

DOI:10.3969/j.issn.1003-5060.2026.03.009

水冷辅助铝/镁异材搅拌摩擦焊接头 金属间化合物析出行为

吴安邦¹, 安井利明², 张昊晨²

(1. 东北大学 材料各向异性与织构教育部重点实验室, 辽宁 沈阳 110819; 2. 丰桥技术科学大学 机械工学系, 日本 丰桥 441-8580)

摘要:文章在大气与水冷辅助下分别对 2 mm 厚的 AZ31B/6061-T6 异种合金薄板进行搅拌摩擦对接焊接, 并分析水冷对搅拌摩擦焊(friction stir welding, FSW)异质接头脆性金属间化合物(intermetallic compounds, IMCs)析出行为的影响。结果表明:水冷接头焊接时的峰值温度和高温停留时间均低于大气焊接时, 焊缝平均焊接温度低于 350 °C, 且温降速率更快;水冷辅助 FSW 接头脆性 IMCs 的析出量较大气辅助 FSW 有所减少, 界面处 IMCs 层厚度显著降低;水的比热容较大, 能够有效吸收焊接热, 冷却效果显著, 但也导致材料塑性流动遭到削弱, 易引起接头隧道缺陷的发生以及诱发淬火残余应力。

关键词:铝/镁异种合金;搅拌摩擦焊(FSW);水冷辅助;金属间化合物(IMCs);焊接热循环

中图分类号:TG453.9 **文献标志码:**A **文章编号:**1003-5060(2026)03-0342-05

Intermetallic compounds precipitation behavior of water-cooled assisted Al/Mg dissimilar friction stir welding joints

WU Anbang¹, YASUI Toshiaki², ZHANG Haochen²

(1. Key Laboratory for Anisotropy and Texture of Materials, Ministry of Education, Northeastern University, Shenyang 110819, China;

2. Department of Mechanical Engineering, Toyohashi University of Technology, Toyohashi 441-8580, Japan)

Abstract: AZ31B/6061-T6 dissimilar alloys sheets with thickness of 2 mm were used to carry out friction stir butt welding, which were under atmosphere and water-cooled assisted conditions, respectively. The influence of water-cooled condition on the precipitation behavior of brittle intermetallic compounds(IMCs) in dissimilar friction stir welding(FSW) joints was studied. Results show that peak temperature and high temperature duration of joints under water-cooled condition were lower than those under atmospheric condition, which exhibited an average welding temperature of 350 °C at welding line and a faster cooling rate. Besides, the precipitation of brittle IMCs in water-cooled assisted FSW joints was decreased comparing to that under atmospheric condition, and the thickness of IMCs was apparently decreased. Specific heat capacity of water is high, which can effectively absorb welding heat and has a remarkable cooling effect. However, it also weakens the plastic flow of materials, which may lead to tunnel defects and induce quenching residual stress.

Key words: aluminum/magnesium dissimilar alloys; friction stir welding(FSW); water-cooled assisted method; intermetallic compounds(IMCs); welding thermal cycle

近年来,为实现节能减排的目标,汽车结构轻量化的研究与应用得到了学术界广泛关注。铝/镁合金因密度低、比强度高等优势^[1],满足了汽车

制造等不同行业部门对轻量化和节能的追求^[2-3]。铝/镁合金复合构件的连接技术一般采用焊接工艺,然而,传统熔焊技术容易导致接头处形成凝固

收稿日期:2023-11-26;修回日期:2023-12-07

基金项目:特种焊接技术安徽省重点实验室开放基金资助项目(2023SW1002)

作者简介:吴安邦(1998—),男,安徽合肥人,东北大学硕士生;

安井利明(1970—),男,日本爱知人,博士,丰桥技术科学大学副教授,博士生导师。

裂纹、气孔等严重缺陷;另外,铝/镁共晶反应温度低,较大的热输入将增加 $\text{Al}_{12}\text{Mg}_{17}$ 、 Al_3Mg_2 为主的脆性金属间化合物(intermetallic compounds, IMCs)的析出倾向,严重危害接头力学性能,因此熔焊无法实现铝/镁合金间的有效连接^[4-5]。搅拌摩擦焊(friction stir welding, FSW)是一种固相焊接方法,焊接热输入低于传统熔焊工艺,针对轻金属焊接具有显著优势^[6]。然而,尽管铝/镁异材 FSW 焊接温度远低于基材熔点,仍无法避免低共晶温度的脆性 IMCs 析出。文献[7]研究了铝/镁 FSW 接头处 IMCs 析出行为,发现较低焊速下焊接热输入显著升高,脆性 IMCs 在搅拌区(stir zone, SZ)大量析出,接头强度较差。文献[8]对比分析了大气与水下 FSW 峰值温度、接头组织性能,发现在大气中焊缝核心温度可能已经超过 IMCs 的共晶温度;而水下焊接时焊缝核心温度较低,且升温、降温速率更快,界面处 IMCs 的析出量显著下降。文献[9]设计了新型水雾喷淋冷却装置,水冷缓解了因焊接热所导致的残余应力变形,并抑制了第二相粒子粗化,因此接头的强度、断裂延伸率均有所提高。文献[10]研究了不同水温条件下 AZ31B/6061 异材中厚板水冷辅助搅拌摩擦焊,对比大气、0 °C 水、15 °C 水和 60 °C 水中的焊接结果,发现水温较低时,IMCs 的析出明显得到抑制,从而较大地提高了接头强度和断裂延伸率。考虑到薄板沿板厚方向的温度分布较厚板更均匀,IMCs 的析出行为易调控,因此水冷辅助 FSW 试验的研究多集中在厚板与中厚板,然而已有研究表明,薄板铝/镁合金 FSW 接头处 IMCs 的严重析出现象同样是制约接头强度提升的重要原因。目前,国内外关于水冷辅助薄板铝/镁异材 FSW 的研究鲜有报道,本文以 2 mm 厚铝合金、镁合金薄板为研究对象,探究水冷辅助异材 FSW 接头成形效果,分析水冷对铝/镁异材 FSW 接头 IMCs 析出的影响,为控制、减少铝/镁异材 FSW 接头 IMCs 析出提供方法与依据。

1 研究材料与方法

本研究选用 AZ31B 镁合金和 6061-T6 铝合金作为基材,工件尺寸为 100 mm × 50 mm × 2 mm。焊接试验设备为 MP-46VHT 数控加工中心,焊接基材采用对接配置,镁合金放置在前进侧(advancing side, AS)。研究所用搅拌针为长 1.7 mm 的圆柱,侧面为螺距 0.8 mm 的左旋螺纹;轴肩表面向内凹陷,直径 15 mm。搅拌头转速为

1 000 r/min,焊速 50 mm/min,压下量 0.15 mm,搅拌头向镁侧偏置以达到消除宏观缺陷的目的。其他焊接工艺参数见表 1 所列。利用嵌入基材预制槽中的 K 型热电偶测量焊接核心区域的温度。水冷过程如图 1 所示,通过固定在搅拌头上的管道,向轴肩行进后方的基材上表面附近喷淋冷却水流,其中红色直箭头为焊接方向,蓝色旋转箭头为搅拌头旋转方向。

表 1 焊接工艺参数

试样编号	1	2	3	4
偏置量/mm	0.6	0.8	0.6	0.8
环境条件	大气	大气	水冷	水冷

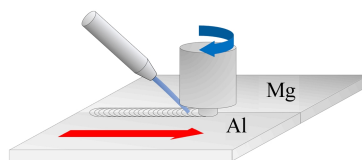


图 1 水冷辅助搅拌摩擦焊示意图

以焊缝为中心切取金相样品,试样表面经打磨、抛光后用镁合金腐蚀液腐蚀 4~6 s。利用 ECLIPSE LV150N 型光学显微镜(optical microscope, OM)观察接头横截面方向上的宏观形貌,使用 JSM-IT100 型扫描电子显微镜(scanning electron microscope, SEM)及能谱仪(energy dispersive spectrometer, EDS)表征分析接头横截面各区域微观组织。

2 结果与分析

2.1 焊缝表面宏观形貌

试样 1~试样 4 焊缝表面宏观形貌如图 2 所示。由图 2a、图 2b 可知,由于搅拌头向镁侧偏置,试样 1 和试样 2(大气环境)焊缝表面没有明显缺陷,但部分位置发现“起皮”现象。轴肩的挤压、摩擦作用往往导致其正下方材料发生局部液化并被轴肩挤出,与空气接触后迅速凝固,因此焊缝表面“起皮”现象标志焊接峰值温度过高。由图 2c 和图 2d 可知,试样 3 和试样 4(水冷环境)的焊缝表面平整且不存在“起皮”,说明水冷有效地降低了焊接峰值温度,然而在前进侧发现一道从焊缝根部起、直至匙孔的裂纹,与焊缝几乎等长(图 2d 中黄色矩形)。对比图 2b、图 2d 可知,水冷对焊缝成形作用较为复杂。水冷过程与淬火类似,淬火前基材保持较高温度,此时材料屈服强度

较低,一旦经历快速降温,材料发生收缩,并由于收缩应力高于屈服强度而发生塑性变形;此外,由于试样基材较薄,热传导速率较高,淬火时基材表面至心部温度梯度较缓,从而使其整体发生塑性变形^[11-12]。由于搅拌头向镁侧偏置,在镁侧搅拌区与热机影响区间产生较大的应力,导致此处极易萌生裂纹,裂纹在残余应力作用下继续扩展,最终沿厚度方向贯穿接头。

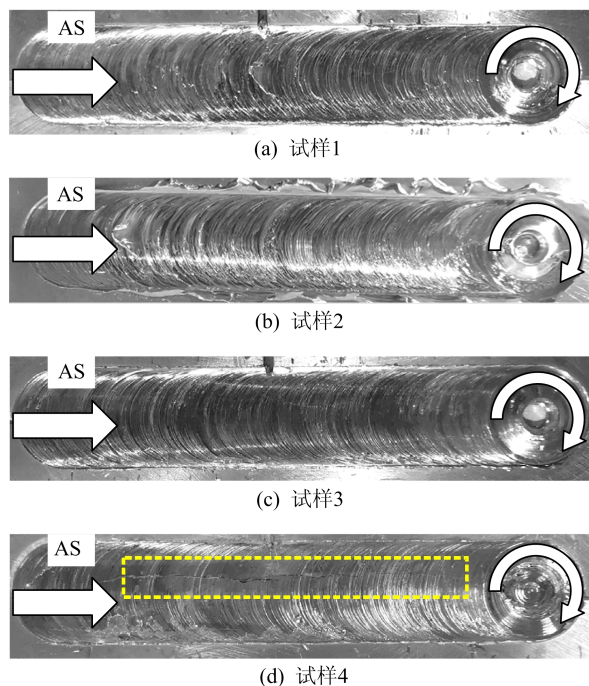


图 2 不同试样焊缝表面宏观形貌

2.2 接头宏观形貌

不同试样接头横截面宏观形貌如图 3 所示。由图 3a、图 3c 可知:试样 1 底部存在孔洞缺陷,这是由于搅拌头对底部材料作用较弱,材料塑性流动较差导致的,但材料流动较好的上、中部结合紧密,无宏观缺陷;试样 3 由于冷却水流削弱了材料塑性流动能力,水冷接头上半部分材料结合不紧密,界面间存在大体积孔洞缺陷,中、下部材料流动则进一步遭到削弱,形成隧道缺陷,如图 3c 中椭圆框线所示。由图 3b、图 3d 可知,增加向镁合金侧的偏置量无法改善材料混合,依然会发生严重的隧道缺陷。当冷却速率过大时,前进侧材料片层无法迁移至后退侧,因此形成隧道缺陷;结合图 2d 可见,前文所述的前进侧裂纹沿夹层结构扩展,几乎贯穿整个横截面。由于降温速率过大,搅拌杆后侧空腔没有得到有效填充,留下的孔洞缺陷成为裂纹源,在残余应力作用下裂纹沿夹层结构扩展,最终贯穿接头横截面。

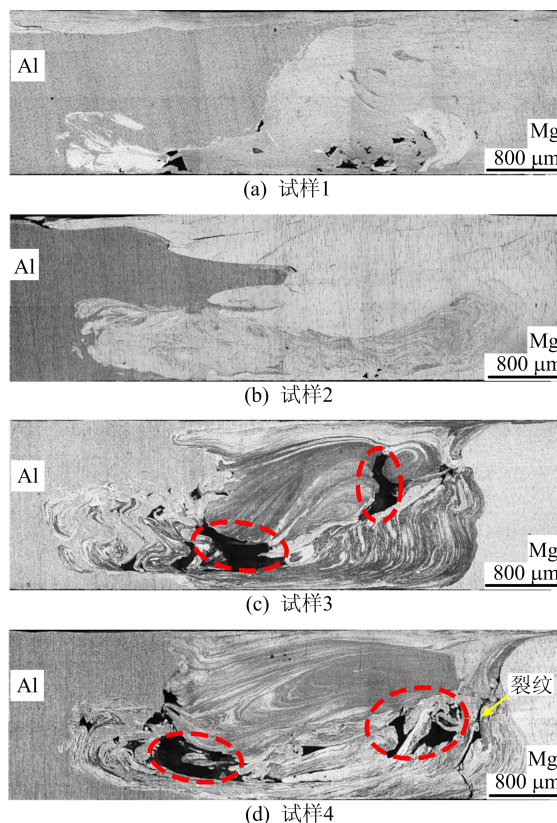


图 3 试样横截面的宏观形貌

2.3 接头微观形貌

试样 1 接头横截面微观形貌及化学成分如图 4 所示。图 4 中红色虚线为铝/镁界面。

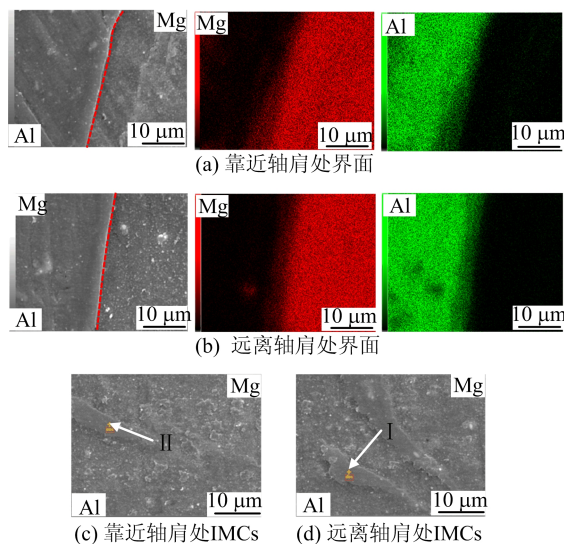


图 4 试样 1 的 SZ 微观形貌

由图 4a、图 4b 可知,大气 FSW 接头界面存在于厚度为 $6\sim 10\ \mu\text{m}$ 的 IMCs 层,靠近上表面的 IMCs 层厚于中下部受到轴肩的摩擦与剪切作用,上半部分材料温度更高,原子扩散速率更快,

导致 IMCs 层较厚。点 I 和 II 的化学成分见表 2 所列,其主要成分为 $Mg_{17}Al_{12} + Mg$ 。

表 2 试样 1 金属间化合物附近的化学成分

分析位置	$x(Mg)/\%$	$x(Al)/\%$	可能的相组成
I	67.88	32.12	$Mg_{17}Al_{12} + Mg$
II	73.62	26.38	$Mg_{17}Al_{12} + Mg$

试样 2 的微观形貌如图 5 所示,化学成分见表 3 所列。由于搅拌头更偏向镁侧,预计焊接温度稍低于试样 1,因此界面附近 IMCs 层更薄。由表 3 可知,点 VII 推测存在 $Mg_{17}Al_{12}$ 型 IMCs。

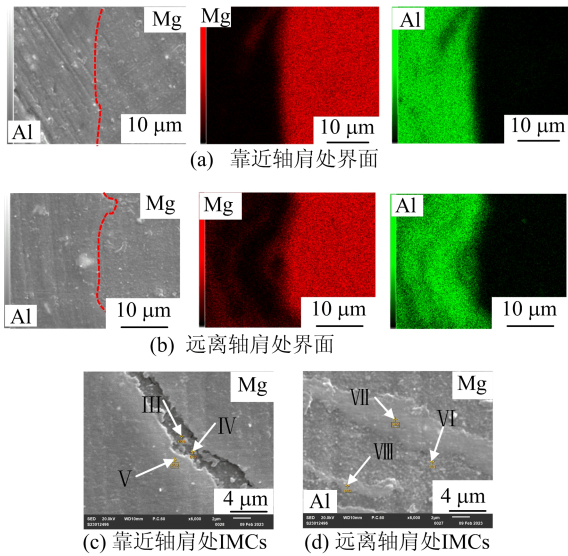


图 5 试样 2 的 SZ 微观形貌

表 3 试样 2 金属间化合物附近的化学成分

分析位置	$x(Mg)/\%$	$x(Al)/\%$	可能的相组成
III	87.72	12.28	Mg
IV	85.70	14.30	Mg
V	75.14	24.86	$Mg_{17}Al_{12} + Mg$
VI	96.07	3.93	Mg
VII	69.51	30.49	$Mg_{17}Al_{12} + Mg$
VIII	89.47	10.53	Mg

试样 3、试样 4 的微观形貌如图 6 所示,化学成分见表 4 所列。图 6a 为试样 3 接头界面, IMCs 层的厚度均低于常规焊接接头,EDS 分析表明 IMCs 层厚度在 $4 \mu m$ 以下。图 6b 为夹层结构微观形貌,EDS 分析表明此处存在异质金属混合,但未发现 IMCs 层。由表 4 可知:受制于设备性能,无法确定点 IX 和 X 处是否存在 IMCs 薄层;但即使存在 IMCs,其厚度显然远小于大气 FSW 接头析出的 IMCs 层。图 6c 所示界面观察到有限的元素扩散,但不存在明显的 IMCs 层。此外,在镁侧观察到一些含有少量铝元素的弥散相,其形貌类似共晶组

织,但由于此处检测到的铝元素浓度过低,推测是镁合金母材中原有的第二相粒子。

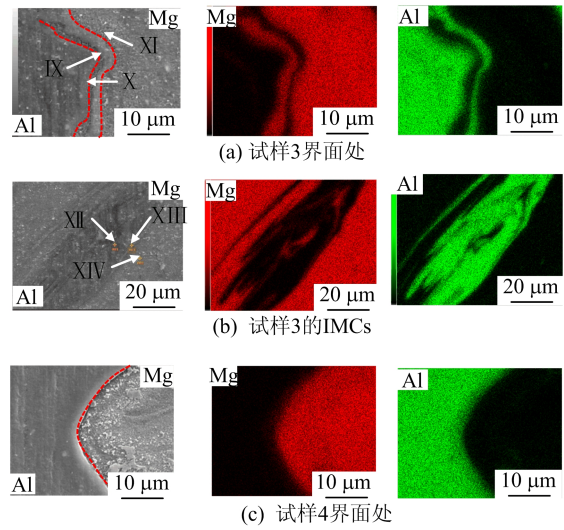


图 6 试样 3 和试样 4 的 SZ 微观形貌

表 4 试样 3 和试样 4 金属间化合物附近的化学成分

分析位置	$x(Mg)/\%$	$x(Al)/\%$	可能的相组成
IX	20.51	79.49	$Al_3Mg_2 + Al$
X	75.80	24.20	$Mg_{17}Al_{12} + Mg$
XI	94.93	5.07	Mg
XII	2.09	97.91	Al
XIII	97.12	2.88	Mg
XIV	68.01	31.99	$Mg_{17}Al_{12} + Mg$

焊接接头的 X 射线衍射(X-ray diffraction, XRD)测试结果如图 7 所示。由图 7 可知:试样 1、试样 2 中存在 $Mg_{17}Al_{12}$ 和 Al_3Mg_2 衍射峰,且衍射强度较高;试样 3、试样 4 中 $Mg_{17}Al_{12}$ 衍射强度低, 36.8° 附近的 $Mg_{17}Al_{12}$ 衍射峰几乎消失。证明了冷却条件对抑制 IMCs 析出具有积极作用。

铝/镁异材 FSW 接头中 IMCs 存在扩散和共晶反应 2 种析出途径。铝、镁原子的扩散集中在 2 种金属相互结合的位置,即界面与夹层结构。通过扩散机制形成的 IMCs 通常析出于铝/镁界面,呈现 $(Mg_{17}Al_{12} + Al_3Mg_2)$ 双层形貌;通过共晶反应生成的 IMCs 含量较少,这是由于共晶反应需要满足一定的温度和化学配比,反应发生条件较为苛刻。 $Mg_{17}Al_{12}$ 、 Al_3Mg_2 分别在 437 、 $450^\circ C$ 下析出,而本研究接头平均温度基本无法达到 $430^\circ C$,未达到共晶反应温度;另外,搅拌头的机械作用对元素扩散作用较弱,接头处铝、镁原子不满足共晶反应的化学配比。因此,共晶反应析出的 IMCs 远少于因扩散反应形成的 IMCs。

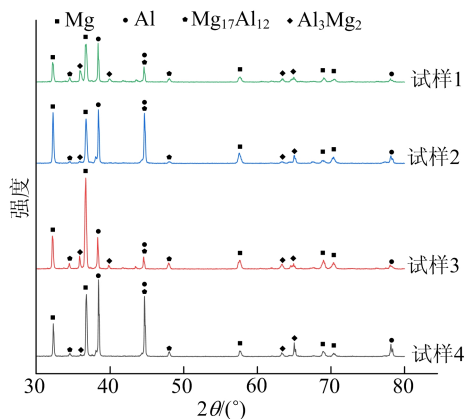


图 7 大气与水冷辅助下试样横截面的 XRD 谱图

2.4 接头界面热循环

试样 2(大气)和试样 4(水冷)接头热循环曲线如图 8 所示。由图 8 可知,水冷作用下,接头处峰值温度和高温停留时间均低于大气作用下,且降温速率更快(如红线和蓝线所示)。降低峰值温度、减少高温停留时间,有利于减缓原子扩散速率,从而阻止了界面处 IMCs 的析出^[13]。然而,由于基材厚度较薄,在厚度方向上导热良好,且水流吸收并带走大量热量,导致接头处温度过低,基材尤其是镁合金在较低温度下变形困难,因此材料流动不足。热循环曲线验证了图 3、图 4 中材料流不足是焊接温度过低造成的。

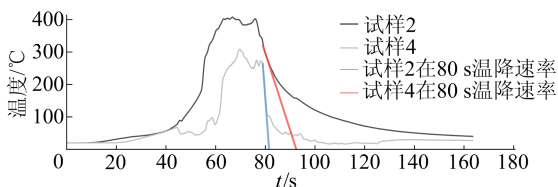


图 8 测温点热循环曲线

3 结 论

水冷辅助能有效抑制铝/镁异材 FSW 接头脆性 IMCs 的析出,接头处 IMCs 层厚度由 6~10 μm 降至 4 μm 以下,这是由于水流的冷却作用降低了焊接峰值温度和高温停留时间,IMCs 的生成减少乃至完全消失。水的比热容较大,能够吸收大量焊接热,因此有效降低接头峰值温度并阻碍原子扩散,但也存在削弱塑性流动的副作用,增加了接头发生隧道缺陷的概率。尽管搅拌头向镁侧偏置能够强化接头材料的结合,但也在镁侧产生了较大应力,结合淬火残余应力易诱发 SZ 与热机械影响区(thermo-mechanically affect-

ed zone, TMAZ) 交界处形成贯穿性裂纹。

[参 考 文 献]

- [1] SHI L, WU C. Transient model of heat transfer and material flow at different stages of friction stir welding process [J]. *Journal of Manufacturing Processes*, 2017, 25: 32-39.
- [2] 袁序弟. 轻金属材料在汽车上的应用[J]. *汽车工艺与材料*, 2002(10): 30-33.
- [3] 袁择. 铝和铝合金的焊接概述[J]. *现代焊接*, 2010(11): 49-52, 54.
- [4] BORRISUTTHEKUL R, MIYASHITA Y, MUTOH Y. Dissimilar material laser welding between magnesium alloy AZ31B and aluminum alloy A5052-O[J]. *Science and Technology of Advanced Materials*, 2005, 6(2): 199-204.
- [5] QI X, LIU L. Fusion welding of Fe-added lap joints between AZ31B magnesium alloy and 6061 aluminum alloy by hybrid laser-tungsten inert gas welding technique[J]. *Materials & Design*, 2012, 33(1): 436-443.
- [6] FIROUZDOR V, KOU S. Al-to-Mg friction stir welding: effect of material position, travel speed, and rotation speed [J]. *Metallurgical and Materials Transactions: A*, 2010, 41(11): 2914-2935.
- [7] MOHAMMADI J, BEHNAMIAN Y, MOSTAFAEI A, et al. Friction stir welding joint of dissimilar materials between AZ31B magnesium and 6061 aluminum alloys; microstructure studies and mechanical characterizations[J]. *Materials Characterization*, 2015, 101: 189-207.
- [8] MOFID M A, ABDOLLAHZADEH A, MALEK GHAINI F. The effect of water cooling during dissimilar friction stir welding of Al alloy to Mg alloy[J]. *Materials and Design*, 2012, 36: 161-167.
- [9] 孟令斐, 卢林, 方超, 等. 基于水雾冷却的薄板铝合金高转速搅拌焊接技术研究[J]. *电焊机*, 2019, 49(3): 66-71.
- [10] CHEN W, WANG W X, LIU Z P, et al. Improvement in tensile strength of Mg/Al alloy dissimilar friction stir welding joints by reducing intermetallic compounds [J]. *Journal of Alloys and Compounds*, 2021, 861: 157942.
- [11] ROBINSON J S, TANNER D A. Residual stress development and relief in high strength aluminium alloys using standard and retrogression thermal treatments[J]. *Materials Science and Technology*, 2003, 19(4): 512-518.
- [12] GUR C H, TEKKAYA A E. Numerical investigation of non-homogeneous plastic deformation in quenching process[J]. *Materials Science and Engineering*, 2001, 319/320/321: 164-169.
- [13] 徐洋, 柯黎明, 聂浩, 等. 局部强冷作用下厚板铝合金/镁合金搅拌摩擦焊界面金属间化合物的析出行为[J]. *金属学报*, 2024, 60(6): 777-788.

(责任编辑 闫杏丽)