



水泥行业

前 言

国家节能中心制定能效评价技术依据的主要目的是为全国节能中心系统有关工作提供依据，例如，固定资产投资项目节能评估和审查、“中国能效之星”评价、能源审计等。同时，随着能效评价技术依据的不断修订和完善，希望能为相关行业、企业及机构统一规范地开展能效评价工作提供帮助，并为形成国家标准提供参考。

能效评价技术依据，其核心内容是能效评价指标体系的设置，主要包含能效评价指标和指标值两个部分。其中，指标的设置参考了国家能耗限额标准、地方能耗限额标准（限额文件）、行业能耗限额标准，以及相关行业和企业统计指标；指标值的确定参考了国家能耗限额标准、行业能耗限额标准、地方能耗限额标准，以及国家节能中心和地方节能中心所掌握的能效数据、行业协会和相关科研机构的统计数据、典型企业的实际运行数据等。此外，能效评价技术依据还对指标体系的具体应用进行了解释。

《水泥行业能效评价技术依据》由国家节能中心组织制定，在制定过程中得到了中国建筑材料工业规划研究院能效评估中心和山东、广西、安徽、湖南、河南、山西、江苏、青海等省节能中心及相关企业的大力支持和帮助，在此表示感谢。

1 适用范围

本技术依据适用于通用硅酸盐水泥及熟料制造企业的能效评价，包括新建项目的节能评估和审查，以及既有项目的能效评价等。

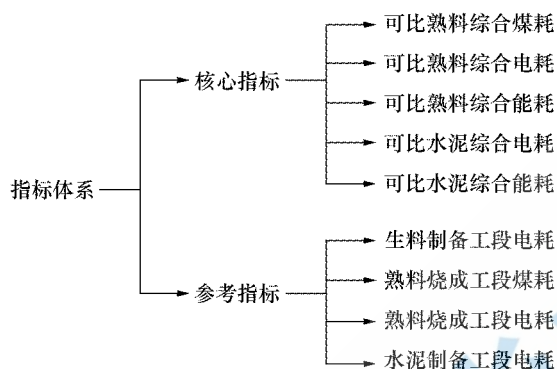
2 规范性引用文件

本技术依据引用了下列文件的条款。凡是注日期的引用文件，仅所注日期的版本适用于本技术依据。凡是不注日期的引用文件，其最新版本适用于本技术依据。

GB 16780—2012	水泥单位产品能源消耗限额
GB 50443—2007	水泥工厂节能设计规范
GB/T 2589	综合能耗计算通则
GB/T 26281	水泥回转窑热平衡、热效率、综合能耗计算方法
GB/T 26282	水泥回转窑热平衡测定方法
GB/T 27977—2011	水泥生产电能能效测试及计算方法
GB/T 213—2003	煤的发热量测定方法
GB/T 17954	工业锅炉经济运行
GB 18613	中小型三相异步电动机能效限定值及能效等级
GB/T 23331	能源管理体系要求
GB/T 24851—2010	建筑材料行业能源计量器具配备和管理要求
GB/T 6422—2009	企业能耗计量与测试导则
GB/T 15587—2008	工业企业能源管理导则

3 能效评价指标体系

能效评价指标体系见下图。



4 评价指标的定义及计算方法

4.1 核心指标

4.1.1 可比熟料综合煤耗

定义：在统计期内生产一吨熟料的综合燃料消耗，包括烘干原燃材料和烧成熟料消耗的燃料，折算成标准煤，经统一修正后所得的煤量。

统计范围：熟料综合煤耗是从原燃材料进入生产厂区开始，到水泥熟料出厂的整个熟料生产过程中消耗的燃料量，包括烘干原燃材料和烧成熟料消耗的燃料（不包含点火用油或用气）。如果水泥企业采用废弃物作为替代燃料，应单独统计替代燃料消耗量，但替代燃料不包含在熟料综合煤耗范围内。废弃物种类见财政部、国家税务总局《关于资源综合利用及其他产品增值税政策的通知》（财税〔2008〕156号）中附件2的规定和《关于资源综合利用及其他产品增值税政策的补充的通知》（财税〔2009〕163号）中的规定。

计算公式：

$$e_{kcl} = aK(e_{cl} - e_{he} - e_{hu} - e_{fc})$$

式中：

e_{kcl} —— 可比熟料综合煤耗，单位为千克每吨（kg/t）；

a —— 熟料强度等级修正系数；

K ——海拔修正系数；

e_{cl} ——熟料综合煤耗，单位为千克标准煤每吨（kgce/t）；

e_{he} ——统计期内余热发电折算的单位熟料标准煤量，单位为千克标准煤每吨（kgce/t）；

e_{hu} ——统计期内余热利用的热量折算的单位熟料标准煤量，单位为千克标准煤每吨（kgce/t）；

e_{fc} ——处理废弃物消耗的燃料折算到每吨熟料的标准煤耗，单位为千克标准煤每吨（kgce/t），如果没有处理废弃物，按 0 考虑。

(1) 熟料综合煤耗（ e_{cl} ）：

$$e_{cl} = \frac{P_C Q_{net,ar}}{Q_{BM} P_{CL}}$$

式中：

P_C ——统计期内用于烘干原燃材料和烧成熟料的入窑与入分解炉的实物煤总量，单位为千克（kg）；

$Q_{net,ar}$ ——统计期内实物煤的加权平均低位发热量，单位为千焦每千克（kJ/kg）；

Q_{BM} ——每千克标准煤发热量，见 GB/T 2589，单位为千焦每千克（kJ/kg）；

P_{CL} ——统计期内的熟料总产量，单位为吨（t）。

燃料发热量：固体燃料发热量按 GB/T 213 的规定测定，液体燃料发热量按 GB/T 384 的规定测定；企业无法直接测定燃料发热量时，按 GB/T 26282 的规定计算。

(2) 余热发电折算标准煤量（ e_{he} ）：

$$e_{he} = \frac{0.1229 \times (q_{he} - q_0)}{P_{CL}}$$

式中：

e_{he} ——统计期内余热发电折算的单位熟料标准煤量，单位为千克标准煤每吨

(kgce/t) ;

0.1229——每千瓦时电力折合的标准煤量，单位为千克标准煤每千瓦时 (kgce/kW·h) ;

q_{he} ——统计期内余热电站总发电量，单位为千瓦时 (kW·h) ;

q_0 ——统计期内余热电站自用电量，单位为千瓦时 (kW·h)。

(3) 余热利用热量折算标准煤量 (e_{hu}) :

$$e_{hu} = \frac{H_{HI} - (H_{HE} + H_{HD})}{Q_{BM} P_{CL}}$$

式中:

e_{hu} ——统计期内余热利用的热量折算的单位熟料标准煤量，单位为千克标准煤每吨 (kgce/t) ;

H_{HI} ——统计期内余热利用进口总热量 (不包含烘干原料与烘干煤的热量)，单位为千焦 (kJ) ;

H_{HE} ——统计期内余热利用出口热量，单位为千焦 (kJ) ;

H_{HD} ——统计期内余热利用系统的散热损失总量，单位为千焦 (kJ)。

(4) 熟料强度等级修正系数 (a) :

$$a = \sqrt[4]{\frac{52.5}{A}}$$

式中:

A ——统计期内熟料平均 28d 抗压强度，单位为兆帕 (MPa) ;

52.5 ——统计期内熟料平均抗压强度修正到 52.5MPa。

(5) 海拔修正系数 (K) :

水泥企业所在地海拔高度超过 1000 米时进行海拔修正。

$$K = \sqrt{\frac{P_H}{P_0}}$$

式中：

K ——海拔修正系数；

P_0 ——海平面环境大气压，101325 帕（Pa）；

P_H ——当地环境大气压，单位为帕（Pa）。

4.1.2 可比熟料综合电耗

定义：在统计期内生产一吨熟料，包括熟料生产各过程的电耗和生产熟料辅助过程的电耗，经强度和海拔高度修正后的综合电耗。

统计范围：熟料综合电力消耗包括熟料工序（包括废气处理）用电，以及生料电力消耗，不包括矿山石灰石和其他辅助原料的破碎和输送至厂区的电耗。熟料工序用电中还应包括生产煤粉各项用电，即生产水泥熟料的全部电耗。对只生产水泥熟料的企业，熟料生产综合电力消耗量还应包括水泥熟料发送工序的电力消耗，不包括用于基建、技改等项目建设消耗的电量。采用废弃物作为替代燃料和替代原料时，处理废弃物消耗的电量应单独统计，并且不包含在熟料综合电耗范围内。

计算公式：

$$Q_{KCL} = aKQ_{CL}$$

式中：

Q_{KCL} ——可比熟料综合电耗，单位为千瓦时每吨（kW·h/t）；

a ——熟料强度等级修正系数；

K ——海拔修正系数；

Q_{CL} ——统计期内熟料综合电耗，单位为千瓦时每吨（kW·h/t）。

4.1.3 可比熟料综合能耗

定义：在统计期内生产一吨熟料消耗的各种能源按熟料 28d 抗压强度等级修正到 52.5 等级及海拔高度统一修正后并折算成标准煤所得的综合能耗。

统计范围：生产水泥熟料综合能源消耗量包括电力、煤炭（不包括油品、

天然气、煤气、液化气、蒸汽) 的消耗。企业用自备锅炉、自备发电机组生产的蒸汽、电力由本企业消耗, 只计算第一次能源消耗, 不再重复计算蒸汽及电的消耗, 水泥厂利用余热发的电同样不重复计算。

计算公式:

$$E_{CL} = e_{kcl} + 0.1229 \times Q_{KCL}$$

式中:

E_{CL} ——可比熟料综合能耗, 单位为千克标准煤每吨 (kgce/t);

e_{kcl} ——可比熟料综合煤耗, 单位为千克每吨 (kg/t);

Q_{KCL} ——可比熟料综合电耗, 单位为千瓦时每吨 (kW·h/t)。

4.1.4 可比水泥综合电耗

定义: 在统计期内生产一吨水泥的综合电力消耗, 包括水泥生产各过程的电耗和生产水泥的辅助过程电耗 (包括厂内线路损失以及车间办公室、仓库的照明等消耗), 按照强度和海拔高度统一修正后的综合电耗。

统计范围: 水泥消耗的电力应包括水泥工序电耗, 以及水泥所消耗的熟料、石膏、混合材的电力消耗量, 还包括水泥出厂时进行包装或者散装所消耗的电力。为生产水泥的各种辅助用电如机修、供热、供水、化验等辅助用电和变电、配电、线路损失的电力、厂区、办公室、仓库照明用电, 除生产水泥, 还有其他产品生产的, 各种辅助用电应合理分摊。采用废弃物作为替代原料、替代燃料和水泥混合材时, 处理废弃物消耗的电量应单独统计, 并且不包含在水泥综合电耗范围内。

计算公式:

$$Q_{KS} = dKQ_S$$

式中:

Q_{KS} ——可比水泥综合电耗, 单位为千瓦时每吨 (kW·h/t);

d ——水泥强度等级修正系数;

K ——海拔修正系数；

Q_s ——水泥综合电耗，单位千瓦时每吨 ($\text{kW} \cdot \text{h}/\text{t}$)。

(1) 水泥综合电耗：

$$Q_s = \frac{q_{fm} + Q_{cl}P_{cl} + q_m P_m + q_g P_g + q_{fz}}{P_c}$$

式中：

Q_s ——水泥综合电耗，单位为千瓦时每吨 ($\text{kW} \cdot \text{h}/\text{t}$)；

q_{fm} ——统计期内水泥粉磨及包装过程耗电量，单位为千瓦时 ($\text{kW} \cdot \text{h}$)；

p_{cl} ——统计期内熟料消耗量，单位为吨 (t)；

q_m ——统计期内每吨混合材预处理平均耗电量，单位为千瓦时每吨 ($\text{kW} \cdot \text{h}/\text{t}$)；

p_m ——统计期内混合材消耗量，单位为吨 (t)；

q_g ——统计期内每吨石膏平均耗电量，单位为千瓦时每吨 ($\text{kW} \cdot \text{h}/\text{t}$)；

p_g ——统计期内石膏消耗量，单位为吨 (t)；

q_{fz} ——统计期内应分摊的辅助用电量，单位为千瓦时 ($\text{kW} \cdot \text{h}$)；

P_c ——统计期内水泥总产量，单位为吨 (t)。

当企业全部采用外购熟料生产水泥时，上式中外购熟料的 Q_{cl} 按零计算；当企业外购部分熟料生产水泥时，上式中外购熟料的 Q_{cl} 按 $65\text{kW} \cdot \text{h}/\text{t}$ 统一计算。

当企业部分熟料外卖时，在计算水泥综合电耗时，上式中 p_{cl} 不包括外卖的熟料量。

(2) 水泥强度等级修正系数：

$$d = \sqrt[4]{\frac{42.5}{B}}$$

式中：

d ——水泥强度等级修正系数；

B ——统计期内水泥加权平均强度，单位为兆帕 (MPa)；

42.5——统计期内水泥平均强度修正到 42.5MPa。

4.1.5 可比水泥综合能耗

定义：在统计期内生产一吨水泥消耗的各种能量折算成标准煤，经统一修正后所得的综合能耗。

统计范围：水泥综合能源消耗包括电力、原煤。企业用自备锅炉、自备发电机组生产的蒸汽、电力，由本企业消耗的，只计算第一次能源消耗，不再重复计算。水泥厂利用余热发电同样不重复计算。

计算公式：

$$E_{KS} = e_{kcl} \times g + e_h + 0.1229 \times Q_{KS} + 1.15 \times (f - 25\%) \times 100$$

式中：

E_{KS} ——可比水泥综合能耗，单位为千克每吨（kg/t）；

e_{kcl} ——可比熟料综合煤耗，单位为千克每吨（kg/t）；

g ——统计期内水泥企业水泥中熟料平均配比，%；

e_h ——统计期内烘干水泥混合材所消耗燃料折算的单位水泥标准煤量，单位为千克每吨（kg/t）。

Q_{KS} ——可比水泥综合电耗，单位为千瓦时每吨（kW·h/t）；

f ——水泥中石膏和混合材掺加量（%）；

1.15——混合材每改变 1%，影响水泥综合能耗值，单位为千克每吨（kg/t）；

25%——混合材掺量基准。

当企业全部采用外购熟料生产水泥时，上式中外购熟料的 e_{kcl} 按零计算。

当企业外购部分熟料生产水泥时，上式中 e_{kcl} 可采用本企业可比熟料综合煤耗数据。

统计期内企业生产两种以上不同强度等级的水泥时，应根据不同强度等级的可比水泥综合电耗和水泥产量采用加权平均的方法计算可比水泥综合电耗和可比水泥综合能耗。

企业有多条生产线时，按生产线分别计算能耗，公用部分的电耗按统计期所属工序产品实际产量分摊到各条生产线。

4.2 参考指标

4.2.1 生料制备工段电耗

定义：在统计期内生产一吨生料，生料制备工序的电力消耗。

统计范围：从原材料进入生产厂区开始，到生料出生料库和废气出高温风机到窑尾烟囱的整个生料制备和废气处理过程消耗的电量，包括原料破碎、原料预均化、生料粉磨、生料均化消耗的电量。

计算公式：

$$Q_{yz} = \frac{q_{yz}}{P_y}$$

式中：

Q_{yz} ——生料制备工段电耗，单位为千瓦时每吨（kW·h/t）；

q_{yz} ——统计期内生料制备工段电耗，单位为千瓦时（kW·h）；

P_y ——统计期内生料产量，单位为吨（t）。

4.2.2 熟料烧成工段煤耗

定义：在统计期内生产一吨熟料，熟料制备工序消耗的标准煤量。

统计范围：从生料出生料库到熟料入熟料库整个过程中消耗的标准煤量，包括窑头和窑尾喂煤。

计算公式：

$$e_{sc} = \frac{P_C Q_{net,ar}}{Q_{BM} P_{CL}}$$

式中：

e_{sc} ——熟料烧成工段煤耗，单位为千克标准煤每吨（kgce/t）；

P_c ——统计期内用于烘干原燃材料和烧成熟料的人窑与入分解炉的实物煤总量，单位为千克（kg）；

$Q_{net,ar}$ ——统计期内实物煤收到基的加权平均低位发热量，单位为千焦每千克（kJ/kg）；

Q_{BM} ——每千克标准煤发热量，见 GB/T 2589，单位为千焦每千克（kJ/kg）；

P_{CL} ——统计期内的熟料总产量，单位为吨（t）。

4.2.3 熟料烧成工段电耗

定义：在统计期内生产一吨熟料，熟料制备工序的电力消耗。

统计范围：从生料出生料库到熟料入熟料库，原煤入煤磨到煤粉入煤粉仓的整个熟料烧成过程消耗的电量，包括燃料制备及生料预热分解、熟料煅烧及熟料冷却和废气处理消耗的电量。

计算公式：

$$Q_{sc} = \frac{q_{sc}}{P_{cl}}$$

式中：

Q_{sc} ——熟料烧成工段电耗，单位为千瓦时每吨（kW·h/t）；

q_{sc} ——统计期内熟料烧成工段电耗，单位为千瓦时（kW·h）；

P_{cl} ——统计期内熟料产量，单位为吨（t）。

4.2.4 水泥制备工段电耗

定义：在统计期内生产一吨水泥，水泥制备工序的电力消耗。

统计范围：从水泥熟料、石膏及混合材出调配库到水泥出厂的整个水泥制备工段消耗的电量，包括水泥粉磨、水泥包装及散装消耗的电量。

计算公式：

$$Q_{sz} = \frac{q_{sz}}{P_s}$$

式中：

Q_{sz} ——水泥制备工段电耗，单位为千瓦时每吨（kW·h/t）；

q_{sz} ——统计期内水泥制备工段电耗，单位为千瓦时（kW·h）；

P_s ——统计期内水泥产量，单位为吨（t）。

5 能效评价指标值

能效评价指标值见表 1。

表 1 能效评价指标值

	A	B	C	D
可比水泥综合能耗（kgce/t）	73	86	92	95
可比水泥综合电耗（kW·h/t）	68	80	85	88
可比熟料综合能耗（kgce/t）	92	106	112	118
可比熟料综合煤耗（kgce/t）	85	99	105	110
可比熟料综合电耗（kW·h/t）	51	54	58	62
生料制备工段电耗（kW·h/t）	15	16	18	20
熟料烧成工段煤耗（kgce/t）	99	103	106	110
熟料烧成工段电耗（kW·h/t）	25	29	32	33
水泥制备工段电耗（kW·h/t）	30	32	34	36

其中，A 值为全国同类水泥企业能效最高水平；B 值为全国同类水泥企业能效前 5% 水平；C 值为全国同类水泥企业能效前 20% 水平；D 值为全国同类水泥企业能效平均水平。

6 能效评价指标体系的应用

6.1 固定资产投资项目节能评估和审查

新建水泥项目的固定资产投资项目节能评估文件，应提供所有核心指标和参考指标的设计值及计算过程。

在固定资产投资项目节能评审中，对新建水泥项目采用可比水泥综合能

耗为判断项目总体能效水平的指标，对只生产熟料的新建水泥项目采用可比熟料综合能耗为判断项目总体能效水平的指标。具体判断方法如下。

新建水泥项目：

- 可比水泥综合能耗设计值 \leq B 值，国内领先水平；
- B 值 $<$ 可比水泥综合能耗设计值 \leq C 值，国内先进水平；
- C 值 $<$ 可比水泥综合能耗设计值 \leq B 值，国内一般水平；
- 可比水泥综合能耗设计值 $>$ D 值，国内落后水平。

只生产熟料的新建水泥项目：

- 可比熟料综合能耗设计值 \leq B 值，国内领先水平；
- B 值 $<$ 可比熟料综合能耗设计值 \leq C 值，国内先进水平；
- C 值 $<$ 可比熟料综合能耗设计值 \leq D 值，国内一般水平；
- 可比熟料综合能耗设计值 $>$ D 值，国内落后水平。

节能评估报告中除可比水泥综合能耗或可比熟料综合能耗之外的其他评价指标，用于项目评审中“项目主要能效指标水平”等部分进行对标分析。

6.2 “中国能效之星”评价

“中国能效之星”评价指标体系（工业领域）中的“能效水平状况”指标（3.2）可采用本技术依据。水泥企业以可比水泥综合能耗为总体能效水平评价指标；只生产熟料的水泥企业，以可比熟料综合能耗为总体能效水平评价指标。申报“中国能效之星”的水泥企业，应在申报材料中明确列出可比水泥综合能耗（或可比熟料综合能耗）指标，指标值应采用实际测试数据，测试和监测方法应按有关标准执行，并委托第三方机构进行检测与测算。

根据“中国能效之星”评分规则，在行业平均水平（D 值）与最高水平（A 值）之间划分为 12 个区间，分别给予不同分值。水泥企业“中国能效之星”评价和只生产熟料的水泥企业的具体标准见表 2、表 3。

表2 水泥企业“中国能效之星”评价具体标准

可比水泥综合能耗值 X (kgce/t)	得分	可比水泥综合能耗值 X (kgce/t)	得分
$X \geq 95$	0	$93.1 < X \leq 94.05$	1
$92.15 < X \leq 93.1$	2	$91.2 < X \leq 92.15$	3
$90.25 < X \leq 91.2$	5	$89.3 < X \leq 90.25$	7
$88.35 < X \leq 89.3$	9	$87.4 < X \leq 88.35$	12
$86.45 < X \leq 87.4$	15	$85.5 < X \leq 86.45$	18
$84.55 < X \leq 85.5$	21	$X \leq 84.55$	25

表3 只生产熟料的水泥企业具体标准

可比水泥综合能耗值 X (kgce/t)	得分	可比水泥综合能耗值 X (kgce/t)	得分
$X \geq 118$	0	$115.64 < X \leq 116.82$	1
$114.46 < X \leq 115.64$	2	$113.28 < X \leq 114.46$	3
$112.1 < X \leq 113.28$	5	$110.92 < X \leq 112.1$	7
$109.74 < X \leq 110.92$	9	$108.56 < X \leq 109.74$	12
$107.38 < X \leq 108.56$	15	$106.2 < X \leq 107.38$	18
$105.02 < X \leq 106.2$	21	$X \leq 105.02$	25

6.3 能源审计

能源审计报告中应当包含所有核心指标和参考指标。指标值应采用实际测试数据，数据测试和监测按照国家标准方法执行，并委托第三方检测机构进行检测与统计。

能源审计机构应依据各指标所处的区间，综合考虑该水泥企业的能效水平，分析能源利用中存在的问题，判断问题产生的原因，查找节能潜力，提出改进措施和建议。

6.3.1 可比熟料综合煤耗的影响因素及改进措施

6.3.1.1 影响因素

(1) 生料易烧性。生料的易烧性对熟料烧成热耗有比较明显的影响，生料的易烧性越差，熟料矿物形成的温度要求越高。同样规格的生产线，当采用的生料的易烧性相差一个等级时，窑系统的产量会相差 10% 左右，熟料烧

成的热耗影响在 83.6kJ/kg (20kcal/kg) 以上。

(2) 入窑生料水分。对于新型干法生产线，入窑生料水分一般控制在 1% 以内，入窑生料水分每增加 0.1%，蒸发生料中水分耗热将增加 3.8kJ/kg (0.9kcal/kg) 左右。

(3) 燃料热值。进厂原煤热值低、灰分高，对熟料烧成带来十分不利的影 响。当采用这种高灰分低热值煤时，一方面由于窑内火焰温度低，对熟料的质量会带来不利影响；另一方面，窑系统产量会大大降低，煤粉燃烧产生的烟气量大，系统热耗会大大增加。如果入窑煤粉 $Q_{net,ar}$ 低于 23000kJ/kg (5500kcal/kg)，煤粉热值每降低 2091kJ/kg (500kcal/kg)，窑系统产量将下降 5% ~ 7%。

(4) 有害成分。如果原燃料中挥发份成分 (K、Na、S 和 Cl) 偏高，窑尾需要进行旁路放风，对热耗会产生一定影响。对于预热器窑，窑尾每放风 1%，热耗增加约 20.9kJ/kg (5kcal/kg)。对新型干法窑，窑尾每放风 1%，热耗增加 8.4 ~ 12.5kJ/kg (2kcal/kg ~ 3kcal/kg)。

(5) 海拔高度。当水泥企业所在地区海拔高度低于 1000 米时，海拔高度对能耗的影响很小，可以不予考虑。当海拔高度超过 1000 米时，特别是超过 2000 米时，对能耗的影响比较明显。同样配置的水泥熟料生产线，在高海拔地区水泥熟料的产量将大大降低，电耗也相应增大。

(6) 熟料强度。同样的生产线，由于生产的熟料强度不同，其相应的单位熟料能耗也有所差异。一般而言，熟料强度越高，其能耗也越高；但熟料强度高，可以提高水泥中混合材的掺量，达到较好的节能效果。

6.3.1.2 改进措施

(1) 采用新一代新型干法烧成系统节能技术。通过大量的研究，我国自主研发了新一代新型干法烧成系统，其技术经济指标较正常水泥生产线大幅提高。主要成果有：①新一代带高效环保分解炉的六级预热器系统。该系统可以降低预热器出口废气温度，优化分解炉内煤粉的燃烧。②两档支撑短回

转窑。该窑型可减少回转窑表面散热，减少电耗。③新型大推力的煤粉燃烧器。该技术可减少一次风量，降低热耗。④第四代行进式稳流篦式冷却机。该技术可提高冷却效果，降低出冷却机熟料带走热量。

(2) 改造窑内燃烧系统。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 浓度高以及过多的一次空气等。一台好的燃烧器，首先要有足够高的火焰温度，以生产质量好的熟料；同时又要求火焰峰值温度稳定，以保持窑皮稳定，延长耐火砖的使用周期；火焰形状调节灵活，保证燃料燃烧完全，减少窑尾 CO 的生成量；同时燃烧器设计时尽可能降低一次风量，以降低热耗及减少 NO_x 的排放。

(3) 粘湿物料的工艺设计处理。采用适当的工艺和装备，防止粘湿物料在破碎、堆存和输送过程中的粘挂、堵塞，提高粘湿物料的配料精度，减轻工人劳动强度，改善和提高原料配料质量。

(4) 采用在线分析仪质量控制系统，提高出磨生料质量。在线分析仪实现了无需对物料进行破坏性处理的大宗物料的实时分析，改变了“磨尾取料 - 样品输送 - 制样 - 分析（荧光仪） - 控制调整配料秤”这一滞后一小时的控制方式。使用在线分析仪，简化了新型干法水泥生料均化链的工艺流程，提高了出磨生料的合格率及产品质量，降低了工程投资及运行费用，经济效益显著，对提高生料易烧性、降低煤耗具有重要作用。

6.3.2 可比熟料综合电耗的影响因素及改进措施

6.3.2.1 影响因素

(1) 原料破碎阶段的影响因素。①原料条件。原料条件是影响原料破碎电耗的最重要的外部因素。不同的矿石种类，有不同的易破碎性，其原料破碎电耗也有较大差距。②设备选型。不同的破碎方式和输送方式，对原料破碎电耗影响较大。例如，采用气力输送方式的电耗将大大低于机械输送方式的电耗。

(2) 熟料烧成阶段的影响因素。①生产线规模。不同规模的生产线，由于

采用的系统配置不同，烧成系统的电耗也存在差异；一般生产线规模越大，由于规模化的影响，能耗会逐渐降低。②预热器系统阻力。预热器系统阻力高低对高温风机的电耗会产生较大影响，如果采用低压损预热器系统或其他降阻措施降低预热器系统压损，每降低 500Pa 压损，可节电 0.66 ~ 0.77 千瓦时/吨熟料。

(3) 原料粉磨阶段的影响因素。①原料易磨性。原料的易磨性用粉磨功指数 W_i 表示，反映用球磨粉磨物料的难易程度。中等易磨性 W_i 介于 10 ~ 12kW · h/t 之间， W_i 值越大越难磨，在一定范围内 W_i 与粉磨电耗存在线性关系。另外，用 MF 表示用辊磨粉磨原料的难易程度，中等易磨性 MF 介于 0.9 ~ 1.0 之间，值越小越难磨，与粉磨电耗存在近似线性关系。②入磨原料粒度。入磨原料粒度对粉磨电耗有重要影响，在允许粒度范围内，粉磨电耗与粒度（用 80% 通过的筛孔孔径表示）存在指数方关系，该指数介于 0.1 ~ 0.2 之间。③入磨原料水分。利用窑尾废气可烘干的原料水分大致为：尾卸磨 4% ~ 5%、中卸磨 6% ~ 7%、风扫磨 8%、辊磨 8%。如果引入辅助热源，则可以烘干更高水分的原料，特别是风扫磨和辊磨可达 15%，但是原料水分越高，要求的热风量即热量越多，如果要求的热风量大于提升物料要求的风量，则通风电耗增加，同时对粉磨效率也会产生一定的影响。④设备选型。不同的磨机形式对生料粉磨电耗影响较大。采用辊磨系统制备生料时，部分外循环允许部分物料经过风环排出磨外，再经提升装置喂入磨机，因此可以降低风环风速，进而降低通风风量和阻力，达到降低通风电耗的目的。另外，带旋风收尘器及循环风机的双风机系统要比配高浓度收尘器的单风机系统更利于磨机的稳定运行。对于中等易磨性的原料，一般采用立磨系统比采用球磨系统节电 5 ~ 6kW · h/t 生料。⑤生料细度。生料细度要求越高，则粉磨电耗越高。对于球磨系统，生料 0.08mm 筛筛余每降低 1%，则粉磨电耗增加 3% 左右；对于立磨系统，生料 0.08mm 筛筛余每降低 1%，则粉磨电耗增加 2% 左右。

6.3.2.2 改进措施

(1) 采用高效破碎机。

(2) 采用低压损预热器旋风筒。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。一般可使每吨熟料的烧成电耗下降 $0.66 \sim 1 \text{ kW} \cdot \text{h}$ 。

(3) 生料磨采用高效选粉技术。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。普通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。在高效选粉机中，物料停留时间更长，分离效率更高，同时减少了过粉磨。

(4) 采用生料辊压机终粉磨技术。

(5) 原料粉磨系统采用新型旋风收尘器。原料立磨系统、生料终粉磨（辊压机）系统的旋风筒均采用新型旋风收尘器，新型旋风收尘器从结构上进行了调整，旋风筒的内筒插入深度比原旋风筒深，以提高收尘效率。为防止积灰，旋风筒的进口采用五边形，旋风筒的椎体设置膨胀仓，以防止锥体堵料。新型旋风筒与原旋风筒相比阻力小，收尘效率高，可降低吨生料电耗 $1\% \sim 3\%$ 。

(6) 小型袋收尘器袋子采用覆膜滤袋的措施。小型袋收尘器袋子采用覆膜滤袋，运行阻力小（可降低 800 Pa 左右），减小了排风机风压，降低生产电耗。对 5500 t/d 规模水泥生产线，相当于每吨熟料节约 0.5 度。

(7) 设备配置的电动机选用高效节能电动机。高效电机从设计、材料和工艺上采取措施，降低损耗，效率可提高 $2\% \sim 8\%$ ，平均提高 4% 。从节约能源、保护环境出发，高效率电动机是目前的国际发展趋势。对 5500 t/d 规模水泥生产线，小型电动机约 700 台，装机功率约 13400 kW 。若小型电动机采用高效节能电动机，全厂节电是非常可观的。

6.3.3 可比熟料综合能耗的影响因素及改进措施

可比熟料综合能耗的影响因素和改进措施与可比熟料综合煤耗和可比熟

料综合电耗相似。

6.3.4 可比水泥综合电耗的影响因素及改进措施

6.3.4.1 影响因素

(1) 熟料性能。熟料的易磨性是影响粉磨电耗的关键因素。从熟料种类分析，窑外分解窑熟料要比立窑熟料难磨。

(2) 混合材的品种和掺加量。混合材对粉磨电耗的影响主要体现在以下几方面：熟料中掺入矿渣后粉磨功指数变差，粉磨电耗上升；石灰石可以改善混合料的易磨性，每掺加 1% 的石灰石，比表面积增加 $55\text{cm}^2/\text{g}$ ；粉煤灰也可以改善混合料的易磨性，一般每掺加 1% 的粉煤灰，单位电耗下降 1%。

(3) 水泥粉磨设备选型。选用辊压机与球磨机组成的各种预粉磨系统，可显著降低粉磨能耗。因为辊压机的粉磨效率为球磨机的 2 倍左右，系统节电 30% 以上。

(4) 水泥产品细度。水泥粉磨电耗与比表面积存在指数方关系，比表面积越小，则该指数也越小，粉磨电耗越低。

(5) 水泥强度。水泥强度对水泥综合能耗的影响主要体现在水泥强度不同，水泥粉磨电耗也不同。在同样的混合材种类和掺量情况下，水泥细度越细，水泥的强度会更高，但水泥粉磨的电耗也更高。

6.3.4.2 改进措施

(1) 电机拖动系统变频调速。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。通过安装调速系统，可以使电机系统出力与负荷相匹配，减少不必要的电能浪费。

(2) 水泥辊压机联合粉磨技术。采用辊压机联合粉磨技术，可提高 50% ~ 100% 的产能，水泥粉磨电耗可降低至 $26 \sim 29\text{kW} \cdot \text{h}/\text{t}$ ，比球磨系统节电 30% 以上。

6.3.5 降低水泥能耗的其他改进措施

6.3.5.1 建设能源管理中心

通过建设能源管理中心，采用自动化、信息化技术和集中管理模式，对

企业能源系统的生产、输配和消耗环节实施集中扁平化的动态监控和数字化管理，改进和优化能源平衡，实现系统性节能降耗的管控一体化系统。能效监控系统跟踪现场设备连续运行，同时产生了大量的优化与分析所需要的基础数据。以这些信息作为数据源，对它们进行分析，从而确定设备安全和经济运行水平，预测可能发生的故障，找出故障原因，分析设备状态，提出检修建议时间，为优化运行提出操作建议。

根据其他行业及国内建材企业的成功实践，能源管理中心项目在企业建成使用后，根据企业不同的生产工艺状况和企业的管理水平、管理理念的差异，一般能够产生 1% ~ 5% 的节能效果。

6.3.5.2 采用现场总线控制系统（FCS）

FCS 把各个智能传感器连接成了可以互相沟通信息、共同完成控制任务的网络系统与控制系统，更好地体现 DCS 中的“信息集中，控制分散”的功能，提高了信号传输的准确性、实时性和快速性。以现场总线技术为基础的 FCS 系统与传统的 DCS 相比，具有投资小、具备容错能力、抗干扰能力强、控制系统可靠性高、信息量大、提高节能降耗水平等优点。

6.3.5.3 加强能效检测与评估

企业应根据生产线运行情况，定期按照 GB/T 26282 和 GB/T 26281 规定的方法对水泥回转窑系统的热平衡和热效率进行测试和计算，并按照 GB/T 27977—2011 规定的方法对水泥和熟料生产过程中的电能能效进行测试和计算。针对检测结果，从工艺、设备、操作方面改进。

6.3.5.4 加强余热梯度利用

水泥企业普遍采用了余热发电、余热烘干生料和煤等余热利用技术。此外，水泥生产中旋窑外表面的余热、窑头及窑尾烟气余热可作为溴化锂吸收式冷（热）水机组的热源，为中控室中央空调提供空调、采暖及生活用冷（热）水。