

中图分类号: TQ172.625.3 文献标识码: B 文章编号: 1008-0473(2017)04-0021-04 DOI编码: 10.16008/j.cnki.1008-0473.2017.04.004

# 中国水泥工业烧成系统技术升级路线图之 熟料标煤耗低于100 kg的技改方向

齐砚勇<sup>1,2</sup> 邓国亮<sup>1</sup> 黄洋洋<sup>1</sup> 柯盛强<sup>1</sup> 高宇蕾<sup>1</sup> 王丹<sup>1</sup>

1. 西南科技大学 材料科学与工程学院, 四川 绵阳 621010;

2. 中国建筑材料科学研究总院绿色建筑材料国家重点实验室, 北京 100024

**摘要** 在降低C<sub>1</sub>筒出口烟气温度、加强系统保温、堵漏等工作上已做的相对较好, 优秀厂家通过这些手段已能将熟料标煤耗降到103 kg/t。对几十条生产线热工标定数据分析, 认为改造冷却机, 提高二、三次风温, 尽量多地从出窑熟料上回收热量, 是熟料标煤耗降到100 kg/t以下最关键的技改方向。

**关键词** 熟料标煤耗 C<sub>1</sub>筒 表面散热 出窑熟料 二、三次风温

## 0 引言

近年, 水泥行业已从过往的粗放型产业, 逐渐向精细操作迅速发展。生产指标日趋先进的同时, 也面临着产能过剩, 原材料成本上升以及环保压力增大等巨大的挑战。节能减排, 优化技术指标, 显然是立足于行业技术领先地位的有效途径, 也符合相关部门提出的CDM (Clean Development Mechanism in China) 发展模式。

宏观上, 节能降耗的实现途径为: 保证熟料烧成所需热量的同时, 尽可能地降低烟气、熟料和表面散热带走的热量。最终目的: 减少整个熟料烧成系统的收入热量, 即减少窑炉喂煤量。目前, 在降低出冷却机熟料温度、降低C<sub>1</sub>筒出口温度、加强系统保温、堵漏等工作上已做的相对较好, 但高品位的二、三次风作为节能降耗的关键参数, 却并没有得到足够的重视。根据对几十条生产线热工标定数据的总结和分析, 本文主要针对如何将吨熟料标煤耗降到100 kg/t以内作出探讨, 为同行指出降耗的关键方向, 避免同行在其他降耗方向上“花大力, 得微效”, 在可持续发展的经济大环境下, 为推动行业进步, 贡献微薄之力。

## 1 部分标定生产线的能耗水平分析

由图1可以看出, 能耗水平参差不齐, 标煤耗

在110 kg/t熟料的生产线依然存在, 并且还占有一定比例, 多数标煤耗集中在105~109 kg/t熟料, 较优秀的生产线能做到103 kg/t熟料。从能耗水平来看, 水泥工业还有很大的潜力可供我们挖掘, 俨然是一个朝阳产业。

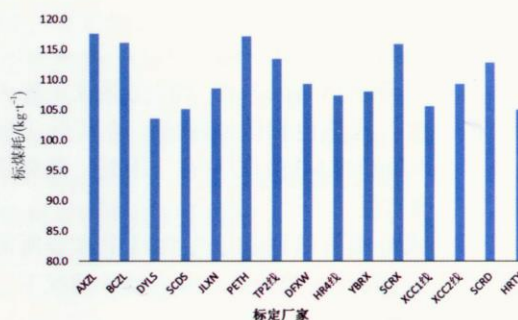


图1 部分标定厂家标煤耗

## 2 系统热量分布

### 2.1 系统 (窑+预热器) 热平衡数据

表1为XX厂5 000 t/d生产线热平衡计算, 以下数据均严格按照JC/T 733-2007《水泥回转窑热平衡测定方法》和GB/T 26281-2010《水泥回转窑热平衡、热效率、综合能耗计算方法》的要求进行数据的采集和计算。测点具有代表性, 对波动较大的数据, 采取多次测量, 反复评估。

表1 系统热平衡

收入热量	kJ/kg熟料	比例/%	支出热量	kJ/kg熟料	比例/%
生料带入热	70.6	1.7	C <sub>1</sub> 筒烟气带走热量	591.3	14.2
一次空气带入热	3.4	0.1	飞灰带走热量	30.2	0.7
燃料燃烧热	3075.6	74.0	熟料形成热	1690.7	40.7
燃料显热	9.1	0.2	出窑熟料热量	1451.3	34.9
二次风带入热	376.0	9.0	表面散热	259.7	6.2
三次风带入热	618.3	14.9	水分蒸发	71.5	1.7
漏风带入热	4.4	0.1	其他损失	63	1.5
总计	4157.7	100.0	总计	4157.7	100.0

备注:计算中未考虑飞砂入窑。

## 2.2 热量支出部分降耗分析

### 2.2.1 无降耗空间的支出部分

熟料形成热是指0℃的干物料在没有任何物料和热量损失的情况下,形成1 kg同温度熟料所需要的热量。由于生料组成不同,熟料形成理论耗热量也可能不同,但波动不大,基本均在1 675~1 755 kJ/kg熟料,是系统最大的支出部分,占总热量的40.7%。此部分热量是形成熟料所必需的热量,在工程上不具有降耗空间。

其次,出窑熟料热量(Q<sub>ysh</sub>)是仅次于形成热的较大支出热量。

$$Q_{ysh} = m_{ysh} \times t_{ysh} \times C_{ysh} \quad (1)$$

式中: m<sub>ysh</sub>—出窑熟料量, kg;

t<sub>ysh</sub>—出窑熟料温度, ℃;

C<sub>ysh</sub>—熟料比热, kJ/(kg·℃)。

出窑熟料带出热与熟料温度和比热成正比关系,温度一定,比热也相应地确定。在实际工况中,温度基本维持在1 350℃左右。因此,熟料带出热基本为确定值。

最后,水分蒸发热量是蒸发物料中水分所需的热量,入窑生料含水量较低,除去特殊情况下,基本都没什么差别。

### 2.2.2 有降耗空间的支出部分

(1) C<sub>1</sub>筒烟气带走热。

由图2可知, C<sub>1</sub>筒烟气带走的热591.3 kJ/kg熟料,占系统支出热量的14.2%,是除熟料形成热和出窑熟料带走热量外,预分解窑热损失中最大的一项。

带走热量计算公式如下:

$$Q_f = v_f \times t_f \times c_f \quad (2)$$

式中: v<sub>f</sub>—单位熟料量的体积流量, Nm<sup>3</sup>/kg熟料;

t<sub>f</sub>—气体温度, ℃;

c<sub>f</sub>—废气平均比热,根据出口废气成分、废气温度计算, kJ/(Nm<sup>3</sup>·℃)。

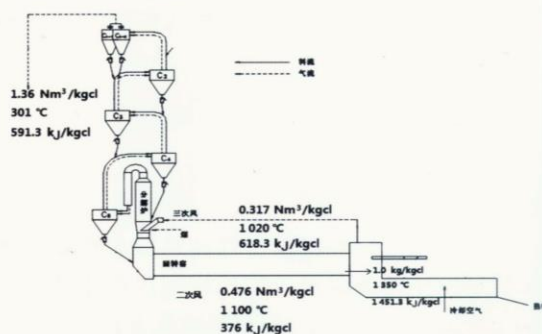


图2 XX厂系统(窑+预热器)主要热量分布

由图2、公式(2)可知, C<sub>1</sub>筒气体量1.36 Nm<sup>3</sup>/h、301℃,若气体量保证不变, C<sub>1</sub>筒出口温度降低10℃(目前优秀厂家C<sub>1</sub>筒出口温度基本能维持在290℃左右),热耗可降低22 kJ/kg熟料,即总热耗的0.7%左右。理论计算得出, XX厂标煤耗105.1 kg/t熟料可降低至104.4 kg/t熟料。

若保持C<sub>1</sub>筒温度301℃不变,标煤耗降低1 kJ/kg熟料,以理论烟气量的经验公式:

$$V_{\text{烟气}} = 0.213 \times Q / 1000 + 1.65 \quad (3)$$

式中: Q—煤粉热值, kJ/kg。

C<sub>1</sub>筒烟气量减少2 067 Nm<sup>3</sup>/h( C<sub>1</sub>筒过剩空气系数1.11,产量5 670 t/d),热耗可降低4 kJ/kg熟料,即总热耗的0.13%。

出C<sub>1</sub>筒烟气量主要由煤粉燃烧产生的烟气和系统漏风两部分组成。目前,大部分厂家已经在预热器堵漏上做了较足的措施,漏风对热耗的影响程度相对占了很小的份额。其次,在保证整个窑系统正常运行的情况,适当减少高温风机转速,降低分



解炉及窑内的过剩空气系数, 不仅可降低C<sub>1</sub>筒废气带走热, 还对窑炉内NO<sub>x</sub>的产生有一定的好处。但对中控操作人员的技能和经验要求较高, 且对窑炉适应复杂工况的要求较高。总之, 降低C<sub>1</sub>筒废气带走热的关键就是减少燃烧产生的烟气量, 烟气量的减少必然要求煤耗的降低。因此, 在核心问题没解决的情况下, 一味地在提高预热器的换热效率采取措施, 是很难将熟料标煤耗降低至100 kg以内, 且对于C<sub>1</sub>筒废气温度已经在290 ℃的优秀厂家相对更加艰难。

(2) 表面散热。

表面散热也是能量损失的一大组成部分, 损失的大小与保温材料的选择、保温措施的到位程度以及当地风速大小有着密切关系。表2为部分标定生产线的表面散热的情况, 就目前标定厂家来看, 相互比较看似有30 kJ/kg熟料, 即1 kgce/t熟料的降耗空间。但这与当地风速关系较大, 各厂不具有相互比较的实际意义。厂家可根据工厂实际情况, 适当在散热较明显的地方采取一些保温措施。就目前较好的厂家来看, 要把标煤耗降至100 kg, 在表面

表2 部分标定生产线的表面散热分布

5 000t/d	散热损失/(kJ·kg <sup>-1</sup> 熟料)												合计
	C <sub>1</sub>	C <sub>2</sub>	C <sub>3</sub>	C <sub>4</sub>	C <sub>5</sub>	鹅颈管	分解炉	烟室	三次风管	回转窑	冷却机	窑头罩	
BJZL	9.01	4.90	7.23	7.42	9.43	10.83	24.53	8.27	20.01	156.85	3.96	13.12	275.54
HF4#	10.17	9.70	10.24	11.21	10.31	22.47	11.54	0.73	11.47	140.71	2.76	6.89	248.20
HF2#	10.32	8.14	9.65	11.15	11.72	22.00	11.88	1.57	11.69	135.6	2.98	5.40	242.12
HG2#	4.72	5.96	9.10	11.58	12.12	25.64	21.06	0.89	7.77	146.01	2.72	7.76	255.33

散热方面继续加大投入, 贡献价值不大。

2.3 热量收入部分降耗分析

由表1可知, 生料、一次空气、漏风和燃烧带入的显热不仅比例较小, 且在工艺中也基本确定其数值。燃料燃烧热由煤粉热值和消耗量两部分决定, 热值一定, 想要降低其投入量, 只有保证窑炉内温度这个充分条件。

由图2及表1可以看出, 熟料带出热量1 451.3 kJ/kg, 二、三次风分别回收376 kJ/kg熟料、618.3 kJ/kg熟料, 二、三次风带入热量约占热耗的23.9%, 是除燃料燃烧热外最大的一部分热量。二、三次风回收热量的多少, 取决于篦冷机工作的好坏与关系着整个系统热耗的高低。二、三次风带入热量计算方法:

$$Q_{fk} = m_{fk} \times t_{fk} \times C_{fk} \quad (4)$$

式中:  $m_{fk}$ —二、三次风风量, Nm<sup>3</sup>/kg熟料;

$t_{fk}$ —温度, ℃;

$C_{fk}$ —比热, kJ/(m<sup>3</sup>·℃)。

由公式(4)可知, 二、三次风回收热量由风量、温度、比热三者共同决定, 二、三次风量的大小, 取决于煤耗的多少, 煤耗越高, 二、三次风越大, 增大二、三次风量显然与降低热耗的目的相悖。温度越高, 比热也越高, 提高二、三次风温度, 才是提高回收热量的关键。高温的二、三次风升高窑炉内温度的同时, 也有利于头尾煤的燃烧和传

热, 才能满足保证窑炉内温度这个降低煤粉投入量的充分条件。显然, 保证较高温度的二、三次风才是降低热耗最直接、效果最明显、吨熟料标煤耗降低至100 kg的正确方向。

3 二、三次风对标煤耗降到100 kg的决定性作用

3.1 降低热耗的理论极限

由表3可知, 当标煤耗降至98.2 kg/t熟料以下时, 煤粉燃烧所需的理论二、三次风温度达到理论最高的1 350 ℃也无法回收完熟料带出的热量。表明标煤耗98.2 kg/t熟料是二、三次风能回收完热量的一个理论极限值。由表4可知, 降低标煤耗至100 kg/t熟料, 二、三次风温度达到1 328 ℃就能将熟料带出热量完全回收。

3.2 降低热耗的理论空间

由表1、表5可知, 该厂标煤耗105 kg/t熟料。出窑吨熟料(1 350 ℃)带出49.6kg标煤的热量。若二、三次风风量不变, 温度从950 ℃、1 000 ℃各提高150 ℃, 窑炉吨熟料将多回收6.2 kg标煤热量。因此, 所需燃料燃烧带入热量降低, C<sub>1</sub>筒出口带走热量自然也将显著降低。热耗降低的空间巨大, 可见理论上将吨熟料标煤耗降低至100 kg以内是完全科学、可行的。

3.3 标定生产线二、三次风温与标煤耗对应关系

对比表6中标定厂家的数据, 二、三次风的温度高低基本反映了标煤耗的高低, 更加肯定了提高

表3 二、三次风回收热理论极限计算

标煤耗		温度 /°C	风量 /(Nm <sup>3</sup> ·kg <sup>-1</sup> 熟料)	比热 /[kJ·(kg·m <sup>3</sup> ·°C) <sup>-1</sup> ]	热量 /(kJ·kg <sup>-1</sup> 熟料)	合计 /(kJ·kg <sup>-1</sup> 熟料)
98.2 kg/t熟料	出窑熟料	1 350	1.00	1.075	1451	1450
	二次风	1 350	0.2966	1.449	580	
	三次风	1 350	0.4449	1.449	870	

备注:头尾煤比例4:6,理论风量按经验公式计算,过剩空气1.0。

表4 100 kg/t熟料 二、三次风回收热理论极限计算

标煤耗		温度 /°C	风量 /(Nm <sup>3</sup> ·kg <sup>-1</sup> 熟料)	比热 /[kJ·(kg·m <sup>3</sup> ·°C) <sup>-1</sup> ]	热量 /(kJ·kg <sup>-1</sup> 熟料)	合计 /(kJ·kg <sup>-1</sup> 熟料)
100 kg/t熟料	出窑熟料	1 350	1.00	1.075	1 451	1 450
	二次风	1 328	0.302 1	1.446 4	580	
	三次风	1 328	0.453 1	1.446 4	870	

备注:头尾煤比例4:6,理论风量按经验公式计算,过剩空气1.0

表5 二、三风理论热量的计算

项目	温度 /°C	风量 /(Nm <sup>3</sup> ·kg <sup>-1</sup> 熟料)	比热 /[kJ·(kg·m <sup>3</sup> ·°C) <sup>-1</sup> ]	热量 /(kJ·kg <sup>-1</sup> 熟料)	标煤耗 /(kg·t <sup>-1</sup> 熟料)	差值 /(kg·t <sup>-1</sup> 熟料)
出窑熟料	1 350	1.00	1.075	1 451	49.6	
二次风	1 150	0.317	1.428	521	17.8	2.5
	1 000	0.317	1.409	447	15.3	
三次风	1 100	0.476	1.422	744	25.4	3.7
	950	0.476	1.403	634	21.7	

备注:以上计算按吨熟料标煤耗105 kg、头尾煤比例4:6计算。

二、三次风温度是吨熟料标煤耗降低至100 kg的最直接、有效的途径。

#### 4 结束语

总而言之,在做好每级预热器的换热、堵

表6 部分厂家标定参数

厂家	产量/(t·d <sup>-1</sup> )	标煤耗/(kg·t <sup>-1</sup> )	C <sub>1</sub> 筒温度/°C	二次风温度/°C	三次风温度/°C	备注
GG	5 510	107.4	304	1 000	965	三次风测点靠近窑尾,能真实的反映风温。
TY	5 670	105.1	301	1 091	1 008	

漏、系统的保温等条件的同时,要更进一步地将标煤耗做到100 kg/t熟料以内,最为关键的是温度较高的二、三次风这一必要条件,也是最容易被忽视的条件。理论上出窑高温熟料带出的巨大热量,尽快回收入窑对系统标煤耗的降低至关重要。如何让空气以最快的速度将高温熟料的热量交换出来,是目前最为关键的问题。要想降低标煤耗,提高二、三次风温度,篦冷机必须做到以下几点:

(1) 篦冷机风量高、中、低段风量分布合理,高温段风量必须满足窑炉内煤粉燃烧所需的

空气量(三代篦冷机1、2、3室,四代篦冷机1、2室);

(2) 篦冷机料层粗细段风量分布合理;

(3) 篦冷机篦板篦缝合理、均匀,不能存在“风短路”现象;

(4) 风室之间做好密封,杜绝风室间“窜风”现象。

(收稿日期:2017-05-10)