

# 含 CO<sub>2</sub> 气流对 20 号碳钢冲蚀磨损性能影响的试验研究

赵宪萍 朱崇武 孙坚荣 潘卫国

(上海电力学院 能源与机械工程学院 上海 杨浦 200090)

**摘要:** 火电站燃煤锅炉由于飞灰冲蚀磨损而导致爆管的问题一直是行业急待解决的问题。用试验研究方法,在温度为 250-450 °C 之间,研究了气流中含 CO<sub>2</sub> 气体时对 20 号碳钢冲蚀磨损性能的影响,并与之前在压缩空气流中做的此类试验结果做了比较。试验结果表明,加入 CO<sub>2</sub> 气流后 20 号碳钢的磨损规律未变,其相对磨损量随温度的升高先减小后增大。同时,由于氧化腐蚀和冲蚀的交互作用,加入 CO<sub>2</sub> 气流后 20 号碳钢的冲蚀磨损量明显增大。

**关键词:** 飞灰冲蚀磨损; CO<sub>2</sub>; 20 号碳钢; 燃煤锅炉

中图分类号: TK 224.9

文献标识码: A

DOI:10.16146/j.cnki.rndlgc.2015.01.021

## 引言

煤在锅炉中燃烧后,烟气中会含有大量的 CO<sub>2</sub>、H<sub>2</sub>O、N<sub>2</sub>、O<sub>2</sub> 和 SO<sub>2</sub> 等物质成份。其中 CO<sub>2</sub> 气体所占烟气体积比例较大,干燥的 CO<sub>2</sub> 并不具备腐蚀性,但在高温、高湿的条件下流动的 CO<sub>2</sub> 气体在空气中溶解发生电离产生碳酸根离子 CO<sub>3</sub><sup>2-</sup>,因而造成 CO<sub>2</sub> 气体流过或接触的受热面及设备不同程度的腐蚀和材料磨损冲蚀。其主要的影响因素有: CO<sub>2</sub> 气体分压力、介质中的含水量、腐蚀产物膜厚度、金属化学成份、流速和氧含量等<sup>[1-4]</sup>。此外,不同气体氛围对金属的氧化影响也有很大差别。已有研究表明,碳钢在 CO<sub>2</sub> 气氛下与空气下的抗氧化性能并不相同<sup>[5]</sup>,温度对金属材料冲蚀磨损和氧化腐蚀均有重要影响,这与高温下金属表面产生的多层氧化膜厚度有关<sup>[6-10]</sup>。20 号钢作为电厂低温段受热面的常用材料,在 530 °C 以下具有较好的抗氧化性能。常被用于锅炉尾部受热面省煤器的制造材料。

文献[11]对 20 号钢的磨损性能在压缩空气流中进行了热态试验研究,得到一些有价值的规律。然而,烟气中大量的 CO<sub>2</sub> 气体对锅炉金属材料的冲蚀磨损影响有多大,业内并没有太多的研究。

本研究在热态飞灰磨损试验装置上对 20 号碳钢进行了 250-450 °C 温度段的试验研究。试验气流参照一般燃煤电厂锅炉烟气中 CO<sub>2</sub> 的含量比例,掺入 CO<sub>2</sub> 气体进行试验,分析气流中 CO<sub>2</sub> 气体对 20 号碳钢冲蚀磨损性能的影响。

## 1 试验系统及工况

### 1.1 试验系统

试验系统如图 1 所示。

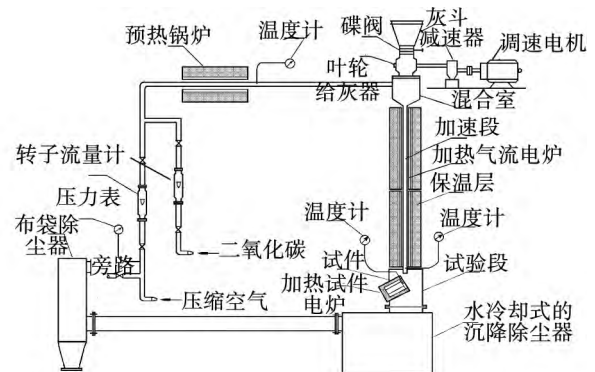


图 1 热态飞灰冲刷磨损试验系统

Fig. 1 A hot-state flying-ash washing and sweeping wear and tear test system

该试验系统的工作过程如文献[10]所述,在试验系统中增加了混入 CO<sub>2</sub> 气流的管道、相关阀门及转子流量计。按设定的试验工况,CO<sub>2</sub> 气体经转子流量计测量后与压缩空气混合,一起进入预热段加热后进入混合室,气流和飞灰以 30° 冲刷角冲击试件。用专门的加热电炉维持试验所要求的温度,20 号碳钢试件中心设有温度测点。试件称重使用 1/10 000 g 精度的天平。冲刷试验后的试件放入干

收稿日期: 2014-03-25; 修订日期: 2014-05-16

基金项目: 上海市地方能力建设项目(13160501000)

作者简介: 赵宪萍(1956-),女,山西襄垣人,上海电力学院教授。

燥器皿中冷却至常温时才取出称重,其失重量为  $\Delta g'$  (mg)。另外,考虑试验过程中试件在热态下被氧化而导致重量增加的量  $\Delta g''$  mg,所以磨损的真正失重量  $\Delta g = \Delta g' + \Delta g''$  mg。试件的磨损量采用相对磨损量  $\Delta I = \Delta g/G$  mg/g,  $G$  为用掉的灰的质量,即相对于每克灰冲蚀掉的金属量 mg。

### 1.2 试验工况拟定

试验用灰样取自某电厂实际运行中产生的煤灰,经粒度分析试验,并计算求得其平均粒径为  $112.8 \mu\text{m}$ 。试件为  $\Phi 50 \text{ mm} \times 4 \text{ mm}$  的 20 号碳钢圆片。

试验前根据电厂几种常用煤种的含碳量,计算出烟气中 CO<sub>2</sub> 的含量比例,气流中混入 CO<sub>2</sub> 的量为  $0.77 - 1.11 \text{ m}^3/\text{h}$ 。在同一气流速度  $100 \text{ m/s}$  下,试件及气流的温度分别控制在  $250, 300, 350, 400$  和  $450 \text{ }^\circ\text{C}$  进行含 CO<sub>2</sub> 气流环境下热态飞灰冲蚀磨损试验。

## 2 试验数据处理及试验结果

试验结果如图 2 所示,可以看出,加入 CO<sub>2</sub> 气流后试件质量相对磨损量  $\Delta I$  随温度的升高先减小后增大,存在一个临界温度点,磨损规律与文献 [11] 中热态规律相同。

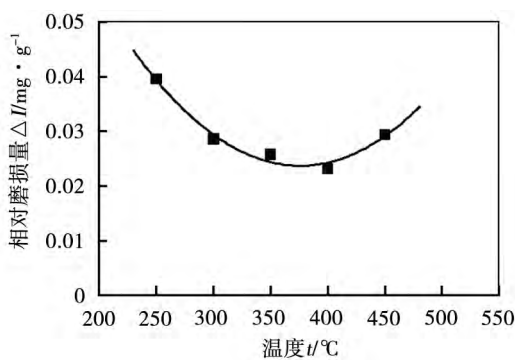


图 2 CO<sub>2</sub> 气流环境下 20 号碳钢相对质量磨损量与温度的关系

Fig. 2 Relationship between  $\Delta I$  and  $T$  of 20# carbon steel in an atmosphere of CO<sub>2</sub> flow

根据数据点分布情况及其规律,采用非线性曲线进行拟合,拟合公式为:

$$\Delta I = (163.47 - 0.7434t + 0.001t^2) \times 10^3 \quad (1)$$

式中:  $\Delta I$ —试件质量相对磨损量  $\text{mg/g}$ ;  $t$ —试件表面温度  $^\circ\text{C}$ 。拟合公式 (1) 的相关系数  $R^2 = 0.9749$ 。多项式拟合曲线如图 2 中曲线所示。

公式 (1) 两边对温度  $t$  求导,可得:

$$\Delta I' = -0.7434 + 2 \times 0.001t \quad (2)$$

当  $\Delta I' = 0$  可求得  $\Delta I$  的最小值对应温度,即加入 CO<sub>2</sub> 气流后的临界温度点。20 号碳钢在试验 CO<sub>2</sub> 气流环境下的临界温度为:

$$t_1 = \frac{0.7434}{2 \times 0.001} = 371.7(^\circ\text{C}) \quad (3)$$

与文献 [11] 相比,加入 CO<sub>2</sub> 气流后临界温度有所提升。

## 3 试验结果分析与讨论

比较 CO<sub>2</sub> 气流环境下的试验结果与文献 [11] 中相同试验工况下不含 CO<sub>2</sub> 气流的试验结果如图 3 所示。明显看出,在 CO<sub>2</sub> 气流环境下 20 号碳钢的相对磨损量明显变大,是不含 CO<sub>2</sub> 气流环境下的 2-3 倍。分析原因,CO<sub>2</sub> 与气流中水分作用会产生腐蚀,此外 CO<sub>2</sub> 气氛下金属表面的氧化有很大的不同。在含有 CO<sub>2</sub> 的氧化性气氛中金属的氧化速率远远高于在纯空气中的氧化速率<sup>[5]</sup>,CO<sub>2</sub> 的存在影响了 20 号碳钢表面氧化膜的密度、生成与脱落。CO<sub>2</sub> 气氛下 20 号碳钢的氧化腐蚀和冲刷的交互作用是造成磨损量变大的主要原因。氧化腐蚀破坏金属的晶界、相界等组织的完整性,降低其结合强度使得材料表面疏松易于被冲刷掉;冲刷磨损破坏金属表面氧化膜,抑制氧化膜的保护作用,裸露出新的金属表面容易被腐蚀。此外,由于 CO<sub>2</sub> 密度大于空气密度,加入 CO<sub>2</sub> 后增大了气流的密度,无形中也增加了试件被冲刷程度。

研究发现,大多数冲刷-腐蚀引起的金属材料高温退化是由于表面氧化膜的形成和去除,冲刷-腐蚀是两个相互竞争过程的综合效应。氧化腐蚀形成的氧化膜或多或少地为金属提供了保护,使得反应速率随膜厚度的增大而下降。根据氧化膜的厚度及其保护性能不同,氧化速度取决于界面反应速度或反应物通过膜的扩散速度。在 CO<sub>2</sub> 氛围下能促进氧通过氧化物结构中的孔洞传输,试验气流中 CO<sub>2</sub> 能够明显增加金属的氧化速率。CO<sub>2</sub> 引起的碳化反应也会显著改变金属的反应速率。CO<sub>2</sub> 气氛中金属在经过一段孕育期后会发生“失稳”氧化,加速氧化与碳在氧化膜中的沉积有关。CO<sub>2</sub> 穿过金属表面腐蚀产物膜导致碳在金属机体中溶解,随后碳在膜中的沉积破坏氧化膜,使得体系处于快速的“失稳”氧化状态<sup>[5-12]</sup>。冲刷磨损会除去材料的表面,使氧化

形成的表面膜耗损或减薄,抑制氧化膜的保护作用,当反应产物被持续去除时,氧化物又会迅速生成。这样的交互作用导致了材料的快速流失,因而在含 CO<sub>2</sub> 气流中冲刷磨损率会增大。

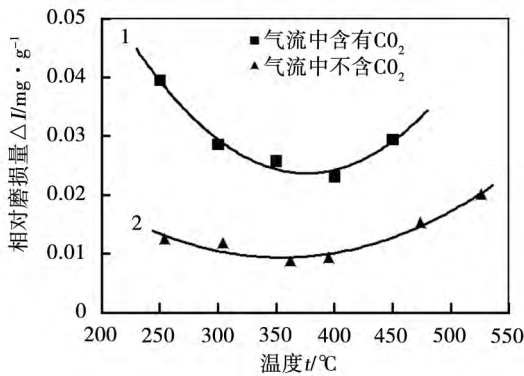


图3 20号碳钢在两种不同气流环境中相对质量磨损量比较

Fig. 3 Relative mass erosion rate of 20# carbon steel in an atmosphere of two kinds of gas flow

电厂燃煤锅炉的烟气中的成分更加复杂,其氧化腐蚀和冲刷磨损交互影响,使得飞灰对金属的冲刷磨损更加严重。在各种气体的混合气氛中,对不同气体的影响和腐蚀机理还需进一步研究。通过试验研究及理论分析,了解二者的相互作用机制,才能更有效的从材料选择、表面处理等方面寻求防护措施。

#### 4 结论

(1) 在试验温度区域内,20号碳钢在含 CO<sub>2</sub> 气流环境下仍然符合热态磨损规律,即相对磨损率先随着温度的升高而减小,达到临界点温度后,随温度升高而增大。与不含 CO<sub>2</sub> 气流环境相比<sup>[11]</sup>,其临界拐点温度有所提升。

(2) 加入 CO<sub>2</sub> 气流后加速了20号碳钢的冲刷磨损,CO<sub>2</sub> 气流环境下的相对磨损量是不含 CO<sub>2</sub> 气流环境下的2-3倍。

(3) 氧化腐蚀和冲刷磨损交互作用表现为腐蚀加速冲刷磨损,冲刷磨损加速腐蚀导致金属材料磨损加剧。对不同气流中腐蚀和冲刷磨损交互作用机理还需进一步研究。

#### 参考文献:

[1] 周琦,王建刚,周毅. 二氧化碳的腐蚀规律及研究进展[J]. 甘肃科学学报. 2005, 17(1): 38-40.

ZHOU Qi, WANG Jian-gang, ZHOU Yi. Law governing the corrosion and erosion caused by carbon dioxide and advances in its study[J]. Journal of Gansu Sciences 2005, 17(1): 38-40.

[2] 赵学芬,姚安林,赵忠刚. 二氧化碳腐蚀影响因素的层次分析法[J]. 腐蚀与防护. 2006, 27(4): 191-193.

ZHAO Xue-fen, YAO An-lin, ZHAO Zhong-gang. Method for hierarchically analyzing the factors influencing corrosion and erosion caused by carbon dioxide[J]. Corrosion and Protection. 2006, 27(4): 191-193.

[3] ZHANG Yu-cheng, PANG Xiao-lu. Discussion of the CO<sub>2</sub> corrosion mechanism between low partial pressure and supercritical condition[J]. Corrosion Science 2012, 59: 186-197.

[4] GAO M, PANG X, GAO K. The growth mechanism of CO<sub>2</sub> corrosion product films[J]. Corrosion Science 2011, 53: 557-568.

[5] 刘秀成,安成强,等. 金属腐蚀学[M]. 北京: 国防工业出版社. 2002.

LIU Xiu-cheng, AN Cheng-qiang, et al. Corrosion Science of Metals[M]. Beijing: National Defence Industry Press 2002.

[6] Maksim Antonov, Renno Veinthal, Elina Huttunen-Saarivirta, et al. Effect of oxidation on erosive wear behaviour of boiler steels[J]. Tribology International 2013, 68: 35-44.

[7] 姜晓霞,李诗卓,李曙. 金属的腐蚀磨损[M]. 北京: 化学工业出版社. 2003.

JIANG Xiao-xia, LI Shi-zhuo, LI Shu. Corrosion and wear of various metals[M]. Beijing: Chemical Industry Press. 2003.

[8] 赵宪萍,孙坚荣. 电厂锅炉常用钢材热态飞灰磨损性能的试验研究[J]. 中国电机工程学报. 2005, 25(21): 117-120.

ZHAO Xian-ping, SUN Jian-rong. An experimental study on the hot-state flying-ash wear and tear performance of steel materials commonly used in utility boilers[J]. Proceedings of China Electric Machinery Engineering 2005, 25(21): 117-120.

[9] 赵宪萍,徐开义,蒋伟元,孙家庆. 不同温度下金属氧化膜对灰磨损性能的影响[J]. 华东工业大学学报. 1996, 18(1): 73-79.

ZHAO Xian-ping, XU Kai-yi, JIANG Wei-yuan, et al. Effect of metal oxide films at various temperatures on their wear and tear performance to flying-ash[J]. Journal of East China University of Technology, 1996, 18(1): 73-79.

[10] 赵宪萍,孙坚荣. 12Cr1MoV合金钢热态飞灰冲刷磨损性能的试验研究[J]. 热能动力工程. 2000, 15(5): 502-505.

ZHAO Xian-ping, SUN Jian-rong. Experimental study of the hot-state flying ash washing and sweeping-caused wear and tear performance of 12Cr1MoV alloy steel[J]. Journal of Engineering for Thermal Energy and Power 2000, 15(5): 502-505.

[11] 赵宪萍,孙坚荣,邹荣辉. 20号碳钢热态飞灰冲刷磨损性能的试验研究[J]. 中国电机工程学报. 2001, 21(6): 90-93.

ZHAO Xian-ping, SUN Jian-rong, ZOU Rong-hui. An experimental study on hot-state flying-ash washing and sweeping wear and tear performance of 20# carbon steel[J]. Proceedings of China Electric Machinery Engineering 2001, 21(6): 90-93.

[12] Neil Birks, Gerald H. Meier, Frederick S. Pettit. 金属高温氧化导论[M]. 辛丽,王文,译. 北京: 高等教育出版社. 2010.

Neil Birks, Gerald H. Meier, Frederick S. Pettit. Introduction to High-temperature Oxidation of Metals[M]. translated by XIN Li, WANG Wen, Beijing: Higher Education Press 2010.

(姜雪梅 编辑)

tubesheets of a condenser it is reasonable and feasible to use the matrix displacement method to seek solutions to the mechanical model for tubesheets and beams. **Key Words:** condenser , tubesheet , beam , matrix displacement method

含 CO<sub>2</sub> 气流对 20 号碳钢冲蚀磨损性能影响的试验研究 = **Experimental Study of the Influence of a CO<sub>2</sub> contained Gas Flow on the Erosion and Wear Performance of 20 Carbon Steel** [刊 , 汉] ZHAO Xian-ping , ZHU Chong-wu , SUN Jian-rong , PAN Wei-guo ( College of Energy Source and Mechanical Engineering , Shanghai University of Electric Power , Shanghai , China , Post Code: 200090) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. - 2015 , 30( 1) . - 78 - 80

Tube rupture of coal-fired boilers in thermal power plants arisen from the erosion and wear by flying ash is considered as a problem urgently to be solved in the sector. The authors studied the influence of a gas flow contained carbon dioxide on the erosion and wear performance of 20 carbon steel by using an experimental study method when the temperature is within a range from 250 °C to 450 °C and compared with the results of the test of the same kind previously made in the compressed air flow. The test results show that the wear and tear law of 20 carbon steel keeps unchanged after the carbon dioxide gas flow is added and the relative amount of steel worn and torn will first decrease and then increase with an increase of the temperature. At the same time , due to the interaction of oxidized corrosion and erosion , the erosion and wear amount of 20 carbon steel will conspicuously increase after an addition of carbon dioxide to the gas flow. **Key Words:** erosion and wear by flying ash , CO<sub>2</sub> , 20 carbon steel , coal-fired boiler

基于褐煤干燥技术的机炉热集成优化系统 = **Lignite Drying Technology-based Turbine-boiler Thermal Integrated System** [刊 , 汉] FANG Ya-xiong , XU Cheng , XU Gang , ZHANG Chen-xu , YANG Yong-ping ( College of Energy Source and Mechanical Engineering , Shanghai University of Electric Power , Shanghai , China , Post Code: 200090) , SONG Xiao-na ( College of Energy Source and Mechanical Engineering , Shanghai University of Electric Power , Shanghai , China , Post Code: 200090) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. - 2015 , 30( 1) . - 81 - 87

On the basis of the conventional steam extraction drying system for lignite-fired units , proposed was a type of turbine-boiler thermal integration and optimization system in combination with the flue gas waste heat utilization technology for use in the tail portions of boilers. The steam exhausted from the drying of the lignite was utilized to pre-