

电子束焊接 2A14 铝合金接头的组织与特征

王亚荣, 滕文华, 余 洋, 樊亚丽

(中国工程物理研究院 机械制造及工艺研究所, 绵阳 621900)

摘 要: 对 10 mm 厚的 2A14 铝合金板进行电子束焊接, 通过金相及扫描电镜沿焊缝熔深方向对各个区域的微观组织进行对比分析。结果表明: 电子束焊接 2A14 铝合金接头沿焊缝中心和焊缝边缘的组织在尺寸、结晶形态和生长方向上存在很大差异, 焊缝顶部和根部的组织尺寸较粗大, 晶粒尺寸可达到 20~50 μm , 靠近熔合线附近的焊缝组织沿最快散热方向具有明显的方向性, 焊缝中心部位的组织非常细小, 晶粒尺寸小于 10 μm , 分布均匀, 呈典型的非平衡快速凝固形成的枝晶组织。焊缝根部容易形成缩孔并伴随裂纹的产生, 可通过散焦焊接和焊后背部重熔的方法加以消除。

关键词: 2A14 铝合金; 电子束焊接; 微观组织; 缩孔

中图分类号: TG456.3

文献标志码: A

Microstructure and characteristics of joint of electron beam welds of 2A14 aluminum alloy

WANG Ya-rong, TENG Wen-hua, YU Yang, FAN Ya-li

(Institute of Machinery Manufacturing Technology, China Academy of Engineering Physics, Mianyang 621900, China)

Abstract: The electron beam welding was performed on 10 mm thick 2A14 aluminum alloy sheets. Metallography and scanning electron microscopy were used to study the weld microstructure. The microstructures of different sites in the weld was employed to compare and analyze the structure distribution in weld-bead. The results show that electron beam (EB) welding 2A14 Al alloy establishes a nonuniform temperature distribution throughout the weld pool and this thermal condition leads to the difference in grain size and solidification mode along the depth of penetration. The up and bottom of the weld-bead are coarse grained region where the crystallite dimension is up to 20–50 μm and the microstructure near bond line is arranged along the solidification direction, while in the middle of the weld-bead, there are fine and homogeneous non-equilibrium microstructures of dendritic grains with dimension of less than 10 μm . Focusing out welding and post welding re-melting were used to remove the shrinkage and associated cracks, which are easy to form in the root of weld.

Key words: 2A14 aluminum alloy; electron beam welding; microstructure; shrinkage

高强铝合金因具有良好的耐蚀性、较高的比强度和比刚度、良好的导电性及导热性等综合性能, 在航天航空、国防等领域有着广泛的应用前景^[1-3]。同时, 由于其特殊的理化性质, 如密度低、熔点低、热导率和电导率大、热膨胀系数大、化学活泼性很强、易氧

化、且氧化物的熔点很高, 所以, 在焊接高强铝合金过程中会产生如气孔、变形、热裂等一系列问题^[4-6]。2A14 高强铝合金属于热处理强化铝合金, 其高强低韧的特殊物理性质和沉淀强化机制^[7-8]使得这种材料在焊接过程中较其他铝合金更容易产生裂纹等焊接缺

陷, 可焊性很差。利用电子束焊接高强铝合金, 不仅有效地防止焊接过程的氧化, 而且可以减少和抑制铝合金焊缝中气孔的产生, 同时由于电子束的穿透能力非常强, 焊接速度快, 可以很好地抑制铝合金焊缝热影响区晶粒的长大, 可以在一定程度上改善铝合金接头软化现象, 因此, 电子束焊接高强铝合金具有明显优势。

高功率密度的电子束焊接铝合金时, 束流与材料作用加热速度非常快, 同时小孔效应促使电子束流在很短时间内形成深宽比很大的熔池。焊缝的冷却过程主要是通过大温度梯度的金属材料的自传导实现的, 冷却速度非常大^[9-10], 而相对于钢铁材料, 铝合金材料的熔点低、比热小、热导率高(是低碳钢的 5 倍), 因此, 焊缝液态金属的凝固速度很快, 其电子束焊接头组织有着区别于其它金属的显著特点。目前的研究大多关注于铝合金电子束焊接工艺与接头组织的关系, 很少去关注接头内部不同区域内微观组织的分布特征, 而接头的组织构成与分布却直接影响接头最终的综合性能, 因此, 研究电子束焊接铝合金接头组织分布特征具有重要的意义, 本文作者将针对电子束焊接 2A14 铝合金的微观组织构成及分布特征进行深入研究, 揭示铝合金电子束焊接过程中熔池内部液态金属的凝固行为, 为接头性能的综合控制提供依据。

1 实验

试验材料 2A14 高强铝合金, 尺寸规格为 230 mm×100 mm×10 mm, 焊前状态为固溶处理后再人工时效的稳定状态, 微观组织见图 1 所示, 以 Al-Cu 二元相图为参考依据, 借鉴其他资料文献可知^[11-13], 母材组织为含有少量 Cu 的 Al 基固溶体— α 相, 强化相为 Al_2Cu 和 Mg_2Si 。

表 2 室温时 2A14 铝合金常用物理性能和机械性能

Table 2 Major mechanical and physical properties of 2A14 Al alloy at room temperature							
Melting temperature of solidus/°C	Melting temperature of liquidus/°C	Thermal conductivity/(W·m ⁻¹ ·°C ⁻¹)	Specific heat/(kJ·kg ⁻¹ ·°C ⁻¹)	Electrical resistivity/(Ω·m)	Thermal coefficient of expansion/(10 ⁻⁶ °C ⁻¹)	Tensile strength/MPa	Yield strength/MPa
510	638	159.6	0.84	43×10 ⁻⁶	22.5	430	340

表 3 电子束焊接工艺参数

Table 3 Parameters of EB welding					
Voltage/kV	Beam current/mA	Velocity/(mm·min ⁻¹)	Figure	Figure size/mm	Focal length/mA
120	20	600	Circle	0.2×0.3	40

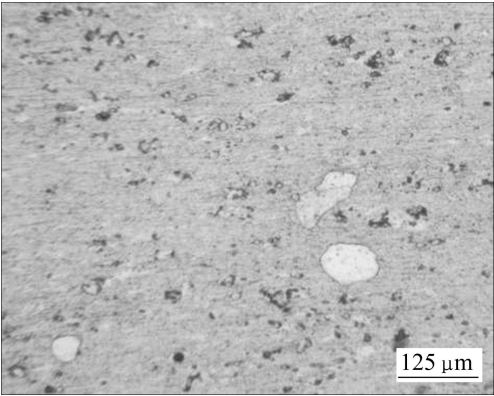


图 1 2A14 母材组织
Fig. 1 Microstructure of base metal 2A14

表 1 所列为 2A14 铝合金的主要成分。材料主要的物理性能见表 2 所列。试验在德国 Pro-beam 公司生产的高压电子束焊机上进行, 焊前试件表面用铜刷轻刷以去除表面油污和附着物, 之后用丙酮清洗表面。具体的焊接参数见表 3 所列。焊接时焦点位置的变化是通过控制聚焦电流来实现的, 增加聚焦电流, 焦点位置向上移动, 因此表 3 中焦点位置+40 mA 代表着焊件表面上聚焦, 即散焦焊接。而扫描图形的扫描频率对接头组织分布及气孔等缺陷的形成有很大的影响, 频率越高, 气孔含量越少, 在本试验中, 采用的频率为 10 kHz。焊后在光学和电子显微镜下对焊缝横截面组织分布和特征进行观察。

表 1 2A14 铝合金的主要化学成分
Table 1 Chemical composition of 2A14 Al alloy (mass fraction, %)

Si	Fe	Cu	Mn	Mg	Ni	Zn	Al
0.6-1.2	0.7	3.9-4.8	0.4-1.0	0.4-0.8	0.1	0.3	Bal.

2 结果与分析

2.1 焊缝的典型微观组织

电子束焊接 2A14 铝合金焊缝截面的整体形貌如图 2 所示。整个区域可以明显地分为母材、热影响区和焊缝 3 大部分。由于电子束焊接热输入量小且集中, 焊缝冷却迅速, 热影响范围较小。整个焊缝内部组织沿着熔深方向存在明显的差异, 为了能更好地研究组织的变化情况, 将放大的组织照片沿深度方向拼接, 可以发现焊缝组织在纵深方向存在明显的分层现象, 标识出焊缝内部各个特征区域, 如图 2 所示, 对各个区域的组织特点进行对比分析。

2.2 焊缝中心组织沿熔深方向的分布特征

根据沿着焊深方向焊缝中心组织的变化特点可以分为 6 个区域, 将这 6 个区域的组织进行对比, 见图 3 所示。从对比中可以发现, 焊缝内部组织的形貌、尺寸和生长方向有着很大的区别, 证明其在凝固过程中所处的温度环境存在很大的差异。I 区的焊缝组织为大块的等轴晶, II 区的晶粒为柱状枝晶, 晶粒尺寸达到 $20\sim 50\ \mu\text{m}$ 存在着明显的结晶方向, 由晶粒的生长方向可以得到此处熔池凝固时最大的热散方向, 可以看到晶粒生长的方向与垂直于熔池凝固的分层轮廓线。而到达 III 区和 IV 区后, 焊缝内部的晶粒非常的细小, 晶粒尺寸小于 $10\ \mu\text{m}$, 为细小均匀的枝晶组织,

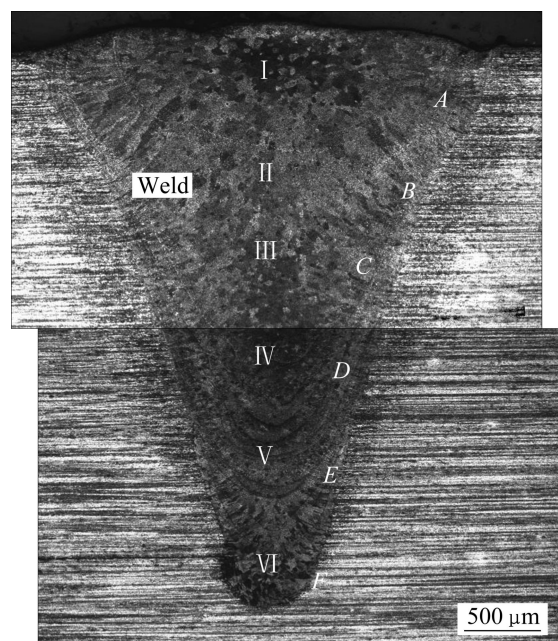


图 2 2A14 电子束焊接头的显微组织

Fig.2 Microstructures of 2A14 EB welding joint

晶粒凝固没有明显的方向性, 证明在整个焊缝当中, 这里经历的高温时间最短, 凝固速度最快, 也就是说焊缝的中心部位受到的搅动最为剧烈, 液体流动速度最快, 各个方向的散热速度相同。而到达 V 区后, 晶粒又有所增大, 可以看到晶粒的生长方向。到达焊缝根部 VI 区, 晶粒为块状等轴晶, 尺寸呈现明显长大, 这说明焊缝根部晶粒有充分的时间长大。

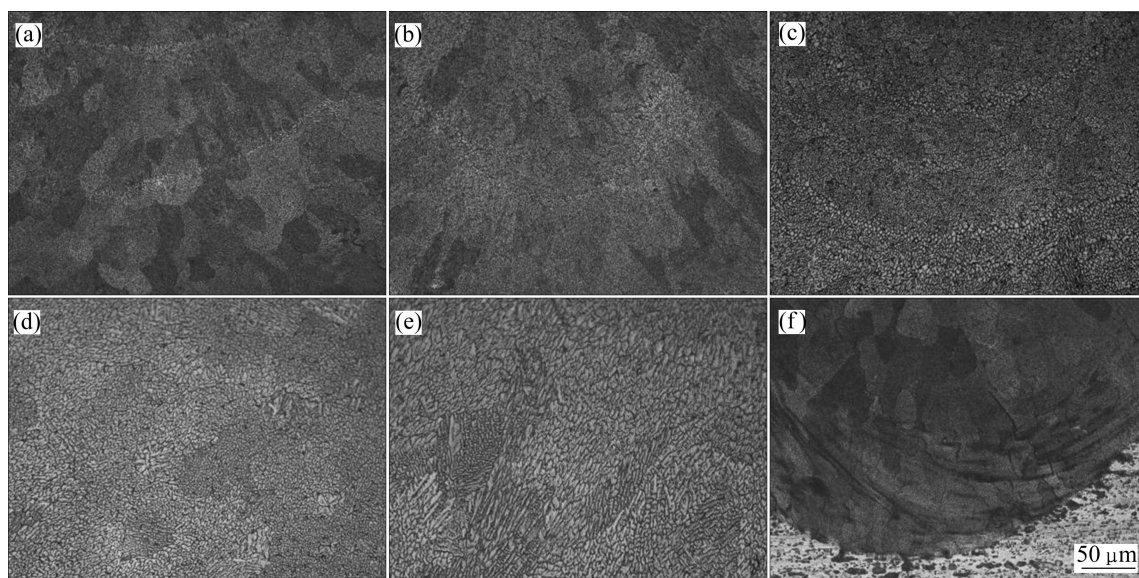


图 3 焊缝中心组织沿熔深方向分布

Fig.3 Microstructures distributions of weld center along fusion depth direction: (a) Area I; (b) Area II; (c) Area III; (d) Area IV; (e) Area V; (f) Area VI

由于电子束是靠加速电压加速电子轰击工件表面, 电子的动能就转变为热能, 使金属迅速熔化和蒸发。在焊缝根部的Ⅵ区, 电子束对这里的金属冲击和搅拌均减弱, 即此处焊缝温度梯度较小, 对流不充分, 沿各个方向散热缓慢, 液态金属有较为充足的时间长大。

2.3 焊缝边缘组织沿熔深方向的分布特征

焊缝边缘靠近熔合线的组织分布如图 4 所示。图 4 中在熔合线左边为焊缝, 右边为热影响区。对于靠近熔合线区域的焊缝组织, 焊缝上部 A 和 B 区的晶粒尺寸明显较大, 生长方向很一致, 均沿着最大散热方向, 且在与母材相连接的区域联生晶区范围较宽, 这也证明在这一部分温度梯度较大, 且在高温区停留时间较长, 晶粒有较充裕的时间沿散热方向生长为较大的晶粒。而靠近中心部位的 C、D 区晶粒变得很细小, 且枝晶生长方向不是很清晰, 也就是这一部分液态金属受到的搅动非常剧烈, 温度梯度减小, 而且液态金属的流动会将母材半熔化区的组织冲刷进熔池, 增加了异质形核中心, 增大形核率的同时, 又打乱了枝晶原本的生长方向。而到 E 区, 液态金属的流动减缓, 熔合线附近液态金属凝固为枝晶组织, 生长方向垂直于熔合线, 而到 F 区后, 晶粒有明显长大, 呈现等轴晶状, 这里电子束的搅拌作用减弱, 液态金属流动缓慢, 温度梯度很小, 晶粒生长非常充分。

焊缝组织分布上的不均匀说明电子束焊接中能量分布非常不均匀, 致使不同部位的焊接材料在熔化、

流动、凝固过程中的差异, ARATA^[14]采用钨粒示踪体研究电子束焊接匙孔周围熔体的流动规律, 发现在熔池上部的流动很缓慢且相当平静, 但进入中部, 流动变得很剧烈, 而接近底部时, 运动轨迹变窄, 且在根部处, 接近停止。也就是说在电子束焊接时, 液态金属的流动在整个焊接区内是非常不平衡的, 在中部非常剧烈, 而在顶部则相对较为平缓, 再到根部则接近停止^[15], 这样的流体运动分布决定了焊接熔池各部分的热循环曲线也必定相差很大, 焊缝沿熔深方向的微观组织分布从一个侧面验证了电子束焊接时液态金属的流动行为。

2.4 焊缝根部缩孔与裂纹的产生与防治

电子束焊接铝合金时, 电子的动能转变为热能, 电子束持续撞击金属表面, 在高压金属蒸汽的作用下, 熔化的金属被排开, 电子束继续撞击深处的固态金属, 形成一个小孔, 随着电子束与工件的相对移动, 液态金属沿小孔周围流向熔池后部, 逐渐冷却, 凝固而成为焊缝。但在搅拌不充分的情况下, 根部熔化的金属在凝固时流动缓慢, 不能很好地完整地填充所有的熔化区域, 在焊缝根部很有可能形成缩孔, 且常常伴随着裂纹的产生, 如图 5 所示。这样的焊接缺陷严重影响到头部的性能和使用, 因此必须加以抑制。

对于电子束焊接铝合金时出现这种根部缺陷, 一方面加大束流搅拌频率, 采用散焦焊接, 可以延长熔池凝固的时间, 增加电子束对熔池底部的搅动作用, 图 6 所示为电子束焊接中散焦与聚焦束流对熔池的作

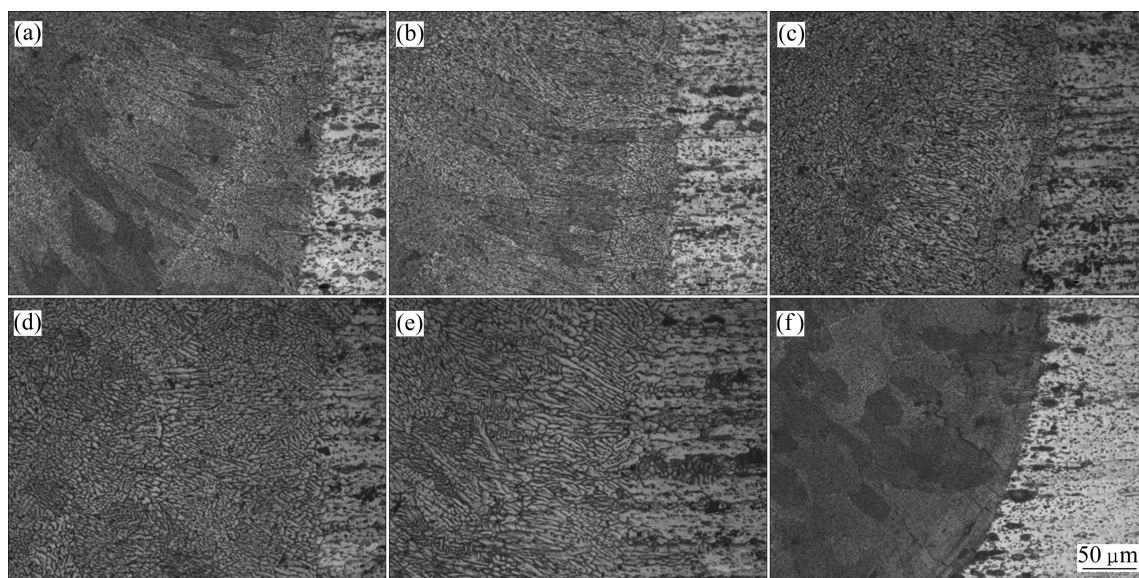


图 4 焊缝边缘组织沿熔深方向分布

Fig. 4 Microstructures distributions of weld edge along fusion depth direction: (a) Area A; (b) Area B; (c) Area C; (d) Area D; (e) Area E; (f) Area F

用示意图。另外, 可以采取焊后背部重熔的方法加以改善, 重熔后的接头形貌如图 7 所示, 根部缩孔和裂纹缺陷在重熔过程中得到消除。

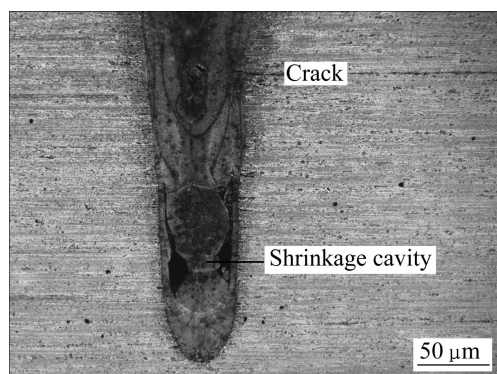


图 5 焊缝根部缩孔

Fig. 5 Shrinkage cavity in weld root

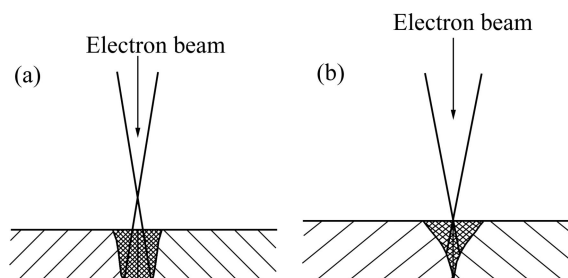


图 6 散焦与聚焦焊接示意

Fig. 6 Schematic diagrams of focusing out(a) and focusing(b) beams in electron beam welding

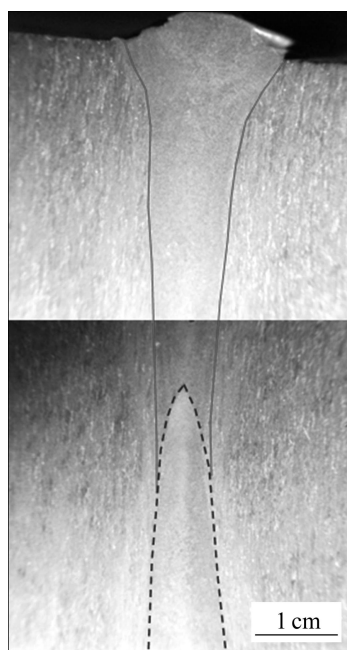


图 7 焊后重熔消除根部缩孔示意图

Fig. 7 Schematic diagram of eliminating shrinkage cavity of weld root by re-melting

3 结论

1) 2A14 铝合金电子束焊缝接头的组织分布由上而下晶粒尺寸逐渐减小, 到焊根处晶粒尺寸又进一步增大, 这样的组织分布特征与电子束焊接时熔池内部液态金属的流动行为有着密切的关系。

2) 焊缝中心部位液态金属流动速度快, 降低了熔体内的温度梯度, 大量的晶核在温度梯度较小的液相中向各个方向长大成为细小均匀的枝晶组织。

3) 在焊缝的边缘处温度梯度较大, 由于散热方向不尽相同, 其上联生结晶生长出的晶粒在方向上存在差异, 熔合线附近焊缝微观组织晶粒生长具有明显的方向性。

4) 焊缝根部容易产生缩孔和裂纹等缺陷, 影响接头性能, 应采取措施消除。

参考文献:

- [1] CHEN Shu-hai, LI Li-qun, CHEN Yan-bin, LIU De-jian. Si diffusion behavior during laser welding-brazing of Al alloy and Ti alloy with Al-12Si filler wire[J]. Transactions of Nonferrous Metals Society of China, 2010, 20(1): 64-70.
- [2] 王 涛, 尹志民. 高强变形铝合金的研究现状和发展趋势[J]. 稀有金属, 2006, 30(2): 197-202.
WANG Tao, YIN Zhi-min. Research status and development trend of ultra-high strength aluminum alloys[J]. Chinese Journal of Rare Metals, 2006, 30(2): 197-202.
- [3] STARINK M J, DESCHAMPS A, WANG S C. The strength of friction stir welded and friction stir processed aluminium alloys[J]. Scripta Materialia, 2008, 58(5): 377-382.
- [4] 韩小磊, 熊柏青, 张永安, 李志辉, 朱宝宏, 王 锋, 刘红伟. 固溶处理对 7150 铝合金组织和力学性能的影响[J]. 中国有色金属学报, 2010, 20(6): 1095-1100.
HAN Xiao-lei, XIONG Bai-qing, ZHANG Yong-an, LI Zhi-hui, ZHU Bao-hong, WANG Feng, LIU Hong-wei. Effect of solution treatment on microstructures and mechanical properties of 7150 aluminum alloy[J]. The Chinese Journal of Nonferrous Metals, 2010, 20(6): 1095-1100.
- [5] 李 杰, 宋仁国, 陈小明, 马晓春, 翁晓红. 固溶处理对 7050 高强铝合金显微组织和机械性能的影响[J]. 稀有金属, 2009, 33(4): 494-499.
LI Jie, SONG Ren-guo, CHEN Xiao-ming, MA Xiao-chun, WENG Xiao-hong. Effects of solid solution treatment on microstructure and mechanical properties of 7050 high strength aluminum alloy[J]. Chinese Journal of Rare Metals, 2009, 33(4): 494-499.

- [6] 李占明, 朱有利, 王 侃. 超声冲击处理对 2A12 铝合金焊接接头组织的影响[J]. 金属热处理, 2008, 33(7): 52–56.
LI Zhan-ming, ZHU You-li, WANG Kan. Influence of ultrasonic impact treatment on microstructure of 2A12 aluminum alloy welded joint[J]. Heat Treatment of Metals, 2008, 33(7): 52–56.
- [7] DADBAKHS S, TAHERI A K, SMITH C W. Strengthening study on 6082 Al alloy after combination of aging treatment and ECAP process[J]. Materials Science and Engineering A, 2010, 527: 4758.
- [8] 陈康华, 刘允中, 刘卫红. 7075 和 2024 铝合金的固溶组织与力学性能[J]. 中国有色金属学报, 2000, 10(6): 819–822.
CHEN Kang-hua, LIU Yun-zhong, LIU Hong-wei. Microstructure and mechanical properties of enhanced solution treated 7075 and 2024 aluminum alloys[J]. The Chinese Journal of Nonferrous Metals, 2000, 10(6): 819–822.
- [9] 黄 锐, 赵鹏飞, 付 钢, 左从进. 人工时效后 2B16 铝合金电子束焊接接头的组织与性能[J]. 金属热处理, 2009, 34(1): 43–45.
HUANG Rui, FU Peng-fei, FU Gang, ZUO Cong-jin. Microstructure and properties of 2B16 aluminum alloy electron beam welding joints after artificial aging[J]. Heat Treatment of Metals, 2009, 34(1): 43–45.
- [10] MALARVIZHI S, BALASUBRAMANIAN V. Effect of welding processes on AA2219 aluminium alloy joint properties[J]. Transactions of Nonferrous Metals Society of China, 2011, 21: 962–973.
- [11] 周 琦, 刘方军, 齐铂金. 电子束深穿透焊接熔质成分分布与熔池流动特征[J]. 中国机械工程, 2003, 14(5): 406–409.
ZHOU Qi, LIU Fang-jun, QI Bo-jin. Properties of the element distribution & melting metal flow in the electron beam deep penetration welding process[J]. China Mechanical Engineering, 2003, 14(5): 406–409.
- [12] 许良红, 田志凛, 彭 云, 张晓牧. 高强铝合金的 MIG 以及激光-MIG 焊接工艺对比[J]. 焊接学报, 2007, 28(2): 38–42.
XU Liang-hong, TIAN Zhi-ling, PENG Yun, ZHANG Xiao-mu. Comparison of MIG welding and laser-MIG welding of high strength aluminum alloy[J]. Transactions of the China Welding Institution, 2007, 28(2): 38–42.
- [13] 严 军, 高 明, 曾晓燕. 激光-MIG 复合焊接 2A12 铝合金工艺和接头性能[J]. 中国有色金属学报, 2009, 19(12): 2112–2118.
YAN Jun, GAO Ming, ZENG Xiao-yan. Welding process and joint properties of 2A12 aluminum alloy by laser-MIG hybrid welding[J]. The Chinese Journal of Nonferrous Metals, 2009, 19(12): 2112–2118.
- [14] ARATA Y. Fundamental feature of advanced laser and electron beam technology[C]//4th International Colloquium on Welding and Melting by Electron and Laser Beam. France: CEN SACLAY, 1988: 21–40.
- [15] 周 琦, 刘方军. 电子束深穿透焊接过程匙孔动力学研究进展[J]. 焊接学报, 2001, 22(3): 88–92.
ZHOU Qi, LIU Fang-jun. The review on the keyhole dynamics of the electron beam deep penetration welding process[J]. Transactions of the China Welding Institution, 2001, 22(3): 88–92.

(编辑 李艳红)