

测试与分析

热喷涂涂层界面断裂韧性的反向三点弯曲法试验

李巧莲^{1,2}, 张坤¹, 张凯^{1,2}, 彭青^{1,2}

(1. 中国科学院力学研究所 先进制造工艺力学重点实验室, 北京 100190;

2. 中国科学院研究生院, 北京 100190)

摘要:以热喷涂 NiCrBSi 涂层/钢基体为材料模型, 利用将涂层置于受压侧的反向三点弯曲法试验, 对热喷涂涂层界面断裂现象进行分析并建立相应的界面断裂韧性计算模型。结果表明, 界面裂纹起始于三点弯曲试样中部, 对应于加载压头与涂层接触区域正下方的界面上, 并向两侧扩展, 伴随涂层屈曲, 形成分层屈曲的破坏形貌。根据分层屈曲形貌建立计算模型, 通过分层屈曲几何参数与屈曲临界应力、涂层内真实应力以及界面断裂韧性的关系, 获得界面断裂韧性值。

关键词:三点弯曲试验; 热喷涂涂层; 分层屈曲; 界面断裂韧性

中图分类号: TG115.5⁺4 **文献标志码:** A **文章编号:** 0254-6051(2010)01-0114-03

Three-point reverse bending test of interfacial fracture toughness on thermal spraying coating

LI Qiao-lian^{1,2}, ZHANG Kun¹, ZHANG Kai^{1,2}, PENG Qing^{1,2}

(1. Key Lab of Mechanics in Advanced Manufacturing, Institute of Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China;

2. Graduate University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China)

Abstract: Interfacial fracture phenomenon was analyzed with three-point reverse bending test to measure the interfacial fracture toughness of thermal spraying NiCrBSi coating/steel substrate. The results show that the interfacial crack initiates along the interface under the contact zone of the indenter and the coating at the mid-span, and buckling morphology is formed as the interfacial crack propagates to two ends of the sample. Calculation model is given according the buckling morphology of the coating, and the interfacial toughness is obtained by the relationship between the geometric parameters of coating buckling and critical stress, real stress and interfacial toughness.

Key words: three-point bending test; thermal spraying coating; delamination buckling; interfacial fracture toughness

测量涂层与基体界面断裂韧性的方法, 从试件制备的角度分为预制裂纹和非预制裂纹两种情形: 前者为弯曲法, 如三点弯曲法^[1]、四点弯曲法^[2-5], 依据界面断裂力学理论建立测量模型, 加载特点是涂层侧受到拉应力作用; 而后者主要有表面压入法^[6-7]、激光屈曲法^[8-9]。目前的弯曲法共同特点是^[1-5]: 一是需要预制涂层和界面裂纹; 二是涂层侧受拉伸载荷。而表面压入法和激光屈曲法均需要在卸载后, 将试件横截面剖开以获得屈曲形貌几何尺寸。

本文涂层侧受压的弯曲法采用圆柱压头, 利用压头侧面对涂层表面进行模拟压入试验, 观察涂层破坏形态, 提出新的界面断裂韧性的测试方法。由于传统的弯曲法为涂层侧受拉伸载荷, 称该种涂层侧受压缩载荷的加载方式为反向弯曲法。

1 试验材料及方法

试样材料为 NiCrBSi 涂层/钢基体, 如图 1 所示, 尺寸为 40 mm × 2.5 mm × 2.5 mm, 涂层厚度为 0.25 mm, 两端支座之间的跨度为 25 mm, 压头为半径 $r = 2.5$ mm 的圆柱。压头作用于三点弯曲试样中部(简称“跨中”)位置, 涂层置于受压侧。

试验在配有 S-570SEM 的 Instron Microtester 5848 上进行。在试件跨中的基体侧贴应变片测量轴向应变, 采用控制载荷方式进行加载, 加载速度为 0.08 mm/min, S-570SEM 用以实时观察试样截面的破坏, Instron Microtester 5848 用以实时监测载荷-应变曲线。

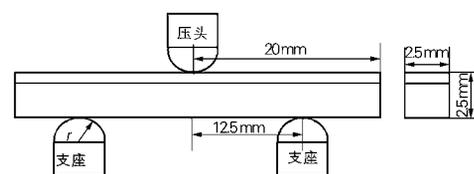


图 1 反向三点弯曲示意图

Fig. 1 Schematic of three-point reverse bending test

收稿日期: 2009-06-04

基金项目: 国家自然科学基金面上项目 (50471087)

作者简介: 李巧莲 (1983—), 女, 河南南阳人, 硕士研究生, 主要从事涂层界面结合性能方面研究工作。联系电话: 010-82544271, E-mail: liqiaolian@mech.ac.cn

2 试验结果

2.1 加载过程

试样装夹加载前跨中涂层及界面 SEM 形貌见图 2(a),涂层及界面完整连续。加载过程中的载荷-应变曲线(见图 3)显示,在加载初期,曲线线性上升,当载荷增至 250 N 左右时,曲线斜率减小,载荷增速放缓,预示着跨中塑性铰的形成,在这个过程中,试样的涂层及界面均未发生破坏;当载荷增至 345 N 时,载荷-应变曲线发生偏折,载荷突降,应变也大幅下降,表现为瞬间卸载;对应的 SEM 图像显示,试样界面发生大面积开裂,涂层拱起,此时停止加载。

试验结果表明,界面裂纹在加载过程中产生并扩展,涂层始终保持完整未出现断裂。另外,对比跨中界面分层破坏出现后的实时 SEM 形貌(见图 2(b))与原始 SEM 形貌(见图 2(a)),结合加载卸载过程中实时观察现象可知,初始界面裂纹出现在跨中附近,对应于压头与涂层接触的正下方的界面上,并向两侧扩展。

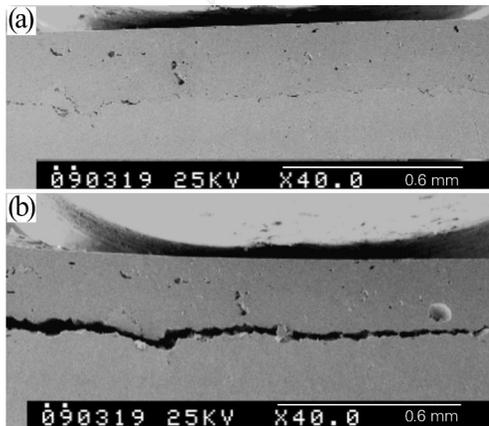


图 2 试样跨中 SEM 形貌

(a) 加载前; (b) 卸载前

Fig. 2 SEM images of specimen at mid-span

(a) before loading; (b) before unloading

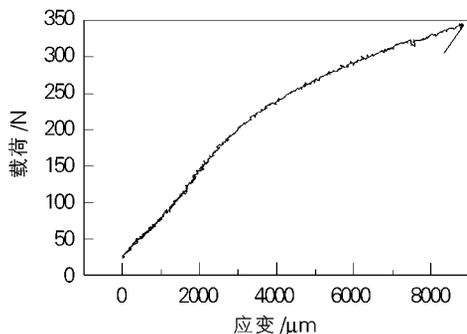


图 3 反向三点弯曲典型载荷-应变曲线

Fig. 3 Typical load-strain curve of three-point reverse bending test

2.2 卸载后涂层形貌

卸载后压头左侧的涂层屈曲形貌如图 4 所示,涂层与基体在界面处分离,基体一侧保持平直,未现残余变形,而涂层出现明显的拱起现象,这说明涂层发生了屈曲变形。

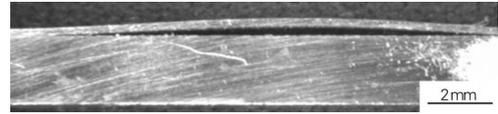


图 4 压头一侧界面开裂形貌

Fig. 4 Morphology of cracked interface on one side of the indenter

3 涂层屈曲机制分析

分层屈曲属于失稳破坏,是层状复合材料受压应力作用时较易发生的一种破坏模式。层状复合材料中的局部分层可以视为界面裂纹,裂尖区的高应力导致裂纹扩展,最终形成分层屈曲破坏;另外,在高压应力作用下,层状复合材料的分层屈曲也会在无初始分层的条件下瞬时出现^[10]。

本试验在加载过程中由于压头对涂层的应力集中作用和涂层与基体间的弹性模量在界面处失配,在界面上形成高应力区,导致涂层与基体在界面分离,形成了涂层屈曲变形的界面缺陷条件,当缺陷尺寸达到分层的临界尺寸后,涂层与基体间发生分层^[11]。涂层置于受压侧的三点弯曲加载,使分离涂层处于单向受压状态,在此压应力作用下涂层易发生失稳而屈曲;涂层屈曲对分层扩展具有推动作用^[12],导致界面裂纹迅速扩展,长界面裂纹伴随涂层屈曲出现。

在试验过程中,分层屈曲破坏形成迅速,导致检测设备无法分离初始分层形成阶段及分层扩展阶段,在试验现象上表现为瞬时破坏,而理论上合理认为这种破坏是由初始分层出现并在外载下扩展的结果。进一步的证实有待于更精确的检测设备的运用。

4 测试理论及应用

4.1 屈曲模型

对分层屈曲现象和模型的研究已取得了很大进展^[10-14],其中根据分层屈曲模型参数与屈曲临界应力、涂层内实际应力及能量释放率之间的关系,给出定量计算公式的思想得到了肯定^[13-14]。依据该思想建立的分层屈曲模型只关注涂层的弹性模量和泊松比等力学性能参数及屈曲形貌的几何参数,如屈曲最大高度和屈曲半长。结合该思想建立如图 5 所示的分层屈曲计算模型, d 为屈曲最大高度, b 为屈曲半长。

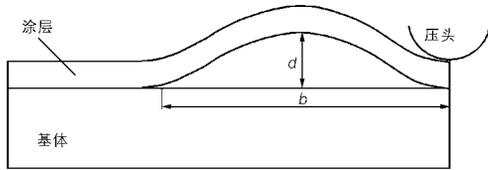


图 5 屈曲计算模型

Fig. 5 Calculation model of buckling

涂层临界屈曲应力 σ_c 和屈曲后的涂层受到的实际应力 σ 分别为^[12]:

$$\sigma_c = \frac{2}{12} \frac{E}{(1-\nu^2)} \left(\frac{h}{b} \right)^2 \quad (1)$$

$$\frac{d}{h} = \left[\frac{4}{3} \left(\frac{c}{b} \right) \right]^{\frac{1}{2}} \quad (2)$$

式中: E 、 ν 分别表示涂层的弹性模量和泊松比; h 、 b 分别表示屈曲涂层厚度和屈曲半长, d 是涂层屈曲变形的最大高度。该类型断裂问题界面断裂韧性可用涂层屈曲起始点处(界面裂纹尖端处)的临界能量释放率来表示^[15]:

$$G_c = \left[\frac{(1-\nu^2)h}{2E} \right] (\sigma_c - \sigma) (\sigma_c + 3\sigma) \quad (3)$$

4.2 应用举例

以本文所用涂层/基体材料体系为例,涂层弹性模量 $E=150$ GPa,泊松比 $\nu=0.2$,厚度 $h=250$ μm ;测得 $d=336$ μm , $b=14\ 500$ μm ;带入公式(1)~(3)得到: $\sigma_c=38.16$ MPa, $\sigma=89.86$ MPa, $G_c=12.73$ J/m²,该数据与文献[15]利用三点弯曲试验测得的热喷涂涂层界面断裂韧性值 $G_c=3.28\sim 3.91$ J/m²具有可比性。为了验证新方法的可靠性,利用传统弯曲法测量该种材料的界面断裂韧性是有必要的,在这里不予赘述。

5 结论

1) 采用涂层侧受压的三点弯曲法,得到与传统的涂层侧受拉的弯曲法不同的涂层屈曲破坏现象。

2) 同传统的弯曲法相比,该方法不需要预制涂层裂纹及界面裂纹。

3) 同表面压入和激光屈曲法相比,该方法一是不需要试验后,对屈曲形貌的横截面进行剖开处理,节省了时间;二是可以进行屈曲形貌形成过程的实时观察。

参考文献:

- [1] 蔡昊,嵇醒,沈碧霞.界面断裂韧性的实验研究[J].上海力学,1997,18(3):241-247.
- [2] 杜向鹏,刘洪伟,郭成,等.不锈钢-铝复层材料界面断裂性能分析[J].稀有金属材料与工程,2007,36(3):131-133.
- [3] Ines Hofinger, Karen Raab, Jorg Moller, et al Effect of substrate surface roughness on the adherence of nitrided thermal spray coatings[J]. Journal of Thermal Spray Technology, 2002, 11(3): 387-392.
- [4] 郭香华,蔡乾煌,汪长安,等.叠层结构陶瓷强化设计的力学分析[J].固体力学学报,2000,21(4):313-324.
- [5] Huang Zhenyu, Suo Z, Xu Guanghai, et al Initiation and arrest of an interfacial crack in a four-point bend test[J]. Engineering Fracture Mechanics, 2005, 72(17): 2584-2601.
- [6] Liman M, Godoy C, Modenesi P J, et al Coating fracture toughness determined by Vickers indentation: an important parameter in cavitation erosion resistance of WCCo thermally sprayed coating[J]. Surface and Coatings Technology, 2004, 177: 489-496.
- [7] Kim J J, Jeong J H, Lee K R, et al A new indentation cracking method for evaluating interfacial adhesion energy of hard films[J]. Thin Solid Films, 2003, 441(1/2): 172-179.
- [8] Warrender J M, Mulligan C P, Underwood J H. Analysis of the mechanical cracking in refractory coatings using variable pulse-duration laser pulse heating[J]. Wear, 2007, 263: 1540-1544.
- [9] 张国祥,张坤,罗耕星,等.测量镀铬层界面韧性的激光屈曲法[J].吉林大学学报:工学版,2008,38(1):57-60.
- [10] Kachanov L M. Delamination Buckling of Composite Materials [M]. Kluwer Academic Publishers, 1988.
- [11] Hutchinsona J W, Hebl M Y, Evans A G The influence of imperfections on the nucleation and propagation of buckling driven delaminations [J]. Journal of the Mechanics and Physics of Solids, 2000, 48(4): 709-734.
- [12] Henrik Myher Jensen, Izhak Sheinman Straight-sided, buckling-driven delamination of thin films at high stress levels[J]. International Journal of Fracture, 2001, 110(4): 371-385.
- [13] Moon M W, Jensen H M, Hutchinson J W, et al The characterization of telephone cord buckling of compressed thin films on substrates[J]. Journal of the Mechanics and Physics of Solids, 2002, 50(11): 2355-2377.
- [14] Je H, Was G S, Thouless M D. Measurement of the niobium/sapphire interface toughness via delamination [J]. International Journal of Fracture, 2003, 119(1/2): 441-448.
- [15] Ren F Z, Liu P, Jia S G, et al Adhesion strength of Ni film on Ti substrate characterized by three-point bend test, peel test and theoretic calculation[J]. Materials Science and Engineering A, 2006, 419(1/2): 233-237.

新书介绍:《化学热处理技术》

本书主要介绍了化学热处理概论,化学热处理基本原理,气体渗氮、离子渗氮及其他渗氮新工艺,氮碳共渗及其新工艺,渗碳及其他渗碳新工艺,氮碳共渗及其新工艺,提高耐磨性及增加减摩性的化学热处理,提高耐蚀性的化学热处理等内容。本书注重内容的通俗性、科学性、先进性与实用性。对从事金属热处理的技术人员具有较大的参考价值。

化学工业出版社 2006年5月出版,32开本,共498页,邮购单价:40元。

通讯地址:100083北京市907信箱 全国热处理学会;联系人:荆秀华;电话:010-82755375,传真:010-62920613,电子信箱:jingxiuhua@chts.org.cn 订书网址:www.chts.org.cn