

氧化锌法式圆炉燃烧系统及结构优化

吴竺^{1,2}, 陈祎², 王建召²

1. 同济大学机械工程学院, 上海 200092
2. 上海新奥能源科技有限公司, 上海 201203

摘要 氧化锌的生产可分为火法和湿法两种工艺, 法式氧化锌生产工艺是火法间接氧化锌生产的一种重要工艺。本文以浙江某厂的一台氧化锌法式圆炉为研究对象, 采用数值模拟方法对该窑炉的加热工艺及结构进行优化, 并通过改造实施进行验证, 有效提高了氧化锌法式圆炉的热效率, 增加了窑炉的使用寿命。通过对法式圆炉燃烧井及燃烧空间的数值模拟, 对比分析了燃烧器型式及燃烧井结构的变化对窑炉温度场、流场及气体浓度场等的影响, 据此提出了合理的优化改造意见, 模拟结果与实测数据吻合良好。依据模拟结果对法式圆炉进行节能技术改造, 首先将燃烧器型式由大气式改为预混式, 并采用空燃比例调节装置, 控制天然气和助燃空气的比例及混合程度; 其次将炉窑燃烧井由垂直结构改为扩口结构。技术改造之后, 生产每吨氧化锌的天然气单耗由 240Nm³ 降至 192Nm³, 日节约天然气 360Nm³; 内外坩锅寿命由 3 个月提高至 6 个月; 每个生产周期氧化锌平均产量由 7.5t/d 提升至 8.0t/d, 单台窑炉的年经济效益可达 50 万元人民币。

关键词 氧化锌; 法式圆炉; 数值模拟

中图分类号 TK224.1

文献标识码 A

doi 10.3981/j.issn.1000-7857.2012.03.004

Optimization of Combustion System and Structure for the French Process Zinc Oxide Furnace

WU Zhu^{1,2}, CHEN Yi², WANG Jianzhao²

1. School of Mechanical Engineering, Tongji University, Shanghai 200092, China
2. Shanghai ENN Energy Science & Technology Co., Ltd., Shanghai 201203, China

Abstract The process of zinc oxide production could be divided into two processes including fire and wet. French process is an important method for indirect ZnO production. A French ZnO furnace in Zhejiang Province is taken as the research object, the heating process and structure of the furnace are optimized and confirmed by means of numerical simulation and are tested through implementation, which effectively enhances thermal efficiency and extends the life-span of the furnace. By using numerical simulation of fire tunnel and combustion chamber, the effects of both burner type and furnace structure on the temperature field, flow field, and concentration field in the furnace are simulated and analyzed. Several reasonable optimization methods and reformation advices are put forward, and the simulation results are consistent with the field test results quite well. The furnace is reformed according to the simulation results, gas burner is changed from atmospheric to premixed, and the device for the air-fuel ratio adjustment is used to control the ratio of air and fuel, then the fire tunnel is changed from vertical structure to flaring structure. After these technique transformations as mentioned above, the gas consumption for one ton ZnO decreases from 240Nm³ to 192Nm³, and for each single day, 360Nm³ natural gas is saved, the average production of ZnO increases from 7.5t/d to 8.0t/d, and the life-span of the inner and outer crucibles of the furnace increases from three months to six months. The economy benefit due to the energy saving reconstruction is up to fifty thousand Yuan RMB per furnace per year.

Keywords zinc oxide; French process furnace; numerical simulation

0 引言

氧化锌用途广泛, 主要用于橡胶、涂料、搪瓷、陶瓷、玻璃

及医药、农业、电子等行业。氧化锌的生产方法有火法和湿法之分^[1]。湿法是用酸、碱或碳酸氢溶液等, 浸出氧化锌矿、含锌

收稿日期: 2011-12-01; 修回日期: 2012-01-19

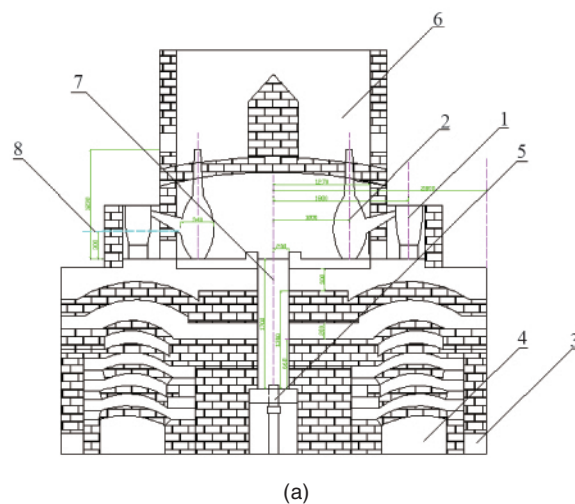
作者简介: 吴竺, 博士研究生, 研究方向为天然气及工业节能, 电子信箱: bagnwoo@163.com

烟尘等含锌物料,经静液除杂、沉淀碱式碳酸锌、干燥、煅烧,制得氧化锌。火法分为直接法(美国法)和间接法(法国法)两种。直接法是将硫化锌精矿经沸腾焙烧,加碳质还原剂制团(个别情况不制团),加入韦氏炉;在高温下,锌被还原,旋即被炉气中的 CO_2 及引入空气中的氧所氧化;氧化物冷却后进入布袋室,得成品氧化锌(含 99.5% ZnO)。直接法是将金属锌锭熔化,加入蒸发炉内;在高温下,锌被蒸发,然后将其导入氧化炉(室)氧化,降温后进入布袋室,得成品氧化锌(含 99.7% ZnO)^[2]。直接法制得的氧化锌通常呈针状或棒状结晶,颗粒较粗。间接法具有生产连续稳定、能耗低、产品质量高等特点。间接法生产氧化锌,因锌蒸汽不受燃料燃烧产物的污染,所以产品纯度高(可达 99.8%以上),色泽洁白(白度在 86%以上)^[3]。

20 世纪 70 年代以来,国内一些冶金企业陆续开展了氧化锌火法生产工艺及设备的研究与应用。温州市颜料化工厂进行了新炉型的试制工作,设计出半卧式发射炉,经过 10 个多月的反复实践,效果良好,不但变间歇式生产为连续化,而且实现了以重油为燃料,不需要块煤。葫芦岛锌厂提出了锌锭反射炉法生产氧化锌,该法以锌锭作原料,将坩锅炉改为反射炉,在兴城市冶化厂经过了两年多的生产实践,此法建设投资较低、建设周期短、技术条件易控制、余热利用较好、工艺流程短、产品质量高,在技术和经济方面都具备可行性^[4]。

本文的研究对象为浙江某厂的一台氧化锌法式圆炉(火法间接生产氧化锌),炉子结构见图 1。炉内的工艺过程为:燃气在燃气烟道中燃烧产生高温烟气(高于 1100℃),通过传导和对流传热将熔锌锅(内坩锅)的液态锌蒸发(锌的沸点为 906℃),经过内坩锅吸热之后,烟气降温并进入外坩锅空间,通过传导和对流传热将熔锌锅(外坩锅)内的固态锌锭熔化(锌的熔点为 419.5℃);锌锭被熔化之后进入内坩锅,液态锌在内坩锅中被加热至沸点时,转变成锌蒸汽进入氧化室,进而与氧气反应成为氧化锌粉末。目前该炉存在的问题是:采用水煤气为能源,能耗高;空燃比无法精确配比,燃烧不充分,热效率低;采用引射式燃烧器,火焰较长,火焰直接焙烧内坩锅,使坩锅寿命短(一般为 3 个月),且造成锌大量损耗。

随着计算机技术的发展,采用数值模拟方式对工业窑炉内的燃烧状况及燃烧器进行分析与优化,是近年来工业窑炉节能改造的一个重要发展方向^[5-9]。Abbassi 等^[7]采用 CFD 模拟软件对玻璃熔窑内的燃气燃烧状况进行模拟,模拟结果与实测结果吻合良好;Cadavid 等^[8]通过模拟燃气自热干锅炉并对比实验数据,讨论了不同反应模型的选取对模拟结果的影响,指出燃气的喷射方式是影响火焰形状的重要因素。在国内,同济大学朱彤等^[9]通过大量的数值模拟试验,提出均热炉燃烧技术必须充分考虑系统布置、炉膛结构、炉内烟气流动及传热过程、工件加热工艺过程等因素,提出了均热炉燃烧系统的改造方案,并进行了非稳态燃烧过程数值模拟研究;林鹏云等^[10]采用数值方法讨论了空气分段燃烧技术,研究了



(a)



(b)

1—熔锌锅(外坩锅);2—蒸发锅(内坩锅);3—风口;4—烟道;
5—天然气烧嘴;6—氧化室;7—燃烧井;8—热电偶(位于两个坩锅之间)

图 1 氧化锌法式圆炉的结构(a)及现场照片(b)

Fig. 1 Scheme (a) and photo (b) of French process zinc oxide furnace

影响燃煤电站锅炉 NO_x 排放及空气分段燃烧生成 NO_x 的因素。

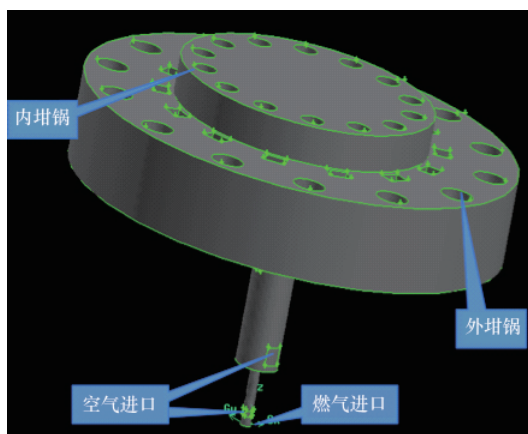
本文采用数值模拟方法对氧化锌法式圆炉的加热工艺及结构进行优化,并通过改造实施进行验证。对窑炉的燃烧系统及结构进行优化,燃烧器由大气式燃烧器改为完全预混燃烧器并采用空燃比例调节装置,同时通过窑炉高温排烟来预热助燃空气,降低窑炉的单位产品耗气量,提高窑炉的系统能效。

1 数值仿真模型

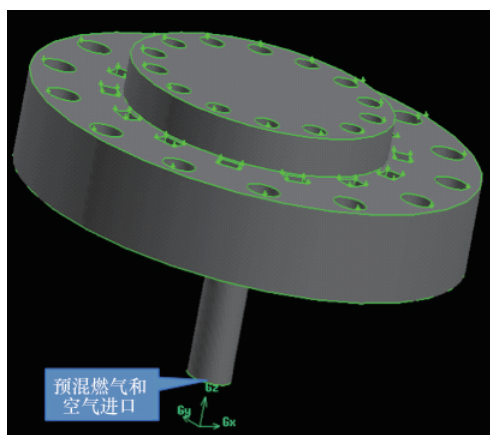
1.1 物理模型及网格划分

对物理模型(图 2)进行如下假设:忽略内坩锅之间的支撑结构;忽略炉内各结构由于温度变化而引起的体积变化。研究对象为氧化锌窑炉的燃烧及烟气流通空间,以内坩锅外

表面、外坩锅外表面、支撑立柱外表面、燃气烟道内表面为边界,改造前为大气式燃烧器(部分预混),通过天然气的引射卷吸空气,另在燃气烟道下部还有二次空气入口;改造后为完全预混燃烧器,空气和天然气在进入燃气烟道之前已完全预混,整个窑炉有4个烟气出口(在图1中未标出),位于支撑立柱及两个外坩锅之间的位置,4个出口呈对称分布。由于物理模型结构复杂,采用非结构化网格,改造前模型的网格总数为264955。燃烧器的烧嘴部分是该窑炉的关键部分,网格稀疏会造成局部的剧烈湍流和燃烧等现象,因此,需要对该部分的网格进行局部加密^[11-12]。



(a) 改造前
(a) Before reconstruction



(b) 改造后
(b) After reconstruction

图2 氧化锌法式圆炉的物理模型

Fig. 2 Physical model of French process zinc oxide furnace

1.2 数值模拟方法

数值模拟采用三维稳态模型计算,采用 Simple 算法进行压力速度耦合求解,启用能量平衡计算方程,采用 $k-\varepsilon$ 双方程模型进行湍流计算,对 k, ε 采用欠松弛因子方法进行处理,采用 DO 辐射模型计算辐射传热,以便获得热工模型的温度场、压力场、速度场等,为实例提供计算支持。通过现场测

试并进行适当简化来确定模拟的边界条件(详见表1)。燃烧室壁温度设置为 1200°C ,支撑柱侧面设置为绝热边界,通过热力计算来确定内外坩锅表面的热流密度。内坩锅中还存在一定的液面高度,分为气液两层,存在气-液两相,液面上下的热流密度需分别计算来确定。天然气成分按照纯甲烷计算。

表1 数值模拟的边界条件

Table 1 Boundary conditions of numerical simulation

项目	改造前	改造后 (无扩口)	改造后 (有扩口)
天然气量/($\text{Nm}^3 \cdot \text{h}^{-1}$)	75	60	60
天然气压力/Pa	500	1196	1196
天然气和空气混合方式	部分预混	完全预混	完全预混
过剩空气系数	一次风空气:1.7 二次风空气:0.6	1.2	1.2
空气温度/ $^{\circ}\text{C}$	一次空气 27 二次空气 77	180	180
蒸发锅上侧热流/($\text{kW} \cdot \text{m}^{-2}$)	1	1	1
蒸发锅下侧热流/($\text{kW} \cdot \text{m}^{-2}$)	20	20	20
熔锌锅/($\text{kW} \cdot \text{m}^{-2}$)	3	3	3

2 模拟结果

2.1 模拟结果的分析与讨论

图3为3种工况下的温度分布图。从图3(a)可以看出,当采用大气式燃烧器时,由于一次及二次空气均为常温且过量空气系数较高,使得燃烧井出口附近的温度较低,与改造后的完全预混燃烧器的燃烧状况相比,天然气燃烧产生的烟气体积较大,造成烟气流速高(最高可达 65m/s ,详见图4),大量的高温烟气($1227-1327^{\circ}\text{C}$)聚集在燃烧空间的上部,对顶部及侧面的耐火砖冲击较大,造成这两部分耐火砖的使用寿命偏短。从图3(b)可以看出,当采用完全预混燃烧器时,加强了燃气空气的混合强度,同时燃烧器采用空燃比例调节装置,能很好地控制天然气和助燃空气的比例及混合程度(过量空气系数为1.2),天然气燃烧后产生的烟气体积较小,烟气流速降低(最高流速约 10m/s),因此,烟气对顶部的耐火砖冲击较小,且顶部的烟气温度偏低($1027-1127^{\circ}\text{C}$),有利于延长窑炉顶部耐火砖的寿命。从图3(c)可以看出,当将燃气烟道改为扩口结构之后,烟气对顶部耐火砖的冲击进一步减小,顶部烟气温度进一步降低($927-1127^{\circ}\text{C}$),更加有利于延长窑炉顶部耐火砖的寿命。

天然气在燃烧室内的燃烧状况可根据燃烧室内的 O_2 浓

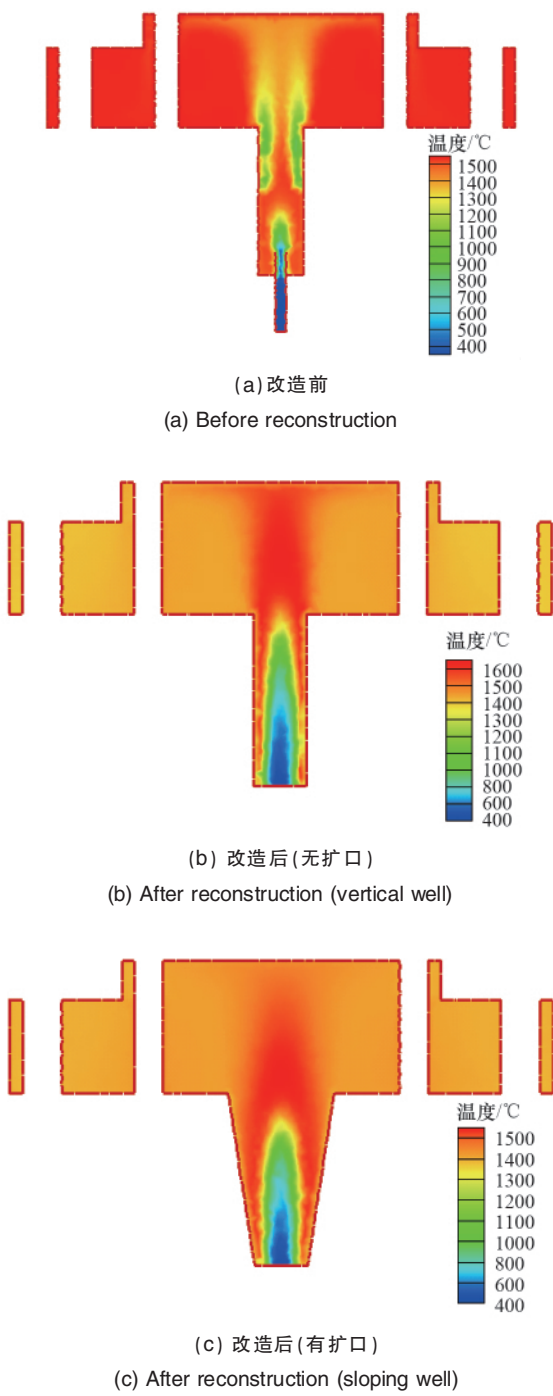


图 3 3 种工况下的温度分布
Fig. 3 Simulation results of temperature distribution based on three kinds of conditions

度和 CO 浓度来判断。从图 5 和图 6 可以看出,当采用大气式燃烧器时,一次及二次空气均为常温且过量空气系数很高,燃气与空气混合较好,燃气在燃烧室下部空间就已经被完全消耗,因此,CO 浓度在燃烧室上部空间已经很低;由于过量空气系数很高,在靠近燃烧井出口处, O₂ 体积浓度均偏高,约为 11%。在改为完全预混燃烧器后,燃气和空气进行比例调节且空气被预热至 180℃,燃气和空气混合充分,火焰长度变

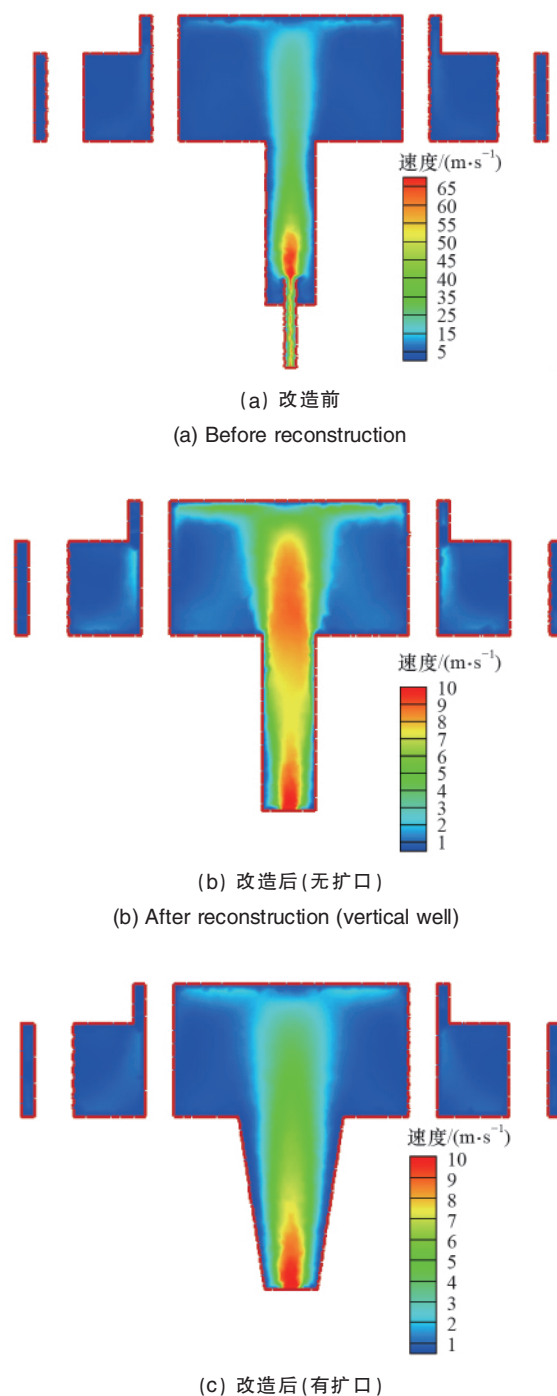


图 4 3 种工况下的速度场分布
Fig. 4 Simulation results of velocity distribution based on three kinds of conditions

短,在燃烧室下部空间就已燃烧充分;在靠近烟气出口处,由于过量空气系数偏低, O₂ 体积浓度偏低,约为 3.5%。

2.2 模拟结果的验证

为了验证模拟结果的正确性,采用 NiCr/NiSi 热电偶对燃烧烟道里面的温度进行测试,热电偶的位置在排烟出口及两个外塔锅之间的中心位置。测试及模拟结果见表 2,实测值与

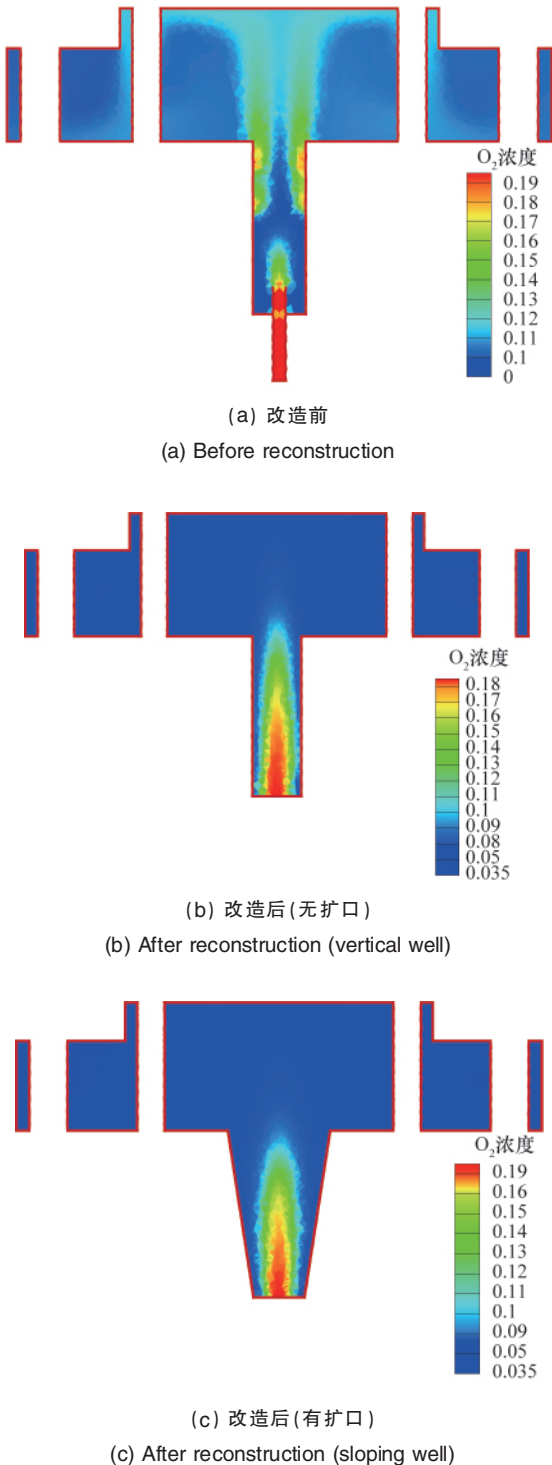


图5 3种工况下的 O₂ 浓度分布图

Fig.5 Simulation results of O₂ concentration distribution based on three kinds of conditions

模拟结果能较好吻合。

3 结论

本文通过对氧化锌法式圆炉燃烧工艺的数值模拟分析,并与原工艺进行对比,制定了节能技术改造方案。燃烧系统

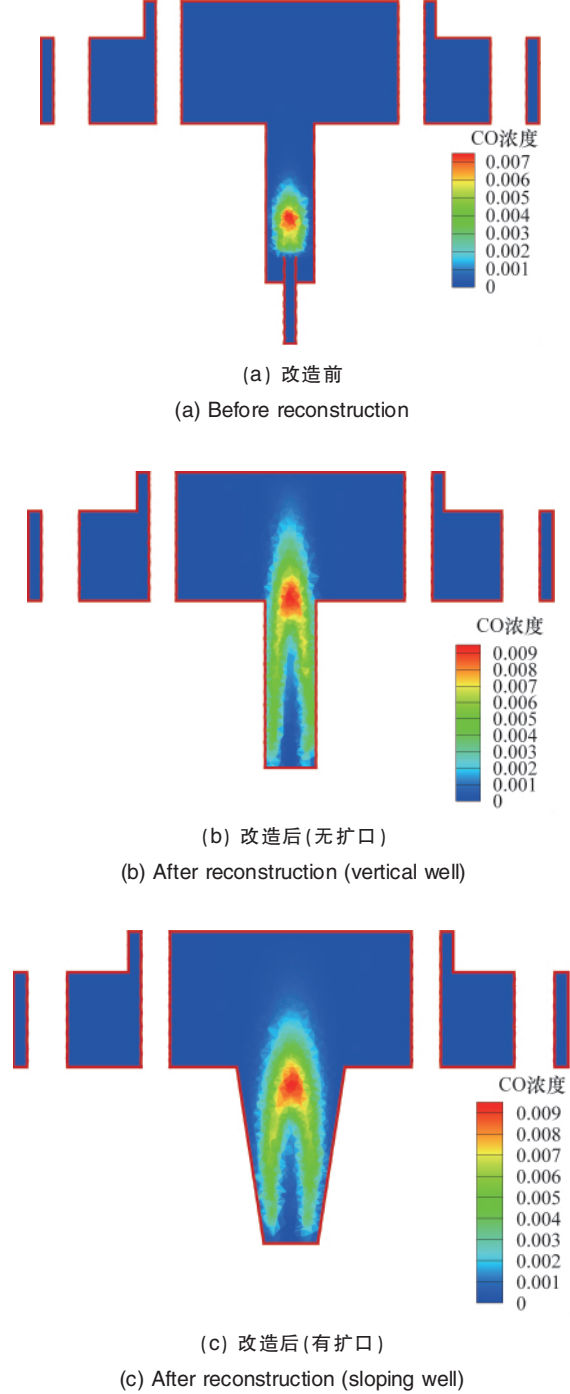


图6 3种工况下的 CO 浓度分布图

Fig.6 Simulation results of CO concentration distribution based on three kinds of conditions

由原大气式燃烧和二次风预热改为完全预混燃烧,利用烟气余热对助燃空气进行预热,同时将燃烧井的竖直结构改为扩口结构。对窑炉温度场、流场及气体浓度场等的数值分析结果与改造前后的实际测定结果吻合较好。改造后,单位产品的天然气消耗由 240Nm³ 降至 192Nm³,日节约天然气量 360Nm³,内外坩锅寿命由 3 个月提高至 6 个月,单个生产周期内氧化锌平均产量由 7.5t/d 提升至 8.0t/d,单台窑炉的年经

表 2 模拟结果与测试结果比较 (单位: °C)

Table 2 Comparison between the simulation result and test result (unit: °C)

工况	模拟结果	测试结果
改造前	1254	1224
改造后(无扩口)	1164	1128
改造后(有扩口)	1156	1129

济效益可达 50 万元人民币。本研究为传统法式圆炉氧化锌生产工艺提供了一条很好的节能减排工艺路线。

参考文献 (References)

- [1] 郭天立, 未立清, 王明辉. 氧化锌产品的现状评述 [J]. 中国有色冶金, 2008(2): 38-41.
Guo Tianli, Wei Liqing, Wang Minghui. *China Nonferrous Metallurgy*, 2008(2): 38-41.
- [2] 王子谦, 王首文. 反射炉法生产高级氧化锌 [J]. 有色金属: 冶炼部分, 1998(6): 18-22.
Wang Ziqian, Wang Shouwen. *Nonferrous Metals: Extractive Metallurgy*, 1998(6): 18-22.
- [3] 叶林. 间接法氧化锌中金属物测定基体干扰的排除 [J]. 铜业工程, 2004(3): 63-64.
Ye Lin. *Copper Engineering*, 2004(3): 63-64.
- [4] 王子谦. 锌锭反射炉法生产氧化锌[J]. 无机硅酸盐工业, 1992(6): 28-30.
Wang Ziqian. *Inorganic Silicate Industry*, 1992(6): 28-30.
- [5] Shang Q, Zhang J. Simulation of gas-particle turbulent combustion in a pulverized coal-fired swirl combustor[J]. *Fuel*, 2009, 88(1): 31-39.
- [6] Stowe R A, Dubois C, Harris P G. Performance prediction of ducted rocket combustor using a simulated solid fuel [J]. *Journal of Propulsion and Power*, 2004, 20(5): 936-944.
- [7] Abbassi A, Khoshmanesh K. Numerical simulation and experimental analysis of an industrial glass melting furnace [J]. *Applied Thermal Engineering*, 2008, 28: 450-459.
- [8] Cadavid F, Herrera B, Amell A. Numerical simulation of the flow streams behavior in a self-regenerative crucible furnace [J]. *Applied Thermal Engineering*, 2010, 30: 826-832.
- [9] 朱彤, 苏正川, 饶文涛. 高温空气燃烧技术改造均热炉方案研究[J]. 同济大学学报: 自然科学版, 2004, 32(8): 1033-1037.
Zhu Tong, Su Zhengchuan, Rao Wentao. *Journal of Tongji University: Natural Science Edition*, 2004, 32(8): 1033-1037.
- [10] 林鹏云, 罗永浩, 胡璠元. 燃煤电站锅炉空气分段低 NO_x 燃烧影响因素的数值模拟[J]. 锅炉技术, 2007, 38(5): 42-47.
Lin Pengyun, Luo Yonghao, Hu Liyuan. *Boiler Technology*, 2007, 38(5): 42-47.
- [11] 王福军. 计算流体力学分析, CFD 软件原理与应用[M]. 北京: 清华大学出版社, 2004.
Wang Fujun. *Computational fluid dynamics analysis, the principle and application of CFD software* [M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2004.
- [12] Bunker D L, Garrett B, Kleindienst T, et al. Discrete simulation methods in combustion kinetics[J]. *Combustion and Flame*, 1974, 23: 373-379.

(责任编辑 马宇红, 代丽)

· 学术动态 ·

“第十二届全国敏感元件与传感器学术会议”征文

“第十二届全国敏感元件与传感器学术会议”计划于 2012 年 10 月 1 日在江苏省苏州市。会议由全国敏感元件与传感器学术团体联合组织委员会主办。

征文范围: 敏感材料(含纳米材料); 敏感元件与传感器的工艺技术; 光敏元件与光传感器; 力敏元件与力传感器; 温敏元件与温度传感器; 声敏元件与声传感器; 磁敏元件与磁传感器; 湿敏元件与湿度传感器; 气敏元件与气体传感器; 离子敏传感器; 生物传感器; 其他类传感器; 敏感元件与传感器测试技术(含接口与处理电路)与工艺装备; 传感器应用; 物联网技术。

摘要截止日期: 2012 年 4 月 30 日。

全文截止日期: 2012 年 7 月 30 日。

联系电话: 0512-57218152。

电子信箱: stc2012@126.com。

会议网站: <http://meeting.chinatrducers.com/Web/CommonPage.aspx?Id=13>。