

# 激光热-力耦合作用引起颗粒增强金属基复合材料的损伤与断裂\*

龙士国<sup>1</sup> 周益春<sup>1,2</sup> 段祝平<sup>2</sup>

(<sup>1</sup>湘潭大学物理系,湘潭大学基础力学与材料工程研究所,湖南湘潭,411105)

(<sup>2</sup>中国科学院力学研究所,北京,100080)

**摘要** 用激光热冲击作为实验手段,研究了颗粒增强金属基复合材料在热-力耦合作用下的损伤与断裂.在宏观上发现了这种复合材料的破坏效应是热-力耦合的非线性效应.在微观上观察到了微观破坏的三种模式及微观结构对其热冲击性能的影响,同时定量测定了其在不同热-力耦合作用下的损伤程度.

**关键词** 金属基复合材料,热冲击,损伤,破坏,非线性效应

## 1 引言

陶瓷颗粒增强金属基复合材料近十年引起人们的广泛关注<sup>[1]</sup>.人们对它的宏观力学性能<sup>[2]</sup>,增强机理<sup>[3]</sup>,破坏机制<sup>[4]</sup>的研究取得较大进展,但对这种材料的热冲击性能的研究少见报道<sup>[5]</sup>.由于这种材料在热载荷作用下将产生热失配,而且材料在受到热冲击时,往往同时受到机械载荷的作用.因此本文研究这种材料在热-力耦合作用下的损伤与断裂.

## 2 实验

实验所用的材料是两种热压成型 SiC 颗粒增强 Al 合金基体复合材料,其中 SiC 的体积百分比都是 15%,增强颗粒的平均大小为 10 $\mu$ m.通过扫描电镜对其微观形貌进行观察分析,发现其中一种颗粒分布较均匀(代码为 uk),另一种颗粒分布不均匀(代码为 cn).热冲击实验使用的激光热源是由“力光”可调试千兆瓦级高功率钕玻璃激光装置输出的长脉冲激光束<sup>[6]</sup>,其脉宽为 250 $\mu$ s,激光强度的空间分布是均匀的.

把材料加工成图 1 所示的尺寸,制成单边缺口是为了使裂纹沿着固定方向扩展,便于观察.一面是激光作用面,保持较粗糙状态,以便于激光能量的吸收,该面称为 A 面;另一面不仅预磨而且抛光,这是为了在扫描电镜(SEM)下观察由热-力耦合作用所产生的微观形貌,该面称为 B 面.

为研究热-力耦合作用下的陶瓷颗粒增强金属基复合材料的损伤与断裂,当试件受到激光热冲击的同时,在试件两端还作用有机载机械载荷,由文[7]得出缺口端部 A 点的应力集中系数  $K_t = 3.2$ ,因此缺口端部实际应力为  $\sigma_{max} = \dots$ .

## 3 实验结果

### 3.1 宏观实验结果

\* 本项工作得到国家重大基金(No. 19891180-4),国家自然科学基金(No. 19772043),中国科学院重大项目(K-951-201),国家 863 高技术激光技术领域和湖南省教委的资助.  
1998-12-01 收到第 1 稿,1999-10-26 收到修改稿.

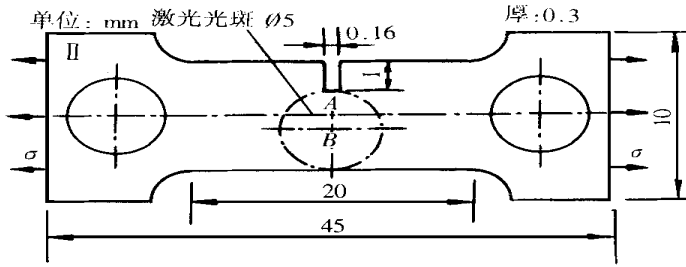


图 1 试样尺寸及热-力耦合方式

在研究激光热冲击与机械载荷耦合作用对颗粒增强金属基复合材料的宏观破坏效应时,将激光功率密度  $E_j$  和机械载荷  $\sigma_{max}$  作为横、纵坐标,在  $E_j - \sigma_{max}$  平面上,根据复合材料损伤、破坏的程度,将它分为未损伤区、损伤区和断裂区.图 2(a)和(b)分别是 cn 材料和 uk 材料的结果.

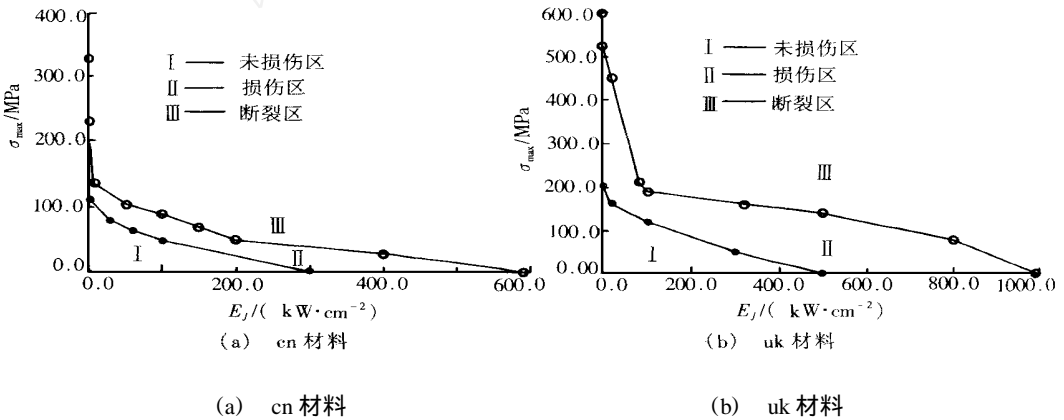


图 2 复合材料在激光功率密度  $E_j$  和机械载荷  $\sigma_{max}$  平面上的宏观破坏效应

从图 2 可以看出,无论是 cn 材料还是 uk 材料,激光功率密度  $E_j$  与外载荷  $\sigma_{max}$  对材料的作用结果都不是简单的线性叠加,它们呈现一种非线性效应,特别是在机械外载荷接近复合材料的屈服强度时,只需要一个微小的激光功率密度作用就能使材料破坏;与此类似,当  $E_j$  超过损伤临界值后,微小的  $\sigma_{max}$  也能使材料破坏,由此可见,不同的  $(E_j, \sigma_{max})$  值,对材料的耦合程度和对材料引起损伤和断裂的主要因素和诱导因素不同.从图中还可以看出,uk 材料明显比 cn 材料耐耦合作用,即图 2(b)的损伤区域面积明显比图 2(a)的损伤区域面积大.这与两种材料的微观结构有密切关系,由于 cn 材料的增强颗粒分布不均匀,使 cn 材料比 uk 材料的一般力学性能低,这必将降低它的热冲击性能.

### 3.2 微观实验结果

在 SEM 下,通过对大量不同的激光功率密度  $E_j$  和载荷  $\sigma_{max}$  耦合作用试件的观察,发现颗粒增强金属基复合材料的损伤有三种基本模式:(a) 基体产生孔洞、微裂纹,(b) 增强颗粒出现破碎,(c) 基体与颗粒的界面脱胶.根据材料破坏的过程,可以分为三个典型阶段:

(1) 微裂纹和孔洞萌生阶段, (2) 微裂纹和微孔洞汇集形成主裂纹阶段, (3) 主裂纹迅速扩展至材料完全断裂阶段。

在未形成主裂纹前的损伤萌生阶段, 缺口端部出现了微孔洞和微裂纹, 这些孔洞和微裂纹产生在界面上和基体中, 而颗粒没有破碎现象, 由此可见, 颗粒增强金属基复合材料在热-力耦合作用下的损伤萌生一般发生在有应力集中的基体和界面上。

裂纹的扩展主要受到主裂纹前端微结构的影响, 从扩展的路径分析, 一般有三种情况: (a) 裂纹直接穿过已破碎的粒子, (b) 穿过基体与颗粒的界面, (c) 直接穿过基体。图 3(a),

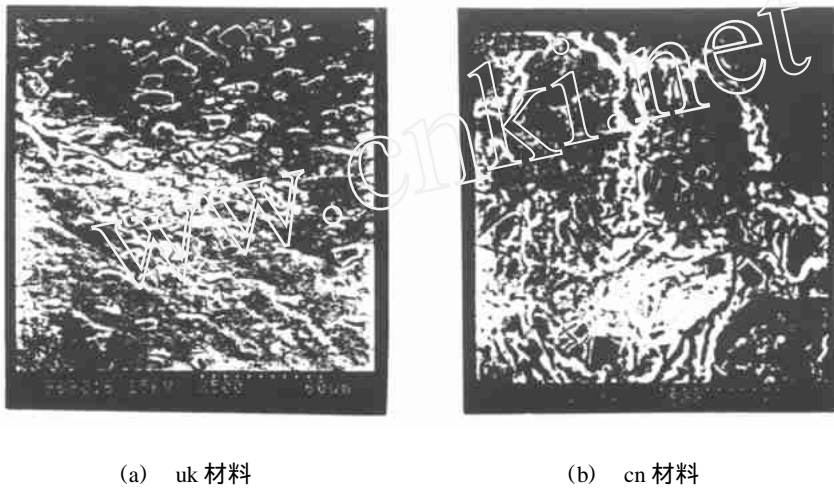


图 3 裂纹尖端的形貌

(b) 分别是 uk 材料和 cn 材料主裂纹尖端的形貌。可以看出, 这两种材料的裂尖损伤有极大差异。对 uk 材料, 在裂尖前沿完全是粒子破碎, 如果主裂纹继续扩展, 将穿过这些已破碎的粒子。而对于 cn 材料, 在裂尖前沿只有极个别粒子出现破碎现象, 裂纹扩展主要是基体内出现裂纹和界面脱胶。

为更深入的分析, 根据损伤的基本模式, 定义四种损伤参数:

$$1 = \frac{S_1 + S_2}{S}, \quad 2 = \frac{n}{N}, \quad 3 = \frac{l}{L}$$

其中  $\omega$ 、 $1$ 、 $2$ 、 $3$  分别是综合损伤参数, 基体损伤参数, 颗粒损伤参数, 界面损伤参数;  $S$ 、 $S_1$ 、 $S_2$ 、 $n$ 、 $N$ 、 $l$ 、 $L$  分别是总面积, 基体的孔洞面积, 颗粒的裂纹面积, 破碎的颗粒数, 总颗粒数, 界面脱胶总长度, 界面总长度。

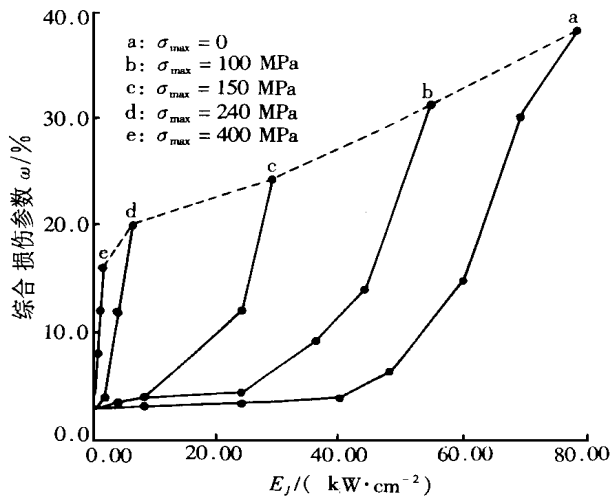
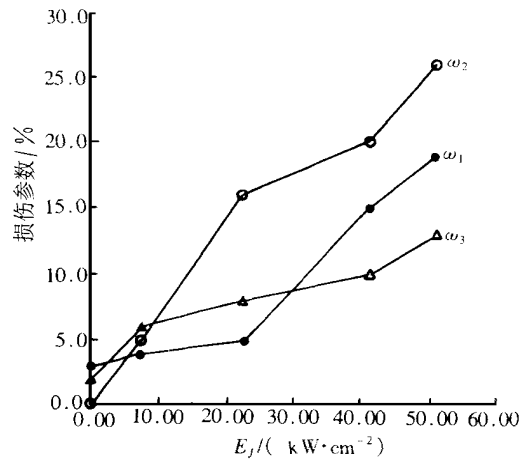
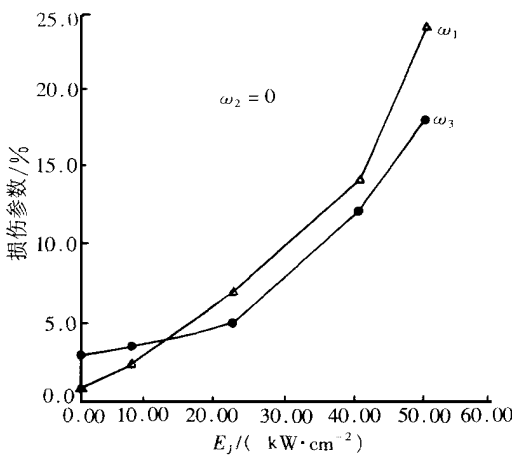


图 4 综合损伤参数与耦合参数的关系

图 4 是综合损伤参数与热-力耦合参数 ( $E_l, \sigma_{max}$ ) 的曲线图, 图中的最大损伤值即虚线对应于试件的完全断裂. 从图 4 可以看出, 此种材料大约有 3 % 的原始损伤, 且断裂时的损伤值是不同的, 即与  $E_l$  和  $\sigma_{max}$  有关,  $E_l$  越小,  $\sigma_{max}$  越大, 则断裂时的损伤值越大, 这表明材料破坏时的能量阈值 (机械外载荷输出的机械能与激光能量之和) 不是定值, 在较大机械外载荷作用时, 能量阈值较低.

图 5(a) 和 (b) 分别是在定载荷  $\sigma_{max} = 100 \text{ MPa}$  时, 缺口端部 A 点与试件中部 B 点的损伤参数  $\omega_1, \omega_2, \omega_3$  随激光功率密度  $E_l$  变化的曲线. 对 A 点,  $\omega_1, \omega_3$  随着  $E_l$  的增大而增大, 而  $\omega_2$  几乎等于零, 这说明起裂是以基体和界面损伤为主. 而在 B 点,  $\omega_2$  随着  $E_l$  的增大而增大, 这说明裂纹扩展是以颗粒破碎为诱导. 颗粒的作用在裂纹的扩展阶段起重要作用.



(a) 裂纹萌生时的损伤参数

(b) 裂纹扩展时的损伤参数

图 5 损伤参数随激光功率密度变化的曲线

### 4 结论

本文研究了颗粒增强金属基复合材料在激光热-力耦合作用下的损坏与破坏. 观察到了其微观损伤和破坏的基本现象, 分析了其机制, 定量的统计了微观损伤程度. 在宏观上测出了热-力耦合的损伤和破坏的非线性效应.

### 参 考 文 献

- 1 El-Nasr A-B A et al. High temperature rupture of an SiC particulate reinforced Al composite under multiaxial stress states. Mater Sci Engng, 1996, A214:33~41
- 2 Nair S V et al. SiC-reinforced aluminum metal matrix. Int Metals Rev, 1985, 30:275~288
- 3 Arsenault R J et al. Strengthening of composites due to microstructural changes in the matrix. Acta Metall Mater, 1991, 39:47~57
- 4 Brechet Y et al. Damage initiation in metal matrix composites. Metall Mater, 1995, 39:1781~1786
- 5 Zhou Y C, Duan Z P, Yang Q P. Failure of SiC particulate reinforced metal matrix composite induced by laser thermal shock. Metall Mater Trans, 1998, A29:685~692

- 6 周益春,王春奎,段祝平. 吉瓦级“力光”可调式钕玻璃激光器. 强激光与粒子束,1995,7:350~354  
7 航空工业部科学技术委员会. 应力集中系数手册. 北京:高等教育出版社,1990,49~50

## THE DAMAGE AND FAILURE OF PARTICLE REINFORCED METAL MATRIX COMPOSITE INDUCED BY THE COUPLED LOADS OF LASER BEAM—THERMAL SHOCK AND MECHANICAL LOADING

Long Shiguo<sup>1</sup>      Zhou Yichun<sup>1,2</sup>      Duan Zhuping<sup>2</sup>

(<sup>1</sup> Department of Physics, Institute of Fundamental Mechanics and Material Engineering, Xiangtan University, Xiangtan, Hunan, 411105)

(<sup>2</sup> Institute of Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Beijing, 100080)

**Abstract** This study investigates the damage and failure of particle reinforced metal matrix composite with two kinds of particle distribution. The damage and failure were induced by the coupled loads of laser beam thermal shock and mechanical loading. It is found that the effect of the thermal shock and mechanical loading on the damage and failure is nonlinear. Three different damage and failure modes are observed. The parameters of damage are detected quantitatively which give a good explanation to the microscopical feature.

**Key words** metal matrix composite, thermal shock, damage, failure, nonlinear effect