LBNL ####

ERNEST ORLANDO LAWRENCE
BERKELEY NATIONAL LABORATORY

水泥行业提高能效的机会

Ernst Worrell, Christina Galitsky and Lynn Price

劳伦斯伯克利国家实验室

环境与能源技术部

二〇〇八年一月

本工作得到了美国环保署气候保护合作伙伴事业部能源之星项目的支持，合同号为 DE-AC02-05CH11231。 本次面向中国的报告修订工作是在美国环保署国际事务办公室、美国能源基金会中国可持续能源项目和陶氏化学公司的资助下完成的。在此我们感谢美国环保署、美国能源基金会和陶氏化学公司在本次报告修订中给予的大力支持

免责声明

本文件编写工作由美国政府资助。同时，虽然本文件中的信息被认为是准确的，但是无论是美国政府或是其机构， 加州大学董事会或是其雇员都既不对文件的准确性，完整性，信息的有用性，仪器，产品，以及披露的过程，或是其使用不侵犯私有权进行明示或暗示的保障，也不负法律责任。此处提到的任何具体商业产品，过程或有商标名称，商标，制造商名的服务，并不一定构成或暗示美国政府或其机构，加州大学董事会的认可，推荐，或偏袒其使用。作者在这里表示的观点和意见，并不一定代表美国政府及其机构，或加州大学董事会。

劳伦斯伯克利实验室是一个机会均等的雇主。

水泥行业提高能效的机会

Ernst Worrell, Christina Galitsky and Lynn Price
劳伦斯伯克利国家实验室

环境与能源技术部

摘要

该报告阐述了在水泥行业应用的多项技术和措施以及实施这些措施所带来的节约能源、成本以及减少二氧化碳排放等方面的效果。这些技术和措施，既包括目前正在全世界水泥企业中应用的最新技术措施，也包括那些只在局部有限应用的、或已接近商业化的先进措施。

本报告主要侧重于利用成熟的商业化技术进行改造的措施，但其中许多技术已经应用于新工厂。在可能情况下，对于每一种技术或措施，将估计每吨水泥的生产成本减少和能源节约效果，还将计算二氧化碳减排量。对水泥窑节能机会的分析可分为适用于水泥不同生产阶段和适用于不同窑型的技术和措施：原料（和燃料）制备；熟料制备（适用于各种窑型，或只适用于回转窑，或只适用于立窑）；产品粉磨；以及可降低水泥熟料的能源消耗等管理措施。表 1 按工艺分类列出了各项措施，其中包括了工厂管理性措施。表 2～表 8 给出了每项技术的如下详细信息：吨水泥燃料和电能节约；吨水泥年运行成本和资金成本，或预计的投资回收期；每项措施实现的二氧化碳减排量。

这些信息的收集最初是为了形成一份关于美国水泥行业的报告（Worrell and Galitsky，2004）和形成一份关于中国水泥行业节能机会的报告（Price and Galitsky，2006）。本报告所提供的资料来源于公开发表的报告、期刊论文和国际上广泛应用的案例研究。

目录

前言 1
提高能效的机遇 1
原料制备 2
熟料制备——所有炉窑 7
熟料制备——回转窑 11
熟料制备——立窑 21
产品粉磨 23
全厂范围措施 26
全厂范围照明 32
产品和配料变化 33
感谢 39
参考文献 40

表

表 1. 水泥行业的能效措施和技术 2
表 2. 水泥厂中原料制备的能效措施 3
表 3. 适用于各种炉窑的能效机会 7
表 4. 适用于回转窑的能效机会 12
表 5. 适用于立窑的能效机会 22
表 6. 水泥厂产品终磨的能效措施。更多信息可以在下面的措施描述中找到: ... 24
表 7. 水泥厂全厂范围的能效措施。更多信息可以在下面的措施描述中找到 26
表 8. 在产品和配料变化方面的能效措施 34
表 9. 中国使用的各种添加剂的价格和运输方式 35

前言

这份报告为水泥行业在节约能源，成本和二氧化碳排放量减少的多项技术和措施实施方面提供适用的信息。这些技术和措施，既包括目前国际上水泥企业使用的最先进的措施，也包括正在市场化或试用的先进措施。报告主要着重在可用来进行旧厂改造的市场化的技术，但很多技术也适用于新厂。在可能的情况下，对每一个技术或措施的每吨水泥生产的成本和能源节约进行了估算，然后基于所采用的技术或措施计算了过程二氧化碳排放减少量。水泥窑节能机会的分析分为技术和措施，适用于在中国使用的不同生产阶段和各种窑型。生料（燃料）制备，熟料制备（适合各种窑型的，只适合回转窑的，只适合立窑的），产品粉磨，以及全厂规模的能降低熟料生成能耗的措施或原料和产品改变。

提高能效的机遇

表 1 中显示该报告中包括的分工艺能效措施以及通用措施。以下相关章节中有更详尽的分工艺能效措施的描述。

表 1. 水泥行业的能效措施和技术

原料制备	**适用所有炉窑**
高效输送送系统（干法）	改善耐火材料性能
原料预均化系统（干法）	减少窑表面热损失
立磨的过程控制优化（干法）	加强能源管理与过程控制
高效辊式磨（干法）	风机系统变频调速
高效分选机（干法）	
浆料混合和均化（湿法）	**立窑**
更换为闭路洗磨（湿法）	以 NSP 窑替代
燃料制备	改进窑燃烧系统
辊式磨用于燃料制备	
煤研磨滚压机	**回转窑**
产品粉磨	预热器窑升级为预分解窑
加强能源管理和过程控制	中空窑改为 NSP 窑
高压辊压机	旧干法长窑改为 NSP 窑
高效选粉机	替换为往复推动式篦冷机
改良研磨介质（球磨机）	改进窑燃烧系统
通用措施	
加强维护（绝缘，压缩空气系统，维修）	优化热回收/改造熟料冷却机
	加强密封
高效电机	低温余热发电（资金成本，单位为美元/千瓦）
电机系统变频调速	
优化压缩空气系统	高温余热发电
高效照明	低压损旋风筒
	高效窑传动
改进产品配比	
混合水泥	
废物衍生燃料的使用	
石灰石水泥	
低碱水泥	
钢渣在炉窑中的使用	

原料制备

表 2 显示了与原料制备（包括燃料制备）相关的每项节能措施所达到的燃料和电力节能量，以及预计的投资回收期和二氧化碳（CO_2）减排量。表下是对各项措施的描述。

表 2. 水泥厂中原料制备的能效措施

能效措施（原料生产）	燃料节约 (吉焦/吨)	节电量 (千瓦时/吨)	预计投资回收期（年）[1]	CO_2减排量（kgC/t）
高效输送系统（干法）	-	3.4	> 10 [1]	0.78
原料混预均化系统（干法）	-	1.7-4.3	NA [1]	0.4-1.0
立磨的过程控制优化（干法）	-	1.4-1.7	1	0.3-0.4
高效辊式磨（干法）		10.2-11.9	> 10 [1]	2.3-2.7
高效选粉机（干法）	-	4.8-6.3	> 10 [1]	1.1-1.4
浆料混合和均化（湿法）	-	0.5-0.9	< 3	0.1-0.2
带闭路选粉机的洗磨（湿法）		8.5-11.9	> 10 [1]	2.0-2.7
辊式磨用于燃料制备	-	0.7-1.1	NA [1]	0.2-0.3

注释:上述数据按每吨水泥计算。

[1] 回收期的计算只基于能源节约。在实际情况中，这种投资可能被能效以外的其它因素（例如，生产率和产品质量）所影响，而作为正常商业周期或扩建项目的一部分，可能碰到这些因素。在这些情况下，这项措施将具有更短的投资回收期，这将取决于工厂的具体条件。

NA ：数据不详。

高效输送系统（干法）。在整个工厂内，需要利用输送系统运送粉状物料，如入窑生料，窑灰和水泥成品等。这些物料通常利用气力或机械方式运输。使用机械输送，其能耗比气力输送系统低。根据 Holderbank（1993）资料，改用机械输送系统，平均单位节电量估计为 2.0 千瓦时/吨原料；该系统的安装成本约为 3 美元/吨原料。当需要更换输送系统来提高可靠性和减少停机时间时，改为机械输送具有成本有效性。

生料预均化（均化）系统（干法）。为了生产优质的产品，并维持窑中最佳和高效的燃烧状态，原料的充分均化是至关重要的。质量控制从采石场开始进行，并一直持续到均化库。用于控制原料混合比例的在线分析仪是质量控制系统的重要组成部分（Fujimoto，1993；Holderbank，1993）。

大多数工厂利用压缩空气搅动在空气流态化均化库内的粉状生料（每吨生料耗能 1.1～1.5 kWh）。旧式干法工艺厂使用机械系统，它同时以可变速率从 6～8 座不同的筒仓输出物料（Fujimoto，1993），每吨生料耗能 2.2～2.6 kWh。现代工厂利用重力式均化库（或连续混合及储存筒仓）来降低能耗。在这些筒仓中，物料向下漏到多个卸料点中的一处，在其倒锥筒中进行混合。重

力式均化库一般比空气搅拌系统的均化效率低。虽然大多数老厂使用机械或空气流化床系统，但由于节电效果很大，越来越多的新厂更倾向于使用重力式均化库（Holderbank，1993）。当库内可被充气箱分割为连续小空间时，如果又不想另外新建一座库，那么采用重力式连续均化库改造方案则更为合适（Gerbec，1999），改造带来的节能效果估计为 1.0-2.5 千瓦时/吨生料（Fujimoto，1993；Holderbank，1993；Alsop & Post，1995，Cembureau，1997b；Gerbec，1999）；改造的成本估计为 3.7 美元/吨原料（假设每个筒仓成本为 55 万美元、平均年产量为 15 万吨）。

生料过程控制（干法 - 立磨）。现有立磨存在的主要问题是振动跳闸。在高产量下运行时，人工操作难以保证平稳运行。当生料磨跳闸时，一小时内不能开机，直到电机绕组冷却。根据模型预测，多变量控制器使总供料达到最大化，同时维持目标残留量，并迫使振动的跳闸级处于安全范围。它的应用消除了可避免的振动跳闸（在应用该控制项目之前，每个月跳闸 12 次）；生产量增加 6%，相应的单位能耗降低 6%（Martin 和 McGarel，2001b），或 0.8～1.0 千瓦时/吨原料（基于 Cembureau，1997b）。

辊压机的应用（干法）。高效辊压机、与球磨机结合的辊压机联合粉磨系统或筒辊磨可替代用于研磨某些原料（主要是硬石灰石）的传统球磨机。应用这些先进的粉磨设备，既节约能源，又不影响产品质量。安装一台立式或筒辊磨估计可节约能源 6～7 千瓦时/吨原料（Cembureau，1997b）。在线立式辊式磨的另外一个优点是，通过使用来自窑或熟料冷却机的大量低品位余热，可以将原料干燥与研磨过程结合在一起（Venkateswaran and Lowitt，1988）。

1998 年，亚利桑那州的普通硅酸盐水泥厂（Rillito，美国亚利桑那州）安装了一台用于研磨原料的辊式磨，增加了生产能力、灵活性和生料细度，并降低了电力消耗（De Hayes，1999）。投资成本预计为 5.5 美元/吨原料（Holderbank，1993）。

高效选粉机/分离机。高效粉磨技术的最新进展是高效选粉机或分离机的使用。选粉机分开小颗粒和粗颗粒，然后大颗粒再循环返回至磨机。高效分选机在原料磨机和水泥成品磨机中都可以使用。

标准选粉机的分离效率一般较低，导致小颗粒循环，结果额外增加磨机电耗。已经开发制造出了不同概念的高效选粉机（Holderbank，1993；Süssegger，1993）。在高效选粉机中，物料的停留时间较长，能导致更清晰的分离，从而可以减少过粉磨。通过应用高效选粉机，估计可节约 8%的 单位用电量（Holderbank，1993）。

1990 年，Tilbury 水泥厂（Delta，加拿大不列颠哥伦比亚省）用高效选粉机改良了一台辊式磨，增加了产量并减少了用电量（Salzborn 和 Chin-Fatt，1993；Süssegger，1993）。应用实例表明能降低 2.8-3.7kWh/t 原料(Salzborn and Chin-Fatt, 1993; Süssegger, 1993).，通过高效选粉机替带传统选粉机，可增加生产能力 15%（Holderbank，1993）；而且由于生料和水泥具有更为均匀的粒度（Salzborn and Chin-Fatt，1993），还能改善产品性能。粒度分布更为均匀的生料，可节省熟料烧成的燃料，并提高熟料质量。根据 Holderbank（1993），投资成本估计为每年每吨原料 2.2 美元。

浆料混合和均化（湿法）。在湿法工艺中，浆料以间歇生产过程进行混合和均化，混合一般利用压缩空气和旋转搅拌器进行。由于较低的效率，使用压缩空气的能量损失较大。而高效混合系统，耗能量为 0.3～0.5 千瓦时/吨原料（Cembureau，1997b）。对于浆料混合系统，压缩空气系统是提高能效的潜力之所在（见下文全厂范围的措施）。

带有闭路分选机的洗磨（湿法）。在大多数湿法窑中，管磨机与闭路或开路分选机一起使用。高效管磨系统的耗电量约为 13 千瓦时/吨（Cembureau，1997b），利用洗磨更换管磨机，将减少 5～7 千瓦时/吨的电力消耗（Cembureau，1997b），而投资和运行费用与管磨系统差不多。当更换管磨机时，洗磨应被视为一种替代方法，可降低 5～7 千瓦时/吨，或 40～60%的电力消耗。

燃料制备

煤是水泥行业中使用最广泛的燃料。燃料制备大部分在厂内进行。燃料制备可包括煤的粉碎、粉磨和干燥。煤粉运输时是“湿的”，以防止运输期间形成粉尘和着火。通过将热气体输送到磨机中，将研磨和干燥两工艺过程结合起来。煤是水泥行业中使用最广泛的燃料，并且是中国大多数水泥窑的主要燃料。在各种类型的煤粉磨中，冲击式磨的平均能耗约为 45～60 千瓦时/吨，管磨机约为 25～26 千瓦时/吨（包括整个磨系统）（Cembureau，1997b）。一般情况下，窑系统（如熟料冷却机）的余热可用于煤的烘干。

辊式磨的其它优点是，它能够处理较大粒径和水分较高的煤，并且可以适应产量变化较大的工况。当然，对于磨蚀性较大的煤种应首选管磨机。目前，辊式磨是美国水泥行业中最常见的磨煤机，煤辊磨的生产能力可达到 5.5～220 吨/小时。1999 年，位于美国马里兰州联盟大桥的 Lehigh Portland Cement 厂安装了一台立式辊式磨，用于磨煤。Blue Circle 水泥厂已经订购一台立式辊式磨，安装到位于美国阿拉巴马州 Calera 的 Roberta 厂新建的 V 号生产线，其生产能力为 41.3 吨/小时，并在 2001 年初交付。辊式煤磨已应用于世界许多国家，例如：巴西，加拿大，中国，丹麦，德国，日本和泰国。所有主要水泥技术供应商都可以提供研磨煤粉的辊式磨设备。

辊式磨的电力消耗估计为 16～18 千瓦时/吨煤（Cembureau，1997b），其投资成本通常高于管磨机或冲击磨，但是，运行成本低于管磨机或冲击磨；大致估算，与管磨机相比，降低 20%，与冲击磨相比，降低 50%（Cembureau，1997b），估计节约 7～10 千瓦时/吨煤。

磨煤辊压机。就像用于水泥和生料研磨的磨机一样，辊压机通常比传统磨机的效率更高。尽管磨煤设备需要特殊的防爆保护，但辊压机可交替用于研磨原料和煤。

熟料制备——所有炉窑

所有炉窑可以适用的能效措施包括：改进耐火材料、减少窑表面热损失，加强能源管理和优化工艺过程控制系统，以及风机系统的变频调速等。虽然所有炉窑均可以通过改进燃烧系统来提高能效，但是我们把这项措施分为两种不同的措施，即分别针对回转窑和立窑，将在下面章节中进行详细阐述。对于各种类型的炉窑，能源管理和工艺过程控制措施的差别将在本节中予以解释。表 3 提供了如下信息：与上述每项措施相关的初始资金成本，运行和维护成本（O&M），简单投资回收期，单位燃料节约量，单位节电量，单位二氧化碳减排量和寿命周期。

表 3. 适用于各种炉窑的能效机会

	资金成本（$/t）	O & M 成本（$/t）	回收期（年）	燃料节约(吉焦/吨)	节电量(千瓦时/吨)	CO_2 减排（kgC/t）	寿命周期（年）
改进耐火材料	NA		NA	0.4-0.6[1]	-	10.3-15.5	NA
减少窑表面热损失	0.25		1	0.1-0.63[2]	-	2.8-10.3	20
能源管理和过程控制	0.3-1.7		< 2	0.1-0.2	1.5-3.2	2.9-5.9	10
窑风机系统变频调速	0.23	0	2-3	-	6.1	1.4	10

注释：节能量和成本基于来自美国的案例研究数据，特别注释的地方除外。在中国，成本将取决于技术和技术的可获得性。在下列描述中，我们已尽可能加入更多来自中国的数据。所有数据均基于每吨熟料。对于美国数据，估计的节约量和投资回收期基于了美国水泥行业的平均情况（例如，熟料与水泥之比）。

[1] 数据取自中国的案例研究

[2] 取自中国案例研究的数据表明，每吨熟料节能 0.46～ 0.63GJ，而来自美国的数据表明，每吨熟料可节能 0.1～ 0.4GJ。

NA = 数据不详

改进耐火材料。耐火材料保护钢制窑筒体免受热、化学和机械应力。耐火材料的选择取决于原料、燃料和操作条件的综合因素。使用高品质耐火材料，可延长使用寿命，减少炉窑大修期间的生产时间损失，从而抵消其较高的成本（Schmidt，1998；van Oss，2002）。同时由于缩短了点火时间，还能产生额外的能源节约效果。节能在很大程度上取决于炉衬的选择与运行管理，节能效果往往难以量化。

中国华南地区的一个立窑正在应用一种新的节能炉衬，可使燃料消耗量从 930～950 kcal/kg 熟料（3.9～4.0 吉焦/吨熟料）降低到 800～820 kcal/kg 熟料（3.4～3.5 吉焦/吨熟料），节能率约 14%（ITIBMIC，2004），每小时产量增加 1 吨。另一家在中国华北的立窑水泥厂，由于采用了节能炉衬，燃料使用量从 900～920 kcal/kg 熟料降低 到 800 kcal/kg 熟料（3.4 吉焦/吨熟料）（ITIBMIC，2004）。

用于水泥窑的耐火材料主要由在中国的外资公司制造，尤其是在辽宁省，如雷法 Refratechnik（德国）和奥镁 RHI（奥地利）（Cui，2006）。中国还生产许多中小型耐火材料，但其能源效率低于国际著名公司的产品（Cui，2006）。

减少窑表面热损失。水泥窑表面的热损失相当大，尤其是在燃烧区。使用较好的绝热耐火材料（如 Lytherm），可以减少热量损失（Venkateswaran and Lowitt，1988）。耐火材料的选择取决于耐火砖的绝热性以及形成和维持窑皮的能力。窑皮有助于减少热量损失，并保护燃烧区的耐火砖。预测显示，开发窑用耐火材料、高温保温衬里可以将燃料使用量减少 0.12～0.4 GJ/t 熟料（Lowes and Bezant，1990；COWIconsult，1993；Venkateswaran and Lowitt，1988）。保温系统的成本估计为每年每吨熟料 0.25 美元（Lesnikoff，1999）。但必须考虑，结构性因素可能限制新绝热材料的使用。使用改进的炉窑耐火材料也可以提高炉窑的可靠性，减少停机时间，降低生产成本，减少点火阶段的能源需求。

江苏省镇江市长江水泥厂对其立窑采用节能窑衬，可节约能源 0.46～0.63 GJ/t 熟料（ITIBMIC，2004）。除了上述节能效果，还可以增加产量。一般说来，这项技术都是从国外引进的（Cui，2006）。

能源管理和过程控制系统。非最佳工艺条件或过程管理而可造成炉窑的热损失。自动化电脑控制系统有助于优化燃烧过程。过程优化控制将有助于提改善产品的质量和易磨性（所制熟料的反应性和硬度），从而提高熟料粉磨的效率。世界各地的水泥厂采用了不同的控制系统，并由不同的厂商提供。许多现代化的系统使用了所谓的“模糊逻辑”或专家控制，或以规则为基础的控制策

略。专家控制系统没有使用模仿过程来控制工艺条件，而设法使用来自各个工艺阶段的信息来模拟最好的人工操作。

这样一种系统称为 ABB LINKman，最初由英国 Blue Circle 公司和 SIRA 开发（ETSU，1988）。1985 年，首套系统安装在 Blue Circle Hope Works，实现了约 8%的燃料节约量（ETSU，1988）。LINKman 系统已成功应用在回转窑中（不论是干法还是湿法）。在他们 1985 年首次应用后，现代控制系统获得了更广泛应用，目前已在欧洲许多工厂中使用。其他开发商还在销售“模糊逻辑”控制系统，例如 F.L. Smidth（丹麦），Krupp Polysius（德国）和三井矿山（日本）。中国的几家公司也为能源管理和过程控制提供优化的信息技术，如 ABB 或者中国云天软件公司（Wang，2006b）。

上述所有外国公司生产的控制系统，一般的节能率为 3%～8%，同时提高了炉窑的生产能力。例如，Krupp Polysius 认为典型的节能率为 2.5%～5%，同时增加了生成能力，以及耐火材料寿命延长了 25%～100%。Ash Grove 于 1999 年在 Durkee Oregon 厂实施了模糊控制系统。

专家系统或模糊逻辑系统的一种替代系统是模型预测控制系统，它以窑工艺的动态模型为基础。1999 年南非的一台窑安装了模型预测控制系统，减少了 4%的能源需求，同时提高了生产能力及熟料质量。即便南非煤炭价格通常很低，但该项目的投资回收期预计为 8 个月（Martin & McGarel，2001a）。

其它的过程控制系统，如在线分析仪，它允许操作员即时确定被处理原料的化学成分，从而了解原料混和过程中的实时变化。均匀供料可确保炉窑平稳运行，从而极大地节省燃料。Blue Circle 的 St. Marys 厂（加拿大）于 1999 年在其预分解窑上安装了一台在线分析仪，取得了较好的控制效果并节省了燃料。

外国生产的各种过程控制系统的节能范围为 2.5%～10%（ETSU，1988；Haspel and Henderson，1993；Ruby，1997），一般的节能率估计为 2.5%～5%。先进过程控制系统的经济效果非常好，投资回收期一般小于 3 个月（ETSU，1988）。Blue Circle Hope Works（英国）的控制系统共投资 20.3 万英镑（1987

年），相当于每年每吨熟料 0.3 美元（ETSU，1988），包括测量仪器、计算机硬件和培训。Holderbank（1993）指出，在线分析仪的装置成本为每年每吨熟料花费 0.8～1.7 美元。对于炉窑控制系统，投资回收期通常为 2 年或更短，而实际上往往可以实现更短的回收期（ETSU，1988；Martin and McGarel，2001a）。

熟料冷却机的过程控制可以有助于改善余热回收和物料生产能力，改进熟料中游离氧化钙的含量控制，并减少氮氧化物排放量（Martin et al.，2000）。安装（Pavilion 科技公司的）Process Perfecter®，可使冷却机的生产能力增加 10%，游离氧化钙减少 30%，并减少 5%的能耗，同时减少 20%的氮氧化物排放量（Martin et al.，1999；Martin et al.，2001）。装置成本相当于每年每吨熟料 0.35 美元，预计投资回收期为 1 年（Martin et al.，2001）。

立窑的燃烧控制比回转窑更困难，立窑中原料的流动是由一个机械式旋转横向轴来控制，它与垂直方向存在一个很小的角度，而不是恰好沿重力方向（Liu et al.，1995）。因此，在这些窑中，操作技能和适当的培训对能源效率和产品质量是非常重要的。要想实现自动控制系统的顺利运行，工厂必须将从矿山管理、原料入窑至燃料入窑的所有过程联系起来，以实现稳定生产；任何过程都不应当由手动完成（ITIBMIC，2004）。空气的输入一样需要控制。（关于 VSKs 炉窑燃烧系统改进和控制的更多信息，请参看下文熟料生产的能效机会——立窑中“炉窑燃烧系统改进”）。原料和燃料混合可按下列方式来改进：仔细分析其化学和物理特性，称重过程和成球生产（含水量和原料喂料混合物）、混合过程以及炉窑操作（优化空气流量，温度分布，进料和出料速度）的自动化。Cui（2006）认为，这项措施的大多数技术由国际公司完成，如西门子和 ABB；很少由国内公司来完成。

窑风机的变频调速。窑风机系统的调速控制（ASDs）可以减少电力消耗和减少维修成本。墨西哥 Cruz Azul 水泥公司的 Hidalgo 厂对窑尾风机使用调速控制后，改进了运行条件，提高了可靠性，而且，1000 马力的电机减少了大约 40%的用电量（Dolores and Moran，2001）。该厂之所以用调速控制系统替代节流

阀是因为遇到了控制和维护上的困难。由于不同的炉窑布局所匹配的风机系统布局也不同，因此，节能可能没有代表性。例如，Fujimoto（1994）指出，Lafarge 加拿大的 Woodstock 厂对其风机系统实施调速改造，用电量减少了 5.50 千瓦时/吨水泥（6.1 千瓦时/吨熟料）。拥有 10 个水泥企业的中立达集团（既有立窑也有新干法回转窑），在 40 台大型电机（功率超过 55kW）以及 40 多台小型电机（功率小于 55kW）中安装了调速系统，结果节能超过 30%（ITIBMIC，2004）。目前中国正在生产制造电机调速系统，但很多部件仍从德国或日本进口（Cui，2006）。

熟料制备——回转窑

对于回转窑，现有的预热器窑可以通过增加分解炉和附加预热器而改为预分解窑，现有的干法中空窑可改造为为多级预热器/预分解窑，其他老式的干法窑也可以升级为多级预热器/预分解窑。其他节能技术和措施包括窑炉燃烧系统的改进，往复式篦式冷却机，优化余热回收和升级熟料冷却系统，加强密封，实施低温余热发电和高温余热发电，用于悬浮预热器的低压损旋风筒，以及高效炉窑传动等。表 4 提供了下列方面的信息：与上述每项措施相关的初始资本费用，操作和维修（O&M）成本，简单投资回收期，单位节能量，单位节电量，单位二氧化碳减排量，以及项目措施的寿命周期。

预热器改为预热器/预分解窑。现有预热器窑可以通过增加一台分解炉，可能的话再增加一级预热器而转换为多级预热器/预分解窑。分解炉的增加通常能提高工厂的生产能力，同时降低单位燃料消耗量，并减少氮氧化物的排放量（由于分解炉中较低的燃烧温度）。为尽可能利用工厂现有的设施，各生产商已经开发了专门的分解炉，以对既有设备进行更新改造。例如，德国 KHD 开发的 Pyroclon®-RP。一般来说，在新厂中，可以继续使用既有的炉窑、基础和塔架，而冷却机和预热器则被更换。为了增加高产量所需的冷却能力，可能有必要更换冷却机。在意大利，在既有回转窑基础上的更新改造，生产能力增加了 80～100%（从 1100 吨/天增加至 2000～2200 吨/天），同时降低了燃料消耗量，从 3.6 降至 3.1～3.2 GJ/t 熟料，因而节约了 11～14%的燃料消耗（Sauli，

1993）。燃料节约在很大程度上取决于现有炉窑的效率以及新的工艺参数（例如，预分解的程度，冷却机的效率）。欧洲委员会（2000）估计，对于多级预热器/预分解窑，每吨熟料大约使用 3 GJ 热量。

表 4. 适用于回转窑的能效机会

	资本成本（$/t）	O & M 成本（$/t）[1]	回收期（年）	节燃料(吉焦/吨)	节电量(千瓦时/吨)[2]	CO_2 减排（kgC/t）	使用寿命(年)
预热器窑升级为预分解窑	9.4-28	-1.1	5	0.16-0.7		4.1-18.1	40
中空窑升级为预热器/预分解窑	8.6-29		> 10	1.4	-	36	40
旧干法窑升级为多级预热器窑	28-41		> 10	0.9	-	23	40
转换为往复篦式冷却机	0.4-5.5	0.11	1-2	0.27	-3.0	6.3	20
炉窑燃烧系统改进	1.0	0	2 – 3	0.1-0.5	-	2.6-12.9	20
间接燃烧	7.4		NA	0.015-0.022	-	0.39-0.57	NA
优化热回收/升级熟料冷却机	0.1-0.3		1-2	0.05-0.16	-2	0.8-3.7	20
更换密封	NA		≤ 0.5	0.011	-	0.3	NA
低温余热发电（资本成本，单位为美元/千瓦）	800-1250（$/kW）[3]	0.007	< 3	-	20-35	4.6-8.1	NA
高温余热发电	2.2-4.4	0.22-0.33	3	-	22	5.1	35
低压损旋风筒	3		> 10	-	0.7-4.4	0.16-1.0	20
高效炉窑传动	+0-6% [4]		NA	-	0.55-3.9	0.13-0.9	10

注释：节能量和成本基于案例研究数据。在中国，其成本将取决于技术和技术可获得性。如有可能，我们已在下列文字中包含更多来自中国的数据。所有数据均基于每吨熟料。对于美国数据，估计的节能量和回收期是基于美国水泥行业的平均情况（例如，熟料与水泥之比）。

[1] 负数表示运行和维护节约。

[2] 负数表示由于该措施导致的电力增加。

[3] 国产技术成本为每种投资 6000～10000 元人民币，比国外技术（每千瓦 16000～20000 元人民币）约少 10000 元人民币。我们使用来自中国案例研究的估算，来确定上表中的数值。

[4] 相对于标准的美国技术，额外所需的一次成本的百分数。

NA =数据不详

为了提高能源效率和减少氮氧化物的排放量，也可以对旧分解炉进行改造。Dyckerhoff Zement（德国）的 Lengerich 工厂于 1998 年改造了分解炉，结果削减了近 45%的氮氧化物排放量（Mathée，1999）。德国、意大利和瑞士也存在着类似的减排情况（Menzel，1997）。俄勒冈州 Ash Grove 的 Durkee 始建于 1979 年的工厂，在 1998 年安装了新的预热器和分解炉，日产量由 1500 吨/天提高到 2500 吨/天（Hrizuk，1999）。这种改造减少了燃料消耗，减少量为 0.16～0.7 吉焦/吨熟料（Hrizuk，1999），同时减少了氮氧化物的排放。Capitol

水泥公司（圣安东尼奥，德克萨斯州）利用新的立管式分解炉更换旧的在线分解炉，以提高生产能力，这是大项目的内容之一，其余还包括更换预热器，安装脱硫减排设备，以及增大辊式磨生产能力。该新厂于 1999 年成功投产。Capitol 水泥公司的燃料消耗降低至 3.4 GJ/t 熟料（Frailey & Happ，2001）。

根据 Sauli（1993）的介绍，新分解炉的平均节能量可达 0.4GJ/t 熟料。Sauli（1993）并没有描述这种改建项目所需的投资。Vleuten（1994）估计，增加分解炉和悬浮预热器的成本为每年每吨熟料花费 28 美元（不清楚这种估计中包含哪些费用）。Jaccard and Willis（1996）估计的成本低得多，为 9.4 美元/吨熟料。增加的生产能力可能大大节约运行成本，估计为 1.1 美元/吨熟料（Jaccard & Willis，1996）。浙江省江山市何家山水泥有限公司在 2001 年和 2003 年安装了两条新型干法窑，炉窑日产量分别为 1000 吨和 1500 吨，投资分别为 1.05 亿元和 1.56 亿元人民币（ITIBMIC，2004）。这相当于大约 300 元人民币/吨熟料（37 美元/吨）。对于日产量为 1000 吨的炉窑，用电量预计为 85.87 千瓦时/吨熟料，燃料消耗预计为 2.5GJ/t 熟料。

Cui（2006）的报告认为，自 2001 年以来，中国已建成许多预分解窑，其中约 10%～20%采用进口技术，而其余 80%～90%采用国产技术。Cui 指出，少数实力雄厚的厂商利用国产技术在中国制造的设备，其费用大约为进口技术的 1/3～1/5，但是国产技术的使用寿命没有进口技术那么长。绝大多数公司都采用国产技术（Cui，2006）。然而，国产技术不可应用于日产量超过 5000 吨规模的炉窑（Wang，2006b）。

干法中空窑改为预热器/预分解窑。中空窑可以升级为当前较为先进的多级预热器/预分解窑。对于这种更新改造，节能量估计为 1.4 GJ/t 熟料。这种节能效果反映了干法窑平均单位燃料消耗量与新型预热器、预分解窑平均单位燃料消耗量之间的差别，是基于加拿大水泥行业的研究以及意大利工厂的改造实践（Holderbank，1993；Sauli，1993）。Holderbank 的研究指出，预热器、预分解窑的成本范围为 23～29 美元/吨熟料。Jaccard and Willis（1996）给出了更低的数值，约为 8.6 美元/吨熟料。

老式干法窑改为多级预热器窑。老式干法窑可能只是在中空窑的链条部分预热，或可能只具有单级或双级预热器。安装多级悬浮预热器（即四级或五级）可以减少热量损失，从而提高效率。新型旋风筒或悬浮预热器的压降还较小，从而可以提高热回收效率，降低风机的电力消耗（参看上述的低压损旋风筒）。通过安装新的预热器，提高入窑物料的分解率（高达 30%～40%），窑的生产能力将会增加。同时，窑的长度可缩短 20%～30%，从而减少辐射热损失（van Oss，1999）。随着生产能力的增加，熟料冷却机必须能适应冷却大量的熟料。当旧窑需要更新，而新窑过于昂贵时，如果石灰石的储量适当，旧窑改造就有较强的吸引力。

能源节约量在很大程度上取决于即将改造的干法窑的单位能耗和即将安装的预热器的数量。举例来说，在原德意志民主共和国，水泥窑由 Lafarge 改造，以更换原建于 1973 年和 1974 年的四台干法窑。在 1993 年和 1995 年，三台窑配备了四级悬浮预热器。单位燃料消耗量从 4.1 GJ/t 熟料降低至 3.6 GJ/t 熟料，同时，单台窑的生产能力从日产量 1650 吨增加至 2500 吨（Duplouy and Trautwein，1997）。在同一项目中，由于更换了风机和产品磨机，耗电量减少了 25%。对于这种改造，节能量估计达 0.9 GJ/t 熟料，这反映了干法窑平均单位燃料消耗量与新型预热器窑平均单位燃料消耗量之间的差别，这是基于加拿大水泥行业的研究（Holderbank，1993）结果得出的。该研究报告估计，对于这种升级为多级预热器窑的措施，单位成本为每年每吨熟料花费 39～41 美元，而 Vleuten（1994）估计，安装悬浮预热器，单位成本为每年每吨熟料耗花费 28 美元。

改造为往复篦式冷却机。熟料的冷却主要使用四类冷却机：（1）立式；（2）旋转式；（3）行星式；（4）往复篦式冷却机。北美已不再使用任何旋转式或立式冷却机；中国即使有也只有很少的旋转式或立式冷却机（Cui，2006）。然而，一些往复篦式冷却机仍在运行。

几乎所有的新型炉窑中使用篦式冷却机。篦式冷却机的优点是处理能力大（允许较大的炉窑能力）及高效热回收（熟料离开冷却机的温度可低至 83℃，

而不是离开行星式冷却机时预计的 120～200℃（Vleuten，1994））。对于行星式冷却机，三次余热回收（分解炉所需的）是不可能的（Cembureau，1997b），这限制了回收热效率。篦式冷却机可比其它类型的冷却机回收更多的热量。对于较大生产能力的工厂，篦式冷却机是首选设备。对于日产量少于 500 吨的工厂，使用篦式冷却机不具经济合理性（COWIconsult et al.，1993）。用篦式冷却机更换行星式冷却机的案例并不鲜见（Alsop and Post，1995）。

现代往复式冷却机比旧型号冷却机具有更高程度的热回收，热回收效率增加了 65%或更高，同时降低了热回收效率的波动（即提高了炉窑的生产率）。中国琉璃河水泥厂实施了 TCDRI 第三代篦式冷却机，对于日产量为 2500 吨的预分解窑，取得了 72%以上的余热回收率（ITIBMIC，2004）。这种充气梁篦式冷却机，还可以节约用水，它利用空气冷却代替水喷淋冷却（ITIBMIC，2004）。与行星式冷却机相比，篦式冷却机的附加余热回收是可能的，额外的功率消耗约为 3.0 千瓦时/吨熟料（COWIconsult et al.，1993；Vleuten，1994）。窑燃料消耗的节省估计达 8%（Vleuten，1994）。通常只有当安装需要产生三次风的分解炉，或扩大生产能力时，更换冷却机在经济上才具有吸引力。更换冷却机的成本估计为每年每吨熟料 0.44～5.5 美元之间，取决于所需改造的程度。每年的运行成本增加了 0.11 美元/吨熟料（Jaccard and Willis，1996）。

窑燃烧系统改进。窑的燃烧系统是影响炉窑效率低的重要因素，与效率低相关的问题如：燃烧难以调节，燃料不完全燃烧形成 CO 浓度高，以及过剩空气燃烧（Venkateswaran and Lowitt，1988）。改进燃烧系统，旨在优化火焰的形状、燃烧空气和燃料的混合，减少过量空气的使用。已经制定出各种办法来解决上述问题。英国为火焰控制开发的一种技术，可节省 2%～10%的燃料，具体节约效果则取决于不同窑型（Venkateswaran and Lowitt，1988）。Lowes and Bezant（1990）论述了使用燃烧技术的好处，这些技术通过使用更好的炉窑控制系统来改善燃烧。他们还指出，在 BlueCircle 工厂，使用火焰设计技术来消除窑内熟料烧成带的还原条件，已证明节约燃料可达 10%（Lowes and Bezant，1990）。

对于回转窑，Gyro-Therm 技术提高了燃气火焰质量，同时减少了氮氧化物的排放。最初由阿德莱德大学（澳大利亚）开发的 Gyro-Therm 技术可以适用于煤气炉或燃气/煤粉双燃料炉。Gyro-Therm 燃烧器采用专利“旋进射流”技术。喷嘴设计产生了以回转式旋进动作离开燃烧器的燃气射流。这种搅拌动作产生了大规模的快速混和，空气袋被卷入燃料包内，无需使用高速气体或空气喷射。在富燃料条件下，燃烧发生在燃料包内的口袋中，这造成了高度明亮的火焰，以确保良好的辐射传热。澳大利亚阿德莱德布莱顿工厂的示范工程显示，燃料平均节约 5％～10%，同时增加了 10%的产量（CADDET，1997a）。美国（Durkee，Oregon）Ash Grove 工厂的第二个示范工程显示，燃料节约为 2.7％～5.7%，同时产量增加了 5％～9%（CADDET，1997a；Videgar，Rapson and Dhanjal，1997）。这种技术的成本随着设备的不同而不同。据估计，平均成本为每年每吨熟料 1 美元，该数据来自示范工程。

间接点火。历史上最常见的燃烧系统是直接燃烧系统。煤炭在一连串系统中被干燥、粉磨和分级，并直接供入炉窑中。这可能导致一次空气占总风量的比例较高（高达化学计量比的 40%）。这些高比例的一次空气限制了从熟料冷却机引入至炉窑的二次空气量。一次空气百分比相差很大，不合适时可能引起严重的操作问题，比如，造成窑壁及熟料面的还原条件，或由于必须在较高过剩空气水平下运行以确保炉窑内燃料的有效燃尽而引起耐火材料的磨损和燃烧效率的降低。

更现代化的水泥厂最常使用的是间接燃烧系统。在这些系统中，无论是一次空气还是燃煤，都不是直接进入到炉窑中。煤粉干燥产生的所有水分被排入到大气中，煤粉经旋风分离器或袋式除尘器运往储仓。然后，利用少量一次空气将煤粉密相输送至燃烧器（Smart and Jenkins，2000）。由于一次空气供给在多通道设计中与磨煤机分离，因而使用一次空气的比例较低，一般为 5％～10%。多通道布局还可以在一定程度上优化火焰。燃料区域是否被点着，这是一个重要特征。多通道燃烧器的输入条件必须根据二次空气和窑的空气动力学进行优化以达到最佳运行状态（Smart and Jenkins，2000）。燃烧条件的优化，

将导致氮氧化物排放量的减少，随不同的燃料混合物而更好运行，并减少能源损失。对于现代化工厂，这是一项标准的技术。

过量空气渗入估计造成的热损失相当于 75 MJ/t 熟料。假设过剩空气减少 20%～30%，间接燃烧可节约燃料达 15～22 MJ/t 熟料。改善燃烧条件的优势，将导致炉窑耐火材料更长的使用寿命，并减少氮氧化物的排放。这些效果比单纯节能可节约更大的成本。

间接燃烧系统的缺点是带来了额外的资本付出。1997 年，加利福尼亚州科尔顿的 California Portland's 水泥厂实施了间接燃烧系统，使氮氧化物排放量减少了 30％～50%。对于年产 68 万吨熟料的工厂，间接燃烧系统的投资成本为 500 万美元，或 7.4 美元/吨熟料。

优化余热回收/升级熟料冷却机。熟料冷却机将熟料的温度从 1200℃降低到 100℃。最常见的冷却机设计为行星式（或卫星式）、滑动式和往复篦式冷却机。所有冷却机都能加热用于窑燃烧过程中的二次空气，有时还为分解炉加热三次空气（Alsop and Post，1995）。往复篦式冷却机适合于大规模炉窑（日产量高达 10000 吨）。篦式冷却机使用电动风机和过量的空气。剩余空气中温度最高的部分可作为分解炉的三次空气。旋转式冷却机（对于熟料日产量达 2200～5000 吨的工厂，世界上大约 5%的工厂采用这种冷却机）和行星式冷却机（对于熟料日产量达 3300～4400 吨的工厂，世界上大约 10%的工厂采用这种冷却机）不需要吹助燃空气的风机，并使用少量的过剩空气，导致相对较低的热损失（Buzzi and Sassone，1993；Vleuten，1994）。

篦式冷却机可在每吨熟料中回收 1.3～1.6 GJ 显热（Buzzi and Sassone，1993）。提高冷却机的余热回收效率不但可以节省燃料，也可能影响产品质量和排放水平。余热回收可通过减少过剩空气量（Alsop and Post，1995）、控制熟料层的深度以及采用诸如环形炉篦等新炉篦等措施（Buzzi and Sassone，1993；Lesnikoff，1999）来改进。控制穿过炉篦的冷却空气分布，可以降低熟料温度提高空气温度。由于燃烧空气具有较高的温度，附加的余热回收导致窑和分解炉中的能源使用降低。Birch（1990）指出，通过改进篦式冷却机的运

行，可节约 0.05～0.08 吉焦/吨熟料，而 Holderbank,（1993）指出，通过改造篦式冷却机，可节约 0.16 吉焦/吨熟料。COWIconsult et al.（1993）指出，可节约 0.08 GJ/t 熟料，但用电量增加 2.0 千瓦时/吨熟料。这项措施的成本估计为利用篦式冷却机更换行星式冷却机的一半，或每年每吨熟料生产花费 0.22 美元。

熟料冷却机近期的一项创新是在熟料冷却机热端安装一个静态炉篦。这项措施可以提高余热回收效率，并减少了冷却机的维修。冷却机的这一改进能其比传统的篦式冷却机提高 2%～5%的余热回收率。投资成本估计为每年每吨熟料花费 0.11～0.33 美元（Young，2002）。

更换密封。在炉窑进口和出口使用密封来减少外部空气的渗入以及热量损失。密封不严有可能导致窑的漏风，增加窑的热需求。最常使用的是气动和薄片式密封，也还可利用其它设计（如弹簧式）。尽管密封可以持续 10000 至 20000 小时，仍可能需要定期检查来减少泄漏。由密封泄漏所造成的能源损失可能各有不同，但一般都比较小。Philips Kiln Services（2001）报告说，在印度（Maihar Cement）相对现代化的工厂中，更新进口气封，可降低炉窑中 0.4%（0.011 吉焦/吨熟料）的燃料消耗。炉窑密封的改进维护，其投资回收期估计为 6 个月或以下（Canadian Lime Institute，2001）。这项技术已在中国生产和应用（Cui，2006）。

低温余热发电[1]。尽管中国政府已采取政策来促进该项技术的使用（例如，通过《中国中长期节能计划》），虽然 45 家水泥回转窑已经采用了这种措施（Cui，2006），但是低温余热发电并没有在水泥厂广泛采用（GEI，2005）。甚至许多 2003 年后建成的大型回转窑都没有采用该技术。有一个厂受日本捐助获得并使用了这一技术(GEI, 2005)安徽宁国水泥厂在日产 4000 吨的水泥窑生产线上安

[1] 在水泥厂中，采用低温余热发电改变了烟气的温度分布，这可能影响低温催化生成二恶英的反应。废热回收锅炉增加了烟气停留在二恶英形成温度窗口（700～200℃）的时间，从而增加了二恶英的形成。烟气冷却温度分布是决定燃烧设施生成二恶英多少的一个重要因素。一些危险废物焚烧炉使用高速烟气淬火，以减少烟气穿过二恶英形成温度窗口的停留时间，从而控制二恶英形成。另一方面，可能是由于淬火与非淬火系统中最适温度窗口中较少的锅炉表面积，而不是烟气停留时间。表面趋于积聚反应碳和微量金属。大多数区域很可能意味着更高的 D/F 浓度。还需要进一步研究，以找出余热回收是否对水泥窑二恶英排放具有显著的影响(Lee, 2006; Gullett, 2006)。

装了发电系统，自 1998 年开始运行以来，发电量达到 39 千瓦时/吨熟料（Anhui Ninggou，2002）。Pan（2005）估计，对于安装一台容量超过 6 兆瓦的机组，进口（日本）技术的成本为 18000 至 22000 元人民币/千瓦（2250 美元至 2750 美元/千瓦）。中国国产技术于 1996 年开发，目前由三家中国公司所有：天津水泥工业设计院，中信重型机械公司和华效资源有限公司。所有这三家公司都拥有正在中国水泥厂进行的示范项目。目前，国产技术和设备的装置成本大约为 10000 元人民币/千瓦（1250 美元/千瓦）。如果同时兴建炉窑和发电系统，那么装置成本将会降低一些。在中国联合水泥有限公司，安装了两套成本为 1.018 亿元人民币（2006 年折合为 1270 万美元）的 6000 千瓦发电系统，其中 3600 万元人民币（2006 年折合为 4500 万美元）为私人资本，6400 万元人民币（2006 年折合为 800 万美元）为银行贷款，大约相当于人民币 8500 元人民币/千瓦（CNBM，2005）。其发电能力为 79.8 千瓦时/吨熟料。北京水泥有限公司也在日产量为 2400 吨和 3200 吨的炉窑上安装了余热回收设备（BEIC，2006）。目前总容量为 7.5 兆瓦，总投资为 4743 万元人民币（2006 年折合为 600 万美元），约相当于 6300 元人民币/千瓦（2006 年折合为 800 美元/千瓦）。其中，70%的投资由北京能源投资公司提供。

在 GEI（2005）总结的另一个示范工程中，泰山水泥有限公司即将利用来自两台熟料窑的废热。这两台熟料窑的生产能力分别为 5000 吨/日和 2500 吨/日。于 2005 年 10 月 1 日开始运转；设备已经安装，但目前仍在调试中。最大容量设计为 13.2 兆瓦，年发电量可达 95 GWh。其中，90.8 GWh 将供应给水泥生产，占水泥生产能源需求的 30%以上（Guo，2004）。

ITIBMIC（2004）估计，对于日生产能力为 2000 吨（年产量为 73 万吨）的炉窑，每吨熟料大约可以发电 20 kWh，投资成本在 2000～3000 万元人民币。

2002 年 5 月，天津水泥工业设计研究院与上海万安企业总公司合作，开始对一台 1350 吨/日的 4 级旋风预热器窑进行改造，以便实现低温余热发电（ITIBMIC，2004）。他们采用了国产低温余热回收技术，现在该设备的发电能力已超过 1.8 兆瓦，每年运行 7000 小时。包括运行该系统所需电力的 10%，

该设备每年额外发电 11.34 GWh。若电价按 0.50 元人民币/千瓦时计，天津水泥厂可使每吨水泥熟料节月 11～14 元人民币。运行成本约为 0.06 元人民币/千瓦时，投资回收期约为 3 年。低温余热回收也已经在其它工厂得以实施，包括海螺集团宁国水泥厂和柳州水泥厂容量为 4000 吨/日的预分解窑（ITIBMIC，2004）。

（ITIBMIC，2004）报道，国产技术的发电能力约为 24～32 千瓦时/吨熟料，而国外技术的发电能力约为 28～36 千瓦时/吨熟料。Cui（2006）最近报道，国产技术可以发电 35 千瓦时/吨熟料，而日本技术现在可以发电 45 千瓦时/吨熟料；德国技术较好，但没有数据可用。然而，采用国产技术投资要少得多，投资约为 6000 元人民币，而采用国外设备投资为 16000 元人民币。运行时间和所需劳力大致相同。

高温余热发电。从炉窑排气口、熟料冷却系统和窑预热器系统排出的废气，都包含有用的可以转化为电力的能量。在美国，只有中空窑的尾气温度足够高，可以通过发电来经济地回收余热[2]。热电联产系统可以直接在燃气轮机利用废热（顶部循环），或安装一台余热锅炉系统运行蒸汽轮机系统（底部循环）。本报告着重于蒸汽轮机系统，因为这些系统已安装在全世界许多工厂中，并已被证明具有经济合理性的（Steinbliss，1990；Jaccard and Willis，1996；Neto，1990）。余热回收已经限制了工厂在线生料磨的应用，因为窑废气的热量用于原料干燥。但发电效率仍然相对较低（18%），基于若干案例研究，每吨熟料的发电能力可能在 11～25 kWh 之间（Scheuer & Sprung，1990；Steinbliss，1990；Neto，1990）。假定每吨熟料可节约用电 22 kWh，Jaccard and Willis（1996）估计，这种系统的装置成本为每年每吨熟料生产花费 2.2～4.4 美元，而运行成本为 0.22～0.33 美元/吨熟料。1999 年，4 家美国水泥厂热电联产发电 4.86 亿 kWh（USGS，2001）。中国大多数高温余热回收用于预热和预分解。

[2]技术上，有机朗肯循环或 Kalina 循环（使用水和氨的混合物）可用于回收低温余热发电，但目前这在经济上不具吸引力，除了电力成本很高的场所以外。但在中国，低温余热正在被回收；有关具体细节，请参看前面的措施。

悬浮预热器的低压损旋风筒。旋风筒是带有预热系统的工厂的基本组成部分。水泥厂安装压力损失较低的新式旋风筒将降低窑废气风机系统的能耗。对于每降低 50mm 水柱的压力损失，可节电 0.66～0.77 千瓦时/吨熟料，具体取决于风机的效率。对于大多数老炉窑，单位节电量为 0.66～1.1 千瓦时/吨熟料（Birch，1990）。Fujimoto（1994）论述了 Lehigh 水泥厂改造，他们在 Mason 市 Iowa 厂安装了低压损旋风筒，节电 4.4 千瓦时/吨熟料（Fujimoto，1994）。然而，安装低压损旋风筒可能比较昂贵，因为它往往可能需要重建或改造预热器塔架，其成本非常高。此外，新的旋风分离器系统可能增加粉尘总负荷，并增加来自预热器塔架的粉尘运送。但是，如果在线生料磨跟在它后面，那么粉尘运送问题变得不是那么重要。对于一套低压降旋风分离器系统，成本估计为每年每吨熟料 3 美元。中国最佳可获得的技术从奥地利 PMT 公司引进（Cui，2006）。

高效窑传动。窑的转动需要使用大量动力。使用带有空气离合器和同步电动机的单齿轮传动，可获得最高的效率（Regitz，1996）。该系统将降低数个百分点的窑传动用电量，即以稍高（+6%）的资金成本，使单位电耗降低约 0.55 千瓦时/吨熟料。最近，提倡使用交流（AC）电机来取代传统使用的直流（DC）电机传动。交流电机系统可能带来稍高的效率（炉窑传动用电量减少 0.5%～1%），并降低投资成本（Holland，2001）。采用高效电机取代旧电机或代替重绕组的旧电机，可以降低 2%～8%的电力成本。

熟料制备——立窑

对立窑而言，主要的能效机会是用新的悬浮预热器/预分解窑替换立窑。此外，可对窑的燃烧系统进行改进。表 5 提供了下列方面的信息：与上述每项措施相关的初始资金成本，运行和维护（O&M）成本，简单投资回收期，单位燃料节能量，单位节电量，单位二氧化碳减排量，以及使用寿命。

用新的悬浮预热器/预分解窑替换立窑。现正在开发新的日产 1000 吨、2000 吨和 4000 吨悬浮预热器（NSP）技术（GEI，2005）的炉窑。NSP 应当用于正在

扩建或重建的中型或大型水泥厂。对于小水泥厂，土立窑（和干法中空回转窑）应当逐步淘汰，上面已经对这些窑的进行了更多的描述。

表 5. 适用于立窑的能效机会

	资金成本（$/t）	O & M 成本（$/t）[1]	回收期（年）	燃料节约 (吉焦/吨)	节电 (千瓦时/吨)[2]	CO_2 减排（kgC/t）	使用寿命（年）
转换为新的悬浮预热器/预分解窑	28-41	NA	5-7[1]	2.4	-	62	40
炉窑燃烧系统改进	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA

注释：能源节省和成本基于案例研究数据。在中国，其成本将取决于技术和可用性。如有可能，下列文字中，我们已加入更多来自中国的数据。所有数据均基于每吨熟料。

[1] 使用 2005 年中国工业锅炉烟煤的约计成本来计算回收期（约 55 美元/吨煤）。

NA=数据不详；效率数据不详，因为案例通常研究了一套措施的燃料节省；很少单独应用某一项措施，因此，这些措施的燃料节省往往不能被衡量或计算（Liu et al，1995）。举例来说，Liu et al.（1995）报道说，针对 VSKs 的一套措施通常导致 10～30%的燃料节省，投资回收期为 2 年。

根据 Liu et al.（1995），在一些“关键”的中国工厂[3]，每吨熟料耗能 5.4 GJ，而对于先进的预分解窑，每吨熟料大约耗能 3 GJ；每吨熟料节能 2.4GJ。琉璃河水泥厂安装了一台带有 5 级预热器和一座预燃烧炉的预分解窑，结果燃料消耗为 3.011 吉焦/吨熟料（ITIBMIC，2004）。

截至 2004 年底，中国已投入使用了 140 台新的悬浮预热器/预分解窑（NSP）和悬浮预热器（SP）窑；其中 50 台为 2004 年新建（Cui，2004）。关于这项技术的更多信息，请参看上述“水泥生产的能效机会——回转窑”章节中的措施。

窑燃烧系统改进。窑的燃烧系统是影响窑效率的重要因素，较低的燃烧效率往往导致生成较多的一氧化碳（CO）。效率低是由下列原因造成的：燃料的未完全燃烧，燃烧空气过剩或不足，空气分布不均匀，以及煤粉供给过度（Venkateswaran and Lowitt，1988；Liu et al.，1995）。鼓风机能力不足和漏风可能导致空气供应不足。空气分布的改善需要更好的成球质量和精确的窑操作。先进立窑利用自动给料和卸料装置实现机械化，而老式立窑仍采用手动操作

[3] “关键”中国工厂通常指大型、中央管理的国有企业(Sinton, 1996)。

（Liu et al.，1995）。煤粉的供给过度往往是由于煤粉研磨过度，导致燃料浓度很高。在低温和氧气量不足时，过磨的煤粉与 CO_2 反应，生成 CO。有关窑、供料和混合自动化的更多信息，可在上述“能源管理和过程控制系统”的措施中找到。

在中国，国产技术正用于中小型水泥厂；很多大型水泥厂都采用了进口技术（Cui，2006）。

产品粉磨

表 6 显示了与产品粉磨相关的每项措施的节约燃料和节电量、预计投资回收期和二氧化碳（CO_2）减排量。每项措施描述如下：

过程控制与管理——磨机。对窑实施的过程控制系统的开发方法也同样可用于粉磨作业（见上文）。该系统通过控制磨机和选粉机中物料的流动，来生产质量稳定且优质的产品。许多制造商正在市场上销售诸多用于产品粉磨的控制系统。自 90 年代初以来，专家系统已经开始商业化运行。Schwenk KG（德国）的 Karlstadt 工厂于 1992 年在产品磨机中实施了专家系统，从而增加了生产能力和节能效果。在德国，投资回收期预计为 1.5～2 年（Albert，1993）。自 1998 年以来，Magotteaux（比利时）已经开始销售磨机控制系统，已经售出六套装置给德国（Rohrdorfer Zement）、希腊（Heracles General Cement）、南非（PPC 集团）和英国（UK）（Rugby 集团）的工厂。英国 Rugby 集团旗下南 Ferriby 厂在水泥磨机方面的经验表明，生产能力增加（+3.3%）及节电 3%，而细度标准偏差却下降（Van den Broeck，1999）。克虏伯公司的 Polysius 销售了 PolExpert 系统，并宣称在产品磨机中安装该控制系统后，可节能 2.5%～10%（一般为 8%），同时提高产品质量（偏差较低），产量增加 2.5%～10%（Martin and McGarel，2001a）。南非水泥厂对水泥球磨机采用模型预测控制（人工神经网络），已经取得了类似的结果（Martin and McGarel，2001a）。Pavilion Technologies（美国）已经开发出一种利用神经网络的新控制系统。Pavilion Technologies 表明在水泥球磨机中安装模型预测控制系统，生产能力可

增加 4%～6%（并相应减少单位耗电量）（Martin et al.，2001）。回收期一般为 6～8 个月（Martin and McGarel，2001a）。

表 6. 水泥厂产品终磨的能效措施。更多信息可以在下面的措施描述中找到

能效措施（对于水泥磨）	燃料节约量 (吉焦/吨)	节电量 (千瓦时/吨)	估计投资回收期（年）[1]	CO_2 减排（kgC/t）
能源管理和过程控制	-	3.8-4.2	< 1 to 2	0.9-1.0
高压辊压机	-	8-28	> 10（1）	1.8-6.3
高效选粉机	-	1.9-6.0	> 10（1）	0.4-1.4
改进球磨机的研磨介质	-	3-5	8（1）	0.7-1.2

注释：

所有数据的给出基于每吨水泥

[1] 回收期的计算只基于能源节约。在实际中，这种投资可能被能效以外的其它因素（例如，生产率和产品质量）所影响，而作为正常商业周期或扩建项目的一部分，可能碰到这些因素。在这些情况下，这项措施将具有较短的投资回收期，取决于工厂的具体条件。

先进的研磨方式。产品磨中使用的球磨机，其能效相对较低，能耗高达 30～42 千瓦时/吨熟料，具体数据取决于水泥细度（Marchal，1997；Cembureau，1997b）。有几种新型研磨方式，可大大降低终磨磨机中的能耗，降至 20～30 千瓦时/吨熟料，包括辊压机，辊式磨，以及与球磨机结合用于预研磨的辊压机（Alsop and Post，1995；Cembureau，1997b；Seebach *et al.*，1996）。依靠位于水平磨盘上的活动连杆臂携带 2～4 个研磨辊，辊式磨将压缩和剪切两种研磨方式组合在一起（Cembureau，1997b；Alsop and Post，1995）。在高压辊压机中，两个辊子对物料加压，压力高达 3500 bar（Buzzi，1997），显著提高了研磨效率（Seebach et al.，1996）。

在产品磨中一般应用带有选粉机的风扫立磨，而最近结合球磨机的预研磨系统正在使用无风扫的技术。辊式磨的变体是风扫环形辊轧机，对于 Blaine 比表面积为 3000cm^2/g 的辊压机，其单位用电量可降低至 25 千瓦时/吨（Folsberg，1997）。新的磨机理念是 Horomill，最早于 1993 年在意大利得到证实（Buzzi，1997）。在 Horomill 中，卧式辊在筒体内被驱动。筒体运动产生的离心力，使料层在筒体内均匀分布，该料层通过辊子研磨（带有 700～1000bar 的压力）（Marchal，1997），最终成品进入到灰尘过滤器中收集。Horomill 是一种紧凑

式磨机，可以一步生产成品，因此具有相对较低的资金成本。磨制普通硅酸盐水泥，Blaine 比表面积为 3200 cm^2/g 时，单位耗电量约为 23 千瓦时/吨（Buzzi,1997）。甚至对于 Blaine 比表面积为 4000cm^2/g 的火山灰水泥，单位耗电量可能低至 30 千瓦时/吨（Buzzi,1997）。

当今，高压辊压机最常用于扩大现有磨机的能力，尤其是在电力成本较高或供电不便的国家中可以应用（Seebach et al，1996）。Horomill 首次在意大利得到示范后，这种理念现在也在墨西哥（Buzzi，1997）、德国、捷克和土耳其（Duplouy and Trautwein，1997）的工厂得到应用。新设计的辊式磨允许更长的运行时间（大于 2 万小时）。当新的终磨磨机取代球磨机时，其单位节电量估计为 28 千瓦时/吨水泥。为球磨机增加预粉磨系统，其单位节电量为 7～24 千瓦时/吨水泥（Cembureau，1997b；Holland et al.，1997；Scheuer and Sprung，1990）。安装一台新的辊压机，文献中对其资金成本估计差别较大，范围从较低的 2.5 美元/年/吨水泥（Holderbank，1993）或 3.6 美元/年/吨水泥（Kreisberg，1993），到较高的 8 美元/年/吨水泥（COWIconsult *et al.*，1993）。辊压机系统的资金成本比其他系统的资金成本低（Kreisberg，1993），或至少具有可比性（Patzelt，1993）。一些新的磨机理念，可降低 30%～40%的运行成本（Sutoh *et al.*，1992）。

高效选粉机。高效研磨技术的最新发展是高效选粉机或分离机的使用。选粉机从粗颗粒中分离出细颗粒，然后大颗再循环返回至磨机中。标准的选粉机可能具有较低的分离效率，因为一部分细颗粒也同时被回收并再次研磨，造成磨机的额外耗电量。在高效选粉机中，物料分离更清晰，从而减少了过粉磨。高效选粉机或分离机对提高产品质量和降低电力消耗具有很大的影响。

英国使用高效选粉机的研究表明，在他们的产品磨磨机中安装选粉机后，单位用电量减少 7 千瓦时/吨水泥，生产能力增加了 25%（Parkes，1990）。Holderbank（1993）估计，用电量下降了 8%（6 千瓦时/吨水泥），而其他研究估计为 1.9～2.5 千瓦时/吨水泥（Salborn and Chin-Fatt，1993；Süssegger，1993）。新设计的高效选粉机旨在进一步提高分离效率，并减少所需的空气量

（从而降低电力消耗），同时优化设计。所有主要供应商都在销售新设计的选粉机，例如：Polysius（SEPOL），F. L. Smidth/Fuller 和 Magotteaux（Sturtevant SD）。实际节能效果将随工厂和水泥类型以及所要求细度的不同而不同。例如，在 Origny-Rochefort（法国）的水泥厂安装了一种新型高效选粉机，单位节电量为 0～6 千瓦时/吨（Van den Broeck，1998），而投资成本为 2 美元/年/吨成品原料，此项数据基于 Holderbank（1993）。

改进研磨介质。改良的耐磨材料可以用作研磨介质，尤其是在球磨机中。通常根据物料的磨蚀性来选择研磨介质。实践证明，增加研磨介质的表面硬度以及磨机衬里的耐磨性，可以减少磨损，降低能源消耗（Venkateswaran and Lowitt，1988）。由高铬钢制成的改良的磨球与衬里就是这样的材料，但其他材料也有可能。其它改进包括采用改进的衬里设计，如沟槽分级衬板。这些改进都有可能降低研磨能耗，在某些磨机中可降低 5%～10%，单位节电量大约为 3～5 千瓦时/吨水泥（Venkateswaran and Lowitt，1988）。

全厂范围措施

表 7 显示了与全厂范围相关的每项措施的节约燃料和节电量、预计投资回收期和二氧化碳（CO_2）减排量。每项措施的描述如下。

表 7. 水泥厂全厂范围的能效措施。更多信息可以在下面的措施描述中找到

能效措施（全厂范围措施）	燃料节约量 (吉焦/吨)	节电量 (千瓦时/吨)	估计投资回收期（年）	CO_2 减排（kgC/t）
预防性维护	0.05	0-6	< 1	1.3-2.6
高效电机	-	0-6	< 1	0-1.3
变速传动	-	6-8	2- 3	1-2
压缩空气系统的优化	-	0-6	< 3	0-1
有效照明	-	0-0.6	<3	0-0.1

注释：

所有数据的给出基于每吨水泥

预防性维护。预防性维护包括培训人员关注能源消耗和效率。在各种行业中已经推出成功的案例（Caffal，1995；Nelson，1994）。尽管在水泥生产中，许多工序已基本实现自动化，但仍然还有节能潜力，需要对员工进行适当的培

训，以提高其节能意识。此外，预防性维护（例如，对于窑用耐火材料）还增加了工厂设备的利用率，因为它减少了停机次数、缩短了停机时间。Birch（1990）提到，减少在窑罩处进入炉窑的无效空气量，可节能 0.05 吉焦/吨。Lang（1994）指出，对于各种预防性维护和工艺控制措施，节能可达 5 千瓦时/吨（通常约为 3 千瓦时/吨）。基于其他行业的类似案例，实施这种培训的年费用和启动金很小，投资回收期不到一年。对于压缩空气系统的预防性维护见下文。

高效电机和传动。电机和传动用于整个水泥厂，用于驱动风机（预热器，冷却机，碱旁路），转动炉窑，运送物料，最重要的是用于研磨。在一个典型的水泥厂，可能使用 500～700 台电动机，其功率从几千瓦到几兆瓦不等（Vleuten，1994）。窑（不包括研磨）的用电量粗略估计为 40～50 千瓦时/吨熟料（Heijningen *et al.*，1992）。变速传动、改进的控制策略和高效电机，可以帮助降低水泥窑的用电量。如果更换不影响工艺操作，那么可随时更换电机。然而，电机往往被重新绕线，而不是用新电机取而代之。对各个工厂而言，节电量可能存在相当大的差异，变化范围从 3%～8%（Fujimoto，1994）。Vleuten（1994）估计，潜在的节能率可达 8%。基于美国能源部的 MotorMaster+软件对电机所作的分析，以及 Bösche（1993）给出的 5000 吨/日水泥厂中的电机细目分类，假定用高效电机更换工厂内所有风机系统，那么平均成本为 0.22 美元/年/吨水泥。

可调或变速传动。在水泥生产工艺中，传动是最大的耗电用户。通过减少能量损失或增加电机效率（见上文），可以提高传动系统的能源效率。降低节流可以减少系统中的能量损失以及通过安装变速传动（ASD）导致的耦合损失。大多数电机都是定速交流型号。然而，电机系统往往在部分或可变负荷下运行（Nadel *et al.*，1992）。此外，在水泥厂，负荷可能发生巨大变化（Bösche，1993）。有各种技术来控制电机（Worrell *et al.*，1997）。这些系统由许多供应商提供，并在全球范围内获得。Worrell *et al.*（1997）提供了调速系统在各种应用中取得节能效果的概述。节能取决于流动模式和负荷的变化。节能效果可能

在 7%～60%范围内变动。电机调速系统正在越来越多的水泥厂中使用（Bösche，1993；Fujimoto，1993），但应用情况可能大不相同，主要取决于电力成本。在一个工厂内，电机调速系统主要可应用于炉窑、冷却机、预热器、选粉机和磨机中的风机，以及各种传动设备。例如，Blue Circle 的 Bowmanville 厂（加拿大）安装了变速进气风机，这降低了窑的电力和燃料使用量（由于减少了送风量），每年节约能源成本达 75000 加元（约合 47000 美元）（CIPEC，2001）。对一家现代化水泥厂的案例研究表明，工厂中所安装的电机中有 44%适宜进行调速改造（Bösche，1993）。即便当节约能源是安装电机调速系统的唯一原因时，为熟料冷却风机安装电机调速系统也具有较低的投资回收期（Holderbank，1993）。能源节约很大程度上依赖于所安装的电机调速系统的应用和流动模式。虽然节能量相当可观（Holderbank，1993），但是没有太多的定量研究可供水泥行业使用。一份假设案例研究估计，与带有节流阀的系统相比，原料磨风机节能可达 70%（或与带有调整装置的系统相比，节能可达 37%）（Bösche，1993）。在实践中，节能 70%是不现实的（Young，2002）。Fujimoto,（1994）指出，Lafarge 加拿大的 Woodstock 工厂利用电机调速系统改造了他们的窑风机，结果单位用电量减少 6 千瓦时/吨。据估计，对于 44%的装机功率，可以节能 15%，即单位节电量大约 8 千瓦时/吨水泥。单位成本在很大程度上取决于系统的规模。对于超过 300 千瓦的系统，其成本估计为 70 欧元/千瓦（75 美元/千瓦）或更低，对于 30～300 千瓦的系统，成本估计为 115～130 欧元/千瓦（120～140 美元/千瓦）（Worrell *et al.*，1997）。根据以上成本估算，按照 Bösche（1993）的研究，一个现代化水泥厂的单位成本可估计约为 0.9～1.0 美元/年/吨水泥。其他估计的变化范围为 0.4～3 美元/年/吨水泥（Holland et al.，1997；Holderbank，1993）。

压缩空气系统。压缩空气系统在工厂的不同地方使用，即搅拌泥浆（湿法厂），布袋脉冲-射流或高压脉冲袋式除尘器中，以及其它地方。在水泥厂，压缩空气系统的能源消耗总量相对较小，但如果系统连续运行并且终端使用是不连续的，那么它可能产生相当高的费用。在这些系统中还可以找到改进能效的

措施。在工厂中，压缩空气可能是最昂贵的可获得的能源形式，因为它效率低。压缩空气的整体效率通常为 10%左右（LBNL et al.，1998）。因为这种低效率，如果压缩空气被使用，那么它应该在可能最短的时间内最少使用，并不断监测和权衡选择。

压缩空气系统的维护。维护不当可能降低压缩效率和增加漏风或压力变化，以及导致工作温度增加，湿度控制不足和过度污染。改善维修将减少这些问题出现，并节约能源。正确维护包括以下方面（LBNL et al.，1998）：

- *保持压缩机和中间冷却表面清洁和无污染。*阻塞的过滤器增加了压降。通过检查并定期清理过滤器，压降可维持在较低水平。寻求使用 10 年后过滤器的压降仅为 1psig。清洗过滤器的投资回收期通常不超过 2 年（Ingersoll-Rand，2001）。修理运行不当的过滤器，以防污染物进入工具而导致过早磨损。通常，当压降超过 14～20 kN/m^2 时，应更换微粒和润滑剂脱除介质，并且每年对各系统至少检查一次。同时，考虑增加并联过滤器，以降低空气流速，从而减少空气压降。在压缩空气系统中，更加频繁地更换过滤器，预计每年可节能 2%（Radgen and Blaustein，2001）。
- *保持电机适当润滑和清洁。*电机冷却不当可能增加电机温度和绕组电阻，缩短电机寿命，以及增加能源消耗。每 2～18 个月，应当检查和更换压缩机的润滑油，以确保它处于适当水平。除了节约能源，这还可以帮助系统避免腐蚀和老化。
- 定期检查放泄弯管，以保证它们不会粘结在打开或关闭位置，并清洁它们。某些用户让自动冷凝槽一直处于半开状态，以便不断排水。这种做法浪费大量能源，绝不能忍容。取而代之，安装简单的压力传动阀。失灵的冷凝槽应当被清洗和修复，而不是任其敞开。某些自动排水装置，如浮动开关或电动排水装置，不会浪费空气。对排水装置进行检查和维修，回收期通常不到 2 年（Ingersoll-Rand，2001）。

- *维护压缩机上的冷却器，*以确保干燥器获得尽可能低的入口温度（Ingersoll-Rand，2001）。
- *检查皮带磨损*并调整它们。一个良好的经验法则是每运行 400 小时调整一次。
- *依照规范或更早更换空气润滑油分离器。*旋转式螺杆压缩机启动其空气润滑油分离器时，在满负荷下压降通常为 14～20 kN/m^2。当它增加至 70 kN/m^2 时，更换分离器（LBNL at al.，1998）。
- *检查水冷系统*的水质（pH 值和溶解固体总量）、流量和温度。按照各厂商的规范清洁和更换过滤器和换热器。

减少泄漏。泄漏可能是浪费能源的一个重要源头。一家没有得到很好维护的典型工厂，其泄漏率可能等于压缩空气总生产能力的 20%～50%（Ingersoll Rand，2001；Price and Ross，1989）。泄漏维护可以将该数字降低至 10%。总而言之，在压缩空气系统中，经过修复泄漏，预计每年可减少 20%的能源消耗（Radgen and Blaustein，2001）。泄漏的估计，随管道或设备上的小孔大小不同而不同。除了增加能源消耗外，泄漏可能使启动工具效率较低，影响生产，缩短设备寿命，导致额外的维修需求以及增加计划外的停机。在最坏的情况下，泄漏可能导致压缩机增加不必要的容量。

最常出现泄漏的地方是偶合器，软管，管材，配件，压力调节器，开式冷凝阀和截止阀，管接头，断开以及螺纹密封层。检测泄漏的一种简单方法是应用肥皂水检查可疑区域。检测泄漏的最好方法是利用超声波声学探测器，它能够识别出与空气泄漏有关的高频咝音。经鉴定后，应当跟踪、修理并核实泄露。泄漏检测与维护应当不间断开展。

降低进风温度。降低进风温度可以降低压缩机的能耗。在许多工厂中，通过从建筑物外面抽风，可以降低压缩机的进风温度。引入新鲜空气，投资回收期可能为 2～5 年（CADDET，1997b）。实践表明，进风温度每降低 3℃，压缩机可节能 1%（CADDET，1997b；Parekh，2000）。

进风口最大允许压力露点。选择具有最大允许压力露点和最佳效率的干燥器。实践表明，干燥剂式干燥器的能耗占压缩机总能耗的 7%～14%，而冷冻干燥器的能耗只占压缩机总能耗的 1%～2%（Ingersoll Rand，2001）。应考虑使用带有浮动露点的干燥器。

压缩机控制。任何控制策略的目标都是关闭不需要的压缩机或延迟启动额外的压缩机，直到需要它们为止。所有开启的压缩机都应当满负荷运行。控制回路的布置也很重要；减少和控制初级空气收集器的系统下游压力，可能导致能耗达 10%或更高（LBNL，et al.，1998）。通过采用先进控制系统，每年节能量可达 12%（Radgen and Blaustein，2001）。启动/停止，加载/卸载，节流，多级，变速和网络控制是压缩机控制的方案，具体描述如下。

启动/停止（开机/关机）是最简单的控制变量的控制，可用于往复式或旋转式螺杆压缩机。对于启动/停止控制，驱动压缩机的电机随着机器的排气压力来实现开启或关闭。它们主要用于空转比非常低的场合。频繁交替的应用将导致电机过热。对于启动/停止控制，回收期通常为 1～2 年。

加载/卸载控制，或者恒速控制，使电机持续运行，但当排气压力足够时，将压缩机卸载。在大多数情况下，卸载后的旋转式螺杆压缩机仍然消耗 15%～35%的满负荷电力，此时没有提供任何有用功（LBNL et al.，1998）。因此，加载/卸载控制的效率可能很低。

调节或节流控制允许压缩机改变其输出量，以满足流量需求，通过关闭压缩机的进气阀和限制进气来实现。节流控制应用于离心泵和旋转式螺杆压缩机。将压缩机控制从开/零/关控制改为变速控制，每年可以节能 8%（CADDET，1997b）。

选择合适的管道直径。管道直径选择不当可能造成压力损失，泄漏增加，以及成本增加。为了优化性能，必须选择合适的管径，以适应当前的压缩机系统。增加管径通常可以使每年的能源消耗降低 3%（Radgen and Blaustein，2001）。

回收余热用于水预热。工业空压机所用的电能中，高达 80%～93%的电能转换成热能。在许多情况下，余热回收装置可以回收 50%～90%的可用热，用于采暖，工业过程加热，水加热，补给空气加热，锅炉补水预热，工业干燥，工业清洗过程，热泵，洗熨或预热燃油炉的吸入空气（Parekh，2000）。据估计，对于容量 0.05 m^3/s 的压缩机（满负荷下），大约有 50 兆焦耳/小时的能量可供利用（LBNL et al.，1998。回收期通常少于一年。水冷式压缩机回收余热供暖并不常见，因为需要额外的热交换阶段，而且可用热量的温度较低。然而，随着大型水冷式压缩机的出现，回收效率通常为 50%～60%（LBNL et al.，1998）。实施这项措施用于供暖，压缩空气系统每年可节能 20%（Radgen and Blaustein，2001）。

全厂范围照明

在水泥行业中，用于照明的能源非常少。尽管如此，仍可以发现降低能源使用成本的机会。照明用于提供整个生产、仓库和办公场所的整体照明，或提供特定区域的低凹和工作照明。高强度放电（HID）源用于前者，包括金属卤化物灯，高压钠灯和汞蒸气灯。荧光灯、紧凑型荧光灯（CFL）和白炽灯通常用于办公室工作照明。

照明控制。在非工作时间，可以通过自动控制关闭灯，如控制传感器，当房间无人时，灯即关掉。除了自动控制，还可使用手动控制，以节省较小区域内的额外能量。照明控制系统的回收期通常低于 2 年。

用 T-8 灯管替换 T-12 灯管。工业照明通常使用 T-12 灯管。T-12 指管径为 1/8 英寸为倍数（T-12 指管径为 12/8 英寸或 3.8 厘米的灯管）。这些灯的初始输出量较高，但能源消耗也较高。T-12 灯光效差，寿命较短，光衰较快，显色性差。正因为如此，维修和能源成本较高。利用 T-8 灯管（直径较小）替换 T-12 灯管，其效率可比后者大约增加一倍。

用金属卤化物灯或高压钠灯替换水银灯。在显色性要求较高的地方，金属卤化物灯可代替水银灯或荧光灯，可节能 50%。在显色性要求不高的地方，与水银灯相比，高压钠灯可节能 50%～60%（Price and Ross，1989）。

用高强度荧光灯替换金属卤化物灯 HID。传统 HID 照明可以用高强度荧光照明来更换。这些新系统整合了高效荧光灯、电子镇流器和高效灯具，可以最大限度地输出到工作平面上。新系统的优点很多：它们具有较低的能耗，在整个灯管寿命期内光衰较低，亮度好，启动和再触发性能快，显色性好，光通量高以及较低的眩光（Martin，et al.，2000）。与标准金属卤化物灯 HID 相比，高强度荧光系统可以节能 50%。金属卤化物灯 HID 采用亮度控制，也可达到节电的效果。改造灯具系统成本约为 185 美元，包括安装成本（Martin，et al.，2000）。除了节能外还可得到更好的照明质量，高强度荧光灯还可以帮助提高生产力和降低维修费用。

用电子镇流器替换电感镇流器。镇流器是一种调节启动照明灯具和保持灯具稳定输出所需电量的机械装置。与电感镇流器相比，电子镇流器可省电 12%～25%（U.S. EPA，2001）。

产品和配料变化

产品和配料变化包括混合水泥的生产，废物衍生燃料的使用，石灰石水泥和低碱水泥的生产，以及窑中钢渣的使用。表 8 提供了以下方面的信息，包括上述每项措施相关的初始资本费用、操作和维修（O&M）成本、简单投资回收期、单位燃料节约量、单位节电量、单位二氧化碳减排量，以及使用寿命。

混合水泥

混合水泥的生产包括熟料与一种或多种不同比例的添加剂（粉煤灰，火山灰，高炉矿渣，硅石烟尘）共同研磨。混合水泥的使用是一种特别有吸引力的提高效率的选择，因为熟料与其它添加剂的共同研磨，不仅可以降低熟料生产中所使用的能源（和碳排放），而且相当于减少了煅烧过程中二氧化碳的排放。混合水泥已经在世界各地使用几十年了。

表 8. 在产品和配料变化方面的能效措施

	资金成本（$/t）	O & M 成本（$/t）	回收期（年）	燃料节约(吉焦/吨)	节电量(千瓦时/吨)[1]	CO_2 减排（kgC/t）	使用寿命(年)
混合水泥	0.7	-0.06	< 1	0.9-3.4 [2]	-11	21-85	20
废物衍生燃料的使用	0.1-3.7	< 0 [3]	1	> 0.6	-	12 [4]	20
石灰石水泥 [5]	极少	-5%	< 1	0.3	2.8	8.4	NA
低碱水泥（只有回转窑）	0	0	即刻	0.19-0.5	[6]	4.6-12.1	NA
炉窑中钢渣的使用	*		< 2	0.19	-	4.9	NA

注释：能源节省和成本基于案例研究数据，特别注释的地方除外。在中国，其成本将取决于技术和可用性。如有可能，下列文字中，我们已加入更多来自中国的数据。所有数据均基于每吨熟料。

[1] 负数表示由于该措施导致的电力增加。

[2] 来自中国案例研究的数据表明，可节省 2.6～3.4 吉焦/吨熟料，而美国方面的数据显示，可节省 0.9 吉焦/吨熟料（或在熟料与水泥之比为 0.65 时，节省 1.4 吉焦/吨 水泥）。

[3] 降低了营运成本，但数据不详

[4] 在计算这项措施的单位 CO_2 减排时，我们对溶剂使用 0.02 tC/GJ 的排放系数。

[5] 这项措施的节省计算基于以每吨水泥为基准给出的数据以及熟料与水泥之比为 0.85。O&M 成本节省的给出，基于炉窑营运成本的节省百分比。

[6] 可以节省一些电力，但数据不详。

*每种装置的总投资成本为 40 万～100 万美元。

NA =数据不详

混合水泥在欧洲非常普遍，高炉矿渣水泥和火山灰水泥约占水泥生产总量的 12%，普通硅酸盐水泥占水泥生产总量的 44%（Cembureau，1997b）。混合水泥引入到美国，以降低水泥生产成本（尤其是能源成本），无需大量资金成本，并可扩大生产能力，以减少窑的废气排放。在欧洲，已经为 25 种水泥（不同应用场合使用不同成分）拟订了一种通用标准。欧洲标准允许更广泛应用添加剂。在世界各地其他许多国家都在使用混合水泥。中国混合水泥中使用了各种材料（见下文），但水泥厂主要生产普通硅酸盐水泥（约占总产量的 95%）（Cui，2004）。混合水泥具有更高的长期强度，提高了耐酸和抗硫化的能力，同时有变废为宝的效果。尽管混合材掺量小于 30%的水泥一般都具有与普通硅酸盐水泥混凝土相媲美的凝固时间，但短期强度（7 天内测量）可能较低。

美国混合水泥的消费和生产仍然有限。然而，在中国生产的水泥中，普通硅酸盐水泥和矿渣水泥正被广泛使用（ITIBMIC，2005）。此外，由于技术进

步和市场发展允许生产不同种类和等级的水泥，一些工业副产品，如炉渣、飞灰、煤矸石、石灰石、沸石、火山灰以及天然矿物，正广泛应用于水泥生产。在中国水泥制品中，混合材掺量达 24%～26%（ITIBMIC，2005）。表 9 给出了中国使用的各种混合材的价格和不同运输方式。不同混合材的价格会有很大差别。价格随着地点、产量、市场需求、产品类型和处理方法的变化而变化。ITBIMIC（2005）估计，燃料节约至少达 10%，并且产品也有类似的增加。

表 9. 中国使用的各种添加剂的价格和运输方式

添加剂	高炉炉渣	飞灰	煤渣	煤矸石	石灰石	石膏	卵石	窑灰
价格（元/吨）	13 - 80	12 - 35	14 - 26	10 - 38	11 - 40	52	19	0
运输方式	火车和卡车	卡车和管道	火车和卡车	卡车	卡车和传送带	卡车	卡车	管道

根据 ITIBMIC，2005，表 26 改编。添加剂的价格随着地点，市场需求，产品类型和运输方式的变化而变化。

对于熟料/水泥平均比率为 65%的混合水泥，熟料比重每降低一个百分点，则相应节约燃料 1.42 GJ/t 水泥。为了干燥高炉矿渣，单位燃料使用量增加 0.09 GJ/t 水泥，但由于减少了旁路窑出口气体以消除富碱灰尘所需的能源，相应节约单位能耗 0.2 GJ/t 水泥。每增加 1%的旁路，估计单位节能量为 9～23 MJ/t 水泥（Alsop and Post，1995）。旁路节能是由于下列这个事实：混合水泥提供了一种附加优势，由于共同研磨的材料还降低了碱-硅反应性（ASR），从而减少了消除含碱量高的窑灰所需的能量消耗。在实践中，旁路节能量可能极少，主要由于为避免预热器堵塞，存在一个最低限度的旁路量要求。因此，这项措施的单位节能量为 1.4 GJ/t 水泥（对于 0.65 的熟料/水泥比，该值为 0.9 GJ/t 熟料）。但是，由于增加了与粉磨高炉矿渣有关的用电量（其它材料或多或少足够细），能源消耗有可能增加。

在水泥生产中应用混合材，其成本可能会有所不同。资金成本限制了混合材的额外存储容量。然而，高炉炉渣可能需要在用于水泥生产之前进行干燥。这可以可以在磨机中完成，利用窑废气，或补燃的气体，后者可来自用于发电的燃气轮机，或来自补燃的空气加热器。节约运行成本将取决于混合材的购买

（包括运输）成本[4]，（细）磨所增加的电力成本，熟料生产所降低的燃料成本，原料研磨和回转窑传动的电力成本，以及降低处理和采矿成本。这些成本将随工厂位置的不同而不同，而且还要基于单个工厂的具体情况进行评估。据估计，单位用电量增加 16.5 千瓦时/吨水泥（11 千瓦时/吨熟料）（Buzzi，1997），投资成本为 0.72 美元/吨水泥（0.5 美元/吨熟料），包括运输和储存的成本（料仓和重量计量进料器）。

中国广东省连州水泥厂利用 33%～34%的氧化钙（CaO）以及来自邻县铜尾矿中高含量硫化铁取代它的一些高品位石灰石（ITIBMIC，2004）。其结果，单位节能量为 2.6～3.4 GJ/t 熟料，节煤量超过 50%。熟料产量已从日产 2 吨增加到 14 吨，其强度有所改善，且质量稳定（ITIBMIC，2004）。

中国每年产生 2.5 亿吨高炉炉渣，并且具有使用这类废物的悠久历史（Cui，2006）。凡有利用的地方，大约 20%～25%的熟料被替换；中国最高炉渣使用比率达 50%（Cui，2006）。此外，高炉炉渣还被加入到混凝土和水泥熟料中。在中国，粉煤灰也越来越多地被使用。中国每年产 1 亿吨高炉炉渣水泥和 3 亿吨的粉煤灰水泥（Cui，2006）。

废物衍生燃料的使用。在窑中，废物燃料可替代传统的商业燃料。例如，美国水泥行业正在越来越多地使用废物燃料。1999 年，轮胎几乎占美国水泥行业燃料总投入量的 5%，而所有废料的总量约占所有燃料投入量的 17%。当在欧洲和北美进行的各种废物利用试验取得成功后，废物利用增加的趋势可能会继续增加。新的废物源包括地毯和塑料废料，滤饼，油漆残余物以及（脱水的）污水污泥（Hendriks et al.，1999）。水泥窑还可以焚烧有害废物。自上世纪 90 年代初以来，水泥窑每年焚烧将近 1 百万吨的有害废物（CKRC，2002）。焚烧废物所带来的额外收入有助于降低各种废弃物焚烧水泥窑的生产成本，尤其是湿法窑。废物衍生燃料可代替商业燃料的使用，并具有节能效果和二氧化碳减排效果，这取决于废物的选择使用（例如，带有或不带能量回收的焚烧）。目

[4]为了避免揭露专利数据，对于“水泥质”飞灰或颗粒状高炉炉渣，USGS 没有报道船载运量数据值，导致不能估计添加剂的平均成本。

前，中国只有三个水泥厂正在燃烧废物燃料。北京水泥厂年处理废物燃料的能力为 1 万吨 (25 种废物燃料)；该厂正在处理来自化工厂的固体废物，某些颜料、溶剂以及来自水处理的废污泥（Cui，2004；Wang，2006a）。上海金山水泥厂处理了从黄浦江挖掘的污泥（Cui，2004）。香港水泥厂从其他省份购买废物，在其炉窑使用（Wang，2006a）。其他工厂也正在利用废物，但数量很少（Wang，2006a）。

水泥窑是一种从废物回收能源的有效方式。二氧化碳排放量的减少取决于废物衍生燃料的碳含量，以及废物的选用和使用效率（例如，带有或不带热量回收的焚烧）。在表 8 中，我们使用溶剂的碳含量来确定二氧化碳减排量。事实上，炉窑中高温和长停留时间摧毁了几乎所有的有机物，而高效除尘过滤器可以将某些其它潜在排放物降低到安全水平（Hendriks et al.，1999；Cembureau，1997b）。

在北美，许多替代燃料主要是使用轮胎或轮胎衍生燃料。自从 1990 年以来，30 多家水泥厂已获得批准焚烧轮胎衍生燃料，每年燃烧了大约 3500 万只轮胎（CKRC，2002）。加拿大魁北克省 Joliette 市 St. Lawrence 水泥厂在 1994 年完成了一个项目，他们安装了一套轮胎自动给料系统，用于输送整只轮胎到窑中部进行焚烧，代替了约 20%的能量（CADDET，1996），相当于节能 0.6 吉焦/吨熟料。安装 Joliette 系统的单位成本约为 3.70 美元/年/吨熟料。对于不太复杂的系统，其单位成本为 0.11～1.1 美元/年/吨熟料。其他工厂已经有焚烧固体和液体废物，以及粉碎的塑料废物的项目经验。考虑运行成本的净降低（CADDET，1996；Gomes，1990，Venkateswaran and Lowitt，1988），同时加上新增的废物衍生燃料的储存设施和燃烧器的改造（如有必要），其单位投资成本估计为 1.1 美元/年/吨熟料。

石灰石普通水泥。类似于混合水泥，破碎的石灰石与熟料共同研磨来生产水泥，可以减少熟料煅烧的需求。这降低了窑和熟料研磨中的能源使用以及煅烧产生的二氧化碳排放量和煅烧的能源使用。已经证实，添加高达 5%的石灰石不会对普通水泥的性能产生任何负面影响，而优化的石灰石水泥还可以稍微改善其可

加工性（Detwiler and Tennis，1996）。添加 5%的石灰石将会降低 5%的燃料消耗（即平均 0.35 吉焦/吨熟料），单位研磨耗电降低 3.3 千瓦时/吨水泥，以及二氧化碳排放量减少接近 5%。同时附加费用将微乎其微（仅限于额外的物料储存和输配），炉窑运行成本减少 5%。

低碱水泥*。在北美，水泥行业的部分产品为碱含量低的水泥（约占 20%～50%的市场份额），远高于在其他很多国家的份额（Holderbank，1993）。美国和中国的一些地区，由于骨料质量的因素，某些客户或特定地区的气候要求低碱水泥（如高碱水泥更适合降雨量较大的华南地区，而不太适合较干旱的华北地区）。通过从生产系统中排出（称之为旁路）热气体和带有碱金属的微粒，可以达到降低碱含量的目的。旁路还可避免预热器堵塞。旁路形成了水泥窑灰（CKD），对水泥窑灰的处理是由资源节约和回收法案（RCRA）来监管的。很多水泥应用领域需要较低的碱含量，因为混合材选择的余地更大。粉煤灰或高炉炉渣用作混合材（或在混合水泥的生产中，见下文），可以减少对低碱水泥的需求。低碱水泥生产可能导致更高的能耗。据假设，旁路排出废气每提高 1%，单位节能 8～21 MJ/t（2～5Kcal/kg）（Alsop and Post，1995）。对于预分解窑，该数值较低，而对于预热器窑，该数值较高。通常情况下，通过旁路排出的废气占炉窑尾气的 10%～70%（Alsop and Post，1995）。此外，由于水泥产量增加，节约了电耗，这是因为水泥窑粉尘结束于熟料，而不是水泥，因此需要进一步处理。为了说明问题，假定旁路量减少 20%时，导致节约能源 0.19～0.5 吉焦/吨熟料。尽管水泥用户（如商品混凝土生产者）可能需要改变所用混合材的种类（这可能导致成本），但这种产品变化不涉及投资。因此，与商品混凝土制造商和其他大型水泥用户配合实施，这项措施最成功。在中国，低碱水泥的生产采用国产技术（Cui，2006）。

钢渣在炉窑中的使用。德克萨斯州企业（中洛锡安郡，德克萨斯州）在 1994 年开发了新的生产工艺，以使用钢铁行业电弧炉（EAF）的炉渣作为炉窑的入料，以减少石灰石的使用。含有硅酸三钙（C3S）的钢渣，可以比石灰石更容易地转换为游离氧化钙。这种炉渣可代替石灰石（比重约为石灰石的 1.6 倍）。电

弧炉产生 0.055～0.21 吨炉渣/吨钢（平均 0.12 吨炉渣/吨钢）（U.S. DOE OIT，1996）。CemStar®工艺允许用电弧炉炉渣代替 10%～15%的熟料，以减少煅烧的能源需求。CemStar®工艺的优点是不需研磨炉渣，而是将它们以 5cm 的块度直接添加到窑中。根据投入位置的不同，它还可节省加热的能量。煅烧能量估计为 1.9 吉焦/吨熟料（Worrell et al.，2001）。因为炉渣中的石灰已经分解，这减少了分解引起的二氧化碳排放量，而减少燃烧能源和降低火焰温度又减少了氮氧化物排放量（Battye et al.，2000）。为了说明起见，使用 10%的炉渣投入量，将减少单位能耗 0.19 吉焦/吨熟料，同时二氧化碳排放量减少约为 11%。在湿法窑中，节能可能更多，这是由于减少了蒸发需求。氮氧化物排放量的减少随窑型的不同而不同，范围在 9%～60%之间，该数据是基于两种炉窑的测量结果（Battye et al.，2000）。设备成本主要用于物料处理，每套装置的成本在 20 万美元～50 万美元之间。总投资约为设备成本的二倍，CemStar®收取专利费（Battye et al.，2000）。成本节省包括不增加运行和能源成本而生产额外熟料所增加的收入，以及减少的铁矿石采购（由于炉渣提供了熟料所需的部分铁）。铁含量需要与其它铁源进行平衡，例如轮胎和铁矿石。在美国，美国环境保护局在 1999 年为 CemStar®工艺颁发了特别奖，作为 ClimateWise 程序的一部分。

中国没有根据国情发展这种技术，而到目前为止，这项措施尚未在中国水泥窑中实施（Cui，2006）。

感谢

本工作得到了美国环保署气候保护合作伙伴事业部能源之星项目的支持，合同号为 DE-AC02-05CH11231。 本次面向中国的报告修订工作是在美国环保署国际事务办公室、美国能源基金会中国可持续能源项目和陶氏化学公司的资助下完成的。在此我们感谢美国环保署、美国能源基金会和陶氏化学公司在本次报告修订中给予的大力支持。

众多人员在本报告的数据收集和早期版本评阅中提供了大力帮助。我们特别希望感谢 Alexander Goebel (Krupp Polysius，德国)，Steve McGarel，Tom Evans，Amy George 和 Greg Martin (Pavilion Technologies Inc.，得克萨斯州) 在早期研究中为我们提供数据。我们感谢下列人员对本报告早期版本的评阅：John Chadbourne (Essroc)，Greg Galvin (RMC Pacific)，Gerald Young (Penta Engineering)，Robert Miller (Metso Minerals)，Joel Fleming (Lafarge North America)，Greg Miller (CTL，伊利诺伊州)，Hendrik van Oss (USGS)，Robin Riester (FLS Automation)，Dan Willis (Trinity Consultants，得克萨斯州) 和 Ray Worthington (BMH Americas Inc.)。我们感谢 Tom Carter (PCA) 协助我们收集建议。我们感谢 Ann Dougherty，Gregg Miller (Portland Cement Association，Skokie，伊利诺伊州)，George Lesnikoff (Hanson Cement，Cupertino，加利福尼亚州) 以及 Michael Nisbet (JAN Consultants，Montreal，加拿大) 帮助评阅本报告基于的一些早期报告并提供技术信息。我们也要感谢 Suzanne Giannini-Spohn (美国环保署) 在炉窑能源利用和效率部分的研究和写作中提供的有益指导。我们感谢清华大学的 Wang Yanjia 教授对报告进行评阅并提供信息。我们感谢建筑材料工业技术情报研究所副所长 Cui Yuansheng 教授与我们会见并提供中国水泥工业的相关文档和数据。

作者对本报告中可能存在的任何错误负责。本报告描述的观点并不一定反映美国环保署、美国能源部或美国政府的观点。

参考文献

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

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

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).

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.

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.

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.

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

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

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

Caffal, C. 1995. Energy Management in Industry, *CADDET Analyses Series 17*, Sittard, the Netherlands: CADDET.

Canadian Lime Institute. 2001. Energy Efficiency Opportunity Guide in the Lime Industry, Office of Energy Efficiency, Natural Resources Canada, Ottawa, ON.

Cembureau, 1997a. Alternative Fuels in Cement Manufacture: Technical and Environmental Review. Brussels: Cembureau. http://www.cembureau.be/Documents/Publications/Alternative_Fuels_in_Cement_Manufacture_CEMBUREAU_Brochure_EN.pdf

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

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.

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.

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.

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.

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.

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.

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

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).

De Hayes, L.J., 1999. Flexibility, Availability and Maintenance Concept for the Quadropol, Polysius Teilt Mit No. **208**, pp.33-38, Krupp Polysius, Germany.

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.

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

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

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

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.

Folsberg, J., 1997. Future Grinding, *Asian Cement*, January 1997, pp.21-23.

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

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

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

Gerbec, R., 1999. Fuller Company. Personal Communication.

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

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

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.

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

Haspel, D., and W. Henderson. 1993. A New Generation of Process Optimisation Systems, International Cement Review, June: 71-73.

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.

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.

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

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.

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

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

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

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.

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

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.

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.

Lang, Theodor A., 1994. Energy Savings Potential in the Cement Industry and Special Activities of the 'Holderbank' Group, in *Industrial Energy Efficiency: Policies and Programmes Conference Proceedings* (May 26-27, 1994). Paris: International Energy Agency and U.S. Department of Energy.

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.

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.

Lesnikoff, G. 1999. Hanson Cement, Cupertino, CA, personal communication.

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.

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

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.

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., 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.

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/

Martin, G. and S. McGarel, 2001b. Automated Solution, International Cement Review, February 2001, pp.66-67.

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.

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.

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.

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.

Nelson, K., 1994. Finding and Implementing Projects that Reduce Waste, in R. Socolow, C. Andrews, F. Berkhout and V. Thomas, *Industrial Ecology and Global Change*, Cambridge, UK: Cambridge University Press.

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

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

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.

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.

Patzelt, N., 1993. Finish Grinding of Slag, *World Cement* 10 **24** pp.51-58.

Philips Kiln Services. 2001. Philips Enviro-Seal, Case Study – M/S Maihar cement, Available at: http://www.kiln.com, accessed November 2001.

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

Price, L. K. and C. Galitsky. 2006. *Opportunities for Improving Energy and Environmental Performance of China's Cement Kilns*. Berkeley, CA: Lawrence Berkeley National Laboratory.

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.

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

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.

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.

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.

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.

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.

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.

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

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.

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

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.

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.

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.

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

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

Van den Broeck, M., 1999. GO Control Goes 'Multi-Circuit' *International Cement Journal* 1, pp.35-37.

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

Van Oss, H. 2002. Personal Communication. U.S. Geological Survey, March – May, 2002.

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.

Videgar, R., Rapson, D. and Dhanjal, S., 1997. "Gyro-therm Technology Boosts Cement Kiln Output, Efficiency and Cuts NOx Emissions." *Proc.1997 IEEE/PCA Cement Industry Technical Conference XXXIX Conference Record*, Institute of Electrical and Electronics Engineers: New Jersey.

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

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

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

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.

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).

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.

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