

填充焊丝对 A7204 铝合金光纤激光-VPTIG 复合焊接头的影响

王 灿, 吕俊霞, 张建超, 吴世凯

北京工业大学激光工程研究院, 北京 100124

摘要 基于光纤激光-变极性钨极稀有气体保护电弧焊(VPTIG)复合焊技术,利用不同填充焊丝对 A7204 铝合金进行了焊接,分析了复合焊接接头的显微组织与力学性能,并研究了接头的软化行为及机制。结果表明,ER5087 填充焊丝条件下的焊缝上部铸态组织最细小;自然时效 90 天后,三种填充焊丝条件下的接头力学性能相近,拉伸试样基本断裂于近母材侧的热影响区;三种填充焊丝条件的焊接接头在距熔合线 1.6~2 mm 处的热影响区硬度最高,而在距焊缝中心 3~7 mm 处的热影响区有明显的软化带;焊接热影响区存在明显的时效硬化区和再结晶软化区,且自然时效对热影响区软化具有明显影响。

关键词 激光技术; 光纤激光; 复合焊接; A7204 铝合金; 接头软化

中图分类号 TG456.7

文献标识码 A

doi: 10.3788/CJL201845.0302002

Effects of Filler Wires on A7204 Aluminum Alloy Joint by Fiber Laser-VPTIG Hybrid Welding

Wang Can, Lü Junxia, Zhang Jianchao, Wu Shikai

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

Abstract By using the hybrid welding technology of fiber-laser and VPTIG (variable-polarity tungsten inert gas arc welding), the A7204 aluminum alloys are welded with different filler wires. The microstructures and mechanical properties of these joints by this hybrid welding are analyzed, and the softening behavior and mechanism of these joints are also investigated. The results show that the upper part of the weld with ER5087 filler wires presents the finest microstructure with narrow dendrite arms. After the natural aging of 90 days, the mechanical properties of joints welded with three kinds of filler wires are similar, and the tensile specimens fracture basically in the heat-affected zone which is close to the base metal. The microhardness of these joints welded with three kinds of filler wires in the heat-affected zone, 1.6-2 mm away from the fusion line, is the highest, in contrast, the softening zone obviously occurs in the heat-affected zone, 3-7 mm away from the weld center. In the heat-affected zone, there exist the obvious aging hardening zone and recrystallization softening zone, and the natural aging has an obvious effect on the softening of heat-affected zone.

Key words laser technique; fiber laser; hybrid welding; A7204 aluminum alloy; joint softening

OCIS codes 140.3390; 160.3900; 350.3390

1 引 言

A7204 铝合金属于 Al-Zn-Mg 系可热处理强化

铝合金,是一种典型的时效硬化合金,具有强度高、成形性好、耐腐蚀性强、焊接性能好及密度低等优点,被广泛应用于高速列车车体的制造中^[1]。传统

收稿日期: 2017-09-18; 收到修改稿日期: 2017-10-11

基金项目: 国家自然科学基金(51775008)、北京市自然科学基金(2152007)

作者简介: 王灿(1993—),女,硕士研究生,主要从事铝合金激光焊接方面的研究。

E-mail: wangcan1012@emails.bjut.edu.cn

导师简介: 吴世凯(1976—),男,博士,副研究员,硕士生导师,主要从事激光电弧复合焊接机理及工艺技术方面的研究。

E-mail: wushikai@bjut.edu.cn(通信联系人)

的铝合金车体焊接采用熔化极稀有气体保护电弧焊(MIG),但MIG过程中容易产生气孔、裂纹等缺陷,造成焊接变形及接头软化等问题^[2]。激光-电弧复合焊接热输入小、熔深大,可有效抑制气孔的产生,提高接头力学性能。Yonetani等^[3]采用激光-MIG复合焊焊接A6N01S-T5挤压型材,得到的接头抗拉强度比MIG焊接下的提高了20%。Vaidya等^[4]研究发现,激光-MIG复合焊AA6013-T6铝合金的接头在高周循环区的疲劳极限提高了30%。李飞等^[5]利用激光-钨极稀有气体保护电弧焊(TIG)复合焊焊接了5083铝合金,获得了稳定的焊接过程及成形良好的焊缝。乔俊楠等^[6]研究发现,激光-TIG复合焊A7N01铝合金的接头抗拉强度提高到母材的83%,疲劳极限为115 MPa。光纤激光-变极性(VP)TIG复合焊接的正、反向电流值及占空比可调,可最大程度地强化阴极雾化作用以清理表面氧化膜,同时可减小焊接热输入,改善焊缝成形并提高接头力学性能,在铝合金焊接中表现出突出的优势^[6-8]。

在铝合金填丝焊接中,焊缝金属的成分决定接头的组织和性能,通过合理选择填充焊丝可以调控焊缝接头组织性能,已成为一种提高铝合金车体焊接质量的可行手段。李慧中等^[9]研究发现,在MIG过程中,ER2319填充焊丝条件下的2519铝合金焊

接接头的力学性能优于ER4047填充焊丝条件下的。易杰等^[10]研究发现,6005A铝合金使用ER5356填充焊丝进行焊接时,得到的接头强度高于ER4047填充焊丝条件下的;7020铝合金使用ER5087填充焊丝进行焊接时,得到的接头强度高于ER5356填充焊丝条件下的。然而,关于填充焊丝对激光焊接7XXX系铝合金接头性能的影响规律鲜有报道。

本文选用Al-Mg系的ER5356、Al-Mg-Zr系的ER5087及Al-Si系的ER4047填充焊丝分别进行A7024铝合金焊接工艺的试验,对比分析了三种填充焊丝条件下的复合焊接接头的显微组织及力学性能变化,并研究了填充焊丝对接头软化行为的影响机制。

2 试验材料及方法

试验材料为4 mm厚A7204铝合金板材,其热处理态为T4态。试样尺寸为200 mm×100 mm×4 mm,采用对接焊方式,填充焊丝选用直径为1.2 mm的ER5087、ER5356和ER4047焊丝,A7204铝合金和填充焊丝的化学成分见表1。A7204铝合金的显微组织如图1所示,可以看到,显微组织呈典型的轧制态长条状,晶粒沿轧制方向伸长,晶粒内部有黑色析出相呈弥散分布。

表1 A7204铝合金和填充焊丝的化学成分(质量分数,%)

Table 1 Chemical compositions of A7204 aluminum alloy and filler wires (mass fraction, %)

Material	Si	Fe	Cu	Mn	Mg	Cr	Zn	Ti	Zr	Al
A7204	≤0.3	≤0.35	≤0.2	0.2-0.7	1.0-2.0	≤0.3	4.0-5.0	≤0.2	≤0.25	Bal.
ER5356	0.057	0.12	0.011	<0.13	4.9	0.065	0.13	0.11	-	Bal.
ER5087	<0.25	<0.4	<0.05	0.7-1.0	4.5-5.2	0.05-0.25	<0.25	<0.15	0.1-0.2	Bal.
ER4047	11-13	-	0.3	0.15	0.1	-	0.2	-	-	Bal.

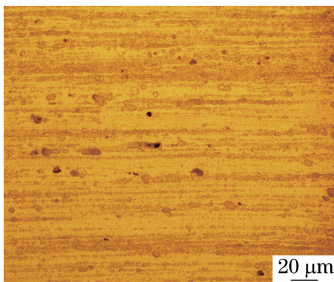


图1 A7204铝合金的金相显微组织

Fig. 1 Metallographic microstructure of A7204 aluminum alloy

光纤激光-变极性钨极稀有气体保护电弧焊(VPTIG)复合对接焊的试验装置示意图如图2所示。采用激光在前、电弧在后的旁轴复合方式,焊丝从激光前方送入,光丝间距约为1 mm;电弧在激光后方,激光和电弧的间距为2 mm左右。激光器为美

国IPG公司生产的YLS-6000光纤激光器,波长为1060~1070 nm,光纤传输芯径为200 μm,输出耦合准直镜的焦距为200 mm,聚焦镜的焦距为250 mm,光斑直径约为0.25 mm。采用德国KUKA公司生产的KRC-30型六轴关节型机械手控制焊接运动系统,焊接电源选用奥地利福尼斯公司生产的Magic Wave 3000 Job数字化焊机。VPTIG的电流波形为带圆角的矩形波,频率为60 Hz,占空比为64%。钨极选用直径为2.4 mm、Ce₂O₃质量分数为2%的铈钨极,伸长为3~5 mm,钨极尖端距工件表面约2.5 mm。焊接保护气体为氩气,正、背面保护气流量均为10 L·min⁻¹。试验工艺参数设定为激光功率6000 W,电弧电流180 A,焊接速度及送丝速度4 m·min⁻¹。

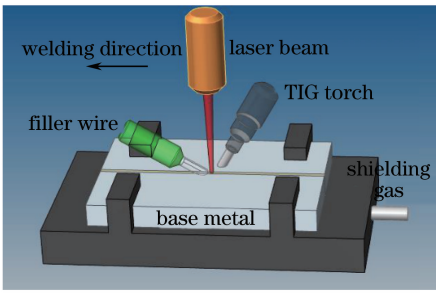


图 2 焊接试验装置示意图

Fig. 2 Schematic of welding experimental setup

焊前依次使用饱和氢氧化钠溶液碱洗、水洗、硝酸水溶液酸洗、水洗,化学清洗后需在 24 h 内施焊。试验前用刮刀刮削试样对接焊接区至表面露出金属光泽。试验后将试板线切割加工成金相试样并用凯勒试剂进行腐蚀,用金相显微镜观察接头显微组织。

将试样制成光滑试样后,采用美国 MTS 公司生产的 MTS370 Load Frame 型材料试验机进行接头拉伸性能测试,接头拉伸试样尺寸如图 3 所示。采用澳大利亚 FMG 公司生产的 FMG300e 型显微硬度测试仪进行试样的硬度测试,载荷为 100 g,加载为 15 s。采用透射电镜(TEM)观察接头析出相。三种填充焊丝条件下复合焊接得到的焊缝表面形貌如图 4 所示。

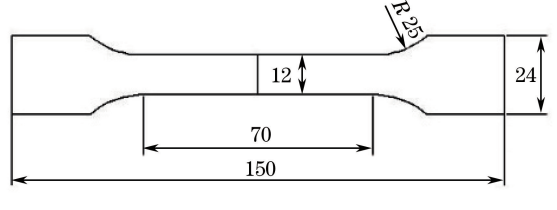


图 3 拉伸试样示意图

Fig. 3 Schematic of tensile specimen

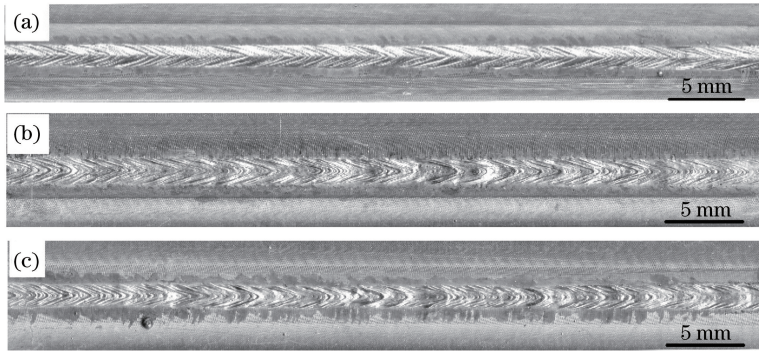


图 4 三种填充焊丝条件下的焊缝宏观形貌。(a) ER5087;(b) ER5356;(c) ER4047

Fig. 4 Macroscopic appearances of welds under three kinds of filler wires. (a) ER5087; (b) ER5356; (c) ER4047

3 试验结果及讨论

3.1 接头显微组织

A7204 铝合金属于典型的时效硬化合金,随着自然时效时间的延长,焊缝析出相数量增多,析出相的钉扎位错会提高接头的力学性能^[11]。研究表明,自然时效 30 天后接头力学性能达到稳定状态^[6]。自然时效 90 天后,三种填充焊丝条件下的接头焊缝金相显微组织如图 5 所示,焊缝为典型的铸态组织。焊缝上部为激光和电弧热源共同作用区,焊缝下部为激光热源单独作用区。由于电弧热分布较为发散,因此,电弧热只作用于焊缝上部区域,焊缝上部出现较为粗大的二次枝晶,而下部激光热源作用区为均匀的等轴细晶区。观察三种填充焊丝条件下的接头焊缝形貌可发现,ER5087 填充焊丝条件下的焊缝上部枝晶较细小,ER5356 填充焊丝条件下的焊缝次之,ER4047 填充焊丝条件下的焊缝

上部枝晶较发达,而焊缝下部激光热源作用区晶粒的尺寸差别不大。快速凝固使得填充焊丝在熔池上部熔化后难以运动到焊缝下部激光作用区。结合表 1 可知,ER5356 和 ER5087 填充焊丝中 Mg 的含量较多,可补充焊接时母材中 Mg 元素的蒸发烧损。同时,在焊接过程中,Al 基体中会有一些量的 Al₃Mg₂ 强化相共晶组织析出,Al₃Mg₂ 共晶相既会在晶体内部起到弥散强化作用,也会在晶界处起到细化晶粒的作用。ER5087 填充焊丝中含有的变质元素 Zr 和稀土元素 Er 会在液态铝熔池中形成金属间化合物,该化合物可作为人工核心促进异质形核,使熔池金属形核率增加,从而改变焊缝金属凝固组织形态,使得焊缝上部晶粒最细小^[12]。

3.2 接头力学性能

自然时效 90 天后三种填充焊丝条件下的焊接接头和母材(BM)的拉伸试验结果如图 6(a)所示。从图中可以看出,三种填充焊丝条件下的接头抗拉

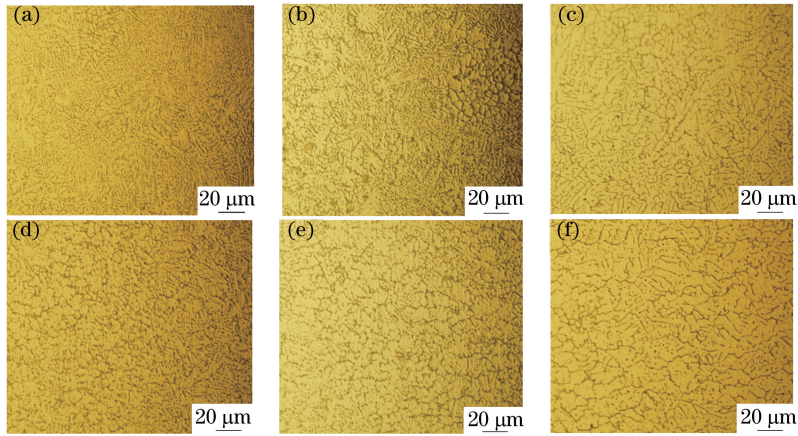


图 5 不同填充焊丝条件下焊缝不同位置的显微组织。(a) ER5087,上部;(b) ER5356,上部;(c) ER4047,上部;(d) ER5087,下部;(e) ER5356,下部;(f) ER4047,下部

Fig. 5 Microstructures at different positions of welds under different filler wires. (a) ER5087, upper part ; (b) ER5356, upper part; (c) ER4047, upper part; (d) ER5087, lower part; (e) ER5356, lower part; (f) ER4047, lower part

强度和屈服强度都接近于母材的;ER4047 填充焊丝条件下的接头延伸率最小,仅为 6.5%,而 ER5356 和 ER5087 填充焊丝条件下的接头延伸率分别为8.5%和 8.7%。图 6(b)所示为 ER5087 填充焊丝条件下的接头断口形貌。三种填充焊丝条件下的接头拉伸试样大多断裂于距焊缝中心 4~6 mm 的热影响区,断口轮廓线与拉伸方向成 45°角,时效后接头断口存在明显颈缩现象。试验结果表明,三种填充焊丝的成分对接头的拉伸性能影响不大,且热影响区为明显的软化区。

时效 90 天后三种填充焊丝条件下的接头显微硬度分布如图 7 所示。结果表明,三种填充焊丝条件下的接头焊缝区(FZ)、热影响区(HAZ)和母材显微硬度分布相近,接头硬度以焊缝中心线为对称轴呈近似对称分布;焊缝区硬度最低,平均硬度值为 95 HV 左右。这是由于焊丝的填充和焊接过程中合金元素的蒸发烧损造成 Zn、Mg 等主合金元素的析出相减少,且大量的主合金元素在熔池结晶时偏聚于晶界造成基体过饱和度减小,后续自然时效的驱动力不足,沉淀强化效果低于母材和热影响区的。紧邻熔合线 1.6~2 mm 范围内的近缝热影响区显微硬度达到 125 HV 左右,高于母材的平均硬度;在距焊缝中心 3~7 mm 处的远缝热影响区存在约 4 mm宽的软化区。不同填充焊丝对接头显微硬度分布影响不大,但在接头的热影响区存在明显的软化区。近母材侧热影响区存在接头软化区可能是由于在焊接热循环的作用下,母材的轧制组织发生再

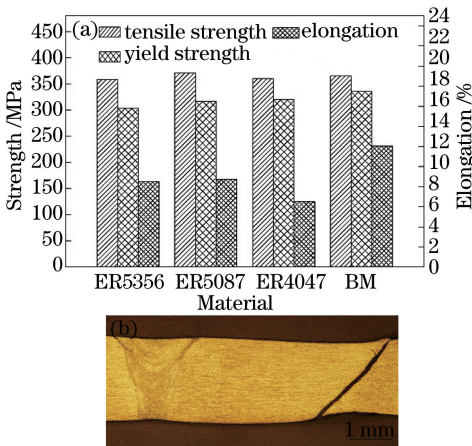


图 6 (a)自然时效后三种填充焊丝条件下的接头及母材的拉伸性能;(b) ER5087 填充焊丝条件下的接头拉伸断口横截面形貌

Fig. 6 (a) Tensile properties of joints welded with three kinds of filler wires and base metal after natural aging; (b) cross-sectional morphology of joint welded with ER5087 filler wire after natural aging

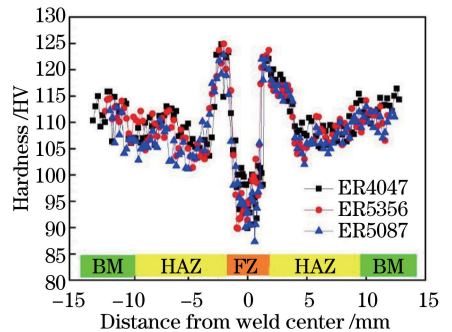


图 7 三种填充焊丝条件下的接头显微硬度
Fig. 7 Microhardness of joints welded with three kinds of filler wires

结晶或不完全再结晶,过时效后析出相减少并粗化,从而使得接头的强度减小。

3.3 接头热影响区的软化行为

为了进一步探究接头软化行为,针对 ER5356 填充焊丝条件下的接头进行了不同时效时间的接头显微硬度测量,结果如图 8 所示。由图可知,焊缝和热影响区均存在不同程度的软化现象,且自然时效对显微硬度分布有明显影响。焊缝硬度为整个接头硬度最低的区域,紧邻焊缝 1.6~2 mm 处的近缝热影响区硬度值随着自然时效时间的延长而显著提高,且在时效 30 天后超过母材硬度;

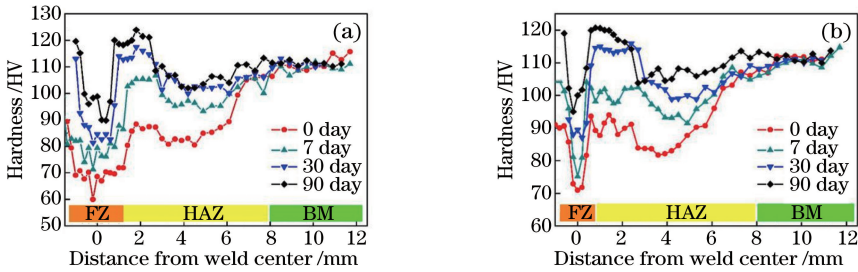


图 8 ER5356 填充焊丝条件下接头不同位置的显微硬度。(a)上部;(b)下部

Fig. 8 Microhardness at different positions of joints welded with ER5356 filler wire. (a) Upper part; (b) lower part

焊缝区、近缝热影响区、远缝热影响区和母材四个微区的 TEM 像和选区电子衍射分析结果如图 9 所示。从图 9(a)可以看出,焊缝晶粒内部 $\alpha(\text{Al})$ 基体上弥散分布着位错,且焊缝内有少量晶粒尺寸较

大的块状析出相。晶内析出相呈直径为 0.3~0.8 μm 的球形或圆饼状,经过能谱分析可知,主要元素成分为 Al、Mg、Zn、Cu 并在 $\alpha(\text{Al})$ 基体上呈不均匀分布。由图 9(b)可见,母材内部均匀分布着许多条带状组织,晶内有大量位错存在,位错及其周围有细小的第二相粒子,母材基体中弥散分布着大量的纳米级析出相。由图 9(c)可以看出,近缝热影响区存在着规则的板条状组织,晶内出现了高密度且分布均匀的点状析出相。由于该处紧邻焊缝,焊接热循环峰值温度高,可能超过了母材中析出相的回熔温度,在焊接过程中,母材中原有的析出相发生回熔,形成过饱和固溶体,在焊接冷却阶段和室温放置过程中就会出现 GPI 区,使近缝热影响区硬度显著提高^[13]。通过对衍射斑点的观察发现,在 Al 晶面不同位置处有额外衍射斑点出现,这些位置的衍射斑点来自于 η' 相, η' 相是 Al-Zn-Mg-Cu 系合金峰值时效状态下最主要的析出相^[14],析出相的增多强化了该区域并对焊缝起到了保护作用。由图 9(d)可以看出,析出相数量明显减少,相比于母材析出相有所粗化且分布不均匀。通过能谱分析可知,该微区强化元素减少,这是由于过时效导致母材强化相颗粒发生了分解或减少,使远缝热影响区的显微硬度和拉伸强度降低,发生了明显的软化效应。

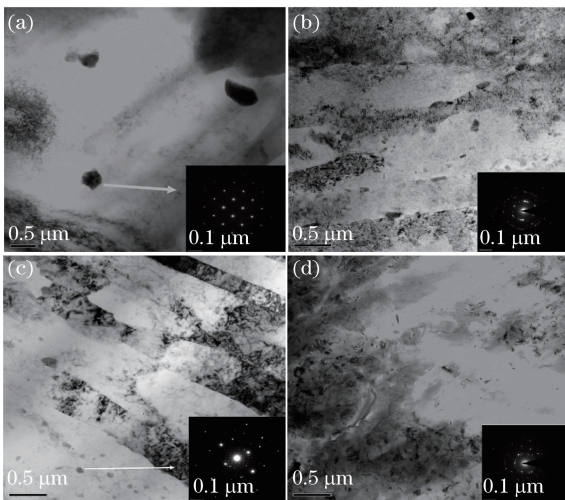


图 9 ER5356 填充焊丝条件下不同位置的接头 TEM 图和部分衍射斑点。(a)焊缝;(b)母材;
(c)近缝热影响区;(d)远缝热影响区

Fig. 9 TEM images at different parts of joints welded with ER5356 filler wire and some diffraction spots.

(a) Weld; (b) base metal; (c) heat-affected area near to weld; (d) heat-affected area far from weld

4 结 论

基于光纤激光-VPTIG 复合焊技术,利用 ER5356、ER5087 和 ER4047 填充焊丝对 A7204 铝合金进行了焊接,得到以下结论。

1) 三种填充焊丝条件下的接头焊缝是呈等轴树枝晶状的铸态组织。ER5087 填充焊丝条件下的焊缝上部晶粒最细小,三种填充焊丝条件下的焊缝下部晶粒大小相近。不同填充焊丝的成分对接头力学性能影响不大,拉伸试样主要断裂于靠近母材的热影响区。

2) 三种填充焊丝条件下的接头显微硬度分布相近,都存在时效硬化区和再结晶软化区。

3) 自然时效后,近缝热影响区的析出相数量较多,该微区硬度最高。焊缝区的析出相数量少且分布不均匀,存在元素蒸发烧损现象,该区域硬度最低。远缝热影响区的析出相数量少并伴有粗化,该微区存在软化现象。

参 考 文 献

- [1] Duan Y, Xu J J, Chen J Y, *et al.* The effects of heat treatment on the microstructure and cyclic behavior of A7N01-T4 aluminum alloy[J]. *Materials Characterization*, 2017, 131: 201-209.
- [2] Yang S L, Lin Q L. Microstructures and properties of the Al-4.5Zn-1.5Mg-0.5Mn aluminum alloy welding joints [J]. *Advanced Materials Research*, 2011, 148/149: 640-643.
- [3] Yonetani H. Laser-MIG hybrid welding to aluminium alloy carbody shell for railway vehicles[J]. *Welding International*, 2008, 22(10): 701-704.
- [4] Vaidya W V, Angamuthu K, Kocak M, *et al.* Strength and fatigue resistance of laser-MIG hybrid butt welds of an airframe aluminium alloy AA6013[J]. *Welding in the World*, 2006, 50(11/12): 88-97.
- [5] Li F, Kong X F, Wu S K, *et al.* Fiber laser-TIG hybrid welding process of 5083 aluminum alloy[J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 2014, 26(3): 039003.
李飞,孔晓芳,吴世凯,等. 5083 铝合金光纤激光-TIG 复合焊接工艺研究[J]. *强激光与粒子束*, 2014, 26(3): 039003.
- [6] 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 铝合金接头组织与力学性能[J]. *中国激光*, 2016, 43(9): 0902001.

- [7] 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.
- [8] Wang Q M, Qiao J N, Zou J L, *et al.* Fiber laser-variable polarity TIG hybrid welding of A7N01 aluminum alloy with filler wire[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2016, 43(6): 0602004.
王启明,乔俊楠,邹江林,等. A7N01 铝合金光纤激光-变极性 TIG 复合填丝焊接工艺研究[J]. *中国激光*, 2016, 43(6): 0602004.
- [9] Li H Z, Guo F F, Liang X P, *et al.* Effect of welding wire compositions on microstructures and mechanical properties of welded joint of 2519 aluminum alloy[J]. *Transactions of the China Welding Institution*, 2008, 29(4): 77-81.
李慧中,郭菲菲,梁霄鹏,等. 焊丝成分对 2519 铝合金焊缝组织与性能的影响[J]. *焊接学报*, 2008, 29(4): 77-81.
- [10] Yi J, Li L X, Liu K Y, *et al.* Effect of welding wire compositions on microstructures and mechanical properties of double pulsed MIG welding joint of 6061-T6 aluminum alloy[J]. *Ordnance Material Science and Engineering*, 2015, 38(3): 26-30.
易杰,李落星,刘开勇,等. 焊丝成分对 6061-T6 铝合金双脉冲 MIG 焊缝组织与性能的影响[J]. *兵器材料科学与工程*, 2015, 38(3): 26-30.
- [11] Zhang J B, Zhang Y A, He Z B, *et al.* Effect of natural ageing on properties and microstructure of 7N01 aluminum alloys[J]. *Chinese Journal of Rare Metals*, 2012, 36(2): 191-195.
张建波,张永安,何振波,等. 自然时效对 7N01 铝合金组织和性能的影响[J]. *稀有金属*, 2012, 36(2): 191-195.
- [12] Zhang X Y. Microstructures and mechanical properties of laser welded joints of 2060 aluminum lithium alloy[D]. Beijing: Beijing University of Technology, 2016.
张心怡. 2060 铝锂合金激光焊接组织及力学性能研究[D]. 北京:北京工业大学,2016.
- [13] Zhang L. Study on the softening behavior of the 7E49 aluminum alloy welding joint [D]. Beijing: Beijing University of Technology, 2016.
张亮. 7E49 铝合金焊接接头软化行为研究[D]. 北京:北京工业大学,2016.
- [14] Berg L K, Gjønnes J, Hansen V, *et al.* GP-zones in Al-Zn-Mg alloys and their role in artificial aging[J]. *Acta Materialia*, 2001, 49(17): 3443-3451.