

燃烧气脉冲除灰技术的试验研究

孙文超* 詹焕青 陈丽芳 吴承康
(中国科学院力学研究所)

摘 要

我国电站锅炉燃用大量高灰煤,受热面积灰严重,影响锅炉效率和出力。中国科学院力学研究所研制成功的燃烧气脉冲除灰技术是电站锅炉新一代的除灰技术。该技术的原理是可燃气体与空气混合后,在燃烧室中快速燃烧,产生的冲击波作用在空预器的波纹板上,使积灰清除。此项技术可降低排烟温度,提高锅炉热效率和运行安全性。它已成功地用于电厂燃煤和燃油锅炉上。本文较详细地介绍了气脉冲除灰技术的研究及其结果,并描述了气脉冲除灰技术的先进性。

关键词: 燃烧气脉冲除灰技术, 回转式空气预热器, 电站锅炉

Experimental Study on Combustion Gas-Pulse Ash-Cleaning Technology

Sun Wenchao Zhan Huanqing Chen L ifang Wu Chengkang
(Institute of Mechanics, Chinese Academy of Science)

Abstract

Chinese power plants very often burn a large amount of high-ash coal without washing, so the fouling problems are often serious. Therefore boiler output and efficiency are adversely affected. A new type of ash-cleaning technology for power plants—combustion gas-pulse ash-cleaning technology has been developed by the Institute of Mechanics, Chinese Academy of Science. The working principle of the combustion gas-pulse ash-cleaning technology is that after combustible gas and air are premixed properly, they are ignited and burn in a very short time, producing a gas pulse which impinges on the corrugated plates of the air preheater, cleaning out the ash deposit. By using this technology, significant decrease in stack gas temperature and increase in boiler efficiency and operational safety have been achieved. It has been successfully applied in pulverized coal and oil fired utility boilers. Detailed introduction to the study on the gas-pulse ash-cleaning technology and analysis of the research results is given, and the advantages of this technology are also described in this paper.

Key words: Combustion Gas-pulse ash-cleaning technology, Rotary air heater, Utility boiler

* 原稿收到日期为 1997-12-17, 修改稿收到日期为 1998-03-01。

** 中国, 北京, 邮编 100080。

引 言

电站锅炉低温对流受热面的积灰和腐蚀,一直是困扰燃煤动力设备安全和经济运行的难题之一,也是影响其自动化程度提高的因素之一。这是因为积灰和腐蚀使烟气通道堵塞,从而使烟气通风能力下降,传热条件恶化,排烟温度升高,降低了锅炉的热效率。在堵灰严重时,锅炉被迫降负荷运行,甚至为此专门停炉维修清洗,降低了发电设备的可利用率。

大型电站锅炉低温受热面的堵灰,最严重的部位是空气预热器,特别是回转式空气预热器。这种空气预热器因其波形传热元件设计得十分紧凑,极易使烟气中的飞灰颗粒沉积在波形板上,积灰的问题尤为突出。在使用回转式空气预热器的锅炉燃用高硫煤、高灰煤以及燃用灰中钙含量较高的煤种时,波纹板的堵塞就更加严重。国内外通常使用的“蒸汽吹灰”技术面对这种情况,也显得无能为力。

如何有效地解决大型电站锅炉低温受热面的除灰问题,中国科学院力学研究所在实验室研究的基础上,首先研究成功电站锅炉新一代除灰技术——燃烧气脉冲除灰技术及其装置(已获专利),并和上海电力局所属上海石洞口发电厂合作,完成了工业试验。这种技术不使用蒸汽,而是利用快速燃烧产生的冲击波与金属的积灰表面相作用,将积灰打落。该技术适用于燃煤和燃油的电站锅炉,也适用于工业热水锅炉和废热锅炉,对于烟气中含有 SO_2 和 HF 等腐蚀介质的情况,也可以使用。

1 燃烧气脉冲技术原理及研究

气脉冲装置的运行原理如图 1 所示,可燃气体和空气预先混合,然后点火,并在燃烧室中快速燃烧,由输出管的喷口发射出脉冲气流和冲击波。空气预热器波纹板上的积灰在冲击波的作用下被“吹”走,一部分较硬质的灰垢也可以被“打松”而逐渐“脱落”。

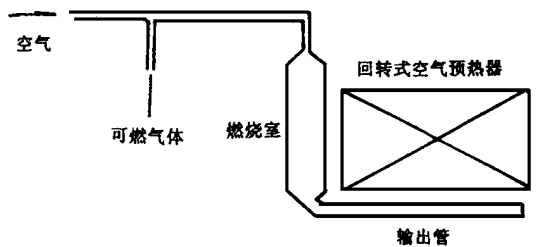


图 1 气脉冲除灰示意图

从原理上讲,该技术的关键是研制一种能够满足除灰要求的燃烧装置,这类装置与能源动力中常规燃烧设备相比,在原理上有所不同。在常规的诸如燃气锅炉等燃烧设备中,燃烧基本上是稳态的,燃烧速度较低,燃烬时间也较长,燃烧室或锅炉炉膛维持负压,燃烧过程中不存在压力波。但在本燃烧装置中,燃烧是非定常的,燃烧速度达 $(200 \sim 300) \text{ m/s}$,燃烬的时间在毫秒量级,燃烧产生压力,但压力需控制在 0.7 MPa 之内,压力波的速度保持在音速附近。换句话说,这是一种带有压力波的燃烧,压力波行进在燃烧波阵面之前,前驱的压力波和后随的燃烧波阵面表征了这一燃烧过程。这也正是本燃烧方式在原理上既不同于常规燃烧,又不同于爆轰的基本特征。

由于除灰效果决定于冲击波的强弱,而冲击波的强弱又决定于燃烧产生的压力,因而原理研究的重点在于探求影响压力大小的某些相关规律。本文对影响压力的条件和参数作了计算分析和实验研究。

1.1 可燃混合气体浓度对燃烧压力的影响

在气脉冲除灰装置中, 燃烧室通过输出管的喷口与外部相通, 属于开口体系。因而可燃混合气在此燃烧室中产生的最大压力小于密闭状态下的燃烧压力。在等容和绝热条件下, 燃烧压力正比于初始压力, 正比于最高火焰温度与初始温度之比, 正比于生成物与反应物的物质的量之比。当燃烧的初始状态为常温常压时, 决定燃烧压力的主要因素就是燃烧火焰温度。图2和图3分别给出了过量空气系数 α 和可燃气体乙炔 C_2H_2 在混合时的体积分数 $\varphi(C_2H_2)$ 与绝热火焰温度 T_m 的关系。计算中考虑了气体在高温下的离解过程。可以看出, α 越大或者 $\varphi(C_2H_2)$ 越小, 火焰温度也越低。在化学当量比 $\alpha=1$ 附近, 或者说, 在 $\varphi(C_2H_2)=7.7\%$ 左右时, 燃烧火焰温度达到最大值。

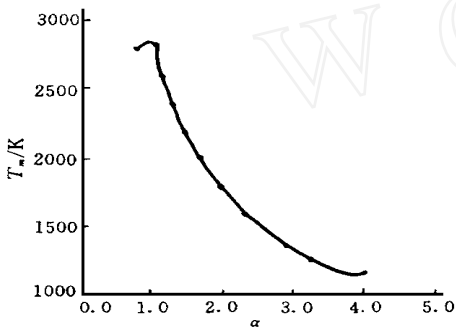


图2 过量空气系数 α 与 T_m 的关系

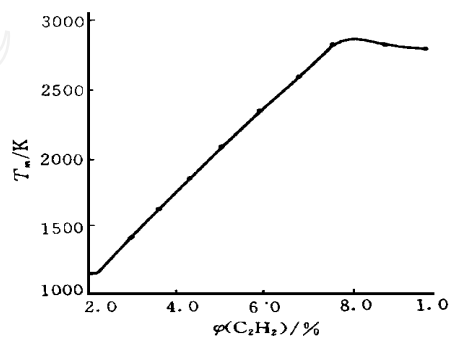


图3 乙炔的浓度与 T_m 的关系

图4和图5分别表示了密闭状态下计算的 α 及 $\varphi(C_2H_2)$ 与燃烧压力 p 的关系曲线。它们的相关变化规律与图2和图3是基本一致的。这表明, 随着可燃气体浓度的增大, 或者过量空气系数的减小, 燃烧压力逐渐增加, 在达到化学当量体积分数附近时, 燃烧压力达到最大值。图6是用高精度的压力传感器实测的可燃气体体积分数与燃烧压力的相关曲线, 尽管测量是在开口体系下进行的, 并且可燃气体的体积分数范围取得较窄, 但与图5比较仍可以看出, 两条曲线的趋势还是基本相同的, 只是测量值比相应体积分数下的计算值要小些。

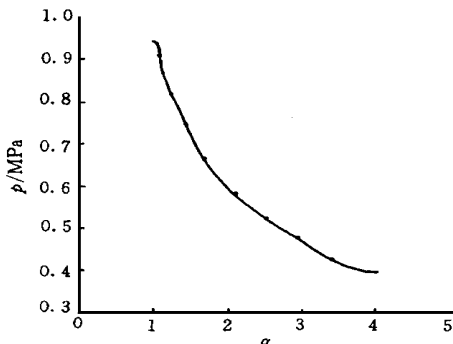


图4 燃烧压力与过量空气系数的关系

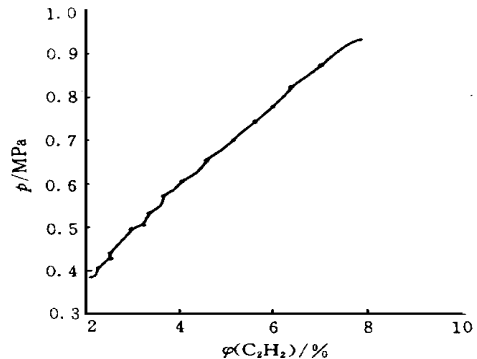


图5 燃烧压力与乙炔浓度的关系(计算值)

1.2 可燃混合气体流速对燃烧压力的影响

可燃混合气体在燃烧室中的流速对燃烧压力的影响关系列在表 1 中。在燃烧室内部结构给定的情况下, 气流速度的变化实质上可反映湍流或雷诺数的变化, 气体流速越高, 意味着它的扰动越大。表中 E_B 为示波器显示的压力波形的最大全脉宽, 它表示在一个压力脉冲波形中升压和卸压所经历的最长时间。 F_B 为最大升压脉宽, 它可以表征燃料的燃烧时间。 p_A 为燃烧室 A 测点上测量的峰值燃烧压力。由表 1 可以看出, 流速变化约 40%, 峰值压力变化高达 80% 左右。随着气流速度的提高, 最大全脉宽和最大升压脉宽均变小。这表明, 扰动增强, 燃烧速度也随之加快。但压力波的传播速度仍保持不变, 基本上维持在音速附近。

表 1 可燃混气流速对燃烧参数的影响

燃烧室 流速/ $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$	体积分数/%	p_A/MPa	压力波速 $\bar{V}/\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$	F_B/ms	E_B/ms	脉冲间隔/ ms
0.389	2.37	0.099	393	25.5	51.7	10
0.432	2.37	0.120	389	24.5	48.6	9
0.486	2.37	0.153	381	16.2	46.1	8
0.555	2.37	0.179	392	14.1	42.8	7

1.3 面积比对燃烧压力的影响

面积比与燃烧压力的关系表示在图 7 上。面积比 r 定义为出口总面积与燃烧室截面积之比。当面积比分别为 0.4, 0.48 和 0.7 时, 燃烧室的峰值压力分别达到 0.512 MPa, 0.442 MPa 和 0.282 MPa, 即面积比越小, 燃烧室的峰值压力越高^[1]。当面积比由 0.7 减小到 0.4 (减小 43% 左右) 时, 燃烧室的峰值压力由 0.282 MPa 增高到 0.512 MPa (增高约 82%)。面积比的减小, 使在快速燃烧阶段流经出口的质量流率减小, 在快速排气阶段所受的制约增大, 因而压力也就提高。在面积比小到接近密闭状态时, 燃烧压力趋于最大值。

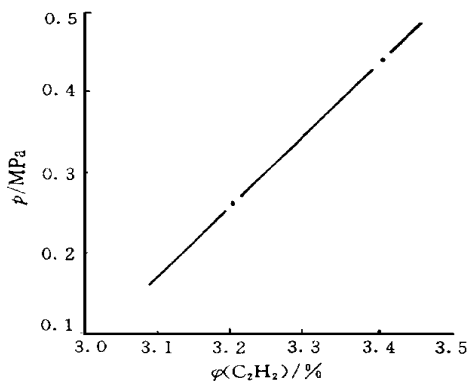


图 6 燃烧压力与乙炔浓度的关系(测量值)

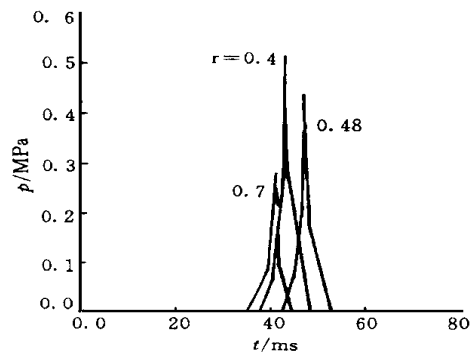


图 7 面积比与燃烧压力的关系(计算值)

1.4 点火功率对燃烧压力的影响

表 2 显示了点火功率对燃烧压力的影响。在燃烧压力的其它影响参数不变的条件下, 点火功率减小, 燃烧过程减慢, 燃烧压力也减小, 但燃烧压力的降低并不强烈依赖于点火功率。事实

上, 在本研究中, 所需要的点火功率的大小还受到燃料的体积分数和预混可燃气体在点火区的流速等因素的制约。当可燃混合气的体积分数接近着火极限的下限区附近时, 所需要的点火功率最大, 而在当量比附近时, 点火功率可以降至最小, 即一个功率较小的火花便足以支持燃烧波的传播。同样若点火区气体的流速较高, 冷却或散热作用加强, 所需要的点火功率就增大, 而气流稳定, 流速又较低, 则点火功率就可以减小。

表2 点火功率对峰值燃烧压力的影响*

点火功率/W	p_A / MPa	压力波速 $\sqrt{v} / (\text{m} \cdot \text{s}^{-1})$	$F_B / \text{m/s}$	$E_B / \text{m/s}$
20.77	0.192	384	11.86	38.34
17.9	0.189	390	12.19	39.2
10.07	0.169	—	—	—
7.31	0.151	385	13.37	39.67
4.99	0.143	379	15.77	40.48
1.57	0.135	382	16.58	40.82

注: * 使用高压变压器作为点火电源。

1.5 可燃混合气体初始温度对燃烧压力的影响

初始温度对燃烧压力的影响是十分明显的。可燃混合气的初始温度升高, 可使着火极限的范围扩大, 使燃烧速度加快, 但燃烧的峰值压力则随初温的提高而下降。这是因为在较高的初始温度下, 可燃混合物的质量变小了。如在密闭容器中, 体积分数为 5% 下的丙烷-空气混合物 (丙烷是液化石油气的主要成份), 在 204 °C 下的峰值燃烧压力比在 27 °C 下的值低约 27%。

由于气脉冲燃烧装置是在常压下启动运行的, 因而初压对峰值燃烧压力的影响可不予考虑。在该装置的设计参数确定以后, 流动参数、面积比、点火功率和初始温度等即为定值。因此在运行中调整燃烧压力或者冲击波强度的主要手段则应是改变过量空气系数 α 或可燃气体的体积分数, 这些值的大小应该在 $\alpha > 1$ 或在小于化学当量体积分数的范围内选择, 超出这些值的范围则会造成燃料的浪费。

2 在石洞口电厂 300MW 机组回转式空气预热器上的试验和应用

在工业试验和应用中, 气脉冲除灰装置系统布置如图 8 所示^[2], 可燃气体使用乙炔或液化石油气, 燃烧空气引自冷 2 次风道, 冲击波输出管安装在回转式空气预热器冷端波纹板的正下方, 喷口面对波纹板。

表 3 给出了不同运行周期下气脉冲装置的除灰参数, 可以看出, 每隔 8 h 或 24 h 除灰一次, 效果比相隔 48 h 要好, 而 8 h 和 24 h 两工况的除灰指标又较接近。从经济性和效果上综合考虑, 在应用中将除灰的运行周期定为 24 h, 即每天用气脉冲装置除灰一次。投用本技术时, 在距空预器 1 m 处测得的声压级比现场的背景噪声仅高 3 dB^[2]。

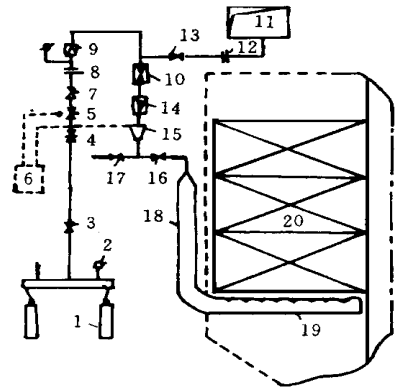


图 8 气脉冲除灰系统示意图

- 1. 乙炔瓶 2. 压力表 3, 4. 旋塞 5. 电磁阀
- 6. 控制装置 7. 乙炔调节阀 8. 乙炔流量孔板
- 9. 单向阀 10. 混合器 11. 风道 12. 空气流量孔板
- 13. 空气调节阀 14. 阻尼器 15. 点火器
- 16. A 组截止阀 17. B 组截止阀 18. 燃烧室
- 19. 脉冲输出管 20. 回转式空预器

表 3 不同运行周期下气脉冲除灰装置运行参数比较

项 目	每个工况重复 2 次进行		
	8 h	24 h	48 h
气脉冲发射次数	120	120	120
空预器烟阻/Pa (试验前/试验后)	1 920/1 900	1 950/1 900	2 050/1 980
排烟温度/ (试验前/试验后)	140/139	140/138	143/141
热风温度/ (试验前/试验后)	309/310	314/317	312/313
冷风温度/ (试验前/试验后)	18~ 20	18~ 20	18~ 20

注: 1 试验时, 发电负荷均保持 280 MW ~ 300 MW。

2 试验时, 烟前是停止吹灰 8 h, 24 h, 48 h 后的数据。

2.1 工业试验研究

在工业试验期间, 对蒸汽吹灰和气脉冲除灰两种吹灰方式的除灰效果进行了比较。参见图 9。试验是在 A、B 两组空预器上同时进行的。空预器 A 用气脉冲除灰, 空预器 B 用蒸汽吹灰, 两者均以 24 h 为除灰周期。除灰过程中锅炉运行工况保持相同, 负荷范围维持在 290 MW ~ 300 MW 水平, 运行测试持续 25 天。该炉空预器在中修后投运时, 曾实测的 A 侧烟气阻力值为 2 000 Pa。图中 t_{ky} 和 t_k 分别表示空预器的排烟温度和冷风温度, ΔH_{ky} 表示空预器烟气侧的进出口阻力差, 即空预器的烟气阻力。可以看出, 在监测对比的 25 天之内, 与 B 侧蒸汽吹灰所维持的平均烟温和烟阻相比, A 侧投用

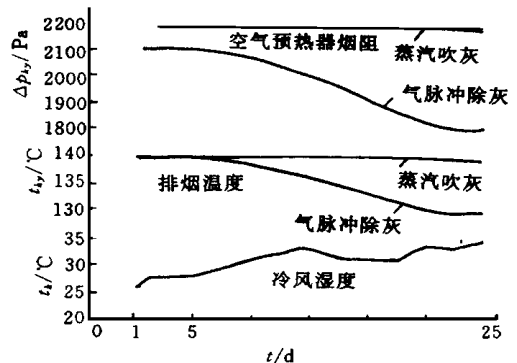


图 9 气脉冲和蒸汽吹灰对空预器烟阻及排烟温度影响

气脉冲除灰能使排烟温度下降 10 °C 左右, 烟阻下降约 350 Pa, 即由约为 2 150 Pa 的初始值下降到 1 800 Pa, 低于中修后实测的 2 000 Pa 的水平。这表明, 在中修时所残留的一部分硬质灰垢也被震碎并清除, 这一分析和停炉后实际观察的结果也十分相符: A 侧空预器冷端波纹板在可视范围内比较清洁, 而 B 侧空预器冷端波纹板则污垢严重, 两者反差甚大。

2.2 工业应用

在气脉冲除灰设备投入运行期间, 又进行了连续运行 100 天的监测。试验条件是锅炉经过大修, 更换了空预器的全部波纹板。投运后在 300 MW 负荷下实测了烟气阻力, A 侧为 1 450 Pa, B 侧为 1 550 Pa。此次监测反映了在洁净的空预器上, 投用气脉冲除灰的实际效果, 参见图 10。由图可见, 运行到 100 天时, 烟阻平均仍维持在 1 500 Pa 左右。需要说明的是, 空预器在这三个多月的运行期间, 经受了多次恶劣条件的考验。由于每天坚持一次气脉冲除灰, 空预器的烟阻在三个月内没有增加, 在全厂 4 台 300 MW 机组中, 其排烟温度也一直处于最好状态。以后的运行进一步证明了, 该炉与使用蒸汽吹灰的其它 3 台炉相比, 排烟温度要低 10 °C 左右。在

洁净的空预器上使用气脉冲除灰, 可较长时间维持空预器原有的清洁水平。

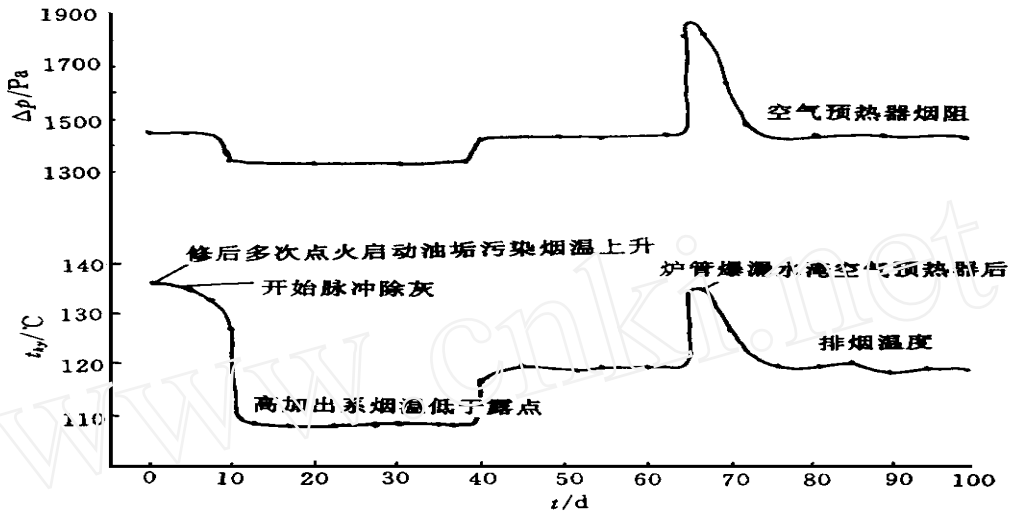


图 10 3[#] 炉空预器气脉冲除灰运行记录

工业试验和运行表明, 使用气脉冲技术可获得优异的除灰效果和显著的经济效益, 可解决蒸汽吹灰解决不了的问题。在较短的时间内, 该技术已在 7 厂 15 台中大型机组上获得了成功的应用。

3 结论

(1) 气脉冲除灰技术, 体现了一种锅炉除灰原理的新思想。它利用可燃气体快速燃烧后产生的冲击波清除波纹板上的积灰, 从而解决了蒸汽吹灰不能解决的回转式空预器的积灰和堵塞等问题。该技术能源利用率高, 应用前景广阔, 可作为电力工业新一代除灰技术发展应用。

(2) 在试验研究的基础上提出的气脉冲除灰方法, 以及在工业试验中优选的最佳运行参数是可靠的, 可以作为设计和运行的依据。

(3) 气脉冲的除灰效果和经济效益比蒸汽吹灰要好得多。它能长时期保持回转式空预器受热面的洁净程度。在已有积灰的空预器上使用, 可使烟气阻力和排烟温度明显降低, 提高锅炉热效率 0.6% 以上。其除灰运行费用也比蒸汽吹灰低约二分之一。

(4) 除灰过程不影响锅炉的正常运行, 也不会损坏空预器设备。相反, 会增加机组运行的可靠性和安全性。

参 考 文 献

- 1 Fan Weijun, He Weilang, Sun Wenchao, et al Study on the Gas-Explosion Soot Remover and Its Application to Power Plant Air-Preheaters Fourteenth Annual International Pittsburgh Coal Conference, September 23~ 27, 1997
- 2 单昌伦, 胡四杰. 气脉冲除灰技术在 300MW 机组上的应用 上海电力 1997, (2): 42~ 45