

叶片间距对五级叶片百叶窗煤粉浓缩器性能的影响

王志强¹, 孙绍增², 窦礼亮³, 马春元¹, 董勇¹

(1. 山东大学能源与动力工程学院, 山东省 济南市 250061; 2. 哈尔滨工业大学燃烧工程研究所, 黑龙江省 哈尔滨市 150001; 3. 艾欧史密斯热水器有限公司, 江苏省 南京市 210038)

Effect of Blade Spaces on the Performance of a Five Stage Blades Louver Coal Concentrator

WANG Zhi-qiang¹, SUN Shao-zeng², DOU Li-liang³, MA Chun-yuan¹, DONG Yong¹

(1. School of Energy and Power Engineering, Shandong University, Jinan 250061, Shandong Province, China;

2. Research Institute of Combustion Engineering, Harbin Institute of Technology, Harbin 150001, Heilongjiang Province, China;

3. A. O. Smith Water Heater Co., Nanjing 210038, Jiangsu Province, China)

ABSTRACT: The horizontal bias combustion (HBC) is a combustion technology that has achieved satisfactory comprehensive effects with stability combustion, high combustion efficiency, resistance to slagging and high temperature corrosion and low NO_x emission. As the key part of HBC technology, the efficiency of coal combustion in the pulverized fuel boiler is affected by the performance of louver concentrator. A study of the effect of blade spaces in five stages on the performance of the louver concentrator was conducted in a louver concentrator test system. The experimental results show that the front blades have great influence on concentration coefficient and the middle and the rear blades have great influence on resistance coefficient. When the ratio of the space of blades is 1:1:1:3, the maximum concentration coefficient and average resistance coefficient are achieved and it can satisfy the concentrators with high concentrated level. And when ratio of the space of blades is 1:2.25:1:1, it can satisfy the concentrators with low resistance. These tests provide a theoretical basis for the design of louver concentrator and its engineering application.

KEY WORDS: louver concentrator; blade space; concentration rate; resistance coefficient

摘要: 水平浓淡燃烧技术作为先进的煤粉燃烧技术,可以使锅炉同时达到稳燃、高效、防腐蚀结渣和低污染排放等方面的要求。作为水平浓淡燃烧技术的关键部件,百叶窗煤粉浓缩器性能的好坏直接影响到煤粉炉中煤粉燃烧的效果。该文利用百叶窗浓缩器实验装置研究了叶片间距对5级叶片百叶窗浓缩器性能的影响。实验结果表明:靠前的叶片对浓缩率影响较大,中间及末级叶片对阻力系数影响较大。各级叶

片间距比为1:1:1:3时具有最大浓缩率和居中的阻力系数,可满足对浓缩效果要求较高的浓缩器;1:2.25:1:1结构可满足对阻力要求较高的浓缩器。实验结果为百叶窗浓缩器的设计和工业化应用提供了理论依据。

关键词: 百叶窗浓缩器; 叶片间距; 浓缩率; 阻力系数

0 引言

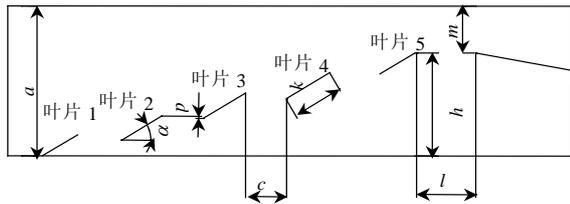
煤粉炉中煤粉燃烧过程中遇到的燃烧效率、低负荷稳燃、结渣、高温腐蚀和环境污染这五个问题是必须要解决的。只有解决了这5个问题,才能保证机组的安全、稳定和经济运行。但是,这5方面的问题往往是互相掣肘的,实际运行中难免顾此失彼,迫切需要一种可以同时达到稳燃、高效、防腐蚀结渣和低污染的燃烧技术。国内外同行在这方面做了大量工作,发展了许多新型燃烧器及燃烧技术,取得了一定的成果^[1-8]。

利用百叶窗煤粉浓缩器实现的水平浓淡燃烧技术可以同时解决电站锅炉稳燃能力差、易结渣和高温腐蚀以及NO_x排放高的问题,是一种实际应用中比较理想的燃烧技术。作为水平浓淡煤粉燃烧技术的关键部件,对百叶窗煤粉浓缩器的研究已经有十多年历史,得到了一些具有普遍适用意义的成果,积累了丰富的理论和实践经验^[9-19]。然而,由于结构的复杂性,一方面前人的研究成果有矛盾之处,一方面对百叶窗浓缩器进行更深入研究和进一步优化仍然是有意义的。基于此,本文进一步研究了叶片间距对5级叶片百叶窗浓缩器性能的影响规律,即各

叶片间距的地位及最优叶片间距比的获取,为百叶窗浓缩器的设计和工业化应用提供了理论依据。

1 实验系统

百叶窗煤粉浓缩器原理是一次风气流进入到浓缩器内,经过叶片的导流和分离,将其分成浓度不同的2股气流。根据工程应用的需要,可以控制浓淡两侧的煤粉浓度,也可以控制2股气流的风量。百叶窗煤粉浓缩器原理如图1。



a —浓缩器宽度; b —叶片长度; c —叶片间距; α —叶片倾角;
 p —叶片遮盖高度; h —阻塞高度; l —分体长度; m —分流挡板开度

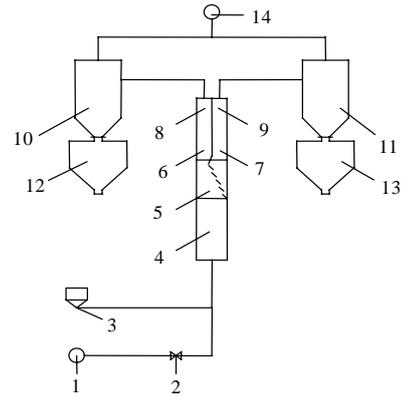
图1 百叶窗浓缩器结构原理图

Fig. 1 Structure drawing of louver concentrator

百叶窗浓缩器实验包括单相及两相实验,单相实验考察浓缩器阻力变化情况和浓淡风分配,两相实验考察对固体颗粒的分配性能。实验系统根据相似与模化理论进行设计,实验段长度780 mm,宽度200 mm。单相实验采用正压鼓风系统,实验用空气由风机供给,来流速度18 m/s,实验系统处于第二自模化区。来流经足够的稳定段后进入浓缩器实验段,通过叶片的浓缩作用,浓淡两侧气流分别进入由分隔挡板隔离成的浓淡两侧风道,然后直接排入大气。各测点压力均由标准毕托管测得。

两相实验采用引风机供给系统,实验用玻璃微珠由螺旋给粉机供给,玻璃微珠进入给料口后,经过足够的加速混合进入浓缩器实验段,浓缩器实验段垂直布置,固体颗粒经过浓缩器浓缩后分别进入6、7两侧风道,在两侧风道上布置动压测点,测量仪器采用笛形管。气固两相流体经过两侧风道进入旋风除尘器,进行固体颗粒的回收,最后颗粒从两侧集尘器罐中回收称重。实验系统如图2所示。

进行两相实验时,代表固相颗粒的并不是真实的煤粉,而是利用玻璃微珠代替煤粉^[20]。玻璃微珠由螺旋给粉机送入给料口,因此在进行实验前需要对螺旋给粉机进行标定。另外,为了保证两相流流量测量的准确性,实验采用笛形管来测量气固两相流中气相的流速。由于笛形管是非标准的测量元件,因此在实验前要对笛形管进行标定。螺旋给粉机和笛形管的标定曲线见文献[21]。



1—鼓风机; 2—调节阀; 3—给粉机; 4—压力测点; 5—实验段;
6—浓侧风道; 7—淡侧风道; 8—浓侧测点; 9—淡侧测点; 10—浓侧除尘器;
11—淡侧除尘器; 12—浓侧集尘器; 13—淡侧集尘器; 14—引风机

图2 百叶窗浓缩器实验台示意图

Fig. 2 Schematic diagram of test system of the louver concentrator

2 百叶窗浓缩器性能参数及测量方法

浓淡风比 R_1 、总阻力损失系数 D 、浓缩率 R_2 是百叶窗浓缩器的主要性能参数。浓淡风比反映出浓淡两侧空气流量分配的均匀程度,过大会浓侧气流流量过大,将稀释浓缩器的浓缩效果,浓缩器结构上应保证浓淡风比适当,一般在 $R_1=1$ 较好。总阻力损失系数反映了空气和煤粉经过浓缩器后需要克服多大的阻力,一般希望总阻力损失系数越小越好。浓缩率 R_2 反映了煤粉浓缩器对煤粉气流中颗粒浓度提高作用的强弱。

主要性能指标的测试方法如下:浓淡风比 R_1 的测量通过浓淡两侧的流量测点测量浓淡两侧的体积流量;总阻力损失系数 D 的测量利用浓缩器浓淡出口的测点测得压差 ΔP ,然后根据毕托管测量的入口流速计算出总阻力系数;浓缩率 R_2 的测量对在单位时间内通过旋风除尘器回收的浓淡两侧粉量进行称重,得出浓淡两侧粉量比,再结合已经测量的浓淡风比,计算出浓缩率 R_2 。

3 实验结果及分析

3.1 3个叶片间距不同于另外一个的情况

为研究方便,对叶片间距进行编号,令第1、2级叶片间距为间距1,其余间距依次排序为间距2、间距3及间距4。

考虑到叶片间距对浓缩器的影响不仅仅与各叶片间距比例有关,叶片间距的绝对值大小也会产生不容忽视的影响,因此该组实验分2类,以考察间距绝对值和间距比例在对浓缩器产生的影响中所具有的地位。

图 3 所示为各级叶片间距变化与浓缩器性能参数间的关系。图中 I 类为变化较小的情况，所谓变化较小是指叶片间距间的比例较小，如工况 1 叶片间距比例为 2.25:1:1:1。相应地，II 类为变化较大的情况，如工况 1 叶片间距比例为 3:1:1:1。实验工况见表 1。从图 3 可以看出：对于浓缩率，叶片

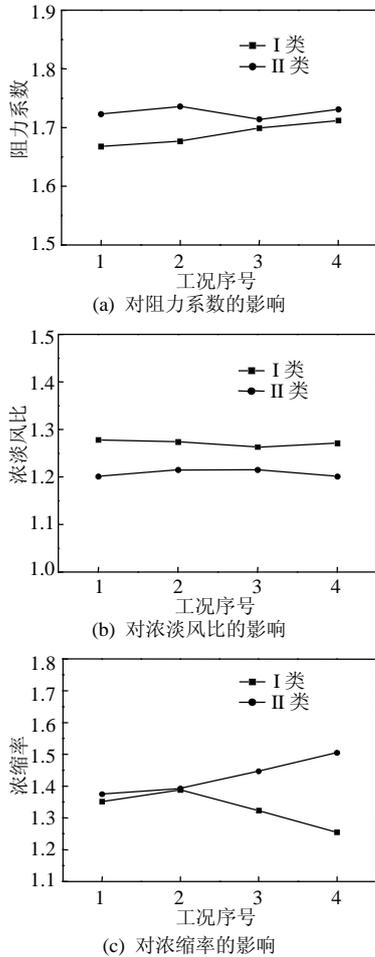


图 3 3 个叶片间距不同于另外一个的浓缩器性能变化
Fig. 3 Performance variations of three blade spaces differing from other blade space

表 1 3 个叶片间距不同于另外一个的实验工况
Tab. 1 Experimental cases of three blade spaces differing from other blade space

类别	工况序号	叶片间距/m				间距比例
		1	2	3	4	
类 I	1	72	32	32	32	2.25:1:1:1
	2	32	72	32	32	1:2.25:1:1
	3	32	32	72	32	1:1:2.25:1
	4	32	32	32	72	1:1:1:2.25
类 II	1	84	28	28	28	3:1:1:1
	2	28	84	28	28	1:3:1:1
	3	28	28	84	28	1:1:3:1
	4	28	28	28	84	1:1:1:3

间距绝对值越小，前级叶片作用越大，随着叶片间距绝对值的增大，后级叶片的作用将得到加强。而浓缩器阻力及浓淡风比则受叶片间距绝对值的影响不大。同时看到，I 类工况阻力普遍小于 II 类工况，而浓淡风比和浓缩率则大于 II 类工况，说明在 II 类工况中，较小绝对值的叶片间距起到了主要作用，这也是符合规律的。对比可见，该组实验中 I 类工况 2 即 1:2.25:1:1 的结构和 II 类工况 4 即 1:1:1:3 的结构是较好的。

3.2 2 个叶片间距不同于其他 2 个的情况

由于该组工况较复杂，不适于用曲线表示浓缩器性能随结构参数的变化态势，因此用表 2 给出实验结果。其中工况 0 为原始工况。可见，当第 1 叶片间距较大时，随着后 3 级叶片间距中大间距的后移，阻力系数呈逐渐增大趋势，其中第 3、4 叶片间距为较大时对阻力的影响变化不大，说明当第 1 叶片间距较大时，后 3 级叶片间距中第 2 级叶片起的作用相对较大；同时在该组全部工况中，工况 2、3 具有最大阻力系数，说明第 1 叶片间距大、第 2 叶片间距小的情况是应当避免的。

当第 1 叶片间距较小时，无论后 3 级叶片间距如何变化，阻力系数的变化都较小；当第 2、3 级叶片间距较大时，浓淡风比最小，浓缩率也处于一个相对较高的水平，而工况 5、6 具有近似的浓淡风比，可以推测其浓缩率也将在一个近似水平上，总体上来说，工况 4~5 浓缩率及阻力系数都很接近，且与工况 1~3 相比阻力系数均有下降，浓缩率有上升的趋势。虽然只对 3 个典型的工况做了两相实验研究，但并不妨碍得出以下结论，即对浓缩率而言，第 1 叶片间距在浓缩过程中起了相对较大的作用，若该间距较小则可获得较大的浓缩率，但它对阻力系数的影响没有后级叶片间距大，当第 2 叶片间距较大时可以得到最小的 2 个阻力系数，因此可以预测：第 2 叶片间距对阻力系数的影响是较大的。同样，第 3 叶片间距对阻力系数的影响几乎跟第 2 叶片间

表 2 2 个叶片间距不同于其他 2 个的浓缩器性能变化
Tab. 2 Performance variations of two blade spaces differing from other two blade spaces

序号	间距比例	阻力系数	浓淡风比	浓缩率
1	2:2:1:1	1.79	1.27	1.26
2	2:1:2:1	2.02	1.28	1.31
3	2:1:1:2	2.05	1.27	1.29
4	1:2:2:1	1.73	1.22	1.32
5	1:2:1:2	1.72	1.27	1.30
6	1:1:2:2	1.73	1.25	1.29

距完全相同。

由于本实验中,有4个间距,因此可将以上结论归结为:第4叶片间距对浓缩率有较大影响,中间叶片间距对阻力系数有较大影响。同时,与原始工况的对比发现,工况4即间距比1:2:2:1的结构和工况6即1:1:2:2的结构较好。

3.3 2个叶片间距相同而其余叶片间距不相同的情况

该组工况在第3组工况的基础上设计,主要考察2个较大间距具有不同增大幅度时对浓缩器性能的影响,进一步考察各级叶片间距的作用。实验结果见表3,其中工况0为原始工况。

由表可见,工况1具有较小的阻力系数和浓缩率,再次说明靠前的叶片间距对浓缩率有较大影响,同时工况3显示虽然第1叶片间距较大,但是由于第2、3叶片间距非常小,削弱了其对浓缩率的消极影响,从一个侧面反映出第2叶片间距对浓缩率的影响。虽然工况4具有略高于原始工况的阻力系数和浓缩率,但是对比工况1可见,经过间距1、2的位置互换,浓缩率增大,进一步印证了越靠前的叶片对浓缩率影响越大。总之,第1、2级叶片间距对浓缩率有较大影响,同时叶片位置越靠近来流方向,对浓缩率的影响越大。

实验结果显示工况12具有最小阻力系数,且浓缩率与原始工况相同。说明第3、4叶片间距对浓缩率的影响没有第1、2叶片间距大,但对阻力的影响则大于1、2叶片间距。同时对比工况10可见,大叶片间距越靠后,阻力系数越小,浓缩率方面,这

表3 2个叶片间距相同其余间距均不同的浓缩器性能变化

序号	间距比例	阻力系数	浓淡风比 R_Q	浓缩率
0	1:1:1:1	1.77	1.20	1.32
1	2.5:1.5:1:1	1.75	1.24	1.28
2	2.5:1:1.5:1	1.75	1.25	1.29
3	2.5:1:1:1.5	1.74	1.25	1.32
4	1.5:2.5:1:1	1.78	1.26	1.34
5	1.5:1:2.5:1	1.76	1.17	1.31
6	1.5:1:1:2.5	1.74	1.25	1.31
7	1:2.5:1.5:1	1.79	1.22	1.30
8	1:1.5:2.5:1	1.81	1.24	1.32
9	1:2.5:1:1.5	1.77	1.21	1.29
10	1:1:2.5:1.5	1.77	1.27	1.31
11	1:1.5:1:2.5	1.77	1.28	1.30
12	1:1:1.5:2.5	1.71	1.21	1.32

两个工况变化不大,说明3、4级叶片对浓缩率的影响都不大。此处可得结论:后级叶片间距对浓缩率影响不大,对阻力影响较大。

同时考察工况2、3和工况7、8,发现阻力系数和浓淡风比变化均不大,说明中间2级叶片间距位置互换对浓缩器的影响不大,但是考察工况11、12又可见阻力系数和浓淡风比均随大间距后移而减小,说明中间2级叶片间距对浓缩器的影响与其他间距也是有关系的。与其他工况对比可发现,第1叶片间距较小是导致此现象的原因。

综上所述,该组实验说明:中间两叶片间距对浓缩器的影响不是很大,但若前面的叶片间距较小,或者说前面的叶片已经对气流进行较强浓缩后,中间两叶片间距中较大间距后移会降低阻力,同时也降低了浓淡风比。该组实验中工况12即1:1:1.5:2.5的结构是较好的。

3.4 最优工况分析

为选取最佳结构,需对所得的5个较好工况与原始工况进行对比,见表4。可见,实验上来看这些经过优化的工况都在一定程度上降低了浓缩器阻力损失,且多数工况浓缩率也有增加,这说明在一定范围内达到阻力的减小和浓缩率的增大是可能的,但同时多数工况增大了浓淡风比,削弱了浓缩率的增大程度,符合理论推理。

在5个优化结构中,1:1:1:3结构具有最大浓缩率和居中的阻力系数,可满足对浓缩效果要求较高的浓缩器;1:2.25:1:1结构具有最小阻力系数和居中的浓缩率,可满足对阻力要求较高的浓缩器。但具体比例仍需针对具体工程需要进行设计。

表4 较优工况的对比

Tab.4 Contrast of optimal cases

组号	间距比例	阻力系数	浓淡风比	浓缩率
1	1:1:1:1	1.77	1.20	1.32
2-I	1:2.25:1:1	1.68	1.27	1.39
2-II	1:1:1:3	1.73	1.20	1.51
3	1:2:2:1	1.73	1.22	1.31
3	1:1:2:2	1.73	1.25	1.29
4	1:1:1.5:2.5	1.71	1.21	1.32

4 结论

(1) 叶片间距总和一定时,若增大某一个叶片间距,减小其余叶片间距,则对于浓缩率,叶片间距绝对值越小,前级叶片的作用越大,随着叶片间距绝对值的增大,后级叶片重要性得到加强;而浓缩器阻力受叶片间距绝对值的影响不大。

(2) 靠前的间距对浓缩率有较大影响, 中间及末级叶片间距对阻力系数有较大影响。

(3) 1:1:1:3 结构具有最大浓缩率和居中的阻力系数, 可满足对浓缩效果要求较高的浓缩器; 1:2.25:1:1 结构具有最小阻力系数和居中的浓缩率, 可满足对阻力要求较高的浓缩器。

参考文献

- [1] Bee J M. Combustion technology developments in power generation in response to environmental challenges[J]. *Progress in Energy and Combustion Science*, 2000, 26(4): 301-327.
- [2] 胡和兵, 王牧野, 吴勇民, 等. 氮氧化物的污染与治理方法[J]. *环境保护科学*, 2006, 32(4): 15-19.
Hu Hebin, Wang Muye, Wu Yongmin, et al. Pollution of nitrogen oxides and its treating method [J]. *Environmental Protection Science*, 2006, 32(4): 15-19 (in Chinese).
- [3] 苏亚欣, 毛玉如, 徐璋. 燃煤氮氧化物排放控制技术[M]. 北京: 化学工业出版社, 2005.
- [4] 王志强, 孙绍增, 钱琳, 等. 煤气再燃还原氮氧化物的特性研究[J]. *中国电机工程学报*, 2007, 27(20): 42-45.
Wang Zhiqiang, Sun Shaozeng, Qian Lin, et al. Characteristic study on NO_x reduction with coal-gas reburning[J]. *Proceedings of the CSEE*, 2007, 27(20): 42-45 (in Chinese).
- [5] 杨光军, 刘吉臻, 谭文, 等. 燃煤电厂控制氮氧化物的原则性方法及燃烧优化技术[J]. *华东电力*, 2007, 35(2): 16-18.
Yang Guangjun, Liu Jizhen, Tan Wen, et al. Principles of NO_x control for coal-fired power plants and combustion optimization techniques [J]. *East China Electric Power*, 2007, 35(2): 16-18 (in Chinese).
- [6] Watts J U, Mann A, Harvilla J, et al. NO_x control by utilization of reburn technologies in the United States[C]. *Fifth International Conference on Technology and Combustion for a Clean Environment*, Lisbon, 1999.
- [7] Spliethoff H. Low-NO_x combustion for pulverized coal a comparison of air staging and reburning[C]. *2nd Int. Conference on Combustion and Emission Control*, London, 1995.
- [8] 毕玉森. 电站锅炉NO_x排放现状、预测及技术政策[J]. *中国电力*, 1998, 31(12): 59-62.
Bi Yusen. Current situation, forecast and technical police of NO_x emission of utility boilers[J]. *Electric Power*, 1998, 31(12): 59-62 (in Chinese).
- [9] 范卫东, 高继慧, 孙绍增, 等. 百叶窗浓缩器内叶片及壁面磨损数值预测[J]. *中国电机工程学报*, 2000, 20(10): 75-79.
Fan Weidong, Gao Jihui, Sun Shaozeng, et al. Numerical simulation study about the louver concentrator erosion by pulverized coal flow [J]. *Proceedings of the CSEE*, 2000, 20(10): 75-79(in Chinese).
- [10] 聂其红, 孙绍增, 吴少华, 等. 新型水平浓淡风低NO_x煤粉燃烧器在贫煤锅炉的应用研究[J]. *中国电机工程学报*, 2002, 22(7): 155-159.
Nie Qihong, Sun Shaozeng, Wu Shaohua, et al. Study on application of new type HBS-SSA burners with low NO_x emissions in a lean coal fired boiler[J]. *Proceedings of the CSEE*, 2002, 22(7): 155-159(in Chinese).
- [11] 孙绍增. 水平浓淡煤粉燃烧过程的研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 1995.
Sun Shaozeng. Study on combustion processes with horizontal bias combustion pulverized coal burners[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 1995(in Chinese).
- [12] 张泽. 水平浓淡风煤粉燃烧器的炉内流动特性研究及应用[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2000.
Zhang Ze. Study on flow properties and application of horizontal bias combustion pulverized coal burner with side secondary air in tangentially fired boiler[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2000(in Chinese).
- [13] 韩才元, 袁建伟, 徐明厚. 火焰稳定和弯管浓缩煤粉浓淡燃烧研究[J]. *中国电机工程学报*, 1997, 17(4): 274-277.
Han Caiyuan, Yuan Jianwei, Xu Minghou. Flame stabilization and study on combustion of dense thin pulverized coal with bent tube [J]. *Proceedings of the CSEE*, 1997, 17(4): 274-277(in Chinese).
- [14] 时黎明, 张梦珠, 马春元. 煤粉浓缩器阻力特性试验研究[J]. *热能动力工程*, 1999, 14(4): 256-259.
Shi Liming, Zhang Mengzhu, Ma Chunyuan. An experimental investigation of the resistance characteristics of pulverized coal concentrators[J]. *Journal of engineering for thermal energy and power*, 1999, 14(4): 256-259(in Chinese).
- [15] 朴桂林, 成庆刚, 姜健强, 等. 煤粉浓缩器的模化试验研究[J]. *电站系统工程*, 1993, 9(2): 35-38.
Piao Guilin, Cheng Qinggang, Jang Jianqiang, et al. Modelling experimental investigation of pulverized coal concentrator[J]. *Power System Engineering*, 1993, 9(2): 35-38(in Chinese).
- [16] 孙锐, 孙绍增, 李争起, 等. 煤粉浓缩器内气固两相流动特性的数值模拟[J]. *机械工程学报*, 2004, 40(3): 35-39.
Sun Rui, Sun Shaozeng, Li Zhengqi, et al. Numerical simulation of gas-particle two phase in a pulverized-coal concentrator[J]. *Chinese Journal of Mechanical Engineering*, 2004, 40(3): 35-39 (in Chinese).
- [17] 孙绍增, 王志强, 姜文龙, 等. 叶片转动角度对百叶窗浓缩器性能影响的研究[J]. *热能动力工程*, 2007, 22(4): 423-426.
Sun Shaozeng, Wang Zhiqiang, Jiang Wenlong, et al. A study of the effect of blade rotating angles on the performance of a louver concentrator[J]. *Journal of engineering for thermal energy and power*, 2007, 22(4): 423-426 (in Chinese).
- [18] 吴建甫, 王洪涛, 杨林, 等. 百叶窗煤粉浓缩器性能参数和燃烧优化试验研究[J]. *电力设备*, 2005, 6(1): 70-73.
Wu Jianfu, Wang Hongtao, Yang Lin, et al. Testing and study on the performance parameters of louver type pulverized coal concentrator and combustion optimization[J]. *Electrical Equipment*, 2005, 6(1): 70-73(in Chinese).
- [19] 吴磊, 池作和, 王蓉, 等. 离心式旋转煤粉浓缩器的试验和数值模拟研究[J]. *电站系统工程*, 2005, 21(2): 10-12.
Wu Lei, Chi Zuohe, Wang Rong, et al. Experimental study and numerical simulation of rotary-classifier[J]. *Power System Engineering*, 2005, 21(2): 10-12 (in Chinese).
- [20] 邱建荣, 马毓义. 用 PDA 测量两相湍流场时固体粒子的选择[J]. *气动实验与测量控制*, 1994, 8(1): 54-59.
Qiu Jianrong, Ma Yuyi. Choice of solid particles during measuring gas-solid two-phase turbulent flow field with particle dynamic analyzer[J]. *Experiments and Measurements in Fluid Mechanics*, 1994, 8(1): 54-59 (in Chinese).
- [21] 王志强. 地下气化煤气再燃还原NO_x的研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2007.
Wang Zhiqiang. NO_x Reduction by reburning with coal-gas from underground gasification[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2007(in Chinese).

收稿日期: 2008-01-21.

作者简介:

王志强(1978—), 男, 博士后, 讲师, 研究方向为燃烧及大气污染物控制技术, jackywzq@sdu.edu.cn.

(责任编辑 车德竞)