

Mg 含量对 7A52 铝合金 MIG 焊熔滴过渡及组织性能的影响

何逸凡¹, 王呈阳², 贾舒茗², 王大锋¹, 马修斯³, 马冰¹, 陈东高¹, 张文治¹, 杨文静¹, 张龙¹

(1. 中国兵器科学研究院 宁波分院, 浙江 宁波 315103; 2. 驻杭州地区军代室, 浙江 杭州 310015;

3. 宁波博德高科股份有限公司, 浙江 宁波 315100)

摘 要 用 3 种不同 Mg 含量的 ER5356 铝合金焊丝对 20 mm 厚 7A52 铝合金进行 MIG 焊, 研究 Mg 含量对熔滴过渡及电弧形态的影响, 分析不同 Mg 含量焊丝对 7A52 焊接接头组织和性能的影响。结果表明: 随 Mg 含量的增加, 熔滴尺寸增加, 过渡频率降低, 焊接电弧产生的压缩作用减弱; 焊缝区显微硬度提高, 接头的抗拉强度提高, 伸长率略有下降, 断裂方式为韧性断裂; 焊缝区等轴晶尺寸减小, Al_3Mg_2 相增加; 熔合区沿晶界处析出的 Al_3Mg_2 相增加, 晶粒尺寸减小。当 Mg 的质量分数为 5.0%~5.1% 时, 对裂纹扩展阻力大, 焊缝中心延展性较好, 抗拉强度为 285.33 MPa, 综合力学性能较好。

关键词 Mg 含量; MIG 焊; 熔滴过渡; 组织性能

中图分类号 TG44

文献标志码 A

文章编号 1004-244X(2023)05-0076-06

DOI: 10.14024/j.cnki.1004-244x.20230919.003

Effects of Mg contents on droplet transition and microstructure properties of 7A52 aluminum alloy by MIG welding

HE Yifan¹, WANG Chengyang², JIA shuming², WANG Dafeng¹, MA Xiusi³, MA Bing¹,

CHEN Donggao¹, ZHANG Wenzhi¹, YANG Wenjing¹, ZHANG Long¹

(1. Ningbo Branch of Chinese Academy of Ordnance Science, Ningbo 315103, China; 2. Military Generation Office in Hangzhou Area, Hangzhou 310015, China; 3. Ningbo BODE Hightech Co. Ltd., Ningbo 315100, China)

Abstract Three kinds of ER5356 aluminum alloys welding wires with different Mg content were used to MIG weld the 20 mm thick 7A52 aluminum alloy. The effects of different Mg contents on droplet transition and arc morphologies were studied, and the effects of different Mg contents welding wire on the microstructure properties of 7A52 welded joint were analyzed. The results show that with the increase of Mg content, the droplet size increases, the transition frequency decreases, and the compression effect generated by welding arc weakens. The microhardness of the weld area increases, the tensile strength of the joint increases, the elongation slightly reduces, and the fracture method is ductile fracture. The equiaxed crystal size in the weld area decreases, and the Al_3Mg_2 phase increases. The Al_3Mg_2 phase precipitated along the grain boundary in the fusion zone increases, and the grain size decreases. When the Mg content is 5.0%-5.1%, the resistance to crack propagation is large, the ductility of the weld center is good, the tensile strength reaches 285.33 MPa, and the comprehensive mechanical properties are better.

Keywords Mg content; MIG welding; droplet transition; microstructure properties

近年来, 装备轻量化的需求与日俱增, 铝合金因比强度高、耐腐蚀性好、焊接性好等特点在航空航天、兵器制造、轨道车辆、船舶运输等各个领域得到广泛运用^[1-3]。MIG 焊通过对焊接电流、焊接速度、送丝速度等参数匹配, 可满足铝合金高质量、低成本焊接的需求, 凭借其焊接成型美观、生产效率高、经济适用性强等优点受到越来越多的关注^[4-6]。Mg 作为 5 系焊丝制备中添加的主要元素, 对焊接接头的力学性能、组织形态等有较大的影响。姜龙等^[7]采用真空—氩气熔炼工艺, 通过研究 Mg 含量对铸造 5356 铝合金组织和性能

的影响, 发现 5356 铝合金的抗拉强度随 Mg 添加量的增加而提高, 而伸长率逐渐降低。王金波等^[8]用 P-MIG 焊接研究铝合金 P-MIG 焊接 6061-T6 铝合金试板, 发现随峰值电流的降低, 熔滴过渡方式从一脉一滴向一脉两滴转变, 脉冲频率、电弧电压的改变不影响熔滴过渡方式。

本文作者用 3 种不同 Mg 含量的 ER5356 铝合金焊丝对 7A52 铝合金试板进行焊接, 用高速摄影系统观察电弧形态及熔滴过渡行为, 研究 Mg 含量对 7A52 铝合金 MIG 焊熔滴过渡、接头组织、性能的影响, 为铝合金

收稿日期: 2023-06-08; 修回日期: 2023-09-05

基金项目: 宁波市科技攻关计划项目(2022Z109); 宁波市重点研发计划项目(2023Z098)

第一作者: 何逸凡, 男, 硕士。E-mail: 582019706@qq.com。

通信作者: 王大锋, 男, 博士, 副研究员。E-mail: bjing2013saw@126.com。

高质量焊接工艺地制定提供依据。

1 试验材料与方法

熔滴过渡试验用平板堆焊,材质为7A52,尺寸为150 mm×40 mm×20 mm,焊丝选用3种不同Mg含量的ER5356(ϕ 1.2 mm)铝合金焊丝,焊丝和试板的化学成分见表1、2。用KUKA机器人、FroniusTPS-5000电弧焊机进行熔滴过渡试验,焊接电流、焊接电压及送丝速度自动匹配,焊枪与水平面夹角为70°,气体用体积分数为99.999%的氩气,流量为20 L/min,干伸长为15 mm,焊接速度为0.6 m/min。高速摄影设备为Acuteye V4.0高速摄影系统,拍摄帧率为4 000 f/s,曝光时间为

表1 不同Mg含量的ER5356铝合金焊丝成分
Table 1 Chemical composition of ER5356 aluminum alloy welding wire with different Mg contents

编号	w(Mg)/%	w(Mn)/%	w(Cr)/%	w(Ti)/%	w(Al)/%
1	4.5~4.6	0.13	0.13	0.13	余量
2	4.8~4.9	0.13	0.13	0.13	余量
3	5.0~5.1	0.13	0.13	0.13	余量

表2 7A52铝合金试板化学成分
Table 2 Chemical composition of 7A52 titanium alloy plate

成分	质量分数/%	成分	质量分数/%
Si	≤0.25	Zn	4.00~4.80
Fe	≤0.30	Ti	0.05~0.18
Cu	0.05~0.20	Cr	0.15~0.25
Mn	0.20~0.50	Al	余量
Mg	2.00~2.80		

25 μ s,滤光镜片波长为(808±10) nm,高速摄影设备与焊接方向垂直进行拍摄。

对接接头试板规格为300 mm×150 mm×20 mm;坡口形状为单Y形;坡口角度为80°;间隙为0.5 mm。填充材料用3种不同Mg含量ER5356直径为1.2 mm的铝合金焊丝,焊接时用背部铜垫板加快散热,控制层间温度为80℃。熔滴过渡堆焊和对接焊接工艺参数,如表3所示。焊接坡口示意图,如图1所示。焊接接头X射线检测执行标准NB/T 47013.11—2015(数字成像),评定标准执行NB/T 47013.2—2015。

表3 焊接工艺参数
Table 3 Welding process parameters

参数	堆焊	接头	参数	堆焊	接头
焊接电流/A	220	220	干伸长/mm	16	16
弧长修正/%	0	0	焊接速度/(m·min ⁻¹)	0.60	0.28~0.45

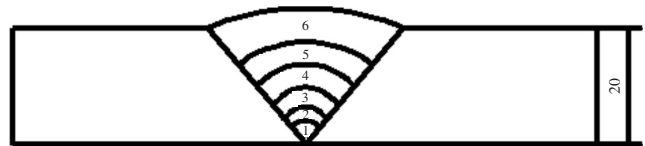


图1 焊接坡口示意图(mm)
Fig.1 Schematic diagram of welded grooves(mm)

2 结果与讨论

2.1 熔滴过渡特征

图2为3种不同Mg含量ER5356铝合金焊丝的熔滴过渡过程。用MIG焊工艺焊接,借助高速摄影技术研究

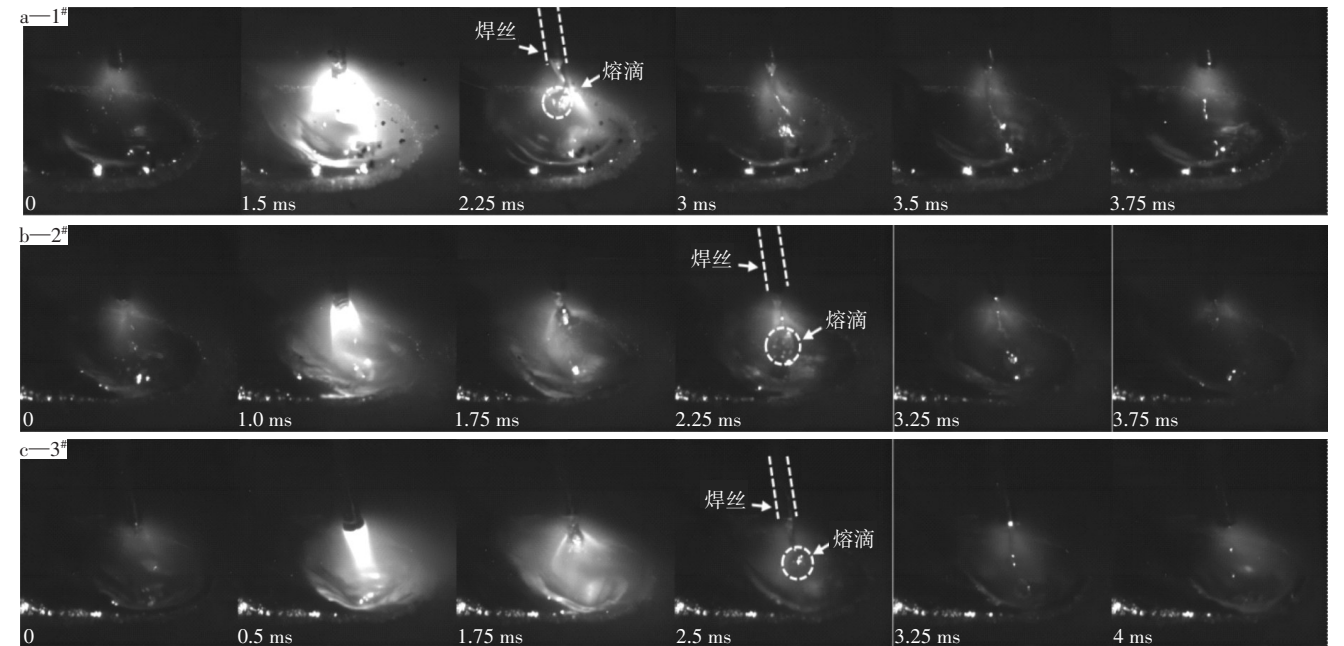


图2 3种不同Mg含量ER5356铝合金焊丝的熔滴过渡方式
Fig.2 Droplet transfer modes of ER5356 aluminum alloy welding wire with three different Mg contents

同种焊接工艺下不同焊材的熔滴过渡特性。可知,在一个脉冲周期内,随脉冲时间的延长,熔滴金属在焊丝端部逐渐积累,最终熔滴在电磁收缩力、自身重力的作用下从焊丝端部降落熔池表面过渡,熔滴沿焊丝轴向滴落,大小接近焊丝直径,过渡方式为射滴过渡。在焊接电流为220 A时,3种焊丝熔滴过渡方式均为射滴过渡,熔滴尺寸接近焊丝直径,呈球滴状,基本无飞溅,熔滴尺寸及过渡频率如图3所示。分析认为,随Mg含量的增加,熔滴尺寸略有增加,过渡频率降低,不会改变熔滴的过渡方式,焊丝中Mg含量的改变对熔滴和过渡频率产生影响^[9-10]。随Mg含量的增加,单个熔滴质量和体积增大,飞溅略有增加。当焊丝Mg的质量分数为5.0%~5.1%(3[#])时,在过渡周期内熔滴过渡尺寸最大(1.51 mm),大于焊丝直径,过渡频率最低,为250 Hz。

图4为不同Mg含量铝合金焊丝MIG焊时的电弧形态。由图4a可以看出,在一个脉冲周期内,由基值电流处电弧起弧,弧柱面积逐渐增大,在峰值电流处弧柱面积达到最大,最终重新到达基值电流时弧柱面积缩小。3种焊丝的Mg含量逐渐增加,Mg的质量分数由4.5%升至5.1%,弧柱面积随之增加,在电磁收缩力的

作用下,弧柱沿焊接方向发散呈钟罩形,电弧挺度逐渐增加,熔池流动加剧。当Mg的质量分数为5.0%~5.1%时,焊丝端部弧柱较分散,弧柱面积达到最大,同时保护气体对焊接电弧产生的压缩作用减弱。焊丝Mg含量的增加会使电弧在过渡过程中燃烧加剧,Mg的熔点低,热导率高,与氧气发生反应剧烈燃烧,发出耀眼白光并放出热量,在环境压力不变的情况下表现为电弧体积膨胀,导致电弧弧长和弧锥角增大、电弧弧柱面积增加。

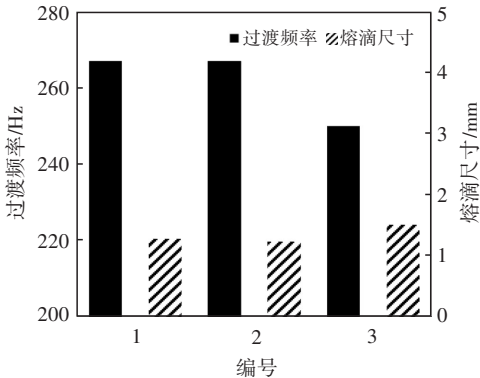


图3 3种焊丝的熔滴尺寸及过渡频率
Fig.3 Droplet sizes and transition frequency of three welding wires

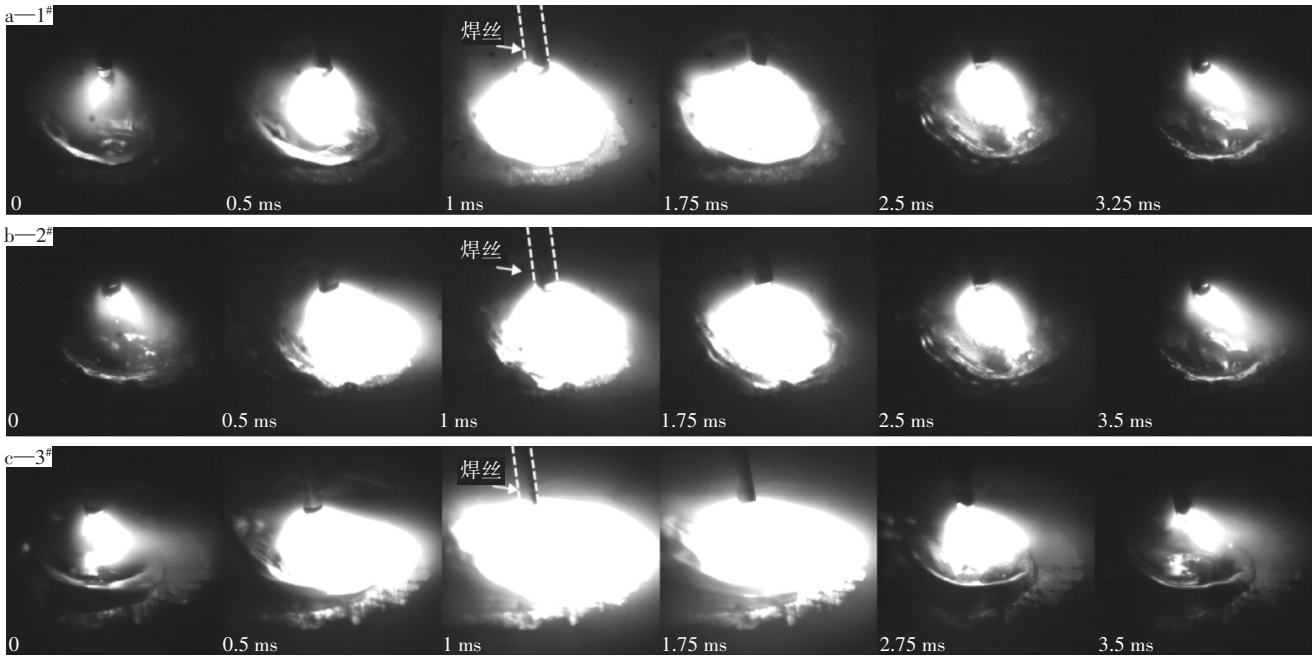


图4 不同Mg含量铝合金焊丝MIG焊时的电弧形态
Fig.4 Arc shapes of aluminum alloy wire with different Mg contents during MIG welding

2.2 接头显微硬度

测量3种焊丝在同种焊接工艺下的焊缝区维氏硬度,载荷为3 N,显微硬度测试结果如图5所示。以1[#]铝合金焊丝为例,对比同种焊丝焊缝区、热影响区、母材区的显微硬度可以发现,在焊接热循环的作用下焊缝区的显微硬度降低,发生软化现象,平均为84HV,

热影响区显微硬度高于焊缝区,略低于母材,为134HV。

对比3种不同Mg含量焊丝同种焊接工艺下焊缝区显微硬度可以看出,焊丝Mg的质量分数由4.5%升至5.1%,焊缝区显微硬度逐渐提高,其中3[#]铝合金焊丝Mg含量最高,焊缝区的显微硬度高于其余两种焊

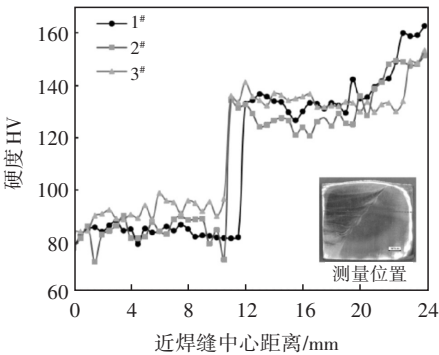


图5 显微硬度
Fig.5 Microhardness

丝,平均值为92HV,热影响区和母材显微硬度变化不明显,热影响区显微硬度低于母材。在每个区内显微硬度变化不大,各区之间硬度变化较大。在焊接过程中,热影响区的冷却速度较快,显微硬度较焊缝提高。通过对各接头焊缝区采用阳极覆膜进行晶粒度测试得出,3种接头焊缝区晶粒度均为5级,焊缝区在焊接过程中因冷却速度较慢,晶粒产生粗化现象,显微硬度降低,接头发生软化,3种Mg含量焊丝接头的晶粒度组织形貌如图6所示。

图7为3种Mg含量焊丝焊接接头的宏观表面成型及探伤结果。表4为各接头X射线探伤等级。结合图、表可以得出,1#接头内部存在圆形缺陷1点、2#接头内部存在圆形缺陷2点、3#接头内部存在条形缺陷3.2 mm,质量评级均达到Ⅱ级及以上,在同种焊接工艺下焊缝内部质量均较好,无裂纹、未熔合等缺陷,表面成型美观,过渡均匀。

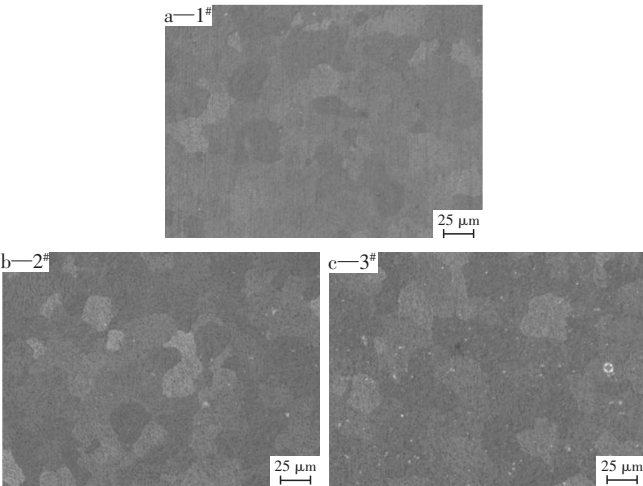


图6 3种Mg含量焊丝接头的晶粒度组织形貌
Fig.6 Grain size microstructure morphologies of three kinds of Mg contents welding wire joints

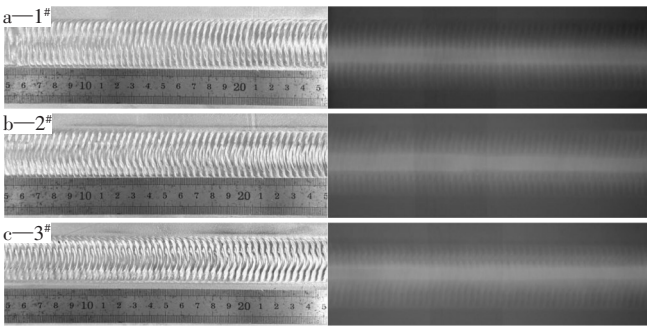


图7 3种Mg含量焊丝焊接接头的宏观表面成型及探伤结果
Fig.7 Results of macroscopic surface formation and flaw detection of welded joints with three kinds of Mg content wires

表4 接头X射线探伤等级 Table 4 X-ray flaw detection rating of joints		
焊丝	缺陷性质及点数	评级
1#	圆形缺陷1点	I
2#	圆形缺陷2点	I
3#	条形缺陷3.2 mm	II

2.3 接头力学性能

分别对上述3种焊丝焊接的对接接头进行拉伸试验,得到各焊丝焊接接头的力学性能如图8所示。可以看出,随5356铝合金中Mg含量增加,抗拉强度逐渐增大。焊丝Mg的质量分数由4.5%升至5.1%,抗拉强度提高了2.3%,平均伸长率略有下降。Mg在铝合金基体中溶解度较大,随焊丝Mg含量增加,Mg在 α -Al基体中的溶解度随之增大。图9为焊接接头组织形貌及能谱图。可以看出, Al_3Mg_2 相分布在 α -Al周围,随Mg含量的增加,在晶界处形成的 Al_3Mg_2 第二相随之增加,抗拉强度提升,但Mg含量达到一定值后,抗拉强度未继续提高。其中3#焊丝的抗拉强度、伸长率最高,为285.33 MPa、11.16%。综上可知,在Mg的质量分数

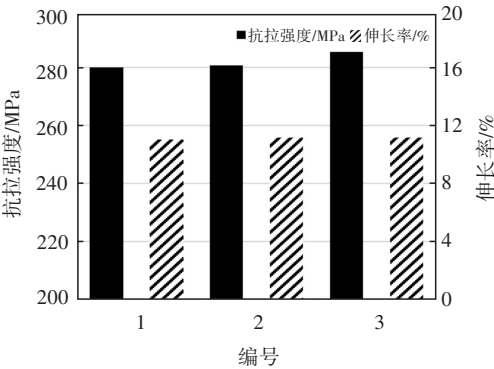


图8 各焊丝焊接接头的力学性能
Fig.8 Mechanical properties of each welding wire welded joint

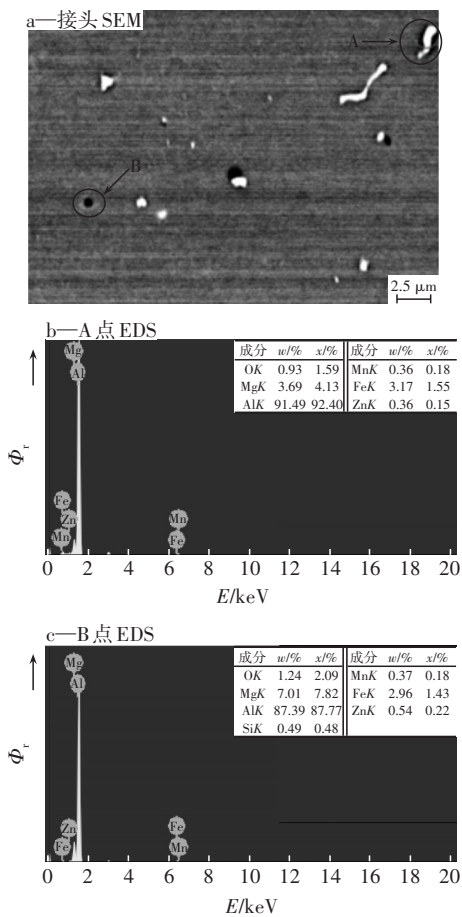


图9 焊接接头组织形貌及能谱图
Fig.9 Welded joint microstructure and energy spectrum

为5.0%~5.1%时,接头具有较高的抗拉强度和较高的伸长率,力学性能较好。

图10为3种不同Mg含量焊丝拉伸试样断口形貌。

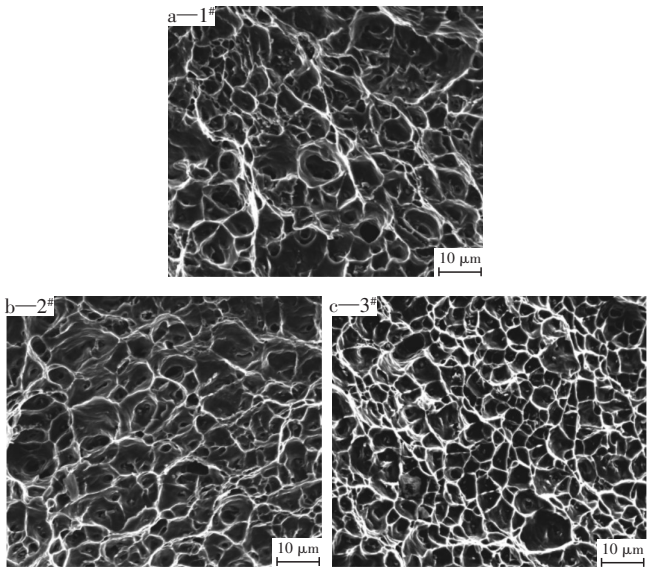


图10 3种不同Mg含量焊丝拉伸试样断口形貌
Fig.10 Fracture morphologies of three kinds of different Mg contents welding wire tensile samples

可知,断口存在大量韧窝,在外载荷作用下,产生变形、焊接应力集中产生空穴,随外力的增加,空穴不断生长并与其他空穴集聚形成微裂纹,微裂纹不断扩展最终发生断裂,拉伸试样的断裂方式为韧性断裂。可以看出,随Mg含量的增加,断口处韧窝尺寸逐渐减小,3#韧窝最细小,随载荷增加,韧窝快速形成、断裂速度加快。Mg的质量分数为5.0%~5.1%时,接头断口处存在大量细小的韧窝,尺寸为3~5 μm,断裂方式为韧性断裂,焊缝中心延展性较好。

2.4 接头组织分析

图11为焊缝显微组织图。依次为各接头焊缝区及熔合区。接头焊缝区内部为等轴晶粒,熔合区附近为细小的等轴晶粒。在冷却过程中,靠近母材的区域温度梯度较大,存在较多的形核点,结晶速度较小。由图9分析可知,晶界处为Al₃Mg₂相,结合图10得出,随Mg含量的提高,沿晶界析出的Al₃Mg₂相增多,Mg含量的增加弥补了过渡过程中烧损的Mg。焊缝中心区由尺寸较大的等轴晶组成,方向与凝固方向一致。焊缝中心在焊接时熔池内金属物质流动剧烈,冷却时温度梯度较小^[11-12],晶粒在经过非均匀形核后有充分时间长大,形成宏观尺寸较大的等轴晶。通过对焊缝区进行晶粒度检测,得出3种接头的焊缝区平均晶粒度均为5级,在相同区域过冷度一致,晶粒尺寸一致。结合图11可以看出,随焊丝Mg的质量分数由4.5%升至5.1%,焊缝区等轴晶尺寸减小,Al₃Mg₂相增多;熔合区沿晶界处析出的Al₃Mg₂相增加,晶粒尺寸减小。

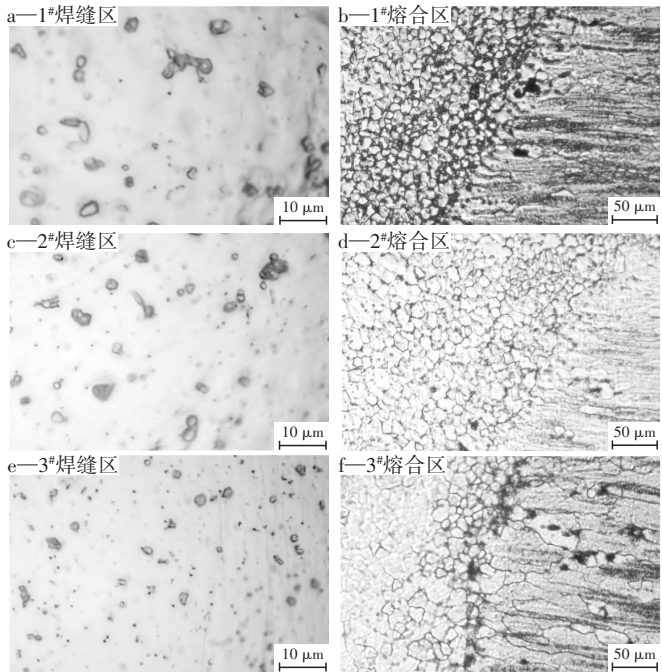


图11 焊缝显微组织
Fig.11 Weld microstructure

3 结论

1) 随Mg含量的增加,熔滴尺寸增加,过渡频率降低,同时加剧过渡过程中电弧的燃烧,焊接电弧产生的压缩作用减弱。

2) 焊丝Mg含量增加,焊缝区显微硬度提高,接头的抗拉强度提高,伸长率略有下降。Mg的质量分数为5.0%~5.1%时,韧窝细小,断裂方式为韧性断裂,焊缝中心延展性较好,抗拉强度为285.33 MPa。

3) 焊丝Mg含量增加,焊缝区等轴晶尺寸减小, Al_3Mg_2 相增多;熔合区沿晶界处析出的 Al_3Mg_2 相增加,晶粒尺寸减小。

4 参考文献

- [1] 臧金鑫,陈军洲,韩凯,等. 航空铝合金研究进展与发展趋势[J]. 中国材料进展,2022,41(10):769-777.
ZANG Jinxin, CHEN Junzhou, HAN Kai, et al. Research progress and development tendency of aeronautical aluminum alloy[J]. Materials China, 2022, 41(10): 769-777. (in Chinese)
- [2] 管仁国,娄花芬,黄晖,等. 铝合金材料发展现状、趋势及展望[J]. 中国工程科学,2020,22(5):68-75.
GUAN Renguo, LOU Huafen, HUANG Hui, et al. Development of aluminum alloy materials: Current status, trend, and prospects[J]. Strategic Study of CAE, 2020, 22(5): 68-75. (in Chinese)
- [3] 邓运来,张新明. 铝及铝合金材料进展[J]. 中国有色金属学报,2019,29(9):2115-2141.
DENG Yunlai, ZHANG Xinming. Development of aluminium and aluminium alloy[J]. The Chinese Journal of Nonferrous Metals, 2019, 29(9): 2115-2141. (in Chinese)
- [4] 王佳宁. 车用铝合金薄板双脉冲MIG焊接头的非匹配成型及力学性能研究[D]. 长春:吉林大学,2022.
WANG Jianing. Research on the mismatched formability and mechanical properties of double-pulse MIG welded joints in aluminum alloy sheets for automotive applications[D]. Changchun: Jilin University, 2022. (in Chinese)
- [5] 何鹏,柏兴旺,周祥曼,等. MIG电弧增材制造6061铝合金的组织与性能[J]. 焊接学报,2022,43(2):50-54.
HE Peng, BAI Xingwang, ZHOU Xiangman, et al. Research on the mismatched formability and mechanical properties of double-pulse MIG welded joints in aluminum alloy sheets for automotive applications[J]. Transactions of the China Welding Institution, 2022, 43(2): 50-54. (in Chinese)
- [6] SCOTTIA F M, TEIXEIRAA F R, SILVAA L J D, et al. Thermal management in WAAM through the CMT advanced process and an active cooling technique[J]. Journal of Manufacturing Processes, 2020, 57: 23-35.
- [7] 姜龙,张志峰,白月龙,等. Mg对真空-氩气熔炼铸造5356铝合金组织和性能的影响[J]. 特种铸造及有色金属,2021,41(5):539-542.
JIANG Long, ZHANG Zhifeng, BAI Yuelong, et al. Effects of Mg content on microstructures and properties of 5356 aluminum by vacuum-argon melting and casting[J]. Special Casting & Nonferrous Alloys, 2021, 41(5): 539-542. (in Chinese)
- [8] 王金波,李科,宁虹,等. 铝合金P-MIG焊接熔滴过渡研究[J]. 热加工工艺,2019,48(7):28-31.
WANG Jinbo, LI Ke, NING Hong, et al. Study on droplet transfer of P-MIG welding of aluminum alloy[J]. Hot Working Technology, 2019, 48(7): 28-31. (in Chinese)
- [9] ZHANG Liang, WANG Songtao, WANG Huixia, et al. Investigate the effect of arc characteristic on the mechanical properties of 5A56 Al alloy in CMT arc additive manufacturing[J]. CIRP Journal of Manufacturing Science and Technology, 2023, 40: 102-113.
- [10] 戴宇,王大锋,马良超,等. 超高强度钢激光-MAG复合焊熔滴过渡研究[J]. 兵器材料科学与工程,2020,43(2):67-71.
DAI Yu, WANG Dafeng, MA Liangchao, et al. Droplet transfer in laser-MAG hybrid welding of ultra-high strength steel[J]. Ordnance Material Science and Engineering, 2020, 43(2): 67-71. (in Chinese)
- [11] 张龙,陈东高,张迎迎,等. 7B52-T6叠层铝合金焊接接头组织及疲劳损伤行为[J]. 兵器材料科学与工程,2021,44(2):126-130.
ZHANG Long, CHEN Donggao, ZHANG Yingying, et al. Microstructure and fatigue damage behavior of 7B52-T6 laminated aluminum alloy welded joint[J]. Ordnance Material Science and Engineering, 2021, 44(2): 126-130. (in Chinese)
- [12] 戴宇,张迎迎,王大锋,等. 真空中间退火拉拔制备ER5356焊丝MIG焊接头的组织与性能[J]. 热加工工艺,2022,51(21):41-45.
DAI Yu, ZHANG Yingying, WANG Dafeng, et al. Microstructure and properties of MIG welded joint of ER5356 wire prepared by drawing with vacuum intermediate annealing[J]. Hot Working Technology, 2022, 51(21): 41-45. (in Chinese)