DOI: 10.3969/j.issn.1006 - 4729.2016.01.001

不同温度工况下飞灰磨损速度指数特性的试验研究

赵宪萍, 叶桂林, 朱崇武, 孙坚荣

(上海电力学院 能源与机械工程学院, 上海 200090)

摘 要:冲刷速度是影响飞灰冲蚀磨损的主要因素,速度对冲蚀磨损的影响与温度有着很大的关系. 研究了12Cr1MoV 合金钢在不同温度时冲刷速度对磨损率的影响,并且用速度指数 n 表征. 试验数据结果表明:在热态试验中(250 ~ 550 ℃),飞灰磨损速度指数为 1.006 27 ~ 0.827 52;而在常温态试验中,速度指数达到 2.95,基本规律为飞灰磨损速度指数随温度的升高而降低,且常温态的相对磨损率明显大于热态时的相对磨损率.

关键词:电厂锅炉; 冲蚀磨损机理; 速度指数; 12Cr1MoV 合金钢

中图分类号:TK224.9 **文献标志码**:A **文章编号**: 1006 - 4729(2016)01 - 0001 - 04

Experimental Study on the Characteristic of Velocity Index for Flying-ash Erosion at Different Temperature Conditions

ZHAO Xianping, YE Guilin, ZHU Chongwu, SUN Jianrong

(*School of Energy and Mechanical Engineering*, *Shanghai University of Electric Power*, *Shanghai* 200090, *China*)

Abstract: The velocity is the major effective factor for the flying-ash erosion, and its influence has close relation with the temperature condition. The influence of particle velocity for flying-ash erosion of 12Cr1MoV steel is studied on the experiment, in different temperature conditions, and is characterized by velocity index. The analysis on the data of the flying-ash erosion tests shows that the velocity index for flying-ash erosion varies from 1.006 27 to 0.827 52 in hot conditions from 250 ℃ to 550 ℃, and 2.95 at normal atmosphere temperature. So the basic rule is that the velocity index for flying-ash erosion varies as the inverse temperature and the relative erosion-wear is significantly higher at normal atmosphere temperature than that in hot conditions.

Key words: boiler in power plants; erosive mechanism; velocity index; 12Cr1MoV alloys steel

工业生产中,因磨损导致工程材料失效的事件经常发生. 尤其在燃煤电厂,锅炉对流受热面由于长期受到飞灰颗粒的冲刷作用,使得受热面管壁不断磨损变薄,直至爆管. 这种因受热面爆管而带来的停炉事故在火电厂中频频发生,在电厂事故中所占比重最大[1]. 因此,电厂金属材料的飞灰冲蚀磨

收稿日期: 2015 - 06 - 04

通讯作者简介:赵宪萍(1956 -),女,教授,山西襄垣人. 主要研究方向为锅炉尾部烟道飞灰磨损. E-mail: zhaoxianping@shiep.edu.cn.

基金项目:上海市地方能力建设项目(13160501000).

损问题一直是行业亟待解决的问题之一.

颗粒冲刷磨损是一个由多重机制作用且相互交错的复杂系统过程,诸多因素与它密切相关,如粒子冲刷速度、环境温度、金属材料、颗粒浓度、颗粒大小、气流气氛、冲刷角度等,无论哪种因素发生变化都会引起材料磨损量的改变[2-5]. 其中,冲刷速度被一致认为是主要影响因素之一. 颗粒在冲击材料表面时,之所以产生磨损是在于其冲刷过程中颗粒所具有的动能,而颗粒的动能与其速度的平方成正比. 不仅如此,颗粒撞击材料表面频率以及颗粒相对被磨损材料的速度也直接影响了材料的磨损程度. 因此,许多研究者认为材料的磨损量与颗粒速度的 3 次方成正比[6-7]. 颗粒冲刷速度对磨损的影响由速度指数来直观表征. 为了寻找速度指数变化的理论依据及其规律,通过多个不同条件的试验研究结果发现,尽管条件改变会引起速度指数的大小发生变化,但对于气固两相流来说,无论颗粒浓度、冲刷角度等哪一种条件发生改变,材料的磨损量都会随着速度的增大而增大,且颗粒速度对磨损的影响指数一般介于 2 ~ 3 之间[8]. 另外,在热态环境中,工程材料的相对磨损量会随着温度的升高而降低,当超过某一临界点温度时,相对磨损量则会随温度升高而增大[9-11].

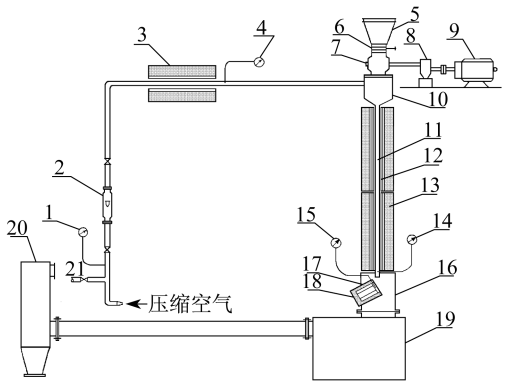
电厂锅炉对流受热面材料中,12Cr1MoV 合金钢是通过加入 0.2% 的钒代替部分钼而生成的铬钼钢,是一种低合金耐热钢. 一般用于壁温 ≤ 580 ℃的导汽管以及壁温≤530 ℃的联箱的受热面,是电厂低温段过热器和再热器的常用钢材. 该合金钢在高温环境中(560 ~ 580 ℃)具有较高的持久强度、良好的耐腐蚀性和抗氧化性能. 然而在长期的高温工况中服役,会导致钢材中珠光体结构向铁素体转变,其内部碳化物含量因析出而降低以及合金元素的改变,都使得 12Cr1MoV 合金钢的高温强度和力学性能降低[12-14]. 因此,本文通过对 12Cr1MoV 合金耐热钢分别进行常温态和热态的冲刷磨损试验,研究了在不同温度环境工况中冲刷速度对 12Cr1MoV 合金钢耐磨损性能的影响.

1 试验装置及工况

1.1 试验装置

飞灰冲刷磨损试验系统如图 1 所示.

试验系统由空气压缩机提供的压缩空气流经阀门进入试验系统. 气流压力及流量分别由压力表和转子流量计进行测量. 试验用灰经称量后装入灰斗,用蝶阀来控制灰斗中灰的下落. 给灰装置采用叶轮式给料,并由调速机和减速器控制其叶轮转速. 灰落入混合室后与气流混合,并由气流携带进入加速管段,粒子加速到最大可能的速度. 在试验段,气固两相流体冲刷试件之后进入水冷却沉降式除尘器. 在此,由于气体流动方向发生改变,在惯性力及重力的作用下,大部分的灰留在除尘器中,携带少部分灰的气流进入布袋式除尘器除尘后排向大气. 试件由专门的加热炉加热到试验所需工况温度. 试件冲刷角度按韧性材料的最大冲刷角度 30°设计[15].



注:1—压力表;2—转子流量计;3—预热电炉;4—温度计;5—灰斗;6—碟阀;7—叶轮给灰器;8—减速器;9—调速电;10—混合室;11—加速;12—加热气流电炉;13—保温层;14—温度计;15—温度计;16—试验段;17—试件;18—加热试件电炉;19—水冷却式沉降式除尘器;20—布袋除尘器;21—旁路.

图 1 飞灰冲刷磨损试验系统示意

1.2 试验工况

试验压力为 0.3 MPa(绝对压力). 试验温度设定在常温态和热态(250 ~ 550 ℃)温度范围内,且热态中以每 50 ℃为一个工况点. 常温态时的气流速度为 60 m/s,80 m/s,100 m/s,120 m/s;热态时的气流速度为 80 m/s,100 m/s,120 m/s. 试件材料为 12Cr1MoV 合金钢圆片,Φ50 × 4 mm. 试验用灰量为 G = 2 000 g/工况.

试验前,采用 1/10 000 g 精度的高精度自动天平对试件材料进行称重记录. 试验后,将试件材料置于干燥皿中冷却至室温后取出称重,失重量为 $\Delta g'$(mg). 由于在热态(250 ~ 550 ℃)试验中,

试件表面会因氧化导致重量增加,增量为 $\Delta g''$[16],因此热态中试件的实际失重量为 $\Delta g = \Delta g' + \Delta g''$. 试件的磨损量采用相对磨损量 ΔI,即常温态时 $\Delta I = \Delta g'/G$(mg/g),热态时 $\Delta I = \Delta g/G$(mg/g).

2 试验数据处理及分析

根据理论研究及以往的磨损研究[9],仍采用相对磨损量的数学模型为:

$$\Delta I = a d_s^m W_s^n t^u \tag{1}$$

式中:ΔI ——相对磨损量,mg/g;

a——飞灰磨损性能系数,通过线性回归得到;

d_s——固体粒子的平均粒径,可由筛分灰份加权平均得到,μm;

W_s——粒子冲刷速度,由试验数据计算得到;

t——试验温度;

m——粒度指数,由以前试验获得[5],$m = 1.876$;

n——速度指数,由对试验数据线性回归得到;

u——温度指数,由对试验数据线性回归得到.

对式(1)两边同时取对数,即:

$$\ln\Delta I = \ln(a d_s^m) + n\ln W_s + u\ln t + e_k \tag{2}$$

式中:e_k——残差.

令 $\hat{y} = \ln\Delta I$, $b_0 = \ln(a d_s^m)$, $b_1 = n$, $b_2 = u$, $x_1 = \ln W_s$, $x_2 = \ln T$,则式(2)表示为:

$$\hat{y} = b_0 + b_1 x_1 + b_2 x_2 + e_k \tag{3}$$

采用最小二乘法,求取试验值 y_i 与回归值 $\hat{y}_i$ 之差 e_i 为:

$$e_i = y_i - (b_0 + b_1 x_{1i} + b_2 x_{2i})$$
$$i = 1,2,3,\cdots,m \tag{4}$$

取偏差平方和 $Q = \sum_{i=1}^{M} e_i^2$ 的最小值,并将试验数据代入 $\partial Q/\partial b_0 = 0$, $\partial Q/\partial b_1 = 0$, $\partial Q/\partial b_2 = 0$ 求得试验所需速度指数和温度指数.

2.1 常温态试验结果的处理与分析

常温态下的试验曲线如图 2 所示. 采用数学模型(1)对常温态数据进行最小二乘法一元线性回归处理,回归公式为:

$$\Delta I = 2.243\ 9 \times 10^{-7} d_s^{1.786} W_s^{2.95} \tag{5}$$

由试验曲线和数据处理结果可明显看出:常温态中,颗粒速度对 12Cr1MoV 合金钢的冲蚀磨损的影响随着粒子速度的增大而不断增大,且速度指数 $n = 2.95$. 这与已有的理论结果"颗粒速度对磨损的影响指数一般介于 2 ~ 3 之间"[8] 相一致.

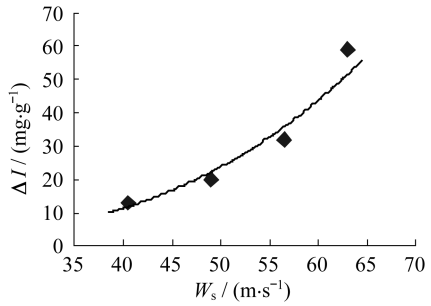


图 2 常温态下相对磨损量与粒子速度的关系

2.2 热态试验结果的处理与分析

热态下的试验结果及回归曲线如图 3 所示.

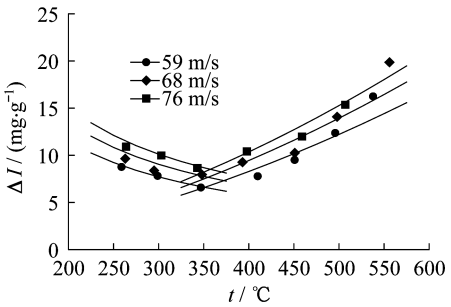


图 3 热态下相对磨损量与温度的关系

在试验温度范围内,相对磨损量随着温度的升高呈现先降低再升高的规律,且在 350 ℃左右存在一个临界转折点. 此数据处理采用最小二乘法二元线性回归进行分段回归,分别获得回归数学方程式如下.

250 ~ 350 ℃时:

$$\Delta I = 5.106\ 13 \times 10^{-6} d_s^{1.876} W_s^{1.006\ 27} T^{-0.989\ 482} \tag{6}$$

350 ~ 550 ℃时:

$$\Delta I = 1.176\ 28 \times 10^{-12} d_s^{1.876} W_s^{0.827\ 52} T^{1.741\ 9} \tag{7}$$

热态时,12Cr1MoV 合金钢的相对磨损量与粒子速度的关系曲线如图 4 所示.

冲刷速度对磨损量的影响总是随着速度的增加而增大,并以指数规律增长. 因此,速度指数 n 可以表征速度对冲刷磨损的影响. 然而,从热态试验数据中可以明显地看出,随着温度的升高,速度指数逐渐减小. 临界温度前速度指数 $n = 1.006\ 27$,临界温度后速度指数 $n = 0.827\ 52$,而温度指数 u 分

别为 −0.989 482 和 1.741 9. 显然,在热态环境中,速度对磨损的影响随温度的升高而逐渐减弱.

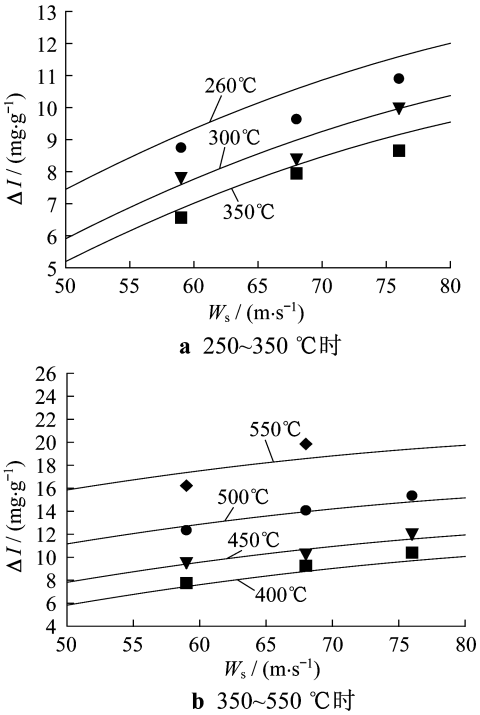


图 4 热态时 12Cr1MoV 合金钢的相对磨损量与粒子速度的关系

2.3 常温态与热态试验结果的比较分析

表 1 列出了不同工况下的速度指数与温度指数. 由表 1 可以看出,常温态与热态时速度指数差距较大,而且速度指数随着温度的升高而逐渐减小;然而,温度指数则随着温度的升高而不断升高. 显然,温度对磨损的影响随着温度的升高而逐渐增强.

表 1 不同工况下的速度指数与温度指数

工 况	速度指数 n	温度指数 u
常温态	2.950 00	常 数
热态(250 ~ 350 ℃)	1.006 27	−0.989 482
热态(350 ~ 550 ℃)	0.827 52	1.741 900

将不同温度下的冲刷速度与磨损率的变化曲线放在同一坐标系中,如图 5 所示.

由图 5 可以看出,在相同的粒子冲刷速度下,粒子速度对材料相对磨损量的影响,常温态明显大于热态.

分析其原因主要是,在常温中,环境温度作用较小,金属表面主要受到颗粒的冲刷作用,因此颗粒速度是影响磨损率的主要因素;热态时,材料的物理特性和气体动力场均会发生变化. 金属材料在高温环境中,其表面因氧化作用形成一层致密氧化膜,且合金元素氧化形成的氧化膜硬度比金属基体大,对金属基体形成保护作用[16]. 同时,高温中钢材内部碳元素多以 CO 形式从材料表面析出[13],氧化膜的形成有利于防止合金钢材料发生脱碳行为,使得钢材表面产生碳的富集,金属表面的耐磨性增强. 空气阻力与动力场中空气粘度的大小成正比关系,空气粘度随着温度的升高而增大. 在 300 ~ 450 ℃时,空气粘度的大小约为 20 ℃时的 2 ~ 4 倍[17]. 因此,颗粒在高温中所受阻力随温度的升高而不断增大,使得颗粒冲刷金属材料表面时的速度降低. 因此,相同速度时,热态的磨损率明显小于常温态.

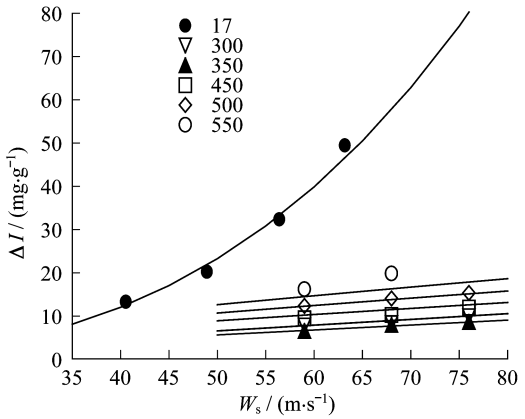


图 5 不同温度时粒子速度与相对磨损量的关系

显然,高温中的冲蚀磨损研究比常温态的研究更加复杂,考虑的因素更多. 热态的飞灰磨损研究也更加接近生产的实际工况,其研究也更具实际意义和价值.

3 结 论

(1) 速度指数 n 是表征颗粒速度对冲蚀磨损影响的特征值. 试验数据回归得出:常温态时,速度指数 n 为 2.95. 热态试验时,速度指数为 1.006 27;而超过临界拐点温度(约 350 ℃)后,速度指数为 0.827 52. 显然,速度对磨损的影响在常温中远大于热态,且随着温度的升高而逐渐减弱.

(2) 常温态时,粒子速度是影响相对磨损率的主要因素;而热态时,影响相对磨损率的主要因素则

(下转第 24 页)

4 结 语

本文阐述了罗戈夫斯基线圈的工作原理,介绍了两种积分器. 针对普通罗戈夫斯基线圈绕线不均匀、测量精度低的缺点,设计了一种基于PCB 的新型罗戈夫斯基线圈电流传感器,由主印制板与副印制板组成. 重点分析了副印制板即小贴片的参数对传感器互感的影响,并根据设计要求,确定了小贴片的结构参数,建立了传感器的简化模型,可实现对系统正常运行时的工频大电流的测量以及泄漏电流等小电流的测量.

参考文献:

[1] 张明明,张艳,李红斌,等. Rogowski 电流互感器的积分器技术[J]. 高电压技术,2004,30(9):13-16.

[2] 张岗. 光电混合式电流互感器的设计理论及其在电力系统中的应用[D]. 武汉:华中理工大学,2000.

[3] 杨红伟,陈明军. Rogowski 线圈的设计原理及其预处理电路的分析[J]. 机电工程,2008,25(2):86-88.

[4] Fiber Optic Sensors Working Group. Optical current transducers for power systems [J]. IEEE Trans on Power Delivery, 1994,9(4):1 778-1 788.

[5] WARD D F, EXON J. Using Rogowski coils for transient current measurements [J]. Engineering Science and Education Journal,1993,2(3):105-113.

(编辑 白林雪)

(上接第 4 页)

是温度,且温度对磨损的影响随温度的升高而增强.

(3) 温度会引起材料物性及气体动力场内颗粒受力发生变化,在热态中冲蚀磨损的研究更加复杂.

参考文献:

[1] 贾兆鹏,徐党旗,张广才,等. 低温再热器磨损泄漏及再热汽温偏低原因分析及改造[J]. 热力发电,2014,13(2):122-128.

[2] YEE K H, SHAYLER P J, COLLINGS N. Erosion of metals by fly ash particle[J]. Wear,1983(91):161-170.

[3] 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,2003,21(2):307-312.

[4] NAGARAJAN R, AMBEDKAR B, GOWRISANKAR S, *et al*. Development of predictive model for fly-ash erosion phenomena in coal-burning boilers[J]. Wear,2009(267):122-128.

[5] 赵宪萍,徐开义,孙家庆. 电站锅炉中受热面温度对飞灰磨损影响规律的试验研究[J]. 上海电力学院学报,1995,11(3):18-24 .

[6] 孙家庆,张从宽. 关于锅炉对流受热面灰磨损的研究[J]. 锅炉技术,1980(7):1-10.

[7] 岑可法,樊建人,池作和,等. 锅炉和热交换器的积灰、结渣、磨损和腐蚀的防止原理与计算[M]. 北京:科学出版社,1994:436-439.

[8] 赵宪萍,石奇光,孙家庆,等. 飞灰磨损基本规律的试验研究[J]. 华东工业大学学报,1996,18(4):65-71.

[9] 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.

[10] 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.

[11] 李庆棠,陈川辉,张林进,等. 耐热钢高温抗冲蚀磨损性能试验[J]. 南京工业大学学报,2012,34(3):93-97.

[12] 章燕谋. 锅炉与压力容器用钢[M]. 西安:西安交通大学出版社,1997:120-127.

[13] BIRKS N, MEIER G H, PETTIT F S. 金属高温氧化导论[M]. 章丽,王文,译. 北京:高等教育出版社,2010:121-131.

[14] 张而耕,童遂放,王琼琦,等. 12Cr1MoV 珠光体耐热钢长期服役中碳化物的变化以对性能的影响[J]. 机械工程材料,2009,33(9):28-32.

[15] 石奇光,马庆,徐开义,等. 飞灰冲刷角度变化对锅炉常用钢材磨损影响的试验研究[J]. 上海电力学院学报,1996,12(1):1-7.

[16] 赵宪萍,徐开义,孙家庆. 电厂锅炉中受热面温度对飞灰磨损影响规律的试验研究[J]. 上海电力学院学报,1995,11(3):18-24.

[17] 袁竹林,朱立平,耿凡,等. 气固两相流动与数值模拟[M]. 南京:东南大学出版社,2013:25-36.

(编辑 白林雪)