

耐火材料高温下抗冲蚀磨损检测技术及应用

姜海琴¹ 宋伟² 刘晖³ 马培沪² 李永刚¹ 邵昕¹

1) 中钢集团洛阳耐火材料研究院有限公司

2) 新沂北美高科耐火材料有限公司

3) 济南钢铁股份有限公司

摘要 简要介绍了国际高温耐磨测试技术现状,分析了耐火材料固体粒子冲蚀磨损机理,简要阐述了该院自主研发的HAT高温耐磨试验机的工作原理、主要结构和技术特性。应用该试验机,做了大量的实验验证工作,重点讨论了实验结果。研究显示:仪器测试结果稳定、可靠,优于常温耐磨性试验方法国家标准的规定;通过不同温度、冲蚀速度、冲蚀角度等条件的分析,说明具有专利技术的HAT高温耐磨试验机能够很好地模拟材料的使用环境。研究表明:随着试验温度的升高,不同耐火材料耐磨损性能变化趋势不同;随着冲蚀速度的增加,材料的耐磨损性能呈递减趋势;不同的冲蚀角,材料的耐磨损性能具有加大的差异。

关键词 冲蚀磨损,耐火材料,冲蚀角度,冲蚀速度

1 引言

工业窑炉耐火材料炉衬受固体粒子的持续或断续冲蚀磨损,最终造成损坏,是高温工业窑炉损毁的一个重要因素^[1],给工业生产带来许多不利影响。如高炉上部及风口,水泥窑窑口、下料管、冷却器、喷煤管,循环流化床锅炉等部位长期受粉尘、盐类、烟气的冲蚀,极易发生磨损,时常造成设备泄漏、损坏等事故,严重影响企业的正常生产及经济效益。

近几十年来,国内外众多学者对这些耐火材料的磨损行为进行了大量的研究,但大多是室温下的磨损研究,对高温下耐火材料的磨损行为研究报道很少,主要是缺乏试验测试仪器。目前英国、日本已制订了高温耐磨试验方法标准。

2 英国、日本及德国高温耐磨试验技术状况

英国国家标准《BS 1902: section 4.7:1985 1400 °C高温下抗磨损指数的测定》规定了耐火砖或耐火材料试件在室温至1400°C内的抗磨损性能(磨损指数)的测定方法。耐磨测试装置(如图1)主要包括重力给料系统、试样加热炉、磨料砂以及标准碳块。磨料砂为含40%ZrO₂的锆刚玉,由重力给料系统进入试样加热炉。试样倾斜45°支撑在炉膛入口的炉内耐火材料上;冲击过试样的磨料穿过炉底的管子到达收集器(盘),再通过文氏管将磨料吸入到一个电动鼓风机,用旋风分离器循环到给料漏斗。

标准碳块由英国陶瓷研究院提供。

先测两个标准碳块的正、反面在常温条件下、磨损 30 min 后的质量损失，记录 4 次测量的平均损失质量，计算出校正因子 C_r 。然后，称 110 °C 干燥至恒重的试样质量 $M_1(g)$ ，再在规定温度磨损 30 min（坚硬材料需 60 min）后称量试样的质量 $M_2(g)$ ，则可计算该温度下的磨损指数：

$$(M_1 - M_2) / \rho_b * 30 / t * 100 C_r$$

式中： ρ_b 为试样的体积密度， $g \cdot cm^3$ ； t 为试样的磨损时间，min； C_r 为校正因子。

特点：磨损介质依靠自由落体加速，由鼓风系统、旋风分离器等在一次试验中被循环使用；电加热炉加热试样。

缺点：受空间限制，磨损介质速度小，用量大；设备庞大复杂，测试时间长；与常温耐磨性的试验方法缺乏延续性。

日本国家标准《JIS R 2252-1:2007 耐火材料产品耐磨性试验方法 第 2 部分 高温耐磨试验方法》中规定的磨损试验机(如图 2)包括：①试样加热炉：炉体用耐火材料砌成，一侧设有燃烧喷嘴孔，孔内安装氧气-丙烷燃烧器，燃烧喷嘴孔的对面侧墙上侧立安装耐火材料试样，用氧气-丙烷加热试样冲击面的背面至试验冲击面达到试验温度；②磨料加热装置：用碳化硅发热体电加热磨料，热电偶测温，磨料在加热过程中被电机带动的搅拌系统不停地搅拌，达到规定的温度时，经流出开关在重力作用下自由落体流出；③抛甩机及磨损试样室：抛甩机为一个由反转电机控制的高速旋转叶轮，装置在磨损试样室内，当自由落下的磨料落入抛甩机叶轮中时，抛甩机叶轮将磨料高速抛甩出，经磨损喷嘴冲击至加热炉完成加热的试样冲击面上。

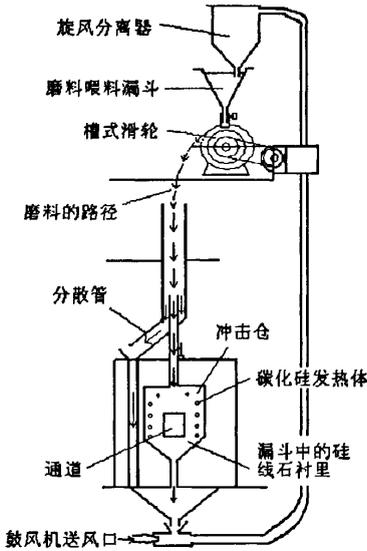


图 1 BS 1902 耐火材料高温耐磨结构原理图

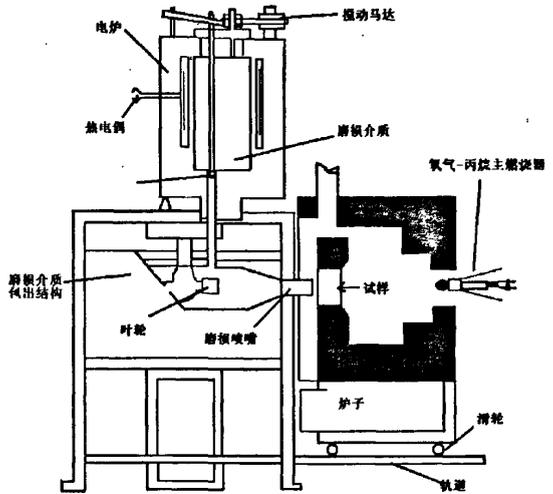


图 2 JIS R 2252 高温耐磨性结构原理图

将预热的磨料介质加入速度恒定的抛甩机叶轮中，并对准试样抛甩 180 s，取出试样，自然冷却，去掉磨损痕上残留的磨料介质，水平放置试样，用测量砂填平试样表面，移去多余的测量砂，然后取出填在磨损痕的测量砂，称量，按下式计算试样的磨损体积：

$$A=M/\rho$$

式中：A为耐火材料被磨损的体积，cm³；M为测得的测量砂的质量，g；ρ为测得的测量砂的体积密度，g·cm⁻³。

特点：旋转叶轮加速磨损介质，冲击速度易控制；预加热磨损介质，试样表面温度波动小；氧气-丙烷燃烧法加热试样。

缺点：叶轮旋转要求极高的机械平衡性，难以加工和控制；旋转叶轮要求高转速和高温耐磨性，易损坏；氧气-丙烷燃烧法耗能大，结构复杂。与常温耐磨性的试验方法缺乏延续性。

德国波恩^[2]采用与常温磨损机理相同的压缩空气流加速磨损介质，试样试验面与喷枪口距 203 mm 加速的基本原理冲蚀耐火材料，测试其抗高温磨损性。但目前还没有查阅到该设备更为具体的信息。

中钢洛耐院在多年研究的基础上，研制出了 HAT 高温耐磨试验机。该试验机能在常温、中温高温（1400℃）范围内对耐火材料及陶瓷材料抗冲击磨损能力进行评价和研究，为国家标准的制定奠定基础。

3 试验机工作原理及特点

在已预热的压缩空气流的作用下，一定量的磨损介质在规定的时间内被加速喷射、冲击已加热至高温的试样表面，待试样冷却到室温后，测量试样表面被磨损掉的体积。

HAT 高温耐磨试验机与 NMJ 常温耐磨试验机的工作原理基本一致，也就是说 HAT 的基本原理等同于标准 GB/T 18301《耐火材料常温耐磨性试验方法》，关键解决了高温条件下进行耐磨试验所涉及的一系列技术问题，HAT 高温耐磨试验机是 NMJ 常温耐磨试验机测试技术的提升和延展，是其换代产品。

试验机主要由试样加热炉、试样承载机构、磨料喷枪、压缩空气供储装置、尾气冷却净化装置等组成，如图 3 所示。

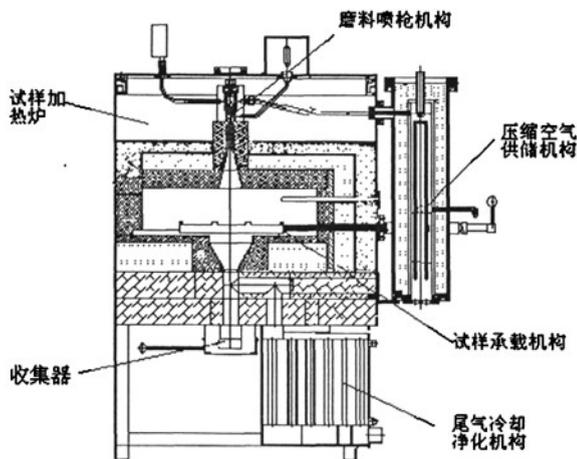


图 3 HAT 高温耐磨试验机结构原理图

试样承载机构可以进行3个试样/炉的试验,采用自动或手动进样控制;磨料喷枪机构采用文氏效应加速磨损介质,使磨损介质喷射稳定可靠;压缩空气供储机构采用空气预加热原理使炉温在试验过程中波动小、稳定;炉底收集器便于磨损介质喷射后的收集,炉体还采用尾气冷却净化系统,达到除尘环保的效果。

试验机的主要技术特点:试验温度:室温~1400℃;试样数量:3个/炉;动力气源:0.1~1.0 MPa,常用0.445 MPa;炉膛内压力:311 Pa;磨损介质:36号黑色碳化硅或白刚玉砂;磨损介质质量:(1000±5)g;喷砂管:长度115 mm,内径5 mm;试验面与喷枪口距离:203 mm;试样规格:100 mm×100 mm×(25~30) mm或114 mm×114 mm×(65~76) mm。

4 耐火材料固体粒子冲蚀磨损机理

固体粒子冲蚀磨损一般是指高速气体携带一定粒度的固体颗粒以一定的速度和角度冲击材料表面,使材料发生损耗的一种现象或过程^[3]。冲蚀磨损分为脆性磨损和塑性磨损。

脆性磨损最具影响力的是由S Jahanmir^[4]提出的颗粒冲击靶材时亚表面的应力分布及空穴成核理论,他指出空穴成核区出现在表面下某一深度,冲击角越大,则空穴成核越深。脆性材料的磨损过程是先在冲蚀坑附近产生一定的弹塑性变形,然后引起表面裂纹的形核及扩展。表面裂纹分为径向、横向和锥状三种,径向裂纹垂直于冲蚀表面,其扩展长度与材料的性质和冲蚀速度有关。锥状裂纹被认为是弹性断裂且发生在材料内部的缺陷处,而横向裂纹平行于冲蚀表面,在磨料反弹过程中有残余塑性变形形成,通常被认为是冲蚀磨损的主要原因。

塑性磨损较有影响的是1963年J G Abitter^[5]提出的变形磨损理论。该理论从能量平衡的观点出发,认为冲击过程中可能存在弹性或塑性变形,这取决于材料的屈服强度和冲击力的大小。他认为冲蚀磨损可分为变形磨损和切削磨损,磨损总量为两者之和,并从能量平衡的角度推出了变形磨损量与切削磨损量表达式:

$$W_D = M(v \sin \alpha - K)^2 / (2\varepsilon)$$

式中: W_D 为变形磨损量; M 为入射粒子总质量; v 为入射粒子速度; α 为入射角; K 为产生弹性变形的临界速度; ε 为变形磨损因子。

通过对冲蚀磨损中颗粒冲入和被挤出两个阶段的能量分析,提出了变形磨损理论。他认为颗粒冲击表面有可能产生弹性变形,也有可能产生塑性变形,主要取决于冲击应力是否达到材料的屈服强度,还提出塑性材料冲蚀角度的改变对磨损量有一定的影响。

耐火材料自身复杂的结构及化学组成,造成了其在高温下非常复杂的磨损机理。随着温度的升高,耐火材料开始有液相出现,使其自身的脆性行为逐渐减弱,塑性行为逐渐增强,其转变温度一般在 $0.5T_m$ ^[6] (T_m 为绝对温度表示的熔点)左右,如此的行为特性使其磨损机理也随之产生很大的变化,多数情况下往往同时存在脆性、塑性(含切削磨损)行为造成的复杂机理。

关于其高温下的冲蚀机理在国内外鲜有很充分的研究。本次试验试图通过改变不同的试验条件进行耐火材料高温磨损机理的研究。

5 试样的选取、制备与测试

本次试验选用了常用的钢纤维增强高铝质浇注料、高铝砖、刚玉砖及 Si_3N_4 结合 SiC 砖等, 其理化性能如表 1 所示。

不定形试样采用振动成型, 养护, 热处理条件为试验温度 \times 3 h, 如 1200 $^\circ\text{C}$ 耐磨试验, 试样的热处理条件为 1200 $^\circ\text{C}$ \times 3 h。试样尺寸为 100 mm \times 100 mm \times 30 mm。磨损介质选用国产 36 号黑色碳化硅。

本次试验主要针对试验机的稳定性及其各种不同试验参数对试样磨损率的影响做了系列试验, 并对实验结果进行分析。试验采用的电子天平规格: 1000 g/0.01 g。

表 1 不同试样的基本性能参数

试样种类	$w(\text{Al}_2\text{O}_3)/\%$	$w(\text{SiC})/\%$	体积密度/ ($\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$)	气孔率/ $\%$	耐压强度/MPa
钢纤维增强高铝浇注料	76.4	-	2.39	17	55
高铝砖	80.4	-	2.61	16	95
刚玉砖	99.1	-	3.17	18	100
Si_3N_4 结合 SiC 砖	-	74.61	2.68	13	144

6 试验结果及讨论

6.1 试验机的稳定性及分析

本次试验选用性能稳定、抗冲蚀磨损性能居中的高铝砖进行试验机稳定性的测试。在室温、800 $^\circ\text{C}$ 和 1200 $^\circ\text{C}$ 下对试验机稳定性进行测试。表 2 为试样在不同温度下抗冲蚀磨损的试验结果。

表 2 高铝砖不同温度下多次试验结果

测量次数 温度	1	2	3	4	\bar{A}	\bar{A}_{rel} (%)	$A_{rel}(\max)$ (%)
室温	4.85	4.72	4.78	4.62	4.74	1.53	4.85
800 $^\circ\text{C}$	4.65	4.58	4.71	4.5	4.61	1.51	4.56
1200 $^\circ\text{C}$	1.68	1.60	1.61	1.65	1.64	1.83	4.88

注: 表中引用的公式为: $\bar{A} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n A_i$; $\bar{A}_{rel} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \frac{|A_i - \bar{A}|}{\bar{A}}$; $A_{rel}(\max) = (A_{\max} - A_{\min}) / \bar{A}$; (其中 \bar{A} 为

观测结果的平均值, \bar{A}_{rel} 为测试结果的相对误差, $A_{rel}(\max)$ 为测试结果的最大偏离误差。

结果显示, 在不同的温度下, 试样的平均 \bar{A}_{rel} 均在 2% 以内, 具有较好的稳定性; 其最大偏离误差 $A_{rel}(\max)$ 也低于 7%, 与 GB/T 18301 准标样规定的两次测量误差不大于 7% 相比, 具有良好的一致性。

分析其引入误差的原因有直接误差和间接误差。直接误差包括: 试样质量误差、体积密度测量误

差；间接误差主要包括：试验温度、磨损介质喷射过程中的有效喷砂量及气源压力波动误差等。

实验前后试样质量称取采用 2000 g/0.1 g 的电子天平，该天平允许的最大称量误差为 0.1g，对于 100 mm×100 mm×30 mm，体积密度约 $2.60 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-3}$ 的制品，其质量约 780 g，百分误差为 0.0128%。可见质量误差对测试结果产生的影响可以忽略不计；在此，我们假设要将质量误差控制在 0.05% 以内，那么，采用 2000 g/0.1 g 的电子天平时试样的质量应在 2000~200 g 之间。需特别注意的是：试样在称量之前一定要充分干燥；某些试样从室温加热到试验温度后也会发生质量变化，这也是造成试验误差的因素之一。

体积密度的测量采用标准 GB2998，其允许误差为 $0.02 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-3}$ 。对于试样体积密度约为 $2.61 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-3}$ ，测量误差为 $0.02/2.61=0.77\%$ 。可见，正确测量试样的体积，将其误差控制在标准允许的范围内是相当重要的工作。

试验温度、磨损介质、气体压力、炉腔压力，喷砂管口距试样的距离、喷砂时间等均对实验结果产生影响。

不同的试验温度，将有不同的实验结果，这将在本文的 6.2(1)中详细描述。一般而言，要将炉温控制在 $\pm 10 \text{ }^\circ\text{C}$ 以内，炉温指示温度控制在 $\pm 1 \text{ }^\circ\text{C}$ 是容易实现的。但要将常温的空气经空气压缩机压缩后直接喷射到炉腔，要让炉温的波动在 $\pm 10 \text{ }^\circ\text{C}$ 以内，HAT 采用独特的空气预热和动平衡技术，有效地控制了炉温的波动。

试验中使用的磨损介质为 1000 g，采用 2000 g/0.1 g 的电子天平称量，其称量误差为 0.01%，不会对实验结果造成影响。但当喷砂不能全部喷射到试样上时，将可能对实验造成较大的影响，使测试结果偏低。这一点，希望引起大家重视。

试验中使用的气体压力为 0.445 MPa，炉腔压力为 311 Pa。压力的变化会引起磨损介质喷射速度的变化，将在 6.2(2)中详述。

试验中使用的喷砂管口距试样的距离 203 mm。1000 g 磨损介质在一定的压差下，沿 $\phi 5 \text{ mm} \times 115 \text{ mm}$ 的喷砂管以锥形喷射出去，距离管口不同的位置，喷射冲击力和冲击的面积不同，会对实验结果造成影响。

试验中喷砂时间在 $450 \pm 15 \text{ s}$ 之间。喷砂时间决定于压力、喷砂管有效尺寸、文氏喷枪性能、喷砂颗粒级配、管道是否畅通等因素。喷砂时间过长过短，会对测试结果产生影响。

国家常温耐磨试验方法标准规定的试样数量为 2 块，本实验中我们以取 3 块试样为主，数据处理按照国家标准进行。从统计学上的规律来说，采用 3 块试样要优于 2 块试样，实验结果的可信度更高。

6.2 不同试验参数对试样磨损率的影响

(1) 温度对不同耐火材料高温耐磨性的影响

温度对高铝砖等 4 种耐火材料耐磨性的影响见图 4。可以看出：在常温时，钢纤维增强高铝浇注料和刚玉砖具有几乎相同的耐磨性；随着温度的升高，刚玉砖的耐磨性逐渐增强；800 $^\circ\text{C}$ 之前，钢纤维增强高铝浇注料的耐磨性几乎没有太大的变化，800 $^\circ\text{C}$ 以后呈增强趋势，1000 $^\circ\text{C}$ 时与刚玉砖的趋于一致，1000 $^\circ\text{C}$ 之后则优于刚玉砖。

耐火材料的显微结构和矿物组成，决定了材料的耐磨性能的差异。随温度的升高，材料内部结构会发生由弹性到塑性的转变，一般认为该温度约为 $0.5T_m$ 左右。当材料处于塑性温度段时，材料内部少量低熔点矿物熔化变形导致材料产生塑性，对磨损介质的冲击有一定的缓冲作用；随试验温度升高，材料塑性形变程度增加，材料磨损率下降幅度增加。 Si_3N_4 结合 SiC 砖由于没有液相的存在，自身硬度大，主要发生脆性磨损，故其磨损量低、变化小。

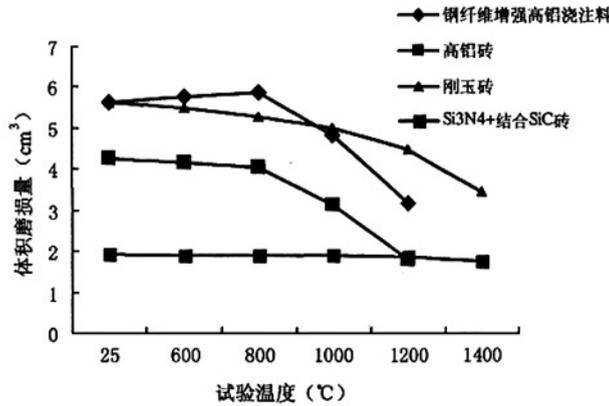


图4 不同耐火材料试验温度与体积磨损量关系曲线

温度对耐火材料耐磨性的影响从磨损后试样的表面形貌也可以很明显的反映出来。图5为钢纤维增强高铝浇注料常温和1000℃下磨损后的表面形貌。在常温条件下，试样中间部位被磨损介质冲刷出较深的坑，并且磨损后试样表面明显有较多裸露的颗粒，其周围基质部分已经被冲刷掉。这种现象说明，在常温条件下，试样在磨损介质的冲刷作用下，基质部分耐磨性较差，首先被冲蚀掉，与基质相比颗粒料则不易被磨损掉。与常温相比，在1000℃下的磨损坑明显变小，而且被冲蚀掉的表面没有特别突出裸露的颗粒。原因可能是材料内部的裂纹随着温度的升高会有不同程度的弥合，裂纹减少，从而限制了冲击裂纹的产生和扩展，耐磨性增强。另外，高温下少量液相的生成使塑性增强，会缓冲磨损介质对材料表面的冲刷作用。综合以上因素，随温度的升高，材料的被磨损表面会呈现不同的状态，耐磨性也相应提高。

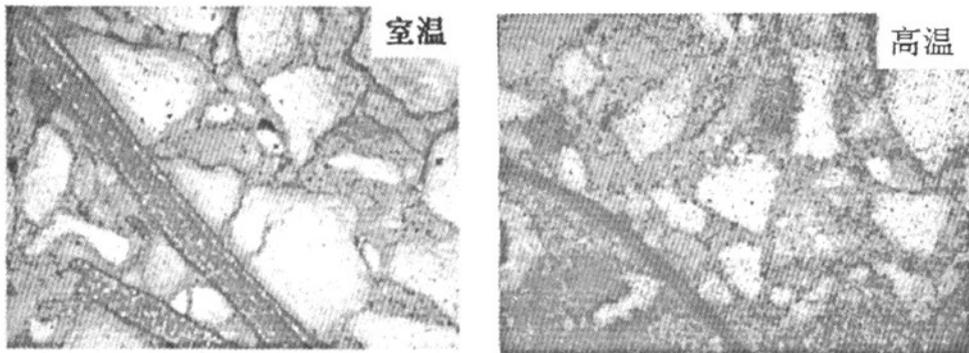


图5 钢纤维增强高铝浇注料在0.45 MPa、90°冲击角被冲蚀后的表面显微图

(2) 冲击速度对材料高温耐磨性的影响

高温下磨损介质冲击速度的变化可以更真实地反映耐火材料使用环境，为材料的研究提供更贴切的数据。冲击速度可通过空气压力调节，它们之间的关系近似满足绝热状态一元稳定流动的伯努利方程^[7]：

$$\frac{k}{k-1} \frac{p}{\rho} + \frac{v^2}{2} + gh = \text{常数}$$

式中： p 为磨损介质的压强，MPa； ρ 为磨损介质的分散密度， $\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$ ； v 为冲击速度， $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$ ； k 为绝热指数。假设喷枪口为初始状态 1，此时压强为不定值 P ，试样试验面为状态 2，喷枪口与试验面距离 h 为 203 mm，喷砂管内径为 5 mm，炉膛内压强为 310 Pa，代入公式算出喷射腔气体压力 P 与磨损介质冲击试样表面速度 v 的近似关系式为： $89.9P + 4.06 = v^2$ ，该关系式使试样被冲击的参数更具体化，与国外高温耐磨设备的冲击速度基本吻合。

图 6 为钢纤维增强高铝浇注料试样的不同冲击速度在室温、1200 °C 下对材料磨损性能的影响。冲击速度的改变对材料体积磨损量有一定的影响。随着冲击速度的增加，材料的磨损量呈增加趋势；当速度超过某一值时，体积磨损量突然增加，随后以相近幅度增加。在室温下，冲击速度较小时，如小于 $6 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 时，冲击力产生的能量小于材料的屈服强度，只能使其发生弹性形变而不足以使缺陷处的裂纹扩展，材料磨损不明显。当超过某一速度时，冲击力产生的动能已经足够大，使得裂纹扩展，磨损量迅速增加。在高温下，由于液相的存在使材料产生塑性缓冲了部分动能，使磨损量突然增加的冲击速度相对常温的较高。

一般的耐火材料，冲击速度在 $6 \sim 7 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 之间为最佳冲击速度，其相应的气源压力为 0.445 MPa 附近；对于硬度更高如碳化硅制品或者硬度较低的粘土砖等，则需要增加或者减低其冲击速度，从而得到更好的测试结果。

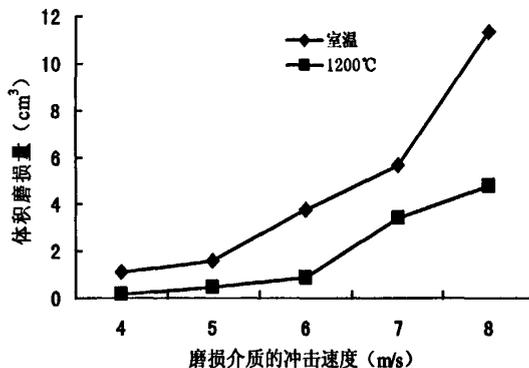


图 6 磨损介质冲击速度与体积磨损量的关系曲线图

(3) 冲蚀角的大小对材料高温耐磨性的影响

磨损介质的冲击角度对材料的磨损性有一定的影响，图7为在不同温度下材料受冲蚀的角度与磨损量的关系曲线。图7显示，当试验温度低于800 °C时，冲击角度对材料的体积磨损量的影响接近正比关系；但随着温度的升高，低冲击角的磨损量几乎不变，影响变小，高冲击角时磨损量迅速变大，但总体结果仍然是冲蚀角度为90°时，磨损量最大。

从能量平衡角度看,当介质冲击材料表面时,垂直方向的冲击和水平方向的切削造成冲蚀之和,满足关系式 $\varepsilon = A'\cos^2\alpha\sin(\alpha) + B'\sin^2\alpha$ ^[8]。当试验温度在 800℃以下时,材料表现为脆性磨损, $A'=0$, $\varepsilon = B'\sin^2\alpha$, 材料的体积磨损量随冲蚀角增加趋势与该曲线接近,原因可能是脆性材料由于磨削造成的冲蚀很小,主要为法向冲击磨损,随着冲击角度的增大,法向速度不断增大,使材料表面或亚表面形成裂纹,裂纹在后继冲蚀磨料的持续作用下扩展、连接而最终导致基质的流失;随着温度的升高,材料开始表现出一定的塑性,呈现脆性和塑性复合,磨损机理复杂,有待进一步研究。

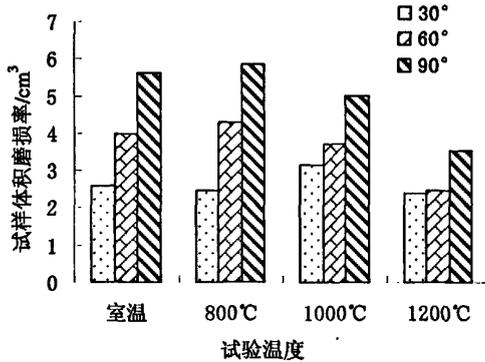


图 7 磨损介质冲击角度与体积磨损量的关系图

7 结论

研制的耐火材料高温抗磨损测试设备具有良好的稳定性,解决了我国耐火材料高温耐磨性研究的装备问题。

合理完善的测试结构,可大幅降低系统误差,获得稳定可靠的试验结果,甚至优于常温试验。

随温度的升高,不同材料磨损量变化趋势不同,氧化物制品磨损量会在某一温度下迅速下降,SiC 质等非氧化物制品,磨损不明显;冲击速度增加,材料的磨损量增加,一般的耐火材料,最佳冲蚀速度 $6\sim 7\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$;冲击角度对材料不同温度下磨损量影响不同,90°时,磨损量最大。

参考文献

- [1] 李诗卓,董祥林.材料的冲蚀磨损与微动磨损.北京:机械工业出版社,1987:2-5
- [2] Brüggmann C,Krause O,Pötshke J,et al.High temperature abrasion resistance of cement-based refractories[C] International Colloquium on Refractories,Aachen,Germany,2005:35-39
- [3] 陈冠国,诸秀萍.关于冲蚀磨损问题.河北理工学院学报,1997,19(5):27
- [4] S.Jahanmir.Wear,1980,(61):301
- [5] J.G.A.Bitter.Wear,1963,(6):169
- [6] I.Finnie,A,Levy,D.H.Mc Fadden,ASTM STP-664,1979:36
- [7] 周谔仁 流体力学泵与风机 北京:中国建筑工业出版社,1979:159-162
- [8] Y.I.Oka.H.Ohnogi,The impact angle dependence of erosion damage caused by solid particle impacc,Wear,1997, 203~204:573

致谢:本文在试验过程中接受了我院总工会干教授级高工、彭西高教授级高工的建议,在此对他们表示深深的感谢。

耐火材料高温下抗冲蚀磨损检测技术及应用

作者: 娄海琴, 宋伟, 刘晖, 马培沪, 李永刚, 邵昕

作者单位: 娄海琴, 李永刚, 邵昕(中钢集团洛阳耐火材料研究院有限公司), 宋伟, 马培沪(新沂北美高科耐火材料有限公司), 刘晖(济南钢铁股份有限公司)

本文读者也读过(10条)

1. 黄仲明. 高建荣. 李永刚. 娄海琴. 蔚晓敏 一种新型高温耐磨试验方法的探讨[期刊论文]-耐火材料2010, 44(6)
2. 王黎. 蒋明学. 彭西高 一种新型高温耐磨性能研究方法[会议论文]-2005
3. Kiyoshi Sugia 耐火材料测试方法近半世纪的发展[会议论文]-1998
4. 胡水 耐火材料高温耐冲蚀磨损性能试验方法研究[学位论文]2005
5. 胡水. 于仁红. 蒋明学. Hu Shui. Yu Renhong. Jiang Mingxue 刚玉质耐火材料高温耐冲蚀磨损性能的研究[期刊论文]-耐火材料2005, 39(6)
6. 郭世云. 赵慧颖. 张海滨 单组分磷酸盐结合高耐磨衬里材料的研制[会议论文]-2003
7. 何文明 窑口浇注料寿命的影响因素分析与改进措施[期刊论文]-新世纪水泥导报2008, 14(6)
8. 谢杰华. 倪高金. 窦青荣. 郑华. 李平. 冯运生 大型循环流化床锅炉耐磨耐火材料的发展趋势[会议论文]-2007
9. 董高营. 李长丹. 朱喜仲 延长窑口浇注料使用寿命的措施[期刊论文]-水泥2010(1)
10. 王广强 延长窑口浇注料使用寿命的措施[期刊论文]-水泥2007(6)

本文链接: http://d.g.wanfangdata.com.cn/Conference_7178966.aspx