

## 耐火材料高温弯曲应力 - 应变关系测试方法及影响因素

徐恩霞<sup>1)</sup> 黄少平<sup>2)</sup> 钟香崇<sup>1)</sup>

1) 郑州大学高温功能材料河南省重点实验室 郑州 450052

2) 洛阳高新技术产业开发区精达科技工业有限公司

**摘要** 介绍了耐火材料弯曲应力 - 应变测试仪的基本构成以及对试验炉、加荷装置、变形量测量装置和计算机控制系统等各构件的要求,重点介绍了使用该仪器研究耐火材料应力 - 应变关系的方法以及影响测试结果的相关的因素。该方法可以用来研究耐火材料在高温下承受弯曲应力时的变形问题,确定耐火材料在各温度下的应力 - 应变关系,测试和判断耐火材料的弹性、塑性和粘滞流动的温度范围,并根据应力 - 应变关系计算耐火材料在不同温度下的弹性模量。

**关键词** 耐火材料,高温力学性能,应力 - 应变关系,弹性模量,测试方法

随着耐火材料新品种的不断涌现和对耐火材料产品性能要求的不断提高,合理评价耐火材料高温力学性能,使测试结果能准确、真实、全面地反映材料本身的特性,这不仅对指导材料的制备有着重要意义,而且为产品在使用过程中的可靠性提供了保证。在目前的耐火材料高温力学性能检验方法中,对在高温受力时至关重要的应力 - 应变关系评价较少,尚缺少一套完善的应力 - 应变关系的测试方法,因而难以对耐火材料的高温力学性能进行全面的描述。因此,需要研究和探讨一种合适的测试技术对耐火材料在高温受力时的应力 - 应变关系进行评价。

本工作通过在研制的高温弯曲应力 - 应变仪<sup>[1]</sup>上对一些材料的测试、比较和分析,拟订出一套耐火材料应力 - 应变关系的测试方法。应用本测试方法可以测定材料在不同温度下受力时的变形情况,并根据其应力 - 应变关系来判断该材料的塑性变形开始温度和粘性流动开始温度。

## 1 试验设备

### 1.1 试验炉

采用二硅化钼发热元件或碳化硅发热元件的电热炉。该试验电炉能同时加热弯曲装置和试样,能按试验要求形成空气气氛或非氧化气氛。采用经过校准的热电偶测量试验温度,采用程序控温并自动记录温度,控温精度在  $\pm 5$  °C 以内。

### 1.2 加荷装置

包括试验机和弯曲装置。试验机可采用与试验

炉配合的各种形式的压力机,但必须满足下列要求:

1) 具有足够折断试样的力 2) 能以规定的加荷速率对试样均匀加荷,并记录或指示试样断裂时的载荷 3) 能以规定的速率加荷和卸荷,并能记录加荷和卸荷过程的载荷值 4) 能保持恒定载荷,并记录恒定载荷大小及保持时间 5) 测力误差在  $\pm 2\%$  以内。

弯曲装置由 2 个下刀口和 1 个上刀口组成,并满足下列要求: 1) 3 个刀口应相互平行,上刀口位于 2 个下刀口的正中间,偏离不超过 2 mm 2) 2 个下刀口应在一个水平面上; 3) 2 个下刀口间的距离为  $(100 \pm 2)$  mm,刀口应具有  $(5 \pm 1)$  mm 的曲率半径; 4) 刀口长度至少比试样宽 5 mm。(注:上述尺寸均在室温下测量,精确到 0.5 mm)

### 1.3 变形量测量装置

该装置由内、外示差管和示差机构支撑架组成,如图 1 所示。内、外示差管材质相同。试样的变形量通过内示差管的伸缩传给位移传感器。位移传感器的量程为 100 mm,分辨率为 1  $\mu$ m。位移信号与计算机系统相联。

### 1.4 计算机控制系统

计算机控制系统配有专用的仪器操作控制软件,内容如下: 1) 引导仪器的控制,显示控制过程及记录结果 2) 被测对象在某一温度下的抗折强度及相应变形量的测试及描述 3) 被测对象在某一温度下在施加应

\* 徐恩霞:女,1965年生,博士研究生,高级工程师。

E-mail: htci@zzu.edu.cn

收稿日期: 2006-04-24

编辑: 黄卫国

力和释放应力过程的应力 - 应变关系的测定及描述。

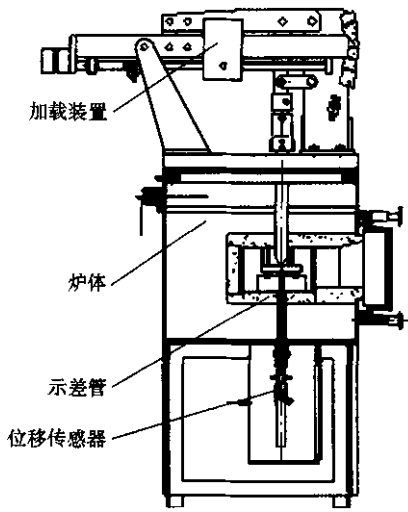


图1 应力 - 应变仪结构示意图

## 2 试样

### 2.1 形状和尺寸

采用的试样为  $(25 \pm 2) \text{ mm} \times (25 \pm 2) \text{ mm} \times (125 \sim 130) \text{ mm}$  的长方体。试样长度方向的相对两面应平行,压力面和张力面的平行度允许偏差  $\leq 0.5 \text{ mm}$ 。试样中部横切面的两对边平行度允许偏差  $\leq 0.2 \text{ mm}$ 。

### 2.2 制样

由定形制品上切取试样时应保留垂直于成型加压方向的一个原砖面作为试验时施加载荷的受力面,并且做上标记。对于不定形材料,使用模型制备试样,以成型时的侧面作为试验时施加载荷的受力面。制样时应避免裂纹和水化。

## 3 试验步骤

### 3.1 试样尺寸的测量

用游标卡尺测量试样中部的宽度和高度,精确到  $0.1 \text{ mm}$ ,并将此数据输入计算机内。

### 3.2 加热

将试样放入试验炉均温带的弯曲装置上,调整好内示差管的高度,根据制品的技术条件或由有关方面商量确定试验温度和炉内气氛,然后按下列升温速率加热至试验温度:室温  $\sim 1000 \text{ }^\circ\text{C}$  的升温速率为  $8 \sim 10 \text{ }^\circ\text{C} \cdot \text{min}^{-1}$ ;  $1000 \text{ }^\circ\text{C} \sim$  试验温度的升温速率为  $4 \sim 5 \text{ }^\circ\text{C} \cdot \text{min}^{-1}$ 。到达试验温度后,保温一定时间,其中烧成制品保温  $30 \text{ min}$ ,不烧制品保温  $60 \text{ min}$ 。

### 3.3 加荷

保温结束后,以一定的加荷速度对试样施加弯曲载荷。当载荷值达到预定值时,立即以同样的速度减

少载荷。在加荷和卸荷过程中,记录试样承受的载荷值和对应的弯曲变形量。

### 3.4 应力 - 应变曲线图的绘制

根据试验中得到的载荷值和试样的弯曲变形量,由式(1)计算其应力  $\sigma$ ,由式(2)计算其应变  $\varepsilon$ ,然后以应力值为纵坐标,以试样的应变量为横坐标作图,可得到试验材料在该温度下的应力 - 应变曲线。

$$\sigma = \frac{3Pl}{2bh^2} \quad (1)^{21}$$

$$\varepsilon = \frac{6h\delta}{l^2} \quad (2)^{21}$$

## 4 分析与计算

### 4.1 应力 - 应变曲线分析

在低温下,试样在加荷过程中的应力 - 应变曲线与卸荷过程中的应力 - 应变曲线基本上是可逆(重合)的直线。试样的变形属弹性变形。

试验温度升高至某一温度值后,加荷过程中的应力 - 应变曲线开始向横轴(应变)方向倾斜和弯曲,其卸荷过程的应力 - 应变曲线与加荷过程的应力 - 应变曲线不重合,当载荷完全卸除后试样仍残留有少量的永久变形。这说明,在此温度下,试样在载荷的作用下开始发生塑性变形。这一温度称为塑性变形开始温度  $T_p$ 。

从  $T_p$  开始,随着试验温度的继续升高,试样在加荷过程中的应力 - 应变曲线向横轴(应变)方向的倾斜量以及完全卸荷后的永久变形量均逐渐增大。当试验温度超过某一温度后,试样在加荷过程中的应力 - 应变曲线向横轴(应变)方向的倾斜量显著增大,并且在卸荷过程还未结束时试样就发生断裂,说明试样已进入粘滞流动阶段<sup>[3-4]</sup>,这一温度称为粘滞流动开始温度  $T_v$ 。如图2所示,一等高铝砖的  $T_p$  为  $1000 \text{ }^\circ\text{C}$ ,  $T_v$  为  $1300 \text{ }^\circ\text{C}$ 。因此,根据不同温度下的应力 - 应变曲线,可以判断耐火材料的弹性变形温度范围、塑性变形开始温度和粘滞流动开始温度。

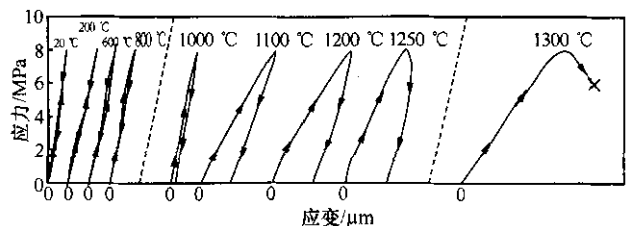


图2 一等高铝砖在不同温度下的应力 - 应变曲线

### 4.2 弹性模量的计算

弹性模量是一个重要的材料常数,除与材料的化学组成和相组成有关外,还与温度有关。大部分固体材料受热后逐渐变软,其弹性模量随温度的升高而

减小。

如图3所示,在三点弯曲试验中,一定尺寸的长方体试样在载荷的作用下发生弹性变形时,若以A点为坐标原点,AB为X轴,其变形的线位移方程为:

$$\delta = -\frac{Px}{48EI}(3l^2 - 4x^2) \quad (0 \leq x \leq \frac{l}{2})$$

式中  $\delta$  为挠度即梁轴线上的一点在垂直于梁变形前轴线方向的线位移,mm;  $P$  为试样上所承受的弯曲载荷, N;  $E$  为材料的弹性模量, MPa;  $I$  为矩形材料的惯性矩, mm<sup>4</sup>;  $l$  为两下刀口之间的跨距, mm。

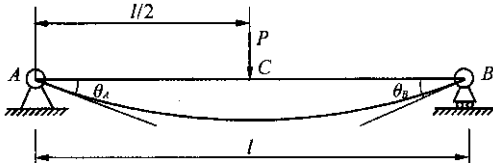


图3 试样变形示意图

当取最大挠度时其绝对值为:

$$\delta_{\max} = -\frac{Pl^3}{48EI} \quad (\text{当 } x = \frac{l}{2} \text{ 时})$$

代入矩形材料的惯性矩  $I = bh^3/12$  ( $b$  为试样宽度, mm;  $h$  为试样高度, mm) 后得:

$$\delta_{\max} = -\frac{Pl^3}{48E \cdot \frac{bh^3}{12}} = -\frac{Pl^3}{4Ebh^3}$$

整理后得:

$$E = \frac{Pl^3}{4bh^3\delta} = \frac{l^3}{4bh^3} \cdot \frac{P}{\delta_{\max}} \quad (3)$$

通过实验测出耐火材料试样所承受的载荷  $P$  和与之对应的最大挠度  $\delta_{\max}$  后,用(3)式计算材料的弹性模量。

## 5 影响测试结果的因素

耐火材料试样的塑性变形开始温度与其相组成和结构密切相关。在试样主晶相相同时,结合相的性质影响塑性变形开始温度;结合相相同时,主晶相的性质及主晶相与结合相的结合方式决定着塑性变形开始温度的高低。因此,材料本身的性质决定着材料在不同温度下的应力-应变关系。然而,实验条件的选择对实验结果也具有一定的影响,主要表现为:

### (1) 最大载荷值对塑性变形开始温度的影响

图4是SiAlON结合刚玉制品在流通氮气保护下以分别选取10 MPa、15 MPa和20 MPa的最大载荷进行应力-应变试验时得到的应力-应变曲线。可以看出,对于同一种材料,当选取的最大载荷不同时,其塑性变形开始温度有一定的差别,最大载荷越大,其塑性变形开始温度越低;SiAlON结合刚玉试样在10

MPa、15 MPa和20 MPa的最大试验载荷下的塑性变形开始温度分别为1200℃、1100℃和1000℃。由此可以看出,选取合适的最大实验载荷是相当重要的。测试应力-应变关系时,一般按下列方法选定最大载荷值:首先测试材料的强度-温度关系,知道材料在哪一个温度点强度最低,并以与该强度对应的载荷值的1/2~2/3为应力-应变试验中的最大载荷值。试验采用的最大载荷值应该在应力-应变试验结果中标明。

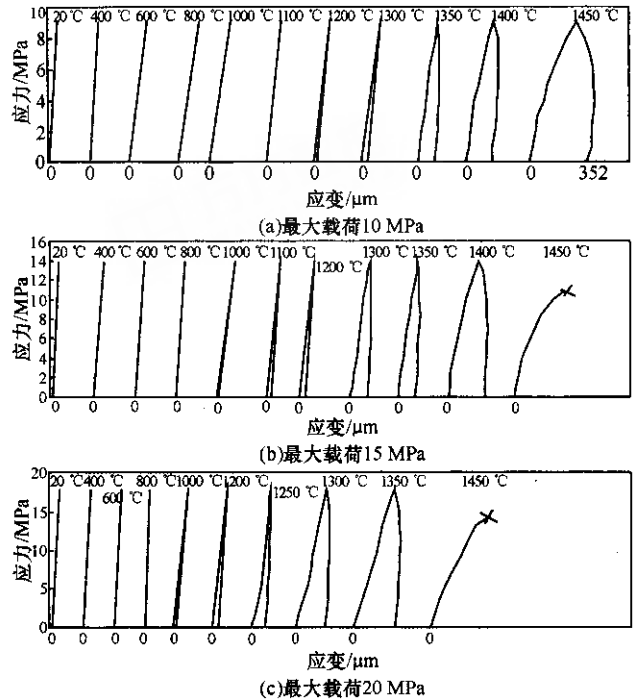


图4 SiAlON结合刚玉制品在不同最大载荷下的应力-应变曲线

### (2) 试验气氛对塑性变形开始温度的影响

对一些含非氧化物的材料,试验气氛对试验结果有很大的影响。图5为矾土基SiAlON结合刚玉砖在不同气氛中的应力-应变曲线。可以看出,试样在流通氮气气氛和在空气气氛中的塑性变形开始温度分

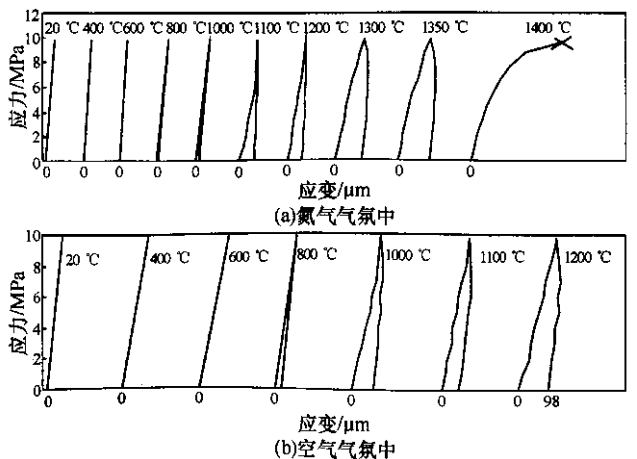


图5 矾土基SiAlON结合刚玉砖在不同气氛下的应力-应变曲线

别为 1000 °C 和 800 °C。显然,在氮气气氛中的塑性变形开始温度要高于在空气气氛中的塑性变形开始温度。这主要是由于矾土基 SiAlON 结合刚玉在空气中加热到一定温度后部分被氧化导致性能下降所引起的。因此,对含碳或含非氧化物的耐火材料,试验时要通入保护性气体以防止其氧化而影响其试验结果的准确性。

### (3) 加荷速率对实验结果的影响

试验中以慢速加荷和卸载为好。材料受外力后产生变形,除去外力后变形恢复,试验仪器在采集这些变形数据时往往有滞后现象,使应力和应变的对应关系出现偏离。慢速加荷和卸载可以为仪器采集变形数据留有相对长的时间,尽可能地消除试验误差。试验中一般采用的加荷速率为  $5 \sim 8 \text{ N} \cdot \text{s}^{-1}$ 。

## 6 结论

(1) 高温弯曲应力-应变实验方法可以用来研究

耐火材料在高温下承受弯曲应力时的变形,确定耐火材料在不同温度下的应力-应变关系,从而确定耐火材料只发生弹性变形、开始发生塑性变形和开始发生粘滞流动的温度,并根据其应力-应变关系计算耐火材料在不同温度下的弹性模量。

(2) 试验过程中,要注意选择合适的最大试验载荷、加荷速率和试验气氛。

### 参考文献

- [1] 郑州大学,洛阳精达公司.耐火材料弯曲应力应变测试仪.中国专利.专利号 ZL03126331.3 20050831
- [2] 包亦望,王毅敏,金宗哲.  $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{SiC}$  复相陶瓷的高温蠕变与持久强度.硅酸盐学报,2000,28(4):348-351
- [3] 徐恩霞,钟香崇.高铝砖高温弯曲应力-应变关系.耐火材料,2005,39(4):266-269
- [4] 尹汝珊,钟香崇.高铝砖的高温力学性能.耐火材料,1983,17(6):1-8

Testing method and influence factor for hot bending stress - strain relationship of refractories/Xu Enxia, Huang Shaoping, Zhong Xiangchong//Naihuo Cailiao. -2006,40(5):382

Major components of a stress - strain testing apparatus for refractories, including its furnace, loading device, deformation testing device, and control system are introduced. The stress - strain testing method and influence factors are especially focused on. This method is used to test and determine the deformation of the refractories under bending stress at high temperatures, the stress - strain relationship at various temperatures, the temperature range of the elasticity, plasticity and viscous flow. According to the stress - strain relationship, the modulus of elasticity at different temperatures can be figured out.

**Key words:** Refractories, High temperature mechanical properties, Stress - strain relationship, Modulus of elasticity, Testing method

**Author's address:** The Henan Province Key Laboratory of High Temperature Ceramics, Zhengzhou University, Zhengzhou 450052, China

# 耐火材料高温弯曲应力-应变关系测试方法及影响因素

作者: [徐恩霞](#), [黄少平](#), [钟香崇](#), [Xu Enxia](#), [Huang Shaoping](#), [Zhong Xiangchong](#)  
作者单位: [徐恩霞, 钟香崇, Xu Enxia, Zhong Xiangchong \(郑州大学高温功能材料河南省重点实验室, 郑州, 450052\)](#), [黄少平, Huang Shaoping \(洛阳高新技术产业开发区精达科技工业有限公司\)](#)  
刊名: [耐火材料](#) **ISTIC** **PKU**  
英文刊名: [REFRACTORIES](#)  
年, 卷(期): 2006, 40(5)  
被引用次数: 4次

## 参考文献(4条)

1. [郑州大学; 洛阳精达公司](#) [耐火材料弯曲应力应变测试仪](#) 2005
2. [包亦望; 王毅敏; 金宗哲](#) [Al2O3/SiC复相陶瓷的高温蠕变与持久强度](#)[期刊论文]-[硅酸盐学报](#) 2000(04)
3. [徐恩霞; 钟香崇](#) [高铝砖高温弯曲应力-应变关系](#)[期刊论文]-[耐火材料](#) 2005(04)
4. [尹汝珊; 钟香崇](#) [高铝砖的高温力学性能](#) 1983(06)

## 本文读者也读过(4条)

1. [徐恩霞](#), [钟香崇](#), [Xu Enxia](#), [Zhong Xiangchong](#) [高铝砖高温弯曲应力-应变关系](#)[期刊论文]-[耐火材料](#)2005, 39(4)
2. [徐恩霞](#), [张恒](#), [钟香崇](#), [Xu Enxia](#), [Zhang Heng](#), [Zhong Xiangchong](#) [β-SiAlON/Si3N4结合刚玉/碳化硅材料的高温力学性能](#)[期刊论文]-[耐火材料](#)2007, 41(5)
3. [刘新红](#), [叶方保](#), [钟香崇](#) [β-SiAlON添加量对矾土基浇注料高温力学性能的影响](#)[期刊论文]-[耐火材料](#)2004, 38(3)
4. [石凯](#), [罗焰](#), [钟香崇](#), [Shi Kai](#), [Luo Yan](#), [Zhong Xiangchong](#) [Al和Al-Si加入量对Al2O3-C材料高温性能的影响](#)[期刊论文]-[耐火材料](#)2007, 41(2)

## 引证文献(4条)

1. [徐恩霞](#), [张恒](#), [钟香崇](#) [β-SiAlON结合刚玉砖的高温力学性能与显微结构](#)[期刊论文]-[耐火材料](#) 2008(1)
2. [徐恩霞](#), [张恒](#), [钟香崇](#) [高温循环载荷作用下β-SiAlON结合刚玉砖的损伤行为](#)[期刊论文]-[耐火材料](#) 2008(4)
3. [侯阳来](#), [王玺堂](#), [李云宝](#), [李钰](#) [Al2O3-SiC浇注料的应力-应变行为](#)[期刊论文]-[武汉科技大学学报\(自然科学版\)](#) 2009(4)
4. [徐恩霞](#), [张恒](#), [钟香崇](#) [β-SiAlON/Si3N4结合刚玉/碳化硅材料的高温力学性能](#)[期刊论文]-[耐火材料](#) 2007(5)

本文链接: [http://d.g.wanfangdata.com.cn/Periodical\\_nhcl200605018.aspx](http://d.g.wanfangdata.com.cn/Periodical_nhcl200605018.aspx)