

高速列车用 6106-T6 铝合金型材激光-电弧 复合焊接工艺及接头性能

韩晓辉^{1**}, 李帅贞¹, 毛镇东¹, 温鹏^{2,3}, 栗忠秀^{2,3}, 吴世凯^{2,3*}

¹中车青岛四方机车车辆股份有限公司, 山东 青岛 266111;

²跨尺度激光成型制造技术教育部重点实验室, 北京 100124;

³北京工业大学激光工程研究院, 北京 100124

摘要 采用光纤激光-冷金属过渡(CMT)焊、光纤激光-变极性钨极惰性气体保护(VPTIG)焊、光纤激光-熔化极惰性气体保护(MIG)焊三种复合焊接方法对带锁底结构的 6106-T6 铝合金型材进行焊接。采用优化后的焊接工艺参数,焊后得到了成形良好、无明显缺陷的复合焊接接头,研究了接头的显微组织、拉伸性能和疲劳性能,并分析了疲劳断裂机理及断口形貌。结果表明:激光-CMT 和激光-VPTIG 复合焊接接头中心由上至下等轴晶尺寸逐渐减小,激光-MIG 复合焊接接头焊缝中心的晶粒较粗大,且上下部分等轴晶的尺寸变化不大;激光-CMT、激光-VPTIG、激光-MIG 三种复合焊接接头的抗拉强度分别为 213.0, 198.0, 200.0 MPa, 较母材均存在一定程度的强度损失,疲劳极限分别为 105.00, 100.83, 113.50 MPa;疲劳断裂位置均在焊缝熔合线处的柱状晶区,断口均呈韧窝状,为典型的韧性断裂。

关键词 激光技术; 冷金属过渡焊; 变极性钨极惰性气体保护焊; 熔化极惰性气体保护焊; 6106-T6 铝合金; 显微组织; 接头性能

中图分类号 TG456.7

文献标识码 A

doi: 10.3788/CJL201946.1202004

Laser-Arc Hybrid Welding Process and Joint Performances of 6106-T6 Aluminum Alloy Profiles for High Speed Trains

Han Xiaohui^{1**}, Li Shuaizhen¹, Mao Zhendong¹, Wen Peng^{2,3},

Li Zhongxiu^{2,3}, Wu Shikai^{2,3*}

¹CRRC Qingdao Sifang Co., Ltd., Qingdao, Shandong 266111, China;

²Key Laboratory of Trans-Scale Laser Manufacturing Technology, Ministry of Education, Beijing 100124, China;

³Institute of Laser Engineering, Beijing University of Technology, Beijing 100124, China

Abstract The 6106-T6 aluminum alloy hollow extrusion profiles having a lock bottom structure were welded via fiber laser-cold metal transfer (CMT) arc hybrid welding, fiber laser-variable polarity tungsten inert gas (VPTIG) hybrid welding, and fiber laser-melt inert gas (MIG) hybrid welding. Subsequently, a hybrid welding joint with good forming properties and without clear defects was obtained using optimized welding parameters. Furthermore, the joint microstructure, tensile, and fatigue properties were studied, and the fatigue fracture mechanism and fracture morphology were analyzed. The results denote that the sizes of equiaxed grains at the center of the laser-CMT and laser-VPTIG hybrid welding joints gradually decrease from the upper part of the bead to the bottom. However, the sizes of the coarse equiaxed grains in the upper and lower parts do not change considerably, and the sizes of grains at the center of the laser-MIG hybrid welding joint are large. Furthermore, the tensile strengths of the laser-CMT, laser-VPTIG, and laser-MIG hybrid welded joints are 213.0, 198.0, and 200.0 MPa, respectively. These values denote a certain degree of strength loss when compared with that of the base metal. The fatigue limits of the three hybrid welded joints are 105.00, 100.83, and 113.50 MPa, respectively. All the fatigue fracture positions are located in the columnar crystal zone at the fusion line of the welding joints. In addition, the fractures

收稿日期: 2019-06-20; 修回日期: 2019-07-21; 录用日期: 2019-08-07

基金项目: 国家重点研发计划(2016YFB1200602)、国家自然科学基金(51775008)、北京市自然科学基金(3182004)

* E-mail: wushikai@bjut.edu.cn; ** E-mail: 13793237339@139.com

are dimpled, indicating a typical ductile fracture.

Key words laser technique; cold metal transfer welding; variable polarity tungsten inert gas welding; melt inert gas welding; 6106-T6 aluminum alloy; microstructures; joint performances

OCIS codes 140.3390; 160.3900; 350.3390

1 引 言

高速列车运行时速的不断提高,除了对钢轨等铁路基建的要求更高以外,对列车车体材料的选择也越来越严格。6106 铝合金作为 Al-Mg-Si 系热处理强化铝合金的一种,具有良好的挤压性、可机加工性、耐腐蚀性以及可成形性,适用于制造截面复杂的中空型材,被广泛应用于高速列车车体的侧墙、车顶等部位^[1-3]。目前的铝合金车体焊接仍然是以熔化极惰性气体(MIG)保护焊为主,但是传统电弧焊接的热输入较大,焊接效率低,容易产生焊接气孔、裂纹、接头软化等问题^[4-5]。激光焊接是利用高能量密度的激光束作为热源的一种高效精密的焊接方法,具有熔深大、焊道窄、焊缝深宽比大等优点,其较小的热影响区使得接头的力学性能更加稳定,焊接变形小,残余应力低,已成为铝合金焊接的一种重要手段^[6-7]。但是铝合金激光焊接也存在反射率高、对工件装配精度要求高、气孔率高等问题^[8]。

激光-电弧复合焊接的发展为克服两种单一热源的缺点提供了一条行之有效的解决途径。激光与电弧不限方式组合而成的复合热源,具有焊接效率高、工艺稳定性高、对装配间隙适应性强等优点,得到的复合焊接接头缺陷明显减少,性能明显改善^[9-10]。Lee 等^[11]对 YAG 激光-MIG 复合焊接 6061 铝合金的过程稳定性进行了研究,结果表明,复合焊在熔化效率和桥接能力方面要远高于单激光焊。杨大伟等^[12]采用激光-非熔化极惰性气体保护(TIG)电弧焊焊接了 6005 铝合金,分析了接头的显微组织,发现在焊缝区边缘存在具有明显择优取向的柱状晶,焊缝中心为晶粒较粗大的等轴晶。Wanjara 等^[13]对 AA6061-T6 铝合金激光-MIG 复合焊接头的性能进行了研究,结果表明,熔合区和热影响区的硬度分别比母材低约 40%和 35%,在对接

间隙为 0.5 mm 时,可获得综合力学性能最佳的复合焊接头。季卫东等^[14]采用双层激光-MIG 复合焊接方法对 6005A 铝合金进行了焊接,结果表明,激光-MIG 复合焊接头的抗拉强度较传统 MIG 焊接提高了 20%。Qiao 等^[15]研究了 A7N01 铝合金激光-变极性钨极惰性气体保护(VPTIG)焊接接头的疲劳性能,结果表明,复合焊接接头疲劳性能明显改善,且疲劳裂纹萌生于焊缝上表面焊趾应力集中处,裂纹延晶扩展。Casalino 等^[16]采用光纤激光-MIG 复合焊接工艺焊接了 3 mm 厚的 AA5754 铝合金,研究后发现,电弧和激光功率对焊接性能有重要影响,高激光功率有利于工艺的稳定性,并可得到具有良好结构和几何特性的焊缝。大量的研究表明,激光-电弧复合焊接铝合金有着较高的技术优势,但复合焊接中辅助热源的不同特性会带来焊接过程稳定性、缺陷抑制及接头性能的差别,而且目前关于不同复合焊接工艺方法之间的对比研究还鲜有报道。

本文采用激光-冷金属过渡(CMT)电弧焊、激光-VPTIG 焊和激光-MIG 焊三种复合焊接工艺方法分别对高速列车用 6106-T6 铝合金型材(带锁底结构)进行焊接试验,通过工艺优化获得了表面成形良好、无气孔及裂纹等缺陷的焊接接头,在此基础上系统研究了不同复合焊接头的显微组织、静载力学性能和疲劳性能,并分析了接头的疲劳断裂特征及断口形貌。

2 试验材料及方法

2.1 试验材料

试验材料为 6106 铝合金中空型材,供货状态为 T6 态,试板尺寸为 600 mm×1000 mm,焊接区厚度为 3 mm,填充材料均为 ER5356 焊丝(直径为 1.2 mm)。母材与焊丝的化学成分如表 1 所示,母材的力学性能如表 2 所示。

表 1 6106 铝合金及焊丝的化学成分

Table 1 Chemical compositions of 6106 aluminum alloy and welding wire

| Material | Mass fraction /% | | | | | | | | |
|----------|------------------|-------|-------|-----------|-----------|-------|-------|------|------|
| | Si | Fe | Cu | Mn | Mg | Cr | Zn | Ti | Al |
| 6106-T6 | 0.30-0.60 | ≤0.35 | ≤0.25 | 0.05-0.20 | 0.40-0.80 | ≤0.20 | ≤0.10 | — | Bal. |
| ER5356 | 0.057 | 0.12 | 0.011 | <0.13 | 4.9 | 0.065 | 0.13 | 0.11 | Bal. |

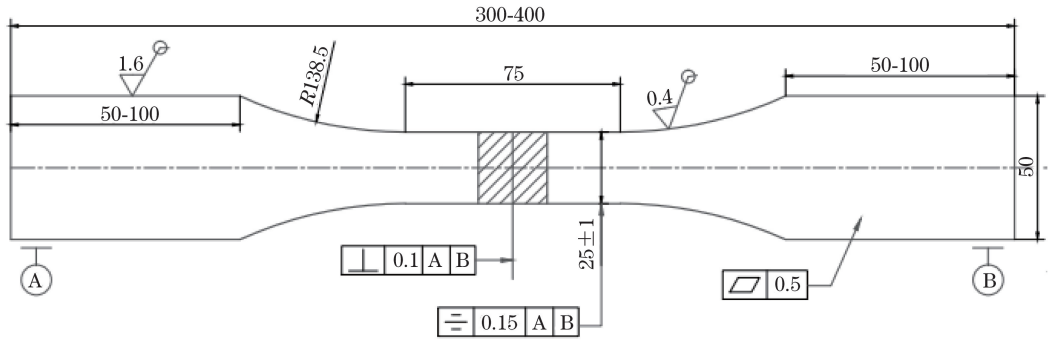


图 2 拉伸和疲劳试样的尺寸

Fig. 2 Sizes of tensile and fatigue specimens

焊接接头均呈“Y”形特征,焊缝熔宽较窄,宽度在 3.0 mm 左右;激光-MIG 复合焊接接头呈“V”形特征,焊缝熔宽在 7.0 mm 左右,其间隙适应性较激光-CMT 及激光-VPTIG 接头明显改善。此外,复

合焊缝上部为激光与电弧的共同作用区,电弧能量发散,大部分作用于表面,而焊缝下部主要受激光束的作用,能量集中,故三种接头总体上都呈上宽下窄的形状。

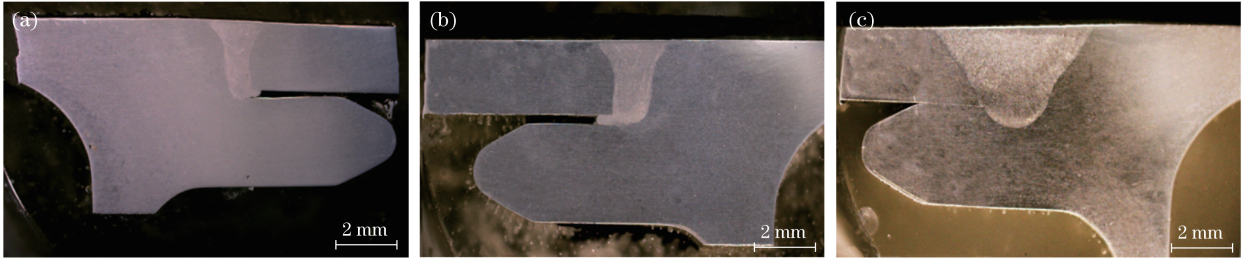


图 3 复合焊接接头的横截面形貌。(a)激光-CMT 接头;(b)激光-VPTIG 接头;(c)激光-MIG 接头

Fig. 3 Cross-sections of hybrid welded joints. (a) Laser-CMT hybrid welded joint;

(b) laser-VPTIG hybrid welded joint; (c) laser-MIG hybrid welded joint

3.1 焊接接头的显微组织

图 4 所示为三种复合焊接接头熔合线及焊缝中心的显微组织,可以看出:在上部的熔合线附近,可以明显区分出母材区(BM)、热影响区(HAZ)、柱状晶区及焊缝中心等轴晶区(WM),且三种接头熔合线附近的焊缝金属具有明显的联生结晶特点,液态金属依附于熔池边缘未熔化母材的固态晶粒处开始生长,并从表面析出固态晶粒,由母材向熔池内继续生长。在各种取向的晶粒中,与熔池散热方向相反的晶粒竞相生长,而与此方向不一致的晶粒将会受到抑制而停止生长,形成柱状的枝晶组织。在焊缝下部熔合区,激光-CMT 和激光-VPTIG 接头中的柱状晶区基本消失,而激光-MIG 接头中的柱状晶区特征与上部复合热源作用区相比没有明显改变。

焊缝中心的显微组织主要为等轴树枝晶区。在激光-CMT 和激光-VPTIG 复合焊接接头中,焊缝上部的等轴晶尺寸均较大,且有明显的粗大的二次枝晶,同时等轴树枝晶的尺寸呈从上部向下减小的趋势。这是因为电弧能量大部分施加于焊缝表面,

焊缝上部受激光和电弧能量的共同作用,热输入较大,导致焊缝上部熔池的冷速缓慢,晶粒尺寸较大并在晶枝上又继续生长出粗大的二次枝晶。在焊缝下部的激光作用区域,两种接头焊缝中心的组织均为细小的等轴树枝晶区,二次枝晶弱化。这是因为下部激光作用区较上部热输入减少,熔池冷速加快,过冷度较大,晶粒细小,因而在这两种接头中焊缝晶粒尺寸由上至下逐渐减小。在激光-MIG 复合焊接接头中,如图 4(k)、(l)所示,焊缝上部和下部晶粒尺寸变化不明显,且上下部分晶粒尺寸明显大于激光-CMT 和激光-VPTIG 复合焊接接头。这是因为激光-MIG 复合焊接时的激光功率、电弧电流明显较其他两种方法有大幅提升,热输入始终保持在较高水平,焊接熔池上下部分热输入差别不大。高的热输入导致焊缝中心的液态金属停留时间延长,冷却速度慢,温度梯度相对较低,熔池冷却凝固速度变慢,使得晶粒再结晶程度较以上两种复合焊接方法更大。

3.2 接头力学性能的对比

图 5 为三种不同焊接工艺条件下制备的复合焊

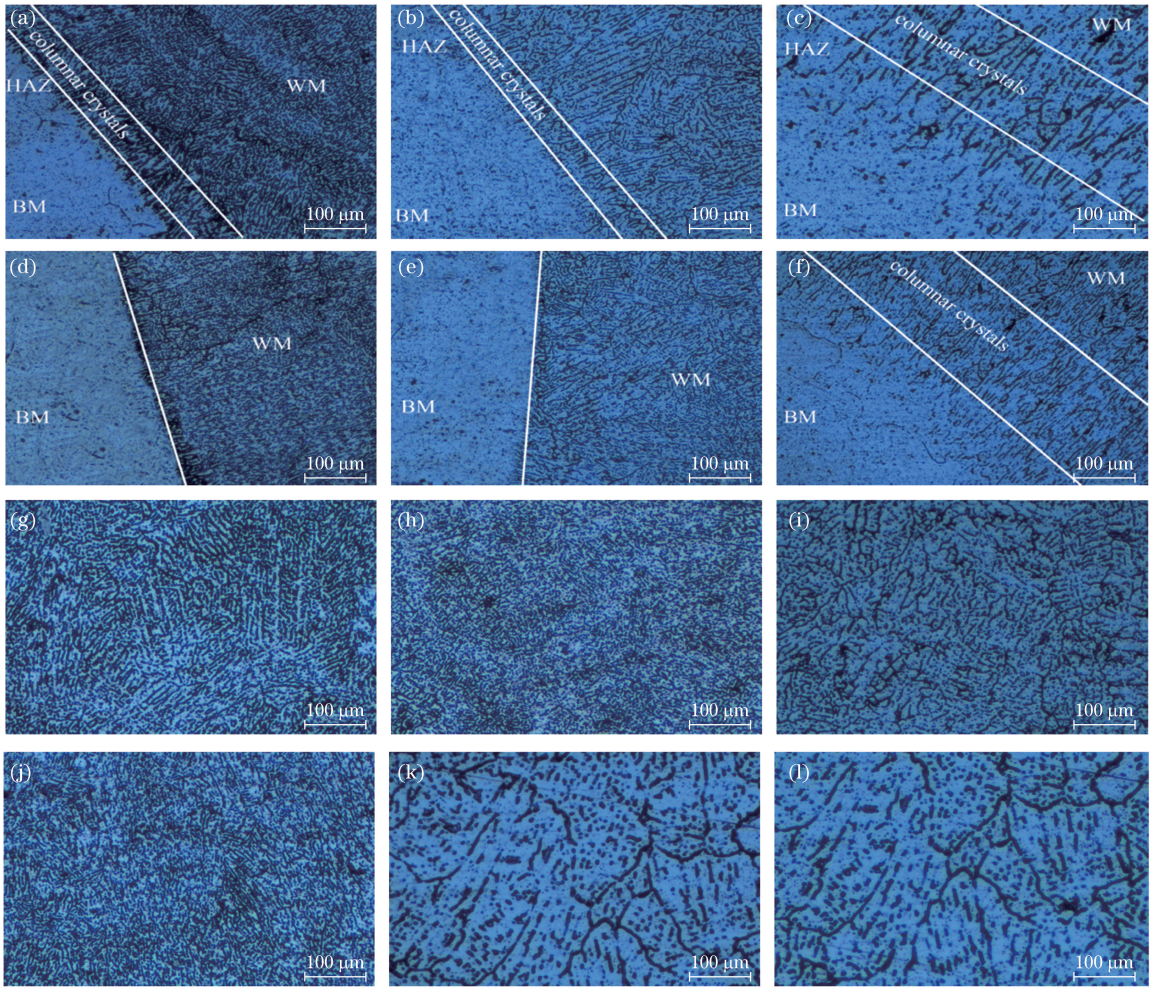


图 4 不同复合焊接接头的显微组织。(a)激光-CMT 接头熔合线上部;(b)激光-VPTIG 接头熔合线上部;(c)激光-MIG 接头熔合线上部;(d)激光-CMT 接头熔合线下部;(e)激光-VPTIG 接头熔合线下部;(f)激光-MIG 接头熔合线下部;(g)激光-CMT 焊缝中心上部;(h)激光-CMT 焊缝中心下部;(i)激光-VPTIG 焊缝中心上部;(j)激光-VPTIG 焊缝中心下部;(k)激光-MIG 焊缝中心上部;(l)激光-MIG 焊缝中心下部

Fig. 4 Microstructures of different hybrid welded joints. (a) Fusion line upper section of laser-CMT hybrid welded joint; (b) fusion line upper section of laser-VPTIG hybrid welded joint; (c) fusion line upper section of laser-MIG hybrid welded joint; (d) fusion line lower section of laser-CMT hybrid welded joint; (e) fusion line lower section of laser-VPTIG hybrid welded joint; (f) fusion line lower part of laser-MIG hybrid welded joint; (g) upper part of center of laser-CMT hybrid weld; (h) lower part of center of laser-CMT hybrid weld; (i) upper part of center of laser-VPTIG hybrid weld; (j) lower part of center of laser-VPTIG hybrid weld; (k) upper part of center of laser-MIG hybrid weld; (l) lower part of center of laser-MIG hybrid weld

接接头的室温拉伸试验结果。激光-CMT、激光-VPTIG 和激光-MIG 复合焊接接头的平均抗拉强度分别为 213.0,198.0,200.0 MPa,分别约为母材的 85.2%、79.2%、80.0%。激光-CMT 复合焊接接头的强度最高,其原因可能与激光-CMT 复合焊接的热输入最低有关。焊接过程的热输入越高,焊缝熔化和软化区越大,接头抗拉强度越低。另一方面,在热循环作用下,低熔点的 Mg、Zn 元素会发生蒸发、烧损,加之复合焊接过程的冷却速度较快,由焊

丝补充进熔池的 Mg 元素来不及与基体形成第二相而在熔池结晶时在晶界偏聚,导致熔池凝固后焊缝强化相 $\beta(Mg_2Si)$ 的析出量减少,从而影响强化效果。

此外,在较高的热输入水平下,T6 态热处理强化铝合金焊缝和热影响区在经历一次焊接热循环后发生变化。热影响区的软化主要是由于在焊接高温作用下第二相(强化相)脱溶析出并集聚长大,使焊前母材的弥散强化效果消失,形成“过时效”软化,这

是在熔焊条件下很难避免的现象。综上可知,三种复合焊接接头较母材均存在一定的强度损失。

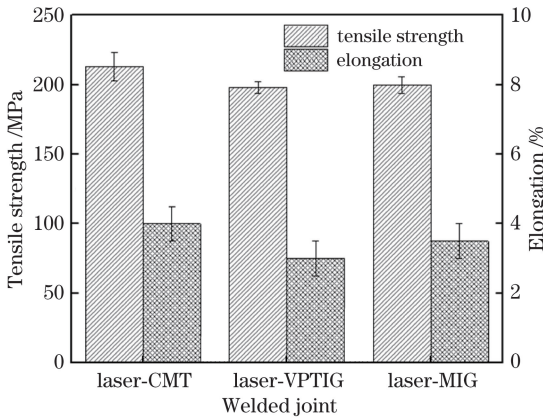


图 5 三种复合焊接接头的拉伸强度

Fig. 5 Tensile strength of three kinds of hybrid welded joints

接头的力学性能表现为强度损失,这一失强现象与软化效应存在相关性。图 6 为三种不同焊接方法得到的复合焊接接头显微硬度,可以看出:三种焊接接头均存在软化现象,焊缝区的硬度最低,约为 53 HV,是整个接头软化最为严重的区域;激光-CMT、激光-VPTIG 焊接接头的热影响区软化趋势基本相同,而激光-MIG 焊接接头由于热输入较大,焊缝区宽度明显大于其他两种接头,相应的热影响区宽度也大幅增加,其软化区宽度较其他两种接头大幅增加。明显的接头软化行为会导致接头的抗拉强度较母材有所降低。

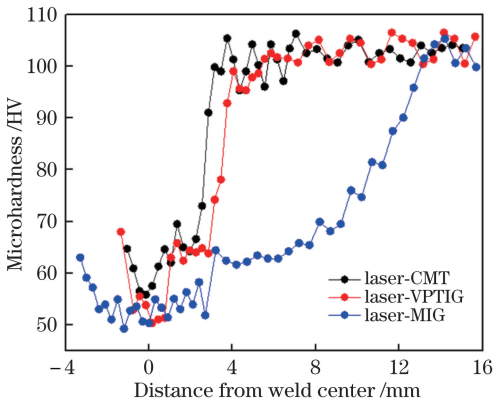


图 6 三种焊接接头的显微硬度

Fig. 6 Microhardness of three kinds of hybrid welded joints

3.3 接头的疲劳性能

对三种不同焊接方法得到的复合焊接接头进行疲劳测试,疲劳试验要求在最低应力等级时疲劳寿命达到 10^7 次循环,且 5 件试样中至少 4 件未断裂为合格。采集不同应力等级下的疲劳循环次数,采用

Origin 软件对数据点进行 S-N (S 为应力, N 为疲劳寿命) 曲线拟合,然后求出循环次数为 10^7 次时的疲劳极限。图 7 所示为根据疲劳试验结果拟合得到的表征复合焊接接头疲劳性能的 S-N 曲线及典型的疲劳断裂位置图。其中,激光-CMT、激光-VPTIG 和激光-MIG 复合焊接接头 S-N 曲线的拟合相关系数 (R^2) 分别为 0.77265、0.78781 和 0.84856,拟合曲线的可信度较好。由于纯铝及铝合金材料没有明显的疲劳极限^[17],所以将循环次数为 10^7 时对应的循环载荷作为复合焊接接头的疲劳极限。由图 7 可知,应力随着循环次数的增加而降低,激光-CMT、激光-VPTIG 和激光-MIG 三种复合焊接接头的极限疲劳强度分别为 105.00, 100.83, 113.50 MPa。激光-MIG 焊接接头在三种接头中表现出了最高的疲劳极限,分析后认为这可能是由于激光-MIG 接头焊缝中心上下部分的晶粒尺寸差别不大,焊缝区域突变程度较小,晶粒的一致性较好,故抗疲劳性能较强。

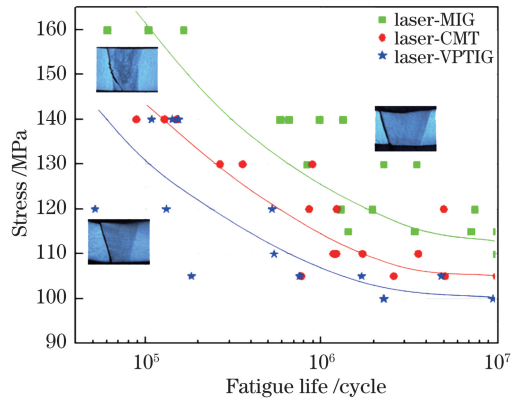


图 7 三种复合焊接接头的 S-N 曲线

Fig. 7 S-N curves of three kinds of hybrid welded joints

试验中,三种复合焊接接头上的疲劳裂纹均在焊缝熔合线附近萌生及扩展。由前述结果可知,复合焊接接头存在软化现象,焊缝区的强度最低,同时焊缝熔合线作为熔化区与非熔化区的过渡部分,化学成分很不均匀,存在过热组织,同时也存在较大的焊接残余应力,在交变载荷作用下,三种复合焊接接头上的疲劳裂纹均萌生于焊缝上部熔合线处的粗大柱状晶区(图 8)。上述几种因素的综合作用使得焊缝区熔合线处成为整个复合焊接接头最薄弱的区域,故疲劳裂纹在该处萌生;随后疲劳裂纹继续沿熔合线进入稳定扩展阶段,扩展方向垂直加载方向并沿焊缝熔合线向下扩展,最后快速失稳断裂。

图 9 为疲劳断口的 SEM 照片。疲劳断口区域

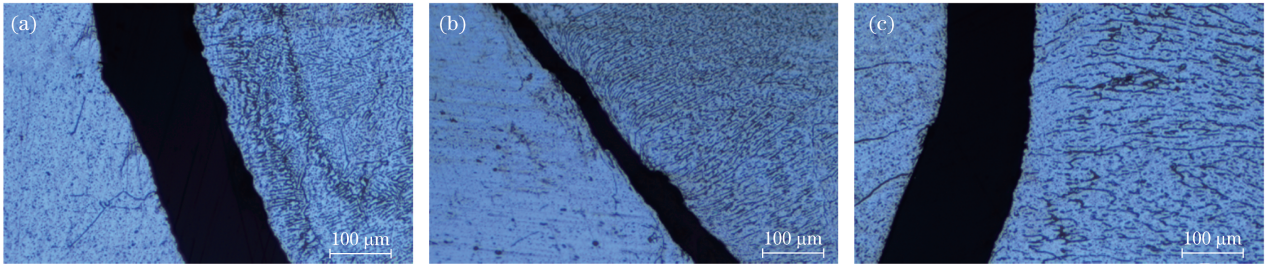


图 8 三种复合焊接接头疲劳裂纹萌生区的显微组织。(a)激光-CMT 接头;(b)激光-VPTIG 接头;(c)激光-MIG 接头

Fig. 8 Microstructures of fatigue crack initiation zone of three kinds of hybrid welded joints.

(a) Laser-CMT hybrid welded joint; (b) laser-VPTIG hybrid welded joint; (c) laser-MIG hybrid welded joint

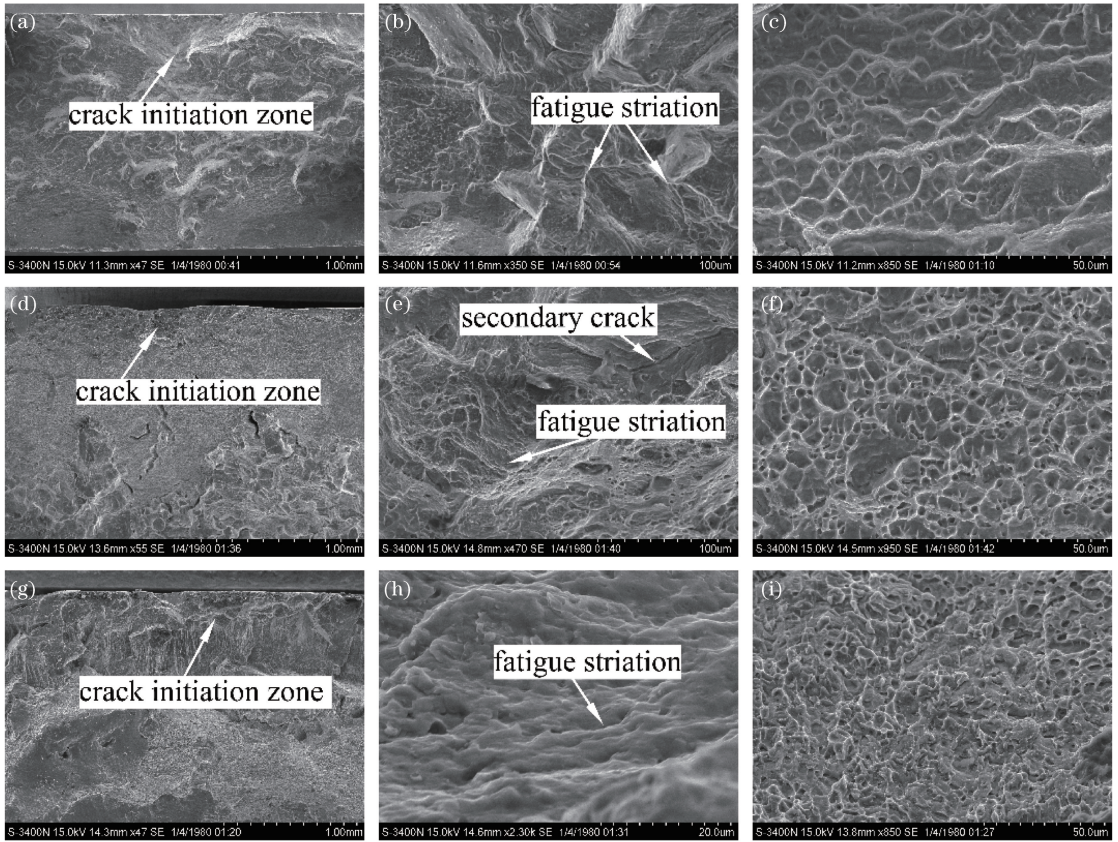


图 9 三种复合焊接接头的疲劳断口形貌。(a)激光-CMT 接头裂纹萌生区;(b)激光-CMT 接头裂纹扩展区;(c)激光-CMT 接头瞬断区;(d)激光-VPTIG 接头裂纹萌生区;(e)激光-VPTIG 接头裂纹扩展区;(f)激光-VPTIG 接头瞬断区;(g)激光-MIG 接头裂纹萌生区;(h)激光-MIG 接头裂纹扩展区;(i)激光-MIG 接头瞬断区

Fig. 9 Fatigue fracture morphologies of three kinds of hybrid welded joints. (a) Fatigue crack initiation zone of laser-CMT hybrid welded joint; (b) extended zone of laser-CMT hybrid welded joint; (c) instantaneous break zone of laser-CMT hybrid welded joint; (d) fatigue crack initiation zone of laser-VPTIG hybrid welding joint; (e) extended zone of laser-VPTIG hybrid welded joint; (f) instantaneous break zone of laser-VPTIG hybrid welded joint; (g) fatigue crack initiation zone of laser-MIG hybrid welded joint; (h) extended zone of laser-MIG hybrid welded joint; (i) instantaneous break zone of laser-MIG hybrid welded joint

主要包括疲劳裂纹萌生区、疲劳裂纹扩展区和瞬断区。由图 9(a)、(d)、(g)可以看出,三种复合焊接接头的疲劳裂纹均萌生于焊缝上表面,由于疲劳载荷的循环作用,疲劳裂纹不断地张开闭合,疲劳裂纹萌生区存在向试样内部扩散的扇形放射棱线,具有典

型的疲劳裂纹源特征。图 9(b)、(e)、(h)为疲劳裂纹的稳态扩展区,疲劳裂纹沿着垂直于最大切应力的方向扩展,该阶段扩展面积较大并出现了河流状疲劳条纹,与文献[18]的分析结果相同;同时还能看到一些二次裂纹,二次裂纹平行于疲劳条带。瞬断

区断口形貌呈典型的韧窝状,具有延晶断裂特征,如图9(c)、(f)、(i)所示。

4 结 论

采用光纤激光-CMT、光纤激光-VPTIG、光纤激光-MIG三种复合焊接方法分别焊接了带锁底结构的6106-T6铝合金型材,在优化的参数条件下均可获得成型良好,无明显气孔、裂纹等缺陷的复合焊接接头,而且激光-MIG复合焊接接头的间隙适应性明显提高。

三种复合焊接接头焊缝中心的显微组织均为等轴晶,激光-MIG复合焊接接头的晶粒尺寸较大,且上下部分的晶粒尺寸差别不大,而激光-CMT和激光-VPTIG复合焊接接头中心的等轴枝晶尺寸较小,且由上到下逐渐减小。

光纤激光-CMT、光纤激光-VPTIG、光纤激光-MIG三种复合焊接接头均存在接头软化现象,抗拉强度均值分别为213.0,198.0,200.0MPa,疲劳极限分别为105.00,100.83,113.50MPa,激光-MIG复合接头的极限疲劳强度最高。三种复合焊接接头疲劳裂纹均萌生于焊缝融合线处的柱状晶区,疲劳断口呈典型的韧性断裂特征。

参 考 文 献

- [1] Qiao J N, Wang Q M, Zou J L, *et al.* Microstructure and mechanical property of A7N01 aluminum alloy joints 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.
- [2] Miller W S, Zhuang L, Bottema J, *et al.* Recent development in aluminium alloys for the automotive industry[J]. Materials Science and Engineering: A, 2000, 280(1): 37-49.
- [3] Ghosh P K, Gupta S R, Gupta P C, *et al.* Fatigue characteristics of pulsed MIG-welded Al-Zn-Mg alloy [J]. Journal of Materials Science, 1991, 26(22): 6161-6170.
- [4] Dausinger F, Rapp J, Beck M, *et al.* Welding of aluminum: a challenging opportunity for laser technology[J]. Journal of Laser Applications, 1996, 8(6): 285-290.
- [5] Lu H, Xing L W, Liang Z M. Arc behavior of A-MIG welding and microstructure of aluminum alloy welded joint [J]. Transactions of the China Welding

- Institution, 2014, 35(11): 1-4, I .
路浩, 邢立伟, 梁志敏. 铝合金活性 MIG 焊接电弧行为及微观组织分析 [J]. 焊接学报, 2014, 35(11): 1-4, I .
- [6] Narsimhachary D. Effect of laser welding parameters on 6061 aluminium alloy [D]. Odisha: National Institute of Technology Rourkeal, 2014: 7-9.
- [7] Katayama S, Nagayama H, Mizutani M, *et al.* Fibre laser welding of aluminium alloy [J]. Welding International, 2009, 23(10): 744-752.
- [8] Ahn J, He E G, Chen L, *et al.* The effect of Ar and He shielding gas on fibre laser weld shape and microstructure in AA 2024-T3 [J]. Journal of Manufacturing Processes, 2017, 29: 62-73.
- [9] Fan D, Dong B Z, Yu S R, *et al.* Technology features and progress of laser-arc hybrid welding[J]. Hot Working Technology, 2011, 40(11): 164-166, 169.
樊丁, 董铂喆, 余淑荣, 等. 激光-电弧复合焊接的技术特点与研究进展 [J]. 热加工工艺, 2011, 40(11): 164-166, 169.
- [10] Yonetani H. Laser-MIG hybrid welding to aluminium alloy carbody shell for railway vehicles[J]. Welding International, 2008, 22(10): 701-704.
- [11] Lee K D, Park K Y. A study on the process robustness of Nd:YAG laser-MIG hybrid welding of aluminum alloy 6061-T6[C]//International Congress on Applications of Lasers & Electro-Optics, October 6-10, 2003, Miami, USA. USA: AIP, 2003.
- [12] Yang D W, Chen S H, Huang J H, *et al.* Laser-TIG arc hybrid welding technology of 6005A aluminum alloy with filler wire[J]. Transactions of the China Welding Institution, 2017, 38(10): 51-54, I .
杨大伟, 陈树海, 黄继华, 等. 6005A 铝合金激光-TIG 复合热源填丝焊接技术 [J]. 焊接学报, 2017, 38(10): 51-54, I .
- [13] Wanjara P, Cao X J. Hybrid laser-arc welding of AA6061-T6 butt joints[J]. Materials Science Forum, 2014: 2833-2838.
- [14] Ji W D, Chen H. 10 mm thick 6005A aluminum alloy laser-MIG hybrid welding[J]. Electric Welding Machine, 2014, 44(9): 128-132.
季卫东, 陈辉. 10 mm 厚 6005A 铝合金激光-MIG 复合焊接 [J]. 电焊机, 2014, 44(9): 128-132.
- [15] Qiao J N, Lu J X, Wu S K. Fatigue cracking characteristics of fiber laser-VPTIG hybrid butt welded 7N01P-T4 aluminum alloy[J]. International Journal of Fatigue, 2017, 98: 32-40.
- [16] Casalino G, Mortello M, Leo P, *et al.* Study on arc and laser powers in the hybrid welding of AA5754 Al-alloy[J]. Materials & Design, 2014, 61: 191-198.

[17] Srivatsan T S, Vasudevan S, Park L, *et al.* An investigation of the high cycle fatigue and final fracture behavior of aluminum alloy 2219 [J]. *Key Engineering Materials*, 2008, 378/379: 207-230.

[18] Alrubaie K, Barroso E, Godefroid L. Fatigue crack growth analysis of pre-strained 7475-T7351 aluminum alloy[J]. *International Journal of Fatigue*, 2006, 28(8): 934-942.