

Al-Cu-Mg 硬铝合金 TIG 焊焊接接头的组织与力学性能*

刘政军, 刘继国, 苏允海

(沈阳工业大学 材料科学与工程学院, 沈阳 110870)

摘 要: 为了研究 Al-Cu-Mg 硬铝合金 TIG 焊焊接接头的组织与力学性能, 采用 ER4043 焊丝对 2A12 硬铝合金进行了焊接实验. 利用光学显微镜、扫描电子显微镜、透射电子显微镜、能谱分析仪和硬度计对 Al-Cu-Mg 硬铝合金的组织与力学性能进行了表征. 结果表明, 焊缝的强度和塑性较低, 焊缝边缘为柱状晶, 中心为枝晶组织, 晶界存在大量低熔点共晶体. 近缝区存在明显的晶界液化现象, 晶粒为圆润的等轴晶, 焊缝的硬度大幅度下降. 固溶区焊缝的硬度和母材相近, 基体中存在大量的针状 S' 相, 可对该区域起到强化作用. 过时效区基体软化现象比较严重, 存在很多 S (Al₂CuMg) 相.

关 键 词: Al-Cu-Mg 硬铝合金; 焊接接头; 显微组织; 力学性能; 晶界液化; 低熔点共晶; 过时效; 固溶强化

中图分类号: TG 406

文献标志码: A

文章编号: 1000-1646(2015)06-0629-05

Microstructure and mechanical properties of TIG welded joint of Al-Cu-Mg aluminum alloy

LIU Zheng-jun, LIU Ji-guo, SU Yun-hai

(School of Materials Science and Engineering, Shenyang University of Technology, Shenyang 110870, China)

Abstract: In order to study the microstructure and mechanical properties of TIG welded joint of Al-Cu-Mg aluminum alloy, the welding tests for 2A12 aluminum alloy were performed with ER4043 welding wire. The mechanical properties of Al-Cu-Mg aluminum alloy were characterized with optical microscope (OM), scanning electron microscope (SEM), transmission electron microscope (TEM), energy dispersive spectrometer (EDS) and hardness tester. The results show that the strength and plasticity of welding seam is low, the grains in the edge of welding seam are columnar while the grains in the center are isometric, and there are a large number of low-melting-point eutectics at the grain boundaries. In the zone close to the welding seam, the obvious grain boundary liquation phenomenon appears, the grains are rounded isometric ones, and the hardness of welding seam greatly reduces. In the solid solution zone, the hardness of welding seam is close to that of base metal, and there are a lot of acicular S' phase in the matrix which can play a strengthening role for the zone. In the overaging zone, the matrix softening phenomenon is serious, and there are a lot of S (Al₂CuMg) phase.

Key words: Al-Cu-Mg aluminum alloy; welded joint; microstructure; mechanical property; grain boundary liquation; low-melting-point eutectic; overaging; solid solution strengthening

铝及铝合金材料具有密度低、强度高、导热性好、断裂韧性高等优点^[1], 已经广泛应用于航空

航天和交通运输等行业. 近年来, 中国飞速发展的飞机和高铁制造行业, 对性能优良铝合金材料的

收稿日期: 2015-05-21.

基金项目: 辽宁省博士启动基金资助项目(20131017); 辽宁省教育厅基金资助项目(201124125).

作者简介: 刘政军(1962-), 男, 黑龙江讷河人, 教授, 博士生导师, 主要从事焊接冶金与特种焊接材料等方面的研究.

* 本文已于 2015-09-15 09:09 在中国知网优先数字出版. 网络出版地址: <http://www.cnki.net/kcms/detail/21.1189.T.20150915.0909.026.html>

需求越来越大. Al-Cu-Mg 硬铝合金是一种室温性能优良的高强铝合金,但因其焊接性能不佳,从而限制了其在工程中的应用. 搅拌摩擦焊^[2-4]和激光焊^[5-6]的出现在较大程度上改善了 Al-Cu-Mg 硬铝合金的焊接质量问题. 然而,这两种焊接方法的设备成本都很高,在发展中国家难以得到普及. 因此,传统的交流 TIG 焊焊接方法依然具有较高的研究价值. 已有研究^[7-10]表明,Al-Cu-Mg 硬铝合金 TIG 焊焊接接头主要存在焊接热裂纹、焊接接头软化、气孔和焊接变形等缺陷.

本文采用典型的 Al-Cu-Mg 硬铝合金(2A12)进行了焊接实验. 文献[7]表明,焊接硬铝合金 2A12 时主要采用抗裂性较好的 ER4145、ER4043 或 BJ-380A 焊丝. 其中,ER4145 (Al-10Si-4Cu) 焊丝的抗热裂能力很强,但焊丝及焊缝的延性很差. ER4043 (Al-5Si-Ti) 焊丝的抗热裂能力较强,形成的焊缝金属的延性也较好. 当 ER4043 焊丝用于钨极氩弧焊时,能有效防止焊缝金属产生结晶裂纹,但该焊丝抑制近缝区母材产生液化裂纹的能力较差. BJ-380A (Al-5Si-2Cu-Ti-B) 焊丝的主要成分与 ER4043 (Al-5Si-Ti) 焊丝基本相同,而且添加了较多的 Cu 元素及适量的 B 元素,因此, BJ-380A 焊丝能很好地防止焊缝的结晶裂纹以及近缝区液化裂纹的产生,但该焊丝在市场上的销量非常小,很难购买到合格的产品. 综合比较后,本文选用了容易购买的 ER4043 焊丝. 选用 ER4043 焊丝的另一个优点是在焊接过程中,母材中的部分 Cu、Mg 等合金元素可以过渡到焊缝中,使焊缝金属产生微合金化. 已有研究^[11]表明,微合金化能够增加由 ER4043 焊丝焊接得到的焊接接头的强度和塑性. 本文将热影响区中的软化区域称为“过时效区”,而将热影响区中的硬化区域称为“固溶区”.

1 实验材料及方法

实验母材为 2A12 硬铝合金,且其热处理状态为 T4 态,即经过了固溶(495 ~ 505 ℃) + 自然时效处理. 试板尺寸为 150 mm × 60 mm × 4 mm. 实验采用 ER4043 焊丝,且其直径为 1.2 mm. 母材与焊材的化学成分如表 1 所示. 由于焊丝中 Si 元素的含量较高,可以有效地抑制焊接热裂纹的产生. 采用自动送丝机构和自动行走机构配合交流 TIG 焊接电源进行焊接实验. 在焊接过程中,利用琴键式卡具强制固定试板. 焊前对母材坡口周围进行机械清理,同时注意保持焊丝的洁净. 试板的坡

口角度为 60°,在焊接过程中需要使用引弧板和收弧板,且试板背面需加散热铜垫板. 实验中采用单面单层焊接工艺. 其中,焊接电流为 140 A;焊接电压为 17 V;焊接速度为 15 cm/min;送丝速度为 250 cm/min;钨极直径为 3.2 mm. 焊缝正反面成型照片如图 1 所示. 可见,由 ER4043 焊丝焊接得到的焊接接头成型良好. 在外观检查合格后,再对焊接接头进行拉伸、硬度与金相试样的制备. 金相腐蚀剂采用 Keller 试剂(1 mL HF + 1.5 mL HCl + 2.5 mL HNO₃ + 95 mL H₂O).

表 1 2A12 与 ER4043 的化学成分(w)
Tab. 1 Chemical compositions of 2A12 and ER4043(w)
%

材料	Si	Fe	Cu	Mn	Mg	Zn	Ti	Al
2A12	0.14	0.23	4.52	0.59	1.54	0.20	0.10	余量
E4043	5.13	0.12	0.30	0.05	0.05	0.10	0.20	余量

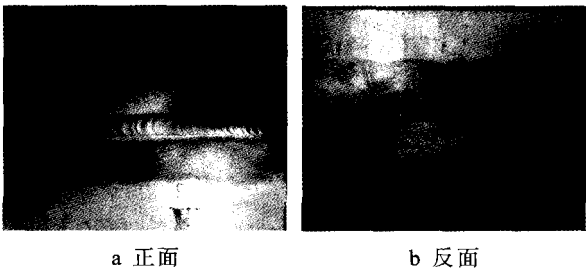


图 1 焊缝成型照片
Fig. 1 Forming photos of welded seam

2 实验结果与分析

2.1 硬度曲线

采用维氏硬度计测量焊接接头的硬度曲线,由于焊接接头具有对称性,实验中只测量了焊接接头一侧的硬度值,结果如图 2 所示.

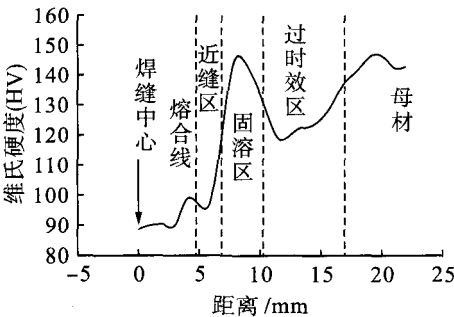


图 2 焊接接头的维氏硬度
Fig. 2 Vickers hardness of welded joint

由图 2 可见,焊接接头的硬度曲线中存在两个低点,一个位于热影响区的过时效区,另一个位于焊缝区. 处于热影响区的固溶区的硬度值得到

了提高,且几乎与母材的硬度水平相近,且固溶区与母材的硬度均约为 140 HV. 近缝区的硬度值朝着熔合线方向呈现出较为剧烈的下降趋势,且近缝区的硬度从 120 HV 下降到了 90 HV 左右. 熔合线区的硬度约为 95 HV. 焊缝中心的硬度约为 90 HV,故该区硬度约为母材硬度的 65%. 处于热影响区的过时效区硬度约为 120 HV,且该区硬度约为母材硬度的 86%.

2.2 显微组织

图3为焊接接头各区域的显微组织. 图3a为焊接接头的母材的显微组织. 可见,该区域晶粒大小均匀,变形程度一致,并沿轧制方向有序排列. 母材基体上散落分布着一些较大的黑色颗粒,这些黑色颗粒主要为固溶时未溶入母材的粗大S相(Al_2CuMg)和杂质. 图3b为位于热影响区中的固溶区的显微组织. 可见,经腐蚀后该区域的金相图片发黑,且粗大黑色颗粒略微长大. 造成固溶区金相图片发黑的原因是在焊接过程中,由于该区域温度高于人工时效温度,但是低于母材固溶温度,基体中的Cu原子发生聚集,使得过渡相(S'相)转变为粗大的S相,即出现过时效现象. 这些弥散分布在基体中的S相被腐蚀剂腐蚀后会变黑,因此,固溶区的金相图片也同样发黑. 另外,S相生成的同时基体也会变软,因而在金相试件的制备过程中很容易产生划痕. 图3c为位于热影响区的固溶区的显微组织. 可见,该区域晶粒变形程度低于母材,但依然沿着轧制方向有序排列.

该区域基体中散落分布的粗大颗粒进一步长大并发生聚集. 在焊接过程中,固溶区温度达到了母材的固溶温度,但是低于母材的固相线温度,因而平衡相(S相)重新溶入基体,并在冷却后形成了过饱和固溶体. 随后在焊后自然时效过程中析出S'相. 经过上述过程,该区域相当于经历了一次固溶处理,强度能够得到恢复,因此,该区域称为固溶区. 图3d为近缝区的显微组织. 可见,该区域晶粒呈等轴状,并未出现明显长大的晶粒. 该区域发生了明显的晶界液化现象,散落分布的黑色颗粒已经全部溶入基体中. 在焊接过程中,该区域温度达到了母材的固相线温度,因而可使母材中的低熔点共晶体和散落分布的粗大颗粒相发生熔化,而熔化后的低熔点共晶体会聚集到晶界,形成了粗大共晶体,从而降低了基体中合金元素的含量. 越靠近焊缝,基体承受的温度越高,晶界形成的低熔点共晶体也就越多,基体中的合金元素含量也就越低,基体强度也就越低,因此,在硬度曲线上表现出硬度急剧下降的趋势. 同时,虽然近缝区温度达到了母材的固相线温度,但是由于母材中由各种合金元素形成的弥散分布的细小强化相颗粒较多,限制了晶界的大范围移动,因而晶界只能进行平直化运动,因此,晶粒并未大幅度长大,只是形成了正常大小的圆润等轴晶. 图3e为靠近熔合线的焊缝组织. 可见,此区域为柱状组织,形成原因是在结晶过程中,该区域的温度梯度很大,晶粒平行于温度梯度方向的生长速度较快,而垂直于

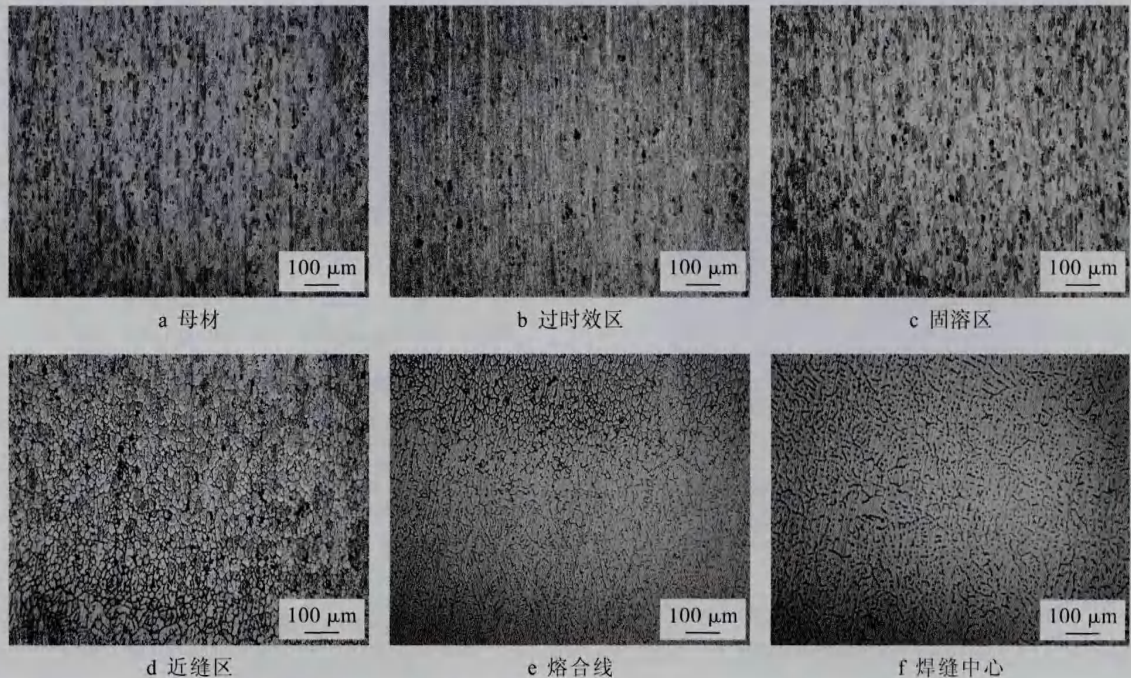


图3 焊接接头的显微组织

Fig.3 Microstructures of welded joint

温度梯度方向的生长速度较慢,因此,最终形成了朝焊缝中心生长的柱状晶.图 3f 为焊缝中心的显微组织,该区域呈现出明显的枝晶组织,晶界处出现了大量低熔点共晶体聚集的现象.由于焊丝中的 Si 含量很高,在焊缝金属结晶凝固的过程中, Si 元素和从母材中过渡而来的 Cu、Mg 等合金元素将会被排挤到晶界,因而在晶界形成大量的低熔点共晶体.这些低熔点共晶体一方面能够改善焊接接头的抗结晶裂纹能力,但另一方面也会降低焊接接头的塑性.

2.3 TEM 分析

图 4 为处于热影响区的固溶区的透射电子显微(TEM)图像.由图 4 可以观察到大量均匀分布的 S'相,这些 S'相是在固溶后的自然时效阶段形成的,可以对基体起到有效的强化作用.固溶区的脱溶序列可以表示为 GP 区—S''—S'—S (Al₂CuMg) 固溶区在受到焊接热循环作用后,基体中的平衡相(S 相)会发生溶解,而分解出来的 Cu、Mg 原子将会重新固溶到基体中形成过饱和固溶体.随着温度的下降,过饱和固溶体中的 Cu、Mg 原子将会发生聚集,依次形成 GP 区、S''相和 S'相. S'相为非平衡组织,是基体快速冷却后形成的可以在室温下长期存在的强化相,且与基体存在部分共格关系,因此, S'相能够产生较大的畸变能,并起到应变强化、弥散强化和化学强化的作用. S'相不但可以提高焊接接头的强度,而且也能提高其塑性,故 S'相的强化效果最为理想.但是 S'相在受热时容易聚集转变成 S 相, S 相的尺寸较为粗大,与基体无共格结合,故其强化效果大大降低.这就是处于热影响区的过时效区硬度低于母材和固溶区的原因.

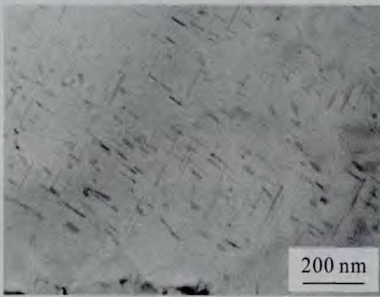


图 4 固溶区 TEM 图像

Fig. 4 TEM image for solid solution area

2.4 拉伸实验

焊接接头的拉伸实验结果如表 2 所示.在拉伸实验中,拉伸试件大多断裂于焊缝中心区域.由表 2 可见,焊接接头的平均抗拉强度约为 270 MPa,为母材平均抗拉强度的 60%.焊接接头的断后伸

长率为 6.5%,为母材的断后伸长率为 17.6%.因此,焊接接头的平均抗拉强度和断后伸长率均大幅度低于母材.

表 2 拉伸试验结果
Tab. 2 Results of tensile test

材料	平均抗拉强度/MPa	断后伸长率/%
母材	450	17.6
焊接接头	270	6.5

2.5 SEM 与 EDS 分析

对近缝区和焊缝区的低熔点共晶体进行扫描电子显微(SEM)观察和能谱(EDS)分析,结果分别如图 5 和表 3 所示.图 5a 为近缝区晶界共晶体的 SEM 图像,可见亮灰色共晶体沿着晶界断续分布(如图 5a 中 A 区所示).结合能谱分析结果可知,该区域 Cu 元素的含量高达 26.71%,导致基体强度会由于 Cu 元素含量的急剧降低而随之降低.同时,存在于近缝区晶界的大量低熔点共晶体也会增加近缝区的液化裂纹敏感性.图 5b~d 为焊缝组织中具有不同形貌的低熔点共晶体的 SEM 图像.

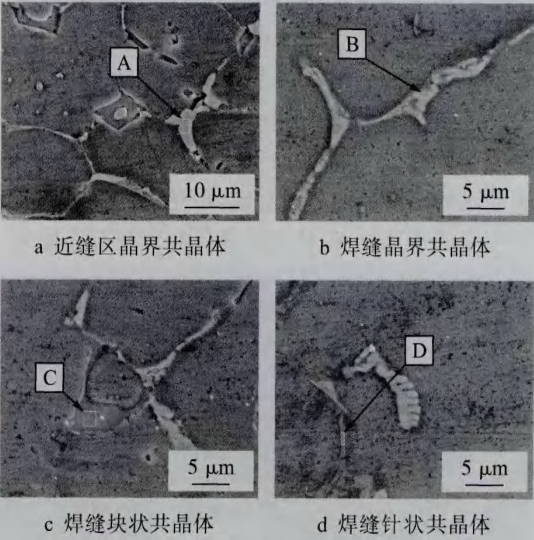


图 5 低熔点共晶体的 SEM 图像

Fig. 5 SEM images of low-melting-point eutectics

表 3 EDS 实验结果(w)
Tab. 3 Results of EDS test(w) %

区域	Al	Cu	Mg	Si
A	69.92	26.71	1.71	1.65
B	82.00	11.42	3.03	3.54
C	83.25	5.23	0.70	10.82
D	77.22	6.35	6.86	9.75

结合表 5 中的 EDS 数据可知,由于这些共晶体的 Cu、Mg 和 Si 元素含量各不相同,因此,这些

共晶体应该是由不同成分的组元构成的低熔点共晶体. 由图 5b~d 可见,焊缝组织存在大量的低熔点共晶体. 在这些共晶体的共同作用下,焊缝金属在结晶过程中具有“愈合”作用,能很好地抑制结晶裂纹现象,但其塑性变形能力较差. 这是因为在焊缝凝固后期,如果晶界处存在的低熔点共晶体较少,则容易被焊接拉应力拉开形成裂纹;如果晶界存在较多的低熔点共晶体,则被拉开的晶界可以及时得到足够的液体(低熔点共晶体)来补充,即起到“愈合”作用.

3 结 论

Al-Cu-Mg 硬铝合金焊接接头的组织和性能变化较为复杂,焊接接头的各个区域均具有各自鲜明的特点,且 Al-Cu-Mg 硬铝合金焊接接头的焊接性能较差. 本文选用 ER4043 焊丝对 Al-Cu-Mg 硬铝合金进行焊接,并研究了所得焊接接头的组织与性能. 通过以上实验分析,可以得出如下结论:

1) 在焊接接头的过时效区,由于 S'相转变为强化效果较差的 S 相,因此,该区域硬度值大幅度下降.

2) 焊后焊接接头的固溶区强度可以自行恢复,且在该区域能够观察到大量的 S'强化相.

3) 近缝区晶界存在大量富含 Cu 元素的低熔点共晶体聚集现象,造成基体中合金元素的含量下降,并对基体硬度产生了明显的影响.

4) 利用 ER4043 焊丝焊接得到的焊缝组织存在大量的低熔点共晶体,这些低熔点共晶体在结晶过程中可以产生“愈合”作用,能够有效地抑制结晶裂纹,但同时也会降低焊缝的塑性.

参考文献 (References):

- [1] 周万盛,姚君山. 铝及铝合金的焊接 [M]. 北京:机械工业出版社,2006:1-4.
(ZHOU Wan-sheng, YAO Jun-shan. Welding of aluminum and aluminum alloy [M]. Beijing: China Machine Press, 2006:1-4.)
- [2] Radisavljeic I, Zivkovic A, Radovic N, et al. Influence of FSW parameters on formation quality and mechanical properties of Al 2024-T351 butt welded joints [J]. Transactions of Nonferrous Metals Society of China, 2013, 23(12): 3525-3539.
- [3] 王快社,吴楠,王文,等. 2024-T4 铝合金水下搅拌摩擦焊接研究 [J]. 稀有金属材料与工程, 2013, 42(9): 1949-1952.
(WANG Kuai-she, WU Nan, WANG Wen, et al. Sub-

merged friction stir welding of 2024-T4 aluminum alloy [J]. Rare Metal Materials and Engineering, 2013, 42(9): 1949-1952.)

- [4] 高辉,董继红,张坤,等. 厚板铝合金搅拌摩擦焊接头组织及性能沿厚度方向的变化规律 [J]. 焊接学报, 2014, 35(8): 61-65.
(GAO Hui, DONG Ji-hong, ZHANG Kun, et al. Variations of the microstructure and mechanical properties for the thick aluminum friction stir welding joint along the thickness direction [J]. Transactions of the China Welding Institution, 2014, 35(8): 61-65.)
- [5] Beiranvand M Z, Ghaini M F, Sheikhi M, et al. Effect of severe plastic deformation on hot cracking of wrought aluminium alloy in pulsed laser welding [J]. Science and Technology of Welding and Joining, 2013, 18(6): 473-477.
- [6] 占小红,陈杰,董志波,等. 铝合金 T 型接头双激光束双侧同步焊接温度场模拟 [J]. 沈阳工业大学学报, 2013, 35(3): 279-284.
(ZHAN Xiao-hong, CHEN Jie, DONG Zhi-bo, et al. Numerical simulation of dual laser-beam bilateral synchronous welding for T-joint of aluminum alloy [J]. Journal of Shenyang University of Technology, 2013, 35(3): 279-284.)
- [7] 中国机械工程学会焊接学会. 焊接手册 [M]. 北京:机械工业出版社, 2007: 592-597.
(Welding Society of Chinese Mechanical Engineering. Welding handbook [M]. Beijing: China Machine Press, 2007: 592-597.)
- [8] 乔及森,余江瑞,苟宁年,等. 微观组织对 2A12 铝合金熔焊接头力学性能的影响 [J]. 焊接学报, 2011, 32(9): 5-8.
(QIAO Ji-seng, YU Jiang-rui, GOU Ning-nian, et al. Development of microstructure influence on mechanical properties of fusion welding joints of alloy 2A12 [J]. Transactions of the China Welding Institution, 2011, 32(9): 5-8.)
- [9] 李艳军,康举,吴爱萍,等. TIG 焊工艺对 LD10 铝合金接头气孔的影响 [J]. 焊接学报, 2014, 35(4): 37-40.
(LI Yan-jun, KANG Ju, WU Ai-ping, et al. Influence of TIG welding parameters on porosity in LD10 aluminum alloy joint [J]. Transactions of the China Welding Institution, 2014, 35(4): 37-40.)
- [10] 康举,李艳军,吴爱萍,等. 两种 TIG 焊工艺对 LD10 铝合金接头力学性能的影响 [J]. 焊接学报, 2014, 35(3): 109-112.
(KANG Ju, LI Yan-jun, WU Ai-ping, et al. Effect of two different TIG welding processes on mechanical properties of LD10 aluminum alloy joint [J]. Transactions of the China Welding Institution, 2014, 35(3): 109-112.)
- [11] 赵志浩,徐振,王高松,等. 微合金化 4043 铝合金焊丝焊接接头的组织与性能 [J]. 金属学报, 2013, 49(8): 946-952.
(ZHAO Zhi-hao, XU Zhen, WANG Gao-song, et al. Microstructure and property of welding joint weld with micro-alloying 4043 welding wire [J]. Acta Metallurgica Sinica, 2013, 49(8): 946-952.)
(责任编辑:尹淑英 英文审校:尹淑英)