

2A14 铝合金激光-MIG 复合填丝焊特性分析

常云峰, 雷 振, 王旭友, 滕 彬
(机械科学研究院 哈尔滨焊接研究所, 哈尔滨 150080)

摘 要: 针对 2A14 铝合金同时进行了激光-MIG 复合焊和激光-MIG 复合填丝焊试验,对比分析了激光功率、离焦量、焊接速度、焊接电流、光丝间距、填丝速度等工艺参数对两种焊接方法焊缝成形的影响规律. 结果表明,铝合金激光-MIG 复合填丝焊方法切实可行,工艺适应性良好,与铝合金激光-MIG 复合焊相比,均能在较宽的工艺参数范围内实现良好的焊缝成形;相同试验参数条件下,铝合金激光-MIG 复合填丝焊的焊缝成形特征与激光-MIG 复合焊基本相同,但其熔敷速度明显大于激光-MIG 复合焊,焊缝余高明显增加.

关键词: 铝合金; 复合填丝; 焊接特性

中图分类号: TG 456.7 **文献标识码:** A **doi:**10.12073/j.hjxb.20161121004

0 序 言

2A14 属于铝铜系可热处理强化铝合金,具有比重小、比强度高、易于加工等特点,在航空航天工业中得到普遍应用^[1].

铝合金因比热容大、电导率高、热导率大等特性,决定了其焊接时宜采用能量集中的热源^[2-3]. 与一般弧焊相比,激光焊接具有明显的技术优势,如能量密度高、焊接速度快、热输入低、变形小等^[4]. 铝合金的化学成分、物理特性及激光焊的工艺特性决定了铝合金激光焊焊缝成形差、气孔率较高、裂纹倾向较大、接头元素烧损严重等一系列焊接问题^[5].

激光-电弧复合焊充分利用了激光和电弧的优势,避免单一热源焊接的一些不足,提高了焊接过程的稳定性、接头质量及焊接效率,降低了工件加工装配要求^[6-7]. 铝合金激光-MIG 复合焊具有高速稳定焊接的技术优势^[8-10],但常常在焊接过程中熔敷速度无法与高速焊接相匹配,致使其高速焊接的技术优势无法充分发挥. 基于当前铝合金激光-MIG 复合焊存在的问题,创新性地开发了一种激光-MIG 复合填丝焊新工艺. 激光-MIG 复合焊通过在激光侧额外加一根冷丝,在不增加热输入条件下增加焊缝熔敷速度,有助于解决相关问题. 文中系统地对比研究了工艺参数对铝合金激光-MIG 复合焊与激光-MIG 复合填丝焊两种焊接方法焊缝成形的影响规律.

1 试验方法

试验母材为 2A14 铝合金,焊丝直径 1.2 mm 的 ER5356,其化学成分见表 1,试验采用平板堆焊方式,尺寸 250 mm×80 mm×8 mm,工艺参数见表 2. 图 1 为试验装置示意图,两种焊接方法采用同一个焊接装置,当进行激光-MIG 复合焊时,填丝速度设为 0 m/min. 试验设备包括 IPG YLR-6000 光纤激光器,HIGHYAG 激光焊枪,Fronius TPS4000 焊机,松下 YC-500 送丝装置,KUKA 机器人以及自行研制的工作台和卡具等.

表 1 母材及焊丝的化学成分(质量分数,%)

Table 1 Chemical compositions of base metal and wire

材料	Mg	Fe	Si	Zn	Ti	Mn	Cu	Cr	Al
2A14	0.63	0.21	0.75	0.034	0.02	0.7	4.19	-	余量
ER5356	5.0	0.4	0.25	0.25	0.15	0.1	0.1	0.03	余量

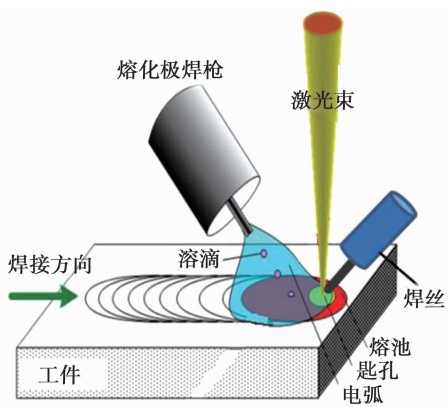


图 1 激光-MIG 复合填丝焊接示意图

Fig. 1 Setup sketch of laser-MIG hybrid welding with filler wire

表 2 主要试验工艺参数
Table 2 Main parameters

试验方法	焊接方法	激光功率 P/kW	离焦量 L/mm	焊接速度 $v/(\text{m}\cdot\text{min}^{-1})$	焊接电流 I/A	光丝间距 D/mm	填丝速度 $v_1/(\text{m}\cdot\text{min}^{-1})$
功率试验	复合	3~6	+4	2	160	4	0
	复合填丝						4
离焦量试验	复合	5	-20~+20	2	160	4	0
	复合填丝						4
焊接速度试验	复合	5	+4	1~6	160	4	0
	复合填丝						4
焊接电流试验	复合	5	+4	2	100~320	4	0
	复合填丝						4
光丝间距试验	复合	5	+4	2	160	0~12	0
	复合填丝						4
填丝速度试验	复合	5	+4	2	160	4	0~4
	复合填丝						4

2 试验结果与分析

2.1 典型焊缝成形对比

图 2 为相同工艺参数下铝合金激光-MIG 复合焊和激光-MIG 复合填丝焊的焊缝成形特征,可以看出,相同试验条件下,两种焊缝表面成形相当,均能得到连续、均匀的焊缝,无咬边等缺陷。

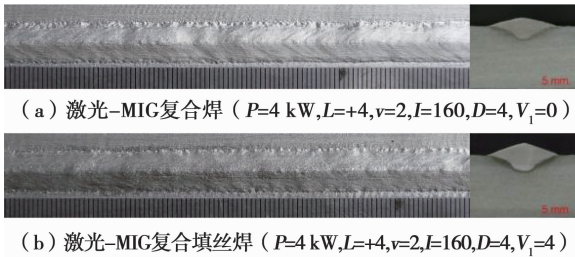


图 2 典型焊缝成形特征

Fig. 2 Typical characteristics of weld appearance

2.2 激光功率对焊缝成形的影响

图 3 为激光功率对两种焊缝的熔深、熔宽、余高和深宽比的影响规律。由图 3 可知,试验条件下,随激光功率的增加,两种焊缝的熔深、熔宽、深宽比均增大,余高基本不变。激光功率增大,匙孔直径和深度增加,导致熔池变大,造成熔深和熔宽的增加,而深宽比随激光功率的增加而变大,说明激光在激光-熔化极电弧复合焊中主要影响焊缝熔深,而对熔宽影响较小。另外,由图 3 可知,试验条件下,铝合金激光-MIG 复合填丝焊的焊缝熔深、熔宽、余高和深宽比均高于激光-MIG 复合焊。其中,熔深约增加

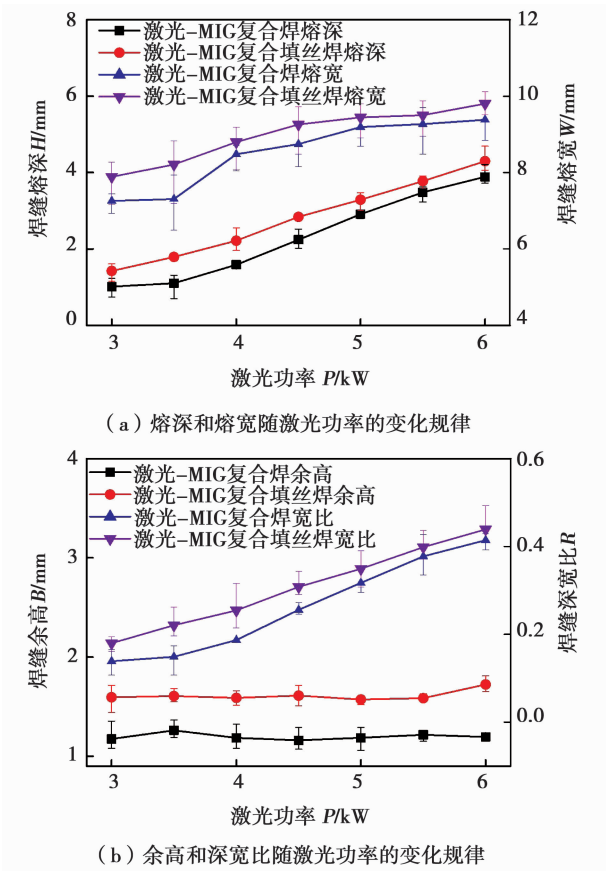


图 3 激光功率对焊缝横截面成形的影响规律

Fig. 3 Effect of laser power on parameters of cross section

8.5%~62.3%,并且,随着激光功率的增加其增加幅度变小,熔宽约提高2.5%~12.4%,余高约增加27.4%~44.3%,深宽比约提高5.5%~48.2%。这可能是由于在激光侧填入ER5356焊丝后,增加了

液态熔池对激光的吸收率,激光能量利用率增加,从而增加了熔深,具体原因有待进一步研究。

2.3 离焦量对焊缝成形的影响

图 4 为离焦量对两种焊缝的熔深、熔宽、余高和深宽比的影响规律。由图 4 可知,在该试验条件下,离焦量从 $-20 \sim -8$ mm 逐渐增大时,两种焊缝的熔深、深宽比均逐渐增加;离焦量在 $-8 \sim +20$ mm 范围内逐渐增大时,两种焊缝的熔深、深宽比均逐渐减小。离焦量在 $-20 \sim 0$ mm 范围内逐渐增大时,两种焊缝的熔宽呈现先增加后减小的趋势,但变化幅度较小,最大减幅分别约为 3.0% 和 2.7%;离焦量在 $0 \sim +20$ mm 范围内逐渐增大时,两种焊缝的熔宽呈现先增加后减小的变化趋势。试验参数范围内,两种焊缝的余高基本不变。

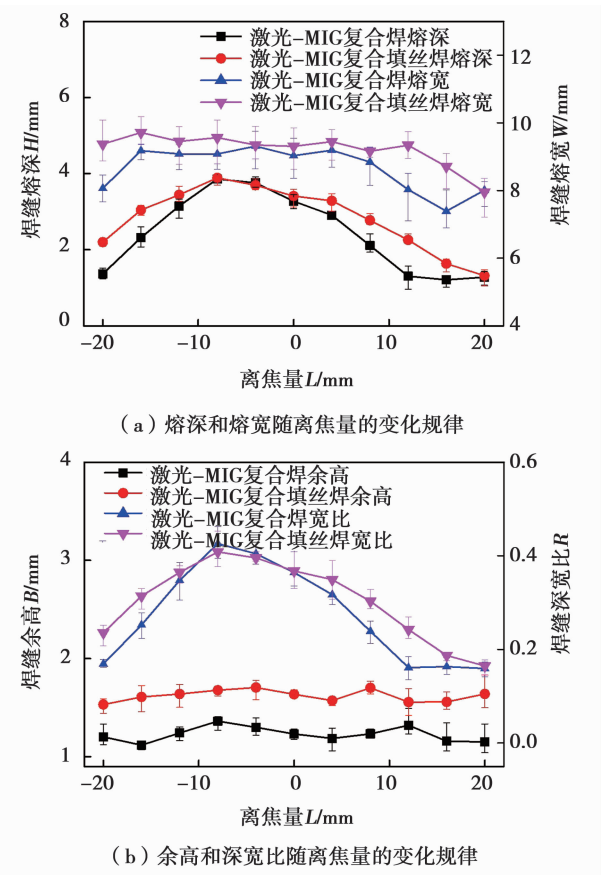


图 4 离焦量对焊缝横截面成形的影响规律
Fig. 4 Effect of defocus distance on parameters of cross section

随着离焦量绝对值的增加,试板表面处光斑直径变大,激光能量密度分布发生变化,中心高能量区面积减少,光斑边缘处能量密度显著下降,导致匙孔直径和深度下降,所以熔深、熔宽和深宽比均减小。由图 4 可知,试验参数范围内,铝合金激光-MIG 复

合填丝焊的焊缝熔深、熔宽、余高和深宽比整体均高于激光-MIG 复合焊,其中,离焦量相同时,激光-MIG 复合填丝的焊缝熔深均不低于激光-MIG 复合焊,最大约增加 72.8%。

2.4 焊接速度对焊缝成形的影响

图 5 为焊接速度对两种焊缝的熔深、熔宽、余高和深宽比的影响规律。由图 5 可知,随焊接速度的增加,两种焊缝的熔深、熔宽和余高均快速减小,深宽比有所波动,但整体趋势均是随焊接速度的增加而降低,当焊接速度增加到 4 m/min 后保持不变,这主要是由于当焊接速度增加到 4 m/min 后,焊接模式由深熔焊变为热导焊。随焊接速度增加,单位时间内的熔敷量快速减小,并且其减小速率远大于熔宽的减小速率,所以余高呈快速下降的趋势。

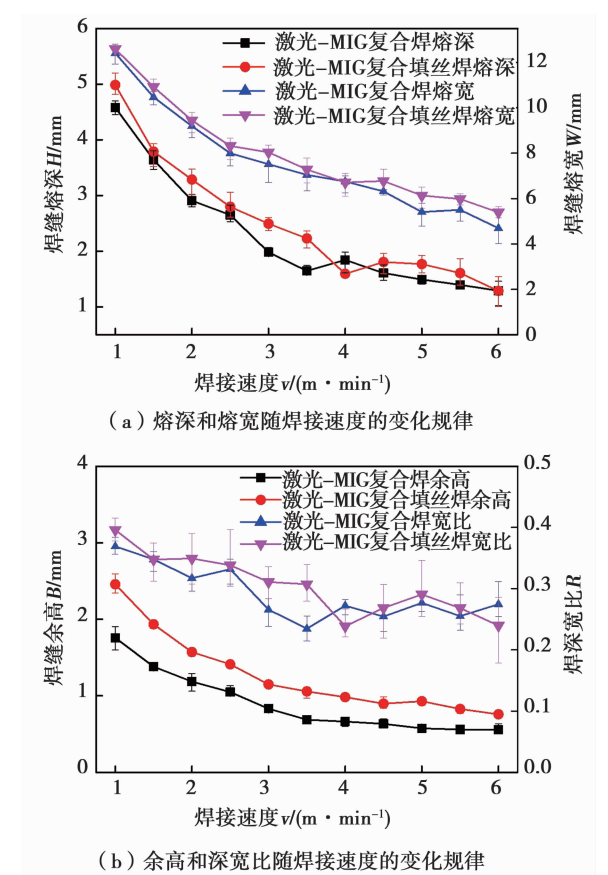


图 5 焊接速度对焊缝横截面成形的影响规律
Fig. 5 Effect of welding speed on parameters of cross section

由图 5 可知,试验参数范围内整体来看,铝合金激光-MIG 复合填丝焊的熔深、熔宽和深宽比略高于激光-MIG 复合焊,余高明显高于激光-MIG 复合焊。其中,当焊接速度在 4 m/min 附近时,铝合金激光-MIG 复合填丝焊的焊缝熔深稍低于激光-MIG 复

合焊,约降低 13.5%,其余焊接速度试验范围内,铝合金激光-MIG 复合填丝焊的焊缝熔深均不低于激光-MIG 复合焊,最大约增加 35.4%。

2.5 焊接电流对焊缝成形的影响

图 6 为焊接电流对两种焊缝的熔深、熔宽、余高和深宽比的影响规律。由图 6 可知,试验条件下,随焊接电流的增加,两种焊缝的熔深、熔宽和余高整体均呈增加趋势,深宽比整体呈减小趋势。焊接电流变大时,电弧弧柱区变大,但电弧能量密度有限,且远低于激光,对熔深的影响作用远小于其对熔宽的影响作用,所以熔深与熔宽均呈增加趋势,深宽比呈降低的趋势。由图 6 可知,试验参数范围内从整体来看,铝合金激光-MIG 复合填丝焊的熔深、深宽比和余高均高于激光-MIG 复合焊,熔宽与激光-MIG 复合焊相当,变化幅度最大约为 9.5%。其中,当焊接电流在 200 A 附近时,铝合金激光-MIG 复合填丝焊的焊缝熔深略低于激光-MIG 复合焊,约下降 2.4%,其它试验焊接电流下,铝合金激光-MIG 复合填丝焊的焊缝熔深均高于激光-MIG 复合焊,增加幅度约为 1.5%~21.2%。

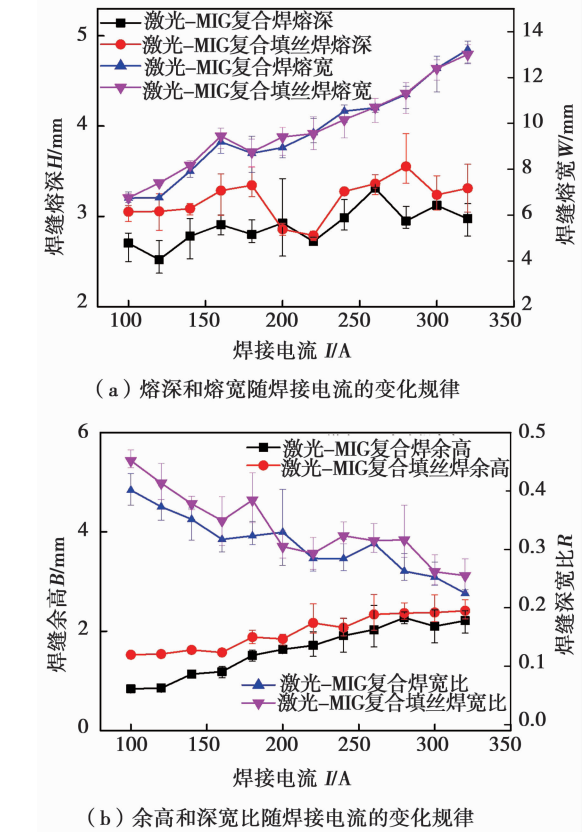


图 6 焊接电流对焊缝横截面成形的影响规律
Fig. 6 Effect of welding current on parameters of cross section

2.6 光丝间距对焊缝成形的影响

图 7 为光丝间距对两种焊缝的熔深、熔宽、余高和深宽比的影响规律。由图 7 可知,试验条件下,随光丝间距的增加,两种焊缝的熔深、熔宽均呈现先增大后减小的变化趋势,并且均在光丝间距为 4 mm 时达到最大;随光丝间距的增加,余高均呈缓慢增加的趋势,深宽比基本不变。

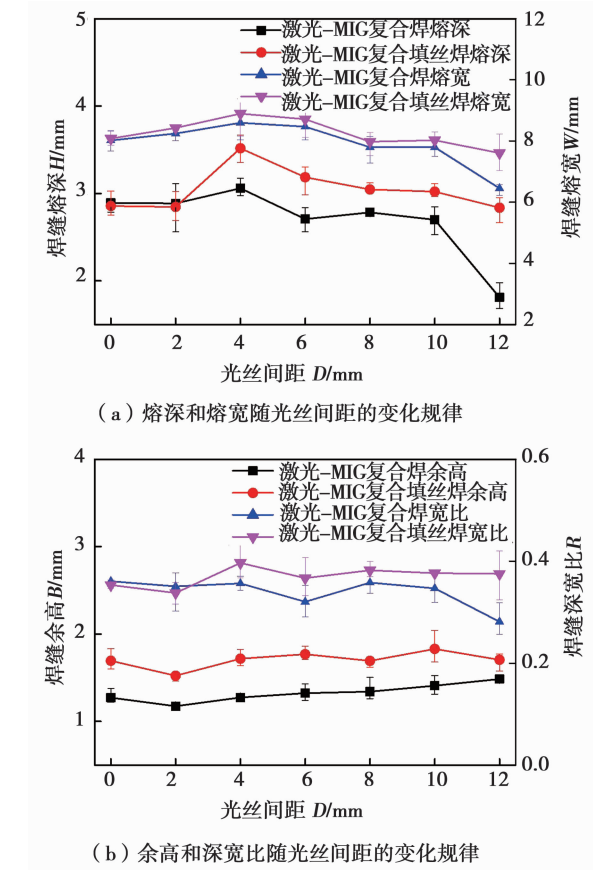


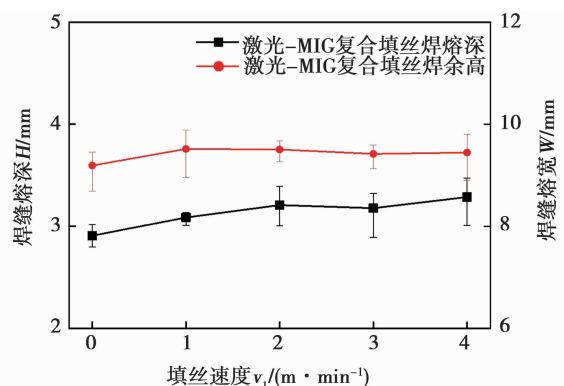
图 7 光丝间距对焊缝截面成形的影响规律
Fig. 7 Effect of laser-arc distance on parameters of cross section

由图 7 可知,试验参数范围内,从整体来看,铝合金激光-MIG 复合填丝焊的熔深、熔宽、余高和深宽比均明显高于激光-MIG 复合焊。其中,当光丝间距在 0~2 mm 范围内时,铝合金激光-MIG 复合填丝焊的焊缝熔深略低于激光-MIG 复合焊,最大约下降 1.4%;当光丝间距在 2~12 mm 范围内时,铝合金激光-MIG 复合填丝焊的焊缝熔深明显高于激光-MIG 复合焊,增加幅度约为 9.5%~56.7%。另外,由图 7 可知,当光丝间距由 10 mm 变为 12 mm 时,铝合金激光-MIG 复合焊的熔深、熔宽及深宽比均出现大幅度下降,而激光-MIG 复合填丝焊的下降幅度明显低于激光-MIG 复合焊,这可能是由于当光丝间

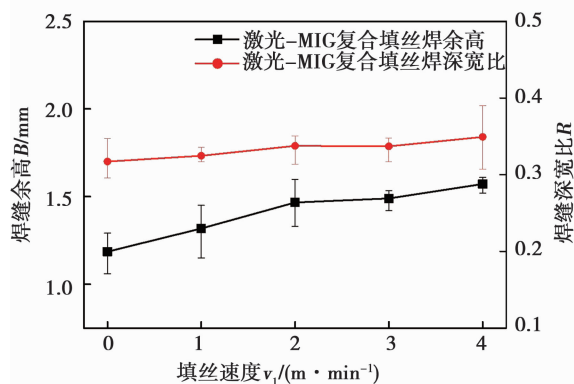
距由 10 mm 变为 12 mm 时,铝合金激光-MIG 复合焊中激光与电弧的复合程度大幅度降低,失去复合作用,而激光-MIG 复合填丝焊中激光与电弧的复合程度变化不大,仍处于复合状态。

2.7 填丝速度对焊缝成形的影响

图 8 为填丝速度对铝合金激光-MIG 复合焊填丝焊的熔深、熔宽、余高和深宽比的影响规律。由图 8 可知,试验范围内,随填丝速度的增加,熔深、余高和深宽比缓慢增加,而熔宽在填丝速度达到 1 m/min 后基本保持不变。



(a) 熔深和熔宽随填丝速度的变化规律



(b) 余高和深宽比随填丝速度的变化规律

图 8 填丝速度对焊缝截面成形的影响规律

Fig. 8 Effect of wire feed speed on parameters of cross section

3 结 论

(1) 铝合金激光-MIG 复合填丝焊切实可行,焊接工艺性良好,试验参数范围内焊缝成形良好。

(2) 相同试验条件下,铝合金激光-MIG 复合填丝焊的焊缝成形特征与激光-MIG 复合焊基本相同,但焊缝余高明显增加,熔敷速度明显提高。

(3) 与传统激光-MIG 复合焊相比,相同焊接条件下,激光-MIG 复合填丝焊在不增加焊接热输入的条件下提高了熔敷量而未减小熔深。

参考文献:

- [1] 周万盛,姚君山. 铝及其合金的焊接[M]. 北京:机械工业出版社,2006.
- [2] 肖荣诗,陈 铠,左铁钊,等. 高强铝合金激光焊接新进展[J]. 应用激光,2002,22(2):206-208.
Xiao Rongshi, Chen Kai, Zuo Tiechuan, *et al.* Laser welding recent development of high strength aluminum alloy[J]. Applied Laser, 2002, 22(2): 206-208.
- [3] Bunaziv I, Akselsen O M, Salminen A, *et al.* Fiber laser-MIG hybrid welding of 5mm 5083 aluminum alloy[J]. Journal of Materials Processing Technology, 2016, 233: 107-114.
- [4] 吴圣川,朱宗涛. 铝合金的激光焊接及性能评价[M]. 北京:国防工业出版社,2014.
- [5] Xu Lianghong, Tian Zhiling, Peng Yun, *et al.* Microstructure and mechanical properties of high strength aluminum alloy laser welds[J]. Chinese Journal of Lasers, 2008, 35(3): 456-461.
- [6] 丁 灏,马云霞,白培康,等. 铝合金激光焊新技术[J]. 热加工工艺,2012,41(3):111-113.
Ding Hao, Ma Yunxia, Bai Peikang, *et al.* The new laser welding technology of aluminum alloy[J]. Hot Working Technology, 2012, 41(3): 111-113.
- [7] 雷正龙,陈彦宾,李 颖,等. 铝合金 CO₂激光-TIG 电弧复合焊接试验研究[J]. 航天制造技术,2012,8(4):35-37.
Lei Zhenglong, Chen Yanbin, Li Ying, *et al.* CO₂ laser-TIG hybrid welding of aluminum alloy[J]. Aerospace Manufacturing Technology, 2012, 8(4): 35-37.
- [8] 王 威,王旭友,秦国梁,等. 铝合金激光-小功率脉冲 MIG 电弧复合热源焊接特性分析[J]. 焊接学报,2007,28(8):37-40.
Wang Wei, Wang Xuyou, Qin Guoliang, *et al.* Welding characteristics of laser-low power pulse MIG hybrid welding aluminum alloy[J]. Transactions of the China Welding Institution, 2007, 28(8): 37-40.
- [9] 王旭友,王 威,林尚扬. 焊接参数对铝合金激光-MIG 电弧复合焊缝熔深的影响[J]. 焊接学报,2008,29(6):13-16.
Wang Xuyou, Wang Wei, Lin Shangyang. Effect of welding parameter on weld penetration in laser-MIG hybrid welding of aluminum alloy[J]. Transactions of the China Welding Institution, 2008, 29(6): 13-16.
- [10] 王旭友,雷 振,张 健,等. 高速列车 6005A-T6 铝合金型材激光-双丝 MIG 复合焊[J]. 焊接学报,2012,33(7):9-12.
Wang Xuyou, Lei Zhen, Zhang Jian, *et al.* Laser-tandem MIG hybrid welding for 6005A-T6 aluminum alloy profile of high-speed train[J]. Transactions of the China Welding Institution, 2012, 33(7): 9-12.

作者简介: 常云峰,男,1990 年出生,硕士研究生. 主要从事激光及激光-电弧复合焊接研究工作. 发表论文 4 篇. Email: changtous@163.com

通讯作者: 雷 振,男,高级工程师. Email: laser_lei@126.com