

电站锅炉燃烧稳定性研究*

陈刚 邱纪华 张志国

李佛金 陈迪训 孙学信

(华中理工大学)

〔摘要〕 简述了锅炉稳定燃烧的理论,并介绍了几种稳燃装置:边界射流钝体稳燃器;中心回流稳燃腔;内外双回流稳燃器;相交式高浓度煤粉燃烧器。在应用中表明,脱油稳燃效果好,燃烧效率提高,经济效益显著。

关键词 稳定燃烧 燃烧理论 锅炉

分类号 TK223.2

0 前言

电站锅炉煤粉燃烧的稳定和强化是大家共同关心的问题。由于我国电站锅炉煤种多变、煤质下降以及调峰的需要,需耗用大量的助燃油来稳定燃烧。如河南丹河电厂410 t/h锅炉,当负荷低于70%时,每小时投助燃油2吨,如每年调峰1000小时,耗油量达2000吨。因此,强化煤粉气流的着火过程,保证燃烧稳定,对电厂运行的安全性及经济性具有重要意义。

1 强化燃烧的理论基础

要实现电站锅炉调峰或因煤种变化、煤质下降时少投助燃油并保证锅炉安全正常运行的关键是要保证燃烧稳定,而保证燃烧稳定的关键是进一步强化高温烟气的回流来加热未燃煤粉使它快速着火,增加燃烧的稳定

性。特别是对于无烟煤,由于它的活化能高,要求吸收更多的热量,达到更高的温度才能着火。

根据工业试验数据计算,以高温烟气回流的对流加热时,煤粉的着火时间 $\tau = 0.003$ 秒,以火焰及炉墙的辐射加热时, $\tau = 0.07$ 秒,这就是说高温烟气把煤粉加热至着火的时间比辐射加热快23倍。因此,强化高温烟气回流是解决低负荷下煤粉迅速着火稳定燃烧的关键。

在研究钝体回流区内高温烟气与回流区外的低温燃料气流之间通过回流区边界进行的质量交换是它们进行热量交换的基础,而高温烟气通过回流区边界向燃料气流扩散的质量流量 J_{or} 可以用下式表示:

$$J_{or} = \frac{C_p}{S_c} \cdot \frac{|dU_x/dy|^3}{|d^2U_x/dy^2|^2} \cdot \frac{df_o}{dy}$$

式中, S_c 为施密特准则, f_o 为煤粉的百分比浓度, C_p 为常数, U_x 为主气流速度。因此可

* 国家攀登计划项目及机电部八·五计划项目资助

收稿日期 1993 05 27 收修改稿 1993 08 24

本文联系人 陈刚 男 29 讲师 430074 华中理工大学煤燃烧国家重点实验室

发现,回流区边界的热质交换与速度梯度的三次方成正比。因此强化回流区热质交换的最有效方法是增加射流速度 U_x 。但增加 U_x ,对管道的磨损将急剧加快,下粉管的阻力也会增大,特别是 U_x 增大后,同样负荷时煤粉浓度则下降,降低了煤粉的挥发份浓度,这对着火极为不利。近几年我们从强化回流的基本理论入手研制了强化高温烟气回流的几种稳燃装置,并在实际锅炉中进行了应用,实践证明稳燃效果比普通钝体要好得多。

强化燃烧的另一有效方法是实现高浓度煤粉燃烧。高浓度煤粉燃烧就是利用一次风煤粉气流的浓度与着火过程的关系,达到强化着火稳定燃烧及减少污染的目的。我们曾对某煤种做过粗略计算,当煤粉浓度由 0.37 kg(粉)/kg(气) 提高到 1 kg(粉)/kg(气) 时,着火热相对减少 58.5%。同时,煤粉浓度的提高,实际上提高了单位体积煤粉气流中的挥发份,使得煤粉着火提前,着火距离缩短,着火温度降低,着火区温度明显上升,NO_x 排放下降。这些我们均以理论计算和试验证明如此。

2 调峰稳燃装置的研究

根据上述理论分析,近几年我们研制出了几种稳燃装置,对无烟煤,劣质煤着火稳燃及调峰中脱油稳燃具有很好的效果。

2.1 边界射流钝体稳燃器

在普通钝体稳燃器前角边缘装一附加高速度小流量射流喷嘴,使它在回流区边界外形成局部高速区。这种装置一般采用图 1 的典型结构。附加射流的角度 $\beta = 30^\circ$ 时试验证明有良好效果,而附加射流速度有较大的适应范围,可根据射流的质量流量的大小在 70 m/s 与 200 m/s 之间选择。一般说来采用饱和蒸汽的附加射流时可用高速度和极小的流量,而采用热空气作附加射流时可选择较

大流量和较低的射流速度均可获得良好的效果。在湖南耒阳电厂 670 t/h 锅炉上采用这种稳燃器,稳燃效果较好。

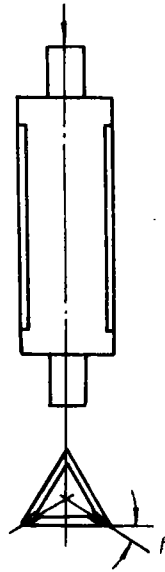


图 1 附加射流结构图

2.2 中心回流稳燃腔

中心回流稳燃腔,同样也是一种用增加边界层速度来强化烟气回流的有效稳燃装置。其结构如图 2 所示。这种稳燃腔在结构方面简单,易于实现,而且在结构设计上容易满足各种边界速度的要求以适应各类煤质着火的需要,而不增加对钝体的冲刷速度,亦不改变原煤粉管的煤粉浓度。既不会降低煤粉浓度也不会增加磨损。

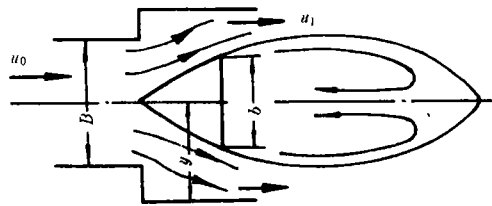


图 2 中心回流稳燃腔

如果由稳燃腔进入炉膛时的平均流速用 U_1 表示,则 U_1 可用下面的半经验公式进行计算: $U_1 = (1 + C)BU_0 / (2Y - b)$,式中 U_0 为加装稳燃腔前原一次风的射流速度, B 为原一次风喷嘴宽, b 为钝体边宽, C 为中心回流区回流率, Y 为稳燃腔半宽度。其中回流率 C 可根据试验曲线和 U_1 选取,从上式可知,中心回流稳燃腔的设计主要是正确选择稳燃腔进入炉膛的速度(亦即回流区边界速度)。根据煤质不同 U_1 可选不同数值,一般均应大于 40 m/s,速度确定后即可设计出稳燃腔的关键尺寸腔体宽 $2Y$ 。这一装置已在海口发电厂两台 5 万机组上应用,热态观察火焰稳定性好,并在 40% 负荷下长时间运行不投油可保持炉温稳定不变,其燃烧效率有大幅度提高。

2.3 内外双回流稳燃腔

中心回流稳燃腔在强化高温烟气与煤粉之间的热质交换上有明显作用,由于稳燃腔在射流的初期对外部烟气卷吸有屏蔽作用。它的外回流是在煤粉气流流出稳燃腔后才能形成。因此内回流形成时间早于外回流形成,而不是同时产生的。这对于缩短着火时间有不利的影响。为了进一步提高稳燃腔的稳燃能力,在中心回流稳燃腔的基础上我们提出了双回流稳燃腔科学构思与研制。其具体结构见图 3。从图中可以看出它完全保存了中心回流稳燃腔的各项特性,而在腔外两侧增加了外回流通道的。在稳燃腔底部与通道开通,借助射流根部的负压卷吸作用,将高温烟气吸入射流根部进行混合。从双回流稳燃腔的原理和结构可知,由于外回流的参入在 U_0 不变的情况下 U_1 将比中心回流稳燃腔有所增大,上述的设计计算中回流率 C 值将取更大的数值,而这些变化对煤粉的浓度钝体冲刷速度也不会引起变化。而将获得腔体的更大速度 U_1 和更高的腔内温度。这些都将提高火焰稳定的能力。因此双回流稳燃腔将比中心回流稳燃腔更适合无烟煤和劣质煤的稳

燃,在低负荷运行时,可保证炉内稳定燃烧,现在双回流稳燃腔已在南昌发电厂应用。其应用效果证明比原来在该炉使用的普通钝体稳燃器有更好的稳燃效果。

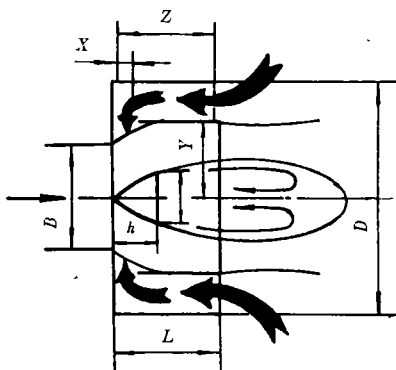


图 3 双回流稳燃腔结构图

2.4 相交式高浓度煤粉燃烧器

以上所述,一次风煤粉气流浓度提高后,降低了煤粉气流的着火热,并提高了单位体积中的煤粉的挥发份,因而使煤粉着火提前,着火距离缩短,着火区温度上升,NO_x 排放下降,所以高浓度煤粉燃烧是稳定燃烧、降低污染的一种良好方式。但由于煤粉浓度提高后,若仍按常规浓度的一二次风混合方式,势必造成一次风煤粉气流中心得不到充足氧量而引起燃尽度降低。所以我们采用一二次风以一定角度在炉内相交来强化混合,实现

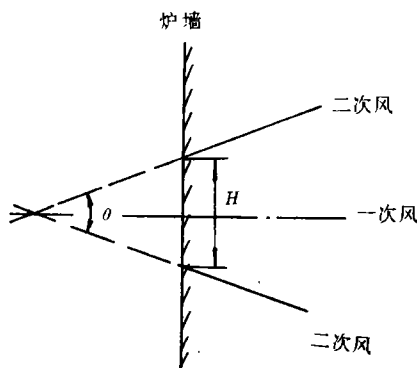


图 4 相交式高浓度煤粉燃烧器示意图

高浓度煤粉燃烧。示意图如图 4, 通过冷态热态试验, 以 30° 角最为理想, 并可将浓度提高一倍左右而保证燃尽度较好。二次风间距 H 可根据具体煤种的特性来定。热态试验表明, 着火提前, 着火区温度水平提高。当调峰低负荷运行时, 只需相应降低浓度即可, 如低负荷 50% 运行时, 只需将高浓度降低到常规浓度即可, 并可保证燃烧稳定。

3 强化燃烧的实践

在湖南省耒阳电厂 670 t/h 无烟煤锅炉上用空气产生附加射流进行强化燃烧, 并在燃烧器出口 630 mm 处进行回流区定点温度测量。其测量结果见表 1。

表 1 空气附加射流对着火温度的影响

| 测量时发电负荷 /kW | 18 万 | 16 万 |
|---------------------------|------|------|
| 无附加射流钝体 ($U_1 = 0$) | 789℃ | 776℃ |
| 有附加射流钝体 ($U_1 = 60$ m/s) | 879℃ | 869℃ |
| 温度升高 | 90℃ | 93℃ |

双回流稳燃腔在南昌电厂 2[#] 炉上应用。运行情况表明, 对劣质煤的适应性良好。原炉在加装普通钝体后还需敷设较多卫燃带方能基本稳定燃烧。但改装双回流稳燃腔后, 已将全部卫燃带去掉, 而其燃烧工况比以前更稳定。

中心回流稳燃腔在海口电厂 50 MW 机组烟煤燃烧器上首次进行了应用。解决了低负荷时的燃烧稳定的问题。

首先, 在额定负荷下进行试验, 不投油稳定燃烧, 在下次风喷口处用光学高温计测量的火焰平均温度为 970℃, 左右侧看火孔中的炉温平均 1500℃。比没装稳燃腔以

前, 炉温明显提高。当负荷降低至 35 MW 时 (70% 负荷), 仍然全停油枪脱油燃烧, 下次风喷口处的火焰温度平均为 960℃, 左右侧墙炉温平均为 1440℃, 在下次风喷口处可以明显看到回流区的火焰点烧煤粉的现象, 炉内燃烧稳定, 炉膛负压无明显波动。负荷继续降至 25 MW 时 (50% 负荷), 仍然全停油枪脱油燃烧, 这时下次风喷口处的火焰温度仍有 920℃, 没有发现脱油和煤粉推迟现象, 炉膛左右侧炉温仍有 1310℃ 左右, 炉膛负压没有明显波动。为了考验更低负荷下的调峰可能性, 在 20 MW 负荷时运行了较长一段时间, 仍然全停油枪脱油燃烧, 工况很稳定, 说明稳燃腔燃烧器可以在 40% 的额定负荷下稳定运行, 调峰幅度是比较大的。而且热态试验表明, 锅炉效率比原来提高 (5—7)%。

4 低负荷稳燃节能效率

以上所述的几种强化燃烧的稳燃装置, 在实际运用中均取得明显效果, 不仅使燃烧稳定性加强, 增强了电厂的安全运行, 并且也为电厂创造了很大的社会效益。以海口电厂为例, 过去电厂 2[#] 炉规定在 38 MW 以下运行时, 需投两支 637 kg/h 油枪助燃, 现在 20 MW 还可脱油稳燃, 如果每年运行 7200 小时 (300 天), 每天低负荷时间 8 小时, 每年节约助燃油为 3057.6 吨。由于煤粉着火及燃烧得到强化, 将原来 4 只油枪 (637 kg/h) 改为 4 只小油枪 (220 kg/h) 直接点燃煤粉, 缩短了点火时间, 每年节约点火用油约 130 吨。停炉时节油约每年 80 吨。

另外由于稳燃, 使锅炉效率提高 5%, 故每年节煤折合人民币的 183.5 万元

由此可见, 稳燃腔燃烧器应用于海口电厂之后, 创造的经济效益是非常高的。

(下转 158 页)

小时后实测埋管磨损厚度不大于 0.1 mm,而且锅炉出力充足。

5 过热蒸汽温度

当分离器布置在过热器中间或以后时,由于循环流化床锅炉烟气中的飞灰浓度较高,无疑对过热蒸汽温度有较大影响。尤其高倍率循环流化床锅炉飞灰浓度更大,亦对过热汽温影响更大。烟气中的飞灰浓度决定循环倍率。当分离器结构一定时,分离效率决定于一系列运行因素,如负荷、飞灰粒度、浓度等,而这些因素是很难控制的,它们变化引起分离效率变化,从而引起循环倍率、飞灰浓度变化,最后引起过热蒸汽温度的变化。从表 1 可见低倍率时,分离器效率的变化引起循环倍率变化不大,也就是烟气中飞灰浓度变化不大,对汽温的影响不大;高倍率时分离器效率的变化,引起循环倍率很大的变化,也就是烟气中飞灰浓度有很大的变化,从而过热汽温将发生较大的变化。可见当分离器布置在过热器中间或以后时,循环倍率较低时过热汽温容易控制。当然,如将分离器布置在过热器之前,这种影响会减小,但循环灰对床层

温度的调节作用会减弱。

6 结论

低倍率循环流化床锅炉燃烧效率可以满足燃用劣质燃料的要求,而且由于密相区布置有埋管受热面,分离器的分离效率对循环倍率的影响不大,故使低倍率循环流化床锅炉床层温度易于控制,过热汽温比较稳定,锅炉出力能达到设计要求。以燃料灰为循环物料的循环流化床锅炉宜采用低倍率循环流化床锅炉。如考虑脱硫,以填充剂石灰石为主要循环物料,这时就要求较高的分离器分离效率,宜采用高倍率循环流化床锅炉。

参 考 文 献

- 1 Probir Basu, Fraser S A. Circulating fluidized bed boilers design and operations. Butterworth—Heineman, 1991.
- 2 杨励丹. 建议发展低倍率循环流化床锅炉. 中国电工技术学会, 电工信息与建议, 1991, (1, 2)
- 3 鲍亦令等. 低倍率循环流化床锅炉的研究与设计. 哈尔滨工业大学学报优秀论文集, 1990
- 4 杨励丹. 床料粒度及组成对循环流化床锅炉设计的影响. 全国循环流化床锅炉学术交流会论文集, 1993
- 5 张子栋等. 低倍率循环流化床锅炉槽型惯性分离器. 全国循环流化床锅炉学术交流会论文集, 1993

(李乡复 编辑)

(上接 154 页)

5 结论

以上几种稳燃装置已成功地应用于电厂,为电厂安全经济运行创造了良好的条件,但随着参与调峰机组容量的不断增大以及电厂燃用煤质多变等特点,必然会出现更多的问题,因此有必要进一步深入研究适用于电站锅炉的稳燃装置。由于我们对稳燃的基本理论已掌握,而且在稳燃技术上具有许

多先进手段,一定会研制出更好的稳燃装置,以满足电站锅炉稳定燃烧的需要。

参 考 文 献

- 1 陈迪训等. 在煤粉燃烧中强化高温烟气回流的研究与应用. 动力工程“无烟煤燃烧技术研讨会”. 1992, 芜湖
- 2 陈刚. 华中理工大学硕士论文. 1991 年
- 3 李佛金等. 海口电厂 2# 炉稳燃腔燃烧器热态试验报告. 1992. 4

() *heat recovery boiler, regeneration restriction, simulation calculation, STIG cycle*

(151) **A Study on the Combustion Stability of Utility Boilers** Chen Gang, Li Fekin, et al. (*Central China Polytechnical University*)

This paper gives a brief description of the theory of boiler combustion stability and presents several types of combustion stabilizing devices, among others, boundary jet-flow bluff-body combustion stabilizer, central return-flow combustion stabilizing device, inward/outward duplex return flow combustion stabilizer, intersection type high concentration pulverized coal burner. Their practical applications have shown that significant economic benefits have been attained as a result of their combustion stabilizing effect due to degreasing and also their enhanced combustion efficiency. **Key words:** *stable combustion, combustion theory, boiler*

(155) **An Exploratory study on the Development of Circulating Fluidized Bed Boilers** Zhang Zidong, Wu Wenyuan, Bao Yilin, Bei Rushan, Zhao Mingquan (*Power Engineering Department of the Harbin Institute of Technology*)

Circulating ratio, as an important design parameter of CFG boilers, exercises a significant influence on boiler design and operation. In this paper the authors deal with the dependence of the circulation ratio on the following factors: the selection of circulating materials, combustion efficiency, separation efficiency of separators, the arrangement of heating surfaces in a dense phase region, superheated steam temperature, etc. In addition, some helpful suggestions concerning the above are also presented. **Key words:** *circulating fluidized boiler, circulating ratio, low circulating ratio, circulating materials*

(159) **Jet-flow Device—a Useful Tool for Enhancing Circulation Water Velocity in Natural Circulation Hot Water Boilers** Zhu Qunyi, Zhang Peting, et al. (*Harbin Institute of Technology*)

Theoretical analysis and experimental study results are given of the performance of a jet-flow device employed in the circulating circuit of natural circulation hot water boiler. Presented in the paper is also a formula for calculating additional head ΔP of the said circuit after the installation of a straight-tube nozzle and a conical one. **Key words:** *hot water boiler, jet-flow device, straight-tube nozzle, conical nozzle*

(163) **A Mathematical Model for the Optimized Design of Heat Pipe Air Preheater of a Utility Boiler** Huang Xinyuan (*Power Engineering Department of Shandong Polytechnical University*)

This paper presents a mathematical model for the optimized design of the heat pipe air preheater of a utility boiler. The control condition of the preheater minimum tube wall temperature has been introduced into the constraint function vector. Some explanatory notes are given regarding the specific features of the method involving the use of optimization techniques during the design of the heat pipe air preheater. A specific calculation example is also presented. **Key words:** *utility boiler, heat pipe, air preheater, mathematical model*

(168) **A Study on the pressure Distribution in Headers of Gas-Liquid Two-Phase Flows in a Horizontal Parallel Tube System** Wu Dongyin (*Xi'an thermotechnical Institute*); Liu Zonghu (*Xi'an Communications University*)