

颗粒分布对金属基复合材料 激光热冲击破坏的影响*

龙士国¹⁾ 周益春¹⁾ 段祝平²⁾

【摘要】 从宏观和微观两方面研究了 SiC 颗粒分布状况对陶瓷颗粒增强金属基复合材料激光热冲击破坏的影响,发现微裂纹形成是由基体内的孔洞和颗粒与基体脱胶所引起,而陶瓷颗粒分布不均匀对裂纹的扩展机理有重要影响,它大大降低了复合材料的宏观力学性能

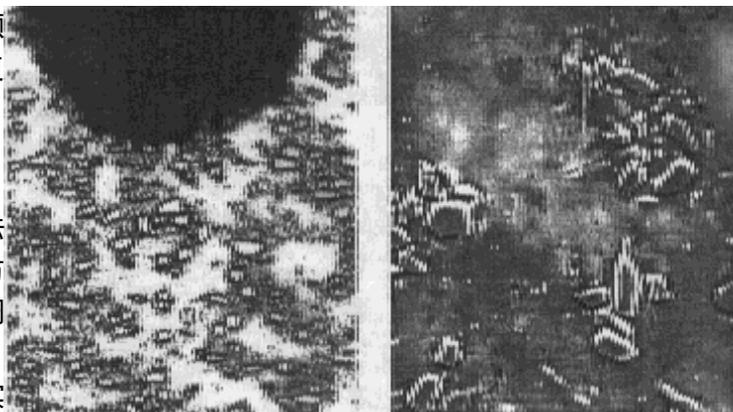
主题词 金属基复合材料;颗粒分布;激光热冲击

分类号 O 341

陶瓷颗粒增强金属基复合材料在热压成型过程中不可避免地会出现颗粒的非均匀性,在热压方向聚集有百分比极高的陶瓷颗粒,最高可达 50% ~ 60%^[1],相反在基体的某些区域又很少有增强相,这就出现了增强相-陶瓷颗粒的团聚现象(cluster). Park 等人^[1]和 Prangnell 等人^[2]分别研究这种团聚现象对金属基复合材料的疲劳和压缩性能的影响.然而,由于 Al 与 SiC 的物理、力学性能相差很大(其热传导系数和热膨胀系数相差 4 倍多),在热环境中将产生严重的热失配;广泛存在的瞬时加热和突然冷却等热冲击现象对复合材料的使用具有极大的威胁^[3,4].因此,本文研究 SiC 颗粒分布对 Al 基 SiC 颗粒增强复合材料激光热冲击破坏的影响

1 实验方法

传统热冲击实现的加热方法有一定的局限性,而激光加热方法可以根据需要对激光束进行调节,如能量、功率、热冲击面积等,还可以对变形和断裂过程进行实时观察,热冲击所使用的激光束的波长和脉宽分别为 1.06 μm 和 250 μs,其空间分布均匀



(a) uk 材料

(b) cn 材料

图 1 材料的微观形貌

复合材料是热压成形的颗粒增强 6061Al 合金,其一(代码为 uk)是颗粒均匀分布于基体之中,如图 1(a)所示;其二(代码为 cn)是颗粒非均匀分布于基体之中,如图 1(b)所示;SiC 颗粒的体积百分比都是 15%.

将试样加工成如图 2 所示的几何尺寸,A 面只预磨而不抛光,B 面不仅预磨而且抛光,A 面是激光作用面,B 面将在扫描电镜下观察由热-力耦合作用所产生的微观形貌;激光热-力耦

* 国家自然科学基金资助项目(19772043)和湖南省教委资助项目

作者单位: 1) 湘潭大学基础力学与材料工程研究所,湘潭,411105; 2) 中国科学院力学研究所,北京,100080

收稿日期: 1998-04-07

合方式也如图2所示

2 实验结果

2.1 宏观性能

分别测量了两种复合材料的抗拉强度和延伸率,其结果见表1.从表1可以看出, cn 材料的抗拉强度和延伸率都明显的低于 uk 材料的相应值.可见颗粒的非均匀性大大地影响了复合材料的宏观力学性能.

2.2 微裂纹的形成

图3是未形成宏观裂纹前所产生的微裂纹状况,从图3(a)和图3(b)可以看出:缺口根部出现一些微孔洞和微裂纹,而这些孔洞和微裂纹发生在颗粒与基体的界面上,基体内也出现了孔洞,但粒子没有破碎现象;同时在远离缺口的激光光斑边缘出现了径向微裂纹.两种复合材料都是由于在基体内出现了许多孔洞,这些孔洞开始连接形成微裂纹,同时陶瓷颗粒与基体发生脱胶而产生损伤.而在机械载荷作用下微裂纹的形成却与之不同,经观察发现,颗粒沿着与外载 σ 垂直的方向出现微裂纹和破碎,并且这些破碎的粒子集中在缺口的根部或缺口的延长线上.随着外载荷 σ 的增加,以破碎颗粒为核心,微裂纹逐渐成长并连接成宏观裂纹.

2.3 裂纹的扩展

裂纹的扩展主要受到微裂纹前端微结构的影响,从裂纹扩展的路径分析,一般有三种情况:裂纹直接穿过已断裂的粒子、穿过基体和粒子的界面、直接穿过基体.图4(a)和(b)分别是 uk 材料和 cn 材料宏观裂纹尖端的形貌.

我们可以发现两种不同材料裂尖处破坏形成的极大差别:对

于 uk 材料完全是粒子的破碎,即使在裂尖周围区域,也主要是由颗粒破碎引起裂纹进一步扩展,基体内几乎没有孔洞,也几乎没有粒子与基体脱胶的现象;可对于 cn 材料,虽然裂纹尖端也有粒子破碎现象,但主要是由基体内的孔洞和粒子同基体脱胶而引起裂纹的进一步扩展,并且还发现,裂纹是沿粒子集中的区域扩展,即使其它区域的裂纹也改变传播方向而向粒子团聚区(cluster)靠拢,在团聚区出现损伤集中现象.

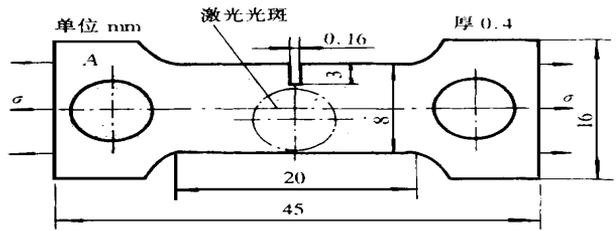
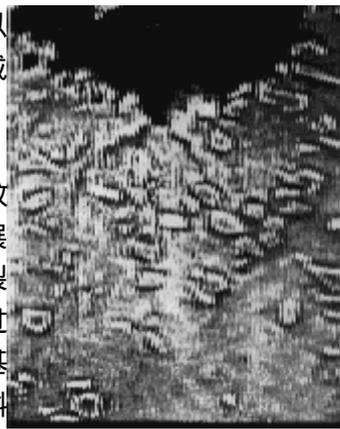


图2 试样的几何尺寸及热-力耦合方式

表1 两种复合材料的宏观力学性能

材料	抗拉强度/ M Pa	延伸率/%
uk	619	6.0
cn	327	0.6



(a) uk 材料的微裂纹

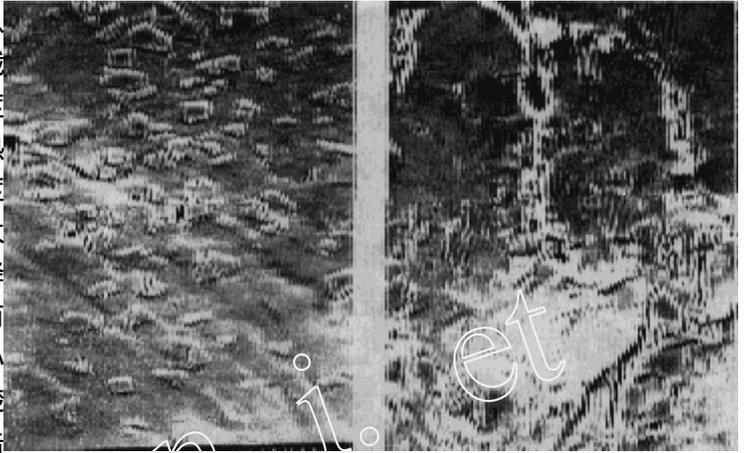


(b) cn 材料的微裂纹

图3 微裂纹的形成

2.4 热-力耦合的非线性效应

为了研究机械载荷和热冲击对金属基陶瓷复合材料的破坏效应, 通过实验与 SEM 观察, 得出 cn 复合材料在机械载荷 σ_{\max} 和激光能量密度 E 平面上的热-力耦合的三个区域: 未损伤区, 损伤区和断裂区 (如图 5)。从图 5 可明显看出, 在只有机械载荷作用时, 材料的拉伸断裂强度为 327 MPa, 而当同时有激光热冲击载荷时材料的拉伸断裂强度迅速下降; 而当激光能量密度大到某一值时, 拉伸断裂强度下降得比较缓慢。同时也发现当只有激光热冲击而机械外载荷较小时, 材料很难破坏, 从而可以清楚地看到机械外载荷与激光热冲击载荷对材料的作用不是二者简单的线性叠加, 而是互相加强, 即热-力耦合的非线性效应。



(a) uk 材料宏观裂纹尖端 (b) cn 材料宏观裂纹尖端

图 4 材料宏观裂纹尖端的情形

3 讨论

3.1 裂纹的形成机制

机械载荷造成微裂纹形成主要是由缺口根部的增强相-陶瓷颗粒的破碎所引起, 而激光热冲击所引起 uk 材料和 cn 材料形成微裂纹的机制都是由缺口根部和激光光斑边缘基体内出现孔洞和颗粒与基体界面脱胶所引起。为什么会有这种不同的裂纹形成机制呢?

当试件受到激光辐照后, 被辐射区的温度迅速升高, 存在较高的温度梯度, 在材料内部产生一定的热应力, 在光斑内的热应力是压应力, 而在光斑边缘的热应力是拉应力; 同时由于温升, 基体材料软化而造成基体承载能力下降, 机械拉伸载荷和热应力共同作用, 在缺口处出现应力集中, 由于基体强度较低, 通过基体传递给颗粒的应力不足以使颗粒破裂, 这样在缺口处和光斑边缘的基体产生孔洞以及基体与颗粒出现脱胶。

然而在机械载荷作用下, 由于颗粒与基体结合良好, 基体也未软化, 基体有效地将载荷通过界面剪切力而传递给颗粒, 使颗粒受到很大的载荷作用, 从而造成颗粒破碎。

3.2 裂纹的扩展机制

当形成微裂纹后, 随着载荷的增加, 微裂纹就会连接而形成宏观裂纹, 对于颗粒均匀分布

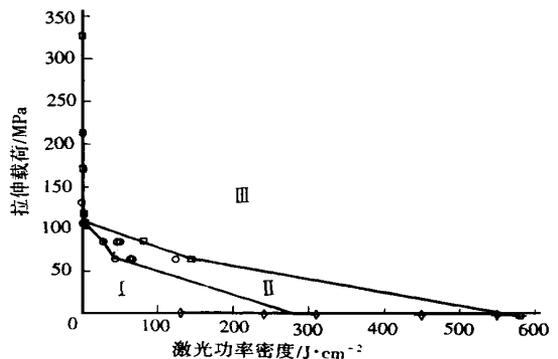


图 5 机械载荷 σ_{\max} 和激光能量密度 E 平面图上

cn 金属基陶瓷复合材料的破坏效应

I) 未损伤区; II) 损伤区; III) 断裂区

的 u_k 材料, 裂纹的扩展完全是由粒子的破碎所引起, 而对于具有 $cluster$ 的颗粒非均匀分布的 c_n 材料, 裂纹的扩展却主要是由颗粒与基体的脱胶和基体内形成孔洞所引起。为什么对于 u_k 材料和 c_n 材料裂纹扩展会有不同的机制呢?

Wither 等人^[5]应用 Eshelby 平均场近似分析发现, 在弹性变形时, 当增强相陶瓷颗粒的百分比增加时, 粒子内的平均应力就会减小。由有限元计算表明^[6-8], 在塑性流动时, 通过基体和增强相的界面内应力的作用, 增强了基体内的塑性变形。Wang 等人^[9]研究表明, 在有四个或更多粒子的团聚区 ($cluster$) 内, 基体内的应力远远大于非团聚区基体内的应力, 这种基体内的高应力起到的屏蔽作用, 使得粒子团聚区内不易产生塑性变形。Watt 等人^[10]的三维有限元模型研究表明, 在粒子团聚区内的粒子间产生极高的三轴应力, 并且在粒子团聚区的裂尖处, $cluster$ 和应力场及塑性区互相影响, 大大降低了材料的断裂韧性。

Prangnell 等人^[2]从颗粒破碎的形式、程度及基体内孔洞生长状况的图象以及二维有限元计算, 详细研究了在外载荷为压应力的状态下, 颗粒分布对损伤形成的影响。结果表明: 当颗粒均匀分布时, 在颗粒的棱角即颗粒与基体的界面是剪应力, 而随着颗粒的聚集, 棱角的剪应力迅速提高, 从而造成颗粒与基体分离。

总之, 随着局部颗粒百分比的增加, 颗粒与基体界面的应力增加, 基体内的应力增加, 从而会出现 $cluster$ 处容易破坏, 而且颗粒与基体界面分离和基体内的孔洞是主要破坏形式, 进而造成颗粒非均匀分布大大地降低材料的宏观力学性能。

3.3 热-力耦合的非线性效应机理

激光热冲击和机械外载荷共同作用使材料更容易破坏, 它们的作用效果不是二者的线性叠加, 而是二者的非线性耦合。当有机机构外载荷作用时, 激光热冲击加速材料的软化, 尤其是对于金属基陶瓷复合材料, 主要是基体的软化, 从而降低材料的承载能力, 更易加速损伤的产生和裂纹的形成, 形成裂纹后塑性功转化为热, 又进一步使材料软化, 这种相互耦合作用使这种复合材料容易被破坏。

参 考 文 献

- 1 Park J, Lnshek D X, Povirk G J. Reinforcement redistribution in Al-SiC Composites under cyclic deformations. *Acta Mater*, 1997, 45: 1351~1364
- 2 Prangnell P B, Barnes S J, Roberts S M, et al. The effect of particle distribution on damage formation in particulate reinforced metal matrix composites deformed in compression. *Mater Sci Engng (A)*, 1996, 220: 41~56
- 3 Kagawa Y. Thermal shock damage in a two-dimensional SiC/SiC composite reinforced with woven SiC fibers. *Composites Sci Tech*, 1997, 57: 607~611
- 4 Zhou Y C, Duan Z P, Yang Q B. Failure of SiC particulate reinforced metal matrix composites induced by laser thermal shock. *Metall Mater Trans (A)*, 1998, 29: 685~692
- 5 Withers P J, Stobbs W M, Pedersen O B. An analytical study on strengthening of particulate reinforced metal matrix composites. *Acta Metall*, 1989, 37: 3061~3072
- 6 Shen Y L, Finot M. Effective elastic response of two-phase composites. *Acta Metall Mater*, 1994, 42: 77~97
- 7 Dutta I, Sims J D, Seigenthaler D M. An analytical study of residual stress effects on uniaxial deformation of whisker reinforced metal matrix composites. *Acta Metall Mater*, 1993, 41: 885~908
- 8 Bao G, Hutchinson J W, McMeeking R M. Particle reinforcement of ductile matrices against plastic flow and creep. *Ac-*

- ta Mater, 1991, 39: 1 871~ 1 882
- 9 Wang Z R, Chen T K, Lyd D J. Stress distribution in particulate reinforced metal matrix composites subjected to external load Metall Tran, 1993, A24: 197~ 207
- 10 Watt D F, Xu X Q, Zhang R J, et al A finite element method analysis of the stress distribution of particle reinforced metal matrix composites Acta Mater, 1996, 44: 789~ 792

THE EFFECT OF PARTICLE DISTRIBUTION ON THERMAL FAILURE IN PARTICULATE REINFORCED METAL MATRIX COMPOSITES INDUCED BY LASER

L ong S iguo

(Institute of Fundamental Mechanics and material Engineering, Xiangtan University, Xiangtan, 411105, china)

Zhou Yichun, Duan Zhuping

(Institute of Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Beijing, 100080, China)

【Abstract】 Thermal failure of particulate reinforced 6061 aluminum alloy composites with two kinds of particle distribution has been investigated. The thermal failure was induced by the coupled load of laser thermal shock and mechanical load. The initiations of micro-fracture in composites for homogeneous and heterogeneous particle distributions are both in the form of void in matrix or decohesion at the interface between the particle and the matrix. However, their mechanisms of the crack propagation are very different. The macrocrack formation is produced in the form of the separation of the SiC particle-matrix interface or in the form of void nucleation and growth within the matrix for the composites with homogeneous particles distribution. However, for the composites with heterogeneous particles distribution, the reinforcement SiC particle fracture is the dominant damage mechanism for macrocrack propagation. As the results of the different micro-behaviours of the composites, their mechanical properties are different. The strength of the composites with heterogeneous particle distribution is very lower than that of the composites with homogeneous particles distribution.

Subject words metal matrix composites, particle distributions, thermal failure, thermal shock induced by laser