

工业炉窑物质流和能量流匹配的节能原理分析

魏小林^{1,2} 李慧鑫^{1,2} 李森¹ 黄俊钦^{1,2} 李博¹ 陈立新³

(1.中国科学院力学研究所 高温气体动力学国家重点实验室,北京 100190; 2.中国科学院大学 工程科学学院,北京 100049;
3.北京汉能清源科技有限公司,北京 100070)

摘要:工业炉窑是我国的能耗大户,每年耗能约占全国总能耗的 1/4。在能源日益紧缺、环境污染严重的今天,工业炉窑节能减排工作十分紧迫。工业炉窑的生产是不同设备、不同工序协同生产的一个过程,包含物质与能量在各个系统之间的转换与转移,因此工业炉窑的物质流和能量流分析是炉窑实现高效能和低排放的基础。一般的方法主要从炉窑的产品用能或余热利用角度来分析,未将工业炉窑作为一个系统,整体来考察物质流和能量流状况。基于节点计算法,从工业炉窑整体系统出发,建立一种工业炉窑物质流与能量流匹配的数学模型,获得了典型工业炉窑不同部位的能量收支情况;同时采用热力学第二定律的焓分析方法研究炉窑系统的焓损失,明确了炉窑节能的重点部位。采用该方法开展了 3 200 t/d 典型水泥炉窑的物质流和能量流分析计算,结果表明,水泥炉窑的热量损失主要包含高温损失与低温损失,其中高温损失主要是炉窑壁面散热损失与煤粉未燃尽的碳热损失,分别占 6.84%与 1.95%,焓损失分别为 4.17%与 2.59%,有较大的节能潜力;低温热损失包含烟道尾部烟气的排烟热损失、出冷却机熟料带出的显热等,AQC 炉和 SP 炉的热量损失各占 3.06%和 6.19%,焓损失分别为 1.26%和 1.45%,仍有利用价值。针对高温和低温热量损失的不同原因,对于炉窑的节能潜力进行了评估,提出采用先进保温、富氧煅烧、低温余热再利用等新技术,可进一步降低炉窑的煤耗;此外,也推荐了减少设备电耗的新技术,如采用高效风机以及永磁电机等,结合富余蒸汽拖动风机以及节能管控等技术,有望实现熟料烧成系统零电耗的目标。

关键词:工业炉窑;物质流;能量流;匹配;节能原理

中图分类号:TQ53;TK114 文献标志码:A 文章编号:1006-6772(2020)05-0011-09

Principle analysis of energy saving of matched material and energy flows in the industrial furnace and kiln

WEI Xiaolin^{1,2} ,LI Huixin^{1,2} ,LI Sen¹ ,HUANG Junqin^{1,2} ,LI Bo¹ ,CHEN Lixin³

(1.State Key Laboratory of High Temperature Gas Dynamics, Institute of Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China;
2.School of Engineering Science, University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China;
3.Beijing Hanneng Qingyuan Science & Technology Co., Ltd., Beijing 100070, China)

Abstract: Industrial furnace is a huge energy consumption industry in China, which accounts for about 1/4 of the total energy consumption in China every year. In the increasing shortage of energy and environmental pollution today, the energy saving and emission reduction is very urgent for the industrial furnaces and kilns. The production of industrial furnaces is a process of collaborative works of different equipments and processes, including the conversion and transfer of material and energy between various systems. Therefore, the analysis of material flow and energy flow for industrial furnaces and kilns is the basis of realizing high efficiency and low emission. The general method is mainly analyzed from the perspective of energy or waste heat utilization of the furnace products, and the industrial furnace is not regarded as a total system to investigate the material flow and energy flow status. In this paper, based on the node calculation method and starting

收稿日期:2020-08-06;责任编辑:张晓宁 DOI:10.13226/j.issn.1006-6772.IF20080616

基金项目:国家重点研发计划资助项目(2016YFB0601501)

作者简介:魏小林(1967—),男,陕西西安人,研究员,主要从事固体燃料清洁燃烧研究与工业炉窑节能减排技术研发工作。

E-mail:xlwei@imech.ac.cn

引用格式:魏小林,李慧鑫,李森,等.工业炉窑物质流和能量流匹配的节能原理分析[J].洁净煤技术,2020,26(5):11-19.

WEI Xiaolin, LI Huixin, LI Sen, et al. Principle analysis of energy saving of matched material and energy flows in the industrial furnace and kiln[J]. Clean Coal Technology, 2020, 26(5): 11-19.



移动阅读

from the whole system of industrial furnaces, a mathematical model of matching material flow and energy flow was established, and the energy balance of different parts of a typical industrial furnace was obtained. Meanwhile, the exergy loss of furnace system was studied by the second law of thermodynamics, and the key parts of furnace energy saving were found. The material flow and energy flow of 3 200 t/d typical cement kiln were analyzed and calculated by this method. The results show that the heat loss of cement kiln mainly includes high-temperature loss and low-temperature loss. The high-temperature loss is mainly the heat loss of the kiln's walls and the carbon heat loss of unburned coal, accounting for 6.84% and 1.95% respectively, and corresponding to the loss of exergy as 4.17% and 2.59% respectively, which has a few energy-saving potential. The low-temperature heat loss includes the heat loss of flue gas at the tail of kiln and sensible heat from the clinker out of the cooler. The heat loss of AQC furnace and SP furnace accounts for 3.06% and 6.19% respectively, and corresponding to the loss of exergy as 1.26% and 1.45% respectively, which is still worthy of utilization. According to the different reasons for high temperature and low temperature heat loss, in this paper, the energy saving potential of furnace and kiln was evaluated and some new technologies, such as advanced heat insulation of furnace wall, oxygen enriched calcination, and low temperature waste heat utilization were proposed, which could further reduce the coal consumption of the kiln. In addition, some new technologies are recommended to reduce the electrical power consumption of the equipment, such as the use of high-efficiency fans and permanent magnet motors, combined with the technology of surplus steam-driven fan and energy-saving management, which is expected to achieve the goal of zero power consumption of clinker sintering system.

Key words: industrial furnace and kiln; material flow; energy flow; matching; principal of energy saving

0 引言

工业炉窑是工业生产中的重要热工设备,其利用燃料或电能转化产生的热量,实现物料或工件的冶炼、焙烧、烧结、熔化、加热等工序,目的是制造或加工出更有利用价值的物料或工件。工业炉窑是我国的能耗大户,每年耗能约占全国总能耗的1/4,其中燃煤约70%,其他为气体、液体燃料或电力等^[1]。由于我国工业炉窑种类多、数量大,在节能与环保等方面技术相对落后,从而造成产品综合能耗高、环境污染较严重等问题,因此从工业炉窑流程中的物质流、能量流分析角度入手,研究其节能原理与技术十分必要。

工业炉窑的核心工艺是由不同的装置与工序连接起来的流程组成^[2-3],流程中的物质流是生产的主体,能量流推动物质流进行流动和转变,两者各自独立、变化又相互联系、制约^[4]。生产中的物料包括原料、燃料、辅材等,不同化学成分的物料在生产流程中定向运动,形成物质流;由燃料、电力等提供的不同形式能源为生产流程的各种物料提供了流动、转化的动力与热量,形成能量流。本文以水泥炉窑的能量流和物质流分析为例,研究工业炉窑的节能原理,为该行业提高能效、节约能源、较少温室气体排放及其他污染排放做出贡献^[5]。

水泥炉窑是一种典型的工业炉窑,截至2019年底,全年水泥和熟料产量分别为23.3亿t和15.2亿t,每年能耗可达2亿t标准煤^[6]。水泥炉窑包括熟料生产线和水泥粉磨站等。水泥熟料生产线是水泥工业的核心装备,其功能是将石灰石和黏土、铁质原

料等按适当比例配制成生料,烧至部分熔融,并经冷却而获得的半成品,称为熟料。一般的硅酸盐水泥熟料主要矿物组成为硅酸三钙、硅酸二钙、铝酸三钙和铁铝酸四钙,主要化学成分为氧化钙、二氧化硅和少量的氧化铝和氧化铁^[7]。熟料煅烧完成后,在粉磨站加入一定量(20%~40%)的混合材(如矿渣、粉煤灰等),生产出硅酸盐水泥。

Sogut等^[8]建立数学模型,对于进出水泥炉窑的能量流进行分析,得到回转窑和各磨机的能量利用效率,特别是进行了不同装置的焓分析,结果表明,不考虑烟气余热利用时,炉窑系统的焓损失为49%。Sui等^[9]研究了利用余热发电进行水泥生产过程的焓分析,其结果表明能量效率不能准确表达系统的能量利用率,而焓效率可准确表达。Atmaca等^[10]通过类似的数学模型分析了水泥炉窑的能量流和焓流,给出了回转窑和篦冷机的能量流输入与输出份额,同时研究了炉窑高温壁面的散热,结果表明炉窑表面的散热占总能量的11.3%。

在窑头窑尾烟气余热发电方面,我国的技术较先进,Wang等^[11]对于水泥炉窑余热发电采用单压闪蒸、双压蒸汽循环、ORC循环以及卡琳娜循环等进行了热分析和焓分析,结果表明,目前使用较多的双压蒸汽循环热电转换效率为24.9%,焓效率可达40.7%。李福通^[12]进行了水泥炉窑系统的能效分析、物料平衡、热平衡的计算与测试,分析了预热器、分解炉、回转窑和篦冷机系统的能耗分布,计算方法来自于国家标准^[13]。周元^[14]推导了水泥炉窑系统中预热器、分解炉和回转窑的质量平衡和热量平衡方程,得到了炉窑系统中各主要生产参数间的关系,

仿真计算的结果得到了现场数据的验证。

综上,对于水泥炉窑的物质流与能量流研究主要关注的是预热器、分解炉、回转窑和篦冷机系统^[15-17]。对于余热利用单独进行分析,未考虑原材料的干燥系统。本文在此基础上,建立了一种可适用工业炉窑物质流与能量流分析的节点计算模型,研究了包含窑头余热锅炉(AQC炉)、篦冷机、回转窑、分解炉、五级悬浮预热器、窑尾余热锅炉(SP炉)、生料磨系统等主要装置的水泥炉窑系统能量流与焓流分布情况,得到了能量与焓损失的主要部位,对节能潜力进行了评估,为水泥炉窑节能管控技术提供了理论依据。

1 工艺流程与数学模型

1.1 工艺流程

对于目前的新型干法水泥熟料生产工艺流程^[18],从窑头至窑尾,除图1中的主要装备外,还包括生料磨、煤磨、高温风机、窑头与窑尾引风机、篦冷机风机等主要耗电设备。在熟料生产中,水泥生料经窑尾预热器、分解炉,90%以上的碳酸钙完成分解,然后进入回转窑进一步升温、烧成,生成温度达1400℃的高温熟料,从窑头出来进入篦冷机冷却至110℃左右,输送至熟料库;而燃煤烟气分为两路,与物料形成逆向流动,首先从窑头燃烧器进入回转窑,保持燃烧温度达1700℃左右,窑头烟气与窑尾燃煤烟气在分解炉里混合,保持温度在900℃左右,分解炉出来的烟气进入预热器,预热生料后的烟气温在300℃以上,进入SP炉,SP炉出口的180℃烟气分别进入生料磨和煤磨,干燥物料,降至70℃后排放。另外,从篦冷机高温段出来的高温空气(900~1000℃)分两路,进入窑头(二次风)和窑尾(三次风)作为煤粉的主要助燃风;而从篦冷机中、低温段出来的热空气(350~400℃)进入AQC炉,降温至110℃后排放。图1中,还给出了可能在

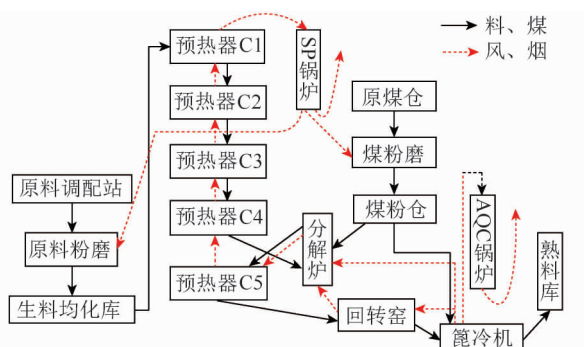


图1 新型干法水泥熟料生产线工艺流程

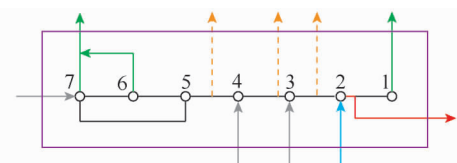
Fig.1 Flowchart of new dry process cement clinker production line

水泥炉窑上使用的新技术,包括节能管控平台、富氧煅烧、分级燃烧、微细颗粒物与CO₂减排等设备^[19]。

1.2 数学模型

1.2.1 流程网络图

为了从数学上描述水泥熟料生产工艺流程的物质流与能量流,借鉴殷瑞钰院士提出的钢铁制造流程工序功能集合的解析思路^[2],采用图2的流程网络来描述水泥炉窑,图中的节点代表具有不同功能的装置,连接线是指节点之间的连接方式,例如管道、物料提升机、输送带等。图2将水泥炉窑的7个主要装置简化为7个节点,节点间的关系表达了不同装置之间的联系。外围的框图将所研究的炉窑系统与外界分割开,进出炉窑系统的物质流及其伴随的能量流用实线描述。炉窑不同部位由于热能散失的能量流用虚线描述,计算时并入各附近的节点。



1—AQC锅炉; 2—篦冷机; 3—回转窑; 4—分解炉;
5—五级悬浮预热器; 6—SP锅炉; 7—生料磨系统

图2 水泥炉窑流程网络

Fig.2 Flow network diagram of cement furnace and kiln

表1为进出图2炉窑系统的主要物质流与能量流情况。

1.2.2 物质流与能量流模型

采用热力学第一定律来分析水泥熟料生产工艺流程不同装置间的物质流与能量流关系。

在工业炉窑物质流分析中,一般将单位目标产品(如每kg水泥熟料产量)的物质流变量作为分析对象,因此定义

$$m_{j,k} = \frac{\dot{m}_{j,k}}{\dot{m}_p} = \frac{\dot{m}_{j,k}}{\dot{m}_{cl}}, \quad (1)$$

式中, $m_{j,k}$ 为单位目标产品产量的 k 种物质流质量/kg/kg; $\dot{m}_{j,k}$ 为从节点 j 进入节点 i 的 k 种物质流的流量/kg/s; \dot{m}_p 为目标产品的生产质量流率,kg/s,对于水泥炉窑,目标产品为水泥熟料(Clinker),此值即为 \dot{m}_{cl} 。

对于某一节点 i ,根据物质守恒,当进出节点的物质达到平衡时,其物质流将满足

$$\sum_{k=1}^M \sum_{j=0}^N (m_{j,k}^{in} - m_{j,k}^{ex}) = 0, \quad (2)$$

式中, m^{in} 为以每kg熟料为基准进入节点的物质质量/kg/kg; m^{ex} 为以每kg熟料为基准离开节点的物质质量/kg/kg。

表1 水泥炉窑流程中的主要节点以及物质流与能量流
Table 1 Main nodes in the cement process and the material and energy flow

节点	进入节点		离开节点	
	物质流	能量流	物质流	能量流
1: AQC 锅炉	篦冷机余风	余风显热	排放烟气, 锅炉产生的蒸汽	烟气显热, 蒸汽显热
2: 篦冷机	高温水泥熟料、冷却空气	高温熟料显热、冷却空气显热	篦冷机余风, 低温水泥熟料	余风显热、熟料显热, 窑头罩和篦冷机壁面的散热
3: 回转窑	煤粉和一次风、二次风, 漏风, 预热器 C5 出口分解后的生料	煤粉和一次风的显热及煤粉燃烧放热、二次风显热, 漏风显热, 生料显热	窑尾烟室的烟气	烟室烟气的显热, 回转窑和三次风管壁面的散热
4: 分解炉	煤粉和一次风、三次风, 预热器 C4 出口的生料, 漏风	煤粉和一次风的显热及煤粉燃烧放热、三次风显热, 生料显热, 漏风显热	分解炉出口的生料	生料显热, 壁面散热
5: 五级悬浮预热器	预热器 C1 进口的生料, 来自分解炉的窑尾烟气	生料显热, 窑尾烟气显热	预热器 C4 出口的生料, 预热器 C1 出口的烟气	生料显热, 烟气显热, 壁面散热
6: SP 锅炉	预热器 C1 出口的烟气	烟气显热	进入生料磨系统的排放烟气, 锅炉产生的蒸汽	烟气显热, 蒸汽显热
7: 干燥前生料, SP 炉出口烟气	生料显热, 烟气显热	干燥后的生料, 生料磨后排放烟气	生料显热, 烟气显热	

进入装置的物质组分发生相变或化学反应时, 需要考虑组分间的定量关系, 因此定义为进入节点 i 内的 n 组分物质转化生成成为 k 组分物质的定量系数, 该系数由相变平衡或化学反应条件决定, 这些系数是炉窑物质流与能量流匹配的关键。因此离开节点 i 的 k 组分物质可由进入节点 i 内的 n 组分物质表达为

$$m_{j,k}^{ex} = \sum_{n=1}^M r_{nk} m_{j,n}^{in} \quad (3)$$

式中 r_{nk} 为通过相变或化学反应, 从 n 组分转化生成成为 k 组分的定量系数, kg/kg 。

式(3)给出了离开与进入炉窑物质流之间的内在关系, 在实际炉窑的物质流与能量流计算中, 可用于分析炉窑的物质流与能量流平衡, 替代繁复的现场测试。

将式(3)带入节点 i 的物质流平衡方程(2), 得到

$$\sum_{k=1}^M = \left[\sum_{j=0}^N (m_{j,k}^{in} - \sum_{n=1}^M r_{nk} m_{j,n}^{in}) \right] = 0 \quad (4)$$

在物质流模型的基础上, 讨论能量流模型。当物质流进出节点 i , 各组分物质的显热将伴随进出, 同时在节点 i 内若有物质组分发生相变或化学反应时, 将会有相变潜热或反应热的变化。

将 k 种物质的显热表达为

$$Q_{j,k,S} = c_p \sum_{j=0}^N t_{j,k} m_{j,k} \quad (5)$$

式中 $Q_{j,k,S}$ 为单位目标产品产量(以每 kg 熟料为基准)对应的 k 种物质的显热, kJ/kg ; c_p 为比热容, $\text{kJ}/(\text{kg} \cdot \text{K})$; t 为温度, K 。

由于相变和化学反应从 n 组分转化为 k 组分的物质, 其相变潜热和反应热为

$$Q_{j,k,LH} = \sum_{n=1}^M [r_{nk} m_{j,n}^{in} (L_{nk} + \Delta H_{nk})] \quad (6)$$

式中 $Q_{j,k,LH}$ 为单位目标产品产量(即每 kg 熟料)的 k 种物质的相变潜热和反应热, kJ/kg ; L 为相变潜热, kJ/kg ; H 为化学反应热, kJ/kg 。

根据能量守恒, 对于某一节点 i , 当进出节点的能量达到平衡时, 其能量流满足

$$\sum_{k=1}^M \sum_{j=0}^N [(Q_{j,k,S}^{in} - Q_{j,k,S}^{ex}) + Q_{j,k,LH}] = 0 \quad (7)$$

对于包含多个节点的炉窑系统, 可将其作为一个整体, 看作一个更大的节点, 以上方程仍然适用, 如可以将图2框图中的炉窑系统作为一个大节点进行讨论。

为了研究工业炉窑的能源利用效率和节能潜力, 同时采用热力学第二定律获得工艺流程中不同装置部位的焓效率。对于进入炉窑的燃料燃烧热、物料的高温显热等, 视为进入炉窑的焓 $E_{x,in}$; 对于炉窑产品生成需要的热量, 比如将熟料生成热、物料干

燥热、锅炉吸热等看作为有用的能量(焓 Ex_{cl});对于炉窑壁面的散热以及离开炉窑气体携带的显热 Q_1 ,看作为损失的能量,其焓损 $^{[7]}$ 表示为

$$Ex_{out} = Q_1 \left(1 - \frac{T_0}{T_1} \right), \quad (8)$$

式中 Ex_{out} 为单位质量目标产品(以每kg熟料为基准)的焓损失,kJ/kg; T_0 为环境温度,K; T_1 为炉窑壁面温度,K。

炉窑的焓平衡方程为

$$Ex_{in} = Ex_{cl} + Ex_{out}, \quad (9)$$

式中 Ex_{cl} 为节点炉窑的焓(以每kg熟料为基准)kJ/kg。

炉窑的焓效率 η_{Ex} 为

$$\eta_{Ex} = 1 - \frac{Ex_{out}}{Ex_{in}}. \quad (10)$$

焓损失的计算考虑了热能的品位,为了减少能量损失,需尽量实现热量的高温高用、余热利用。减

少高温炉壁的散热,可减少焓损;减少排放烟气的温度,可实现余热的高效利用。

1.3 计算条件与参数

本文以金刚(集团)白山水泥有限公司3200t/d水泥熟料生产线为例,对水泥炉窑进行节能分析。该生产线的熟料产量达3763t/d,干燥后的入窑生料量为5400t/d,入窑生料水分为1.5%(干燥前,进入生料磨时的水分为5%),表2为生料、熟料的化学成分分析。

原煤用量为533t/d,进厂原煤水分为9.40%,干燥后水分为0.87%,表3为干燥后煤粉的工业分析。炉窑重要节点的温度见表4,一次风包括窑头输煤风与入窑净风以及窑尾分解炉输煤风等,煤粉采用罗茨风机浓相送粉,煤粉耗气 $0.4 \text{ Nm}^3/\text{kg}$,漏风包括窑头、分解炉、预热器等漏风,C1出口即为SP炉进口,SP炉出口为生料磨进口,汽轮机蒸汽分为高压蒸汽(1.3MPa)和低压蒸汽(0.18MPa)。

表2 生料、熟料化学成分分析

Table 2 Chemical composition analysis of raw meal and clinker

项目	含量/%							Σ
	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	SO ₃	Loss	
生料	13.25	3.09	2.18	41.64	2.33	—	36.29	98.78
熟料	22.38	5.07	3.30	63.77	3.73	—	0.10	98.39

表3 煤粉的工业分析

Table 3 Proximate analysis of pulverized coal

工业分析/%					$Q_{net,ar}/(\text{kJ} \cdot \text{kg}^{-1})$	$Q_{net,ad}/(\text{kJ} \cdot \text{kg}^{-1})$
M_{ar}	M_{ad}	A_{ad}	V_{ad}	FC_{ad}		
9.40	0.87	27.44	27.80	43.89	22 189	24 514

表4 炉窑各主要节点的运行参数

Table 4 Operation parameters of main nodes of furnace and kiln

节点温度/℃									
一次风	二次风	三次风	漏风	SP炉进/出口	AQC炉进/出口	生料磨出口	煤粉/生料	高/低温熟料	汽机高/低压汽
51	1 020	910	34	305/180	402/110	70	51/38	1 430/208	296/168

计算时采用自编程序(也可用Aspen-Plus等流程计算软件)求解物质流和能量流方程组(4)和(7),得到各节点的物质流和能量流数据。计算时窑头与窑尾的煤粉量比例取为4:6,煤粉燃烧需要的理论空气量估算式 $^{[7]}$ 为

$$V_{air}^0 = (0.241 \cdot Q_{net,ad}) / 1000 + 0.5, \quad (11)$$

式中 V_{air}^0 为煤粉燃烧需要的理论空气量, Nm^3/kg 。

煤粉燃烧的过量空气系数取为1.03,漏风后的窑尾烟室、分解炉和预热器过量空气系数分别为1.06、1.15和1.24。窑头与窑尾的总一次风量占总

风量的9.33%,其中窑头一次风量(包括输煤风、入窑净风)占总一次风量的60%。

入回转窑的二次风和入分解炉的三次风均来自于篦冷机的冷却空气,占其中的47%,冷却空气量为 $1.7 \text{ Nm}^3/\text{kg}$,冷却机漏风率约为2%。除很高温度的二次风和三次风进入炉窑外,冷却机的高温余风(约400℃)进入AQC锅炉,占余风的73%,而低温余风(约200℃)进入除尘器后排放,占余风的27%。

由于现场运行时缺乏煤粉的元素分析数据,因

此燃烧的理论烟气量按照煤粉所需空气量和煤粉可燃成分质量之和确定。另外,也可采用式(12)^[7]对理论烟气量进行校核。

$$V_{gas}^0 = (0.213 \cdot Q_{net,ad}) / 1000 + 1.65, \quad (12)$$

式中, V_{gas}^0 为理论烟气量, Nm^3/kg 。

入窑生料由于碳酸钙与碳酸镁的煅烧分解,产生的大量 CO_2 , 其中碳酸镁在预热器中即完成分解,而碳酸钙约有 95% 在分解炉内分解,产生的 CO_2 占窑尾 C1 出口烟气体积流量的 20%, 同时烟气中也包含入窑生料和煤粉中蒸发的少量水蒸气。SP 炉出口烟气进入生料磨和煤磨用于干燥物料,使煤的水分从 9.40% 降至 0.87%, 生料的水分从 5% 降至 1.5%。

生料在炉窑内煅烧生成熟料的形成热按式(13)^[7]估算。

$$Q_{cl,f} = 17.21A_{cl} + 27.13M_{cl} +$$

$$32.01C_{cl} - 21.42S_{cl} - 2.47F_{cl}, \quad (13)$$

其中 $Q_{cl,f}$ 为熟料的形成热, kJ/kg ; A, M, C, S, F 分别为熟料中 $Al_2O_3, MgO, CaO, SiO_2, Fe_2O_3$ 的质量分数 %。在烟气余热利用方面, SP 炉的蒸汽产量为 12.4 t/h, AQC 炉的高/低压蒸汽产量分别为 16.2/3.4 t/h, 余热电站发电量为 5 700 kW。

2 结果与讨论

2.1 计算结果验证

对于计算结果进行验证,测试数据来源于 2017 年国家建材工业水泥能效环保评价检验检测中心的现场测试报告^[20],测试炉窑为金刚(集团)白山水泥有限公司 3 200 t/d 水泥熟料生产线。表 5 为炉窑主要运行数据的对比,可以看出,模型预测值较可靠。

表 5 炉窑主要运行参数的计算与测试值

Table 5 Calculation and test data of main operation parameters of furnace and kiln

项目	一次风量/ ($Nm^3 \cdot h^{-1}$)	二次风量/ ($Nm^3 \cdot h^{-1}$)	三次风量/ ($Nm^3 \cdot h^{-1}$)	AQC 炉烟气量/ ($Nm^3 \cdot h^{-1}$)	窑尾 SP 炉烟气量/ ($Nm^3 \cdot h^{-1}$)	窑尾烟气 CO_2 体积分数/%
计算值	12 300	45 140	73 900	111 600	211 200	31.2
测试值	12 280	40 800	87 000	103 800	210 000	30.6
误差/%	0.16	10.60	-15.10	7.50	0.57	1.96

2.2 炉窑系统的热量收支

本文首先计算了包含篦冷机、回转窑、分解炉、五级悬浮预热器等 4 个主要装置的水泥炉窑系统支出热量,该系统的 4 个节点对应图 2 的节点 2~5,此方法与一般水泥炉窑的热平衡计算区域一致^[13]。在此基础上,计算的区域被扩大到包含 AQC 锅炉、篦冷机、回转窑、分解炉、五级悬浮预热器、SP 锅炉、生料磨系统等 7 个主要装置的水泥炉窑系统支出热量(图 2)。

图 3 为炉窑 4 个节点系统的收入热量与支出热量对比。炉窑系统的热量收入(黑色柱图)中, 95.3% 的热量来源于煤的燃烧热(Q_f),其他为原燃材料与空气的显热(Q_0)。有效热量支出(灰色柱图)中,熟料形成热($Q_{cl,f}$)最大,占总支出热量的 53.38%(相当于 1 742 kJ/kg);由于干燥后的生料与煤中残余水分占 1%~2%,因此干燥后生料和煤粉进入炉窑,蒸发残余水分需热量($Q_{re,w}$) 1.89%。预热器出口废气显热(Q_{preh})和冷却机余风显热(Q_c)分别占支出热量的 18.86%和 12.3%(白色柱图),其通过余热锅炉和生料、原煤的初始水分干燥过程,将得到进一步利用。其他支出热量(条纹柱图)包括:炉窑系统高温壁面散热($Q_{s,lo}$),占支出热量的

6.84%(相当于 220 kJ/kg);由于出冷却机的熟料温度较高(208 $^{\circ}C$,一般为 110 $^{\circ}C$),因此出口熟料带走的显热($Q_{cl,out}$)占总支出热量的 4.86%(相当于 159 kJ/kg);煤粉的未燃尽碳热损失(Q_{ub})占支出热量的 1.95%(相当于 63 kJ/kg)。

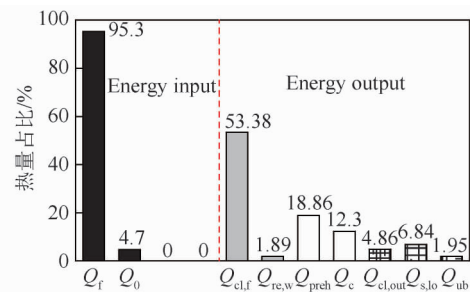


图 3 炉窑 4 个节点系统的热量收入与支出对比

Fig.3 Comparison of heat income and expense of 4 nodes system of furnace and kiln

图 4 为炉窑 7 个节点系统的收入热量与支出热量对比。可见,热量收入与图 3 相同,而有效热量支出(5 个灰色柱图)中,熟料形成热占 53.5%(相当于 1 742 kJ/kg),窑头与窑尾的烟气余热主要被 AQC 炉($Q_{AQC,st}$)和 SP 炉($Q_{SP,st}$)所吸收,产生蒸汽,该热量分别占总支出热量的 9.27%和 6.83%;SP 炉出口

的 180 °C 烟气分别用于干燥生料和原煤的初始水分, 该热量 (Q_{dry}) 占支出的 5.11%; 蒸发残余水分需热量 ($Q_{re,w}$) 1.89%。考虑余热利用和物料干燥后, 热量利用的份额提升到 76.6%, 明显高于图 3 的结果。

热量损失(图 4 中 6 个白色柱图)中, 高温炉壁 ($Q_{s,jo}$) 所占的份额最大, 占 6.75%, 具有可利用的潜力; 煤粉的未燃尽碳热损失 (Q_{ub}) 占支出热量的 1.95%; AQC 炉 ($Q_{AQC,jo}$) 和 SP 炉 ($Q_{SP,jo}$) 的热量损失各占 3.06% 和 6.19%, 也仍有利用价值; 出口熟料带走的显热 ($Q_{cl,out}$) 占支出热量的 4.87%, 若降低熟料出口温度, 还有进一步下降的可能性。

表 6 为炉窑主要热量收支占比较大的节点计算值与来自于 2017 年国家建材工业水泥能效环保评

表 6 炉窑主要节点热量收支占比的计算与测试值

Table 6 Calculation and test data of heat budget in main nodes of furnace and kiln

项目	燃料燃烧热 占比 Q_f	熟料形成 热占比 $Q_{cl,f}$	出冷却机熟 料显热占比 $Q_{cl,out}$	预热器出 口废气显热 占比 Q_{preh}	冷却机余风 显热占比 Q_c	系统高温壁 面散热占比 $Q_{s,jo}$
计算值 / %	95.30	53.38	4.86	18.86	12.30	6.84
测试值 / %	94.23	51.71	5.09	18.32	12.69	5.94

2.3 炉窑系统的焓分析

为了从能量的品位角度分析热量的利用与损失情况, 计算了炉窑 7 个节点系统的焓支出对比(图 5) 其中熟料形成热引起的焓支出最大, 达 71%。为了分析对比明显, 图 5 仅给出除熟料形成热支出焓外的其他焓支出和焓损失, 可以看出, SP 炉 ($Ex_{SP,st}$) 和 AQC 炉 ($Ex_{AQC,st}$) 的焓支出分别占 6.61% 和 7.25%, 是较大的焓支出。另外, 用于生料磨和煤磨的物料干燥 (Ex_{dry}) 和用于在预热器中物料残余水分干燥 ($Ex_{re,w}$) 的焓支出分别占 2.25% 和 1.84%。可见, 这些用于熟料形成热以及余热锅炉吸热、物料干燥的有效焓支出占 88.95%, 因此该炉窑的焓效率相当高, 这是因为随烟气温度降低, 其焓将被贬值。

图 5 还给出了炉窑 7 个节点系统的焓损失, 主要的损失来自于炉窑高温壁面散热 ($Ex_{s,jo}$) 和燃料的不完全燃烧 (Ex_{ubc}), 分别占焓损失的 4.17% 和 2.59%; 出冷却机熟料的剩余焓 ($Ex_{cl,out}$) 占 1.32%; SP 炉 ($Ex_{SP,jo}$) 的其他烟气(温度 180 °C) 以及 AQC 炉 ($Ex_{AQC,jo}$) 出口烟气(温度 110 °C) 还有一定的焓损失, 分别为 1.45% 和 1.26%。从节能角度从发, 这些损失都有可利用的价值, 目前水泥炉窑节能需加以重视。

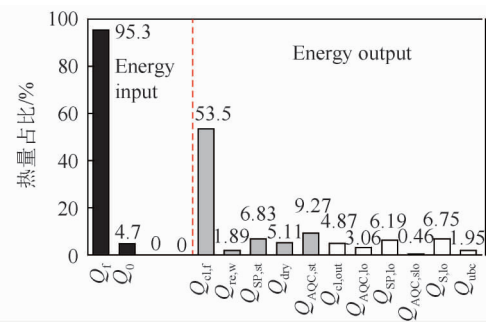


图 4 炉窑 7 个节点系统的热量收入与支出对比

Fig.4 Comparison of heat income and expense of 7 nodes system of furnace and kiln

价检验测试中心的现场测试报告的测试值对比, 可以看出, 基于节点的物质流与能量流计算模型预测值较可靠。

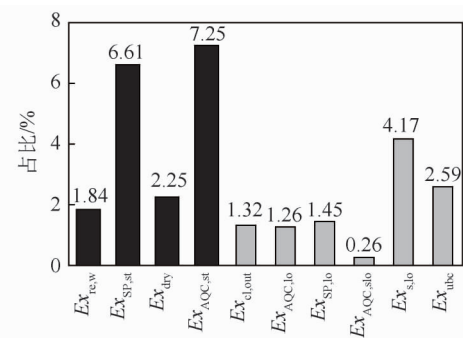


图 5 炉窑 7 个节点系统的焓收入与支出对比

Fig.5 Comparison of exergy income and expense of 7 nodes system of furnace and kiln

2.4 炉窑的节能潜力评估与技术措施

从炉窑系统的焓分析可见, 高温炉壁散热引起的焓损失最大, 相当于浪费了 220 kJ/kg 的热量。另外, 由于煤粉的未燃尽碳热损失为 63 kJ/kg, 这 2 项的热损失若换算为每吨熟料的标准煤热量, 则相当于约 9.7 kg/t。由于这 2 项焓损失属于炉窑系统的高温损失, 因此是炉窑系统节能的重点。在低温余热方面, 由于出冷却机熟料的温度过高, 其热量还可通过加大冷却机送风, 增加利用约 50%, 即有 79 kJ/kg 的熟料显热; 对于 SP 炉出口的 180 °C 烟气, 除用于物料干燥外, 仍有 51 kJ/kg 的烟气余热可以利用; 对于冷却机低温余风 (208 °C), 也有

69 kJ/kg 的显热,这些低温余热(换算为每吨熟料的标准煤热量)相当于 6.8 kg/t。若在实际工程中能够使得高温与低温余热得到有效利用,可减少煤耗 5 kg/t 以上。

从节能技术看,对于回转窑和三次风管等高温壁面的散热,可采用覆盖辐射换热器等措施回收热量,但更佳的方案是采用更先进的保温技术,减少散热。另外,对于炉窑高温段的密封也非常重要,可减少漏风引起的热损失。对于燃料的未燃尽碳热损失,可采用富氧燃烧等技术,提高低质煤的燃尽率和火焰着火温度,实现高效燃烧。

对于 SP 炉的烟气热损失,由于目前还有 1/3 左右的高温烟气热量未得到有效利用,因此需要在统筹物料干燥的基础上,尽量使高温烟气进入 SP 炉,产生更多的蒸汽。对于 AQC 炉出口的 110 °C 烟气,可采用余风再循环方式,110 °C 烟气进入篦冷机的二、三等低温段,提高冷却机的余风温度,可同时实现 AQC 炉出口烟气以及冷却机低温余风的热利用。

以上分析主要针对燃煤消耗的能量,未考虑电耗,一般研究的水泥炉窑电耗在 60~65 kWh/t(换算为每吨熟料的电耗)。目前,也有一些新技术可减少电耗,针对 3 200 t/d 的熟料生产线,若采用生料磨采用高效辊压机可以减少 5 kWh/t;采用高效风机以及永磁电机等技术可分别提高效率 10% 以上,相当于减少电耗 10 kWh/t,结合富余蒸汽拖动风机以及节能管控技术采用新技术后,节电效果将更显著,加上余热电站的发电量(相当于 35~38 kWh/t),可实现烧成系统零电耗的目标。

3 结 论

本文建立了一种基于节点法的工业炉窑物质流与能量流计算模型,可利用节能管控平台的监测数据,比较准确地预测炉窑的物质流与能量流状况,同时给出炉窑系统不同部位的焓分析。通过研究包含 AQC 锅炉、篦冷机、回转窑、分解炉、五级悬浮预热器、SP 锅炉、生料磨系统等主要装置的典型水泥炉窑系统能量流与焓流分布,得到能量与焓损失的主要部位,评估了节能的潜力。

1) 高温炉壁散热引起的热量损失最大,达 6.84%,其焓损失达 4.17%;煤粉的未燃尽碳热损失相对较大,达 1.95%,焓损失达 2.59%,这 2 项均属于高温能源浪费,具有较大的节约潜力。

2) 窑头与窑尾的烟气余热主要被 AQC 炉($Q_{AQC, st}$)和 SP 炉($Q_{SP, st}$)吸收,该热量分别占总支出热量的 9.27%和 6.83%。但 AQC 和 SP 锅炉出口

烟气温度的分别为 110 °C 和 180 °C,高于环境温度,还有一定的焓损失。

3) 采用更先进的保温技术,可减少高温炉壁散热损失;对于燃料的未燃尽碳热损失,可采用富氧燃烧等技术,实现高效燃烧;对于烟气低温热损失,可采用余风再循环,同时实现 AQC 炉出口烟气以及冷却机低温余风的热利用。

4) 针对水泥厂节电措施,推荐采用高效辊压机、高效风机、永磁电机等技术,结合富余蒸汽拖动风机以及节能管控技术等,可取得显著的节电效果。

参考文献(References):

- [1] 王冠,安登飞,庄剑恒,等.工业炉窑节能减排技术[M].北京:化学工业出版社,2015:1-14.
WANG Guan, AN Dengfei, ZHANG Jianheng, et al. Energy saving and emission reduction technology of industrial furnace and kiln [M]. Beijing: Chemical Industry Press, 2015: 1-14.
- [2] 殷瑞钰.冶金流程工程学[M].北京:冶金工业出版社,2009:87-190.
YIN Ruiyu. Metallurgical process engineering [M]. Beijing: Metallurgical Industry Press, 2009: 87-190.
- [3] 叶竹.钢铁生产过程中物质流与能量流协同关系的研究[D].沈阳:东北大学,2014.
YE Zhu. Research on material flow and energy flow synergy relationship in steel producing process [D]. Shenyang: Northeastern University, 2014.
- [4] 蔡九菊,王建军,陆钟武,等.钢铁企业能量流与物质流及其相互关系[J].东北大学学报:自然科学版,2006,27(9):979-982.
CAI Jiuju, WANG Jianjun, LU Zhongwu, et al. Material flow and energy flow in & steel industry and correlation between them [J]. Journal of Northeastern University (Natural Science), 2006, 27(9): 979-982.
- [5] SWANEPOEL J A, MATHEWS E H, VOSLOO J, et al. Integrated energy optimization for the cement industry: A case study perspective [J]. Energy Conversion and Management, 2014, 78: 765-775.
- [6] 石朝亭,蔡军,任强强,等.燃煤水泥窑炉低 NO_x 排放控制技术研究进展[J].洁净煤技术,2020,26(1):174-183.
SHI Chaoting, CAI Jun, REN Qiangqiang, et al. Research progress of low NO_x emission control technologies in coal-fired cement kilns [J]. Clean Coal Technology, 2020, 26(1): 174-183.
- [7] 马保国,田键.水泥热工过程与节能关键技术[M].北京:化学工业出版社,2009:12-102.
MA Baoguo, TIAN Jian. Thermal process engineering of cement and key technology of energy saving [M]. Beijing: Chemical Industry Press, 2009: 12-102.
- [8] SOGUT Z, OKTAY Z, KARAKOC H. Mathematical modeling of heat recovery from a rotary kiln [J]. Applied Thermal Engineering, 2010, 30(8/9): 817-825.
- [9] SUI X, ZHANG Y, SHAO S, et al. Exergetic life cycle assessment

- of cement production process with waste heat power generation [J]. *Energy Conversion and Management* 2014 ,88: 684-692.
- [10] ATMACA A ,YUMRUTAS R. Analysis of the parameters affecting energy consumption of a rotary kiln in cement industry [J]. *Applied Thermal Engineering* 2014 ,66: 435-444.
- [11] WANG J F ,DAI Y P ,GAO L. Exergy analyses and parametric optimizations for different cogeneration power plants in cement industry [J]. *Applied Energy* 2009 ,86: 941-948.
- [12] 李福通. 水泥窑系统综合节能改造效果研究 [D]. 广州: 华南理工大学, 2015.
LI Futong. The comprehensive energy - saving effect research of cement kiln system [D]. Guangzhou: South China University of Technology 2015.
- [13] 中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局. 水泥回转窑热平衡、热效率、综合能耗计算方法: GB/T 26281—2010 [S]. 北京: 中国标准出版社, 2010.
General Administration of Quality Supervision ,Inspection and Quarantine of the People's Republic of China. Calculating methods for heat balance ,heat efficiency and comprehensive energy consumption of cement rotary kiln: GB/T 26281—2010 [S]. Beijing: Standards Press of China 2010.
- [14] 周元. 大型水泥生产线窑炉节能优化与控制研究 [D]. 湘潭: 湖南科技大学, 2010.
- ZHOU Yuan. Research for kiln and furnace energy - saving and control in large - scale cement production line [D]. Xiangtan: Hunan University of Science and Technology 2010.
- [15] ATMACA A ,YUMRUTAS R. Analysis of the parameters affecting energy consumption of a rotary kiln in cement industry [J]. *Applied Thermal Engineering* 2014 ,66(1) : 435-444.
- [16] DITARANTO M ,BAKKEN J. Study of a full scale oxy-fuel cement rotary kiln [J]. *International Journal of Greenhouse Gas Control* , 2019 ,83: 166-175.
- [17] SHAHIN H ,HASSANPOUR S ,Saboonchi A. Thermal energy analysis of a lime production process: Rotary kiln ,preheater and cooler [J]. *Energy Conversion and Management* ,2016 , 114: 110-121.
- [18] ONI AO ,FADARE DA ,ADEBOYE LA. Thermoeconomic and environmental analyses of a dry process cement manufacturing in Nigeria [J]. *Energy* 2017 ,135: 128-137.
- [19] 姚远 魏小林 陈立新 等. 水泥炉窑的高能效低排放关键技术研发及应用进展 [J]. *洁净煤技术* ,DOI: 10.13226/j.issn.1006-6772.IF20080621.
YAO Yuan ,WEI Xiaolin ,CHEN Lixin ,et al. The research and application of the key technologies for high efficiency and low emission of cement kilns [J]. *Clean Coal Technology* ,DOI: 10.13226/j.issn.1006-6772.IF20080621.