

文章编号: 1001-3806(2020)03-0304-06

A7N01 铝合金激光-MIG 复合焊接焊缝成形与组织性能研究

侯艳喜¹, 罗子艺^{2*}, 易耀勇², 徐荣正¹, 哈斯金·弗拉基斯拉夫²

(1. 沈阳航空航天大学 材料科学与工程学院, 沈阳 110136; 2. 广东省焊接技术研究所(广东省中乌研究院) 广东省现代焊接技术重点实验室, 广州 510650)

摘要: 为了研究工艺参量对激光-MIG 复合焊接的焊缝成形和组织特征及性能的影响, 针对 6mm 的 A7N01 铝合金板, 采用不同的激光功率、焊接速率和坡口形式, 进行了激光-MIG 复合焊接试验, 观察焊缝成形及接头微观组织, 并对其性能进行测试。采用 Y 型 30°坡口, 在激光功率 3.0kW、焊接速率 1.0m/min 的参量下进行激光-MIG 复合焊接时, 焊缝表面成形良好, 底部成形连续; 接头平均抗拉强度为 271MPa, 达到母材的 60%; 焊缝中心硬度为 85.4HV, 达到母材的 78%。结果表明, 随着激光功率的提高, 焊缝熔深呈线性增大; 焊接速率越大, 焊缝熔宽和熔深越小, 余高略有增加; 焊接接头对不同坡口形式的适应性良好; 接头中热影响区晶粒粗化, 硬度降低, 熔合区晶粒为树枝晶, 易产生工艺类氢气孔, 焊缝中心晶粒为等轴晶。该研究有利于获得成形良好的 A7N01 铝合金激光-MIG 复合焊接头。

关键词: 激光技术; 激光-MIG 复合焊接; A7N01 铝合金; 焊缝成形; 力学性能

中图分类号: TG456.7 **文献标志码:** A **doi:**10.7510/jgjs.issn.1001-3806.2020.03.006

Study on weld formation and microstructure of A7N01 aluminum alloy by hybrid laser-MIG welding

HOU Yanxi¹, LUO Ziyi², YI Yaoyong², XU Rongzheng¹, VLADYSLAV Khaskin²

(1. College of Material Science and Engineering, Shenyang Aerospace University, Shenyang 110136, China; 2. Guangdong Provincial Key Laboratory of Advanced Welding Technology, Guangdong Welding Institute (China-Ukraine E. O. Paton Institute of Welding), Guangzhou 510650, China)

Abstract: In order to study the effect of process parameters on weld formation, microstructure characteristics, and properties of the joint welded by laser-melt inert-gas (MIG) hybrid welding, laser-MIG hybrid welding of 6mm A7N01 aluminum alloy plates was carried out with different laser powers, welding speeds, and groove forms. The microstructure and properties of the joints were observed and tested. The results show that as the laser power increases, the weld penetration increases linearly. Furthermore, the higher the welding speed, the smaller the weld width and the penetration depth, and the margin is slightly increased. The welded joints have good adaptability to different groove forms. When the hybrid laser-MIG welding was carried out with the laser power of 3.0kW, welding speed of 1.0m/min, and the Y-shaped 30° groove, the sound joint was obtained. The average tensile strength of the joint is 271MPa, which is 60% of the base metal. The center hardness of the weld is 85.4HV, which is 78% of the base metal. In the joint, the grain in the heat-affected zone is coarsened, the hardness is reduced, and the grain in the fusion zone is dendritic grain, which is easy to produce hydrogen holes in the process. In addition, the grain is equiaxed at the center of weld. This research is conducive to obtaining a well-formed laser-MIG hybrid welding joint of A7N01 aluminum alloy. In addition, the grain is equiaxed at the center of weld.

Key words: laser technique; laser-MIG hybrid welding; A7N01 Al alloy; weld formation; mechanical properties

基金项目:广东省科学院实施创新驱动发展能力建设专项资助项目(2018GDASCX-0803; 2017GDASCX-0113; 2018GDASCX-0113); 广东省科技计划资助项目(2018A050506058; 2017A070701026)

作者简介:侯艳喜(1994-),男,硕士研究生,主要从事轻质合金焊接技术的研究工作。

* 通讯联系人。E-mail:luozy@gwi.gd.cn

收稿日期:2019-05-20;收到修改稿日期:2019-07-11

引言

A7N01 高强铝合金具有低密度、高比强度、高比刚度和良好的加工及焊接性能等特点,在航空、航天、交通运输等领域具有广泛的应用前景,在促进高速列车车体结构轻量化的过程中也具有独特优势^[1-7]。然而采用传统的焊接方法,如熔化极惰性气体保护焊(melt inert-gas, MIG)焊接,对高强铝合金车体结构进

行焊接时,易产生气孔、裂纹和夹杂等缺陷,并且焊接效率低,因此,急需采用先进的焊接技术解决上述问题^[8-11]。激光-MIG 复合焊接作为一种新型焊接技术,能够将激光与电弧两种热源有机结合,从而改善铝合金的焊接适应性,提高铝合金的焊接效率和质量,是目前国内外高强铝合金焊接研究的热点^[12-20]。

本文中以6mm 厚的 A7N01 铝合金板材为研究对象,采用激光(碟片式激光器)-MIG 复合焊接工艺对其

Table 1 Chemical compositions of A7N01 aluminum alloy and ER5356 welding wire (mass fraction)

element	Al	Si	Fe	Cu	Mn	Mg	Cr	Zn	Ti
7N01	balance	0.0030	0.0035	0.0020	0.0070	0.0200	0.0030	0.0500	0.0020
ER5356	balance	0.0025	0.004	0.0010	0.0020	0.0450	0.0010	0.0010	0.0006

1.2 试验方法

在6mm 厚的 7N01 铝合金试样板上进行激光-MIG 焊接试验,通过改变焊接工艺参量,研究激光功率和焊接速度对焊缝成形的影响关系,试验工艺参量如表 2 所示。试验中通过改变激光功率和焊接速度,探

Table 2 Welding test process parameters

numbering	groove type	laser power/ kW	wire feed speed/ (m · min ⁻¹)	welding speed/ (m · min ⁻¹)	arc power/ kW	line energy/ (kJ · m ⁻¹)
1#		2.5	8.5	0.9	2.812	354.13
2#		3.5	8.5	0.9	2.812	420.80
3#	no groove	3.0	8.5	0.9	2.812	387.47
4#		3.0	8.5	1.2	2.812	290.60
5#		3.0	8.5	0.75	2.812	464.96
6#	Y-shaped 60°	3.0	9.0	1.0	3.028	361.68
7#	Y-shaped 30°	3.0	9.0	1.0	3.028	361.68
8#	0.5mm clearance	3.0	9.0	1.0	3.028	361.68

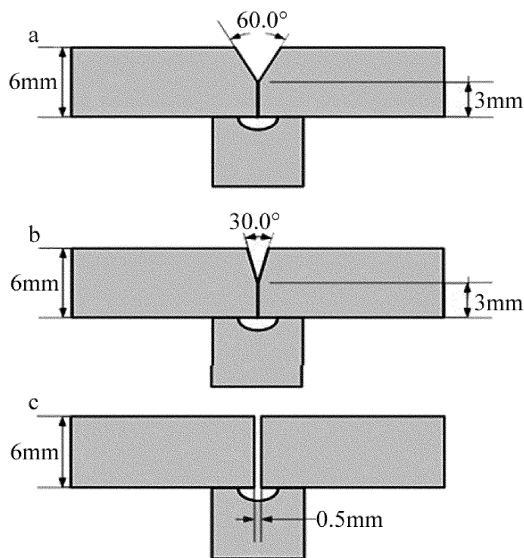


Fig. 1 Groove form

a—Y-shaped 60°, 3mm blunt edge b—Y-shaped 30°, 3mm blunt edge
c—I-shaped, 0.5mm clearance

进行焊接,探究全熔透焊接条件下,焊接工艺参量对焊缝成形、接头力学性能的影响,分析接头的微观组织。

1 试验材料、方法及设备

1.1 试验材料

试验采用的焊接材料为 A7N01 铝合金板,规格为 150mm × 75mm × 6mm,焊丝采用 ER5356 铝合金焊丝,直径 1.2mm。母材及焊丝成分如表 1 所示。

究其对焊缝熔宽、熔深、余高以及宏观形貌的影响。此外,为优化焊缝成形,得到表面成形良好,并且底部成形连续的焊缝,焊接试样板底部采用纯铜衬垫板。3 种坡口形式如图 1 所示。分别是:Y 型 60°坡口,3mm 钝边;Y 型 30°坡口,3mm 钝边;I 型坡口,0.5mm 间隙。

为尽量避免气孔、夹杂等缺陷,焊前对试样板进行酸碱洗,用刮刀清理母材表面的氧化膜,之后用无水乙醇清洗母材表面,清除表面油污。焊后沿垂直于焊缝方向制备金相试样,经打磨抛光后用 Keller 试剂进行腐蚀(Keller 试剂配比为 V(HF):V(HCl):V(HNO₃):V(H₂O) = 2:3:5:90)。在金相显微镜下,观察焊缝截面,并测量熔深与熔宽和余高。采用 GP-TS2000M 型拉伸机,进行接头拉伸测试,拉伸试样尺寸如图 2 所示。焊缝截面示意图如图 3 所示,显微组织选取位置如图 3 中的 A、B、C、D 点位置,其中焊缝转折点为激光与电弧焊接作用区域分界线,由于焊接底部,采用纯铜

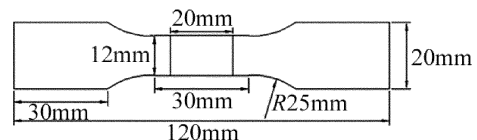


Fig. 2 Size of the tensile specimen

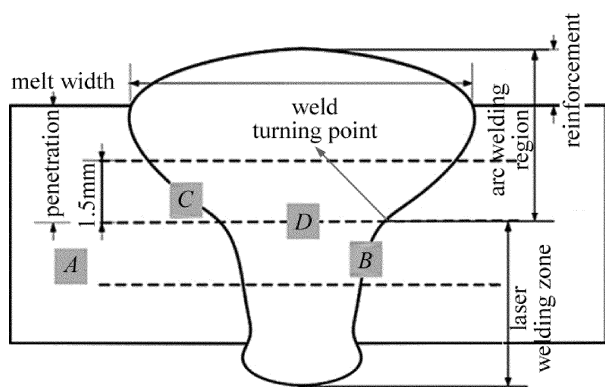


Fig. 3 Schematic diagram of weld cross section

衬垫板强制成形,故由焊缝转折点深度,代替焊缝熔深做近似分析。图中虚线为硬度打点位置,分别在焊缝转折点、近上表面、近下表面距焊缝转折点1.5mm处。

1.3 试验设备

激光-MIG复合焊接试验的焊接系统,主要由激光器、机器人(KUKA KR60)、MIG焊机组成,如图4所示。激光器为Trumpf-TruDisk 10002型碟片激光器,如图5所示。激光波长为1030nm,最大连续输出功率为10kW,光束质量为 $8\text{mm}\cdot\text{mrad}$,功率稳定性 $\pm 1\%$,准直焦距200mm,聚焦焦距300mm,传输光纤芯径 $400\mu\text{m}$ 。保护气采用纯度99.99%的氩气,气体流量为 $14\text{L}/\text{min}$ 。焊接过程中,采用激光前置的方式,激光与电弧夹角为 35° ,离焦量为 -2mm ,光丝间距为1mm。试验过程中的电弧输出采用一元化控制。

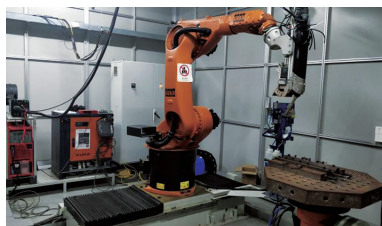


Fig. 4 Actual welding system of laser-MIG welding



Fig. 5 Disc laser

2 实验结果与分析

2.1 激光功率对焊缝成形的影响

在激光-MIG复合焊接过程中,激光功率的大小对

焊缝成形有重要影响。为实现单道对接熔透焊接,激光功率需要达到一定的值。通过改变激光功率,保持其它参量不变的情况下进行对接焊接,焊接参量如表2所示,焊后接头宏观形貌与焊缝横截面,如图6所示。根据试验结果,在激光功率2.5kW时,由于激光的功率密度较小,工件表面的熔深较浅,未能焊透试样板,如图6中1#所示。在激光功率3.5kW时,随着激光功率的增大,工件表面的激光功率密度增大,此时,工件表面被加热到蒸发温度以上,通过形成的压力以及不断形成的金属蒸汽,激光束在工件表面形成了焊接小孔,具备了深熔焊接特性,与电弧复合作用后形成较大的熔深,激光功率越大,所形成的金属蒸汽越多,小孔内压力越大,熔深将越大。然而,由于激光功率过大,热输入过大导致焊缝过熔透,焊缝底部产生大量孔隙,焊缝质量过差,如图6中2#所示。在激光功率3.0kW时,焊缝表面鱼鳞纹明显,无咬边、塌陷等缺陷,焊缝焊趾处,过渡平缓,焊缝成形质量较好,如图6中3#所示。此外,焊缝底部虽熔透,但个别位置间断且底部焊道边缘不平直,工艺参量需进一步优化。可见,激光-MIG复合焊接焊缝熔深及其熔透状态,主要取决于激光功率,随着激光功率的提高,焊缝熔深趋于线性增大。可见,6mm厚的7N01铝合金在不开坡口的情况下进行对接焊接时,采用3kW的激光功率,能够获得单面焊透的试样。

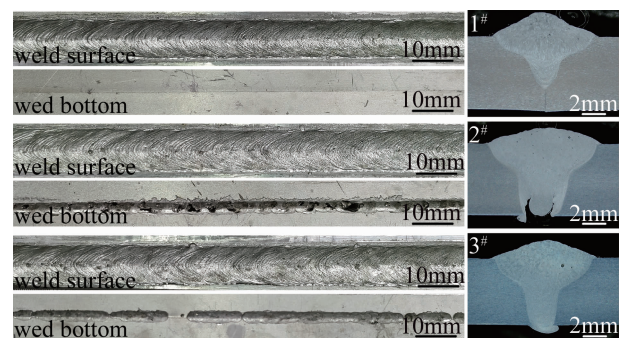


Fig. 6 Macroscopic morphology of joints and weld junction under different laser powers

2.2 焊接速率对焊缝成形的影响

在激光-MIG复合对接焊接过程中,焊接速度将直接影响焊接接头单位热输入,从而对焊缝成形产生影响,故可通过改变焊接速率研究其对焊缝成形的影响,根据不同焊接速率下线能量大小优化工艺参量,其焊接参量如表2所示。在激光功率3.0kW的前提下,分别采用 $0.90\text{m}/\text{min}$, $1.20\text{m}/\text{min}$, $0.75\text{m}/\text{min}$ 的焊接速率,焊后接头宏观形貌及焊缝横截面,如图6中3#和图7中4#、5#所示,焊缝熔深、熔宽、余高结果,如图8

所示。实验表明,在 3.0kW 的激光功率下,焊缝表面均形成了明显的鱼鳞纹,随着焊接速率的降低,焊缝表面光洁度上升,鱼鳞纹致密,焊道弧度平滑,但焊缝底部成形不连续,可见,焊接速率对焊缝底部成形的影响较小。通过分析焊缝熔深、熔宽、余高的结果可知,焊接速率对焊缝熔深和熔宽有直接影响,随着焊接速率的增大,熔深与熔宽均线性减小,当焊接速率为 0.75m/min 时,表面成形较好,但熔宽过宽,如图 7 中 5# 所示。此外,焊缝余高受焊接速率与送丝速率的综合影响,当焊接速率增大时,其焊接热输入增大的同时,单位时间内的送丝量也降低,导致余高的变化较小,当焊接速率为 1.20m/min 时,焊缝余高略有降低,且焊缝中心不平滑。综上可见,在焊接速率为 0.90m/min 时,即焊接线能量约 387kJ/m 时获得的焊缝,其表面成形较好。

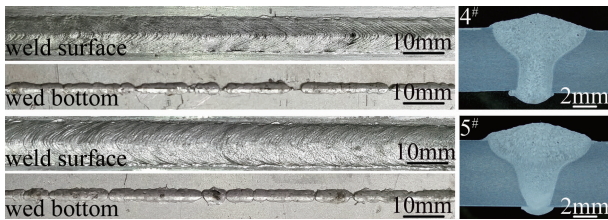


Fig. 7 Macroscopic morphology of joints and weld junction under different welding speeds

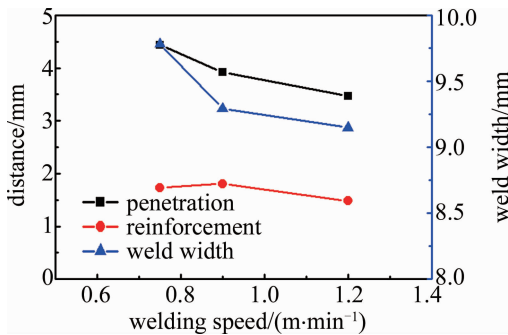


Fig. 8 Relationship between welding speed and penetration, reinforcement and weld width

2.3 坡口形式对焊缝成形的影响

在保持线能量基本一致的前提下,实验中采用了 3 种坡口形式焊接,坡口形式如图 1 所示,焊接参量如表 2 所示,即送丝速率为 9.0m/min,焊接速率为 1.0m/min,线能量为 362kJ/m,焊后接头宏观形貌及焊缝横截面如图 9 所示。此外,坡口形式与熔深、余高、熔宽的关系如图 10 所示。实验结果表明,采用 Y 型 60°坡口和 Y 型 30°坡口时,焊缝底部成形连续且焊道平直稳定,焊缝底部成形较好,如图 9 中 6# 和 7# 所示。其中,双边 60°坡口的焊缝,其熔深较大而余高较小,

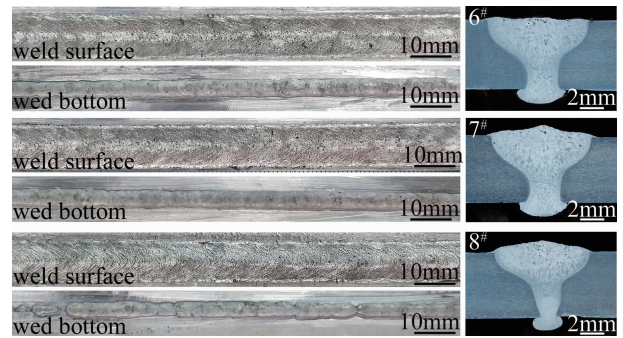


Fig. 9 Macroscopic morphology of joints and weld junction under different groove type

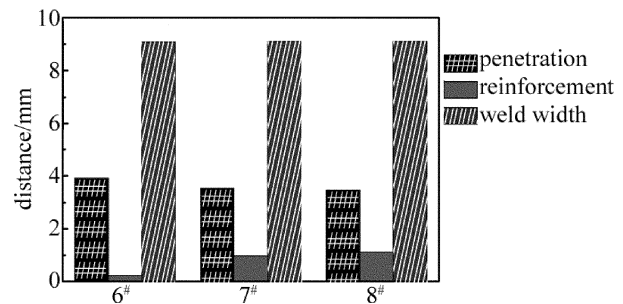


Fig. 10 Relationship among the groove type, penetration and weld width

由于其焊缝表面间隙过大,焊丝填入量较小,焊缝产生了轻微咬边;采用双边 30°以及 0.5mm 间隙的焊缝,其表面成形较好,焊缝熔宽、熔深和余高相差不大,而采用 0.5mm 间隙坡口的焊缝,其底部虽连续但焊道不平直,个别位置熔透性较差,焊缝质量不及 Y 型坡口,如图 9 中 8# 所示。总体而言,采用 Y 型双边 30°坡口的焊缝成形较好,焊接质量较好。

3 接头组织及力学性能分析

3.1 焊缝力学性能分析

3.1.1 焊缝拉伸性能分析 将拉伸试件按照 GB/T16865-2013 的检测标准,在拉力试验机上进行拉伸试验,其不同焊接参量下平均抗拉强度及延伸率如表 3 所示,用 Origin 绘制柱状图如图 11 所示。可见,6 种焊接参量下平均抗拉强度相近,均在 260MPa ~ 280MPa 范围内,拉伸性能比较稳定,平均抗拉强度为 271MPa,达到母材的 60%;平均断后伸长率为 4.3%,达到母材的 48%。其断裂位置均在焊缝中心位置,如图 12 所示。分析为铝合金在进行激光-MIG 复合焊接时,气孔主要集中在焊缝中心以及熔合线附近,其中焊缝中心的大直径不规则气孔,对抗拉强度及焊后延伸率的影响较大,焊缝中心及熔合线附近的气孔是焊接接头的薄弱位置,易发生断裂。

Table 3 Average tensile strength and elongation after fracture under each welding parameter

numbering	3#	4#	5#	6#	7#	8#	average	base metal
tensile strength R_m /MPa	280	266	268	275	265	270	271	454
break elongation A /%	4.0	4.5	5.5	4.5	3.5	4.0	4.3	9.0

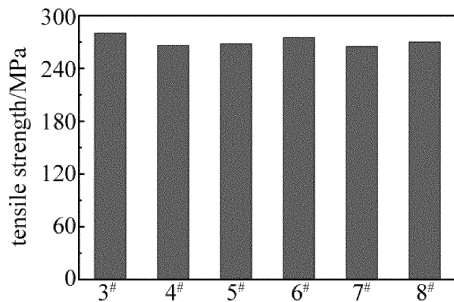


Fig. 11 Average tensile strength histogram under various parameters



Fig. 12 The fracture position of the tensile test piece

3.1.2 焊接接头的显微硬度 对于优化后的接头,沿垂直焊缝方向在近上表面、焊缝转折点、近下表面3种不同位置测量接头硬度,硬度值的分布如图13所示。由图可见,3种位置处的显微硬度分布特征相似,整体上呈“U”型分布,在焊缝中心硬度较低,在熔合线附近硬度陡然上升,到母材硬度趋于平稳,母材硬度均值为109.2HV。此外,近上表面焊缝中心位置的平均硬度为87.3HV,中部及近下表面焊缝中心位置的平均硬度为83.6HV,略低于近上表面的硬度,整体焊缝平均硬度为85.4HV。这是因为激光匙孔”失稳在焊缝中部及底部易产生气孔,气孔附近的硬度较低,使底部焊缝平均硬度减小;另一方面,由于焊缝底部强制成形的衬垫板,阻碍了熔池底部金属液体的流动,使焊缝底部组织分布不均,从而降低了硬度。

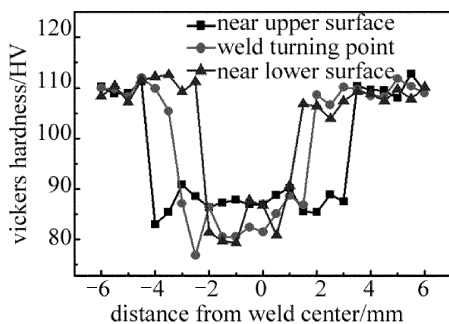


Fig. 13 Hardness distribution of the weld

3.2 接头截面形貌及其显微组织分析

A7N01 铝合金激光-MIG 复合焊接接头微观组织,如图14所示。母材区晶粒为平行于轧制方向的带条

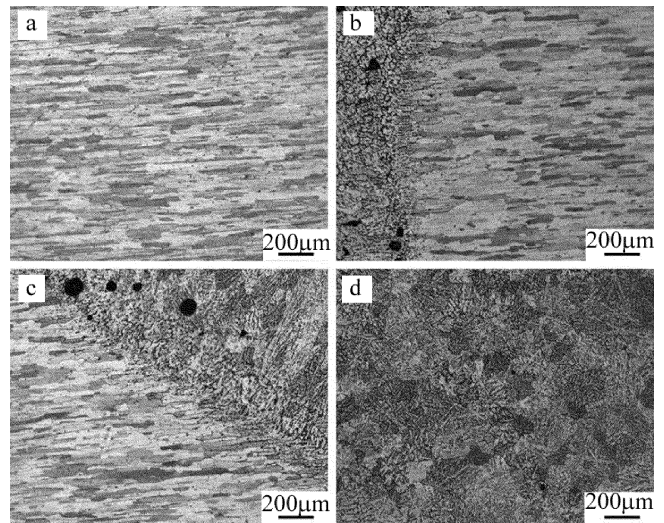


Fig. 14 Microstructure of A7N01 aluminum alloy weld

a—base zone b—heat affected zone c—fusion zone d—weld zone

状组织,晶粒分布均匀,如图14a所示。热影响区靠近熔合线的晶粒,由于受热循环作用,使晶粒发生了一定程度的长大,但仍保留了条带状组织的基本特征,其组织末端与母材区分不明显。由于该区受热会析出固溶相,其硬度强度会有所降低,塑性增加,如图14b所示。焊缝熔合区组织如图14c所示,该区域位于焊缝边缘,温度梯度较大,在熔合线靠近焊缝方向,形成了垂直于熔合线的粗大柱状晶组织,并沿焊缝中心向等轴晶区转变。由于激光-MIG 复合焊接的熔池冷却速度快,其内部由于氧化物夹杂和微量水分子而产生的氢气泡短时间来不及溢出,易产生工艺类氢气泡,严重影响焊缝性能和质量。图14d为焊接接头的焊缝区,由图可知,焊缝区组织属于典型的急冷铸态组织,母材与焊丝熔化后在焊缝中心形成等轴晶,该区易产生冶金类气孔。

4 结论

本文中采用激光-MIG 复合焊接技术对 A7N01 铝合金板进行了焊接。

(1)对6mm厚的 A7N01 铝合金板进行激光-MIG 复合焊接,当激光功率为3.0kW、送丝速率为9.0m/min、焊接速率为1.0m/min时,采用Y型30°坡口能够得到表面成形良好,且底部成形连续的焊缝。

(2)根据焊缝成形分析可知,激光功率对熔深有直接影响,激光功率越大,熔深越大;焊接速率对焊缝

熔宽和熔深的影响较大,对余高的影响较小,焊接速率越大,焊缝熔宽和熔深越小,焊缝余高略有增加;焊缝成形对坡口形式的适应性较好,其显微组织和力学性能相近。

(3)优化后的复合热源焊接接头的平均抗拉强度为271MPa,达到母材的60%;平均断后伸长率为4.3%,达到母材的48%;焊缝中心硬度为85.4HV,达到母材的78%,且焊缝近上表面的硬度略高于中部及近下表面的硬度。

(4)根据显微组织分析可知,母材为轧制态带状组织;热影响区晶粒粗化硬度强度有所降低;熔合线区晶粒为柱状晶,易产生工艺类氢气孔;焊缝区晶粒为等轴晶,易产生冶金类气孔。

参 考 文 献

- [1] 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.
- [2] QIN C, GOU G Q, CHE X L, *et al.* Effect of composition on tensile properties and fracture toughness of Al-Zn-Mg alloy (A7N01S-T5) used in high speed trains[J]. Materials & Design, 2016, 91: 278-285.
- [3] WANG Y, ZHANG Zh Y, GUO W, *et al.* Effects on fatigue properties of A7N01-T5 aluminum alloy welded joints for high-speed train by using different evaluation methods[J]. Electric Welding Machine, 2018, 48(3): 171-175(in Chinese).
- [4] LI B, WU M N, JIN W T, *et al.* Corrosion behavior of weld joints of aluminum alloy A7N01P-T4 for high-speed trains[J]. Corrosion Science and Protection Technology, 2014, 26(3): 223-227(in Chinese).
- [5] CHEN D F, ZHANG T H, ZHANG F D, *et al.* Corrosion behavior of weld joints of aluminum alloy A7N01P-T4 for high-speed trains[J]. Welding Technology, 2015, 44(3): 74-76(in Chinese).
- [6] NI W Y, YANG Sh L, JIA J, *et al.* Microstructure and performance of A7N01 Al alloy welding joint used in automotive high-strength[J]. Hot Working Technology, 2014, 43(19): 22-25(in Chinese).
- [7] GAO B J, JI H, FAN Y J, *et al.* Effect of microstructure and mechanical properties of welded joint of 7N01 alloy by pulse MIG welding[J]. Hot Working Technology, 2012, 41(15): 138-140(in Chinese).
- [8] WANG Y L, CHEN H. Development trend of Al alloy on high speed train[J]. Electric Welding Machine, 2010, 40(10): 9-16(in Chinese).
- [9] MA Zh H, CHEN D G, TAN B, *et al.* Influence of hybrid CO₂ laser-MIG welding process on weld shaping of 5052 aluminum alloy[J]. Ordnance Material Science and Engineering, 2012, 35(2): 76-80(in Chinese).
- [10] DAN L, MA J, YANG Zh. Research on welding of high strength aluminum alloy[J]. China Metal Bulletin, 2019(1): 241-243(in Chinese).
- [11] YANG Z Y. Research status and development direction of high strength aluminum alloy and its advanced welding technologies[J]. Electric Welding Machine, 2018, 48(3): 255-259(in Chinese).
- [12] WANG Q, HUI C, ZHU Z, *et al.* Mechanical properties of a dissimilar aluminum alloy joint welded by hybrid laser-MIG welding[J]. International Journal of Modern Physics, 2017, 31(16/19): 1744037(in Chinese).
- [13] YAN Sh H, NIE Y, ZHU Z T, *et al.* Characteristics of microstructure and fatigue resistance of hybrid fiber laser-MIG welded Al-Mg alloy joints[J]. Applied Surface Science, 2014, 298(15): 12-18.
- [14] KATAYAMA S, KAWAHITO Y, MIZUTANI M. Latest process in-performance and understanding of laser welding[J]. Physics Procedia, 2012, 39: 8-16.
- [15] RONG C, PING J, SHAO X, *et al.* Effect of magnetic field on crystallographic orientation for stainless steel 316L laser-MIG hybrid welds and its strengthening mechanism on fatigue resistance[J]. International Journal of Fatigue, 2018, 112: 308-317.
- [16] CHEN Y B, MIAO Y G, LI L Q, *et al.* Joint performance of laser-TIG double-side welded 5A06 aluminum alloy[J]. Transactions of Nonferrous Metals Society of China, 2009, 19(1): 1-31.
- [17] ZHANG W, YE B, QI X Y, *et al.* Study on the effect of energy ratio in laser-MIG hybrid welding of 6061 aluminium alloy[J]. Laser Technology, 2018, 42(4): 500-504(in Chinese).
- [18] CAI C, HE S, CHEN H, *et al.* The influences of Ar-He shielding gas mixture on welding characteristics of fiber laser-MIG hybrid welding of aluminum alloy[J]. Optics and Laser Technology, 2019, 113: 37-45.
- [19] CHANG Y F, LEI Zh, WANG X Y, *et al.* Stability of laser-MIG hybrid welding process with filling wire for aluminum alloy[J]. Transactions of The China Welding Institution, 2018, 39(10): 123-127(in Chinese).
- [20] WANG H Y, SUN J, LIU L M. Formation and controlling mechanism of pores in laser-TIG hybrid welding of 6061-T6 aluminum alloy at high speed[J]. Chinese Journal of Lasers, 2018, 45(3): 302001(in Chinese).