LBNL-1989E

ERNEST ORLANDO LAWRENCE
BERKELEY NATIONAL LABORATORY

水泥工业能效对标和节能分析工具－BEST Cement
使用指南

开发单位：

劳伦斯伯克利国家实验室
环境与能源技术部
美国 加州 伯克利

能源研究所
中国 北京

2008 年 7 月

1．方法概述

水泥工业能效对标和节能分析工具（BEST Cement）是一个基于工艺过程的能效评估工具，其设计基于全球水泥工业能够提供的各种能效技术。目前的这一版本是专门为在中国使用而设计的。虽然实际的水泥企业不太可能采用“BEST Cement”基准所包括的所有能效措施，但这一基准给出了一个合理的标准，可以作为各个水泥企业努力的方向。根据水泥企业生产工艺的不同，作为最佳实践基准的参考水泥企业的能耗也不一样。“BEST Cement”对这些变量都进行了考虑，并允许用户根据自己企业的特定运行参数修改模型。“BEST Cement”对图 1 设定边界内的工序进行评估。

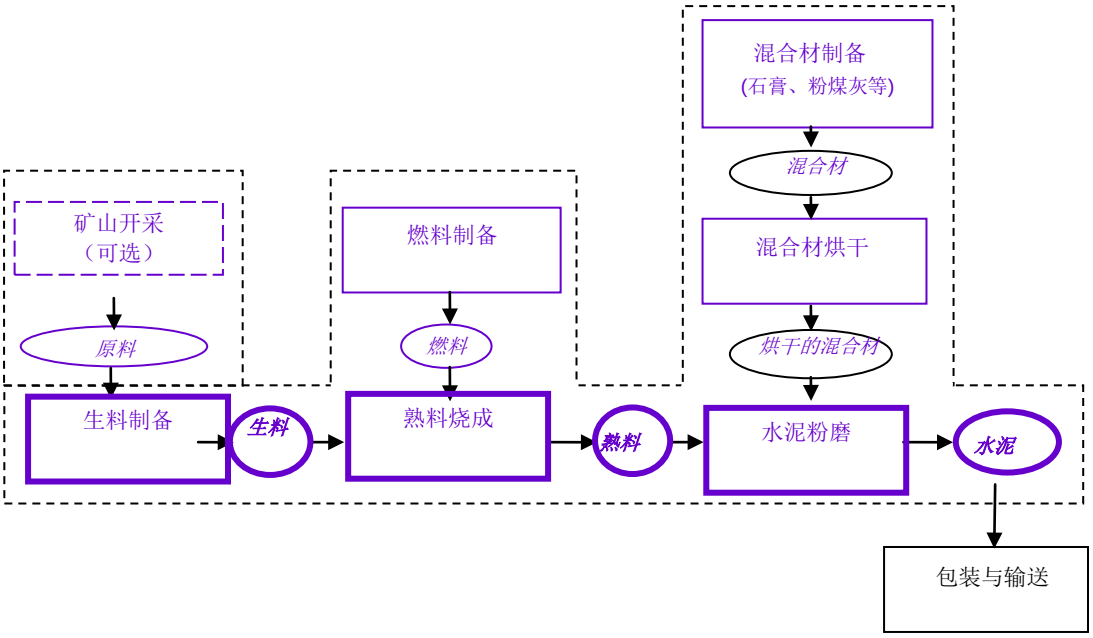


图 1 “BEST Cement”的评估边界

为了建立评估基准，也就是与用户企业相似但能效水平最高的水泥企业，用户首先要在输入信息表格中输入自己企业的一些生产运行参数（要了解如何输入信息，请参考第 6 部分）。根据输入的这些参数，该工具就能建立一个与用户企业相似的基准水泥企业。相对于和一般化的基准企业对标来说，和这样一个根据用户企业的特定参数建立的基准水泥企业进行对标更能反映出用户企业的能效潜力。

需要输入的信息包括：

- 每年消耗的生料吨数（石灰石、石膏、粘土、铁矿石、高炉矿渣、粉煤灰、其他工业矿渣、天然火山灰、石灰石粉、城市垃圾等）；生料的预混合量（预均化和配料）和破碎量（单位：吨/年）；
- 经烘干和粉磨后的混合材量（单位：吨/年）；
- 每台窑的熟料产量（吨/年）及窑型；
- 经粉磨后的原料、煤和熟料的数量（吨/年）及磨机类型；
- 水泥的产量、品种和标号（吨/年）；
- 余热发电量；
- 各种燃料的消耗量以及能源成本（人民币/年）。

该工具为用户提供了快速评估和详细评估两种方式。不同的评估方式要求输入不同详细程度的能耗信息。详细评估需要提供各个生产环节的能耗信息，而快速评估只需要提供企业的整体能耗信息（要了解快速评估和详细评估的更多内容，请参考第 6 部分）。

该能效对标工具提供了两个评估基准－一个是中国最佳，一个是国际最佳。第 2 部分将给出这两个基准的差别，并说明基准是如何计算的。该工具还需要用户输入其希望达到的节能目标。

2．能源建模

a．基于过程的建模

水泥企业的能耗情况可按照以下主要工序建模：

1．矿山开采与原料输送
2．生料制备：
    a．预混合（预均化与配料）
    b．破碎
    c．粉磨
3．混合材制备
4．混合材烘干
5．燃料制备
6．均化
7．窑系统
    a．预热器（如果有）
    b．分解炉（如果有）
    c．窑
    d．熟料冷却机
8．水泥粉磨

在输入各个工序的能耗时，必须把该工序的所有能耗（包括电机、风机、泵和其它设备的能耗）都计算在内（各个工序的具体能耗信息见下文）。

此外，该模型还分别计算其他一些输送设备和辅助设备的能耗，以及非生产性能耗，如照明、办公设备和其他设备的电耗。任何其他地方没有考虑而又包含在图 1 边界范围内的能耗，都应包含在此输入中。

由于生产熟料的能耗要占到水泥生产能耗的 90％左右，所以增加混合材以减少水泥中熟料的比例，能够大大降低水泥生产的总能耗。混合材的最佳添加量是根据欧洲 ENV 197-2 标准确定的：对于复合硅酸盐水泥（CEM II），粉煤灰添加量最高可达 35％，熟料为 65％；而对于高炉矿渣水泥（CEM III/A），高炉矿渣添加量最高可达 65％，只需要 35％的熟料。

b．中国最佳实践值

为了确定中国水泥企业的最佳实践值，中国能源研究所（ERI）和中国水泥协会调查了四家现代化的中国水泥企业，并由这四家水泥企业确定了中国水泥企

业的最佳实践值。这四家水泥企业中有两家是 2000tpd 的，另外两家是 4000tpd 的。

各个生产过程的中国国内最佳实践值是根据这几家水泥企业的情况来确定的。当缺少相关数据时（如非生产性能耗），就以国际最佳实践值代替。

c．国际最佳实践值

各个生产过程的国际最佳实践值是根据公开发表的各种文献资料，以及水泥企业和设备供应商提供的数据确定的。下面来介绍这些数据及其计算过程。

生料和燃料制备

生料制备的能耗包括生料（主要是石灰石）的预混合（预均化和配料）、破碎、粉磨和烘干（如果需要的话）。所有物料在入窑之前都要经过充分的均化。入窑的固体燃料也要先经过破碎、粉磨和烘干。生料制备的最佳实践值计算依据如下：预混合采用带桥式刮板式取料机或斗轮式取料机的纵向预均化堆场，或者带桥式刮板式取料机的环形预均化堆场（电耗 0.5kWh/t生料）[1]；破碎采用转子破碎机（电耗 0.38kWh/t生料）[2]；生料粉磨采用带高效选粉机和四个辊子的立磨系统（电耗 11.45kWh/t生料）[3]；均化采用重力式（多出口筒仓）烘干系统（电耗 0.10kWh/t生料）[4]。综合以上能耗数值，生料制备的最佳总能耗为 12.05kWh/t生料。理论上，该能耗值还应考虑生料水分和石灰石硬度的影响。水分越大则烘干能耗越多，石灰石硬度越高则破碎和粉磨能耗越多。如果原料需要烘干，则最佳的措施是安装一个预热器，虽然它会降低窑的热效率。“BEST Cement”假设烘干湿原料的能耗可以忽略不计，因此没有降低窑系统的热效率。

固体燃料制备的能耗也与燃料的水分有关。“BEST Cement”假设只有煤需要烘干和粉磨，其他物料的烘干和粉磨能耗可忽略不计。烘干煤粉的最佳措施是利用窑系统（如熟料冷却机）的废热做烘干热源[5]。煤粉磨的最佳措施是采用MPS立磨（电耗为 10-36kWh/t无烟煤，6-12kWh/t烟煤，8-19kWh/t褐煤，7-17kWh/t石油焦[6]），或碗磨（电耗为 10-18kWh/t产品[7]）。综合以上能耗数值，燃料制备的最佳总能耗为 10kWh/t产品。

混合材制备

---

[1] Cembureau, 1997. *Best Available Techniques for the Cement Industry*, Brussels: Cembureau.

[2] Portland Cement Association, 2004. *Innovations in Portland Cement Manufacturing*. Skokie, IL: PCA.

[3] Schneider, U., "From ordering to operation of the first quadropol roller mill at the Bosenberg Cement Works," *ZKG International*, No.8, 1999: 460-466.

[4] Portland Cement Association, 2004. *Innovations in Portland Cement Manufacturing*. Skokie, IL: PCA.

[5] Worrell, E. and Galitsky, C., 2004. Energy Efficiency Improvement Opportunities for Cement Making: An ENERGY STAR® Guide for Energy and Plant Managers. Berkeley, CA: Lawrence Berkeley National Laboratory (LBNL-54036).

[6] Kraft, B. and Reichardt, Y., 2005. “Grinding of Solid Fuels Using MPS Vertical Roller Mills,” *ZKG International* 58:11 (pp 36-47).

[7] Portland Cement Association, 2004. *Innovations in Portland Cement Manufacturing*. Skokie, IL: PCA.

除了熟料以外，一些水泥企业还在水泥终产品中添加混合材。该措施在减少熟料生产能耗以及 CO_2 排放量的同时，需要增加混合材的混合与粉磨电耗（如粉煤灰、矿渣和火山灰）以及烘干用的燃料消耗（如高炉矿渣和其他矿渣）。

根据硅酸盐水泥（5％混合材）和其他类型水泥（混合材配比最高达 65％）在混合和粉磨方面的差别，添加混合材会增加额外的电耗。硅酸盐水泥的熟料粉磨电耗一般为 55kWh/t，而粉煤灰水泥（含 25％粉煤灰）的粉磨电耗一般为 60 kWh/t，高炉矿渣水泥（含 65％矿渣）的粉磨电耗一般为 80 kWh/t（这些能耗数值是掺加混合材的一般能耗水平，不是最佳能耗水平；最佳能耗水平可参考下文的水泥粉磨部分）。“BEST Cement”假设只有粉煤灰、高炉矿渣、其它矿渣和天然火山灰需要额外的能耗。综合以上能耗数值可知，粉煤灰需要的额外电耗为 20 kWh/t 粉煤灰，矿渣需要的额外电耗为 38kWh/t 矿渣。天然火山灰的额外电耗假设与粉煤灰相同。这些数据可用于计算水泥粉磨电耗。混合材烘干热耗的最佳水平是 0.75GJ/t（26kgce/t）混合材。一般情况下，只有高炉矿渣和其他矿渣需要烘干。那些需要烘干的混合材（默认情况是所有矿渣，虽然用户可以在生产信息输入表中输入该数据）的最佳烘干热耗为 0.75GJ/t（26kgce/t）混合材。

窑系统

熟料生产过程的能耗可分为驱动机械设备（如风机、窑的驱动装置、冷却机和预热器喂料提升机等）的电耗和烘干物料、煅烧生料的燃料消耗。熟料生产的最佳电耗水平是 22.5 kWh/t熟料 [8]，最佳燃料消耗水平可低至 2.85 GJ/t（97.3kgce/t）熟料 [9]。

水泥粉磨

水泥粉磨的最佳电耗水平取决于水泥的细度或比表面积（cm^2/g）。1997 年，有文献指出用筒辊磨将水泥粉磨到 3200 cm^2/g的电耗为 25 kWh/t水泥，粉磨到 4000 cm^2/g的电耗为 30 kWh/t水泥 [10]。对于中国的水泥，我们做如下假设：标号为 325 的水泥的比表面积小于等于 3200 cm^2/g；标号为 425 的水泥的比表面积约 3500 cm^2/g；标号为 525 的水泥的比表面积约 4000m^2/g；标号为 625 的水泥的比表面积约 4200 cm^2/g。最新的研究认为筒辊磨的能耗范围是 16-19 kWh/t水泥 [11]。我们以用筒辊磨将水泥粉磨到比表面积为 3200 cm^2/g和 4000 cm^2/g的电耗水平作为相应细度的最佳电耗水平，并根据线性分布假设通过内插和外插计算出比表面积为 3500 cm^2/g和 4200 cm^2/g的最佳电耗水平。我们估算得出比表面积为 3200 cm^2/g的水泥最佳粉磨电耗为 16 kWh/t水泥，比表面积为 3500 cm^2/g的水泥的最佳粉磨电耗要比 3200 cm^2/g的水泥高出 8％（17.3 kWh/t水泥），4000 cm^2/g的水泥的最佳粉磨电耗比 3200 cm^2/g的水泥高 20％（19.2 kWh/t水泥），4200 cm^2/g

---

[8] COWIconsult, March Consulting Group and MAIN, 1993. *Energy Technology in the Cement Industrial Sector*, Report prepared for CEC - DG-XVII, Brussels, April.

[9] Park, H. 1998. Strategies for Assessing Energy Conservation Potentials in the Korean Manufacturing Sector. In: *Proceedings 1998 Seoul Conference on Energy Use in Manufacturing: Energy Savings and CO_2 Mitigation Policy Analysis*. 19-20 May, POSCO Center, Seoul, Republic of Korea.

[10] Buzzi, S. 1997. Die Horomill® - Eine Neue Mühle für die Feinzerkleinerung, *ZKG International* 3 50: 127-138.

[11] Hendricks, C.A., Worrell, E., de Jager, D., Blok, K., and Riemer, P., 2004. "Emission Reduction of Greenhouse Gases from the Cement Industry," Proceedings of Greenhouse Gas Control Technologies Conference. http://www.wbcsd.org/web/projects/cement/tf1/prghgt42.pdf

的水泥的最佳粉磨电耗比 3200 cm^2/g的水泥高 24％（19.8 kWh/t水泥）。我们用这些值又估算了其他类型水泥的最佳粉磨电耗，估算过程中考虑了混合材的粉磨电耗。我们假设普通硅酸盐水泥的粉磨能耗与硅酸盐水泥相当，矿渣水泥的矿渣含量平均为 65％，粉煤灰水泥的粉煤灰含量平均为 35％，火山灰的粉磨能耗与矿渣的粉磨能耗相当（掺加量都是 65％），并假设含 5％额外石灰石的石灰石水泥的粉磨能耗与矿渣粉磨能耗相当。

其他生产能耗

一些水泥企业就建在矿山旁，它们一般采用卡车或皮带来运送原料。如果是这样，则矿山开采的能耗约占全厂总能耗的 1％。[12]

其他生产能耗还包括厂区内所有辅助设备和输送设备的动力消耗（我们已经将水泥包装过程的能耗排除在外）。一个水泥企业辅助设备的总能耗约为 10kWh/t熟料。所有输送设备的总能耗约为 1－2kWh/t水泥 [13]。照明、办公设备和其他各种各样的电耗约为全厂总电耗的 1.2％。[14]

3．如何使用该工具

“BEST Cement”使用户可以通过将自己的水泥企业与作为最佳实践基准的参考水泥企业做对比，从而评估自己的水泥企业的能效水平。基准或参考水泥企业是根据现有的已经得到实践验证的技术而建立的。基准水泥企业根据用户水泥企业的相关信息来模拟生产相同产量的同种产品，只是采用更为高效节能的技术。这样就可以得到一个评分，称为能效指数（EII），该指标可以衡量用户水泥企业的能效水平。EII 指标的定义和详细讨论见第 6 部分。

在评估了企业的能效水平之后，用户可以通过选择希望采用的能效措施来评估该能效措施对用户企业能效水平的影响。用户可以选择是否采用某一能效措施（采用，不采用，部分采用），如果是部分采用，用户可以指定实施程度（例如 25％、50％），而后“BEST Cement”会为用户计算总的节能量、投资成本、回收周期以及一个新的 EII 指标值。要想进一步了解如何使用该工具的这一部分，可参考第 6 部分。

4．适用范围

“BEST 水泥”工具适用于所有生产标号为 325，425，525 和 625 水泥的水泥企业（硅酸盐水泥、普通硅酸盐水泥、矿渣水泥、粉煤灰水泥、火山灰水泥以及复合水泥）。

5．计算机性能要求

---

[12] Warshawsky, J. of CMP. 1996. *TechCommentary: Electricity in Cement Production*. EPRI Center for Materials Production, Carnegie Mellon Research Institute, Pittsburgh, PA.

[13] Worrell, E. and Galitsky, C., 2004. *Energy Efficiency Improvement Opportunities for Cement Making: An ENERGY STAR® Guide for Energy and Plant Managers*. Berkeley, CA: Lawrence Berkeley National Laboratory (LBNL-54036).

[14] Warshawsky, J. of CMP. 1996. *TechCommentary: Electricity in Cement Production*. EPRI Center for Materials Production, Carnegie Mellon Research Institute, Pittsburgh, PA.

“BEST Cement”需要在一台安装有 Windows 2000、XP 或 Vista 系统的计算机上运行。运行“BEST Cement”需要 Microsoft .NET Framework 2.0 版本的支持。如果用户计算机没有安装 Microsoft .NET Framework，则用户需要安装 Microsoft .NET Framework 2.0 运行库和其他相关文件。

在输入数据之后，请将“BEST Cement”中已经输入的数据和评估结果以一个新的文件名保存在用户计算机中。

6．工具使用用法

该程序包括大量的工作表。由输入信息表中获取的数据被用来计算。在完成一个工作表之后，通过点击工作表上的相应按钮，用户就可以进入到下一张工作表。接下来，我们将一步一步地完成“BEST Cement”的所有工作表。

快速评估与详细评估

该工具允许用户选用以下两种方式：
（1）详细评估
（2）快速评估

详细评估要求用户输入每个工序的相关生产数据：

1．矿山开采与原料输送
2．生料制备：
    a．预混合（预均化与配料）
    b．破碎
    c．粉磨
3．混合材制备
4．混合材烘干
5．燃料制备
6．均化
7．窑系统
    a．预热器（如果有）
    b．分解炉（如果有）
    c．窑
    d．熟料冷却机
8．水泥粉磨

另外，在输送和其他一些辅助方面也有能耗需求，包括一些非生产性能耗，如照明，办公设备和其他一些电耗。

详细评估远比快速评估详尽得多，但是，快速评估允许仅仅输入设备的总能耗（电耗和燃料消耗）（仍需要各步骤各环节的生产数据）。总的说来，快速评估需要更少的数据但是得到的结果有限。

企业整体评估与单个水泥窑评估

用户可以选择企业整体评估或仅对窑进行评估。如果选择整体评估，需要在第一个工作表内输入所有窑的生产数据。如果进行窑评估，只需输入某条窑的所有生产数据， 即那条窑所需的原料、熟料产量和水泥产量。

点击相应按钮，选择企业整体或窑的详细评估或快速评估，进入第一个输入工作表。

在输入数据页，用户需要输入基本信息以完成用户企业的能效对标过程。用户只须填写黄色的单元格。绿色的单元格有预设的值，但是用户也可以自行修改。其他颜色的单元格（如灰色）通常是通过已输入数据或常数计算得出的，一般不能被修改。

产品输入页 1—原料和熟料

在黄色单元格填入以下信息

原料

1．所用的石灰石总量，输入每年消耗的石灰石数量，单位为吨
2．混合材的量，对于每种混合材，输入每年的消耗量，单位为吨，如果所用的混合材材质不在所列材料范围内，则在“其他混合材 1”和“其他混合材 2”中填入材料名及其数量
3．填入预混合，破碎，烘干以及粉磨的原料量，用户可以使用预设的值，也可以自行输入数据。

熟料产量

4．根据用户企业中使用的水泥窑从下拉菜单中选择窑型。点击单元格以弹出下拉菜单。
5．输入每种窑型对应的熟料产量，填入每年的熟料产量。

产品输入页 2－水泥产量和粉磨量

在黄色单元格填入以下信息：

水泥

6．输入各种水泥的产量。

磨

7．输入生料粉磨，煤粉磨和水泥粉磨等各种粉磨类型的年数量。用户需要输入煤粉磨总量。生料粉磨和水泥粉磨总量根据用户先前输入的数据通过计算得到。

发电输入页

在黄色单元格填入以下信息:

首先，填入整个水泥企业的总购电量。

接着，填入每年的自发电量（千瓦时/年）。输入上网电量（千瓦时/年）。被用于水泥企业或其他用途而未售出的电量计算出结果后显示在灰色单元格。最后，

输入用于发电的能源消耗量。预设值假设所有的发电都来自水泥生产的余热，并用所有发电量的等效热值进行折合。可以使用预设值或输入用户数据。（如果采用其他能源发电，用户需要修正余热的数值）。输入其他用于发电的燃料量。不要输入用于其他用途的燃料。

如果需要，可用能源转换计算器转换物理单位（如吨，千克）为能量单位（kgce）。

能源消耗（详细评估）

对各个工序，输入耗电量和各种燃料消耗量。这个数据包括各工序使用的总电量，例如水泥粉磨就包括电机，风机和其他粉磨所需的设备。省略部分设备的能耗将会导致总能耗和成本计算不准确。

能源消耗（快速评估）

输入整个水泥企业的总能耗（按燃料类型）（电耗已在上页输入）。在本页的右下方的菜单中选择是或否以回答矿山是否在现场开采。

所有的灰色单元格内的数值均通过计算得到，无需输入。

能源账单

输入水泥企业每年消耗的用于水泥生产的各种燃料和电力的成本。在绿色单元格内，可使用预设值也可输入用户数据。如果用户只知道某年的燃料价格和购买量而不是每年的总成本可通过本工具提供的计算器进行计算。

在该页的右侧选择用户水泥企业的节能目标。这个目标可以是百分比（如 20%）也可以是个具体的数（如 100，000 吨标准煤/年）。如果用户选择的是百分比数，则绿色单元格计算相应的实际数值并显示。

对标数据汇总

该汇总页给出了水泥企业能效对标的详细信息（包括国际和国内对标）。如果进行详细评估，基准水泥企业和用户水泥企业各工序的数据将一一列出作对比。如果是快速评估则仅给出基准水泥企业各工序的数据，以及基准水泥企业和用户水泥企业总能耗的对应数据。国际和国内的最佳实践值和采用的技术以及数据来源都列在本页。用户可通过按相应按钮转换到下页。按参考按钮将会显示所有对标数据来源以及采用的能效措施。

国际对标结果

在本页，第一幅图显示了对标水泥企业目前的能耗（终端能耗），能耗目标值（目前值减去目标设定页输入的目标值）以及国际（或国内的，在下页）最佳能耗值。比较这三个值可以得出用户水泥企业实际能耗与能耗目标值以及国际最佳水平之间的差距。

在下一幅图中显示了用户水泥企业与国际最佳水平对比的结果。基于用户企业的能源强度和基准企业能源强度计算出能效指数。该指数作为度量用户水泥企业综合生产能源强度的标准，能效指数用下式进行计算。

$$EII = 100 * \frac{\sum_{i=1}^{n} P_i * EI_i}{\sum_{i=1}^{n} P_i * EI_{i,BP}} = 100 * \frac{E_{tot}}{\sum_{i=1}^{n} P_i * EI_{i,BP}}$$

其中

EII = 能效指数
n = 合计的产品数量
EI_i = 产品i的实际能源强度
$EI_{i,BP}$ = 产品i的最佳能源强度
P_i = 产品i的产量.
E_{tot} = 所有产品的实际总能耗

通过被评估水泥企业实际能源强度与各工序采用“对标基准”所列最好技术后的能源强度的比对，EII 可以被用来评估用户的能效潜力。详细评估时，计算出各关键工序的用户实际能效指数(吨水泥产量的能耗)与参考或基准指数的差，然后累加得到整个水泥企业的结果。快速评估时只比较累加的总能效指数。

能效指数表示用户水泥企业实际的能耗水平与基准或参考水泥企业的能耗水平的对比结果。根据定义，基准或参考水泥企业的能效指数为 100。而实际水泥企业的能效指数大于 100。用户企业实际的能耗水平与基准或参考企业的能耗水平的差距可以看作是用户水泥企业在能效提升方面的潜力。

该页的底部可以选择查看基于一次能源消耗（对电能进行折合时考虑传输和发电损耗以及热值折合系数）或终端能耗（对电能进行折合时仅考虑热值折合系数）计算得到的 EII。

假定用户企业能达到基准或参考水泥企业的能效水平，BEST 提供年节能（电能和燃料）潜力和能源成本节约潜力评估。在本页，所有的参考基准都是国际最佳实践值。下页则为国内最佳实践值。

所有的能耗指标都是综合能耗。综合电耗指生产每吨水泥所需的总电能。它只包含由于使用的生料和生产的水泥种类之间的调整，而不包含由于海拔高度，温度和气候等因素引起的调整。类似的，综合煤耗指基于不同的生料每生产一吨熟料消耗的燃料，而不包括海拔，温度和气候等因素的影响。

国内对标结果

类似于国际对标结果，本页的能效指数也是对比用户水泥企业实际能耗水平和国内最佳水平的能耗水平。假定用户水泥企业能达到国内基准能效水平，BEST 提供每年节能（电能和燃料）潜力和能源成本节约潜力的评估。所有的能耗指标都是综合能耗。在本页的底部用户可以选择能效指数显示结果的形式，可以是基于

一次能源消耗（对电能进行折合时考虑传输和发电损耗以及热值折合系数）或终端能耗（对电能进行折合时仅考虑热值折合系数）。

按工序对标（仅在详细评估时有）

该页显示了国际和国内的最佳实践中各工序的能效指数。同样的，您可以通过相应的按钮选择显示基于一次能耗（对电力进行折合时考虑传输和发电损耗以及热值折合系数）或终端能耗（对电力进行折合时仅考虑热值折合系数）的对标结果。下页分为3栏：第1栏用饼图显示用户企业的电耗和燃料消耗在总一次能源消耗，总终端能耗以及总能源成本中所占比例；第2栏用饼图显示各工序在总一次能源消耗，总终端能耗和总能源成本中所占比例；第3栏显示各工序在总一次能源消耗，总终端能耗和总能源成本中所占比例的具体数值。

这里，使用者可以继续选择对标工具中能效措施部分，生成一个结果报表，返回上一结果页面或是保存并退出。

能效效率措施页面

一旦计算出能效指数，BEST 就可以通过菜单选择能效措施，初步评估能效提升的潜力。能效措施分为 6 个页面，包含以下 6 个方面：

1．生料制备
2．燃料制备
3．窑
4．水泥磨
5．改变成品和原料
6. 公用设施系统

用户可自行选择评估各项能效措施的工作表。当用户选择完能源效率措施后，应选择自评估结果页面查看最终结果。

每张能效措施工作表都有一个关于各项能效措施的列表。双击写有措施名字的单元格（在第1列），即可找到关于各能效措施的详细说明。每一工作表也提供能源节约，投资成本和回收期等相关信息。用户需要从每项措施的下拉菜单中，选择是否要在被评估企业中实施这项措施。共有三个选项：“是，完全实施”；“是，部分实施”；或“否”。如果选择“是，部分实施”，需要在下一列中输入应用的百分比。

能源节约和投资成本的评估是基于水泥和其他行业的以往经验。但是，被评估水泥企业的设备的实际能效水平和特别的参数也许会超出 BEST 水泥工具的能力范围并改变最终结果。因此，“BEST Cement”只是对被评估水泥企业的能效项目给出一个初步的评估，更详细确切的评估应该咨询专业的工程师或承包商。

每一张能效措施工作表既可以合计此张工作表上单向措施的节能效果，又可以将所有其他已经评估过的节能措施效果进行合计，并给出总的运行成本和节能估

计，同时给出所选能效措施的平均回收周期。这个信息会转到最后的“自评估结果”工作表（见下）。

针对各个工序选择了能效措施以后，点击“OK”按钮，即回到能效措施选择工作表，该工作表列出各个生产工序（有能效措施的工序）及自评估结果。选择“自评估结果”中任意一个按钮查看结果或选择“返回前页/退出”按钮退出。

自评估结果

自评估结果工作表提供了对能效提高潜力的自我评估结果。

第一幅柱状图显示了被评估企业的能耗量，设定目标，所选能效措施实施后的预计能耗，以及国际和国内的能耗最佳实践值。比较这些柱状图，可以分别显示出被评估企业在实施所选能效措施之前、之后与所选目标以及和最佳实践值之间的差距。

第二幅柱状图显示了被评估企业现在的实际EII，以及当实施选定的节能措施后，EII会为多少。国际和国内对标EII数据都会提供。按工作表底部的按钮，就会显示出基于一次能耗的计算结果（电量转换包括输送和发电损耗以及热量换算系数）或者基于终端能耗的计算结果（电量转换只包括热量换算系数）。

这张工作表还报告了一次能源的节省潜力和用户所选措施可以节省的能源量（千克标准煤/年），成本降低的潜力和用户所选措施可以节省的成本（人民币/年），以及减排潜力和用户所选措施可以降低的排放量（吨二氧化碳/年）。减排量是基于终端能源消耗计算得到。

汇总数据

这张工作表包括被评估水泥企业，基准（参考）水泥企业和用户所选能效措施的能源数据，财务数据和减少排放的相关数据。

点击“OK”按钮将回到“能效措施选择”工作表，用户可以在此重新评估能效措施或者保存结果并退出。

参考目录

参考目录页列出了 BEST 所用到的参考文献

7. 能效措施

下面是一些可以提高能效的措施，并不是所有的措施都会用到。

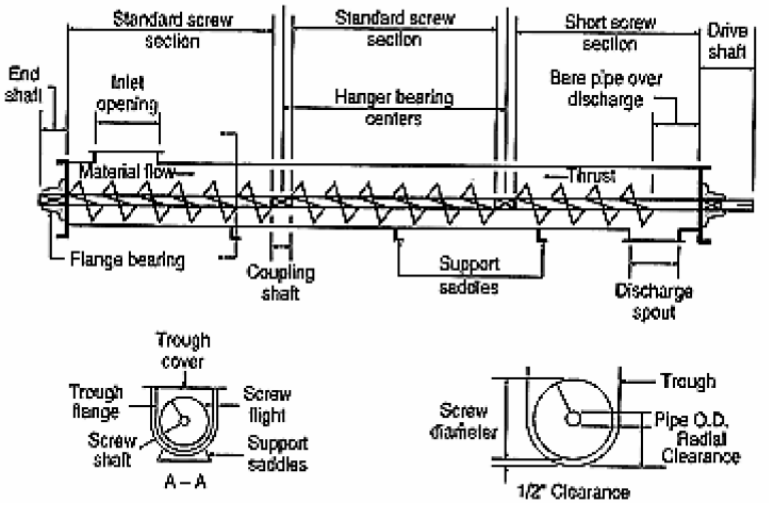
生料制备（干法）的高效输送系统

描述：水泥厂利用输送系统来输运粉状物料，如入窑生料、窑灰和水泥终产品等。输送系统有气力输送系统和机械输送系统两种。机械输送的能耗要低于气力输送。此外，采用机械输送还可以增加可靠性，减少停产时间，因而是一种更加节约成本的方式。

能源/环境/成本/其他收益：

- 改造成机械输送系统，每吨生料可节电 2kWh[1]。
- 机械输送系统的安装成本大约为每吨生料产品 3 美元。

结构图或照片：



螺旋输送机的基本配置。来源于《波特兰水泥生产中的更新改造》，Bhatty, J. I., F. M. Miller 和 S. H. Kosmatka 编，波特兰水泥协会，2004。

案例研究：

- 印度Chittorgarh 公司的Birla 水泥厂，将给窑填料的气动运输系统改进为机械运输系统，每吨熟料节约了 1.24 千瓦时电量，其成本为 15.3 卢比/吨熟料（即 2.64 元/吨熟料）[2].
- 印度 Chittorgarh 公司的 Chittor 水泥厂，在两个筒仓的均化中（为两个窑填料），用机械运输系统取代了气动运输系统，实现了每吨熟料节约 2.35 千瓦时电量，其成本是 10 卢比/吨熟料（即 1.7 元/吨熟料）[2].

---

[1] Holderbank Consulting,1993. Present and Future Energy Use of Energy in the Cement and Concrete Industries in Canada, CANMET, Ottawa, Ontario, Canada.

[2] The United Nations Framework Convention on Climate Change (2008) CDM project documents available at: http://cdm.unfccc.int/Projects/DB/SGS-UKL1175340468.27/view

生料均化系统（干法）

描述：为了生产出优质的产品并且保持窑内最佳的燃烧状态，生料必须经充分均化。质量控制要从矿山开始，并持续到均化库。生料均化控制的在线分析是质量控制系统的重要组成部分 [1,2]。

大多数水泥厂使用压缩空气在一个空气流化均化库内对粉末物料进行混合。老式干法水泥厂采用机械均化系统，该系统同时从 6 到 8 个不同的储仓按照不同的速率将物料卸出 [1]。新型干法水泥厂采用重力式均化库（或连续式混合和储存库）以减少能量消耗。在这些库中，物料从很多卸料点卸落，并在一个倒置的锥体内混合。重力式均化库的均化效率不如空气流化均化库好。虽然大多数老式的水泥厂采用机械式或空气流化床系统，但越来越多的新型水泥厂倾向于采用重力式均化库，因为这种均化库的能耗大为降低了 [2]。

能源/环境/成本/其他收益：

- 采用压缩空气在一个空气流化均化库内对粉末物料进行混合的电耗为 1.1－1.5k Wh/t生料。老式干法水泥厂采用机械式均化系统的电耗为 2.2－2.6 kWh/t生料。新型干法水泥厂采用重力式均化库（或连续式混合和储存库）以减少能量消耗：可节省电耗 1.0－2.5 kWh/t生料 [1, 2, 3,4,5.]。
- 在进行均化库改造的时候，如果能把均化库用空气输送斜槽分割成多个可逐一依次搅拌的隔室，而不是做成一个整体形式的新均化库系统，则成本是很低的。
- 假设年产量 150000 吨的均化库的总造价为 550000 美元，那么均化库改造的成本为 3.7 美元/吨生料。

---

[1] Fujimoto, S., 1993. “Modern Technology Impact on Power Usage in Cement Plants,” *Proc. 35th IEEE Cement Industry Technical Conference*, Toronto, Ontario, Canada, May 1993.

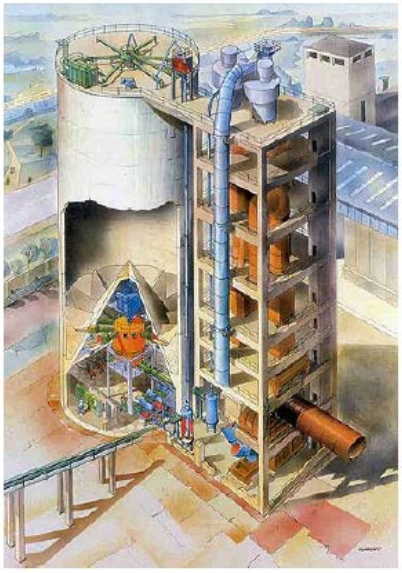
[2] Holderbank Consulting, 1993. *Present and Future Energy Use of Energy in the Cement and Concrete Industries in Canada*, CANMET, Ottawa, Ontario, Canada.

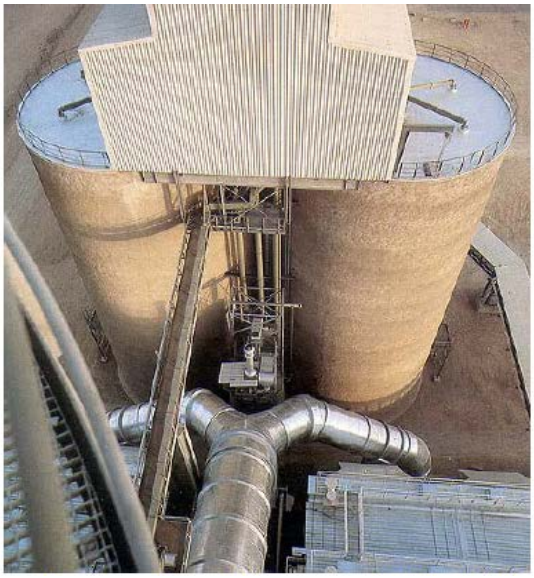
[3] Alsop, P.A. and J.W. Post. 1995. *The Cement Plant Operations Handbook*, (First edition), Tradeship Publications Ltd., Dorking, UK.

[4] Cembureau, 1997. *Best Available Techniques for the Cement Industry*, Brussels: Cembureau.

[5] Gerbec, R., 1999. Fuller Company. Personal Communication.

结构图或照片：





图片来源于 Ibau，德国汉堡：http://www.ibauhamburg.de/raw_meal_silos_01.htm

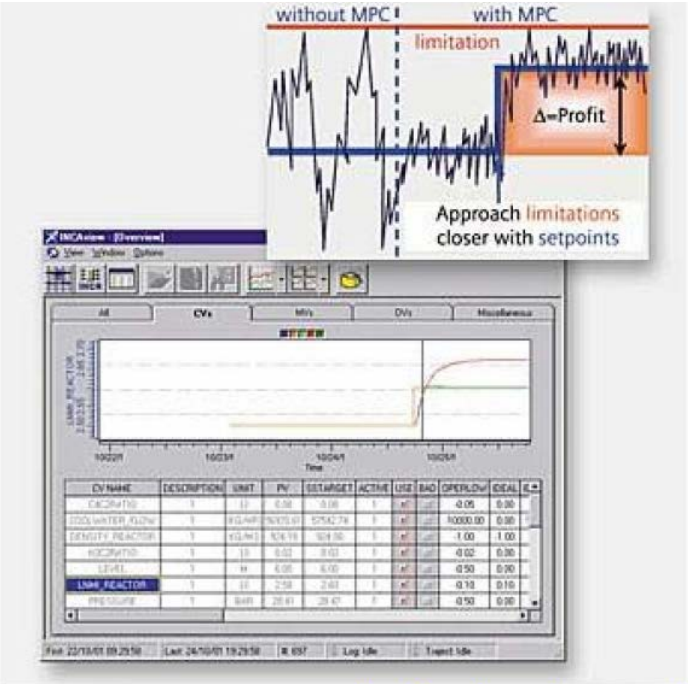
生料立磨的过程控制（干法）

描述：现有立磨的一项主要技术缺点是振动跳闸。当产量很高时，手动式的振动控制变得十分困难。当生料磨跳闸时，必须在一小时后待其电机得到冷却后才能重新开启。一个模型预测多变量控制器能够在增大总的喂料量的同时保持一个目标残差，并且为跳闸触动振幅强设一个安全范围。第一个实际应用消除了可避免的振动跳闸情况（在未采用该控制工程时每月平均跳闸 12 次）。

能源/环境/成本/其他收益：

- 在产量提高 6%的同时 [1]，能耗降低 6%[7] 或 0.8－1.0kWh/t生料 [2]。

结构图或照片：



图片来源于西门子:
http://www2.sea.siemens.com/Products/Process-Automation/Performance/PerformanceAdvancedProcessControl_mvpc.htm

[1] Martin, G. and S. McGarel, 2001. “Automated Solution,” *International Cement Review*, February 2001, pp.66-67.

[2] Cembureau, 1997. *Best Available Techniques for the Cement Industry*, Brussels: Cembureau.

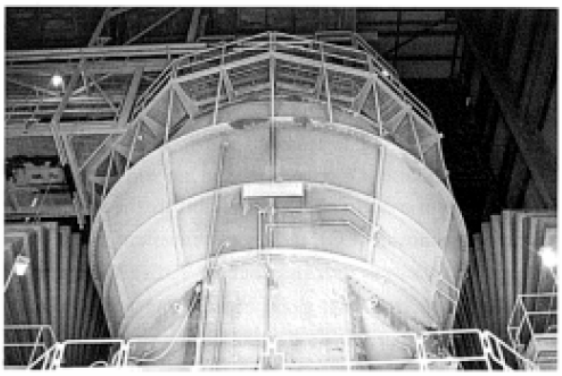
立磨的使用（干法）

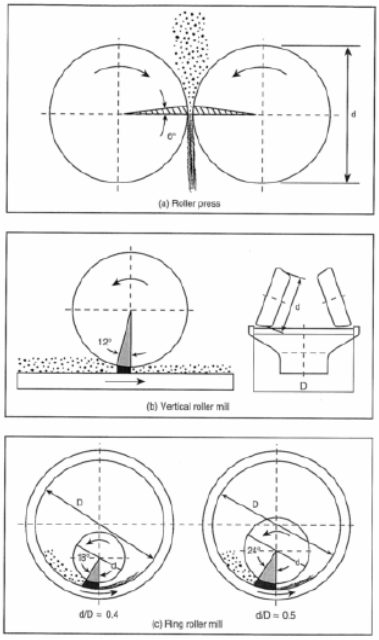
描述：用于原料（主要是硬质石灰石）粉磨的传统球磨可用高效的立磨、球磨和辊压机，或水平辊磨来取代。采用这些先进的磨机能够在保证产品质量的情况下节省能源。现在市场上有多种立磨系统。

能源/环境/成本/其他收益：

- 安装立式或水平辊磨可实现节能 6－7kWh/t生料 [1]。
- 立磨的另外一个优势是它在物料的粉磨过程中可以利用从窑内和冷却机排放出的大量低品质废热同时对生料进行烘干 [2]。
- 立磨的投资估计在 5.5 美元/吨生料 [3]。

结构图或照片：





(a) (b)

(a) 立磨 (b) 三个基于磨运动轨迹的通信系统，来源于《波特兰水泥生产中的更新改造》，Bhatty, J. I., F. M. Miller和 S. H. Kosmatka编，波特兰水泥协会，2004。

案例研究：

- 亚利桑那波特兰水泥厂在 1998 年安装了一台生料立磨，增加了产量和适应性，提高了生料的细度并减少了电耗。[4]
- 河南省新乡水泥公司在其水泥生产线上安装了一台 80 吨/小时的生料立磨。其电耗为 15.4kWh/吨。[5]

---

[1] Cembureau, 1997. *Best Available Techniques for the Cement Industry*, Brussels: Cembureau.
[2] Venkateswaran, S.R. and H.E. Lowitt. 1988. *The U.S. Cement Industry, An Energy Perspective*, U.S. Department of Energy, Washington D.C., USA.
[3] Holderbank Consulting, 1993. *Present and Future Energy Use of Energy in the Cement and Concrete Industries in Canada*, CANMET, Ottawa, Ontario, Canada.
[4] De Hayes, L.J., 1999. "Flexibility, Availability and Maintenance Concept for the Quadropol", Polysius Teilt Mit No. 208, pp.33-38, Krupp Polysius, Germany.
[5] Presentation by Allbest Creative Development Ltd. Information available at: http://www.cement-hightech.com/files/allbest-cement.pdf

高效选粉机（干法）

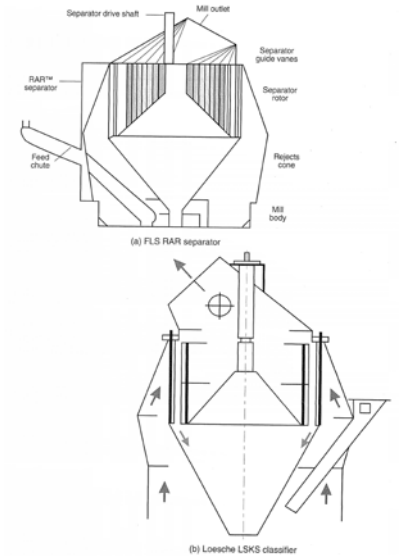
描述：近期粉磨技术的一项进展是高效选粉机的采用。选粉机将细颗粒从粗颗粒中分离出来。粗颗粒再循环进入磨中。高效选粉机在生料磨和水泥终粉磨中都可以使用。

标准的选粉机的分离效率很低，导致细颗粒再次进入磨中过粉磨，从而增加了额外的能耗。现在已经开发出各种概念的高效选粉机[1,2]。在高效选粉机中，物料停留时间更长，分离效率更高，减少了过粉磨。

能源/环境/成本/其他收益：

- 采用高效选粉机估计可实现节电 8%[1]。
- 案例研究表明，采用高效选粉机可减少电耗 2.8－3.7kWh/t 生料[2,3]。
- 用高效选粉机替代普通选粉机可以使磨机提产 15%[1]。此外，由于高效选粉机选出的生料或者水泥粒径均匀[3]，产品质量有所提高。
- 更优的生料颗粒级配不仅有利于窑内煅烧过程燃料的节省，并且还能改善熟料质量。
- 投资成本大约是 2.2 美元/（年•吨生料产品）[1]。

结构图或照片：



立磨中的高效选粉机，来源于《波特兰水泥生产中的更新改造》，Bhatty, J. I., F. M. Miller和 S. H. Kosmatka编，波特兰水泥协会，2004。

案例研究：

- 1990 年提尔堡水泥厂为一台立磨配置了高效选粉机，不仅提高了产量，而且降低了电耗[3]。

---

[1] Holderbank Consulting, 1993. *Present and Future Energy Use of Energy in the Cement and Concrete Industries in Canada*, CANMET, Ottawa, Ontario, Canada.

[2] Süssegger, A., 1993. Separator-Report '92 Proc. KHD Symposium '92, Volume 1 *Modern Roller Press Technology*, KHD Humboldt Wedag, Cologne, Germany.

[3] Salzborn, D. and A. Chin-Fatt, 1993. “Operational Results of a Vertical Roller Mill Modified with a High Efficiency Classifier” *Proc. 35th IEEE Cement Industry Technical Conference*, Toronto, Ontario, Canada, May 1993.

料浆混合与均化（湿法）

描述：在湿法过程中，料浆是按批次进行混合和均化的。利用压缩空气和旋转搅拌器进行混合。由于效率很低，采用压缩空气的方法使得能耗很高。提高能量利用效率的主要措施是采用压缩空气系统。

能源/环境/成本/其他收益：

- 一个高效运转的混合系统耗电 0.3－0.5kWh/t生料 [1]。

结构图或照片：

料浆储存和混合罐，图片来源于维基百科, http://en.wikipedia.org/wiki/Rawmill

[1] Cembureau, 1997. *Best Available Techniques for the Cement Industry*, Brussels: Cembureau.

带闭流选粉机的水洗磨（湿法）

描述：在大多数湿法窑中，管磨往往与闭流或开流选粉机联合使用。

能源/环境/成本/其他收益：

- 一个高效的管磨系统的电耗为 13 kWh/t[1]。如果用水洗磨替代它，则在相同的投资成本和运行成本的情况下，电耗可降低至 5－7kWh/t[1]。
- 如果要替代管磨，水洗磨是一个很好的选择，可将生料粉磨的电耗减少 5－7kWh/t 或者 40％－60％。

结构图或照片：

管磨机，来源于 http://www.xzhdjx.com/english/showinfo.asp?id= 12，徐州华东机械厂。

[1] Cembureau, 1997. *Best Available Techniques for the Cement Industry*, Brussels: Cembureau.

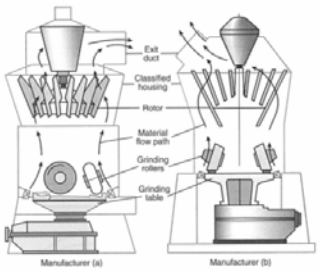
燃料制备立磨

描述：在中国，煤是水泥工业最常用的燃料，也是大量水泥窑的主要燃料。燃料制备一般都是在生产现场进行。煤粉制备过程一般包括破碎、粉磨、烘干等。在煤的运输过程中，一般要先将煤打湿，以免形成粉尘和着火燃烧。向煤磨供热气可将煤的粉磨和烘干结合起来。煤粉立磨的产能有 5.5－220t/h的不同规格。全球各地现在都采用立磨磨煤，如巴西、加拿大、中国、丹麦、德国、日本和泰国等。立式辊磨已在煤的粉磨方面获得广泛发展，在全球被超过 100 家水泥厂所采用 [1]。

能源/环境/成本/其他收益：

- 一个冲击式磨的能耗为 45－60kWh/t，而管磨的能耗大约为 25－26kWh/t。[1] 如果需要，窑系统的废热可用来烘干煤粉。
- 立磨的优点包括：它能处理的煤块尺寸更大（不需要预破碎），它能适应更高的煤粉湿度和更大的产量变化要求。但是，对于更易磨蚀的煤种，管磨是更好的选择。
- 立磨的电耗大约是 16－18kWh/t煤 [1]。碗辊磨的电耗是 10－18kWh/t煤 [2]，球磨的电耗是 30－50kWh/t煤 [1]。
- 立磨的投资成本一般要高于管磨或冲击磨，但其运行成本则相对较低，比管磨低 20％左右，比冲击磨低 50％左右 [1]，大约可节电 7－10kWh/t 煤。

结构图或照片：



装有传统选粉机的辊磨机，来源于《波特兰水泥生产中的更新改造》，Bhatty, J. I., F. M. Miller和 S. H. Kosmatka编，波特兰水泥协会，2004。

案例研究：

- 理海波特兰水泥公司于 1999 年安装了一台煤粉立磨。
- 蓝圈水泥为其在美国阿拉巴马州的罗伯塔水泥厂新建的五号线定购了一台立磨。该立磨的产能为 41.3 吨/小时，并于 2001 年从初开始投入生产。

卖方联系信息：

所有主要的水泥技术服务商都提供煤粉立磨。

---

[1] Cembureau, 1997. Best Available Techniques for the Cement Industry, Brussels: Cembureau.
[2] Bhatty, J. I., F. M. Miller and S. H. Kosmatka (eds.) 2004. Innovations in Portland Cement Manufacturing. Portland Cement Association.

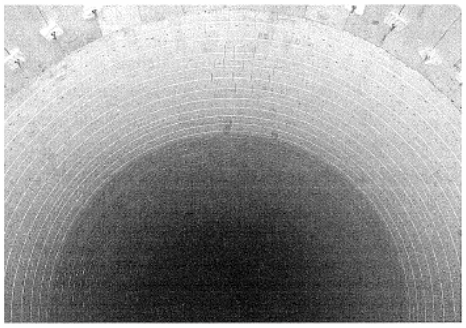
回转窑内优化配置的耐火材料

描述：水泥回转窑（尤其是烧成带）的筒体散热量十分巨大。采用更好的隔热耐火材料（如Lytherm隔热板）能够减少热损失[1]。耐火材料的选择要根据火砖的隔热性能和窑皮形成和能否维持等因此来决定。窑皮能够减少热损失并保护烧成带的火砖。耐火材料能保护窑的钢筒体不受热、化学和机械应力的破坏。耐火材料的选择还依赖于生料、燃料和操作工况[2]。

能源/环境/成本/其他收益：

- 延长高品质耐火材料的使用寿命将使运行期更长，减少停窑换砖期间的产量损失，因而抵消了高品质耐火材料更高的成本[3]。
- 采用改进的窑用耐火材料还能改善窑的可靠性，减少停工期，大幅度减少生产成本并减少窑重新点火过程的能量消耗。
- 估算结果认为，发展耐高温隔热衬里作为窑用耐火材料能够使燃料消耗减少 0.12－0.4GJ/t（4.1－13kgce/t）熟料[4]。
- 隔热系统的成本大约是 0.25 美元/（年•吨熟料）[5]。
- 结构方面的考虑可能会限制新型隔热材料的使用。

结构图或照片：



有耐火材料的回转窑，Miller和 S. H. Kosmatka编，波特兰水泥协会，2004。

案例研究：

- 中国南方的一个立窑采用了一种新型节能内衬。其燃料消耗由 930－950kcal/kg熟料（133－136kgce/t熟料）降至 800－820kcal/kg熟料（116－119kgce/t熟料），节省了大约 14％[6]。其产量也增加了 1 吨/小时。
- 中国北方的一家立窑水泥厂采用了一种新型节能衬里。其燃料消耗由 900－

---

[1] Venkateswaran, S.R. and H.E. Lowitt. 1988. The U.S. Cement Industry, An Energy Perspective, U.S. Department of Energy, Washington D.C., USA.

[2] Cui, Y., 2006. Personal communication with Prof. Cui Yuansheng, VP of the Institute of Technical Information for Building Materials Industry of China (ITIBMIC).

[3] Schmidt, H-J. 1998. Chrome Free Basic Bricks – A Determining Factor in Cement Production Proc.1998 IEEE-IAS/PCA Cement Industry Technical Conference: 155-167; Van Oss, H. 2002. Personal Communication. U.S. Geological Survey, March – May, 2002.

[4] Lowes, T.M. and Bezant, K.W. 1990. Energy Management in the UK Cement Industry Energy Efficiency in the Cement Industry (Ed. J. Sirchis), London, England: Elsevier Applied Science.; COWIconsult, March Consulting Group and MAIN. 1993. Energy Technology in the Cement Industrial Sector, Report prepared for CEC - DG-XVII, Brussels, April 1992.; Venkateswaran, S.R. and H.E. Lowitt. 1988. The U.S. Cement Industry, An Energy Perspective, U.S. Department of Energy, Washington D.C., USA.

[5] Lesnikoff, G. 1999. Hanson Cement, Cupertino, CA, personal communication.

[6] Institute of Technical Information for Building Materials Industry (ITIBMIC). 2004. Final Report on Cement Survey. Prepared for the United Nations Industrial Development Organization (UNIDO) for the Contract Entitled Cement Sub-sector Survey for the Project Energy Conservation and GHG Emissions Reduction in Chinese TVEs-Phase II. Contract no. 03/032/ML, P.O. No. 16000393, September 9.

920kcal/kg熟料（130kgce/t熟料）降至 800kcal/kg熟料（116kgce/t熟料）[7]。其窑的产量也有所增加。

- 江苏镇江的长江水泥厂在其立窑上采用节能窑用衬里，实现节能 0.46－0.63GJ/t熟料（16－22 kgce/t熟料）[8]。此外，还能实现增产。

[7] Institute of Technical Information for Building Materials Industry (ITIBMIC). 2004. Final Report on Cement Survey. Prepared for the United Nations Industrial Development Organization (UNIDO) for the Contract Entitled Cement Sub-sector Survey for the Project Energy Conservation and GHG Emissions Reduction in Chinese TVEs-Phase II. Contract no. 03/032/ML, P.O. No. 16000393, September 9.

[8] Institute of Technical Information for Building Materials Industry (ITIBMIC). 2004. Final Report on Cement Survey. Prepared for the United Nations Industrial Development Organization (UNIDO) for the Contract Entitled Cement Sub-sector Survey for the Project Energy Conservation and GHG Emissions Reduction in Chinese TVEs-Phase II. Contract no. 03/032/ML, P.O. No. 16000393, September 9.

水泥窑熟料煅烧的能量管理和过程控制

描述：非理想的过程状态或过程管理会造成水泥窑的热量损失。计算机自动化控制系统的使用有助于优化燃烧的过程和状态。改进的过程控制还能够改善产品的质量和易磨性，如熟料的活性和硬度，从而使熟料的粉磨更加高效。均匀的喂料使窑的操作更加稳定，从而最终达到节省燃料。全球的各个水泥厂使用着由不同的制造商提供的产品。大多数现代生产系统采用所谓的“模糊逻辑”或专家控制系统，或者规则控制策略。如果要成功实现自动控制，水泥厂必须把从矿山管理到生料入窑到燃料入窑等过程完全连接在一起进行自动化控制，以达到稳定生产，任何过程都不能采用人工操作。[1]

专家控制系统不采用模型过程控制过程状态，而是试图利用从过程的各个阶段获取的信息来模拟最好的操作师。蓝圈公司和SIRA在英国开发了叫做ABB LINKman的专家控制系统[2]。LINKman系统已经成功用于回转窑（干法和湿法）。另外一些公司，如F.L.Smidth（丹麦）、Krupp Polysius（德国）、Mitsui Mining（日本）等，开发了“模糊逻辑”控制系统。专家系统或模糊逻辑系统的一个替代者是利用窑内动态模型参数进行控制的模型预测控制系统。其他的过程控制系统包括采用允许操作者即时地确定所处理生料的化学组成，因而允许迅速对混合中的生料做出调整的在线分析系统。中国的好几家公司，如ABB或中国软件公司Yun Tian，针对能源管理和过程控制提供了优化的信息技术[3]。

在全球的水泥厂，由不同制造商提供的各种系统都在被广泛使用着。自从 1985 的初次应用之后，现代控制系统得到了广泛的应用，并在欧洲的许多水泥厂随处可见。大多数测量技术都由几家国家大公司所开发，如西门子和ABB，只有少数为国内公司开发[4]。

能源/环境/成本/其他收益：

- 过程控制系统可实现节能 2.5％－10％[5]，典型的节能范围是 2.5％－5％。
- 这里提到的所有控制系统声称可实现节能 3％－8％，同时还能提高窑的产量。例如，Krupp Polysius 称其开发的控制系统一般可节能 2.5－5％，可实现提产且能将耐火材料的寿命延长 25－100％。
- 先进过程控制系统的经济性是很好的，其成本回收期可短至 3 个月[6]。
- 窑控制系统典型的回收期是 2 年或稍短，然而通常可以实现更短的回收期。[7]

---

[1] Institute of Technical Information for Building Materials Industry (ITIBMIC). 2004. Final Report on Cement Survey. Prepared for the United Nations Industrial Development Organization (UNIDO) for the Contract Entitled Cement Sub-sector Survey for the Project Energy Conservation and GHG Emissions Reduction in Chinese TVEs-Phase II. Contract no. 03/032/ML, P.O. No. 16000393, September 9.

[2] Energy Technology Support Unit (ETSU). 1988. High Level Control of a Cement Kiln, Energy Efficiency Demonstration Scheme, Expanded Project Profile 185, Harwell, United Kingdom.

[3] Wang, Yanjia of Tsinghua University, Beijing, China. 2006b. Personal written communication.

[4] Cui, Y., 2004 and 2006. Personal communication with Prof. Cui Yuansheng, VP of the Institute of Technical Information for Building Materials Industry of China (ITIBMIC).

[5] Energy Technology Support Unit (ETSU). 1988. High Level Control of a Cement Kiln, Energy Efficiency Demonstration Scheme, Expanded Project Profile 185, Harwell, United Kingdom; Haspel, D., and W. Henderson. 1993. A New Generation of Process Optimisation Systems, International Cement Review, June: 71-73; Ruby, C.W. 1997. A New Approach to Expert Kiln Control. Proc.1997 IEEE/PCA Cement Industry Technical Conference XXXIX Conference Record, Institute of Electrical and Electronics Engineers: New Jersey.

[6] Energy Technology Support Unit (ETSU). 1988. High Level Control of a Cement Kiln, Energy Efficiency Demonstration Scheme, Expanded Project Profile 185, Harwell, United Kingdom.

[7] Energy Technology Support Unit (ETSU). 1988. High Level Control of a Cement Kiln, Energy Efficiency Demonstration Scheme, Expanded Project Profile 185, Harwell, United Kingdom. Martin, G. and S. McGarel. 2001a. Automation Using Model Predictive Control in the Cement Industry.

- 熟料冷却机的过程控制能提高热回收率和产量，改善对游离钙的控制，并且减少NOx排放[8]。安装一套Process Perfecter（Pavilion 技术公司）使冷却机产能提高 10％，游离钙降低 30％，能耗减少 5％，并使NOx排放降低 20％[9]。该系统的安装成本是 0.35 美元/（年•吨熟料），成本回收周期约为 1 年[10]。
- 立窑的燃烧控制远比回转窑的燃烧控制要困难得多，因为回转窑的物料运动是由绕与水平方向呈一个微小角的轴所做的机械旋转控制的，而不像立窑那样纯粹由重力所控制[11]。对于立窑，为了提高能效和产品质量，人员的操作能力和接受的培训显得更加重要。
- 送风口也存在控制技术的问题。（要了解更多关于窑燃烧系统改进的信息以及对 VSK 的控制，参考立窑熟料生产中“窑燃烧系统的改进”部分）
- 改善生料和燃料混合的措施包括：仔细分析两者的物化特性，自动化其计量过程、混合过程和窑的操作（优化空气流动、温度分布、喂料和卸料速度）。

Pavillion Technologies, Inc., Austin, TX (based on a paper published in International Cement Review, February: 66-67). Available at: http://www.pavtech.com/

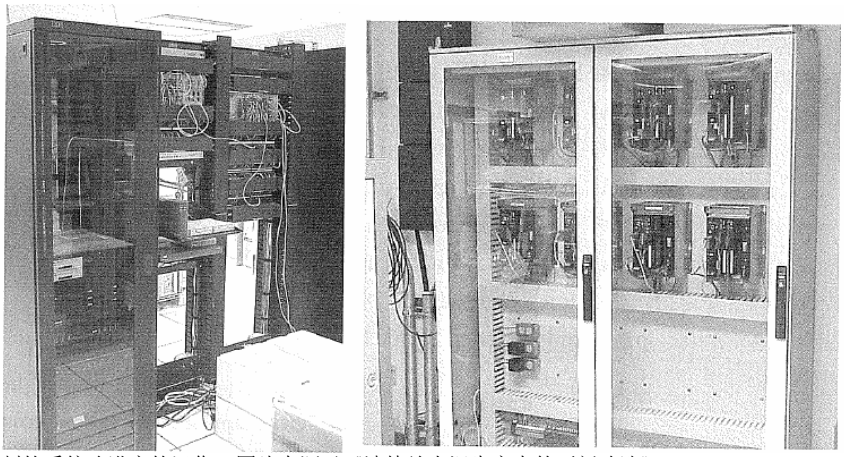
[8] Martin, G., T. Lange, and N. Frewin. 2000. Next Generation Controllers for Kiln/Cooler and Mill Applications based on Model predictive Control and Neural Networks, Proceedings IEEE-IAS/PCA 2000 Cement Industry Technical Conference, Salt Lake City, UT, May 7th – 12th.

[9] Martin, N., E. Worrell, and L. Price. 1999. Energy Efficiency and Carbon Dioxide Emissions Reduction Opportunities in the U.S. Cement Industry. Lawrence Berkeley National Laboratory, Berkeley, CA. September. (LBNL-44182); Martin, G., S. McGarel, T. Evans, and G. Eklund. 2001. Reduce Specific Energy Requirements while Optimizing NOx Emissions Decisions in Cement with Model Predictive Control, Personal Communication from Pavilion Technologies, Inc., Austin, TX, December 3

[10] Martin, G., S. McGarel, T. Evans, and G. Eklund. 2001. Reduce Specific Energy Requirements while Optimizing NOx Emissions Decisions in Cement with Model Predictive Control, Personal Communication from Pavilion Technologies, Inc., Austin, TX, December 3

[11] Liu, F., M. Ross and S. Wang. 1995. Energy Efficiency of China’s Cement Industry. Energy 20 (7): 669-681.

结构图或照片：



由多个电脑控制的系统改进窑的运作。图片来源于《波特兰水泥生产中的更新改造》，Bhatty, J. I., F. M. Miller和S. H. Kosmatka编，波特兰水泥协会，2004。

案例研究：

- **专家控制系统。**Ash Grove 于 1999 年在 Durkee Oregon 水泥厂安装了一套模糊控制系统。
- 第一套ABB LINKman系统于 1985 年安装在蓝圈公司的英国希望水泥厂，使该厂的燃料消耗降低了 8％[12]。该控制系统的投资额为 203000 英镑（1987），相当于 0.3 美元/（年•吨熟料）[13]，包括测量设备、计算机硬件和培训费用。
- 1999 年南非的一台水泥窑安装了一套**模型预测控制系统**，实现节能 4％，同时还提高了产量和熟料质量。即使像南非这样低的煤价，该项目的成本回收周期估计也只需 8 个月 [14]。
- **在线分析系统：**蓝圈公司的加拿大St. Marys水泥厂于 1999 年在它的预分解窑上安装了一套在线分析系统，实现了更好的过程管理并节省了燃料。1993 年Holderbank给出在线分析系统的安装成本是 0.8－1.7 美元/（年•吨熟料）[15]。
- **过程控制：**印度 Chittorgarh 公司的 Birla 水泥厂，在水冷却剂的高架罐上安装具有高限位传感器的浮动开关，在水泵达到高位时切断其供电，从而降低了耗电量。水泵在水达到低位时重新启动。这样消除了从高架罐上的溢出，并节约了 0.08 千瓦时/吨熟料的电量。进行这项措施的成本为 0.328 卢比/吨熟料（即 0.06 元/吨熟料）。
- **风机系统管理：**印度 Birla 有限公司的 Satna 水泥厂，当其产量增加，安装了一个扩大的 3-风机系统来负责立式辊磨机，预热器和静电除尘器。避免漏风（从辊磨机中）进入预热器，从而降低了耗电量，也为静电除尘器节省了电量。节电量为 2.3 千瓦时/吨熟料，其成本为 42 卢比/吨熟料（即 7.2 元/吨熟料）。

---

[12] Energy Technology Support Unit (ETSU). 1988. High Level Control of a Cement Kiln, Energy Efficiency Demonstration Scheme, Expanded Project Profile 185, Harwell, United Kingdom.

[13] Energy Technology Support Unit (ETSU). 1988. High Level Control of a Cement Kiln, Energy Efficiency Demonstration Scheme, Expanded Project Profile 185, Harwell, United Kingdom.

[14] Martin, G. and S. McGarel. 2001a. Automation Using Model Predictive Control in the Cement Industry. Pavillion Technologies, Inc., Austin, TX (based on a paper published in International Cement Review, February: 66-67). Available at: http://www.pavtech.com/

[15] Holderbank Consulting, 1993. Present and Future Energy Use of Energy in the Cement and Concrete Industries in Canada, CANMET, Ottawa, Ontario, Canada.

熟料煅烧过程中窑用风机的变频电机

描述：窑用风机配变频电机（ASDs）能有效减少能耗，降低运行成本。变频电机大多是中国制造，虽然很多零部件要从德国或日本进口[1]。

能源/环境/成本/其他收益：

- 参考案例研究。

结构图或照片：

水泥窑上的变速驱动器，图片来源于 http://fp.is.siemens.de/cement/en/Solutions/Drives_ID.htm

案例研究：

- 墨西哥Cruz Azul水泥公司的Hidalgo水泥厂为其窑用风机配备了变频电机，改善了操作性、可靠性，并将其 1000 匹马达的电耗降低了 40%[2]。将阻尼器换为变频电机是出于水泥厂控制和维持方面的考虑。由于该水泥厂的风机配置不同于典型的水泥厂，所以其节能情况不具有代表性。
- Fujimoto（1994）提到拉法基公司加拿大Woodstock水泥厂为其窑用风机配备了变频电机，使其电耗降低了 5.5kWh/t水泥（6.1kWh/t熟料）[3]。
- Zhonglida集团拥有 10 家水泥生产企业（包括立窑和新型干法回转窑），为其 40 台大电机（55kW以上）和超过 40 台小电机（55kW以下）安装了变频驱动，实现节能超过 30%[4]
- Birla Vikas水泥厂在窑中为分解炉的速度控制（从 70% 到 100% 的速度）安装了支路功率回收系统，取代了液体转子调节器。他们节约了 0.62 千瓦时/吨熟料，其成本为 3 卢比/吨熟料（即 0.5 元/吨熟料）。[5]

---

[1] Cui, Y., 2004 and 2006. Personal communication with Prof. Cui Yuansheng, VP of the Institute of Technical Information for Building Materials Industry of China (ITIBMIC).

[2] Dolores, R. and M.F. Moran. 2001. Maintenance and Production Improvements with ASDs Proc.2001 IEEE-IAS/PCA Cement Industry Technical Conference: 85-97.

[3] Fujimoto, S., 1994. Modern Technology Impact on Power Usage in Cement Plants, IEEE Transactions on Industry Applications, Vol. 30, No. 3, June.

[4] Institute of Technical Information for Building Materials Industry (ITIBMIC). 2004. Final Report on Cement Survey. Prepared for the United Nations Industrial Development Organization (UNIDO) for the Contract Entitled Cement Sub-sector Survey for the Project Energy Conservation and GHG Emissions Reduction in Chinese TVEs-Phase II. Contract no. 03/032/ML, P.O. No. 16000393, September 9.

[5] The United Nations Framework Convention on Climate Change (2008) CDM project documents available at: http://cdm.unfccc.int/Projects/DB/SGS-UKL1175367790.14/view

窑中风机的改进和优化

介绍：增加窑风机的进风管可以降低空气在管道中因摩擦和压力造成的损失，因此节约能源。虽然节省量不大，但是像这样的改进只需要非常少的资金投入。

能源/环境/成本/其他收益:

- 这些方面的优势在案例研究中有详尽的信息

案例研究：

- 印度Chittorgarh 公司的Chittor水泥厂，通过增加风机的直径，改进了冷却风机的进风管，降低了空气在流道中的因摩擦和压力造成的损失[1]。他们因此节约了 0.0048 千瓦时/吨熟料（6 瓦）。资金成本仅为 0.01305 卢比/吨熟料（即 0.00225 元/吨熟料）。

[1] The United Nations Framework Convention on Climate Change (2008) CDM project documents available at: http://cdm.unfccc.int/Projects/DB/SGS-UKL1175340468.27/view

为预热器/预分解窑安装或者加一级预热器

描述：可通过加一个分解炉，可能的话再加一级预热器，将一个现存的预热器窑改造成一个多级预热器/预分解窑。增设分解炉将提高水泥厂的产量，同时降低燃料消耗并减少 NOx 的排放（由于分解炉内的燃烧温度较低）。根据现有水泥厂的许多特征和地基情况，不同水泥技术提供商开发了各具特色的分解炉，还改造水泥厂，如德国洪堡公司的 Pyroclon-RP 分解炉。一般情况下，窑、地基和塔架仍保留下来，而冷却机和预热器都要更换。更换冷却机是为了适应更大的产量。为了改善能效和降低 NOx 排放，老式的分解炉也需要加以改造。

2001 年开始大量建造预分解窑，其中 10－20％是进口的，80－90％是国产的 [1]。中国一些主要水泥技术提供商提供的产品价格只有国外进口技术的 20－33％，但是不能长时间使用。大量企业选择国产技术。不过，国产技术不能提供 5000tpd以上规模的生产线 [2]。

能源/环境/成本/其他收益：

- 燃料节省情况要取决于现有窑的效率和新系统的过程参数（如预分解率，冷却效率）。
- 一个多级预热器/预分解窑将使用大约 3GJ/t熟料（100kgce/t熟料）[3]。
- 新型分解炉的平均节能效果是 0.4GJ/tclinker（14 kgce/t熟料）[4]。
- 增设分解炉和悬浮预热器的成本大约是 9.4－28 美元/吨熟料产能 [5,6]。
- 增加的产量使得运行成本降低了大约 1.1 美元/吨熟料。

---

[1] Cui, Y., 2004 and 2006. Personal communication with Prof. Cui Yuansheng, VP of the Institute of Technical Information for Building Materials Industry of China (ITIBMIC).

[2] Wang, Yanjia of Tsinghua University, Beijing, China. 2006b. Personal written communication.

[3] European Commission (EC). 2000. Directorate-General Joint Research Centre, Institute for Prospective Technological Studies. Integrated Pollution Prevention and Control (IPPC): Reference Document on Best Available Techniques in the Cement and Lime Manufacturing Industries. Seville, Spain. March

[4] Sauli, R.S. 1993. Rotary Kiln Modernization and Clinker Production Increase at Testi Cement Plant of S.A.C.C.I. Spa., Italy Proc. KHD Symposium '92, 2 Modern Burning Technology, KHD Humboldt Wedag, Cologne, Germany.

[5] Vleuten, F.P. van der. 1994. Cement in Development: Energy and Environment Netherlands Energy Research Foundation, Petten, The Netherlands.

[6] Jaccard, M.K. & Associates and Willis Energy Services Ltd. 1996. Industrial Energy End-Use Analysis and Conservation Potential in Six Major Industries in Canada. Report prepared for Natural Resources Canada, Ottawa, Canada.

结构图或照片：

有预热器和分解炉的回转窑。示例图片来源于某中国水泥厂

Sample images from Chinese cement plants showing rotary kilns with preheaters and precalciners.

案例研究：

- 1998 年德国Dyckerhoff Zement公司的Lengerich水泥厂在改造了它的分解炉之后NOx排量减少了 45％[7]。像这样减少排放的例子在德国、意大利和瑞士有很多[8]。
- Ash Grove公司建于 1979 年的Durkee水泥厂在 1998 年安装了新的预热器和分解炉，使其产量由 1500t/d增加到 2500t/d。改造还使燃料消耗减少了 0.16－0.7GJ/t熟料（5.4－24kgce/t熟料）[9]，同时减少了NOx的排放。
- Capitol水泥厂（圣安东尼奥，得克萨斯，美国）将它的一个老式在线分解炉更换为一个新的回流式分解炉以提高其产量。这是它的一个大的改造项目的一部分，其它还包括：更换预热器，安装SOx减排装置，以及增加立磨产量。这个新的水泥厂从 1999 年开始投入使用。其燃料消耗降至 3.4GJ/t熟料（116kgce/t熟料）[10]。
- 浙江省Jiangshan市的Hejiashan水泥有限公司在 2001 年和 2003 年分别用 1.05 亿元人民币建造了一条 1000tpd，用 1.56 亿元人民币建造了一条 1500tpd新型干法水泥生产线[11]。相当于 300 元人民币/吨熟料（37 美元/吨熟料）。1000tpd生产线的动力消耗为 85.87kWh/t熟料，燃料消耗为 2.5GJ/t熟料（85kgce/t熟料）。
- 意大利的一个旧厂改造，保留了原有回转窑，使得其产能增加了 80－100％（从 1100tpd增加到 2000－2200tpd），同时将燃料消耗从 3.6 GJ/t熟料减至 3.1－3.2 GJ/t熟料（123 kgce/t熟料降至 106－109kgce/t熟料），实现节能 11－14％[12]。

---

[7] Mathée, H. 1999. NOx Reduction with the Prepol MSC Process at the Lengerich Plant of Dyckerhoff Zement GmbH, Polysius Teilt Mit, 208: 53-55, Krupp Polysius, Germany.

[8] Menzel, K. 1997. Experience with the Prepol-MSC Calciner and a Review of the Possibilities it Offers, Polysius Teilt Mit, 198: 29-33, Krupp Polysius, Germany.

[9] Hrizuk, M.J. 1999. Expansion is Key at Durkee, International Cement Review, May.

[10] Frailey, M.L. and K.R. Happ, 2001. Capitol Cement's Project 2000. Proceedings IEEE 2001 Cement Industry Technical Conference, May 2001.

[11] Institute of Technical Information for Building Materials Industry (ITIBMIC). 2004. Final Report on Cement Survey. Prepared for the United Nations Industrial Development Organization (UNIDO) for the Contract Entitled Cement Sub-sector Survey for the Project Energy Conservation and GHG Emissions Reduction in Chinese TVEs-Phase II. Contract no. 03/032/ML, P.O. No. 16000393, September 9.

[12] Sauli, R.S. 1993. Rotary Kiln Modernization and Clinker Production Increase at Testi Cement Plant of S.A.C.C.I. Spa., Italy Proc. KHD Symposium '92, 2 Modern Burning Technology, KHD Humboldt Wedag, Cologne, Germany.

将干法长窑改造为预热器/预分解窑

描述：干法长窑可升级为目前流行的多级预热器/预分解窑。

能源/环境/成本/其他收益：

- 经过改造可节能 1.4GJ/t熟料（48kgce/t熟料），反映出干法窑平均的燃料消耗和现代预热器窑、预分解窑燃料消耗的差距（依据对加拿大水泥工业和意大利水泥厂改造的研究结果）[1]。
- 对于预热器、预分解窑，其成本约为 8.6 美元/吨熟料产能 [2] 到 23－29 美元/吨熟料产能 [1]。

结构图或照片：

有预热器和分解炉的回转窑，示例图片来源于中国某水泥厂。

---

[1] Holderbank Consulting, 1993. Present and Future Energy Use of Energy in the Cement and Concrete Industries in Canada, CANMET, Ottawa, Ontario, Canada.; Sauli, R.S. 1993. Rotary Kiln Modernization and Clinker Production Increase at Testi Cement Plant of S.A.C.C.I. Spa., Italy Proc. KHD Symposium '92, Modern Burning Technology, KHD Humboldt Wedag, Cologne, Germany.

[2] Jaccard, M.K. & Associates and Willis Energy Services Ltd. 1996. Industrial Energy End-Use Analysis and Conservation Potential in Six Major Industries in Canada. Report prepared for Natural Resources Canada, Ottawa, Canada.

干法过程升级至多级预热器窑

描述：老式的干法窑只能在长窑的链条部分进行预热，可能存在单级或两级预热器。安装多级悬浮预热器（四和五级）可减少热量损失，提高能量利用效率。现代旋风预热器的压损减少，导致其热回收效率增加，动力消耗减少（参考低压损旋风筒的措施）。

能源/环境/成本/其他收益：

- 通过安装新的预热器，窑的产量将提高，因为入窑的物料分解率已经很高（达到 30％－40％）。
- 窑长也可以缩短 20－30％以减少筒体散热 [1]。
- 随着产能的增加，熟料冷却机必须适应更多熟料的冷却需求。
- 如果石灰石储量丰富，当老窑需要替代而新窑造价太高时，老窑改造就显得十分有吸引力。
- 节能量取决于带改造干法窑的原来能耗和改造后新窑的预热器数量。节能量估计为 0.9GJ/t熟料（31kgce/t熟料），这显示了平均干法窑的能耗与现代预热器窑的差别 [2]。
- 改造为多级预热器窑的成本大约是 39－41 美元/（年•吨熟料产能）[2]，改造为悬浮预热器窑的成本大约是 28 美元/（年•吨熟料产能）[3]。

结构图或照片：

水泥窑和预热塔。图片来源于 Courtesy Castle 水泥厂，http://www.understanding-cement.com/manufacturing.html

案例研究：

- 拉法基公司对民主德国于 1973 和 1974 年建的 4 条干法窑进行了改造。在 1993 年和 1995 年，三条生产线装备了四级悬浮预热器。其燃料消耗由 4.1 GJ/t熟料降至 3.6 GJ/t熟料（140－123kgce/t熟料），同时每台窑的产量也从 1650tpd增至 2500tpd[4]。由于更换了水泥终粉磨和一些风机，动力消耗减少了 25％。

---

[1] Van Oss, H. 1999. Personal Communication. U.S. Geological Survey, February 9.

[2] Holderbank Consulting, 1993. Present and Future Energy Use of Energy in the Cement and Concrete Industries in Canada, CANMET, Ottawa, Ontario, Canada.

[3] Vleuten, F.P. van der. 1994. Cement in Development: Energy and Environment Netherlands Energy Research Foundation, Petten, The Netherlands.

[4] Duplouy, A. and J. Trautwein. 1997. Umbau und Optimierung der Drehofenanlagen im Werk Karsdorf der Lafarge Zement Gmbh. ZKG International 4 50: 190-197.

增加回转窑预热器的阶段

介绍：增加预热器的阶段可以降低热损耗并提高窑的效率。

能源/环境/成本/其他收益:

- 安装新的预热器，从而提高窑的生产力。这是因为当填料进入窑时达到了更高的预煅烧（高达 30-40%）。
- 节能量取决于被改造的干法窑的单位能耗，同时也取决于安装的预热器的数量。
- 其他优势可见其他回转窑预热器/分解炉的措施。

结构图或照片：

这是一张水泥窑和预热塔的图片。图片来自于Castle 水泥，出自：http://www.understanding-cement.com/manufacturing.html

案例研究：

- 印度的Vikram 水泥厂将预热器从 5 阶段提升到 6 阶段 [1]。他们发现，燃料节约了 0.111 吉焦/吨（即 3.8 千克标煤/吨），同时用电量增长了 1.17 千瓦时/吨。资金成本为 110.5 卢比/吨熟料（即 19 元/吨熟料）。

[1] The United Nations Framework Convention on Climate Change (2008) CDM project documents available at: http://cdm.unfccc.int/Projects/DB/SGS-UKL1175350601.7/view

更换为推动篦式冷却机

描述：熟料冷却机有四种类型：（1）立筒冷却机；（2）单筒冷却机；（3）多筒式冷却机；（4）推动篦式冷却机。北美目前已经没有单筒或立筒冷却机在使用，中国还有少量这样的老式冷却机[1]。然而，一些推动篦式冷却机仍在使用中。篦式冷却机是新型水泥厂普遍采用的形式。

能源/环境/成本/其他收益：

- 篦式冷却机的优点是产能大（适用于大型窑），热回收率高（熟料离开篦冷机的温度低至 83℃，而不是像多筒冷却机那样出料温度达到 120－200℃[2]。
- 多筒冷却机不能进行三次风热回收（用于分解炉），限制了它的热回收率[3]。
- 篦式冷却机比其它形式的冷却机的热回收率高。
- 对于大型的水泥长，篦式冷却机是更合适的选择。对于产量低于 500tpd的水泥生产线，篦式冷却机就显得过于昂贵了[4]。把多筒冷却机更换为篦式冷却机是非常常见的[5]。
- 现代推动篦式冷却机比老式冷却机的热回收效率更高，可达 60－71％[6]，同时减少预热利用的波动（也就是说增加窑的产量）。
- 与多筒冷却机相比较，需要增加 3－6kWh/t熟料的动力消耗以达到提高热回收率[6,7]。节省的燃料可达窑用燃料总量的 8％[8]。
- 只有当增设分解炉或提高生产线产量的情况下，改造冷却机才显得经济上有吸引力。
- 根据改造程度的不同，冷却机改造的成本为 0.44－5.5 美元/（年•吨熟料产能）。
- 年运行成本将增加 0.11 美元/吨熟料[9]。

---

[1] Cui, Y., 2004 and 2006. Personal communication with Prof. Cui Yuansheng, VP of the Institute of Technical Information for Building Materials Industry of China (ITIBMIC).

[2] Vleuten, F.P. van der. 1994. Cement in Development: Energy and Environment Netherlands Energy Research Foundation, Petten, The Netherlands.

[3] Cembureau, 1997b. Best Available Techniques for the Cement Industry, Brussels: Cembureau.

[4] COWIconsult, March Consulting Group and MAIN. 1993. Energy Technology in the Cement Industrial Sector, Report prepared for CEC - DG-XVII, Brussels, April 1992.

[5] Alsop, P.A. and J.W. Post. 1995. The Cement Plant Operations Handbook, (First edition), Tradeship Publications Ltd., Dorking, UK

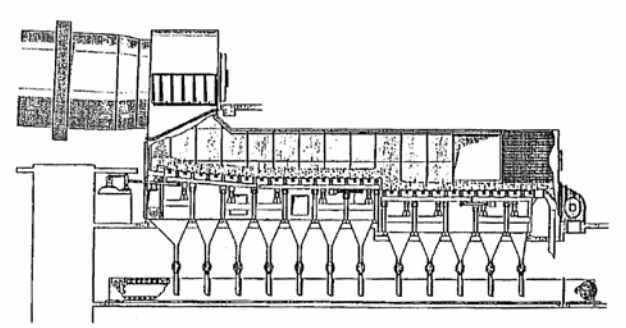
[6] Bhatty, J. I., F. M. Miller and S. H. Kosmatka (eds.) 2004. Innovations in Portland Cement Manufacturing. Portland Cement Association.

[7] COWIconsult, March Consulting Group and MAIN. 1993. Energy Technology in the Cement Industrial Sector, Report prepared for CEC - DG-XVII, Brussels, April 1992; Vleuten, F.P. van der. 1994. Cement in Development: Energy and Environment Netherlands Energy Research Foundation, Petten, The Netherlands.

[8] Vleuten, F.P. van der. 1994. Cement in Development: Energy and Environment Netherlands Energy Research Foundation, Petten, The Netherlands.

[9] Jaccard, M.K. & Associates and Willis Energy Services Ltd. 1996. Industrial Energy End-Use Analysis and Conservation Potential in Six Major Industries in Canada. Report prepared for Natural Resources Canada, Ottawa, Canada.

结构图或照片：



篦式熟料冷却机图片来源于《波特兰水泥生产中的更新改造》，Bhatty, J. I., F. M. Miller和 S. H. Kosmatka编，波特兰水泥协会，2004。

案例研究：

- 中国琉璃河水泥厂应用了天津水泥院设计的第三代篦冷机，其 2500t/d线的热回收率达到 72%[10]。空气流篦冷机代替喷水冷却还可以节约水的使用 [11]。
- 在美国Alpena拉法基水泥厂，为适应产量提高 10%的需要，同时为降低运行成本，更换篦冷机的老化部件，和提高热回收效率，更换了新型的篦冷机。新式篦冷机采用空气流技术以及现有的震荡篦冷机，具有更高的效率。审计热损失为 207MJ/t。能耗 6.6kWh/t。出篦冷机温度低于环境温度+56℃。由于热耗降低，可节省燃料 3%[12]。

---

[10] Institute of Technical Information for Building Materials Industry (ITIBMIC). 2004. Final Report on Cement Survey. Prepared for the United Nations Industrial Development Organization (UNIDO) for the Contract Entitled Cement Sub-sector Survey for the Project Energy Conservation and GHG Emissions Reduction in Chinese TVEs-Phase II. Contract no. 03/032/ML, P.O. No. 16000393, September 9.

[11] Institute of Technical Information for Building Materials Industry (ITIBMIC). 2004. Final Report on Cement Survey. Prepared for the United Nations Industrial Development Organization (UNIDO) for the Contract Entitled Cement Sub-sector Survey for the Project Energy Conservation and GHG Emissions Reduction in Chinese TVEs-Phase II. Contract no. 03/032/ML, P.O. No. 16000393, September 9.

[12] Bump, J. A. of LaFarge Corp. (1996). New cooler installed at Lafarge Alpena Plant: Fuller Controlled Flow Grate (CFG) Clinker Cooler (Cement Plant). Cement Industry Technical Conference, 1996. XXXVIII Conference Record., IEEE/PCA. April 14-18, 1996.

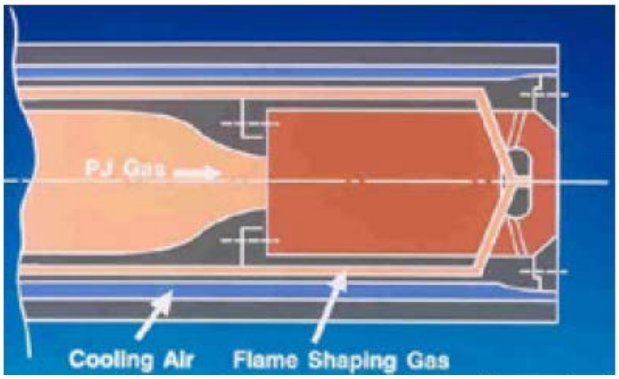
水泥回转窑燃烧系统的改进

描述：窑内燃烧不好一般是因为以下几个问题：较低的火焰调节范围，不完全燃烧造成的CO浓度高以及过多的过剩空气[1]。优化燃烧系统主要目标为改善火焰形状，加强燃料与二次风的混合以及减少过剩空气。为此研发出多种技术。Lowes和Bezant于 1990 年提出通过更好的窑操作改善窑内燃烧。澳大利亚的Adelaide大学研究出螺旋热技术可应用于烧气燃烧器或烧气/煤双重燃料燃烧器。该项技术运用了“运动喷射”专利技术。新设计的喷嘴将出口气流控制成旋转的气流，这股高混合高速旋转的空气卷吸燃料而不需要大量燃气和空气喷入。燃烧发生在大量燃料聚集卷吸的地方，这更容易形成明亮的火焰以保证更好的辐射传热。

能源/环境/成本/其他收益:

- 水泥回转窑采用这项旋流燃烧技术既可以改善气流形状还可以降低 NOx 排放
- 该项技术的成本各异。有关文献推断其成本为 1 美元每年每吨熟料生产能力。

结构图或照片：



螺旋热燃烧器，图片来源于FCT International,
http://www.fctinternational.com/splash/about_fct/fct_combustion/products_fct_combustion/gyrotherm/body.htm

案例研究：

- 在Blue Circle水泥厂应用了该项火焰控制技术消除了烧成带的还原气氛，节约了 10%的燃料消耗[2]。
- 英国开发出一种基于不同窑型通过控制火焰来节约燃料可达 2 到 10%的技术[3]。
- 在澳大利亚的Adelaide Brighton水泥厂进行过这种螺旋热技术的验证试验，结果在提产 10%的情况下还能节约燃料 5%到 10%[4]。
- 另一次在美国Ash Grove厂进行的验证试验结果为提产 5%到 9%，同时节约燃料 2.7%到 5.7%[5,6]。

---

[1] Venkateswaran, S.R. and H.E. Lowitt. 1988. The U.S. Cement Industry, An Energy Perspective, U.S. Department of Energy, Washington D.C., USA.
[2] Lowes, T.M. and Bezant, K.W. 1990. Energy Management in the UK Cement Industry Energy Efficiency in the Cement Industry (Ed. J. Sirchis), London, England: Elsevier Applied Science.
[3] Venkateswaran, S.R. and H.E. Lowitt. 1988. The U.S. Cement Industry, An Energy Perspective, U.S. Department of Energy, Washington D.C., USA.
[4] Centre for the Analysis and Dissemination of Demonstrated Energy Technologies (CADDET), International Energy Agency. 1997. Revolutionary low-NOx high-efficiency gas burner, Sittard, the Netherlands: CADDET.
[5] Centre for the Analysis and Dissemination of Demonstrated Energy Technologies (CADDET), International Energy Agency. 1997. Revolutionary low-NOx high-efficiency gas burner, Sittard, the Netherlands: CADDET.
[6] Videgar, R., Rapson, D. and Dhanjal, S., 1997. Gyro-therm Technology Boosts Cement Kiln Output, Efficiency and Cuts NOx Emissions. Proceedings 1997 IEEE/PCA Cement Industry Technical Conference XXXIX Conference Record, Institute of Electrical and Electronics Engineers: New Jersey.

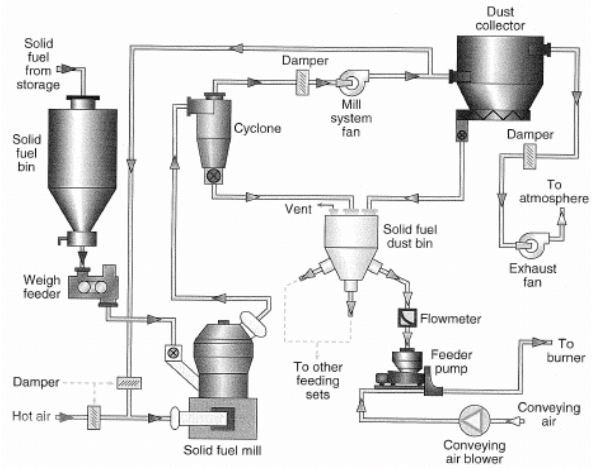
回转窑采用中间仓式喂煤系统进行熟料煅烧

描述：过去大多燃料系统采用直吹式喂煤系统。煤被烘干，粉磨及筛选后被直接送入窑内。这导致了高比例的一次风量（高达燃烧空气量的 40%）。高比例的一次风量就限制了来自篦冷机的二次风量。一次风比例波动大，不优化匹配将导致很多严重的操作问题，例如窑和熟料内产生还原气氛，火砖损坏，以及为保证燃烧运行而采用的高过剩空气比例从而造成的低燃烧效率。现在，越来越多的现代水泥厂采用了中间仓式喂煤系统。这个系统中，一次风和煤粉都不是直接送入窑内。煤粉的水分烘干后通入大气，煤粉通过旋风筒或袋收尘器收集后输送到煤粉仓 [1]。煤粉被少量一次风在高浓度情况下送至燃烧器。由于采用多通道燃烧器，来至煤磨的一次风大大减少，一次风量被降低至燃烧空气的 7%到 12%[2]。多通道燃烧器还利于优化火焰。这也是采用多种燃料时的重要特征。多通道燃烧器的优化操作必须根据二次空气和窑内的空气动力学进行 [3]。

能源/环境/成本/其他收益:

- 燃烧条件的优化可以减少 NOx 的排放以及加强燃料的混合，减少能量损失
- 过量空气的加入将会导致热量损失近 75MJ/t 熟料。假定中间仓式喂煤系统减少 20%到 30%的过剩空气，从而可节约燃料 15 到 22MJ/t 熟料（0.51~0.75kgce/t 熟料）。
- 这些优化燃烧的条件可以延长耐火砖寿命以及降低 NOx 排放。而更多的好处在于成本的降低。
- 中间仓式喂煤系统的缺点在于需要附加一定的建设投资。

结构图或照片：



间接燃料系统，来源于《波特兰水泥生产中的更新改造》，Bhatty, J. I., F. M. Miller 和 S. H. Kosmatka编，波特兰水泥协会，2004。

案例研究：

- 1997 年，位于 Colton，加利福利亚州的波特兰水泥厂采用了间接燃料系统， NOx 排放减少 30%到 50%，并且在燃料中加入了轮胎。中间仓式喂煤系统投资为 5 百万美元对于一条年产 680000 吨的熟料生产线，相当于 7.4 美元每吨熟料。

---

[1] Smart, J. and B. Jenkins. 2000. Combustion in the Rotary Kiln, The Combustion Institute, Leeds, UK. Available at: http://www.chemeng.ucl.ac.uk/research/combustion/nl2000_1/nl00_1_9.html

[2] Bhatty, J. I., F. M. Miller and S. H. Kosmatka (eds.) 2004. Innovations in Portland Cement Manufacturing. Portland Cement Association.

[3] Smart, J. and B. Jenkins. 2000. Combustion in the Rotary Kiln, The Combustion Institute, Leeds, UK. Available at: http://www.chemeng.ucl.ac.uk/research/combustion/nl2000_1/nl00_1_9.html

优化热回收效率/篦冷机的升级

描述：篦冷机将熟料的温度由 1200℃降至 100℃。普通的冷却机大多为多筒冷却机和往复推动篦冷机。冷却机回收的热量通过二次风送回窑内以及三次风送往分解炉[1]。往复推动篦冷机适应于大型的不同产量的生产线（直到 10000tpd）。篦冷机使用风机供入过量空气。高温的回收空气能作为三次风送往分解炉。单筒冷却机（用于世界上 5%的 2200t/d到 5000t/d生产线）和多筒冷却机（用于世界上 10%的 3300t/d到 4400t/d生产线）都不需要风机鼓风，几乎不使用过量空气，从而减少了热量损失[2]。（更多关于篦冷机的信息见回转窑熟料煅烧中改造成往复式篦冷机的措施部分）

能源/环境/成本/其他收益：

- 篦冷机可回收 1.3-1.6GJ/t熟料热量[3]。热回收效果可通过减少过量空气[4]，控制料层厚度以及采用新型篦冷机如圆形篦冷机来提高[5]。
- 提高篦冷机热回收效率可以节约燃料，但是也会影响熟料质量和排放水平。
- 控制篦冷机中冷却风的分布可以降低熟料温度并提高空气温度。
- 提高热回收率还可以提高窑内和分解炉的燃烧温度，从而降低热耗
- Birch在 1990 年提到通过优化篦冷机操作节约 0.05 到 0.08GJ/t熟料（2~3kgce/t熟料）热量，Holderbank1993 年提到通过改造篦冷机节约 0.16GJ/t熟料（5.4kgce/t熟料）热量[6]。COWIconsult et al 在 1993 提到节约 0.08GJ/t熟料（3kgce/t熟料）热量，但是增加了 2kWh/t熟料的电量[7]。
- 经估算，用篦冷式冷却机替代行星式篦冷机，成本仅为一半，或者为 0.22 美元每年每吨熟料。
- 最近的篦冷机改进是在其靠近窑头的一端加入固定部分，这样既可以增加热回收率又可以减少篦冷机的维护
- 针对传统篦冷机的改造可以提高热回收率 2%到 5%。
- 投资估计为 0.11 到 0.33 美元每年每吨熟料[8]。

结构图或照片：

---

[1] Alsop, P.A. and J.W. Post. 1995. The Cement Plant Operations Handbook, (First edition), Tradeship Publications Ltd., Dorking, UK

[2] Buzzi, S. and G. Sassone. 1993. Optimization of Clinker Cooler Operation, Proc. VDZ Kongress 1993: Verfahrenstechnik der Zementherstellung Bauverlag, Wiesbaden, Germany: 296-304; Vleuten, F.P. van der. 1994. Cement in Development: Energy and Environment Netherlands Energy Research Foundation, Petten, The Netherlands.

[3] Buzzi, S. and G. Sassone. 1993. Optimization of Clinker Cooler Operation, Proc. VDZ Kongress 1993: Verfahrenstechnik der Zementherstellung Bauverlag, Wiesbaden, Germany: 296-304

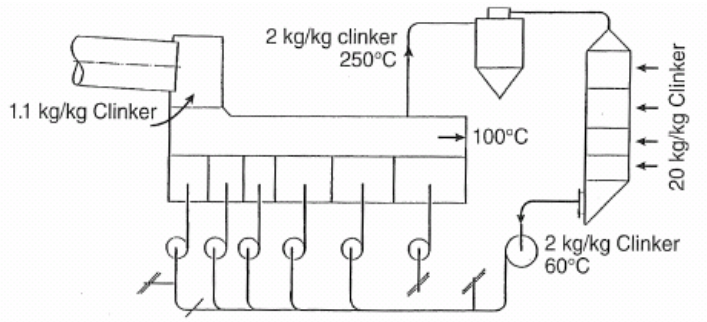
[4] Alsop, P.A. and J.W. Post. 1995. The Cement Plant Operations Handbook, (First edition), Tradeship Publications Ltd., Dorking, UK

[5] Buzzi, S. and G. Sassone. 1993. Optimization of Clinker Cooler Operation, Proc. VDZ Kongress 1993: Verfahrenstechnik der Zementherstellung Bauverlag, Wiesbaden, Germany: 296-304; Lesnikoff, G. 1999. Hanson Cement, Cupertino, CA, personal communication.

[6] Birch, E. 1990. Energy Savings in Cement Kiln Systems Energy Efficiency in the Cement Industry (Ed. J. Sirchis), London, England: Elsevier Applied Science: 118-128; Holderbank Consulting, 1993. Present and Future Energy Use of Energy in the Cement and Concrete Industries in Canada, CANMET, Ottawa, Ontario, Canada.

[7] COWIconsult, March Consulting Group and MAIN. 1993. Energy Technology in the Cement Industrial Sector, Report prepared for CEC - DG-XVII, Brussels, April 1992.

[8] Young, G. 2002. Personal communication from Gerald I. Young, Penta Engineering Corp., St. Louis Missouri, March.



篦冷机回收过量空气，来源于《波特兰水泥生产中的更新改造》，Bhatty, J. I., F. M. Miller和 S. H. Kosmatka编，波特兰水泥协会，2004。

案例研究：

- 印度Binani水泥厂改进了熟料冷却机，增加热回收，实现节能 0.062 吉焦/吨熟料（2千克标煤/吨熟料）。[9]

[9] The United Nations Framework Convention on Climate Change (2008) CDM project documents available at: http://cdm.unfccc.int/Projects/DB/SGS-UKL1159866250.93/view

回转窑的密封

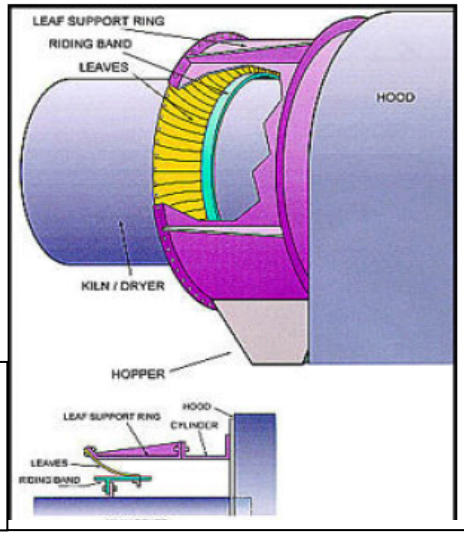
描述：回转窑窑头和窑尾的密封可以有效地减少漏风和热损失。密封不好则会增加窑的热耗。通常采用的密封形式为风力薄片式，当然也有其他一些形式。现在的密封可使用 10000 到 20000 小时，但仍需常规的检查以减少漏风。这种技术已在中国得到使用 [1]。

能源/环境/成本/其他收益：

- 由于密封问题导致的热损失一般相对较小。
- 延长密封寿命的装置其投资回收周期为小于 6 个月 [2]。

结构图或照片：

Polysius 窑密封，图片来源于 http://www.polysiususa.com/html/HTML/Cement/Children/Sub/InletOutletSeals.htm.
Phillips Enviro 密封，图片来源于 Phillips 网站 http://216.216.92.11/profile/default.cfin?content=3010200



案例研究：

- Philips窑服务商在报告中提出其在窑入口处采用的风力密封在印度的试验表明可减少燃料消耗 0.4%（0.011GJ/t熟料或 0.38kgce/t熟料）[3]。

---

[1] Cui, Y., 2004 and 2006. Personal communication with Prof. Cui Yuansheng, VP of the Institute of Technical Information for Building Materials Industry of China (ITIBMIC).
[2] Canadian Lime Institute. 2001. Energy Efficiency Opportunity Guide in the Lime Industry, Office of Energy Efficiency, Natural Resources Canada, Ottawa, ON.
[3] Philips Kiln Services. 2001. Philips Enviro-Seal, Case Study – M/S Maihar cement, Available at: http://www.kiln.com, accessed November 2001.

低温余热发电 [1]

描述：尽管政府鼓励低温余热发电技术的应用（如中国的中长期节能战略），但该项技术仍没有得到广泛的应用（尽管中国已有 45 座回转窑采用了该技术）[2,3]，甚至还有一些 2003 年新建的大型水泥厂没有采用。

能源/环境/成本/其他收益：

- Pan（2005）估计一套应用于 6MW装机容量的进口设备其成本大约为 18000 到 22000 元每千瓦 [4]。
- 中国该项技术从 1996 开始起步，目前有三家公司可提供技术装备：天津水泥工业设计研究院，中信重工和华效资源有限公司。这三家公司都在致力于在中国大力发展水泥行业的低温余热发电技术，目前国内技术和装备的成本为 10000 元每千瓦。
- 如果水泥生产线与余热发电系统同步建设则可以减少成本。
- 一条 2000t/d的水泥熟料生产线可以配套 20kWh/t熟料的发电系统，其投资为 2 到 3 千万人民币 [5]。
- 国产技术可达 24 到 32kWh的发电能力，则国外技术可达 28 到 36kWh的发电能力 [6]。
- 国内技术可达到 35kWh/t熟料的发电能力，则日本的技术可达 45kWh/t熟料的发电能力，而德国的技术还可以达到更高的发电能力 [7]。
- 运行寿命和人工要求国内和国外技术大致相同。

结构图或照片：

---

[1] The adoption of low temperature waste heat recovery for electricity production in cement plants changes the temperature profile of the flue gas which may impact the low-temperature, catalytic dioxin formation reactions. Heat recovery from waste-to-energy boilers increases the residence time for the flue gas at the dioxin formation temperature window (700 -200 C) increases dioxin formation. Flue gas cooling temperature profile is one the important factors determining dioxin formation potential of a combustion facility. Some hazardous waste incinerators use rapid flue gas quenching to reduce residence time of the flu gas passing through the formation window for controlling dioxin formation. On the other hand, it may be due to less boiler surface area in the optimum temperature window in quenched vs. non-quenched systems, rather than a gas residence time. The surface area tends to accumulate reactive carbon and trace metals. More area likely means higher D/F concentrations. Research is needed to find out whether there is significant effect of waste heat recovery on dioxin emissions from cement kilns (Lee, C-W., 2006. Personal communication with Chun-Wai Lee, U.S. Environmental Protection Agency, Office of Research and Development, National Risk Management Research Laboratory. Gullett, B., 2006. Personal communication with Brian Gullett, U.S. Environmental Protection Agency, Office of Research and Development, National Risk Management Research Laboratory.).

[2] Global Environment Institute (GEI). 2005. Financing of Energy Efficiency Improvement for Cement Industry in China. January.

[3] Cui, Y., 2004 and 2006. Personal communication with Prof. Cui Yuansheng, VP of the Institute of Technical Information for Building Materials Industry of China (ITIBMIC).

[4] Pan, Jiong. 2005. The technique and application of power generation by waste heat in moderate and low temperature in cement plant (in Chinese). www.chinacement.org

[5] Institute of Technical Information for Building Materials Industry (ITIBMIC). 2004. Final Report on Cement Survey. Prepared for the United Nations Industrial Development Organization (UNIDO) for the Contract Entitled Cement Sub-sector Survey for the Project Energy Conservation and GHG Emissions Reduction in Chinese TVEs-Phase II. Contract no. 03/032/ML, P.O. No. 16000393, September 9.

[6] Institute of Technical Information for Building Materials Industry (ITIBMIC). 2004. Final Report on Cement Survey. Prepared for the United Nations Industrial Development Organization (UNIDO) for the Contract Entitled Cement Sub-sector Survey for the Project Energy Conservation and GHG Emissions Reduction in Chinese TVEs-Phase II. Contract no. 03/032/ML, P.O. No. 16000393, September 9.

[7] Cui, Y., 2004 and 2006. Personal communication with Prof. Cui Yuansheng, VP of the Institute of Technical Information for Building Materials Industry of China (ITIBMIC).

德国 Lengfurt 水泥厂的 1.5MW Ormat 能量转化器，图片来源于
http://www.ormat.com/FileServer/70b593358e2da845c512c50dc0c47613.pdf

案例研究：

- 安徽宁国水泥厂 4000t/d生产线的余热发电系统由日本引进 [8]，从 1998 年运转以来发电量能达到 39kWh/t熟料 [9]。
- 中国联合水泥公司两条 6000kW的系统总耗资 1 亿 1 百八十万元，其中 3600 万为私人募集，6400 万为银行贷款，相当于 8500 元每千瓦 [10]，其发电容量相当于 79.8kWh/t 熟料。
- 北京水泥厂两条 2400t/d和 3200t/d生产线都装有余热回收系统 [11]。总装机容量为 7.5MW，总投资为 4743 万，相当于 6300 元每千瓦。其中 70%的投资来自北京能源投资公司。
- 另一个国内的示例为泰山水泥厂的一条 5000t/d线和一条 2500t/d线 [12]。自 2005 年 10 月 1 日投产，目前仍在调试阶段。其最大设计装机容量为 13.2MW，年发电量为 95GWh。其中 90.8GW用于水泥生产，可解决 30%多的水泥生产电耗 [13]。
- 2002 年 5 月，天津水泥院和上海万安企业公司开始在一条 1350t/d的四级预热器窑上进行低温余热发电技术改造 [14]。其装机容量 1.8MW，年运转 7000 小时。包括系统运行所需的 10%电力在内，该设备还额外发电 11.34GWh每年。以 0.5 元每kWh计算，天津水泥厂可每吨熟料节约 11 到 14 元成本。其运行成本为 0.06 元每kWh，回收周期为 3 年。

---

[8] Global Environment Institute (GEI). 2005. Financing of Energy Efficiency Improvement for Cement Industry in China. January.

[9] Anhui Ningguo Cement Plant, 2002. The Report on Power Generation by Waste Heat of the Kiln in Ningguo Cements Plant. http://green.cei.gov.cn/doc/LY31/200204192475.htm (in Chinese).

[10] China National Building Material Group Corporation (CNBM), 2005. Zhonglian Julong Huaihai Cement Co., Ltd.: Low Temperature Residual Heat Power Generation Project. Presentation by CNBM, October, 2005.

[11] Beijing Energy Investment Company (BEIC), 2006. Electrical Power Station with Pure Low Temperature & Waste Heat in Beijing Cement Ltd.; Geothermal Heating Supply in BioYuan Uptown. Presentation on CDM proposed projects by BEIC.

[12] Global Environment Institute (GEI). 2005. Financing of Energy Efficiency Improvement for Cement Industry in China. January.

[13] Guo, Jie. 2004. The contract of flash distillation waste heat power generation demonstration project of Taishan Cement signed (in Chinese). Available at http://cncement.com

[14] Institute of Technical Information for Building Materials Industry (ITIBMIC). 2004. Final Report on Cement Survey. Prepared for the United Nations Industrial Development Organization (UNIDO) for the Contract Entitled Cement Sub-sector Survey for the Project Energy Conservation and GHG Emissions Reduction in Chinese TVEs-Phase II. Contract no. 03/032/ML, P.O. No. 16000393, September 9.

- 在宁国海螺 4000t/d生产线和柳州水泥厂也分别安装了低温余热发电装备 [15]。

[15] Institute of Technical Information for Building Materials Industry (ITIBMIC). 2004. Final Report on Cement Survey. Prepared for the United Nations Industrial Development Organization (UNIDO) for the Contract Entitled Cement Sub-sector Survey for the Project Energy Conservation and GHG Emissions Reduction in Chinese TVEs-Phase II. Contract no. 03/032/ML, P.O. No. 16000393, September 9.

高温余热发电技术

描述：来自篦冷机系统和预热器系统的废气含有较高的可利用能量，可用于发电。

能源/环境/成本/其他收益：

- 在美国，只有长干法窑的废气温度足够高，可以通过发电回收废气热量[1]。
- 该系统既可以直接通过汽轮机直接回收废热也可安装余热锅炉通过蒸汽汽轮机回收热量。
- 该技术采用蒸汽汽轮机系统的余热锅炉，这项技术已被广泛采用并已被证明其经济性[2,3,4]。
- 余热回收会影响在线生料磨的生产，因为生料烘干也需要一定的热量。
- 水泥厂的发电效率仍相对较低（18%），据一些调研结果可知，余热发电可发电 11 至 25kWh/t熟料[5,6,7]。
- 电耗节省估计为 22kWh/t 熟料
- 该套设备的建设费用估计为 2.2 到 4.4 美元每年每吨，运行费用为 0.22 到 0.33 每吨熟料[8]。
- 截至 1999 年，美国水泥厂共发电量为 4 亿 8600 万kWh[9]。
- 在中国，大部分的高温废气都进入预热器和分解炉。

---

[1] Technically, organic rankine cycles or Kalina cycles (using a mixture of water and ammonia) can be used to recover low-temperature waste heat for power production, but this is currently not economically attractive, except for locations with high power costs. In China, however, low temperature heat is being recovered; see previous measure for details.

[2] Steinbliss, E. 1990. Traditional and Advanced Concepts of Waste Heat Recovery in Cement Plants Energy Efficiency in the Cement Industry (Ed. J. Sirchis), London, England: Elsevier Applied Science

[3] Jaccard, M.K. & Associates and Willis Energy Services Ltd. 1996. Industrial Energy End-Use Analysis and Conservation Potential in Six Major Industries in Canada. Report prepared for Natural Resources Canada, Ottawa, Canada.

[4] Neto, M. 1990. Waste Gas Heat Recovery in Cement Plants Energy Efficiency in the Cement Industry (Ed. J. Sirchis), London, England: Elsevier Applied Science.

[5] Steinbliss, E. 1990. Traditional and Advanced Concepts of Waste Heat Recovery in Cement Plants Energy Efficiency in the Cement Industry (Ed. J. Sirchis), London, England: Elsevier Applied Science.

[6] Scheuer, A. and Sprung, S., 1990. Energy Outlook in West Germany's Cement Industry. Energy Efficiency in the Cement Industry (Ed. J. Sirchis), London, England: Elsevier Applied Science.

[7] Neto, M. 1990. Waste Gas Heat Recovery in Cement Plants Energy Efficiency in the Cement Industry (Ed. J. Sirchis), London, England: Elsevier Applied Science.

[8] Jaccard, M.K. & Associates and Willis Energy Services Ltd. 1996. Industrial Energy End-Use Analysis and Conservation Potential in Six Major Industries in Canada. Report prepared for Natural Resources Canada, Ottawa, Canada.

[9] United States Geological Survey, 2001. Minerals Yearbook, Washington, D.C., USGS. Available at http://minerals.er.usgs.gov/minerals/.

结构图或照片：

水泥厂废热回收，图片来源于 http://www.takuma.co.jp/english/product/boiler/hainetu/cement.html

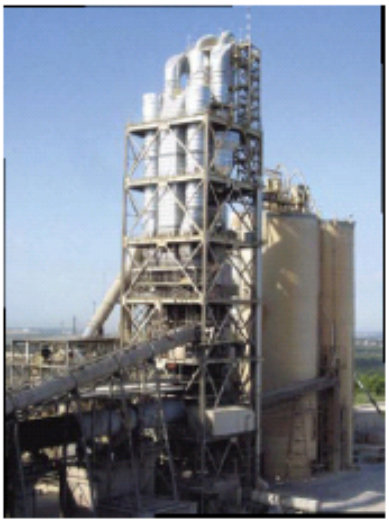
用于旋风预热器的低压损旋风筒

描述：旋风筒是窑尾预热器的基本单元，降低旋风筒的压力损失，可以有效地降低高温风机的载荷和电耗。

能源/环境/成本/其他收益：

- 取决于风机效率，0.66 到 0.77kWh/t熟料的线可以降低压损 50mm水柱。对于一些老厂来说，可以节约 0.66 到 1.1kWh/t熟料 [1]。
- 旋风筒的建设成本经常较高，因为将有可能会频繁的改造窑尾塔架，所以成本较高。
- 旋风筒需要配备回灰系统，因而需要在塔架上加装回灰设备。如果建有生料磨在附近的话可以减轻这个问题。
- 低压损预热器系统成本可能达到 3 美元每年每吨。
- 中国最好的技术引进自奥地利 [2]。

结构图或照片：



有旋风筒的新的预热器，位于 Alamo 水泥厂，圣安东尼奥，德克萨斯，美国。图片来源于 http://www.buzziunicem.it/contentsmulti/instance1/files/document/220ALAMOP34.pdf

案例研究：

- 1994 年Fujimoto在讨论Lehigh水泥厂的旋风筒改造时采用了在Iowa水泥厂使用了低压损结构，节省了 4.4kWh/t熟料 [3]。

---

[1] Birch, E. 1990. Energy Savings in Cement Kiln Systems Energy Efficiency in the Cement Industry (Ed. J. Sirchis), London, England: Elsevier Applied Science: 118-128.

[2] Cui, Y., 2004 and 2006. Personal communication with Prof. Cui Yuansheng, VP of the Institute of Technical Information for Building Materials Industry of China (ITIBMIC).

[3] Birch, E. 1990. Energy Savings in Cement Kiln Systems Energy Efficiency in the Cement Industry (Ed. J. Sirchis), London, England: Elsevier Applied Science: 118-128.

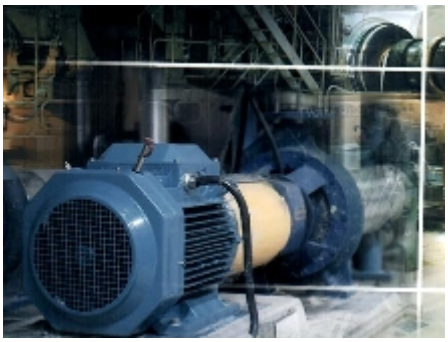
高效窑传动

描述：大量水泥厂都采用回转窑煅烧，通过带一个气动离合器和同步电机的单个齿轮传动来达到高效率的窑传动[1]。

能源/环境/成本/其他收益：

- 该系统可以略微降低窑传动的电耗，约 0.55kWh/t 熟料，相当于主要成本比例较小（6%）。
- 最近，交流电机逐步替代了直流电机，而交流电机可略提高效率（减少窑传动电耗 0.5-1%）以及较低的投资成本[2]。
- 替换旧电机可节约电力成本 2-8%。

结构图或照片：



高效窑传动，图片来源于 http://news.thomasnet.com/fullstory/4650

[1] Regitz, John. 1996. Evaluation of Mill Drive Options IEEE Transactions on Industry Applications 3 32: 653.

[2] Holland, M. 2001. AC DC Kilns, Proc. 2001 IEEE-IAS/PCA Cement Industry Technical Conference: 75- 84.

新式旋风预热预分解窑代替立窑

描述：新型干法技术已用于 1000t/d，2000t/d和 4000t/d的生产线[1]。新型干法技术还可以用于扩建或重建项目上，而一些小型立窑将被逐步淘汰。

能源/环境/成本/其他收益：

中国一些水泥厂熟料热耗达 5.4GJ/t熟料（184kgce/t熟料），而先进的预分解窑系统熟料热耗为 3GJ/t熟料（102kgce/t熟料），热耗降低 2.4GJ/t熟料（82kgce/t熟料）[2,3]。

至 2004 年底，中国投产 140 条新型干法生产线，其中 2004 年新建 50 条[4]。

结构图或照片：

有预热器和分解炉的回转窑，示例图片来源于中国某水泥厂。

案例研究：

- 琉璃河水泥厂采用了 5 级预热器及预分解炉结构，熟料烧成热耗为 3.011GJ/t熟料（102.8kgce/t熟料）[5]。

---

[1] Global Environment Institute (GEI). 2005. Financing of Energy Efficiency Improvement for Cement Industry in China. January.

[2] "Key" Chinese plants generally refer to large, centrally administered state-owned enterprises (Sinton, J.E., 1996. Energy Efficiency in Chinese Industry: Positive and Negative Influences of Economic System Reforms. PhD Thesis, University of California- Berkeley).

[3] Liu, F., M. Ross and S. Wang. 1995. Energy Efficiency of China's Cement Industry. Energy 20 (7): 669-681.

[4] Cui, Y., 2004 and 2006. Personal communication with Prof. Cui Yuansheng, VP of the Institute of Technical Information for Building Materials Industry of China (ITIBMIC).

[5] Institute of Technical Information for Building Materials Industry (ITIBMIC). 2004. Final Report on Cement Survey. Prepared for the United Nations Industrial Development Organization (UNIDO) for the Contract Entitled Cement Sub-sector Survey for the Project Energy Conservation and GHG Emissions Reduction in Chinese TVEs-Phase II. Contract no. 03/032/ML, P.O. No. 16000393, September 9.

立窑的烧成系统的改进

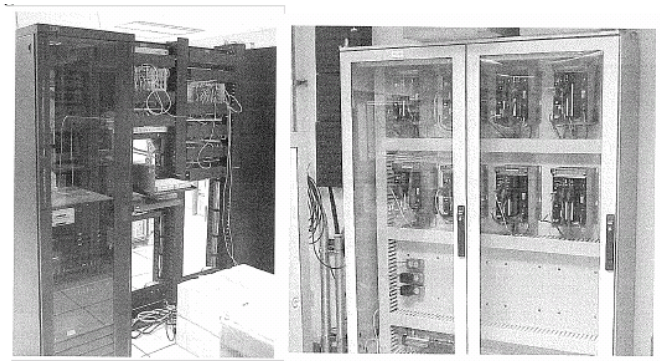
描述：燃料燃烧决定了窑的效率，低燃烧效率表现为大量CO生成。燃烧效率低的原因一般为：空气过量或空气不足，不均匀的空气分布或是燃料投入过多[1]。风机能力不够或者漏风，都会造成燃烧效率低。改进空气分布则依赖于高质量的生料球和精确的窑操作。复杂的立窑已实现喂料和卸料自动化，但有些老的立窑还需人工完成[2]。煤粉输送过量常常是因为输送浓度过高。在低温缺氧情况下，煤与CO_2反应产生CO。在“能耗管理和过程控制系统”一文中将进一步介绍关于自动化，喂料以及混合方面的技术。在中国，只有中小规模的窑采用立窑，大规模的生产线会使用引进技术。

在中国，国内的技术多用于中小型水泥厂；大型水泥厂大多采用从国外引进的技术。[3]

能源/环境/成本/其他收益：

- 回转窑的能耗节省在 2%到 10%。在 BEST Cement 中，我们假设这一数值和应用在立窑上的结果差不多。

结构图或照片：



由多个电脑控制的系统，改进窑的运行。来源于《波特兰水泥生产中的更新改造》，Bhatty, J. I., F. M. Miller和 S. H. Kosmatka编，波特兰水泥协会，2004。

---

[1] Venkateswaran, S.R. and H.E. Lowitt. 1988. The U.S. Cement Industry, An Energy Perspective, U.S. Department of Energy, Washington D.C., USA; Liu, F., M. Ross and S. Wang. 1995. Energy Efficiency of China’s Cement Industry. Energy 20 (7): 669-681.

[2] Liu, F., M. Ross and S. Wang. 1995. Energy Efficiency of China’s Cement Industry. Energy 20 (7): 669-681.

[3] Cui, Y., 2006. Personal communication with Prof. Cui Yuansheng, VP of the Institute of Technical Information for Building Materials Industry of China (ITIBMIC).

水泥磨的过程控制和管理

描述：将窑系统的控制系统应用于磨上也可以得到较好的效果。它可以控制磨和选粉机的风量，从而获得稳定的高质量的产品。目前有多家公司从事该控制系统的开发，早在1990 年代就可以买到专业的控制系统。

能源/环境/成本/其他收益：

- 可节能 3 到 3.5kWh/t
- 投资回收周期在 6 个月到 2 年之间 [1,2]
- 减少过程和质量的不稳定性
- 增加产量

结构图或照片：

来源：Spear, M.，《水泥的成功》，工艺工程，pp.27-28，2004。

案例研究：

- 在亚洲太平洋水泥厂，采用Rockwall粉磨自动优化控制系统优化圈流生料磨系统和水泥磨循环系统，使得粉磨电耗降低 3%，同时增加了产量，降低了风机和电机负荷，提高了产品质量 [3]。
- 在维吉尼亚Roanoke水泥厂，采用Pavilion过程控制系统应用于两台水泥磨，降低 3 到 3.5kWh/t电耗，还增加产量 3 到 4 吨每小时 [4]。
- 在Cemex Fairborn厂采用Pavilion控制系统，降低了 40%的系统过程不稳定性，降低产品质量不稳定性 30%，增产 2%，节约能耗 2%[5]。
- 在新西兰的Golden Bay水泥厂，Pavilion控制系统用于水泥磨，增产 3%，提高 50%稳定性，其投资回收周期小于一年 [6]。
- 1992 年在德国的Karlstadt水泥厂在水泥磨应用了专家系统，增加了产量并节约了能

---

[1] Martin, G. and S. McGarel. 2001a. Automation Using Model Predictive Control in the Cement Industry. Pavillion Technologies, Inc., Austin, TX (based on a paper published in International Cement Review, February: 66-67). Available at: http://www.pavtech.com/

[2] Albert, O., 1993. MCE – An Expert System for Mill Plant Control, Krupp Polysius, Germany

[3] Rockwell Automation, 2004. *Online Control at Major Cement Company in Asia Pacific Maximizes Throughput, Lowers Product Quality Variation to 30% and Reduces Specific Energy Consumption by 3%*. Pub No ELPPVP-AP-009A-EN-D

[4] Pavilion Technologies. “Easy as APC”.

[5] Lauer, D, Becerra, K., Deng, D.J, 2005. “Maximizing Mill Throughput,” *International Cement Review*.

[6] Spear, M., 2004. “Cementing Success,” *Process Engineering*, pp 27-28.

耗。其投资回收周期在 1.5 到 2 年 [7]。

- Magotteaux 从 1998 年开始进入控制系统市场，并在德国，希腊，南非和英国卖出了 6 套系统。
- 在英国South Ferriby水泥厂其水泥磨的经验为：增加产量 3.3%，节省能耗 3%，并能够减少优质产品的次品率 [8]。
- Krupp Polysius将其水泥磨控制系统PolExpert投入市场，其节能效率在 2.5 到 10%，产品质量和产量增加 2.5-10%[9]。
- 应用模型预测控制（神经网络）在南非某水泥厂的水泥球磨也得到了类似的结果 [10]。
- Pavilion技术公司（美国）利用神经网络开发了新型的控制系统，其报告称在水泥球磨上设置模型预测控制后增加产量 4-6%[11]。

---

[7] Albert, O., 1993. MCE – An Expert System for Mill Plant Control, Krupp Polysius, Germany.

[8] Van den Broeck, M., 1999. GO Control Goes ‘Multi-Circuit’ *International Cement Journal* 1, pp.35-37.

[9] Goebel, Alexander, 2001. Personal communication with Alexander Goebel, Krupp Polysius, Beckum, Germany, December 20th, 2001

[10] Martin, G. and S. McGarel. 2001a. Automation Using Model Predictive Control in the Cement Industry. Pavillion Technologies, Inc., Austin, TX (based on a paper published in International Cement Review, February: 66-67). Available at: http://www.pavtech.com/

[11] Martin, G., S. McGarel, T. Evans, and G. Eklund. 2001. Reduce Specific Energy Requirements while Optimizing NOx Emissions Decisions in Cement with Model Predictive Control, Personal Communication from Pavilion Technologies, Inc., Austin, TX, December 3.

用于水泥粉磨的立磨

描述：立磨是通过在水平磨盘上用铰链固定 2-4 个磨辊来施加压力和剪切力进行粉磨[1]。磨辊通过弹簧或者液压向下挤压磨盘上的原料，同时在粉磨过程中通过热风进行烘干[2]。

能源/环境/成本/其他收益：

- 能耗在 18.3 到 20.3kWh/t 熟料（相对于球磨的 30-42kWh/t 熟料，当然也取决于水泥的细度）
- 可允许原料最大水分 20%
- 产品粒度分布均匀

结构图或照片：

来源: http://www.cement.org/manufacture/man_vrm.asp

案例研究：

- 美国的一台立磨能耗 18.3kWh/t熟料，比球磨的 35.2kWh/t熟料节约了 16.9kWh/t熟料[3]。
- 德国Bosenberg水泥厂的一台生料磨采用带高效选粉机和四个磨辊的立磨，其电耗为11.45kWh/t生料（20.3kWh/t熟料）[4]。
- 以色列Ramla水泥厂在终粉磨阶段，用立磨代替了球磨，节能量为 10 千瓦时/吨水泥，设备使用寿命为 20 年[5]。

---

[1] Cembureau, 1997b. Best Available Techniques for the Cement Industry, Brussels: Cembureau; Alsop, P.A. and J.W. Post. 1995. The Cement Plant Operations Handbook, (First edition), Tradeship Publications Ltd., Dorking, UK

[2] Bhatty, J. I., F. M. Miller and S. H. Kosmatka (eds.), 2004. *Innovations in Portland Cement Manufacturing*. Skokie, IL: PCA.

[3] Simmons, M., Gorby, L., and Terembula, J., 2005. “Operational Experience from the United States’ First Vertical Roller Mill for Cement Grinding,” IEEE.

[4] Schneider, U., "From ordering to operation of the first quadropol roller mill at the Bosenberg Cement Works," *ZKG International*, No.8, 1999: 460-466.

[5] The United Nations Framework Convention on Climate Change (2008) CDM project documents available at: http://cdm.unfccc.int/Projects/DB/DNV-CUK1160716504.46/view

用于水泥粉磨的高压辊压机

描述：高压辊压机，其两磨辊之间的压力为 3,500bar，用它代替球磨可明显的提高粉磨效率 [1]。

能源/环境/成本/其他收益：

- 带有V型选粉机的辊压机电耗为 15.6kWh/t[2]
- 资料介绍辊压机的投资成本差别较大，从 2.5[3]美元每吨熟料产量每年到 3.6[4]美元每吨熟料产量每年到最高 8 美元每吨熟料产量每年 [5]。
- 辊压机的成本比其他系统都低，或者相近 [6,7]。
- 可以增加产量 20%，节省能耗 7 到 15%[8]。

结构图或照片：

The Bateman-KHD Roller Press.
来源: http://www.batemanengineering.com/Globe46/BATEMAN_gets_KHD_roller-press_agency.htm

案例研究：

- 在Coplay水泥厂 1 线采用高压辊压机增加产量 70 短吨每小时，节省能耗 30%或是 15kWh/t，节省运行成本 500,000 美元每年 [9]。

---

[1] Seebach, H.M. von, E. Neumann and L. Lohnherr, 1996. State-of-the-Art of Energy-Efficient Grinding Systems *ZKG International* 2 **49** pp.61-67.
[2] Bhatty, J. I., F. M. Miller and S. H. Kosmatka (eds.), 2004. *Innovations in Portland Cement Manufacturing*. Skokie, IL: PCA.
[3] Holderbank Consulting, 1993. Present and Future Energy Use of Energy in the Cement and Concrete Industries in Canada, CANMET, Ottawa, Ontario, Canada.
[4] Kreisberg, A., 1993. Selection and Application of Roller Press for Raw Meal Preparation at Alpena, *Proc. KHD Symposium '92, Volume 1, Modern Roller Press Technology*, KHD Humboldt Wedag, Cologne, Germany.
[5] COWIconsult, March Consulting Group and MAIN. 1993. Energy Technology in the Cement Industrial Sector, Report prepared for CEC - DG-XVII, Brussels, April 1992.
[6] Kreisberg, A., 1993. Selection and Application of Roller Press for Raw Meal Preparation at Alpena, *Proc. KHD Symposium '92, Volume 1, Modern Roller Press Technology*, KHD Humboldt Wedag, Cologne, Germany
[7] Patzelt, N., 1993. Finish Grinding of Slag, *World Cement* 10 **24** pp.51-58
[8] Bhatty, J. I., F. M. Miller and S. H. Kosmatka (eds.), 2004. *Innovations in Portland Cement Manufacturing*. Skokie, IL: PCA.
[9] Conroy, G.H., “Experience of the High Pressure Roller Press Installation at CoplyCement’s Nazareth I Plant,” *Cement Industry Technical Conference*, 1989. XXXI.

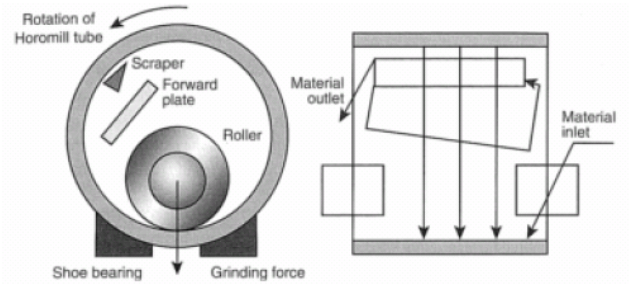
用于水泥粉磨的筒辊磨

描述：筒辊磨最早于 1993 年在意大利设计完成[1]，在一个圆筒内水平磨辊被驱动。圆筒的转动产生离心力，导致圆柱内壁形成均匀的布料层。料层通过磨辊被粉磨（压力为 700-1000bar）[2]。出磨产品还需经过收尘器。

能源/环境/成本/其他收益：

- 相对于球磨，水平辊磨用于水泥磨可节省能耗 35%到 40%，用于生料磨则可达 50%[3]。
- 下面是部分业主提供的使用数据[4]：
  - 普通波特兰水泥：球磨 30kWh/t，筒辊磨 19.5 kWh/t
  - 火山灰或石灰石水泥：球磨 30kWh/t，筒辊磨 16.5kWh/t
  - 生料：球磨 14kWh/t，筒辊磨 7kWh/t
- 水平辊磨可以用于水泥终粉磨，只需较低的投资成本。
- 带入一些新的粉磨理念，运行成本可降低 30-40%[5]。

结构图或照片：



图片来源于《波特兰水泥生产中的更新改造》，Bhatty, J. I., F. M. Miller和 S. H. Kosmatka编，波特兰水泥协会，2004。

案例研究：

- 自从第一台筒辊磨在意大利被设计出后，这种概念还被引入德国[6]，墨西哥，捷克和土耳其[7]。
- 在土耳其使用筒辊磨用于水泥粉磨的电耗为 20.07kWh/t[8]。

---

[1] Buzzi, S. 1997. Die Horomill® - Eine Neue Mühle für die Feinzerkleinerung, ZKG International 3 50: 127-138.

[2] Marchal, G. 1997. Industrial Experience with Clinker Grinding in the Horomill *Proc.1997 IEEE/PCA Cement Industry Technical Conference XXXIX Conference Record*, Institute of Electrical and Electronics Engineers: New Jersey.

[3] Bhatty, J. I., F. M. Miller and S. H. Kosmatka (eds.), 2004. *Innovations in Portland Cement Manufacturing*. Skokie, IL: PCA.

[4] fcb.ciment. *The New Generation of Horomill Gets the Benefit of Mechanical Optimization*. http://www.fcb-ciment.com/en/cement/horomill_0.asp

[5] Sutoh, K., M. Murata, S. Hashimoto, I. Hashimoto, S. Sawamura and H. Ueda, 1992. Gegenwärtiger Stand der Vormahlung von Klinker und Zement-rohmaterialien nach dem CKP-System, *ZKG* 1 **45** pp.21-25

[6] Buzzi, S. 1997. Die Horomill® - Eine Neue Mühle für die Feinzerkleinerung, ZKG International 3 50: 127-138.

[7] Duplouy, A. and J. Trautwein. 1997. Umbau und Optimierung der Drehofenanlagen im Werk Karsdorf der Lafarge Zement Gmbh. ZKG International 4 50: 190-197.

[8] Bhatty, J. I., F. M. Miller and S. H. Kosmatka (eds.), 2004. *Innovations in Portland Cement Manufacturing*. Skokie, IL: PCA.

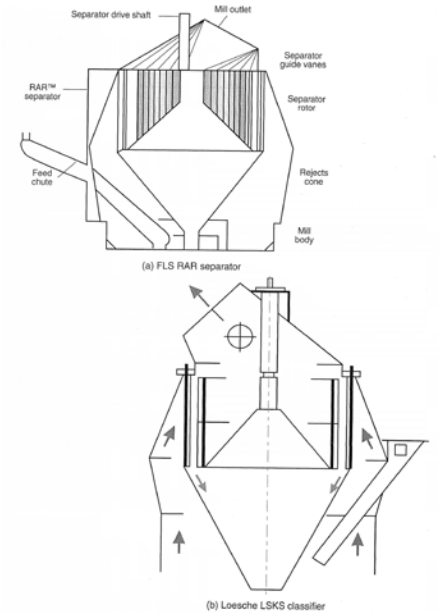
用于水泥粉磨的高效选粉机

描述：最近的提高粉磨效率的方法有一种是采用高效选粉机。选粉机可将细粉从粗粉中分离出来，粗粉将返回磨机。普通选粉机分离效率低，一些细粉重新入磨，导致过粉磨，从而增加了磨机的电耗。高效选粉机恰恰解决了这一问题，它有效的提高了产品质量并且降低了电耗。新设计的高效选粉机将进一步提高分离效率，并减少用风量（从而降低电耗）。

能源/环境/成本/其他收益：

- 在英国进行的一项高效选粉机试验表明，安装该装置后可降低电耗 7kWh/t并增加产量 25%[1]。
- 有研究表明该技术可降低电耗 8%（6kWh/t）[2]，而另一项研究则估计为 1.9-2.5kWh/t[3]。
- 实际的节能效果将取决于工厂运行，水泥种类和所需的水泥细度。

结构图或照片：



立磨中的高效选粉机。来源于《波特兰水泥生产中的更新改造》，Bhatty, J. I., F. M. Miller和 S. H. Kosmatka编，波特兰水泥协会，2004。

案例研究：

- 在法国Origny-Rochefort水泥厂安装高效选粉机后节省电耗 0-6kWh/t[4]，节约投资成本 2 美元每年每吨水泥 [5]。

---

[1] Parkes, F.F., 1990. Energy Saving by Utilisation of High Efficiency Classifier for Grinding and Cooling of Cement on Two Mills at Castle Cement (Ribblesdale) Limited, Clitheroe, Lancashire, UK, *Energy Efficiency in the Cement Industry* (Ed. J. Sirchis), London, England: Elsevier Applied Science.

[2] Holderbank Consulting. (1993). “Present and Future Energy Use of Energy in the Cement and Concrete Industries in Canada,” CANMET, Ottawa, Ontario, Canada.

[3] Salzborn, D. and A. Chin-Fatt, 1993. Operational Results of a Vertical Roller Mill Modified with a High Efficiency Classifier *Proc. 35th IEEE Cement Industry Technical Conference*, Toronto, Ontario, Canada, May 1993; Süssegger, A., 1993. Separator-Report '92 Proc. KHD Symposium '92, Volume 1 Modern Roller Press Technology, KHD Humboldt Wedag, Cologne, Germany.

[4] Van den Broeck, M., 1998. A SD100 Sturtevant High-Efficiency Classifier for Origny-Rochefort, *International Cement Journal* 2 pp.39-45.

[5] Holderbank Consulting, 1993. Present and Future Energy Use of Energy in the Cement and Concrete Industries in Canada, CANMET, Ottawa, Ontario, Canada.

- 印度Birla有限公司的Satna水泥厂优化了选粉机的设计，因此节省了 1.62 千瓦时/吨熟料，其成本为 7.8 卢比/吨熟料（即 1.3 元/吨熟料）。[6]

[6] The United Nations Framework Convention on Climate Change (2008) CDM project documents available at: http://cdm.unfccc.int/Projects/DB/SGS-UKL1175367790.14/view

改进的粉磨介质（球磨）

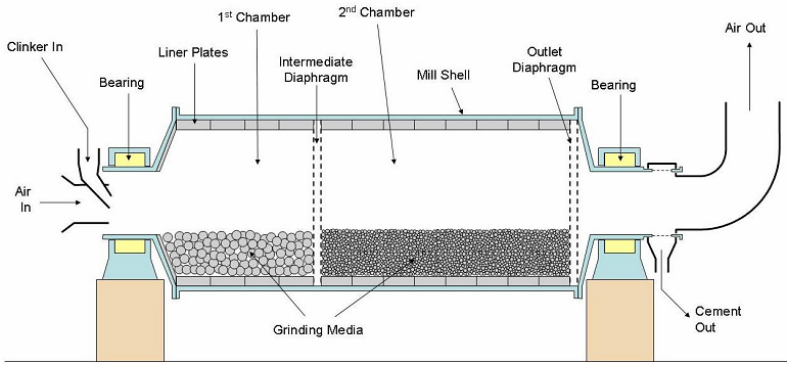
描述：改进的耐磨材料能作为粉磨介质，特别是在球磨里。通常根据材料的耐磨特性选择粉磨介质。增加球的填充量和粉磨介质的表面硬度以及磨衬的耐磨性能够降低磨损和能耗。改进的球和高铬钢衬板就是这种材料，但其它材料也可以[1]。其它改进措施有使用改进的衬板，如开槽的分级衬板。

能源/环境/成本/其他收益

- 改进的粉磨介质能使某些磨的能耗降低 5-10%，相当于节省 3-5kWh/t水泥[2]。

结构图或照片

水泥磨中的熟料和钢球，Castle Cement 免费提供，摘自 http://www.understanding-cement.com/mill.html。



球磨草图，摘自 http://en.wikipedia.org/wiki/Cement_mill。

---

[1] Venkateswaran, S.R. and H.E. Lowitt. (1988). "The U.S. Cement Industry, An Energy Perspective", U.S. Department of Energy, Washington D.C., USA.

[2] Venkateswaran, S.R. and H.E. Lowitt. (1988). "The U.S. Cement Industry, An Energy Perspective", U.S. Department of Energy, Washington D.C., USA.

高效电机和传动装置

描述：电机和传动装置被用来驱动风机（预热器、篦冷机、碱旁路），回转窑，输送原料，以及最主要用于粉磨。一个典型水泥厂需要 500-700 台电机，功率从几kW到几MW[1]。回转窑的电耗（不考虑粉磨）约为 40-50kWh/t熟料。变速传动装置，改进的控制策略和高效电机能降低水泥窑的电耗[2]。在不影响生产运行的情况下，电机可在任何时间进行替换。但电机通常是重新布线而不是用新电机替换。

能源/环境/成本/其他收益

- 根据各个厂的情况，节电通常为 3-8%[3,4]。
- 根据美国能源部的一个分析，高效电机替换所有风机系统现有电机的平均成本为 $0.22/年吨水泥能力[5]。

结构图或照片

高效电机，图片来自 http://news.thomasnet.com/fullstory/4650。

---

[1] Vleuten, F.P. van der. 1994. Cement in Development: Energy and Environment Netherlands Energy Research Foundation, Petten, The Netherlands.

[2] Heijningen, R.J.J., J.F.M. Castro, and E. Worrell (eds.), 1992. Energiekentallen in Relatie tot Preventie en Hergebruik van Afvalstromen, NOVEM/RIVM, Utrecht/Bilthoven, The Netherlands.

[3] Fujimoto, S., 1994. Modern Technology Impact on Power Usage in Cement Plants, IEEE Transactions on Industry Applications, Vol. 30, No. 3, June.

[4] Vleuten, F.P. van der. 1994. Cement in Development: Energy and Environment Netherlands Energy Research Foundation, Petten, The Netherlands.

[5] Bösche, A., 1993. “Variable Speed Drives in Cement Plants,” *World Cement* 6 **24** pp.2-6 (1993).

调速或变速传动装置

描述：传动装置在水泥生产中电耗最大。通过减少能量损失或提高电机效率可以提高传动系统的能效[1]。大部分电机是定速交流模式，但电机系统通常运行在部分载荷或变负荷情况下[2]。同时，水泥厂中有大的负载变化。调速传动（ASDs）主要用于回转窑风机、篦冷机、预热器、选粉机和磨机。

能源/环境/成本/其他收益

- 通过安装 ASD，减少节流可减少系统能量损失和耦合损失。
- ASD越来越多的用于水泥厂[3,4]，但应用差异很大，取决于电力成本。
- ASDs用于篦冷机风机的回报很低，即使节能是唯一的理由[5]。
- ASD各种应用取得的节能效果由其它地方提供[6]。节能取决于流型和载荷。节能强烈依赖于安装ASD的应用和流型[7]，在7-60%变化。节能潜力估计为装机功率的15-44%，相当于 8kWh/t水泥。
- 单位成本强烈依赖于系统规模。超过 300kW的系统成本约为 70ECU/kW（75US$/kW），30-300kW的系统为 115-130 ECU/kW（120-140US$/kW）[8]。根据这些估计成本，一个现代水泥厂的成本约为$0.9-1.0/年吨水泥能力[9]，其它约$0.4-3/年吨水泥能力[10,11]。

---

[1] Nadel, S., M. Shepard, S. Greenberg, G. Katz and A. de Almeida, 1992. Energy Efficient Motor Systems: A Handbook on Technology, Program and Policy Opportunities, ACEEE, Washington, D.C., USA.

[2] Bösche, A., 1993. “Variable Speed Drives in Cement Plants,” *World Cement* 6 **24** pp.2-6 (1993).

[3] Bösche, A., 1993. “Variable Speed Drives in Cement Plants,” *World Cement* 6 **24** pp.2-6 (1993).

[4] Fujimoto, S., 1993. Modern Technology Impact on Power Usage in Cement Plants, Proc. 35th IEEE Cement Industry Technical Conference, Toronto, Ontario, Canada, May 1993.

[5] Holderbank Consulting, 1993. Present and Future Energy Use of Energy in the Cement and Concrete Industries in Canada, CANMET, Ottawa, Ontario, Canada.

[6] Worrell, E., J.W. Bode, J.G. de Beer, 1997. Energy Efficient Technologies in Industry - Analysing Research and Technology Development Strategies - The 'Atlas' Project, Department of Science, Technology & Society, Utrecht University, Utrecht, The Netherlands.

[7] Holderbank Consulting, 1993. Present and Future Energy Use of Energy in the Cement and Concrete Industries in Canada, CANMET, Ottawa, Ontario, Canada.

[8] Worrell, E., J.W. Bode, J.G. de Beer, 1997. Energy Efficient Technologies in Industry - Analysing Research and Technology Development Strategies - The 'Atlas' Project, Department of Science, Technology & Society, Utrecht University, Utrecht, The Netherlands.

[9] Bösche, A., 1993. “Variable Speed Drives in Cement Plants,” *World Cement* 6 **24** pp.2-6 (1993)

[10] Holland, M., H. M. Seebach, M., and Ranze, W., 1997. Variable Speed Drives for Roller Presses. *Proc.1997 IEEE/PCA Cement Industry Technical Conference XXXIX Conference Record*, Institute of Electrical and Electronics Engineers: New Jersey.

[11] Holderbank Consulting, 1993. Present and Future Energy Use of Energy in the Cement and Concrete Industries in Canada, CANMET, Ottawa, Ontario, Canada.

结构图或照片

水泥回转窑和磨机的变速传达装置，图片摘自
http://fp.is.siemens.de/cement/en/Solutions/Drives_ID.htm

案例研究：

- Blue Circle's Bowmanville plant (加拿大)安装了变速空气进口风机，减少了回转窑的电耗和燃料消耗（因为减少了进口的空气量），节省能源成本C$75,000/年（约US$47,000）[12]。
- 一个现代水泥厂的潜在应用约为装机功率的 44%[13]。
- 估算表明与节流阀原料磨风机相比可节省 70%（或者与常规系统相比节省 37%），尽管现实中节省 70%是无法实现的 [14,15]。
- Lafarge Canada's Woodstock plant用ASDs取代ID后节省电耗 6kWh/t[16]。
- 联合国气候变化框架公约关于利用变频驱动器项目的报告 [17]。印度Chittorgarh公司的Chittor水泥厂的熟料冷却机，节能量为 0.08 到 0.17 千瓦时/吨熟料，其节能成本从 0.012 到 0.013 美元/吨熟料（即 0.09～0.1 元/吨熟料）。
- 印度 Chittorgarh 公司的生料磨排气风机，可节能量为 0.25 千瓦时/吨熟料（在 Birla 水泥厂）到 0.41 千瓦时/吨熟料（在 Chittor 水泥厂）。其成本分别为 0.026 美元/吨熟料和 0.023 美元/吨熟料（即分别为 0.2 和 0.18 元/吨熟料）。[17]
- 印度的 Birla 水泥厂的磨煤风机，可节约能源 0.11～0.21 千瓦时/吨煤，其成本为 0.024～0.030 美元/吨熟料（即 0.18～0.22 元/吨熟料）。[17]

---

[12] CIPEC, 2001. Blue Circle Cement Fires Up Energy savings at Ontario Plants, *Heads Up CIPEC* 5 **21** pp.1-2 (2001). Published by Office of Energy Efficiency, Natural Resources Canada, Ottawa, ON, Canada.

[13] Bösche, A., 1993. "Variable Speed Drives in Cement Plants," *World Cement* 6 **24** pp.2-6 (1993).

[14] Young, G. 2002. Personal communication from Gerald I. Young, Penta Engineering Corp., St. Louis Missouri, March.

[15] Bösche, A., 1993. "Variable Speed Drives in Cement Plants," *World Cement* 6 **24** pp.2-6 (1993)

[16] Fujimoto, S., 1994. Modern Technology Impact on Power Usage in Cement Plants, IEEE Transactions on Industry Applications, Vol. 30, No. 3, June.

[17] The United Nations Framework Convention on Climate Change (2008) CDM project documents available at: http://cdm.unfccc.int/Projects/DB/SGS-UKL1175340468.27/view

高效风机

介绍：风机应用于水泥厂预热器，冷却机和碱旁路的整个阶段。用高效风机取代旧的，低效率的风机，可以降低对电量的需求并提高效率。

能源/环境/成本/其他收益:

- 关于节能和成本的信息请参加下面的案例研究。
- 我们假设平均的节能量为 0.4 千瓦时/吨，其成本为 0.07 元/吨。

案例研究：

- 印度Chittorgarh 公司的Birla水泥厂更换了一个水泥磨上的排气风机，因此节约了 0.13 千瓦时/吨熟料的电量，其成本为 0.4 卢比/吨熟料（0.07 元/吨熟料）[1].
- 印度 Birla 有限公司的 Satna 水泥厂用高效风机取代了 一次风机，同时也在风机速度控制上运用了变频驱动面板。因此节省了 0.11 千瓦时/吨熟料，其成本为 0.26 卢比/吨熟料（即 0.045 元/吨熟料）。[1]
- Birla Vikas 水泥厂用高效风机取代了排气风机和一次风机，并在风机速度控制上运用了变压变频（VVVF）交流驱动器。因而节约了 0.65 千瓦时/吨熟料，其成本为 3.1 卢比/吨熟料（即 0.53 元/吨熟料）。[1]
- Birla Vikas 水泥厂也用高效风机和 VVVF 交流驱动器取代了其他三个风机，实现了节能 1.34 千瓦时/吨熟料，其成本为 4.2 卢比/吨熟料（即 0.73 元/吨熟料）。[1]
- Birla Vikas 水泥厂用更高效的风机取代了预热器风机，实现了节能 0.70 千瓦时/吨熟料，其成本为 3 卢比/吨熟料（即 0.5 元/吨熟料）。[1]
- Birla Vikas 水泥厂用高效风机和 VVVF 交流驱动变频器取代了低效的生料磨排风风机和循环风机，实现了节能 0.36 千瓦时/吨熟料，其成本为 1.4 卢比/吨熟料（即 0.25 元/吨熟料）。[1]

[1] The United Nations Framework Convention on Climate Change (2008) CDM project documents available at: http://cdm.unfccc.int/Projects/DB/SGS-UKL1175367790.14/view

空气压缩系统的维护

描述：缺乏维护会导致压缩效率下降和增加空气泄漏或压力波动，导致运行温度升高，湿度控制困难以及污染物增多。改进维护将减少这些问题和节能。正确的维护包括[1]：

- 保持压缩机和中间冷却面的清洁、无污染。堵塞的过滤器增加压损。通过检查和周期清洁，压损会维持很低。力求过滤器 10 年只有 1psig 压损。维修工作异常的过滤器能阻止污染物的进入，避免过早磨损。通常当压损超过 14-20kN/m^2 时要替换颗粒和润滑剂清除单元，整个系统每年都要检修。考虑增多并行过滤器，降低风速从而降低压损。
- 保持电机的润滑和清洁。电机冷却不好会导致电机温度和线圈电阻升高，从而缩短电机寿命，并增加能耗。压缩机润滑剂应每 2-18 个月进行更换并保证工作正常。
- 定期检查排水管并保持清洁。一些用户使自动冷凝排水装置一直处于半开状态以便连续排水，这将浪费能源，不应采用。应该安装简便压力驱动阀。清理并修复损坏装置而不是一直打开。一些自动装置如浮控开关或电动排水不会浪费空气。
- 维护压缩机的冷却机，确保干燥机得到最低的入口温度[2]。
- 检查皮带磨损并调整。好的经验是每运行 400 小时调整一次。
- 根据说明书替换润滑剂分离器。满载时，新旋转螺杆式压缩机的润滑剂分离器压损为 14-20kN/m^2，当增大到 70 kN/m^2 时应更换分离器[3]。
- 检查水冷系统的水质（pH 值和总溶解固体），流量和温度。根据说明书清理替换过滤器和热交换器。

能源/环境/成本/其他收益

- 过滤清洁的回报期通常小于 2 年[4]。空气压缩系统 2%的能耗降低归功于多次的过滤器更换[5]。
- 保持电机的良好润滑和清洁能避免腐蚀。
- 排水装置的检查维护的回报期通常小于 2 年[6]。
- 良好的系统级维护能带来约 15%的节省。

---

[1] Lawrence Berkeley National Laboratory (LBNL) and Resource Dynamics Corporation, 1998. Improving Compressed Air System Performance, a Sourcebook for Industry, prepared for the U.S. Department of Energy, Motor Challenge Program, Berkeley, CA: LBNL.

[2] Ingersoll Rand, 2001. Air Solutions Group—Compressed Air Systems Energy Reduction Basics, http://www.air.ingersoll-rand.com/NEW/pedwards.htm. June 2001.

[3] Lawrence Berkeley National Laboratory (LBNL) and Resource Dynamics Corporation, 1998. Improving Compressed Air System Performance, a Sourcebook for Industry, prepared for the U.S. Department of Energy, Motor Challenge Program, Berkeley, CA: LBNL.

[4] Ingersoll Rand, 2001. Air Solutions Group—Compressed Air Systems Energy Reduction Basics, http://www.air.ingersoll-rand.com/NEW/pedwards.htm. June 2001.

[5] Radgen, P. and E. Blaustein (eds.), 2001. Compressed Air Systems in the European Union, Energy, Emissions, Savings Potential and Policy Actions, Fraunhofer Institute for Systems Technology and Innovation, Karlsruhe, Germany.

[6] Ingersoll Rand, 2001. Air Solutions Group—Compressed Air Systems Energy Reduction Basics, http://www.air.ingersoll-rand.com/NEW/pedwards.htm. June 2001.

减少空气压缩系统的泄漏

描述：泄露是能源浪费的一个重要来源。维护糟糕的典型工厂的泄露率为空气总压缩能力的 20-50%[1]。泄露维护能将该数字减小到 10%以下。泄露量随着管道或设备的空的尺寸的变化而变化。

常见的泄露位置有连接处，软管，管道，接头，压力调节器，开口冷凝排水装置，关闭阀，管道接头，分离处以及螺纹密封。检查泄露的简单方法是在怀疑处洒肥皂水。检查泄露的最好方法是超声探测器，它能探测出与泄露有关的高频声响。确认后，泄露必须追踪、修复和确认。泄露检测和修复正在发展中。

能源/环境/成本/其他收益

- 整体上，修补泄露能够降低空气压缩系统年能耗的 20%[2]。
- 除了增加能耗，泄露会降低效率，减少产量，缩短设备寿命，导致额外维修费用和停工时间。更糟情况将导致不必要的压缩机能力增大。修复泄露能够避免这些问题。

---

[1] Ingersoll Rand, 2001. Air Solutions Group—Compressed Air Systems Energy Reduction Basics, http://www.air.ingersoll-rand.com/NEW/pedwards.htm. June 2001; Price, A. and M.H. Ross, 1989. Reducing Industrial Electricity Costs – an Automotive Case Study, The Electricity Journal. July: 40-51.

[2] Radgen, P. and E. Blaustein (eds.), 2001. Compressed Air Systems in the European Union, Energy, Emissions, Savings Potential and Policy Actions, Fraunhofer Institute for Systems Technology and Innovation, Karlsruhe, Germany.

降低空气压缩系统的入口空气温度

描述：降低入口的空气温度能够减少压缩机的能耗。在许多工厂，从建筑物外抽气可减低压缩机的入口空气温度。

能源/环境/成本/其他收益

- 吸入新空气的回报期为 2-5 年 [1]。
- 根据经验，每 3℃会节约 1%的压缩机能耗 [2]。
- 从建筑物外抽取冷空气，除节能外，压缩机的能力也增大了。
- 2%的成本节约相当于 3 年回收期。

案例研究：

- 美国工业加工部门研究表明抽吸外侧空气的平均回收期小于 17 年，但成本严重依赖于设备布置 [3]。

---

[1] Centre for the Analysis and Dissemination of Demonstrated Energy Technologies (CADDET), International Energy Agency, 1997b. Saving Energy with Efficient Compressed Air Systems, Maxi Brochure 06, Sittard, The Netherlands.

[2] Centre for the Analysis and Dissemination of Demonstrated Energy Technologies (CADDET), International Energy Agency, 1997b. Saving Energy with Efficient Compressed Air Systems, Maxi Brochure 06, Sittard, The Netherlands; Parekh, P., 2000. Investment Grade Compressed Air System Audit, Analysis, and Upgrade, In: Proceedings 22nd National Industrial Energy Technology Conference Proceedings. Houston, Texas. April 5-6: pp 270-279.

[3] Industrial Assessment Centers (IAC) (2005). Industrial Assessment Centers Database. Rutgers University, New Brunswick, New Jersey. http://iac.rutgers.edu/database/

空气压缩系统的压缩机控制

描述：控制的目的是关闭不必要的压缩机或除非必须不增加额外的压缩机。启动的单元应该满负荷运行。控制的位置也非常重要。降低和控制主要接收器下游的系统压力将减少 10%或以上的能耗 [1]。空气压缩系统的控制通常包括：

- 启/停是最简单的控制，可用于往复式或旋转螺旋式压缩机。对启/停控制，压缩机电机根据排放压力开/关，它适用于低负荷循环应用。频繁循环的应用将导致电机过热。
- 负载/空载控制，或常速控制，使电机一直运行，但排放压力足够时压缩机空载。在大部分情况下，空载的旋转螺旋式压缩机的能耗为满载的 15-35%[2]。
- 调制或节流控制以便使压缩机输出能满足外界的要求，主要是通过关闭入口阀控制进入的空气量。节流控制可用于离心式和旋转螺旋式压缩机。
- 单一主机序列系统控制通过监控系统压力控制每个压缩机在线或离线，关闭任何不需要的压缩机。
- 多主机控制是空气压缩系统的最新控制技术，通过控制器网络能够控制四个及以上压缩机，提供单个压缩机控制和系统控制 [3]。控制器共享信息，系统响应更快更准确。一个控制其作为起点，规范整个系统。这种方式是每个控制器运行在最高效率状态，通过最少的控制达到最好的系统压力 [4]。

能源/环境/成本/其他收益

- 精确控制每年节能 12%[5]。
- 开/停控制的典型回收周期为 1-2 年。
- 负载/空载控制的效率不高。
- 压缩机控制由运行/零/关方式变为变速控制每年可节能 8%[6]。
- 高级（多主机）压缩机控制可节能 3.5%[7]。
- 除节能外，控制措施可减少对已有压缩机的需求，从而可出售或作为备用，而且无需购买新压缩机即可扩充能力。降低运行压力也可以减少系统维护费用 [8]。
- 假定节省 12%的压缩空气量，成本将降低 US$0.25/t 水泥。

---

[1] Lawrence Berkeley National Laboratory (LBNL) and Resource Dynamics Corporation, 1998. Improving Compressed Air System Performance, a Sourcebook for Industry, prepared for the U.S. Department of Energy, Motor Challenge Program, Berkeley, CA: LBNL.

[2] Lawrence Berkeley National Laboratory (LBNL) and Resource Dynamics Corporation, 1998. Improving Compressed Air System Performance, a Sourcebook for Industry, prepared for the U.S. Department of Energy, Motor Challenge Program, Berkeley, CA: LBNL.

[3] Martin, N, E. Worrell, M. Ruth, L. Price, R.N. Elliott, A.M. Shipley, and J. Thorne (2000). Emerging Energy-Efficient Industrial Technologies. Lawrence Berkeley National Laboratory, Berkeley, California. LBNL-46990.

[4] United States Department of Energy (DOE) (1998). Improving Compressed Air System Performance - A Sourcebook for Industry. Office of Industrial Technologies, Washington, D.C.

[5] Radgen, P. and E. Blaustein (eds.), 2001. Compressed Air Systems in the European Union, Energy, Emissions, Savings Potential and Policy Actions, Fraunhofer Institute for Systems Technology and Innovation, Karlsruhe, Germany.

[6] Centre for the Analysis and Dissemination of Demonstrated Energy Technologies (CADDET), International Energy Agency, 1997b. Saving Energy with Efficient Compressed Air Systems, Maxi Brochure 06, Sittard, The Netherlands

[7] Nadel, S., R.N. Elliott, M. Shephard, S. Greenberg, G. Katz and A.T. de Almeida (2002). Energy-Efficient Motor Systems: A Handbook on Technology, Program and Policy Opportunities. American Council for an Energy-Efficient Economy, Washington, D.C.

[8] United States Department of Energy (DOE) (1998). Improving Compressed Air System Performance - A Sourcebook for Industry. Office of Industrial Technologies, Washington, D.C.

正确选择空气压缩系统的管道尺寸

描述：管道尺寸太小会引起压损，增加泄漏和生产成本。管道必须选择合理的尺寸以达到最优性能或满足当前压缩系统。

能源/环境/成本/其他收益

- 增大管道尺寸通常每年可节能 3%[1]，其它系统组件（如：过滤器，接头配件和软管）的合理尺寸可进一步节能。
- 根据该措施在其他行业的实施情况，我们估计节能成本为 0.5 美元每千瓦时节约 [2]。

---

[1] Radgen, P. and E. Blaustein (eds.), 2001. Compressed Air Systems in the European Union, Energy, Emissions, Savings Potential and Policy Actions, Fraunhofer Institute for Systems Technology and Innovation, Karlsruhe, Germany.

[2] Galitsky, C., E. Worrell and A. Radspieler of LBNL and P. Healy and S. Zechiel of Fetzer Vineyards. 2005. BEST Winery Guidebook: Benchmarking and Energy and Water Savings Tool for the Wine Industry. Berkeley, CA: Lawrence Berkeley National Laboratory, May, LBNL 3184.

空气压缩系统的热回收用于水加热

描述：空气压缩机电耗的 90%转化为热能。许多情况下，热回收单元可回收利用这部分热量的 50-90%，用来空间供热，过程加热，水加热，空气加热，锅炉水预热，干燥，清洁处理，热泵，或预热油燃烧器的抽送空气 [1]。能力为 0.05m3/s的压缩系统（满负荷）能提供约 50MJ/h(1.7kgce/h)的能量 [2]。空间加热的热回收与水冷压缩机不同，因为需要额外的热交换，所以废热温度很低，大水冷压缩机例外（见下文）。

能源/环境/成本/其他收益

- 回收期通常小于 1 年 [3]。
- 大水冷压缩机的典型回收效率为 50-60%[4]。
- 空间供热最多每年可节能 20%[5]。
- 保守估计成本为 2 年的回收期。

---

[1] Parekh, P., 2000. Investment Grade Compressed Air System Audit, Analysis, and Upgrade, In: Proceedings 22nd National Industrial Energy Technology Conference Proceedings. Houston, Texas. April 5-6: pp 270-279.

[2] Lawrence Berkeley National Laboratory (LBNL) and Resource Dynamics Corporation, 1998. Improving Compressed Air System Performance, a Sourcebook for Industry, prepared for the U.S. Department of Energy, Motor Challenge Program, Berkeley, CA: LBNL.

[3] Galitsky, C., S.C. Chang, E. Worrell, and E. Masanet (2005). Energy Efficiency Improvement and Cost Saving Opportunities for the Pharmaceutical Industry: An ENERGY STAR Guide for Energy and Plant Managers. Lawrence Berkeley National Laboratory, Berkeley, California. Report LBNL-57260.

[4] Lawrence Berkeley National Laboratory (LBNL) and Resource Dynamics Corporation, 1998. Improving Compressed Air System Performance, a Sourcebook for Industry, prepared for the U.S. Department of Energy, Motor Challenge Program, Berkeley, CA: LBNL.

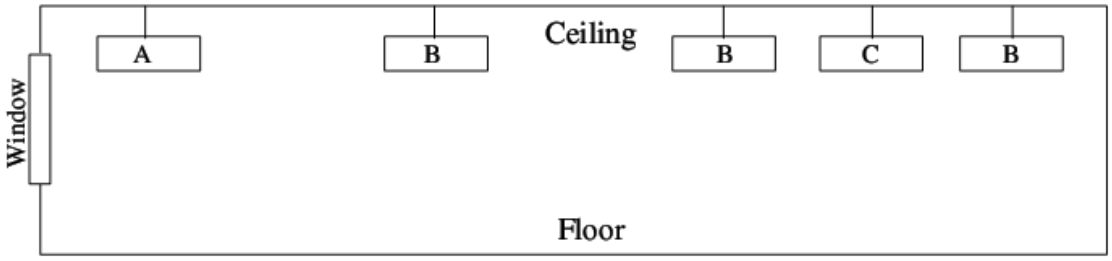
[5] Radgen, P. and E. Blaustein (eds.), 2001. Compressed Air Systems in the European Union, Energy, Emissions, Savings Potential and Policy Actions, Fraunhofer Institute for Systems Technology and Innovation, Karlsruhe, Germany.

厂区照明的控制

描述：非工作时间可由自动控制将灯关闭，如通过占用传感器（occupancy sensors）将灯关闭。美国的大量研究表明占用传感器（occupancy sensors）的平均回收周期约为 1 年 [1]。此外在小范围内也可手动控制以进一步节能。

在小范围内，手动控制联合自动控制可进一步节能。最简单的方法是安装开关以便使占用者控制照明。其它控制包括室内外灯光的日光控制，它利用日光进行控制。高效灯光控制如图 1 所示，车间内有 5 排吊灯。白天窗户提供充足阳光，只需要将C排灯打开。阳光不足时，B排灯全部打开，C排关闭。只有在黑夜或非常暗的时候才需将A、B排全部打开 [2]。这些方法也可用于调整已有的照明设施。如打开离窗户最远的灯。

图 1：灯的位置和控制



能源/环境/成本/其他收益

- Occupancy 传感器可最多节约照明能耗 10-20%[3]。
- 照明控制系统的回收期通常小于 2 年。

---

[1] Industrial Assessment Centers (IAC) (2005). Industrial Assessment Centers Database. Rutgers University, New Brunswick, New Jersey. http://iac.rutgers.edu/database/

[2] Cayless, M. A. and A. M. Marsden (Eds.) (1983). Lamps and Lighting. Edward Arnold, London, England.

[3] Galitsky, C., S.C. Chang, E. Worrell, and E. Masanet (2005a). Energy Efficiency Improvement and Cost Saving Opportunities for the Pharmaceutical Industry: An ENERGY STAR Guide for Energy and Plant Managers. Lawrence Berkeley National Laboratory, Berkeley, California. Report LBNL-57260.

厂区照明用 T-8 灯管代替 T-12 灯管

描述：许多工业设备都是用 T-12 灯管，其直径为 12/8 英寸（3.8cm）（T 表示以 1/8 英寸变化的灯管）。这些灯初期很亮，但能耗也高。它们效率很低，寿命短，亮度衰减很快且颜色变化。因此维护和能耗都很高。T-8（灯管直径较小，1 英寸或 2.54cm）能提高效率。

能源/环境/成本/其他收益

- 用 T-8 代替 T-12，效率可提高约一倍。
- T-8 的使用寿命比 T-12 长约 60%。
- 估计节能 15%，成本 US$0.25/t 水泥。

用金属卤化物或高压钠灯替代汞灯

描述：金属卤化物替代汞灯可提高效率，改善颜色再现性和增强亮度等级。当颜色再现性和亮度不重要时，高压钠灯更节量。

能源/环境/成本/其他收益

- 当颜色再现性很重要时，金属卤化物替代汞灯或荧光灯可节能 50%[1]。
- 当颜色再现性不重要时，与汞灯相比，高压钠灯可节能 50-60%[2]。
- 照明电耗降低 4%的成本约为 US$0.1/t 水泥。

[1] Price, A. and M.H. Ross, 1989. Reducing Industrial Electricity Costs – an Automotive Case Study, The Electricity Journal. July: 40-51.

[2] Price, A. and M.H. Ross, 1989. Reducing Industrial Electricity Costs – an Automotive Case Study, The Electricity Journal. July: 40-51.

用高强度荧光灯代替高强度放电金属卤化物灯

描述：传统高强度放电（HID）灯可用高强度荧光灯代替，它结合了高效荧光灯、电子镇流器和高效装置，从而使生产最大化。

能源/环境/成本/其他收益

- 新系统的优势很多：能耗低，衰减慢，减光选项好，启动快，颜色再现性好，瞳孔流明率高，不刺眼 [1]。
- 高强度荧光灯比标准金属卤化物 HID 节能 50%。
- 减光控制不适用于金属卤化物 HID，因此可进一步节能。
- 系统改造费用约为$185/套，包括安装费 [2]。
- 除了节能和更好的照明外，高强度荧光灯可提高生产力，降低维护成本。
- 节能 20%的成本估计为 US$0.16/t 水泥。

---

[1] Martin, G., T. Lange, and N. Frewin. 2000. Next Generation Controllers for Kiln/Cooler and Mill Applications based on Model predictive Control and Neural Networks, Proceedings IEEE-IAS/PCA 2000 Cement Industry Technical Conference, Salt Lake City, UT, May 7th – 12th.

[2] Martin, G., T. Lange, and N. Frewin. 2000. Next Generation Controllers for Kiln/Cooler and Mill Applications based on Model predictive Control and Neural Networks, Proceedings IEEE-IAS/PCA 2000 Cement Industry Technical Conference, Salt Lake City, UT, May 7th – 12th.

电子镇流器代替磁镇流器

描述：镇流器调节启动电流，提供稳定输出。新的电子镇流器代替旧的磁镇流器可以节能。

能源/环境/成本/其他收益

- 与磁镇流器相比，电子镇流器可节能 12-25%[1]。
- 与磁镇流器相比，新的电子镇流器能平滑安静减亮，寿命长（长 50%），启动迅速，冷运行 [2,3]。
- 新的电子镇流器能自动关闭当灯坏了或寿命到期了。
- 节能 8%的成本估计为 US$0.12/t 水泥。

---

[1] United States Environmental Protection Agency (U.S. EPA), 2001. "Green Lights Program (Part of the ENERGY STAR Program)," http://es.epa.gov/partners/green/green.html.

[2] Eley, C., T. M. Tolen, J. R. Benya, F. Rubinstein and R. Verderber (1993). Advanced Lighting Guidelines: 1993. California Energy Commission, Sacramento, California.

[3] Cook, B. (1998). High-efficiency Lighting in Industry and Commercial Buildings. Power Engineering
Journal. October: 197-206.

改变产品和原料：复合水泥

描述：复合水泥的生产包括熟料与一种或多种混合材（粉煤灰、火山灰、高炉矿渣）按不同比例混合粉磨。复合水泥长期强度较高，抗酸和硫酸盐的性能较好，同时利用了废弃物。但复合水泥的短期强度（7 天内）较低，尽管混合材少于 30%的凝结时间与普通波特兰水泥混凝土相当。

复合水泥很早就被使用。在欧洲复合水泥很常见，矿渣和火山灰水泥占水泥总量的 12%，波特兰复合水泥占 44%[1]。复合水泥引入美国是为了降低生产成本（特别是能耗），在不追加大量成本的前提下增大产能，降低排放。但在美国，复合水泥的生产和使用仍然受到限制。而在中国，波特兰普通水泥和波特兰矿渣水泥被广泛使用。此外，由于技术进步和市场对不同种类、等级水泥的需要，一些工业副产品，如高炉矿渣、粉煤灰、煤矸石、石灰石、沸石、火山灰以及天然矿石，都被广泛应用于水泥生产。在中国，水泥产品的混合材掺量平均为 24-26%[2]。

中国每年生产 25Mt高炉矿渣水泥，很早就开始利用这种废弃物，可替代约 20-25%的熟料，最高添加比为 50%。此外，高炉矿渣和熟料也被添加到混凝土中，粉煤灰在中国也被广泛使用 [3]。

能源/环境/成本/其他收益

- 不同混合材的价格差异很大，与位置、产量、市场需求、产品类型和处理方式有关。估计增产 10%的情况下可节省燃料至少 10%[4]。
- 复合水泥非常有吸引力，因为熟料和其它混合材一起粉磨不仅能减少熟料生产的能耗（和碳排放），同时也能减少分解过程中 CO_2 的排放。
- 对平均熟料/水泥为 65%的复合水泥，减少的熟料相当于节省燃料 1.42GJ/t水泥（48.5kgce/t水泥）。烘干高炉矿渣需要增加燃料消耗 0.09GJ/t水泥，但节能了用于旁路除碱的能量 0.2GJ/t水泥（7kgce/t水泥）。估计每个旁路节能 9-23 GJ/t水泥（0.3-7.1kgce/t水泥）[5]。旁路节能主要是由于复合水泥提供了额外的优势，破碎原料降低了碱硅的活性，从而降低了除去高碱飞灰的能耗。旁路节省还可避免预热器的堵塞，只需最小的旁路体积。这些措施最终导致节约燃料 1.4 GJ/t复合水泥（48kgce/t复合水泥）（0.9 GJ/t熟料或 31 kgce/t熟料，熟料/水泥比为 0.65）。但是电耗将会增加因为要粉磨炉渣（因为其它材料都或多或少足够细）。
- 使用混合材的成本差异很大。资金成本主要是用于混合材的存放。但高炉矿渣需要烘干，这可利用窑的废热或其它热源如发电汽轮机或空气加热炉在磨机内完成。运行成本节省与混合材的采购成本（包括运输），粉磨电耗的增加，熟料生产节约的燃料成本，生料粉磨和窑传动节省的电耗，以及节省的采矿处理成本等有关 [6]。它们与位置有关，需要根据具体情况进行评估。估计电耗增加 16.5kWh/t水泥（11kWh/t

---

[1] Cembureau, 1997b. Best Available Techniques for the Cement Industry, Brussels: Cembureau.

[2] Institute of Technical Information for Building Materials Industry (ITIBMIC). 2005. A Survey on the Chinese Market of Cement Admixtures for Holcim Company.

[3] Cui, Y., 2004 and 2006. Personal communication with Prof. Cui Yuansheng, VP of the Institute of Technical Information for Building Materials Industry of China (ITIBMIC).

[4] Institute of Technical Information for Building Materials Industry (ITIBMIC). 2005. A Survey on the Chinese Market of Cement Admixtures for Holcim Company.

[5] Alsop, P.A. and J.W. Post. 1995. The Cement Plant Operations Handbook, (First edition), Tradeship Publications Ltd., Dorking, UK

[6] To avoid disclosing proprietary data, the USGS does not report separate value of shipments data for “cement-quality” fly ash or granulated blast furnace slag, making it impossible to estimate an average cost of the additives.

熟料）[7]，投资成本$0.72/t水泥能力（$0.5/t熟料），主要是输送和存储能力（仓库和重量计量进料器）。

结构图或照片

复合水泥（中间：复合水泥，右下顺时针：波特兰水泥，粉煤灰，高炉矿渣，粘土粉，分解后的（烧过的）粘土，熟料，石膏），图片摘自 http://www.cement.org/tech/cct_cement_specifying.asp

案例研究：

- 中国广东连州水泥厂用CaO33-34%的石灰石替代高等级石灰石，同时使用附近地区的高硫铁含量的铜渣，可实现节约燃料 2.6-3.4GJ/t熟料（89-120kgce/t熟料），省煤超过 50%，熟料产量从 2t/天增至 14t/天，强度提高，质量稳定 [8]。

[7] Buzzi, S. 1997. Die Horomill® - Eine Neue Mühle für die Feinzerkleinerung, ZKG International 3 50: 127-138.

[8] Institute of Technical Information for Building Materials Industry (ITIBMIC). 2004. Final Report on Cement Survey. Prepared for the United Nations Industrial Development Organization (UNIDO) for the Contract Entitled Cement Sub-sector Survey for the Project Energy Conservation and GHG Emissions Reduction in Chinese TVEs-Phase II. Contract no. 03/032/ML, P.O. No. 16000393, September 9.

改变产品和原料：利用与废弃物有关的燃料

描述：废弃物燃料可替代传统燃料。在北美，替代燃料主要是轮胎及轮胎相关燃料。从1990年，30多家水泥厂被允许使用轮胎相关燃料，每年消耗约3500万只轮胎[1]。其它工厂使用固体、液体废弃物以及碎塑料。1999年，轮胎占全美水泥总燃料的5%，所有废弃物占总燃料的17%。通过在欧洲和北美对不同废弃物燃烧的成功试验，、废弃物利用的趋势正在增加。新的废弃物包括地毯，塑料，过滤物，油漆渣以及（脱水的）污泥[2]。水泥窑也处置有害废弃物，从20世纪90年代初，水泥窑每年处置约100万吨的有害废弃物[3]。

水泥窑是回收废弃物能量的有效途径。CO_2排放的减少取决于废弃物燃料含碳量以及利用的效率（如焚烧有无热回收）。高温，长停留时间能彻底地破坏所有有机成分，高效的粉尘过滤能有效地降低潜在排放危险[4]。

目前中国只有三家水泥厂燃烧废弃物：北京水泥厂年处理能力为1万吨（25种废弃物），能处理化工行业的固体废弃物，某些油漆，溶剂和水处理厂的污泥[5]。上海金山水泥厂处置黄浦江的污泥[6]。香港水泥厂从其它地区购买废弃物进行处理[7]。其它工厂也利用废弃物，但量非常小[8]。

能源/环境/成本/其他收益

- 废弃物处置的收益可降低生产成本，特别是对湿法窑。
- 废弃物燃料可替代常规燃料，节约能源，降低CO_2排放，它们取决于废弃物的利用（如焚烧有无热回收）。
- 处置固体、液体以及碎塑料能够降低运行成本[9,10,11]。
- 废弃物存储和燃烧器改造（如果需要）的投资成本估计为$1.1/年吨熟料。

---

[1] Cement Kiln Recycling Coalition (CKRC). 2002. Volume of Hazardous Wastes Used as Fuel in Cement Kilns Washington, D.C. Available at: http://www.ckrc.org/infocen.html.

[2] Hendriks, C.A., E. Worrell, L. Price, N. Martin and L. Ozawa Meida. 1999. The Reduction of Greenhouse Gas Emissions from the Cement Industry, IEA Greenhouse Gas R&D Programme, Cheltenham, United Kingdom (Report PH3/7), May.

[3] Cement Kiln Recycling Coalition (CKRC). 2002. Volume of Hazardous Wastes Used as Fuel in Cement Kilns Washington, D.C. Available at: http://www.ckrc.org/infocen.html.

[4] Hendriks, C.A., E. Worrell, L. Price, N. Martin and L. Ozawa Meida. 1999. The Reduction of Greenhouse Gas Emissions from the Cement Industry, IEA Greenhouse Gas R&D Programme, Cheltenham, United Kingdom (Report PH3/7), May; Cembureau, 1997b. Best Available Techniques for the Cement Industry, Brussels: Cembureau.

[5] Cui, Y., 2004 and 2006. Personal communication with Prof. Cui Yuansheng, VP of the Institute of Technical Information for Building Materials Industry of China (ITIBMIC); Wang, Xuemin, 2006a. Personal communication with Prof. Wang Xuemin of the Institute of Technical Information for Building Materials Industry of China (ITIBMIC). February.

[6] Cui, Y., 2004 and 2006. Personal communication with Prof. Cui Yuansheng, VP of the Institute of Technical Information for Building Materials Industry of China (ITIBMIC).

[7] Wang, Xuemin, 2006. Personal communication with Prof. Wang Xuemin of the Institute of Technical Information for Building Materials Industry of China (ITIBMIC). February.

[8] Wang, Xuemin, 2006. Personal communication with Prof. Wang Xuemin of the Institute of Technical Information for Building Materials Industry of China (ITIBMIC). February.

[9] Centre for the Analysis and Dissemination of Demonstrated Energy Technologies (CADDET), International Energy Agency. 1996. Tyres used as fuel in cement factory, Sittard, the Netherlands: CADDET.

[10] Gomes, A. S. 1990. Energy Saving and Environmental Impact in the Cement Industry, Energy Efficiency in the Cement Industry (Ed. J. Sirchis), London, England: Elsevier Applied Science: 23-26.

[11] Venkateswaran, S.R. and H.E. Lowitt. 1988. The U.S. Cement Industry, An Energy Perspective, U.S. Department of Energy, Washington D.C., USA.

结构图或照片

(a)利用废轮胎的水泥窑，图片来自 http://en.wikipedia.org/wiki/Portland_cement。(b)用作替代燃料的碎轮胎，图片来自 http://www.letsrecycle.com/do/ecco.py/view_item?listid=37&listcatid=317&listitemid=9464。

案例研究：

- 加拿大某水泥厂（The St. Lawrence Cement Factory in Joliette, Quebec）在 1994 年安装了轮胎自动喂料系统，从窑的中部喂入全部轮胎，可节能 20%[12]，相当于节能 0.6GJ/t水泥（20kgce/t熟料）。安装成本为$3.70/年吨熟料产能。简化喂料系统的成本为$0.11-1.1/年吨熟料。

[12] Centre for the Analysis and Dissemination of Demonstrated Energy Technologies (CADDET), International Energy Agency. 1996. Tyres used as fuel in cement factory, Sittard, the Netherlands: CADDET.

改变产品和原料：石灰石硅酸盐水泥

描述：与复合水泥相似，石灰石粉与熟料一起破碎生产水泥，减少对熟料生产和分解的需要。

能源/环境/成本/其他收益

- 该方法能够降低窑和熟料粉磨的能耗，降低 CO_2 的排放。
- 添加 5%的石灰石对波特兰水泥的性能没有负面影响，优化的石灰石水泥能够些微提高可用性 [1]。
- 添加 5%的石灰石能够减少燃料消耗 5%（平均 0.35GJ/t 熟料或 12kgce/t 熟料），降低粉磨电耗 3.3kWh/t 水泥，减少 CO_2 排放 5%。
- 附加成本很低，取决于原料的存储和分布，但可减少窑运行成本 5%。

[1] Detwiler, R.J. and P.D. Tennis. 1996. The Use of Limestone in Portland Cement: a State-of-the-Art Review, Skokie, IL: Portland Cement Association.

改变产品和原料：低碱水泥

描述：北美水泥行业生产的低碱水泥（市场份额约为 20-50%）比其它任何国家都多[1]。在美国的某些地区以及中国，总体情况是消费者或特殊气候地区（如，与北方的干燥气候相比，低碱水泥更适合中国南方的多雨天气）需要低碱水泥。降低碱含量通过排出（旁路）富含碱金属的热气和颗粒。旁路也可避免预热器的堵塞。这称为水泥窑飞灰（CKD）。CKD的排放根据物质守恒和循环定律（RCRA）。许多消费者要求低碱水泥，因为可更自由地选择集料。用粉煤灰或高炉矿渣作集料（或生产复合水泥，见下文）可降低对低碱水泥的需求。中国的低碱水泥采用了国产技术[2]。

能源/环境/成本/其他收益

- 低碱水泥能降低能耗。每旁路放风 1%可节省 8-21MJ/t（0.3-0.72kgce/t）[3]。较低的数据对应于预分解窑，高数字对应于预热器窑。
- 通常，旁路放风量占窑废气的 10-70%[4]。
- 水泥产量的增加导致电耗降低，因为 CKD 将成为熟料而非水泥，需进一步处理。
- 例如，旁路体积减少 20%将节能 0.19-0.5GJ/t 熟料（6.5-17kgce/t 熟料）。
- 无需投资。尽管水泥用户（如预混生产者）可能需要调整集料类型（可能需要成本）。所以这种措施最好协调预混生产者和其它大水泥客户实施。。

---

[1] Holderbank Consulting, 1993. Present and Future Energy Use of Energy in the Cement and Concrete Industries in Canada, CANMET, Ottawa, Ontario, Canada.

[2] Cui, Y., 2004 and 2006. Personal communication with Prof. Cui Yuansheng, VP of the Institute of Technical Information for Building Materials Industry of China (ITIBMIC).

[3] Alsop, P.A. and J.W. Post. 1995. The Cement Plant Operations Handbook, (First edition), Tradeship Publications Ltd., Dorking, UK

[4] Alsop, P.A. and J.W. Post. 1995. The Cement Plant Operations Handbook, (First edition), Tradeship Publications Ltd., Dorking, UK

改变产品和原料：使用钢渣

描述：Texas Industries (Midlothian, Texas, U.S.)在 1994 年开发了一套系统，使用钢铁企业的电弧炉（EAF）渣为原料，从而减少石灰石的使用。炉渣中的硫酸三钙（C_3S）比石灰石更容易转化为游离钙。炉渣替代石灰石（约为石灰石重量的 1.6 倍）。EAFs生产 0.055-0.21 吨炉渣/吨钢材（平均 0.12t/t）[1]。

中国没有自己的技术，目前这种方法也没在中国水泥厂实施，但是在国际上这是一种成熟技术 [2]。

能源/环境/成本/其他收益

- CemStar®工艺可以用钢渣替代 10-15%的熟料，减少分解的能耗。该工艺的优势是无需对钢渣粉磨，以 5cm 的小块加入回转窑。根据加入位置，可能会节约热能。
- 分解能估计为 1.9GJ/t熟料（65kgce/t熟料）[3]。
- 因为炉渣中的石灰早已煅烧，所以可以减少CO_2 的排放，从而降低燃烧能量和火焰温度，减少NOx的排放 [4]。
- 例如，10%的炉渣可减少能耗 0.19 GJ/t 熟料（65kgce/t 熟料），同时减少 CO_2 排放 11%。
- 湿法窑节能更多因为降低了蒸发热。NOx的减少量与窑型有关，在 9-60%[5]。
- 设备成本主要是原料处置，每套$200,000-500,000。
- 总投资约为设备成本的 2 倍。
- Texas Industries收取CemStar®的专利费 [6]。
- 成本节省包括不增加运行和能源成本的前提下熟料增产带来的收入，减少的铁矿石的成本（炉渣提供了孰料所需的部分铁）。铁含量需要用其它物质进行平衡，如橡胶和铁矿石。
- 1999 年，美国环保署授予 CemStar®工艺特殊荣誉作为 ClimateWise 计划的一步分。

---

[1] United States Department of Energy, Office of Industrial Technologies (U.S.DOE OIT). 1996. Energy and Environmental Profile of the U.S. Iron and Steel Industry, Washington, DC: U.S.DOE OIT.

[2] Cui, Y., 2004 and 2006. Personal communication with Prof. Cui Yuansheng, VP of the Institute of Technical Information for Building Materials Industry of China (ITIBMIC).

[3] Worrell, E., L. Price, N. Martin, C. Hendriks and L. Ozawa Meida. 2001. Carbon Dioxide Emissions from the Global Cement Industry, Annual Review of Energy and the Environment 26: 303-329.

[4] Battye, R., S. Walsh, J. Lee-Greco. 2000. NOx Control Technologies for the Cement Industry, Prepared for U.S. Environmental Protection Agency, Triangle Park, NC.

[5] Battye, R., S. Walsh, J. Lee-Greco. 2000. NOx Control Technologies for the Cement Industry, Prepared for U.S. Environmental Protection Agency, Triangle Park, NC.

[6] Battye, R., S. Walsh, J. Lee-Greco. 2000. NOx Control Technologies for the Cement Industry, Prepared for U.S. Environmental Protection Agency, Triangle Park, NC.