

# 承载 $\text{Fe}_3\text{Al}/\text{Al}_2\text{O}_3$ 复合材料失效 过程声像特征\*

孙康宁<sup>①②</sup> 尹衍升<sup>②</sup> 安阁英<sup>①</sup> 张景德<sup>②</sup>

(<sup>①</sup>哈尔滨工业大学材料科学与工程学院, 哈尔滨 150001; <sup>②</sup>山东工业大学材料科学系, 济南 250061)

**摘要** 利用自行设计的多功能加载装置和扫描声学显微镜连续观察并测量了  $\text{Fe}_3\text{Al}/\text{Al}_2\text{O}_3$  复合材料在承载条件下的失效特征并对其断裂机制进行了讨论, 揭示了复合材料在大尺度范围内裂纹扩展过程和失效特征, 发现材料的裂纹萌生于微缺陷和应力集中区域. 裂纹扩张有明显的孕育过程和较大的孕育区. 当材料承受的应变能或局部应力超过临界值时, 裂纹将发生快速扩张, 并最终导致失效. 承载下该材料测得显微结构, 当卸载后, 显微结构不能恢复.

**关键词** 复合材料 声学 断裂 失效

陶瓷材料脆性大, 品质一致性差, 已成为制约陶瓷材料工程应用的重要因素. 因此了解陶瓷基复合材料的失效机制, 快速准确的评价其品质和性能显得十分重要. 近几十年来对陶瓷材料的声学显微特征, 以及材料性能与声速、声衰减等声学特征的关系进行了一些探索性的研究<sup>[1~4]</sup>. 这是由于在诸多相关测试技术中, 超声显微技术具有逐层透视材料内部结构的功能, 特别适用于研究薄膜试样制备困难的复合材料在负载条件下内部结构的变化. 在陶瓷试样中声速与试样成分、制备工艺、显微结构、内部缺陷以及所处的周围环境, 如温度、压力等都有很好的对应关系. 此外陶瓷材料不同的组织结构, 如杂质的组成、气孔和缺陷的组态都会使声波在传播过程中产生散射, 相应于缺陷部分的声波一部分能量被消耗, 随传播距离的减少, 引起振幅的衰减<sup>[5]</sup>. 这些物理过程都使得这一技术具有很好的结构敏感性, 引起材料物理工作者的重视.

考虑到陶瓷材料的失效是在承受载荷状态下出现的, 因而, 本文将利用声学显微镜的可透视性对陶瓷复合材料在承载下的失效机制进行大尺度的动态跟踪研究, 在特定加载装置下连续观察承载条件下陶瓷基复合材料的失效过程和特征. 进而探索材料失效时的声学机制.

## 1 实验方法

扫描声学显微镜(SAM)的特点是可以大范围和大尺度的对材料进行逐层观察, 因此可用

2000-02-14 收稿, 2000-03-21 收修改稿

\* 山东省自然科学基金项目 (Q99F01, Z99F02) 和国家自然科学基金资助项目 (批准号: 59742004)

自制多功能连续加载装置(图 1)与之配合,动态观测复合材料在承载条件下的失效特征,研究其断裂机制,从而揭示裂纹的扩展过程和失效特征. 自制多功能连续加载装置的工作原理如图 1 所示:旋转螺杆 1 使其上移,在螺杆驱动力  $P$  的作用下,横梁 3 将发生弯曲,若转角为  $\Phi$ , 横梁跨度中间挠度  $f$  与转角  $\Phi$  及螺钉螺距  $h$  有如下关系:

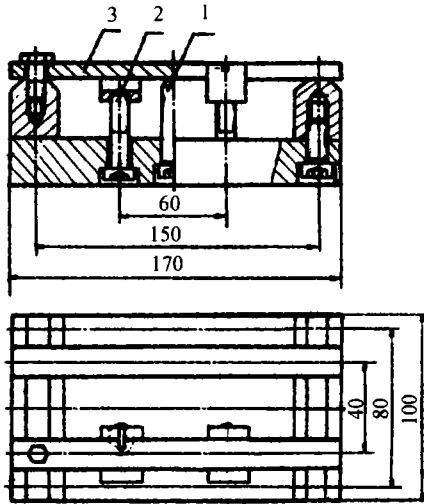


图 1 多功能加载装置示意图

$$f = \frac{6.28 h}{\phi}, \quad (1)$$

式中挠度  $f$  与载荷  $P$  有以下关系<sup>[6]</sup>:

$$f = -\frac{PL^3}{48EJ}. \quad (2)$$

表面的弯曲应力  $\sigma$  与挠度  $f$  及转角  $\Phi$  的关系为

$$\sigma = \frac{3PL}{2bH^2} = \frac{72EJf}{bH^2L^2} = \frac{452hEJ}{b\phi H^2L^2}, \quad (3)$$

式中  $E$  为弹性模量;  $L$  为梁的跨度;  $J$  为梁的惯性矩;  $H$  为梁截面高度;  $b$  为梁截面宽度.

利用(3)式可方便的通过测量参数计算出转角  $\Phi$  与表面的弯曲应力  $\sigma$  的定量关系,但这仅是梁表面的弯曲应力  $\sigma$ ,为测得复合材料的受力,本试验将复合材料用内圆切割机切成 0.2 mm 厚,4 mm 宽,5 mm 长的超薄试样,用 502 胶水粘贴在横梁表面上,使之与梁成为一体,此时测得梁的应力即可近似认为是复合材料的应力. 同理,利用此方法可以进行压应力和不同弯曲形式的应力测量.

复合材料在加载时,随着载荷的增加,会伴随着裂纹的萌生、扩展,最终断裂失效. 为观察裂纹萌生、扩展、失效的全过程,对复合材料试样进行了承载下连续的声像观测.

## 2 实验结果

选用含 20% Fe-Al 合金的复合材料试样为测试对象,试验前试样无人为损伤缺陷(相对热冲击试样). 加载方式如图 1 所示,试样长边与拉应力方向一致. 每次螺杆旋紧增量为  $11^\circ$ ,

不同旋进角度的对应载荷见表 1.

表 1 无损复合材料试样拉伸载荷值

图 2 照片号	转角/(°)	挠度/0.01mm	载荷/N	弯矩/N·mm	拉应力/MPa
(a)	0	0.00	0.0	0	0.00
(b)	11	4.57	46.7	1 750	14.53
(c)	0	0.00	0.0	0	0.00
(d)	22	9.17	93.9	3 520	29.33
(e)	45	18.75	192.1	7 200	60.00
(f)	56	23.33	238.7	8 958	74.60
(g)	78	32.50	332.5	12 480	104.10
(h)	90	37.50	384.2	14 400	120.30
(i)	112	46.67	477.9	17 921	149.30
(j)	123	51.25	524.8	19 680	164.20
(k)	135	56.25	576.0	21 600	180.00
(l)	157	65.42	669.9	25 121	209.30
(m)	225	93.74	959.9	35 996	299.90
(n)	0	0.00	0.0	0	0.00

由表 1 可知,复合材料在拉应力作用下,应力值从 0 一直增加到 299.90 MPa,与之对应的全过程声学显微结构见图 2,图 2 中每幅照片的左边为试样图像,紧靠试样图像右边的声学图像为试样粘贴横梁的附加图像. 在每幅试样照片中均标出纵横两坐标轴,表示被测试声强曲线的对应截面,照片右边示出纵截面声强曲线,试样下方为横截面声强曲线. 与图 2(i-2)对应的金相照片见图 3(b).

### 3 结果分析

#### 3.1 低强度负载下裂纹的局域萌生与扩展

分析图 2 知,试样在由弯曲梁挠度变形转化为拉应力的作用下(在该受力模型中,试样受的拉应力可近似等同于弯曲应力),虽然所承受最大拉应力小于 300MPa,远未超过材料的抗弯曲强度,显微结构却发生了非常明显的变化. 而且材料局部已发生微裂,并最终扩展为宏观裂纹,这在图 2(i-2)的声学照片及对应金相照片(图 3(b))中可以直观观察到. 可见在远低于平均材料失效载荷下,材料仍然会导致裂纹的萌生与扩张.

#### 3.2 裂纹的孕育、萌生与扩张过程

由于声学显微镜对缺陷和微裂纹特别敏感<sup>1)</sup>,图 2 声学照片显示了复合材料裂纹从萌生、扩张直至开裂的完整的全过程,从图 2 (a)可以看到,空载时,材料未发现微裂纹(在金相显微镜下也未观察到微裂纹),声强曲线变化较平缓,说明材料不存在明显缺陷或较严重的应力集中区域,但是照片显示右下方有一倾斜箭头状衬度不均匀区,该区有可能是成分不均匀,也可能是材质局部疏松,从后续金相照片图 3(b))可以观察到,该区域材质疏松,因此相对而言,它

1) 孙康宁.  $\text{Fe}_3\text{Al}/\text{Al}_2\text{O}_3$  复合材料的制备与组织性能研究. 哈尔滨工业大学博士学位论文,1999

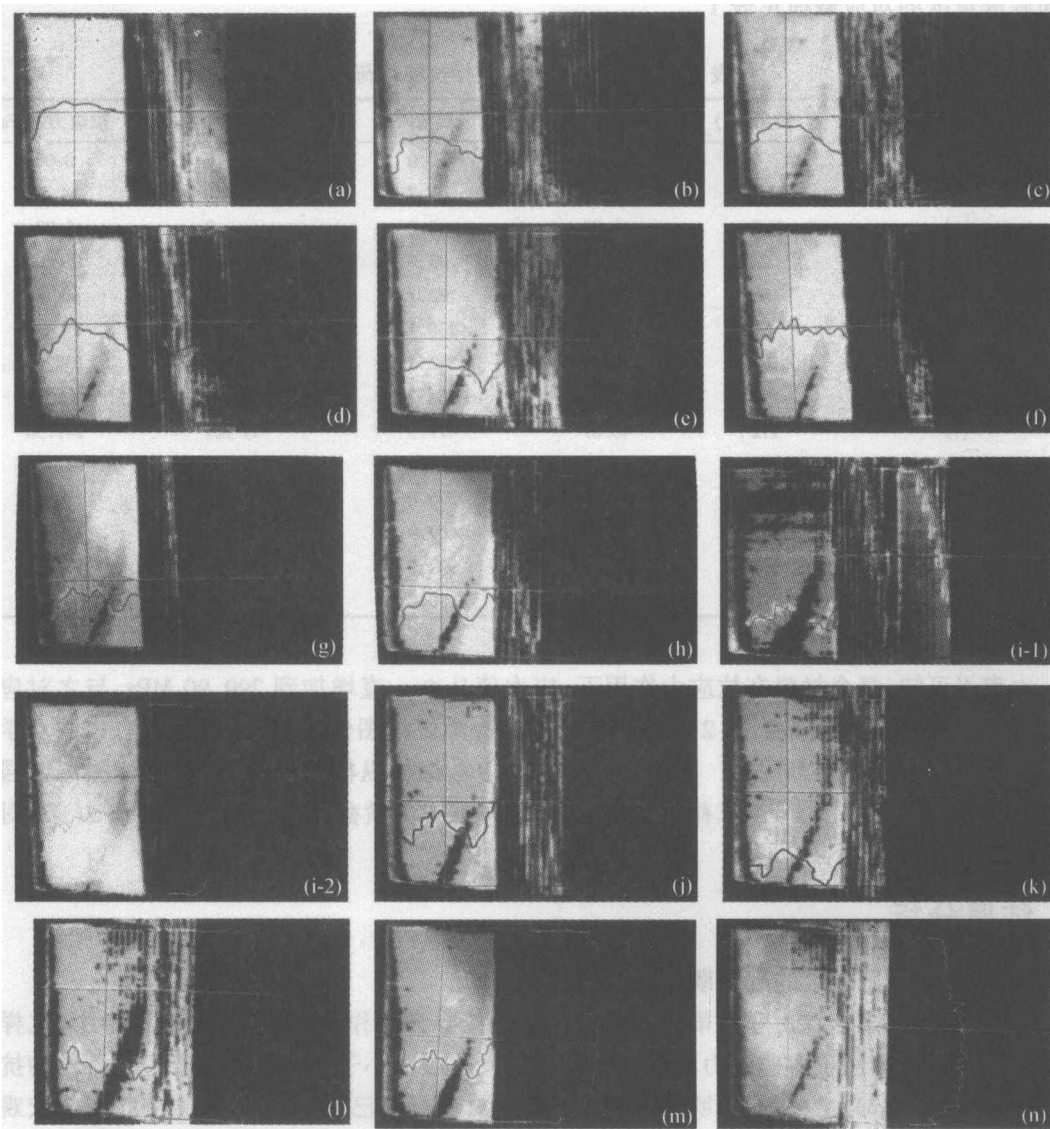


图 2 原始无损伤复合材料拉伸试样声学显微结构

是一种缺陷。从图 2(b)~(e), 材料应力值从零增加到 60MPa, 可以发现, 声学显微结构的变化主要发生在该区域, 首先在缺陷区出现深色斑点, 然后逐渐扩展连接并扩大, 从声强曲线可以看到, 随着载荷增加, 曲线波动加剧, 横截面曲线整体下移, 对应缺陷处的声强曲线(图 2(e))发生跃变, 说明在该区已发生应力集中, 局部应力将超过 60MPa(见表 1)的平均应力, 这一阶段属于裂纹的孕育阶段, 可以看出应力集中影响区尺度远大于裂纹宽度。当载荷继续从 60MPa 增加到 149 MPa 时, 声学显微结构从图 2(e)变化到(i), 从图 2(f)~(h)可以看出孕育区变化幅度较小, 具有分叉扩展的趋势, 但声强曲线波动进一步加剧, 说明局部应力在继续增加。在该阶段, 由于应力分布不均匀, 材料内部发生相互作用, 不同晶粒之间通过界面传递载荷, 预期

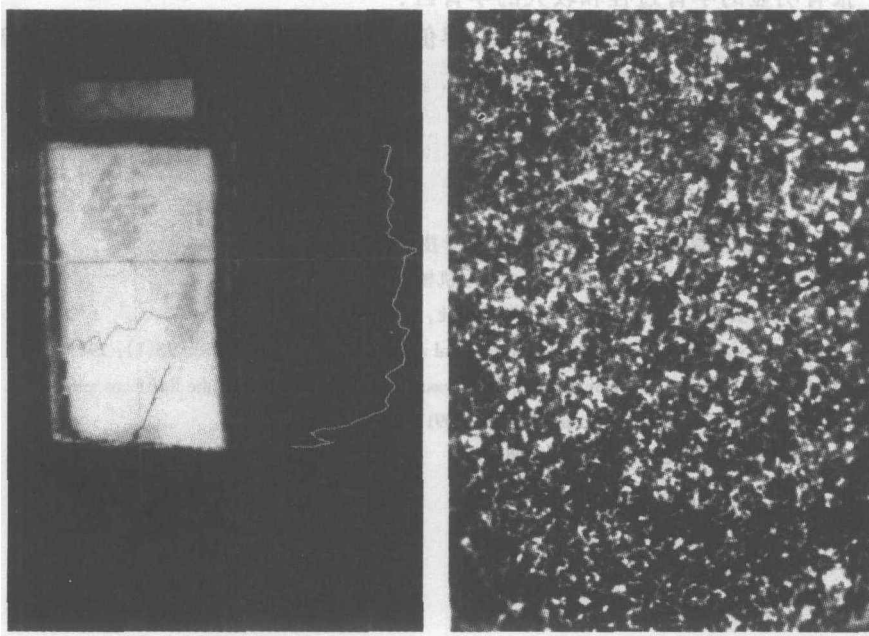


图 3 复合材料试样微观裂纹

(a)声像; (b)金相

塑性较好的  $\text{Fe}_3\text{Al}$  金属间化合物将松弛应力,各部分应力会相互适应调整,在图 2(h)中可以看到横截面声强曲线在裂纹非孕育区的缓解. 但是当载荷增加到 149 MPa 时(图 2(i-1)),孕育区突然急剧扩大,声强曲线波动加剧,预计材料在吸收了大量弹性应变能以后,局部应力超过裂纹扩张强度极限,裂纹将开始扩展,图 2(i-2)用强对比度显示了扩展微裂纹的存在. 在图 2(i-2)裂纹孕育区可清楚看到衬度更大的细裂纹线. 图 2(k)是载荷增至 180MPa 时测得声学照片,试样上部也开始出现裂纹孕育区,从受力横截面声强曲线看,下移趋势开始减缓,表明拉应力接近最大. 图 2(l)为载荷达到 240MPa 时的声学图像,此时声强曲线突然上移,应力集中现象大幅度缓解,经分析发现这是试样与加载装置局部脱胶(试样由 502 胶粘在横梁上),造成部分卸荷所致. 出现该情况后,后续施加载荷已不能全部传递到试样上去,所以从图 2(l)~(m)可以看出声强曲线出现上下波动,应力集中也没有脱胶以前严重.

分析上述结果可知,裂纹的萌生于缺陷,裂纹有较大的孕育区与孕育过程,当载荷超过临界载荷值时,孕育区突然急剧扩大,裂纹开始扩张,并导致材料失效.

### 3.3 复合材料卸载后的声学显微结构

图 2(n)为弹性范围内卸载后的声学照片,相对加载状态应力集中得到一定恢复,但与图 2(a)和(c)相比可以看出,显微结构既不能恢复图 2(c),更不能恢复图 2(a)状态,并最终留下永久性裂纹,这在对应光学照片图 3(b)中清晰可见. 这说明显微结构不存在完全弹性回复,测量结果反映了该材料明显的加载历史.

## 4 结论

材料的裂纹萌生于原始存在微缺陷和应力集中区域.

裂纹扩张有明显的孕育过程和较大的孕育区。

当材料承受的应变能或局部应力超过临界值时,裂纹将快速扩展,并最终导致破坏。

在弹性范围内卸载后,显微结构不能恢复。

### 参 考 文 献

- 1 胡建恺,张谦琳. 超声检测原理和方法. 合肥:中国科学技术大学出版社,1993. 246
- 2 袁振明,马羽宽,何泽云. 声发射技术及其应用. 北京:机械工业出版社,1985. 86
- 3 曾汉民. 高技术新材料要览. 北京:中国科学技术出版社,1993. 38
- 4 Benjamin J S. Dispersion strengthened superalloys by mechanical alloying. Metall Trans, 1970, 25(1): 2943
- 5 Achenbach J D, Ahn V S, Harris J G. Wave analysis of the acoustic material signature for the line focus microscope. IEEE Transactions on Ultrasonics, Ferroelectricity and Frequency Control, 1991, 38(4): 380
- 6 刘鸿文. 材料力学. 北京:人民教育出版社,1980. 182