

含尘气流对 20g 冲蚀磨损性能的研究

梁佳鹏,左海滨,刘燊辉,马恩宇

(北京科技大学 钢铁冶金新技术国家重点实验室,北京 100083)

摘要:燃煤锅炉内含尘烟气的冲蚀作用是换热器失效的主要原因之一。本文设计加速试验,研究燃煤锅炉常见换热材质 20g 在不同飞灰冲击速度(40~120 m/s)、飞灰粒径(65、180 和 320 μm)以及不同温度(300、350 和 400 $^{\circ}\text{C}$)下的冲蚀磨损情况并分析其冲蚀机理。结果表明:磨损量随冲刷速度的增加呈指数增长,温度升高,速度对冲蚀的影响在逐渐减弱;磨损量随着温度的升高先降低后增高,在 300 $^{\circ}\text{C}$ 冲蚀量最小。粒度对磨损量的影响随冲刷速度的增大变得越加明显,冲蚀量随飞灰粒径的增加逐渐减小,在粒径大于 180 μm 后,冲蚀磨损量不再受粒径影响。

关键词:冲蚀磨损;含尘气流;冲蚀速度;冲蚀机理

中图分类号:TK224.9

文献标识码:A

DOI:10.16146/j.cnki.rndlgc.2020.02.029

[引用本文格式]梁佳鹏,左海滨,刘燊辉,等.含尘气流对 20g 冲蚀磨损性能的研究[J].热能动力工程,2020,35(2):208-212. LIANG Jia-peng, ZUO Hai-bin, LIU Shen-hui, et al. Study on 20g erosion wear performance of dust-containing airflow[J]. Journal of Engineering for Thermal Energy and Power, 2020, 35(2):208-212.

Study on 20g Erosion Wear Performance of Dust-Containing Airflow

LIANG Jia-peng, ZUO Hai-bin, LIU Shen-hui, MA En-yu

(University of Science and Technology Beijing, State Key Laboratory of Advanced Metallurgy, Beijing, Post Code: 100083)

Abstract: The erosion of dusty flue gas in coal-fired boilers is one of the main reasons for the failure of heat exchangers. In this paper, an accelerated test was designed to study the erosion wear of 20g of common heat transfer materials of coal-fired boilers under different fly ash impact velocity(40~120 m/s), fly ash particle size(65, 180 and 320 μm) and different temperature(300, 350 and 400 $^{\circ}\text{C}$), and then the erosion mechanism was analyzed. The results show that the wear rate increases exponentially with the increase of the scouring speed, and when the temperature increases, the effect of velocity on erosion is gradually weakened. The wear rate decreases first and then increases with the increase of temperature, and the erosion rate is the smallest at 300 $^{\circ}\text{C}$. The effect of particle size on the wear rate becomes more and more evident with the increase of the scouring speed. The erosion rate decreases with the increase of the fly ash particle size. When the particle size is larger than 180 μm , the erosion wear is no longer affected by the particle size.

Key words: erosion wear, dusty airflow, erosion velocity, erosion mechanism

收稿日期:2019-06-27; 修订日期:2019-08-23

基金项目:国家重点研发计划(2016YFB0600701)

Fund-supported Project: National Key Research and Development Program(2016YFB0600701)

作者简介:梁佳鹏(1994-),男,河南洛阳人,北京科技大学硕士研究生, E-mail:ws_jiapeng@163.com.

通讯作者:左海滨(1976-),男,河北沧州人,北京科技大学教授, E-mail:zuohaibin@ustb.edu.cn.

引言

目前,我国燃煤发电占发电装机总量的73%,处于绝对主导地位。煤粉燃烧后产生大量含粉尘的烟气,烟气经过换热器受热面时会产生积灰、磨损和腐蚀等问题。细小的固体粉尘伴随着气流以一定的速度和角度冲击材质的过程称之为冲蚀磨损,这在冶金、能源、机械等领域是广泛存在的现象。特别是在燃煤电厂中,其管束由于长期受摩擦磨损问题的困扰,经常会发生破裂或泄漏现象,据统计约有一半以上的设备隐患是由于摩擦磨损导致的^[1-2]。关于固体粒子磨损问题,国外学者在理论层面提出一些影响较大的理论,诸如Finnie切削理论^[3],Bitter的变形理论^[4],Sheldo的二次冲蚀理论^[5]等。国内学者则更侧重实际应用中的规律,如葛铭^[6]搭建管束冲蚀磨损平台并结合Fluent软件模拟对不同材质进行研究,得到磨损量与速度、颗粒浓度和粒径等因素的关联式,并指出浓度和极限流速存在一定的影响关系。偶国富^[7]研究了冲击角度、颗粒速度和颗粒粒径等对1Cr9Mo钢的冲蚀磨损,低角度下冲蚀以切削为主并伴随少量犁沟,常温下的冲蚀破坏比高温态更严重。研究磨损机理,对于提高换热器的使用年限,以及设备的稳定运行都有一定的实际意义。

本文以电厂锅炉含尘烟气的回收利用为背景,从粉尘颗粒特性和环境温度两方面研究常用换热器管束用钢20g的冲蚀性能,寻找飞灰对换热器带来的影响。

1 试验介绍

1.1 试验装置

含尘烟气对换热器材质的加速磨损试验在自行设计的冲蚀磨损试验台完成,如图1所示。

试验台由送气部分、加热部分、给灰部分、试验段以及除尘部分组成。空气压缩机将压缩后的气体通入系统中,由入口处的压力表和转子流量计控制气流压力以及气流流速。为使高速气流获得较高的工作温度,气流首先经过预加热炉预热,然后进入混合加热段。预加热炉和混合加热段均采用电炉方式加热,并增设了保温措施。飞灰直接加入到混和加热段,给灰量采用两级控制。将精确称重的飞灰装

入料斗中,用蝶阀控制灰斗中飞灰的下落量,给灰装置采用叶轮式螺旋给料,通过调速机和减速器精准控制叶轮转速从而控制飞灰加入量。为保证飞灰与预热的压缩气流在混合加热段混合和加热均匀,设计了2 m长的混合加热段,使飞灰颗粒具有充分的时间加速并被加热到工况温度。对电厂灰进行分析可知,其主要成分为 SiO_2 以及 Al_2O_3 ,因此在研究飞灰粒径对磨损影响时,采用不同粒径的石英砂和黑刚玉磨料按1.28:1比例混合模拟不同粒径飞灰。对于塑性材料而言,其冲蚀磨损最严重的情况发生在低角度下^[8](30°左右),换热器用20 g钢是典型的塑性材料,为获得材质最大可能磨损状态,实验中将冲刷角度固定为30°。

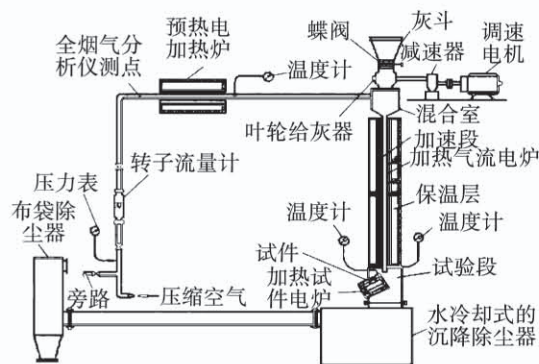


图1 冲蚀磨损试验台

Fig.1 Schematic diagram of erosion wear test bench

1.2 实验方案

试样材质为20 g,加工为直径50 mm,厚4 mm的圆形薄片。试验气体压力为0.3 MPa,气流速度通过阀门调节。为了确保冲刷气流的温度和试件温度保持一致,减少实验误差,在试件侧面插入热电偶检测中试件中心温度。在材料失效研究中,考虑到实际烟气流速较小冲蚀效果不明显,采用加速试验方法。实验气流流速为40、60、80、100和120 m/s 5种情况。环境温度为常温和高温(300、350和400℃)两种状态。考察的飞灰粒径分别为65、180和320 μm,65 μm飞灰为上海某电厂实际除尘灰,后两种粒度由石英砂和黑刚玉配置而成。

1.3 分析方法

冲蚀磨损程度使用经典的失重法来表示,相对磨损量,为试件实验前后质量变化, G 为每次实验用灰重量,两者的比值表示单位质量飞灰对材料的磨

损率。试件在实验前后分别用精度为 0.000 01 g 的电子天平称量记录质量变化,在进行高温环境的冲蚀后,要对试件进行密封干燥降温,防止材料表面和空气接触氧化导致重量增加,从而影响实验结果。另外,在高温态实验时需要考虑温度对表面氧化的作用^[9],减去增重质量 ($\Delta g = 1.318\ 644 \cdot 10^{-15} T^{5.819\ 212}$) 才是实际的质量变化 Δm 。

根据已有研究以及实验分析^[10],相对磨损量的数学模型可以归结为粒度、速度和温度对磨损量的影响,其模型为:

$$E = k \cdot d_s^m V_s^n \cdot T^u \tag{1}$$

式中: E —相对磨损量,mg/g; k —磨损常数,包含冲刷角度,粒子形状等影响的常数; d_s —飞灰的平均粒径, μm ; V_s —固体粒子冲击速度,m/s,由气流速度迭代计算得出^[11]; T —温度, $^{\circ}\text{C}$; m —粒度指数,取 1.876^[12]; n —速度指数; u —温度指数。

2 试验结果及分析

2.1 冲击速度对相对磨损量的影响

冲击速度是影响相对磨损量的主要因素之一,一般而言,冲击速度增大,冲击功增加,对材料的磨损加剧。固定冲击角 30° ,使用平均粒径为 $65\ \mu\text{m}$ 的除尘灰,在常温态 ($28\ ^{\circ}\text{C}$) 和高温态 ($350\ ^{\circ}\text{C}$) 下,测得 20 g 的冲蚀磨损量变化,如图 2 所示。

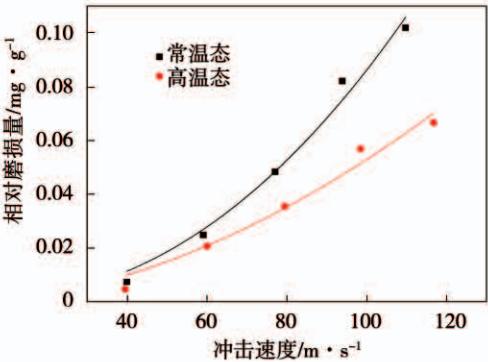


图 2 冲击速度对相对磨损量的影响

Fig. 2 Influence of impact speed on relative wear

利用 Origin 自定义函数,分别对常温和高温下的相对磨损量曲线进行拟合。

常温时的拟合曲线方程:

$$\Delta E = 1.715\ 02 \times 10^{-7} d_s^{1.876} V_s^{2.212\ 47} T^{-1.347\ 9} \tag{2}$$

高温时拟合的曲线方程:

$$\Delta E = 2.087\ 91 \times 10^{-7} d_s^{1.876} V_s^{1.823\ 75} T^{-0.6462} \tag{3}$$

式(2)和式(3)的相关系数 R^2 分别是 0.972 42 和 0.946 51,表明实验数据点和方程有较高的拟合度,无论是常温还是高温时,随着冲击速度增加,相对磨损量均以指数形式增长。其原因在于当速度增加时,单个颗粒的冲击动能增加,对材料表面的冲击破坏程度增加,导致磨损量逐渐增大。相同冲击速度条件下,高温时的相对磨损量小于常温时的相对磨损量,其可能的原因在于材料表面在高温时的某些性质发生变化,如组织的转变,表面氧化膜的生成对内部基体起到保护作用,导致其冲蚀效果减弱。不同温度下,冲击速度对相对磨损量的影响强度也体现在速度指数上。低温时速度指数为 2.212 47,而高温下速度指数为 1.823 75,说明在相同冲击条件下高温时冲击速度对相对磨损量的影响程度比常温时小。试验获得的速度指数与塑性材料在低角度下冲蚀,速度指数一般不会大于 3 的结论相吻合。

2.2 温度对相对磨损量的影响

高温时可使材料表面性质发生变化使得冲蚀效果减弱,为进一步掌握温度对相对磨损量的影响,固定冲击速度为 80 m/s,仍采用平均粒径为 $65\ \mu\text{m}$ 的电厂灰,在不同温度下对试样的相对磨损量进行测定,结果如图 3 所示。

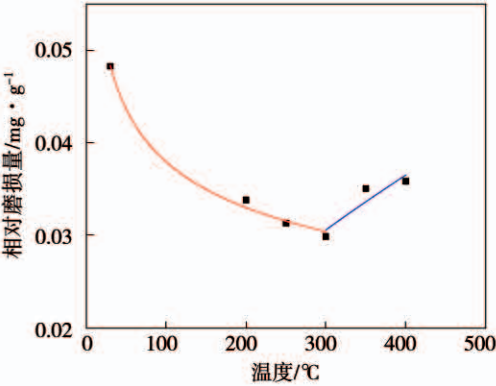


图 3 温度对相对磨损量的影响

Fig. 3 Influence of temperature on relative wear

图中可以看到,常温态下的冲蚀磨损量最大,随着温度升高,磨损量逐渐减小,在 $300\ ^{\circ}\text{C}$ 达到最低点。之后随着温度的升高,磨损量又有所增加,在 $400\ ^{\circ}\text{C}$ 趋于稳定。原因在于高温下材料表面被氧化,生成一层致密的氧化膜,这层氧化膜在一定程度

上保护了金属基体,减弱了冲蚀的作用^[13]。但同时,随着温度的不断升高,材料的硬度降低,耐磨性会下降,其对材料相对磨损量的影响大于氧化膜的保护作用,因此磨损量超过 300 ℃后又有所增加。

不同温度下试件中心点进行能谱分析,测得元素含量如表 1 所示。

表 1 试件冲蚀中心元素含量分析
Tab.1 Analysis of the content of the element
in the erosion of the specimen

温度/℃	O	Fe	C
30	1.49	87.25	2.56
300	6.89	75.63	7.68
350	7.40	71.54	8.83
400	7.94	69.67	9.34

可以看出,随着温度的升高,氧含量在不断增加,说明高温下试件表面已经发生的氧化,而在 350 ℃之后氧含量趋于稳定,表面氧化膜不再增加,相应地对基体的保护也趋于稳定。温度继续升高后,在试验温度范围内,冲蚀磨损量也不再有明显的变化。

2.3 粒度对相对磨损量的影响

在材料冲蚀破坏过程中,粒度对于冲蚀影响存在两面性:一方面,随着磨粒粒径的增加,相同冲击速度下的每个颗粒的动能变大,对材料表面的切削和撞击程度加深,冲蚀增强;另一方面,粒径越大的颗粒在碰撞瞬间越容易破裂,且单位体积内所含的颗粒数目变少,冲击频率降低,使得材料表面不能形成有效裂纹,冲蚀减弱^[14]。350 ℃工况下,不同速度、不同粒径条件下的相对磨损量如图 4 所示。

从图中可以看出,不同冲击速度下相对磨损量都遵循着同一变化规律,相对磨损量随着粒径的增加逐渐减小,但减小的趋势逐渐变缓。不同的冲击速度各自存在一个粒径的临界值,超过该值,相对磨损量将趋于稳定,粒度变化不再是影响相对磨损量的主要因素。同时可以看到,该粒度临界值随着冲击速度的降低而减小。这主要是在相同给灰量条件下,颗粒粒度增大,气流中所含颗粒数目减少,对试件的冲刷不如小粒径时集中连续。此外,虽然小颗粒的单个颗粒冲击动能不如大颗粒,但是细微颗粒与气流的混合更均匀,和材料表面的接触面积大,因而粒径较小时产生的冲蚀效果更明显。

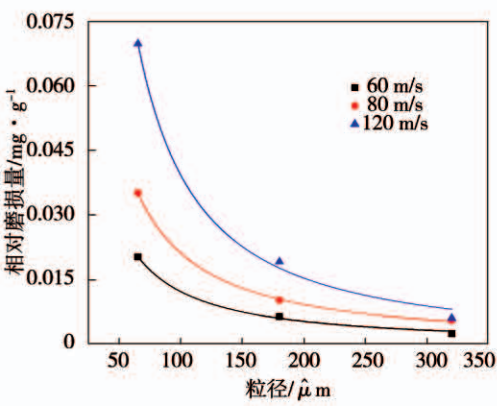


图 4 飞灰粒径对相对磨损量的影响
Fig.4 Influence of fly ash particle size on relative wear

3 结 论

(1) 相对磨损量与冲击速度呈指数关系,冲击速度增大,磨损量呈指数增长。常温时的速度指数为 2.212 47,高温时的速度指数为 1.782 2,说明冲击速度在低温时对相对磨损量的影响更大,这与高温时材料本身的性质改变有关。

(2) 温度对相对磨损量的影响可以归结为对材质自身性质的影响,磨损量随着温度的升高先减少后增加,这是形成致密氧化膜保护和高温造成材质耐磨性能下降共同作用的结果。当粒径温度为 300 ℃时,20g 的相对磨损量最小。

(3) 20g 在细小粒径下的相对磨损量要远远大于粗颗粒条件下的磨损量,随着颗粒的增大,单位体积内颗粒减少,粒子和材料的接触面积减少导致冲蚀作用逐渐减弱。粒径对相对磨损量的影响存在一个临界直径,当粒径超过临界值后,冲蚀磨损量基本维持不变。

参考文献:

[1] 谢文伟,邓建新,周后明,等. 材料冲蚀磨损的数值模拟研究现状及展望[J]. 腐蚀与防护,2012,33(7):601-604.
XIE Wen-wei, DENG Jian-xin, ZHOU Hou-ming, et al. Development and prospect in numerical simulation of erosion[J]. Corrosion & Protection,2012,33(7):601-604.
[2] 冯艳玲,魏 琪,李 辉,等. 高温冲蚀磨损测试方法及机理的研究概述[J]. 锅炉技术,2008(4):62-67.
FENG Yan-ling, WEI Qi, LI Hui, et al. Summarization of the research on high-temperature erosion on test method and mechanisms [J]. Boiler Technology,2008(4):62-67.

- [3] Finnie I. The mechanism of erosion of ductile metals[J]. Proc. 3rd Natl. Cong. Applied Mech., 1958:527-532.
- [4] BITTER J G. A study of erosion phenomena[J]. Wear, 1963, 6(3):169-190.
- [5] SHELTON G L, ASHOK K. An investigation of impingement erosion using single particles[J]. Wear, 1972, 21(1): 195-209.
- [6] 葛 铭, 葛荣存, 张 贤, 等. 换热管束冲蚀磨损的实验研究[J]. 锅炉技术, 2017, 48(4): 1-5.
GE Ming, GE Rong-cun, ZHANG Xian, et al. Experimental research on erosion of heat exchanger bundles[J]. Boiler Technology, 2017, 48(4): 1-5.
- [7] 偶国富, 叶浩杰, 郑智剑, 等. 1Cr9Mo 钢高速气-固两相流冲蚀磨损[J]. 工程科学学报, 2016, 38(12): 1747-1754.
OU Guo-fu, YE Hao-jie, ZHENG Zhi-jian, et al. High-speed gas-solid two-phase flow erosion of 1Cr9Mo alloy[J]. Chinese Journal of Engineering, 2016, 38(12): 1747-1754.
- [8] 吕祥鸿, 王 悦, 张春婉. 316 不锈钢的冲蚀磨损性能研究[J]. 热加工工艺, 2018, 47(24): 48-51, 54.
LYU Xiang-hong, WANG Yue, ZHANG Chun-wan. Investigation on erosion wear behavior of 316 stainless steel[J]. Hot Working Technology, 2018, 47(24): 48-51, 54.
- [9] 赵宪萍, 叶桂林, 朱崇武, 等. 20 碳钢在不同温度工况中冲蚀磨损性能的试验研究[J]. 锅炉技术, 2017, 48(1): 47-50.
ZHAO Xian-ping, YE Gui-lin, ZHU Chong-wu, et al. The research of 20 carbon steel's erosion resistance at different temperature by experiment[J]. Boiler Technology, 2017, 48(1): 47-50.
- [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(5): 502-505, 578.
ZHAO Xian-ping, SUN Jian-rong. Experimental study of wear and erosion of 12Cr1MoV alloy steel caused by hot fly-ash sweep[J]. Journal of Engineering for Thermal Energy and Power, 2000(5): 502-505, 578.
- [11] 赵宪萍, 徐开义, 孙家庆. 电站锅炉中受热面温度对灰磨损影响规律的试验研究[J]. 上海电力学院学报, 1995(3): 18-25.
ZHAO Xian-ping, XU Kai-yi, SUN Jia-qing. An experimental study into effect of heating surface temperature on fly-ash erosion boilers in power plants[J]. Journal of Shanghai University of Electric Power, 1995(3): 18-25.
- [12] 赵宪萍, 叶桂林, 孙坚荣. 电厂飞灰颗粒粒径对冲蚀磨损性能影响的试验研究[J]. 上海电力学院学报, 2018, 34(2): 101-105.
ZHAO Xian-ping, YE Gui-lin, SUN Jian-rong. Experimental study on the influence of flying-ash erosion characteristic with the particle size[J]. Journal of Shanghai University of Electric Power, 2018, 34(2): 101-105.
- [13] 董 刚, 张九渊. 固体粒子冲蚀磨损研究进展[J]. 材料科学与工程学报, 2003(2): 307-312.
DONG Gang, ZHANG Jiu-yuan. Development of research on the solid particle erosion of materials[J]. Journal of Materials Science and Engineering, 2003(2): 307-312.
- [14] 陈川辉, 李庆棠, 张林进, 等. 不锈钢材料高温冲蚀磨损性能与机理[J]. 材料保护, 2012, 45(7): 15-18, 74.
CHEN Chuan-hui, LI Qing-tang, ZHANG Lin-jin, et al. High temperature erosion-wear behavior and mechanism of 304 stainless steel[J]. Materials Protection, 2012, 45(7): 15-18, 74.

(姜雪梅 编辑)