

# 预燃室对逆喷旋流煤粉燃烧器流场特性作用研究

牛 芳<sup>1,2,3</sup>

(1.煤科院节能技术有限公司,北京 100013;2.煤炭资源高效开采与洁净利用国家重点实验室,北京 100013;  
3.国家能源煤炭高效利用与节能减排技术装备重点实验室,北京 100013)

**摘要:**煤粉高效低氮燃烧技术是煤炭高效利用领域持续关注的热点。煤粉燃烧器作为煤粉锅炉的核心设备,研究适合多煤种、宽负荷条件的煤粉燃烧器设计原理及技术至关重要。逆喷射流稳燃机理大都应用在航空发动机和燃气轮机领域,在煤粉燃烧领域应用极少。前人大量研究了预燃室对旋流燃烧器流场特性的影响,但鲜见预燃室对逆喷旋流燃烧器流场影响的相关研究。为了探究预燃室对逆喷旋流煤粉燃烧器流场特性的影响规律,笔者针对一款 20 t/h 逆喷旋流燃烧器,基于等温模化原理建立冷态燃烧器模型,利用热线风速仪和飘带法进行了流场测试和分析,结果表明:预燃室的存在不改变逆喷旋流煤粉燃烧器回流区环形的形状,但在逆喷旋流煤粉燃烧器内形成一个有利于煤粉着火的轴向速度低和湍流强度大的回流区。在  $X/D < 1.3$  区域内,由于圆锥形预燃室对气流的挤压作用,预燃室的存在对回流区的面积起到抑制作用;在  $1.3 < X/D < 2.3$  区域内,由于预燃室的导流作用,预燃室的存在对回流区的形成起到促进作用;在  $X/D > 2.3$  区域内,预燃室对燃烧器内部流场的作用减弱,可忽略不计。在预燃室的作用下,回流区最宽处的直径从  $0.97D$  降至  $0.86D$ ,最大相对回流率位置从截面  $X/D=1$  后移到截面  $X/D=1.6$  处,相对回流率从 1.17 减小至 0.99。预燃室的存在对二次风区域内的轴向平均速度和湍流度分布规律影响较大。无预燃室工况下,在  $X/D < 0.6$  区域内,速度和湍流度均出现峰值,在  $X/D > 1.6$  区域内峰值消失,内外二次风完全混合;有预燃室工况下,在  $X/D < 0.6$  区域速度沿着径向方向逐渐增大,湍流度沿着径向方向逐渐减小,在  $X/D > 1.6$  区域,速度和湍流度沿着径向方向分布均匀。预燃室的存在有利于回流区煤粉的稳定燃烧,工程应用中起到煤粉迅速着火以及难燃煤稳定燃烧的作用。另外预燃室壁面气流速度较大,刚性强,避免预燃室壁面超温或结焦现象的发生,延长了煤粉燃烧器无故障运行时间和整体的使用寿命。

**关键词:**预燃室;逆喷旋流燃烧器;烟气回流区;湍流度;轴向速度

中图分类号:TQ021;TK16 文献标志码:A 文章编号:1006-6772(2020)02-0073-05

## Influence of pre combustion chamber on flow characteristics of reverse swirl pulverized coal burner

NIU Fang<sup>1,2,3</sup>

(1.China Coal Research Institute Company of Energy Conservation, Beijing 100013, China; 2.State Key Laboratory of High Efficient Mining and Clean Utilization of Coal Resources, Beijing 100013, China; 3.National Energy Technology & Equipment Laboratory of Coal Utilization and Emission Control, Beijing 100013, China)

**Abstract:** Pulverized coal high-efficiency and low-nitrogen combustion technology is a hot spot in the field of coal utilization. As a core equipment of the pulverized coal boiler, it is very important to study the design principle and technology of pulverized coal burner suitable for multiple coal types and wide load conditions. The mechanism of reverse jet steady combustion is mostly applied in the field of aero-engines and gas turbines, and rarely used in the field of pulverized coal combustion. Therefore, the studies on the influence of the pre-combustion chamber on the flowfield characteristics of the swirl burner are available, however, there are few studies about the influence on the flow field of the reverse-jet swirl burner. In this paper, in order to explore the influence of precombustion chamber on the flow field charac-

收稿日期:2020-02-29;责任编辑:白娅娜 DOI:10.13226/j.issn.1006-6772.20022901

基金项目:煤炭科学技术研究院科技发展基金项目技术创新项目(2018CX02)

作者简介:牛 芳(1986—),女,山东菏泽人,副研究员,从事煤炭清洁高效利用研究。E-mail:nf37@163.com

引用格式:牛芳.预燃室对逆喷旋流煤粉燃烧器流场特性作用研究[J].洁净煤技术,2020,26(2):73-77.

NIU Fang. Influence of pre combustion chamber on flow characteristics of reverse swirl pulverized coal burner[J]. Clean Coal Technology, 2020, 26(2): 73-77.



移动阅读

teristics of a reverse swirl pulverized coal burner, and taking a 20 t/h reverse jet swirling burner as a prototype, a cold burner model was built based on the isothermal modeling principle. Then, with the help of streamer method, the flow field test and analysis were carried out via hot-wire anemometer. The results show that the annular shape of the backflow area will not be changed in the presence of the pre-combustion chamber. By contrast, the recirculation zone, formed within the burner and featured by low axial velocity and high turbulence intensity, is beneficial to pulverized coal ignition. For the area of  $X/D < 1.3$ , the area of backflow area is prohibited due to the existence of pre-combustion chamber, which is connected to the squeezing effect of the conical pre-combustion chamber on the airflow. While for  $1.3 < X/D < 2.3$ , the existence of the pre-combustion chamber promotes the formation of the reflux zone due to the effect of the combustion chamber. In case of  $X/D > 2.3$ , the effect of pre-combustion chamber on the internal flow field can be ignored. The widest part of the recirculation zone is reduced from  $0.97D$  to  $0.86D$  under the action of the pre-combustion chamber. At the same time, the maximum relative recirculation rate is moved from the cross section  $X/D = 1$  to  $1.6$  and the relative recirculation rate is decreased from  $1.17$  to  $0.99$ . The existence of pre-combustion chamber has a great influence on the axial mean velocity and turbulence distribution in the secondary air zone. Under the condition of no pre-combustion chamber, in the region of  $X/D < 0.6$ , the peak values of velocity and turbulence appear; in the region of  $X/D > 1.6$ , the peak values disappear, and the inner and outer secondary air are completely mixed; under the condition of pre-combustion chamber, in the region of  $X/D < 0.6$ , the velocity increases along the radial direction, and the turbulence decreases along the radial direction; in the region of  $X/D > 1.6$ , the velocity and turbulence are evenly distributed along the radial direction. The existence of pre-combustion chamber is beneficial to the stable combustion of pulverized coal in recirculation zone. It plays the role of rapid ignition of pulverized coal and stable combustion of low volatile coal in engineering application. In addition, the over-temperature or coking phenomenon of the pre-combustion chamber will be prevented by the pre-combustion chamber wall with large air velocity and strong rigidity, which is expected to prolong the trouble-free operation time and overall service life of the pulverized coal burner.

**Key words:** pre combustion chamber; reverse swirl pulverized coal burner; recirculation zone; turbulence intensity; axial velocity

## 0 引言

预燃室、旋流、钝体等技术广泛应用在燃气、燃油和燃煤领域,其中预燃室能够为煤粉燃烧提供良好的预热条件,大幅度节约点火和稳燃用油,具有快速稳定着火特性,因此在煤粉工业锅炉中得到广泛应用<sup>[1]</sup>。煤粉旋流燃烧器预燃室稳定火焰机理已开展了大量研究,徐旭常等<sup>[2]</sup>研究表明:针对旋流燃烧器,预燃室气流结构湍流强度较强,有助于风粉混合煤粉着火,增加火焰稳定性;陈迪训等<sup>[3]</sup>研究了贫煤燃烧器内双回流稳燃腔的燃烧特性,发现双回流稳燃腔对于低挥发分煤种具有更好的稳燃和燃尽效果;太原理工大学金燕团队<sup>[4-10]</sup>研发撞击预燃式煤粉燃烧器并针对此款燃烧器的流场分布开展研究。朱建飞等<sup>[4-5]</sup>通过数值模拟方法研究该燃烧器出口的流场分布,发现燃烧器出口回流区长度与二次风速成正比,回流区直径与旋流强度成正比;董小林等<sup>[6-7]</sup>通过冷态试验研究撞击浓缩预燃室煤粉燃烧器的流场特性,发现二次风旋流强度增大会使射流扩展角增大,预燃室壁面易出现结焦现象;王帅等<sup>[8-9]</sup>研究撞击浓缩预燃室煤粉燃烧器的气固两相流动特性,发现二次风进口角度对煤粉颗粒运动轨迹影响较大。李经宽等<sup>[10]</sup>利用数值模拟研究了撞击预燃式煤粉燃烧器的燃烧特性,发现风粉在预燃室内可达  $1\ 300\ \text{K}$ ,有利于劣质煤的稳定燃烧。

煤科院节能技术有限公司自主研发的预燃室逆

喷旋流煤粉燃烧器具有点火迅速、稳定燃烧、节能减排的效果,但煤种适应性差。国内外学者针对预燃室稳燃机理的研究局限于旋流煤粉燃烧器领域,鲜见针对逆喷射流煤粉燃烧器预燃室的稳燃机理研究。为了进一步拓宽煤种适应性,优化预燃室逆喷射流燃烧器,本文采用飘带法<sup>[11]</sup>和热膜热线风速仪<sup>[12]</sup>等冷态试验方法研究在逆向射流和旋流工况下,预燃室对煤粉燃烧器流场的影响规律。

## 1 试验

### 1.1 燃烧器

试验对象为  $20\ \text{t/h}$  预燃室逆喷射流煤粉燃烧器,如图 1 所示,该燃烧器由一次风管、回流帽、内外二次风管以及预燃室组成。一次风携带煤粉经回流帽逆喷进入燃烧器,内二次风道内置角度为  $50^\circ$  的轴向叶片,外二次风为直流风,起到冷却预燃室壁面的作用。

### 1.2 冷态试验台

燃烧器冷态试验模型是基于等温模化原理,将燃烧器缩小  $1:2$  设计。在等温模化过程中须遵循 3 个原则<sup>[13]</sup>:① 模型与原燃烧器的几何结构相似;② 保证模型中的气流进入第二自模化区;③ 保证进入模型的空气动量比与原燃烧器运行中的空气动量比相等。经计算,试验中一次风管、内外二次风管中气流的最低雷诺数分别为  $27\ 416$ 、 $20\ 000$  和  $30\ 049$ ,均大于进入第二自模化区所需的雷诺数。

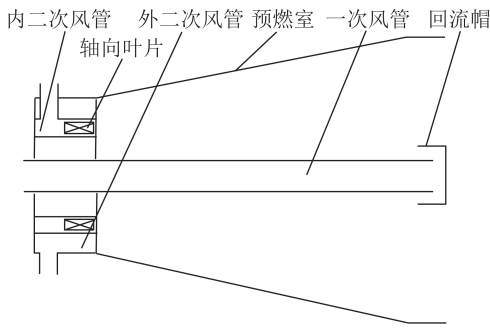


图1 20 t/h 逆喷旋流煤粉燃烧器示意

Fig.1 Structure diagram of the 20 t/h reverse-swirl pulverized coal burner

冷态试验台试验系统由风机、管道、质量流量计、逆喷旋流燃烧器冷态模型以及热线风速仪等组成(图2)。

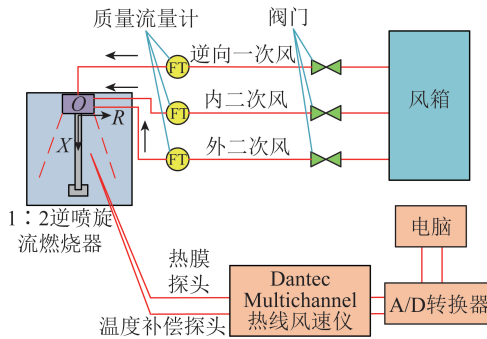


图2 冷态试验系统

Fig.2 Cold test system

### 1.3 测量方法

本试验利用 Dantec Multichannel 热线风速仪<sup>[14]</sup>测量无预燃室和有预燃室2种工况下燃烧器内速度和湍流强度分布。在测量过程中由于风机长时间运转,气流温度与室温会有微小差异,因此用温度探头做温度补偿校正,整个测量过程中速度测量误差在±0.03 m/s以内。利用飘带法测量回流区的形状以及大小<sup>[15]</sup>,飘带网格的距离为0.3 m,测量误差在±0.03 m以内。

### 1.4 试验工况及数据处理

冷态试验工况见表1,A、B分别为无预燃室和有预燃室工况。为了更好地比较A和B两个工况下的流场分布,轴向速度以无量纲形式( $V/V_0$ )表示,其中 $V$ 为测点的测量速度, $V_0$ 为回流帽处的理论

表1 试验工况

Table 1 Experiment conditions

工况	一次风 质量流量/ ( $\text{kg} \cdot \text{s}^{-1}$ )	内二次风 质量流量/ ( $\text{kg} \cdot \text{s}^{-1}$ )	外二次风 质量流量/ ( $\text{kg} \cdot \text{s}^{-1}$ )	一次风、内 二次风与外 二次风量比
A	0.137 50	0.262 9	0.525 0	10 : 19 : 38
B	0.084 67	0.161 9	0.323 7	10 : 19 : 38

平均速度。湍流度  $T$  的计算公式为

$$T = V'/V \quad (1)$$

式中, $V'$ 为测点的湍流脉动速度的均方根。

相对回流率是衡量回流区内相对回流量大小的重要参数<sup>[16]</sup>。本试验相对回流率 $q_{rm}$ 定义为回流区内测量截面上轴向回流流量与该工况下一次风流量的比值,计算公式为

$$q_{rm} = \int_0^{X_{max}} \rho V_a \pi x dx / m_{tpa} \quad (2)$$

式中, $\rho$ 为空气密度, $\text{kg}/\text{m}^3$ ;  $V_a$ 为测量截面上回流区内的轴向平均速度, $\text{m}/\text{s}$ ;  $X_{max}$ 为测量截面上回流区直径, $\text{m}$ ;  $m_{tpa}$ 为一次风的质量流量, $\text{kg}/\text{s}$ 。

## 2 试验结果及分析

回流区的边界、轴向速度分布、湍流强度及相对回流率是评价燃烧器性能的核心指标。测量和分析预燃室对逆喷旋流煤粉燃烧器回流区边界、轴向速度分布、湍流强度及相对回流率具有重要意义。

### 2.1 回流区边界

为定性研究预燃室对回流区的影响规律,特别是确定回流区的区域范围,利用飘带法测量有无预燃室2种工况下的回流区边界,结果如图3所示。可知2种工况下所形成的回流区的整体形状类似环形。在有预燃室工况下,在截面 $X/D=1.4\sim 1.8$ ,回流区直径达到最大 $0.86D$ ;在无预燃室情况下,最宽处直径位置前移至截面 $X/D=0.8$ ,最宽处直径为 $0.97D$ 。在 $X/D<1.3$ 区域内,无预燃室工况的回流区区域大于有预燃室的工况,这是由于预燃室角度较小,抑制气流在径向方向上的发展造成的;在 $1.3 < X/D < 2.3$ 区域,有预燃室工况回流区面积大,这是因为预燃室前期起到导流作用,后期预燃室对气流的挤压作用变弱,气流充分发展造成的;在 $X/D > 2.3$ 区域,预燃室对回流区区域的影响基本可忽略不计,即预燃室对燃烧器流场的作用区域为 $X/D < 2.3$ 。从回流区面积来看,由于预燃室对气流的挤压作用,无预燃室的回流区面积大于有预燃室的回流区面积,

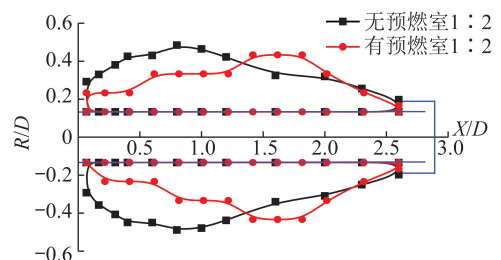


图3 回流区边界

Fig.3 Recirculation zone boundary

但设计煤粉燃烧器时,回流区面积适中最好,因为在考虑煤粉稳定着火的同时应避免回流区面积过大造成预燃室壁面超温或结焦现象发生。

## 2.2 轴向平均速度

为了定量研究燃烧器内部流场分布,本文利用Dantec Multichannel 热线风速仪测量无预燃室和有预燃室2种工况下燃烧器内速度和湍流强度分布。2种工况的轴向无量纲平均速度分布如图4所示,速度为负的区域为回流区。可知在回流区内,2种工况在 $X/D < 0.6$ 区域内,轴向速度沿着径向方向分布均匀,在 $X/D > 0.6$ 区域,轴向速度沿着径向方向逐渐下降。在有预燃室的工况下轴向平均速度值低于无预燃室的工况,这是由于一次风经回流帽逆向进入燃烧器,在预燃室的作用下二次风在径向方向上的速度衰减变弱,轴向速度变大,这是对逆向一次风作用力大造成的;在截面 $R/D = 0.17$ 、 $X/D = 2.6$ 处,2个工况的轴向速度相差较小,这说明预燃室在该区域对回流区内的速度分布影响较小。在二次风区域内, $X/D < 0.6$ 区域,无预燃室工况出现峰值且峰值沿着轴向方向逐渐减小,该峰值主要是由外二次风形成;有预燃室工况的轴向速度沿着径向方向逐渐增大,在预燃室壁面处达到最大值。在 $X/D > 1.6$ 区域内,无预燃室工况峰值消失,有预燃室工况速度分布均匀,均表明内外二次风已经完全混合。

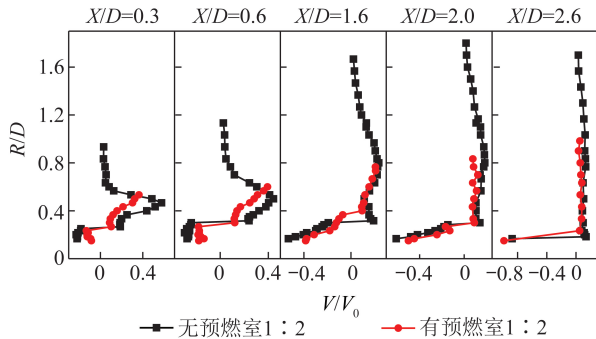


图4 轴向无量纲平均速度

Fig.4 Axial dimensionless mean velocity profiles

## 2.3 湍流强度

2种工况的湍流强度分布如图5所示。可知在回流区内,2种工况下, $X/D < 0.6$ 区域内,湍流强度均沿径向方向分布均匀,在 $X/D > 0.6$ 区域内,湍流强度均沿着径向方向逐渐增大。2种工况对比,有预燃室工况湍流强度显著增加,结合速度分布来看,有预燃室工况形成的回流区具有速度低、湍流强度大等特点。实际工程运行过程中,低速有利于稳定火焰,高湍流强度动量交换强烈有利于风粉混合,无论从流场的速度分布还是从湍流强度来看,预燃室的存在更

有利于煤粉的稳定燃烧。在二次风区域内, $X/D < 0.6$ 区域,有预燃室工况的湍流强度沿着径向方向逐渐降低,射流刚性较强。实际工程运行中,预燃室壁面气流刚性较强有利于保护壁面,避免预燃室高温烧毁或积灰结焦现象的发生。 $X/D > 1.6$ 区域,有预燃室工况湍流强度沿着径向方向有增大趋势,无预燃室工况在截面 $X/D = 2$ 附近分布较为均匀,在截面 $X/D = 2.6$ 附近再次出现峰值。

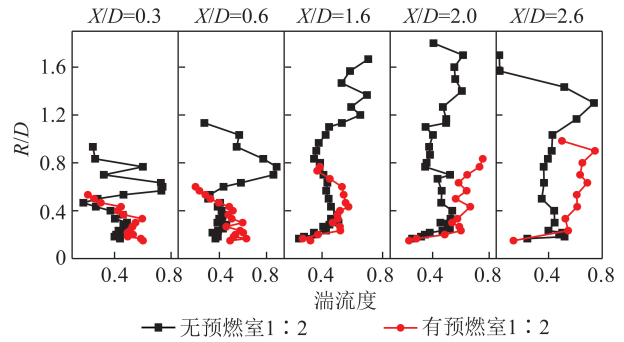


图5 湍流度分布

Fig.5 Turbulence intensity distribution

## 2.4 相对回流率

回流区高温烟气的相对回流率是设计煤粉燃烧器的重要指标。针对2种工况,计算得到相对回流率分布如图6所示。可知有预燃室相对回流率低于无预燃室的工况,有预燃室相对回流率最大值为0.99,而无预燃室的相对回流率最大值为1.17;预燃室相对回流率出现的位置在 $X/D = 1$ 处,而有预燃室的工况相对回流率最大值出现的位置后移至 $X/D = 1.6$ 。这是因为预燃室的圆锥形特殊结构造成的。结合图3和图5可以得出圆锥形预燃室抑制了逆喷旋流燃烧器内回流区的形成。设计燃烧器时应合理控制截面 $X/D = 1.6$ 处的高温烟气回流量,避免预燃室内出现局部高温、预燃室结焦现象的发生。

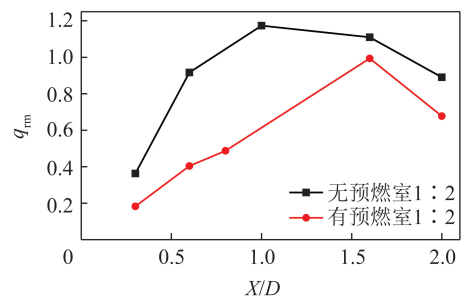


图6 相对回流率分布

Fig.6 Relative reverse flow rate distribution

## 3 结论

1) 预燃室不改变逆喷旋流煤粉燃烧器回流区环形的形状,预燃室对 $X/D < 1.3$ 区域的后回流区起到

抑制作用,对  $1.3 < X/D < 2.3$  区域起到促进作用,对  $X/D > 2.3$  区域的影响可忽略不计。在预燃室的作用下,回流区最宽处的直径从  $0.97D$  降低到  $0.86D$ ,最大相对回流率位置从截面  $X/D = 1$  后移到截面  $X/D = 1.6$  处,相对回流率从 1.17 减小至 0.99。

2) 预燃室对二次风区域内的轴向平均速度和湍流度分布规律影响较大。无预燃室工况下,在  $X/D < 0.6$  区域内,速度和湍流度均出现峰值,在  $X/D > 1.6$  区域内峰值消失,内外二次风完全混合;有预燃室工况下,在  $X/D < 0.6$  区域速度沿着径向方向逐渐增大,湍流度沿着径向方向逐渐减小,在  $X/D > 1.6$  区域,速度和湍流度沿着径向方向分布均匀。

3) 由于预燃室作用,逆喷旋流煤粉燃烧器回流区具有轴向速度较低和湍流度大等特点,实际运行中利于煤粉稳定燃烧;且预燃室壁面气流速度较大,刚性强,避免预燃室壁面超温或结焦现象发生。

## 参考文献 (References):

[1] 徐旭常,张以仁.煤粉预燃室燃烧器的试验研究[J].动力工程,1983(1):19-23.  
XU Xuchang,ZHANG Yiren.Experimental investigation of pulverized coal burner with a precombustion chamber[J].Power Engineering,1983(1):19-23.

[2] 徐旭常,王云山,金茂庐,等.关于煤粉火焰稳定性和煤粉预燃室及火焰稳定船的作用[J].工程热物理学报,1988,9(4):88-93.  
XU Xuchang,WANG Yunshan,JIN Maolu,et al.On pulverized coal flame stabilization and functions of precombustion and flame stabilization boat[J].Journal of Engineering Thermophysics,1988,9(4):88-93.

[3] 陈迪训,邱纪华.双回流稳燃腔的实验研究[J].华中科技大学学报(自然科学版),1990,18(6):119-123.  
CHEN Dixun,QIU Jihua.An experimental investigation of a stabilizing combustion cavity with twin reflow zones[J].Journal of Huazhong University of Science and Technology(Natural Science Edition),1990,18(6):119-123.

[4] 朱建飞,徐衡,乔晓磊,等.撞击预燃式煤粉燃烧器优化研究[J].煤炭转化,2013,36(3):51-54.  
ZHU Jianfei,XU Heng,QIAO Xiaolei,et al.Optimizing study on pulverized coal burner with bumping separator and pre-ignition[J].Coal Conversion,2013,36(3):51-54.

[5] 朱建飞.撞击预燃式煤粉燃烧器冷态流场特性数值模拟与实验研究[D].太原:太原理工大学,2013.  
ZHU Jianfei.Experimental and numerical studies on flow field of a coal burner with bumping separator and pre-ignition[D].Taiyuan:Taiyuan University of Technology,2013.

[6] 董小林.撞击预燃室煤粉燃烧器的结构优化研究[D].太原:太原理工大学,2014.

DONG Xiaolin.Study on the structure optimization of impact pre-combustion chamber pulverized coal burner[D].Taiyuan:Taiyuan University of Technology,2014.

[7] 董小林,樊保国,徐衡,等.撞击浓缩预燃室煤粉燃烧器结构优化研究[J].电站系统工程,2014,30(3):42-47.  
DONG Xiaolin,FAN Baoguo,XU Heng,et al.Structure optimization research on impact precombustion chamber pulverized coal burner[J].Power System Engineering,2014,30(3):42-47.

[8] 王帅,樊保国,刘海玉,等.撞击预燃室煤粉燃烧器气固两相流特性研究[J].热能动力工程,2016,31(11):43-49.  
WANG Shuai,FAN Baoguo,LIU Haiyu,et al.Gas-solid two-phase flow characteristics of the pulverized coal burner with impinging pre-combustion chamber[J].Journal of Engineering for Thermal Energy and Power,2016,31(11):43-49.

[9] 王帅.撞击预燃室煤粉燃烧器气固两相流研究及燃烧模拟[D].太原:太原理工大学,2016.  
WANG Shuai.Study on gas-solid two-phase flow and combustion simulation on impact pre-combustion chamber pulverized coal burner[D].Taiyuan:Taiyuan University of Technology,2016.

[10] 李经宽,王帅,刘海玉,等.撞击预燃室煤粉燃烧器燃烧特性数值模拟[J].电站系统工程,2016,32(5):1-4.  
LI Jingkuan,WANG Shuai,LIU Haiyu,et al.Combustion simulation of pre-combustion chamber pulverized coal burner[J].Power System Engineering,2016,32(5):1-4.

[11] 李劲,赵惠富.逆向射流火焰稳定机理的研究[J].中国科学(技术科学),1997,27(6):504-509.  
LI Jin,ZHAO Huifu.Study on flame stabilization mechanism of reverse jet[J].Science in China(Technical Science),1997,27(6):504-509.

[12] ELBAZ A M,ROBERTS W L.Investigation of the effects of quarl and initial conditions on swirling non-premixed methane flames: Flow field,temperature,and species distributions[J].Fuel,2016,169:120-134.

[13] LI S,CHEN Z,LI X,et al.Effect of outer secondary-air vane angle on the flow and combustion characteristics and  $\text{NO}_x$  formation of the swirl burner in a 300 MW low-volatile coal-fired boiler with deep air staging[J].Journal of the Energy Institute,2016,90(2):239-256.

[14] WEI K,TAO Z,YOU R,et al.Development of a turbulent boundary layer in a rotating square cross-section channel with relatively high local rotation parameter[J].Experimental Thermal and Fluid Science,2017,86:85-97.

[15] TI S,CHEN Z,LI Z,et al.Influence of primary air cone length on combustion characteristics and  $\text{NO}_x$  emissions of a swirl burner from a 0.5 MW pulverized coal-fired furnace with air staging[J].Applied Energy,2018,211:1179-1189.

[16] 徐斌.中心给粉旋流煤粉燃烧器在 300 MW 锅炉的应用及试验研究[D].哈尔滨:哈尔滨工业大学,2007.  
XU Bin.Application and experimental study of the central-fuel-rich swirl coal combustion burner in a 300 MW utility boiler[D].Harbin:Harbin Institute of Technology,2007.