

引用格式:李侃,刘雪梅,赵海涛. 铝合金摩擦堆焊工艺与微观组织演变研究[J]. 热加工工艺, 2023, 52(13): 19-23.
DOI: 10.14158/j. cnki. 1001-3814. 20211174
http://www.rjggy.net rjggy@vip.163.com

铝合金摩擦堆焊工艺与微观组织演变研究

李侃¹, 刘雪梅¹, 赵海涛²

(1. 山东大学 材料科学与工程学院, 山东 济南 250061; 2. 中国航空制造技术研究院 航空焊接与连接技术航空科技重点实验室, 北京 100024)

摘要:采用摩擦堆焊技术在 2024 铝合金表面得到成型良好的 6061 铝合金堆焊层。适当提高轴向进给速度可以改善堆焊层的成型。堆焊层横截面呈流线组织,中心区域堆焊层与基板界面结合良好,但前进侧与后退侧界面处存在结合不足的缺陷。对堆焊层进行电子背散射衍射(EBSD)分析得出,摩擦堆焊过程中发生动态再结晶,堆焊层晶粒呈高度细化的等轴晶,且小角晶界比例提高。由于堆焊层不同区域热输入存在差异,晶粒细化程度和小角晶界比例略有不同。6061-T6 铝合金经过摩擦堆焊,其热处理强化效果消失,堆焊层硬度相较于原始棒材发生一定程度的降低。

关键词:摩擦堆焊;6061 铝合金;组织演变;动态再结晶

中图分类号: TG455

文献标识码: A

文章编号: 1001-3814(2023)13-0019-05

Research on Aluminum Alloy Friction Surfacing Process and Microstructure Evolution

LI Kan¹, LIU Xuemei¹, ZHAO Haitao²

(1. School of Materials Science & Engineering, Shandong University, Ji'nan 250061, China; 2. Aeronautical Key Laboratory for Welding and Joining Technologies, AVIC Manufacturing Technology Institute, Beijing 100024, China)

Abstract: Well-formed 6061 aluminum alloy deposits were fabricated on 2024 aluminum alloy substrate by using friction surfacing, and the formation of the deposits can be improved by properly increasing the axial feed speed. The cross section structure of the deposit shows a streamlined structure. The interface between deposit and substrate in the central zone is well bonded, but there are some insufficient bonding defects at the advancing side and the retreating side. The electron backscattered diffraction (EBSD) analysis of the deposits shows that dynamic recrystallization occurs during the friction surfacing process, and the grains are highly refined and the proportion of low angle grain boundary increases. Due to different heat input in different zone of the deposit, the degree of grain refinement and the proportion of low angle grain boundary are slightly different. The heat treatment strengthening effect of 6061 aluminum alloy disappears during the friction surfacing process, therefore the hardness of the deposits is lower than that of the base metal.

Key words: friction surfacing; 6061 aluminum alloy; microstructure evolution; dynamic recrystallization

摩擦堆焊(friction surfacing, FS)的概念最早于 1941 年由 Klopstock 和 Neelands 提出并申请专利,并在随后的几十年中得到了应用和发展^[1]。摩擦堆焊原理如图 1 所示,利用高速旋转的棒材与母材的摩擦产热及塑性变形产热,借助材料的相互扩散达到原子间的结合。堆焊过程中不发生材料的熔化和

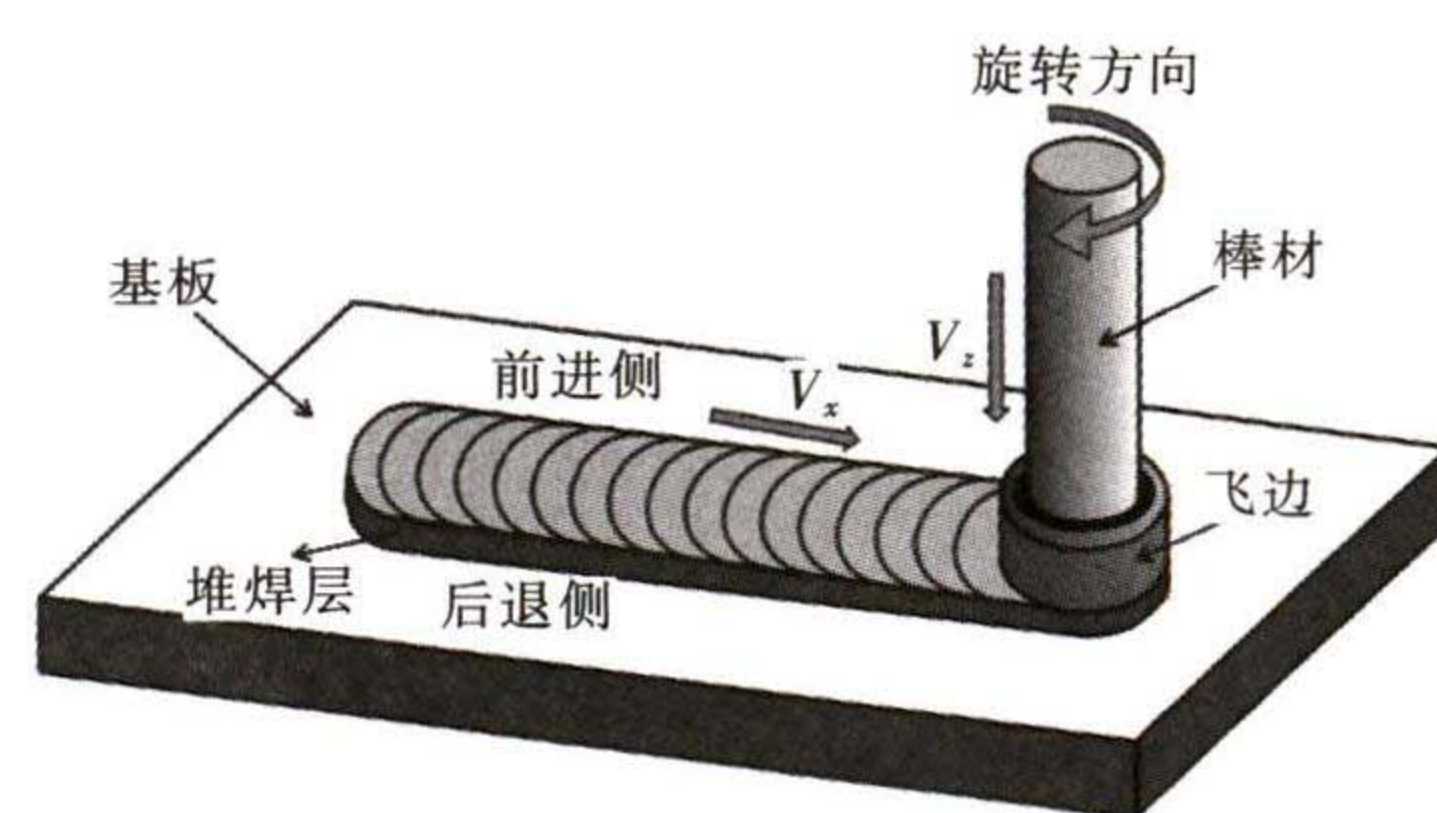


图 1 摩擦堆焊原理示意图

Fig.1 Schematic diagram of friction surfacing

收稿日期:2021-04-28

基金项目:航空科学基金项目(201811Q3001)

作者简介:李侃(1995-),男,山东菏泽人,博士,主要研究方向:焊接工艺;

电话:15624533591;E-mail:sdu_likan@163.com

通讯作者:刘雪梅(1976-),女,山东烟台人,副教授,主要从事摩擦焊、材料

表面改性、焊接过程数值模拟等方面的研究;

电话:13969092761;E-mail:xuemei_buaa@sdu.edu.cn

凝固收缩,有效降低了稀释率和裂纹倾向^[2]。摩擦堆焊不仅可以用来修补磨损的表面和裂纹,也可以在材料表面进行同种或异种材料的多层多道堆焊,从而实现增材制造,具有广阔的应用前景^[3-4]。

2024 铝合金属于 Al-Cu 系铝合金,多采用时效

强化机制,硬度高,强度大,具有良好的力学性能,被广泛应用于飞机承力结构件的制造。但 2024 铝合金在复杂大气环境中易受到腐蚀,严重影响其使用寿命。6061 铝合金属于 Al-Mg-Si 系铝合金,综合力学性能好,同时具有较好的耐蚀性,T6 热处理为固溶+人工时效处理,主要强化相为 Mg_2Si 。Hanke 等^[5]对比了 6082 铝合金和 5083 铝合金在 2024 铝合金表面进行摩擦堆焊得到的堆焊层,高转速下 6082 铝合金堆焊时产热多,工艺稳定且效率更高,堆焊层厚且均匀。Gandra 等^[6]利用摩擦堆焊在 2024-T3 铝合金基体上得到了成型良好的 6082 堆焊层,性能测试结果表明,堆焊层总体硬度下降,但晶粒细化有助于改善其耐磨性。同时得出 2024-T3 铝合金基板表面受热发生轻微过时效,产生 2.2 mm 深的热影响区,硬度降低了 6%。Yu 等^[7]利用电子背散射衍射(EBSD)分析了 6061 铝合金在 Q235 钢板表面摩擦堆焊过程中的微观组织演变,认为连续动态再结晶导致堆焊层晶粒细化,且钝化作用增强,相对于棒材耐蚀性增加。

本试验通过摩擦堆焊在 2024 铝合金基体表面得到 6061 铝合金堆焊层,并对摩擦堆焊过程中铝合金的微观组织演变进行了研究。

1 试验材料及方法

本试验采用的 2024 铝合金板材厚度为 5 mm,棒材选择直径 15 mm 的 6061-T6 铝合金,其化学成分见表 1。

表 1 6061-T6 和 2024 铝合金的化学成分(质量分数,%)
Tab.1 Chemical composition of 6061-T6 and 2024 aluminum alloys (wt%)

材料	Si	Fe	Cu	Mn	Mg	Cr	Zn	Ti	Al
6061-T6	0.56	0.64	0.28	0.15	1.00	0.19	0.20	0.14	余量
2024	0.24	0.27	4.25	0.46	1.40	0.06	0.13	0.08	余量

摩擦堆焊过程在改造后的铣床上进行,焊前用砂纸对铝板表面进行打磨并用酒精清洗,去除氧化皮与油污。经过前期探索,得到适宜的工艺参数:转速 N 为 1100 r/min,横向进给速度 V_x 为 8 mm/s,轴向进给速度 V_z 通过试验过程中轴向位移与时间比得到。具体参数见表 2。

对摩擦堆焊增材制造工艺进行了初步探究,采用上述 4 组参数得到了第一层堆焊层。为保证后续堆焊过程稳定,对第一层堆焊层表面进行铣削加工。

表 2 工艺参数
Tab.2 Process parameters

编号	$V_x/(mm \cdot s^{-1})$	$V_z/(mm \cdot s^{-1})$	V_z/V_x	$N/(r \cdot min^{-1})$
1	8	2.4	0.30	1100
2	8	2.7	0.34	
3	8	3.0	0.38	
4	8	3.7	0.46	

第二层堆焊工艺预设转速 N 和横向进给速度 V_x 与第一层保持一致,但堆焊方向相反。

为了研究堆焊层的微观组织演变,选取原始棒材纵截面和堆焊层横截面进行了金相观察和 EBSD 分析。EBSD 几何方向设置如图 2 所示。使用 200~2500 目金相砂纸对试样表面进行打磨,在高氯酸-乙醇溶液中进行电解抛光。使用 VHX-500F KEYENCE 数字显微镜进行金相观察,观察前使用凯勒试剂对样品表面进行腐蚀。使用 JSM-7800F SEM 和 Oxford NordlysMax3 系统得到了 EBSD 原始数据,并通过 Channel5 软件对数据进行了分析处理。使用 DHV-1000 型显微硬度计在堆焊层横截面按照图 3 所示选点测量硬度值。

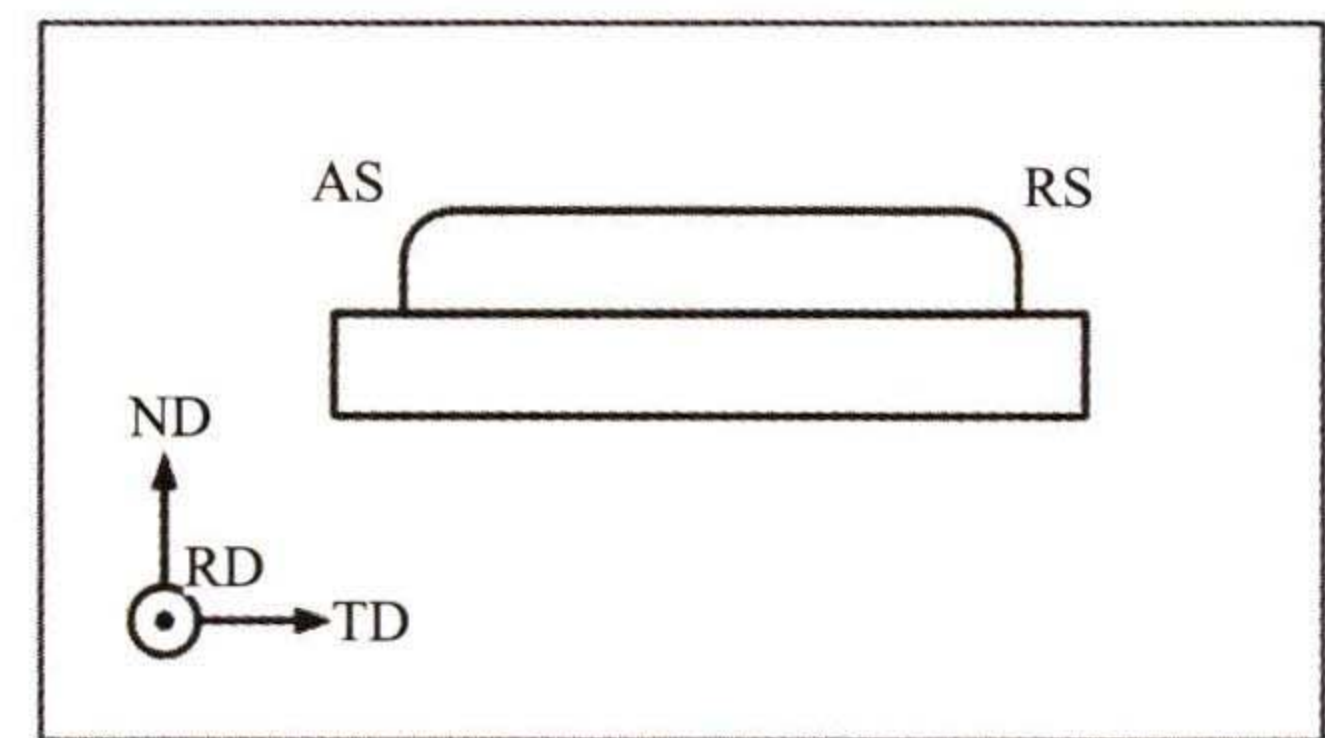


图 2 EBSD 几何方向设置
Fig.2 EBSD geometric direction

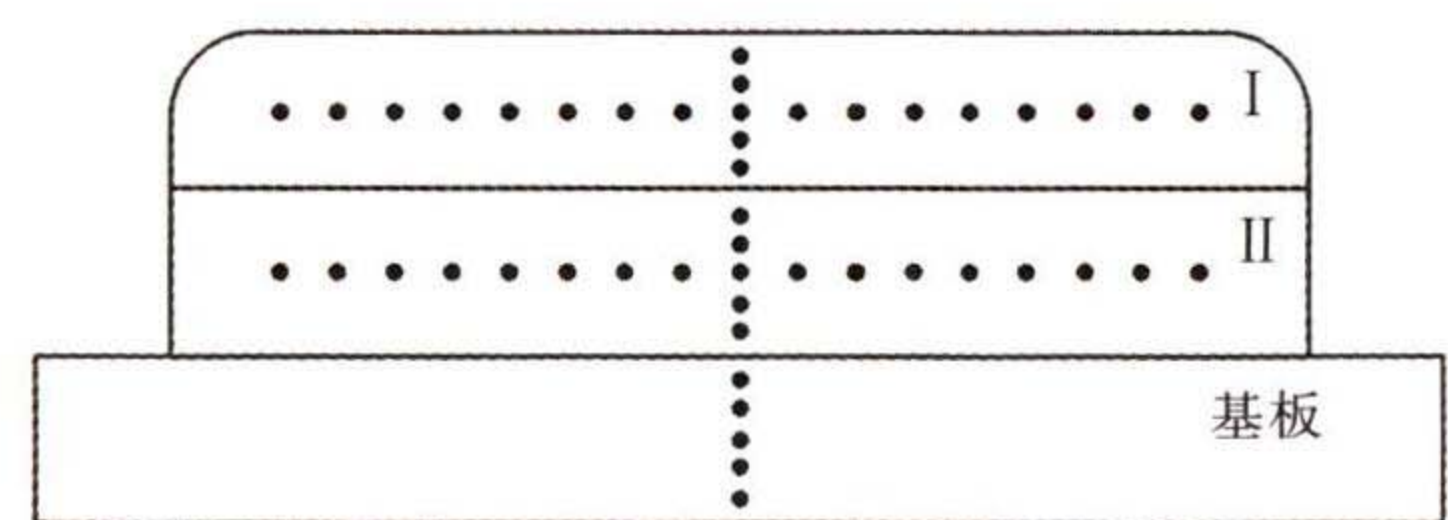


图 3 硬度测试选点示意图
Fig.3 Schematic diagram of selecting points for hardness testing

2 结果与讨论

2.1 堆焊层成型

不同参数下得到的堆焊层形貌如图 4 所示。在合适的工艺参数下,摩擦堆焊工艺过程稳定,得到的堆焊层形状完整均匀,表面呈鱼鳞状。对比得出,当 V_z 较小时,堆焊层成型不均匀,后退侧(RS)明显不如前进侧(AS)平滑。增加 V_z ,堆焊层后退侧成型得

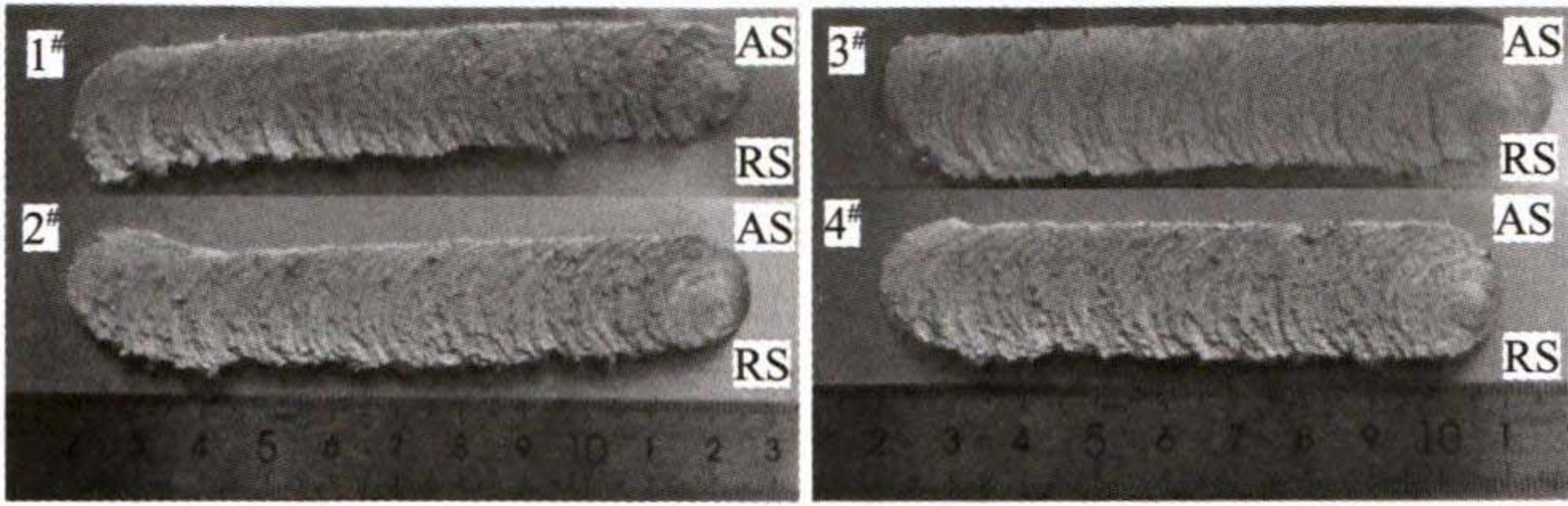


图4 堆焊层的外观形貌
Fig.4 Appearance of the deposits

到改善,堆焊层宽度和厚度增加。Galvis 等^[8]认为轴向压力和进给速度呈正相关,提高 V_z 可以改善材料的流动。在合适的工艺窗口范围内,较大的 V_z 有利于堆焊层的成型,同时提高了堆焊效率。

2.2 堆焊层宏观组织

选择外观形貌最均匀的第4组堆焊层,在中间均匀部分截取试样,对堆焊层横截面进行金相观察,得到图5。堆焊层宽度约20mm,大于棒材直径(15mm)。这是由于堆焊过程中棒材端部受挤压产生飞边,塑性材料向两侧过渡。堆焊过程中,堆焊层中心区域(CZ)受到的压力较大,产生凹陷;两侧类似“挤出”效果,厚度较中心区域略有增加。在光学显微镜下观察,堆焊层前进侧(AS)具有明显的流线组织,且以堆焊层厚度的一半为界线,上方流线略微上翘,下方流线向下弯曲;而后退侧(RS)向下弯曲的流线组织占较大比例。Rafi 等^[9]利用钨粉示踪法探究了

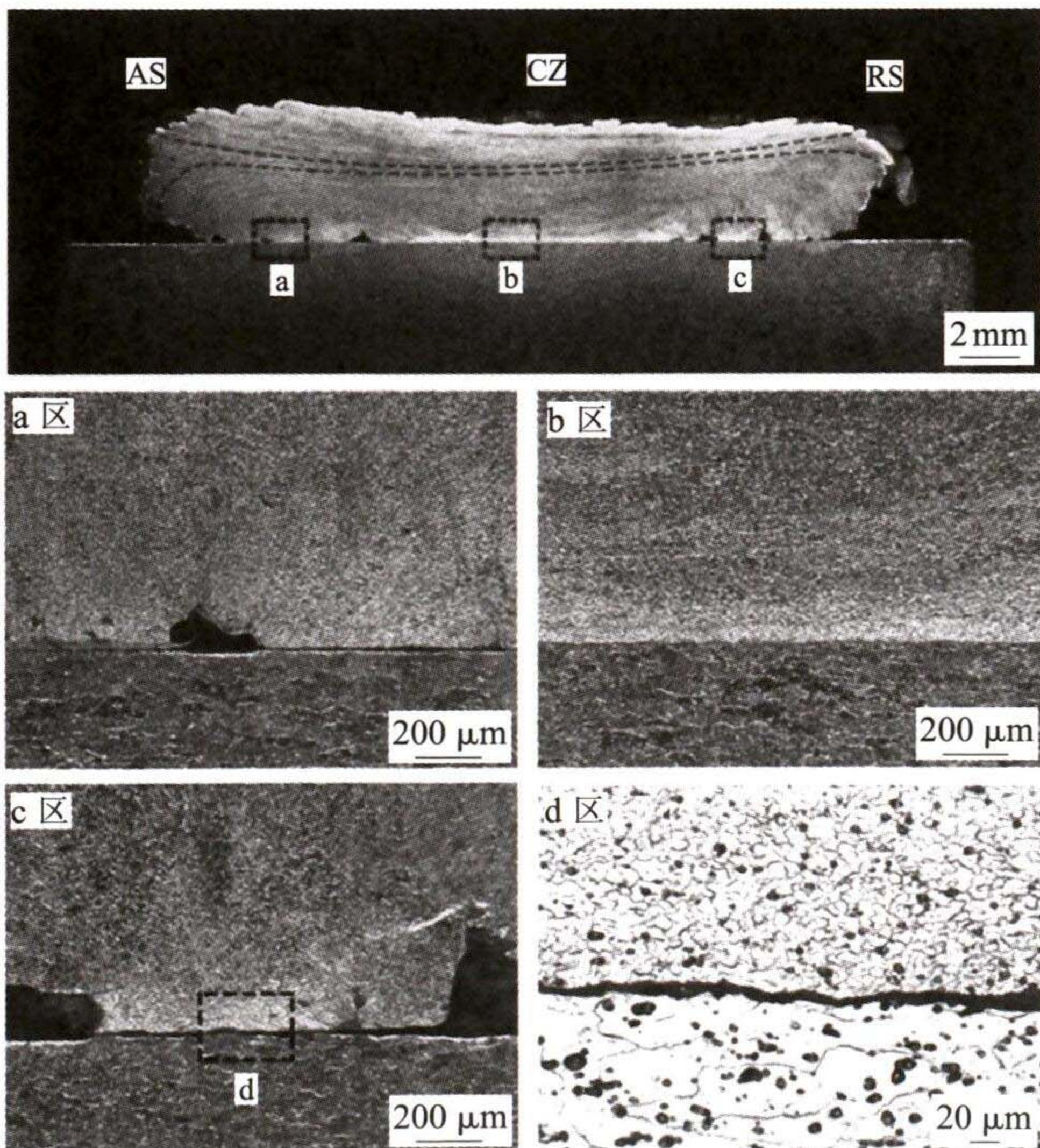


图5 单层堆焊层横截面的金相组织
Fig.5 Microstructure of cross section of the single layer deposit

摩擦堆焊过程中的材料流动,观察到材料从前进侧向后退侧流动。两侧流线组织的差异说明材料流动不足,从前进侧过渡到后退侧的材料较少,因此堆焊层后退侧厚度小于前进侧,且成型较差。堆焊层与基板结合处存在肉眼可见的缺陷,对界面放大观察发现,材料填充不足致使结合处出现多处孔洞缺陷(图5中a,c区),且在前进侧与后退侧均存在宽度约几微米的缝隙(图5中d区)。这是由于堆焊过程中飞边提供的压力不足,导致堆焊层边缘处结合不良。中心区域的结合明显优于两侧,堆焊层与基板间不存在缝隙,也鲜有孔洞等缺陷(图5中b区)。

在双层堆焊层中间位置截取试样进行金相观察,可以清楚地观察到两层堆焊层之间的分界线,见图6。两层堆焊层之间结合良好,只在第一层前进侧(AS)与第二层后退侧(RS')界面处发现少量孔洞缺陷,明显优于第一层与基板之间的结合,说明同种材料之间亲和性更好。由两层堆焊层之间的分界线弯曲情况可知,堆焊过程中第一层堆焊层表面发生变形,对分界线曲折的部位放大观察,发现两层堆焊层之间产生了类似于“铆接”的机械结构(图6(a)),该结构对于两层堆焊层之间的结合强度具有积极意义。第二层堆焊层流线组织较第一层更为明显,尤其是界面附近,晶粒发生明显的挤压变形,形成类似于轧制的织构(图6(b))。

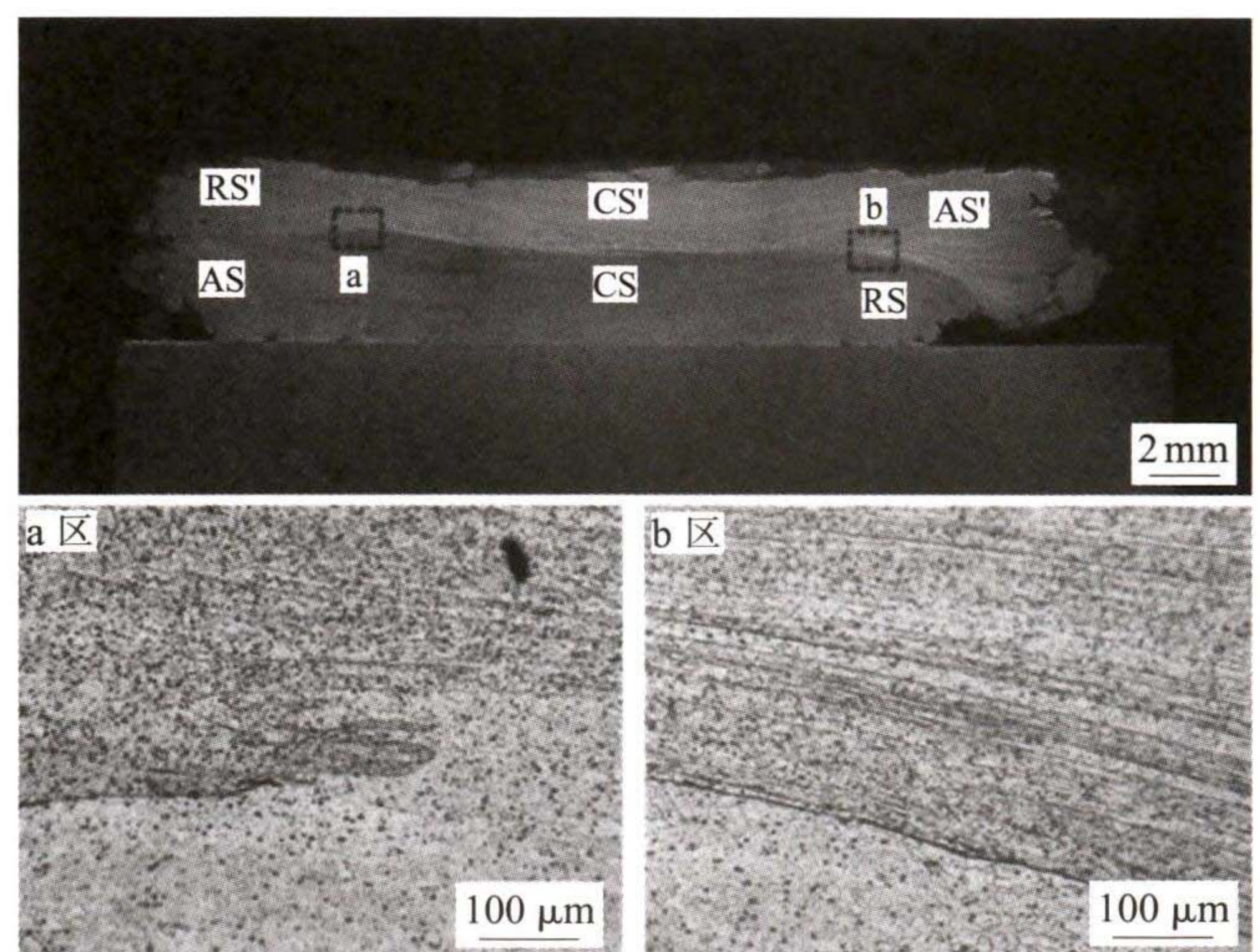


图6 双层堆焊层横截面的金相组织
Fig.6 Microstructure of cross section of the double-layer deposit

2.3 微观组织演变

对第4组参数下得到的堆焊层不同区域进行了EBSD分析,同时与原始棒材进行对照。图7为不同区域z轴方向的反极图(IPF-z)。原始棒材呈典型的

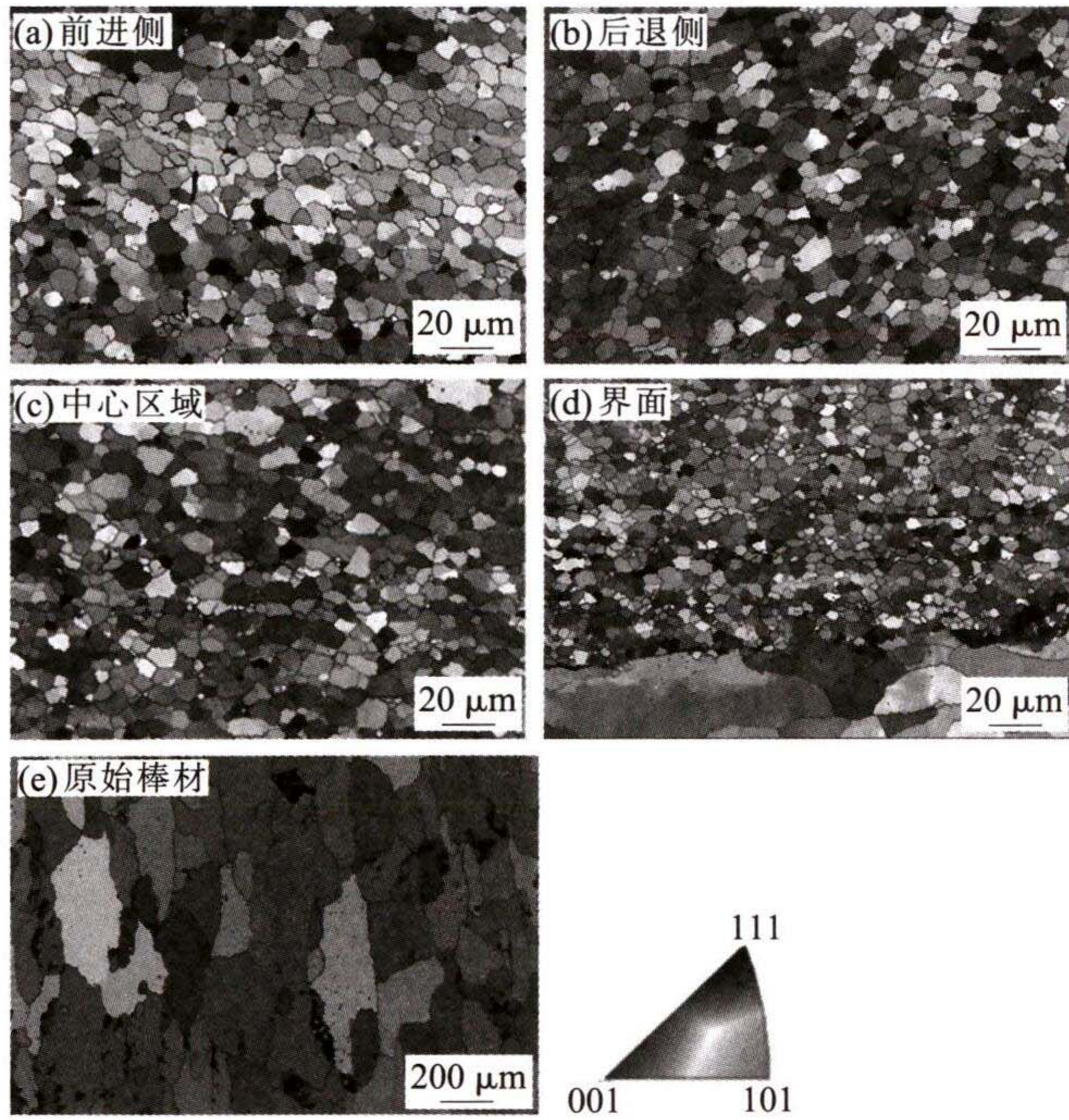


图7 堆焊层不同区域z方向的反极图
Fig.7 IPF-z images of different zones of the deposit

挤压棒材组织,晶粒沿纵向被拉长,晶粒尺寸较大。摩擦堆焊过程中在热输入和剪切应力作用下,晶粒发生动态回复和动态再结晶,堆焊层晶粒呈高度细化的等轴晶,且晶粒取向存在明显差异。中心区域堆焊层与基板界面处结合良好,棒材与基板接触受到急冷和强烈变形,晶粒细化最为明显。界面处堆焊层细小的晶粒甚至嵌入基板大晶粒中,形成牢固的冶金结合。

对EBSD数据进行处理,得到堆焊层不同区域和原始棒材的晶粒尺寸及大角晶界(HAGBs)、小角晶界(LAGBs)比例,见表3。数据显示堆焊层晶粒较原始棒材细化明显,且小角晶界比例明显升高。对堆焊层不同区域之间进行对比得出,前进侧晶粒相对较大,且小角晶界比例高,推测与热输入差异有关。Pirhayati等^[10]对铝合金摩擦堆焊过程中的温度场进行数值模拟得出,前进侧温度高于后退侧,中心区域界面处温度最低;他们认为摩擦堆焊过程中存储在

表3 堆焊层不同区域晶粒尺寸及晶界比例
Tab.3 Grain size and grain boundary proportion of different zones of the deposit

区域材料	晶粒尺寸/ μm	LAGBs 比例(%)	HAGBs 比例(%)
AS	10.63	53	47
RS	8.46	41	59
CZ	8.36	35	65
棒材	171.39	25	75

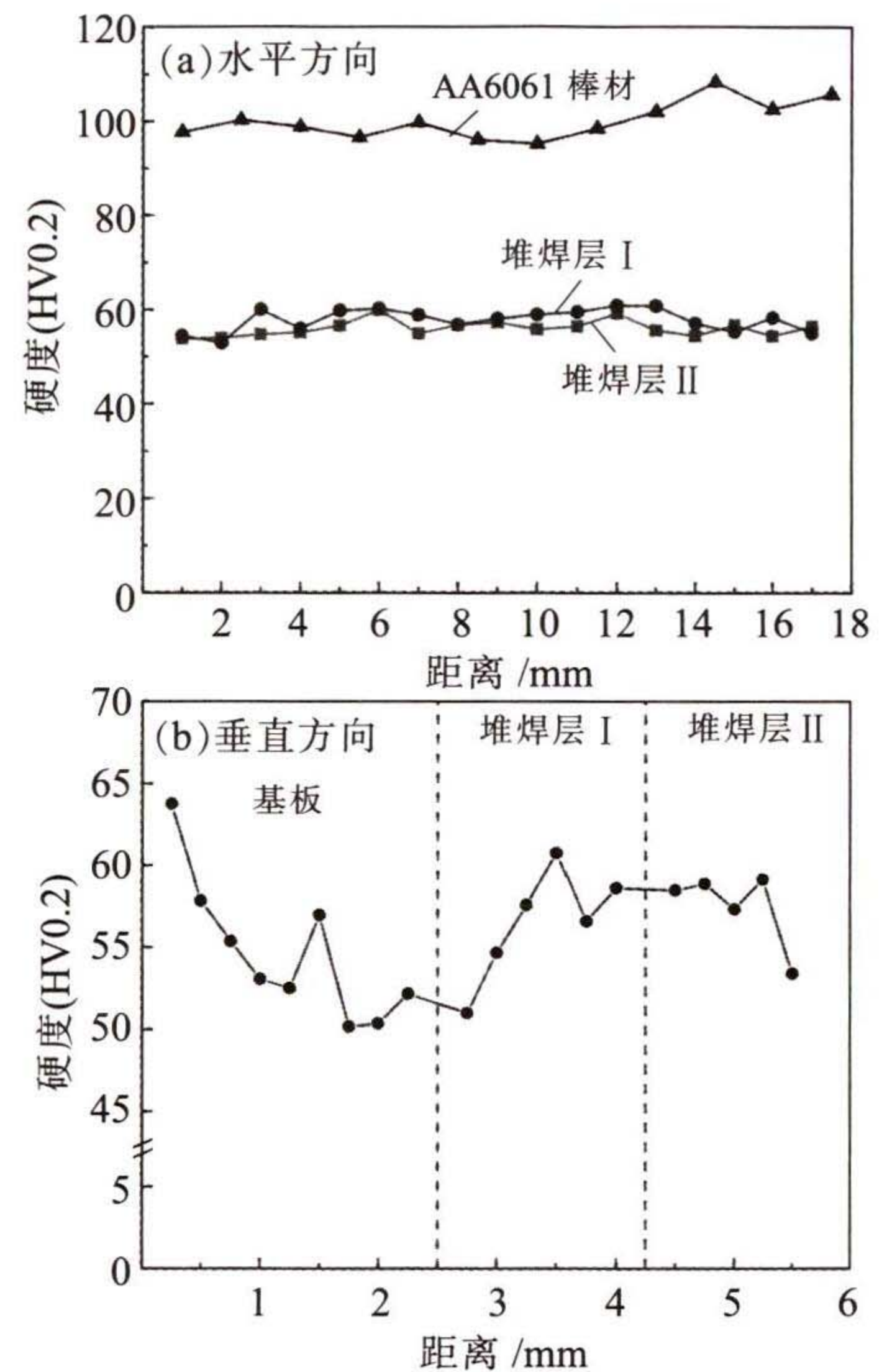


图8 堆焊层的硬度分布
Fig.8 Hardness distribution of the deposit

堆焊层中的应变能对晶粒结构演变的影响可以忽略不计,热输入被认为是决定晶粒尺寸的主要因素。这一观点与本试验结果相吻合。

2.4 硬度测试

从水平和垂直两个方向分别选点对双层堆焊层进行硬度测试,得到的硬度分布如图8所示。两层堆焊层硬度水平分布相对均匀,平均硬度分别为57.5、56.6HV,均低于原始棒材硬度(100HV)。原始棒材热处理状态为固溶+时效,强化机制主要为时效强化。在堆焊过程中,析出相受热重新固溶到基体中,失去了对基体的强化作用,因此堆焊层硬度显著降低。虽然堆焊层晶粒细化明显,但细晶强化作用不足以弥补析出相损失带来的负面影响。从垂直方向的硬度分布看,第一层堆焊层底部和基板表层受焊接热循环影响,硬度下降,该区域可视为接头热影响区。

3 结论

(1) 合适参数下使用6061-T6铝合金棒材在2024铝合金基板表面摩擦堆焊可以得到成型良好的堆焊层。控制转速和横向进给速度不变,轴向进给速度越大,堆焊层后退侧成型越完整。

(2) 堆焊层横截面金相呈流线组织,中心区域堆焊层与基板界面结合良好,两侧由于飞边提供的压力不足导致缺陷产生。多层堆焊层之间结合良好。


(3) 摩擦堆焊过程中晶粒发生动态再结晶,晶粒细化明显,小角晶界比例升高;不同区域热输入存在差异,晶粒尺寸和小角晶界比例略有差别。

(4) 堆焊层硬度均匀,但受焊接热循环影响,发生强化相的溶解,失去热处理强化效果,堆焊层硬度相比原始棒材显著下降。

参考文献:

- [1] Klopstock H, Neelands A R. An improved method of joining or welding metals:UK, GB572789[P]. 1941-10-17.
- [2] 刘雪梅,姚君山,张彦华,等. 摩擦堆焊技术研究进展 [J]. 热加工工艺, 2007, 36(11):62-65.
- [3] Dilip J, Babu S, Rajan S V, et al. Use of friction surfacing for additive manufacturing [J]. Materials & Manufacturing Processes, 2013, 28(2): 189-194.
- [4] Carlos G J, Fernandes O, Paula M, et al. Assessment of process parameters by friction surfacing on the double layer deposition [J]. Mat. Res, 2018, 21(3):1-11.
- [5] Hanke S, Santos J D. Comparative study of severe plastic

deformation at elevated temperatures of two aluminium alloys during friction surfacing [J]. Journal of Materials Processing Technology, 2017, 247:257-267.

- [6] Gandra J, Pereira D, Miranda R M, et al. Deposition of AA6082-T6 over AA2024-T3 by friction surfacing-mechanical and wear characterization [J]. Surface & Coatings Technology, 2013, 223:32-40.
- [7] Yu M, Zhang Z, Zhao H, et al. Microstructure and corrosion behavior of the ultra-fine grained aluminum coating fabricated by friction surfacing[J]. Materials Letters, 2019, 250:174-177.
- [8] Galvis J C, Oliveira P, Hupalo M F, et al. Influence of friction surfacing process parameters to deposit AA6351-T6 over AA5052-H32 using conventional milling machine[J]. Journal of Materials Processing Technology, 2017, 245:91-105.
- [9] Rafi H K, Phanikumar G, Rao K P. Material flow visualization during friction surfacing [J]. Metallurgical and Materials Transactions A, 2011, 42(4):937-939.
- [10] Pirhayati P, Aval H J. An investigation on thermo-mechanical and microstructural issues in friction surfacing of Al-Cu aluminum alloys [J]. Materials Research Express, 2019, 6(5): 12. 


(上接第 14 页) 拉伸孪晶,使板材伸长率达到最大值。由于经过弯曲限宽矫直工艺,板材中出现大量 $\{10\bar{1}2\}$ 拉伸孪晶,使晶粒绕 TD 向 RD 方向发生 86.3° 的偏转,在沿 RD 方向发生拉伸变形时,有助于协调板材的塑性变形,故板材的屈服强度明显降低,有利于板材塑性成形能力的提高。此外,由图 5 可以看出,室温弯曲限宽矫直后板材的工程应力-应变曲线出现“下凹”现象,原因是在沿着 RD 方向拉伸时发生“退孪生”^[4]软化效应。

3 结论

(1) 经过弯曲限宽矫直后由于预置了大量 $\{10\bar{1}2\}$ 拉伸孪晶,使晶粒向 RD 方向发生 86.3° 的偏转,原始板材的强基面织构完全消失,转变为 $\{10\bar{1}2\}$ 拉伸孪晶主导的 RD 偏转织构,由于加工硬化的出现,板材的抗拉强度达到最大值。经过弯曲限宽矫直后,板材的屈服强度明显降低。

(2) 弯曲限宽矫直并经退火处理后,板材中出现部分静态再结晶,同时保留了大量 $\{10\bar{1}2\}$ 拉伸孪晶,再结晶和孪晶共同协调板材的变形,使得板材断裂伸长率达到最大值。

参考文献:

- [1] He W, Zeng Q, Yu H, et al. Improving the room temperature stretch formability of a Mg alloy thin sheet by pre-twinning[J]. Materials Science and Engineering A, 2016, 655: 1-8.
- [2] Xin Y, Wang M, Zeng Z, et al. Tailoring the texture of magnesium alloy by twinning deformation to improve the rolling capability[J]. Scripta Materialia, 2011, 64(10):986-989.
- [3] Zhang H, Huang G, Wang L, et al. Improved ductility of magnesium alloys by a simple shear process followed by annealing[J]. Scripta Materialia, 2013, 69(1):49-52.
- [4] Wang L, Huang G, Quan Q, et al. The effect of twinning and detwinning on the mechanical property of AZ31 extruded magnesium alloy during strain-path changes [J]. Materials & Design, 2014, 63:177-184. 

(上接第 18 页)

- [5] 王子健,万林林,高自成,等. 海水泵用 UNS S32760 超级双相不锈钢焊接接头的组织和性能[J]. 热加工工艺, 2018, 47(9): 219-221.
- [6] 刘军,王家斌,邹英杰,等. 海水淡化泵用 2507 超级双相不锈钢铸件的焊接修复工艺[J]. 焊接, 2018(2):35-39.

- [7] 秦建,董显,路全彬,等. 双相钢焊接接头微观组织表征及性能分析[J]. 焊接, 2019(4):54-59.
- [8] 张志强,荆洪阳,徐连勇,等. 铁素体/奥氏体双相不锈钢焊接接头组织和性能的研究进展 [J]. 材料热处理学报, 2020, 41(5):13-27. 