

热输入对 7075-T6 超高强铝合金激光填丝焊缝组织与力学性能的影响

高文强, 许飞, 马旭颐, 郭路云, 鲁奕廷

(中国航空制造技术研究院, 高能束流加工技术重点实验室, 北京, 100024)

摘要: 利用激光填丝焊实现了厚度为 2.0 mm 的 7075-T6 超高强铝合金的高质量连接, 并研究了热输入对超高强铝合金焊缝组织与力学性能的影响。7075-T6 铝合金激光填丝焊缝组织为典型的铸态组织。焊缝中心区为无明显织构、尺寸较大的等轴晶组织, 且焊缝中强化相颗粒无法充分析出, 导致接头强度出现一定程度的下降。随着热输入的增加, 焊缝横截面的熔凝区面积以及熔宽逐渐增加, 而焊缝中心处等轴枝晶的组织特征均未发生显著变化, 晶粒尺寸呈现先快速增大后缓慢增加的趋势。不同热输入条件下焊接接头的显微硬度分布趋势基本相同, 接头软化最严重的区域均在焊缝。随着热输入的增加, 焊接接头的抗拉强度呈现先增加后下降的趋势。通过对激光填丝焊热输入的调控, 能够使 7075 铝合金焊接接头的强度系数达到 74.9%。

创新点: (1) 揭示了 7075 铝合金焊缝组织与力学性能随焊接热输入增加的演变规律。

(2) 分析了焊接热输入对超高强铝合金焊缝组织和力学性能的影响机理。

(3) 调控热输入可使 7075 铝合金焊接接头强度系数提升至 74.9%, 促进焊接结构件的应用。

关键词: 热输入; 7075 铝合金; 激光填丝焊; 焊缝组织; 力学性能

中图分类号: TG 456.7 **文献标识码:** A **doi:** 10.12073/j.hjxb.20231215002

The effect of heat input on the microstructure and mechanical properties of 7075-T6 ultra-high strength aluminum alloy weld by laser wire filling welding

GAO Wenqiang, XU Fei, MA Xuyi, GUO Luyun, LU Yiting

(Key Laboratory of High-Power Beam Processing Technology, AVIC Manufacturing Technology Institute, Beijing, 100024, China)

Abstract: High quality connection of 2.0 mm thick 7075-T6 ultra-high strength aluminum alloy was achieved using laser wire filling welding, and the effect of heat input on the microstructure and mechanical properties of ultra-high strength aluminum alloy welds was studied. The microstructure of the 7075-T6 aluminum alloy weld by laser wire filling welding was a typical cast structure. The central area of the weld was a relatively large equiaxed dendritic structure with no obvious texture, and the strengthening phase particles in the weld could not be fully precipitated, resulting in a certain degree of decrease in joint strength. With the increase of heat input, the melting zone and melting width of the weld cross-section gradually increased, while the microstructure and texture characteristics of equiaxed dendrites at the center of the weld did not show significant changes. The grain size of the central area of the weld first rapidly increased and then slowly increased. The microhardness distribution of joints under different heat input conditions was basically the same, and the areas with the most severe softening were all in the weld zone. With the increase of heat input, the tensile strength of joints firstly increased and then decreased. By regulating the heat input of laser wire filling welding, the strength coefficient of 7075 aluminum alloy joints could reach 74.9%.

Highlights: (1) The evolution law of the microstructure and mechanical properties of 7075 aluminum alloy welds with increasing

heat input was revealed.

(2) The influence mechanism of heat input on the microstructure and mechanical properties of ultra-high strength aluminum alloy welds was analyzed.

(3) Regulating heat input could increase the strength coefficient of 7075 aluminum alloy joint to 74.9%, the application of its welded structural components was promoted.

Key words: heat input; 7075 aluminum alloy; laser wire filling welding; weld microstructure; mechanical property

0 序言

超高强 Al-Mg-Zn-Cu($7 \times \times \times$) 铝合金因其具有高比强度、高硬度、较高韧性和良好的综合力学性能,广泛应用于航空领域结构制造,如飞机主承力框、翼梁、翼肋和壁板等^[1-3]。随着航空工业的快速发展,迫切需求尺寸更大、结构更复杂的铝合金部件。目前大型航空铝合金构件常用的连接方法主要有铆接、螺纹连接和焊接等^[4]。传统的铆接和螺纹连接会额外增加构件的整体质量,难以达到航空装备减重的目的。

铝合金构件常用的焊接方法包括钨极氩弧焊、惰性气体保护焊、激光焊接和搅拌摩擦焊等。与搅拌摩擦焊相比,熔焊具有更好的工艺可实施性,更加适用于不规则结构的连接。相比于其他熔焊方法,激光焊接具有热输入小、热影响区窄、焊接变形小、焊缝成形美观和易于工业自动化等优点,且相对于螺纹连接和铆接,具有显著的减重效果,因而在航空结构件的连接中应用广泛^[5-6]。然而,激光焊所具有的高能量密度、快速熔凝和焊缝大深宽比等特性,以及超高强铝合金中高含量的低熔点、低电离能合金元素使焊接过程具有更多的不确定性^[7-8]。易产生裂纹、接头强度系数偏低,仅能达到母材的 50%~70% 等因素,严重制约了激光焊接在超高强铝合金结构件连接中的应用^[9-12]。

激光填丝焊接技术通过在激光焊接过程中填

充焊丝,能够实现对焊缝组织的控制,显著提高焊接稳定性,提高焊缝成形质量,抑制焊接缺陷的产生,并可降低对装配精度的要求,提高焊接接头的性能^[13-14]。Saheed 等人^[15]利用 Al-5Mg 作为填充材料,获得强度系数为 67% 的 AA7020 铝合金激光焊接接头。热输入为单位长度焊缝上试件在焊接过程中所获得的激光能量,对铝合金焊缝的成形质量有显著影响^[16-17]。然而,关于 $7 \times \times \times$ 铝合金激光填丝焊过程中热输入对焊缝微观组织与力学性能的影响的相关研究较少。因此,围绕热输入对 $7 \times \times \times$ 铝合金激光填丝焊焊缝组织与力学性能的影响展开研究,对于实现超高强铝合金高效高质量连接,进一步推动超高强铝合金在航空领域的应用具有重大意义。

1 试验方法

焊接试验材料为 7075-T6 铝合金冷轧板,试板尺寸为 120 mm × 100 mm × 2 mm,将 7075 铝合金待焊试板采用碱洗方法去除待焊试板表面氧化膜及油污等杂质,20%NaOH 碱洗液溶液浸泡 2 min,然后用 1%HF + 20%HNO₃ 溶液浸泡 10s 后,用去离子水冲洗试件表面并烘干,确保试板表面清洁。为补充焊接过程中 Mg 元素的烧损与蒸发,激光填丝焊使用 $\phi 1.2$ mm 的 ER5356 焊丝,其 Mg 元素含量约为母材的 2 倍,母材及焊丝的化学成分,如表 1 所示。

表 1 焊丝的化学成分(质量分数,%)
Table 1 The main chemical compositions of welding wire

材料	Zn	Mg	Cu	Si	Mn	Al
7075-T6	5.67	2.66	1.52	0.11	0.14	余量
ER5356	0.01	5.00	0.01	0.07	0.13	余量

激光填丝焊接采用额定功率为 10000 W 的光纤激光器,波长为 1.07 μm 。激光束通过光纤传输到激光头。激光头安装在六轴联动机械手端部,聚

焦镜焦距为 255 mm,焦斑直径为 $\phi 0.280$ mm。由于铝合金对激光反射率较高,为保护激光器不受铝板反射激光的损伤,激光束的中轴线与焊接平面法线

呈逆时针偏转 10° , 焊接方向与试板轧制方向垂直. 推—拉式送丝机将存储在丝盘中的焊丝通过送丝管输送到工件位置, 送丝速度为 5 m/min , 焊接试验时, 采用焊丝在前、激光在后的形式, 光丝间距为 $0.5 \sim 1 \text{ mm}$, 侧面和背面保护气体均为氩气, 气体流量分别为 25 L/min 和 15 L/min , 激光填丝焊接设备示意图, 如图 1 所示. 经初步预试验对激光功率 P 与焊接速度 v 的筛选, 焊接工艺参数及其对应的热输入 Q 如表 2 所示, 焊接过程中激光束聚焦于试件表面, 并分别利用平板堆焊与对接拼焊的方式获得焊接金相试样与力学性能测试试样.

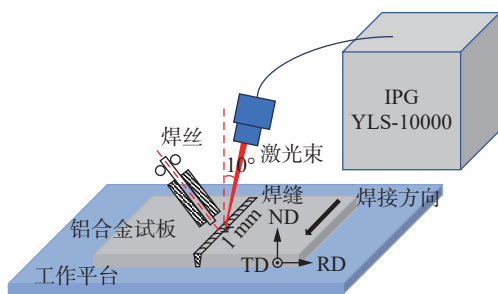


图 1 激光填丝焊接设备示意图

Fig. 1 Schematic of laser wire filling welding equipment

表 2 7075-T6 铝合金激光填丝焊的工艺参数

Table 2 Process parameters of laser wire filling welding for 7075-T6 aluminum alloy

试样	激光功率 P/W	焊接速度 $v/(\text{m}\cdot\text{s}^{-1})$	热输入 $Q/(\text{kJ}\cdot\text{cm}^{-1})$
1	2000	0.025	0.8
2	1800	0.020	0.9
3	2000	0.020	1.0
4	2000	0.015	1.3
5	2200	0.015	1.5

焊缝组织的观察面均为法向 (normal direction, ND)—轧向 (rolling direction, RD) 面, 采用慢走丝线切割截取 7075-T6 铝合金焊接接头的横向金相试样, 使用 keller 试剂对磨抛后试样进行腐蚀, 随后利用 Olympus GX53 倒置金相显微镜和 JSM-IT700HR 热场发射扫描电子显微镜观察母材和焊缝的宏观组织和微观组织, 分析不同热输入下焊缝熔宽尺寸的变化规律, 并用能谱仪 (energy dispersive spectrometer, EDS) 检测微区化学成分. 利用 10% 高氯酸酒精溶液对 7075 铝合金焊接接头试样进行电解抛光, 随后利用牛津仪器 Symmetry S2 电子背散射衍射系统分析母材和焊缝的晶粒形态, 步长均为 $1 \mu\text{m}$. 通过电解双喷法制备母材和焊缝的薄片试

样, 利用 Talos F200X G2 场发射透射电子显微镜 (transmission electron microscopy, TEM) 观察强化相的分布情况.

使用 LD26.205 电子万能试验机对 7075-T6 铝合金母材和对接拼焊试验件进行常温拉伸测试, 拉伸速率为 1 mm/min , 为确保力学性能测试的准确性, 每种试验件均测试 3 组. 使用 QATM Qness 60 维氏硬度仪沿焊缝中心区→熔合区→热影响区→母材依次测量焊接接头区域的硬度分布, 间隔为 $200 \mu\text{m}$, 测试载荷为 0.1 N , 保载时间为 10 s .

2 试验结果与分析

2.1 焊缝形貌与接头组织

试样 4 焊缝正背面的宏观形貌及对应 X 射线无损检测结果, 如图 2 所示. 激光填丝焊焊缝外观整齐光洁, 表面高度和宽度均匀, 鱼鳞纹清晰, 无裂纹、咬边、下陷和不连续等宏观缺陷, 仅产生轻微的飞溅. X 射线检测结果显示焊缝内部无裂纹及超标缺陷, 内部质量满足航空行业标准 HB/Z 20014-2012 《铝合金激光焊接工艺》I 级焊缝技术要求.

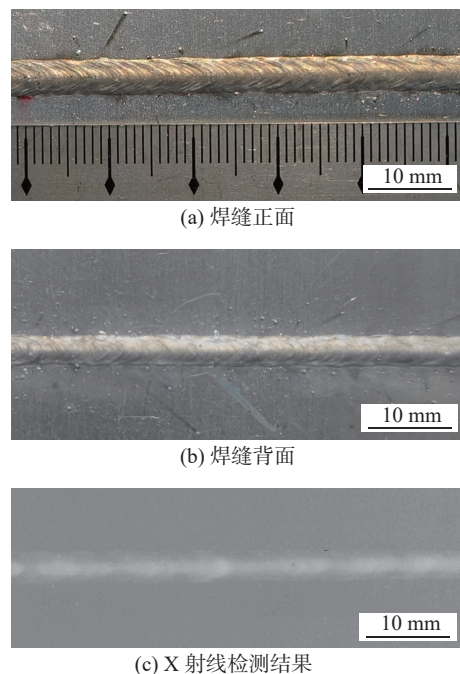


图 2 铝合金激光填丝焊焊缝

Fig. 2 Weld of aluminum alloy by laser wire filling welding. (a) weld front; (b) weld back; (c) X-ray testing results

7075-T6 铝合金母材的微观组织, 如图 3 所示. 母材晶粒在轧制方向被拉长, 呈轧制态长条状. 图 3(b) 取向图中的三角形色尺适用于文中后续中

出现的所有取向图. 图 3(c) 的 TEM 结果显示母材中存在大量的弥散相强化颗粒, 分布均匀, 强化相主要为 η 相 ($MgZn_2$) 和 T 相 ($Al_2Mg_3Zn_3$)^[18]. 图 3(d) 中反极图结果表明母材组织具有较强的 $\langle 001 \rangle // RD$ 织构.

7075-T6 铝合金激光填丝焊试样 4 接头宏观形貌与微观组织, 如图 4 所示. 图 4(a) 和图 4(b) 的中

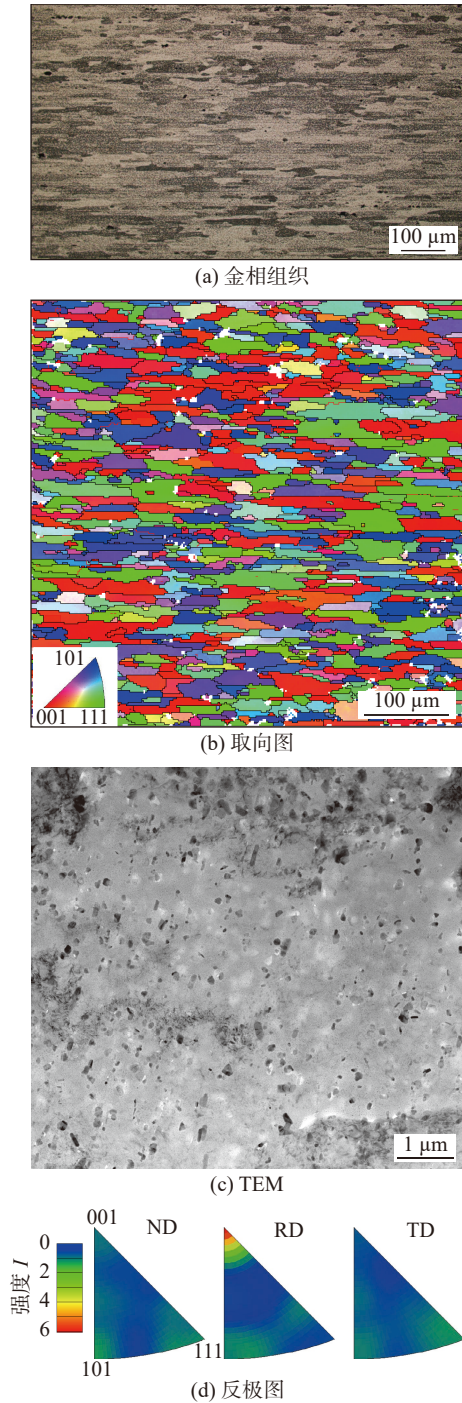


图 3 铝合金母材的微观组织

Fig. 3 Microstructure of aluminum alloy base metal. (a) metallographic structure; (b) orientation map; (c) TEM (d) inverse pole figure

焊缝横截面形貌显示接头由焊缝、熔合区、热影响区和母材组成, 整个焊缝组织为典型的铸态组织, 表现为典型的“Y”形焊缝. 热影响区的宽度大约为 $220 \sim 260 \mu m$, 但在厚度方向的宽度呈现不均匀特征, 焊缝上部和焊缝下部的热影响区宽度大, 焊缝中部的热影响区宽度小. 上述热影响区宽度不均匀分布的主要原因是焊缝各部位散热速率存在显著差异.

焊缝中热输入能量的传递主要依赖于空气和母材金属, 且金属的散热速率大于空气, 在焊缝上下部分焊缝与空气接触, 散热速率较慢, 热影响区

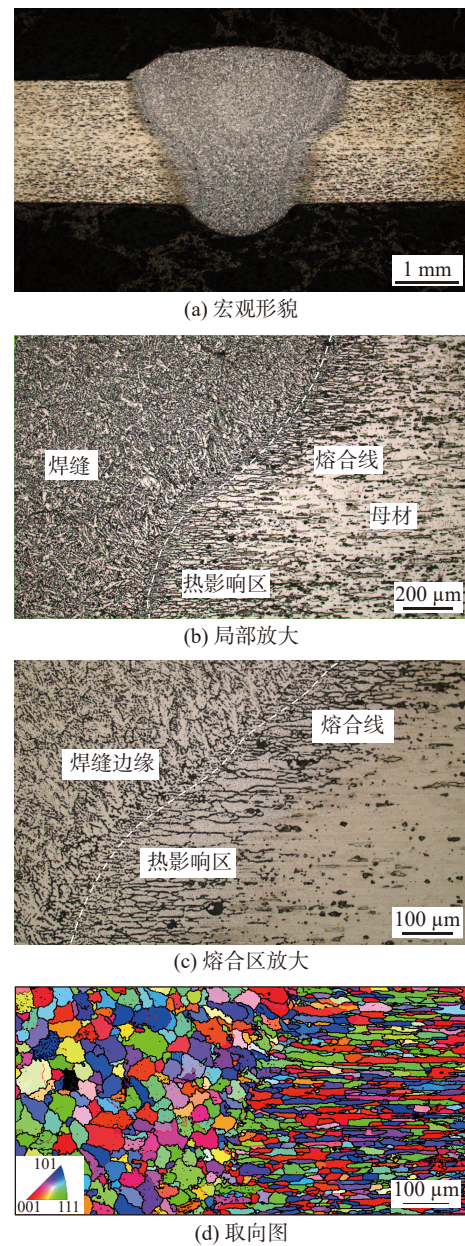


图 4 接头宏观形貌与微观组织

Fig. 4 Macro-morphology and microstructure of joints. (a) macro-morphology; (b) partial enlarged; (c) enlarged of fusion zone; (d) orientation map

宽度大;而焊缝中部直接与母材金属接触,散热速率快,热影响区宽度小.图4(c)和图4(d)为焊缝边缘区域的组织形貌及取向图,热影响区基本保留了母材轧制态晶粒的形貌,但受焊接热输入的影响,相较于母材组织,其晶粒会发生一定程度的长大;焊缝边缘的熔合区为焊缝与热影响区的过渡区域,图4(c)中标出的熔合线实际上是一层很窄的区域,在该区域内存在熔化后的液态金属和未熔化的固态金属,在凝固过程中,熔池液态金属与未熔化的母材晶粒联生结晶,外延长大形成柱状晶组织,并沿散热方向向焊缝中心区生长^[19];同时熔合区内热循环峰值温度低,冷却速度大,故存在一条断续状的细晶带.

7075-T6 铝合金激光焊接焊缝中心区,如图5所示.图5(a)~图5(d)分别为试样4焊缝中心区金相组织、TEM、取向图和极图,由于生长至焊缝中心区时温度梯度减小,形成无明显织构且尺寸较大的等轴晶组织,晶粒尺寸为20~40 μm,且等轴晶的二次枝晶发达.在7075-T6铝合金的激光填丝焊接过程中,焊缝的金属成分主要为7075铝合金与5356铝合金的混合合金,但由于低熔点元素的烧损,Zn元素、Mg元素含量显著减少,焊缝中心区随机选取区域的EDS平均化学成分结果显示Zn元素、Mg元素质量分数分别降至3.4%和2.1%,分别为母材原始浓度的61%与78%,且由于激光焊接过程快速熔化—凝固的特征,强化元素全部溶解进入基体,但强化相来不及析出,因此强化相颗粒的密度大幅下降,导致焊缝强度出现一定程度的下降.

2.2 热输入对焊缝组织的影响

在激光焊接过程中通过改变激光功率和焊接速度能够实现对焊缝处热输入和温度场分布的调控.不同热输入下铝合金焊缝的宏观形貌,如图6所示.对于薄板的激光焊接而言,由于激光束的能量密度高,在焊接过程中容易实现穿透焊接,且随着热输入的增加,熔池凝固速度下降,焊缝横截面的熔凝区面积以及熔宽逐渐增加,焊缝中心区的宽度逐渐增加,柱状晶组织区域逐渐减小.7075-T6铝合金焊缝熔宽随热输入增加的演化情况,如图7所示.当热输入超过1.3 kJ/cm时,熔宽快速增加;当焊缝正面熔宽超过4 mm时,焊接接头呈现明显的过熔透特征,会对焊接接头的力学性能产生不利影响.

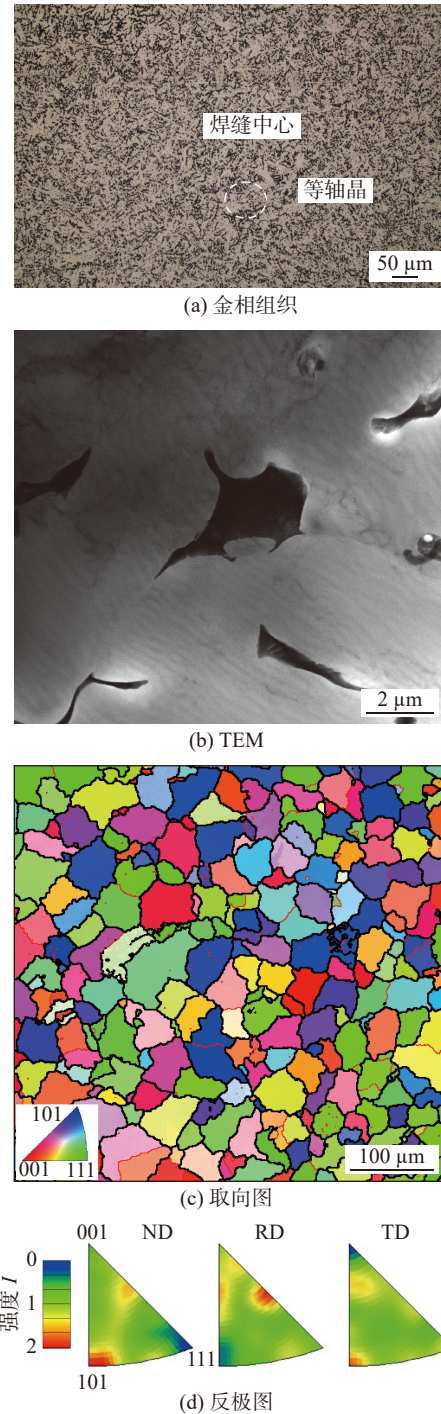


图5 铝合金焊缝中心区

Fig. 5 Center area of the aluminum alloy weld. (a) metallographic structure; (b) TEM; (c) orientation map; (d) inverse pole figure

不同热输入 Q 下铝合金焊缝中心区的微观组织取向图,如图8所示.晶界度数 $2^\circ \sim 15^\circ$ 的小角度晶界,晶界度数大于 15° 的大角度晶界,晶粒尺寸按照大角晶界来统计.随着热输入的增加,焊缝中心处等轴枝晶的组织特征均未发生显著变化.7075-T6铝合金焊缝中心区晶粒尺寸随热输入增加的演化,如图9所示.热输入的增加使晶粒尺寸呈

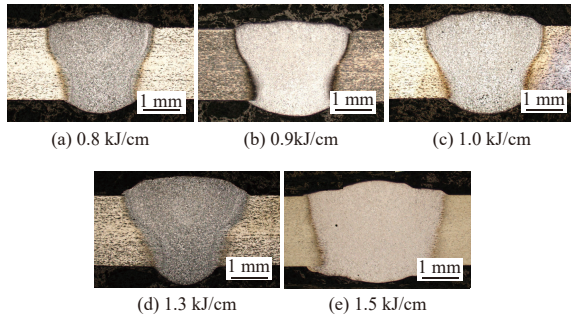


图 6 不同热输入下铝合金焊缝的宏观形貌

Fig. 6 Macro-morphology of aluminum alloy welds under different heat inputs. (a) 0.8 kJ/cm; (b) 0.9 KJ/cm; (c) 1.0 kJ/cm; (d) 1.3 kJ/cm; (e) 1.5 kJ/cm

现出先快速增大然后缓慢增加的趋势,因而通过改变工艺参数实现对焊接热输入的调控能够达到对

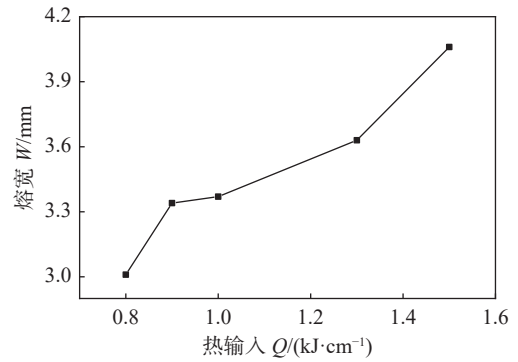


图 7 焊缝熔宽随热输入增加的演化

Fig. 7 Evolution of welds width with increasing heat inputs

焊缝组织调控的目的,进而实现对接头力学性能的调控.

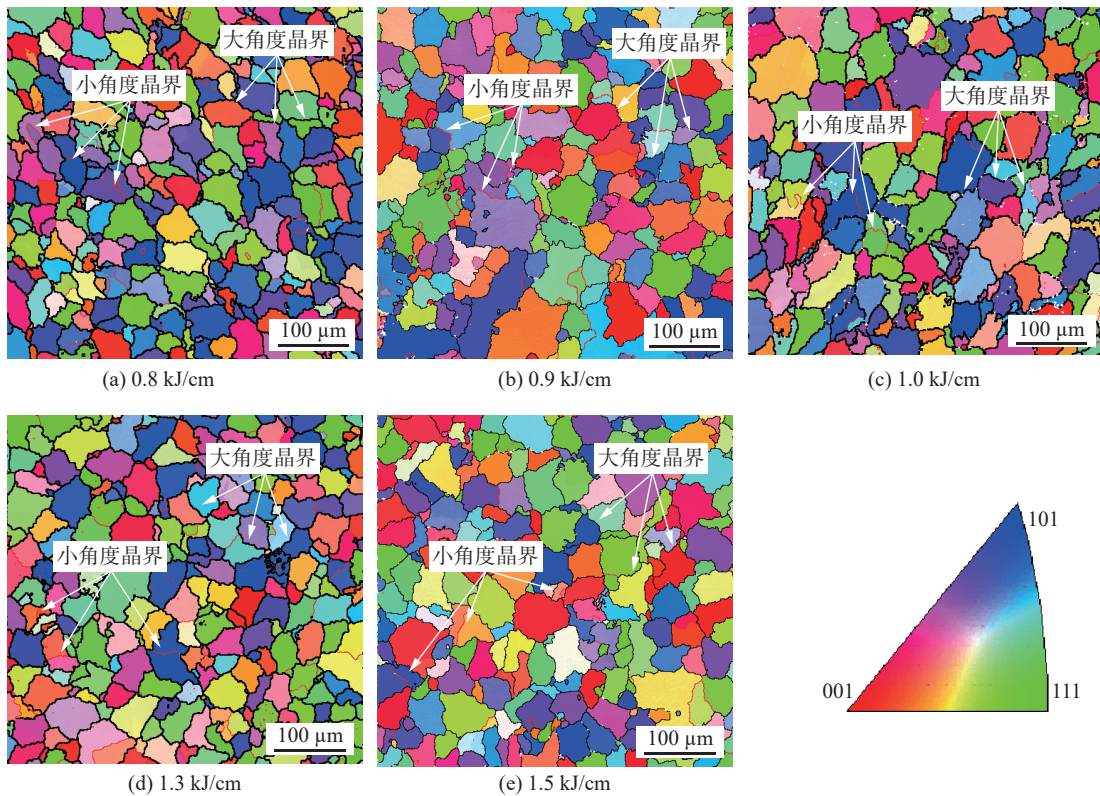


图 8 不同热输入下铝合金焊缝中心区的微观组织

Fig. 8 Microstructure of the center zone of the aluminum alloy welds under different heat inputs. (a) 0.8 kJ/cm; (b) 0.9 kJ/cm; (c) 1.0 kJ/cm; (d) 1.3 kJ/cm; (e) 1.5 kJ/cm

2.3 热输入对力学性能的影响

2.3.1 显微硬度

不同热输入条件下铝合金焊接接头横截面的显微硬度分布曲线,如图 10 所示.各参数下接头硬度分布的趋势基本相同.接头软化最严重的区域均在焊缝,且硬度最低值通常出现在焊缝中心区,约为母材硬度的 60%~70%,虽然焊缝强化元素的烧损能够通过焊丝的添加有所缓解,但填充焊丝与铝

合金母材间的硬度差异、焊缝中心区的组织粗化和强化相颗粒溶解,造成焊缝硬度由母材硬度值的 130~150 HV 急剧下降至 80~110 HV.

焊缝边缘的熔合区是焊缝与热影响区的过渡区,母材金属部分熔化,且存在细晶带,使其硬度相对焊缝中心区有所升高;热影响区受焊接热循环的影响,强化相部分溶解于基体而在后续冷却过程中来不及析出,因此其硬度相对焊缝有一定程度的增

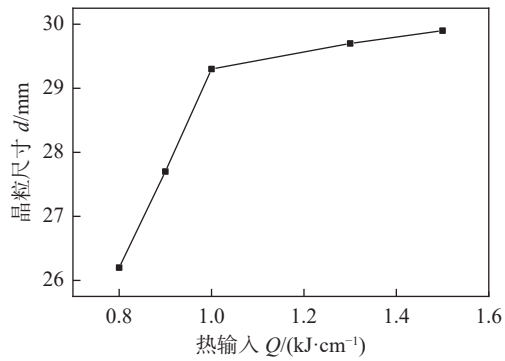


图 9 铝合金焊缝中心区晶粒尺寸演化

Fig. 9 Evolution of grain size in the central area of the aluminum alloy welds

加,但仍低于母材.伴随热输入的增加,焊缝微观组织快速增大,接头软化现象显著,焊缝显微硬度快速下降,但当热输入增加到一定程度时,进入熔池中的液态母材合金数量增加,焊缝中 Zn 元素含量升高,固溶强化效果增强,且微观组织尺寸增大的趋势没有显著增加,因而硬度开始回升,并且在试样 4 达到最高值.而后,随着热输入的进一步增大,焊缝熔宽过大,焊接接头受热严重, Zn 元素烧损严重,从而使得接头硬度再次下降.因此,在稳定全熔透性焊接时,采用合适的工艺参数能够获得恰当的

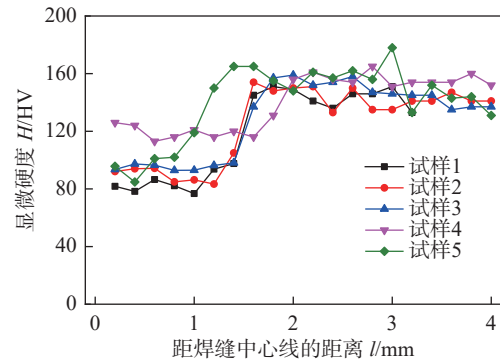


图 10 接头横截面显微硬度分布曲线

Fig. 10 Microhardness distribution curves of the cross-section of joints

热输入和显微硬度更高的焊缝.

2.3.2 拉伸性能

7075 铝合金母材和激光填丝焊接试样的拉伸性能和强度系数(接头抗拉强度和母材抗拉强度的比值),如表 3 所示.对应试样在不同热输入下抗拉强度和屈服强度的变化情况,如图 11 所示.结果表明,不同热输入条件下焊接接头试样均断裂于焊缝熔合区.试样 4 的拉断后的宏观形貌,如图 12 所示.焊缝为 7075 铝合金焊接接头的薄弱环节,与硬度分布的结果完全吻合.

表 3 7075 铝合金母材和接头的拉伸性能

Table 3 Tensile properties of 7075 aluminum alloy base metal and joints

位置	抗拉强度 R_m /MPa	屈服强度 R_{eL} /MPa	强度系数 μ (%)	断后伸长率 A (%)	断裂位置
母材	560.0	500.0	—	15.1	—
试样1	381.7	327.6	68.2	1.7	熔合区
试样2	395.0	328.3	70.5	2.0	熔合区
试样3	407.0	329.0	72.6	2.2	熔合区
试样4	419.7	318.3	74.9	3.3	熔合区
试样5	377.7	309.3	67.4	2.8	熔合区

由表 3 和图 11 可知,由于焊缝的强度较低,降低了焊接接头整体的强度水平,不同热输入条件下铝合金焊接接头的屈服强度在 309 ~ 329 MPa 之间,抗拉强度在 378 ~ 420 MPa 之间,均低于母材(屈服强度 500 MPa、抗拉强度 560 MPa),且随着热输入的增加,接头抗拉强度呈现先上升后下降的趋势.当热输入逐渐增加时,熔池中液态金属的峰值温度上升,母材金属熔化量增加,焊缝中 Zn 元素含量升高,固溶强化效果更佳,微气孔数量下降,抗拉强度达到峰值.而当热输入过大时,焊缝宽度过大,焊接接头受热严重,焊缝晶粒尺寸粗大, Zn 元素烧

损加重,焊接热影响区大,造成焊接接头强度下降.因此通过对激光填丝焊工艺参数的调整实现对热输入的调控,能够使 7075 超高强铝合金焊接接头的强度系数达到 74.9%.

7075-T6 铝合金母材与焊接试样的断口形貌,如图 13 所示.图 13(a)和图 13(b)分别为 7075-T6 铝合金母材以及试样 4 的断口形貌.虽然母材的断口中出现大量韧窝,但是仍存在局部的解理平面,断口形貌整体呈现韧性断裂和脆性断裂的混合断裂特征.而焊缝的断口形貌以等轴状的韧窝为主,为典型的韧性断裂,但韧窝浅而小,塑性较差.由于

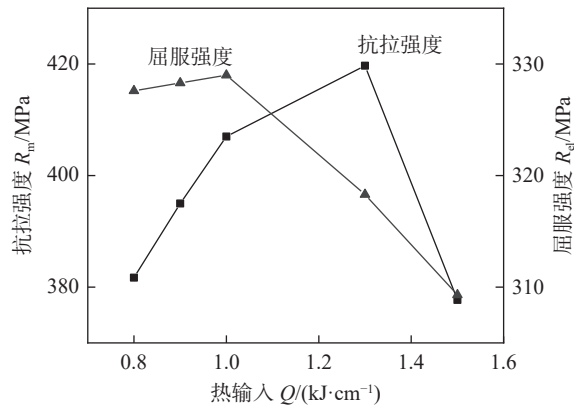


图 11 不同热输入下接头拉伸性能变化

Fig. 11 Changes in the tensile properties of joints under different heat inputs

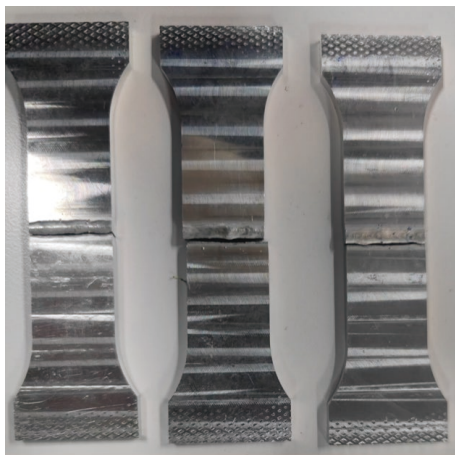


图 12 试样 4 拉断后的宏观形貌

Fig. 12 Macro-morphology of specimen 4 after fracture

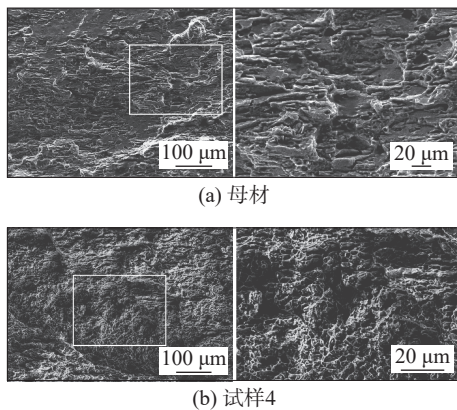


图 13 母材与焊接试样的断口形貌

Fig. 13 Morphology of fracture of base metal and welding specimen. (a) base metal; (b) specimen 4

焊缝金属的成分和组织特征,其硬度和抗拉强度显著低于母材,故在拉伸过程中,焊缝处易产生较大的局部变形,微孔聚集形成微裂纹,随着应力的进一步增大,微观裂纹扩展,在焊缝处率先发生断裂,导致焊接试样的断后伸长率(1.7%~3.3%)远低于铝合金母材(15.1%)。

3 结论

(1) 利用激光填丝焊实现了厚度为 2.0 mm 的 7075-T6 铝合金的高质量连接,焊缝外观整齐光洁、无超标缺陷.焊缝组织为典型的铸态组织,其中心区组织为无织构的等轴晶。

(2) 随着热输入的增加,7075-T6 铝合金焊缝横截面的熔宽逐渐增加,而焊缝组织特征未发生显著变化.热输入的增加使焊缝中心区晶粒尺寸的增长速度呈现先增大后减小的特征。

(3) 7075-T6 铝合金激光焊接接头的硬度分布趋势受热输入条件的影响不大,显微硬度最低值均在焊缝,约为母材硬度的 60%~70%,其次为熔合区和热影响区。

(4) 在稳定全熔透焊接条件下,热输入的持续增加使 7075 铝合金焊接接头的抗拉强度在达到峰值 420 MPa 后快速下降,强度系数为 74.9%。即通过对焊接热输入的控制可以实现对接头力学性能的调控。

参考文献

- [1] Li Y, Wang Y, Lu B, *et al.* Effect of Cu content and Zn/Mg ratio on microstructure and mechanical properties of Al-Zn-Mg-Cu alloys[J]. *Journal of Materials Research and Technology*, 2022, 19: 3451 - 3460.
- [2] 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 alloys[J]. *Materials China*, 2022, 41(10): 769 - 777.
- [3] Huang R S, Li M N, Yang H F, *et al.* Effects of Mg contents on microstructures and second phases of as-cast Al-Zn-Mg-Cu alloys[J]. *Journal of Materials Research and Technology*, 2022, 21: 2105 - 2117.
- [4] 杨光,邹文北,王超,等.激光增材连接异质铝合金的组织及性能研究[J].*中国激光*, 2022, 49(22): 123 - 130.
Yang Guang, Zou Wenbei, Wang Chao, *et al.* Microstructure and properties of laser additive jointing heterogeneous aluminum alloys[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2022, 49(22): 123 - 130.
- [5] Deng A L, Chen H, Zhang Y B, *et al.* Effect of filler materials on the porosity formation of aluminum alloy by laser welding with filler wire[J]. *Optics & Laser Technology*, 2023, 159: 109000.
- [6] Song Y X, Xiao M Z, Huang D C, *et al.* Effect of process para-

- meters on the morphology of aluminum/copper alloy lap joints by red and blue hybrid laser welding[J]. *China Welding*, 2024, 33(2): 23 – 30.
- [7] Teyeb A, Silva J, Kanfoud J, *et al.* Improvements in the microstructure and mechanical properties of aluminium alloys using ultrasonic-assisted laser welding[J]. *Metals*, 2022, 12(6): 1041.
- [8] Ma B, Gao X D, Huang Y J, *et al.* A review of laser welding for aluminium and copper dissimilar metals[J]. *Optics & Laser Technology*, 2023, 167: 109721.
- [9] El-Batahgy A, Klimova-Korsmik O, Akhmetov A, *et al.* High-power fiber laser welding of high-strength AA7075-T6 aluminum alloy welds for mechanical properties research[J]. *Materials*, 2021, 14(24): 7498.
- [10] Xu T Y, Zhou S W, Ma X Q, *et al.* Significant reinforcement of mechanical properties in laser welding aluminum alloy with carbon nanotubes added[J]. *Carbon*, 2022, 191: 36 – 47.
- [11] Bunaziv I, Akselsen O M, Ren X B, *et al.* Laser beam and laser-arc hybrid welding of aluminium alloys[J]. *Metals*, 2021, 11(8): 1150.
- [12] Zhang L, Li X Y, Nie Z R, *et al.* Microstructure and mechanical properties of a new Al–Zn–Mg–Cu alloy joints welded by laser beam[J]. *Materials & Design*, 2015, 83: 451 – 458.
- [13] 刘红兵, 陶汪, 陈洁, 等. 激光填丝焊焊丝熔入行为特征 [J]. *焊接学报*, 2013, 34(11): 73 – 77.
- Liu Hongbing, Tao Wang, Chen Jie, *et al.* Filler wire melting dynamics during laser beam welding with filler wire[J]. *Transactions of the China Welding Institution*, 2013, 34(11): 73 – 77.
- [14] Huang W H, Chen S J, Xiao J, *et al.* Investigation of filler wire melting and transfer behaviors in laser welding with filler wire[J]. *Optics & Laser Technology*, 2021, 134: 106589.
- [15] Saheed A, Loginova I, Khalil A, *et al.* Effect of laser welding process parameters and filler metals on the weldability and the mechanical properties of AA7020 aluminium alloy[J]. *Journal of Manufacturing and Materials Processing*, 2018, 2(2): 33.
- [16] 刘源, 李悦, 王建峰, 等. 热输入对 2219 铝合金激光镜像焊接匙孔动态特征的影响 [J]. *焊接学报*, 2023, 44(6): 103 – 110.
- Liu Yuan, Li Yue, Wang Jianfeng, *et al.* The effect of heat input on the dynamic characteristic of keyhole during laser mirror welding of 2219 aluminum alloy[J]. *Transactions of the China Welding Institution*, 2023, 44(6): 103 – 110.
- [17] Zhao Y Q, Zhan X H, Zhou X D, *et al.* Effect of heat input on macro morphology and porosity of laser-MIG hybrid welded joint for 5A06 aluminum alloy[J]. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2021, 115(11): 4035 – 4045.
- [18] Liu F C, Zhu X Z, Ji S X. Effects of Ni on the microstructure, hot tear and mechanical properties of Al–Zn–Mg–Cu alloys under as-cast condition[J]. *Journal of Alloys and Compounds*, 2020, 821: 153458.
- [19] Han R H, Lu S P, Dong W C, *et al.* The morphological evolution of the axial structure and the curved columnar grain in the weld[J]. *Journal of Crystal Growth*, 2015, 431: 49 – 59.

第一作者: 高文强, 博士; 主要研究方向为铝合金激光加工技术; Email: 13269387926@163.com.

(编辑: 汤明日)