

耐火材料断裂能的测试

刘国齐 杨金松 李红霞 杨文刚 马天飞

中钢集团洛阳耐火材料研究院有限公司 先进耐火材料国家重点实验室 河南洛阳 471039

摘要 在介绍耐火材料断裂能与其抗热震性的关系和国内外耐火材料断裂能测试研究现状的基础上,指出:研究耐火材料在高温下的断裂能,对评价材料的抗热震性有积极的意义;楔入劈拉法是测试耐火材料断裂能的一个有效方法。

关键词 断裂能,抗热震性,楔入劈拉法

大多数耐火材料在初次使用时会经受一定温度梯度的热冲击,因此,耐火材料的抗热冲击性是影响其可使用性的关键因素。现场使用是验证耐火材料抗热冲击性的直接方法,但费用高,危险性大,容易造成不必要的损失。通过模拟现场条件,采用特定的方法评价耐火材料的抗热冲击性具有费用低,危险性小,灵活性高等特点,是评价耐火材料性能的有效途径。

在耐火材料抗热冲击性的评价方面,可以用水冷或风冷的方法(如 YB/T 4018—91)对抗热震性作出现象学判断,但由于试验条件与现场条件相差较大,试验结果还不能随意应用到其他现场条件。因此这种试验方法常常不能在尽可能低的费用条件下,根据物理性能证明材料在各种机械、热应力下的性状,达不到耐火材料用户和制造厂的要求。例如对于性能很好的含碳材料,要鉴定其抗热冲击性就费时、费力。另外,由于耐火材料中存在大量的微裂纹,对抗热冲击性的理论研究特别是 Hasselman 的研究工作可用于粗陶瓷耐火材料^[1]。该工作最重要的成果之一是对热冲击诱导裂纹的形成和扩大,裂纹扩展的参数用以下两个参数之一加以表示:

$$R^m = \frac{2\gamma E}{\sigma^2(1-\nu)}, \quad (1)$$

$$R_s = \left[\frac{\gamma}{\alpha^2 E} \right]^{\frac{1}{2}}. \quad (2)$$

式中: γ 为断裂能, σ 为断裂强度, α 为热膨胀系数, E 为弹性模量, ν 为泊松比。这两者的共同点是提高断裂能有助于提高材料的抗热冲击性,说明断裂能的测试对预期耐火材料的抗热冲击性具有非常重要的作用。所谓断裂能,就是材料裂开时单位面积所需消耗

的平均能量,单位是 $\text{N} \cdot \text{m}^{-1}$,表征材料抵制开裂的能力。

1 耐火材料断裂能测试的研究现状

国内鲜见关于耐火材料断裂能测试方面的文献,而在与断裂能相关的断裂韧性($K_{Ic} = \sqrt{2E\gamma}$,其中 K_{Ic} 为断裂韧性, γ 为断裂能, E 为弹性模量)方面,有少量耐火材料工作者进行了一定的尝试,如刘延伶等^[2]曾采用三点弯曲法测定了诸多耐火材料的断裂韧性,认为相对切口深度是影响测定值的主要因素。但对于耐火材料、陶瓷等脆性材料而言,预制裂纹十分困难,难以人工做出理想的原生裂纹。在用单边切口梁法测试陶瓷等材料断裂韧性时,试件的裂纹通常由一定半径的缺口代替。由于人工切口的曲率半径远远大于自然裂纹,其结果使应力集中程度减小, K_{Ic} 的实测值偏大,并存在随切口宽度增大而增大的“切口钝化效应”。徐恩霞等^[3]采用高温静疲劳法在耐火材料内部预制了裂纹,用以测定材料的断裂韧性,但制作过程颇显复杂。

奥地利莱奥本大学陶瓷中心^[4]采用劈拉法对多种耐火材料的断裂能进行了测试,认为待测试样受到的力除与施加的力有关,还与楔形角度、侧面压块角度有关;并认为在多数机械或热机械应力的条件下,除了具有非线性材料的行为以外,耐火材料还具有较小的脆性。通过计算特征长度、抗热震断裂参数以及 R 曲线,并结合断裂前后的显微特征,认为减弱颗粒和基质之间的结合,并在颗粒和基质之间,特别是颗

* 刘国齐:男,1975年生,博士。

E-mail: weainug@126.com

收稿日期:2010-11-26

编辑:柴剑玲

粒周围预制微裂纹,能够降低结合相断裂所需要的能量,并且增加桥接等非线性效应。C. Manhart 等^[4]将劈拉法测试耐火材料断裂能的试样通过体视显微镜进行了观察,并通过软件计算得到了断面的分形参数,认为此参数与材料的断裂性能有关。Sebastião Ribeiro 等^[5]也采用劈拉法对高铝质耐火浇注料进行了相关研究,认为这种方法不仅使得测试机器存储了最小的弹性应变能,而且测试试样具有较小的体积断裂表面积比,为裂纹稳态扩展提供了有利的条件;研究后认为此方法可以建立起材料性能与显微结构之间的关系,同时认为试样的制备对断裂能的测试具有一定的影响。

由于混凝土的结构和耐火材料尤其是浇注料的较为相似,因此可参照混凝土的测试方法测试耐火材料的断裂能。根据所采用的试件形式不同,目前测定混凝土断裂能的方法主要有直接拉伸法、三点弯曲法(TPB)、紧凑拉伸(CT)以及楔入劈拉法(WS)^[6-8],但还没有形成统一的规范。

紧凑拉伸和楔入劈拉法相对三点弯曲法有一个很大的优点,就是不涉及自重的影响。值得一提的是,与TPB法^[9]和CT法^[10]相比,楔入劈拉(WS)法易现场制作试件,在各种处理过程中不易损坏,通过选取合适的楔形角,使竖向荷载低于水平荷载,人为提高了试验机的刚度,从而在实际操作中降低对试验机本身刚度的要求,而且操作简单,辅助加载装置造价较低。用楔入劈拉法测定材料断裂能时可以满足稳定的裂纹扩展,因此比较适合于测定耐火材料断裂能,国外许多学者也是采用楔入劈拉法测试耐火材料断裂能的。

与混凝土不同,耐火材料需要在高温下使用,因此研究耐火材料在高温下的断裂能更具有现实意义。图1示出了楔入劈拉法测试断裂能的原理图:在垂直方向通过楔形体施加一定的力,然后由圆柱体传递到侧面压块,再由侧面压块传递到待测试样上,在 $\alpha/2 + \beta = 90^\circ$ 的条件下,形成水平向外拉的效果。可利用式(3)~(5)计算耐火材料的断裂能:

$$\gamma = \frac{1}{A} \int_0^{\delta} F_H d\delta, \quad (3)$$

$$F_H = \frac{F_V}{2 \tan \frac{\alpha}{2}}, \quad (4)$$

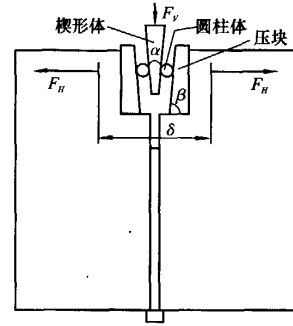
$$\gamma = \frac{1}{2A \cdot \tan \frac{\alpha}{2}} \int_0^{\delta} F_V d\delta. \quad (5)$$

式中: γ 为断裂能, A 为断裂面积, α 为楔入角, F_V 为

垂直力, F_H 为水平力, δ 为水平位移。

利用上述测试原理,通过在待测样块周围施加温度场,即可测定特定温度下耐火材料的断裂能。

耐火材料断裂能的测试样尺寸如图2所示,采用方形样,中间有宽度为2.5 mm的预制缝^[4]。



α —楔入角; β —压块导角; F_V —垂直力;
 F_H —水平力; δ —水平位移

图1 耐火材料断裂能测试原理示意图

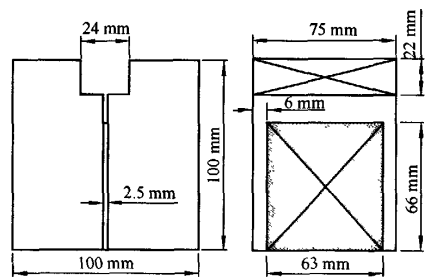


图2 耐火材料断裂能的测试样尺寸示意图

耐火材料断裂能尤其是高温下断裂能的测试,重点在于水平位移的测量。水平位移的测量目前有两种方法:一种是接触式的,采用位移计测量,这种方法精度较高,设备费用低,但操作繁琐,试验误差大;另外一种是非接触式,采用激光散斑引伸计(Laser Speckle Extensometer)测量水平位移,具有操作灵活,测量精度较高,易于实施试验的特点,但存在设备费用高,试验温度不高(不高于1 200 ℃)等问题。对于断裂能的测试来说,另外一个要注意的问题是试验机的刚度要高,否则试验时试验机本身储存的弹性能使裂纹快速扩展,达不到断裂能测试时裂纹稳定扩展的要求。目前国内还缺乏高温断裂能测试方面的设备和材料方面的系统研究。

2 结论

研究耐火材料在高温下的断裂能,对评价材料的抗热震性有积极的意义。楔入劈拉法是测试耐火材料断裂能的一个有效方法。

(下转 226 页)

二次烘烤→安装→台下烘烤→中包烘烤→使用。

稳流器的养护:空气的潮湿度使得产品的不同表面产生不同的饱和蒸气压,影响了稳流器内部水分的排出速度,当稳流器表面的强度完成快于内部强度时,稳流器底部会出现裂纹。为此,建立了恒温养护室。确保稳流器四季的养护温度都在15~25℃之间。适度的养护温度有利于“Si—OH”键的充分发育,从而增加稳流器的常温强度。

稳流器的常温烘烤:稳流器烘烤过程中出现裂纹的原因首先是镁砂在升温过程中水化而使得稳流器膨胀开裂;其次是在烘烤过程中水分急剧排出,产生内外气压差,当压力超过稳流器强度的承受能力时便产生了爆裂现象。为此,建了1座电热隧道式干燥器,2座电热箱式干燥器,实现了烘烤曲线的自动控制,并在此基础上优化了烘烤曲线,见表1。

表1 稳流器优化后的烘烤曲线

时间/h	0	1	4	12	20	26	34	42	46	50
温度/℃	0	50	50	70	70	120	120	270	270	降温

高温二次烘烤:增加钢包烘烤位,烘烤钢包时同时烘烤稳流器。通过1100℃左右72h长时间烘烤,对排除结晶水,促进稳流器的烧结起到了良好作用,显著提高了稳流器的耐冲刷性和质量稳定性。

稳流器的安装:对2、4号连铸机在安装中间包稳流器时采用干式料,在稳流器与中间包工作层接触的边部部位采用涂抹料涂抹。1、3号机稳流器采用嵌入式安装方式,对底部干式料打薄,安装后在边部部位采用涂抹料涂抹。

稳流器的使用:增加中间包高度,将中间包高度800mm改造为900~1000mm,增加了中间包钢水液

面的高度,通过钢水的阻力作用减轻了钢流对稳流器的冲刷,缓解了稳流器底部的冲击压力。同时,对连铸机推行“恒温、恒液面、恒拉速”的“三恒”操作,连铸推行,全过程满包浇铸,降低底部冲击力度,对保护稳流器底部起到了很好的作用。

2 使用效果

通过以上改进措施的实施,稳流器成材率由原来78.5%上升到97.6%,基本杜绝了底部裂纹现象。

检验发现稳流器的显气孔率在9%左右,耐高温冲刷性明显增强,中间包使用寿命较试验初期增加2倍左右,根据15个月统计结果,其月平均使用寿命曲线见图3。

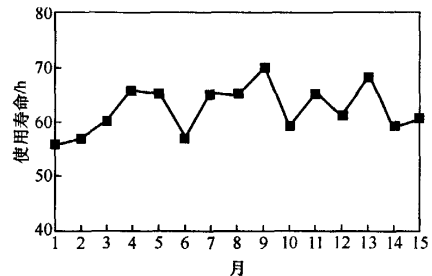


图3 稳流器寿命曲线

3 结语

连铸中间包稳流器通过原料的选择使得稳流器具有足够的强度,提高了成品率;外形的改进使得稳流器更耐冲刷;制作工艺特别是高温二次烘烤、连铸“三恒”操作使得稳流器使用效果明显改善。稳流器的平均寿命为62.2h,最高寿命达到了100h。

(上接224页)

参考文献

- [1] 关振则,张中太,焦金生.无机材料物理性能[M].北京:清华大学出版社,1992:161.
- [2] 刘延伶,王润泽.耐火材料弹塑性断裂韧性的测定[J].硅酸盐通报,1987(2):13-15.
- [3] 徐恩震,张恒,钟香崇.高温静疲劳法预制耐火材料断裂韧性试件原生裂纹[J].材料导报,2007,21(2):154-156.
- [4] Manhart C, Harmuth H. Development of a device and method for fractographic investigation of refractories [C]//Proc of UNITECR'07, Dresden, German, 2007:494-497.
- [5] Sebastião Ribeiro, José S C Vieira, Caio C D Exposito, et al. Fracture energy of a refractory castable measured by the wedge splitting method [C]//Proc of UNITECR'07, Dresden, German, 2007:498-501.
- [6] Harmuth H, Rieder K, Krobath M, et al. Investigation of the nonlinear fracture behavior of ordinary ceramic refractory materials [J]. Mat Sc Eng A, 1996(214):53-61.
- [7] Tschegg E K, Elser M, Stanzl-Tschegg S E. Biaxial Fracture tests on concrete - development and experience [J]. Cement & Concrete Composites, 1995, 17(1):57-75.
- [8] Rasmus Walter, Lennart Ostergaard, John F Olesen, et al. Wedge splitting test for a steel-concrete interface [J]. Engineering Fracture Mechanics, 2005, 72(17):2565-2583.
- [9] 何金荣,郑治,曾正宾.混凝土断裂韧度两种测试方法比较[J].水电勘测设计,2006(4):34-36.
- [10] 郭向勇,方坤河,冷发光.混凝土断裂能的理论分析[J].哈尔滨工业大学学报,2005,37(9):1119-1123.

耐火材料断裂能的测试

作者: 刘国齐, 杨金松, 李红霞, 杨文刚, 马天飞
作者单位: 中钢集团洛阳耐火材料研究院有限公司, 先进耐火材料国家重点实验室, 河南洛阳471039
刊名: 耐火材料 ISTIC PKU
英文刊名: REFRACTORIES
年, 卷(期): 2011, 45(3)

参考文献(10条)

1. 关振则;张中太;焦金生 [无机材料物理性能](#) 1992
2. 刘延伶;王润泽 [耐火材料弹塑性断裂韧性的测定](#) 1987(02)
3. 徐恩霞;张恒;钟香崇 [高温静疲劳法预制耐火材料断裂韧性试件原生裂纹](#)[期刊论文]-[材料导报](#) 2007(02)
4. Manhart C;Harmuth H [Development of a device and method for fractographic investigation of refractories](#) 2007
5. Sebastião Ribeiro;José S C Vieira;Caio C D Exposito [Fracture energy of a refractory castable measured by the wedge splitting method](#) 2007
6. Harmuth H;Rieder K;Krobath M [Investigation of the nonlinear fracture behavior of ordinary ceramic refractory materials](#) 1996(214)
7. Tschegg E K;Elser M;Stanzl-Tschegg S E [Biaxial Fracture tests on concrete-development and experience](#)[外文期刊] 1995(01)
8. Rasmus Walter;Lennart Ostergaard;John F Olesen [Wedge splitting test for a steel-concrete interface](#)[外文期刊] 2005(17)
9. 何金荣;郑治;曾正宾 [混凝土断裂韧度两种测试方法比较](#) 2006(04)
10. 郭向勇;方坤河;冷发光 [混凝土断裂能的理论分析](#)[期刊论文]-[哈尔滨工业大学学报](#) 2005(09)

本文读者也读过(10条)

1. Kiyoshi Sugia [耐火材料测试方法近半世纪的发展](#)[会议论文]-1998
2. 陈俊红. 封吉圣. 郑本水. 封立杰 [悬浮预热器内筒的研究及应用](#)[期刊论文]-[耐火材料](#)2011, 45(3)
3. 曹金章. 黄志强 [碾压混凝土层面断裂韧度楔入劈拉试验](#)[期刊论文]-[科技风](#)2009(22)
4. 许大燕. 叶国田. 刘磊. 黄亚东. 陈留刚 [机械活化勃姆石-二氧化硅混合物合成莫来石](#)[期刊论文]-[耐火材料](#) 2011, 45(3)
5. 纪瑞东. 魏薇. 李俊. 勾新勇. 孙翠华 [解决转炉炉体空洞缺陷的措施](#)[期刊论文]-[耐火材料](#)2011, 45(3)
6. 许承凤. 杨开保. 郁书中 [滑动水口砖型浅考与设计](#)[期刊论文]-[耐火材料](#)2011, 45(3)
7. 李亮. 郁书中. 邓葱柏. 尚钢城 [PLC控制耐火材料配料系统的设计](#)[期刊论文]-[耐火材料](#)2011, 45(3)
8. 崔等. Cui Deng [煤系高岭土高温煨烧单晶相莫来石产品的工艺条件](#)[期刊论文]-[耐火材料](#)2011, 45(3)
9. 郑新兵. 何宇蓉 [硫磺回收反应炉衬里失效原因及防范措施](#)[期刊论文]-[耐火材料](#)2011, 45(3)
10. 李培佳. 李林. 贺智勇. 彭小艳. 杨粉荣 [硅线石对矾土基浇注料性能的影响](#)[期刊论文]-[耐火材料](#)2011, 45(3)

本文链接: http://d.g.wanfangdata.com.cn/Periodical_nhcl201103019.aspx