

# 煤粉高温富氧无油点火的优化设计研究

刘国伟 张 燕 董 芃 别如山

(哈尔滨工业大学 能源科学与工程学院 黑龙江 哈尔滨 150001)

**摘 要:** 设计了一种煤粉高温富氧无油点火装置,利用高温氧气与高浓度煤粉气流的混合直接点燃煤粉,进而取代油枪,实现煤粉的无油点火。通过冷态流场测定实验对点火装置进行了结构优化,并以此为基础,对煤粉高温富氧无油点火进行了数值模拟。结果表明:煤粉高温富氧无油点火装置采用三角形导流锥,中心管喷口扩口半角取  $15^\circ$ ,高温氧气通道喷口扩口半角取  $25^\circ$  时组织的流场状况较好;点火装置形成的富氧燃烧高温火炬温度最高可在  $3\ 000\ \text{K}$  上,烟气平均温度可在  $2\ 000\ \text{K}$  以上,能有效保证主燃烧器的顺利点火。

**关 键 词:** 无油点火; 点火装置; 高温氧气; 结构优化; 数值模拟

中图分类号: TK223.2 文献标识码: A

## 引 言

劣质煤的大量使用是我国当前动力用煤的现状,为此在我国常规电站煤粉锅炉的运行过程中要耗费大量的燃油<sup>[1]</sup>。这些燃油的消耗主要有两种途径:一是在锅炉启动点火过程中,帮助锅炉达到稳定的燃烧工况,另一个是帮助锅炉实现低负荷稳燃,以防发生熄火事故<sup>[2]</sup>。而近年来随着燃油价格的不断升高,减少锅炉启动及低负荷稳燃用油以降低发电成本已成为发电企业的共识<sup>[3]</sup>。因此,各类无油点火技术的发展受到了广泛的关注。目前,我国现有的煤粉无油直接点火技术主要有等离子点火<sup>[4-6]</sup>、高温热壁点火和高温空气点火等<sup>[7-16]</sup>。

富氧燃烧技术由于具有着火温度低、燃烧强度高、燃烧温度高等优点,一直是人们关注和研究的热点。近年来,随着新型制氧技术的逐步成熟<sup>[17-20]</sup>,制氧的成本大大降低,富氧燃烧技术在大型煤粉锅炉的点火上应用也越来越多。但是,现有的应用和研究大都是将富氧燃烧技术与油点火技术相结合,即用小油枪点火后用富氧气体助燃,就其点火方式而言,依然是油点火。

针对以上的情况,研究设计了一种煤粉高温富

氧无油点火装置,利用高温氧气与高浓度煤粉气流的混合直接点燃煤粉,进而彻底取代油枪,实现煤粉的无油点火。与此同时,通过冷态流场测定实验对点火装置结构进行了优化设计,以此为基础,对煤粉高温富氧无油点火进行了数值模拟。

## 1 点火装置的介绍

研究设计的煤粉高温富氧无油点火装置功率为  $0.5\ \text{MW}$ ,可分为中心管煤粉气流通道和高温氧气通道两大部分,其具体结构如图 1 所示。在应用过程中,点火装置可根据需要安装在主燃烧器中心位置或倾斜地插在主燃料喷口旁。

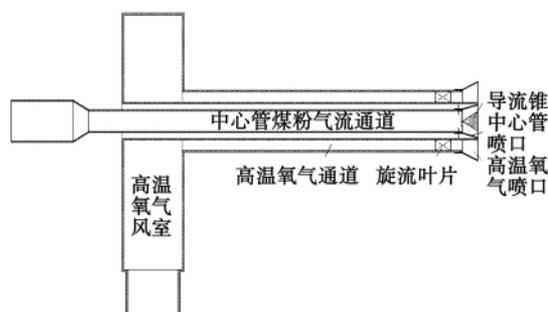


图 1 煤粉高温富氧无油点火装置示意图  
Fig. 1 Schematic drawing of a high temperature oxygen-enriched oil-free pulverized coal ignition device

煤粉高温富氧无油点火的具体过程为:首先,高浓度煤粉气流(空气送粉)从中心管煤粉气流通道以直流方式吹出,并在喷口和导流锥的作用下沿周向扩散;之后,高温氧气(约  $850\ ^\circ\text{C}$ )通过高温氧气通道以旋流方式吹出,与中心管煤粉气流相混合;随着混合的进行,煤粉气流温度不断升高,煤粉气流中氧气份额不断增大,煤粉着火温度相应下降,直到在某一位置,煤粉气流达到其着火温度,煤粉气流被点

收稿日期: 2010-10-19; 修订日期: 2011-02-23

作者简介: 刘国伟(1982-),男,黑龙江肇东人,哈尔滨工业大学博士研究生。

燃,点火装置成功点火;最后,利用点火装置形成的富氧燃烧高温火炬点燃主燃烧器。

## 2 点火装置结构优化

结合点火装置的结构特点分析,有效地组织流场使之形成面积较大、形状合理的回流区是保证中心管煤粉气流能与高温氧气充分混合继而成功实现点火的关键。因此,按 1:1 比例搭建了点火装置实验台,利用热线风速仪对点火装置冷态流场进行了测定,以此为依据对点火装置结构进行了优化设计。

### 2.1 导流锥形式的影响

分别在无导流锥和使用十字型导流锥、船型导流锥、三角形导流锥 4 种情况下,对点火装置流场中心截面上回流区的变化情况进行了测定。

表 1 流场中回流区的最大宽度和长径比

Tab.1 Maximal width and aspect ratio of the return flow zone in the flow field

	最大宽度/mm	长径比
无导流锥	200	1.75
十字型导流锥	175	1.77
船型导流锥	275	1.6
三角形导流锥	260	1.38

结果表明:无导流锥和使用十字型导流锥时,流场中形成的回流区都比较小,中心管煤粉气流与外侧氧气流混合情况比较差,不能满足点火装置的技术要求;使用船型或三角形导流锥时,流场中可以形成面积较大的回流区,且在回流区边界附近的较大区域内湍流脉动值较大,说明中心管煤粉气流与外侧氧气流混合情况良好。与使用船型导流锥时相比,使用三角形导流锥时流场中回流区的长径比较小,回流区形状更为合理,因此点火装置宜采用三角形导流锥。

### 2.2 中心管喷口扩口角度的影响

在使用扩口半角角度分别为  $0^\circ$ 、 $5^\circ$ 、 $10^\circ$ 、 $15^\circ$ 、 $20^\circ$ 、 $25^\circ$  种中心管喷口情况下,对点火装置中心截面上的流场进行了测定,结果如图 2 和图 3 所示。

当中心管喷口扩口半角等于  $15^\circ$  时流场中回流区的宽度最大,形状(长径比)也最为合理。分析可知,由于中心管导流锥为正圆锥,其顶角等于  $60^\circ$ ,当中心管喷口扩口半角小于  $30^\circ$  时,中心管喷口处实际上为一渐缩段,煤粉气流在中心管喷口处因为流通截面积的不断缩小而存在一加速过程,进而使

煤粉气流和氧气流的混合得到加强,同时也为回流区的形成提供了有利的条件,而在扩口半角约为  $15^\circ$  时,这一效果最为明显。而当中心管喷口扩口角度进一步减小时,喷口出口处的截面积会变得过小,使得该处的局部阻力过大,影响到了煤粉气流的正常输出,反而导致回流区面积减小。

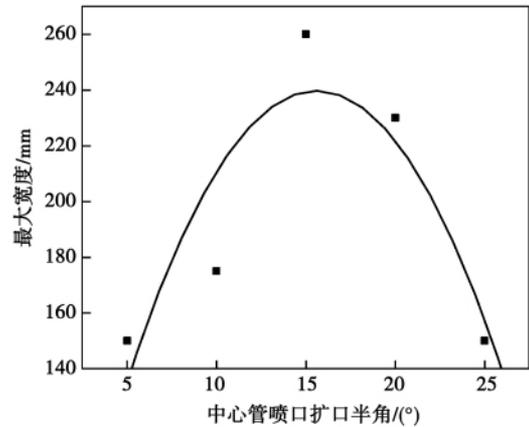


图 2 中心管喷口角度对回流区最大宽度的影响  
Fig.2 Effect of the angle of the spout of the central tube on the maximal width of the return flow zone

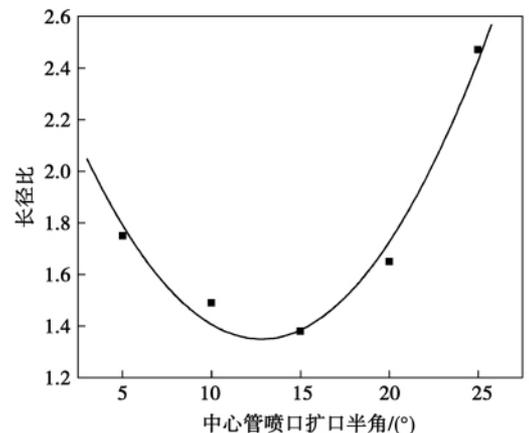


图 3 中心管喷口角度对回流区长径比的影响  
Fig.3 Effect of the angle of the spout of the central tube on the aspect ratio of the return flow zone

### 2.3 高温氧气通道喷口扩口角度的影响

在使用扩口半角分别为  $0^\circ$ 、 $5^\circ$ 、 $10^\circ$ 、 $15^\circ$ 、 $20^\circ$ 、 $25^\circ$ 、 $30^\circ$  7 种高温氧气通道喷口情况下,对点火装置中心截面上的流场进行了测定,结果如图 4 和图 5 所示。

实验发现,当高温氧气通道喷口为直喷口(即扩口半角为零)时,中心管煤粉气流与氧气流的混

合区域整体上沿中心管轴向呈条带状分布,沿周向的扩展很小,流场中没有形成明显的回流区。这一状况无疑是不理想的。当采用带一定扩口角度的喷口后,流场状况得到了明显改善:随着扩口角度的增大,混合区域沿周向的扩展随之增大,在喷口附近出现了明显的回流区,且回流区域面积随扩口角度的增大而增大。另外还发现,扩口角度对流场回流区形状的影响较大:流场回流区长径比随扩口角度增大而急剧缩短。而当扩口角度增大到某一值(30°)时,旋流氧气流会“突变”为开放气流,完全与中心管煤粉气流分离,流场中回流区完全消失。因此,在本研究点火装置上,比较合理的高温氧气通道喷口扩口半角角度为 25°。

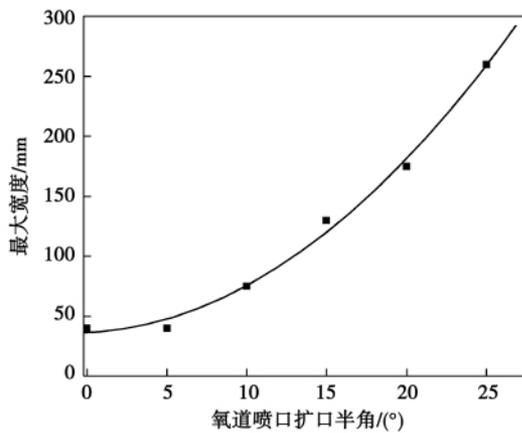


图 4 氧道喷口角度对回流区最大宽度的影响  
Fig. 4 Effect of the angle of the spout of the oxygen passage on the maximal width of the return zone

### 3 数值模拟与分析

#### 3.1 网格划分和模型选取

根据点火装置的结构特点,采用非结构化网格对计算区域进行网格划分,并在存在较强旋流的高温氧气通道部分对网格进行了加密。

采用 SIMPLE 算法求解  $N-S$  方程,采用可实现  $k-\epsilon$  模型模拟气相湍流流动,采用拉格朗日法追踪颗粒运动轨迹,采用双平行反应速率模型(即双反应竞争模型)和 PDF 模型(概率密度模型)模拟挥发份析出、燃烧过程,采用动力/扩散表面反应速率模型模拟焦炭颗粒燃烧,采用 P-1 模型对炉内辐射换热进行模拟。

#### 3.2 煤粉着火的判断

考虑到所研究的是稳态燃烧过程,选择采用温

度跃变作为判断煤粉着火与否的依据,即当气流温度发生跃变时,认为煤粉开始着火。具体来讲,可用公式  $dT/dx > 0$  和  $d^2T/dx^2 \geq 0$  对煤粉着火对应的气流温度跃变加以判断。与之对应,使用温度跃变处所对应的轴向坐标作为着火距离的确定依据。

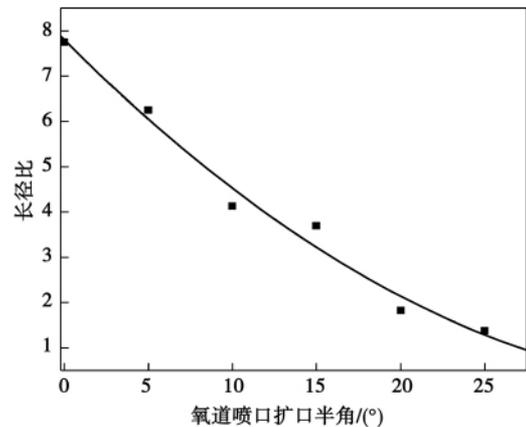


图 5 氧道喷口角度对回流区长径比的影响  
Fig. 5 Effect of the angle of the spout of the oxygen passage on the aspect ratio of the return flow zone

#### 3.3 模拟结果分析

根据点火装置的设计参数,以高温氧气旋流强度为 4.66、高温氧温度为 1 123 K、煤粉气流速度为 15 m/s、煤粉气流温度为 373 K、煤粉浓度为 0.8 kg/kg 为典型工况。其中,使用的煤种为烟煤,颗粒的粒径范围为 35 ~ 100  $\mu\text{m}$ ,服从 Rosin-Rammler(罗森-拉姆勒)分布,即:

$$R(d_k) = \exp[-(d_k/\bar{d})^n]$$

式中:  $R(d_k)$ —尺寸大于  $d_k$  颗粒占有所有颗粒群的质量百分数;  $\bar{d}$ —颗粒的平均尺寸;  $n$ —实验常数。

图 6 给出了典型工况条件下点火装置轴向中心截面上的流场温度分布。从图中可以看到,煤粉气流在点火装置中心管喷口正前方首先着火;在煤粉燃烧放热和高温氧气流共同的加热作用下,整体煤粉气流全部被点燃,最终在点火装置喷口附近沿轴向形成了一个持续的高温燃烧区。

图 7 给出了点火装置在中心管轴线方向上的烟气温度分布。从中可以看出,流场中烟气温度随着与喷口轴向距离的增大而不断升高,并且升高过程可被分为一个跃变式增长段和两个缓慢增长段。第一个缓慢增长段位于距离中心管喷口 100 mm 以内,这一阶段为煤粉着火预备段,在这一阶段中,温

度较低的煤粉气流受到来自于炉内的气体和火焰的加热作用而不断升温,但由于煤粉自身还未发生着火放热,升温的速率相对缓慢;之后的跃变式增长段出现在距离中心管喷口 100 ~ 200 mm 处,这是煤粉气流发生着火的阶段,在这一阶段中,随着煤粉燃烧大量化学热的释放,流场中烟气被加热,迅速从 600 K 升温至 1 500 K 以上;而当距离中心管喷口超过 200 mm 以后,烟气的升温速率再次下降,进入了第二个缓慢增长段,最终流场中烟气温度维持在 2 000 K 左右。

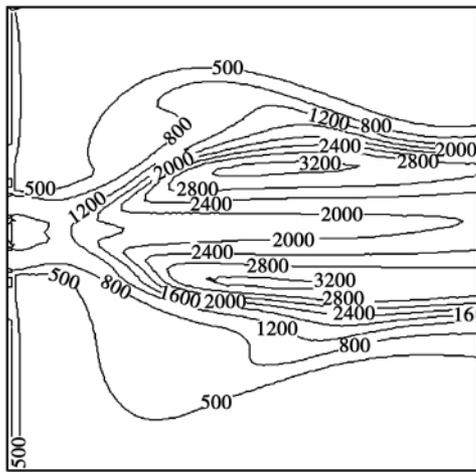


图 6 截面温度分布 (K)

Fig. 6 Temperature distribution in a section

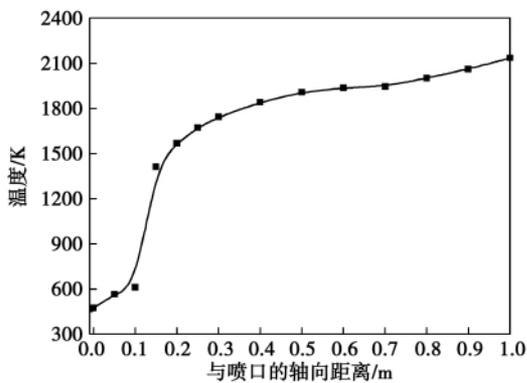


图 7 中心管轴线方向上的烟气温度分布

Fig. 7 Flue gas temperature distribution along the axial line of the central tube

图 8 给出了距离中心管喷口  $L$  处垂直于中心管轴线方向上的烟气温度分布。从图中可以看出,在  $L = 100$  mm 时,垂直于中心管轴线方向上的烟气温度只在中心管轴线附近略有升高,不同位置间温度变化很小,说明此处煤粉尚未着火;在  $L = 200$  mm

时,中心管轴线附近的温度则明显高于其它区域,说明在该处煤粉气流首先在中心管轴线附近发生着火;而在  $L$  大于 400 mm 后,在中心管轴线两侧则出现了两个烟气温度的峰值,且其值要远远高于中心管轴线上的烟气温度值,达到了 3 000 K 以上,这说明此时流场的“燃烧中心区”并不位于中心管轴线上,而是位于中心管轴线位置的两侧(即空间上位于环绕中心管轴线的周向位置),出现这一现象的主要原因是:虽然煤粉气流是在点火装置中心管喷口正前方首先开始着火的,但是由于中心管喷口的导流作用和旋流高温氧气的卷吸作用,煤粉的富集区域,即煤粉浓度最高的区域,却并不位于中心管轴线上,而是位于中心管轴线位置的两侧,因此,整个煤粉气流被点燃后,受到高煤粉浓度和高氧气浓度的影响,位于中心管轴线位置两侧的煤粉富集区域成为了整个流场的“燃烧中心区”。

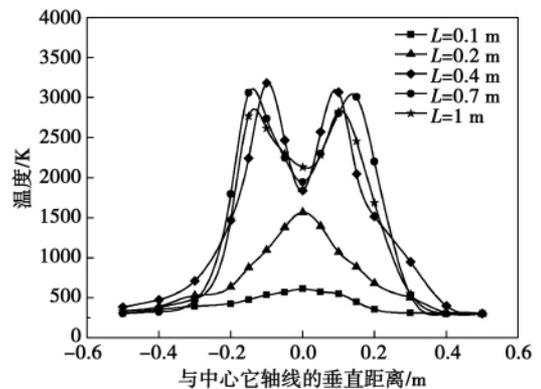


图 8 垂直于中心管轴线方向上的烟气温度分布

Fig. 8 Flue gas temperature distribution perpendicular to the axial line direction of the central tube

#### 4 结 论

(1) 煤粉高温富氧无油点火装置采用三角形导流锥、中心管喷口扩口半角取  $15^\circ$ , 高温氧气通道喷口扩口半角取  $25^\circ$  时组织的流场状况较好;

(2) 在煤粉高温富氧无油点火中,煤粉气流在点火装置喷口正前方首先开始着火,但是整个流场的“燃烧中心区”并不位于中心管轴线上,而是位于中心管轴线位置的两侧;

(3) 在煤粉高温富氧无油点火中,点火装置形成的富氧燃烧高温火炬温度最高可达 3 000 K 以上,烟气平均温度可达 2 000 K 以上,可有效保证主燃烧器的顺利点火。

## 参考文献:

- [1] 康志忠,孙保民. 高温空气点火在 200 MW 机组锅炉中的应用[J]. 中国电机工程学报, 2009, 29(14): 18-23.  
KANG Zhi-zhong, SUN Bao-min. Application of high temperature air ignition in 200 MW utility boilers [J]. Proceedings of CSEE, 2009, 29(14): 18-23.
- [2] 李文蛟,姚强,周俊虎,等. 煤粉直接点火燃烧器技术及其进展[J]. 热能动力工程, 1999, 14(9): 327-329.  
LI Wen-jiao, YAO Qiang, ZHOU Jun-hu, et al. Pulverized coal direct ignition burner technology and its advances [J]. Journal of Engineering for Thermal Energy and Power, 1999, 14(9): 327-329.
- [3] 王正华,张珊. 电站锅炉点火油系统节油技术应用展望[J]. 湖南电力, 2009, 29(3): 60-62.  
WANG Zheng-hua, ZHANG Shan. Prospects of the application of oil-saving technologies for utility boiler ignition oil systems [J]. Hunan Power, 2009, 29(3): 60-62.
- [4] 张孝勇,王雨蓬,郭永红,等. HM 型等离子燃烧器多级燃烧特性数值模拟[J]. 中国电机工程学报, 2006, 26(4): 60-65.  
ZHANG Xiao-yong, WANG Yu-peng, GUO Yong-hong, et al. Numerical simulation of HM type plasma burner multi-stage combustion characteristics [J]. Proceedings of CSEE, 2006, 26(4): 60-65.
- [5] Belosevic S, Sijercic M, Stefanovic P. A numerical study of pulverized coal ignition by means of plasma torches in air-coal dust mixture ducts of utility boiler furnaces [J]. International Journal of Heat and Mass Transfer, 2008, 51(7-8): 1970-1978.
- [6] Gururajan V S. Mechanisms for the Ignition of Coal Particles [J]. Combustion and Flame, 1990, 81: 71-78.
- [7] 周俊虎,石伟,周志军,等. 煤粉浓度对煤粉高温热壁点火影响的试验研究[J]. 中国电机工程学报, 2003, 23(7): 208-211.  
ZHOU Jun-hu, SHI Wei, ZHOU Zhi-jun, et al. Experimental study of the influence of the pulverized coal concentration on pulverized coal high temperature hot-wall ignition [J]. Proceedings of CSEE, 2003, 23(7): 208-211.
- [8] Zhang D, Wall T F. An analysis of the ignition of coal dust clouds [J]. Combustion and Flame, 1993, 97: 475-480.
- [9] 康志忠,张伟,郭永红,等. 高温空气煤粉直燃技术的数值模拟[J]. 工程热物理学报, 2006, 27(2): 163-166.  
KANG Zhi-zhong, ZHANG Wei, GUO Yong-hong, et al. Numerical simulation of the high-temperature air pulverized coal direct combustion technology [J]. Journal of Engineering Thermophysics, 2006, 27(2): 163-166.
- [10] 聂欣,周志军,吕明,等. 煤粉气流在高温空气中着火与熄火的试验研究[J]. 中国电机工程学报, 2008, 28(14): 67-72.  
NIE Xin, ZHOU Zhi-jun, LU Ming, et al. Experimental study of pulverized coal gas flow ignition and extinguishment in high temperature air [J]. Proceedings of CSEE, 2008, 28(14): 67-72.
- [11] Gupta R P. Ignition temperature of pulverized coal particles: experimental techniques and coal-related influences [J]. Combustion and Flame, 1990, 79: 569-578.
- [12] Srdjan Belosevic, Miroslav Sijercic, Perdrag Stefanovic. A numerical study of pulverized coal ignition by means of plasma torches in air-coal dust mixture ducts of utility boiler furnace [J]. International Journal of Heat and Mass Transfer, 2008, 51(7-8): 1970-1978.
- [13] 冯武军,李栋. 高温空气煤粉点火的试验研究[J]. 煤炭学报, 2004, 29(5): 611-613.  
FENG Wu-jun, LI Dong. Experimental study of pulverized coal ignition by utilizing high-temperature air [J]. Journal of Coal, 2004, 29(5): 611-613.
- [14] 张怀远,孙保民,康志忠. 高温空气多级点火燃烧器热态数值模拟[J]. 电站系统工程, 2008, 24(4): 29-42.  
ZHANG Huai-yuan, SUN Bao-ming, KANG Zhi-zhong. Hot-state numerical simulation of a high-temperature air multi-stage ignition burner [J]. Power Plant System Engineering, 2008, 24(4): 29-42.
- [15] 聂欣,周俊虎,吕明,等. 新型高温空气加热器的试验研究[J]. 热力发电, 2008, 37(8): 9-12.  
NIE Xin, ZHOU Jun-hu, LU Ming, et al. Experimental study of a new type high-temperature air heater [J]. Thermal Power Generation, 2008, 37(8): 9-12.
- [16] 聂欣,周俊虎,汪洋,等. 我国电站锅炉煤粉直接点火技术的发展以及现状[J]. 热能动力工程, 2008, 23(4): 333-337.  
NIE Xin, ZHOU Jun-hu, WANG Yang, et al. Development and status quo of utility-boiler pulverized coal direct ignition technologies in China [J]. Journal of Engineering for Thermal Energy and Power, 2008, 23(4): 333-337.
- [17] Tondeur D, Wankat P C. Gas purification by pressure swing adsorption [J]. Separation and Purification Methods, 1985, 14(2): 157-212.
- [18] Yoshida S, Kamioka K. Study of zeolite molecular sieves for production of oxygen by using pressure swing adsorption [J]. Adsorption, 1999(5): 57-61.
- [19] Yoshida S, Hirano S, Harada A. Nitrogen adsorption properties of cubic and orthorhombic Li-exchanged low silica X [J]. Microporous and Mesoporous Materials, 2001, 46: 203-209.
- [20] Shen D M, Bulow M, Jale S R. Thermodynamics of nitrogen and oxygen sorption on zeolites LiLSX and CaA [J]. Microporous and Mesoporous Materials, 2001, 48: 211-216.

(陈滨 编辑)

煤粉高温富氧无油点火的优化设计研究 = **Study of the Optimized Design of High Temperature Oxygen-enriched Oil-free Ignition of Pulverized Coal** [刊, 汉] LIU Guo-wei, ZHANG Yan, DONG Peng, BIE Ru-shan ( College of Energy Science and Engineering, Harbin Engineering University, Harbin, China, Post Code: 150001) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. -2012 27( 1) . -66 ~70

Designed was a pulverized coal high temperature oxygen-enriched oil-free ignition device. It utilizes the mixture of high temperature oxygen and high concentration pulverized coal to directly ignite the pulverized coal and to replace the oil gun, thus realizing an oil-free ignition of pulverized coal. Through a cold-state flow field measurement test, the device under discussion was structurally optimized. On this basis, a numerical simulation of the high temperature oxygen-enriched oil-free ignition of pulverized coal was performed. The research results show that when the device adopts a triangular flow guiding cone, the semi-angle of the spout flaring of the central tube is set at 15 degrees and that of the spout flaring of the high temperature oxygen passage is set at 25 degrees, the conditions in the flow field thus organized is relatively good. The temperature of the high temperature torch of the oxygen-enriched combustion formed by the device can be as high as 3000 K and above, and the average temperature of the flue gas can reach over 2000 K, thus effectively guaranteeing a successful ignition of the main burner. **Key words:** oil-free ignition, ignition device, high temperature oxygen, structural optimization, numerical simulation

循环流化床锅炉中飞灰颗粒孔隙结构的实验研究 = **Experimental Study of the Pore Structure of the Flying Ash Particles in a CFB Boiler** [刊, 汉] JIN Yan, LIU Juan-juan, QIAO Xiao-lei, FENG Cui-ying ( College of Electrical and Power Engineering, Taiyuan University of Science and Technology, Taiyuan, China, Post Code: 030024) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. -2012 27( 1) . -71 ~75

The experimental study was conducted with the help of a nitrogen adsorption device and a scanning electronic microscope ( SEM). The pore structure of the flying ash particles in a CFB boiler was comprehensively analyzed from the specific features and characteristics in the isothermal adsorption/desorption curves, hysteresis loop and pore distribution etc. various aspects. During the sifting test and carbon content determination, the flying ash carbon content of the boiler was obtained, of which the peak value appeared in the particle diameter in a range of 45 - 25  $\mu\text{m}$ . The carbon adsorption test results show that the adsorption isotherms of the flying ash in various parts of the particle diameters are approximately the Category II, the pore distribution of the flying ash is very wide and the most possible radius is about 2 nm. Among them, the medium sized pores dominate, basically reaching 60% and above. However, no micro pores are found. The large and medium sized pores are mainly of cone, parallel plate slot and ink bottle-shaped type. **Key words:** CFB boiler, flying ash, nitrogen isothermal adsorption, pore structure