

## 硅酸铝短纤维强化铝基复合材料的激光切割\*

杨永强 李林

郑启光

(华南理工大学机电系, 广州, 510641) (华中科技大学激光技术国家重点实验室, 武汉, 430074)

**摘要:** 研究探讨了硅酸铝强化铝基复合材料的激光切割工艺对切口宽度及热影响区的影响。研究发现, 2000W CO<sub>2</sub> 激光在 1~ 8 m/min 速度下切割厚度 1~ 4.2 mm 复合材料时, 可以得到全穿透、宽度小的切口和较小的热影响区。由于激光切割时的热作用, 热影响区显微组织不同于复合材料本体, 硅酸铝细微发生了部分熔化, 在随后冷却中出现了富硅析出相。

**关键词:** 激光切割 硅酸铝短纤维强化 MMC 热影响区

## Laser cutting of Al-silicate fibre reinforced ZL109 matrix composition

Yang Yongqiang, Li Lin

(Department of Mechatronic Engineering, South China University of Technology, Guangzhou, 510641)

Zheng Qiquang

(National Laboratory of Laser Technology, HUST, Wuhan, 430074)

**Abstract:** This paper deals with the laser cutting parameters for Al-silicate short fibre reinforced aluminum matrix composite and the heat-affecting zone (HAZ) of laser interaction. The results show that under the condition of 2kW CO<sub>2</sub> laser and cutting velocity of 1~ 8m/min, penetrated and narrow cutting kerf and small HAZ had been gotten on composite samples whose thickness is from 1 to 4.2mm. Because of the effect of heat conduction, the microstructure of HAZ of laser cutting samples is different from that of the original composite and subsequently precipitated a silicon-rich phase by the melted Al-silicate fibres.

**Key words:** laser cutting Al-silicate fibre reinforced MMC HAZ

## 引言

复合材料具有传统材料所不具备的许多优异性能, 越来越多地应用于航空、航天、军事等高科技领域。随着复合材料制造技术的发展, 金属基复合材料在汽车、机械等民用工业领域的应用也逐渐成熟。各种高性能、特殊性能的复合材料制造工艺日新月异。然而, 金属基复合材料的相关加工技术的发展远滞后于复合材料本身的发展。因此, 研究金属基复合材料的加工技术具有较高的理论意义和实用价值。

硅酸铝纤维强化铝基复合材料是以铝合金为基体, 以硅酸铝(Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>·SiO<sub>2</sub>) 纤维为增强相的复合材料。复合材料的制备采用了混合浆料挤压成形技术, 获得了纤维分布均匀、无缺陷的复合材料, 具有高的比强度、比刚度, 优异的耐磨性等优点, 有广泛的应用前景。

激光切割有速度快、无接触、切口窄和高度编程能力等特点, 已广泛应用于各种材料的切割成形加工。激光切割时, 激光与材料发生交互作用, 产生表面吸收、热传导、相变、熔化、等离子体云的形成等物理过程, 并对切割效果产生直接影响。探讨激光切割硅酸铝纤维强化铝基

\* 激光技术国家重点实验室资助。

复合材料时的激光工艺参数对切口几何的影响、切口热影响区的组织结构演变是我们的主要研究目的。

### 1 实验方法

#### 1.1 试样材料

采用压力浸渗法制备了硅酸铝短纤维/ZL109 复合材料。硅酸铝短纤维长度为 25~50μm, 复合材料由 20% 硅酸铝纤维与 ZL109 构成。其成分见表 1。

Table 1 Composition of Al-silicate short fibre and ZL109(wt%)

	Al	Si	Mg	Cu	Fe	Mn	SiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>
ZL109	bal.	11.0~ 13.0	0.8~ 1.5	0.5~ 1.5	0.5	0.6	-	-	-
Al-silicate short fibre	-	-	-	-	-	-	bal.	46~ 48	0.7~ 1.7

将尺寸为 20mm × 20mm × 50mm 的复合材料线切割成不同厚度的薄片作为激光切割试样。

#### 1.2 激光切割工艺参数

采用 Rofex Sinar 2200W CO<sub>2</sub> 激光, 脉冲波、连续波; 激光模式 TEM<sub>01</sub>。切割点光斑直径约为 0.2mm, 用 N<sub>2</sub> 作为工作气体和保护气体。

Table 2 Parameters of laser cutting

	laser power (kW)	cutting speed (m/min)	pulse frequency (Hz)	pulse wide/ space (%)	thickness of samples (mm)
1#	2.0	8, 5, 3, 1	1000	70	4.2
2#	1.5	8, 5, 3, 1	1000	70	4.2
3#	1.0	8, 5, 3, 1	1000	70	2.6
4#	0.5, 1.0, 1.5, 2.0	3	1000	70	1.25
5#	0.5, 1.0, 1.5, 2.0	3	CW	100	1.5
6#	1500	8, 5, 3, 1	CW	100	1.9

### 2 结果与讨论

#### 2.1 工艺参数对硅酸铝强化 MMC 激光切口及热影响区宽度的影响

图 1 为激光功率和切割速度在 2000W, 1500W, 1000W 和 8m/min, 5m/min, 3m/min, 1m/min 时试样切口宽度。此宽度数据均在试件上表面即与激光作用面测得, 并且所测试样全部切透。

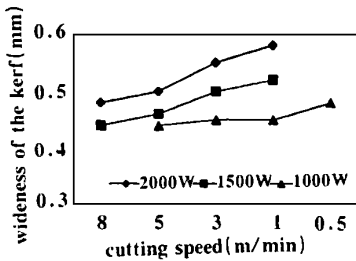


Fig. 1 Wideness of the kerf in different laser power and cutting speed

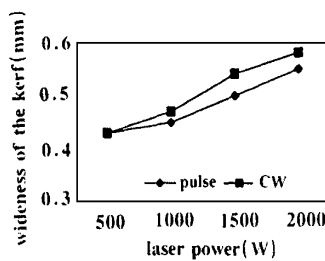


Fig. 2 Wideness of the kerf in diffeent laser power and CW/pulse, cutting speed 3m/min

的看来, 在本试验条件下, 切口宽度最大数据为 0.58mm, 在功率 2000W, 速度 1m/min 时获得; 切口宽度最小为 0.44mm, 在功率 1500W, 速度 8m/min 和功率 1000W, 速度 5m/min 时获

全部切透。可见, 在固定切割速度下, 随着激光功率的提高, 切口宽度变大; 在固定激光功率条件下, 降低切割速度, 切口宽度增大。总

得。功率 1000W, 速度 1~5 m/min 条件下获得的切割宽度接近最小值, 最佳切割工艺参数为

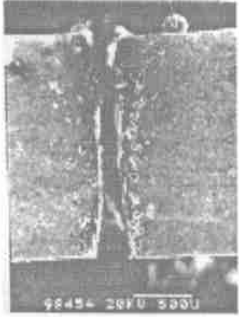


Fig. 3 Photograph of the kerf

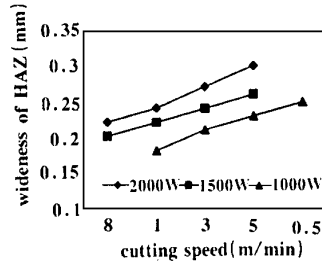


Fig. 4 Widthness of HAZ of the kerf in different laser parameters

功率 1000W、速度 5m/min。

试验对连续和脉冲 CO<sub>2</sub> 激光切割效果进行了对比, 结果如图 2 示。可以看出, 二者差异较小。连续波切割时, 切口宽度稍大。

切口热影响区在切口横断面呈上窄下宽形态, 切口横断面低倍照片见图 3。测量切口横断面中部热影响区

单边尺寸, 获得不同激光切割工艺条件下的热影响区尺寸变化, 见图 4。从中可以发现, 激光工艺参数对热影响区尺寸的影响与切口宽度具有相似的功率, 即特定功率条件下, 速度降低热影响区扩大; 在特定速度条件下, 功率提高热影响区扩大。

## 2.2 激光切割区域的组织结构

硅酸铝纤维强化铝基复合材料本体的显微组织见图 5。由金相照片可见, 该复合材料的显微组织由 Al+Si 共晶基体和任意排列的硅酸铝纤维组成, 这与材料提供者<sup>[1]</sup>的分析结果一致。从激光切割后切口的低倍照片(图 3)可见, 切口呈上喇叭口形的切缝, 上部稍宽。靠近切缝边缘的深色区域是热影响区, 并可看到热影响区内有许多孔洞。从热影响区的范围看, 切口的热影响区呈倒喇叭口形状。

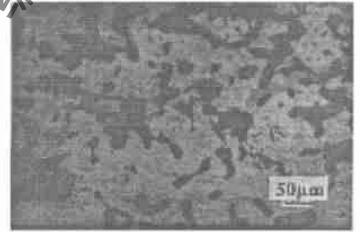


Fig. 5 Microstructure Al+silicate fibre reinforced composite

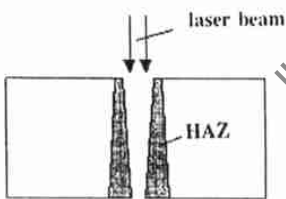


Fig. 6 Sketch of the kerf and HAZ

切口呈上喇叭口状是由于试件的上表面是与激光束首先发生作用的部位, 试件表面在激光束作用下先后发生熔化、汽化, 并经氮气吹掉。与试件内部相比, 激光作用区在上表面最大。由于激光切割速度很快, 表面热积累较少, 而内部尤其是试件的下部, 由于整个切口的熔化材料要经下口吹出, 下部的热积累明显较大, 因此下方的热影响区域相对要大一些。图 6 为切口形状及热影响区的示意图。

## 2.3 热影响区孔洞产生机理切口热影响区显微组织照片

由图 3 可见, 在热影响区有许多孔洞存在。研究发现, 这些孔洞是在试样磨削和抛光过程中出现的。出现孔洞原因与激光加热条件下产生的组织结构和残余应力有关。图 7 为热影响区的显微组织高倍照片。由照片可见, 热影响区的显微组织与复合材料本体不同。由于激光切割时的加热作用, 热影响区温度急剧升高, 但并未超过材料熔点, 硅酸铝纤维发生部分分解, 并固溶于附近基体合金中。由于 ZL109 合金硅含量为 11~13wt%, 为 Al+Si 共晶合金(Al+Si 合金共晶成分点 87.5wt% Al, 12.5wt% Si; 共晶温度 577℃)<sup>[2]</sup>, 硅酸铝纤维中含有 50% 以上 SiO<sub>2</sub>, 故纤维熔入后基体合金的成分成为过共晶合金, 电子探针微区成分分析发现, 热影响区 Si 含量为 23.15wt%, 见表 3。在随后的冷却过程中, 靠近未溶硅酸铝纤维边缘由于加热/冷

Table 3 Composition of HAZ of laser cutting analyzed by electronic probe (wt%)

elements	Al	Si	Mg	S
HAZ	76.85	23.15	-	-
substrate	64.90	35.10	-	-
gray phase(un-melted fibre)	48.72	51.28	-	-
remnant in hole	34.00	64.95	6.27	0.78

氧元素在能谱分析时不能很好地检出,但由于硅酸铝纤维中有氧元素存在,孔洞处也应有氧元素存在。

在试样磨削和抛光过程中之所以出现孔洞是由于富硅析出相与基体合金 ZL109 及硅酸铝纤维的热膨胀系数差异造成的。硅、硅酸铝纤维和 ZL109 的线膨胀系数<sup>[3-5]</sup>分别为  $2.33 \times 10^{-6}$ ,  $5.5 \times 10^{-6}$  和  $20.5 \times 10^{-6}$ 。富硅相在冷却时的收缩量只相当于 ZL109 收缩量的 1/8。因此,富硅相在冷却时与纤维和基体组织产生较大的拉应力并残留下来。在磨削和抛光过程中,磨削和抛光力与残留在富硅相周围的拉应力合并起来,将富硅相拉出,故在试样上出现许多孔洞。基体材料无富硅相,即使在复合材料制造过程中有富硅相出现,由于物相间残余拉应力较小,在试样磨削和抛光时不会出现孔洞。

由以上分析可以看出,尽管硅酸铝强化铝基复合材料激光切口很窄,热影响区较小,但如果以切割热影响面作工作面使用,则会出现表面孔洞而影响材料耐磨性。在稍作磨削加工去除热影响区,则材料性能不受影响。

### 3 结 论

(1) 厚度 1~4.2mm 硅酸铝纤维强化铝基复合材料在 2kW CO<sub>2</sub> 激光切割条件下,可获得较窄的切口宽度和热影响区;最佳的切割工艺参数为功率 1000W、速度 5m/min。(2) 切口热影响区显微组织不同于复合材料本体;在未溶纤维附近有富硅析出相。(3) 富硅析出相在试样磨削和抛光过程中容易拉出造成孔洞,其原因与富硅析出相和复合材料中本体及未溶纤维的线膨胀系数差异较大、界面有残留拉应力存在有关。(4) 尽管热影响区尺寸较小,但由于易脱落的富硅析出相存在,在应用时不易使用切割面作为工作面。

黄岳山博士、李文芳博士为我们提供了试验材料,特表示衷心感谢!

#### 参 考 文 献

- 1 黄岳山,李文芳,蒙继龙. 材料开发与应用, 1998; 13(2): 26~29
- 2 陆树荪,顾开道,郑来苏. 铸造有色金属及其熔炼. 北京: 国防工业出版社, 1983: 20
- 3 Wolf F. Silicon Semiconductor Data. New York: Sigtics Corporation, 1969
- 4 安继儒,荆秀枝. 中外常用金属材料手册. 西安: 西安交通大学出版社, 1990
- 5 武 恭. 铝及铝合金材料手册. 北京: 科学出版社, 1994

\* \* \*

作者简介: 杨永强,男,1961年8月出生。工学博士,副教授。主要研究方向为材料的激光加工及应用,设备材料数据库、专家系统等。

却时间极短,溶解的硅来不及远程扩散并形成富硅区,冷却时就地将有初生硅析出。图6中基体组织为 Al-Si 共晶,深色组织为未溶硅酸铝纤维,而孔洞均产生在靠近未溶纤维的富硅析出相中。表3为图7中各物相的电子探针成分分析结果。

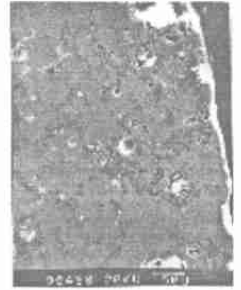


Fig. 7 Photograph of microstructure near the kerf