

文章编号: 0253-9993(2013)10-1800-06

预热催化氧化反应器导流系统的数值模拟与优化

刘永启 杜德娟 毛明明 陈 帅 郑 斌 孟 建

(山东理工大学 交通与车辆工程学院 山东 淄博 255049)

摘 要: 针对反应室入口截面的气体速度分布均匀性对预热催化氧化反应器的氧化效率和运行稳定性的影响,利用 CFD 软件对预热催化氧化反应器反应室入口的导流分配系统进行模拟计算,确定了扩张段的最佳导流分配方案。结果表明:未加导流板时的原模型在反应室入口处,速度呈现出周围低、中间高的趋势,速度梯度比较大,反应室氧化床入口截面的速度分布不均匀性系数为 0.8 左右;布置了水平导流板之后,反应室纵向速度分布略微改善,反应室入口处截面的速度分布不均匀性系数降低到 0.5 左右;增加垂直导流板改装成网格状导流板后,反应室入口处整个截面的速度分布均匀性明显提高,不均匀性系数降低到 0.2 左右。

关键词: 预热催化氧化反应器;不均匀性系数;导流板

中图分类号: TD712.63 **文献标志码:** A

Numerical simulation and optimization of diversion system in a preheating catalytic monolithic reactor

LIU Yong-qi, DU De-juan, MAO Ming-ming, CHEN Shuai, ZHENG Bin, MENG Jian

(School of Transportation and Vehicle Engineering, Shandong University of Technology, Zibo 255049, China)

Abstract: The velocity uniformity of the gas at the reaction chamber inlet has an important influence on the oxidation efficiency and running stability of the preheating catalytic monolithic reactor (PCMR). The flow field of the reaction chamber inlet of the PCMR was numerically simulated to determine the optimized design of deflectors and improve the flow uniformity by using the CFD software in this paper. The results show that in the original model without deflectors the velocity in the center is much higher than surrounding, and the non-uniformity coefficient of the velocity distribution at the inlet cross section of the oxidation bed is 0.8. By arranging the horizontal deflectors, the velocity vertical distribution in the reactor is improved to some extent, and the non-uniformity coefficient of the velocity distribution is reduced to 0.5. After the combination of the vertical deflectors and horizontal ones, the uniformity of the velocity distribution is improved obviously and the non-uniformity coefficient is reduced to 0.2.

Key words: preheating catalytic monolithic reactor; non-uniformity coefficient; deflectors

煤矿每年排出的乏风瓦斯既造成了能源浪费又加剧了温室效应的影响^[1-9],目前有效处理乏风瓦斯的技术有热逆流氧化、催化逆流氧化和预热催化氧化^[10-14]。热逆流氧化技术的工作原理为:不断变换进入氧化床的气体流动方向,使气体在氧化床中吸热升温,直至甲烷氧化;氧化的热气体在向前流动过程中,把热量传递给氧化床,以保证氧化过程的自维持。

催化逆流氧化技术的工作原理与热逆流氧化技术大体相同,主要区别是使用了氧化催化剂,以降低瓦斯氧化所需要的温度。预热催化氧化技术利用反应后的废气预热新鲜进气,废气余热回收效率高,减少了能耗,提高了热利用率和催化氧化床进气温度,而且具有结构紧凑、占地面积小、机械强度高优点。

氧化床内气流分布的均匀性是影响预热催化氧

收稿日期:2012-11-29 责任编辑:张晓宁

基金项目:国家高技术研究发展计划(863)重点资助项目(2009AA063202);山东省自然科学基金资助项目(ZR2011EL017);山东省科技发展计划资助项目(2012GGX10417)

作者简介:刘永启(1965—)男,山东枣庄人,教授,博士。Tel:0533-2782616, E-mail:liuyq65@163.com

化装置稳定运行的关键因素,速度分布不均可以造成局部低温、燃烧熄火;或者局部高温形成温度梯度,产生热应力,氧化床变形毁坏;温度过高还将破坏催化剂的稳定性,导致催化剂活性降低甚至消失^[15]。为了避免进气不均的不利影响,需要对装置氧化床入口的进气进行导流分配数值模拟研究,并寻找导流分配系统的最佳结构设计方案。

预热催化氧化装置的结构如图 1 所示,其工作原理为:常温的新鲜乏风流经预热器、扩张段,由电加热器加热后进入反应室,在催化氧化床内被氧化,氧化反应放出的热量一部分进入陶瓷氧化床蓄热,一部分由废气携带在预热器内将热量传递给新鲜乏风,降温后的废气最终排入到大气中。气体流经弯头处的离心力使气流主要集中在管道下半部分,最终导致进入氧化床的气流速度分布很不均匀,氧化床顶部出现较大低速区。可以通过在扩张段安装导流板来调节气体流通面积和速度分布,改善催化氧化床入口截面的速度分布均匀性。

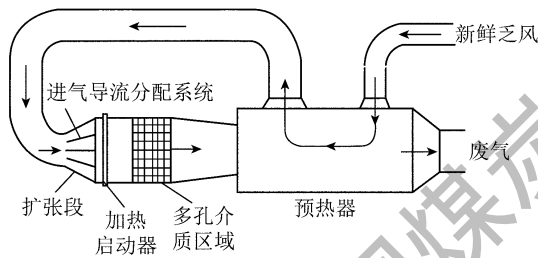


图 1 预热催化氧化反应器简图

Fig. 1 Diagram of preheating catalytic oxidation reactor

关于气流分布均匀性的研究,毛建丰通过在烟道内布置导流板提高了烟道流场及换热器流场的均匀性^[16];唐帅等研究了在集气箱中安装导流板改善氧化床气流分布的均匀性^[17-18];贾兴豪等在弯管内布置导流板改善了管内流体的流动特性^[19]。前人的研究与本文中的具体结构有很大区别,因此需要开展数值模拟研究并寻找最佳导流系统设计方案。

1 模型的建立及实验对比

1.1 数值计算模型

利用 Gambit 建立不加导流板的反应室物理模型如图 2(a) 所示。简化后的模型由反应室入口管道、扩张段和反应室构成,反应室的后半段为多孔介质区域,其第 1 排为均温均流床层,第 2 排至反应室出口全部为催化氧化床层,是乏风进行氧化反应的主要场所。流出预热器的乏风进入反应室入口管道,经过扩张段的导流作用进入反应室,通过多孔介质区域流出反应室。

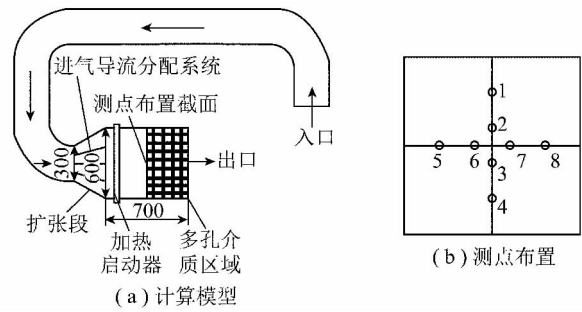


图 2 模型及实验测点布置

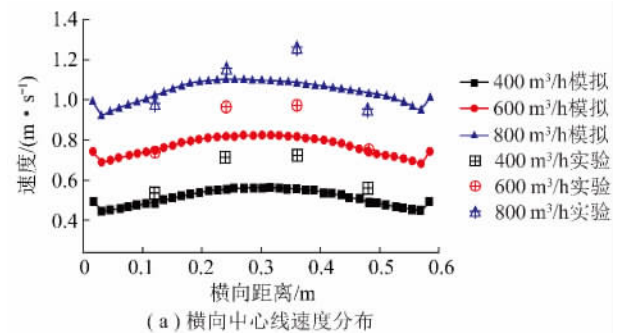
Fig. 2 Model and experimental arrangement

模型的结构尺寸:管道横截面及扩张段缩口为边长 300 mm 的四边形,扩张段扩口横截面为边长 600 mm 的四边形,反应室为 700 mm × 600 mm × 600 mm 的长方体。

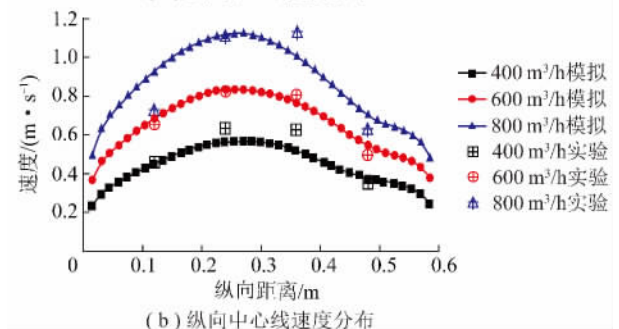
边界条件的设置:入口设置为速度入口,出口设为 outflow 出流边界,壁面设置为绝热,其中多孔介质的黏性阻力系数在速度方向上设置为 7.6×10^6 ,惯性阻力系数设置为 86.65,其他方向的阻力系数各扩大 1 000 倍,孔隙率设置为 0.63,未加导流板模型的网格数为 155 200,网格状导流板模型的网格数为 185 784。

1.2 计算模型的实验验证

在氧化床(即多孔介质区域)入口截面纵向中轴线和横向中轴线上各均匀布置 4 个速度测点(图 2(b))。速度测量仪器为电子微风仪,速度测量误差为 2%。测得入口流量为 400, 600, 800 m³/h 所对应的速度分布与模拟结果进行比对,如图 3 所示,图



(a) 横向中心线速度分布



(b) 纵向中心线速度分布

图 3 模拟与实验结果的对比

Fig. 3 Comparison of simulation and experimental results

3(a) 横坐标为氧化床中心的横向距离,图 3(b) 横坐标是从截面底部到顶部的纵向距离。虽然模拟数据与实验数据有一定的偏差,但模拟结果的速度分布规律与实验结果一致,都表现为中间速度高、周围速度偏低的一种态势,且氧化床顶部及底部较大部分处于低速度区,速度分布极不均匀,这一点从氧化床入口截面的速度分布云图(图 4)也可以看出。不均匀性系数 α 的计算公式为

$$\alpha = (V_{\max} - V_{\text{ave}}) / V_{\text{ave}} \quad (1)$$

其中, V_{\max} 为截面最大速度; V_{ave} 为截面平均速。计算得出氧化床入口截面的不均匀性系数为 0.8 左右。为了提高气流分布的均匀性,考虑在扩张段加装导流

板以改变气流的分布,从而改善氧化床入口截面气流速度分布的均匀性。

2 模拟结果分析

2.1 水平导流板结构参数

水平板方案对比均以 $400 \text{ m}^3/\text{h}$ 为例,由图 4 可以看出,纵向的速度分布不均匀性较之横向要严重,故先在扩张段安装水平导流板,改善纵向的气流分布均匀性。图 5 为分别安装水平导流板且均匀布置后的速度分布云图,对比可以看出,安装 3 块水平导流板对气体的导流分配效果已经比较明显,考虑到节约成本及安装方便,在扩张段布置 3 块水平导流板。

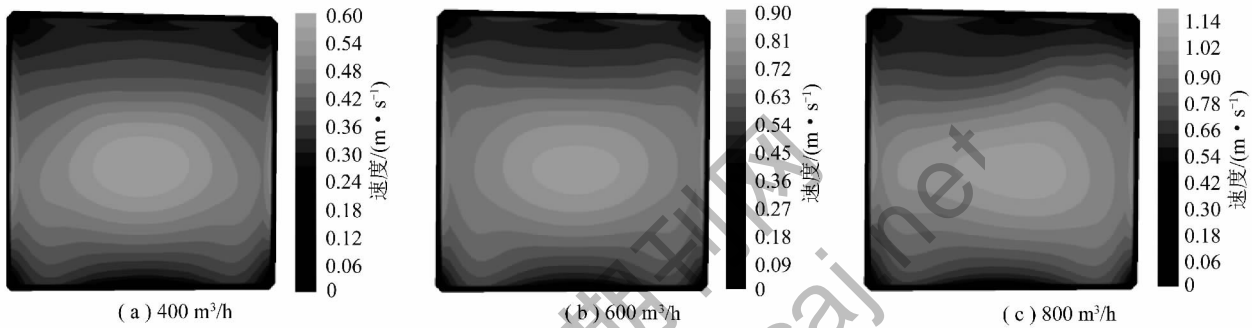


图 4 氧化床入口截面的速度分布

Fig. 4 Velocity distribution at the inlet cross section of the oxidation bed

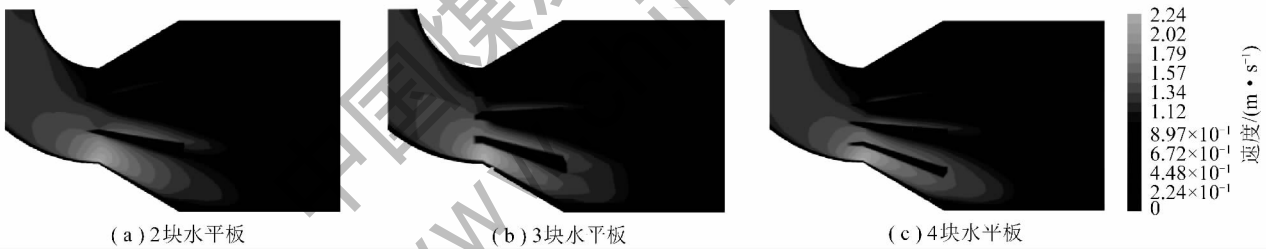


图 5 不同水平板数的纵向速度分布

Fig. 5 Vertical velocity distribution with different amount of horizontal deflectors

假设扩张段入口横截面的流量分布保持不变,此时出口速度大小与对应截面面积成反比,即,速度 = 体积流量 / 面积。因此先设定扩张段一端导流板的间距为定值,通过改变另一端的间距调节出口的速度分布,目标是使被 3 块横向导流板分成的 4 个出口截面的平均速度逐渐接近于 1 : 1 : 1 : 1。6 种方案的结构参数见表 1。

A-1 ~ A-3 方案固定扩张段入口为均匀布置,改变出口端导流板间距,A-3 方案的扩张段出口端 4 个出口截面的平均速度接近于 1 : 1 : 1 : 1,但是氧化床入口截面靠上的位置出现较大一片低速区,造成整个入口截面的速度分布不均匀(图 6(b)),这主要是由扩张段入口处的的气体流量主要集中在截面的下半部分,上部气体流量少造成的。采用固定扩张段出

表 1 水平板方案

Table 1 Schemes with different kinds of horizontal deflectors

水平板方案代号	入口	出口
A-1	均分	均分
A-2	均分	80+137+168+215
A-3	均分	68+115+164+253
B-1	123+75+57+45	均分
B-2	125+76+55+44	均分
C-1	110+80+60+50	120+150+130+200

注:数据表示导流板分成的几个出口的纵向尺寸,mm。

口板间距,改变扩张段入口板间距的 B 方案来改善气流分布的均匀性。模拟结果显示,B 方案较 A-3 效果要好,减小了氧化床入口处的低速区

(图 6(c)) ,但并没有将其完全消除,在 B-2 方案的基础上进行略微调整,最终确定了入口和出口板间距都不是均匀布置的 C-1 方案,氧化床入口处的速度分布均匀性显著提高,低速区明显变小(图 6(d)) ,

此时不均匀性系数为 0.5 左右。4 种水平板方案的不均匀系数为: 不加板 0.84; A-3 0.56; B-2 0.53; C-1 0.49。可以看出,水平导流板的布置明显提高了速度分布的均匀性。

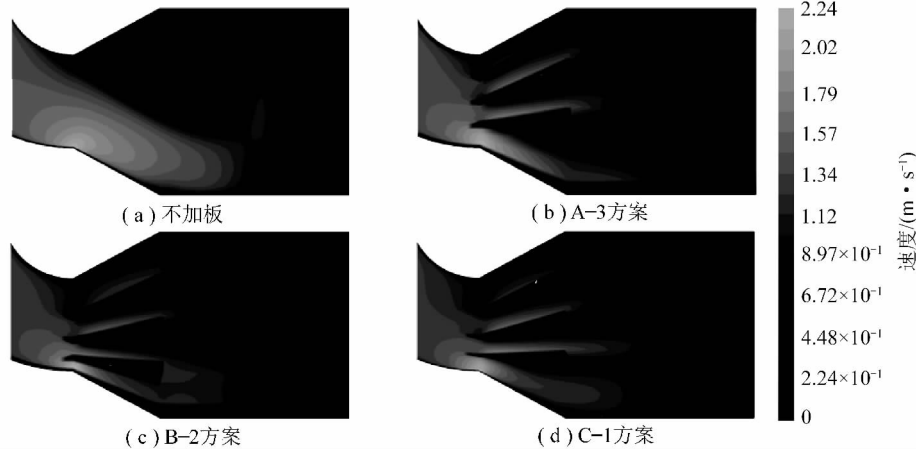


图 6 不同方案的纵向速度分布

Fig. 6 Vertical velocity distribution of different kinds of scheme

2.2 网格状导流板结构参数

安装水平导流板改善了气流在纵向截面的速度分布均匀性,对横向速度分布均匀性的影响并不大,为了提高气流在整个流通截面上的速度分布均匀性,需要加装垂直导流板。

在横向导流板方案 C-1 的基础上加装垂直导流板成网格状导流板,如图 7 所示,由于模型及气流分布的左右对称性,垂直导流板均匀布置对速度分布均匀性的改善效果比较好。以 $400 \text{ m}^3/\text{h}$ 为例,在均匀布置了 3 块竖向导流板之后,氧化床入口截面的速度不均匀性系数降低到 0.2 左右,如图 8 所示。

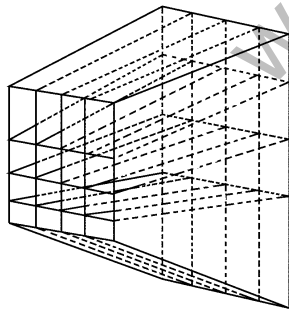


图 7 网格状导流板

Fig. 7 Gridded deflectors

2.3 最优方案与不加导流的原型对比

由于进气温度的变化会引起气体速度、密度和黏性的改变,故计算了两种不同进气温度下的速度分布。图 9 和图 10 是进气温度分别为 313 K 和 673 K 时加装导流板前后的速度分布,在两种进气工况下,速度分布趋势大致相同。

从图 9(a) (b) 和 10(a) (b) 均可以看出,未加

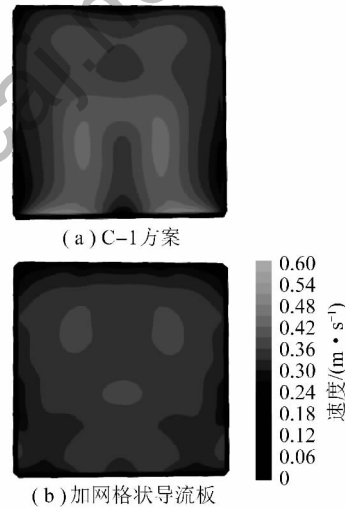


图 8 垂直导流板安装前后的速度分布对比

Fig. 8 Velocity distribution comparison with horizontal deflectors and gridded deflectors

导流板前氧化床入口截面中轴线上速度呈抛物线分布规律,中间部位有较大的速度峰值且向两边逐渐减小。

由图 9(c) 和图 10(c) 可知,中心位置有较高的气流速度,向周围逐渐减小,呈阶梯状分布趋势,贴近反应室壁面处有较大部分是气流难以到达的低速区,气流分布的不均匀性系数在 0.8 左右。在反应室入口前扩张段布置了网格状导流板之后,氧化床入口截面速度峰值及平均速度都降低,中轴线上没有出现较大变化的速度峰值。

从图 9(d) 和图 10(d) 可以看出,阶梯状的速度分布趋势得到改善,没有了中心位置的高速区,整个

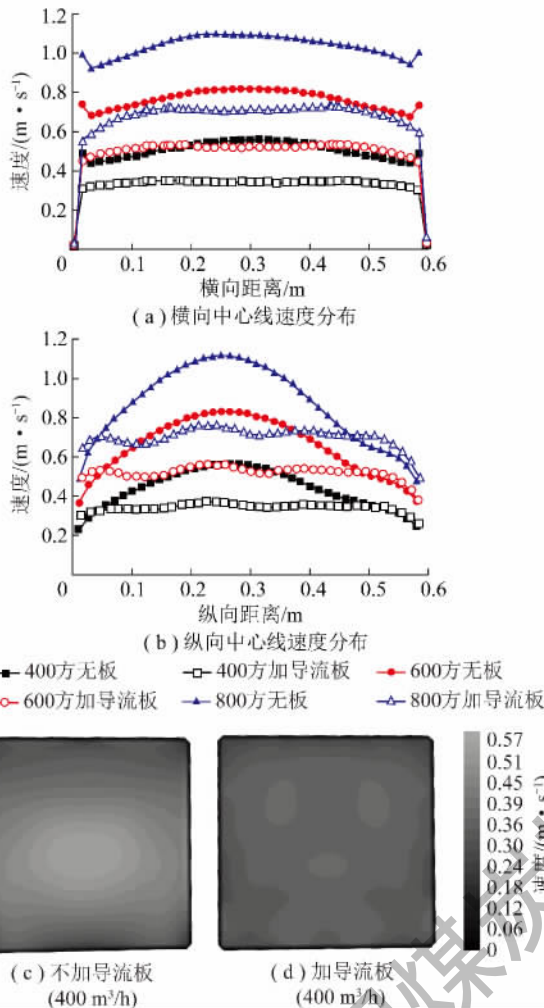


图9 最终方案与原型的速度分布对比(进气温度 313 K)

Fig. 9 Velocity distribution contrast of final project and original model (inlet air temperature of 313 K)

截面的速度分布均匀性明显提高,不均匀性系数降低到 0.2 左右。

3 结 论

(1) 未加导流板的反应室氧化床入口截面的速度分布呈现中心高、周围低的梯度分布趋势,速度分布很不均匀,中心有较大速度峰值,贴近反应室壁面处有较大一片低速区,氧化床入口截面的速度分布不均匀性系数在 0.8 左右。

(2) 在入口流量分布一定的前提下,通过改变水平导流板间距来改变气体流通面积,进而调节速度大小。水平导流板的安装改善了截面的纵向速度分布,减小了靠近反应室顶部的低速区,氧化床入口截面的速度分布不均匀性系数降低到 0.5 左右。

(3) 在水平导流板的基础上安装垂直导流板形成网格状导流板,改变了氧化床入口截面速度呈阶梯状分布的趋势,避免了较大速度峰值的出现,整个入

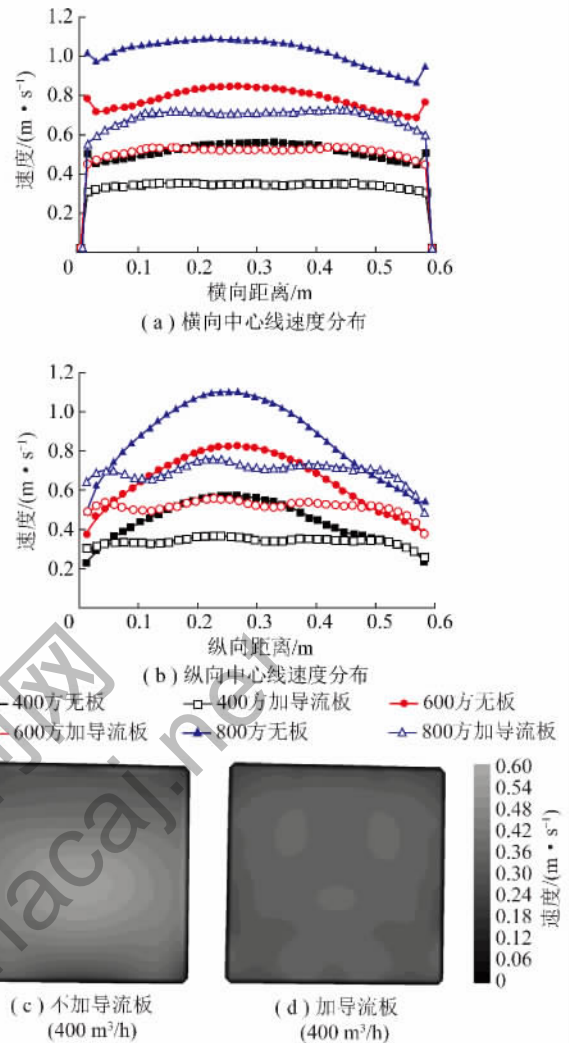


图10 最终方案与原型的速度分布对比(进气温度 673 K)

Fig. 10 Velocity distribution comparison of final project and original model (inlet air temperature of 673 K)

口截面的速度分布均匀性明显提高,不均匀性系数降低到 0.2 左右。

参考文献:

- [1] 杨仲卿,张 力,唐 强.超低浓度煤层气能源化利用技术研究进展[J].天然气工业,2010,30(2):115-118.
Yang Zhongqing, Zhang Li, Tang Qiang. Research progress in the utilization of ventilation air methane as an energy source [J]. Gas Industry, 2010, 30(2): 115-118.
- [2] Su S, Agnew J. Catalytic combustion of coal mine ventilation air methane [J]. Fuel, 2006, 85: 1201-1210.
- [3] IPCC. Climate change 2001: the scientific bases, intergovernmental panel on climate change [M]. New York: Cambridge University Press, 2001.
- [4] 李文俊. 矿井通风瓦斯催化燃烧的数值模拟[D]. 重庆: 重庆大学, 2010.
Li Wenjun. Numerical simulation on catalytic combustion of coal mine ventilation methane [D]. Chongqing: Chongqing University, 2010.

- [5] 蒲 舸,李文俊,闫云飞. 超低浓度甲烷气体催化燃烧数值模拟[J]. 重庆大学学报 2010, 33(4): 60-64.
Pu Ge, Li Wenjun, Yan Yunfei. Numerical simulation of catalytic combustion of extremely low concentration CH_4 [J]. Journal of Chongqing University 2010, 33(4): 60-64.
- [6] 毛明明,刘永启,高振强,等. 热逆流反应器的流动均匀性实验研究[J]. 煤炭学报 2011, 36(8): 1349-1353.
Mao Mingming, Liu Yongqi, Gao Zhenqiang, et al. Experimental investigation of flow uniformity in a thermal reverse-flow reactor [J]. Journal of China Coal Society 2011, 36(8): 1349-1353.
- [7] 孙继平. 基于物联网的煤矿瓦斯爆炸事故防范措施及典型事故分析[J]. 煤炭学报 2011, 36(7): 1172-1176.
Sun Jiping. The accident prevention measure and analysis based on internet of things in the gas explosion of coal mines [J]. Journal of China Coal Society 2011, 36(7): 1172-1176.
- [8] 陈先锋,陈 明,张庆明,等. 瓦斯爆炸火焰精细结构及动力学特性的实验[J]. 煤炭学报 2010, 35(2): 246-249.
Chen Xianfeng, Chen Ming, Zhang Qingming, et al. Experimental investigation of gas explosion microstructure and dynamic characteristics in a semi-vented pipe [J]. Journal of China Coal Society 2010, 35(2): 246-249.
- [9] 邓 明,张国枢,陈清华,等. 基于瓦斯涌出时间序列的煤与瓦斯突出预报[J]. 煤炭学报 2010, 35(2): 260-263.
Deng Ming, Zhang Guoshu, Chen Qinghua, et al. Forecast of coal and gas outburst based on time series of gas concentration [J]. Journal of China Coal Society 2010, 35(2): 260-263.
- [10] 刘永启,刘瑞祥,高振强. 矿井乏风氧化装置[P]. 中国专利: CN201292859 2009-08-19.
Liu Yongqi, Liu Ruixiang, Gao Zhenqiang. Mine VAM gas oxidation device [P]. China Patent: CN201292859 2009-08-19.
- [11] 刘永启,刘瑞祥,高振强. 矿井乏风瓦斯热氧化装置[P]. 中国专利: CN101464062 2009-06-24.
Liu Yongqi, Liu Ruixiang, Gao Zhenqiang. Mine VAM gas thermal oxidation device [P]. China Patent: CN101464062 2009-06-24.
- [12] Karakurt I, Aydin G, Aydiner K. Mine ventilation air methane as a sustainable energy source [J]. Renewable and Sustainable Energy Reviews 2011, 2(15): 1042-1049.
- [13] Warmuzinski K. Harnessing methane emissions from coal mining [J]. Process Safety and Environmental Protection 2008, 86(5): 315-320.
- [14] Gosiewski K, Matros S Y, Warmuzinski K, et al. Homogeneous vs catalytic combustion of lean methane-air mixtures in reverse-flow reactors [J]. Chemical Engineering Science 2008, 63(20): 5010-5019.
- [15] 张 强,杨祖照,李文彦,等. 甲烷催化燃烧研究进展[J]. 热力发电 2007(8): 1-8.
Zhang Qiang, Yang Zuzhao, Li Weiyan, et al. Advancement in study on catalytic combustion of methane [J]. Thermal Power Generation 2007(8): 1-8.
- [16] 毛建丰. 入口速度分布对热管换热器性能影响的数值模拟与优化[D]. 长沙: 中南大学 2011.
Mao Jianfeng. Numerical simulation and optimization of heat pipe exchanger under various velocity distribution inflow [D]. Changsha: Central South University 2011.
- [17] 唐 帅,刘永启,毛明明,等. 乏风氧化装置进气导流的流动均匀性研究[J]. 煤炭工程 2012(1): 107-110.
Tang Shuai, Liu Yongqi, Mao Mingming, et al. Study on flow uniformity of air intake deflection in ventilation air oxidized device [J]. Coal Engineering 2012(1): 107-110.
- [18] 唐 帅. 氧化装置进出口乏风分配系统数值模拟与优化设计[D]. 淄博: 山东理工大学 2011.
Tang Shuai. Simulation and optimum design of flow distribution at inlet and outlet diversion system for thermal flow-reversal reactor [D]. Zibo: Shandong University of Science and Technology 2011.
- [19] 贾兴豪,彭向和,龙血松. 导流板改善弯管流场的数值模拟与优化[J]. 西南大学学报(自然科学版) 2011(3): 139-143.
Jia Xinghao, Peng Xianghe, Long Xuesong. Numerical simulation and optimization of flow field in elbow pipes with baffle [J]. Journal of Southwest University (Natural Science Edition) 2011(3): 139-143.