2060 铝锂合金填充 ER4047 焊丝激光焊接接头组织性能研究

周宝升[1]，刘奋成[1,2]，黄春平[1]，王维新[3]，李秋歌[2]，陈玉华[1]

（1. 南昌航空大学 轻合金加工科学与技术国防重点学科实验室，江西 南昌 330063）

(2. 西北工业大学 凝固技术国家重点实验室，陕西 西安 710072)

（3. 三江航天红阳机电有限公司，湖北 孝感 432000）

摘 要：利用光纤激光填充 ER4047 焊丝对 2060 铝锂合金进行了对接试验，研究了焊缝形貌和组织特征、合金元素微观偏析、二次相析出、焊缝的力学性能等，分析了其相互关系。结果表明，合理的焊接工艺下焊缝成形良好，沿熔合线分布着非常细小的等轴晶，焊缝中心为大量的等轴树枝晶，柱状晶区域比较窄；焊缝存在较为严重的微观偏析，主要的合金元素 Cu、Mg、Si 等集中分布在晶界处，Al 元素在晶间含量较少；主要强化相 T1(Al_2CuLi)在焊缝中几乎全部消失，并有一定数量的 TB(Al_7Cu_4Li)相析出；填充 ER4047 焊丝的焊缝晶间存在大量的共晶体，较多的 Mg_2Si 及 $Al_xCu_yMn_{1-x-y}$ 二次相等；热影响区(HAZ)中晶粒和二次相尺寸变大，并有 θ'(Al_2Cu)、TB 及未溶解的 T1(Al_2CuLi)等相共存。最佳工艺下接头的性能测试发现，焊缝区的硬度(HV)最小，平均为 986 MPa，约为母材硬度的 65%；接头抗拉强度达到了 354 MPa，伸长率为 4.9%，分别为母材 2060 合金的 67%和 40.8%。焊缝区是接头的最薄弱环节，拉伸断裂优先发生于焊缝下部的粗大的等轴晶区，沿晶界逐渐向上扩展，最终沿柱状晶区断裂，断口表现为韧窝聚集型沿晶断裂。

关键词：2060 铝锂合金；激光焊接；显微组织；力学性能

中图法分类号：TG146.21; TG456.7 **文献标识码**： A **文章编号**：1002-185X(2018)07-2216-09

2060 铝锂合金是新一代铝合金中具有更好的强度特性和进一步提高耐腐蚀性的代表[1-3]。2060 铝锂合金属于 Al-Cu-Li-Mg 系沉淀强化型合金材料，在成分设计上提高了 Cu/Li 的比例，更大地促进了主要强化相 T_1(Al_2CuLi)的析出[4]，其在 Al 基体中大量的弥散分布，合金中还有 θ'(Al_2Cu)、δ'(Al_3Li)、及少量的 T_2(Al_6CuLi_3)、S′(Al_2CuMg)等相，多种类型的相析出提高了 2060 合金的强度。

光纤激光比其他激光具有更高的光电转化效率、更好的光束质量，因此被广泛应用于航空航天制造领域；光纤激光焊接过程中热源能量高度集中、焊接速率快、热输入低、对母材的焊接影响小，因而比 MIG、TIG 等传统的焊接方法易获得熔深更大、热影响区更窄且性能优良的焊接接头[5-7]，而激光填丝焊接有力地弥补了铝合金激光自熔焊后的表面塌陷、强度低的缺点[8]，其高度的柔性自动化程度在航空航天大型复杂结构件中的焊接优势也远远大于搅拌摩擦焊[9,10]。

尽管 2060 铝锂合金在成分设计上改善了它的焊接性，诸位学者对其的研究发现，其焊缝的气孔和热裂纹的敏感性仍然比较高，焊缝区的软化程度依旧比较严重，由此导致接头的力学性能比母材低很多，此类焊接问题的出现在一定程度上限制了其作为蒙皮结构材料在航空航天上的应用。X. Y. Zhang 等[11]对 2060 铝锂合金进行了填充 5087 焊丝的激光焊接，接头的抗拉强度仅为 317 MPa，焊缝的平均硬度(HV)仅为 700 MPa，接头软化很严重，准晶相 T2 促进了焊缝含有韧窝的沿晶断裂。安娜等[12]对其做了焊接工艺的研究，在最佳工艺参数下，平均抗拉强度仅为 309 MPa，平均断后延伸率约为 0.7%，强韧性都比较差，结晶裂纹的倾向性很大。2060 铝锂合金具有较大的热膨胀系数，填充 Al-Mg 焊丝后在焊缝中易形成含 Mg 的脆性相，所以焊缝容易产生裂纹。然而 ER4047Al-Si 焊丝作为一种低熔点共晶型合金，在焊接熔池复杂的成形过程中具有良好的流动性，可调节熔池的化学成分和焊缝金属的结晶形态，抑制热裂纹的产生，所以填充 ER4047 焊丝可以降低 2060 铝锂合金焊接中热裂纹敏感性。

收稿日期：2017-07-12

基金项目：国家自然科学基金(51565041, 51565040); 江西省教育厅科研项目(GJJ150710); 凝固技术国家重点实验室开放课题(SKLSP201634)

作者简介：周宝升，男，1990 年生，硕士生，南昌航空大学航空制造工程学院，江西 南昌 330063，电话：0791-83863028，E-mail: baossk@163.com

2A97、2198 等其他高强铝锂合金的激光自熔焊接和激光填丝焊接在组织、力学性能等方面也得到了一定的研究成果[13-15]，但是国内外目前对 2060 铝锂合金焊接性的研究比较少、比较浅，并没有从根本上揭示接头力学性能降低的原因。因此，需要从溶质微观分布形态及强化相的析出方面深入研究其与力学性能的关系。

本研究采用填充 ER4047 焊丝的光纤激光焊接技术对 2060 铝锂合金进行对接试验，通过控制填丝焊接工艺解决了热裂纹缺陷问题，降低了气孔的产生，提高了焊缝的力学性能，分析了焊缝的组织演变规律，深入研究了焊缝中的元素分布、二次相析出情况及它们对力学性能的影响。

1　实　验

本试验所用材料为 2060-T8 铝锂合金轧制板材，是 C919 大型客机机身壁板材料[16]，尺寸为 100 mm×100 mm×2 mm，抗拉强度为 530 MPa，延伸率为 12.9%。填充材料选用美国 AlcoTec 生产的 ER4047 铝硅焊丝，规格均为 Φ1.2 mm，基材和焊丝的化学成分及含量分别如表 1、表 2 所示。

试验所用的激光焊接系统由 IPG-YLS-6000 光纤激光器、KUKA KR16-2W 机器人及龙门滑轨、卧式回转台等部分组合。激光焊接时采用光束负离焦，离焦量为-2 mm，最大脉冲频率 1000 Hz，激光束波长 1060 nm，聚焦镜焦距为 250 mm，聚焦光束直径为 0.25 mm，传导光纤芯径 200 μm，准直径焦距 200 mm，聚焦光斑直径 0.2 mm。焊接过程中采用氩气作为保护气体，正、背面保护气流量为 15 L/min。焊接方向与轧制方向平行。实验所用的焊接参数包括激光功率 P=3.5 kW，送丝速度 w=3.2 m·min^{-1}，焊接速度分别为 v=4、4.5 和 5 m·min^{-1}，比较焊接速度对焊缝形貌及接头组织性能的影响。

焊前需要对试板表面进行严格的碱洗和酸洗，去除表面氧化膜；焊后沿垂直于焊接方向线切割切取横截面试样，经镶嵌、粗磨、精磨和抛光后使用 Keller 试剂（体积比 HF:HCl:HNO_3:H_2O =1:1.5:2.5:95）进行腐蚀，然后采用 OLMPUS PM-T3 型光学显微镜和 ZEISS SUPRA 55 型场发射扫描电镜观察接头的显微组织；采用 EPMA-1720 型电子探针进行焊缝化学元素分析；利用 D8ADVANCE-A25 型 X 射线衍射仪进行接头物相分析，并结合 JEM-2010F 型透射电镜对析出相形貌进行观察。透射试样制备先手工磨到 50 μm 以下，然后在液氮冷却下的 10%高氯酸+90%甲醇的电解液中双喷减薄至镜面效果并穿孔，减薄过程中温度保持在-30 ℃；采用 401MVD 型数显显微硬度计对接头进行硬度测试，加载载荷为 100 g，持续加载时间为 10 s，沿直线每间隔 0.2 mm 依次选取 1 个测试点进行测试；在 WDW-E200D 型微机控制电子万能试验机上进行室温拉伸试验，加载速度为 2 mm/min，拉伸试样截取方式及尺寸如图 1 所示。

表 1　2060-T8 铝锂合金的化学成分

Table 1　Chemical composition of 2060-T8 Al-Li alloy (ω/%)

Alloy	Cu	Li	Mg	Zn	Mn	Ag	Zr	Si	Fe	Al
2060	3.8	0.75	0.85	0.42	0.30	0.30	0.11	0.05	0.10	Bal.

表 2　ER4047 焊丝化学成分

Table 2　Chemical composition of ER4047 welding wire (ω/%)

Wire	Si	Mg	Fe	Cu	Zn	Mn	Cr	V	Ti	Al
ER4047	12	0.1	0.8	0.03	0.2	0.15	-	-	0.01	Bal.

2　结果与分析

2.1　接头的宏观形貌

图 2 给出了不同焊接速度下焊缝形貌。比较发现，在一定的焊接功率和速度下，焊缝的上表面呈现为规则连续的鱼鳞状条纹，成型均比较好，随着焊接速度的增大，输入的线能量减少，焊缝表面金属的堆积量减少，背面的金属下陷量不均匀。焊接过程中能量吸收率越来越不稳定，背面的液态金属飞溅减少，焊缝的整体宽度

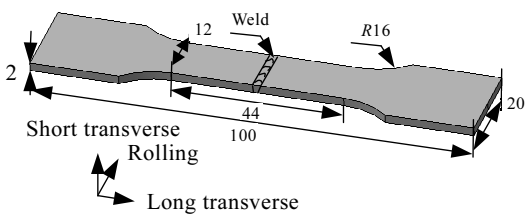


图 1　拉伸试件几何图形

Fig.1　Geometry of tensile specimen

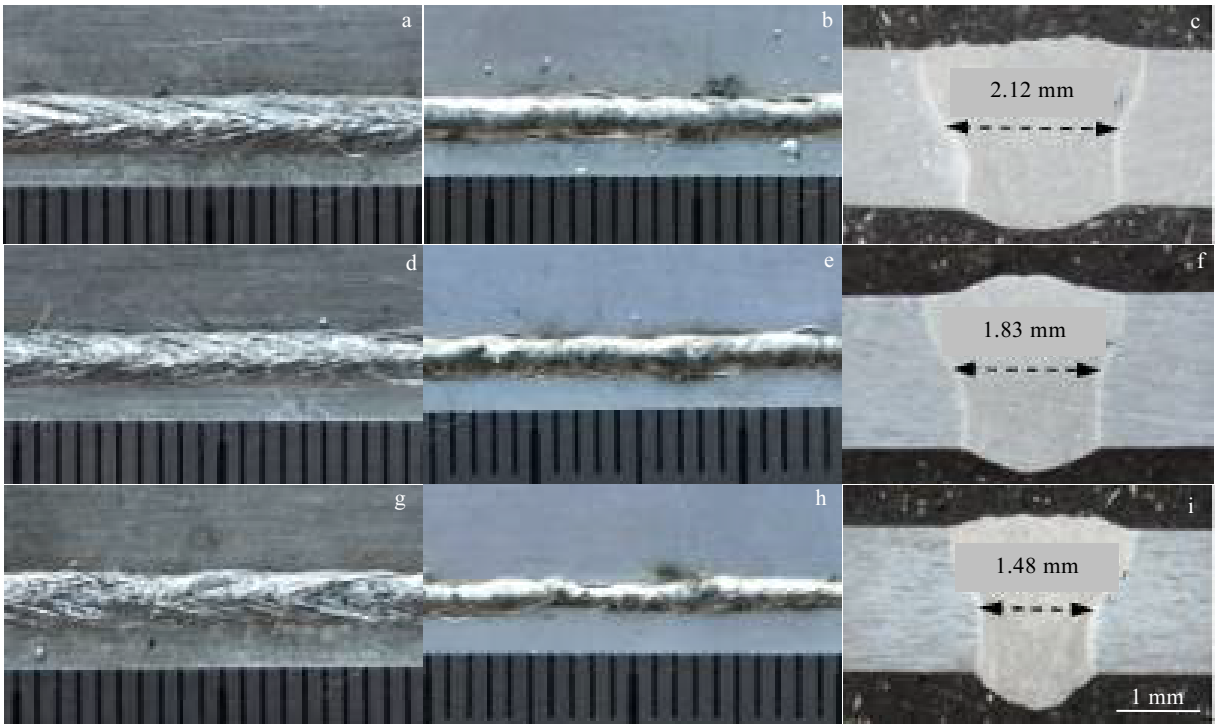


图 2　不同焊接速度下 2060 铝锂合金填充 ER4047 焊丝激光焊焊缝形貌

Fig.2　Morphologies of filled ER4047 welding wire at different welding speeds: (a~c) 4 m·min^{-1}; (d~f) 4.5 m·min^{-1}; (g~i) 5 m·min^{-1}; (a, d, g) front view; (b, e, h) back view; (c, f, i) cross section morphologies

逐渐变窄，焊缝截面形貌由近“Y”型变为“Y”型焊缝。

2.2　接头微观组织演变

2060 铝锂合金填充 ER4047 激光焊接接头的微观组织从热影响区到焊缝中心的演变大致依次表现为具有粗大的轧制时效态组织的热影响区（HAZ）、半熔化区(PFZ)、等轴细晶区(EFGZ)、柱状晶区（CGZ）及等轴枝晶与等轴晶的混合区（MGZ）。焊缝金属沿熔合线的晶粒外延生长向焊缝中心联生结晶，各个晶区的过渡十分明显，如图 3 所示。焊缝上部熔合区沿熔合线的等轴细晶区最窄，焊缝中部最宽。柱状晶区由上到下呈现变窄的趋势，从熔合线到焊缝中心柱状晶粒由粗大逐渐变为细长，并最终转变为等轴枝晶。焊缝上部柱状晶转变为粗大的等轴枝晶，中部等轴枝晶区中夹杂粗大的柱状枝晶。焊缝中心整体表现为等轴枝晶和等轴晶的混合区，且从焊缝的上部到下部晶粒尺寸呈逐渐变小的规律。

沿熔合线分布的等轴细晶区是铝锂合金焊缝中最显著的微观组织结构特点。在焊缝金属的凝固过程中，由于冷却速度非常快，熔合线附近的液态金属不与热的熔池相混合，使得熔池边界的异质晶核滞留下来并且促使形成非枝晶等轴晶，比如可以存在于基体中的弥散强化相 Al_3Zr 及 $Al_3(Li_xZr_{1-x})$[17]，并且此区域的成分过冷度较大，等轴晶得以细化，形成等轴细晶区。然而异质形核不能存在于热的液态金属中，并且垂直于熔合线的方向温度梯度最大，散热最快，生长速率最快，晶粒最易沿着此方向生长，晶粒竞争生长为柱状晶。 临近焊缝中心，等轴晶形核并长大阻碍了柱状晶的生长，由于焊缝的快速凝固，在固液界面前沿的液态金属出现了大范围的成分过冷，粗大的等轴晶转变为等轴树枝晶，甚至出现二次枝晶比较发达的树枝晶，如图 3f 和 3i 所示。

通过扫描电镜（SEM）观察发现，熔合线附近的热影响区在焊接热循环作用下受到过时效的作用，二次相粒子进一步长大，沿晶界分布着大量的共晶体。在半熔化区（PFZ）分布着大量的白色球状的共晶颗粒，还有少量的长条状和片状的共晶体；而在等轴细晶区（EQFZ）的细小晶粒间会出现共晶组织的团簇，如图 4b 的虚线圈所示，该区域存在许多三角形片状的共晶组织，另外长条状的共晶含量也比较多；在柱状晶区（CGZ）以长条状的共晶沿晶界不连续分布为主，如图 4c 标记的 5 号灰色位置所示，这种灰色的共晶组织在焊核沿晶界均有大量分布；在等轴枝晶区长条状和球状的共晶分布为主，含有少量的片状共晶组织。

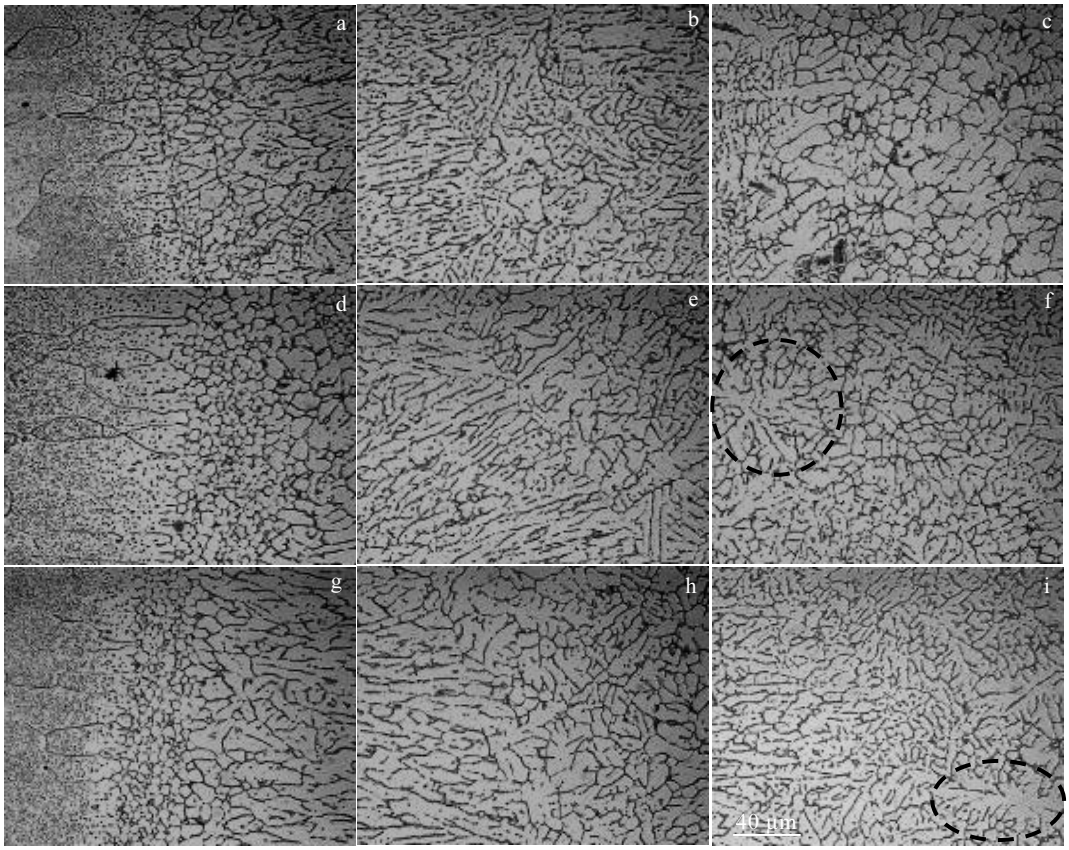


图3　2060铝锂合金填充ER4047焊丝激光焊焊缝显微组织

Fig.3　Microstructures of 2060 Al-Li alloy weld filled with ER4047 wire: (a~c) the upper part of the weld; (d~f) the middle of the weld; (g~i) the lower part of the weld

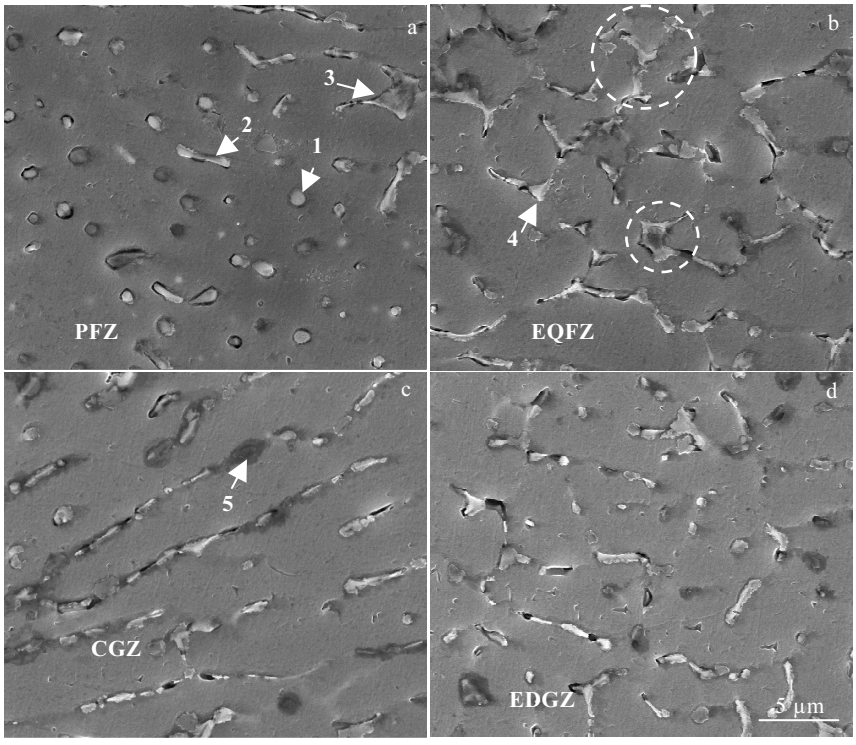


图 4　2060 铝锂合金填充 ER4047 焊丝激光焊焊缝二次相

Fig.4　Secondary phases of the weld: (a) PFZ, (b) EQFZ, (c) CGZ, and (d) EDGZ

对这些共晶组织经过 EDS 分析发现，典型形状的共晶成分如表 3 所示，球状的共晶含有大量的 Al 和 Cu，微量的 Mg 及 Si 元素，根据相关文献研究[18-20]及后面的物相分析可得，该共晶组织中可能以含 α(Al)和 θ'(Al_2Cu)为主，加上少量的 Mg_2Si 相；长条状的共晶里 Cu 元素偏多，存在少量 Si 元素，除了 α(Al)和 θ'(Al_2Cu)以外，可能还有 Si 相；不规则片状的共晶组织中只含有 Al 和 Cu 元素，应该是 α(Al)和 θ'(Al_2Cu)二元共晶，但是三角形片状的共晶含有少量的 Mg；遍布焊核的灰色的共晶组织是 Si 的聚集区，且含有微量的 Cu 元素，分析得该灰色共晶主要是 α(Al)与 Si 的二元共晶。

2.3　合金元素微观偏析与二次相分析

2.3.1　合金元素微观偏析

2060 铝锂合金激光焊接的焊缝冷却速度快，不存在合金元素的宏观偏析，但是仍存在局部的微观偏析。通过电子探针（EPMA）对焊缝区进行了合金元素分析，结果如图 5 所示，图中不同的颜色代表元素的含量大小。可见，部分溶质元素在凝固过程中于晶间处发生了偏析，Mg、Si、Cu 及部分 Ag 等主要强化相元素聚集在晶界处，属于典型的晶界偏析，而 Mn、Fe 及 Zn 元素在焊缝中分布较均匀。成分分布的不均匀会导致组织上的差别，并造成焊缝硬度的不均匀，进而影响到接头的塑性和强度。在晶界液相凝固过程中，焊缝金属的溶质(Mg、Si 及 Cu 等)平衡分配系数 k< 1，这些溶质原子被固相排斥到液相中形成亚共晶成分，冷却过程中亚共晶成分液相首先凝固并析出贫溶质的 α(Al)相，之后当液相成分增加到共晶成分时析出富溶质的共晶相。

2.3.2　二次相分析

2060 铝锂合金母材中除 α-Al 之外，主要的强化相为 T1(Al_2CuLi)相，加上少量的 θ' (Al_2Cu)相、δ' (Al_3Li)、及 S′ (Al_2CuMg)相，还有含 Mn 化合物等，如图 6a 所示在热影响区中，由于固溶和过时效的影响，伴随着部分 Li 元素的挥发，T1 相基本上全部转变为粗化的 TB(Al_7Cu_4Li)相、R(Al_5CuLi_3)相和少量的

表 3　图 4 中典型形状的共晶组织成分 EDS 分析

Table 3　EDS analysis of typical eutectic structure marked point 1~5 in Fig.4 (ω/%)

Point	1	2	3	4	5
Mg	0.84	-	-	0.66	-
Al	69.77	89.81	95.69	86.14	82.38
Si	0.46	0.5	-	-	14.57
Cu	27.48	9.7	4.31	13.2	3.05
Ag	1.43	-	-	-	-

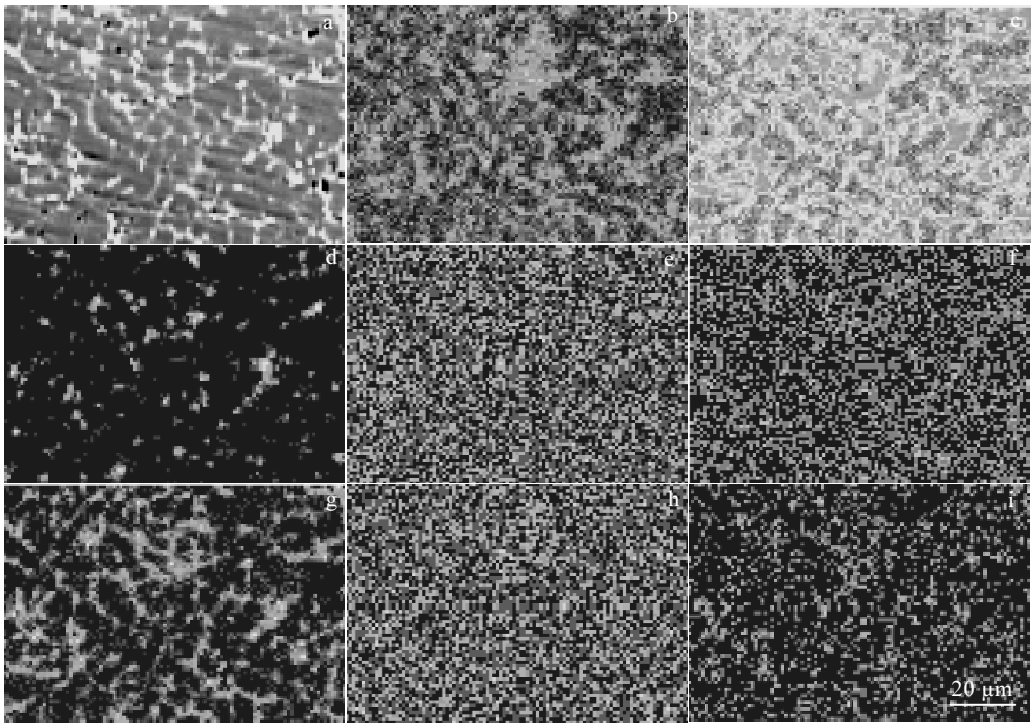


图 5　2060 铝锂合金填充 ER4047 焊丝激光焊焊缝 EPMA 元素面分布

Fig.5　EPMA element mapping of laser beam welded 2026 Al-Li alloys filled with ER4047 wire: (a) the original weld microstructure; (b) Mg; (c) Al; (d) Si; (e) Mn; (f) Fe; (g) Cu; (h) Zn; (i) Ag

θ'相。因此，图 6b 中显示热影响区有 TB 相、R 相及 θ'相。从图 6c 焊缝中心区域的 XRD 分析结果来看，填充 ER4047 焊丝的焊缝中，在高密度的激光束流作用下，T1 相几乎全部溶解，Li 元素大量蒸发，但是仍有含 Li 相的 T(AlLiSi)再析出；另外，焊缝中分布有大量的 Si 相，Mg_2Si 相、θ'相、Cu_4Si 相及含 Mn 的 $Al_xCu_yMn_{1-x-y}$ 化合物，比如 XRD 图谱中的 $AlCu_2Mn$ 和 $Al_{11}Cu_5Mn_3$，且焊丝中也含有部分 Fe 元素，所以焊缝金属在凝固后也析出了含 Fe 的杂质相 Al_7Cu_2Fe。

透射电镜下的 2060 铝锂合金主要强化相形貌如图 7a 所示，针状的 T1 相与 Al 基体共格并呈弥散分布，还有球形的 δ'相及板条状的 θ'相。由 TEM 及表 4 的 EDS 分析发现，偏聚在晶界处的 Cu 元素形成富 Cu 区，如图 7b 中的三角边界区，根据 Al 和 Cu 原子比值可以判定该区分布着大量的 $\theta'(Al_2Cu)$黑色颗粒，同时在晶粒内部也发现分布有少许的 $\theta'(Al_2Cu)$相粒子，如图 7c 所示。从 EDS 分析中可以看出，合金元素 Ag 也在晶界的富 Cu 区聚集，Ag 元素的聚集会降低铝合金中二次相的析出能力[21]；杂质元素 Fe 在该区域也有分布。焊缝的晶界处分布着含 Al、Cu 及 Mn 且尺寸比较粗大的 $Al_xCu_yMn_{1-x-y}$ 系化合物，在晶粒内部的 $Al_xCu_yMn_{1-x-y}$ 系颗粒则比较细小。含 Fe 的 $Al_xCu_yFe_{1-x-y}$ 二次相多呈现灰色的板条状分布在晶间处，且 Si 在该区域有团簇现象，如图 7d 中的 5 黑色块状所示，这与上面图 4 含 Si 的共晶组织得灰色聚集区分析一致。

2.4　接头的力学性能分析

2.4.1　显微硬度分布

2060 铝锂合金为时效强化型铝合金，其 T8 态材料中含有较多的 T1(Al_2CuLi)相，保证材料具有较高的强度。激光焊接后，热影响区靠近焊缝部分二次相溶解，远离焊缝部分由于二次相发生过时效而粗化，因此热影响区硬度较母材有较大幅度降低，如图 8 所示。焊接接头的焊缝区域硬度最低，因为此区域晶粒粗大，且无强化相存在。当 P=3.5 kW、v=3.2 mm·min^{-1}、W=4

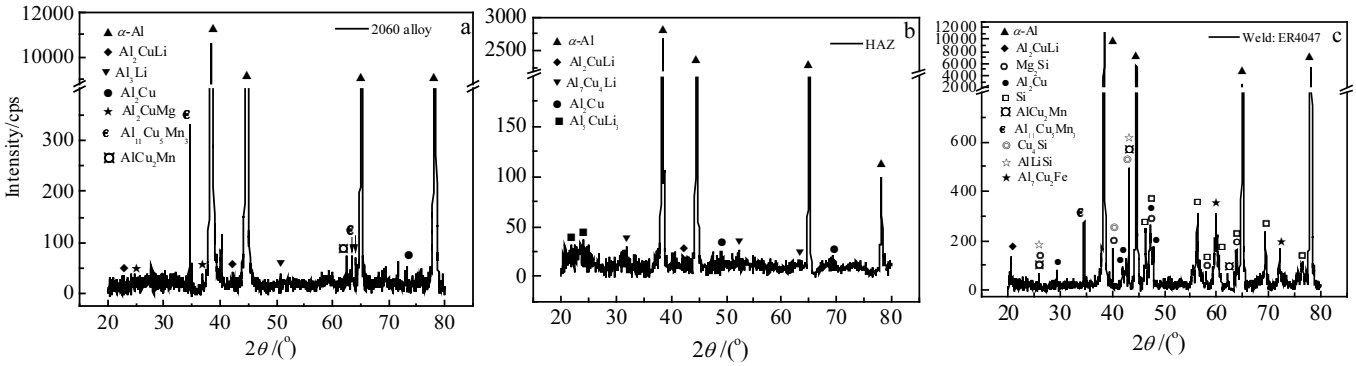


图 6　2060 铝锂合金填充 ER4047 焊丝激光焊焊缝 XRD 谱图

Fig.6　XRD patterns of the joint in different regions: (a) 2060 Al-Li alloy, (b) heat affected zone, and (c) weld zone

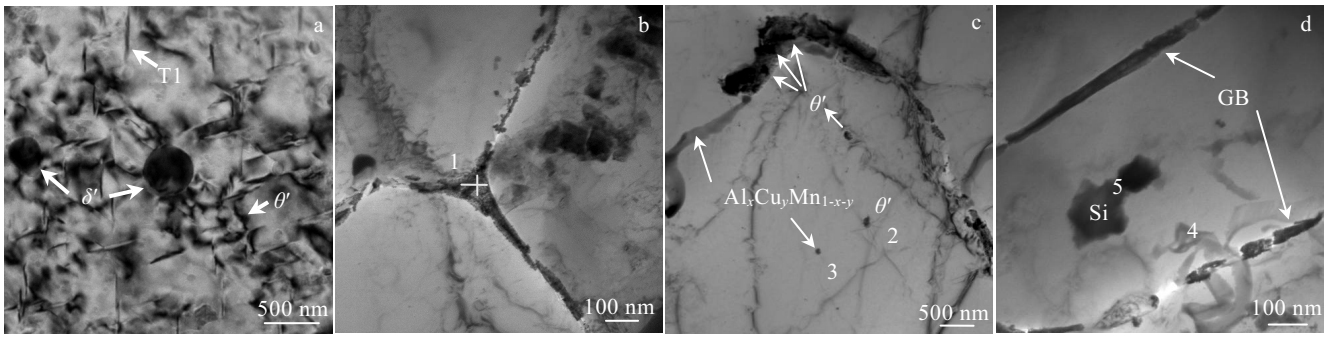


图 7　2060 铝锂合金填充 ER4047 焊丝激光焊焊缝 TEM 照片

Fig.7　TEM second phases images of the weld: (a) 2060 Al-Li alloy; (b) the segregation of elements and the second phases at the grain boundaries; (c, d) the grain boundary and the second phase particles

表 4　图 7 中标记处的二次相 EDS 分析结果

Table 4　EDS analysis of the second phase marked point 1~5 in Fig.7 (*ω*/%)

Element	1	2	3	4	5
Al	12.64	44.36	85.97	59.06	54.24
Cu	83.65	51.36	13.46	10.1	4.07
Si	-	-	-	2.33	21.71
Ag	2.82	4.29	-	-	-
Mn	-	-	0.57	-	-
Fe	0.89	-	-	28.51	19.98

$m \cdot min^{-1}$ 时，焊缝的平均硬度(HV)为 986 MPa，约为母材硬度(HV)1520 MPa 的 65%，比文献[11]中填充 ER5087 的焊缝的平均硬度提高了 286 MPa，同比提高 18.8%，这主要体现在对焊接工艺和焊缝成形的严格控制上，以及发挥了 ER4047 合金焊丝的优点。

同时可见，在焊缝成形良好的情况下，随着焊接速度的增大，焊缝的硬度平均值呈减小的趋势，这与不同焊接速度下焊缝金属显微组织有关，因为所有焊缝均为粗大柱状晶、等轴晶及等轴树枝晶组织，且晶粒内部强化相析出很少，在此种条件下焊缝硬度与晶界处共晶二次相的数量有关，焊接速度越低，共晶二次相数量越多，硬度则越大。另外，从硬度曲线可以看出，焊缝区域靠近熔合线的等轴细晶区的硬度较低，这也与此区域共晶二次相数量少有关。

2.4.2　室温拉伸性能及断口的分析

图 9 为焊接接头在典型工艺参数下的工程应力应变曲线。如图 9 所示，在焊缝成形良好的情况下，接头的抗拉强度均低于母材时，焊接接头的最大的抗拉强度达到了 354 MPa, 伸长率为 4.9%，分别为母材

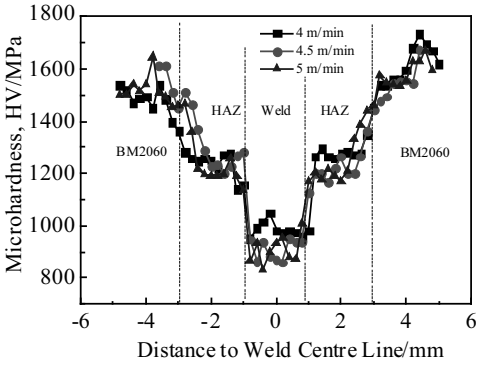


图 8　不同焊接速度下 2060 铝锂合金填充 ER4047 焊丝激光焊接接头硬度分布

Fig.8　Hardness distribution comparison of laser welded joint of 2060 Al-Li alloy filled with ER4047 welding wire

2060 合金抗拉强度和伸长率的 67%和 40.8%，比文献[12]中的研究提高了 45 MPa，抗拉强度和延伸率同比提高 8.5%和 35%，接头的强韧性均得到改善。保持焊接功率与填丝速度不变，增大焊接速度，减少线能量的输入，接头的抗拉强度呈现略微降低的趋势。可见，接头的抗拉强度仍然低于母材。诸位学者[22,23]在对 5A90 及 2091 铝锂合金的研究中发现，对接头分级固溶时效热处理可促进沉淀强化相的析出能力，不但能使接头的强度恢复到母材水平，还可以改善接头的塑性，实现硬度与抗拉强度更好的匹配。

接头断裂的位置位于熔合线附近的焊缝区，如图 10a 所示，如硬度测试结果显示此区域是接头的薄弱区。拉伸时裂纹最初在图 10a 中的位置 3 处开始萌生，该处为等轴细晶与柱状晶的过渡区域，裂纹萌生向焊缝中部的等轴细晶区扩展。由于焊缝上部的柱状晶向焊缝中心生长的过程中过冷度比较大，凝固前沿界面不稳定，加之未溶解的二次相异质形核粒子的存在，在其中间形成了狭窄的等轴晶组织，该区域组织极不均匀，由此成为了拉伸时裂纹容易萌生和扩展的区域，导致接头最终沿此区域断裂。

图 11 为拉伸试样断口形貌。从拉伸断口形貌来看，断口表面不平整，如图 11a 所示。断口表面存在大量的韧窝，韧窝间的撕裂棱明显，断口整体表现为韧窝聚集型沿晶断裂，兼有韧性和脆性混合断裂的特点。图 11a 中所示的位置 4 为断裂开始的区域，即为焊缝的下部，如前所述，此区域晶粒之间存在 Mg_2Si、Cu_4Si、$Al_xCu_yMn_{1-x-y}$ 及含杂质 Fe 的 $Al_xCu_yFe_{1-x-y}$ 粗大脆性相，拉伸时二次相颗粒与基体界面处容易脱离形成微坑，如图 11b 和 11c 所示，聚集后成为裂纹源。裂纹继续扩展到焊缝上部位置 6 时，韧窝尺寸减小，说明此处塑性略差。

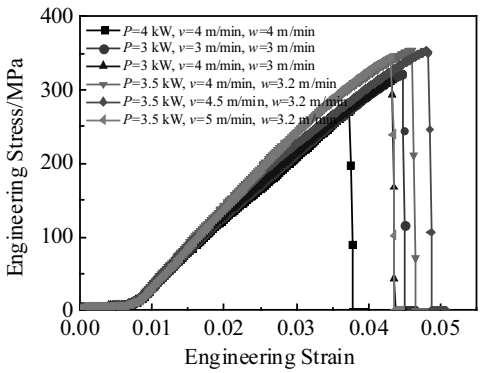


图 9　焊接接头在典型工艺参数下的工程应力应变曲线

Fig.9　Engineering stress and strain curves of welded joints under typical process parameters

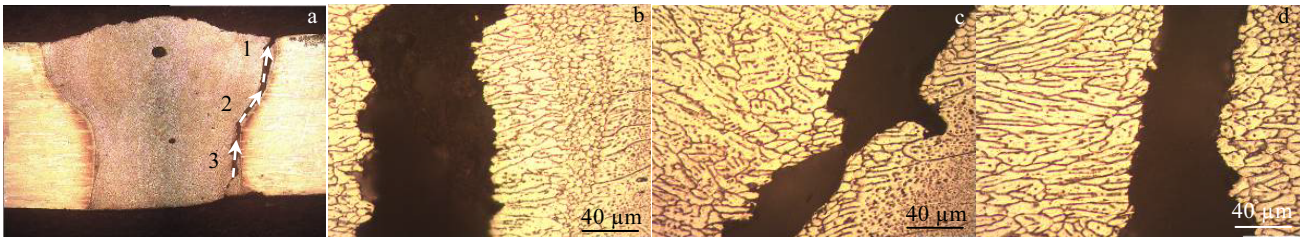


图 10　拉伸断口横截面组织

Fig.10　Cross section images of tensile fracture in welded joint: (a) the macroscopic cross section morphology and (b), (c), (d) OM images corresponding to the 1, 2 and 3 regions of Fig.10a, respectively

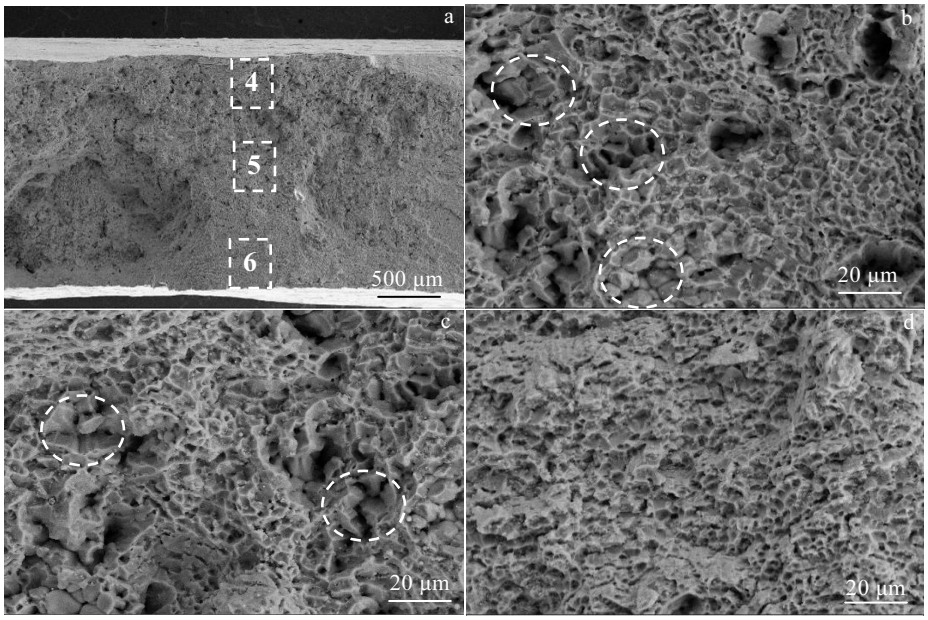


图 11　拉伸断口形貌

Fig.11　Tensile fracture morphologies (a): (b), (c), (d) corresponding to 4, 5, 6 regions of Fig.11a, respectively

3　结　论

1）2060 铝锂合金填充 ER4047 焊丝激光焊接接头的组织从熔合线附近到焊缝中心依次为半熔化区、等轴细晶区、柱状晶区及等轴枝晶与等轴晶的混合区，在合理的填丝焊接工艺下获得了无裂纹缺陷的接头，焊缝晶界处分布着大量的不同形貌的二元和三元共晶组织。

2）焊缝的晶界处存在 Mg、Si、Cu 及部分 Ag 元素的偏析，晶界处形成富 Cu 区，在该区分布着大量的 Al_2Cu 颗粒。焊缝中同时分布着大量的 Si 相，较多的 Mg_2Si 相，含 Mn 的 $Al_xCu_yMn_{1-x-y}$ 相及含 Fe 的粗大的板条状二次相，其中 Si 元素容易发生团簇聚集在晶界处。

3）当 P=3.5 kW，w=3.2 m·min^{-1}，v=4 m·min^{-1} 时，焊缝的平均硬度(HV)为 986 MPa，约为母材硬度的 65%，其抗拉强度达到了 354 MPa，伸长率为 4.9%，分别为母材 2060 合金的 67%和 40.8%，拉伸断口表现为韧窝聚集型沿晶断裂，含 Mn 及 Fe 的粗大的脆性相导致了撕裂坑洞的出现，二次相在晶界处的偏聚促进了焊缝的沿晶断裂。含 Li 的主要强化相的缺失导致接头力学性能降低。

参考文献　References

[1] Ahmad I K, Kumar J, Michael V *et al. J Alloy Compd*[J], 2016, 657: 546

[2] Sun Jingfeng(孙景峰), Zheng Ziqiao(郑子樵), Lin Yi(林　毅) *et al. The Chinese Journal of Nonferrous Metals*(中国有色金属学报)[J], 2014, 24(2): 364

[3] Zhang Yunlong(张淯龙). *Dissertation for Master*(硕士论文)[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2013

[4] Zheng Ziqiao(郑子樵), Li Jinfeng(李劲风), Chen Zhiguo(陈志国) *et al. The Chinese Journal of Nonferrous Metals*(中国有色金属学报)[J], 2011, 26(10): 2337

[5] Cui Li(崔 丽), Zhang Yanchao(张彦超), He Dingyong(贺定勇) *et al. Laser Technology*(激光技术)[J], 2012, 36(2): 154

[6] Zhang L, Li X Y, Nie Z R *et al. Mater & Design*[J], 2016, 92: 880

[7] Zhao Lin(赵 琳), Zhong Benjin(塚本进), Huang Jinwulang(荒金吾郎) *et al. Chinese Journal of Lasers*(中国激光)[J], 2013, 40(11): 104

[8] Liu Xin(刘 昕), Chen Li(陈 俐). *Welding & Joining*(焊接)[J], 2009(5): 52

[9] Zhang Zhiyong(张志勇), Tian Zhiling(田志凌), Peng Yun(彭云). *Welding & Joining*(焊接)[J], 2003(7): 5

[10] Li Yajiang(李亚江), Wu Na(吴 娜), Puchkov P U. *Aeronautical Manufacturing Technology*(航空制造技术)[J], 2010(9): 43

[11] Zhang X Y, Yang W X, Xiao R S. *Mater & Design*[J], 2015, 88: 446

[12] An Na(安 娜), Zhang Xinyi(张心怡), Wang Qiming(王启明) *et al. Chinese Journal of Lasers*(中国激光)[J], 2014, 41(10): 100

[13] Fu B L, Qin G L, Meng X M *et al. Mater Sci Eng A*[J], 2014, 617: 1

[14] Lin Kaili(林凯莉), Yang Wuxiong(杨武雄), Lv Junxia(吕俊霞) *et al. Chinese Journal of Lasers*(中国激光)[J], 2014, 41(1): 90

[15] Cui Li(崔 丽), Li Xiaoyan(李晓延), He Dingyong(贺定勇) *et al. Rare Metal Materials and Engineering*(稀有金属材料与工程)[J], 2011, 40(S4): 39

[16] Lei Yiming(雷一鸣). *China Science & Technology Information*(中国科技信息)[J], 2015, 15(18): 55

[17] Lin Dechao(林德超), He Yong(贺 勇), He Yunjia(贺运佳) *et al. Materials for Mechanical Engineering*(机械工程材料)[J], 1996, 20(4): 10

[18] Ma Guangyi(马广义), Wu Dongjiang(吴东江), Wang Zhanhong(王占宏) *et al. Chinese Journal of Lasers*(中国激光)[J], 2011, 38(6): 161

[19] Mitsuhiro O, Satoshi T, Mamoru M. *J Mater Sci*[J], 2012, 47(1): 241

[20] Li Z, Samuel A M, Samuel F H *et al. J Mater Sci*[J], 2003, 38(6): 1203

[21] Liu Zhiyi(刘志义), Li Yuntao(李云涛), Liu Yanbin(刘延斌) *et al*. *The Chinese Journal of Nonferrous Metals*(中国有色金属学报)[J], 2007, 17(12): 1905

[22] Cui Li(崔 丽), Ding Hongyuan(丁红园), Chen Li(陈 俐) *et al*. *Transactions of Materials and Heat Treatment*(材料热处理学报)[J], 2014, 35(10): 58

[23] Wang Xiaoyu(王小玉), Liu Aiguo(刘爱国), Zhang Xiuzhi(张修智). *Transactions of the China Welding Institution*(焊接学报)[J], 1995, 16(4): 222

Microstructure and Properties of Laser Beam Welded 2060 Al-Li Alloys Filled with ER4047 Wire

Zhou Baosheng[1], Liu Fencheng[1,2], Huang Chunping[1], Wang Weixin[3], Li Qiuge[2], Chen Yuhua [1]

(1. National Defence Key Discipline Laboratory of Light Alloy Processing Science and Technology, Nanchang Hangkong University, Nanchang 330063, China)

(2. State Key Laboratory of Solidification Processing, Northwestern Polytechnical University, Xi'an 710072, China)

(3. Hubei Sanjiang Aerospace Hongyang Electromechanical Co., Ltd, Xiaogan 432000, China)

Abstract: 2060 Al-Li alloy was tested by laser beam welding filled with ER4047 welding wire. The morphology and microstructure of the weld, the micro segregation of the alloy elements, the precipitation of the second phases and the mechanical properties of the weld were studied by optical microscope, scanning electron microscope, electron probe micro analyzer (EPMA) and transmission electron microscopy (TEM), X-ray diffractometer (XRD), micro hardness test, and tensile test. The results show that the formation of the weld is good in a reasonable welding process. Along the fusion line, there are so fine equiaxed grains, and there exist a large number of equiaxed dendritic crystals and columnar grains in the center of the weld. The micro segregation of the weld is serious at the grain boundaries, such as Cu, Mg and Si, but the Al elements are less. The main reinforcement phase T1 (Al_2CuLi) in the weld almost all disappears, and a certain amount of TB (Al_7Cu_4Li) phase precipitate. There are a large number of binary eutectics and ternary eutectics in the grain boundary, more Mg_2Si and $Al_xCu_yMn_{1-x-y}$ secondary phase. In the heat affected zone (HAZ), the grain size and the size of the secondary phase become larger, and undissolved T1 (Al_2CuLi), θ' (Al_2Cu) and TB phases coexist. Under the optimum process, the hardness (HV) of the weld zone is the smallest, with an average of 986 MPa, which is about 65% of that of the base metal. The tensile strength of the joint is 354 MPa, and the elongation is 4.9%, which is about 67% and 40.8% of that of the base metal, respectively. The tensile fracture occurs preferentially in the coarse equiaxed grain zone at the lower part of the weld, and gradually extends along the grain boundaries, and finally fractures in the columnar grain zone. The fracture morphology exhibits the mixed fracture of toughness and brittleness with a large number of dimples.

Key words: 2060 Al-Li alloy; laser welding; microstructure; mechanical property

Corresponding author: Liu Fencheng, Ph. D., Associate Professor, Nanchang Hangkong University, Nanchang 330063, P. R. China, Tel: 0086-791-83863023, E-mail: fencheng999@163.com