

材料导报

Materials Reports

ISSN 1005-023X, CN 50-1078/TB

《材料导报》网络首发论文

题目： 7050 铝合金搅拌摩擦焊接头的微观织构演变与力学性能
作者： 金玉花，张林，张亮亮，王希靖
网络首发日期： 2020-08-26
引用格式： 金玉花，张林，张亮亮，王希靖. 7050 铝合金搅拌摩擦焊接头的微观织构演变与力学性能. 材料导报.
<https://kns.cnki.net/kcms/detail/50.1078.TB.20200826.1231.006.html>



网络首发：在编辑部工作流程中，稿件从录用到出版要经历录用定稿、排版定稿、整期汇编定稿等阶段。录用定稿指内容已经确定，且通过同行评议、主编终审同意刊用的稿件。排版定稿指录用定稿按照期刊特定版式（包括网络呈现版式）排版后的稿件，可暂不确定出版年、卷、期和页码。整期汇编定稿指出版年、卷、期、页码均已确定的印刷或数字出版的整期汇编稿件。录用定稿网络首发稿件内容必须符合《出版管理条例》和《期刊出版管理规定》的有关规定；学术研究成果具有创新性、科学性和先进性，符合编辑部对刊文的录用要求，不存在学术不端行为及其他侵权行为；稿件内容应基本符合国家有关书刊编辑、出版的技术标准，正确使用和统一规范语言文字、符号、数字、外文字母、法定计量单位及地图标注等。为确保录用定稿网络首发的严肃性，录用定稿一经发布，不得修改论文题目、作者、机构名称和学术内容，只可基于编辑规范进行少量文字的修改。

出版确认：纸质期刊编辑部通过与《中国学术期刊（光盘版）》电子杂志社有限公司签约，在《中国学术期刊（网络版）》出版传播平台上创办与纸质期刊内容一致的网络版，以单篇或整期出版形式，在印刷出版之前刊发论文的录用定稿、排版定稿、整期汇编定稿。因为《中国学术期刊（网络版）》是国家新闻出版广电总局批准的网络连续型出版物（ISSN 2096-4188，CN 11-6037/Z），所以签约期刊的网络版上网络首发论文视为正式出版。

DOI:10.11896/cldb.19100068

7050 铝合金搅拌摩擦焊接头的微观织构演变与力学性能

金玉花^{1,2}, 张林¹, 张亮亮¹, 王希靖^{1,2}

(1 兰州理工大学材料科学与工程学院, 兰州 730050; 2 兰州理工大学省部共建有色金属先进加工与再利用国家重点实验室, 兰州 730050)

对 5 mm 厚 7050 铝合金搅拌摩擦焊接头各区域的微观织构演变、硬度分布及拉伸性能进行了研究, 并与完整焊缝接头的拉伸性能进行了对比。结果表明: 母材主要为亚结构组织, 存在 (011) [100] 高斯织构、(112) [111] 铜织构和 (001) [100] 立方织构; 焊核区发生动态再结晶, 主要为 [100]//WD、[110]//WD、[111]//WD 丝织构; 前进侧热力影响区存在 (111) [110] 剪切织构、(110) [112] 黄铜织构、(100) [012] 和 (100) [012] 再结晶织构; 而后退侧热力影响区为 (001) [110] 旋转立方再结晶织构和 (112) [111] 铜织构, 主要是由各微区热-力作用不同导致。焊缝区硬度呈“W”型分布, 硬度最小值出现在后退侧热影响区。前进侧与后退侧抗拉强度分别为 496.9 MPa 和 505.2 MPa, 达到母材强度的 88% 和 90%; 焊核区抗拉强度为 440.4 MPa; 完整焊缝抗拉强度最低, 为 415.7 MPa。

关键词 7050 铝合金 搅拌摩擦焊 电子背散射衍射 (EBSD) 拉伸性能

通信作者: 金玉花, yhjin8686@163.com

中图分类号: TG453 **文献标识码:** A

Microtexture Evolution and Mechanical Properties of Friction Stir Welded 7050 Aluminum Alloy

JIN Yuhua^{1,2}, ZHANG Lin¹, ZHANG Liangliang¹, WANG Xijing^{1,2}

1 Material Science and Engineering Institute, Lanzhou University of Technology, Lanzhou 730050, China;

2 State Key Laboratory of Advanced Processing and Recycling of Non-ferrous Metals, Lanzhou University of Technology, Lanzhou 730050, China

基金项目: 国家自然科学基金 (51865028)

This work was financially supported by the National Natural Science Foundation of China (51865028).

The microtexture evolution, hardness distribution and tensile properties of the friction stir welded joint of 7050 aluminum alloy with a thickness of 5 mm were studied and compared with the tensile properties of the complete welded joints. The results show that the base metal is mainly for the substructure, with (011) [100] Goss texture, (112) [111] copper texture and (001) [100] Cube texture. Dynamic recrystallization occurred in the weld nugget zone, mainly existing in [100]//WD, [110]//WD, [111]//WD fiber texture. There are (111) [110] shear texture, (110) [112] brass texture, (100) [012] and (100) [012] recrystallization texture in the thermo- mechanically affected zone of advancing side; the thermo-mechanically affected zone of retreating side is (001) [110] rotating cubic recrystallization texture and (112) [111] copper texture, mainly due to different thermal-mechanical action in each microzone. The hardness of the weld zone is "W" type distribution, and the lowest hardness is located in the heat-affected zone of retreating side. The tensile strength of the advancing side and the retreating side of the weld is 496.9 MPa and 505.2 MPa, respectively, reaching 88% and 90% of the tensile strength of the base metal. The tensile strength of the weld nugget zone is 440.4 MPa. The tensile strength of the complete welded joints is the lowest, 415.7 MPa.

Keywords: 7050 aluminum alloy, friction stir weld, electron backscattered diffraction(EBSD), tensile property

Correspondence: Yuhua Jin, yhjin8686@163.com

0 引言

7050 铝合金具有高的比强度、良好的断裂韧性和耐腐蚀性, 在航空航天、交通运输等工业领域越来越受到重视, 但其连接技术不理想成为约束该材料被广泛应用的障碍之一^[1-2]。自 1991 年搅拌摩擦焊 (Friction stir welding, FSW) 连接技术发明以来, 学者们开展了一系列利用该技术连接高强度 7xxx 系列铝合金的研究工作, 也取得了显著成效。研究主要集中在焊接工艺参数的优化^[3]、接头各区域微观组织及强化相的演变规律^[4]、微观组织的细化工艺^[5]、第二相对接头性能的影响^[6-7]、厚板搅拌摩擦焊组织与力学性能^[8-9]以及表面改性辅助提高接头强度^[10]等方面。然而, 在搅拌摩擦连接过程中, 焊接接头各区域除组织发生显著变化外, 织构也发生了演变。如 Suhuddin 等^[11]对 6016 铝合金薄板搅拌摩擦焊过程中的织构演变进行了研究, 发现在匙孔周围形成了 {112}<110>剪切织构, 而在远离匙孔的焊核区域, 由于经历了回复再结晶, 形成了 {100}<100>立方织构。Zhang 等^[12]研究了 6082-T6 铝合金搅拌摩擦焊焊核区上表面的晶粒取向, 发现焊核区中主要是 (111) [110] 剪切织构及 (001) [100]、(001) [110] 再结晶织构。Kalemba 等^[13]在研究 7136-T76 高强铝合金搅拌摩擦焊接头织构演变时得出: 从热力影响区到焊核区的织构强度逐渐减弱, 但织构变化非常复杂。7050 高强铝合金也属于 7xxx 系列铝合金, 目前对该材料焊接接头各微区织构、性能方面进行详细研究的报道比较少。

因此, 本试验以 5 mm 厚的 7050 铝合金搅拌摩擦焊接头为研究对象, 分析接头各区域微观织构的演变规律、显微硬度及拉伸性能, 为从织构演化角度研究焊接接头质量控制和预测提供试验数据和理论依据。

1 实验

实验材料选用厚度为 5 mm 的 7050 铝合金轧制态板材，其规格为 200 mm×100 mm，材料主要化学成分如表 1 所示。

表 1 7050 铝合金的化学成分（质量分数/%）

Table 1 Chemical compositions (wt%) of the 7050 aluminum alloy

Zn	Mg	Cu	Fe	Si	Ti	Mn	Al
6	2.3	2.0	0.15	0.1	0.06	0.05	Bal.

采用带螺纹的圆柱形搅拌头（轴肩直径为 18 mm，搅拌针直径为 5 mm，长度为 4.7 mm），焊接工艺参数：搅拌头旋转速度为 900 r/min，焊接速度为 100 mm/min，下压量为 0.2 mm，搅拌头倾斜角度 2°。沿垂直板材轧制方向进行接焊，得到成形良好的接头。焊接完成后垂直于焊接方向制取金相试样、EBSD 试样及拉伸试样，金相试样经砂纸粗磨细磨机械抛光至无划痕，用 Keller 试剂（体积比为 HF: HCl: HNO₃: H₂O=2: 3: 5: 190）进行金相腐蚀；EBSD 试样经机械抛光后再在 10%高氯酸无水乙醇溶液中进行电解抛光，去除残余应力，抛光电压为 20 V，电解液温度为 -20 °C，电解时间为 40 s。拉伸试样截取位置及各微区试样尺寸如图 1 所示。采用 Axio Scope A1 光学显微镜、带有 EBSD 探头和 Channel 5 取向分析系统的 Quanta FEG-450 扫描电镜（SEM）对接头横截面各特征区域进行宏观、微观组织形貌观察，晶粒取向表征；用 HV-1000B（100 gf，加载 15 s）数字维氏显微硬度仪测量焊接接头的显微硬度；在 CSS-44100 型微机控制电子式万能试验机上进行室温拉伸试验，拉伸速率为 0.2 mm/min。

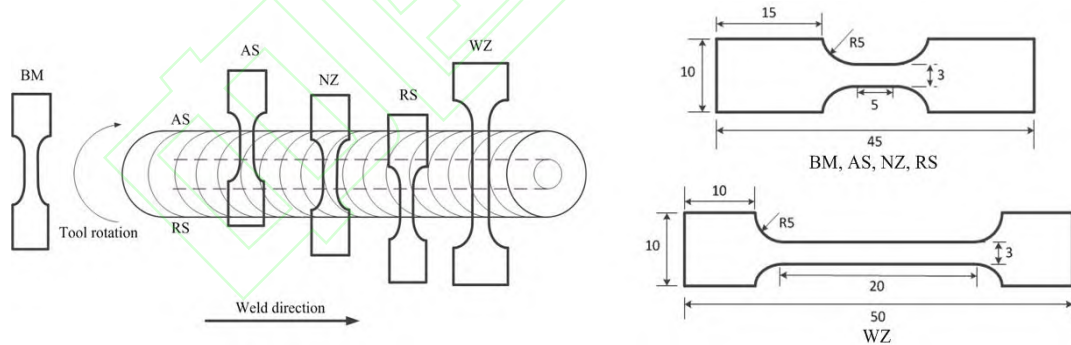


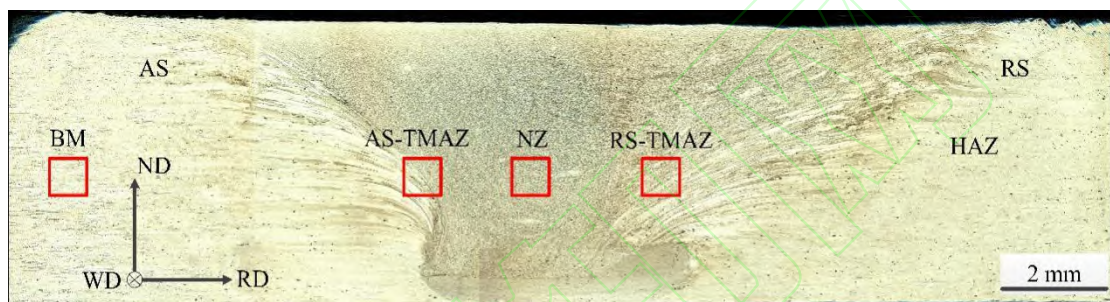
图 1 搅拌摩擦焊接头拉伸试样取样的位置及尺寸示意图

Fig.1 Schematic diagram of sampling position and dimension of friction stir welding joint tensile specimen

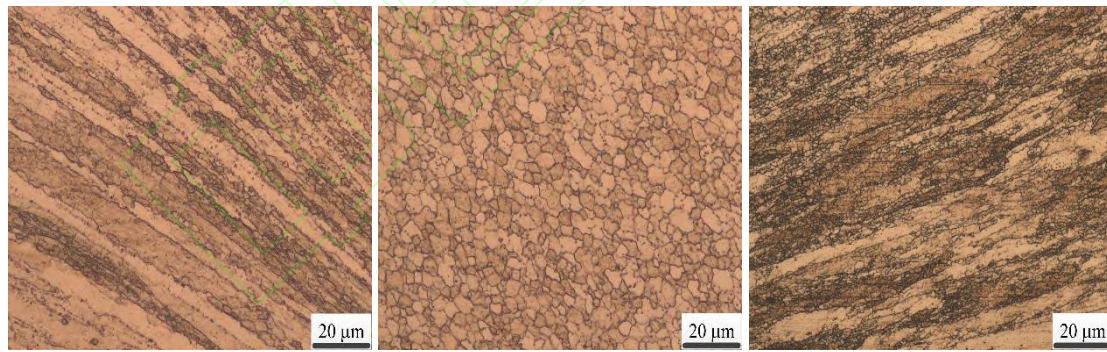
2 结果与分析

2.1 焊接接头各区域微观组织结构及晶界类型

图2为经Keller试剂腐蚀后的焊接接头横截面的宏观形貌以及不同区域微观组织。由图2a可以看出焊缝整体(Weld zone简称WZ)形貌呈现出典型的FSW区域特征,焊缝区上宽下窄为“漏斗状”,旋转方向和前进方向一致的一侧为前进侧(AS),相反的一侧为后退侧(RS),焊缝中心部分为焊核区(NZ)。焊核区两侧为热力影响区(TMAZ),热力影响区以外为热影响区(HAZ)。与母材相比,热影响区的晶粒结构没有明显的变化,只有热循环作用。前进侧热力影响区(AS-TMAZ)与焊核区之间边界清晰可见,而后退侧热力影响区(RS-TMAZ)与焊核区边界较模糊、过渡平缓。这是因为前进侧和后退侧金属所受搅拌针的作用力不同,导致发生塑性变形的金属流动模式存在差异。前进侧材料受到搅拌针的连续剪切作用且初始温度较低,与紧邻流动的金属变形差异较大^[14];而后退侧金属有一定的初始温度,且塑性变形金属流动方向跟搅拌针旋转方向一致,因此其边界过渡较平缓。热力影响区由于受到搅拌针的机械搅拌作用以及摩擦热作用,晶粒变形被拉长且发生部分动态再结晶,如图2b、2d所示。焊核区由于受到搅拌针剧烈的搅拌作用以及充分的热循环作用,发生动态回复再结晶,形成细小的等轴状晶粒,如图2c所示。



(a)



(b)

(c)

(d)

图2 焊接接头横截面的宏观形貌及不同区域的显微组织:

(a)焊缝、(b)前进侧热力影响区、(c)焊核区、(d)后退侧热力影响区

Fig.2 Macroscopical morphology of cross-section of whole weld zone and microstructure of different regions:

(a)WZ, (b)AS-TMAZ, (c)NZ, (d)RS-TMAZ

图3为母材(BM)、焊核区、前进侧热力影响区以及后退侧热力影响区的EBSD晶粒取向图。定义取向差 $2^{\circ}\sim 15^{\circ}$ 为低角度晶界,大于 15° 为高角度晶界,EBSD取向图中黑色线为高角度晶界,白色线为低角度晶界。图3a为母材沿轧制方向排列的具有致密亚结构的细长晶粒,展现出高度不均匀的微观结构(典型的轧制组织结构),平均晶粒尺寸为 $71\mu\text{m}$;由图5所示,得知母材有大量的低角度晶界,比例为91%,其晶粒间的取向差完全偏离自由取向差,表明母材呈现出明显的择优取向,如图4(a)所示。在热、力双重作用下,焊核区经历了动态再结晶,形成了等轴状晶粒以及长条状晶粒,平均晶粒尺寸为 $7.5\mu\text{m}$,属于细小的动态再结晶结构;与母材相比,焊核区低角度晶界的体积分数显著下降至41%,而高角度晶界的体积分数升高到59%,如图5所示。这主要是由于塑性变形产生的位错被亚晶界连续吸收,低角度晶界间的取向差增加,随后在热循环作用下低角度晶界极易变成高角度晶界,此过程通常被称为“连续动态再结晶”^[15-16]。

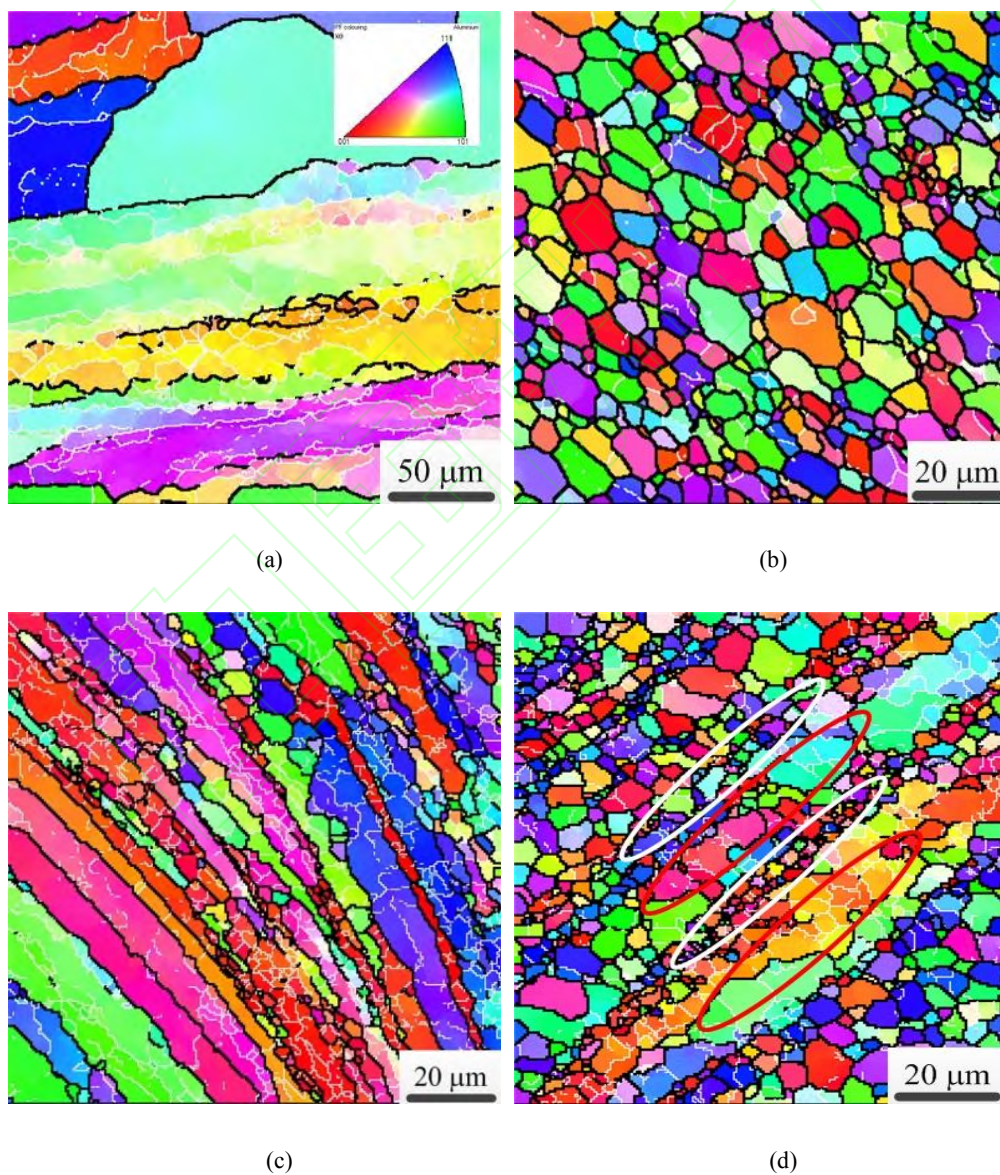


图3 母材及焊接接头各区域的EBSD图:

(a)母材; (b)焊核区; (c)前进侧热力影响区; (d)后退侧热力影响区

Fig.3 EBSD maps of base metal and each area of welded joint:

(a)BM, (b)NZ, (c)AS-TMAZ, (d)RS-TMAZ

而前进侧热力影响区相对于后退侧塑性变形程度较小，储存的能量较低，且热输入较低，变形亚结构没有足够的能量进行充分动态再结晶，呈现条状变形结构（平均晶粒尺寸为 $23\ \mu\text{m}$ ），因此前进侧热力影响区低角度晶界体积分数达到 67%，高角度晶界体积分数为 33%，如图 4c、图 5 所示。由图 3c 可以看出，在焊接过程中，由于搅拌针的旋转剪切作用，晶粒发生变形弯曲，且长条状晶粒内发生位错塞积与重组；在热塑性变形过程中，长条状晶粒内的部分亚晶粒通过吸收位错发生旋转形成再结晶晶粒。而后退侧热力影响区相对于前进侧热力影响区塑性变形程度较大，且在焊接过程中，后退侧温度高于前进侧，因此发生部分动态再结晶，部分低角度晶界持续吸收位错，角度不断增大，最终由低角度晶界转变为高角度晶界，呈现细小等轴再结晶晶粒带与粗大亚晶粒带交替的组织，平均晶粒尺寸为 $15\ \mu\text{m}$ ，如图 3d 所示，白色圈代表细小等轴再结晶晶粒带，红色圈代表粗大亚晶粒带，低角度晶界比例下降至 47%，高角度晶界体积分数为 53%（见图 4d、图 5）。

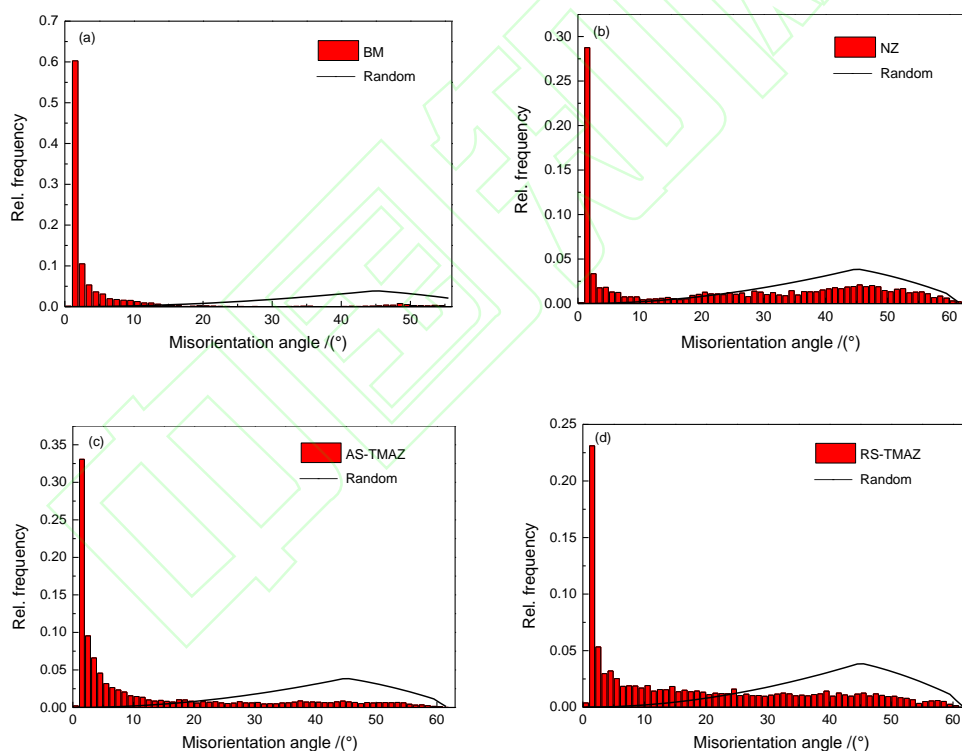


图 4 母材及焊接接头各区域的晶界取向差分布图:

(a)母材; (b)焊核区; (c)前进侧热力影响区; (d)后退侧热力影响区

Fig.4 Grain boundary misorientation of BM and of welded joint:

(a)BM, (b)NZ, (c)AS-TMAZ, (d)RS-TMAZ

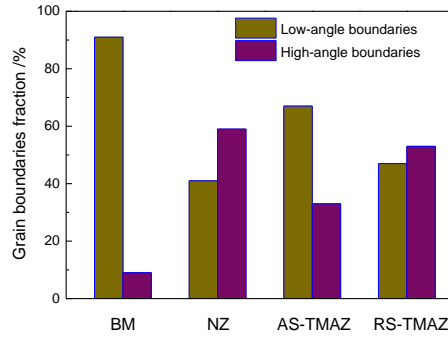


图5 母材、焊接接头各区域低角度及高角度晶界组分

Fig.5 Low-angle boundaries and high-angle boundaries fraction of BM and different regions of welded joint

2.2 焊接接头各区域微观组织演变规律

为了进一步揭示焊接接头各区域晶粒取向的演变规律，应用 Channel 5 取向分析软件，分析焊接接头不同区域晶粒的择优取向。图 6 为母材和焊接接头各区域的 (001)、(110) 与 (111) 极射赤面投影图，由图 6(a) 可知母材中主要为 (011) [100] 高斯织构，并含有少量的 (112) [111] 铜织构和 (001) [100] 立方织构。焊接过程中，由于各区域所能达到的温度峰值不同，软化后塑性变形能力不同，导致焊后接头各区域晶粒取向会存在一定的差异。起初，母材在摩擦热及搅拌针的旋转剪切作用下，沿剪切方向发生塑性变形，在前进侧热力影响区中产生 (111) [110] 剪切织构、(110) [112] 黄铜织构及介于立方织构和旋转立方织构之间的 (100) [012] 和 (100) [012] 再结晶织构，如图 6b 所示，其中 (111)、(110) 与 (100) 晶面法线平行于 RD 方向，[110]、[112]、[012] 和 [012] 晶向平行于 WD 方向，即平行于剪切方向。塑性变形过程中，对于面心立方结构的金属而言，晶体滑移通常沿 {111} <110> 方向。此过程中，(112) [111] 铜织构和 (011) [100] 高斯织构沿 [101] 晶向旋转 35° 分别形成 (111) [110] 剪切织构和 (110) [112] 黄铜织构；(001) [100] 立方取向晶粒为不稳定取向晶粒，在剪切应力作用下，(001) [100] 立方织构沿 [001] 晶向旋转 27° 形成 (100) [012] 和 (100) [012] 再结晶织构。

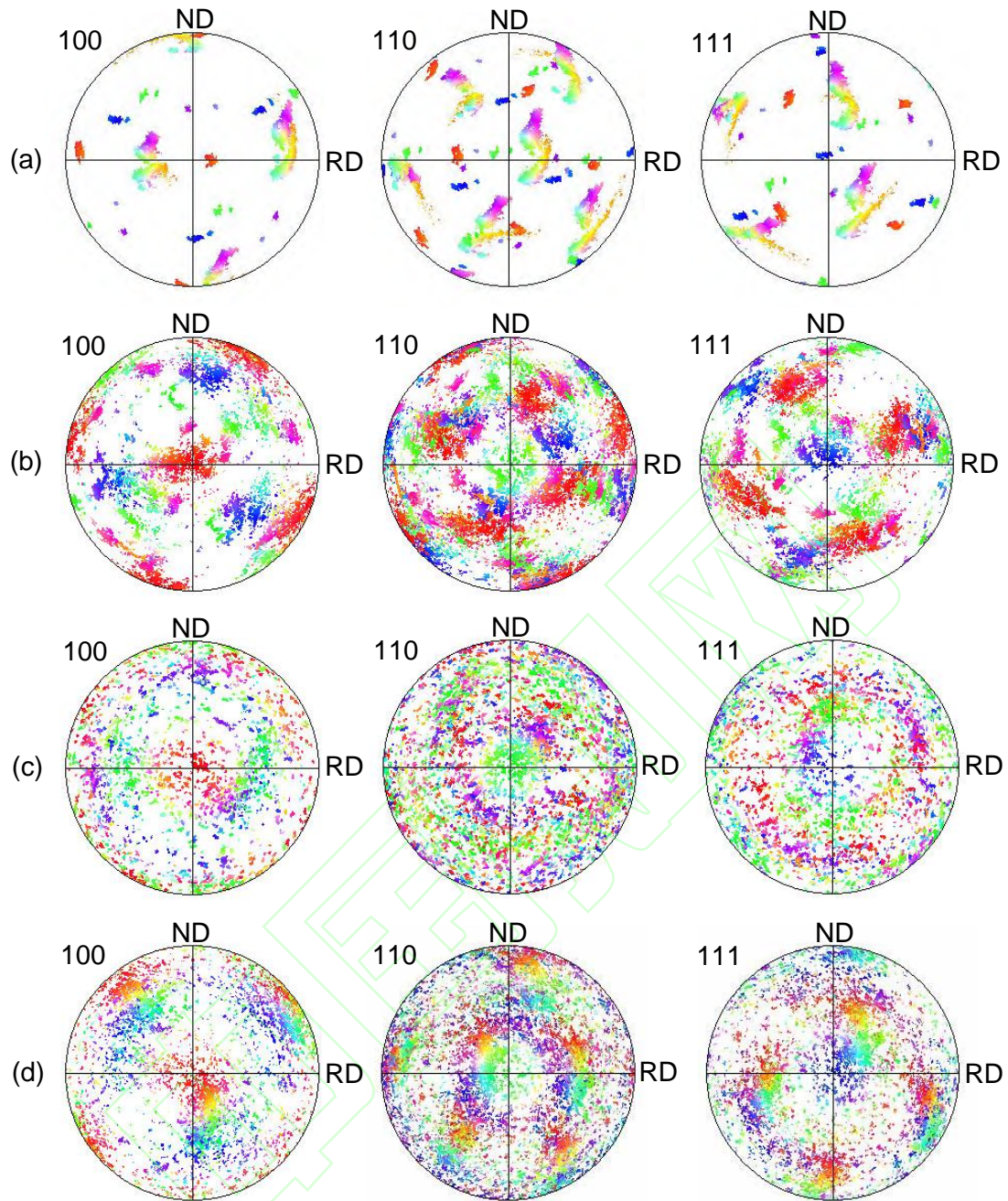


图6 母材、焊接接头各区域的(001)、(110)及(111)极图:

(a)母材、(b)前进侧热力影响区、(c)焊核区、(d)后退侧热力影响区

Fig.6 (001), (110), (111) pole figures of BM and different regions of welded joint:

(a)BM, (b)AS-TMAZ, (c)NZ, (d)RS-TMAZ

FSW 工艺与扭转或挤压工艺具有相似的组织，面心立方金属在挤压变形后存在纤维组织^[17]，搅拌头在旋转前进时，搅拌头前方材料受到严重挤压，因此焊核区中晶粒沿挤压方向产生一定变形，其晶粒 $\langle uvw \rangle$ 晶向平行于焊接方向(WD)。由于各相邻晶粒位向不同，当一个晶粒发生塑性变形时，为了保持变形的连续性，周围的晶粒中必然有多个滑移系同时启动，使晶粒沿某一特定晶向旋转，最终达到一个稳定的取向。由图 6c 可知，在焊核区主要形成 $[100]//WD$ 、 $[110]//WD$ 、 $[111]//WD$ 丝织构。

在焊缝中部，塑性金属随搅拌针进行旋转运动，前进侧金属材料经搅拌头旋转剪切作用后，流经焊核区到后退侧。因此，焊核区的[100]//WD、[110]//WD、[111]//WD取向晶粒经搅拌旋转发生轻微转动，在后退侧热力影响区进一步形成(001)[110]旋转立方再结晶组织和(112)[111]铜织构。

2.3 焊接接头硬度分布

如图7为FSW接头横截面不同深度和二维显微硬度分布图。由图7可以看出不同深度的硬度分布存在明显差异，从接头上部到下部，硬度主要分布范围从焊核区向两边热力影响区和热影响区过渡。这主要是由于在厚度方向上焊缝金属所受到的热-力作用不同，焊缝区上宽下窄为“漏斗状”，导致焊接接头上部主要为焊核区，下部为热力影响区与热影响区，硬度曲线分布大都呈“W”型。由图7b可以直观地看出焊接接头各区域的硬度存在明显差异，母材硬度在160HV左右，焊核区的硬度变化范围在133~173HV，前进侧热力影响区的硬度变化范围在123~143HV，而后退侧热力影响区的硬度变化范围较宽，硬度值在112~143HV。这是由于前进侧和后退侧塑性金属流动模式不同，后退侧微区范围金属流动变形差异相对于前进侧较小，且后退侧金属所受的热作用比前进侧大，所以后退侧热力影响区的硬度变化范围比前进侧热力影响区要大，这也说明后退侧热力影响区与焊核区边界比前进侧热力影响区与焊核区边界过渡要平缓。整个焊接接头最低硬度分布区域位于后退侧热影响区，硬度变化范围在92~112HV。

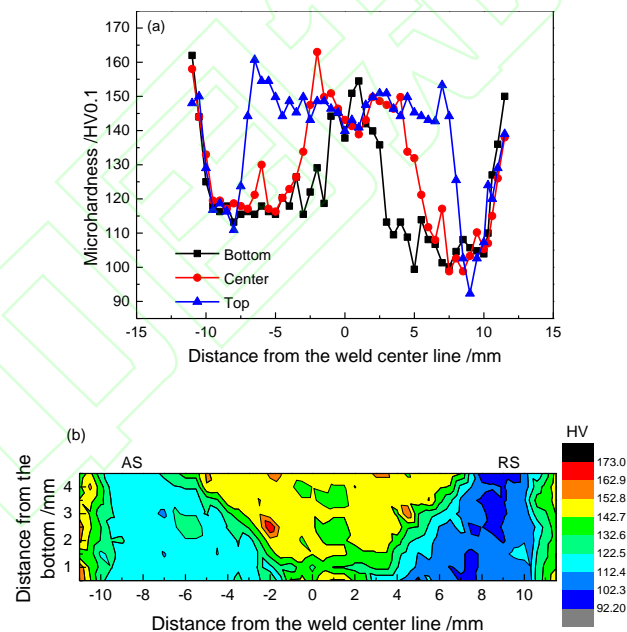


图7 FSW接头横截面显微硬度分布：(a)不同深度、(b)二维云图

Fig.7 Microhardness distribution on cross-section of FSW welded joint:

(a)different depths, (b)2D contour map

2.4 焊接接头各区域拉伸性能对比

图 8 为母材、完整焊缝及焊缝不同区域的拉伸性能，可以看出母材的抗拉强度和延伸率最高，分别为 562.1 MPa 和 8.6%；焊缝前进侧与后退侧的抗拉强度达到 496.9 MPa 和 505.2 MPa，分别为母材的 88% 和 90%，但其延伸率略有下降。断裂位置分别位于前进侧热影响区和后退侧热影响区，可能原因是热影响区受到热循环作用，组织有恶化现象产生，即晶粒变得粗大、晶界有杂质以及第二相粗化^[18]，在拉伸载荷作用下硬脆的第二相破裂，萌生微裂纹，最终在热影响区断裂^[19]。焊核区试样断裂发生在前进侧热力影响区与焊核区过渡处，抗拉强度为 440.4 MPa，达到母材强度的 78%，延伸率最低，为 4.0%。主要是焊核区试样中去除了热影响区及母材部分，导致热力影响区和焊核区过渡处容易成为该试样的薄弱区域，断裂在此处发生。完整焊缝的抗拉强度为 415.7 MPa，断裂位置位于前进侧轴肩边缘处，可能原因是前进侧轴肩边缘处存在明显的强化相分布差异，在拉伸过程中此处产生较大的应力集中、萌生裂纹，最后断裂失效。

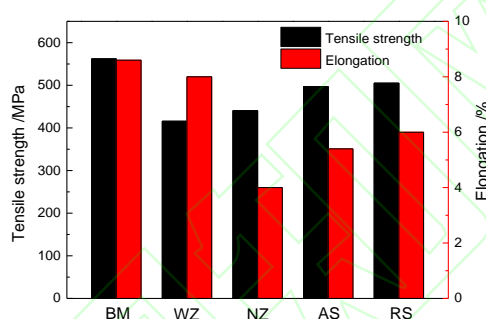


图 8 母材及焊缝不同区域的拉伸性能

Fig.8 Tensile properties of BM and different regions of welded joint

3 结论

(1)母材为(011)[100]高斯织构，(112)[111]铜织构和(001)[100]立方织构。焊接过程中，母材沿剪切方向发生塑性变形，在前进侧热力影响区，(112)[111]铜织构和(011)[100]高斯织构沿 $\bar{1}01$ 晶向旋转 35° 分别形成(111)[$\bar{1}10$]剪切织构和(110)[$\bar{1}12$]黄铜织构；(001)[100]立方织构沿 $00\bar{1}$ 晶向旋转 27° 形成(100)[$\bar{0}12$]和(100)[$\bar{0}12$]再结晶织构。焊核区中存在[100]//WD、[110]//WD、[111]//WD丝织构，经搅拌旋转发生轻微转动，在后退侧热力影响区形成(001)[110]旋转立方再结晶织构和(112)[$\bar{1}11$]铜织构。

(2)7050 铝合金搅拌摩擦焊接接头硬度分布大致呈“W”型，后退侧热力影响区硬度变化范围比前进侧热力影响区大，接头硬度最低值位于后退侧热影响区。

(3)焊缝前进侧与后退侧位置抗拉强度为 496.9 MPa 和 505.2 MPa，达到母材强度的 88% 和 90%，断裂位置分别位于前进侧热影响区和后退侧热影响区；焊缝焊核区位置抗拉强度为 440.4 MPa，完整焊缝抗拉强度最低，为 415.7 MPa。

参考文献

- 1 Yang W J, Ding H, Mu Y L, et al. *Materials Science and Engineering:A*, 2017, 707, 193.
- 2 Komarasamy M, Alagarsamy K, Ely L, et al. *Materials Science and Engineering:A*, 2018, 716, 55.
- 3 Zhang F, Su X K, Chen Z Y, et al. *Materials & Design*, 2015, 67(15), 483.
- 4 Jin Y H, Wang X J, Li C F, et al. *Hot Working Technology*, 2010, 39(15), 122(in Chinese).
金玉花, 王希靖, 李常峰, 等. *热加工工艺*, 2010, 39(15), 122.
- 5 Rouzbehani R, Kokabi A H, Sabet H, et al. *Journal of Materials Processing Technology*, 2018, 67(15), 239.
- 6 Jin Y H, Huo R J, Li C F, et al. *Transactions of the China Welding Institution*, 2017, 38(2), 10(in Chinese).
金玉花, 霍仁杰, 李常峰, 等. *焊接学报*, 2017, 38(2), 10.
- 7 Liu Y, Deng C Y, Gong B M. *Materials Science and Engineering:A*, 2019, 764.
- 8 Mao Y Q, Ke L M, Chen Y H, et al. *Journal of Materials Science & Technology*, 2018, 34(1), 228.
- 9 Zhao Y X, Yang Z Y, Domblesky J P, et al. *Materials Science and Engineering:A*, 2019, 760, 316.
- 10 Dong P, Liu Z P, Zhai X, et al. *International Journal of Fatigue*, 2019, 124, 15.
- 11 Suhuddin, U F H R, Mironov S, Sato Y S, et al. *Materials Science and Engineering:A*, 2010, 527(7-8), 1962.
- 12 Zhang L L, Wang X J, Liu X. *Materials Review*, 2019, 33(2), 665(in Chinese).
- 13 Kalembe L, Muszka K, Wrobel M, et al. *Solid State Phenomena*, 2013, 203-204, 258.
- 14 Gong W B, Tian H J, Liu W, et al. *Rare Metal Materials and Engineering*, 2012, 41(2), 854(in Chinese).
宫文彪, 田红娇, 刘威, 等. *稀有金属材料与工程*, 2012, 41(2), 854.
- 15 Song K H, Fujii H, Nakata K. *Materials & Design*, 2009, 30(10), 3972.

- 16 Yamagata H, Ohuchida Y, Saito N. *Materials transactions*, 2001, 42(11), 2440.
- 17 Field D P, Nelson T W, Hovanski Y, et al. *Metallurgical and Materials Transactions A*, 2001, 32(11), 2869.
- 18 Denquin A, Allehaux D, Campagnac M H, et al. *Materials Science Forum*, 2003, 426(4), 2921.
- 19 Wu Y W. Investigation based on strengthening mechanism of thermo-mechanically affected zone of aluminum alloy friction stir welded joints. Master's Thesis, Lanzhou University of Technology, China, 2018(in Chinese).

吴永武. 铝合金搅拌摩擦焊接头热机影响区强化研究. 硕士学位论文, 兰州理工大学, 2018.



Jin yuhua, associate professor, Lanzhou University of Technology, the main research fields include non-ferrous metal and its alloy friction stir welding joint mechanism research, nickel base alloy melting, high temperature resistance performance research and surface modification technology research. In recent years, she published more than 30 articles in important journals.

金玉花, 兰州理工大学, 副教授。主要从事有色金属及其合金的搅拌摩擦焊连接机理研究, 镍基合金的熔炼、抗高温性能研究以及表面改性工艺研究。近年来在国内外重要期刊发表文章 30 余篇。