doi: 10.3969/j.issn.1007–9289.2010.05.002

新型高温冲蚀磨损试验方法研究*

魏 琪，崔明亮，冯艳玲，王 瑞
（北京工业大学 材料科学与工程学院，北京 100124）

摘 要：介绍了一种新型高温冲蚀磨损测试装置及方法，研究了冲蚀距离、冲蚀温度、冲蚀速度、冲蚀角度等因素对涂层冲蚀磨损测试结果的影响。结果表明，所研制的新型高温冲蚀磨损测试装置结构简单、操作方便、运行稳定、所测试的数据重现性好，利用该装置可以评价不同冲蚀温度、冲蚀速度和冲蚀角度条件下涂层的耐冲蚀磨损性能。

关键词：高温冲蚀磨损；热喷涂；涂层；测试方法
中图分类号：TH871.6 文献标识码：A 文章编号：1007–9289(2010)05–0017–04

Research of New Test Method for High Temperature Erosive Wear

WEI Qi, CUI Ming–liang, FENG Yan–ling, WANG Rui
(Colledge of Materials Science and Engineering, Beijing University of Technology, Beijing 100124)

Abstract: A novel high temperature erosion wear tester and the testing method are introduced in this paper. The influence of erosion variables, such as the erosion distance, the erosion temperature, the erosion velocity and the erosive angle, etc. on the testing result were studied. It was shown that the tester has a simple structure, which is convenient to operate and work stable with good reproducibility, therefore, it can be used to characterize the erosion-resistance of coatings under different erosion temperature, erosion velocity and erosion angle.

Key words: high temperature erosion wear; thermal spray; coating; test method

0 引 言

磨损是造成材料损失和设备破坏的重要原因，在冶金、电力、矿山、建材和化工等工业领域，由于材料的磨损和腐蚀，每年都会造成巨额的浪费和损失。其中冲蚀磨损约占工业生产中磨损破坏总数的8 %[1]，特别是高温冲蚀磨损对材料和装备造成的破坏更为严重。例如锅炉受热管壁因高温磨损而导致的减薄甚至爆管是影响锅炉运行的主要问题[2]，特别是循环流化床锅炉水冷壁管等受热面的高温冲蚀磨损问题更为严重，磨损减薄量可达5～6 mm/年[3,4]。因此，提高材料的耐冲蚀性能就成为人们极为关注和急需解决的问题。

热喷涂技术是提高材料耐磨蚀应用最多、最经济和最有效的方法之一。开发耐高温冲蚀磨损涂层已成为当前研究的一个热点。而耐高温冲蚀磨损涂层的研发要借助于更好、更实用的测试手段和方法。

目前，国内外见诸于报道的高温冲蚀磨损试验方法有多种，但都还有一定的局限性。有的试验条件与实际工况相差较远，有的设备复杂操作繁琐，有的测试结果的准确性和测试环境较差。由于没有合适的试验方法和设备，在国内很多人只能通过测试涂层的硬度或涂层的常温磨损性能，间接判断涂层的高温冲蚀磨损性能，这种方法既不准确也不科学。因此，开展新型高温冲蚀磨损试验方法的研究是非常有必要的。

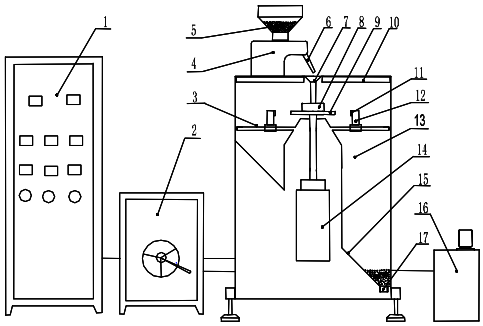
1 测试装置

根据高温冲蚀磨损的实际工况要求，所设计的新型高温冲蚀磨损测试装置的测试温度为室温～1000 ℃之间，砂粒的冲击速度为0～120 m/s,冲蚀角度为0～90 °。而且要求设备结构简单，操作方便，经济实用，测量数据稳定可靠。

根据上述设计原则，所研制的新型高温冲蚀磨

收稿日期：2010–04–30；修回日期：2010–07–02
基金项目：*北京市教委科技发展项目（JP009012200803）
作者简介：魏琪(1953—)，男（汉），北京人，副教授，硕士。

损测试装置采用电阻热对试样直接加热的方式，用高速电机带动转盘作高速旋转运动来提供冲蚀所需要的动力，砂粒从转盘上方的落砂斗下落到分砂器中，砂粒在离心力的作用下被高速抛出打击放置在转盘周围的试样表面，最后通过计算试件单位面积的失重量来评价涂层的耐高温冲蚀磨损性能。图1是所设计的高温冲蚀磨损测试装置结构示意图。



1.控制柜；2.加热电源；3.支架；4.送砂器；5.磨粒；6.落砂槽；7.漏斗；8.分砂器；9.转盘；10.箱体盖；11.试样；12.电极；13.冲蚀箱体；14.电机；15.滑砂板；16.水冷系统；17.出砂口

图1 高温冲蚀磨损测试装置结构示意图

Fig.1 High temperature erosion wear tester

2 测试方法及结果

试样制备、冲蚀砂粒、冲蚀时间、冲蚀距离、冲蚀角度、冲蚀速度和测试温度等因素对材料的冲蚀测试结果有重要影响，因此有必要研究上述因素对高温冲蚀磨损测试结果的影响。

2.1 试样的制备

本试验试样是在25 mm×10 mm×2 mm的304不锈钢基体上喷涂涂层制备而成。试验选用了2种铁基涂层A和B。在高温试验时，由于只对试样的一个表面进行冲蚀，其它未被冲蚀的表面会因高温氧化增重影响测试结果。试验中实际测量了304不锈钢基体在800 ℃下的氧化增重曲线（如图2所示）。由图 2 可知，在低于800 ℃短时间高温冲蚀磨损试验中，基体单位面积氧化增重较少，若对测试结果精度要求不非常高的情况下，试样基体的氧化增重可以忽略不计。

2.2 冲蚀砂粒的选择

一般认为，砂粒的硬度要高于被冲蚀磨损材料的硬度；尖棱角砂粒造成的冲蚀失重远大于球状砂粒；砂粒的粒度越大动能越大，冲蚀磨损越严重；砂粒的流量越大，冲蚀磨损试验效率越高。根据试验设备和条件，经试验确定选用991 μm（16目）的尖棱角形棕刚玉砂，砂粒流量为300 g/min。

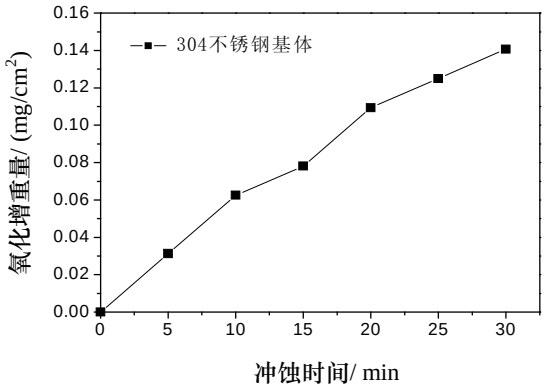


图 2 304不锈钢在800 ℃下的氧化曲线

Fig.2 Oxidation curve of 304 stainless steel under 800 ℃

2.3 冲蚀时间的选择

试验主要目的是测定冲蚀时间对涂层冲蚀磨损的影响，并确定最佳冲蚀磨损试验时间。试验参数：冲蚀角为90 °，冲蚀温度为650 ℃，冲蚀速度为60 m/s，冲蚀距离为40 mm；试验结果如图3所示。

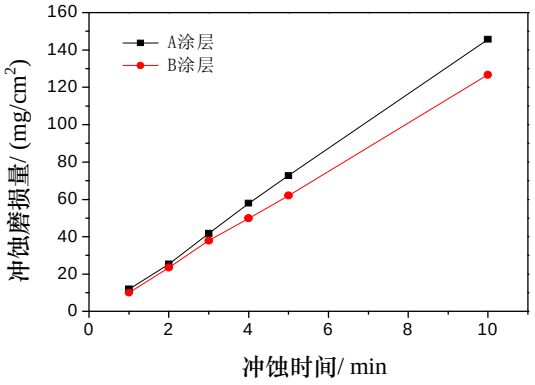


图 3 冲蚀磨损量与冲蚀时间的关系曲线

Fig.3 The relationship of the erosion wear lost and the erosion time

由图 3 可以看出，涂层在0～10 min之内，单位面积冲蚀磨损量与冲蚀时间成线性关系。冲蚀时间太短测量结果不够精确，时间过长，试样容易变形，也会影响测试结果。因此，选取冲蚀时间为5 min。

2.4 冲蚀距离对冲蚀磨损量的影响

冲蚀距离是指被冲蚀试样表面距转盘边缘出砂孔的距离。由于砂粒从出砂孔飞出后，随着飞行

距离的增加，颗粒有一个逐渐发散的过程。冲蚀距离不同，冲蚀磨损的程度也不相同。图 4 是两种冲蚀速度下冲蚀距离与涂层冲蚀磨损量的关系。由图 4 可见，当冲蚀距离为40 mm时试样的冲蚀磨损量达到最大值。因此，选取冲蚀距离为40 mm。

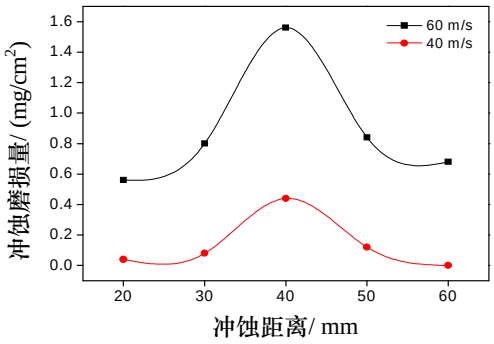


图 4 冲蚀距离对冲蚀磨损量的影响

Fig.4 Influence of the erosion distance on the erosive wear lost

2.5 冲蚀速度对冲蚀磨损量的影响

材料发生冲蚀磨损存在一个冲击速度的门槛值，低于这个数值不产生冲蚀磨损，只发生弹性碰撞变形[5]。试验测量了A和B两种涂层在650 ℃时不同冲蚀速度下的冲蚀磨损量（见图 5），冲蚀距离为40 mm。

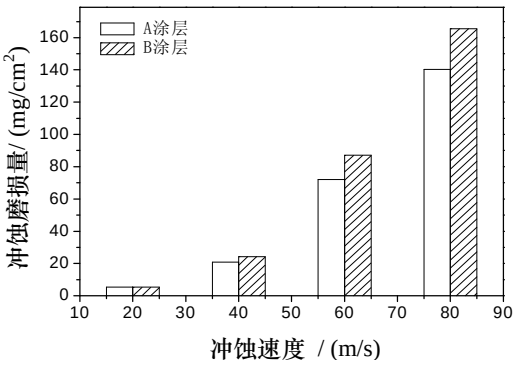


图 5 冲蚀速度与冲蚀磨损量的关系

Fig.5 Influence of the erosion velocity on the erosion wear lost

A和B两种涂层单位面积冲蚀磨损量都随冲蚀速度的增加而急剧增加，这是由于冲蚀粒子速度增大，其动能相应也增加，导致材料的冲蚀磨损加剧。

2.6 冲蚀角度对冲蚀磨损量的影响

大量试验表明，材料的冲蚀磨损量和磨粒的冲蚀角有密切关系。冲蚀角与冲蚀磨损量的关系几乎不随磨粒的种类、形状和速度而改变，只与材料的类型有关[6]。试验选用A和B两种涂层，研究了不同冲蚀角度下的冲蚀磨损量情况。试验条件：冲蚀速度60 m/s，冲蚀温度650 ℃，冲蚀距离为40 mm。结果如图 6 所示。

由图 6 可知，在650 ℃时，A和B 2 种涂层单位面积冲蚀磨损量随冲蚀角度的增加而增加，当冲蚀角为90 ° 时冲蚀磨损量达到最大值。

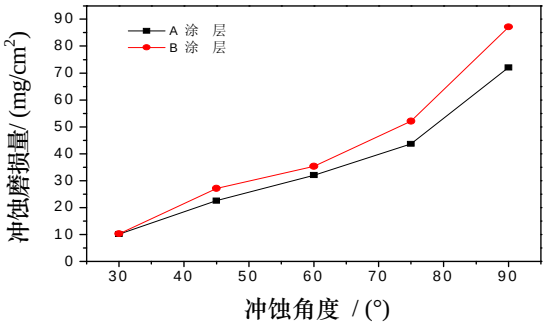


图6 冲蚀角度对冲蚀磨损量的影响

Fig.6 Influences of the impact angle on the erosion wear lost

2.7 冲蚀温度对冲蚀磨损量的影响

试验中分别在室温、450 ℃、650 ℃和800 ℃条件下测试了A和B两种涂层的耐冲蚀磨损性能。试验参数：冲蚀速度为60 m/s，冲蚀角度为90°，冲蚀距离为40 mm。试验结果如图 7 所示。

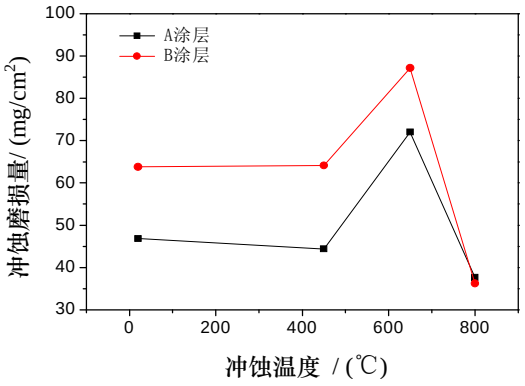


图 7 冲蚀温度对冲蚀磨损量的影响

Fig.7 Influence of the erosion temperature on the erosion wear lost

由图 7 可见，A和B两种涂层的冲蚀磨损量随试验温度的增高，先降低，再增加，650 ℃时达到最大值后又减少。说明测试温度对材料的耐冲蚀磨损性能有重要影响。冲蚀磨损量的变化不仅与氧化增重和磨损失重有关，而且还与氧化物的类型及其耐冲蚀磨损性能有关，具体关系有待进一步研究。

2.8 涂层冲蚀磨损量的计算和数据重现性

涂层耐冲蚀磨损性能的评价采用涂层单位面积的磨损失重量来表征。计算公式如下[6]:

$$\frac{\Delta m}{S_0}=\left[(m_0-m_1)-\frac{S-S_0}{S}(M_1-M_0)\right]\Big/ S_0 \qquad (1)$$

式中：Δm为覆有涂层的试样磨损前后的质量差；m_0为覆有涂层的试样磨损前的质量；m_1 为覆有涂层的试样磨损后的质量；S_0为覆有涂层面的面积；S为基体的总表面积；M_1为基体氧化后的质量；M_0为基体氧化前的质量。

在保证所有试验条件不变的情况下，对涂层高温冲蚀磨损测试数据的可靠性进行测定，然后用方差公式分析数据的波动性[7]，其表达式为:

$$\omega=\frac{\sigma}{\varpi}\times 100\ \% \qquad (2)$$

$$\sigma=\sqrt{\frac{1}{n-1}\sum_{i=1}(\varpi-\omega_i)^2} \qquad (3)$$

$$\varpi = \frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n}\omega_i \qquad (4)$$

式中：σ为试样失重的方差；ϖ 为试验平均失重；n为试验次数；ω_i为各次试验失重量。不同试样在各自相同的试验条件下做5次重复性试验，A和B涂层在650 ℃，80 m/s条件下的冲蚀磨损数据重现性试验结果见表1。由表1可见，磨损试验相对误差在2.80 %～4.97 %之间。可靠性分析表明，通常磨损试验数据的置信区间宽度小于10 %即认为重现性良好。因此，在该试验装置上的试验结果可靠。

表 1 数据重现性试验结果

Table 1 Reliability test of the erosion wear lost of selected materials

涂 层	温度/℃	角度/(°)	单位面积失重量 /(mg/cm^2)					ϖ	σ	ω / %
			1	2	3	4	5			
A 涂层	650	30	25.4	25.08	26.08	26.68	26.68	25.984	0.73	2.80
		90	109.44	110.24	105.68	108.64	102.88	107.376	3.04	2.83
B 涂层	650	30	21.72	23.48	24.12	24.84	23.16	23.464	1.17	4.97
		90	114.8	116.4	112.28	104	110.52	111.6	4.81	4.31

3 结 论

（1）所研制的新型高温冲蚀磨损测试装置设计合理，结构简单，操作方便，性能稳定，测得的数据准确可靠，是一种评价材料耐高温冲蚀磨损性能的好方法。

（2）所研究的高温冲蚀磨损测试方法能够满足不同冲蚀温度、冲蚀速度、冲蚀角度和冲蚀距离条件下涂层耐冲蚀磨损性能测试的需要。具体测试条件应根据实际工况条件来决定。

（3）测试温度对材料的耐冲蚀磨损性能有重要影响，材料在不同温度下有不同的耐冲蚀磨损性能。

参考文献:

[1] 李诗卓，董祥林. 材料的冲蚀磨损与微动磨损 [M]. 北京: 机械工业出版社, 1987: 105-120.

[2] 赵雁潮，魏琪，栗卓新，等. 热喷涂技术在锅炉管防中的应用进展 [J]. 材料保护, 2006, 39(8): 43-46.

[3] Mann B S , Prakash B. High temperature friction and wear characteristics of various coating materials for steam valve spindle application [J]. Wear, 2000, 240: 223-230.

[4] Silhu Ts, Prakash S, Agrawal R D. State of the art of HVOF coating investigations–A review [J]. Marine Technology Society Journal, 2005, 39(2): 53 - 64.

[5] 冯益华，邓建新，史佩伟. 陶瓷材料冲蚀磨损的研究 [J]. 陶瓷学报, 2002, 23(3): 169.

[6] 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): 307-311.

[7] 武文忠，邢建东，苏俊义. 高温磨损试验机的研制 [J]. 试验技术与试验机, 2002, 42(1,2): 15-17.

作者地址：北京工业大学材料科学与工程学院 100124

Tel：(010)67396168

E–mail：weiqi@bjut.edu.cn