

适用于无烟煤燃烧的新型涡流拱特性的研究

庄正宁, 朱长新, 唐桂华, 曹子栋

(西安交通大学 能动学院 热能工程系, 陕西 西安 710049)

摘要: 提出一种能够用于链条炉燃用无烟煤的涡流拱新技术。通过模化试验对涡流拱特性进行了试验研究, 分析了其工作机理, 获得确定涡流拱最佳结构尺寸的要素。结果表明, 涡流拱能有效地增加后拱气流向前拱的卷吸输送量, 有助于提高前拱温度。在首次应用实践中, 对于燃用 III 类末煤型无烟煤的炉膛能够及时着火、强化燃烧, 取得了满意效果。

关键词: 层燃炉; 无烟煤; 涡流拱; 强化燃烧

中图分类号: TK229.91 文献标识码: A

1 引言

在广泛应用的工业锅炉中, 绝大多数采用火床燃烧设备, 其中链条炉排的燃烧方式占了统治地位。我国煤炭品种繁多, 煤质复杂, 且工业锅炉用原煤细末含量高, 故给层燃炉燃烧带来各种困难。近十年来, 在广大科技工作者的努力下, 采取了多种综合改进措施, 尤其是对传统炉拱的改造, 在链条炉燃用劣质煤方面取得了明显的成果。但是对全部燃用低挥发分的无烟煤还缺乏行之有效的办法。无烟煤是煤龄最长、碳化程度最深、挥发分最低的煤种。该煤种燃烧化学反应性能差, 热传导能力低, 燃烧不稳定, 燃尽程度差。尤其是着火特别困难, 通常着火温度在 $900\text{ }^{\circ}\text{C}$ 以上^[1], 这是要解决无烟煤燃烧的关键问题。为解决这一难题, 一般采用压低后拱倾角并向前延伸的方法, 但传统炉拱在前拱下存在一个烟气回流区, 阻止后拱烟气的有效输入; 也有采用空气预热器, 抽吸高温烟气送入前拱区, 以及炉拱表面涂刷高温远红外辐射涂层等辅助性措施, 但这需要增加设备和能耗, 且易受炉拱表面灰渣污染的影响。上述方法均是为了增加向前拱区输送的热量, 提高前拱表面温度。但由于受到传统炉拱布置方式的限制, 不能从根本上解决高温烟气向前拱的有效输送, 其成效并不明显。

为解决链条炉全燃无烟煤及时着火, 稳定燃烧和充分燃尽等问题, 提出一种全新的炉拱布置型式, 即涡流拱。模化试验和锅炉运行实践表明, 涡流拱

比传统拱向前拱输送高温烟气的能力有较大幅度的增加, 起到了使无烟煤适时着火的作用, 为解决无烟煤燃烧提供了一条新思路。

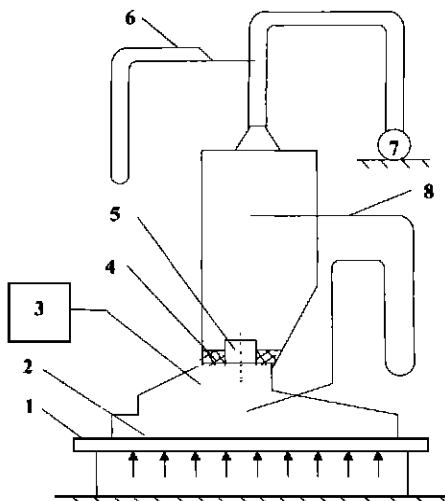
2 涡流拱

涡流拱的理论基础是涡动力学。涡动力学^[2~3]及文献[4]指出, 轴对称通道可以诱发上游大空间中流体的运动, 形成自由涡。自由涡作用于涡外粘性流体, 使其产生旋转运动, 形成一对大尺度的可控涡流场。基于这种理论, 可以将传统前后拱之间的喉口处全部用耐火材料覆盖住, 在合适的位置沿炉膛宽度开两个孔作为烟气通道, 这种新的炉拱布置型式称之为涡流拱。涡流拱可以将炉拱下无序紊流场整理成有序涡流场, 提供了向前拱输送烟气的通道, 它有如下优点: (1) 可控涡流场可以有效地将旺盛燃烧区的高温烟气和炽热碳粒卷吸输运到前拱区, 提高前拱温度, 供给新燃料及时引燃所需的热量; (2) 涡流拱增大炉拱对炉排的覆盖面积, 提高燃烧室的绝热程度, 有助于强化燃烧; (3) 烟气的旋转运动延长了烟气中可燃气体和含碳颗粒在高温区的燃尽时间, 可以部分分离烟气中的固体颗粒, 减少机械不完全燃烧和化学不完全燃烧热损失, 以及离开燃烧室烟气中的飞灰携带量, 减轻烟尘排放对环境造成的污染。

理论分析表明, 影响涡流拱效果的主要因素是涡流场的卷吸强度。卷吸强度越大, 涡流拱对燃料及时着火和强化燃烧的作用越强; 但烟气流过涡流拱的阻力也越大, 随之拱下涡流场的负压影响区扩大, 造成对煤层的抽吸。因此, 对于具体的锅炉炉膛结构, 存在最佳的涡流拱几何特性参数, 即涡流拱圆形通道合适的开孔尺寸。

3 试验系统和方法

冷态试验对 SHL10-13 型锅炉进行模化, 将炉



1—布风板；2—炉膛；3—热线风速仪；4—涡流拱；5—导流装置；6—毕托管；7—引风机；8—U型压差计。

图 1 模化试验系统简图

膛内发生的复杂流动和燃烧过程简化成一个等温、不可压缩、单相粘性流体的稳定流动过程。由于链条炉拱区高度较低，炉内又是强迫流动，根据相似原理，可以忽略重力的影响。因此只要保证几何，边界条件相似，雷诺数相等就能保证流动的近似相似。模化试验系统如图 1 所示。主要由试验台本体，引风装置，热线风速仪测速系统及测量仪表等组成。试验台本体与锅炉原型在几何上相似，比例为 1:10。涡流拱插入前、后拱的槽缝内，可以自由抽出调换。涡流拱上与炉排中心线对称的两个圆形通道内装有向上延伸的导流装置。为了便于观察，锅炉两侧墙板为有机玻璃，可以拆卸。布风板上开孔模拟实际锅炉炉排的配风情况和阻力特性。

试验中，涡流拱高度保持不变，总风量维持恒定。通过改变涡流拱孔径来满足各种工况的要求。炉膛内涡流场用美国 TSI 公司的 1050 系列热线风速仪通过单线探针旋转测量法测量。此外，还用发烟剂和飘带两种示踪方法直接观察护膛的流场分布。试验中，流动过程处于第二自模化区。

涡流拱圆形开孔直径分别为 60、70、80、90、100、110、120 和 130 mm 等 8 种尺寸。

4 试验结果与分析

4.1 示踪观察试验结果

试验对装与不装涡流拱两种情况进行了示踪观察。不装涡流拱时拱区床面上有无数方向各异的紊流脉动旋涡，前拱区下存在一个水平轴无控涡，这一无控涡的形成气流主要来自于炉排前部，阻止了后拱区气流对前拱的冲刷，使后拱区绝大部分气流直接转向喉口流走。装有涡流拱的炉膛内，从后拱喷

出的一般射流，在涡流拱下水平流场上出现了一对围绕垂直轴反向旋转的对称可控旋涡（如图 2 所示），形成有序的回流；后拱气流进入前拱时，在前拱区炉墙两侧附近形成两个绕水平轴向前旋转的旋涡。示踪观察试验结果表明，涡流拱提供了一条后拱气流进入前拱的通道，可以明显增大后拱气流向前拱的输送能力。

4.2 涡流拱卷吸强度

涡流拱卷吸气流的效果可以用卷吸强度 α 来表示，即卷吸回流量与总风量的比值。卷吸回流量取流入前拱下垂直流通截面的体积流量。通过对截面进行网格剖分，测定截面上各点向前的速度分量，对各点速度与面积微元的乘积求和，可以获得卷吸回流量的大小。表 1 为各种孔径的卷吸回流量，卷吸强度以及装加涡流拱后卷吸回流量的增幅。从表 1 可以看出，装加涡流拱后，气流的卷吸回流量明显增加。随着涡流拱孔径减小，气流卷吸强度和卷吸回流量增幅增大。因为回流区的旋涡由涡流核区和包围核区的卷吸涡流区组成，回流区内的压力随旋涡半径的减小而降低，旋涡内外的压力梯度是卷吸外圈气流的动力。在总流量不变的条件下，涡流拱孔径越小，涡流核区旋转流体的角速度增大。根据伯努利方程可知，核心内的压力越低，则卷吸作用越强。但卷吸回流量增幅的增值减小。当孔径小于 70 mm 时，试验已不能反映卷吸流量的变化。试验表明，涡流拱具有明显增加向前拱输送气流的作用，若选用孔径为 90 mm 的涡流拱，将有 11.2% 的后拱气流进入前拱区，比传统层燃炉膛增加 59.9%。

表 1 不同涡流拱孔径的卷吸效果

孔径 Φ /mm	60	70	80	90	100	110	120	130	无
卷吸烟量 V / $m^3 \cdot h^{-1}$	63.7	63.7	63.1	61.4	58.6	54.8	49.3	46.6	38.4
卷吸强度 α	0.116	0.116	0.115	0.112	0.107	0.100	0.090	0.085	0.074
卷吸回流量 增幅/%	65.9	65.9	64.3	59.9	52.6	42.7	28.4	21.4	

4.3 涡流拱阻力特性

气流通过涡流拱的损失主要由两部分组成，气流旋转卷吸产生的碰撞、粘性损失和由于通道截面变化引起的动能损失。涡流拱的阻力系数 ξ 采用通常的方式定义，即 $\xi = \Delta P / \frac{\rho v^2}{2}$ ，式中， v 为通过涡流拱时气流的平均速度。

表 2 为当涡流拱两孔径间距为 130 mm，导流装置向上延伸时阻力系数和原型锅炉的阻力损失随孔

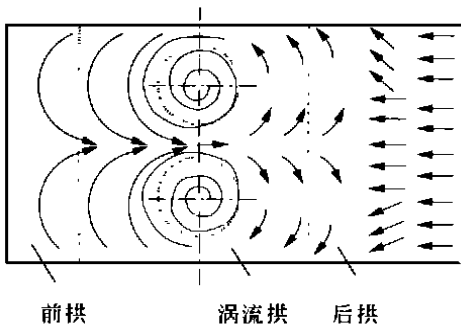


图2 涡流拱下水平流场示意图

径的变化关系。图中可以看出,随着涡流拱孔径减少,阻力系数增大。这是因为孔径减小时回流区内卷吸强度增大,气流的扰动增强,从而能量损失增加。由模化计算得到原型锅炉阻力损失的数据可知,当涡流拱实际开孔直径大于800 mm 阻力损失的影响已很小。

表2 不同涡流拱孔径的阻力系数和阻力损失

孔径 Φ /mm	60	70	80	90	100	110	120	130
阻力系数 ξ	1.778	1.559	1.356	1.179	1.072	0.983	0.911	0.859
阻力损失 ΔP /Pa	306	144.7	73.9	39.9	23.7	15	9.9	6.7

试验结果还表明涡流拱的导流装置和孔间距对阻力特性也有影响。气体从装有导流装置的涡流拱流出,阻力系数比未装导流装置时减小40%。因为有限高度的导流装置使气流流出时离涡流拱上壁面较远,减小了气流卷吸形成的旋涡与壁面的碰撞,以及碰撞引起的气流扰动而产生的能量损失,因而阻力系数减小。当孔径一定时,随着孔间距的变化,有一最小阻力系数。若孔间距太小,涡流拱下两回流区靠近,相互干扰使能量损耗增加;若孔间距过大,旋转气流撞击拱区炉壁面的能量损耗增加,这两种情况均使阻力系数增大3%左右。

4.4 涡流拱负压区

根据涡动力学理论,涡流拱下回流区的旋涡内,气体的压力小于其周围主气体的压力,称之为负压区。若负压区高度较大,且达到炉排床面时,将抽吸床层的燃料,增大烟气中飞灰含量,并影响床层燃料厚度分布的均匀性,使燃烧过程恶化。

表3为不同涡流拱孔径的负压区高度 h , h 表示负压区底部与床层面之间的距离。表中可以看出,随着涡流拱孔径的减小,负压区高度降低,即负压区作用于床层的可能性增加。因为涡流拱孔径越小,旋涡的卷吸回流量越多,则卷吸回流区的范围扩大,负压区高度降低。

表3 不同涡流拱孔径的负压区高度

孔径 Φ /mm	60	70	80	90	100	110	120	130
高度 h /mm	0	4	8	13	19	26	32	36

5 涡流拱的应用

晋城矿务局古书院矿生产的无烟煤主要特性为,挥发分 $V_{daf} = 8.49\%$, $C_{ar} = 63.30\%$, $Q_{ar.net} = 23.39$ MJ/kg;焦渣特性为1,粘结指数为0。对锅炉用煤进行筛分的结果表明,粒径小于3 mm 的煤粒含量大于55%。这种燃料挥发分低,且粒度较细,属于II类末煤型无烟煤。该煤种对于链条炉的着火很困难,火床燃烧不稳定性强,不易燃尽。

该矿有6台SHL10-13型锅炉,存在锅炉设计先天不足:前拱与燃用烟煤的锅炉相同;后拱覆盖率60%;炉排长度比一般燃用无烟煤炉型短1300 mm。运行时若燃用本矿产的末煤型无烟煤,锅炉根本无法着火。为此,该矿只能耗资外购小煤窑的煤运行。即使燃用小窑煤($V_{daf} = 12\%$),原煤经煤闸门后1000 mm仍不能着火,经常出现断火现象,被迫采用人工拨煤和正压燃烧方式运行。煤层到最后一个风门时燃烧还处于旺盛区,燃料不能燃尽,燃烧效率很低,供汽负荷严重不足。经测定,炉渣与漏煤混合物中的含碳量为67.1%。

上述分析表明,锅炉存在的关键问题是后拱区下高温烟气向前拱引燃区的输送能力差,使得前拱表面温度偏低,辐射引燃作用很弱,燃料不能及时着火。在模化试验基础上,根据古书院矿末煤型无烟煤的燃料特性,考虑了在不发生结焦条件下,选取了具有适当卷吸强度、阻力特性和负压高度的涡流拱结构参数,在1996年首次对SHL10-13型锅炉实施改造。改造后的锅炉,全燃古书院矿末煤型无烟煤时,着火点距阻燃拱500 mm之内,在锅炉正常出力条件下,能保稳定负压燃烧方式,不需人工拨煤,不发生煤层断火现象,炉渣与漏煤混合物中的含碳量降低为47.0%。运行及测试结果表明,涡流拱技术在燃用II类末煤型无烟煤中取得了成功,效果十分明显。

又对该矿5台SZL4-13型锅炉采用同样的措施进行了改造,也取得了改善燃烧状况的相同效果。

6 结论

(下转第430页)

表3 测试输入数据

K1	K2	K3	K4	K5	K6	K7	K8	K9	K10	K11	K12	K13	K14
0.4	0.4	0.4	0.9	0.4	0.4	0.4	0.4	0.4	0.4	0.4	0.4	0.4	0.4
0.6	0.6	0.6	0.6	0.2	0.6	0.6	0.6	0.6	0.6	0.6	0.6	0.6	0.6
0.7	0.7	0.7	0.7	0.7	0.7	0.7	0.7	0.7	0.7	0.7	0.7	0.9	0.9

表4 测试输出数据

P1	P2	P3	T1	T2	T3
0.198	0.198	0.198	367	367	367
0.196	0.196	0.196	394	394	394
0.201	0.201	0.201	385	385	385

表5 在表3测试输入下现场实际的输出数据

P1	P2	P3	T1	T2	T3
0.195	0.199	0.194	369	366	365
0.193	0.199	0.198	397	397	392
0.208	0.206	0.207	387	388	383

根据上述仿真模型的测试结果,对比表2和表4:当其它阀门的开度均为0.4,而4号阀门的开度变为0.9时,P1、P2、P3的值均有所降低,T1、T2、T3的值均有所降低;当其它阀门的开度均为0.6,而5号阀门的开度变为0.2时,P1、P2、P3的值均有所降低,T1、T2、T3的值均有所升高;当其它阀门的开度均为0.7,而13、14号阀门的开度变为0.9时,P1、P2、P3的值均有所降低,T1、T2、T3的值均有所升高。

对比表4和表5,表4中用本文方法的模型输出

结果与表5中实测结果相比,上述数据只是在有效数字的第三位有区别。经过统计计算,误差与实测值之比均小于3.5%。因此,误差精度较高。这就证明了本文方法的有效性和正确性。

4 结论

本文通过对循环水系统的建模数值仿真,证明了所提出方法的正确性和实用性。在工程实际中这种复杂系统经常会遇到,它们的机理十分复杂,而只有通过其它的方法建立数学模型,本文为这一问题提供一种方便而行之有效的办法,此方法应用前景十分广阔。

参考文献:

[1] 王行仁. 建模与仿真的回顾及展望[J]. 系统仿真学报, 1999, 11(5): 309-311.
 [2] 李伯虎, 王行仁. Modeling and Simulation in China[A]. 4th Meeting of International Simulation Advisory Group[C]. 北京: 北京航空航天大学, 1995.
 [3] 黄友谦. 曲线曲面的数值表示与逼近[M]. 上海: 上海科学技术出版社, 1984.
 [4] 王德人, 杨忠华. 数值逼近引论[M]. 北京: 高等教育出版社, 1990.
 [5] 哈尔滨汽轮机厂. 20万千瓦汽轮机的结构[M]. 北京: 水利电力出版社, 1992.

(渠 源 编辑)

(上接第405页)

(1) 涡流拱是一项能够全燃无烟煤的新技术。涡流拱可以有效地增加将后拱下高温烟气卷吸输送到前拱区的能力,给新燃料及时提供引燃所需要的热量;增大了拱区对煤层的覆盖面积,拱下回转气流延长了烟气中可燃气体和固体颗粒在炉膛的停留时间,有助于强化燃烧;拱下涡流场能够实现烟气中部分灰粒的早期分离,减少烟尘排放浓度。

(2) 模化试验表明,涡流拱可以将无序的紊流场整理成有序的涡流场,在拱下形成一对围绕垂直轴反向旋转的对称可控旋涡,卷吸后拱气流向前拱输送。随着涡流拱孔径减小,卷吸强度和流动阻力增加,负压区高度减小。试验参数内,最高卷吸回流量比传统层燃炉膛增加65.9%。

(3) 涡流拱最佳结构参数的选择应考虑卷吸强度和流动阻力的大小,以及负压区高度的影响。

SHL10-13型锅炉的实际开孔直径在800mm~1000mm为宜。

(4) 涡流拱首次运行实践表明,该项新技术能有效解决II类末煤型无烟煤的着火问题,提高燃烧效率,为我国链条炉全燃各种类型无烟煤、劣质煤提出了一条新思路。

参考文献:

[1] 杜梅芳, 张忠孝. 典型中国无烟煤燃烧特性研究[J]. 热能动力工程, 1994, 9(6): 336-340.
 [2] 董秉纲, 尹协远, 朱克勤. 涡运动理论[M]. 合肥: 中国科学技术大学出版社, 1994.
 [3] 周光焜, 严宗毅, 许世雄, 等. 流体力学[M]. 北京: 高等教育出版社, 1992.
 [4] 沈月芬, 郭志仁, 曹子栋, 等. 利用偶极子涡流器强化层燃锅炉燃烧的试验研究[J]. 动力工程, 1998, 18(2): 35-38.

(何静芳 编辑)

which has the following dimensions: length 900 mm, width 100 mm and height 5200 mm. The particle transverse dispersion in the above-cited zone can be described with the help of a one-dimensional dispersion model. The model calculation results are in very good agreement with experimental data. Through the experimental data fitting one can obtain the particle transverse dispersion factor D_{sr} . The tests show that with the increase in fluidizing air speed and stationary bed height there will be an increase in the transverse dispersion factor. The transverse dispersion factor will decrease with the increase in particle diameter. Finally, an empiric formula was given for the transverse dispersion factor with the fluidizing air speed, stationary bed height and particle diameter serving as influencing factors. **Key words:** circulating fluidized bed, transverse dispersion factor, hot tracer particle

大容量锅炉锅筒两侧水位测量偏差问题的研究 = An Investigation of the Deviation in Water Level Indication at the Two Ends of the Boiler Drum of a Large-sized Boiler [刊, 汉] / LIU Fu-guo (Thermal Energy Institute under the Shandong Provincial Electric Power Research Academy, Jinan, China, Post Code: 250002), MOU Chun-hua (Shandong Rizhao Power Plant, Rizhao, Shandong Province, China, Post Code: 276826), TAN Zhe-ling (Shandong No. 3 Electric Power Construction Co., Rizhao, Shandong Province, China, Post Code: 276826) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. — 2001, 16(4). — 399 ~ 402

A recurrent problem in recent years is the measurement discrepancy in water level indication at the two ends of the drum of a large-sized boiler. This can affect the safe operation of a power plant. After an analysis of the root cause of this deviation the authors present their successful experience in employing uniform-pressure tubes for coping with the issue and recommend some effective measures both in design and operation aimed at reducing the discrepancy of water level measurement. **Key words:** boiler, boiler drum water level, liquid level measurement, correction of calculation

适用于无烟煤燃烧的新型涡流拱特性的研究 = A Study of the Features of a Novel Vortex Arch Suited for the Combustion of Anthracite Coal [刊, 汉] / ZHUANG Zheng-ning, ZHU Chang-xin, TANG Gui-hua (Energy Engineering Institute under the Xi'an Jiaotong University, Xi'an, China, Post Code: 710049) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. — 2001, 16(4). — 403 ~ 405, 430

Presented is a kind of new technology incorporating a vortex arch suited for the burning of anthracite coal in a traveling-grate boiler. Through modeling tests an experimental investigation was conducted of the features of the vortex arch along with an analysis of its working mechanism. As a result, identified are the key conditions to be met for achieving the optimum structural dimensions of a vortex arch. The results of study indicate that the vortex arch can effectively increase the suction and transport quantity of gas flow from a rear arch to a front one, contributing to an increase in the front arch temperature. During its practical use for the first time it has been found that the vortex arch is conducive to the timely ignition of a furnace firing flaxseed coal of category III accompanied by an intensified combustion. **Key words:** stoker boiler, anthracite coal, vortex arch, intensified combustion

中小煤粉炉运行优化新方法研究 = An Investigation of New Methods for Attaining an Optimized Operation of Small and Medium-sized Pulverized Coal-fired Boilers [刊, 汉] / WANG Xin-xin, XU Xiang-dong (Thermal Energy Engineering Department, Tsinghua University, Beijing, China, Post Code: 100084) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. — 2001, 16(4). — 406 ~ 408, 382

On the air feed control loop of a computer-based control system for present-day small and medium-sized pulverized coal-fired boilers there usually lack suitable economic indexes to evaluate the boiler operating efficiency. In this regard some new methods are proposed to optimize the control of the above-cited boilers. Based on the counterbalance calculating method of boiler thermal efficiency and the energy balance of boiler furnace the authors have come up with a set of discriminating criteria through a detailed deductive process. The above-mentioned criteria can be employed to evaluate the boiler thermal efficiency and reflect the variation trend of the latter in case of a change in air feed rate. All the above has been accomplished by taking into account the practical operating data of boilers and neglecting some secondary unimportant factors. With the above discriminating criteria serving as a basis a continuous optimization was conducted with respect to the target of the air feed control loop, i. e. the oxygen content in flue gas, thereby achieving the aim of an optimized combustion process through the proper adjustment of air-coal ratio. **Key words:** pulverized coal-fired boiler, optimized operation, discriminating criteria for evaluation of thermal efficiency