

转速对 2024-T4 铝合金水下搅拌摩擦焊接接头 组织与性能的影响

王快社, 吴楠, 王文, 丁凯, 郭强

(西安建筑科技大学 冶金工程学院, 西安 710055)

摘要: 采用水下搅拌摩擦焊接技术(Submerged friction stir welding, SFSW)对 2024-T4 铝合金板材进行连接, 研究搅拌头转速对 SFSW 接头焊接温度场、焊核区析出相形貌以及接头力学性能的影响。结果表明: 循环水冷介质具有明显的瞬时快冷作用; 随着搅拌头转速从 600 r/min 增大到 1 180 r/min, SFSW 接头焊接温度场峰值由 271.0 °C 增大到 310.8 °C; 焊核区析出相在热循环作用下析出并长大。析出相的数量逐渐增多, 尺寸增大; SFSW 接头焊核区显微硬度平均值由 117.5HV 降低至 99.2HV、抗拉强度和伸长率分别由 403.3 MPa 和 3.24%降低至 334.5 MPa 和 1.44%。

关键词: 铝合金; 水下搅拌摩擦焊接; 转速; 组织; 性能

中图分类号: TG456.5

文献标志码: A

Effect of rotation speed on microstructure and properties of 2024-T4 aluminum alloy submerged friction stir weld

WANG Kuai-she, WU Nan, WANG Wen, DING Kai, GUO Qiang

(College of Metallurgical Engineering, Xi'an University of Architecture and Technology, Xi'an 710055, China)

Abstract: 2024-T4 aluminum alloy plate was jointed by submerged friction stir welding (SFSW). The effects of rotation speed on the welding temperature fields of SFS weld, precipitate morphology of the nugget zone and mechanical properties of SFS weld were investigated. The results show that the cooling water circulation medium has significant instantaneous cooling effect; the peak value of welding temperature fields increases from 271.0 °C to 310.8 °C with the rotation speed increases from 600 r/min to 1180 r/min. The precipitate phases of the nugget zone precipitate and grow under welding thermal cycle. The quantity and size of the precipitates gradually increase with the increase of the rotation speed. The average value of microhardness in the nugget zone of SFS weld decreases from 117.5HV to 99.2HV with the increase of the rotation speed, meanwhile, tensile strength and elongation of SFS weld decrease from 403.3 MPa and 3.24% to 334.5 MPa and 1.44%, respectively.

Key words: aluminum alloy; submerged friction stir welding; rotation speed; microstructure; properties

铝合金由于具有比强度高、疲劳性能好、耐腐蚀性强等优点, 广泛应用于航空、航天、船舶和汽车等领域。铝合金的焊接方法主要有熔化极气体保护焊、钨极惰性气体保护焊、等离子弧焊、激光焊和电子束焊等。这些传统的熔化焊接方法容易产生气孔、裂纹

等缺陷, 所得焊接接头的强度较低, 仅为母材强度的 50%~70%^[1]。

1991 年, 英国焊接研究所开发了一种新型的固相连接技术即搅拌摩擦焊(Friction stir welding, FSW), 为铝合金的低成本、高效率 and 高质量连接提供了有效方

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51074119); 陕西省教育厅科学研究计划资助项目(11JK0802); 西安市工业应用技术研发项目(CXY1124(4))

收稿日期: 2012-03-05; **修订日期:** 2012-11-15

通信作者: 王快社, 教授, 博士; 电话: 029-82205096; E-mail: wangkuaishe888@126.com

法^[2]。在 FSW 过程中,被焊接材料产生剧烈的塑性变形,可实现焊接接头组织细化和均匀化。焊接过程中较低的热循环作用,避免了气孔、裂纹等熔焊缺陷的产生,减小了组织粗化倾向,使焊接接头具有较高的强度和韧性^[3-4]。但是,FSW 过程中产生了大量的摩擦热和塑性变形热,使焊接接头存在明显的热软化效应^[5-6],导致焊接接头强度仍低于母材强度。

针对这一问题,目前国内外的一些学者采用冷却介质在焊接过程中对被焊工件进行强制冷却,以减弱焊接温度场对接头的热软化效应,从而改善接头的组织性能。LIU 等^[7-8]分别在水与空气介质中对 2219 铝合金进行 FSW,发现水中 FSW 接头的抗拉强度高于空气中 FSW 接头的抗拉强度,但伸长率略低。FRATINI 等^[9]也进行了类似的实验,发现水冷条件下 FSW 接头强度更高,软化区域明显缩小。BENAVIDES 等^[10]在液氮强冷环境中对 2024 铝合金进行 FSW,并测量了其焊接温度场,发现冷却介质能有效抑制材料再结晶晶粒的长大。FU 等^[11]和 FRATINI 等^[12]研究了 7 系铝合金在冷却介质中的 FSW。STARON 等^[13]和李光等^[14]研究了冷却介质中 FSW 接头的残余应力特征。另外,还有学者研究了不锈钢、紫铜、镁合金以及异种材料在冷却介质中的搅拌摩擦焊接与加工^[15-18]。

本文作者采用水下搅拌摩擦焊接技术(Submerged friction stir welding, SFSW)对 2024-T4 铝合金板进行连接,研究搅拌头转速对 SFSW 焊接温度场与接头焊核区析出相析出状况的影响,分析转速对接头显微硬度和拉伸性能影响的机理。

1 实验

实验选用 70.0 mm×60.0 mm×3.0 mm 的 2024-T4 铝合金板材进行 SFSW,铝合金的化学成分(质量分数,%)为 4.41Cu, 1.61Mg, 0.27Fe, 0.59Mn, 0.17Si, Al 余量,其力学性能如表 1 所列。SFSW 在改造的 X5032 型立式升降台铣床上进行。搅拌头工具材料为 W18Cr4V,搅拌头轴肩直径为 12 mm,搅拌针直径为 3.4 mm,高度为 2.8 mm。搅拌头的焊接速度恒定为 47.5 mm/min,转速分别为 600、750、950 和 1 180 r/min,焊接时压下量为 0.2 mm。实验时,首先将铝合金板接头端面用刨床刨平,再用钢丝刷将工件待焊接表面刷干净,并用丙酮清洗。然后,将被焊接材料用压板固定在冷却水槽内,采用循环水冷却,水流速度为 0.15 L/s,冷却水的初始温度为 25.3 ℃。

表 1 2024-T4 铝合金的力学性能

Table 1 Mechanical properties of 2024-T4 aluminum alloy

Tensile strength/MPa	Elongation/%	Hardness, HV
464.2	18.5	140.0

为了了解 SFSW 过程中搅拌头转速对焊核区温度场的影响,采用热电偶对焊件在不同转速下进行测温实验。由于焊接过程中,焊核区材料会在搅拌针的直接作用下发生严重的塑性变形,无法填埋热电偶直接测量该区的实际温度,因此,设计测温点使其紧邻于搅拌针外侧,位置距离焊缝中心 3.5 mm 处。实验时,首先在被测铝板特征点处加工直径为 1.2 mm、深为 10 mm 的盲孔,孔底为测温点所在位置,实验时热电偶测量端头在孔底处与材料相接触,并使用 705 硅胶连接。热电偶预埋位置如图 1 所示。

采用 JSM-6700F 型场发射扫描电子显微镜 BSE 模式观察析出相形貌。采用 401MVD 型数显显微维氏硬度计进行显微硬度测试,测试位置为沿试样横截面厚度中心水平方向。采用 WDW-100D 型电子拉伸机对试样进行室温拉伸,拉伸速度为 0.5 mm/min。采用 OXFORD S-3400N 型扫描电子显微镜观察拉伸试样断口形貌。

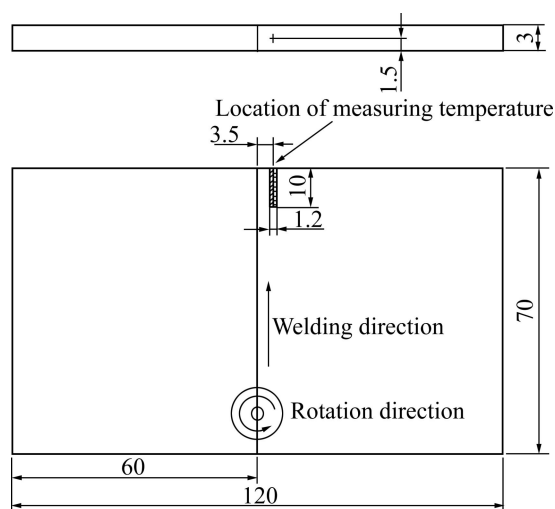


图 1 测温点示意图

Fig. 1 Schematic diagram of point for measurement of temperature (Unit: mm)

2 结果与讨论

2.1 温度场分布

图 2 所示为不同转速条件下 SFSW 特征点的温度曲线。从图 2 可见,各特征点温度值都经历了一个相

同的变化规律,即温度变化趋势都是随着搅拌头的移动由低温逐渐升高,直至搅拌头通过该点时到达最高温,随着搅拌头的撤离,温度又由高温逐渐降低。转速为600、750、950和1180 r/min时的特征点峰值温度分别为271.0、278.3、292.8和310.8 °C,表明当其他焊接参数相同时,随着转速的增大,焊件的热输入量增大。这是因为SFSW的热量主要来源于搅拌头与焊材的摩擦生热和材料的塑性变形热,而搅拌头转速的高低会影响摩擦生热的大小,因此,搅拌头转速越高,摩擦生热量也越多。图2所示的热循环曲线表现出近乎相同的升温和降温速率,表明循环水冷条件具有明显的瞬时快冷作用。需要说明的是,由于热电偶

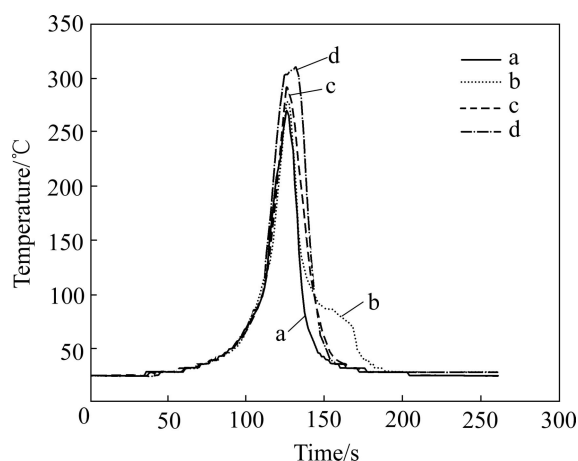


图2 不同转速下SFSW温度曲线

Fig. 2 Temperature profiles of SFSW at different rotation speeds: (a) 600 r/min; (b) 750 r/min; (c) 950 r/min; (d) 1180 r/min

测温端头无法与测温点孔底处完全紧密接触,稍有间隙会导致测得温度略微低于实际温度,但不会影响不同转速下温度峰值的变化趋势。

2.2 焊核区析出相形貌

图3所示为2024-T4铝合金的第二相形貌。2024-T4母材为自然时效态,由图3可以看到与基体半共格和非共格的 $S\text{-Al}_2\text{CuMg}$ 相^[5]和杂质相。在SFSW过程中,焊核区的温度为300~350 °C,远远低于 S 相的固溶温度518 °C^[19],使得 S 相未固溶到铝基体中,仅发生了不同程度的析出长大行为。图4所示为焊接速度恒定为47.5 mm/min,旋转速度分别为600、750、950和1180 r/min时,焊核区 S 析出相的形貌和分布形态。对比发现,随着转速的增大, S 相的析出数量

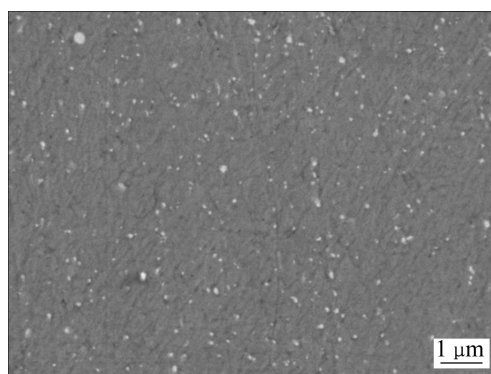


图3 2024-T4铝合金的第二相形貌

Fig. 3 Morphology of second phases of 2024-T4 aluminum alloy

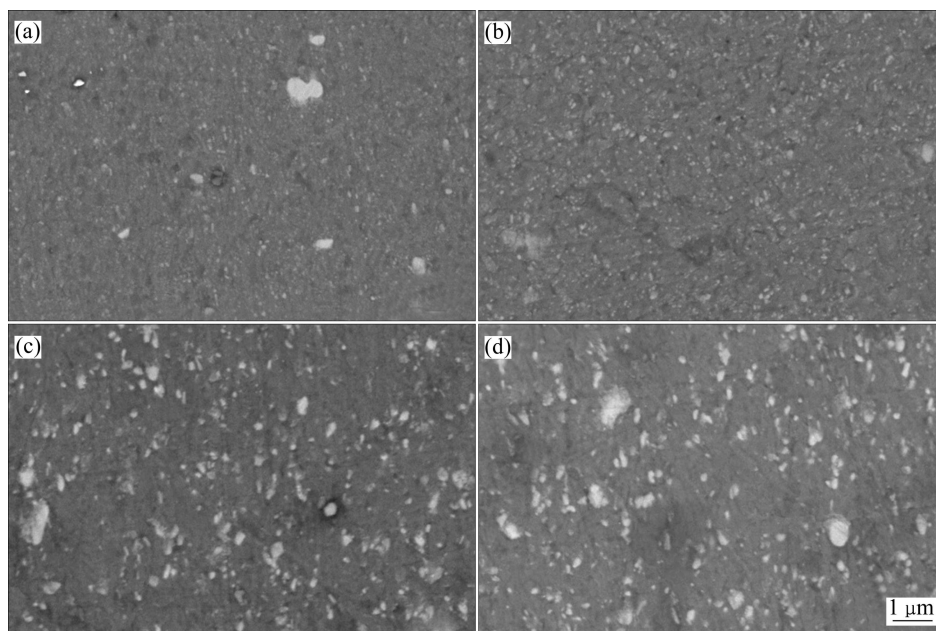


图4 不同转速下SFSW接头焊核区析出相形貌

Fig. 4 Morphologies of precipitates of nugget zone of SFS welds at different rotation speeds: (a) 600 r/min; (b) 750 r/min; (c) 950 r/min; (d) 1180 r/min

增多，且尺寸增大。这是因为随着转速的增大，搅拌头轴肩和搅拌针与材料的摩擦产热量增加。温度越高，从基体中析出的 S 相更多，并在高温作用下长大。

2.3 焊接接头的力学性能

图 5 所示为焊接速度恒定为 47.5 mm/min，搅拌头转速分别为 600、750、950 和 1 180 r/min 时的 SFSW 接头显微硬度分布图，焊核区硬度平均值列于表 2 中。对比图 5 和表 1 可见，各转速下的 SFSW 接头焊核区显微硬度明显低于焊接前母材的显微硬度；对比分析不同转速下 SFSW 接头的显微硬度分布曲线可见，随着转速的增大，焊核区显微硬度逐渐降低。这主要受到析出相的数量和尺寸的影响。金属强化取决于位错与脱溶相质点间的相互作用。当运动位错遇到脱溶质点时，会在质点周围生成位错环以通过脱溶质点的阻碍。按照 Orowan 强化机制，位错绕过脱溶质点时所需增加的切应力与质点的体积分数及质点半径相关。体积分数越大，强化值越大；当体积分数一定时，强化值与脱溶质点半径成反比，质点越小，强

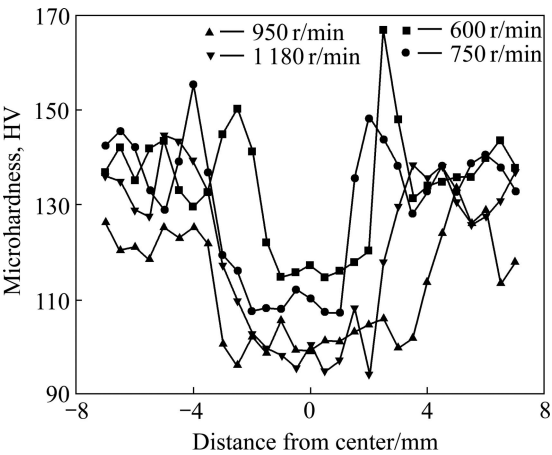


图 5 不同转速下横截面显微硬度的分布
Fig. 5 Distribution of microhardness in cross section at different rotation speeds

表 2 不同转速下焊核区显微硬度平均值
Table 2 Average values of microhardness in nugget zone at different rotation speeds

Rotation speed/(r·min ⁻¹)	Microhardness, HV
600	117.5
750	110.8
950	102.3
1 180	99.2

化值越大。在焊接热循环的作用下，SFSW 接头 S 相析出并粗化，使其强化效应减弱，故 SFSW 接头硬度低于母材的。同时，随着转速的增大，S 相数量增多且尺寸增大，导致接头显微硬度逐渐降低。另外，由显微硬度分布图可见，各转速下的 SFSW 接头距焊缝中心约 3 mm 处硬度达到相应的最高值。这是因为该区域位于热机械影响区，该区域材料发生剧烈塑性变形，变形区组织内部存在大量的亚结构，导致硬度显著升高。

图 6 所示为焊接速度恒定为 47.5 mm/min、搅拌头转速分别为 600、750、950 和 1 180 r/min 时 SFSW 接头的抗拉强度和伸长率分布曲线。对比分析可见，SFSW 接头的抗拉强度和伸长率呈现出随转速增大而降低的变化趋势。当转速为 600 r/min 时，接头抗拉强度和伸长率均为最高值，分别为 403.3 MPa 和 3.24%；当转速增大到 1 180 r/min 时，接头抗拉强度降至最低值，伸长率亦降至相应低值。显微组织分析表明：随着搅拌头转速的增大，S 相数量增多且尺寸增大。粗大强化相并不能对 SFSW 接头起到有效的强化作用，反而会减弱强化相与基体间的界面结合力，促使裂纹形核并扩展。因此，随着搅拌头转速的增大，SFSW 接头强度降低，塑性减弱，伸长率降低。拉伸断裂位置主要位于热影响区与热机械影响区交界处，该区域组织梯度大，析出相尺寸较大，故接头性能较差，是 SFSW 接头的薄弱区。

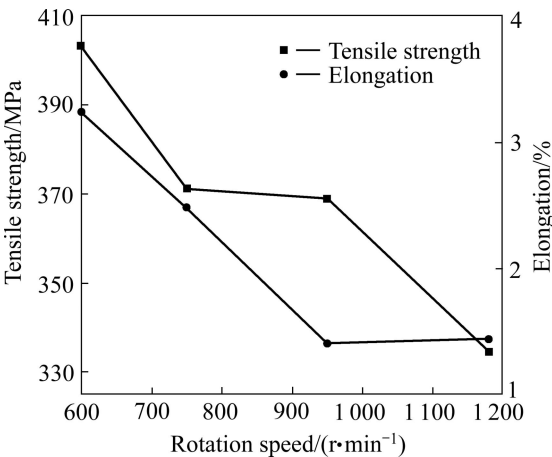


图 6 不同转速下 SFSW 接头的拉伸性能
Fig. 6 Tensile properties of SFS welds at different rotation speeds

2.4 拉伸断口形貌

图 7 所示为焊接速度恒定为 47.5 mm/min、搅拌头转速分别为 600、750、950 和 1 180 r/min 时 SFSW 接头的拉伸断口形貌。图 7 中断口均由解理小裂纹与

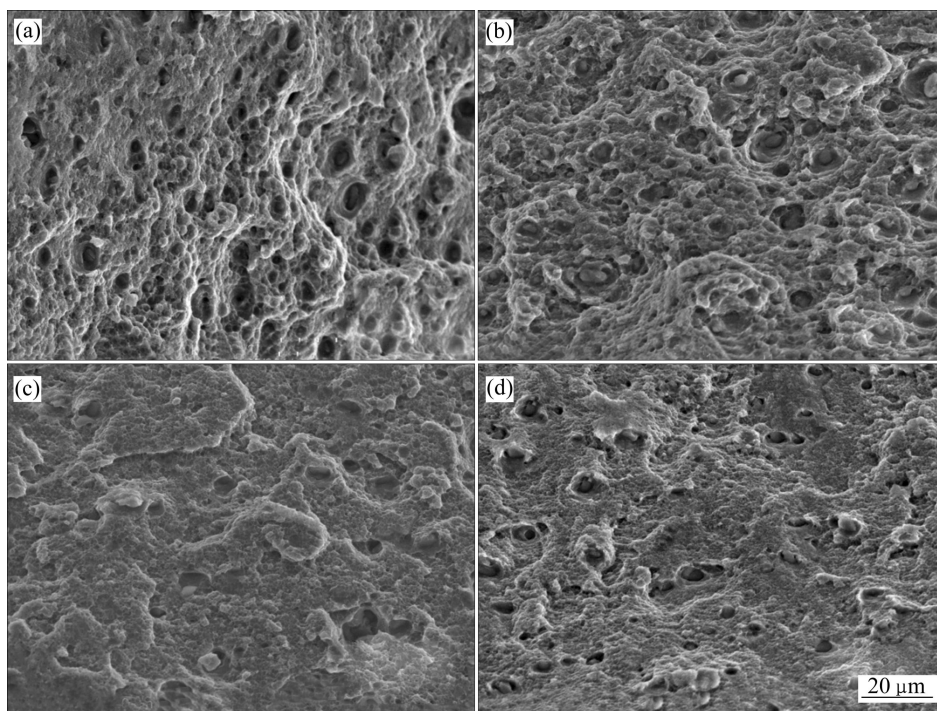


图 7 不同转速下拉伸样品断口形貌

Fig. 7 Morphologies of fracture surface of tensile specimen at different rotation speeds: (a) 600 r/min; (b) 750 r/min; (c) 950 r/min; (d) 1180 r/min

韧窝组成, 呈准解理断裂特征。随着转速增大, 断口中韧窝逐渐减少, 准解理小平面积逐渐增大。这主要是由于作为裂纹源, 粗大的析出相增加了解理裂纹的形成几率, 降低了 SFSW 接头的塑性。

3 结论

1) SFSW 热循环曲线表现出近乎相同的升温 and 降温速率, 表明循环水冷方式具有明显的瞬时快冷作用。当其他焊接参数恒定时, 随着转速的增大, 焊缝热输入量增大, 温度升高。

2) SFSW 接头焊核区 $S\text{-Al}_2\text{CuMg}$ 相在热循环作用下发生析出长大行为。随着转速增大, 析出相的数量增多, 尺寸增大。

3) 焊接参数对 SFSW 接头力学性能有显著影响: 当焊接速度恒定时, 随着转速增大, 接头显微硬度、抗拉强度和伸长率逐渐降低。SFSW 接头拉伸断口呈准解理断裂特征, 随着转速增大, 准解理小平面积增大, 韧窝数量减少。

REFERENCES

[1] 刘会杰, 张会杰, 于 雷. 强冷介质作用下的铝合金搅拌摩

擦焊焊接特征[J]. 焊接, 2010(7): 8–11.

LIU Hui-jie, ZHANG Hui-jie, YU Lei. Influence of intensive cooling medium on friction stir welding characteristics of aluminum[J]. Welding & Joining, 2010(7): 8–11.

[2] THOMAS W M, NEEDHAM J C, DAWES C J. Friction stir butt welding: Great Briton, 9125978.8[P]. 1991–12–06.

[3] MISHRA R S, MA Z Y. Friction stir welding and processing[J]. Materials Science and Engineering R, 2005, 50: 1–78.

[4] LEE W B, YEON Y M, JUNG S B. The improvement of mechanical properties of friction-stir-welded A365 Al alloy[J]. Materials Science and Engineering A, 2003, 355: 154–159.

[5] GENEVOIS G, DESCHAMPS A, DENQUIN A, DOISNEAU-COTTIGNIES B. Quantitative investigation of precipitation and mechanical behavior for AA2024 friction stir welds[J]. Acta Materialia, 2005, 53: 2447–2458.

[6] SRIVATSAN T S, VASUDEVAN S, PARK L. The tensile deformation and fracture behavior of friction stir welded aluminum alloy 2024[J]. Materials Science and Engineering A, 2007, 466: 235–245.

[7] LIU H J, ZHANG H J, HUANG Y X, YU L. Mechanical properties of underwater friction stir welded 2219 aluminum alloy[J]. Transactions of Nonferrous Metals Society of China, 2010, 20: 1387–1391.

[8] LIU H J, ZHANG H J, YU L. Effect of welding speed on microstructures and mechanical properties of underwater friction stir welded 2219 aluminum alloy[J]. Materials and Design, 2011,

- 32: 1548–1553.
- [9] FRATINI L, BUFFA G, SHIVPURI R. In-process heat treatments to improve FS-welded butt joints[J]. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2009, 43: 664–670.
- [10] BENAVIDES S, LI Y, MURR L E, BROWN D, MCCLURE J C. Low-temperature friction-stir welding of 2024 aluminum[J]. *Scripta Materialia*, 1999, 41: 809–815.
- [11] FU R D, SUN Z Q, SUN R C, LI Y, LIU H J, LIU L. Improvement of weld temperature distribution and mechanical properties of 7050 aluminum alloy butt joints by submerged friction stir welding[J]. *Materials and Design*, 2011, 32: 4825–4831.
- [12] FRATINI L, BUFFA G, SHIVPURI R. Mechanical and metallurgical effects of in process cooling during friction stir welding of AA 7075-T6 butt joints[J]. *Acta Materialia*, 2010, 58: 2056–2067.
- [13] STARON P, KOCAK M, WILLIAMS S. Residual stresses in friction stir welded Al sheets[J]. *Applied Physics A*, 2002, 74(Suppl.): 1161–1162.
- [14] 李 光, 李从卿, 栾国红, 董春林. 阵列射流冲击热沉搅拌摩擦焊接新方法[J]. *稀有金属材料科学与工程*, 2009, 38(增刊 3): 205–209.
- LI Guang, LI Cong-qing, LUAN Guo-hong, DONG Chun-lin. New FSW technology with array jet impingement heat sink mode[J]. *Rare Metal Materials and Engineering*, 2009, 38(Suppl.3): 205–209.
- [15] CLARK T D. An analysis of microstructure and corrosion resistance in underwater friction stir welded 304L stainless steel[D]. Provo, Utah, USA: Department of Mechanical Engineering, Brigham Young University, 2005: 1–69.
- [16] 简 波, 杜随更, 傅 莉. 强制冷却搅拌摩擦焊接工艺[J]. *焊接学报*, 2006, 27(6): 21–24.
- JIAN Bo, DU Sui-geng, FU Li. Forced cooling friction stir welding process[J]. *Transactions of the China Welding Institution*, 2006, 27(6): 21–24.
- [17] 孙 鹏, 杨延安, 白文峰, 王快社, 李建平. 镁合金强制冷却搅拌摩擦加工研究[J]. *热加工工艺*, 2011, 40(1): 135–137.
- SUN Peng, YANG Yan-an, BAI Wen-feng, WANG Kuai-she, LI Jian-ping. Research on friction stir processing with forced cooling for magnesium alloy[J]. *Hot Working Technology*, 2011, 40(1): 135–137.
- [18] MOFID M A, ABDOLLAH-ZADEH A, GHAINI F M. The effect of water cooling during dissimilar friction stir welding of Al alloy to Mg alloy[J]. *Materials and Design*, 2012, 36: 161–167.
- [19] JARIYABOON M, DAVENPORT A J, AMBAT R, CONNOLLY B J, WILLIAMS S W, PRICE D A. The effect of welding parameters on the corrosion behaviour of friction stir welded AA2023-T351[J]. *Corrosion Science*, 2007, 49: 877–909.

(编辑 龙怀中)