

文章编号: 1004 - 0609(2006) 10 - 1672 - 06

搅拌摩擦焊缝中的洋葱环形成分析^①

王希靖¹, 达朝炳^{1, 2}, 李 晶¹, 张忠科¹

(1. 兰州理工大学 甘肃省有色金属新材料省部共建国家重点实验室, 兰州 730050;

2. 青海石油管理局油田建设有限责任公司, 敦煌 736202)

摘 要: 研究了搅拌摩擦焊焊接铜合金、铝合金时接头中出现的洋葱环结构, 分析其形成及影响因素。结果表明: 洋葱环的实质是搅拌针旋转前进时其带动的软化层与上一软化层塑性金属间相对移动摩擦叠加后产生的一种轨迹; 由于搅拌针区域摩擦热输入不足, 层间新生成的晶核呈弥散分布, 层间与层内晶粒形状不同, 从宏观上看, 接头纵剖面上形成了结构重叠的半圆环结构, 而从横剖面上就形成了独特的“洋葱环”结构; 焊缝中心纵剖面上出现环间距大小与搅拌针旋转一周向前移动的距离基本相等。

关键词: 搅拌摩擦焊; 洋葱环结构; 塑性流动; 隧道形缺陷

中图分类号: TG 453

文献标识码: A

Analysis of formation of onion rings in friction stir welding

WANG Xi-jing¹, DA Chao-bing^{1, 2}, LI Jing¹, ZHANG Zhong-ke¹

(1. State Key Laboratory of Gansu Advanced Nonferrous Metal Materials,

Lanzhou University of Technology, Lanzhou 730050, China;

2. Qinghai Oil Field Construction of Limited Liability Corporation,

Dunhuang 736202, China)

Abstract: The onion rings structures in the joints of Cu alloy and Al alloy welded by friction stir welding were studied, and their formation and influence factors were analyzed. The results show that the key of forming onion rings structure is a trace in a way the plastic metal softened shell layers around the friction stir pin were shifted, superimposed and fractionated between the former plastic layer. The grains between the layers were dispersed, and which are different from the grains in the layers due to low friction heating in the friction stir pin zone. From macroscopic point of view, the overlapped semicircle structures form in the longitudinal section of the joint while the special onion rings structure emerge in the cross-section. The study also discovered that the distance between the layers in the longitudinal section of the center joint nearly equals to the forward step over which the stir pin rotating a circuit are forced to move forward.

Key words: friction stir welding; onion rings structure; plastic flow; tunnel type defects

搅拌摩擦焊(friction stir welding, 即 FSW) 是目前最具有吸引力的一种新型材料连接方法, 与常规熔焊相比, 它具有明显的优点, 已经开始广泛应用于铝合金的焊接, 并且发展到镁合金、铜合金和异种材料(如 Al, Cu, Ti 系合金)之间的焊接^[1~8]。

在搅拌摩擦焊接过程中, 搅拌头周围塑性材料流动行为对接头组织、力学性能具有重大的影响, 出现在接头横剖面的“洋葱”环(onion ring)就是塑性金属流动最明显的体现。探索洋葱环的形成机理, 对深刻理解搅拌针周围金属的塑性流动, 揭示

① 基金项目: 国家自然科学基金资助项目(10577010)

收稿日期: 2006 - 03 - 27; 修订日期: 2006 - 07 - 10

通讯作者: 王希靖, 教授; 电话: 0931 - 2976706; E-mail: wangxj@lut.cn

接头组织形成具有重要意义。到目前为止, 不少文献对洋葱环的形成机制提出过解释, Colligan 和 Reynolds 认为洋葱环是搅拌针在搅拌挤压塑性材料上升流动时形成的^[5]; Biallas 认为搅拌针循环移动导致了圆周半径的减少从而形成了一些管系的图案^[3]; Krishnan 对洋葱环的特征作了说明, 认为其形成主要是摩擦热的作用^[6]。目前, 国内外对洋葱环还没有一个确定的解释, 对其形成原因、影响因素及其存在的实际意义等都还在研究阶段。

本文作者针对搅拌摩擦焊焊接铜合金、铝合金等材料接头中出现的洋葱环特征, 根据塑性金属的流动情况对洋葱环的形成及其影响因素进行了分析。

1 实验

本研究分别选用 4 mm 厚的 T2 紫铜、10 mm 厚的 LF2 防锈铝及 LY12 硬铝为实验材料进行 FSW 焊接。实验在 FSW-3LM-015 搅拌摩擦焊机上进行。焊接异种金属 LF2 与 LY12 时, 将 LY12 放置在搅拌头前进侧, 而将 LF2 分别放置在搅拌头后退边, 搅拌头相对于工作表面垂直线后倾 2°。焊接工艺参数如表 1 所示。焊接完成后, 沿垂直于焊缝方向切割实验所需试样。对试样横断面和水平面进行抛光, 紫铜、铝合金抛光后分别用氯化高铁酒精水溶液、Keller 试剂进行腐蚀。腐蚀后采用大型光学显微镜 Mef3 观察显微组织, 并用 EPMA-1600 电子探针对环间距的晶粒进行成分分析, 研究洋葱环的形成机理。

表 1 焊接工艺参数

Table 1 Welding parameters of FSW		
Alloy	Spin speed/(r · min ⁻¹)	Weld speed/(mm · min ⁻¹)
T2	800	115
T2	600	75
LF2, LY12	900	75

2 结果及分析

2.1 紫铜搅拌摩擦焊接头中的洋葱环分析

图 1 所示为紫铜 FSW 焊接头横剖面形貌图。图左侧为搅拌头前进侧, 右侧为返回侧, 返回侧与前进侧相对于焊核区(Weld nugget)中心并不对称。在焊核区正下方有一并不对称的偏平椭圆形洋葱环状结构, 呈现右高左低。图 2(a) 和 2(b) 所示分别为图 1 中 A、B 两区放大图(图中最小刻度 0.1 mm)。从图中可看出, B 区尾部比 A 区尾部过渡圆滑一些, 并且 A 区尾部已伸入热力影响区内, 形成尖角。A 区、B 区环间距都从外向里逐渐增大, 但 B 区环间距明显大于 A 区的环间距, B 区环间距在 0.2~0.6 mm 之间, A 区环间距约为 0.1~0.2 mm, 与搅拌头移动的水平环间距 0.144 mm 相差无几。C 区在椭圆环的正上方, 金属流动并不规则, 呈现紊流状态。这与 FSW 塑性金属流场关于焊缝中心并不对称, 焊缝金属在前进侧和返回侧流动模式并不相同是相吻合的^[7], 也说明了在厚度方向上塑性金属流动情况是不相同的, 造成流动不对称的原因是前进侧与返回侧的温度场关于焊缝中心并不对称^[8-9]。从图 1 中可看出, 返回侧的热影响区晶粒明显要大于前进侧的热影响区的晶粒, 前进侧热机械影响区的分界线比返回侧的明显, 这说明摩擦头返回侧的温度要高于前进侧, 靠近肩部区域的温度要大于搅拌针端部区域的温度。这是因为塑性材料从前进侧流动到返回侧, 将前进侧一部分热量随着塑性金属转移使得返回侧的温度要稍高于前进侧。由于返回侧温度高, 塑性金属软化程度高, 其流动性能比前进侧好, 因此返回侧的洋葱环结构间距要比前进侧的大。同时, 由于前进侧搅拌针端部区域附近热量不足, 所以前进侧容易出现隧道形缺陷。

图 2(a) 和 2(b) 所示环间距分别是从左向右、

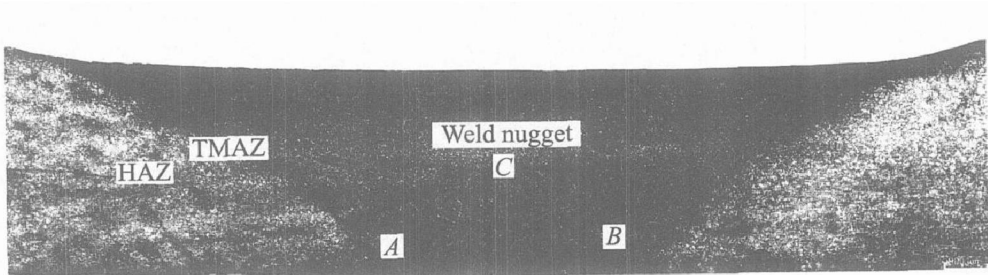


图 1 紫铜搅拌摩擦焊接头横剖面形貌图

Fig. 1 Transverse metallographic section of FSW joint of copper

从右向左,即从焊核区向热机械影响区逐渐增大。这是因为靠近搅拌针部位的金属温度高,软化程度高,软化层相对厚;相反距离搅拌针远的部位的软化层温度低,层间距相对小。而在搅拌针中心靠近轴肩部位的软化层如图 1 所示的 C 区,搅拌针每次旋转带动的塑性材料在壳体叠加时同时受到轴肩的压力影响大,呈现层与层不规则的混合,故无明显的洋葱环出现。图 1 所示的洋葱环不对称结构同时说明搅拌针后方半径两侧的塑性材料不是沿同一个方向流动的,而是大体以搅拌针为中心偏向前进侧向两个相反的方向流动^[10-13]。

为了进一步分析紫铜中洋葱环的形成,将图 1 中的试样沿焊缝中心切割,如图 3 所示,图中箭头方向为摩擦头前进方向,图上侧为焊缝表面。在纵向焊缝搅拌针经过的一定范围内出现了明显的层流现象,间距大小相等,约为搅拌针每旋转一周向前移动的距离;由于在焊接过程中轴肩压力不断增大,整个环状结构在截面厚度方向上逐渐缩小并消

失。结合焊缝横剖面与纵剖面示意图,可知当搅拌针旋转时,流动到搅拌针后方远离轴肩的软化层包绕搅拌针后部侧面,形成类似球状的半圆壳体,当搅拌针旋转前进时,软化程度不同的塑性壳体层按先后顺序相互叠加,在相邻壳体间留下轨迹线,沿垂直于焊缝截面剖开后其轨迹线表现为洋葱环结构^[12]。为了观察层与层之间晶粒的形状与大小区别,将环间部分放大 2000 倍,如图 4 所示。从图中看出在层与层相交处弥散分布着超细晶粒(约为 1 ~ 3 μm),晶粒尺寸明显小于层内晶粒,相似的结果也在文献[14]中表述过。采用电子探针分别对点 1、2、3(图 4 中所示)进行成分分析,图 5 所示为 1 点采样分析图。电子探针分析后对点的成分分析结果如表 2 所示。

从表 2 中可看出,层与层相交处黑色部分杂质含量(1 点在层间黑色部分处)如 Fe、Sn 要比层内高(Fe、Cl 的含量高与所选腐蚀液成分有关),这说明在这一区域当搅拌针旋转前进时,带动的软化层

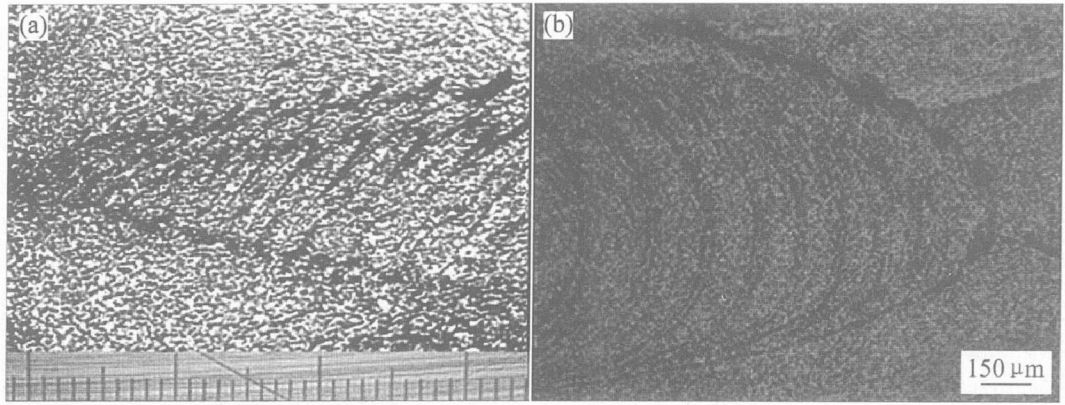


图 2 FSW 紫铜接头中洋葱环结构示意图

Fig. 2 Onion ring structure shape and space of FSW joint of copper

- (a) —Onion rings structure presented in advancing side;
- (b) —Onion rings structure presented in retreating side

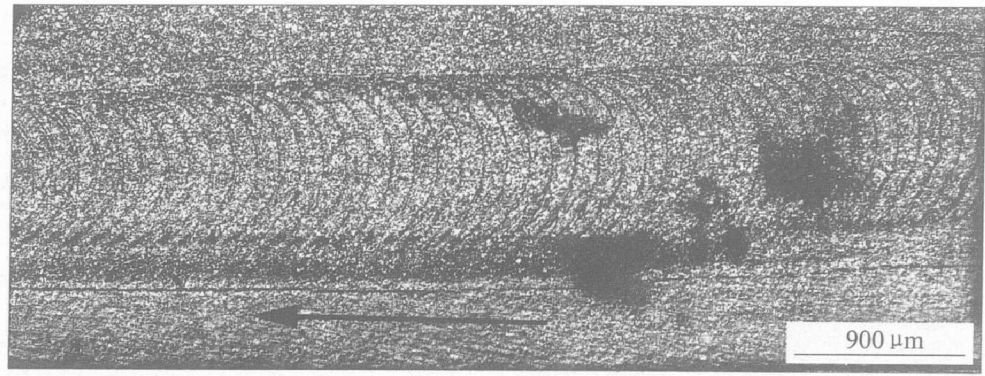


图 3 FSW 紫铜接头中心纵剖面环状结构

Fig. 3 Semicircle structure in center longitudinal metallographic section of FSW joint of copper

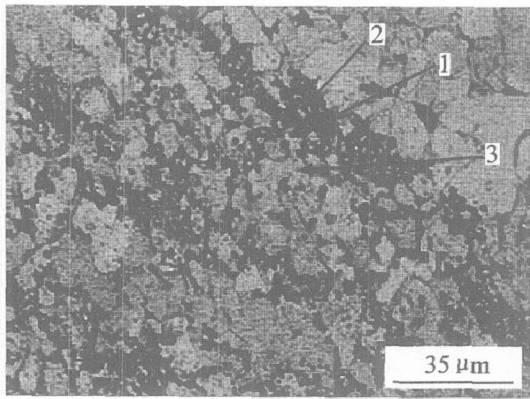


图 4 FSW 接头紫铜环间距电子探针位置

Fig. 4 Location of electrode probe on layers micrographs in copper FSW weld

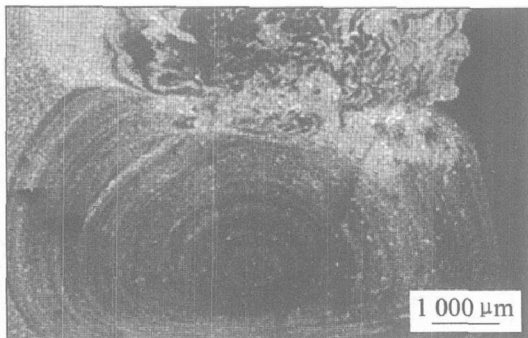


图 5 铝合金搅拌摩擦焊接头中的洋葱环结构

Fig. 5 Onion rings structure presented in cross-section of FSW joint of Al alloy

表 2 图 4 中 1、2、3 点处成分分析

Table 2 Results of component testing of points 1, 2 and 3 in Fig. 4 by electrode probe(mass fraction, %)

Point	Cu	Fe	Sn	Cl
1	94.862	2.992	1.179	0.967
2	99.712	0	0	0.515
3	100	0	0	0

与上一软化层之间存在摩擦挤压,其层间晶界内的杂质向层间处富集。由于在整个焊核区内晶粒受到搅拌、拉伸,发生动态再结晶,而层间杂质点多且层与层相对移动时产生摩擦热,变形塑性金属首先在层间结核并形成与层内晶粒差异较大的超细晶粒,从宏观上看就形成了特殊的环状结构。

2.2 铝合金搅拌摩擦焊接头中的洋葱环分析

铝合金及镁合金搅拌摩擦焊接头横剖面中出现"洋葱"环结构与紫铜中出现的不同,图 5 所示为

10 mm 厚的 LF2 与 LY12 铝合金 FSW 焊接时接头出现的洋葱环结构。左侧为 LF2 防锈铝,颜色呈白色;右侧为 LY12 硬铝,颜色为黑色。图 5 中的环间距大小相同、结构也关于焊缝中心基本对称,洋葱环呈近似圆形,与此相似的洋葱环状结构也出现在其它铝、镁合金搅拌摩擦焊接头中^[13-16]。相同点一是在焊核正上方有与图 1 相同的紊流层,二是环间距从中心向外逐渐变小。由于是异种金属焊接,可以看到紊流层两种不同颜色材料有较程度的混合。出现这种现象是由于铝合金塑性流动所需要的温度远低于铜合金塑性流动需要的温度,铝合金塑性流动没有铜合金塑性流动对温度那样敏感。

从图 1 与图 5 中的洋葱环结构看,在温度场、应力场及搅拌的作用下,搅拌头横剖面厚度方向上塑性金属的流动并不一致。由于搅拌头轴肩压力及摩擦作用,靠近轴肩部分的塑性材料受到的压力及摩擦热大于搅拌针根部所受到的摩擦热,并且受到轴肩向前的水平力,导致塑性软化层在轴肩后部出现小区域的紊流层。这一紊流层是由轴肩附近的软化层及搅拌针上部一部分软化层的流动复合而成。远离轴肩靠近搅拌针的塑性金属软化层从搅拌针前部流动到搅拌针后部,当搅拌针向前旋转挤压时,在上一软化层的压力下,这部分金属以搅拌针为中心,以剪切方式向两侧相反的方向流动^[11]。

2.3 搅拌摩擦焊中缺陷处环状结构分析

除了接头剖面的洋葱环结构具有明显的层流间距以外,还发现在搅拌摩擦焊隧道形缺陷或孔洞周围也总是伴有塑性金属流动时遗留的轨迹,呈现更明显的层流状态。图 6 和 7 所示为紫铜 FSW 焊接中出现的隧道形、小孔洞缺陷周围的材料流动轨迹。FSW 焊接中出现隧道形缺陷的原因是材料分别从搅拌针的两侧向后方流动,由于焊接参数选择不当,焊缝温度较低,或者搅拌针形状不合理时,材料不能充分流动。这样软化不充分的金属在汇合点处便形成孔洞或隧道形缺陷。从图 6 中可明显看出,缺陷上方层间距分布是密疏相间的,材料从上向下流动,由于孔洞尺寸大,金属塑性软化程度不高,层间距约为 0.4 mm。当接头中出现小孔洞时也会影响材料的塑性流动,如图 7 所示,塑性材料绕过孔洞留下间距非常小的层流轨迹。实验过程中同时发现这种缺陷一般出现在搅拌针中部至端部靠近前进侧旋转摩擦过的区域内。轴肩对这部分的影响作用减小,当搅拌针产生的摩擦热使围绕其后半周塑性金属的软化程度高时,搅拌针向前移动就会

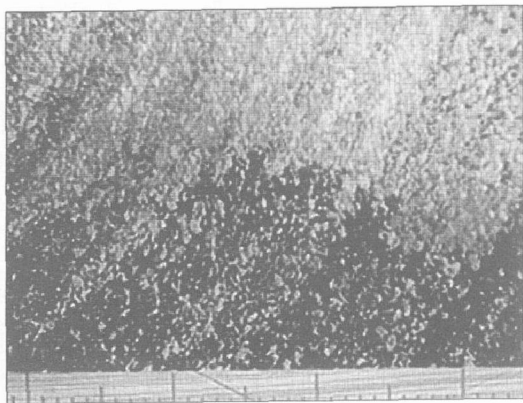


图6 FSW 紫铜接头隧道型缺陷周围层流现象

Fig. 6 Trace of plastic layers flow around tunnel type defects in FSW joint of copper

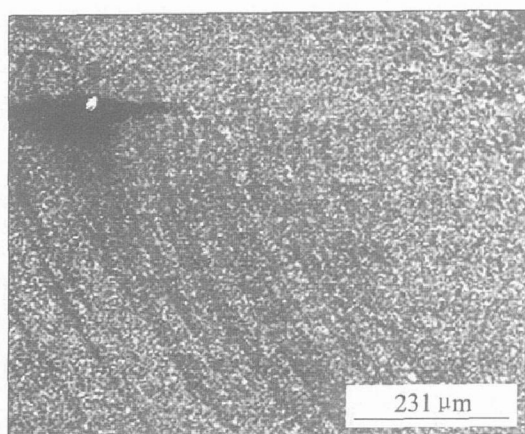


图7 FSW 紫铜小孔处的塑性金属流动轨迹

Fig. 7 Trace of plastic metal flow around small hole defects in FSW joint of copper

带走充足的材料,软化层之间黏度系数较大,软化层与层间热量能使形核晶粒长大,在搅拌针剪切力作用下层与层之间结构不明显或消失。当搅拌针产生的摩擦热不足时,塑性金属的软化程度不高,软化层之间的黏度系数小,在搅拌针向前移动时,层间阻力增大,围绕搅拌针的塑性软化材料不足,从而形成缺陷并相应地出现层与层之间密疏相间的轨迹线。

3 结论

1) 并非所有的FSW接头横剖面上都存在洋葱环结构,只有当搅拌针周围塑性金属软化程度不高时,这部分金属在应力场、温度场综合作用下发生了塑性流动。洋葱环就是塑性金属发生层与层相对流动时产生的一种轨迹。

2) 洋葱环的形成主要是搅拌针与塑性金属的

摩擦热造成的。当搅拌头旋转前进时,流动到搅拌针后方远离轴肩的软化层包绕搅拌针后部侧面形成类似球状的塑性壳体,并在搅拌头旋转前进过程中不断形成软化程度不同的塑性壳体层相互摩擦叠加,当层间塑性金属软化程度低时,层间杂质富集,新生成的晶核来不及长大,从宏观上看就会在横剖面上形成洋葱环结构。

3) 出现在FSW接头横剖面上的洋葱环间距从环中心向两侧(前进侧、返回侧)逐渐减小;接头中心纵剖面上的环间距大体与搅拌针旋转一周时前进的距离相等。

4) 在搅拌摩擦焊焊缝中所表现的塑性金属流动特征不仅与所选的工艺参数有关,还与工件厚度及所焊材料的物理性质有关。

5) 洋葱环对焊接接头机械性能的影响,尚需进一步的工作来研究。

REFERENCES

- [1] Shibayanagi T, Maeda M. Microstructure and hardness in a joint of 7075 aluminum alloy friction stir welded [A]. Proceeding of IIW Pre-Assembly Meeting on FSW in Nagoya [C], Japan: Osaka University, 2004: 205 - 211.
- [2] Seung H C, Sato Y, Kokawa H. Effect of microtexture on fracture location in friction stir weld of Mg alloy AZ61 during tensile test [J]. Scripta Mater, 2003, 49: 161 - 166.
- [3] Biallas G, Braun R, Donne C D, et al. Mechanical properties and corrosion behaviour of friction stir welded 2024 - T6 [A]. First International Conference on Friction Stir Welds [C]. Thousand Oaks, CA, 1999.
- [4] Lee W B, Jung S B. The joint properties of copper by friction stir welding [J]. J Materials Letters, 2004, 58: 1041 - 1046.
- [5] Colligan K. Material flow behavior during friction stir welding of aluminum [J]. Weld J, 1999, 2: 295 - 375.
- [6] Krishnan K N. On the formation of onion rings in friction stir welds [J]. Mater Sci Eng A, 2002, A327: 246 - 251.
- [7] 王希靖, 韩晓辉, 李常锋, 等. 厚铝合金板搅拌摩擦焊塑性金属不同深度的水平流动状况 [J]. 中国有色金属学报, 2005, 15(2): 198 - 203.
WANG Xi-jing, HAN Xiao-hui, LI Chang-feng, et al. Horizontal flow status of plastic metal in different depth during friction stir welding for thick aluminum alloy [J]. The Chinese Journal of Nonferrous Metals,

- 2005, 15(2): 198 - 203.
- [8] 王希靖, 郭瑞杰, 阿 荣. 搅拌摩擦焊接头的温度检测[J]. 电焊机, 2004, 1: 22 - 23.
- WANG Xijing, GUO Ruojie, A Rong. Temperature measure for joint of friction stir welding[J]. Electric Welding Machine, 2004, 1: 22 - 23.
- [9] Vilaca P, Quintino L, dos Santos J F. A stir-analytical thermal model for friction stir welding[J]. Journal of Materials Processing Technology, 2005, 169: 452 - 465.
- [10] 赵衍华, 林三宝, 贺紫秋, 等. 二维搅拌摩擦焊接过程的数值模拟[J]. 中国有色金属学报, 2005, 15(6): 865 - 869.
- ZHAO Yan-hua, LIN San-bao, HE Ziqiu, et al. Numerical simulation of 2D friction stir welding process[J]. The Chinese Journal of Nonferrous Metals, 2005, 15(6): 865 - 869.
- [11] 黄奉安, 刑丽, 柯黎明, 等. 搅拌摩擦焊焊缝材料二维塑性流动研究[J]. 南昌航空工业学院学报, 2003, 17(3): 17 - 19.
- HUANG Feng-an, XING Li, KE Liming, et al. The studies of material two-dimensional plastic in friction stir welding[J]. Journal of Nanchang Institute of Aeronautical Technology (Natural Science), 2003, 17(3): 17 - 19.
- [12] 王大勇, 冯吉才. 搅拌摩擦焊接三维流动模型[J]. 焊接学报, 2004, 25(4): 46 - 50.
- WANG Dayong, FENG Jiecai. The model of three-dimensional plastic flow in friction stir welding[J]. Transaction of the China Welding Institution, 2004, 25(4): 46 - 50.
- [13] Schneder J A, Nunes Jr A C. Characterization of plastic flow and resulting microtextures in a friction stir weld[J]. Metall Mater Trans B, 2004, B35: 4 - 13.
- [14] Fonda R W, Bingert J F, Colligan K J. Development of grain structure during friction stir welding[J]. Scripta Mater, 2004, 51: 243 - 248.
- [15] Bussu G, Irving P E. The role of residual stress and heat affected zone properties on fatigue crack propagation in friction stir welded 2024 - T351 aluminum joints[J]. International Journal of Fatigue, 2003, 25: 77 - 88.
- [16] Su J Q, Nelson T W, Mishra R, et al. Microstructural investigation of friction stir welded 7050 - T651 aluminium[J]. Acta Mater, 2003, 51: 713 - 729.

(编辑 何学锋)