

煤矿瓦斯旋流混合器定工况下混合均匀性研究

毛明明, 刘永启, 高振强, 刘瑞祥

(山东理工大学 交通与车辆工程学院, 山东, 淄博 255049)

摘 要: 利用简化的数学模型对给定工况下煤矿瓦斯旋流混合器的混合均匀性进行了研究, 主要研究旋流方式和旋流强度对乏风瓦斯出口速度和体积分数分布均匀性的影响。研究表明: 在外管气体的流量和转动惯量明显大于内管的工况下, 外管的旋流对出口的速度场起到主导作用, 使出口乏风瓦斯的速度分布均匀性降低; 内管的旋流建立了径向和轴向的反压力梯度, 产生了中心回流区, 增强了内、外管流体动量和质量的交换, 使出口的体积分数分布均匀性明显提高; 随着旋流强度的提高, 外管具有旋流的旋流方式的出口速度分布均匀性变差, 而内管具有旋流的旋流方式的回流区掺混强度增大, 有利于乏风瓦斯体积分数混合均匀性的提高。

关键词: 旋流混合器; 旋流强度; 均匀性; 煤矿; 瓦斯

中图分类号: TD 724

文献标志码: A

文章编号: 1001-0645(2013)04-0343-06

Research on the Mixing Uniformity of Coal Mine Methane Swirl Mixer Under Given Inlet Condition

MAO Ming-ming, LIU Yong-qi, GAO Zhen-qiang, LIU Rui-xiang

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

Abstract: The mixing uniformity of coal mine methane swirl mixer was numerically investigated under given inlet condition focusing upon the effects of swirl way and swirl intensity on the outlet uniformity of velocity and concentration distributions. The results show that, on condition that the flow mass and moment of inertia of outer tube gas are greater than that of inner tube, the swirl flow of outer tube gas dominates the velocity field at outlet and decrease the outlet velocity distribution uniformity. The swirl flow of inner tube gas sets up the reverse pressure gradient in radial and axial direction that leads to the creation of return flow region, which enhances the momentum and mass exchange of inner and outer tube gases and significantly improve outlet concentration distribution uniformity. With the increase of swirl intensity, the outlet velocity distribution uniformity decreases for swirl ways with outer tube gas swirling, while the mixing intensity strengthens in return flow region which contributes to the improvement of concentration uniformity for swirl ways with inner tube gas swirling.

Key words: swirl mixer; swirl intensity; uniformity; coal mine; methane

我国作为产煤大国, 煤矿瓦斯排放量居世界首位, 然而我国每年利用的抽采瓦斯仅占 $1/4 \sim 1/3$, 其余抽采瓦斯和乏风瓦斯都处于排空状态^[1-2]。特

别是体积分数低于 1% 的超低体积分数乏风瓦斯由于热值低并且流量和体积分数波动大, 难以进行民用或发电利用, 只有排空^[3]。大量低体积分数瓦斯

收稿日期: 2011-11-19

基金项目: 国家“八六三”计划项目(2009AA063202); 山东省自然科学基金资助项目(ZR2009FQ023)

作者简介: 毛明明(1981—), 女, 博士, 讲师, E-mail: shandongmao@163.com.

通信作者: 刘永启(1965—), 男, 博士, 教授, E-mail: liuyq65@163.com.

的排放不仅浪费了宝贵的清洁能源,同时也加重了全球温室效应的影响.并且煤矿瓦斯具有燃烧、爆炸和突出危险,威胁着煤矿的安全生产.因此,加强我国煤矿瓦斯的资源化利用具有节能、环保和保证安全生产的重要现实意义.热逆流氧化装置是对超低体积分数的甲烷进行利用的先进技术,可以将抽采瓦斯与空气或者乏风瓦斯混合稀释后送入氧化装置内进行氧化利用^[4-5].

为了保证热逆流氧化装置安全运行,要求进入氧化装置氧化床的瓦斯气体体积分数要远远低于瓦斯的爆炸极限,一般来说要小于 1.5%,不能出现局部过浓现象^[6].旋流式混合器是该氧化装置中保证抽采瓦斯与空气或者乏风瓦斯混合均匀的关键部件,可以配制出甲烷体积分数为 0.3%~1.2%的均匀混合气.另外,为了使装置入口输运混合气的送风机具有较高的运转效率降低电耗,混合气的速度分布也应尽量均匀.旋流式混合器性能好坏在很大程度上对氧化装置的甲烷转化率、稳定性、经济性和安全性有重要影响.

国内外的众多学者已对旋流混合器的流动阻力、混合传热和流场特性等方面做了深入研究^[7-10].但以往的旋流混合器结构与文中有很大区别.为了使旋流混合器更好地应用于乏风瓦斯的混合过程,需要对其流动混合机理展开系统研究.文中利用简化的数学模型对给定工况下不同旋流方式和旋流强度的旋流混合器的混合均匀性进行了研究,为其结构优化设计提供理论指导依据.

1 物理和数学模型

1.1 物理模型

图 1 为旋流混合器的物理模型,高体积分数的抽采瓦斯从内部的瓦斯引射管轴向进气,空气或低体积分数的乏风瓦斯从外部的壳体进气.瓦斯引射管末端的扩张口可以加强对内管高体积分数瓦斯的引射作用.通过安装在内管和外壳的旋流器使内侧和外侧的气流产生旋流,然后在扩张口的下游进行均匀掺混,再进入热逆流反应器中进行氧化处理.

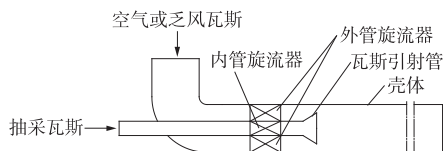


图 1 旋流混合器的物理模型

Fig. 1 Physical model of the swirl mixer

1.2 数学模型

文中着重于研究不同的旋流方式和旋流强度对混合均匀性的影响,不涉及具体结构参数的优化设计,因此在计算时将模型简化为图 2 所示.在图 2 中将旋流器的结构省略掉,通过在进口边界条件设置旋流切向速度,可以实现不同的旋流方式和强度.旋流混合器外管直径为 1 m,长度为 7 m,内管直径为 0.3 m,长度为 1.5 m,瓦斯引射管扩张角为 30°.

采用 Fluent 商业软件对旋流混合器的流动特性进行数值模拟,控制方程离散采用基于控制体中心的有限体积方法,用 SIMPLEC 算法对微分方程进行求解,选用分离式求解器和隐式格式,采用二阶迎风差分格式.湍流模型采用可实现(Realizable) $k-\epsilon$ 模型,近壁面处采用标准壁面函数法.组分模型采用组元输运模型,求解残差小于 1×10^{-4} .进口边界条件给定速度入口,给出入口的轴向速度和切向速度,出口边界条件为自由出流.

网格划分通过 Gambit 软件自动生成,坐标原点定在瓦斯引射器扩张出口的中心处,混合器套管式的结构较为规则,采用结构化六面体网格,网格数目总共大约为 40 万,网格如图 2 所示.经过网格无关性验证,网格数量能够满足计算精度的要求.



图 2 旋流混合器计算模型网格

Fig. 2 Computation grids of the swirl mixer

2 旋流数和均匀性系数定义

旋流数可以衡量气体旋转强度,定义为气流转动量矩与轴向动量矩的比值^[11],转动量矩根据下式计算为

$$G_{\phi} = \int_{r_s}^{R_s} u w \rho 2\pi r^2 dr, \quad (1)$$

轴向动量由下式计算:

$$G_x = \int_{r_s}^{R_s} \rho u^2 2\pi r dr, \quad (2)$$

式中: u 为轴向速度; w 为切向速度; R_s 为外半径; r_s 为内半径; ρ 为密度.

$$G_{\phi_{out}} = 2\pi/3 \rho u w (R_s^3 - r_s^3) \text{ (环形截面外管),}$$

$$G_{\phi_{in}} = 2\pi/3 \rho u w r_s^3 \text{ (柱状内管).}$$

旋流数 S 的计算公式为

$$S = G_{\phi} / G_x R_s, \quad (3)$$

内管为圆柱截面,其 r_s 为0,根据式(1)~(3)可得内管和外管的旋流数分别为

$$S_{out} = S_{in} \left[1 - \left(\frac{r_s}{R_s} \right)^3 \right] / \left[1 - \left(\frac{r_s}{R_s} \right)^2 \right],$$

$$S_{in} = 2\omega/3u.$$

文中采用均匀性系数来评价流动参数分布的均匀性,其定义为

$$\gamma = 1 - \frac{1}{2n} \sum_{i=1}^n \sqrt{(\Phi_i - \Phi_{mean})^2} / \Phi_{mean}. \quad (4)$$

式中: γ 为量纲一的均匀性系数,在0~1之间变化,越接近1表示流动分布越均匀; n 为截面上取的流体微元个数, Φ_i 和 Φ_{mean} 分别为 i 微元流动参数和截面上流动参数的平均值.当 Φ 分别取速度和体积分数时,可得速度均匀性系数 γ_v 与体积分数均匀性系数 γ_c .反映流动截面上速度和体积分数分布的均匀性.

3 计算结果分析

3.1 实验与数值计算结果的比较

为了验证数值计算方法对混合器掺混流动模拟的可靠性,将原先未安装旋流器的混合器(图1结构去掉旋流器)流场测量结果与计算结果进行了对比.图3所示为混合器瓦斯引射管下游0.4 m处的横截面的甲烷摩尔体积分数和速度垂直沿直径的分布,横坐标为沿直径的相对位置, D 为直径.通过比较可以看到,计算结果与试验结果的分布规律非常接近.在测量工况下,内管的甲烷体积分数比外管大,速度和流量比外管小,因此混合后的截面中部出现了体积分数的高峰和速度的低谷.并且由于外管进气经过弯头转向,离心力使截面下侧的空气速度较高,从而使混合后的体积分数与速度分布不对称.

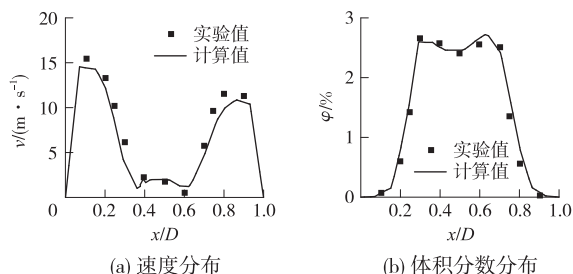


图3 混合器截面体积分数和速度分布沿直径的分布
Fig. 3 Radial distributions of the concentration and velocity in the cross section of swirl mixer

3.2 旋流方式对混合均匀性的影响

为了研究不同的旋流方式对混合器流动特性和

混合均匀性的影响,本文中设定了4种旋流方案,分别是内管入口旋流(insw),外管入口旋流(outsw),内、外管入口同向旋流(bstx)和内、外管入口反向旋流(bsfx).为了使不同的旋流方案具有可比性,通过设置其入口的切向速度使入口内管和外表管的旋流数 S 均在1.4左右.图4为4种旋流方式入口的速度矢量分布,可以看到内、外管入口有无切向速度及旋转方向的区别.4种旋流方式内管入口的轴向速度均为3.0 m/s,外管入口轴向速度均为1.5 m/s.

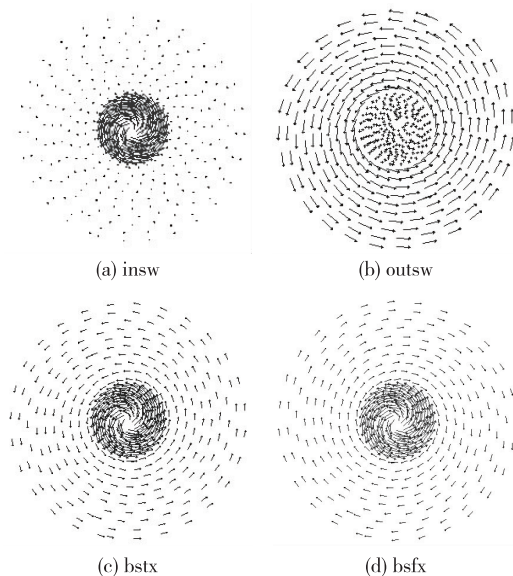


图4 进口速度矢量分布
Fig. 4 Distribution of velocity vectors at inlet

图5是4种旋流方式出口截面的甲烷摩尔体积分数和速度沿直径的分布与无旋流动(nosw)的对比,横坐标为沿直径的坐标位置.可以看出与无旋流动相比,outsw之外的3种旋流方式都明显提高了出口体积分数的均匀性,尤其是insw最为显著.而速度分布均匀性只有insw略有提升,其它3种旋流方式出口的速度分布均匀性明显变差,呈现中心低周边高的旋流速度场特征.

为了从流动机理入手详细分析不同旋流方式对速度分布均匀性的影响,图6给出了不同旋流方式的流动迹线图,均从入口沿直径释放质点.可以看到无旋流动的迹线为层流状态非常顺畅,因在扩张管出口外管气体的动压较高,因此外管的迹线向管道中心偏转,这使出口的速度分布更加均匀.insw旋流方式内管气体的旋流强度受到外管气体的黏滞作用迅速降低,出口处的旋流特征已不明显;outsw旋流方式外管气体尽管受到内管层流气体的

黏性阻力,仍保持较强的旋流强度,并通过黏性力带动中心流体产生同向旋流. bstx 旋流方式由于内管和外管气体的旋流强度和方向都相同,相互黏性阻碍作用最小,至出口仍保持很强的旋流强度. bsfx 旋流方式内管气体在外管气体的黏性力下改变了旋流方向,在出口处与外管气体同向旋转. 可以发现外管的流态对混合器整体的速度场起到主导作用,这是因为在此工况下外管气体的流量和转动惯量都远大于内管气体,所以当外管气体带有旋流时,出口的速度分布会出现旋流速度场特征.

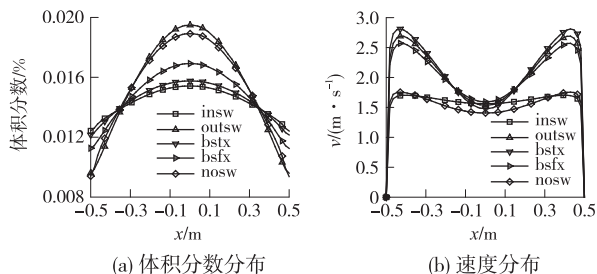


图 5 出口参数沿直径的分布

Fig. 5 Distribution of outlet parameters along the diameter

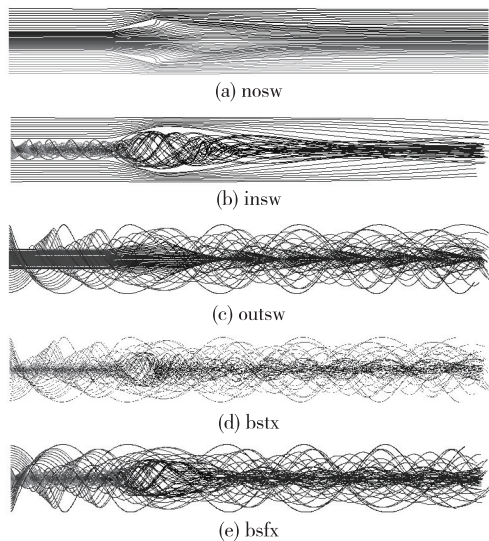


图 6 流动迹线图

Fig. 6 Map of path lines

从图 6 还可看出,内管气体具有旋流的 3 种旋流方式(insw, bstx 和 bsfx)在扩张管中心都出现了明显的回流区,无旋和 outsw 旋流方式则没有出现. 这是因为内管的旋流导致了径向和轴向反压力梯度的建立,从而在扩张管内形成了一个负压区,在两个反压差的作用下引起内卷吸产生回流. 在回流区内进行着强烈的动量和质量的交换,对混合均匀性起着非常有利的作用,因此具有中心回流区的

3 种旋流方式出口的甲烷均匀性系数明显要高.

图 7 所示为扩张管出口截面的静压沿直径的分布,在横坐标 $-0.325 \sim 0.325$ m 之间为内管扩张出口截面,其余为外管截面. 从图中可见, bstx 流动在扩张管出口的径向压力梯度最大,因此其中心回流区的强度最大,掺混最剧烈. 还可以看到,无旋和外旋流动内管没有产生径向逆压力梯度,因此没有产生回流区. 而由于内管和外管存在着较大的动压差,因此在扩张管出口的外侧内、外管流体的掺混比较剧烈. 与无旋流动相比,外旋流动外管较大的径向速度和压力梯度使其与内管流体掺混强度更大,但在加强混合的同时也增加了对内管主流的阻塞,使内管的主流高体积分数区被挤压在扩张口中心附近流出,不利于下游的自由扩散,因此外旋流动出口的体积分数分布不如无旋流动均匀.

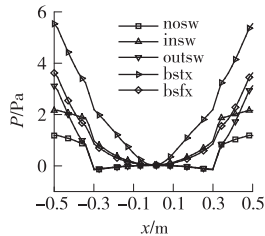


图 7 扩张管出口截面的静压沿直径的分布

Fig. 7 Static pressure distribution along the diameter at the outlet of expansion tube

图 8 为不同旋流方式的扩张管下游速度均匀性系数 γ_v 和体积分数均匀性系数 γ_c 轴向分布,横坐标为到扩张管出口的距离. 从图 8(a)可见带有外管旋流的 bstx、bsfx 和 outsw 3 种旋流方式的速度均匀性系数在出口 1 m 距离内上升较快,这是因为外管旋流产生较大的径向压力梯度(图 7),加速外管流体动量向内管的径向输运,然而超过 1 m 距离后这 3 种旋流流动的速度均匀性系数由于整体较强的旋流强度保持在较低水平不再上升. 无旋及 insw 两种流动由于外管的径向压力梯度较小,动量径向输运不太迅速,因此速度均匀性系数起初上升较缓

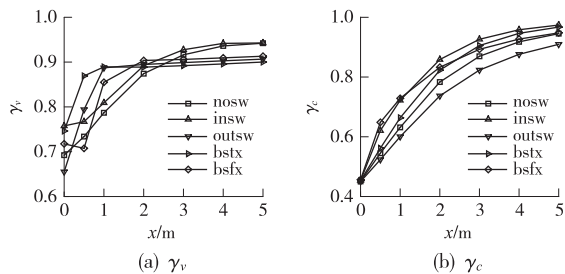


图 8 γ_v 和 γ_c 的轴向分布

Fig. 8 Axial distribution of γ_v and γ_c

慢,但外管流体的黏滞使整体旋流强度降低,因此出口处速度分布比较均匀. 由图 8(b)可看出由于回流区加强了内外管流体的湍动掺混, insw、bstx 和 bsfx 3 种旋流流动体积分数均匀性系数上升比其它两种流动明显迅速,并且在出口达到更均匀的体积分数分布.

3.3 旋流强度对混合均匀性的影响

旋流强度是影响旋流混合器混合均匀性的重要参数,因此需对其进一步详细了解. 如表 1 所示,对 4 种旋流方式各采用了 5 种旋流强度的算例, S_{in} 为内管入口旋流强度, S_{out} 为外管入口的旋流强度. 算例 1~5 的旋流强度依次增大,各算例的内管入口轴向速度都为 3.0 m/s,外管入口轴向速度都为 1.5 m/s,通过调整入口切向速度实现不同旋流强度.

表 1 各算例的旋流强度
Tab. 1 Swirl intensity of each example

算例 序号	insw		outsw		bstx		bsfx	
	S_{in}	S_{out}	S_{in}	S_{out}	S_{in}	S_{out}	S_{in}	S_{out}
1	0.34	0	0	0.36	0.34	0.36	0.34	0.36
2	0.67	0	0	0.72	0.67	0.72	0.67	0.72
3	1.34	0	0	1.44	1.34	1.44	1.34	1.44
4	2.01	0	0	2.16	2.01	2.16	2.01	2.16
5	2.68	0	0	2.88	2.68	2.88	2.68	2.88

图 9 为 4 种旋流方式不同旋流强度情况出口的 γ_c 和 γ_v , 横坐标为旋流强度依次增大的 5 个算例, 图中横线为无旋情况. 由图 9(a)可以看到, 随着旋流强度的增大, bstx、bsfx 和 outsw 3 种旋流出口的速度均匀性系数都是迅速下降的, 明显低于无旋流动, 而 insw 旋流出口的速度均匀性系数变化很小, 并且与无旋情况很接近. 这是因为外管流体的转动惯量占据主导, 对出口流动状态的影响比内管流体大的多, 其转动动量矩的增大使出口的不均匀性增加. 图 9(b)中 insw、bstx 和 bsfx 3 种旋流出口的体积分数均匀性系数在各个旋流强度下都大于无旋流动, 而 outsw 旋流当只有当旋流强度达到最大时出

口的体积分数均匀性系数才会超过无旋流动达到最大. insw 和 bstx 两种旋流出口的体积分数均匀性系数都随着旋流强度单调增大, 而 outsw 和 bsfx 两种旋流出口的体积分数均匀性系数则随旋流强度先减小再增大, 均出现了最低值.

随着旋流强度的提高, insw、bstx 和 bsfx 3 种旋流方式回流区的回流速度增大, 回流强度提高, 使内、外管的流体在回流区内掺混更为剧烈, 有利于出口体积分数均匀性的提高. Bsfx 旋流方式在回流区的下游有向内的径向二次流, 不利于中心高体积分数区的扩散. 但随着旋流强度的增大, 增强的径向二次流使湍流扰动增强, 促进流体的掺混和高体积分数区的扩散, 因此 bsfx 出口的体积分数均匀性随着旋流强度的提高先降低再升高. outsw 旋流方式没有产生回流区, 依靠内外管流体的动压差促进混合. 当旋流强度足够高时, 内外管流体增大的动压差及外管的高径向压力梯度使出口的体积分数均匀性系数得到提高, 比无旋流动更均匀.

4 结 论

① 4 种旋流方式中, insw、bstx 和 bsfx 由于内管的旋流产生了中心回流区, 有利于出口混合均匀性的提高. outsw 没有产生回流区, 依靠内、外管流体的动压差促进混合.

② 在本文中的来流工况条件下, 外管气体的流量和转动惯量对整体的速度场起到主导作用, 因此具有外管旋流的 outsw、bstx 和 bsfx 3 种旋流出口速度均匀性较低, 而只有内管旋流的 insw 出口速度分布非常均匀.

③ 随着旋流强度的增大, outsw、bstx 和 bsfx 3 种旋流出口的速度均匀性明显变差, 而 insw 旋流出口的速度均匀性系数变化很小, 这是因为外管流体转动动量矩的增大使出口的不均匀性增加.

④ 随着旋流强度的增大, insw、bstx 和 bsfx 3 种旋流回流区的强度提高, 使出口的掺混均匀性提高. outsw 旋流在高旋流强度时, 掺混旋涡的出现也提高了出口的体积分数分布均匀性.

⑤ 通过 4 种旋流方案的混合均匀性比较, insw 方案在给定的工况下呈现最佳混合体积分数均匀性和速度均匀性, 并且随着旋流强度的增大而优势更为明显. 然而在变工况下, 4 种旋流方式的混合特性需进一步开展研究, 以丰富对煤矿瓦斯旋流混合器内部流动机理的认识.

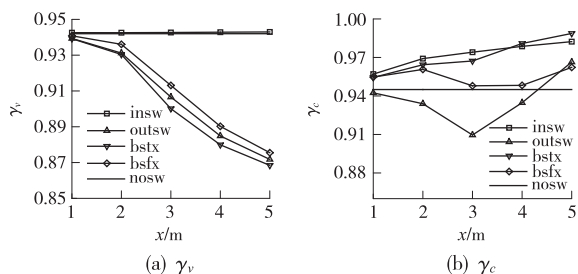


图 9 出口的 γ_v 和 γ_c 随旋流强度的变化

Fig. 9 Variation of γ_v and γ_c with swirl intensity at outlet

参考文献:

- [1] 陈宜亮, 马晓忠, 魏华兴. 煤矿通风瓦斯氧化技术及氧化热利用方式[J]. 中国煤层气, 2007, 4(4): 27-30.
Chen Yiliang, Ma Xiaozhong, Wei Huaxing. Methane oxidation technology for VAM and mode of utilization of oxidation heat [J]. China Coalbed Methane, 2007, 4(4): 27-30. (in Chinese)
- [2] 桑逢云, 赵国泉. 通风瓦斯利用技术比较与设备选择[J]. 中国煤层气, 2010, 7(2): 44-46.
Sang Fengyun, Zhao Guoquan. Comparison of VAM utilization technology and equipments selection [J]. China Coalbed Methane, 2010, 7(2): 44-46. (in Chinese)
- [3] 王鑫阳, 杜金. 浓度低于1%的矿井瓦斯氧化技术现状及前景[J]. 煤炭技术, 2008, 27(9): 1-3.
Wang Xinyang, Du Jin. Present situation and prospect of oxidation technology about mine methane with concentration less than 1% [J]. Coal Technology, 2008, 27(9): 1-3. (in Chinese)
- [4] 郑斌, 刘永启, 刘瑞祥, 等. 煤矿乏风的蓄热逆流氧化[J]. 煤炭学报, 2009, 34(11): 1475-1478.
Zhen Bin, Liu Yongqi, Liu Ruixiang, et al. Oxidation of coal mine ventilation air methane in thermal reverse-flow reactor [J]. Journal of China Coal Society, 2009, 34(11): 1475-1478. (in Chinese)
- [5] 毛明明, 高振强, 刘永启, 等. 乏风瓦斯热逆流反应器的流动压力损失特性[J]. 北京理工大学学报, 2011, 31(11): 1287-1291.
Mao Mingming, Gao Zhenqiang, Liu Yongqi, et al. Investigation into pressure loss characteristics of a thermal reverse-flow reactor [J]. Transactions of Beijing Institute of Technology, 2011, 31(11): 1287-1291. (in Chinese)
- [6] 龙伍见. 我国煤矿低浓度瓦斯利用技术研究现状及前景展望[J]. 矿业安全与环保, 2010, 37(4): 74-77.
Long Wujian. Current situation and advances of utilization technology of low concentration coal mine gas [J]. Mining Safety & Environmental Protection, 2010, 37(4): 74-77. (in Chinese)
- [7] Kumar V, Shirke V, Nigam K D P. Performance of Kenics static mixer over a wide range of Reynolds number [J]. Chemical Engineering Journal, 2008, 139(2): 284-295.
- [8] Keshav T R, Somaraju P, Kalyan K, et al. Liquid phase residence time distribution for gas-liquid flow in Kenics static mixer [J]. Chemical Engineering Process, 2008, 47(12): 2275-2280.
- [9] 龚斌, 吴剑华, 王宗勇, 等. SK型静态混合器流体湍流时传热性能的研究[J]. 高校化学工程学报, 2008, 22(3): 384-388.
Gong Bin, Wu Jianhua, Wang Zongyong, et al. Turbulent heat-transfer performance in SK static mixer [J]. Journal of Chemical Engineering of Chinese Universities, 2008, 22(3): 384-388. (in Chinese)
- [10] 孟辉波, 高艳丽, 禹言芳, 等. 旋流静态混合器内脉动壁压符号时间序列复杂度分析[J]. 实验流体力学, 2011, 25(5): 30-34.
Meng Huibo, Gao Yanli, Yu Yanfang, et al. Complexity analysis of instantaneous tube-wall pressure fluctuation symbolic series in static mixer with twisted-leaves [J]. Journal of Experiments in Fluid Mechanics, 2011, 25(5): 30-34. (in Chinese)
- [11] 杨华, 杜聪, 周晓芳, 等. 空气旋流强度对气泡雾化喷雾流场及火焰的影响[J]. 燃烧科学与技术, 2008, 14(6): 523-528.
Yang Hua, Du Cong, Zhou Xiaofang, et al. Influences of air swirl intensity on the atomization and combustion performances of effervescent atomized spray [J]. Journal of Combustion Science and Technology, 2008, 14(6): 523-528. (in Chinese)

(责任编辑: 孙竹凤)