

基于同步辐射衍射技术的 5A06 铝合金焊接残余应力的测量研究

韩月林¹, 祁俊峰², 蔡泉³, 杨光辉¹, 杨斌¹

(1. 北京科技大学, 北京 100083)

(2. 北京卫星制造厂有限公司, 北京 100080)

(3. 中国科学院高能物理研究所, 北京 100049)

摘要: 利用同步辐射 X 射线衍射技术测量了变极性等离子弧 (VPPA) 焊接 5A06 铝合金试样表面的残余应力, 获得了该试样表面残余应力的分布规律, 结合金相组织观察、EBSD、显微硬度测试等方法, 分析了焊缝区、热影响区、母材区残余应力的产生及演化机制。结果表明: VPPA 焊接 5A06 板材焊缝区晶粒粗大, 热影响区晶粒细小, 残余应力呈现出焊缝区域为压应力, 热影响区为拉应力的“M”形状; 在垂直于焊缝 (TD) 方向上存在 75.79 MPa 的最大拉应力和 159.34 MPa 的最大压应力; 在平行于焊缝 (LD) 方向上存在 132.33 MPa 的最大拉应力和 89.38 MPa 的最大压应力。相比于传统 X 射线仪器测量获得的残余应力变化趋势, 同步辐射衍射测量的残余应力分布趋势与试样不同焊接区域显微硬度的变化趋势更加吻合。实验结果表明, 相比于传统的 X 射线仪器测量残余应力, 同步辐射 X 射线衍射测量的残余应力数据一致性更好。

关键词: 同步辐射 X 射线衍射; 残余应力; VPPA 焊接; 5A06 铝合金

中图分类号: TG146.21

文献标识码: A

文章编号: 1002-185X(2019)01-0205-08

5A06 铝合金广泛应用于航天器制造, 具有强度高、耐腐蚀性好、可切削性以及可焊接性能好等特点。焊接作为机械紧固的重要手段, 会在熔融和热影响区附近形成微结构, 尤其是晶粒尺寸发生变化进而产生残余应力。残余应力与外界环境、载荷的耦合作用会使焊接结构产生脆性破坏、疲劳破坏、应力腐蚀、开裂等不良后果^[1-4], 影响焊接件的强度和使用寿命。因此, 开展铝合金焊接构件残余应力的测量研究对于保障重大装备关键构件的服役安全尤为重要。

残余应力的测定方法有十余种, 大致可分为机械测定法和物理测定法两大类。机械测定法是一种破坏性测量方法, 而物理测定法是利用晶体的衍射来测量残余应力, 不需要对工件进行分离或分割, 即可直接求得残余应力, 是一种无损测量方法, 受到广泛重视。近年来, 我国在焊接热过程、表面残余应力等方面的研究取得了显著的进步^[5-7], 目前国内铝合金焊接件的无损残余应力检测常用 X 射线衍射仪来测量表征^[8], 然而 X 射线衍射仪在进行残余应力测量时, 存在衍射强度低导致测试数据存在波动和误差。

近年来, 中子和同步辐射衍射测量残余应力逐步

受到广泛重视。由于材料表面的残余应力是二维应力状态, 而中子衍射独特的优势是中子具有很强的穿透能力^[9], 更适合测量材料内部的残余应力。同步辐射具有高亮度、宽能谱、小发散等常规 X 射线所不具备的优势, 与普通 X 射线衍射相比有效透入深度更好, 测量结果更为准确, 在国内外已经逐步得到应用^[10,11]。S. Ganguly 等^[12]认为同步辐射 X 射线比中子衍射穿透力小但可以快速测量 VPPA 焊接组件的二维残余应力。R. A. Owen 等^[13]使用中子衍射和同步辐射检测了 2024-TIG 焊接铝合金的残余应力, 两者测量结果一致。P. J. Webster 等^[14]使用同步辐射测量了 AA7108 挤压铝合金搅拌摩擦焊接的横截面上的残余应力分布, 结果表明该方法可以无损测量表面残余应力。C. Okoro 等学者^[15]使用同步辐射 X 射线衍射技术对 Cu-TSV 中的残余应力张量进行了无损检测, 认为同步辐射是有效的测量工具。宋生等^[16]使用同步辐射测定了晶体中的残余应力并提出了一种新的计算方法。张津等^[17]认为同步辐射和中子衍射一样都是准确进行残余应力无损检测的手段。由此可见, 同步辐射 X 射线衍射在测量残余应力方面应用日益广泛, 在测量

收稿日期: 2018-01-09

基金项目: 国家自然科学基金 (2017YFA0403404)

作者简介: 韩月林, 男, 1992 年生, 硕士生, 北京科技大学, 北京 100083, 电话: 010-62332740, E-mail: hanyl@ustb.edu.cn

方面相较于传统的残余应力测量手段具有更好的准确性和稳定性。

因此，本实验开展了同步辐射 X 射线衍射测量 5A06 铝合金焊接残余应力的研究，获得 VPPA 焊接件残余应力的分布规律，结合微观组织和显微硬度测试，分析 VPPA 焊接 5A06 的焊缝区、热影响区、母材区残余应力的产生及演化机制，最后通过与常规 X 射线衍射仪的对比分析，进一步验证同步辐射 X 射线测量 5A06 残余应力的准确性和稳定性。

1 实验

1.1 试样的制备

本实验采用经过热轧制处理的铝合金板材，沿板材的轧制方向进行焊接。材料成分如表 1 所示。

为了避免焊缝末端对实验的影响，切割试样所选区域为距离焊缝末端约 60 mm 的位置，试样大小分别为 300 mm×100 mm 的试样 1 和 300 mm×68 mm 的试样 2，试样 1 和试样 2 都以焊缝中心呈对称结构，试样 2 紧邻着试样 1 进行切割。由于受制于北京同步辐射光源 4B9A 线站测试能力及试验台空间的限制，在同一试样上无法进行 2 个方向残余应力的测量。因此，试样 1 用于测量平行于焊缝方向的残余应力，试样 2 用于测量垂直于焊缝方向的残余应力。本研究定义试样平行于焊缝方向为纵向 (LD)，垂直于焊缝方向为横向 (TD)，贯穿厚度方向为法线方向 (ND)，如图 1 所示。

表 1 5A06 铝合金化学成分

Table 1 Chemical composition of 5A06 aluminum alloy (wt%)

Si	Fe	Cu	Mn	Mg	Zn	Ti	Al
<0.4	0.0~0.4	<0.1	0.5~0.8	5.8~6.8	≤0.2	0.02~0.1	Bal.

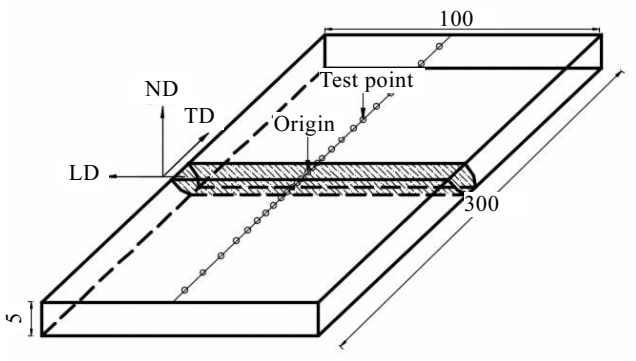


图 1 试样各方向及取点示意图

Fig.1 Schematic of sample directions and selected points

电火花线切割加工的表面平整度较高，产生的附加机械应力层只有几十微米，因此选用电火花切割加工 5A06 铝合金板材试样。

位于试样 2 下方 100 mm 左右便于切割的位置截取 60 mm×50 mm 试样用于制作无应力标样，沿横向 (TD) 方向长度为 60 mm，沿纵向 (LD) 方向宽度为 50 mm，包含焊缝区、热影响区和母材区。去应力条件为退火加热至 300 °C，保温 2 h，试样取出后空冷至室温。由于同步辐射 X 射线衍射测量残余应力时，对试样表面要求较高，考虑到加工及存放铝合金表面存在氧化层及机械应力层，将所有试样用 400#、800#、1000#、1200#、1500#、2000#、3000#金相砂纸打磨，再进行电解抛光，以减少残余应力测量的干扰。试验中电解抛光液采用无水乙醇和高氯酸，按照 9:1 的比例混合进行配制。实际抛光过程中先用饱和 NaCl 溶液进行初抛，再使用电解抛光液进行抛光，电解抛光时选取电流密度为 0.1~0.15 A/cm²。

1.2 残余应力测试原理

本次实验中使用同步辐射所测得的残余应力是二维平面应力，测量此类应力典型方法为 sin²ψ 方法。同步辐射 X 射线衍射所用 sin²ψ 方法测量表面残余应力的基本原理如图 2 所示。

方法的具体表达式如下^[6]：

$$\sigma_\phi = -\frac{1}{2} \cot \theta_0 \left(1 / \frac{1}{2} S_2^{(hkl)}\right) \frac{\pi}{180} \cdot \frac{\partial 2\theta_{\phi,\psi}}{\partial \sin^2 \psi} = KM \quad (1)$$

式中，σ_φ 为表面残余应力，θ₀ 为无应力状态的布拉格角。

1.3 测量参数的选择

本次实验在北京同步辐射装置的 4B9A 衍射站进行，根据欧盟 X 射线衍射残余应力测定标准 EN5305-2008 和国家标准 GB/T7704-2008^[18]选取实验

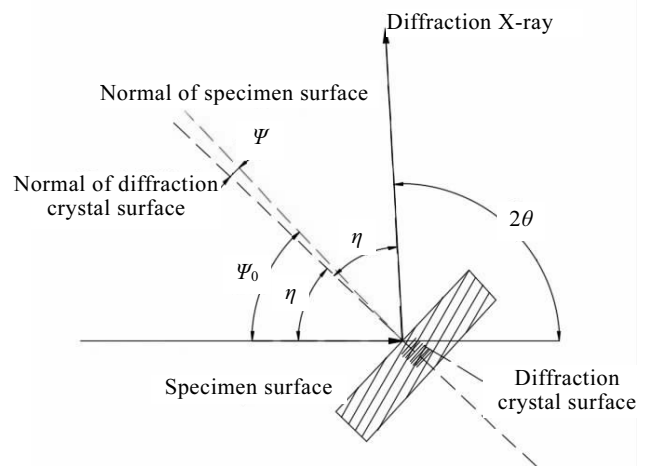


图 2 衍射原理几何图

Fig.2 Geometric figure of diffraction principle

参数。仪器为德国 HUBER 公司的六圆衍射仪, 衍射站能量范围为 4~15 keV, 光斑尺寸 ($H \times V$): 2 mm × 1 mm, 扫描范围为同倾固定 ψ_0 法下 $0^\circ \sim 120^\circ$ 。按照测定标准, 本次实验在设备可以满足的条件下选取最大衍射角, 选定衍射能量为 7.0 keV, $\lambda=0.177$ nm, 此时衍射角约为 92° 。扫描方式为同倾固定法下的点扫描, 衍射晶面选取 Al (311) 晶面, 扫描时设定了 9 个入射角度, 分别为 $5^\circ, 10^\circ, 15^\circ, 20^\circ, 25^\circ, 30^\circ, 35^\circ, 40^\circ, 45^\circ$ (此角度为入射 X 射线与试样表面夹角)。残余应力测量时设定衍射仪转动角度步长为 0.02° , 探测器的积分时间为 2 s。

1.4 组织观察

所用金相试样均为电火花线切割得到, 试样截取方向为垂直于焊缝 (TD) 方向, 用于观察的金相试样总长度为 60 mm, 宽度为 10 mm。为了便于后期的抛光和腐蚀, 将试样又切割为 3 部分, 最后得到 3 块金相试样的尺寸为 20 mm × 10 mm × 2.5 mm。首先对金相试样进行研磨, 采用金相砂纸 400#、800#、1000#、1200#、1500#、2000#、3000# 进行水磨抛光, 砂纸抛光完毕后, 采用抛光机进行抛光, 抛光布选用精丝绒抛光布, 研磨膏选用 W1.5 的刚玉抛光磨料, 待试样表面光滑无划痕时停止抛光。将无划痕试样进行腐蚀, 腐蚀剂成分如表 2 所示。

腐蚀方法为在常温下进行浸泡腐蚀, 时间为 20~30 s, 然后采用大量清水冲洗表面残留的酸液, 再用乙醇擦拭表面, 去掉试样表面残留的杂质, 使用吹风机快速吹干试样表面, 避免试样被氧化。

1.5 显微硬度

铝合金的硬度测试采用静压法中的维氏硬度方法, 仪器为依工测试测量仪器有限公司生产的型号为 401MVD 数显显微维氏硬度计, 将试样抛光到金相组织观察要求的粗糙度。铝合金质地较软, 为了压痕清晰, 加载载荷选为 200 g, 加载时间为 15 s, 压痕为正四棱锥形。显微硬度测量方向为垂直于焊缝 (TD) 方向, 以焊缝中心作为坐标原点, 以距离坐标原点 ± 45 mm 作为测量距离, 其测试位置与残余应力测试位置保持完全一致, 每个测量点在纵向 (LD) 方向上进行 5 次硬度值测量, 然后取平均值。

1.6 晶粒取向及结构

表 2 腐蚀剂成分表

Table 2 Etchant composition

Composition	HF	HCL	HNO ₃	Distilled water
Volume/mL	1.5	2	1.5	95

使用 Zeiss Auriga 聚焦离子束场发射扫描双束电镜 (FIB) 中的背散射电子取向成像系统 (EBSD) 对试样表面待测区域进行扫描。选取的位置为焊缝区 (weld zone, WZ)、热影响区 (heat affected zone, HAZ)、母材区 (base metal zone, BMZ) 3 个区域的测试点。将材料进行切样, 试样大小为 10 mm × 10 mm × 2.5 mm, 按照金相组织观察要求进行磨削、机械抛光、电解抛光, 得到合格的实验样品, 利用 EBSD 方法测试样品的晶粒大小和取向, 并对焊接板材的表面的组织情况进行检测。

2 结果与讨论

2.1 金相观察结果

对于焊缝及其周围材料的微观组织如图 3 所示, 其中图 3a 中明显可以看到焊缝区 WZ 和热影响区 HAZ 中间存在一条较窄的区域, 此区域称之为熔合区 (fusion zone, FZ), 也称为熔合线, 宽度约为 400 μm ; 图 3b 为热影响区 HAZ 和母材区 BMZ, 可以看到在距离焊缝较远处由于焊接热的影响较小, 两个区域的分布界限变得不清晰。

2.2 晶粒大小和纹理

在进行 EBSD 实验时, 使用仪器对样品进行了扫描, 得到如图 4 所示的微观组织图。从图中可以观察到焊接板材上焊缝区、热影响区和母材区的晶粒情况。

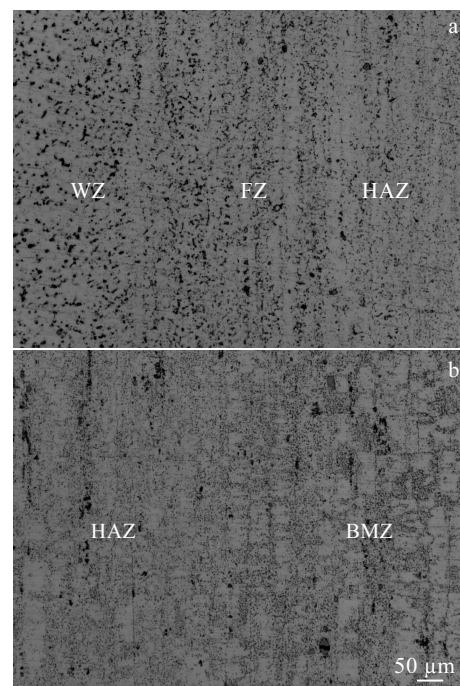


图 3 焊缝及其周围材料的微观组织

Fig.3 Microstructure of weld zone (a) and base metal zone (b)

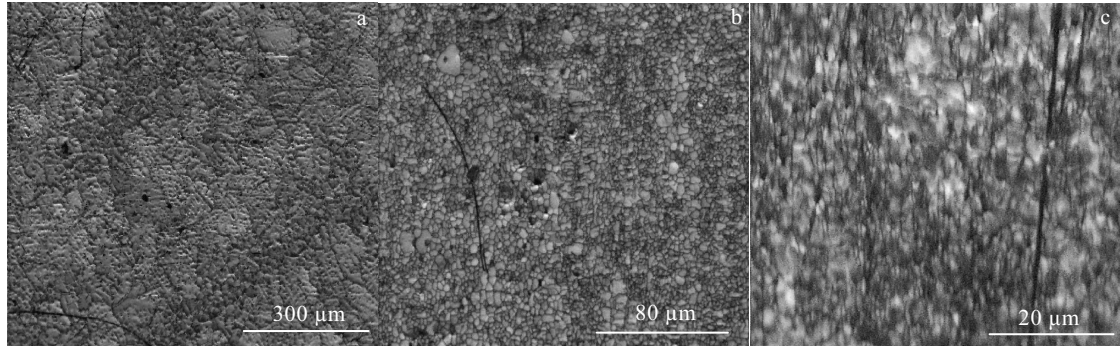


图 4 焊接板材微观组织形貌

Fig.4 Microstructure of welded plate: (a) weld zone, (b) heat affected zone, and (c) base metal zone

结合 EBSD 测试点的选取位置及图 3 分析, 图 4a 属于焊缝区 (WZ), 其晶粒形貌主要以粗大的等轴晶为主, 其粒度分布为 60~100 μm, 相对于热影响区 (HAZ) 晶粒粒度相差甚大, 这是由于焊接过程中焊接热的作用, 晶粒发生了长大; 图 4b 属于热影响区 (HAZ), 其晶粒较小, 粒度分布为 2~15 μm, 这是由于经历了焊接热循环, 发生了动态再结晶, 因此晶粒细小。

对比图 4a 和 4b 可以看到晶粒尺寸相差较大, 结合图 3a 中两区域中间有一条清晰较窄的熔合线, 通过对焊缝区、热影响区、母材区的位置观察, 得到 VPPA 焊接的热影响区宽度, 相比其他焊接方法较窄, 热输出集中, 热效率较高^[11,19]; 图 4c 为母材区 (BMZ), 对比热影响区 (HAZ) 晶粒有明显的沿轧制方向的拉伸, 变得细长, 初步认为晶粒存在着择优取向。

选取焊缝区 (WZ)、热影响区 (HAZ)、母材区 (BMZ) 测试点极图的(111)晶面进行织构分析, 由图 5 的极图可以看出, 焊缝区 (WZ)、热影响区 (HAZ) 存在一定的织构, 但织构分布较为随机, 母材区 (BMZ) 则存在明显的“唇式”特征的“铜式”织构结构。

2.3 显微硬度结果

在试样表面沿横向 (TD) 方向测量得到显微硬度分布如图 6 所示。硬度曲线整体上显现出 V 形, 可以从硬度曲线确定各个区域, 焊缝区 (WZ) 硬度最低, 热影响区 (HAZ) 硬度值急剧上升, 母材区 (BMZ) 硬度值略微降低至恒定。

测量得到焊缝正中心的硬度值为 853 MPa, 硬度值在距离焊缝正中心 2.5 mm 处达到最低值 820 MPa, 这是因为焊缝显微硬度与 Mg 含量变化有关, 随着 Mg 含量的上升其显微硬度也上升, 原因是由于 Mg 元素在合金中起主要强化作用, 在焊接期间, 形成的熔池中 Mg 元素存在一定程度的烧损导致了显微硬度的下降, Mg 元素烧损程度越重, 显微硬度降低越明显^[20]。

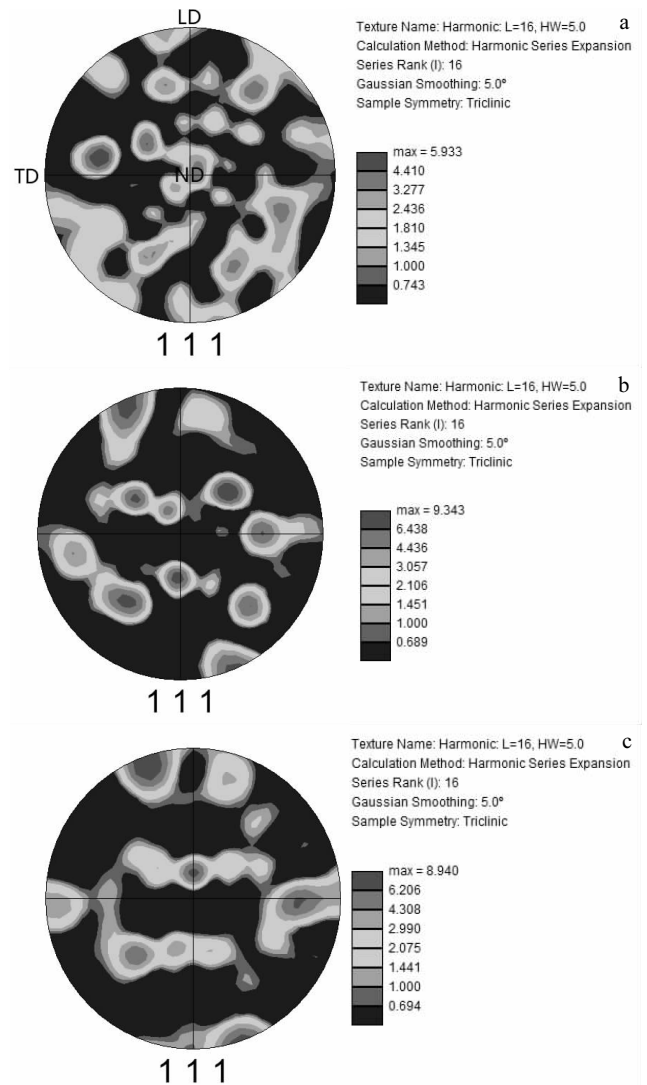


图 5 焊接板材晶面积构极图

Fig.5 Pole figure of welded plate: (a) weld zone, (b) heat affected zone, and (c) base metal zone

在靠近焊缝边缘的过程中硬度值上升缓慢，在经过熔合区(FZ)后硬度急剧上升，在距离焊缝约 15 mm 处硬度值上升幅度变小，逐渐达到最高峰。在 22 mm 处硬度值达到最大值 1235 MPa。母材区(BMZ)由于受轧制影响，整体硬度值在 1170 MPa 附近出现小幅波动。

2.4 数据拟合及结果

2.4.1 数据拟合方法

将各个入射角度测量得到的衍射峰进行拟合,拟合定峰方法选用半高宽法,峰形拟合方法选用 Gauss 拟合,通过拟合得到每个衍射峰的衍射角。拟合效果如图 7 所示。由图 7 可以看到,垂直于焊缝(TD)方向上,距离焊缝中心 10 mm 处测量点的衍射峰采用 Gauss 峰形拟合进行半高宽法定峰时,峰位拟合误差较小,可信度较高,且衍射峰峰形较为理想,与普通 X 射线衍射的衍射峰峰形相比具有更加优异的信噪比。

2.4.2 测试数据及拟合结果

将焊缝 LD 和 TD 方向各个测试点的 2θ 值计算得到 $\sin^2\psi$,使用 Origin 将 2θ 与 $\sin^2\psi$ 的关系进行一次

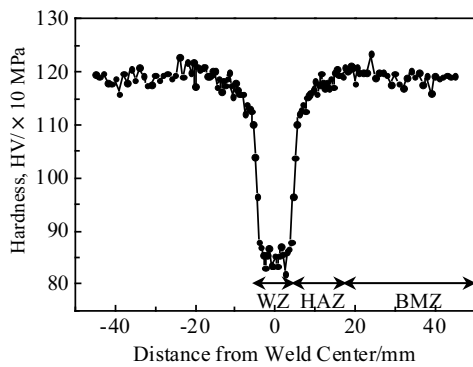


图 6 显微硬度分布图

Fig.6 Microhardness distribution

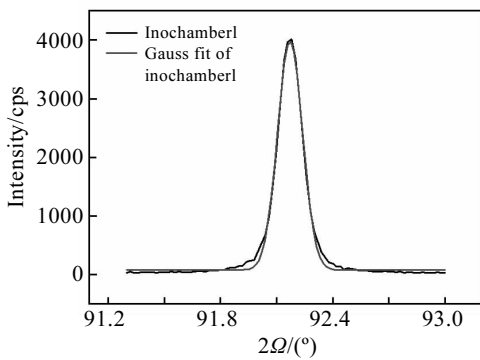


图 7 定峰拟合图

Fig.7 Fitting figure of the peak value

线性拟合。母材区、热影响区的 $2\theta-\sin^2\psi$ 关系曲线如图 8 和图 9 所示。从图中可以看出,母材区拟合点出现震荡现象。结合 EBSD 实验结果可以得到结论:由于母材区存在织构,使得拟合点出现震荡现象,一定程度上影响了拟合精度,但拟合曲线的线性趋势良好,对测量结果的影响不显著。焊缝区(WZ)、热影响区(HAZ)则由于晶粒取向分布是随机的,因此拟合结果良好,对射线衍射影响较小,测量结果可信。

2.5 同步辐射 X 射线衍射测量结果

实验测得 5A06 铝合金表面残余应力,横向(TD)和纵向(LD)残余应力分布如图 10 所示,2 个方向焊缝两侧残余应力呈现对称分布,在中心部位近似为“M”形。TD 方向,最大拉应力出现在距离焊缝中心点 8 mm 的热影响区,大小为 75.79 MPa,在焊缝区(WZ)出现了大小为 159.34 MPa 的最大压应力。根据趋势可以看出,焊缝区(WZ)内的横向残余应力是压应力,由焊缝区(WZ)向热影响区(HAZ)过渡的区域内,残余应力逐渐由压应力过渡为拉应力,并达到最大值,此后逐步下降并在距焊缝 22 mm 处转折。

由于材料在焊接前没有去应力退火,存在残余拉应力,导致残余应力开始逐步上升,最终达到稳定状态,此时残余应力值约为 60 MPa。

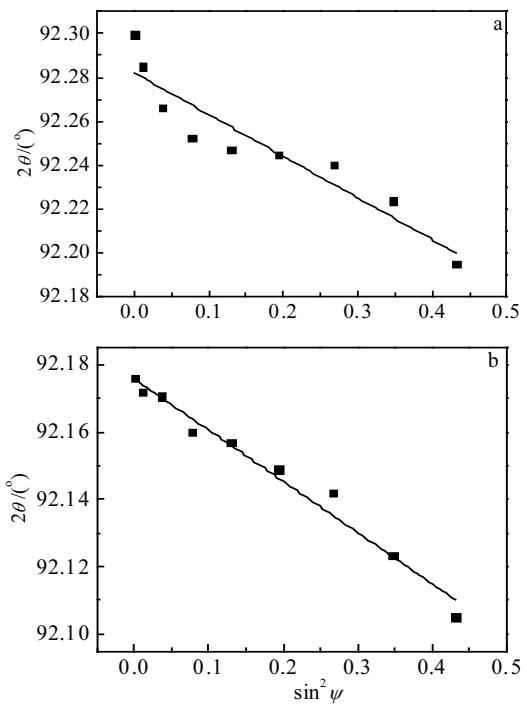


图 8 TD 测试点的一次线性拟合

Fig.8 Plots of point linear fitting across the weld (TD): (a) base metal zone and (b) heat affected zone

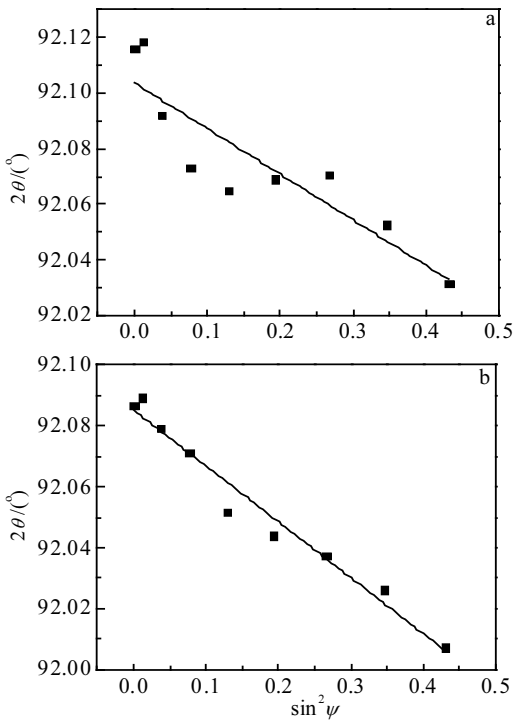


图 9 LD 测试点的一次线性拟合

Fig.9 Plots of point linear fitting along the weld (LD): (a) base metal zone and (b) heat affected zone

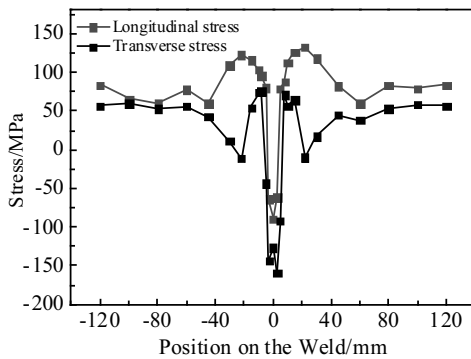


图 10 残余应力分布

Fig.10 Residual stress distribution

LD 方向，最大拉应力出现在距离焊缝中心点 22 mm 处，大小为 132.33 MPa，最小压应力出现在焊缝区 (WZ) 中，大小为 89.38 MPa。从图 10 可以看出，纵向 (LD) 远离焊缝方向的残余拉应力逐渐增大，距离焊缝 22 mm 处残余应力出现转折，开始逐步下降。在距离焊缝中心约 45 mm 处的两侧表面残余应力近似达到了一个稳定状态，表面残余应力值为 50~70 MPa。

2.6 实验结果分析

残余应力值选取距离焊缝中心 80 mm 两侧，对比横向、纵向残余应力以及显微硬度的变化趋势，如图 11 所示，结果表明：三者变化趋势一致，且以焊缝为中心对称分布。横向和纵向残余应力的最小值（距离焊缝中心 3 mm 附近）与焊缝区的硬度最小值对应；2 个方向上残余应力第 1 个峰值均处在热影响区 (HAZ)，且与热影响区 (HAZ) 硬度值最大处对应。

由图 11 表明，在距离焊缝中心 3 mm 的位置处残余应力与显微硬度趋势均呈现出剧增趋势，然后出现下降和波动。在横向 (TD) 和纵向 (LD) 均出现了双高峰，双峰应力是由所在区域显微结构的改变造成的。残余应力及显微硬度均较低的区域为焊缝区 (WZ)，残余应力剧增区域为焊缝区 (WZ) 经过熔合区 (FZ) 向热影响区 (HAZ) 的过渡区域，残余应力趋于平稳的区域为母材区。通过前述 EBSD 的观察可以看到焊缝区 (WZ) 晶粒粗大，随着位置靠近热影响区其晶粒粒度在减小，在热影响区 (HAZ) 晶粒度达到最小，而母材区 (BMZ) 晶粒还保留着轧制后的形态。这种趋势变化的主要原因：一方面是在焊接过程中，距离焊缝越远材料所受温度影响越小，温度梯度诱导的热应力也就越小，冷却时靠近母材一侧的熔融金属先进行冷却凝固，进而对后冷却的金属产生约束作用；另一方面，焊接过程中电弧产生的高温使靠近融合线的近热影响区 (HAZ) 被再溶解再冷却，与相邻的区域比，铝基质含有较多的 β (Al_8Mg_5) 溶质^[21]，压缩塑性应变较大，所以此区域硬度较大。之后硬度降低表明焊接完成后，热影响区 (HAZ) 析出物发生了时效变化。在时效变化过程中，很可能出现应力松弛，导致残余应力下降^[11]。因此，在焊缝区 (WZ)

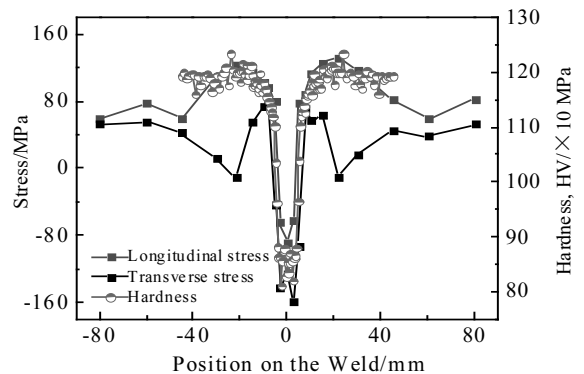


图 11 X 射线衍射测得残余应力和显微硬度曲线分布

Fig.11 Residual stress and microhardness curve distribution measured by synchronous radiation X-ray diffraction

和热影响区 (HAZ) 导致了双峰应力分布的形成。

在横向 (TD) 15~40 mm 处残余应力的变化是因为母材区 (BMZ) 轧制而存在残余拉应力。轧制时产生的残余应力状态与轧制过程中最后一轮的压缩量有关。当最后一轮压缩量很大时, 塑性变形区将直接穿透板材内部, 此时表层与里层材料都发生塑性延伸, 表层由于受到与轧辊之间的接触阻力的作用延伸量较小, 里层材料塑性延伸量较大, 造成表层材料阻止里层材料塑性延伸, 从而在表层呈现残余拉应力, 里层呈现残余压应力^[22]。因此在焊接热影响过程和母材表面存在残余拉应力的双重作用下, 出现了图 11 中残余应力的下降再上升现象, 并最终稳定在 60 MPa 左右。

在纵向 (LD) 22~40 mm 区域内的残余应力的趋势和横向 (TD) 方向上完全相反, 这是由于轧制方向上材料自身具有较大的残余拉应力, 而焊接产生的残余拉应力又与之发生了叠加, 所以导致了与横向 (TD) 方向上相反的趋势。

由图 8 和图 9 的拟合结果可以看到, 由于在同步辐射 X 射线衍射测量中得到的衍射峰峰形良好, 在进行衍射峰拟合时得到的数据可以肯定较为准确。由此测量下得到的测量数据图 11 与使用普通 X 射线仪测量得到数据图 12 进行比较, 可以看到: 在总体趋势上, 两者都与显微硬度的趋势相近, 同步辐射衍射测量的残余应力分布趋势与试样不同焊接区域显微硬度的变化趋势更加吻合; 其次在 LD 方向上普通 X 射线衍射测得数据浮动较大, 线性趋势杂乱; 在进行大晶粒衍射时 (如焊缝区), 普通 X 射线衍射仪测量结果存在较大误差, 其趋势与显微硬度趋势有较大偏离, 可信度较低, 如图 13 所示。

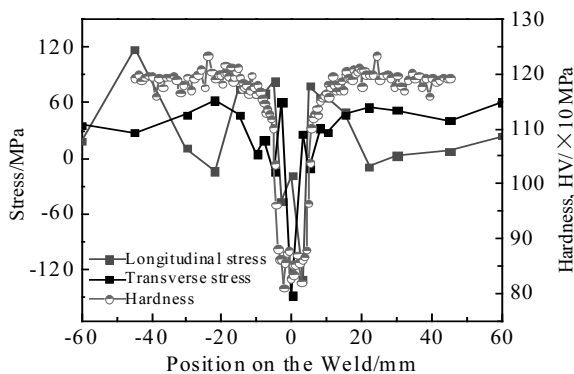


图 12 普通 X 射线衍射测得残余应力和显微硬度曲线分布
Fig.12 Residual stress and microhardness curve distribution measured by normal X-ray diffraction

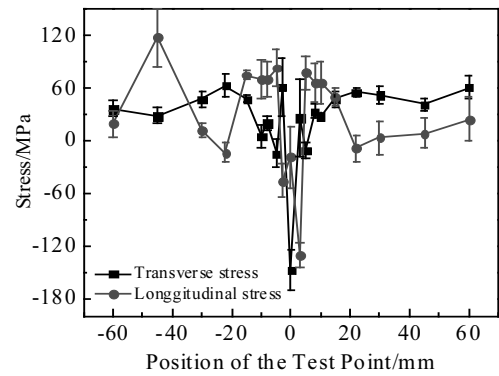


图 13 普通 X 射线衍射测得残余应力误差曲线
Fig.13 Residual stress error curves measured by of normal X-ray diffraction

3 结论

1) VPPA 焊接 5A06 铝合金残余应力场具有特征性的双峰轮廓, 双峰轮廓是在焊接过程中, 材料经历热循环导致的应力松弛和金属的约束作用共同作用下产生的。

2) 焊接板由于焊接热产生残余应力, 在 TD 方向上出现了大小为 75.79 MPa 的最大拉应力和 159.34 MPa 的最大压应力, 在 LD 方向上出现了大小为 132.33 MPa 的最大残余拉应力和 89.38 MPa 的最大残余压应力, 峰值应力均未超过 5A06 铝合金屈服强度, 且结合组织晶粒大小和分布可以看到焊缝区 (WZ) 和热影响 (HAZ) 区宽度较窄, VPPA 焊接较好的避免了焊接对母材的影响, 为实际应用提供试验参考和依据。

3) 同步辐射 X 射线衍射技术测量残余应力, 其本身具有入射深度大, 衍射干扰小等优点, 得到的衍射峰峰形优异, 同普通 X 射线衍射测量残余应力相比数据更稳定, 得到的残余应力分布趋势与显微硬度分布趋势更吻合, 测量结果可靠, 是一种测量残余应力的可靠手段。

参考文献 References

[1] Laamouri Adnen, Sidhom Habib, Braham Chedly. *International Journal of Fatigue*[J], 2013, 48(2): 109

[2] Han Liang(韩亮), Zhang Hui(张晖), Zhang Wangfeng(张旺峰) et al. *Rare Metal Materials and Engineering*(稀有金属材料与工程)[J], 2017, 46(1): 221

[3] Ghosh Swati. *Materials & Design*[J], 2011, 32(7): 3823

[4] Clifford S, Jansson N, Yu W. *Composites Part A*[J], 2006, 37(4): 538

- [5] Guo Junkang(郭俊康), Wu Yunxin(吴运新), Hu Yonghui(胡永会). *Light Alloy Fabrication Technology*(轻合金加工技术)[J], 2010, 38(4): 31
- [6] Ma Changxun(马昌训), Wu Yunxin(吴运新), Guo Junkang(郭俊康). *Hot Working Technology*(热加工工艺)[J], 2010, 39(24): 5
- [7] Chen Yuan(陈玉安), Zhou Shangqi(周上祺), Han Xianbing(韩宪兵). *Journal of Chongqing University*(重庆大学学报)[J], 2002, 25(1): 40
- [8] Guo Fei(郭非), An Ning(安宁), Wu Siyu(吴思宇) *et al.* *Nondestructive Testing*(无损检测)[J], 2017, 39(7): 65
- [9] Sun Guangai(孙光爱), Chen Bo(陈波). *Nuclear Techniques*(核技术)[J], 2007, 30(4): 286
- [10] Wang Dewu(王德武), Liu Jianfei(刘建飞). *Chinese Physics C*(中国物理 C)[J], 1995(5): 473
- [11] Ganguly S, Stelmukh V, Edwards L. *Materials Science & Engineering A*[J], 2008, 491(1-2): 248
- [12] Ganguly S, Fitzpatrick M E, Edwards L. *Metallurgical & Materials Transactions A*[J], 2006, 37(2): 411
- [13] Owen, R.A, Preston. *Materials Science & Engineering A*[J], 2003, 346(1): 159
- [14] Webster P J, Hughes D J, Kang W P *et al.* *Journal of Strain Analysis for Engineering Design*[J], 2001, 36(1): 61
- [15] Okoro C, Levine L E, Xu R. *IEEE Transactions on Electron Devices*[J], 2014, 61(7): 2473
- [16] Song Sheng(宋生), Cui Yingxin(崔潞心), Yang Kun(杨昆) *et al.* *Journal of Synthetic Crystals*(人工晶体学报)[J], 2013, 42(12): 2515
- [17] Zhang Jin(张津), Li Feng(李峰), Zheng Lin(郑林) *et al.* *Journal of Mechanical Engineering*(机械工程学报)[J], 2013, 49(2): 28
- [18]. *Non-Destructive Testing-Test Method for Residual Stress Analysis by X-ray Diffraction*(欧盟应力测试标准) EN15305-2008[S]. 2008: 4
- [19] Zhang Jianqiang(张建强), Zhang Guodong(张国栋), Zhao Haiyan(赵海燕) *et al.* *Transactions of the China Welding Institution*(焊接学报)[J], 2007, 28(6): 5
- [20] Wang Xingjun(汪兴均), Huang Wenrong(黄文荣), Wei Qilong(魏齐龙) *et al.* *New Technology & New Process*(新技术新工艺)[J], 2006(10): 42
- [21] Li Huitong(李炯辉). *Metallograph of Metallic Materials*(金属材料金相图谱)[M]. Beijing: China Machine Press, 2006
- [22] Fang Bowu(方博武). *The Residual Stress of Metal in Hot and Cold Processing*(金属冷热加工的残余应力)[M]. Beijing: Higher Education Press, 1991

Research on Measurement of Residual Stress of Welded 5A06 Aluminum Alloy Based on Synchrotron Radiation Diffraction Technology

Han Yuelin¹, Qi Junfeng², Cai Quan³, Yang Guanghui¹, Yang Bin¹

(1. University of Science & Technology Beijing, Beijing 100083, China)

(2. Beijing Satellite Manufactory Company Limited, Beijing 100080, China)

(3. Institute of High Energy Physics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

Abstract: The residual stress on surface of variable polarity plasma arc (VPPA) welded 5A06 aluminium alloy sample was measured by synchrotron radiation X-ray diffraction, and the distribution of residual stress on the surface of the sample was obtained. The generation and evolution mechanisms of weld zone, heat affected zone and base metal area were analyzed in combination with metallurgical structure observation, EBSD and microhardness tester. The results indicate that the weld zone of VPPA welded 5A06 plate shows coarse grains, while the grains in the heat affected zone are small; the residual stress presents an "M" shape: the weld zone is compressive stress, and the heat affected zone is tensile stress. There is a maximum tensile stress of 75.79 MPa and a maximum compressive stress of 159.34 MPa in the direction vertical weld (TD) and a maximum tensile stress of 132.33 MPa and a maximum compressive stress of 89.38 MPa in the direction parallel to the weld (LD). Compared with the trend of the residual stress measured by traditional X-ray instrument, the distribution trend of the residual stress of the synchrotron radiation diffraction measurement is more consistent with the variation trend of the microhardness of the sample in different welding areas. The experimental results show that the synchrotron radiation X-ray diffraction measurement has better consistency in residual stress data than the traditional X-ray instrument.

Key words: synchrotron radiation X-ray diffraction; residual stress; VPPA welding; 5A06 aluminum alloy

Corresponding author: Yang Bin, Ph. D., Associate Professor, National Center of Materials Service Safety, University of Science and Technology Beijing, Beijing 100083, P. R. China, Tel: 0086-10-62334158, E-mail: binyang@ustb.edu.cn