

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^①

王希靖¹, 韩晓辉^{1, 2}, 李常锋¹, 包孔¹, 郭瑞杰¹

(1. 兰州理工大学 甘肃省有色金属新材料国家重点实验室, 兰州 730050)

2. 中国南车集团四方机车车辆股份有限公司, 青岛 266031)

摘要: 通过在 10 mm 厚 LF2 铝合金板的不同位置嵌入示踪 Fe 粉, 进行搅拌摩擦焊对接实验, 焊后截取不同深度的水平面试样, 采用扫描电镜对试样进行能谱分析, 通过观察 Fe 粉在焊缝金属中的水平分布, 确定了 10 mm 厚 LF2 搅拌摩擦焊焊缝金属的二维水平流动状况。结果表明, 塑性金属流动关于焊缝中心并不对称。焊缝下部金属受搅拌针作用, 前进侧大部分金属与焊接方向相反向后流动, 小部分金属向前流动, 但都未进入返回侧; 返回侧金属都向后流动, 且有部分金属进入前进侧。焊缝上部金属主要受轴肩作用, 前进侧大部分金属向前流动但未进入返回侧, 小部分金属向后流动; 返回侧金属沿旋转方向流入前进侧。

关键词: 搅拌摩擦焊; 流场; 前进侧; 返回侧; 示踪粒子

中图分类号: TG 453

文献标识码: A

Horizontal flow status of plastic metal in different depth during friction stir welding for thick aluminum alloy

WANG Xi-jing¹, HAN Xiao-hui^{1, 2}, LI Chang-feng¹, BAO Kong¹, GUO Rui-jie¹

(1. State Key Laboratory of Advanced Non-ferrous Metal Materials

Gansu Province, Lanzhou University of Technology, Lanzhou 730050, China

2. Sifang Locomotive & Rolling Stock Ltd., CSR, Qingdao 266031, China)

Abstract Marker Fe grains were inserted into 10 mm LF2 aluminum alloy in different positions during the friction stir welding course. After butt welding, the samples which were selected in horizontal sections in different depths were analyzed by using EDS (energy dispersive X-ray spectroscopy) of SEM (scanning electron microscope). The 2-D horizontal flow status of friction stir welding for 10 mm LF2 aluminum alloy was confirmed by observing the horizontal distributions of Fe grains in welding zone. The results show that the flow is not symmetric about the weld centerline. The lower metal of weld is completely affected by pin. The bulk of metal in the advancing side is transported backward against the welding direction. However, a small amount is moved forward at the edge of the pin. The metal in the retreating side is only transported against the welding direction and some metal flows into the advancing side. The upper metal of weld is mainly affected by shoulder. The bulk of metal in the advancing side moves forward in the welding direction and a little backward, but no metal flows into the retreating side. However, the bulk of metal in the retreating side is transported backward into the advancing side along the rotation direction.

Key words friction stir welding; flow field; advancing side; retreating side; marker grain

流场研究是搅拌摩擦焊接过程中的重要研究内容, 它对于理解搅拌摩擦焊焊缝成形机理, 分析孔

洞和焊缝成形不良等焊接缺陷的产生, 具有重要的理论意义; 对于优化焊接工艺, 确定焊接参数, 控

① 基金项目: 甘肃省科技攻关资助项目 (GS012-A52-069)

收稿日期: 2004-08-06 修订日期: 2004-10-13

作者简介: 王希靖 (1956-), 男, 教授, 博士生导师.

通讯作者: 王希靖, 教授; 电话: 0931-2806865 传真: 0931-2806962 E-mail: wangx@lut.cn

制焊缝接头的组织和性能,提高焊接质量,改进焊接设备具有重要的实用价值。文献[1-4]提供了流场的测定方法,文献[4-6]分析了流场对焊缝组织和性能的影响,文献[7-12]中初步划分了搅拌摩擦焊塑性金属流动分区,并且分析了某些区域特定的流动特征,文献[13-15]提供了国内流场研究的基本现状。以上文献对搅拌摩擦焊流场的研究方法、某一区域的流动特征等涉及较多,而对于建立一个较为完整的三维搅拌摩擦焊流场的研究工作尚待深入。本研究采用嵌入示踪粒子的方法对10mm厚LF2铝合金在最佳焊接参数下塑性金属的二维水平流动情况进行了初步的实验研究,确立了搅拌摩擦焊塑性金属不同深度的水平流动状况,从而为建立三维流场奠定基础。

1 实验

实验选用的材料为10mm厚LF2铝合金,其化学成分见表1。采用在待焊板材中嵌入示踪粒子,焊后通过观察示踪粒子的分布确定搅拌摩擦焊焊缝金属的流动状况。实验在自制的FSW焊机上进行,选用的焊接参数见表2。焊接参数由焊机控制系统的MCGS组态软件实时检测记录^[16]。

具体实验过程如下:焊前用线切割的方法在10mm厚LF2板靠近焊缝侧的不同位置开4种深度、宽1mm、长16mm的细槽,将两块板平焊对接,如图1所示。然后在槽内填入厚度为0.5mm、颗粒平均直径为90μm的Fe粉;用1mm厚LF2铝合金细条压实以保证焊缝金属流动的连续性和完整性。焊后按照观测要求,分别截取不同位置不同深

表 1 LF2铝合金的化学成分

Table 1 Chemical composition of LF2
(mass fraction, %)

Mg	Mn	Fe	Si	Cu
2.0~2.8	0.15~0.40	0.40	0.40	0.10

表 2 焊接参数

Table 2 Welding parameters

Parameter	Value
Shoulder diameter/mm	32
Pin diameter/mm	10
Rotation speed/(r·min ⁻¹)	945
Welding speed/(mm·min ⁻¹)	21
Welding energy/J	6 230

度的水平面,进行磨制,用Keller's腐蚀剂腐蚀50s后制成金相试样。对试样进行能谱分析时将整个焊缝分区,利用S-520型扫描电镜的EDAX9100能谱分析仪对每一分区(subarea)进行面扫描能谱分析,确定每一分区Fe颗粒的分布和百分含量,最后将所有分析的分区拼合,确定整个焊缝区示踪Fe颗粒的分布状况。同时在XJP-200光学显微镜下观察焊缝各截面上的组织变化情况,经过综合对比分析后,得到10mm厚LF2铝合金搅拌摩擦焊的不同深度水平流动状况。

2 结果与分析

实验得到了2、4、6、8mm4种深度的水平宏观流动图,并且对每种深度水平面做了面扫描能谱

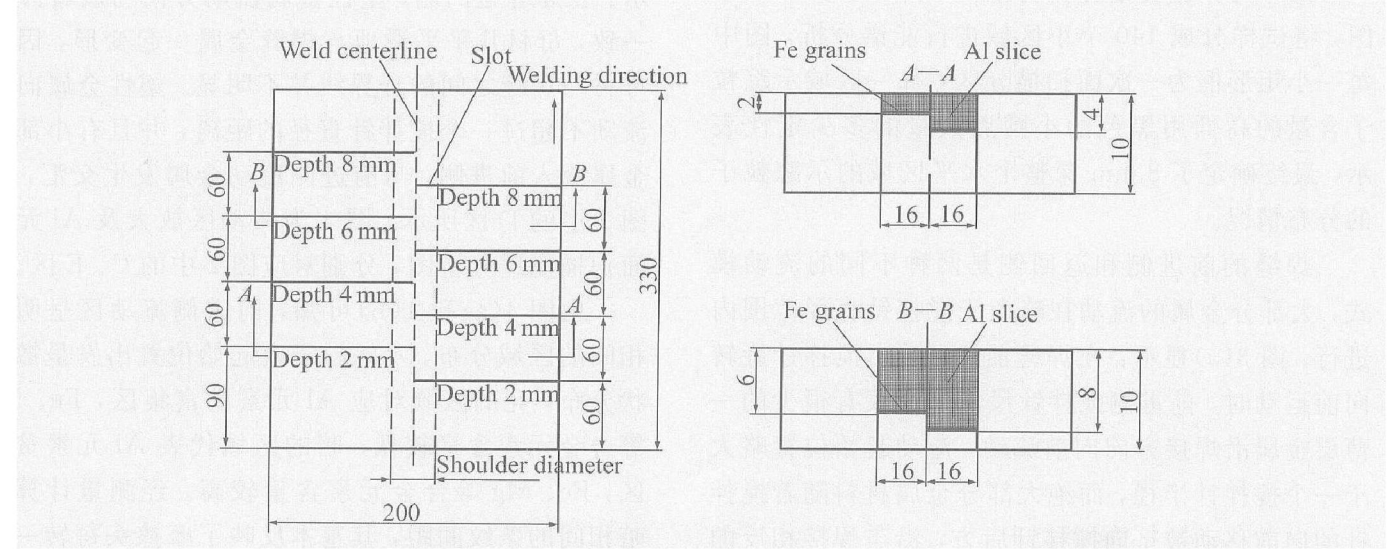


图 1 示踪粒子嵌入位置示意图

Fig 1 Schematic of inserted position of marker grains

分析,得到不同深度示踪 Fe粉的分布情况,从而确立了 10mm 厚 LF2 搅拌摩擦焊焊缝金属二维水平流动状况。本文选取典型的截面进行分析。

2 1 水平方向 8mm 深金属流动状况

8mm 深处焊缝金属主要受到搅拌针的旋转挤压作用,摩擦头轴肩的作用可以忽略,焊缝金属宏观流动如图 2 所示。水平流动区域宽度约为 12 mm, 略大于搅拌针直径。图中 A 为母材区; B 为过渡区, 对应于焊缝的热力学影响区, 金属组织被拉长, 金属发生小范围内的流动; C、E 分别为前进侧、返回侧流动区, 塑性金属在较高的温度下发生高速流动; D 为两侧金属流动交汇区, 位于焊缝中心偏向前进侧, 该区是搅拌摩擦焊焊缝孔洞易发区。

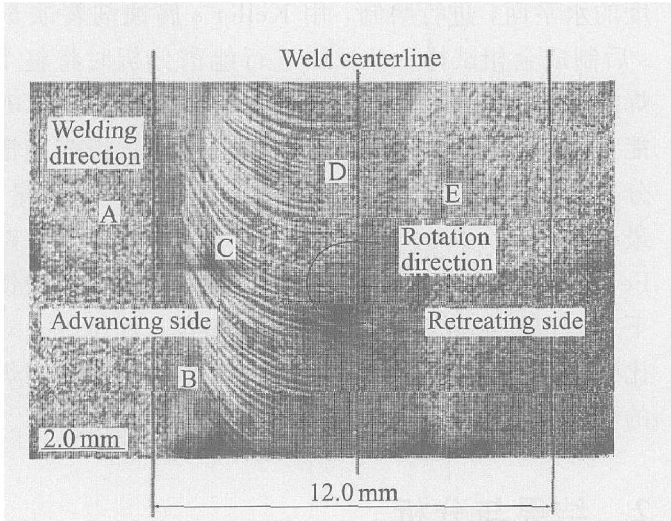


图 2 水平方向 8mm 深金属流动图

Fig 2 Horizontal metal flow in 8mm depth

图 3 为根据能谱分析所做的示踪颗粒分布示意图, 将试样分成 140 个小区域进行能谱分析, 图中每一小矩形框为一次面扫描分区, 每一区域示踪粒子含量的高低用黑色的小圆点数量的多少定性表示, 最终确定了 8mm 深整个水平区域的示踪粒子的分布情况。

焊缝的前进侧和返回侧是两种不同的流动模式, 大部分金属的流动在略大于搅拌针直径范围内进行。图 3(a) 显示: 在焊缝前进侧, 当搅拌针旋转向前运动时, 前进侧搅拌针尺寸边缘仅有很少的一薄层金属沿焊接方向向前流动, 流动起始位置略大于一个搅拌针半径, 而绝大部分金属材料随着搅拌针的向前移动被挤向搅拌针后方, 沿与焊接相反的方向流动, 因此造成前进侧的母材金属与流场金属的较大变形差, 分界线比较明显。金属向后流动的

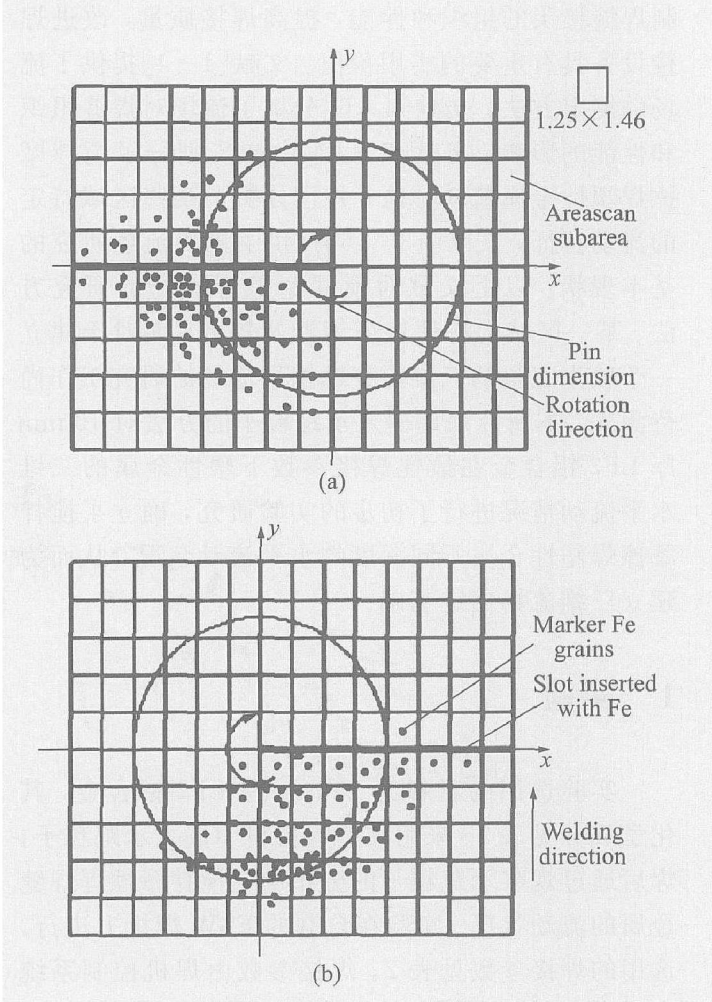


图 3 水平方向 8mm 深 Fe 粉的分布

Fig 3 Horizontal distributions of Fe grains in 8mm depth

- (a) — Distribution of Fe grains in advancing side
(b) — Distribution of Fe grains in retreating side

最终位置不会超过搅拌针直径, 而向右流动的最终位置不会超过焊缝中心线进入返回侧。图 3(b) 显示: 在焊缝返回侧, 塑性金属流动方向与旋转方向一致, 母材几乎平滑地与焊缝金属一起变形, 因而母材与焊缝之间的分界线并不明显。塑性金属向后流动不超过一个搅拌针直径的距离, 并且有小部分金属流入前进侧, 与前进侧流动金属发生交汇, 如图 2 中的 D 区所示。图 4 为流动区放大及 Al 元素面扫描能谱分析图, 分别对应图 2 中的 C、E 区。

由图 4(a) 和 4(b) 可知, 前进侧流动区呈明暗相间的区域分布, 示踪粒子由起始位置出发呈散射状分布, 亮的区域对应 Al 元素的富集区, Fe、Mg 等合金元素含量较低; 暗的区域代表 Al 元素贫瘠区, Fe、Mg 等合金元素含量较高。经测量计算明暗相间的条纹间距, 其基本反映了摩擦头每转一周前进的距离, 平均间距为 24 μm , 这也证明了 8mm 深前进侧金属是分层交替过渡到焊缝中, 层与层之

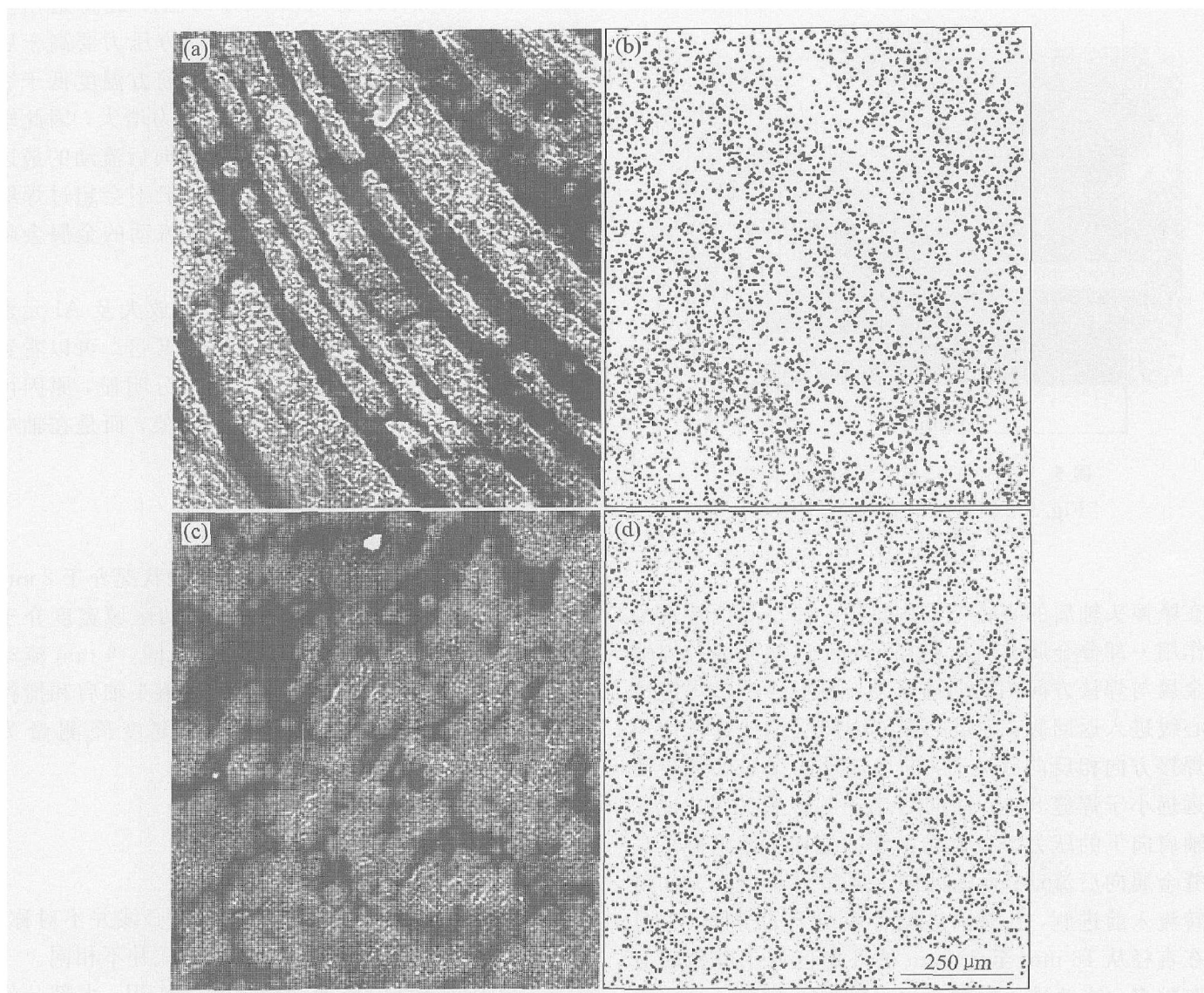


图 4 流动区域放大及 Al 元素面扫描分析图

Fig 4 Enlarged flow zone and areascan of Al element

(a) —Enlarged flow zone in advancing side (b) —A reascan of flow zone in advancing side
(c) —Enlarged flow zone in retreating side (d) —A reascan of flow zone in retreating side

间的过渡形式并不相同。由图 4(c) 和 4(d) 可知，返回侧流动区 Al 元素分布比较均匀，呈弥散状，其示踪元素也找不到明显的流动痕迹，从宏观流动状况分析，返回侧金属也应是分层过渡到焊缝中去，但流动痕迹并不明显，初步认定是层与层之间的过渡形式基本相同所致。

受搅拌针影响的这种流动规律影响整个焊缝厚度方向，做 2、4、6mm 的能谱分析都可以发现这种规律的存在，但在水平方向 2mm 深的焊缝金属由于受轴肩作用影响较大而使这种规律并不明显。

2.2 水平方向 2mm 深金属流动状况

离上表面 2mm 深处的焊缝金属由于靠近轴肩，流动模式与 8mm 深的焊缝金属截然不同，除

了受到搅拌针的旋转挤压作用，更主要的是受到轴肩的旋转摩擦和下压作用。焊缝区金属宏观流动如图 5 所示。旋转流动区经测定约为 20mm，图中 A 为母材，B、E 分别为前进侧和返回侧旋转区，对应搅拌针和轴肩之间的环形区域，主要受轴肩作用；C、D 分别为前进侧和返回侧搅拌区，对应搅拌针直径内区域，主要受搅拌针作用。前进侧焊缝金属流动方向与母材金属移动方向均相反，存在较大的变形差，返回侧焊缝金属尽管与母材金属移动方向相同，但受高速旋转轴肩的作用，流动速度远大于母材金属移动速度，两者之间也存在较大的变形差，因此在焊缝的前进侧和返回侧都有明显的分界线。

由能谱分析图 6 可知：所有焊缝金属的流动均

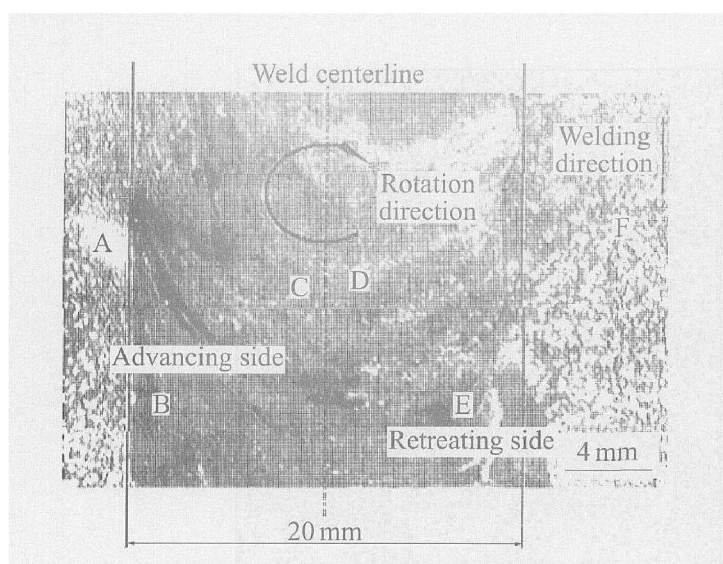


图 5 水平方向 2mm 深金属流动图

Fig 5 Horizontal metal flow
in 2mm depth

在摩擦头轴肩的直径范围内进行, 并且受搅拌针的作用一部分金属会流入搅拌区。前进侧大部分焊缝金属与焊接方向相同向前流动, 但不会越过焊缝中心线进入返回侧, 少量的焊缝金属受搅拌针作用与焊接方向相反向后流动, 向后流动的金属的数量要远远小于焊缝 8mm 深向后流动的金属数量, 说明轴肩向下的压力以及旋转向前的拖动作用阻碍了焊缝金属向后流动; 而返回侧金属将沿着旋转方向旋转流入前进侧, 补充前进侧金属留下的空间, 并且在直径从 16mm 至 20mm 的环形区域示踪粒子分布较多, 流动最远的粒子位于轴肩直径的三分之二处, 说明塑性金属在该区域的流动性最好。这与 10

mm 厚 LF2 搅拌摩擦焊在该处的温度最高是相吻合的^[17]。同时, 由于摩擦头轴肩前方压力要高于后方, 并且从温度测量的结果显示其前方温度低于后方^[17], 造成塑性金属向前流动的阻力增大, 因此塑性金属向前流动的最远距离要小于向后流动的最远距离, 而且向前流动的塑性金属一般不会超过焊缝中心线进入返回侧, 而返回侧向后流动的金属会越过焊缝中心线进入前进侧。

图 7 所示为返回侧旋转区局部放大及 Al 元素面扫描能谱分析图, 对应图 5 中的 E 区。可以看到焊缝金属的旋转流动迹象, 但不十分明显, 原因可能是焊缝金属没有发生分层流动现象, 而是在轴肩作用下整体流动。

2.3 其它深度金属流动状况

深度为 4mm 和 6mm 截面流动状况介于 2mm 和 8mm 截面流动状况之间, 其流动区域宽度介于 2mm 和 8mm 截面流动区域宽度之间, 4mm 流动区域宽度经测量为 16mm, 受到摩擦头轴肩和搅拌针的双重作用, 6mm 流动区域宽度经测量为 14mm, 主要受到搅拌针作用。

3 结论

1) 搅拌摩擦焊流场关于焊缝中心线并不对称, 焊缝金属在前进侧和返回侧流动模式并不相同。

2) 焊缝下部金属流动受搅拌针作用。大部分的金属材料向后流动, 并且不会超过一个搅拌针直径

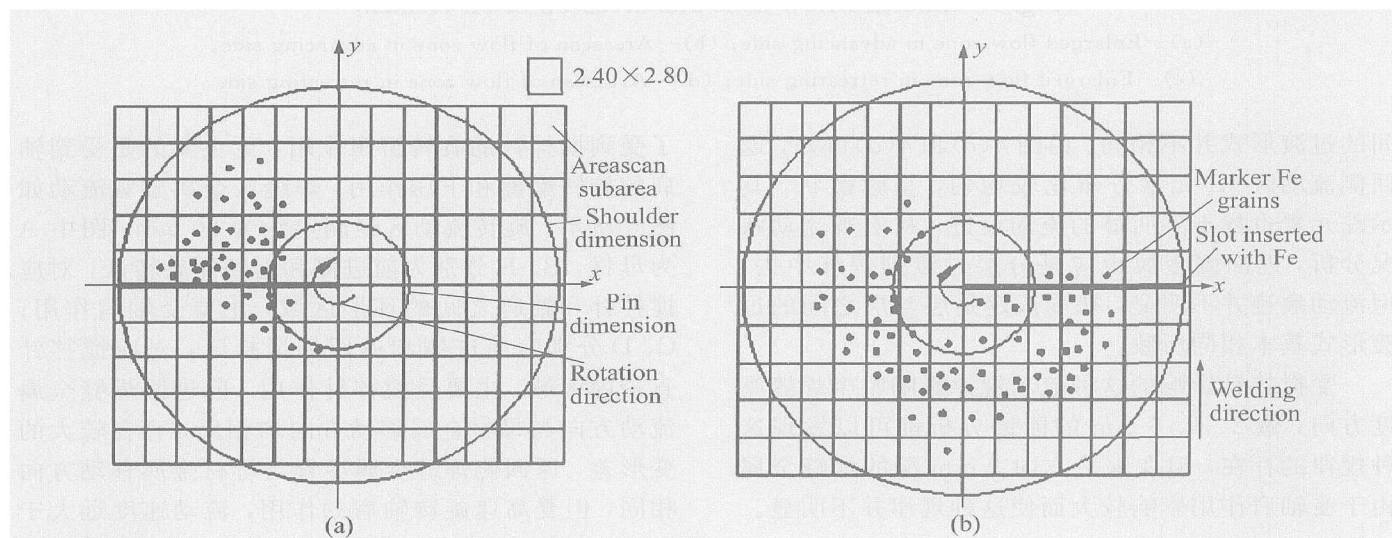


图 6 水平方向 2mm 深 Fe 粉分布

Fig 6 Horizontal distributions of grains in 2mm depth

(a) —Distribution of Fe grains in advancing side (b) —Distribution of Fe grains in retreating side

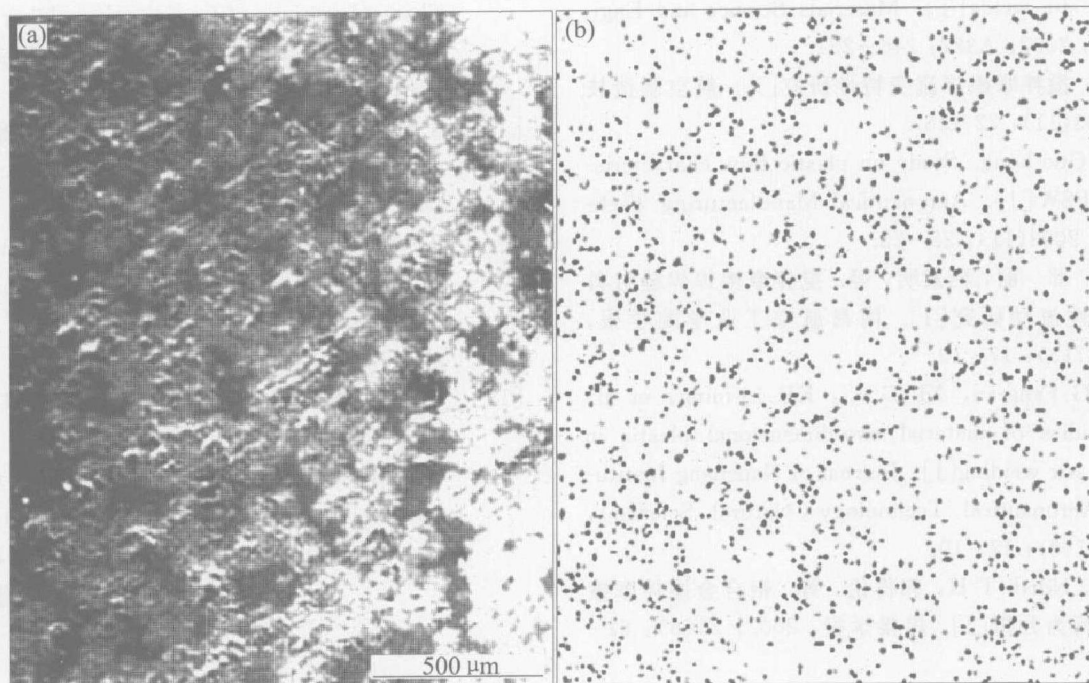


图 7 旋转区域放大及 Al 元素面扫描分析图

Fig 7 Enlarged rotation zone and areascan of Al element

(a) —Enlarged rotation zone; (b) —Areascan of rotation zone

的位置。前进侧金属流动不会超过焊缝中心线进入返回侧；而返回侧一部分金属越过焊缝中心线进入前进侧。

3) 焊缝上部金属流动主要受轴肩作用。前进侧大部分金属向前流动，并且终止在前进侧，小部分金属向后流动不超过一个搅拌针半径的距离；返回侧金属向后流动绕过焊缝中心线进入前进侧直至摩擦头前方。

4) 受摩擦头轴肩压力和温度场分布的影响，焊缝金属向前流动受到的阻力要大于向后流动受到的阻力，大部分金属向后流动，而且向前流动的最远距离要小于向后流动的最远距离。

REFERENCES

- [1] Blair L, Murray M, William B, et al. Material flow in friction stir welding monitored with AFS and AFW composite markers [A]. Symposium Sponsored by the Shaping and Forming Committee of the Materials Processing & Manufacturing Division of TMS [C]. TMS Indianapolis America 2003. 3-12.
- [2] Ying Li, Murr L E, McClure J C. Solid-state flow visualization in the friction stir welding of 2024 Al to 6061 Al [J]. Scripta Materialia 1999, 40(9): 1041-1046.
- [3] Seidel T U, Reynolds A P. Visualization of the material flow in AA2195 friction-stir welds using a marker insert technique [J]. Metallurgical and Materials Transactions, 2001, 32A(11): 2879-2884.
- [4] Ying Li, Murr L E, McClure J C. Flow visualization and related microstructures associated with the friction stir welding of 2024 Al to 6061 Al [J]. Materials Science and Engineering A, 1999, 271(1-2): 213-223.
- [5] Ouyang J H, Kovacevic R. Material flow and microstructure in the friction stir butt welds of the same and dissimilar aluminum alloys [J]. Journal of Materials Engineering and Performance, 2002, 11(1): 51-63.
- [6] XU Shao-wen. Microstructure Analysis and Solid Mechanics Modeling of Friction Stir Welding [D]. University of South Carolina 2003.
- [7] Colligan K. Material flow behavior during friction stir welding of aluminum [J]. Welding Journal, 1999, 78(7): 229-237.
- [8] Guerra M R. Material Transport During Friction Stir Welding [D]. The University of Texas at El Paso, 2001.
- [9] Seidel T U. The Development of a Friction Stir Welding Process Model Using Computational Fluid Dynamics [D]. University of Carolina 2002.
- [10] Guerra M, McClure J C, Murr L E, et al. Metal flow during friction stir welding [J]. Friction Stir Welding and Processing, 2001, 4(4): 25-34.
- [11] Guerra M, Schmidt C, McClure J C, et al. Flow pattern during friction stir welding [J]. Materials Characterization, 2002, 49(2): 95-101.
- [12] Krishnan K N. On the formation of onion rings in friction stir welds [J]. Materials Science and Engineering, 2002, A327: 246-251.

- [13] 栾国红. 搅拌摩擦焊流变特性研究 [J]. 航空制造技术, 2003(11): 22- 25
LUAN Guo-hong Study on plastic flow characteristics of FSW [J]. Aeronautical Manufacturing Technology 2003 (11): 22- 25
- [14] 黄奉安, 邢 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
- [15] 栾国红, North T H, 郭得伦, 等. 铝合金搅拌摩擦焊接头行为分析 [J]. 焊接学报, 2002 23(6): 62- 66
LUAN Guo-hong North T H, GUO De-lun et al Characterizations of friction stir welding on aluminum alloy [J]. Transaction of the China Welding Institution, 2002 23(6): 62- 66
- [16] 王希靖, 陈书锦, 李常锋, 等. 搅拌摩擦焊机控制器的研制 [J]. 兰州理工大学学报, 2004 30(1): 15- 18
WANG Xi-jing, CHEN Shu-jin, LI Chang-feng et al Development of friction stir welding controller [J]. Journal of Lanzhou University of Technology, 2004 30(1): 15- 18
- [17] 郭瑞杰. 搅拌摩擦焊温度场数值模拟 [D]. 兰州: 兰州理工大学, 2004
GUO Rui-jie Numerical Simulation for the Temperature Field of Friction Stir Welding [D]. Lanzhou Lanzhou University of Technology, 2004

(编辑 袁赛前)