

煤粉旋流燃烧器掺混系数的研究与分析

赵伶玲, 周强泰, 赵长遂

(东南大学洁净煤发电及燃烧技术教育部重点实验室, 江苏省 南京市 210096)

Study on Mixed Coefficient of Pulverized Coal Swirl Burner

ZHAO Ling-ling, ZHOU Qiang-tai, ZHAO Chang-sui

(Key Laboratory of Clean Coal Power Generation and Combustion Technology of Ministry of Education, Southeast University, Nanjing 210096, Jiangsu Province, China)

ABSTRACT: The stable combustion of swirl burner is assessed usually by the size of the Central Recirculation Zone (CRZ), the recirculated mass and the concentration of pulverized coal flow, while the mixed time and intensity between high temperature flue gas and the pulverized coal are not considered. This paper puts forward the concept of "mixed coefficient" that is used as the assessment of the mixed speed and intensification between the pulverized coal-air flow and the recirculation high temperature gas. Through the mathematics simulation, the mixed coefficients of the general bluff-body stabilizer, the Petal Flame Stabilizer, and the common swirl burner and Petal Swirl Burner are analyzed. And this paper discussed the temperature distribution of common swirl burner and petal swirl burner burn semi-anthracite at 55% load. The results show that the "mixed coefficient" can perfectly predict the mixing of the boundary of CRZ, which is important to deepen the investigation in stable combustion and flow field for swirl burner.

KEY WORDS: thermal power engineering; swirl burner; mixed coefficient; stable combustion; petal flame stabilizer; petal swirl burner

摘要: 以往作为衡量旋流燃烧器稳燃性能的指标通常有回流区的尺寸(长度和宽度)、回流量、煤粉浓度等参数,而对煤粉气流在炉内与回流区高温流体混合的早晚及混合强度未曾提及。该文提出了掺混系数这一新概念,用以衡量煤粉与高温回流烟气之间掺混速度和掺混强度。应用数值模拟的方法得到扩流锥稳燃器、花瓣稳燃器和普通旋流燃烧器及花瓣燃烧器的流场,并对其掺混系数进行了分析与研究。同时给出了花瓣燃烧器和普通燃烧器在燃烧贫煤时 55% 负荷下的温度分布。研究得出掺混系数可以很好地反应回流区边界上的掺混程度,为旋流燃烧器的设计提供了新的依据。

关键词: 热能动力工程; 旋流燃烧器; 掺混系数; 稳燃; 花瓣稳燃器; 花瓣燃烧器

0 引言

随着锅炉容量的增加,旋流燃烧器的稳燃问题已成为电站锅炉煤粉燃烧亟待解决的问题之一^[1-2]。以往对于旋流燃烧器的稳燃性能研究都是从回流区大小^[3-4]、回流量^[5-6]和煤粉浓度^[7-8]等角度进行的。但只考虑回流区大小和煤粉浓度是不够的,还应考虑煤粉颗粒与高温烟气之间的掺混速度及前期掺混强度。比如在同样回流量的情况下,煤粉颗粒在回流区尾部进入回流区与煤粉颗粒一喷入炉膛即能随回流区边界的宏观对流运动进入回流区,对煤粉气流着火和煤粉颗粒的燃烧强化强度是完全不同的。

当煤粉颗粒在进入炉内后较早地进入回流区时,煤粉可以在回流区内着火燃烧,放出的热量可提高回流区的烟温^[9]。在回流区尾部进入回流区的煤粉,若在进入炉内后已着火燃烧,随煤粉带入回流区的热量已经不多;若煤粉还未着火,随煤粉带入回流区的则是大量低温气流,致使回流区温度不升反降^[10-11]。因此,煤粉较早进入回流区可以强化煤粉的着火燃烧。

现有文献中作为衡量旋流燃烧器稳燃性能的指标^[12]通常有回流区的尺寸(长度和宽度)、回流量、煤粉浓度等参数,而对煤粉气流在炉内与回流区高温流体混合的早晚及混合强度未曾提及。本文提出了掺混系数的概念,用以衡量煤粉与高温回流烟气之间掺混速度和掺混强度,拓展了稳燃原理,为旋流燃烧器的设计提供了新的依据。

1 掺混系数的概念

掺混系数 j 定义为在回流区边界上通过单位表面积进入回流区的流量,见图1。

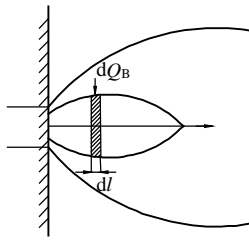


图1 掺混系数原理图

Fig. 1 The principle of mixed coefficient

其表达式为

$$j = \frac{dQ_B}{dl} \quad (1)$$

式中： Q_B 为回流区边界单位面积进入回流区的流体量； l 为距燃烧器喷口的距离，将 l 无量纲化， l/D ， D 为燃烧器的最大直径；将 Q_B 也无量纲化， Q_B/Q_1 ， Q_1 为一次风量。掺混系数 $j = dQ_B/dl$ 表明通过回流区表面(外边界)流体质量的交换强度，实际上反映了回流区边界上进行热质交换的强度。该值为正，说明风粉气流向外扩散，没有煤粉颗粒进入回流区；该值为负，表示有风粉气流从回流区边界外进入回流区，负值出现得越早说明风粉气流开始进入回流区的位置距离喷口越近，进入回流区的速度越快，该值越大表示回流区边界上热质交换的强度也越大。掺混系数 j 的数值也可大致评价沿轴向位置处，从回流区边界外进入回流区内的煤粉量的多少。

沿轴向某位置掺混系数的数值，由下式求出：

$$j = v_{B,l_0} \cdot L_0 \quad (2)$$

式中： v_{B,l_0} 为轴向 $l=l_0$ 处回流区边界上风粉气流的径向速度； L_0 为 $l=l_0$ 处回流区的外边界周长。

2 花瓣稳燃器的掺混系数分析

普通扩流锥稳燃器(扩锥角 40°)的流场，经数值计算得出^[13]，如图2所示。在图2中，速度较高的外围气流为主流(风粉气流)，中心回流区被外围主流所包围。中心回流流体，在回流至燃烧器附近时，速度减慢，一部分折向并作 180° 转弯，另一部分回流至扩流锥内部再转弯。回流流体折向后沿回流区的外边缘与主流作平行流动。两种平行流动流体之间的混合和热质交换，主要是依靠两流体之间分界面上流体的脉动作为动力，但脉动速度比主流速度低很多，几乎差两个数量级，因此，热、质交换和混合强度较低。也就是说，这种燃烧器高温回流烟气对风粉气流的加热速率较慢，对于低挥发分煤而言，风粉气流进入炉膛后着火较迟。

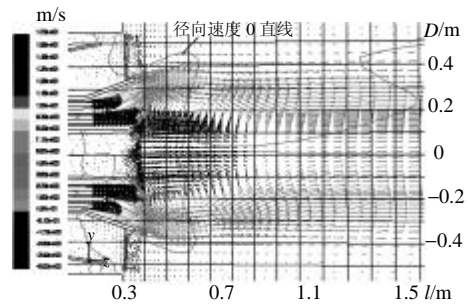
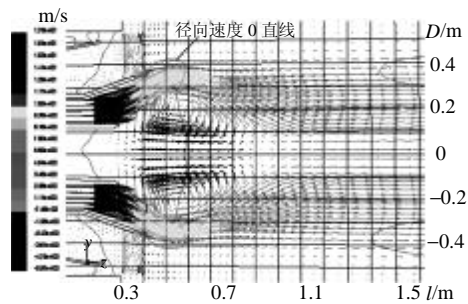
图2 40° 扩流锥轴向剖面速度矢量图Fig. 2 The center pipe expand 40° - velocity vectors

图3 花瓣稳燃器瓣峰剖面速度矢量图

Fig. 3 The flow field of petal flame stabilizer

花瓣稳燃器^[14](petal flame stability, PFS)在瓣峰

剖面上的流场如图3所示。瓣峰以外的外围区域为风粉主流，中心回流区也是被外围主流所包围。比较图2和图3看出，瓣峰扩角 40° 的花瓣稳燃器可获得与扩锥角 40° 的扩流锥稳燃器尺寸大体相同的中心回流区。但与带扩流锥的普通燃烧器不同，花瓣稳燃器在每个花瓣的背流面，还存在明显的径向回流区，而且径向回流区的流体与中心回流区融合在一起。中心回流流体在回流至燃烧器附近时折向，在花瓣的背流面作径向流动，且径向速度较高，在瓣峰附近与风粉气流主流体混合。径向流体与轴向流体的混合强度要比两种方向相同平行流动的流体大得多。所以，高温回流烟气被径向回流区源源不断地输送给从燃烧器进入炉膛的风粉气流，使其迅速着火并稳定燃烧。

图4和图5为扩流锥和花瓣稳燃器的径向速度等值线图^[15]。径向速度的正负可代表风粉气流外扩与反向回流的情况。流经扩流锥的风粉气流进入炉膛后径向速度的正值区明显比花瓣稳燃器径向速度的正值区大，而径向速度负值区也明显比花瓣稳燃器外扩，尾部收缩慢，速度梯度小，即 $dQ_{回,花瓣}/dl > dQ_{回,扩锥}/dl$ 。虽然扩流锥与花瓣都可以使来流外扩到大体同样角度，但花瓣流体外扩后折回快，受力大，说明瓣后的径向垂直运动比扩流锥大。

掺混系数可以表征风粉气流与回流热烟气的

宏观掺混速度和掺混强度。计算的掺混系数 j 随 l/D 的变化曲线如图 6 所示。

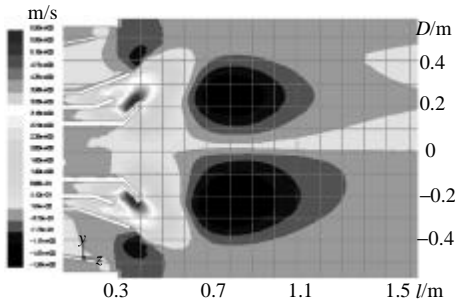


图 4 40°扩流锥轴向剖面径向速度等值线图

Fig. 4 The center pipe expand 40° radial velocity contours

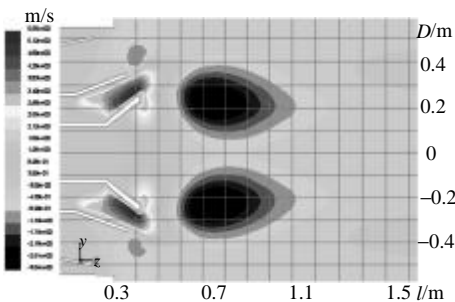


图 5 花瓣稳燃器瓣峰剖面径向速度等值线图

Fig. 5 Petal flame stabilizer-radial velocity contours

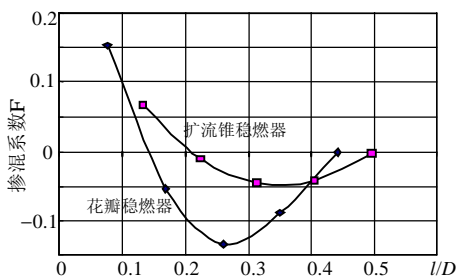


图 6 花瓣稳燃器与扩流锥稳燃器掺混系数曲线图

Fig. 6 The mixed coefficient of PFS and common combustion stabilizer

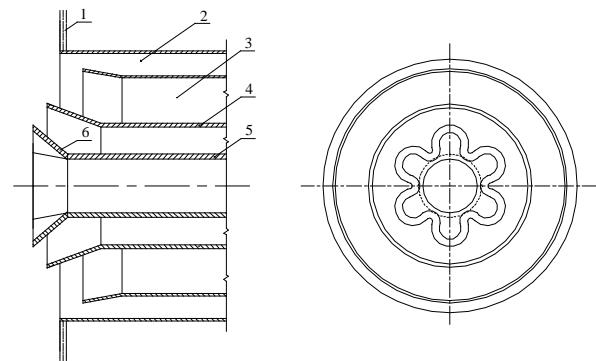
假设把掺混系数 j 为零值看作不存在风粉气流与回流烟气的宏观掺混，则掺混系数为正值时，即回流区边界气流的径向速度为正值，风粉气流向外扩散，没有煤粉颗粒进入中心回流区。反之，掺混系数开始出现负值时，即回流区边界气流的径向速度开始为负，速度方向由风粉气流指向回流区，煤粉颗粒开始进入回流区；掺混系数负值的位置出现得越早，说明风粉气流也越早进入回流区；掺混系数的负值越大，说明风粉气流进入回流区的流量也越大，二者的掺混越剧烈。所以掺混系数可以衡量煤粉与高温回流烟气之间掺混速度和掺混强度。

由图 6 可以看出花瓣稳燃器的宏观掺混比普通扩流锥早，且掺混系数的绝对值大，说明花瓣稳燃器的风粉气流进入炉内后较早就能以较大的量进入

回流区，沿轴向不断增大。这也就是说，花瓣稳燃器形成的流场使风粉气流迅速大量进入回流区，能够与高温烟气迅速混合，进行剧烈的热、质交换。分析普通扩流锥掺混系数曲线看出，在扩流锥出口附近并没有风粉气流进入回流区，随后有少量进入，风粉气流向中心回流区的流动主要发生在回流区尾部。在回流区尾部进入回流区的煤粉对加速低挥发分煤的着火和稳定燃烧没有实际意义。

3 花瓣燃烧器的掺混系数分析

加装花瓣稳燃器的旋流燃烧器称之为花瓣燃烧器(petal swirl burner, PSB)，如图 7 所示。



1—水冷壁管；2—直流二次风；3—旋流二次风；4—一次风管；5—中心风管；6—花瓣稳燃器

图 7 花瓣燃烧器(PSB)喷口局部放大图

Fig. 7 Structure of petal swirl burner

花瓣燃烧器不仅回流量大，且在风粉气流进入炉内初期混合强度大，这是许多旋流燃烧器设计所要达到而未能达到的目标。根据计算结果，整理出的花瓣燃烧器和同等条件下普通扩流锥燃烧器的冷态下掺混系数 j 的分布曲线^[16]，如图 8 所示。

对于普通旋流燃烧器，掺混系数 j 在 $l/D=0.75$ 以后才开始出现负值，并在 $l/D=1.0$ 处达到一个最大值。轴向位置 $l/D=0.75$ 已超过了回流区的最宽边界，而 $l/D=1.0$ 已处于回流区开始闭合的地方。图 9 示出花瓣燃烧器与普通燃烧器冷态流场回流区边界曲线图。比较图 8 和图 9，说明普通旋流燃烧器的煤粉气流要流过回流区最宽边界之后才能开始进入回流区，并在回流区开始闭合时才能达到一个稍大的数值。这也说明，对普通燃烧器来说，从风粉气流中进入回流区的煤粉主要发生在回流区尾部，这与文献[13]的理论分析一致。

对于花瓣燃烧器，掺混系数在 $l/D=0.5$ 左右开始出现负值，且沿轴向方向急剧增加，在 $l/D=0.7$ 附近达到最大值，不仅比普通燃烧器提前，且最大负值是普通燃烧器的 4~5 倍。由于花瓣稳燃器的存

在,风粉气流在进入炉膛后即可迅速进入回流区中,掺混强度很大,使风粉气流快速加热升温,煤粉颗粒迅速着火,及时燃烧,并可得到较高的燃烧效率。

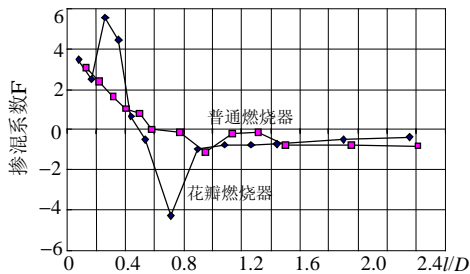


图8 花瓣燃烧器与普通燃烧器的冷态掺混系数
Fig. 8 The mixed coefficient of PSB and common swirl burner

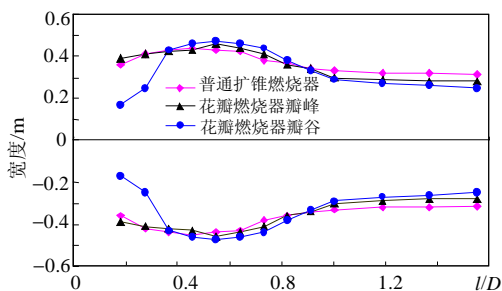


图9 花瓣燃烧器与普通燃烧器的冷态回流区边界曲线图
Fig. 9 The boundary of CRZ of PSB and common swirl burner

在图9中,花瓣瓣谷回流区的边界曲线,在 $z/D=0.2\sim 0.4$ 的区域较窄,随后逐渐变宽,说明从瓣谷区域进入炉内的风粉气流先近似于平行流动,然后卷入到瓣后的径向回流区,掺混系数从 $l/D=0.45$ 开始出现负值,说明这是瓣后径向回流区所起的作用。本文关于普通燃烧器和花瓣燃烧器的比较是在风量、粉量、回流区机制相同的情况下进行的,可以看出掺混系数主要是指回流区边界上发生的掺混,其数值大小不会影响中心回流区的稳定性。

图10和图11分别为普通燃烧器和花瓣燃烧器在210 MW锅炉中燃烧 $V_{\text{daf}}=14\%$ 的贫煤时,55%负荷下计算所得的温度场分布图。比较图10和图11可得,花瓣燃烧器的高温区较长,不过分集中;在燃烧器出口形成较大的局部火焰,称之为“值班火焰”,该火焰在回流区端部形成稳定热源,为低温风粉气流的着火燃烧提供热量;由于风粉气流与高温烟气间进行的是强烈的对流换热,部分煤粉颗粒从回流区端部进入回流区,故风粉气流升温快,在距燃烧器喷口0.4~0.5 m左右火焰温度即可达到1600 K,而普通燃烧器在这一区间温度只能达到1200 K左右,不利于煤粉气流特别是贫煤等低挥发分煤的着火燃烧,这与掺混系数的分析是一致的,可见分析

煤粉与高温烟气间前期混合速度和混合强度的重要性。计算和现场试验结果表明花瓣燃烧器的这种温度分布,十分有利于低挥发分煤的迅速着火、稳定燃烧和充分燃尽,在55%负荷时能够较好地燃烧 $V_{\text{daf}}=14\%$ 的贫煤,具有良好的稳燃性能。

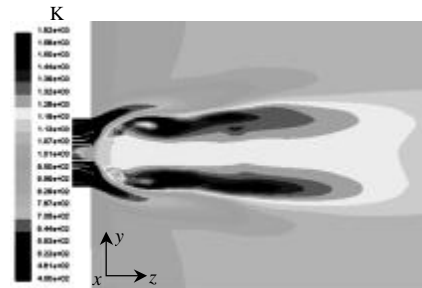


图10 55%负荷普通燃烧器温度分布图(115MW)
Fig. 10 The temperature distribution of common swirl burner at 55% load

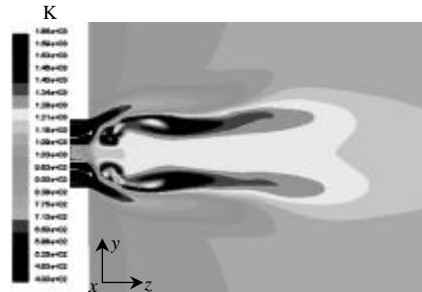


图11 55%负荷花瓣燃烧器温度分布图(115MW)
Fig. 11 The temperature distribution of petal swirl burner at 55% load

4 结论

(1) 回流区的尺寸(长度和宽度)、回流量、煤粉浓度等参数,不足以完全描述旋流燃烧器的稳燃性能。

(2) 掺混系数用以衡量煤粉气流在炉内与回流区高温流体混合的早晚及混合强度,对于旋流燃烧器的设计与分析提供了有利的依据。

(3) 花瓣稳燃器与普通扩流锥稳燃器相比,在同样扩角的情况下,掺混系数负值出现较早且数值较大,说明回流区前期掺混剧烈,煤粉气流能够在回流区头部大量进入,与热烟气进行强烈的热质交换。

(4) 与相同条件普通旋流燃烧器相比,花瓣燃烧器的掺混系数负值始点的位置不仅提前,而且负值的绝对值也大,最大负值是普通燃烧器的4~5倍。

通过对掺混系数的分析,为旋流燃烧器的稳燃原理进一步的研究,提供了新途径。

参考文献

- [1] Xiumin Jiang, Chuguang Zheng, Che Yan, et al. Physical structure and combustion properties of super fine pulverized coal particle[J]. Fuel, 2002, 81(6): 793-797.
- [2] Björkman A. Projects on coal characterization[J]. Fuel, 2001, 80(2): 155-166.
- [3] 秦裕琨, 王磊, 李争起, 等. 淡一次风扩口角度对径向浓淡旋流煤粉燃烧器出口流场影响的试验研究[J]. 中国电机工程学报, 2000, 20(3): 56-60.
Qin Yukun, Wang lei, Li Zhengqi, et al. Effects of lean primary air outlet angle on characteristics of gas particle tow phase flows of the radial bias combustion swirl burner[J]. Proceedings of the CSEE, 2000, 20(3): 56-60(in Chinese).
- [4] 李争起, 孙锐, 孙绍增, 等. 径向浓淡旋流燃烧器气固流动特性的实验研究及其对燃烧的影响[J]. 中国电机工程学报, 1999, 19(5): 18-23.
Li Zhengqi, Sun Rui, Sun Shaozeng, et al. Experimental study on characteristics of gas-particle flows with the radial bias combustion (RBC) swirl pulverized coal burner and influence of the characteristics on combustion[J]. Proceedings of the CSEE, 1999, 19(5): 18-23(in Chinese).
- [5] Kawahara H, Nishinura T. Numerical study on vortex structures in a two-dimensional bluff-body burner in the transitional flow regime [C]. The Third Asia-Pacific Conference on Combustion (ASPACC 2001), Seoul, Korea, 2001, 154-157.
- [6] Zhengqi Li, Rui Sun, Lizhe Chen, et al. Effect of the central air on air flow and coal combustion in the region of swirl burners[C]. The Fifth International Symposium on Coal Combustion, Nanjing, China, 2003, 153-158.
- [7] 陈智超, 李争起, 孙锐, 等. 适用于 1025t/h 燃煤锅炉的浓淡旋流煤粉技术的研究[J]. 中国电机工程学报, 2004, 24(4): 189-194.
Chen Zhichao, Li Zhengqi, Sun Rui, et al. Study on fuel bias combustion swirl technology OFA 1025t/h pulverized coal fired boiler[J]. Proceedings of the CSEE, 2004, 24(4): 189-194(in Chinese).
- [8] 秦裕琨, 孙锐, 李争起, 等. 径向浓淡旋流煤粉燃烧器流动特性研究及应用[J]. 中国电机工程学报, 2000, 20(9): 72-76.
Qin Yukun, Sun Rui, Li Zhengqi, et al. Flow properties study and application of radial bias combustion swirl burner[J]. Proceedings of the CSEE, 2000, 20(9): 72-76(in Chinese).
- [9] Yin Chungen, Rosendahl Lasse, Condra Thomas J. Further study of the gas temperature deviation in large-scale tangentially coal-fired boilers [J]. Fuel, 2003, 82(9): 1127-1137.
- [10] Fan Jianren, Qian Ligeng, Ma Yinliang, et al. Computational modeling of pulverized coal combustion processes in tangentially fired furnaces [J]. Chemical Engineering Journal, 2001, 81(1-3): 261-269.
- [11] 陈刚, 郑楚光. 锅炉炉膛上部容积热负荷与煤粉锅炉烟温偏差的关系[J]. 中国电机工程学报, 2002, 22(11): 146-148.
Chen Gang, Zheng Chuguang. Relation between the volume heat load of upper furnace and the flue gas temperature deviation for tangential firing boiler[J]. Proceedings of the CSEE, 2002, 22(11): 146-148(in Chinese).
- [12] Zhongxiao Zhang, Jing Jin, Ailan Zhou, et al. Experimental study on low NO_x combustion technology of pulverized coal [C]. Proceedings of International Conference on Energy and Environment, Shanghai, China, 2003, 1024-1029.
- [13] 赵伶俐, 周强泰, 吕震中. 旋流燃烧器的流场特性与稳燃[C]. 全国博士生学术论坛论文集, 2004, 8: 366-373.
Zhao Lingling, Zhou Qiangtai, Lü Zhenzhong. Study on flue field and stable combustion of swirl burner[C]. China Doctoral Candidates' Academic Forum, 2004, 8: 366-373(in Chinese).
- [14] 周强泰, 赵伶俐. 旋流燃烧器的花瓣稳燃器[P]. 中国发明专利, 200410041107. 7. 2004.
Zhou Qiangtai, Zhao lingling. Flame petal stabilizer of swirl burner [P]. China Invention Patent, 200410041107. 7. 2004(in Chinese).
- [15] 赵伶俐, 周强泰. 旋流燃烧器的稳燃性能分析[J]. 动力工程, 2005, 25(3): 364-368.
Zhao Lingling, Zhou Qiangtai. Analysis of combustion stability of swirl burner[J]. Power Engineering, 2005, 25(3): 364-368(in Chinese).
- [16] 赵伶俐. 花瓣燃烧器的稳燃性能与应用研究[D]. 南京: 东南大学, 2005.
Zhao Lingling. Study on flame stability and application for petal swirl burner[D]. Nanjing: Southeast University, 2005(in Chinese).

收稿日期: 2006-05-05。

作者简介:

赵伶俐(1979—), 女, 辽宁省盘锦人, 博士, 主要从事锅炉、节能、燃烧及污染控制方面的研究, zhao_lingling@seu.edu.cn;

周强泰(1935—), 男, 广东省阳江人, 教授, 博士生导师, 多年从事锅炉、强化传热、节能的教学和研究。

(编辑 贾瑞君)