转速对 7075-T651 铝合金搅拌摩擦焊接件内部残余应力分布 的影响

计鹏飞^{1,2}, 张津^{1,2}, 郑林³, 肖勇³, 窦世涛³, 崔晓明^{1,2}

(1. 北京科技大学 新材料技术研究院,北京 100083; 2. 北京市腐蚀、磨蚀与表面技术重点实验室,北 京 100083; 3.西南技术工程研究所,重庆 400039)

摘要:目的 掌握铝合金搅拌摩擦焊接板内部残余应力的分布,为控制焊接残余应力、改进焊接工艺和提高焊接件质量。方法 以13.6 mm 厚的 7075-T651 铝合金为研究对象,用短波长 X 射线衍射技术,对在不同搅拌头转速下搅拌摩擦焊接板内部的残余应力进行了无损测试,并对焊接接头在板厚中心层上的微观组织和显微硬度进行了研究。结果 在垂直于焊缝截面上的显微硬度均呈"W"型分布,焊核区的显微硬度高于其两侧的热机械影响区和热影响区,但低于母材区的硬度;随着转速的增大,接头硬度的最小值减小,低硬度区的范围越大。横向残余应力绝对值整体小于焊接方向;焊核区为正应力,热机械影响区残余应力减小且变化梯度最大;残余应力的极大值位于热影响区和热机械影响区的交界处;残余应力权大值与硬度最小值的位置重合。结论 通过残余应力的无损检测分析,不仅可以直接获得加工件内部应力分布,还可以间接获得加工件内部的加工缺陷情况,为改进加工工艺、提高成形精度提供依据。

DOI: 10.3969/j.issn.1674-6457.2016.04.002

中图分类号: TG404 文献标识码: A 文章编号: 1674-6457 (2016)04-0008-08

Effect of Rotation Speed on the Residual Stress Distribution of Friction Stir Welded AA7075-T651 Plates

JI Peng-fei^{1,2}, ZHANG Jin^{1,2}, ZHENG Lin³, XIAO Yong³, DOU Shi-tao³, CUI Xiao-ming^{1,2}

(1.Institute for Advanced Materials and Technology, University of Science and Technology Beijing, Beijing 100083, China;
 2.Beijing Key Laboratory for Corrosion, Erosion and Surface, Beijing 100083, China;
 3.Southwest Technology and Engineering Research Institute, Chongqing 400039, China)

ABSTRACT: In order to control the residual stress, develop the welding process and improve the quality of the weldments, the distributions of residual stress of friction stir welded aluminum alloy plates were investigated. The residual stress distributions of friction stir weldments of 13.6-mm-thick AA7075-T651 plates at different rotate speed were measured non-destructively using short-wavelength X-ray diffraction method. What is more, the microstructure and microhardness in the middle layer of thickness of the weld joint was also studied. Results show that the profile of the microhardness is W shape and the values of hardness in weld nugget zone are bigger than those in thermo-mechanically affected zone and heat affected zone but lower than those in parent material. The minimum of microhardness increases and the soft region expands with the increase of rotation speed. The absolute values of residual stress in transverse direction are smaller than longitudinal direction. Tensile residual stress exists in

收稿日期: 2016-07-01

基金项目:国家自然科学基金(51275037)

作者简介: 计鹏飞(1988—),男,河南人,博士研究生,主要研究方向为铝合金搅拌摩擦焊残余应力的无损表征及工艺与性 能研究。

9

the weld nugget zone and decreases in thermo-mechanically affected zone in which residual stress varies intensely. In addition, maximum of residual stress locates on the boundary of thermo-mechanically affected zone and heat affected zone, where the minimum microhardness also locates. By the non-destructive analysis of residual stress, residual stress distribution could be investigated directly and the potential internal defect could also be perceived, which can be employed as the basis of developing the processing and improving the accuracy of forming.

KEY WORDS: internal residual stress; short-wavelength X-ray diffraction; friction stir welding; microhardness

搅拌摩擦焊(Friction Stir Welding, FSW)是一种无 需填料,但却伴随有强烈塑性变形的材料固相连接技 术。与传统的焊接方法相比,FSW 具有外观平整、优 质、高效、低耗、焊接变形小、无污染等特点^[1-2], 特别适合用来焊接一些熔焊方法难以焊接的金属材 料,如铝、镁等合金材料^[3]。FSW 焊接件内部的残余 应力的大小及分布,直接关系到焊件的服役寿命,不 当的焊接应力会加速疲劳裂纹的扩展,降低焊接件的 疲劳寿命^[4-6];此外在工件的服役过程中,焊接残余 应力还会与其所受载荷引起的工作应力相互叠加,从 而产生二次变形和残余应力的重新分布^[7],导致工件 变形。如何控制残余应力的大小和分布,是改进FSW 焊接工艺和提高 FSW 焊接件质量的关键,前提便是 FSW 焊接区残余应力的大小和分布的准确测量。

残余应力的测试方法可分为有损的机械破坏法 和无损法两大类。无损测定方法不会对被测样品造 成破坏,包括普通 X 射线衍射法^[8-9]、高能同步辐射 法^[10]、中子衍射法^[11]、超声波法^[12-13]和磁测法^[14]等。 目前能够准确有效地对材料内部残余应力进行无损 测试的方法为中子衍射和高能同步辐射。中子衍射 和高能同步辐射限于其造价昂贵、实验设施庞大、 运行和维护费用高昂,只能在少数实验室开展研究 工作,制约了其在生产中的应用^[15-16]。目前利用国 内的中子衍射[17-20]和高能同步辐射[21-22]装置测试 残余应力的研究工作也已经起步,但还没有较广泛 的应用。国内对 FSW 内部残余应力的研究仍多局限 于有损测试法^[23],限制了FSW工艺开发和改进,也 限制了 FSW 加工工艺在工业上的应用和发展^[24]。另 外,不同的残余应力测试方法都有其各自的适用范 围和局限性^[25-26],高强铝合金 FSW 焊接区残余应 力的精确测量评定现也是一个亟待解决的问题。

短波长 X 射线衍射(Short wavelength X-ray Diffraction, SWXRD)技术^[27],作为一种无损测试材料内部残余应力的新技术,为 FSW 焊接接头内部残余应力的无损测量和应力分布的精确评定提供了一种新的研究方法^[28-32],为焊接残余应力的控制以及 FSW

焊接工艺的改进和焊接件质量的提高提供了依据。 本文利用 SWXRD-1000 型短波长特征 X 射线衍射仪, 对铝合金 3 种转速下焊接的铝合金 FSW 的板厚中心 层的残余应力进行了无损测试,分析了工艺参数对 焊接残余应力的影响。

1 试验材料及方法

1.1 搅拌摩擦焊接样品制备

将尺寸为轧向(Rolling direction, RD)×横向 (Transverse direction, TD)×法向(Normal direction, ND)= 500 mm×150 mm×13.6 mm 的 2 块 7075-T651 铝合金 预拉伸板进行对接焊,在 3 种不同转速下焊接成如 图 1 所示的焊件,焊接方向(Longitudinal direction, LD) 平行于 RD 方向。



c FSW-14-3 图 1 FSW 样品焊接后的宏观形貌 Fig.1 Macro-morphology of the as-welded FSW plates

焊接过程如下:对接面为线切割加工后表面, 经 SiC 砂纸打磨至 400[#];先用直径为 *Φ*12 mm,长为 2.4 mm 的小搅拌针对样品进行 FSW 预焊接,转速为 800 r/min,前进速度为 200 mm/min;再用直径为 *Φ*20 mm,长为13.4 mm 的锥形螺纹搅拌头进行正式焊接, 图 1 中 3 组样品的转速分别为 400,600,800 r/min, 前进速度均为 100 mm/min。焊接过程未使用额外的 冷却措施。

1.2 微观组织结构

使用 FEI Quanta250 环境扫描电镜,对 3 组 FSW 样品垂直于焊缝方向的 TD-ND 截面上的焊核区和母 材区的微观组织结构进行观察。

1.3 显微硬度

使用 HXD-1000TMC/LCD 维氏显微硬度仪,测试 3 种转速的 FSW 样品垂直于焊缝的 TD-ND 截面上的 板厚中心层显微硬度,相邻测试点的间隔为 1 mm。使 用压头压力为 200 gf,载荷保持时间为 10 s。

1.4 残余应力测试

使用西南技术工程研究所开发的 SWXRD-1000 型短波长 X 射线衍射仪,对 3 块样品进行残余应力 测试。用 W 靶的特征 X 射线衍射谱 Kα₁ 作为射线源 (λ=0.020 899 2 nm)。测试采用 d₀法,其测试原理与 中子衍射基本原理相同,参考中子衍射测量残余应 力的国际标准 ISO/TS 21432:2005 和国家标准 GB/T 26140—2010,其计算公式为:

$$2d_{\rm HKL}\sin\theta_{\rm HKL} = \lambda \tag{1}$$

$$\varepsilon \cong \frac{d_{\text{HKL}} - d_0}{d_0} = -\Delta\theta \cdot \cot\theta_0 \tag{2}$$

$$\sigma_{xx} = \frac{E_{\rm HKL}}{\left(1 - v_{\rm HKL}^2\right)} \left(\varepsilon_{xx} + v_{\rm HKL}\varepsilon_{yy}\right) \tag{3}$$

$$\sigma_{yy} = \frac{E_{\rm HKL}}{\left(1 - v_{\rm HKL}^2\right)} \left(\varepsilon_{yy} + v_{\rm HKL}\varepsilon_{xx}\right) \tag{4}$$

其中: d_{HKL} 为(HKL)晶面的晶面间距; $2\theta_{HKL}$ 为 (HKL)晶面的衍射角; λ 为 X 射线波长; d_0 为无应力 参考晶面间距; $2\theta_0$ 为对应的无应力标样的衍射角; σ_{xx} 和 σ_{yy} 为采用平面应力状态假设^[33]时所设定的主 方向上的主应力; ϵ_{xx} 和 ϵ_{yy} 为所设定的主方向上所测 得的主应变; E_{HKL} 为被测晶面的弹性模量; v_{HKL} 为 被测晶面的泊松比。

在测试时,忽略板面法线方向(ND 方向)的主应 力和切应力,设定 LD 方向和 TD 方向为 2 个主应力 方向。衍射晶面选取铝的(111)面,该晶面的弹性模 量和泊松比¹³⁴¹分别为 *E*{111} = 73400 MPa, v{111} = 0.34。使用去应力标样测得的晶面间距作为无应力参 考晶面间距,进行残余应力的计算。去应力标样和 残余应力测试样品均从焊接后的板材上取样,如图 2 所示。



a 测试样品





去应力标样的尺寸为 200 mm(TD)×80 mm(LD)× 13.6 mm(ND),将去应力标样切成梳状,以释放残余 应力:从上表面切成 3 mm(TD)×4 mm(LD)的立方体 柱,在下表面留 3 mm 不切透。3 种转速 FSW 样品 残余应力的测试点位于垂直于焊缝的截面上,沿板 厚中心层分布,见表 1。

表 1 FSW 样品残余应力测试点分布(距焊缝中心距离) Table 1 Distribution of the residual stress testing points of the FSW samples mm 后退侧 前进侧 样品 母材区 热影响区 热机影响区 焊核区 热机影响区 热影响区 母材区 R7 R6 R5 R4 R3 R2 R1 С A1 A2 A3 A4 A5 A6 Α7 被测样品 -90 -65 -25 -15 -9 -2-6 9 0 3 6 15 25 65 90 CR2 CC CA1 CA2 CA3 CR5 CR4 CR3 CR1 CA4 CA5 去应力标样 -15 -9 -6 -2 -65 0 3 6 9 15 65

2 结果及分析

2.1 显微组织

3 种转速样品焊核区和母材区的微观组织结构 如图 3 所示。焊核区受热输入和强烈的机械搅拌作 用,主要为再结晶的细小的等轴晶组织,与母材区 晶粒粗大的轧制组织相差很大。通过对比 3 种转速 样品的焊核区的组织可以发现,从 FSW-14-1 号样 品到 FSW-14-3 号样品,随着焊接转速的增大,由 于热输入量的增大,其再结晶晶粒的尺寸增大。而 母材区由于受到的焊接热的作用较弱,组织结构相 差不大。



图 3 FSW 样品焊核区和母材区的 SEM 微观形貌 Fig.3 Microstructure of weld nugget zone and parent material of the FSW plates obtained by SEM

2.2 显微硬度

3种转速样品焊接接头显微硬度分布分别如图 4 所示。对比 3 个样品在板厚中心层上的显微硬度可 以发现,3种转速样品垂直于焊缝截面上的显微硬度 均呈"W"型分布,即焊核区的显微硬度高于其两侧的热机械影响区和热影响区,但低于母材区的硬度; 硬度的最小值出现在热机械影响区和热影响区的交界处。原因是:在焊核区,由于搅拌头的直接搅拌作用,原有铝合金母材的组织被完全破坏,新生成

11

的再结晶组织晶粒细小,其细晶强化作用使得焊核 区的强度提高,表现为其显微硬度高于属于过渡型 的混合组织的热机械影响区。在热机械影响区和热 机械影响区与热影响区的交界处,一方面受到强烈 的搅拌作用,使得原有的板条状的轧制组织发生较 大的变形,并混杂有许多再结晶晶粒,另一方面这 个区域受到的摩擦热输入量最大,材料受热软化明 显,因而表现为显微硬度在一个很小的范围内(距离 焊缝中心约 7~15 mm)先急剧下降至最小值,后逐渐 恢复到母材水平。搅拌头转速越大,接头硬度的最 小值越小,低硬度区的范围越大。这是由于随着转 速的增加,热输入量越大,材料软化的效果越明显、 软化区的范围越大。



图 4 FSW 样品板厚中心层的显微硬度分布 Fig.4 Distributions of microhardness of the FSW plates in the middle layer of thickness

2.3 残余应力测试

使用 SWXRD 测得的 3 种转速的 FSW 样品,在 TD 和 LD 方向上的晶面间距分布如图 5 所示。从图 5 中可以看出,焊核区的晶面间距较大,大于母材区 的平均晶面间距;热机械影响区样品的晶面间距急 剧减小,变化梯度较大;热影响区的晶面间距变化 较为平缓,且数值接近母材的晶面间距。除了残余 应力造成的晶面间距的变化之外,造成焊核区和母 材区晶面间距相差较大的主要原因还是微观组织结 构的差异。这种差异造成的晶面间距的变化,其作 用效果要大于残余应力造成的晶面间距的变化,其作 用效果要大于残余应力造成的晶面间距的变化,因 此在残余应力测试时,无应力参考晶面间距不能使 用焊接板不同区域之间晶面间距的平均值,而必须 制备去应力标样,在标样的不同区域选择与应力试 样相同或相近的位置进行测试^[35],得到去应力参考 标样的晶面间距作为无应力参考晶面间距,再根据 式(2)—(4)计算相应的残余应变和残余应力。

3种转速的FSW样品TD和LD方向上的主应力 分布如图 6 所示。对于每块样品,焊核区的残余应 力均为正应力,TD方向上的应力绝对值整体都比LD 方向上偏小。热机械影响区的应力变化梯度最大且 存在向负应力变化的趋势,对比图 4,该区域内显 微硬度变化的梯度也是最大的。在热影响区和热机 械影响区的交界位置(距焊缝中心±9 mm 左右)出现 应力的极大值,而此处恰好为硬度最小的位置。该 位置机械搅拌作用强烈,且处于搅拌针和基体直接 摩擦的位置,受到的热输入量最大,在强烈的热-力耦合作用下,显微硬度的极小值和残余应力的极 大值均出现在这一位置。随着向母材区过渡残余应 力值逐渐减小,应力的变化也趋于平缓。残余应力 测试结果的分布趋势与国外通过中子衍射测得的结 果类似^[36]。3种转速样品残余应力测试结果的对比 见表2。



图 5 样品的晶面间距分布

Fig.5 Profiles of the lattice spacing distribution of FSW-14-1, FSW-14-2, and FSW-14-3



b LD方向

图 6 FSW 样品内部板厚中心层的残余应力分布 Fig.6 Residual stress profiles of the FSW plates in the middle layer of thickness in (A)TD and (B)LD

	表 2	FSW	/ 样品残余应力测试结果对比
Table 2	Comp	arison	of residual stress of the FSW samples
			MPa

民日	LD 方向最	LD 方向最	TD 方向最	TD 方向最
作于日日	大拉应力	小压应力	大拉应力	小压应力
FSW-14-1	183	-78	140	-55
FSW-14-2	189	-25	222	-76
FSW-14-3	173	-24	127	-26

由表 3 可以看出,最大拉应力 3 号样品≤1 号样 品<2 号样品。根据样品的加工状态,3 块样品的前 进速度是一样的,而转速为 1 号>2 号>3 号样品,随 着转速的增大,焊接过程中的发热量增大,残余应 力值应该增加,但实际的情况与预测的结果不符。

根据焊接后的组织观察,3号样品前进侧的热机 械影响区接近焊件上表面处,有明显的焊接缺陷, 缺陷类型为孔洞型缺陷^[3],如图 7 所示。由于 FSW-14-3号样品的搅拌头转速较高,造成焊接缺陷 的原因很可能是搅拌头的转速过高,焊接过程中的 热输入量过大造成的。缺陷的存在可能造成焊接接 头内局部残余应力的释放,同时降低焊接工件的各项力学性能指标,造成其提前失效。该参数应属于 不合格的加工工艺。由于缺陷的存在导致局部残余 应力部分释放,使得 3 号样品的残余应力较小,且 在前进侧的热机械影响区和临近的热影响区的残余



图 7 FSW-14-3 号样品宏观缺陷 Fig.7 The macroscopic defect of FSW-14-3

应力要小于后退侧的残余应力。同时,还应考虑到 样品的测试次序为2号早于1号早于3号,由于时效作 用导致了一部分应力的释放。

3 结论

1) 7075-T651 铝合金预拉伸板经不同搅拌转速 摩擦焊焊接后,焊核区形成具有细小的再结晶晶粒 的等轴晶组织,且焊核区晶粒随着转速的增大而增 大。

2) 7075-T651 铝合金搅拌摩擦焊接板垂直于焊 缝截面上的显微硬度均呈"W"型分布,焊核区的显 微硬度高于其两侧的热机械影响区和热影响区,但 低于母材区的硬度;硬度的最小值出现在热机械影 响区和热影响区的交界处。随着转速的增大,接头 硬度的最小值减小,低硬度区的范围变大。

2)通过短波长 X 射线衍射技术可以无损检测焊 接件的内部残余应力,测试结果为 TD 方向上的残余 应力绝对值整体小于 LD 方向;在焊核区为正应力; 热机械影响区残余应力减小且变化梯度最大;在热 影响区和热机械影响区的交界位置出现残余应力的 极大值,残余应力极大值位置与硬度最小值的位置 重合;母材区残余应力绝对值最小。

 3)随着转速的增加,残余应力的最大值增大, 但焊接缺陷的存在导致转速最大的样品发生应力释 放,应力最大值较小。

4) 从发现内部残余应力的分布异常,采用破坏 性的方式找到了焊接件内部的缺陷,表明短波长 X 射线衍射技术是一种有效的无损测试内部残余应力 的方法。

参考文献:

- 张欣盟,杨景宏,王春生,等. 搅拌摩擦焊技术及其应 用发展[J]. 焊接, 2015(1): 29—32.
 ZHANG Xin-meng, YANG Jing-hong, WANG Chun-sheng, et al. Applications and Aevelopments of Friction Stir Welding [J]. Welding & Joining, 2015(1): 29—32.
- [2] 张华,林三宝,吴林,等. 搅拌摩擦焊研究进展及前景展望[J]. 焊接学报,2003,24(3):91—96.
 ZHANG Hua, LIN San-bao, WU Lin, et al. Current Progress and Prospect of Friction Stir Welding[J]. Transactions of the China Welding Institution, 2003, 24(3):91—96.
- [3] 王国庆,赵衍华. 铝合金的搅拌摩擦焊接[M]. 北京:中 国宇航出版社出版, 2010.
 WANG Guo-qing, ZHAO Yan-hua. Friction Stir Welding

of Aluminum Alloys[M]. Beijing: China Astronautic Press, 2010.

- [4] BIRO A L, CHENELLE B F, LADOS D A. Processing, Microstructure, and Residual Stress Effects on Strength and Fatigue Crack Growth Properties in Friction Stir Welding: A Review[J]. Metallurgical and Materials Transactions B, 2012, 43(6): 1622–1637.
- [5] BIALLAS G. Effect of Welding Residual Stresses on Fatigue Crack Growth Thresholds[J]. International Journal of Fatigue, 2013, 50: 10–17.
- [6] DALLE DONNE C, RAIMBEAUX G. Residual Stress Effects on Fatigue Crack Propagation in Friction Stir Welds: ICF10, 2001[Z]. Honolulu (USA), 2013.
- [7] PRIME M B, HILL M R. Residual Stress, Stress Relief, and Inhomogeneity in Aluminum Plate[J]. Scripta Material, 2002, 46(1): 77–82.
- [8] 张定铨,何家文.材料中残余应力的 X 射线衍射分析和 作用[M].西安:西安交通大学出版社,1999.
 ZHANG Ding-qaun, HE Jia-wen. Residual Stress Analysis by X-ray Diffraction and Its Functions[M]. Xi'an: Xi'an Jiaotong University Press, 1999.
- [9] 黄少东,许彪,刘川林,等. 冷径向精锻钛合金管残余 应力测试[J]. 精密成形工程, 2011, 3(6): 85—87.
 HUANG Shao-dong, XU Biao, LIU Chuan-lin, et al. Measurement of Residual Stress to Titanium Alloy Tube Made by Cold Radial Forging[J]. Journal of Netshape Forming Engineering, 2011, 3(6): 85—87.
- [10] FITZPATRICK M E, LODINI A. Analysis of Residual Stress by Diffraction Using Neutron and Synchrotron Radiation[M]. CRC, 2003.
- [11] WITHERS P J, BHADESHIA H. Residual Stress. Part 1–Measurement Techniques[J]. Materials Science and Technology, 2001, 17(4): 355–365.
- [12] 徐春广,宋文涛,潘勤学,等. 残余应力的超声检测方法[J]. 无损检测, 2014(7): 25—31.
 XU Chun-guang, SONG Wen-tao, PAN Qin-xue, et al. Residual Stress Nondestructive Testing Method Using Ultrasonic[J]. Nondestructive Testing, 2014(7): 25—31.
- [13] 李浩宇, 董世运, 潘亮, 等. 熔焊焊缝超声检测的技术 现状[J]. 无损检测, 2014(10): 84—88.
 LI Hao-yu, DONG Shi-yun, PAN Liang, et al. Technology Status in Ultrasonic Testing of Fusion Welding Seam[J]. Nondestructive Testing, 2014(10): 84—88.
- [14] 沈军,林波,迟永刚,等. 残余应力物理法测量技术研究状况[J]. 材料导报,2012(S1):120—125.
 SHEN Jun, LIN Bo, CHI Yong-gang, et al. Research Status of Residual Stress Physical Method Measurement Techniques[J]. Materials Review, 2012(S1): 120—125.
- [15] 杨传铮, Newsam Johnm. 用同步辐射 X 射线研究材料结构[J]. 物理学进展, 1992(2): 129-167.
 YANG Chuan-zheng, NEWSAM J. Structural Studies of Materials Using Synchrotron X-radiation[J]. Progress in Physics, 1992(2): 129—167.
- [16] 孙光爱,陈波. 中子衍射残余应力分析技术及应用[C]. 第一届中国核技术及应用研究学术研讨会,上海,2006. SUN Guang-ai, CHEN Bo. Residual Stress Analysis Technology by Neutron Diffraction and Its Application[C]. 1st National Symposium on Nuclear Technology and Applica-

15

tions Research, Shanghai, 2006.

- [17] 李峻宏,高建波,李际周,等. CARR 中子残余应力谱仪的设计与应用[J]. 原子能科学技术, 2010(4): 484—488. LI Jun-hong, GAO Jian-bo, LI Ji-zhou, et al. Design and Application of Neutron Residual Stress Diffract Meter for China Advanced Research Reactor[J]. Atomic Energy Science and Technology, 2010(04):484—488.
- [18] 李峻宏,高建波,李际周,等.中子衍射残余应力无损测量与谱仪研发[J].无损检测.2010(10):765—769.
 LI Jun-hong, GAO Jian-bo, LI Ji-zhou, et al. Nondestructive Measurement of Residual Stress by Neutron Diffraction and the R&D of the Diffractometer[J]. Nondestructive Testing, 2010(10):765—769.
- [19] 李眉娟,刘晓龙,刘蕴韬,等.中国先进研究堆中子织 构衍射仪的研制与调试[J].原子能科学技术,2014(03): 532—537.

LI Mei-juan, LIU X, LIU Y, et al. Construction and Adjustment of Neutron Texture Diffractometer at China Advanced Research Reactor[J]. Atomic Energy Science and Technology, 2014(3): 532—537.

[20] 孙光爱, 汪小琳, 吴二冬, 等. 过盈配合 7050 铝合金套 筒三维应力分布的中子衍射分析[J]. 科学通报, 2013, 58(11): 1000—1006.

SUN Guang-ai, WANG Xiao-lin, WU Er-dong, et al. Three-dimensional Stress Distribution of Surplus Assembled 7050Al Alloy Ring and Plug Determined by Neutron Diffraction[J]. Chinese Science Bulletin, 2013, 58(11): 1000—1006.

- [21] 马礼敦. 上海光源及其在金属材料领域中的应用[J]. 热处理, 2011(5): 63—74.
 MA Li-dun. Shanghai Synchrotron Radiation Facility and Its Applications in Metal Material Field[J]. Heat Treatment, 2011(5):63—74.
- [22] 宋生,崔潆心,杨昆,等.同步辐射白光形貌术定量计 算晶体的残余应力[J].人工晶体学报,2013(12):2515— 2519.
 SONG Sheng, CUI Ying-xin, YANG Kun, et al. Quantita-

tive Calculation of the Residual Stress in Crystal Based on Synchrotron Radiation White Beam Topography[J]. Journal of Synthetic Crystals, 2013(12): 2515–2519.

[23] 傅田, 李文亚, 余意, 等. 7075-T651 铝合金搅拌摩擦焊 对接接头残余应力研究[J]. 热加工工艺, 2014(3): 15— 18.

FU Tian, LI Wen-ya, YU Yi, et al. Research on Residual Stresses in Friction Stir Welding 7075-T651 Butt-welds[J]. Hot Working Technology, 2014, 43(3):15—18.

- [24] 牛鹏亮,李文亚. 搅拌摩擦焊残余应力研究现状及展望
 [J]. 精密成形工程, 2015, 7(5): 1—6.
 NIU Peng-liang, LI Wen-ya. Present Study and Prospect of Friction Stir Welding Residual Stress[J]. Journal of Net-shape Forming Engineering, 2015, 7(5): 1—6.
- [25] 刘金娜,徐滨士,王海斗,等.材料残余应力测定方法的发展趋势[J].理化检验(物理分册),2013(10):677—682.

LIU Jin-na, XU Bin-shi, WANG Hai-dou, et al. Development Tendency of Measurement Methods for Residual Stress[J]. Physical Testing and Chemical Analysis (Part A: Physical Testing), 2013(10): 677–682.

- [26] 董美伶,金国,王海斗,等. 纳米压痕法测量残余应力的研究现状[J]. 材料导报, 2014(3): 107—113.
 DONG Mei-ling, JIN Guo, WANG Hai-dou, et al. The Research Status of Nanoindetation Methods for Measuring Residual Stresses[J]. Materials Review, 2014(3): 107—113.
- [27] ZHENG L, HE C, PENG Z. Measuring Device for the Shortwavelength X-ray Diffraction and a Method Thereof[P]. 2009-09-01.
- [28] 郑林,张津,何长光,等. 短波长 X 射线衍射无损测定 铝板内部残余应力[J]. 精密成形工程, 2011, 3(2): 25— 30.
 ZHENG Lin, ZHANG Jin, HE Chang-guang, et al. Non-destructive Measuring Internal Residual Stress in Aluminum Alloy Plates Using Short-wavelength Characteristic X-ray Diffraction[J]. Journal of Netshape Forming Engineering, 2011, 3(2): 25—30.
- [29] 张津,李峰,郑林,等. 2024-T351 铝合金搅拌摩擦焊焊件内部残余应力测试[J]. 机械工程学报, 2013, 49(2): 28—34.
 ZHANG Jin, LI Feng, ZHENG Lin, et al. Internal Residual Stresses in the Friction Stir Weldment of 2024-T351 Al Alloy Determined by Short Wavelength X-ray Diffraction[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2013, 49(2): 77—88.
- [30] 杨中玉,张津,郭学博,等. 铝合金的织构及测试分析 研究进展[J]. 精密成形工程, 2013, 5(6): 1—6. YANG Zhong-yu, ZHANG Jin, GUO Xue-bo, et al. Research Progress on Aluminum Alloy Texture and Test Analysis[J]. Journal of Netshape Forming Engineering, 2013, 5(6):1—6.
- [31] 郑林,车路长,张津,等. 预拉伸厚铝板内部残余应力与晶粒取向均匀性的研究[J]. 精密成形工程, 2014, 6(5): 50—58.
 ZHENG Lin, CHE Lu-chang, ZHANG Jin, et al. Internal Residual Stress and Texture Homogenization in Pre-stretch

Aluminum Alloy Plates[J]. Journal of Netshape Forming Engineering, 2014, 6(5): 50—58.[32] ZHANG Jin, ZHENG Lin, GUO Xue-bo, et al. Residual

- Stresses Comparison Determined by Short-Wavelength X-Ray Diffraction and Neutron Diffraction for 7075 Aluminum Alloy[J]. Journal of Nondestructive Evaluation, 2014, 33(1): 82–92.
- [33] STEUWER A, PEEL M J, WITHERS P J. Dissimilar Friction Stir Welds in AA5083–AA6082: The Effect of Process Parameters on Residual Stress[J]. Materials Science and Engineering: A. 2006, 441(1/2): 187–196.
- [34] HUTCHINGS M T, WITHERS P J, HOLDEN T M, et al. Introduction to the Characterization of Residual Stress by Neutron Diffraction[M]. CRC Press, 2005.
- [35] JI P, YANG Z, ZHANG J, et al. Residual Stress Distribution and Microstructure in the Friction Stir Weld of 7075 Aluminum Alloy[J]. Journal of Materials Science. 2015, 50(22): 7262–7270.
- [36] STARON P, KOCAK M, WILLIAMS S, et al. Residual Stress in Friction Stir-welded Al Sheets[J]. Physica B: Condensed Matter. 2004, 350(1): E491–E493.