

7050 高强铝合金激光焊接接头的组织性能

谢超杰¹, 杨尚磊^{1,2}, 刘浩博¹, 曹亚明¹, 张琪¹, 王远¹¹上海工程技术大学材料工程学院, 上海 201620;²上海工程技术大学上海市高强激光智能加工装备关键技术产学研开发中心, 上海 201620

摘要 采用光纤激光对 3 mm 厚的 7050 铝合金板进行了对接焊, 分析了焊接工艺对焊缝成形的影响, 并对接头的微观组织、化学成分、力学性能及断口特征进行了研究。结果表明, 当激光功率为 3 kW, 焊接速度为 4 m·min⁻¹, 光斑直径为 0.2 mm 时, 能够得到性能良好的焊接接头。焊缝中心以等轴晶组织为主, 晶界处弥散分布着 Al-Cu 金属间化合物, 焊缝边缘为柱状晶组织, 热影响区(HAZ)较窄。焊缝中无强化相析出, 热影响区的强化相有所溶解。接头硬度分布不均匀, 焊缝处硬度最低, 热影响区发生明显软化。焊接接头抗拉强度为 307 MPa, 接头拉伸后断于焊缝, 断口处有小韧窝, 呈沿晶脆性断裂特征。

关键词 激光技术; 激光焊接; 7050 铝合金; 微观组织; 力学性能

中图分类号 TG456.7

文献标识码 A

doi: 10.3788/LOP55.031403

Microstructures and Mechanical Properties of 7050 Ultrahigh-Strength Aluminum Alloy Joints by Laser Welding

Xie Chaojie¹, Yang Shanglei^{1,2}, Liu Haobo¹, Cao Yaming¹, Zhang Qi¹, Wang Yuan¹¹School of Materials Engineering, Shanghai University of Engineering Science, Shanghai 201620, China;²Shanghai Research & Development Center for Key Technologies of Ultra-Intense Laser Processing Equipments, Shanghai University of Engineering Science, Shanghai 201620, China

Abstract The butt welding of 3 mm thick 7050 aluminum alloy plates by using fiber lasers is conducted. The effect of welding process on weld forming is studied, and microstructures, chemical compositions, mechanical properties and fracture characteristics of joints are also investigated. The results show that well joints can be obtained when laser power of 3 kW, welding speed of 4 m·min⁻¹, and spot diameter of 0.2 mm are chosen. There exist mainly equiaxed grains in the weld center, Al-Cu intermetallic compounds are dispersed in the grain boundaries, there are mainly columnar dendrite grains in the weld edge, and the heat affected zone (HAZ) is relatively narrow. No precipitation is found in the weld and the strengthening phase in the HAZ melts slightly. The microhardness distribution of weld joints is non-uniform, the hardness at the weld is the lowest, and there exists obvious softening in the HAZ. The tensile strength of welded joints is 307 MPa, the joints fracture along the weld after tensile, and there exist small dimples in the fractures, which shows a character of intergranular brittleness fracture.

Key words laser technique; laser welding; 7050 aluminum alloy; microstructures; mechanical properties

OCIS codes 140.3390; 160.3900; 350.3390

1 引言

7050 铝合金属于 Al-Zn-Mg-Cu 可热处理强化

铝合金, 其中 Zn 和 Mg 起主要强化作用^[1]。7050 高强铝合金具有比强度高、加工性能及耐腐蚀性能好、断裂韧度高等特性, 主要应用于高铁、飞机、火箭

收稿日期: 2017-06-23; **收到修改稿日期:** 2017-07-06

基金项目: 上海市自然科学基金(14ZR1418300)、上海汽车工业科技发展基金(1404)、上海工程技术大学研究生科研创新项目(16KY0510)

作者简介: 谢超杰(1991—), 男, 硕士研究生, 主要从事高强铝合金焊接及疲劳性能方面的研究。E-mail: xcj0502@163.com

导师简介: 杨尚磊(1968—), 男, 博士, 教授, 硕士生导师。主要从事轻质材料连接及高能束加工方面的研究。

E-mail: yslei@126.com(通信联系人)

等高强度结构件,已成为重要的结构材料之一^[2-5]。焊接是高强铝合金结构件最常用的连接方法,可以实现轻量化并提高装配效率,因此,高强铝合金焊接研究具有重要意义^[6]。

铝合金焊接方法主要有固相焊接和熔化焊。固相焊接主要为搅拌摩擦焊,高强铝合金采用搅拌摩擦焊可以获得良好的焊接接头,但搅拌摩擦焊受焊接装配影响较大。Tran等^[7]研究发现,加工时间会影响搅拌摩擦焊 5750-7075 合金的焊接接头性能,搅拌摩擦焊焊接效率较低且存在起焊点及终点匙孔等缺陷。传统的熔化焊接方法有熔化极气体保护焊(GMAW)和钨极稀有气体保护焊(TIG),但这些焊接方法的热输入较大,焊接接头的热影响区较大且软化严重。Kumar等^[8]通过GMAW对6082铝合金薄板进行焊接,得到了良好的焊接接头,但降低了接头的抗疲劳性能。虽然铝合金电子束焊接速度快,但焊缝根部易产生气孔缺陷,热影响区析出相比较较大,焊接成本较高^[9]。与传统熔化焊接方法相比,激光焊接具有热输入小、能量集中、焊缝熔宽比大、焊接热影响区窄、自动化控制易于实现等优势^[10]。然而,高强铝合金激光焊接的难度较大,存在大激光束反射率、焊接接头气孔、液化裂纹等缺陷^[11-12]。和岳

等^[13]研究发现,坡口对光纤激光压焊具有明显的会聚作用。蔡华等^[14]采用激光填丝焊对薄板高强铝合金进行了焊接,发现选择合适的工艺可使焊缝晶粒细化,热裂纹倾向降低。杨智华等^[15]发现,7系高强铝合金激光填丝焊的静态拉伸试样断于焊缝,焊缝是接头的薄弱环节。周逸凡等^[16]研究发现,合适的焊接工艺能够有效降低气孔的产生。

本文采用光纤激光器对3 mm厚的7050高强铝合金进行了对接自熔焊,研究了工艺参数对焊缝成形及焊接缺陷的影响,分析了焊缝的结晶组织,母材及焊缝的断裂形式,测试了焊缝和热影响区的化学成分及接头的力学性能,并观察了断口形貌。

2 试验材料及方法

2.1 试验材料

试验材料选用厚度为3 mm的7050铝合金轧制板材,其化学成分和力学性能分别见表1和表2。试样尺寸为150 mm×100 mm×3 mm。

表1 7050铝合金化学成分(质量分数,%)

Table 1 Chemical compositions of 7050 aluminum alloy (mass fraction, %)

Element	Zn	Mg	Cu	Cr	Zr	Si	Mn	Fe	Ti	Al
Content	6.0	2.2	2.2	0.04	0.1	0.12	0.10	0.1	0.06	Bal.

表2 7050铝合金的力学性能

Table 2 Mechanical properties of 7050 aluminum alloy

Item	Yield strength /MPa	Tensile strength /MPa	Elongation /%	Microhardness /HV
Value	455-480	520-550	≥12	≥160

2.2 试验方法

采用德国IPG公司生产的YLS-5000型光纤激光器对铝合金进行激光对接焊,正面和背面焊接的保护气均采用氩气,保护气流量分别为20 L·min⁻¹和15 L·min⁻¹。激光功率为3 kW,焊接速度分别为2, 3, 4 m·min⁻¹,离焦量为0 mm,激光波长为1070 nm,光斑直径为0.2 mm。焊接前用砂纸对试样正反面进行打磨,再用丙酮溶液进行表面清洗后吹干备用。

焊接完成后截取焊缝横截面制备金相试样,通过日本基恩士公司生产的VHX-600型超景深数码显微镜和日本日立公司生产的S-3400型扫描电子显微镜(SEM)观察接头微观组织形貌;利用荷兰帕纳科公司生产的XPerpPRO型X射线衍射仪(XRD)对焊接接头进行相结构分析;采用上海泰明公司生产的HXD-1000型维氏硬度计进行接头硬度测试,硬度测试点间距为0.1 mm,加载力为1 N,保荷时间为15 s,每个点测试两次后取平

均值;采用德国Zwick/Roell公司生产的Amsler HB250型材料试验机进行拉伸试验,并通过SEM进行断口观察。接头拉伸试样示意图如图1所示。

3 试验结果及分析

3.1 工艺参数对焊缝成形的影响

当激光功率、离焦量、激光波长、光斑直径等焊接参数不变时,焊接速度对接头成形的影响如图2所示。从图中可以看出,不同焊接速度下的焊缝都发生了熔透现象,由于焊接时没有采用填充金属,焊缝表面稍有塌陷。当焊接速度为2 m·min⁻¹时,焊缝最宽,为1811.00 μm,如图2(a)所示。随着焊接速度的增大,焊缝宽度减小,但当焊接速度为3 m·min⁻¹时,接头中出现明显的气孔,如图2(b)所示。当焊接速度为4 m·min⁻¹时,焊缝中没有裂纹和夹杂等缺陷,如图2(c)所示。

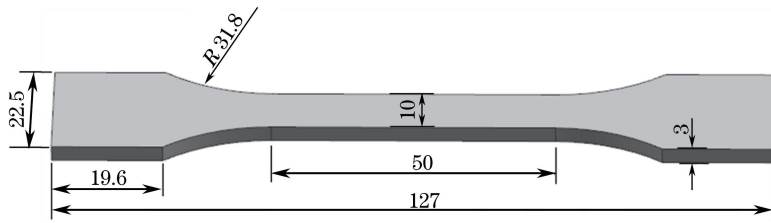
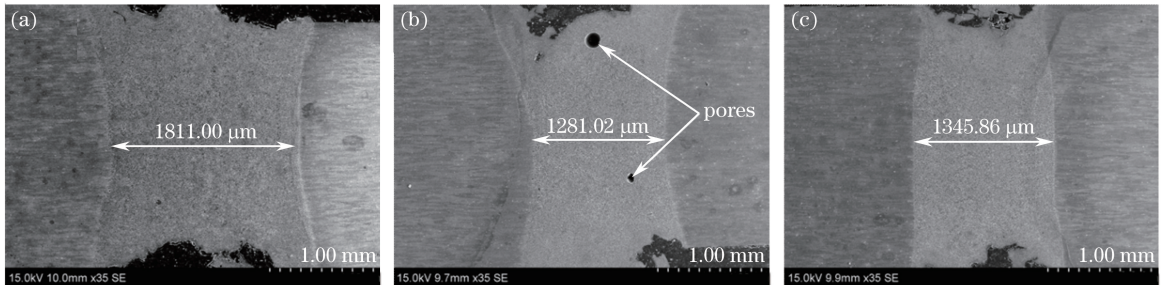


图 1 拉伸试样示意图

Fig. 1 Schematic of tensile specimen

图 2 不同焊接速度下接头的宏观形貌。(a) $2 \text{ m}\cdot\text{min}^{-1}$; (b) $3 \text{ m}\cdot\text{min}^{-1}$; (c) $4 \text{ m}\cdot\text{min}^{-1}$ Fig. 2 Weld appearances under different welding speeds. (a) $2 \text{ m}\cdot\text{min}^{-1}$; (b) $3 \text{ m}\cdot\text{min}^{-1}$; (c) $4 \text{ m}\cdot\text{min}^{-1}$

3.2 接头显微组织分析

当焊接速度为 $4 \text{ m}\cdot\text{min}^{-1}$ 时,焊接接头的显微组织形貌如图 3 所示。由图 3(a)可以看出,接头显微组织发生了明显的变化,接头中无裂纹、气孔等缺陷。这是由于焊接时没有填丝且焊接是在高温下进行,焊缝材料发生烧损,导致表面稍有塌陷。图 3(b)、(c)所示分别为图 3(a)中焊缝中心(A)和焊缝边界(B)的显微组织形貌。从图 3(b)可以看出,焊缝中心为等轴晶,并存在少量的柱状树枝晶。这是因为焊缝熔池中心处液相温度梯度很小,液相中出现了成分过冷,致使液相内部产生了可以自由生长的新晶核。由图 3(c)可以看出,靠近熔合区的

焊缝边缘为典型的柱状晶组织,在焊接热循环作用下,熔池的结晶从半熔化的母材(BM)晶粒表面开始以柱状晶形式向焊缝中心生长,表现出典型的联生结晶特点。图 3(d)所示为图 3(c)中虚线圈处熔合区的显微组织,可以看到焊缝区(WZ)、熔合区(FZ)、热影响区(HAZ)的组织形貌,其中,熔合区分为半熔化区(SMZ)和未混合区(UZ)。半熔化区母材晶粒发生了局部熔化,而未混合区晶粒已完全熔化,形成了粗大的胞状晶。在焊接热循环作用下,熔合区发生局部过热和成分偏析,该区化学成分及组织形态不均匀,成为接头最薄弱的环节,从而影响接头的力学性能^[17]。

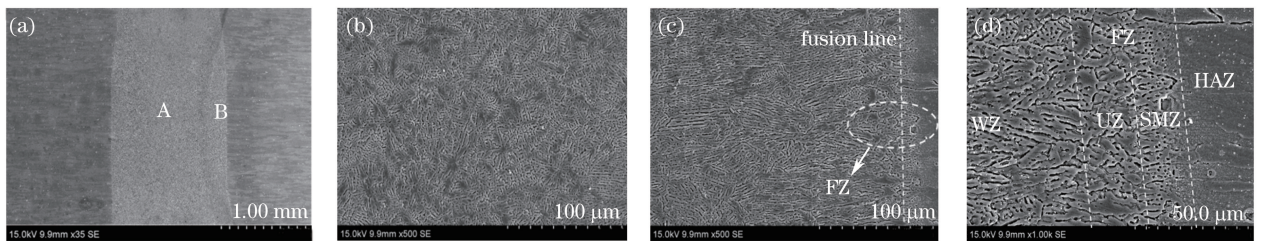


图 3 焊接接头的 SEM 图。(a) 宏观形貌; (b) 焊缝中心的显微组织; (c) 焊缝边界的显微组织; (d) 熔合区显微组织

Fig. 3 SEM images of welded joint. (a) Macro-morphology; (b) microstructure of weld center;

(c) microstructure of weld boundary; (d) microstructure in FZ

3.3 接头化学成分及物相分析

激光焊属于高能量密度焊接方法,焊接过程中温度过高会造成接头烧损。焊接熔合区附近显微组织及成分线扫描曲线如图 4 所示。图 4(a)中

标示出了线扫描方向及长度。由图 4(b)可见,熔合区附近主要元素为 Al、Cu、Mg、Zn,熔合区与热影响区交界处的 Mg、Zn 元素与焊缝及母材中含有的元素相近,Al 元素在焊缝处分布不均,而在热影

响区基本没有变化;Cu 元素在半熔化区略高于母材和焊缝。

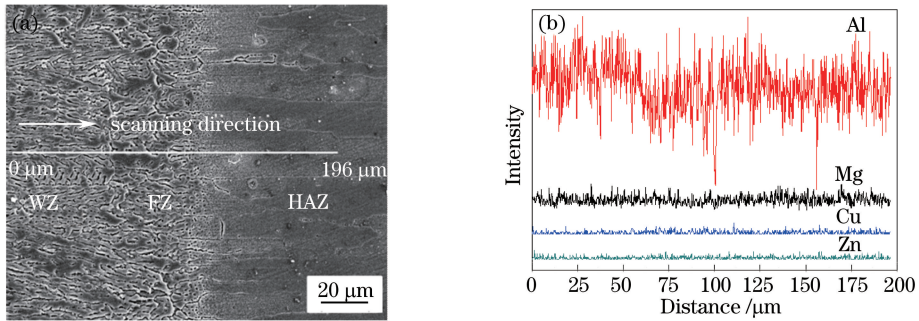


图 4 熔合区(a)显微组织 SEM 图和(b)成分扫描曲线

Fig. 4 (a) SEM image of microstructure and (b) linear scanning curves of elements in FZ

7050 铝合金中的合金元素及强化相对焊接接头性能起着关键作用。图 5(a)~(c)所示分别为焊缝中心、半熔化区、热影响区微观组织形貌,可以看出,焊缝中心晶界处弥散分布着细小的灰白色金属颗粒。利用能谱仪(EDS)测试颗粒 *a* 点,结果如图 5(d)所示,可以看出,焊缝中心晶界处的 Mg 和 Zn 元素的含量基本没有变化,但 Cu 元素的含量明显增大。半熔化区及热影响区存在未熔、粗大且形

状规则的第二相大颗粒,半熔化区颗粒受热发生部分熔化。对 *b*、*c* 两点未熔相进行的 EDS 测试结果分别如图 5(e)、(f)所示。从图 5(e)可以看出,半熔化区含有 Al、Zn、Mg、Cu 和 Cr 元素,且 Mg 元素含量增大,由于 Cr 元素在高温时才能分解,故确定图 5(c)中点 *c* 为含 Cr 高温分解质点。图 5(f)所示的元素种类与图 5(e)相同,但各元素的含量发生了变化。

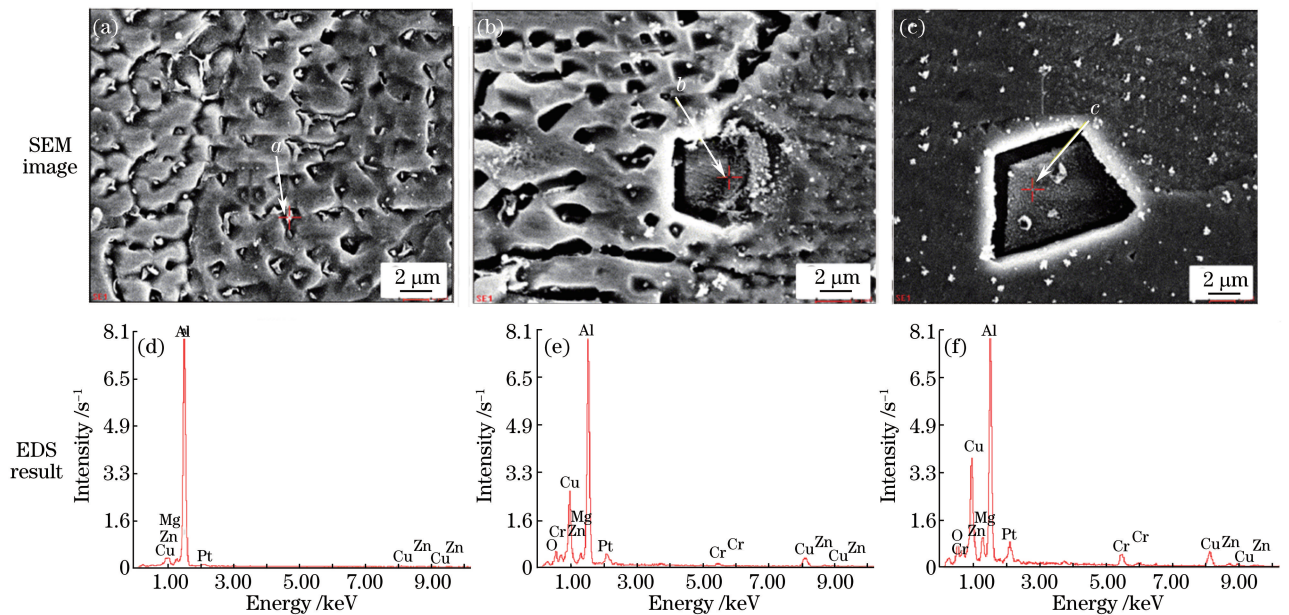


图 5 焊接接头的(a)(d)焊缝中心,(b)(e)半熔化区和(c)(f)热影响区

Fig. 5 (a)(d) Weld center, (b)(e) SMZ, and (c)(f) HAZ of welded joint

焊缝和热影响区的 XRD 测试结果如图 6 所示。由图 6(a)可知,焊缝中除了 Al 外,还含有一定量的 Al-Cu 相,这与 EDS 测试结果中焊缝晶界析出相相同。从图 6(b)可以看出,母材和热影响区衍射峰的位置基本相同,但衍射峰的强弱发生了明显变化,母材除了有 Al 的衍射峰外,在衍射角为 40° 附近还有微弱的 $MgZn_2$ 衍射峰,热影响区没有发现明显的

$MgZn_2$ 衍射峰。这是因为 $MgZn_2$ 为易熔强化相,在热影响区受热发生熔解。在衍射角为 37° 和 43° 附近的母材和热影响区均发现微弱的 $Al_{18}Mg_3Cr_2$ 相衍射峰,可以验证半熔化区和热影响区富含 Cr 相。除此之外,图 6(b)中并未出现其他物相的衍射峰,这可能由于第二相的含量较小且试样过小,X 射线不能产生明显衍射。

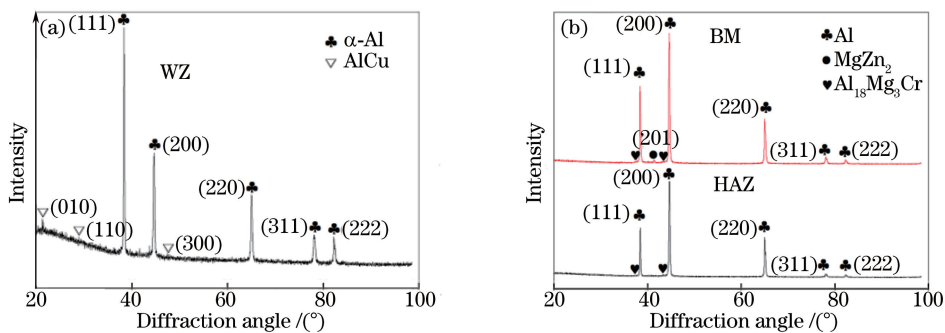


图 6 XRD 图谱。(a)焊缝区;(b)母材和热影响区

Fig. 6 XRD images. (a) WZ; (b) BM and HAZ

3.4 力学性能分析

焊接接头横截面中心沿水平方向的显微硬度分布如图 7 所示。由图可见,焊接接头各区域的硬度分布不均匀,焊缝区硬度最小,平均显微硬度为 105 HV,为母材的 60.8%;焊缝边缘半熔化区的硬度比焊缝中心的大,其值为 114 HV。这是由于半熔化区有局部未熔化的固相及硬质强化相存在,焊缝区两侧的热影响区宽度约为 3.2 mm,在焊接热循环的作用下,热影响区的硬度分布不均匀。热影响区分为固溶区(m)和软化区(n),由于

焊接峰值温度高及焊后冷却速度快,硬质相来不及析出,邻近焊缝的固溶区发生固溶,焊后发生自然时效,其硬度较大,平均显微硬度为 137 HV;在远离焊缝的软化区,强化相脱离固溶体而转变为平衡相,合金发生软化^[18],即存在明显的软化区,该软化区是接头的薄弱环节。随着热源与焊缝距离的增大,热影响区硬度值逐渐增大直到接近母材。

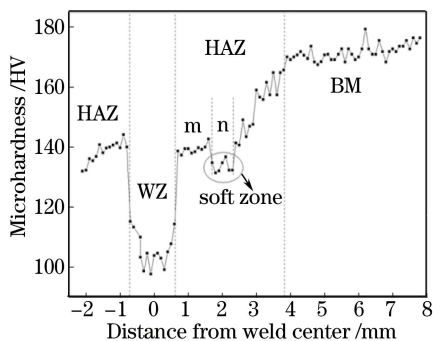


图 7 焊接接头的显微硬度分布

Fig. 7 Microhardness distribution of welded joint

母材及焊接接头拉伸试验的应力-应变曲线如图 8 所示。从图 8(a)可以看出,当应变量为 0~1.5%时,应力-应变呈线性关系,且应力变化较快;随着应变的继续增大,应力发生较小变化,直至试样发生断裂。从图 8(b)可以看出,焊接试样从拉伸直至断裂,应力-应变呈近线性关系,当应变为 1.08%时,试样发生断裂。这是由于焊缝中心成分分布不均匀, α -Al 晶界上析出大量的脆性 Al-Cu 金属间化合物,其在应力作用下产生裂纹最终断裂,使得焊缝成为接头的“危险区”。母材及焊接接头的拉伸试验结果见表 3,母材抗拉强度达到了 545.78 MPa,且具有较大的断后延伸率;焊接接头的抗拉强度为 307.23 MPa,且断裂后无明显缩颈现象,塑性变形较差。

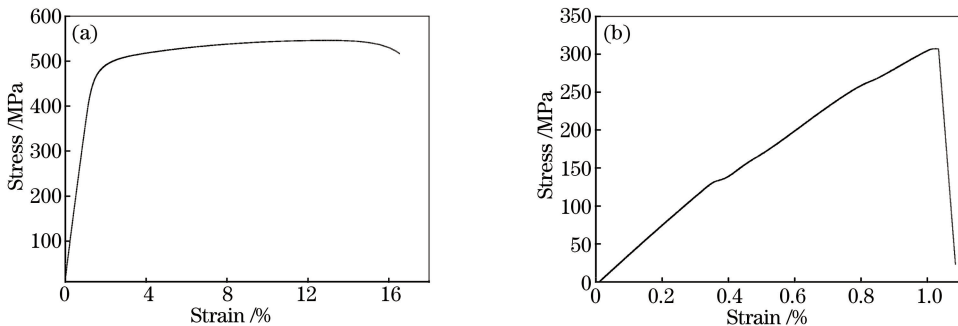


图 8 应力-应变曲线。(a)母材;(b)焊接接头

Fig. 8 Stress-strain curves. (a) BM; (b) welded joint

表3 母材和焊接接头的拉伸试验结果

Table 3 Tensile test results of BM and welded joint

Material	Tensile strength /MPa	Elongation /%	Fracture site	Phenomenon of necking
BM	545.78	16.10	-	Yes
Welded joint	307.23	1.08	WZ	No

母材和焊接接头断裂的宏观截面如图9所示。从图9(a)可以看出,断裂试样发生了明显的缩颈,断口平面与外加应力方向夹角近似成 45° ,断口呈

楔形,表面较亮但不发光。图9(b)所示是焊接速度为 $4\text{ m}\cdot\text{min}^{-1}$ 时的接头断裂宏观形貌,可以看到,试样在焊缝中心处断裂,接头没有发生明显缩颈。

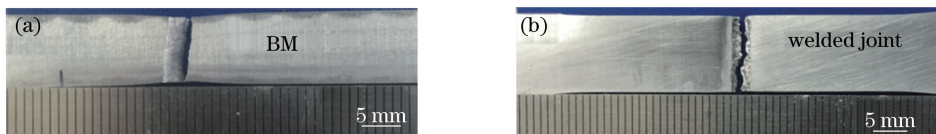


图9 断裂宏观截面。(a)母材;(b)焊接接头

Fig. 9 Macroscopic cross section of fracture. (a) BM; (b) welded joint

图9(a)所示断口形貌的SEM照片如图10(a)~(c)所示。从图10(a)可以看出,断口由类似解理台阶的层片状构成,但铝合金材料属于面心立方晶体,自身有大量的滑移系,因此不属于解理断裂。图10(a)中箭头处所示为拉伸过程中由应力集中而破碎的强化相粒子,经EDS分析,其为Al-Cu-Mg-Cr相,粒子两边形成台阶,其在一定程度上阻碍了裂纹的扩展,提高了合金的强度;仔细观察发现,片层由大量的韧窝和撕裂棱连接,因此判断为准解理断裂^[19]。由图10(b)可以看出,高倍镜下M区存在大量浅且细小的韧窝,韧窝深度较小,说明材料的塑性变形能力较差。从图10

(c)中可以看到,撕裂破碎的强化相周围分布着韧窝。

图9(b)所示断口形貌的SEM照片如图10(d)、(e)所示。从图10(d)可以看出,断口晶粒明显,呈现出具有不同多面体外形的冰糖状花样,为典型的沿晶断裂形貌^[20]。由于焊缝中心为等轴晶,晶界弥散分布着Al-Cu脆性化合物,因此,可判断裂纹沿等轴晶粒边界分离。从图10(e)可以看出,不同区域的断口表面有小韧窝,这是由于焊缝组织在晶界处偏析,拉伸过程中焊缝中发生了微孔的形核与聚集,因此可以进一步判断其为沿晶脆性断裂,焊缝塑性较母材差。

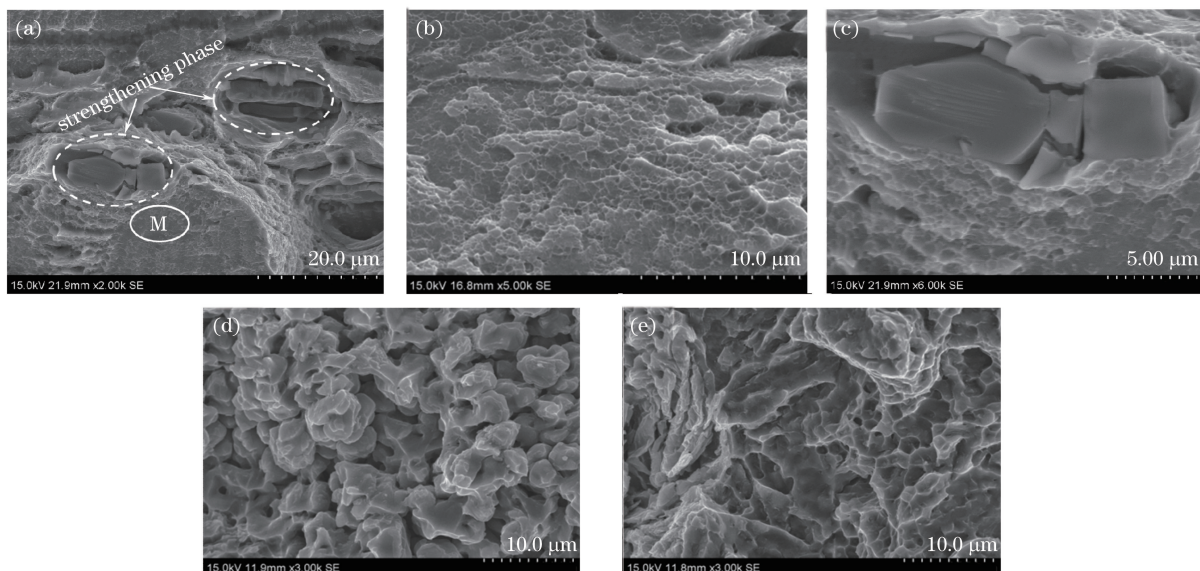


图10 拉伸断口形貌。(a)母材;(b)图10(a)中M区域的局部放大图;(c)图10(a)中强化相的局部放大图;(d)焊缝沿晶断裂;(e)焊缝微孔偏聚

Fig. 10 Morphologies of tensile fracture. (a) BM; (b) local magnification of M zone in Fig. 10(a); (c) local magnification of strengthening phase in Fig. 10(a); (d) intergranular fracture of weld; (e) microporous segregation of weld

4 结 论

采用光纤激光实现了 7050 高强铝合金的对接焊,得到以下结论。

1) 当激光功率为 3 kW,焊接速度为 $4 \text{ m} \cdot \text{min}^{-1}$,离焦量为 0 mm 时,焊接接头无气孔、裂纹等缺陷,焊接质量良好。

2) 焊缝中心主要为等轴晶,并含有少量的柱状树枝晶;靠近熔合区焊缝以柱状晶为主,其中未混合区为粗大的胞状晶。

3) 接头热影响区较窄,接头硬度分布不均匀,热影响区靠近焊缝处硬度值明显高于软化区。

4) 母材抗拉强度为 545 MPa,接头的抗拉强度为 307 MPa;母材为准解理断裂,接头拉伸试样断裂在焊缝,呈典型的沿晶脆性断裂。

参 考 文 献

- [1] 李念奎, 凌杲, 聂波, 等. 铝合金材料及其热处理技术[M]. 北京: 冶金工业出版社, 2012: 156-158.
- [2] Chen K H, Huang L P. Strengthening-toughening of 7xxx series high strength aluminum alloys by heat treatment[J]. Transactions of Nonferrous Metals Society of China, 2003, 13(3): 484-490.
- [3] Lin K L, Yang W X, Lü J X, *et al.* Laser beam welding study of 2198-T851 aluminum-lithium alloy [J]. Chinese Journal of Lasers, 2014, 41(1): 0103007.
林凯莉, 杨武雄, 吕俊霞, 等. 2198-T851 铝锂合金激光焊接工艺研究[J]. 中国激光, 2014, 41(1): 0103007.
- [4] Dursun T, Soutis C. Recent developments in advanced aircraft aluminium alloys[J]. Materials & Design, 2014, 56(4): 862-871.
- [5] 谢水生, 刘静安, 黄国杰. 铝加工生产技术 500 问[M]. 北京: 化学工业出版社, 2006: 183-188.
- [6] Wang P J, Qiao J S, Zhang Y Y, *et al.* Development of microstructures and mechanical properties of laser welded joint for spray formed 7055 high strength aluminum alloy[J]. Chinese Journal of Rare Metals, 2017, 41(7): 733-738.
王鹏建, 乔及森, 张阳羊, 等. 喷射成形 7055 铝合金激光焊接接头组织性能研究[J]. 稀有金属, 2017, 41(7): 733-738.
- [7] Tran V X, Pan J, Pan T. Effects of processing time on strengths and failure modes of dissimilar spot friction welds between aluminum 5754-O and 7075-T6 sheets [J]. Journal of Materials Processing

Technology, 2009, 209(8): 3724-3739.

- [8] Kumar R, Diltthey U, Dwivedi D K, *et al.* Thin sheet welding of Al 6082 alloy by AC pulse-GMA and AC wave pulse-GMA welding [J]. Materials & Design, 2009, 30(2): 306-313.
- [9] Zuo Y T, Wang F, Xiong B Q, *et al.* Microstructure and mechanical properties of spray formed Al-Zn-Mg-Cu alloy produced by electron-beam welding [J]. Chinese Journal of Rare Metals, 2010, 34(4): 624-628.
左玉婷, 王锋, 熊柏青, 等. 电子束焊喷射成形 Al-Zn-Mg-Cu 合金的组织性能研究[J]. 稀有金属, 2010, 34(4): 624-628.
- [10] Dong B Z, Yang W X, Wu S K, *et al.* Numerical analysis on the deformation controlling of T-joint LBW with auxiliary heat source for high strength aluminum alloy[J]. Chinese Journal of Lasers, 2015, 42(8): 0803002.
董韶喆, 杨武雄, 吴世凯, 等. 高强铝合金壁板结构 T 型接头辅助热源变形控制数值分析[J]. 中国激光, 2015, 42(8): 0803002.
- [11] 左铁钊. 高强铝合金的激光加工[M]. 北京: 国防工业出版社, 2008: 62-65.
- [12] Xia F B. Study on microstructures and properties of 7000 series aluminum alloy joints by laser beam welding[D]. Beijing: General Research Institute for Nonferrous Metals, 2013: 6-10.
夏丰滨. 汽车用 7000 系铝合金激光焊接接头组织与性能研究[D]. 北京: 北京有色金属研究总院, 2013: 6-10.
- [13] He Y, Wu Q, Zou J L, *et al.* Melting behavior of materials in grooves during fiber laser pressure welding of thin-sheet aluminum alloy [J]. Chinese Journal of Lasers, 2017, 44(6): 0602008.
和岳, 武强, 邹江林, 等. 薄板铝合金光纤激光压焊坡口内材料的熔化行为[J]. 中国激光, 2017, 44(6): 0602008.
- [14] Cai H, Lin K L, Xiao R S. Process and microstructure properties of laser beam welding of thin 2524 aluminum alloy sheet with filler wire[J]. Transactions of the China Welding Institution, 2014, 35(4): 24-28.
蔡华, 林凯莉, 肖荣诗. 薄板 2524 铝合金激光填丝焊接工艺及组织性能[J]. 焊接学报, 2014, 35(4): 24-28.
- [15] Yang Z H, Yang S L, Jiang Y S, *et al.* Microstructure and mechanical properties of laser welding joints of 7075 aluminum alloy with filler wire

- [J]. *Materials Review*, 2017, 31(6): 60-63.
- 杨智华, 杨尚磊, 姜亦帅, 等. 7075 高强铝合金激光填丝焊接组织与力学性能研究[J]. *材料导报*, 2017, 31(6): 60-63.
- [16] Zhou Y F, Chen G Y, Zhang Y, *et al.* Study on 5A06 aluminum alloy in fiber laser-MIG arc hybrid welding[J]. *Applied Laser*, 2016, 36(2): 156-164.
- 周逸凡, 陈根余, 张焱, 等. 5A06 铝合金光纤激光-MIG 电弧复合焊接研究[J]. *应用激光*, 2016, 36(2): 156-164.
- [17] Hong K M, Shin Y C. Prospects of laser welding technology in the automotive industry: A review[J]. *Journal of Materials Processing Technology*, 2017, 245: 46-69.
- [18] 周万盛, 姚君山. 铝及铝合金的焊接[M]. 北京: 机械工业出版社, 2011: 32-39.
- [19] Han J. Research on rapture performance and microalloying effect of 7xxx-series aluminum alloy [D]. Zhenjiang: Jiangsu University, 2009: 25-31.
- 韩剑. 7xxx 系铝合金断裂性能与微合金化的研究[D]. 镇江: 江苏大学, 2009: 25-31.
- [20] Hull D. *Fractography: Observing, measuring, and interpreting fracture surface topography* [M]. London: Cambridge University Press, 1999: 177-203.