DOI: 10.3901/JME.2020.08.085

基于“热导拘束+局部变形强化”的 铝合金焊轧复合成形方法*

宋 刚 程继文 刘振夫

(大连理工大学材料科学与工程学院 大连 116024)

摘要: 铝合金尤其是热处理强化铝合金焊后不可避免会出现热影响区软化现象, 导致焊接接头的力学性能显著下降。基于热导拘束+局部变形强化构想, 提出一种铝合金焊轧复合成形方法, 系统分析铜垫强制冷却非熔化极惰性气体保护电弧焊(Tungsten inert gas, TIG)填丝对接焊及焊后轧制复合工艺对 5083-O 和 6061-T6 异种铝合金焊接接头组织和力学性能的影响。结果表明, 采用焊轧复合成形方法, 能够得到成形良好且无缺陷的铝合金对接接头, 通过轧制使焊接接头同时发生了纵向变形和横向变形; 焊后轧制可以压实铝合金焊缝组织, 有效降低焊接接头部分熔化区的宽度, 同时热影响区(包括固溶区和过时效软化区)晶粒发生位向改变甚至转动现象; 与自由冷却焊接工艺相比, 采用铜垫冷却的焊接接头 6061-T6 侧软化区硬度升高且向焊缝中心产生明显偏移, 焊后轧制使两种冷却方式的焊接接头的整体硬度均得到大幅度提升, 其中软化最严重位置硬度值由 59.5 HV 提高到 84.4 HV, 提升幅度为 41.8%; 两种冷却方式的焊接接头轧制后接头的抗拉强度均大幅度提升, 其中铜垫冷却焊轧复合成形与自由冷却焊接接头相比, 试样抗拉强度由 197.0 MPa 提升到 288.6 MPa, 提升幅度为 46.5%, 与 5083-O 母材的抗拉强度相当, 断后伸长率由 5.88%提升到 8.85%, 断裂位置由 6061-T6 侧热影响区转移至 5083-O 侧母材。

关键词: 铝合金; 热影响区软化; 焊接; 局部变形强化; 复合成形

中图分类号: TG457

Compound Technique of Welding and Rolling for Aluminum Alloy Based on Thermal Conductivity Constraint and Local Deformation Strengthening

SONG Gang CHENG Jiwen LIU Zhenfu

(School of Materials Science and Engineering, Dalian University of Technology, Dalian 116024)

Abstract: The softening of heat affected zone (HAZ) inevitably occur after welding of aluminum alloy, especially for heat treatment strengthened aluminum alloy, which leads to the significant decrease of mechanical properties of welded joints. Based on the concept of thermal conductance constrain and local deformation strengthening, a compound technique of welding and rolling for aluminum alloy is proposed, and the effect of the compound technique of tungsten inert gas(TIG) filler wire butt welding with copper pad cooling and rolling on microstructure and mechanical properties of 5083-O and 6061-T6 dissimilar aluminum alloy welded joints is systematically analyzed. The results show that the defect-free and well-formed aluminum alloy butt joints can be obtained by welding-rolling composite forming. The longitudinal and transverse deformations of the welded joints occur simultaneously by rolling. This technique has several advantages over welding alone. These include obvious compaction of weld microstructure, effectively reduction of weld melting zone width, and violent rotation of grain in the heat affected zone (including the solid solution region and the overaging softening region). Compared with the free-cooling welding process, the hardness of the softened zone on the 6061-T6 side of the welded joint with copper pads cooling is increased and the severely softened position is significantly offset to the weld zone. Post-weld rolling greatly increase the overall hardness of the welded joints with two cooling methods. The hardness value at the most severely softened position is increased from 59.5 HV to 84.4 HV, an increase of 41.8%. Compared with free-cooled joints, the tensile strength of the samples by the composite forming with copper pad cooling increases from 197.0 MPa to 288.6 MPa, an increase of 46.5%, which is equivalent to the tensile strength

* 国家自然科学基金资助项目(U1764251, U1960111)。20200122 收到初稿,
20200228 收到修改稿

of the 5083-O base material. As well as the elongation is increased from 5.88% to 8.85%. The tensile fracture position is transferred from the 6061-T6 side heat affected zone to the 5083-O side base material.

Key words: aluminum alloy; soften zone in heat affected zone; welding; local deformation strengthening; composite forming

0 前言

铝合金具有密度小、比强度和比刚度高、耐腐蚀性好等一系列优良的特性,被广泛应用于航空航天、车辆及轨道交通运输等领域^[1]。铝合金尤其是热处理强化铝合金,由于其特有的物理特性(导热系数大)和强化机制(固溶处理+时效),导致焊接接头相比于其他材料受热影响的范围更广、程度更大,极易出现晶粒长大、析出相溶解以及析出相粗化等问题,不可避免会产生热影响区软化现象,导致焊接接头的力学性能显著下降。例如,5083-O 铝合金为典型的非热处理强化铝合金,采用传统熔化焊方法接头抗拉强度可达到母材的 85%以上^[2];然而以 6061-T6 为代表的热处理强化铝合金,虽然具有良好的焊接性,但是采用传统熔化焊方法接头抗拉强度仅为母材的 50%~60%^[3]。因此,如何改善铝合金焊接接头热影响区软化问题,是科研机构和企业长期关注的难点和热点^[4-6]。

为改善热处理强化铝合金焊接接头软化现象,国内外学者从降低焊接热输入以及采取焊后处理两方面开展了积极有效的工作。以 6XXX 系铝合金为例,采用低热输入的激光焊、冷金属过渡电弧焊(Cold metal transfer, CMT)等熔化焊方法,可使焊接接头抗拉强度达到母材的 65%~75%^[7-8];采用搅拌摩擦焊为代表的固相焊方法,通过优化工艺参数可使焊接接头抗拉强度达到母材的 70%~80%^[9-10];采用焊后热处理^[11-12]、深冷处理^[13-14]等焊后处理方法,可使焊接接头性能获得不同程度提升,但是软化区仍是焊接接头的薄弱位置。

综上,基于“热导拘束+局部变形强化”的铝合金焊接接头热影响区强化构想^[15],本文提出了一种铝合金焊轧复合成形方法,即采用热导拘束 TIG 填丝焊工艺减少焊接热影响区的软化程度并同时使软化区域向焊缝靠近;后续针对焊缝余高区域进行局部轧制,使得软化区在焊缝余高变形影响下发生协同塑性变形,从而利用塑性变形的强化作用提升焊接接头软化区的力学性能。本文以 5083-O 和 6061-T6 异种铝合金为研究对象,重点探讨了不同冷却方式焊接工艺及焊后轧制工艺对铝合金焊接接头组织与力学性能的影响。

1 试验材料及方法

1.1 试验材料

试验材料选用退火态的 5083-O 铝合金与固溶时效态的 6061-T6 铝合金,两种铝合金焊接试板尺寸为 200 mm×70 mm×1 mm,所用填充焊丝为 Gulf Wire ER5356,直径 1.2 mm。母材和焊丝化学成分如表 1 所示。母材的平均抗拉强度和断后伸长率如表 2 所示。焊前用钢丝刷打磨铝合金表面氧化膜,并用丙酮和无水乙醇去除板材及焊丝表面油污和杂质。

表 1 母材和焊丝化学成分(质量分数) %

材料	Si	Fe	Cu	Mn	Mg	Cr	Zn	Ti	Al
5083-O	0.110	0.311	0.021	0.500	4.440	0.074	0.009	0.020	余量
6061-T6	0.635	0.397	0.268	0.082	1.074	0.205	0.003	0.030	余量
ER5356	0.050	0.120	0.005	0.120	4.900	0.120	0.005	0.090	余量

表 2 6061-T6 铝合金和 5083-O 铝合金力学性能

材料	抗拉强度/MPa	断后伸长率(%)
5083-O	287.5	22.1
6061-T6	352.0	11.7

1.2 试验方法

铝合金焊轧复合成形方法包括热导拘束 TIG 填丝焊和焊后局部轧制两个步骤,具体结构如图 1 所示。热导拘束焊接设备选用 OTC 交直流两用脉冲 TIG 焊机,本试验使用交流模式,送丝设备为 HC-71D 型送丝控制箱。为探讨热导拘束条件对焊接接头及其焊后局部轧制组织和力学性能的影响,采用了两种焊缝冷却形式:即焊接接头自由冷却成形和铜垫强制冷却成形。后者在焊接过程中采用了纯铜盖板 1 和铜垫 5,铜垫上开有宽 4 mm、深 2 mm 的强制冷却凹槽,且焊接时单侧铜制冷却盖板相对焊缝中心夹持距离为 5 mm,冷却铜垫和冷却盖板内部通有水冷箱提供的冷却水(图 1a)。

本试验所采用的焊接工艺经优化如下:送丝速度 5 000 mm/min,送丝角度 20°,TIG 焊枪和送丝装置处于同一平面,TIG 焊枪与水平面夹角 45°,保护气为 99.99%Ar,气体流量为 15 L/min,焊接速度为 350 mm/min,当采用无热导约束的焊缝自由成形时焊接电流为 70 A,当采用热导约束的铜垫强制冷却成形时焊接电流为 100 A。这是由于采用铜垫强制冷却模式时,焊接过程中铜垫会带走一部分热

源热量, 因此为确保获得相近的焊缝熔透能力, 所需要的电流相应会有所增加。

焊后试样在室温条件下进行一道次轧制, 轧制方向与焊接方向相同, 并设置轧辊的间距为母材的厚度, 即只对焊缝余高区域进行轧制(图 1b)。试验采用的工艺参数如表 3 所示。

图 1 铝合金焊轧复合成形方法示意图

1.冷却盖板 2. TIG 焊枪 3.焊缝余高
4.垫板基体 5.冷却衬垫 6.送丝装置 7.轧辊

表 3 工艺参数

编号	成形方式	焊接电流/A	焊接速度/(mm/min)	送丝速度/(mm/min)
I	自由冷却焊接	70	350	5 000
II	铜垫强制冷却焊接	100	350	5 000
III	自由冷却焊接+轧制	70	350	5 000
IV	铜垫强制冷却焊接+轧制	100	350	5 000

1.3 组织分析与性能测试

用线切割方法垂直焊接方向截取金相试样, 经抛光、研磨后用凯乐试剂(1 mL HF+1.5 mL HCl+2.5 mL HNO₃+95 mL H₂O)对其腐蚀 120 s, 然后使用 LEICA DMi8 型显微镜观察晶粒形貌。观察完成后使用 Touch HV-1000A 型触摸屏显微硬度计测量硬度分布, 测试压力 4.9 N, 加载时间 10 s, 以接头中心为基准点, 测试位置为距离板材上表面 0.5 mm, 测试间隔 0.25 mm。采用万能拉伸试验机进行试样的静拉伸试验, 试样尺寸如图 2 所示, 拉

伸速率设定为 2 mm/min, 每个焊接参数切取 3 个试样, 试验结果取平均值。

图 2 拉伸试样尺寸

2 试验结果

2.1 焊接及焊轧工艺成形

图 3 为采用两种不同冷却模式的焊接试样及焊轧试样接头横截面宏观形貌。从图中可知, 采用本试验焊接参数, 焊接和焊后轧制工艺均能够得到成形良好、没有缺陷的 5083-O 和 6061-T6 异种铝合金对接接头。从图 3a 和图 3b 中可以看出, 自由冷却焊接接头的焊缝区下塌量大于强制冷却焊接接头, 而强制冷却焊接接头的焊缝区窄而余高更大。焊后轧制使两种冷却方式焊接接头余高压扁并显著增加了焊缝区的宽度, 表明焊接接头同时发生了纵向变形和横向变形, 如图 3c 和图 3d 所示。钨极氩弧焊为热导焊的传热模式, 而铜垫具有强制成形作用的同时还能约束热量向焊缝两侧的传递, 使除作用于焊缝处的温度较高外, 其余位置的热量大部分被铜垫夹具吸收, 致使熔融的填丝金属向两侧铺展能力减弱。本试验中自由冷却和铜垫强制冷却焊接工艺的填丝量相同, 因此强制冷却焊接接头焊缝更窄且余高更大; 焊后局部轧制使得焊缝余高受到压应力向两侧扩展, 导致两种冷却方式的焊缝宽度均明显变宽, 相应的铜垫强制冷却焊接接头具有更大的变形量。

(a) 自由冷却焊接

(b) 铜垫强制冷却焊接

(c) 自由冷却焊接+轧制

(d) 铜垫强制冷却焊接+轧制

图3 接头横截面宏观形貌

2.2 显微组织

由于 6061-T6 铝合金焊接接头存在严重的热影响区软化现象, 因此 5083-O 与 6061-T6 异种铝合金焊接接头的薄弱位置在 6061-T6 侧热影响区。因此, 本文重点研究了不同冷却方式焊接工艺及焊轧复合工艺对焊接接头 6061-T6 侧显微组织形貌的影响。图 4 为 6061-T6 铝合金焊接接头典型的显微组织形貌示意图, 主要包括焊缝、部分熔化区、固溶区、过时效软化区、母材五部分。本试验中所选用的 6061-T6 母材显微组织形貌为典型的轧态纤维状组织, 如图 5 所示。

图4 6061 焊接接头典型组织形貌

图5 6061-T6 母材显微组织

图 6 为两种不同冷却模式下所获得的焊接接头金相组织。由图 6a、6b 所示, 自由冷却焊缝为粗大的树枝晶, 而铜垫强制冷却焊缝树枝晶形貌较细小。同时由图 6c 和 6d 可知, 相比于自由冷却焊接接头, 铜垫强制冷却焊接接头部分熔化区的宽度更小。而从图 6e~6h 中可以看出, 两种冷却模式的固溶区及过时效软化区受焊接热影响均出现晶粒形貌较母材粗大的现象, 且原始的纤维状组织特征已不明显。两种冷却模式下焊缝及部分熔化区组织形貌的不同, 主要是由于铜垫强制冷却导热能力优于空冷自由成形, 因此可使熔融焊缝金属具有较快的冷却速度, 形成的晶粒相对细小, 同时部分熔化区变窄。

(a) 自由冷却-焊缝

(b) 铜垫强制冷却-焊缝

(c) 自由冷却-部分熔化区

(d) 铜垫强制冷却-部分熔化区

(e) 自由冷却-固溶区

(f) 铜垫强制冷却-固溶区

(g) 自由冷却-过时效软化区

(h) 铜垫强制冷却-过时效软化区

图6 焊接工艺接头金相组织

图 7 为两种不同冷却模式下焊轧复合成形接头金相组织。焊后轧制工艺使得焊缝晶粒由原始焊态树枝晶形貌被压实, 见图 7a、7b。而轧制使焊缝余高压扁、焊缝区明显变宽(图 3c、3d), 不仅产生板厚方向的纵向压应力, 同时产生了平行焊接方向的横向变形应力, 造成紧邻焊缝的部分熔化区尺寸出现减小现象, 如图 7c、7d 所示。从图 7e~7h 中可以看出, 轧制后两种焊接接头的固溶区和过时效软化区的晶粒均发生位向改变甚至发生晶粒偏转现象。由图 7 可知, 由于铜垫强制冷却的焊缝较窄余高较高, 所以在后续轧制变形过程中, 其变形程度更大, 相应焊接接头各区域尺寸和组织形貌变化更剧烈。

2.3 硬度分布

对两种不同冷却模式的焊接及焊后轧制试样进行硬度测试, 硬度分布曲线如图 8 所示。

两种冷却方式焊接接头在 5083-O 侧(图 8a)具有相近的硬度分布特征, 虽然铜垫强制冷却焊接的电

流值较大(表 3), 但 5083-O 侧为退火态受热影响较小且强制冷却有热导约束的作用, 因此两者硬度差距不大。在距离熔合线 2~9 mm 处都出现硬度分布略低于母材的现象, 产生了软化现象, 而在最邻近焊缝处都出现了硬度大幅度上升的趋势说明在焊接热源的影响下填丝焊工艺发生了固溶强化现象^[13]。在焊缝区(图 8b), 铜垫强制冷却焊接由于焊缝处获取较多的焊接热输入, 损失了析出强化对性能的贡献, 其性能下降较大, 所以使得自由成形焊接试样焊缝处硬度值高于铜垫强制冷却成形的。而在 6061-T6 侧(图 8c), 自由冷却焊接接头热影响区硬度最低值仅为 59.5 HV, 软化区域超过 10 mm; 而铜垫强制冷却焊接接头热影响区硬度最低值为 65 HV, 软化区域明显变窄(约 5 mm)且向焊缝区大幅度偏移。这是因为 6061-T6 侧虽易受热影响但同样有铜垫约束热量向板材横向传播的能力和范围, 减少软化的程度, 所以铜垫强制冷却的 6061-T6 热影响区的硬度值更高些, 并且冷却的作用使软化区整体向焊缝中心偏移。

图 7 焊轧复合工艺接头金相组织

两种冷却方式焊轧接头在 5083-O 侧(图 8a)和焊缝区(图 8b)的硬度分布具有相同的趋势, 均得到大幅度提升, 且硬度值相近。从图 8c 中可看出, 两种焊接接头经过轧制后, 6061-T6 侧硬度值都有明显提升, 其中铜垫强制冷却的接头最薄弱位置硬度值提升幅度更大, 增长到 84.4 HV, 甚至超过了 5083-O 母材的硬度。这主要因为强制冷却焊接试样最薄弱的位置性能原本就优于自由成形的, 且更加靠近焊缝, 因此在轧制过程中得到的强化效果更加明显, 使软化区硬度得到大幅提升。而自由冷却焊接试样由于产生的软化程度较严重、范围较大(图 8c 自由成形-焊接曲线), 且轧制过程中变形强化的范围有限, 因此热影响区性能略有改善, 接头中性能最薄弱位置的硬度值由 59.5 HV 增长到 72.7 HV, 相对提升 22%, 仍低于 5083-O 侧性能, 所以接头中 6061-T6 侧热影响区仍是性能最薄弱的位置。

从 5083-O 和 6061-T6 异种铝合金焊轧接头硬度测试结果可以看出, 与自由冷却焊接接头相比, 强制冷却焊轧复合成形接头的软化最严重位置硬度值由 59.5 HV 提高到 84.4 HV, 提升幅度为 41.8%, 热影响区软化现象得到有效改善。

(a) 5083-O 侧硬度分布

(b) 焊缝硬度分布

图8 硬度分布曲线

2.4 拉伸性能

对两种冷却模式下的焊接试样及焊后轧制试样进行拉伸试验，焊接接头的拉伸位移-应力曲线如图9所示、拉伸断裂位置如图10所示。从图9中可以看出，自由冷却焊接试样的抗拉强度只有197 MPa，仅为6061-T6母材的55.9%；试样断裂位置出现在6061-T6热影响区，断后伸长率只有5.88%，仅为6061-T6母材的50.2%。铜垫强制冷却焊接试样的抗拉强度达到229.7 MPa，断裂位置亦出现在6061-T6热影响区，但是更加靠近焊缝，接头的抗拉强度为6061-T6母材的65.2%，断后伸长率只有6.24%。自由成形焊轧复合工艺试样的抗拉强度达到249.9 MPa，断裂位置仍然出现在6061-T6热影响区，接头的抗拉强度为6061-T6母材的70.9%，断后伸长率为5.3%。而当采用基于热导约束+局部变形强化的焊轧复合工艺后，接头抗拉强度达到288.6 MPa，与5083-O侧母材抗拉强度相当，断裂位置出现在5083-O侧母材处，且成45°斜断，断后伸长率为8.85%，抗拉强度相对自由成形焊接接头提升46.5%，断后伸长率提升50.5%。同时，发现具有热导约束能力的铜垫强制冷却焊接试样在局部变形强化后，拉伸性能显著提高的同时塑性也有明显提升，不同于无热导约束能力的自由冷却焊接试样，在局部变形强化后焊接接头符合一般的加工硬化规律，即强度增加塑性下降的现象。

本试验中焊轧复合成形接头的拉伸性能与硬度分布具有很好的对应关系，采用热导约束及局部变形强化方法后，使热影响区产生加工硬化作用，极大程度的改善了接头性能软化现象，降低了拉伸变形过程中应力应变集中在性能软化区的趋势，所以拉伸性能得到明显提升。而自由冷却焊轧试样，热影响区虽也产生加工硬化现象，但其强化程度较低，硬度仍小于5083-O母材的硬度，并出现性能陡降现

象，因而在拉伸时易出现应力应变集中于性能软化区内，所以造成强度提升塑性下降现象。

图9 拉伸位移-应力曲线

图10 拉伸试验接头断裂位置

3 结论

(1) 采用热导约束TIG填丝焊及焊轧复合成形工艺均能够得到成形良好、没有缺陷的5083-O和6061-T6异种铝合金接头。通过轧制使焊接接头同时发生了纵向变形和横向变形。与自由冷却焊接接头相比，强制冷却焊接接头焊缝区窄而余高大，焊后轧制的变形程度更大。

(2) 两种不同冷却模式的焊接接头经局部轧制后，焊缝区树枝晶均被压实、部分熔化宽度减小、固溶区和最邻近固溶区位置的过时效软化区的晶粒均发生了位向改变甚至晶粒偏转现象。且由于铜垫强制冷却在轧制过程中变形程度更大，所以导致各区域晶粒变形更剧烈。

(3) 与自由冷却焊接接头相比，强制冷却焊轧复合成形工艺使铝合金接头热影响区软化现象得到明显改善，其中软化最严重位置硬度值由59.5 HV提高到84.4 HV，提升幅度为41.8%；接头抗拉强度由199 MPa提升到288.6 MPa，相对提升了46.5%；接头断后伸长率由5.88%提升到8.85%，相对提升了50.5%；接头断裂位置由6061-T6侧热影响区转移至5083-O侧母材。

参 考 文 献

- [1] 龙江启, 兰凤崇, 陈吉清. 车身轻量化与钢铝一体化结构新技术的研究进展[J]. 机械工程学报, 2008, 44(6): 27-35.
LONG Jiangqi, LAN Fengchong, CHEN Jiqing. New technology of lightweight and steel-aluminum hybrid structure car body[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2008, 44(6): 27-35.
- [2] 王东, 何长树, 王浩, 等. 国产与进口 5183 焊丝及焊接接头组织与性能[J]. 东北大学学报, 2013, 34(1): 83-87.
WANG Dong, HE Changshu, WANG Hao, et al. Microstructure and mechanical properties of wire and welded joints using domestic and imported 5183 welding wire[J]. Journal of Northeastern University, 2013, 34(1): 83-87.
- [3] ELTAI E O, MAHDI E S. Tensile, hardness, and torsion behavior of welded AA[J]. Applied Mechanics and Materials, 2014, 575: 400-404.
- [4] 姚君山, 周万盛. 铝及铝合金的焊接[M]. 北京: 机械工业出版社, 2006.
YAO Junshan, ZHOU Wansheng. Welding of aluminium and aluminium alloys[M]. Beijing: China Machine Press, 2006.
- [5] 朱浩, 陈强, 陈剑虹. 热影响区几何尺寸对铝合金焊接接头变形及强度影响规律[J]. 焊接学报, 2012, 33(5): 77-81.
ZHU Hao, CHEN Qiang, CHEN Jianhong. Influence rule of HAZ geometrical dimension to aluminum alloy joint deformation and strength[J]. Transactions of the China Welding Institution, 2012, 33(5): 77-81.
- [6] MALOPHEYEV S, VYSOTSKIY I, KULITSKIY V, et al. Optimization of processing-microstructure- properties relationship in friction-stir welded 6061-T6 aluminum alloy[J]. Materials Science and Engineering: A, 2016, 662: 136-143.
- [7] GUNGOR B, KALUC E, TABAN E, et al. Mechanical and microstructural properties of robotic cold metal transfer (CMT) welded 5083-H111 and 6082-T651 aluminum alloys[J]. Materials & Design, 2014, 54(2): 207-211.
- [8] CHU Q L, BAI R X, JIAN H G, et al. Microstructure, texture and mechanical properties of 6061 aluminum laser beam welded joints[J]. Materials Characterization, 2018, 137: 269-276.
- [9] LIU F J, FU L, CHEN H Y. High speed friction stir welding of ultra-thin AA6061-T6 sheets using different backing plates[J]. Journal of Manufacturing Processes, 2018, 33: 219-227.
- [10] 申浩, 杨新岐, 李冬晓, 等. 6061-T6 铝合金的静止轴肩搅拌摩擦焊工艺及组织性能[J]. 焊接学报, 2016(5): 119-123.
SHEN Hao, YANG Xinqi, LI Dongxiao, et al. Microstructures and mechanical properties of 6061-T6 aluminum alloy welded by stationary shoulder friction stir welding process[J]. Transactions of the China Welding Institution, 2016(5): 119-123.
- [11] YI J, GYAN G, LI S K, et al. Effect of post-weld heat treatment on microstructure and mechanical properties of welded joints of 6061-T6 aluminum alloy[J]. Transactions of Nonferrous Metals Society of China, 2019, 29(10): 2035-2046.
- [12] AHMAD R, BAKAR M A. Effect of a post-weld heat treatment on the mechanical and microstructure properties of AA6061 joints welded by the gas metal arc welding cold metal transfer method[J]. Materials & Design, 2011, 32(10): 5120-5126.
- [13] 刘强, 张南南, 张亚雄. 深冷处理对 6061 铝合金冷金属过渡焊接接头组织和力学性能的影响[J]. 热加工工艺, 2017, 46(19): 244-246.
LIU Qiang, ZHANG Nannan, ZHANG Yaxiong. Effect of cryogenic treatment on microstructure and mechanical properties of 6061 aluminum alloy CMT welding joint[J]. Hot Working Technology, 2017, 46(19): 244-246.
- [14] 季凯, 倪赓, 李小兵, 等. 深冷处理对 6005A 铝合金焊接接头组织与性能的影响[J]. 金属热处理, 2016, 41(12): 127-130.
JI Kai, NI Geng, LI Xiaobing, et al. Effect of cryogenic treatment on microstructures and mechanical properties of welded joint of 6005A aluminum alloy[J]. Heat Treatment of Metals, 2016, 41(12): 127-130.
- [15] 宋刚, 刘黎明, 张兆栋, 等. 一种铝合金焊接接头软化区强韧化方法: 中国, 201911320768.6[P]. 2019-12-20.
SONG Gang, LIU Liming, ZHANG Zhaodong, et al. A method for strengthening and toughening the softening zone of an aluminum alloy welded joint: China, 201911320768.6[P]. 2019-12-20.

作者简介: 宋刚(通信作者), 男, 1978 年出生, 博士, 副教授, 博士研究生导师。主要研究方向为轻量化材料先进焊接理论及方法。
E-mail: songgang@dlut.edu.cn