DOI: 10.3901/JME.2020.06.221

含 Sc 高强铝合金薄板 TIG 焊与 FSW 接头组织与性能对比研究*

杨超¹ 王英君² 徐艳利³ 蔡静¹ 于宝海¹ 倪丁瑞¹

(1. 中国科学院金属研究所 沈阳 110016;

2. 东北轻合金有限责任公司 哈尔滨 150060;

3. 北京航天新凤机械设备有限责任公司 北京 100854)

摘要: 分别对 3 mm 厚的 Al-Zn-Mg-Cu-Sc 高强铝合金薄板进行钨极惰性气体保护(Tungsten inert gas, TIG)焊与搅拌摩擦焊接(Friction stir welding, FSW), 对比分析了两种焊接工艺下接头的微观组织与力学性能。结果表明: 两种工艺都能获得无缺陷的接头。TIG 焊核区晶粒粗大; 硬度分布呈“M”形, 中心值降至 125 HV, 最低值出现在热影响区(Heat-affected zone, HAZ)(约 110 HV); 拉伸时样品断在 HAZ, 接头强度约为 417 MPa, 为母材的 71%。FSW 焊核区为等轴细晶; 硬度分布呈典型“W”型, 最低值亦出现在 HAZ(约 115 HV), 且随焊速的提高而提高; 在 400~1 200 r/min 下均有可能获得高强度接头, 其中转速 1 200 r/min、焊速 200 mm/min 下接头强度最高(458 MPa), 为母材的 79%, 拉伸样品断在 HAZ。当焊速过快时, 由于合金变形能力差, 焊核区易出现缺陷, 导致拉伸时接头过早断裂于焊核区中心。

关键词: 高强铝合金; TIG 焊; 搅拌摩擦焊; 微观组织; 力学性能

中图分类号: TG456

Microstructure and Mechanical Properties of TIG and Friction Stir Welded Joints of Sc-contained High Strength Aluminum Alloy Sheet

YANG Chao¹ WANG Yingjun² XU Yanli³ CAI Jing¹ YU Baohai¹ NI Dingrui¹

(1. Institute of Metal Research, Chinese Academy of Sciences, Shenyang 110016;

2. Northeast Light Alloy Co., Ltd., Harbin 150060;

3. Aerospace Science and Industry Group Co., Ltd., Beijing 100854)

Abstract: 3 mm thick Al-Zn-Mg-Cu-Sc alloy plates were subjected to tungsten inert gas welding (TIG) and friction stir welding (FSW), respectively. The microstructure and mechanical properties of the TIG and FSW joints were investigated. The results showed that defect-free joints of both TIG and FSW were acquired. For the TIG joint, the nugget zone (NZ) was characterized with coarsened grains, the hardness distribution exhibited “M” shape with low hardness value in the center (~125 HV), and the lowest hardness zone (LHZ, ~110 HV) located in the heat affected zone (HAZ); the ultimate tensile strength (UTS) of 417 MPa was obtained, ~71% of the BM. For the FSW joints, the NZs were characterized with equiaxed fine grains, and the grain sizes decreased with increasing the welding speed; the hardness distribution presented “W” shape with the LHZ located in the HAZ (~115 HV). FSW joints with high strength could be obtained under the rotation rates of 400-1 200 r/min, and the highest UTS of 458 MPa was achieved under the rotation rate of 1 200 r/min and welding speed of 200 mm/min, ~79% of the BM. When the welding speed was too fast, defects were likely to appear in the NZs due to the poor deformation ability of the alloy, resulting in the premature failure of tensile samples in the center of the NZs.

Key words: high strength aluminum alloy; TIG welding; friction stir welding; microstructure; mechanical properties

* NSFC-钢铁联合基金资助项目(U1760201)。20191028 收到初稿, 20200218

收到修改稿

0 前言

Al-Zn-Mg-Cu(7000)系合金具有高强度,高韧性以及良好的耐蚀性而被广泛的应用于汽车制造、船舶业、航空航天工业等制造领域^[1-2]。7055Al 作为典型的 7000 系合金,为目前应用最广的高强铝合金,由于其具有优异的综合性能,已成为飞机制造业中的重要材料。钪(Sc)元素作为一种稀有元素,具有明显的改性作用,含 Sc 铝合金协同时效硬化效应可使合金拥有更高强度,同时具有良好的热稳定性,是发展高强度、高耐热性和良好抗蚀性铝合金的一种高效的添加元素^[3-8]。因而,在 7055Al 基础上添加一定含量的 Sc 元素,不仅可以发挥过渡族元素对铝合金的细化作用,还可以起到稀土金属元素的精炼效果,这样不仅保留了其强度高、耐蚀性好等优良特性,还提高了该合金的塑性和延展率,使得其优势得到进一步凸显。

目前,Al-Zn-Mg-Cu-Sc 铝合金从薄板到厚板在航空航天领域已获得很大程度关注。而作为结构件,板材的焊接工艺必不可少。然而,熔化焊时铝合金易被氧化,产生的氧化膜会影响材料流动及焊缝的形成;薄板焊接时,易产生变形;焊缝区或热影响区易产生裂纹等缺陷;一些元素在熔化焊接过程中会发生元素烧蚀缺失。因而,采用熔化焊焊接高强铝合金存在很大挑战。

搅拌摩擦焊接(Friction stir welding, FSW)^[9-11],作为一项固相连接技术,具有高质、高效、残余应力小、绿色环保等特点,可成功避免熔化焊时存在的气孔、夹渣、裂纹等缺陷,因此在铝合金焊接方面有十分优异的表现^[12-13],并且已在诸多领域实现成功应用。FSW 工作原理如下:由轴肩和搅拌针组成的焊接工具—搅拌头高速旋转使搅拌针挤入待焊工件接缝处,当轴肩与工件表面接触后,焊接工具沿工件接缝水平移动,焊核区发生剧烈的塑性变形,通过动态再结晶形成致密的焊缝。搅拌针的作用是带动接缝两侧材料产生塑性流变和混合,轴肩的作用是与工件表面摩擦产生温升(低于被焊材料熔点)使材料软化,同时对塑变的材料施加压力并与工件形成自封闭焊区。由于焊接时的峰值温度远低于材料熔点,为固态焊接,因而被视为轻质合金焊接的理想方法。

目前关于 Al-Zn-Mg-Cu-Sc 合金焊接的研究鲜有报道,而 Sc 元素的添加势必会导致其焊接特性与 7000 系铝合金存在一定差异。本研究分别采用钨极惰性气体保护(Tungsten inert gas, TIG)焊工艺和

FSW 工艺对其进行焊接,对比分析两种焊接接头的微观组织与力学性能差异。

1 试验过程

试验选用 3 mm 厚 Al-Zn-Mg-Cu-Sc 铝合金轧制板材,板材尺寸 300×100×3 mm³,供货态板材力学性能如表 1 所示。分别采用 TIG 焊与 FSW 两种工艺进行对接焊接。其中 TIG 焊采用氩气保护气氛,焊丝采用直径 2.4 mm 的自制含稀土元素焊丝,焊接电流 140 A,焊接长度 300 mm。FSW 在 FSW-5LM-020 型数控搅拌摩擦焊机上进行,搅拌头材质为 H13 钢,工具轴肩尺寸 $\phi 15$ mm,搅拌针采用锥形螺纹针,锥度 9°,根部直径 M5,针长 2.7 mm,搅拌头倾角为 2.75°,焊接压下量 0.2 mm。FSW 参数设定如表 2 所示。

表 1 Al-Zn-Mg-Cu-Sc 板材力学性能

抗拉强度/MPa	屈服强度/MPa	伸长率(%)	硬度 HV
579	525	13.75	172

表 2 Al-Zn-Mg-Cu-Sc 板材 FSW 焊接参数

参数	数值					
转速/(r/min)	800	800	800	800	400	1 200
焊速/(mm/min)	100	200	400	800	100	200

采用光学显微镜(Optical microscope, OM)、扫描电镜(Scanning electron microscope, SEM)和透射电镜(Transmission electron microscope, TEM)对焊缝微观组织进行分析。金相样品切取自垂直于焊缝的横截面,经打磨、机械抛光后,用 Keller 试剂($\text{HNO}_3:\text{HCl}:\text{HF}:\text{H}_2\text{O}=2.5:1.5:1:95$,体积分数(%))腐蚀后进行金相观察。采用 Quanta 600 型扫描电子显微镜对样品断面形貌进行观察;断面取自母材与接头拉伸断裂后样品。

显微硬度测试沿垂直于焊缝的横截面进行阵列打点测试,以焊缝中心点为中心,左右各测 15 点,测试阵列横跨焊核(Nugget zone, NZ),热-机影响区(Thermo-mechanically affected zone, TMAZ),热影响区(Heat-affected zone, HAZ)以及母材(Base material, BM)区域,测试载荷 2.94 N,保压时间 15 s,打点间隔 1.5 mm。

采用 SANS-CMT5205 电子万能试验机进行拉伸性能测试,初始应变速率 $1\times 10^{-3}\text{ s}^{-1}$,拉伸速度 4.8 mm/min。拉伸测试样品均以焊缝为中心垂直于焊接方向切取,尺寸细节如图 1 所示。母材与接头均重复测试 3 支样品,取其平均值。

图1 母材及 TIG 焊与 FSW 接头拉伸样品尺寸

2 结果与讨论

2.1 微观组织形貌

2.1.1 TIG 焊接头微观组织

如图2所示, TIG 焊获得了无缺陷的焊接接头, 由于 TIG 焊为熔化焊接过程, 经历了熔化-凝固过程, 焊接区在熔化再凝固时有残余应力产生, 接头发生一定程度的变形(图2a)。TIG 焊接分为焊核区(NZ), 热影响区(HAZ)与母材(BM)区域。图2b所示为 NZ/HAZ 边界区域, 可以看到, 焊核区为近等轴组织, 为晶粒尺寸约 $45\ \mu\text{m}$ 的粗大晶粒(图2c)。由于焊核区经历强烈的热循环, 在凝固过程中形成粗大的晶粒, 这常见于铝合金熔化焊中^[14-15]。

(a) 接头整体宏观组织

(b) NZ/HAZ边界组织

(c) 焊核区高倍组织

图2 TIG 焊接头金相组织

对 TIG 焊核区进行 SEM 观察, 如图3所示, 宏观下观察不到孔洞、杂质颗粒等, 在高倍放大下可见, 焊核区顶部与底部晶粒尺寸无明显差异。值得注意的是, 无论顶部与底部, 在晶界处均可随机观察到小孔状缺陷(箭头所指), 应为焊接过程中产生的气孔所致。文献报道铝合金熔化焊时会产生氢气孔^[15-16], 这与本研究中观察到的现象一致。气孔是 TIG 焊中最为常见的一种夹杂缺陷, 焊接过程中熔池周围分布着成分各异的气体, 其主要来源为周围的空气以及焊件表面的杂质反应后进入熔池, 产生气泡, 在熔池金属凝固过程中来不及逸出而残留在熔池内部从而形成气孔。

2.1.2 FSW 接头微观组织

FSW 是一种固相焊接, 焊接过程中焊核区不会

图3 TIG 接头区 SEM 图像

发生熔化, 因而, 其组织特征与 TIG 焊接头存在明显不同。如图4所示, 与 TIG 焊接头区域划分相比, FSW 接头在两侧多出一个热-机械影响区(Thermomechanically affected zone, TMAZ)。焊核区(NZ)经历剧烈的机械搅拌和热作用, 在随后的冷却过程将发生动态再结晶, 形成等轴细晶组织; TMAZ 位于焊核区两侧, 该区经历热和机械搅拌的共同作用, 晶粒发生拉长, 呈现出粗细晶混合组织形态; HAZ 由于只经历热循环作用, 晶粒发生粗化, 对沉淀强化铝合金而言, 该区会发生沉淀相的粗化/溶解, 从而导致 HAZ 成为薄弱区域^[10-11, 17]。从接头微观组织来看, 与 TIG 相比, FSW 为固相连接, 不存在熔化-凝固过程产生的缺陷, 而且焊核区经历的热循环峰值温度也比 TIG 接头低得多, 从而体现出 FSW 接头独有的组织特点优势: 焊核区均匀细化的等轴细晶组织可使得接头得到强化, 尽管 HAZ 为接头的薄弱区域, 通过控制焊接参数可以控制其经历的热循环峰值温度, 从而实现高质量连接^[18]。

如图4所示, 为六组焊接参数下 FSW 接头宏观形貌, 所选参数均获得了无宏观缺陷的接头。焊核区整体呈盆状, 焊核区与 TMAZ 边界清晰锐利。固定转速时, 随着焊速的增大, 边界逐渐模糊, 并且随着焊速提高, 焊核区逐渐缩窄。1 200 r/min 时搅拌区范围最宽。低焊速下焊核中心区存在明显“洋葱环”形貌, 随着焊速提高逐渐模糊。值得注意的是, 与 TIG 焊接头相比, FSW 接头 HAZ 范围明显减小, 即 FSW 接头 HAZ 所经历的热循环峰值温度要比 TIG 过程小得多, 因而 HAZ 软化程度要比 TIG 焊接头小。

对转速 800 r/min 系列参数 FSW 接头焊核中心区进一步观察(图5), 可以看到, 焊核区均为等轴细

图4 不同参数下FSW接头宏观形貌

图5 不同参数下FSW焊核中心组织形貌。

晶组织,并且随着焊速的提高,晶粒尺寸逐渐减小。对应 100~800 mm/min 四组焊速下的平均晶粒尺寸分别为 6.2 μm 、3.8 μm 、2.5 μm 和 2.0 μm 。这是由于焊核区经历强烈的搅拌和热作用,在后续的冷却过程中焊核区发生动态再结晶,而随着焊速的提高,焊核区后续冷却速率加快,该区域高温停留时间逐渐缩短,抑制了再结晶晶粒长大。与 FSW 接

头相比,TIG 焊温度较 FSW 高出很多,焊丝及母材发生熔化再凝固,凝固过程晶粒发生长大,因而 TIG 焊的晶粒尺寸较 FSW 粗大得多^[14-15]。

2.2 显微硬度曲线

图 6a 所示为 TIG 焊接头横截面厚度中心处显微硬度曲线,可以看到,曲线呈“M”形分布,焊核区其余部分硬度值约为 150 HV,中心硬度降低至约 125 HV;最低硬度值位于 HAZ,约 110 HV。

图 6b 为固定转速 800 r/min,不同焊速下 FSW 接头显微硬度分布,可以看到,接头横截面曲线呈典型的“W”形分布,母材硬度值最高,在 180 HV 左右;焊核区硬度值回复达到 150 HV 左右;最低硬度值出现在 HAZ,并且随焊接速度的提高而升高,由 800-100 参数下的 115 HV 提高到 800-800 参数下的 140 HV,但焊核区硬度值几乎不受焊速影响。对沉淀强化型铝合金,FSW 焊核区硬度受细晶强化、析出相固溶等共同作用,而热影响区的最低硬度值通常是析出相的粗化或溶解导致^[16]。与 TIG 接头相比,FSW 接头软化范围更窄,且最低硬度值高。

图6 不同焊接工艺焊接接头横截面显微硬度曲线

2.3 拉伸性能及断裂位置

图 7 所示为母材与两种焊接接头的工程应力-

应变曲线,表3列出了母材与接头抗拉强度值。可以看到,母材强度约为 580 MPa, TIG 焊接头强度约为 417 MPa, 为母材强度的 71%。

图 7b 为 FSW 接头的工程应力-应变曲线。800-100 参数接头强度达 417 MPa, 与 TIG 焊接头强度相当。大量研究表明,对于沉淀强化的高强铝合金,接头强度随 FSW 焊速提高而提高^[17],理论上本试验中 800-800 参数应具有最高强度,显微硬度曲线中也可看到最低硬度值显示出了随焊速提高的趋势,然而,从拉伸曲线上可以看出,四组参数中除 800-100 外,其他三组接头均发生提前断裂而导致强度降低的异常现象,尽管在宏观组织上无明显可见缺陷。由此可见,在选定的适合于大多常规铝合金焊接的 800 r/min 转速下,对于 Al-Zn-Mg-Cu-Sc 合金,焊速并不是越高越好,这可能是由于高焊速下材料流动不充分,反而会带来焊核区“弱结合”的风险。在没有发生异常断裂的两组参数(400-100, 1200-200)下,均获得高强度接头,其中在 1200-200 参数下获得最高强度 458 MPa,达母材强度 79%,达到以往 7000 系铝合金 FSW 接头 60%~80%水平^[19-20]。因而,对于本研究合金 Al-Zn-Mg-Cu-Sc,一旦焊速过高,焊核区极易出现材料分层产生异常断裂。

图7 不同焊接工艺 Al-Zn-Mg-Cu-Sc 板材接头拉伸曲线

表3 母材与 TIG、FSW 接头样品拉伸强度

样品编号	抗拉强度/MPa
母材	579±7
FSW-800-100	417±11
FSW-800-200	379±18
FSW-800-400	312±17
FSW-800-800	369±10
FSW-400-100	426±1
FSW-1200-200	458±1
TIG 焊接头	417±6

图 8 所示为母材与 TIG、FSW 两种接头样品断裂位置,母材样品均断裂于平行段(图 8a); TIG 焊样品均断裂于热影响区(图 8b),尽管在焊核区域观察到类似缺陷的孔洞,但并未对拉伸性能造成影响,样品仍然断裂于热影响区,即热影响区引起的软化仍然为接头弱化的主导影响因素。

图8 拉伸测试样品断裂位置

图 8c~8h 所示为 FSW 接头断裂位置。低转速 400-100 与高转速 1200-200 两组参数接头样品均断裂于 HAZ,且断裂路径均与焊缝中心线呈近 45°;当转速为 800 r/min 时,只有 800-100 参数断裂于 HAZ,焊速高于 100 mm/min 的其余三组均断裂于焊核中心,即异常断裂,尽管接头未见可见缺陷。

2.4 断口观察

图 9 所示为母材与 TIG 焊接头拉伸断口形貌,由宏观断口形貌可见,母材断口表现出一定的颈缩,放大观察可见断口含有大量韧窝。与母材相

比, TIG 焊接头宏观整体较为平滑, 颈缩较小, 断口韧窝尺寸明显减小, 且有部分比较平滑区域。

图 9 母材与 TIG 接头拉伸断口形貌

图 10 为发生异常断裂的 800-800 参数下 FSW 接头断口形貌, 可以看出, 接头出现明显的分层情况。如图 10a 中虚线分隔区域所示, 接头厚度方向可分为三层流动特点不同所形成的区域, 中间层材料具有一定流向, 近上下表面处较为平滑。由图 10b 可见, 中间层有很窄区域具有韧性断裂特征, 如 B 区所示。当将 B 区放大后观察, 未观察到明显韧窝形貌, 且表面为类似颗粒状的形态, 亦可观察到沟槽状形态, 微观下组织几乎无塑性变形特点。结合上述强度与断裂位置结果可以看到, 发生异常断裂参数 800-800 接头断口表现出一定的材料分层, 即随着焊速的提高, 材料发生周期性流动^[21-22], 当焊速过快时, 焊核中心材料来不及形成一个完整周期的流动, 从而使得焊核中心材料形成一种“弱结合”的状态, 使得接头在拉伸过程中发生异常断裂。因此, 应考虑材料本身的流动特性, 才可能在提高焊速的同时可获得高质量的连接。

(a) 宏观形貌

(b) 断口A区放大

(c) 断口B区放大

图 10 FSW 800-800 接头拉伸断口形貌

图 11 所示为获得最高强度的 1 200-200 参数接头拉伸断口形貌。与 800-800 参数不同, 尽管宏观上观察断口面较为平滑, 但高倍下断口存在大量小

(a) 宏观形貌

(b) 图11a放大

(c) 图11b放大

图 11 FSW 1 200-200 接头拉伸断口形貌

尺寸韧窝, 呈现出典型的韧性断裂形貌。由此进一步说明高转速有助于实现材料的充分流动混合, 得到强塑性较好的高质量 FSW 接头。

3 结论

本文对 3 mm 厚 Al-Zn-Mg-Cu-Sc 高强铝合金薄板进行了 TIG 焊与 FSW 对比分析研究, 获得了无缺陷的焊接接头, 重点分析了两种焊接工艺下接头的微观组织与力学性能, 主要结论如下。

(1) TIG 焊使接头发生明显的焊后变形; 接头焊核区为粗大晶粒组织, 热影响区范围较宽; 而 FSW 接头焊核区在所选参数下均可获得等轴细晶组织, 且热影响区明显缩窄。

(2) TIG 焊接头显微硬度呈现“M”型分布, 焊核中心出现硬度降低, 接头软化范围较宽, 最低硬度值出现在热影响区。典型 FSW 接头显微硬度呈“W”型分布, 母材硬度最高, 焊核区次之, 最低硬度值亦出现在热影响区, 并随焊速提高而升高, 焊核区硬度值几乎不受焊速影响; FSW 接头最低硬度值较 TIG 接头有所提高。

(3) TIG 焊接头强度约为 417 MPa, 为母材强度 (579 MPa) 的 71%, 拉伸时样品断于热影响区。

(4) 由于 Al-Zn-Mg-Cu-Sc 流变能力差, FSW 焊核区易产生“弱结合”类缺陷, 导致拉伸时样品过早失效, 断于焊核中心, 接头强度低。在 1 200-200 的优化参数下获得性能良好的 FSW 接头, 拉伸时样品断于热影响区, 抗拉强度为 458 MPa, 达母材强度的 79%。

参 考 文 献

[1] 蹇海根, 姜锋, 徐忠艳, 等. 航空用高强韧 Al-Zn-Mg-Cu 系铝合金的研究进展[J]. 热加工工艺, 2006, 35(12): 66-71.
JIAN Haigen, JIANG Feng, XU Zhongyan, et al. Study

progress of high strength and tenacity Al-Zn-Mg-Cu aluminum alloy for aviation[J]. Hot Working Technology, 2006, 35(12): 66-71.

- [2] 刘晓涛, 崔建忠. Al-Zn-Mg-Cu 系超高强铝合金的研究进展[J]. 材料导报, 2005, 19(3): 47-50.
LIU Xiaotao, CUI Jianzhong. Progress in research on ultra-high strength Al-Zn-Mg-Cu alloy[J]. Materials Review, 2005, 19(3): 47-50.
- [3] 商海东, 周小军, 王飞, 等. 喷射成型 7055 铝合金锻件的高温力学性能[J]. 粉末冶金材料科学与工程, 2017, 22(5): 1673-0224.
SHANG Haidong, ZHOU Xiaojun, WANG Fei, et al. Mechanical properties at high temperature of spray-forming 7055 aluminum alloy forgings[J]. Materials Science and Engineering of Powder Metallurgy, 2017, 22(5): 636-642.
- [4] 周民, 甘培原, 邓鸿华, 等. 含钪微合金化铝合金研究现状及发展趋势[J]. 中国材料进展, 2018, 37(2): 154-160.
ZHOU Min, GAN Peiyuan, DENG Honghua, et al. Research status and prospect of Sc microalloying aluminum alloys[J]. Materials China, 2018, 37(02): 154-160.
- [5] 陈琴, 潘清林, 王迎, 等. 微量 Sc 和 Zr 对 Al-Mg-Mn 合金组织与力学性能的影响[J]. 中国有色金属学报, 2012, 22(6): 1555-1563.
CHEN Qin, PAN Qinglin, WANG Ying, et al. Effects of minor scandium and zirconium on microstructure and mechanical properties of Al-Mg-Mn alloys[J]. The Chinese Journal of Nonferrous Metals, 2012, 22(6): 1555-1563.
- [6] 张思平. 含 Sc 铝合金的应用研究新进展与前景展望[J]. 铝加工, 2019, 247(02): 4-9.
ZHANG Siping. Research development and prospect for application of Sc-containing aluminum alloy[J]. Aluminium Fabrication, 2019, 247(2): 4-9.
- [7] 徐雪芳, 王春华. 钪含量对 7050 铝合金组织与力学性能的影响[J]. 金属热处理, 2018, 43(9): 6-9.
XU Xuefang, WANG Chunhua. Effect of Sc content on microstructure and mechanical properties of 7050 aluminum alloy[J]. Heat Treatment of Metals, 2018, 43(9): 6-9.
- [8] 陈勇, 张军, 滕广标, 等. Sc 和 Zr 对 7055 合金铸态及热处理态组织和性能的影响[J]. 特种铸造及有色合金, 2018, 38(7): 1130-1133.
CHEN Yong, ZHANG Jun, TENG Guangbiao, et al. Effects of Sc and Zr on microstructure and properties of as-cast and heat-treated state 7055Al alloy[J]. Special Casting & Nonferrous Alloys, 2018, 38(7): 1130-1133.

- [9] 宋友宝, 李龙, 吕金明, 等. 7xxx 系铝合金焊接研究现状与展望[J]. 中国有色金属学报, 2018, 28(3): 492-501.
SONG Youbao, LI Long, LÜ Jinming, et al. The status and perspective of the welding of 7xxx series aluminum alloy[J]. The Chinese Journal of Nonferrous Metals, 2018, 28(3): 492-501.
- [10] MISHRA R S, MA Z Y. Friction stir welding and processing[J]. Materials Science and Engineering: R, 2005: 1-78.
- [11] PADHY G K, WU C S, GAO S. Friction stir based welding and processing technologies processes, parameters, microstructures and applications: A review[J]. Journal of Materials Science and Technology, 2018, 34: 1-38.
- [12] 杨超, 王继杰, 韩培培, 等. 包铝层对 7B04-O 铝合金薄板搅拌摩擦搭接性能影响[J]. 机械工程学报, 2015, 51(22): 54-59.
YANG Chao, WANG Jijie, HAN Peipei, et al. Effect of Al clad layer on friction stir lap welded 7B04 Al-O sheet[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2015, 51(22): 54-59.
- [13] 韩培培, 杨超, 王继杰, 等. 固溶处理对 7B04-O 铝合金搅拌摩擦焊接接头微观组织与力学性能的影响[J]. 机械工程学报, 2015, 51(22): 35-41.
HAN Peipei, YANG Chao, WANG Jijie, et al. Effects of solution heat treatment on friction stir welding joints of 7B04-O aluminum alloy[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2015, 51(22): 35-41.
- [14] ZHANG D K, ZHAO Y, DONG M Y, et al. Effects of weld penetration on tensile properties of 2219 aluminum alloy TIG-welded joints[J]. Transactions of Nonferrous Metals Society of China, 2019, 29(6): 1161-1168.
- [15] ALIAKBARI S, KETABCHI M, MIRSALEHI E. Effect of through-thickness friction stir processing parameters on weld repair and modification of fusion-welded AA6061 aluminum alloy[J]. Journal of Materials Engineering and Performance, 2019, 28(5): 2688-2696.
- [16] TODA H, OOGI H, HORIKAWA K, et al. The true origin of ductile fracture in aluminum alloys[J]. Metallurgical and Materials Transactions A, 2014, 45(2): 765-776.
- [17] YANG C, NI D R, XUE P, et al. A comparative research on bobbin tool and conventional friction stir welding of Al-Mg-Si alloy plates[J]. Materials Characterization, 2018, 145: 20-28.
- [18] LIU F C, MA Z Y. Influence of tool dimension and welding parameters on microstructure and mechanical properties of friction-stir-welded 6061-T651 aluminum alloy[J]. Metallurgical and Materials Transactions A, 2008, 39: 2378-2388.
- [19] YANG C, WANG J J, MA Z Y, et al. Friction stir welding and low-temperature superplasticity of 7B04 Al sheet[J]. Acta Metall. Sin. (Engl. Lett.), 2015, 51: 1449-1456.
- [20] FENG A H, CHEN D L, MA Z Y, et al. Microstructure and strain hardening of a friction stir welded high-strength Al-Zn-Mg alloy[J]. Acta Metall. Sin. (Engl. Lett.), 2014, 27: 723-729.
- [21] ZENG X H, XUE P, WANG D, et al. Material flow and void defect formation in friction stir welding of aluminium alloys[J]. Science and Technology of Welding and Joining, 2018, 23: 677-686.
- [22] TAO Y, ZHANG Z, NI D R, et al. Influence of welding parameter on mechanical properties and fracture behavior of friction stir welded Al-Mg-Sc joints[J]. Materials Science & Engineering A, 2014, 612: 236-245.

作者简介: 杨超, 男, 1987 年出生, 博士研究生。主要研究方向为铝合金的搅拌摩擦焊接。

E-mail: cyang16b@imr.ac.cn

倪丁瑞(通信作者), 男, 1976 年出生, 博士, 研究员。主要研究方向为轻合金及其复合材料的制备与焊接。

E-mail: drni@imr.ac.cn