

水泥窑窑头热风再循环系统热平衡分析

李 冰¹, 潘利生², 魏小林², 史维秀¹, 李 锐¹

(1. 北京建筑大学环境与能源工程学院, 北京 100044;

2. 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)

摘要: 作为高耗能工艺, 水泥炉窑能耗占建材产业总能耗的 50% 以上, 提高其节能水平至关重要。基于一套运行产量为 4000 t/d 的水泥生产线, 通过理论方法, 分析了热风再循环技术方案效果, 得到了不同工况下, 环境温度、烟气-水换热器进气温度、新风量分配对节煤率和需要引入新风量的影响。结果表明: 节煤率随环境温度的升高而升高, 而烟气-水换热器进气温度和进入锅炉中新风比例的升高均有利于降低总新风量和提高节煤率。当锅炉参数保持不变, 换热器进气温度为 200 °C, 环境温度为 30 °C 时, 节煤率可达 0.86%, 对应新风量为 $2.97 \times 10^4 \text{ Nm}^3/\text{h}$ 。

关键词: 水泥炉窑余热利用; 热风再循环; 节煤率

中图分类号: TK115

文献标识码: A

文章编号: 1001-1625(2019)10-3344-05

DOI:10.16552/j.cnki.issn1001-1625.2019.10.045

Thermal Balance Analysis on Hot Air Recirculation System of Cement Kiln Head

LI Bing¹, PAN Li-sheng², WEI Xiao-lin², SHI Wei-xiu¹, LI Rui¹

(1. School of Environment and Energy Engineering, Beijing University of Civil Engineering and Architecture, Beijing 100044, China;

2. State Key Laboratory of High-temperature Gas Dynamics, Institute of Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China)

Abstract: As a high energy consuming process, the energy consumption of cement kiln consumes more than 50% of the total energy consumption of building materials industry. Therefore, it is of great importance to save energy in the cement kiln system. Based on a cement production line with a production of 4000 t/d, the effect of a hot air recirculation technology was analyzed theoretically. The impact of parameters, such as ambient temperature, inlet temperature of heat exchanger and fresh air distribution, on fresh air needed and coal saving ratio was analyzed under different working conditions. The results show that the coal saving ratio increases with increasing the ambient temperature. It is helpful for decreasing the total fresh air flow rate and increasing the coal saving ratio to increase the fresh air flow rate in boiler and the inlet temperature of the heat exchanger. When the operating parameters of the boiler keep constant and the inlet temperature of the heat exchanger is 200 °C, the coal saving ratio reaches up to 0.86% with the ambient temperature of 30 °C. The corresponding fresh air flow rate is $2.97 \times 10^4 \text{ Nm}^3/\text{h}$.

Key words: waste heat utilization of cement kiln; hot air recirculation; coal saving ratio

1 引 言

作为最重要的建筑材料之一, 我国水泥产量长期以来呈现逐渐增长的趋势。至 2018 年, 我国水泥年产量已达到 26.91 亿吨^[1-2]。作为高耗能工艺, 水泥炉窑能耗占建材产业总能耗的 50% 以上^[3]。为解决传统水泥生产过程中存在的能耗大、经济效益和环境效益较差的问题, 以及缓解能源紧缺对社会发展带来的负面影响, 提高水泥生产过程中能源利用率已成为水泥行业发展的必然趋势^[4-6]。新型干法水泥熟料生产工艺在保证水泥产量的前提下, 也能够较充分地回收利用水泥窑高温余热, 使得我国水泥工业的节能水平有了显著的提高^[7]。马文华等^[8]针对水泥生产过程中耗能较大和污染严重的问题, 明确了企业中主要的节能减排

基金项目: 国家重点研发计划(2016YFB0601504)

作者简介: 李 冰(1993-), 女, 硕士研究生, 主要从事热能的高效转化利用方向的研究。E-mail: 547603140@qq.com.

通讯作者: 潘利生, 副研究员。E-mail: panlisheng@imech.ac.cn.

环节,列举出了可采用的节能减排技术,并结合具体案例,对节能减排效果进行了分析。柴进^[1]针对水泥熟料煅烧过程中产生大量 CO₂ 等气体和水泥生产时能耗较大的问题,阐述了新型干法水泥熟料生产加工工艺及水泥生产过程中节能减排技术的应用,并结合具体案例分析得知这种工艺的节能效果明显。回转窑作为水泥生产过程中最主要的设备之一,窑体工作温度可达 300 °C 以上,对回转窑中的热量加以回收利用对提高能源利用率有着至关重要的作用。闻讯^[9]通过采用在回转窑筒体表面加装集热器装置的方式来实现回收回转窑表面因辐射散失的热量。邓静^[10]着眼于回转窑热效率较低的弊端,介绍了几种常见的回转窑高温烟气余热回收利用方法,并说明了每种技术存在的优势与不足。

虽然新型干法水泥因其技术优势而受到了各大企业的青睐,但在水泥生产过程中,因中低温废气排放而带来的能源浪费和环境问题也是不容忽视的^[7]。张广志^[11]从水泥厂中低温纯余热发电技术的特点出发,分析了其优势与不足,详细介绍了中低温纯余热发电设备的配置,并阐述了三种发电技术的优劣。王江峰等^[12]介绍了常用的中低温余热发电技术及其特点,并结合实例对不同的余热利用方案进行了对比分析,结果表明:在相同的条件下,采用混合工质卡琳娜循环发电,余热利用效率更高。石海英等^[13]对某万吨水泥熟料生产线采用双压蒸汽循环和朗肯循环余热发电系统进行了全面的对比分析,表明:采用 ORC 系统余热利用效率更高,但采用该系统投资成本较大、技术成熟度尚未达到、安全性也无法得到保证,因此现阶段采用双压蒸汽循环系统仍是最佳选择。彭岩^[14]介绍了三种国内余热发电技术(单压进汽、双压进汽和闪蒸补汽),并结合案例对三种技术进行了技术经济分析,得出结论:采用双压技术可解决余热锅炉排出烟气余温较高而带来的负面影响,经济效益显著。

在水泥窑余热发电过程中,出窑头余热锅炉的废气温度仍然较高,代伟林等^[15]针对这一问题,提出了一种水泥窑篦冷机循环鼓风技术,通过综合分析比较,得知将篦冷机循环鼓风取气口设置在窑头排风机出口、接入点设置在篦冷机中部是较为理想的选择。

本文针对一套实际运行产量为 4000 t/d 的水泥生产线,将从窑头篦式冷却机(AQC)余热锅炉中排出的烟气余热采用热风再循环技术加以回收利用,在熟料产量、熟料冷却终温、篦冷机熟料放热量均维持不变的情况下,采用理论方法分析热风再循环技术效果及参数间的依变规律。

2 热风再循环系统

图 1 为采用热风再循环技术后的系统流程图。经过篦冷机的冷却风来源于循环风和新风,并分流至二次风、三次风、余热锅炉和烟气-水换热器,其中进入余热锅炉和烟气-水换热器冷却风又最终成为烟囱排风和循环风。应用热风循环后,二次风温度会明显升高,亦对节煤率有贡献,但由于二次风的温度和流量难以测量,并且对节煤率的影响涉及回转窑和分解炉等其他复杂工序,因此,本文仅依据现有系统余热锅炉的烟气量及温度参数,定量推出余热锅炉利用的篦冷机余热,在理论分析时,假定二次风参数维持不变,并不考虑流向二次风管的空气流量。

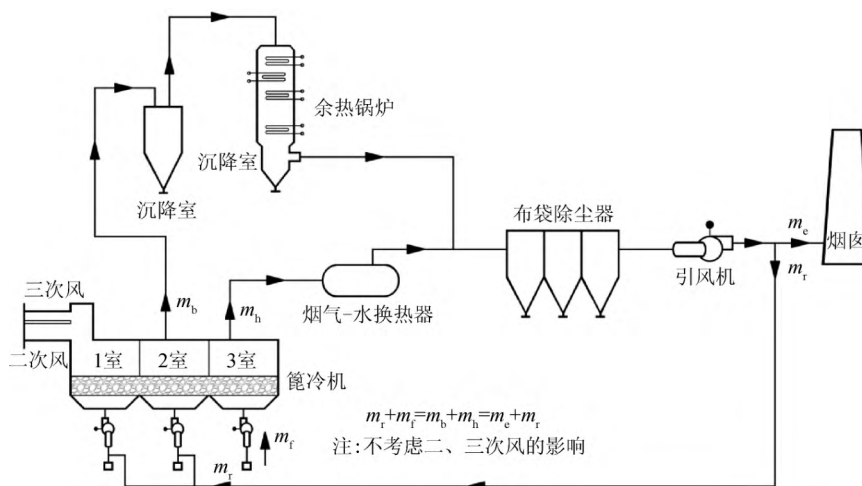


图 1 热风再循环系统流程

Fig. 1 Flow chart of hot air recirculation system

现有生产线窑头余热锅炉烟气进口温度实测数据为 400 °C, 流量实测数据为 $10.88 \times 10^4 \text{ Nm}^3/\text{h}$, 蒸汽产量为 15 t/h, 窑头余热锅炉的排烟温度实测数据为 80 °C。依据上述实测数据, 并指定如下参数: 锅炉进气温度为 400 °C, 换热器进气温度范围为 200 ~ 100 °C, 烟气-水换热器出口风温为 80 °C, 环境温度范围为 10 ~ 30 °C, 流向锅炉的新风量范围为 0 ~ $1.6 \times 10^4 \text{ Nm}^3/\text{h}$ 。

表1 符号表

Table 1 Symbol table

C_p	烟气比热	$\text{kJ}/(\text{kg} \cdot ^\circ\text{C})$	\dot{V}_b	烟气体积流量	$\times 10^4 \text{ Nm}^3/\text{h}$
ρ_a	烟气标况密度	kg/m^3	\dot{m}_c	熟料产量	t/h
q_{sc}	1 kg 标煤的热值	MJ	b	熟料综合煤耗	$\text{kg}(\text{标煤})/(\text{t}(\text{熟料}))$
t_a	环境温度	$^\circ\text{C}$	t_e	放散烟气温度	$^\circ\text{C}$
t'_b	余热锅炉烟气进口温度	$^\circ\text{C}$	t''_b	余热锅炉烟气出口温度	$^\circ\text{C}$
t'_h	烟气-水换热器进气温度	$^\circ\text{C}$	t''_h	烟气-水换热器出口风温	$^\circ\text{C}$
Q_c	熟料放热量	J/h	Q_b	余热锅炉换热量	J/h
Q_s	产生蒸汽所需热量	J/h	Q_r	热风再循环系统新风吸热量	J/h
Q_d	现有系统烟囱散失热量	J/h	Q_e	热风再循环系统烟囱散失热量	J/h
Q_b	余热锅炉中新风放热量	J/h	Q_a	热风再循环技术增加热量	J/h
\dot{V}_f	总新风量	$\times 10^4 \text{ Nm}^3/\text{h}$	\dot{V}_e	放散烟气量	$\times 10^4 \text{ Nm}^3/\text{h}$
\dot{V}_{bf}	余热锅炉新风量	$\times 10^4 \text{ Nm}^3/\text{h}$	\dot{V}_{hf}	烟气-水换热器新风量	$\times 10^4 \text{ Nm}^3/\text{h}$
R_{bf}	余热锅炉新风比例	-	\dot{m}_s	节煤质量	kg/h
b_r	折合降低煤耗	$\text{kg}(\text{标煤})/(\text{t}(\text{熟料}))$	α	节煤率	-

3 理论分析方法

依据现有生产线余热锅炉参数计算篦冷机中熟料热量, 由热平衡方程可得:

$$Q_c = C_p \cdot \rho_a \cdot \dot{V}_b \cdot (t'_b - t_a) \quad (1)$$

水泥窑窑头烟气吸收熟料在篦冷机中冷却并释放出的大量热量后, 通过沉降室进入余热锅炉, 在锅炉中发生热交换, 烟气放热量由式(2)表示:

$$Q_b = C_p \cdot \rho_a \cdot \dot{V}_b \cdot (t'_b - t''_b) \quad (2)$$

对该系统由热平衡方程可知, 未利用热量即从烟囱排放烟气所携带热量用式(3)表示:

$$Q_d = Q_c - Q_b \quad (3)$$

增加热风再循环系统后, 从烟囱排放的高温烟气所携带热量再次被引到系统中。为保证熟料的冷却效果, 并使得出口风温仍保持较高温度, 向篦冷机室内引入一股环境新风是十分必要的。

不考虑二、三次风的影响, 由质量守恒, 放散烟气的流量等于引入新风量与系统漏风量之和。若考虑系统漏风, 则系统会有能量损失, 进而导致各设备进出口温度下降, 增加了分析问题的复杂程度, 系统漏风不列入考虑范围。

$$\rho_a \cdot \dot{V}_e = \rho_a \cdot \dot{V}_f \quad (4)$$

增加热风再循环系统后, 放散烟气所携带热量由式(5)表示:

$$Q_e = C_p \cdot \rho_a \cdot \dot{V}_e \cdot (t_e - t_a) \quad (5)$$

增加热风再循环后, 引入系统中的热量即为未增加热风再循环时烟囱排放烟气所携带热量与增加热风再循环后放散烟气所携带热量之差, 用式(6)表示:

$$Q_r = Q_d - Q_e \quad (6)$$

这部分热量由一股环境新风吸收, 新风一部分进入烟气-水换热器与水发生热交换, 一部分进入余热锅炉。由能量守恒和质量守恒:

$$Q_r = C_p \cdot \rho_a \cdot \dot{V}_{bf} \cdot (t'_b - t_a) + C_p \cdot \rho_a \cdot \dot{V}_{hf} \cdot (t'_h - t_a) \quad (7)$$

$$\rho_a \cdot \dot{V}_f = \rho_a \cdot \dot{V}_{bf} + \rho_a \cdot \dot{V}_{hf} \quad (8)$$

热风再循环增加热量为锅炉增加热量与烟气-水换热器可利用热量之和:

$$Q_a = C_p \cdot \rho_a \cdot \dot{V}_{bf} \cdot (t'_b - t''_b) + C_p \cdot \rho_a \cdot \dot{V}_{hf} \cdot (t'_h - t''_h) \quad (9)$$

热风再循环增加热量折合成标煤即节煤质量, 用式(10)表示:

$$\dot{m}_s = Q_a / q_{sc} \quad (10)$$

其中, 标准煤的低发热量(即热值)为 29307 kJ 的燃料, 即: $q_{sc} = 29.3 \text{ MJ}$ 。

降低煤耗用式(11)表示:

$$b_r = \dot{m}_s / \dot{m}_c \quad (11)$$

其中, 熟料产量 \dot{m}_c 为 4000 t/d。

节煤率用式(12)表示:

$$\alpha = b_r / b \quad (12)$$

其中 $b = 110.16 \text{ kg(标煤) / t(熟料)}$ 。

4 结果分析

本文采用理论方法, 分析了热风再循环技术效果和需引入新风量随各参数(环境温度、换热器进气温度、新风量的分配)间的依变规律。

4.1 环境温度对系统性能的影响

维持余热锅炉运行参数与原有系统相同, 本节分析了不同的换热器进气温度下, 环境温度对需要引入的新风量和节煤率的影响。引入系统中的热量由一股环境新风吸收, 该股环境新风全部进入烟气-水换热器与水发生热交换。

如图 2 所示, 所需引入的新风量随环境温度的升高而升高, 随换热器进气温度的升高而降低; 节煤率随环境温度和换热器进气温度升高而升高。余热锅炉进气温度和流量不变, 熟料放热量不变, 在余热锅炉中烟气放热量不变, 未增加热风再循环系统时的损失热量不变。若环境温度增加, 需引入的新风量增加, 相应地, 换热器可利用热量增加, 节煤量增加, 折合降低煤耗增加, 节煤率增加。若换热器进气温度升高, 引入的新风量降低。当烟气-水换热器进气温度为 200°C , 环境温度为 30°C 时, 节煤率可达 0.86%, 对应新风量为 $2.97 \times 10^4 \text{ Nm}^3/\text{h}$ 。引入的新风质量流量与烟囱排风质量流量相等, 新风量降低意味着通过烟囱散失的热量降低, 因此, 换热器可利用热量增加, 节煤率增加。值得注意的是, 换热器进气温度越高, 需要引入的新风量的变化幅度越小。

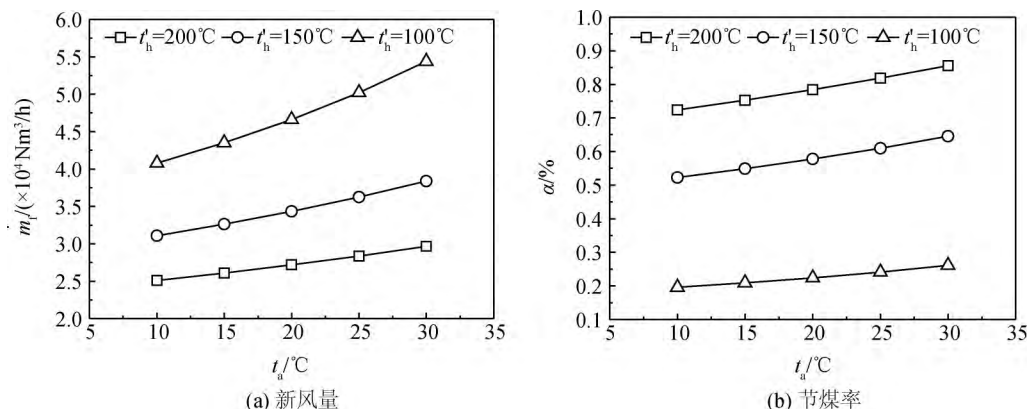


图 2 不同换热器进气温度下, 环境温度对新风量、节煤率的影响

Fig. 2 Variation of fresh air rate and coal saving ratio with ambient temperature under different inlet temperature of heat exchanger

4.2 新风量分配对系统性能的影响

维持余热锅炉进口烟气温度不变, 增加余热锅炉风量。本节分析了当加入的新风一部分进入烟气-水换热器、一部分进入余热锅炉时, 在不同的换热器进气温度下, 锅炉中新风量对需要引入的新风量和节煤率的影响。在理论分析中, 假定环境温度为 20°C 。

如图 3 所示, 换热器进气温度越高, 所需加入的新风越少, 锅炉中新风量所占的比例就越高。由于熟料放热量不变, 在进入余热锅炉新风量一定的情况下, 换热器进气温度越高, 单位质量流量的新风在熟料中吸收的热量越多, 故所需加入的总新风量就越少。由于进入余热锅炉中的烟气温度维持在 400°C 不变, 进入余

热锅炉的新风越多,则单位质量流量的新风在熟料中吸收的热量也越多,故新风量也随进入余热锅炉新风量的升高而降低。进入余热锅炉新风量的比例与进入余热锅炉新风量呈正相关关系,但并非线性关系,余热锅炉中新风量比例随余热锅炉新风量的升高逐渐增加,且增加幅度越来越大,其原因在于进入余热锅炉新风量对总新风量具有影响。

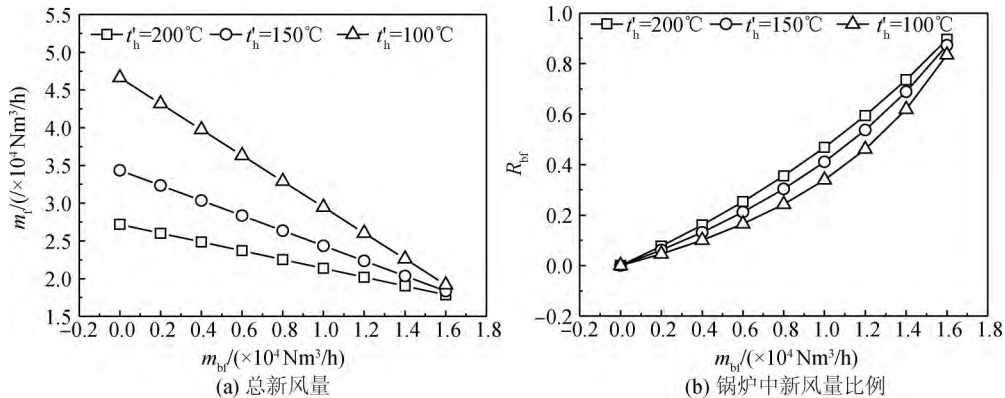


图3 不同换热器进气温度下,锅炉中新风量对加入总新风量的影响

Fig. 3 Variation of total fresh air rate with fresh air rate into boiler under different inlet temperature of heat exchanger

如图4所示,进入锅炉中新风量与换热器进气温度越高,节煤率越高。进入锅炉内新风量增加,引入的总新风量降低,由于烟囱排风量与系统总新风量相等,因此系统排风量也随余热锅炉内新风量的增加而降低,在水泥熟料放热量维持一定的情况下,烟囱排风量越低则系统余热回收效果越佳,节煤率越高。换热器进气温度升高亦有利于降低系统所需新风量,提升系统节能效果,提高节煤率。值得注意的是,换热器进气温度越高,节煤率的上升的速度越小。

综上所述,换热器进气温度越高、进入余热锅炉的新风比例越高,需要引入的新风量越低、节煤率越高。理论上,在考察工况下,当全部新风均被加热至 400°C ,并进入余热锅炉换热时,达到的节煤率最高。但需要注意,采用热风再循环技术后,冷却风温有所提升,为保证对熟料的冷却效果,引入新风量需综合考虑节能和熟料冷却效果等因素,且在实际工程中,引入新风不可能全部被加入到 400°C 。因此,本节关于新风量分配的分析仅为热风再循环系统优化设计提供参数间依变规律的参考,实际工程中进入锅炉中新风量为 $1.6 \times 10^4 \text{ Nm}^3/\text{h}$ 的最优工况不能达到。

5 结论

本文针对一套运行产量为 4000 t/d 的水泥生产线,依据现有运行参数和篦冷机热风再循环系统方案,采用理论方法,开展了热平衡分析,得出了不同工况下,各参数对系统节煤率的影响,为工程设计及调试提供相应的理论支撑。

(1) 在余热锅炉运行参数不变的情况下,所需引入的新风量与环境温度存在正相关关系,与烟气-水换热器进气温度存在负相关关系;节煤率与环境温度和烟气-水换热器进气温度均存在正相关关系。

(2) 当余热锅炉中烟气体量可变时,增加进入余热锅炉中的新风量、提高烟气-水换热器进气温度均有利于降低系统总新风量,提高系统节煤率。

(下转第3354页)

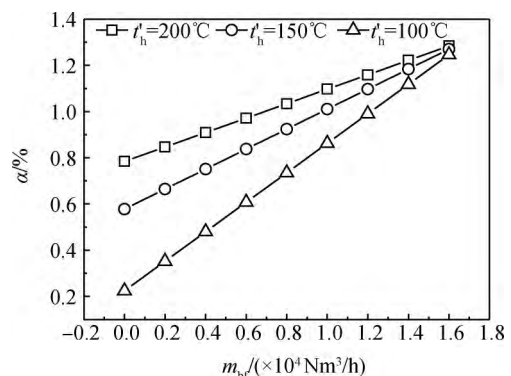


图4 不同换热器进气温度下,锅炉中新风量对节煤率的影响

Fig. 4 Variation of coal saving ratio with fresh air rate into boiler under different inlet temperature of heat exchanger

(2) IAD 在水泥颗粒表面的吸附动力学研究表明: 吸附动力学过程符合 Lagergren 吸附速率方程, 饱和吸附量与温度正相关, 吸附速率常数增大。根据 Arrhenius 方程, 计算出表观活化能得 $E_a = 7.75 \text{ kJ/mol}$ 。

(3) IAD 在水泥颗粒表面的吸附热力学研究表明: 吸附量随温度升高而增大, 热力学参数计算如下: $\Delta H = -11.48 \text{ kJ/mol}$, $\Delta S = 89.05 \text{ J/(mol} \cdot \text{K)}$, $\Delta G < 0$, 说明吸附为放热自发过程, 温度越高, 吸附进行的程度越大。

参 考 文 献

- [1] Lummer N R, Plank J. Combination of ligosulfonate and AMPS-co-NNDMA water retention agent—an example for dual synergistic interaction between admixtures in cement[J]. Cement and Concrete Research, 2012, 42(5): 728-735.
- [2] Plank J, Fatima D B, Lummer N R. Modification of the molar anionic charge density of acetone-formaldehyde-sulfite dispersant to improve adsorption behavior and effectiveness in the presence of CaATBS-co-NNDMA cement fluid loss polymer[J]. Journal of Applied Polymer Science, 2010, 111(4): 2018-2024.
- [3] 董文博, 庄 稼, 马彦龙, 等. 高温油井水泥缓凝剂 2-丙烯酰胺基-2-甲基丙磺酸/苯乙烯磺酸钠/衣康酸的合成及缓凝效果[J]. 硅酸盐学报, 2012, 40(5): 703-710.
- [4] 夏修建. 新型耐高温油井水泥缓凝剂的研制[D]. 天津: 天津大学, 2013.
- [5] 夏修建, 郭锦棠, 于永金. 固井用新型高温缓凝剂的研究与应用[J]. 钻井液与完井液, 2015, 32(2): 72-74.
- [6] 于小荣. 大温差两性离子缓凝剂的制备及在低密度水泥浆中的应用[D]. 成都: 西南石油大学, 2017.
- [7] HJ828—2017, 水质化学需氧量的测定重铬酸盐法[S]. 北京: 中国环境出版社, 2017.
- [8] Zhong C, Huang R, Zhang X, et al. Synthesis, characterization and solution properties of an acrylamide-based terpolymer with butyl styrene[J]. Journal of Applied Polymer Science, 2007, 103(6): 4027-4038.
- [9] 季亚军. 聚羧酸减水剂的分子结构表征及其与胶凝组分的相互作用研究[D]. 广州: 华南理工大学, 2011.
- [10] 胡晓波, 陈志源. 高效减水剂在水泥颗粒表面的吸附[J]. 硅酸盐学报, 2003, 31(8): 784-789.
- [11] 周学永, 周 鑫. 由 Langmuir 方程计算标准吸附平衡常数[J]. 大学化学, 2013, 28(6): 50-53.
- [12] 易聪华, 汤潜潜, 黄 欣, 等. 聚羧酸减水剂在水泥颗粒表面的吸附行为[J]. 化工学报, 2012, 63(8): 2460-2468.

(上接第 3348 页)

参 考 文 献

- [1] 柴 进. 新型干法水泥熟料生产过程节能减排技术应用研究[J]. 水泥生产, 2018(9): 1.
- [2] 李涛平. 中国水泥水平能效现状和节能潜力报告[J]. 水泥生产, 2004(4): 1-10.
- [3] 程玉华. 建材行业能耗标准实施的社会和经济效益分析[J]. 上海建设科技, 2015(3): 74-76.
- [4] 谢卫平. 20MW 水泥窑纯低温余热发电工程设计介绍[J]. 江苏环境科技, 2007, 20(4): 53-56.
- [5] 王旭烽, 朱培武. 国内水泥行业能耗限额标准现状分析[J]. 水泥工程, 2014(5): 1-5.
- [6] 方云龙. 水泥窑余热锅炉设计及结构优化研究[D]. 马鞍山: 安徽工业大学, 2017.
- [7] 黄巧媛. 新型干法水泥生产线纯低温余热发电项目前景广阔[J]. 水泥技术, 2006(5): 93-94.
- [8] 马文华, 莫伟健, 朱树海. 新型干法水泥熟料生产环节节能减排技术研究[J]. 河南科技, 2017(11): 114-115.
- [9] 闻 讯. 水泥回转窑系统余热回收分析与实施[D]. 济南: 山东大学, 2014.
- [10] 邓 静. 回转窑高温烟气余热的回收利用[J]. 科技风, 2013(5): 103-104.
- [11] 张广志. 水泥厂中低温余热发电技术及应用探讨[J]. 企业技术开发, 2014, 33(6): 20-22.
- [12] 王江峰, 戴义平, 陈 江. 中低温余热发电技术及其在水泥生产中的应用[J]. 节能, 2007(2): 32-34.
- [13] 石海英, 刘怀亮, 彭 岩, 等. 低耗低排放万吨水泥熟料线余热发电方案研究[J]. 水泥工程, 2012(4): 82-85.
- [14] 彭 岩. 纯低温余热发电双压技术分析[J]. 锅炉技术, 2009, 40(2): 1-4.
- [15] 代伟林, 魏永杰, 石 磊, 等. 水泥窑篦冷机循环鼓风技术应用分析[J]. 水泥工程, 2012(4): 52-53.