

文章编号 1004-924X(2012)07-1551-08

SiC 颗粒掺杂对激光直接成形 Al_2O_3 陶瓷裂纹敏感性的影响

吴东江*, 杨 策, 吴 楠, 郭玉泉, 马广义, 郭东明

(大连理工大学 精密与特种加工教育部重点实验室, 辽宁 大连 116024)

摘要:为抑制激光直接成形 Al_2O_3 陶瓷过程中的裂纹, 利用 SiC 未熔颗粒的增韧原理, 在 Ti-6Al-4V 合金基底上进行添加 SiC 颗粒的 Al_2O_3 同轴送粉激光直接成形实验, 分析了激光直接成形 $\text{Al}_2\text{O}_3 + \text{SiC}$ 复相陶瓷的可行性以及成形件裂纹敏感性的影响因素。利用光学显微镜观察薄壁成形试样的裂纹扩展、显微组织和两相结合情况, 并使用 X 射线衍射仪 (XRD) 进行相分析。结果表明: SiC 颗粒可在激光直接成形 $\text{Al}_2\text{O}_3 + \text{SiC}$ 陶瓷中起到抑制裂纹的作用, 并可形成各成分结合良好, 无明显化学反应, 含有较完整 SiC 未熔颗粒的复相陶瓷材料。单因素实验显示: SiC 比例 f 、激光功率 P 、扫描速度 v 和送粉率 n 对裂纹敏感性均有显著影响, 最后采用工艺参数: $f = 10\%$ (重量百分比)、 $P = 186 \text{ W}$ 、 $v = 300 \text{ mm/min}$ 及 $n = 1.78 \text{ g/min}$ 成形了裂纹敏感性低, 无明显缺陷的长 \times 高 \times 厚约为 $17 \text{ mm} \times 6 \text{ mm} \times 2 \text{ mm}$ 的薄壁件。

关键词:激光技术; 直接成形; 复相陶瓷; SiC 颗粒; 裂纹抑制

中图分类号: TN249; TG665 **文献标识码:** A **doi:** 10.3788/OPE.20122007.1551

Effect of SiC particles on crack susceptibility in laser direct forming Al_2O_3 ceramic

WU Dong-jiang*, YANG Ce, WU Nan, GUO Yu-quan, MA Guang-yi, GUO Dong-ming

(Key Laboratory for Precision and Non-traditional Machining Technology of the Ministry of Education, Dalian University of Technology, Dalian 116024, China)

* Corresponding author, E-mail: djwudut@dlut.edu.cn

Abstract: The toughening effect of SiC particles was applied to inhibition of the cracks in Al_2O_3 ceramic for Laser Direct Forming (LDF). The experiments of coaxial laser cladding Al_2O_3 ceramic added SiC particles were performed on the Ti-6Al-4V alloy substrate to investigate the feasibility of $\text{Al}_2\text{O}_3 + \text{SiC}$ composite ceramic by LDF and explore the factors effecting on the crack susceptibility. The cracks, microstructures and the combining of the two compositions were observed by an optical microscopy, and the phase transitions were detected by X-ray diffraction. The results show that some complete SiC particles contained in the Al_2O_3 ceramic can inhibit the cracks, and the $\text{Al}_2\text{O}_3 + \text{SiC}$ composite ceramic without serious chemical reactions or combining defects can be prepared. The crack susceptibility is significantly affected by the proportion of SiC (f), laser power (P), scanning velocity (v) and the pow-

收稿日期: 2012-02-24; 修订日期: 2012-04-17.

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (No. 51175061); 国家 973 重点基础研究发展计划资助项目 (No. 2009CB724307)

der flow rate (n). Finally, a thin-wall $\text{Al}_2\text{O}_3 + \text{SiC}$ composite ceramic block ($17 \text{ mm} \times 6 \text{ mm} \times 2 \text{ mm}$) without the obvious defects was formed with the parameters of f , P , v and n in 10% (weight proportion), 186 W, 300 mm/min and 1.78 g/min, respectively.

Key words: laser technique; direct forming; composite ceramic; SiC particle; crack inhibition

1 引言

陶瓷材料由于其独特的耐磨、耐腐蚀、高硬度以及抗高温性能,受到国内外学者的特别关注。其中 Al_2O_3 蕴藏分布丰富、价格低廉,比其他氧化物陶瓷的力学、热学和电学性能更优异,成为微电子工业中最常用的陶瓷材料,适用于制造各种几何形状的电子器件。激光辐射能量高,能够使组织快速凝固,成形零件致密度高,可应用于陶瓷加工^[1]。目前,已有报道证明激光直接成形技术(Laser Direct Forming, LDF)有能力成形完全致密的金属零件^[2],但对直接成形陶瓷结构件的研究还极少,公开报道的文献中仅查到美国军方资助过高纯 Al_2O_3 结构件的成形研究^[3]。由于激光加工过程具有快速熔凝特征,会导致较大的热应力和组织应力,极易诱发裂纹的产生,因此解决加工过程中的裂纹问题成为激光直接成形技术得以推广的关键因素。而选择合适的材料成分,工艺参数(如激光功率、扫描速度、送粉量等)都将对裂纹和材料性能产生重要影响^[4]。不少学者针对这两方面的问题做了大量研究。梁军^[5]分析了 SiC 颗粒对陶瓷材料的增韧机制,证明添加 SiC 可以提高 ZrB_2 和 HfB_2 的断裂韧性,并得出各种增韧机制都是以消耗更多裂纹扩展能量起到增韧作用的结论; Z. Gacsi^[6] 发现激光重熔添加 5% 和 10% (重量百分比)的 Al-SiC 烧结体,后表面材料性能均有明显提高;杨永强^[7] 在 40Cr 钢上制备 SiC 增强的 Fe 基复合材料涂层,结果表明加入 5% (重量百分比)的 SiC 可使熔覆层硬度提高 1 倍,添加 10% (重量百分比)时会进一步提升,但过多的 SiC 会诱发裂纹;J. D. Majumdar^[8] 使用 5% 和 20% (重量百分比)的 SiC 粉末弥散增韧不锈钢,发现添加量为 20% (重量百分比)时,硬度和耐磨性提高最明显;孙荣禄^[9] 在钛合金表面进行 NiCrBSi + TiC 激光熔覆试验,得出激光工艺参数显著影响裂纹、硬度的结论;黄卫东^[10] 通过

多年来的激光立体成形实验,发现并总结出大量激光工艺参数对裂纹敏感性、成形特征、力学性能的影响规律。

虽然有研究表明 SiC 作为增强相效果明显,但此方法并未应用于陶瓷结构的成形技术当中。本文从提高成形质量和材料性能的角度出发,通过实验方法探究 SiC 比例、激光功率、扫描速度和送粉率 4 个参数对激光直接成形 $\text{Al}_2\text{O}_3 + \text{SiC}$ 复相陶瓷中裂纹敏感性的影响规律,并进行了理论分析。

2 实验步骤

2.1 实验材料

实验基底为 Ti-6Al-4V 合金 (TC4),尺寸规格为 $150 \text{ mm} \times 80 \text{ mm} \times 6 \text{ mm}$,实验前用砂纸打磨,并用酒精清洗。成形材料选用粒度为 $42 \sim 90 \mu\text{m}$ 的 Al_2O_3 -13% (重量百分比) TiO_2 球形团聚粉末和纯度为 97% 的 SiC 粉末。将混合的陶瓷粉末在球磨机中混合 24 h,并在 100°C 条件下干燥 4 h。

2.2 实验参数

成形实验采用新加坡 RESEM 公司集成的 RP-503F 型三轴 YAG 激光成形系统。光斑直径 $D=1.4 \text{ mm}$,根据文献调研选定参数范围^[5-10]:激光功率 $P=150 \sim 270 \text{ W}$,扫描速度 $v=200 \sim 500 \text{ mm/min}$,送粉率 $n=0.99 \sim 2.14 \text{ g/min}$,SiC 比例 f 为 $0 \sim 20\%$ (质量百分比)。成形薄壁件的尺寸为长 \times 高 \times 厚约 $17 \text{ mm} \times 6 \text{ mm} \times 2 \text{ mm}$ 。

2.3 观察与检测

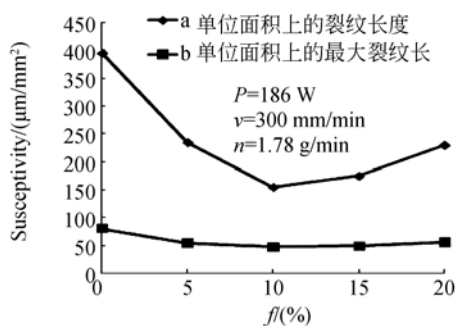
将成形后的薄壁件试样侧面作为观察面镶嵌于环氧树脂中,凝固后样品经 $800^\#$ 、 $1200^\#$ 金刚石砂盘, $1500^\#$ 、 $2000^\#$ 、 $3000^\#$ 砂纸打磨,再用粒度为 1 的金刚石研磨膏抛光。处理后在奥林巴斯 MX40F 型光学显微镜下观察两相结合情况,利用 ACDS-See-Pro 软件中的标尺网格测量薄壁成形件侧面的裂纹长度,用 a (所有裂纹总长度求和/成形件侧面总面积) 作为各成形件裂纹敏感性的衡量指标^[11]。使用 D/MAX-Ultima-X 射线衍射仪

检测成分,结合光学显微镜观察分析两相材料有无明显氧化和分解以及 SiC 颗粒的存留情况。

3 实验结果与分析

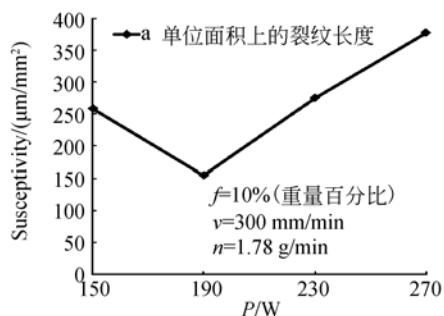
3.1 实验结果

在激光加工过程中,热传导作用使基体陶瓷首先熔化,利用 SiC 添加相熔点高于 Al₂O₃ 基体相的特点,通过调整激光功率和扫描速度,使熔池温度高于 Al₂O₃ 熔点而低于 SiC 熔点的温度,在 Al₂O₃ 基体相开始结晶凝固后,SiC 未熔颗粒可以弥散在基体中形成复相陶瓷材料。基于此原理,使用混合好的陶瓷粉末进行针对 f 、 P 、 v 、 n 4 个参数的激光直接成形单因素实验,对不同条件下的成形试样进行裂纹敏感性检测,结果如图 1 所示。从图 1 可知,SiC 比例(a)、激光功率(b)、扫描速度(c)、送粉率(d)对裂纹敏感性均有显著影响,4 个变量对裂纹敏感性的影响均呈现在一定范围随变量增大而减小,而超过某一范围后,则裂纹敏感性随着变量的增大而逐渐增大。由于添加 SiC 颗粒有钉扎、偏转扩展裂纹的作用^[12],会对最大裂纹长度有一定改变,故针对参数 f 的单因素



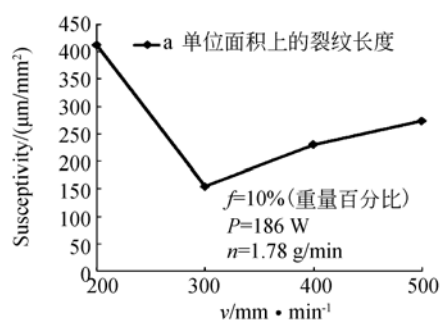
(a) SiC 比例

(a) Proportion of SiC



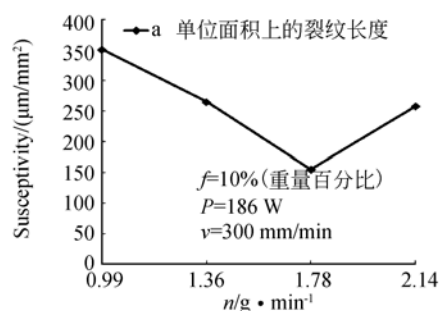
(b) 激光功率

(b) Laser power



(c) 扫描速度

(c) Scanning velocity



(d) 送粉率

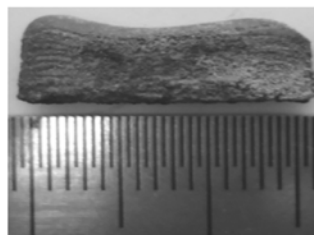
(d) Powder flow rate

图 1 各参数对裂纹敏感性的影响

Fig. 1 Influence of every parameter on crack susceptibility

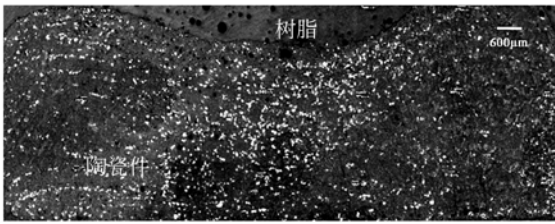
实验中增加指标 b (最大裂纹长度/成形件侧面总面积) 与指标 a 共同作为裂纹敏感性的衡量标准,如图 1(a) 中折线 b 所示。

通过实验对比发现,采用 $f = 10%$ (质量百分比), $P = 186 \text{ W}$, $v = 300 \text{ mm/min}$, $n = 1.78 \text{ g/min}$ 时可较好抑制裂纹,利用该参数制备了长 \times 高 \times 厚约 $17 \text{ mm} \times 6 \text{ mm} \times 2 \text{ mm}$ 的薄壁件。如图 2 所示,(a) 为薄壁件的外观形貌,(b) 为薄壁件侧面经镶嵌、打磨、抛光后的显微观察视图,其中黑色为



(a) 外观

(a) Surface



(b) 加工之后侧面

(b) Profile after processing

图 2 激光直接成形复相陶瓷件

($f = 10\%$ (质量百分比), $P = 186 \text{ W}$,
 $v = 300 \text{ mm/min}$, $n = 1.78 \text{ g/min}$)

Fig. 2 Composite ceramic block of LDF

($f = 10\%$ (质量百分比), $P = 186 \text{ W}$,
 $v = 300 \text{ mm/min}$, $n = 1.78 \text{ g/min}$)

Al_2O_3 , 白色为 SiC 未熔颗粒。可以看出薄壁件无明显缺陷, 裂纹敏感性低, 结合较好, SiC 颗粒分布较为均匀。

3.2 结果分析

3.2.1 SiC 颗粒掺杂对裂纹的抑制作用

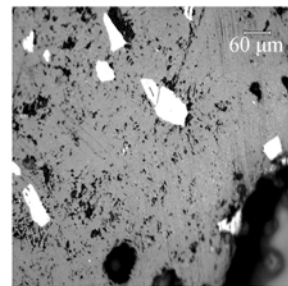
异相颗粒影响裂纹敏感性主要是因为基体与异相颗粒的弹性模量 E 、热膨胀系数 α 差异, 致使两相周围形成的残余应力场与扩展裂纹尖端应力交互作用, 使裂纹发生钉扎、穿晶和偏转^[13]。 Al_2O_3 和 SiC 的主要性能如表 1 所示, 熔点、硬度、弹性模量和热膨胀系数均有较明显差异。

表 1 $\text{Al}_2\text{O}_3 + \text{SiC}$ 陶瓷粉末主要性能参数Tab. 1 Main performance parameters of $\text{Al}_2\text{O}_3 + \text{SiC}$ ceramic

材料	熔点 /°C	莫氏 硬度	弹性模量 /GPa	热膨胀系数 / 10^{-6} K^{-1}
Al_2O_3	2 050	9.0	370	8.8
SiC	3 000	9.5	407	5.2

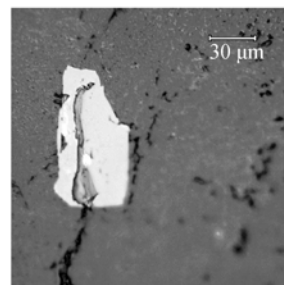
当 SiC 颗粒在某一裂纹的扩展方向上时, 裂纹将首先达到 SiC 颗粒与 Al_2O_3 基体的结合处, 此时如果裂纹扩展能不大, 则 SiC 颗粒可以将裂纹止住, 即钉扎, 如图 3(a); 若扩展能较大, 裂纹有可能穿过 SiC 颗粒, 即穿晶如图 3(b); 或者绕过 SiC 颗粒沿两相结合界面继续扩展, 即偏转(图 3c), 如果 SiC 颗粒的硬度高于 Al_2O_3 基体, 裂纹在截面扩展发生钉扎、穿晶时 SiC 颗粒可消耗更

多裂纹扩展能量, 阻碍裂纹扩展趋势。裂纹偏转可使扩展路径更为曲折或裂纹弯曲, 缩短裂纹在扩展方向上的长度, 从而达到改善裂纹提高材料的韧性的目的。另外, SiC 颗粒的热膨胀系数小于 Al_2O_3 基体, 在冷却时收缩不同, SiC 颗粒将受到一个压应力^[12], 因此可以阻碍 Al_2O_3 基体晶界移动, 对晶粒生长有抑制作用, 有利于细化基体晶粒(图 4), 促进材料致密化, 改善显微结构, 增韧基体, 抑制裂纹。



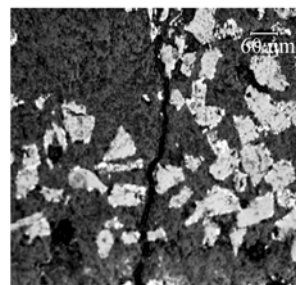
(a) 钉扎

(a) pinning



(b) 穿晶

(b) transgranular



(c) 偏转

(c) deflecting

图 3 SiC 颗粒对裂纹的抑制作用

Fig. 3 Typical inhibition of SiC particles on crack

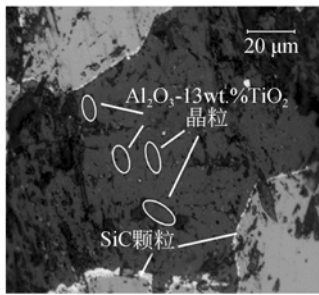
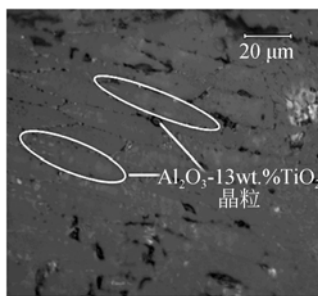
(a) Al₂O₃ + SiC 复相陶瓷(a) Al₂O₃ + SiC composite ceramic(b) Al₂O₃ 陶瓷(b) Al₂O₃ ceramic

图4 SiC颗粒对晶粒的细化作用

Fig. 4 Typical inhibition of SiC particles on grain growth

SiC比例参数 f 的影响趋势主要是由于 SiC 含量低于 10% (重量百分比) 时, 较多区域处于无颗粒添加的状态, 导致在裂纹扩展路径上起作用的 SiC 颗粒过少, 与裂纹相遇的几率较低, 无法形成有效的应力场作用于裂纹尖端。另外, 阻碍晶粒生长的能力弱, 不利于熔覆层的晶粒细化, 均使 SiC 颗粒的抑制作用发挥不明显。当 SiC 含量较大时, 由于过多的 SiC 将导致未熔颗粒聚集概率增大, 使成形件的致密程度、结合强度等材料性能下降, 还增加了 SiC 颗粒与 Al₂O₃ 基体结合界面处成为初始裂纹发源地的可能性, 以及过多 SiC 颗粒的存在造成的高脆性。这些都不利于抑制裂纹扩展, 会使成形效果不佳。

3.2.2 加工参数对裂纹的抑制作用

由于材料的激光凝固层内存在拉应力, 当局部拉应力超过材料的强度极限时就会产生裂纹, 而激光加工的参数会对熔覆层的应力状况、气孔率、硬度、晶粒生长、杂质上浮、元素烧蚀等产生明

显影响, 因此有必要针对激光直接成形的工艺参数进行实验, 以研究工艺参数对裂纹敏感性的影响规律。

根据激光加工的比能量 I :

$$I = \frac{P}{v \times D}, \quad (1)$$

式中: P 为功率, v 为扫描速度, D 为光斑直径。如图 1(b)、(c)、(d) 所示, 作为单一变量时, P 、 v 选取将分别对比能量产生直接影响。当激光输入的比能量减小, 即作为单一变量 P 减小或 v 增大时, 易导致基体材料熔化不完全, 熔层内部易产生气孔和未熔合等缺陷^[9], 熔池变窄变浅, 再熔化深度明显减小, 造成熔池中温度梯度增大, 熔池寿命减小, 液态陶瓷补充不及时, 增加凝固收缩过程产生大量空位、位错等缺陷的趋势, 还有杂质上浮不充分使材料融合不牢固等现象, 残余应力随 v 的增大而增大, 导致出现裂纹等缺陷的几率增大。而输入的比能量增大, 即作为单一变量 P 增大或 v 减小时, 会增加熔池截面表面张力梯度和对流强度^[4], 熔池的流速也会加快, 从而增大了 SiC 颗粒的分布不均匀性趋势。另外, P 增大会导致 SiC 颗粒烧蚀分解比率增加, v 减小会延长材料受热时间, 增加晶粒生长趋势, 这些都会导致材料韧性的降低, 增加裂纹扩展趋势, 弱化 SiC 抑制裂纹效果。

连续送入到熔池中的粉末颗粒温度比熔池温度低, 并且对成形质量、形貌都有显著影响^[10], 而且由于送粉气流搅动及未熔 SiC 颗粒的重力作用都将对熔池造成冲击, 因此激光加工复相陶瓷的送粉率对裂纹敏感性也有显著的影响。当送粉率 f 过大时, 单层熔覆的厚度将增加, 导致开裂倾向也随之增大^[4], 虽然实验中同轴送粉可对粉末进行一定的预热, 但粉末很难完全熔化消除与熔池的温差, 未熔粉末进入熔池后导致熔池熔化深度减小的趋势, 结果使熔覆层之间的温差变大, 拉伸应力增加。另外, 粉末的同轴冲击作用也必将加剧熔池流动, 影响 SiC 颗粒的分布均匀性。当送粉率 f 过小时, 相当于单位质量的粉末吸收的能量增加, 会产生与比能量过大相似的问题, 还会导致单层熔覆厚度降低, 每扫描一次都将引起下面的一层或多层再次熔化, SiC 未熔颗粒由于熔池流动及重力作用会不断下沉, 对分布的均匀性不利, 导致熔池底部未熔颗粒过多, 从而削弱 SiC 对

裂纹的抑制作用,甚至诱发裂纹。

3.3 复相陶瓷的微观形貌及成分分析

激光直接成形复相陶瓷材料的前提是两相的物理、化学性能匹配,应保证成形过程中不存在剧烈的化学反应,同时又具有合适的界面结合状况。通过 XRD 分析成形件侧面的物相组成(参数: $f=10\%$ (重量百分比), $P=186\text{ W}$, $v=300\text{ mm/min}$, $n=1.78\text{ g/min}$),图 5 为试样侧面 X 射线衍射图谱,发现激光成形复相陶瓷材料后未出现集聚态的 TiO_2 ,但是 Al_2O_3 和 SiC 相对应的主峰十分清晰,可以说明成形样品存在着集聚态的 Al_2O_3 和 SiC 陶瓷材料。

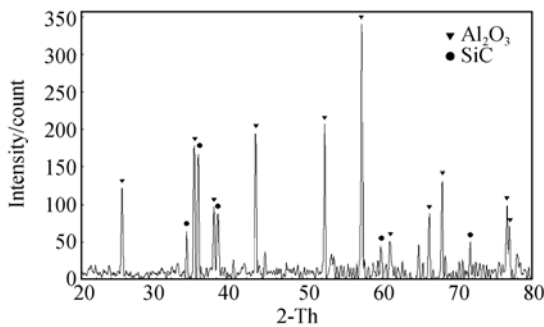
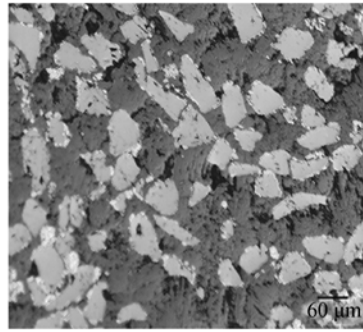


图 5 复相样品的 XRD 谱

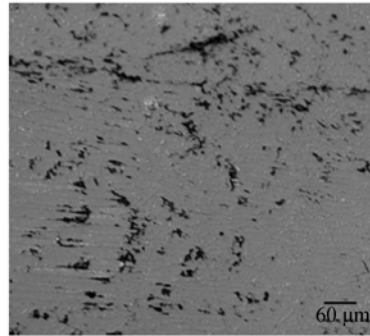
Fig. 5 XRD spectrum of composite sample

用光学显微镜观察成形件侧面,通过图 6(a)与(b)对比可以看出,与成形材料为 Al_2O_3 时相比, $\text{Al}_2\text{O}_3 + \text{SiC}$ 复相陶瓷材料的内部明显多出许多未熔的浅色颗粒,其尺寸与添加的 SiC 粉末相当,边缘处无明显分解过渡痕迹。实验采用的同轴送粉方式能够利用高纯氩气体在熔池附近形成一个保护气氛,较好地避免成形过程中 SiC 的氧化和分解。结合 XRD 谱的分析,可断定浅色的部分为 SiC 颗粒,且通过光学显微镜观察发现基本处于未熔状态。另外,由于 Al_2O_3 存在熔凝过程,复相陶瓷的结合界面间会存在部分原子相互扩散的现象,其性能与比烧结热压等机械结合工艺具有明显优势。以上的分析可表明,添加的 SiC 异相颗粒可处于未熔状态较完整地保留下来,形成了两相结合良好的复相陶瓷,且两相结合处没有成为初始裂纹发源地。



(a) $\text{Al}_2\text{O}_3 + \text{SiC}$ 复相陶瓷

(a) $\text{Al}_2\text{O}_3 + \text{SiC}$ composite ceramic



(b) Al_2O_3 陶瓷

(b) Al_2O_3 ceramic

图 6 复相陶瓷与 Al_2O_3 陶瓷形貌比较

Fig. 6 Comparison between composite ceramic and Al_2O_3 ceramic

4 结 论

本文研究了激光直接成形 $\text{Al}_2\text{O}_3 + \text{SiC}$ 复相陶瓷的可行性及影响成形件裂纹敏感性的相关因素。结果表明: SiC 比例 f 、激光功率 P 、扫描速度 v 和送粉率 n 对激光直接成形 $\text{Al}_2\text{O}_3 + \text{SiC}$ 复相陶瓷的裂纹敏感性影响显著。采用优化的工艺参数: $f=10\%$ (重量百分比)、 $P=186\text{ W}$ 、 $v=300\text{ mm/min}$ 和 $n=1.78\text{ g/min}$,成形了裂纹敏感性低,无明显缺陷的长 \times 高 \times 厚约为 $17\text{ mm} \times 6\text{ mm} \times 2\text{ mm}$ 薄壁件,结果显示,激光直接成形 $\text{Al}_2\text{O}_3 + \text{SiC}$ 过程中两相边界结合良好,无明显化学反应,未熔颗粒保留较完整,可以形成复相陶瓷材料。

参考文献:

- [1] 张永忠,石力开,章萍芝,等. 基于金属粉末的激光快速成型技术新进展[J]. 稀有金属材料与工程, 2000,29(6): 13-19.
ZHANG Y ZH, SHI L K, ZHANG P ZH, *et al.*. The newest advance laser rapid forming of metallic powders[J]. *Rare Metal Materials and Engineering*, 2000,29(6): 13-19. (in Chinese)
- [2] DINDA G P, DASGUPTA A K, J. MAZUMDER. Laser aided direct metal deposition of Inconel 625 superalloy[J]. *Materials Science and Engineering*, 2009,A(509):98-104.
- [3] BALLA V K, BOSE S, BANDYOPADBYAY A. Processing of bulk alumina ceramics using laser engineered net shaping[J]. *Int. J. Appl. Ceram. Technol*, 2008,5(3):234-242.
- [4] 洪蕾,吴钢. 激光制造技术基础[M]. 北京:人民交通出版社,2008.
HONG L, WU G. *Laser-based Manufacturing Technology*[M]. Beijing: China Communications Press, 2008. (in Chinese)
- [5] 梁军,王超,栾旭,等. 几种SiC颗粒增韧防热陶瓷的增韧机制分析[J]. 稀有金属材料与工程,2009,38(增刊2):894-897.
LIANG J, WANG CH, LUAN X, *et al.*. Analysis on toughening mechanisms of different SiC particle reinforced thermal protective ceramics [J]. *Rare Metal Materials and Engineering*, 2009,38(Supp 2): 894-897. (in Chinese)
- [6] GACSI Z, KOVACS J, PIECZONKA T, *et al.*. Investigation of sintered and laser surface remelted Al-SiC composites [J]. *Surface and Coatings Technology*,2002,151-152:320-324.
- [7] 杨永强,文效忠. 激光熔覆SiC/不锈钢粉末复合涂层的组织与性能[J]. 中国激光,2000,27(10):941-946.
YANG Y Q, WEN X ZH. Microstructure and performance of the SiC/Stainless steel composite coating produce by Nd:YAG laser cladding[J]. *Chinese Journal of Lasers*,2000,27(10):941-946. (in Chinese)
- [8] MAJUMDAR J D, KUMAR A, LI L. Direct laser cladding of SiC dispersed AISI 316L stainless steel [J]. *Tribology International*, 2009, 42(5): 750-753.
- [9] 孙荣禄,郭立新,董尚利,等. 钛合金表面激光熔覆NiCrBSi+TiC复合涂层的组织研究[J]. 中国激光,2001,28(3):275-278.
SUN R L, GUO L X, DONG SH L. *et al.*. Study on microstructure of laser-clad NiCrBSi+TiC coating on the surface of titanium alloy [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2001,28(3):275-278. (in Chinese)
- [10] 黄卫东,林鑫,陈静,等. 激光立体成型[M]. 西安:西北工业大学出版社,2007.
HUANG W D, LIN X, CHEN J, *et al.*. *Laser Solid Forming*[M]. Xi'an: Northwest Institute of Technology Press,2007. (in Chinese)
- [11] 宋武林,朱蓓蒂,张洁,等. 激光熔覆层热膨胀系数对其开裂敏感性的影响[J]. 武汉:华中理工大学学报,1999,27(增刊I):42-44.
SONG W L, ZHU B D, ZHANG J. *et al.*. The effects of expansion coefficient of laser cladding layer on cracking sensitivity[J]. *Journal of Huazhong University of Science and Technology*, 1999,27(Supp I): 42-44. (in Chinese)
- [12] 贾成广. 陶瓷基复合材料导论[M]. 2版. 北京:冶金工业出版社,2002.
JIA CH G. *Introduction to Ceramic Matrix Composites*[M]. Beijing: Metallurgical Industry Press, 2002. (in Chinese)
- [13] 张国军,金宗哲. 颗粒增韧陶瓷的增韧机理[J]. 硅酸盐学报,1994,22(3): 259-269.
ZHANG G J, JIN Z ZH. Toughening mechanisms of particulate composite ceramic[J]. *Journal of the Chinese Ceramic Society*, 1994, 22(3): 259-269. (in Chinese)

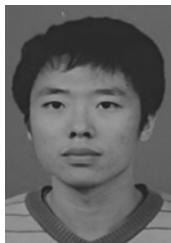
作者简介:



吴东江(1964—),男,山东昌邑人,博士,教授,博士生导师,1987年于大连理工大学获得学士学位,2000年于中科院长春光学精密机械与物理研究所获博士学位,主要从事激光与材料相互作用机理及激光精密微细加工领域的研究。E-mail: djwudut@dlut.edu.cn



郭玉泉(1981—),男,黑龙江密山人,博士研究生,主要从事激光精密制造工艺及数值模拟方面的研究。E-mail: guoyuquan2009@163.com



杨策(1987—),男,吉林四平人,硕士研究生,主要从事激光精密制造方面的研究。E-mail: yangce1987@mail.dlut.edu.cn



马广义(1982—),男,辽宁大连人,博士研究生,主要从事激光精密制造方面的研究。E-mail: gyma@mail.dlut.edu.cn



吴楠(1988—),男,辽宁辽阳人,硕士研究生,主要从事激光精密制造方面的研究。E-mail: wunan19880203@163.com



郭东明(1959—),男,辽宁大连人,博士,教授,中国工程院院士,1982年于大连工学院获学士学位,1992年于大连理工大学获博士学位,主要从事精密与特种加工等方面的研究。E-mail: guodm@dlut.edu.cn

● 下期预告

集成双光栅干涉微梁位移测量方法

冯金扬,叶雄英,陈 烽,商院芳

(清华大学精密仪器与机械学系精密测试技术及仪器国家重点实验室,北京 100084)

介绍了一种基于集成双光栅干涉和 CCD 图像测量的微梁位移测量方法,利用相位相差约 $\pi/2$ 的一组光栅实现扩量程位移检测。敏感芯片利用表面牺牲层工艺制作,在玻璃基底上刻蚀深度约为入射激光波长 $1/8$ 的凹槽,凹槽上下的两组光栅与正上方对应的梁分别构成 2 组相位敏感集成光栅单元。测量系统由激光准直扩束、敏感芯片、透镜成像、空间滤波、CCD 图像采集及图像处理等部分组成。利用 1 级衍射光将集成光栅单元成像在 CCD 靶面上,梁的位移变化通过 CCD 图像上对应光斑的灰度值变化来反映。实验结果表明,虽然玻璃凹槽腐蚀深度的误差导致光栅之间的相位差偏离 $\pi/2$,但所制作的集成双光栅结构实现了多周期的扩量程位移检测,通过接近 $\pi/2$ 相位差的 2 个光栅得到的光强信号的错峰使用,避免了干涉法正弦位移检测信号的峰谷不灵敏位置,实验测得微梁 650 nm 的位移变化。