

5052 铝合金高频微振激光焊接疲劳性能及损伤行为

张巍¹, 卢庆华^{1,2*}, 任新怀¹, 白永真¹, 金杰文¹, 欧佯伶¹

¹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 采用光纤激光器对 5 mm 厚的 5052 铝合金进行振动焊接, 研究其接头组织、残余应力对拉伸性能和疲劳性能的影响。研究表明, 振动焊接的焊缝组织柱状晶数量明显减少, 组织较常规焊缝更均匀细密。采用合适的振动频率与振动加速度, 焊缝残余应力可低至 140 MPa, 而常规焊接焊缝的残余应力高达 335 MPa。在应力比为 0.1 的拉-拉疲劳条件下, 母材和接头的条件疲劳极限分别为 160 MPa 和 120 MPa。疲劳源区位于表面缺陷处, 裂纹以穿晶形式扩展, 大量疲劳条带及二次裂纹产生于断口处。

关键词 激光光学; 激光材料加工; 机械振动; 焊缝组织; 残余应力; 疲劳性能

中图分类号 TG456.7; TN249

文献标识码 A

doi: 10.3788/CJL201946.0302012

Fatigue Properties and Fracture Behavior of 5052 Aluminum Alloys Welded by High Frequency Micro-Vibration Laser

Zhang Wei¹, Lu Qinghua^{1,2*}, Ren Xinhui¹, Bai Yongzhen¹, Jin Jiewen¹, Ou Yangling¹

¹College of Materials Engineering, Shanghai University of Engineering Science, Shanghai 201620, China;

²Shanghai Research and Development Center for Key Technologies of Ultra-Intense Laser Processing, Shanghai University of Engineering Science, Shanghai 201620, China

Abstract The vibration welding test of a 5 mm thick 5052 aluminum alloy is carried out by a fiber laser. The influences of joint microstructure and residual stress on the tensile properties and fatigue properties are studied. The research results show that the number of columnar crystals in the weld microstructure after vibration welding is significantly reduced, and the microstructure is more uniform and finer than that of an ordinary weld. Under the suitable vibration frequency and vibration acceleration, the residual stress of weld is decreased to 140 MPa, while that of an ordinary weld is up to 335 MPa. Under the tension-tension fatigue condition with a stress ratio of 0.1, the conditional fatigue limits of the base metal and joints are 160 MPa and 120 MPa, respectively. The fatigue source is located in the surface defects and the cracks propagate in a transgranular way. A large number of fatigue striations and secondary cracks are formed in the fractures.

Key words laser optics; laser material processing; mechanical vibration; weld microstructure; residual stress; fatigue properties

OCIS codes 350.3390; 140.3325; 140.3380

1 引言

5052 铝合金属于 Al-Mg 系不可热处理强化铝合金, 其焊接结构件具有优良的焊接性能、疲劳性能和耐腐蚀性能, 在汽车、船舶、航空等制造领域具有极好的应用价值^[1-2]。使用合适强度的铝合金结构件替代传统的钢结构件, 能够节能减排, 符合时代发

展的需求^[3]。与传统焊接相比, 激光焊接具有能量密度集中、热影响区小、自动化程度高、效率高等优势, 是铝合金焊接的有效方法之一^[4-5]。铝合金的热膨胀系数高, 易产生焊接变形。焊接变形与焊缝区及附近分布的残余应力密切相关^[6]。在铝合金焊接过程中控制减少残余应力有利于省去焊后加工处理步骤, 提高制造效率, 节约综合成本。焊接残余应力

收稿日期: 2018-11-01; 修回日期: 2018-12-06; 录用日期: 2018-12-18

基金项目: 国家自然科学基金(51605276)、上海工程技术大学研究生科研创新专项(17KY0503)

* E-mail: Lugh@sues.edu.cn

会受到材料特性、热输入条件、结构刚度等因素的影响^[7]。振动焊接是由振动时效发展而来的工艺方法,是在焊接过程中对构件施加振动场,从而达到细化晶粒、消除残余应力^[8-9]等目的,进一步提高焊接接头的品质。Zeidabadi等^[10]在工件的钨极惰性气体保护焊(GTAW)过程中引进机械振动,发现与无振动焊缝组织相比,机械振动焊缝组织的粗大柱状晶数量减少,等轴晶结构区域增加。

疲劳失效是焊接承载结构件中常见的失效方式之一。目前,对铝合金焊接接头疲劳行为的研究主要集中于疲劳损伤机制和数值仿真方面。Xu等^[11]通过对AA2197-T7铝合金的高周疲劳行为进行研究,观察到两种不同的疲劳裂纹起始机制和内部或表面裂纹萌生机理,并且裂纹萌生及扩展阶段消耗了大部分的疲劳寿命。Xie等^[12]研究了DP590双相不锈钢激光焊接接头,发现裂纹主要从表面蚀孔和缺陷萌生并沿着马氏体组织扩展,在组合应力水平下,裂纹尖端附近发生急剧局部变形过程。胡雅

表 1 5052 铝合金的化学成分

Table 1 Chemical compositions of 5052 aluminum alloy

Element	Si	Fe	Mn	Mg	Ti	other	Al
Mass fraction /%	0.4	0.2	0.15	2.0	0.15	0.15	Bal.

焊接前对铝合金表面进行打磨并清洗,去除氧化层及杂质后吹干待焊。如图 1 所示,实验系统由振动平台、振动焊接平台控制中心、夹具和激光焊接头组成。高频振动是由电磁式超磁致伸缩材料(GMM)激振器引发并通过平台传播,光纤激光器(IPG YLS-5000, IPG 公司, 德国)的聚焦光斑直径为 0.3 mm, 焦距为 310 mm, 通过机器人系统(KR 60-3, KUKA, 德国)控制焊接过程, 采用连续激光焊在铝合金样板上焊接, 焊接激光倾角为 10°。焊接前将试样刚性固定在高频微振平台上以保证振动能量的有效传播, 实验中激振器保持的最大稳定振幅为 10 μm, 将振动加速度 a 作为振动强度参数来衡量试样的振动效果。在室温下调试好振动参数和激光焊接参数, 不填充焊丝, 流速为 20 L/min 的氩气在激光前 45°侧吹, 以保证振动激光焊接实验的顺利进行。激光焊接参数设置如下: 功率 $P = 4500$ W, 焊接速度(v)为 0.03 m/s, 离焦量(D_{DA})为 -15 mm。其中振动频率分为无振、低频共振和高频共振 3 种, 共振即激振器输出频率与试样固有频率相同, 此时试样振动效果最为明显。改变振动频率 f (固有频率, 提前测得低频共振频率为 545 Hz, 高频共振频率为 956 Hz) 和对应的振动加速度 a , 对

楠等^[13]利用同步辐射 X 射线三维成像工具对疲劳裂纹萌生及扩展路径进行表征, 疲劳裂纹沿最薄弱的熔合线扩展, 气孔对其扩展过程影响较小。乔俊楠等^[14]对 A7N01 铝合金进行激光电弧变极性复合填丝焊, 疲劳裂纹倾向于在焊缝上表面的应力集中处萌生, 并观察了裂纹处的金相, 发现裂纹沿晶扩展。

本文从激光振动热力耦合焊接得到的 5052 铝合金焊接接头入手, 观察该接头的组织结构, 测试其残余应力和疲劳寿命, 并分析了断口和疲劳损伤行为。

2 实验材料与方法

2.1 实验材料及实验过程

本实验选取 5052 铝合金来研究振动工艺对焊接接头残余应力及疲劳性能的影响。待焊样板的尺寸为 300 mm × 250 mm × 5 mm。5052 铝合金的化学成分见表 1。

应样板编号和焊缝编号及工艺参数见表 2。

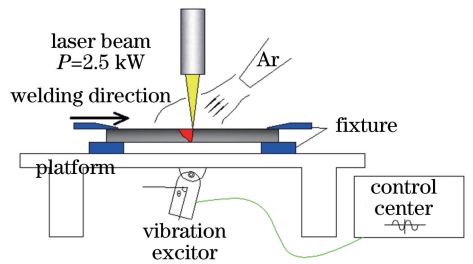


图 1 高频微振激光焊接实验平台示意图

Fig. 1 Schematic of experimental platform for high frequency micro-vibration laser welding

本实验所选取金相为焊缝横截面。腐蚀液配方为 190 mL H₂O、5 mL HNO₃ 溶液、3 mL HCl 溶液和 2 mL HF 溶液, 腐蚀时间为 90 s。使用超景深数码光学显微镜(VHX-600K, 基恩士公司, 德国)观察接头的金相组织。采取钻孔应变释放法测量焊缝残余应力, 具体位置如图 2 中测量点所示(L : 试样长度; W : 工作区宽度; R : 过渡区半径; H : 工作区长度; M : 夹持长度; J : 夹持宽度)。5052 铝合金疲劳试样的具体尺寸如图 2 所示, 采取应力控制方法进行疲劳实验, 按照升降法取应力比 R 为 0.1 的拉-拉实验, 最大循环次数为 1×10^7 。

表 2 实验参数表 ($P=5\text{ kW}$; $v=0.03\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$; $D_{DA}=-15\text{ mm}$)
 Table 2 Parameters for test ($P=5\text{ kW}$; $v=0.03\text{ m/s}$; $D_{DA}=-15\text{ mm}$)

No. of plate (weld number/weld number)	Weld line 1		Weld line 2	
	Frequency /Hz	Acceleration /($\text{m}\cdot\text{s}^{-2}$)	Frequency /Hz	Acceleration /($\text{m}\cdot\text{s}^{-2}$)
A(1/2)	0	0	545	66.5
B(3/4)	0	0	967	33.4
C(5/6)	550	92.2	970	34.3
D(7/8)	0	0	0	0
E(9/10)	549	77	545	52.5
F(11/12)	977	54.1	976	94

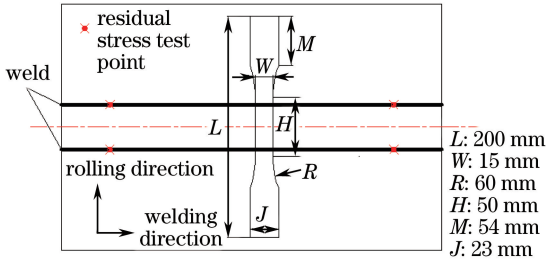


图 2 残余应力测试点及疲劳试样示意图
 Fig. 2 Schematic of residual stress test point and fatigue sample

3 实验结果与分析

3.1 接头微观组织

5052 铝合金常规无振激光焊接和振动激光焊接接头的显微组织如图 3 所示,可以看到,该结构主

要为 $\alpha(\text{Al})$ 和 β 组织,几乎没有强化相组织^[15],故选取熔合线附近组织进行对比。图 3(a)所示为常规无振激光焊缝熔合线处的微观组织,可以分为母材(BM)、热影响区(HAZ)、柱状晶区、等轴细晶区和局部粗晶带。图 3(b)所示为振动激光焊缝熔合处的微观组织,大致分为 BM 和焊缝区,无其他明显特征区域。可以看到:振动激光焊缝熔合处几乎不存在 HAZ;柱状晶区域占比较低,并且长度不超过 $50\text{ }\mu\text{m}$;等轴细晶区域大,晶粒分布均匀。通过对比发现,柱状晶在振动激光焊接过程中被抑制,这主要是因为振动激光焊接能够在快速冷却的时间内给予熔池充分的动能,相当于搅拌了熔池,打碎柱状晶的生长过程。在熔合线处晶粒的细化程度明显高于常规无振激光焊接组织,不存在常规焊接中的分层和明显的晶粒取向问题。

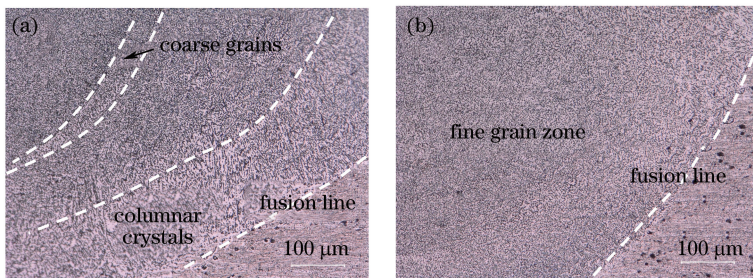


图 3 熔合线处微观组织。(a) 1 号焊缝熔合线;(b) 5 号焊缝熔合线
 Fig. 3 Microstructures at fusion lines. (a) Weld fusion line 1; (b) weld fusion line 5

3.2 残余应力

焊接残余应力在宏观的尺寸范围内存在并保持平衡,通过钻孔应变释放法来测量焊接残余应力的大小和方向。根据 CB3395—1992 计算得到残余应力,本文中残余应力均为拉应力。

焊缝残余应力测量结果如图 4 所示。常规无振焊缝 1、3、7、8 处测得的残余应力较高,均超过 270 MPa ,远大于母材的屈服强度。施加振动工艺的激光焊接接头测得的残余应力明显低于常规焊接接头。根据焊缝残余应力进行排序,低频振动焊接

的焊缝依次为 10、2、5、9 号焊缝,高频振动焊接的焊缝依次为 4、12、6、11 号焊缝。残余应力大小分布不一致,4 号焊缝的残余应力最高,可达 241.5 MPa ,9 号焊缝的残余应力则低至 174.5 MPa ,残余应力大小和频率与加速度的参数匹配情况有一定关系。残余应力较小的焊缝编号为 5、9、6、11,分别采取低振动频率与大振动加速度的组合,高振动频率和低振动加速度的组合参数能得到相对较低的残余应力。两组残余应力最低的振动参数分别为 Weld 9: $f=549\text{ Hz}$, $a=77\text{ m/s}^2$; Weld 11: $f=977\text{ Hz}$,

$a = 54 \text{ m/s}^2$ 。在此 5052 铝合金振动激光焊接实验中,采取低振动频率和大振动加速度可以得到最低残余应力,将该结果与组织分析结果相结合,发现振动可以消除大小不均匀的晶粒聚集带来的集中应力,从而降低了焊缝的应力水平。

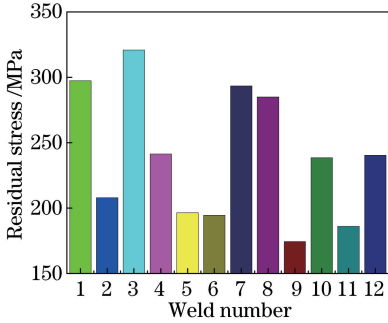


图 4 双道焊接板的残余应力

Fig. 4 Residual stress of double-line welded sheet

3.3 疲劳性能

本疲劳实验为高周疲劳实验,纯铝及铝合金材料没有明显的疲劳寿命极限,将循环次数为 10^7 对应的循环载荷作为焊接接头的疲劳寿命极限,得到的加载应力和寿命周次关系可根据 Basquin 类型公式拟合。

$$\sigma_a/2 = \sigma'_f(2N)^b, \quad (1)$$

式中: σ_a 是应力幅值; σ'_f 是由 $2N = 1$ 时应力截距定义的疲劳强度系数, N 为失效寿命周次; b 为疲劳强度指数。对(1)式取对数,可得:

$$\lg(\sigma_a/2) = \lg \sigma'_f + b \lg(2N). \quad (2)$$

在双对数坐标中, $\lg(\sigma_a/2)$ 与 $\lg(2N)$ 构成二元一次方程。通过 Origin 软件拟合得到的分散点 S-N 曲线,横坐标用 $\lg(2N)$ 表示,纵坐标用 $\lg(\sigma_a/2)$ 表示。

图 5 所示为应力比 $R = 0.1$ 时 5052 铝合金母材及不同振动参数与激光热力耦合焊接得到双道焊缝试样的 S-N 曲线,其中母材及各试样应力寿命曲线(S-N 曲线)拟合公式分别为

$$\text{BM: } \lg(\sigma_a/2) = 2.0671 - 0.025 \lg(2N), \quad (3)$$

$$\text{A: } \lg(\sigma_a/2) = 2.4319 - 0.107 \lg(2N), \quad (4)$$

$$\text{B: } \lg(\sigma_a/2) = 2.4519 - 0.114 \lg(2N), \quad (5)$$

$$\text{C: } \lg(\sigma_a/2) = 2.2791 - 0.072 \lg(2N), \quad (6)$$

$$\text{E: } \lg(\sigma_a/2) = 2.3707 - 0.096 \lg(2N), \quad (7)$$

$$\text{F: } \lg(\sigma_a/2) = 2.2422 - 0.069 \lg(2N). \quad (8)$$

由(3)式可求出 5052 铝合金母材和焊缝在循环次数 $\leq 10^7$ 时任意应力所对应的条件疲劳极限强度,即母材在寿命为 10^7 循环次数时对应的条件疲劳极限为 153.1 MPa。对比母材和双道焊接接头试样的

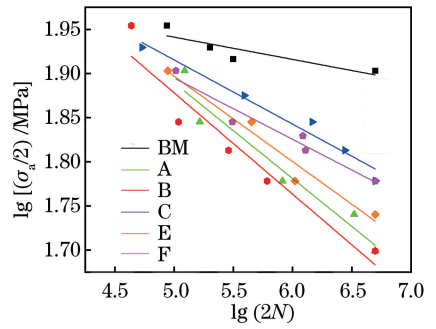


图 5 母材及双道试样 S-N 曲线

Fig. 5 S-N curves of base metal and double-line sample 疲劳寿命曲线,发现焊接后板材的疲劳强度明显降低。这是因为铝合金在焊接后,熔池凝固产生的表面粗糙不平,与母材平整的表面相比,其更易产生裂纹。焊缝的熔合区是焊缝最薄弱的区域,而裂纹在此区域最容易扩展,疲劳强度明显降低。在无振与振动组合的 A、B 试样中,接头率先在 1、3 号无振激光焊缝处断裂。在低频与高频振动参数组合的 C 试样的多个疲劳接头中,疲劳断裂发生在 5 号或 6 号焊缝处。在 E、F 试样中,当频率相同时,随着振动加速度的逐渐加大,10 号和 12 号焊缝处率先断裂。其余在疲劳实验中未失效的焊缝的疲劳寿命均高于对应失效的焊缝。采取振动工艺的激光焊接接头的疲劳性能优于常规无振接头。在振动工艺中,低振动频率与高振动加速度的匹配度较高,高振动频率与低振动加速度的匹配度也较高。在本疲劳实验中,F 试样的疲劳寿命比 C、E 试样长,为得到良好疲劳性能的焊接接头,建议采用高振动频率与低振动加速度的组合。

疲劳强度系数 b 可以用来衡量对应试样的疲劳强度,在表 3 中,比较 b 与疲劳断裂焊缝位置处的最大残余应力,发现残余应力大的 A 和 B 试样的疲劳寿命明显低于其他试样,说明降低焊接残余应力有利于焊接接头疲劳强度的提高。但是在 E、F 试样的对比中发现,试样的残余应力几乎相同时,疲劳强度却相差很大,说明除残余应力外,还有其他影响疲劳强度的因素。对于 C 试样,其残余应力水平低,疲劳强度系数 b 较小,疲劳性能较好。

焊接接头的疲劳裂纹多由集中应力造成,焊接接头表面粗糙不平,内部也存在焊接缺陷。应力集中是由实验主动施加的名义应力与缺陷的几何形状共同决定,而残余应力的存在会提高应力峰值。因此,采用降低残余应力来提高疲劳寿命的方法具有可行性。

表 3 残余应力与疲劳强度指数

Table 3 Residual stress and fatigue strength coefficient

Sample	A	B	C	E	F
Fatigue strength coefficient b	0.107	0.114	0.072	0.096	0.069
Residual stress of fracture weld /MPa	297.5	321	196.5	238.5	240.5

裂纹扩展与裂纹尖端的应力集中程度 ΔK 相关,通常将其称为应力集中系数 ΔK 。当 ΔK 低于阈值 ΔK_{th} 时,裂纹扩展速率为零或扩展速率非常低。当 ΔK 超过 ΔK_{th} 时,裂纹迅速延伸并扩展。Zhang 等^[3]用 Zheng-Hirt 公式来预测疲劳裂纹扩展速率:

$$\frac{da}{dN} = \beta(\Delta K - \Delta K_{th})^2, \quad (9)$$

式中: da/dN 为疲劳裂纹扩展速率; β 为疲劳裂纹扩展系数; ΔK_{th} 为 ΔK 的阈值。对于具有疲劳条纹的铝合金, $\beta = 0.159$,其中弹性模量 E 通常是 69 GPa。微观结构参数如孔隙率、晶粒细化程度等对提高焊缝的 ΔK_{th} 起着关键作用。残余拉应力的存在会增加裂纹尖端的应力集中系数 ΔK ,所以在降低残余应力的同时,减小了裂纹尖端的 ΔK ,疲劳裂纹扩展速率 da/dN 就会随之降低。

3.5 疲劳断口分析

对 5052 铝合金母材及焊接接头的疲劳断口进行扫描电子显微镜(SEM)分析,图 6 所示为母材疲劳断口形貌,由图 6(a)可以看出,试件的表面出现疲劳源,并且有两处明显的疲劳裂纹扩展痕迹,其中

一个疲劳源区局部放大在 6(a)右下角,表面有微观蚀坑,可看作微观缺口,微观缺口的应力水平相对较高,疲劳裂纹最先在缺口处产生,以疲劳源为起始点呈放射状往试样内部扩散,稳态扩展区呈河流状花纹向外辐射,其方向均指向疲劳源^[16-17],图 6(a)左下角为两个疲劳裂纹的最终交界处,两裂纹处于不同的水平高度,在交汇的过程中不断在循环拉应力作用下发生塑性变形,具有明显的密集纹路条带特征,并最终断裂。图 6(b)~(d)所示的裂纹位置均在图 6(a)中标示。图 6(b)断口上形成清晰可见的台阶,这主要是因为存在于许多平行的螺型位错,由局部裂纹尖端沿解理面向箭头方向扩展,形成一个具有明显高度差的台阶,因此在断口视角上无法衡量失真的高度值。图 6(c)为裂纹的失稳扩展区,介于稳定扩展区和瞬断区,此区的疲劳裂纹不断改变着裂纹的局部扩展方向,具有许多大小不一的二次微裂纹,该裂纹破坏痕迹粗糙,没有方向性,断口即将失效。图 6(d)为疲劳瞬断区形成的韧窝形貌,当疲劳裂纹达到临界尺寸时,试样可能发生瞬时断裂,本试样断口面积较大,最后由拉伸实验机静载拉断,该区域的断口形貌与静载拉伸断裂的断口形貌一

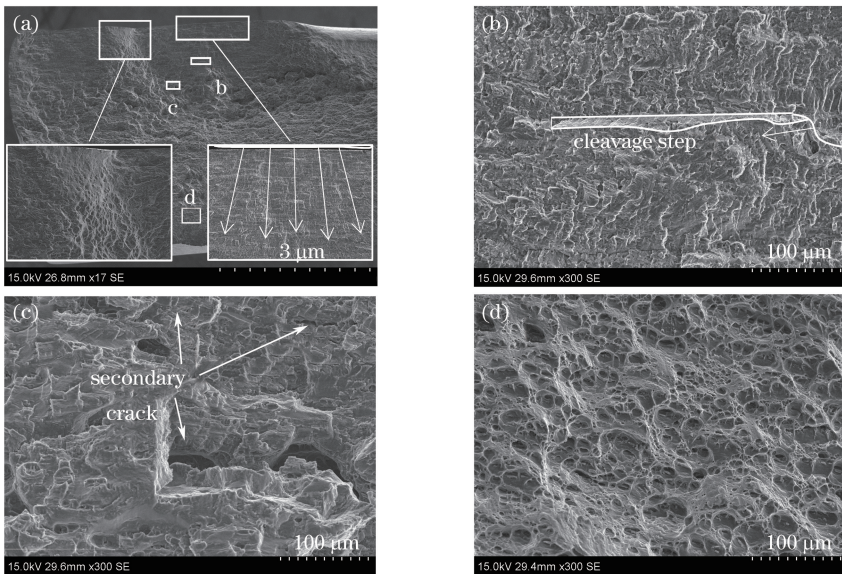


图 6 5052 铝合金母材疲劳断口形貌。(a)断口形貌及位置示意图;(b)疲劳台阶;(c)二次裂纹;(d)韧窝

Fig. 6 BM fatigue fracture morphology of 5052 aluminum alloy. (a) Fracture morphology and position diagram; (b) fatigue step; (c) secondary crack; (d) dimple

致,体现出韧性断裂特性。

图7所示为焊接接头疲劳断口形貌,疲劳断口同样由疲劳源区、疲劳裂纹稳定扩展区和快速断裂区3部分组成。疲劳扩展区比较平缓,快速断裂区有一定的倾斜度。由于该实验为拉-拉高周疲劳实验,交替载荷较高时,应力集中部位产生裂纹,试样中部出现多个疲劳源,如图7(a)所示。图7(b)中,另一个焊接接头疲劳源区位于边缘区凹陷处,同样呈扇形向内部扩展;在扩展后期,边缘处产生裂纹,其受力面积急剧减小,相比于中间产生的两边均匀受力的裂纹,边缘处受力更不平衡,更易失稳扩展,所以疲劳区域面积相对较小。

图7(c)所示为气孔缺陷,在拉-拉载荷下,容易产生集中应力,在左侧产生一个较宽的微裂纹。从图7(d)中可以观察到清晰的疲劳辉纹,宽度在 $0.5\sim 1.5\ \mu\text{m}$ 之间。裂纹尖端呈弧形,并且多数裂纹尖端在循环载荷下,位错不断平移,产生独自扩展的滑移带,并最终交汇;在扩展中,也有可能改变方向,产生二次裂纹,如图7(d)虚线所示。可以看到,不同平面、不同方向上的疲劳条带,由于其内部晶粒取向、晶界的差异,裂纹扩展会由一个平面转移到另一个平面,形成不同区域的疲劳条带分布在高度不同、方向有别的平面上,并在交汇处产生一个塑性变形凸点。

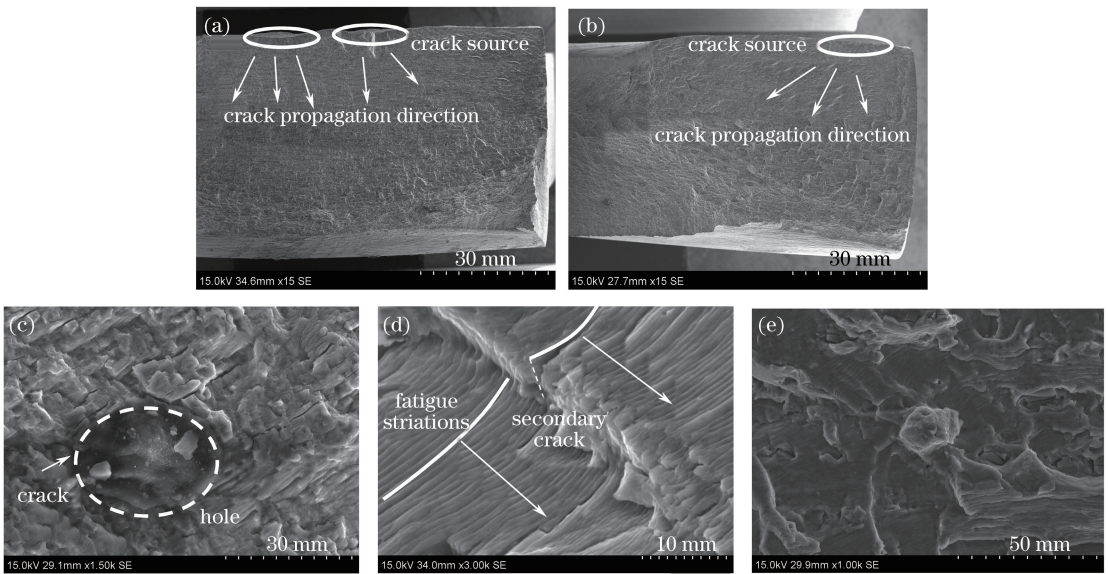


图7 焊接接头疲劳断口形貌。(a)多疲劳源的断口;(b)单疲劳源的断口;(c)气孔;(d)疲劳辉纹;(e)裂纹尖端交汇处
 Fig. 7 Fatigue fracture morphologies of welded joints. (a) Fracture of multiple fatigue sources; (b) fracture of single fatigue source; (c) hole; (d) fatigue striations; (e) crack tip junctions

4 结 论

振动焊接工艺能够有效改善焊接接头组织,并降低其残余拉应力水平,从而提高接头的疲劳寿命。焊接接头的蚀孔和缺陷加速了疲劳裂纹的萌生速度,疲劳断裂特征体现韧性断裂。设计了两种提高疲劳性能的有效途径,通过降低焊缝残余应力或消除表面蚀坑和缺陷来提高疲劳寿命。在后续工作中,结合有限元分析和实时观测手段进一步研究疲劳失效的过程,并找出提高接头性能的最优方法。

参 考 文 献

[1] Feng F, Li J J, Chen R C, *et al.* Effect of die geometry on the formability of 5052 aluminum alloy

in electromagnetic impact deformation [J]. *Materials*, 2018, 11(8): 1379.

[2] Kong X F, Li F, Lü J X, *et al.* Fiber laser welding of 5083 aluminum alloy with filler wire [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2014, 41(10): 1003007.

孔晓芳, 李飞, 吕俊霞, 等. 5083 铝合金光纤激光填充丝焊接工艺 [J]. *中国激光*, 2014, 41(10): 1003007.

[3] Zhang C, Gao M, Zeng X Y. Effect of microstructural characteristics on high cycle fatigue properties of laser-arc hybrid welded AA6082 aluminum alloy [J]. *Journal of Materials Processing Technology*, 2016, 231: 479-487.

[4] Zhu J L, Xu S L, Jiao X D, *et al.* Study on laser lap welding of 304 stainless steel sheet [J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2015, 52(7): 071404.

朱加雷, 徐世龙, 焦向东, 等. 304 不锈钢薄板激光

- 搭接焊工艺研究[J]. 激光与光电子学进展, 2015, 52(7): 071404.
- [5] Liu D Y, Li D, Li K B, *et al.* Influence of laser with same line energy on the microstructure and properties of welded [J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2015, 52(10): 101402.
刘东宇, 李东, 李凯斌, 等. 相同激光线能量对焊缝组织和性能的影响[J]. 激光与光电子学进展, 2015, 52(10): 101402.
- [6] Ganev N, Kolařík K, Pala Z, *et al.* Influence of beam speed on residual stresses in the vicinity of laser welds[J]. Advanced Materials Research, 2014, 996: 463-468.
- [7] Okano S, Mochizuki M. Experimental and numerical investigation of trailing heat sink effect on weld residual stress and distortion of austenitic stainless steel[J]. ISIJ International, 2016, 56(4): 647-653.
- [8] Puga H, Costa S, Barbosa J, *et al.* Influence of ultrasonic melt treatment on microstructure and mechanical properties of AlSi₉Cu₃ alloy[J]. Journal of Materials Processing Technology, 2011, 211(11): 1729-1735.
- [9] Yin H C, Chen L G, Zhang G Y, *et al.* Study on effect of vibrating welding technique[J]. Journal of Vibration and Shock, 2006, 25(4): 132-134.
尹何迟, 陈立功, 张光业, 等. 振动焊接工艺效果研究[J]. 振动与冲击, 2006, 25(4): 132-134.
- [10] Zeidabadi H, Mirdamadi S, Godarzi M. Effect of vibration during GTAW welding on microstructure and mechanical properties of Ti₆Al₄V[J]. Russian Journal of Non-Ferrous Metals, 2015, 56(2): 217-221.
- [11] Xu L P, Wang Q Y, Zhou M. Micro-crack initiation and propagation in a high strength aluminum alloy during very high cycle fatigue[J]. Materials Science and Engineering A, 2018, 715: 404-413.
- [12] Xie C J, Yang S L, Liu H B, *et al.* Microstructure and fatigue properties of laser welded DP590 dual-phase steel joints [J]. Journal of Materials Engineering and Performance, 2017, 26(8): 3794-3801.
- [13] Hu Y N, Wu S C, Song Z, *et al.* Fatigue property and fracture behavior of 7020 aluminum alloys welded by laser-MIG hybrid welding[J]. Chinese Journal of Lasers, 2018, 45(3): 0302003.
胡雅楠, 吴圣川, 宋哲, 等. 激光复合焊接 7020 铝合金的疲劳性能及损伤行为[J]. 中国激光, 2018, 45(3): 0302003.
- [14] Qiao J N, Wang Q M, Zhou J L, *et al.* Microstructure and mechanical property of A7N01 aluminum alloy joint by fiber laser-variable polarity TIG hybrid welding with filler wire [J]. Chinese Journal of Lasers, 2016, 43(9): 0902001.
乔俊楠, 王启明, 邹江林, 等. 光纤激光-变极性 TIG 复合填丝焊接 A7N01 铝合金接头的组织与力学性能[J]. 中国激光, 2016, 43(9): 0902001.
- [15] Li Q Y, Luo Y, Wang Y J, *et al.* Microstructure and mechanical properties of twin spot laser welding of 5052 aluminum [J]. Transactions of the China Welding Institution, 2007, 28(12): 105-108.
李巧艳, 罗宇, 王亚军, 等. 5052 铝合金双光点激光焊接组织与性能[J]. 焊接学报, 2007, 28(12): 105-108.
- [16] Jia J, Yang S L, Ni W Y, *et al.* Microstructure and mechanical properties of fiber laser welded joints of ultrahigh-strength steel 22MnB5 and dual-phase steels[J]. Journal of Materials Research, 2014, 29(21): 2565-2575.
- [17] Mecholsky J J, Jr. Fractography: determining the sites of fracture initiation [J]. Dental Materials, 1995, 11(2): 113-116.