

## 材料与成形性能

## 预拉伸厚铝板内部残余应力与晶粒取向均匀性的研究

郑林<sup>1</sup>, 车路长<sup>1,2</sup>, 张津<sup>3</sup>, 张鹏程<sup>4</sup>, 何长光<sup>1</sup>, 彭正坤<sup>1</sup>, 肖勇<sup>1</sup>, 封先河<sup>1</sup>, 朱蕾<sup>1</sup>

(1. 西南技术工程研究所, 重庆 400039; 2. 国防科技工业精密塑性成形技术研究应用中心, 重庆 400039;  
3. 北京科技大学 材料科学与工程学院, 北京 100083; 4. 中国工程物理研究院 材料研究所, 绵阳 621700)

**摘要:** **目的** 消减预拉伸铝板内部残余应力。 **方法** 利用短波长 X 射线衍射仪(SWXRD), 分别对某公司国产 25 mm 厚 2024-T351 预拉伸铝板, 以及美国铝业公司(ALCOA) 20 mm 厚 7075-T651 预拉伸铝板的内部残余应力、内部织构及其沿板厚的分布, 进行了无损测定。 **结果** ALCOA 的 20 mm 厚 7075 预拉伸铝板内部残余应力小于 25 MPa, 其内部晶粒取向沿板厚均匀分布; 而某公司原工艺生产的 25 mm 厚 2024 预拉伸铝板, 内部残余应力高达 100 MPa 左右, 其内部晶粒取向沿板厚分布很不均匀。 **结论** 源自于轧制的内部织构沿板厚分布的不均匀性, 使得以消减残余应力为目的的预拉伸处理中的铝板塑性变形不均匀, 导致某公司国产预拉伸铝板内部残余应力的消减效果差, 在其后续加工中容易产生加工变形超差的问题, 需要抑制强剪切织构的产生, 减小织构在整个板材厚度上的不均匀分布程度。

**关键词:** 预拉伸铝板; 内部残余应力; 内部织构均匀性; 短波长特征 X 射线; 衍射

**DOI:** 10.3969/j.issn.1674-6457.2014.05.009

**中图分类号:** TG115.5

**文献标识码:** A

**文章编号:** 1674-6457(2014)05-0050-09

### Internal Residual Stress and Texture Homogenization in Pre-stretch Aluminum Alloy Plates

ZHENG Lin<sup>1</sup>, CHE Lu-chang<sup>1,2</sup>, ZHANG Jin<sup>3</sup>, ZHANG Peng-cheng<sup>4</sup>, HE Chang-guang<sup>1</sup>,  
PENG Zheng-kun<sup>1</sup>, XIAO Yong<sup>1</sup>, FENG Xian-he<sup>1</sup>, ZHU Lei<sup>1</sup>

(1. Southwest Technology and Engineering Research Institute, Chongqing 400039, China;

2. National Defence Research and Application Center of Precision Plastic Forming Technology, Chongqing 400039, China;

3. School of Materials Science and Engineering, University of Science and Technology Beijing, Beijing 100083, China;

4. Institute of Material, China Academy of Engineering Physics, Mianyang 621700, China)

**ABSTRACT: Objective** To decrease the residual stress in pre-stretch plates. **Methods** The internal residual stress, internal texture and its distribution along the plate thickness were measured non-destructively for the domestic produced 2024-T351 aluminum alloy pre-stretch plate with a thickness of 25 mm and the ALCOA 7075-T651 aluminum alloy pre-stretch plate with a thickness of 20 mm by means of the self-developed short-wavelength X-ray diffractometer (SWXRD).

收稿日期: 2014-08-10

基金项目: 国家高技术研究发展计划(2009AA03Z539); 国家重大科学仪器设备开发专项(2012YQ130234)

作者简介: 郑林(1963-), 男, 研究员级高工, 主要从事短波长特征 X 射线衍射技术及仪器开发, 以及轻合金材料的残余应力、织构与性能研究。

**Results** The results showed that the internal residual stress was less than 25 MPa and the internal texture was homogeneous along the plate thickness for the ALCOA 7075-T651 aluminum alloy plate, and the internal residual stress was much higher (reaching about 100 MPa) and the internal texture was quite inhomogeneous along the plate thickness for the domestic 2024-T351 aluminum alloy plate. **Conclusion** The inhomogeneous distribution of the internal texture along the plate thickness led to the inhomogeneous plastic deformation of the aluminum plate in the pre-stretch treatment aimed to reduce the residue stress, and finally caused the poor reduction of internal residue stress by the domestic aluminum alloy pre-stretch plates. Therefore, suitable rolling process should be adopted to obtain homogeneous texture, and the strong shear texture should be restrained to increase the texture homogenization.

**KEY WORDS:** pre-stretch aluminum alloy plate; internal residual stress; internal texture homogenization; short-wavelength characteristic X-ray; diffraction

铝合金预拉伸板是航空、航天等领域的主要结构材料,要求其内应力小且均匀<sup>[1-4]</sup>。使用铝合金预拉伸板材加工制造航天、航空飞行器受力部件,大大降低了加工成本和制造成本,极大地解决了大型结构件的铆接等问题<sup>[5]</sup>。目前,在采用大尺寸铝合金预拉伸板的整体直接铣削加工中,由于国产板材内部残余应力过大引起的加工变形超差问题,已成为航空和精密仪器仪表的整体结构件制造的关键技术难点之一<sup>[6-7]</sup>。

在我国,由于能够原位地无损测定工件内部应力、内部织构等的中子衍射<sup>[8-9]</sup>,或高能同步辐射的短波长 X 射线衍射<sup>[10-13]</sup>等的大型科学实验装置还在建造中,研究工作受到了很大的限制。

尽管国内众多学者和企业没有能够原位地无损测定工件内部应力、内部织构等的手段,还是开展了大量研究,力图解决以国产预拉伸铝板加工变形超差为代表的难题,并在预拉伸处理和淬火工艺方面取得了一些进展。国内学者按照平面应力模型,采用裂纹柔度法开展了预拉伸铝板内部残余应力测试技术研究,以及预拉伸工艺和淬火工艺等工艺方面的研究<sup>[6,14]</sup>,力图减小某公司国产预拉伸铝板的内部残余应力。在预拉伸铝板内部织构与性能方面,张新明等人<sup>[15]</sup>通过破坏性取样研究了 7075 预拉伸铝板织构不均匀性对性能的影响,研究结果表明:轧制过程中,表层受摩擦力作用处于剪切应变状态,中心层处于平面应变状态,织构呈不均匀分布;沿板材厚度方向,合金的组织、织构、强度及断裂韧性呈不均匀分布;在同一厚度处,合金的强度和断裂韧性具有明显的各向异性。陈军洲等人<sup>[16]</sup>通过破坏性取样研究了 AA7055 铝合金板材不同厚度层屈服强度的演变规律,研究结果表明:板厚方向上织构的分布

呈现不均匀性;晶粒形貌沿板厚方向也极不均匀;屈服强度沿厚度方向呈梯度分布。众所周知,残余应力的产生源自于不均匀塑性变形,而预拉伸铝板各部位织构、组织等的不均匀性,是除了温度、施加外力等外因的内在原因<sup>[17]</sup>。

目前,关于预拉伸铝板内部晶粒取向等的不均匀性对消减其内部残余应力效果影响的研究未见报道,而某公司国产预拉伸铝板加工变形超差问题一直未能得到较好的解决。

文中基于工程实践中应力与织构往往存在相伴相随的认识,利用近年来本单位自主研发完成的 SWXRD-1000 型短波长 X 射线衍射仪<sup>[18-21]</sup>,首次在国内进行了原位地无损测定预拉伸铝板内部应力、内部织构等,并研究其相互关系,力图找出某公司国产预拉伸铝内部残余应力过大的原因。通过原位地无损测定某公司国产 25 mm 厚 2024 预拉伸铝板和 ALCOA 的 20 mm 厚 7075 预拉伸铝板内部残余应力、内部织构及其沿板厚分布,进行对比实验研究,分析讨论了预拉伸铝板内部织构对其残余应力消减效果的影响,认为预拉伸消减铝板内部残余应力的效果,直接与其内部晶粒取向分布密切相关,均匀轧制是预拉伸处理能够良好消减铝板内部残余应力的必要条件之一。

## 1 实验

### 1.1 材料

预拉伸铝板的主要生产流程是:铸锭→轧制→固溶处理(淬火)→预拉伸→时效。

文中的 25 mm 厚 2024 预拉伸铝板是由某公司

老工艺生产,在预拉伸铝板的中段线切割测试样品,其尺寸为 198 mm (RD) × 204 mm (TD) × 25 mm (ND);切割火柴棍状标样,拼接成 25 mm (RD) × 25 mm (TD) × 25 mm (ND) 的无应力标样。

在一块 ALCOA 的 20 mm 厚 7075 预拉伸铝板上线切割测试样品,线切割后的测试样品尺寸为 200 mm (RD) × 200 mm (TD) × 20 mm (ND);切割火柴棍状标样,拼接成 25 mm (RD) × 25 mm (TD) × 20 mm (ND) 的无应力标样。

以上的无应力标样参照国际标准<sup>[22]</sup>推荐的方法制备。

## 1.2 方法

采用短波长特征 X 射线衍射的 SWXRD 进行预拉伸铝板内部残余应力、内部织构的无损检测分析,以下就短波长特征 X 射线衍射无损检测分析方法进行介绍。

### 1.2.1 短波长特征 X 射线衍射实验方法及实验条件

短波长 X 射线衍射仪<sup>[18-20]</sup>是利用  $W\text{K}\alpha_1$  (波长为 0.020 899 2 nm) 射线的强穿透性射入工件内部,探测器通过限位狭缝系统定点接受被测试工件内部的衍射线,在测试中,被测工件被测试部位始终位于衍射仪圆心(图 1 中的深色部分)。

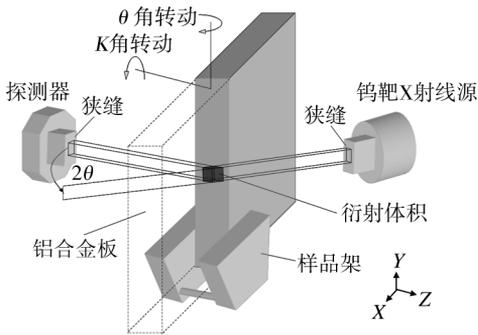


图 1 短波长 X 射线衍射谱测试示意图

Fig. 1 Sketch of principle of SWXRD

不同测试部位的选取,是通过样品台上的三维 X, Y, Z 平移运动,使得被测试部位运动到衍射仪圆心,从而定点无损测量被测工件(如预拉伸铝板测试样品)内部不同部位物质衍射的  $W\text{K}\alpha_1$  衍射强度。

测量被测试部位物质的不同方向衍射强度,是通过  $\theta$  角、样品台上的 K 角转动,使得被测试工件被测试部位转动到待测方向。

在衍射谱测量中,是采用衍射角  $2\theta$  步进扫描方式,定点无损测量工件内部晶体物质短波长特征 X 射线衍射谱,用于应变测量,计算被测试部位的残余应力。

在织构测量中,是采用将探测器置于  $2\theta_{hkl}$ ,转动  $\theta$  角到一定的角度,转动 K 角进行步进扫描,定点无损测量  $W\text{K}\alpha_1$  衍射强度及其分布,用于织构分析,表征被测试部位的晶体取向分布及差异。

利用 SWXRD-1000 型短波长 X 射线衍射仪进行实验研究的主要测试参数为:辐射的 W 靶 X 射线管特征 X 射线  $W\text{K}\alpha_1$  波长为 0.020 899 2 nm,管电压为 200 kV,管电流为 12 mA,衍射晶面为 Al (111)。图 2 为  $2\theta$  步进扫描测得的 25 mm 厚 2024 预拉伸铝板厚度中心层 TD 方向的 Al(111) 衍射谱,从图 2 中可见,  $2\theta = 5.12^\circ$  附近的 Al(111) 晶面衍射峰无  $W\text{K}\alpha_2$  衍射峰的干扰。

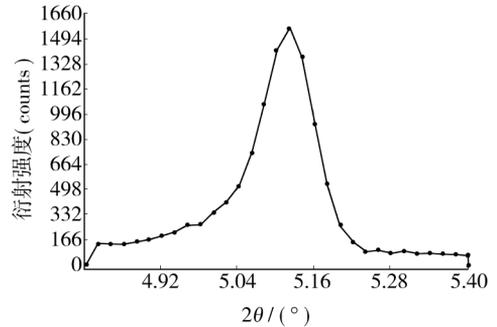


图 2 25 mm 厚 2024 预拉伸铝板厚度中心处 TD 方向的 Al(111) 晶面衍射谱

Fig. 2 Diffraction patterns of Al(111) in the center of the 25 mm thickness 2024-T351 aluminum alloy plate along TD direction

### 1.2.2 铝板内部残余应力及其分布的无损检测分析方法

SWXRD 无损测定工件内部残余应力的测算原理,是参照中子衍射测定内部应力的国际标准<sup>[21]</sup>,通过定点无损测定铝板内部被测试部位的 Al(111) 衍射谱而测得晶面间距及其变化,测算出不同方向的应变  $\varepsilon$ ,根据弹性力学理论的应力-应变关系,计算得到工件内部被测试部位的残余应力。

对于处于平面应力状态的预拉伸铝板<sup>[6,13-14,22]</sup>,其主应力和主应变方向分别为轧制方向 (RD)、横向 (TD)、法向 (ND)。由测得的 RD 方

向应变  $\varepsilon_{RD}^D$ , TD 方向应变  $\varepsilon_{TD}^D$ , 计算 RD 方向应力  $\sigma_{RD}^D$  和 TD 方向应力  $\sigma_{TD}^D$  的公式如下:

$$\sigma_{RD}^D = E(\varepsilon_{RD}^D + \nu \varepsilon_{TD}^D) / (1 - \nu^2) \quad (1)$$

$$\sigma_{TD}^D = E(\varepsilon_{TD}^D + \nu \varepsilon_{RD}^D) / (1 - \nu^2) \quad (2)$$

其中:泊松比  $\nu = 0.33$ ; 衍射晶面 Al(111) 的弹性模量  $E = 77\ 000\ \text{MPa}$ 。

为了测得应变  $\varepsilon^{[23-25]}$ , 首先测量无应力标样各厚度部位的 2 个方向衍射谱, 定峰得到的 Al(111) 晶面间距作为无应力晶面间距的标准值  $d_0$ ; 然后, 测量待测样品相应厚度部位 2 个测试方向的衍射谱, 定峰得到 Al(111) 晶面间距  $d$ , 由此计算得到相应厚度部位的被测试方向应变  $\varepsilon_{TD}^D$  和  $\varepsilon_{RD}^D$  ( $\varepsilon = (d - d_0) / d_0$ ); 根据式(1)和(2)计算得到待测样品相应厚度部位的横向应力  $\sigma_{TD}^D$  和轧向应力  $\sigma_{RD}^D$ 。

通过平移和转动被测工件(如图 1 所示), 就可以测得任意部位的应变  $\varepsilon$ , 最终计算获得被测样品内部残余应力及其分布。

### 1.2.3 铝板内部结构及其沿厚度方向分布的无损检测方法

图 3 是铝合金轧制板典型结构的  $\{111\}$  极图, 结构组分以  $\{110\} \langle 112 \rangle$  等为主。根据图 3, 为了研究预拉伸板内部结构沿板厚的变化情况, 采用 Al  $\{111\}$  极图最外圈的 RD 和 TD 方向附近衍射强度分布(如图 3 中的红框所示)作为表征参量, 通过测量该表征参量沿厚度的分布, 表征预拉伸板内部结构沿板厚的形态和均匀性。

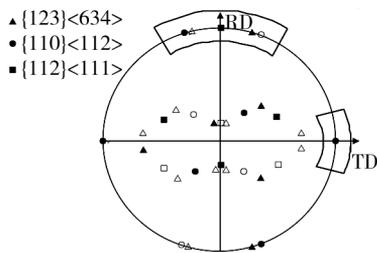


图 3 铝合金轧制板典型结构的  $\{111\}$  极图

Fig. 3  $\{111\}$  pole figure of typical rolling texture of aluminum alloy

本实验采用透射法, 利用 SWXRD 原位无损测量 2 种预拉伸铝板 Al(111) 晶面在极图最外圈 ( $\alpha = 0^\circ$ ) 的轧向附近 ( $\pm 30^\circ$  范围) 和横向附近 ( $\pm 15^\circ$  范围) 衍射强度分布作为表征参量, 以及它们在不同深度处的表征参量分布, 表征 25 mm 厚 2024-T351

预拉伸铝板和 ALCOA20mm 厚 7075-T651 预拉伸铝板内部织构等沿板厚的形态和均匀性。需要说明: 在极图中, 轧向(RD)的  $\alpha = 0^\circ, \beta = 0^\circ$ , 横向(TD)的  $\alpha = 0^\circ, \beta = 90^\circ$ 。

## 2 实验结果

### 2.1 2 种预拉伸铝板内部残余应力及其沿厚度分布的对比测试

无损测定的某公司国产 25 mm 厚 2024-T351 预拉伸铝板内部, 不同深度残余应力及其沿厚度方向的分布见图 4; ALCOA 的 20 mm 厚 7075-T651 预拉伸铝板内部不同深度的残余应力及其沿厚度方向分布结果见图 5, 厚度坐标零点位于板厚中心。

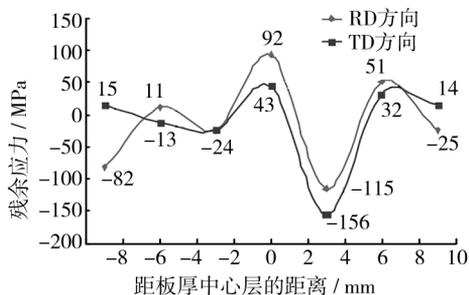


图 4 25 mm 厚 2024-T351 预拉伸铝板内部残余应力及其沿厚度方向的分布

Fig. 4 Residual stress and its distribution along the thickness of the 25 mm 2024-T351 aluminum alloy plate

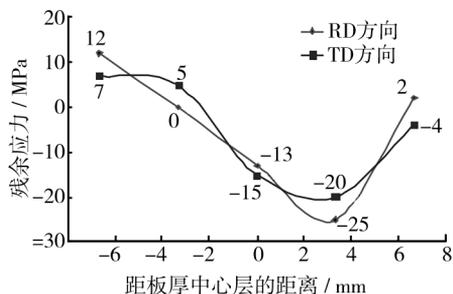


图 5 20 mm 厚 7075-T651 预拉伸铝板内部的残余应力及其沿厚度方向的分布

Fig. 5 Residual stress and its distribution along the thickness of the 20 mm 7075-T651 aluminum alloy plate

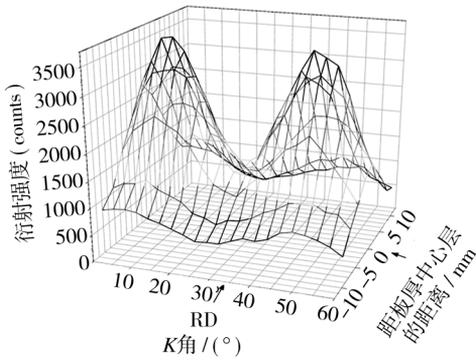
某公司国产 25 mm 厚 2024-T351 预拉伸铝板的测试结果表明: 残余应力沿厚度呈现“波浪”状分布; 最大拉应力处位于厚度中心部位, 横向残余应力

达+92 MPa;最大压应力位于距厚度中心 3 mm 处, 轧向残余应力达-156 MPa;该 2024 预拉伸铝板内部残余应力大,其残余拉应力和残余压应力远远大于 25 MPa。

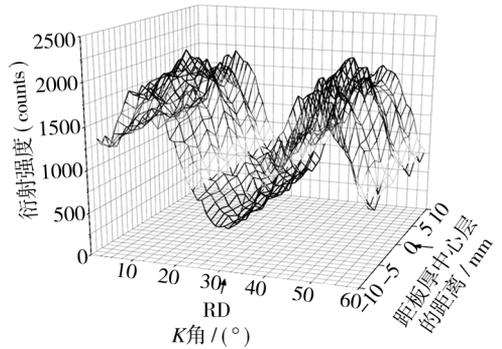
从 ALCOA 的 20 mm 厚 7075-T651 预拉伸铝板测试结果可以看出:各深度部位残余应力均很小,不大于 25 MPa;其最大拉应力和最大压应力均在 RD 方向,最大拉应力仅为 12 MPa,最大压应力仅为 25 MPa。

## 2.2 2 种预拉伸铝板内部晶粒取向沿厚度分布的对比测试

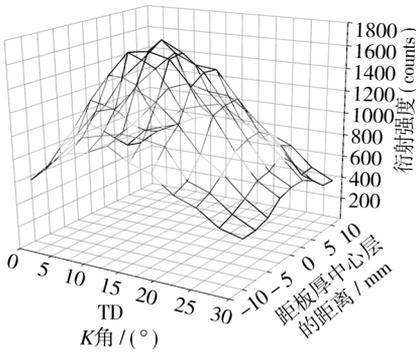
无损测定的某公司国产 25 mm 厚 2024-T351 预拉伸铝板,内部不同厚度部位 Al(111) 在极图最外圈( $\alpha=0^\circ$ )的轧向附近或横向附近的衍射强度及其分布,即表征参量及其分布见图 6。图 6 中,板厚中心层为厚度坐标零点,测试部位分别位于厚度坐标的 0,  $\pm 2.5$ ,  $\pm 5$ ,  $\pm 7.5$ ,  $\pm 10$  mm 厚度处;图 6a 是



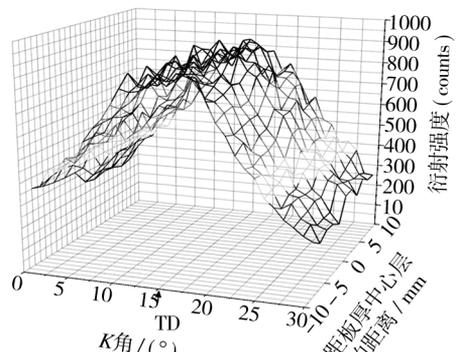
a RD方向( $K=30^\circ$ ),  $K$ 扫描 $0^\circ \sim 60^\circ$



a RD方向( $K=30^\circ$ ),  $K$ 扫描 $0^\circ \sim 60^\circ$



b RD方向( $K=15^\circ$ ),  $K$ 扫描 $0^\circ \sim 30^\circ$



b RD方向( $K=15^\circ$ ),  $K$ 扫描 $0^\circ \sim 30^\circ$

图 6 2024-T351 铝合金板各厚度  $K$  角扫描的衍射强度 ( $\{111\}$  极图最外圈数据)

Fig. 6 The  $K$  angle scanning's diffraction intensity of different thickness in the 2024-T351 aluminum plate (the outmost circle data of  $\{111\}$  pole figure)

RD 方向为  $K=30^\circ$  (对应  $\beta=0^\circ$ ),  $K$  在  $60^\circ$  范围内步进扫描测量在极图最外圈 RD 方向附近的衍射强度分布;图 6b 是 TD 方向为  $K=15^\circ$  (对应  $\beta=90^\circ$ ),  $K$  在  $30^\circ$  范围内步进扫描测量在极图最外圈 TD 方向附近的衍射强度分布。某公司国产 25 mm 厚 2024-T351 预拉伸铝板板厚中心层的衍射强度远远大于其近表面的衍射强度,反映了晶粒取向程度在板厚中心层最强,愈靠近表面愈弱,其结构沿厚度的分布存在显著的差异。

无损测定 ALCOA 的 20 mm 厚 7075-T651 预拉伸铝板内部不同深度部位 Al(111) 在极图最外圈( $\alpha=0^\circ$ )的轧向附近或横向附近的衍射强度分布见图 7。图 7 中,板厚中心层为厚度坐标零点,测试部位分别位于厚度坐标的 0,  $\pm 1.67$ ,  $\pm 3.33$ ,  $\pm 5.00$ ,  $\pm 6.67$ ,  $\pm 8.33$  mm 处,图 7a 中的 RD 方向为  $K=30^\circ$  (对应  $\beta=0^\circ$ ),  $K$  在  $60^\circ$  范围内步进扫描测量在极图最外圈 RD 方向附近的衍射强度分布;图 7b 中的

图 7 7075-T651 预拉伸铝板各厚度  $K$  角扫描的衍射强度 ( $\{111\}$  极图最外圈数据)

Fig. 7 The  $K$  angle scanning's diffraction intensity of different thickness in the 7075-T6 pres-stretch aluminum plate (the outmost circle data of  $\{111\}$  pole figure)

TD方向为 $K=15^\circ$ (对应 $\beta=90^\circ$ ), $K$ 在 $30^\circ$ 范围内步进扫描测量在极图最外圈TD方向附近的衍射强度分布。ALCOA的20 mm厚7075-T651预拉伸铝板不同深度处的衍射强度相差在 $\pm 15\%$ 以内,反映了晶粒取向程度在绝大部分厚度范围内是基本均匀的。

## 3 分析与讨论

### 3.1 残余应力与塑性变形

测试结果表明了某公司国产的25 mm厚2024-T351预拉伸铝板内部残余应力,远远大于ALCOA的20 mm厚7075-T651预拉伸铝板内部残余应力,与该预拉伸铝板容易加工变形的实际情况相吻合。

残余应力产生于材料的不均匀塑性变形,如工件在加工和使用中,内应力的重新平衡使得材料沿截面弹塑性变形不均匀;工件加热及冷却时,其内部温度分布不均匀,导致热胀冷缩不均匀;热加工时,不均匀的温度分布引起相变过程中的不同时性等<sup>[17]</sup>。在预拉伸铝板生产的铸锭、轧制、固溶处理(淬火)等前面环节中,均因材料的不均匀塑性变形而产生残余应力。反之,若使其均匀塑性变形,将能够消除残余应力。基于此原理,在铝板淬火处理后,往往采用施加均匀外力拉伸铝板,使其均匀塑性变形的方法来消除其残余应力,即预拉伸处理。

就预拉伸铝板而言,预拉伸工艺消减残余应力效果的好坏,就不仅取决于预拉伸工艺的拉伸量、夹持力是否均匀(包括预拉伸量、钳口的设计、铝板形状的对称性等)等外在原因,也取决于预拉伸铝板内各部分晶粒的取向或组织差异等内在原因<sup>[17]</sup>,即晶粒的取向均匀性是产生均匀塑性变形的必要条件。

在以消减残余应力为目的的预拉伸处理后,25 mm厚2024-T351预拉伸铝板内部残余应力还高达 $-156 \sim +92$  MPa,消减残余应力效果差,可以推断,该铝板在预拉伸处理中的塑性变形是不均匀的。

### 3.2 均匀塑性变形与晶粒取向分布

#### 3.2.1 铝合金的滑移系与预拉伸铝板织构

晶体材料塑性变形的晶粒取向,主要取决于其

滑移系。不论是2024铝合金还是7075铝合金,其晶胞结构均为面心立方晶系,具有同样的滑移系,即滑移面为 $\{111\}$ ,滑移方向为 $\{110\}$ <sup>[26]</sup>,因而,铝板轧制时,在同样的外力作用下产生塑性变形过程中,铝材晶粒的原子密排面 $\{111\}$ 沿着滑移方向 $\{110\}$ 滑移,各晶粒的晶体取向形成一定的择优取向,它们将形成同类型的轧制织构(如图3所示织构),而晶粒取向程度正比于衍射强度。

经过大变形量轧制后的铝合金板,产生以“黄铜式织构”为主的织构<sup>[27]</sup>,在其后的固溶处理以及预拉伸中的2%左右的拉伸量,均对轧制形成的原始织构影响较小,换言之,预拉伸铝板织构以轧制形成的原始织构为主。

#### 3.2.2 塑性变形的均匀性与晶粒取向分布的均匀性

文中分别测量了2个样品不同深度部位Al(111)在极图最外圈( $\alpha=0^\circ$ )的轧向附近或横向附近的衍射强度,通过它们沿厚度的分布来表征其内部晶粒取向是否均匀。

对于某公司国产25 mm厚2024-T351预拉伸铝板,如图6所示,其RD和TD附近的衍射强度沿厚度是呈山峰形分布,板厚中心层峰顶处的衍射强度数倍于次表层处的衍射强度,晶粒取向沿厚度的分布存在显著差异,亦表征它们在厚度截面(RD-TD面)上的滑移程度存在显著差异,可以认为,该铝板的轧制织构沿厚度的分布是不均匀的,并与实际测得残余应力大的结果相对应。

对于ALCOA的20 mm厚7075-T651预拉伸铝板,如图7所示,其RD和TD附近的衍射强度沿厚度方向基本上是平的分布,板厚中心层峰顶处的衍射强度仅与次表层处的衍射强度相差15%以内,这就表明了该预拉伸铝板在厚度上的晶粒取向程度基本上没有变化,可以认为,在所测厚度范围内,该铝板晶粒取向沿厚度的分布是基本均匀的,并与实际测得残余应力小的结果相对应。

结合3.1章节的分析讨论,即25 mm厚2024-T351预拉伸铝板在预拉伸处理中的塑性变形是不均匀的结论,可以认为,正是由于织构沿板厚的不均匀分布,使得某公司国产25 mm厚2024-T351预拉伸铝板在预拉伸处理中的塑性变形不均匀,消减残余应力的效果差,导致该公司产品内部残余应力过大。

### 3.3 剪切织构与轧制织构

ALCOA 的 20 mm 厚 7075-T651 预拉伸铝板晶粒取向在厚度方向上几乎不存差异,而某公司国产 25 mm 厚 2024-T351 预拉伸铝板晶粒取向在厚度方向上存在很强的差异,表明了某公司国产 25 mm 厚 2024-T351 预拉伸铝板在厚度上的织构类型、取向密度均存在变化。而预拉伸铝板织构以轧制形成的原始织构为主,不能不对轧制形成的原始织构予以关注。

毛卫民<sup>[28]</sup>用金属多晶体材料塑性变形理论和实验分析了轧制时生成织构的不均匀性问题。轧制中,板材的织构可大致分为 3 部分,在中心层,只受到在板厚方向的压力使其变薄,形成如图 3 所示的正常的轧制织构;在其表层和次表层,受到轧辊的压力,该压力分解为 2 个分力,除了在板厚方向的分力(该分力与金属流动方向垂直)使其变薄以外,还在轧向(RD)受到一个分力,(该分力与金属流动方向平行)在其表层和次表层产生的强剪切织构;在中心层与表层和次表层之间部分,为过渡混合区域,愈靠近中心层,织构中的剪切织构组分愈少。对于剪切织构的抑制而言,通过控制轧辊和轧板间的接触长度、压下量与轧板厚度之比以及优化润滑系统等,使得前滑区和后滑区的摩擦力对轧板的正、负剪切作用基本抵消,就可以大大减若剪切织构的产生,在整个板材的绝大部分厚度范围内得到均匀织构分布。

某公司国产 25 mm 厚 2024-T351 预拉伸铝板织构沿板厚的不均匀分布,源自于轧制中的铝板在其表层和次表层产生的较强剪切织构,需要减弱剪切织构的产生。

综上所述,某公司国产 25 mm 厚 2024-T351 预拉伸铝板在以消减残余应力为目的的预拉伸处理过程中,由于其内部织构、组织在厚度方向的不均匀分布等内在原因,使得预拉伸过程中的塑性变形不均匀,导致消减残余应力的效果差。因此,为了获得良好的残余应力消减效果,在生产中,除了继续关注预拉伸、淬火等工艺优化外,需要重点关注某公司国产预拉伸铝板内部织构沿板厚分布的均匀性,特别是需要优化轧制工艺,抑制强剪切织构的产生,减小织构在整个板材厚度上的不均匀分布程度。

## 4 结论

1) ALCOA 的 20 mm 厚 7075-T651 预拉伸铝板内部的残余拉应力和残余压应力在 25 MPa 内,且不同深度部位的晶粒取向程度波动很小,其晶粒取向沿板厚分布基本均匀。

2) 某公司国产 25 mm 厚 2024-T351 预拉伸铝板内部残余应力在 -156 ~ +92 MPa 内,其残余拉应力和残余压应力远远大于 25 MPa;不同厚度部位的晶粒取向程度差异很大,是一种沿板厚不均匀分布的织构。

3) 需要重点关注某公司国产预拉伸铝板内部织构沿板厚分布的均匀性,优化轧制工艺,抑制剪切织构,以获得均匀轧制织构。

4) 织构等沿板厚的不均匀分布是影响以消减内部残余应力为目的的预拉伸处理效果的内在原因。

5) 短波长特征 X 射线衍射技术能够表征预拉伸铝板的内部残余应力、内部织构及其变化。

### 参考文献:

- [1] 柯映林,董辉跃. 7075 铝合金厚板预拉伸模拟分析及其在淬火残余应力消除中的应用[J]. 中国有色金属学报,2004,14(4):639—645.  
KE Ying-lin, DONG Hui-yao. Pre-stretching Process and Its Application in Reducing Residual Stress of Quenched 7075 Aluminum Alloy Thick-plates [J]. The Chinese Journal of Nonferrous Metals, 2004, 14(4): 639—645.
- [2] 吴运新,廖凯. 铝合金厚板拉伸过程横向残余应力消减分析[J]. 材料工程,2009(10):45—48.  
WU Yun-xin, LIAO Kai. Research of Transverse Stress Reduction in Prestretching of Aluminum Alloy Thick Plate [J]. Materials Engineering, 2009(10): 45—48.
- [3] GONG Hai, WU Yun-xin, LIAO Kai. Prediction model of Residual Stress Field in Aluminum Alloy Plate [J]. Cent South Univ Technol, 2011, 18: 285—289.
- [4] 汪洪峰,左墩稳,邵定林,等. 工艺参数对搅拌摩擦焊 7022 铝合金残余应力及耐磨耐腐蚀性能的影响[J]. 航空材料学报,2011,31(1):41—47.  
WANG Hong-feng, ZUO Dun-wen, SHAO Ding-lin, et al. Effect of Process Parameters on Residual Stress and

- Wear and Corrosion Resistance of 7022 Aluminum Alloy by FSW[J]. *Journal of Aeronautical Materials*, 2011, 31(1):41—47.
- [5] 李志辉,熊柏青,张永安,等. 7B04 铝合金预拉伸厚板的微观组织与性能[J]. *稀有金属*, 2007, 31(4):440—445.  
LI Zhi-hui, XIONG Bai-qing, ZHANG Yong-an, et al. Microstructure and Properties of 7B04 Alloy pre-stretched Thick Plates[J]. *Chinese Journal of Rare Metals*, 2007, 31(4):440—445.
- [6] 唐志涛,刘战强,艾兴,等. 基于裂纹柔度法的铝合金预拉伸板内部残余应力测试[J]. *中国有色金属学报*, 2007, 17(9):1404—1409.  
TANG Zhi-tao, LIU Zhan-qiang, AI Xing, et al. Measuring Residual Stresses Depth Profile in Pre-stretched Aluminum Alloy Plate Using Crack Compliance Method[J]. *The Chinese Journal of Nonferrous Metals*, 2007, 17(9):1404—1409.
- [7] 杨峰,武高辉,孙东立,等. 2024 铝合金微变形各向异性消除工艺研究[J]. *金属热处理*, 2000(3):20—21.  
YANG Feng, WU Gao-hui, SUN Dong-li, et al. Study on Eliminating Micro-deformational Anisotropy of Aluminum Alloy[J]. *Metals Heat-treatment*, 2000(3):20—21.
- [8] ALLEN A J, HUTCHINGS M T, WINDSOR C G, et al. Neutron Diffraction Methods for the Study of Residual Stress Fields[J]. *Adv Phys*, 1985, 34(4):445—473.
- [9] PARADOWSKA A M, PRICE J W H, FINLAYON T R, et al. Comparison of Neutron and Synchrotron Diffraction Measurements of Residual Stress in Bead-on-plate Weldments[J]. *Journal of Pressure Vessel Technology*, 2010, 132/011502, 1—8.
- [10] REIMERS W, PYZALLA A, BRODA M, et al. The Use of High-energy Synchrotron Diffraction for Residual Stress Analyses[J]. *Journal of Materials Science Letters*, 1999, 18(7):581—583.
- [11] GANGULY S, STELMUKH V, EDWARDS L, et al. Analysis of Residual Stress in Metal-inert-gas-welded Al-2024 Using Neutron and Synchrotron X-ray diffraction[J]. *Materials Science and Engineering:A*, 2008, 491(1-2):248—257.
- [12] REIMERS W, BRODA M, BRUSCH G, et al. Evaluation of Residual Stresses in the Bulk of Materials by High Energy Synchrotron Diffraction[J]. *Journal of Nondestructive Evaluation*, 1998, 17(3):129—140.
- [13] JAMES M N, HUGHES D J, HATTING D G, et al. Synchrotron Diffraction Measurement of Residual Stresses in Friction Stir Welded 5383-H321 Aluminum Butt Joints and their Modification by Fatigue Cycling[J]. *Fatigue and Fracture of Engineering Material and Structures*, 2004, 27(3):187—202.
- [14] 龚海,吴运新,廖凯. 预拉伸对 7075 铝合金厚板残余应力分布的影响[J]. *材料热处理学报*, 2009, 30(6):201—205.  
GONG Hai, WU Yun-xin, LIAO Kai. Influence of Pre-stretching on Residual Stress Distribution in 7075 Aluminum Alloy Thick-plate[J]. *Journal of Materials Heat-treatment*, 2009, 30(6):201—205.
- [15] 张新明,韩念梅,刘胜胆,等. 7050 铝合金厚板织构、拉伸性能及断裂韧性的不均匀性[J]. *中国有色金属学报*, 2010, 20(2):202—208.  
ZHANG Xin-ming, HAN Nian-mei, LIU Sheng-dan, et al. Inhomogeneity of Texture, Tensile Property and Fracture Toughness of 7050 Aluminum Alloy Thick Plate[J]. *The Chinese Journal of Nonferrous Metals*, 2010, 20(2):202—208.
- [16] 陈军洲,甄良,戴圣龙,等. 晶粒形貌及织构对 AA 7055 铝合金板材不同厚度层屈服强度的影响[J], *稀有金属材料与工程*, 2008, 37(11):1966—1969.  
CHEN Jun-zhou, ZHEN Liang, DAI Sheng-long, et al. Effects of Grain Shape and Texture on the Through-thickness Yield Strength of AA 7055 Aluminum Alloy Plate[J]. *Rare Metal Materials and Engineering*, 2008, 37(11):1966—1969.
- [17] 张定铨. 残余应力测定的基础知识讲座—第一讲 残余应力的基本概念[J]. *理化检测—物理分册*, 2007, 43(4):211—213.  
ZHANG Ding-quan. Basic Knowledge of Stress Determination by X-ray: Lecture No. 1 Basic Concept OF Residual Stress[J]. *PTCA(PART:A PHYS. TEST.)*, 2007, 43(4):211—213.
- [18] 郑林,何长光,彭正坤. 短波长 X 射线衍射测量装置及方法 [P]. ZL2004100688802/2009-05-06, US7583788B2/2009-09-01.  
ZHENG Lin, HE Chang-guang, PENG Zheng-kun. Measuring Device for the Shortwavelength X ray Diffraction and a Method Thereof[P]. ZL2004100688802/2009-05-06, US7583788B2/2009-09-01.
- [19] ZHENG Lin, HE Chang-guang, PENG Zheng-kun. Measuring device for the Shortwavelength X Ray Diffraction and a Method Thereof[P]. USA/US7583788B2, 2009-09-01.
- [20] 周上祺,任勤,郑林. X 射线残余应力测定装置和方法.

- 中国,ZL97101150.8[P]. 2000-01-15.
- ZHOU Shang-qi, REN Qing, ZHENG Li. X ray Measuring Device for Stress and A Method thereof. China, ZL97101150.8[P]. 2000-01-15.
- [21] ISO/TS 21432-2005, Non-destructive testing—Standard Test Method for Determining Residual Stresses by Neutron Diffraction[S].
- [22] YAZDI R S, RETRAINT D, LU J. Study of Through-thickness Residual Stress by Numerical and Experimental Techniques[J], Journal of Strain Analysis, 1998, 33(6):449—458.
- [23] 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.
- [24] 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]. J Nondestruct Eval,2014,(33):82—92.
- [25] 张津,李峰,郑林,等. 2024-T351 铝合金搅拌摩擦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):28—34.
- [26] HONEYCOMBE R W K. 金属塑性变形[M]. 张猛,胡亚民,李先禄. 重庆:重庆大学出版社,1989.
- HONEYCOMBE R W K. The Plastic Deformation of Metals[M]. ZHANG Meng, HU Ya-min, LI Xian-lu. Chongqing:University of Chongqing Press,1989.
- [27] 毛卫民. 金属材料的晶体学结构与各向异性[M]. 北京:科学出版社,2002.
- MAO Wei-min. Crystallography Texture and Anisotropy for Metals Materials[M]. Beijing:Science Press,2002.
- [28] 毛卫民. 金属材料的晶体学结构与各向异性[M]. 北京:科学出版社,2002.
- MAO Wei-min. Crystallography Texture and Anisotropy for Metals Materials[M]. Beijing:Science Press,2002.
- 
- (上接第 17 页)
- [33] WANG Xi-bao. The Metallurgical Behavior of B<sub>4</sub>C in the Iron-matrixd Surfacing Alloy during PTA Powder Surfacing[J]. Applied Surface Science, 2005, 252: 2021—2028.
- [34] KLOBCAR D, TUSEK J, TALJAT B. Thermal Fatigue of Materials for Die-casting Tooling[J]. Materials Science and Engineering A,2008,472:198—207.
- [35] KLOBCAR D, TUSEK J. Thermal Stresses in Aluminum Alloy Die Casting Dies[J]. Computational Materials Science,2008,43:1147—1154.
- [36] KIM H J, YOON B H, LEE C H. Wear Performance of the Fe-matrixd Alloy Coatings Produced by Plasma Transferred Arc Weld - surfacing Process [J]. Wear, 2002(249):846—852.
- [37] YANG Shang-lei, LYU Xue-qin, ZOU Zeng-da, et al. Investigation of Surfacing Electrode with High Hardness Matrixd on Lath Martensite[J]. Materials Science and Engineering A,2006(438-440):281—284.
- [38] WANG Xi-bao, WANG Xiao-feng, SHI Zhong-quan. The Composite Fe-Ti-B-C Coatings by PTA Powder Surfacing Process[J]. Surface & Coating Technology, 2005, 192:257—262.
- [39] 周杰,卢顺,权国政,等. 一种基于铸钢基体的双金属层堆焊制备锻模的方法:中国,200910104604. X[P]. 2010-01-20.
- ZHOU Jie, LU Shun, QUAN Guo-zheng, et al. A Forging Die Manufacturing Method Bimetallic Surfacing Based on Cast-steel Matrix:China,200910104604. X[P]. 2010-01-20.
- [40] 周杰,董旭刚,卢顺,等. 用于双层堆焊制备锻模工艺的铸钢基体及其制备方法:中国,ZL201110179277. 1[P]. 2011-11-16.
- ZHOU Jie, DONG Xu-gang, LU Shun, et al. Steel Matrix and Its Preparation Method for Bimetallic Surfacing Based on Cast-steel Matrix:China,ZL201110179277. 1[P]. 2011-11-16.