

2A12 铝合金激光切割热影响区及其影响分析*

Investigation of HAZ and Its Influence of Laser Cutting 2A12 Aluminum Alloy

西北工业大学现代设计与集成制造技术教育部重点实验室 武伟超 王永军
西安飞机工业(集团)有限责任公司 张新娟 李善良

[摘要] 采用脉冲 CO₂ 激光对 2mm 厚 2A12 铝合金进行了切割试验,研究了切口表面的形貌及成分,以及热影响区的尺寸和显微组织;以水切割为对照,分析了热影响区对试件单向拉伸性能和疲劳寿命的影响,并对疲劳断口进行了显微分析。

关键词: 激光切割 热影响区 显微组织 力学性能

[ABSTRACT] The pulsed CO₂ laser cutting experiment of 2A12 aluminum alloy is carried out to study the morphology and element of fracture surface as well as the size and microstructure of heat affected zone. Then, compared with water-jet cutting, the influences of heat affected zone on single-direction tensile properties and fatigue life of specimen are analyzed, and the fatigue fracture is studied using microscope.

Keywords: Laser cutting Heat affected zone Microstructure Mechanical property

2A12 铝合金以其良好的综合性能被广泛应用于航空工业中,而目前对激光切割铝合金的研究大多集中在工艺参数对切割质量的影响方面。对激光切割所产生的热影响区本身及其影响的研究方面则比较少。陈可心等^[1]进行了 CO₂ 激光切割铝面板试验,分析了切割速度和辅助氧气压力对切割质量及熔渣附着量的影响。D.Araujo 等^[2]分析了采用连续 CO₂ 激光切割铝合金时切口的表面形貌及其对试样疲劳性能的影响。F.J.Carpio 等^[3]进行了连续 CO₂ 激光切割铝合金圆孔疲劳试样的疲劳性能试验,对比了标准铝合金 N-S 曲线并分析了试件的疲劳寿命与切口表面质量的关系。

本课题采用试验方式,研究了激光切割热影响区本身及其对 2A12 铝合金板材性能的影响,并进行了水切割与激光切割的对比试验。

1 试验条件和方法

试验用 2A12 铝合金板材的厚度为 2mm,热处理状

态为 T₃。

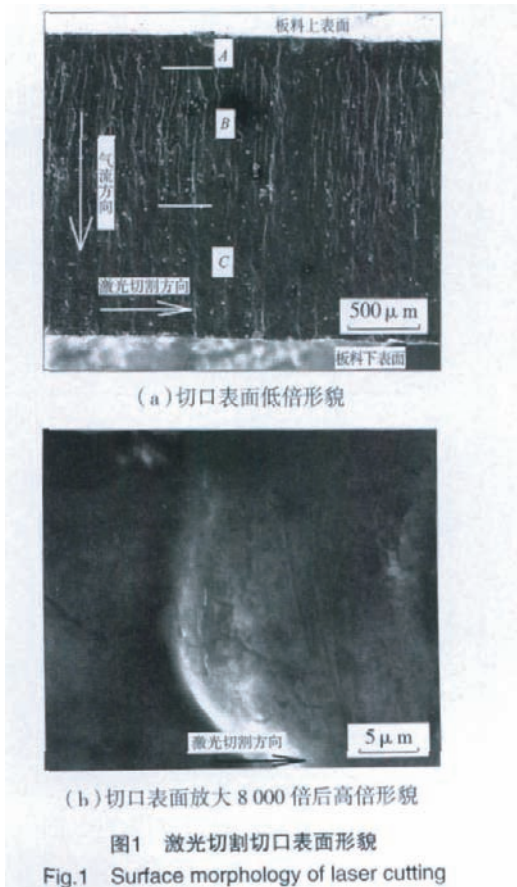
单向拉伸试样和疲劳试样根据国标 GB/T228-2002 和 GB-3075-82 分别制备,切割方向沿板料轧制方向,在意大利 Prima Industrie 公司 OPTIMO 型脉冲 CO₂ 激光器上进行。切割参数为:输出功率 2kW,激光频率为 190Hz,循环周期为 60%,理论束斑直径为 0.2mm,离焦量为 3mm,切割速度为 1 500mm/min,辅助气体为氮气,压力为 0.9MPa。水切割试样在 Flow 公司 IFB1012 型水切割机切割。

2 试验结果与分析

2.1 切口表面形貌及元素分析

在本试验中,激光切割所采用的辅助气体为氮气,切割机理为激光束熔化切割。切口表面如图 1 所示。

在切口表面中部 B 区分布大量由凝固的金属热影



* 清华大学先进成形制造教育部重点实验室开放基金资助项目 (2006002)。

响物形成的沟槽,沿气流方向分布,但并非完全与气流方向平行;在切口表面上部A区和下部C区(靠近板料上表面和板料下表面的区域)则比较平滑,且C区较A区宽,如图1(a)所示。切割时,A区的金属被激光照射后迅速地被融化和汽化,随后被压力较大的辅助气流吹走;而后B区的金属被熔化,此时气流进入切口后只能流向后部,因而将融化的金属熔融物吹向后方,最终未能被气流吹掉的熔融状态的金属冷却粘附在切口表面上。而C区,辅助气流在切口内已变为紊流,压力下降,因而C区较为平滑。

将切口表面放大8000倍后观察发现,在凝结的金属熔流上,与激光切割相反的方向存在较深的槽,且表面有大量的微裂纹,如图1(b)所示。在切割过程中,气流对切口表面的金属熔融物快速冷却,且铝导热性较好,因而切口表面的熔融层组织迅速凝固和收缩,在切口表面形成大量的微裂纹。采用双管显微镜测量试件切口表面任意10点的平均粗糙度为 $3.5\mu\text{m}$,较水切割试件的粗糙度 $5.4\mu\text{m}$ 小。

采用能谱分析仪(EDS)对切口表面进行面扫描,发现切口表面上Al、Mg、Cu三种主要合金元素元素比例未发生明显变化,如图2所示。未发现氮元素存在,但发现有少量氧元素存在,说明氮气作为辅助气体,本身未与基体发生反应,但空气中的氧气使得切口表面发生氧化。

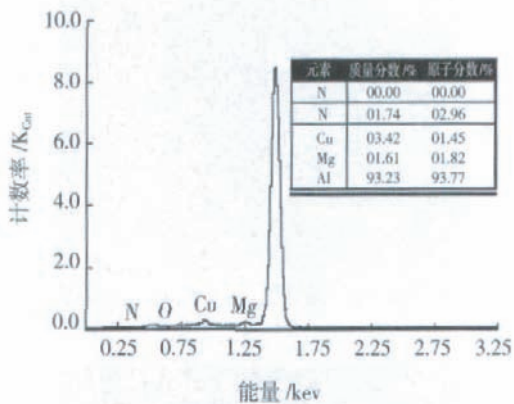


图2 切割表面元素含量分析
Fig.2 Element analysis of laser cutting surface

2.2 激光切割对单向拉伸性能的影响

将6个激光切割试样分为2组,一组未进行任何处理,另一组用砂纸将切口表面打磨光滑。由于水切割在切口周围不产生热影响区,因而采用水切割方式切割试样6个,同样分为未打磨组和打磨组,作为对照。拉伸试样标距长度为50mm,标距宽度为20mm,厚度为2mm。在CSS-44110型电子万能试验机上进行单向拉

伸试验,结果如表1所示。

从表1可以看出,对激光切割的试件而言,无论是否打磨切口表面热影响区,试样的抗拉强度、屈服强度、延伸率和断面收缩率相差不大,热影响区对试件单向拉伸性能的影响是有限的。与水切割的试件相比,激光切割试件的单向拉伸性能与其相当。这是因为热影响区尺寸仅为0.1~0.2mm左右,相对单向拉伸试件20mm的宽度很小,如图3所示。

表1 单向拉伸试验结果

项目	抗拉强度 / MPa	屈服强度 / MPa	延伸率 / %	断面收缩率 / %
激光	443.22	314.76	18.88	22.23
激光(打磨)	458.30	336.51	17.44	22.71
水切割	449.55	286.21	16.58	20.51
水切割(打磨)	443.1	315.45	20.24	26.82

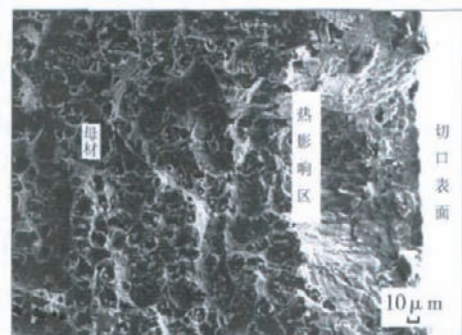


图3 单向拉伸试件断口
Fig.3 Fracture of single-direction tensile specimen

2.3 热影响区尺寸及显微组织分析

取切口横截面制作金相试样,可以发现热影响区的宽度约为0.12mm,如图4所示。由于在切割过程中,从切口中心到母材的温度分布存在梯度,因而,金相照片中可以发现分为4部分:母材、热影响区A、热影响区B、热影响区C。

在靠近母材的热影响区A区, α 相晶粒尺寸和形状无明显变化,局部晶界粗化发毛。这是由于热传导作用使得合金在晶界局部区域有复熔现象,在冷却过程中,原本固溶于晶粒内部的固溶物重新在晶界附近富集分布,使得晶界局部晶界圆滑、粗化发毛。

在热影响区B区,温度相对C区较低。温度降低后晶粒尺寸较小,明亮发白,细长均匀,形貌与铝合金铸造组织相近;晶界粗大密集,呈黑色,由在凝固过程中的固溶物析出构成。

在靠近切口中心的热影响区C区,切割时温度最

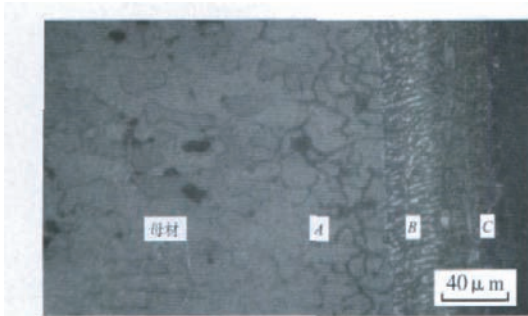


图4 激光切割热影响区
Fig.4 Heat affected zone of laser cutting

高,晶粒的晶界在升温过程中溶解。随后在冷却过程中晶粒沿切口中心向母材方向严重聚集长大,且在特别粗大的晶粒内部弥散分布有黑色的固溶析出物;晶界较为平直粗大。

2.4 激光切割对疲劳性能的影响

试件分为3组,每组3个:第一组激光切割后,未对切口表面进行任何处理;第二组用砂纸将切口表面热影响区去除;第三组为水切割试件,未对切口表面进行任何处理。在高频疲劳试验机上进行拉-拉疲劳试验,载荷为正弦波载荷,应力比为 $R=0.1$,频率为93Hz。试验环境为室内环境,温度为室温。在不同的载荷条件下,3种试件的疲劳寿命如图5所示。

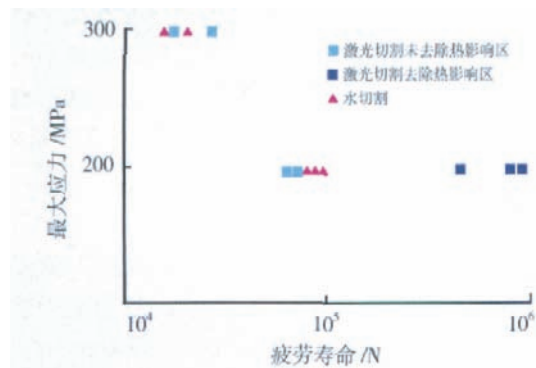


图5 2A12铝合金激光切割及水切割疲劳寿命
Fig.5 Fatigue life of 2A12 aluminum specimens cut by laser and water-jet

对比不同载荷条件下激光切割试件的寿命,在 $\sigma_{\max}=200\text{MPa}$ 的应力水平下,打磨过的激光切割试件的疲劳寿命接近 10^6 次;而未打磨过试件的疲劳寿命仅接近 10^5 次量级,与水切割试件的疲劳寿命接近,说明激光切割热影响区对试件的疲劳寿命有很大的影响。而在 $\sigma_{\max}=300\text{MPa}$ 的应力水平下,未打磨的激光切割试件的疲劳寿命与水切割试件的疲劳寿命相近。

2.5 疲劳试样断口形貌及分析

通常,局部变形区和应力集中区往往就是疲劳开裂的位置^[4],而疲劳断口一般可分为3个具有不同形貌特

征的区域,即疲劳源区、疲劳裂纹扩展区和瞬断区,分别代表了疲劳破坏的不同阶段。用扫描电镜(SEM)对疲劳断口进行微观形貌特征分析,如图6所示。

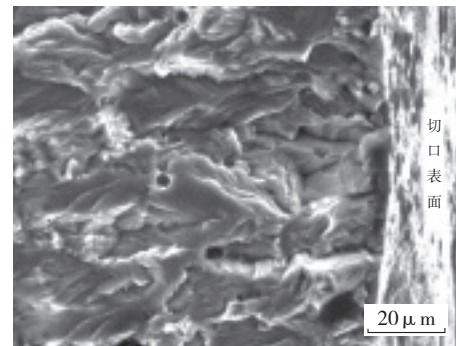


图6 疲劳断口形貌
Fig.6 Surface morphology of fatigue fracture

疲劳裂纹源产生于切口表面热影响层。这是由于切口表面本身存在大量的由熔融的金属凝结而成的沟槽,导致切口表面较为粗糙,存在有严重的应力集中,而且在整个切口表面原本就分布有大量的微小裂纹。同时可以发现,在断口表面存在 $3\sim 5\mu\text{m}$ 的微孔。这是由于在加热中,由于温度过高,本来存在于材料内部的微小气泡在加热过程中急剧膨胀,金属冷却下来后就在组织中形成外形光滑完整的小圆形微孔^[5]。

观察裂纹扩展区可以发现:整个疲劳裂纹扩展区为解理状断口,有大量的台阶和小平面构成,没有发现明显的疲劳条带和韧窝存在,体现出脆性疲劳裂纹扩展的特征。这是热影响层金属由于被辅助气体急剧降温冷却,在施加循环载荷之后,裂纹沿着脆化的晶界向材料内部不断扩展。因而,由于较脆的热影响区的存在,导致试件裂纹加速产生和扩展,降低了试件的疲劳寿命。

3 结论

(1)切口表面分布有大量因辅助气体吹动和凝固收缩所产生的微小沟槽和显微裂纹;切口表面本身的合金元素比例无明显变化,但有少量氧元素存在,表面有氧化现象发生;辅助气体氮气未与板料发生反应;表面粗糙度约为 $3.5\mu\text{m}$,较水切割质量好。

(2)本课题切割参数下对应的热影响区尺寸约为 $0.1\sim 0.2\text{mm}$,其对试件单向拉伸性能影响很小。

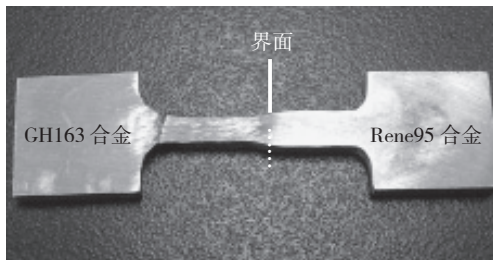
(3)热影响区可分为A区、B区以及C区;A区晶粒尺寸无变化,固溶物析出富集使得晶界圆滑粗化;B区晶粒细小较亮,晶界粗大,类似铸造组织;热影响区C区中的晶粒在凝结过程中变得非常粗大,内部弥散分布有固溶析出物,因而颜色发暗。(下转第97页)

表3 激光熔化沉积镍基合金中颗粒相的成分分析结果

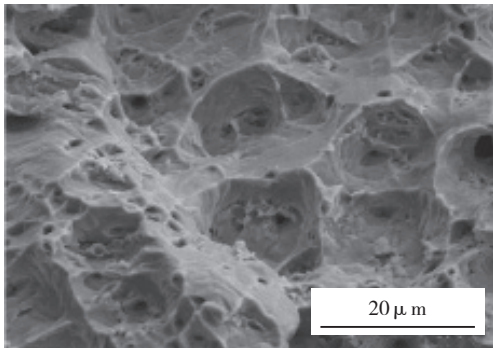
w/%

元素		Cr	Co	Al	Ti	Nb	Mo	W	C	B	Ni
Rene95	晶界颗粒相	4.16	2.39	0.60	5.91	10.6	7.65	2.09	17.43	14.27	34.9
	晶内颗粒相	4.22	2.01	0.57	9.10	9.11	7.01	2.21	15.43	12.71	36.63
GH163	晶界颗粒相	11.68	10.08	0.23	11.49	—	15.20	—	13.80	9.80	27.52

生塑性变形,双合金界面完好,断裂后的宏观照片见图6(a)。图6(b)为断口的SEM形貌,断口存在大量细小的韧窝,表明GH163合金具有良好的塑性。



(a) 断裂后宏观照片



(b) 断口 SEM 形貌

图6 激光熔化沉积GH163/Rene95
镍基双合金的拉伸断口Fig.6 Surface fracture morphologies of laser direct
deposited GH163/Rene95 nickel based dual-alloy

3 结论

(1) 利用激光熔化沉积方法制备出GH163/Rene95镍基双合金薄壁,合金层与层之间呈现外延生长的定向枝晶,双合金的界面处也呈现外延生长特征,双合金结合处观察不到明显的界面存在。

(2) 在2种合金的界面存在宽度约200 μm的过渡区,过渡区的显微硬度从GH163合金到Rene95合金逐渐升高。

(3) GH163/Rene95镍基双合金的界面结合强度高于沉积态GH163合金的强度,沉积态GH163合金的强度在800 MPa左右,呈现明显的韧性断裂特征。

参考文献

- [1] GAYDAJ, GABBT P, KANTZOSP T. The effect of dual microstructure heat treatment on an advanced nickel-based disk alloy. *Superalloy*, TMS, 2004:323-330.
- [2] 毛健,江武祥,呼和,等. 双合金热等静压复合工艺研究. *航空材料学报*, 1996, 16(4): 7-12.
- [3] Zhang Y Z, Wei Z M, Shi L K, et al. Characterization of laser powder deposited Ti-TiC composites and functional gradient materials. *Journal of Materials Processing Technology*, 2008, 206: 438-444.
- [4] 《工程材料实用手册》编辑委员会. *工程材料使用手册*. 北京: 中国标准出版社, 2002.
- [5] 张亚玮,张述泉,王华明. 激光熔化沉积定向快速凝固高温合金组织及性能. *稀有金属材料与工程*, 2008, 37(1): 169-173.
- [6] 王华明,张凌云,李安,等. 高性能航空金属结构材料及特种涂层激光熔化沉积制备与成形研究进展. 2008, 33(1): 82-85.
- [7] 胡本芙,章守华. 镍基粉末高温合金FGH95涡轮盘材料研究. *金属热处理学报*, 1997, 18(3): 28-37.

(责编 玉龙)

(上接第93页)

(4) 由于热影响区材料较脆,且切口表面存在应力集中和微裂纹,使得试件的疲劳寿命降低;激光切割试件的疲劳寿命与水切割试件的疲劳寿命相当。

(5) 疲劳源产生于切口表面。由于切口表面存在应力集中和粗糙的沟槽以及微裂纹,因而易于产生裂纹。裂纹扩展区为解理状断口,是裂纹沿着脆化的晶界向材料内部不断扩展而产生的,体现出脆性沿晶断裂的特征。

参考文献

- [1] 陈可心. 仪表铝面板的激光切割. *应用激光*, 1998(2): 33-34.
- [2] Araujo D. Microstructural study of CO₂ laser machined heat affected zone of 2024 aluminum alloy. *Applied Surface Science*. 2003, 208-209: 210-217.
- [3] F J Carpio. Fatigue behaviour of laser machined 2024 T3 aeronautic aluminium alloy. *Applied Surface Science* 2003, 208-209: 194-198.
- [4] Engel L, Klingele K. 孟锡明译. *An atlas of metal damage*. 北京: 机械工业出版社, 1990.
- [5] 管征芳. 2A12合金金相组织与机械性能分析探讨. *电讯工程*. 2001, 1: 27-33.

(责编 依然)