

# 过盈配合 7050 铝合金套筒三维应力分布的中子衍射分析

孙光爱<sup>①②\*</sup>, 汪小琳<sup>①②</sup>, 吴二冬<sup>③</sup>, 李建<sup>①</sup>, 陈彦舟<sup>①</sup>, 陈波<sup>①</sup>, 盛六四<sup>②</sup>, LUZIN Vladimir<sup>④</sup>,  
GYULA Török<sup>⑤</sup>

① 中国工程物理研究院中子物理学重点实验室, 核物理与化学研究所, 绵阳 621900;

② 中国科学技术大学核科学技术学院, 合肥 230026;

③ 中国科学院金属研究所, 沈阳 110016;

④ The Bragg Institute, Australian Nuclear Science and Technology Organisation, Kirrawee, DC NSW 2232, Australia;

⑤ Research Institute for Solid State Physics and Optics, Budapest, H-1525-49, Hungary

\* 联系人, E-mail: guangaisun\_80@163.com

2012-09-12 收稿, 2012-11-09 接受

国家自然科学基金(91126001, 11105128)、澳大利亚核科学与技术研究院布拉格研究所(ANSTO, Bragg Institute)项目(DB1956)、中国工程物理研究院科学技术发展基金(2010A0103002)和中国工程物理研究院核物理与化学研究所科技创新基金(2009CX01)资助

**摘要** 中子衍射技术用于材料和工程部件内部的应力分析正在国内外引起广泛关注. 为了推动该技术和应用, 本文利用中子衍射技术对过盈配合 7050 铝合金套筒的(200)和(311)晶面进行了测量, 得到了套筒不同位置的环向、径向和轴向三维应变和应力分布, 并将实验结果与理论计算和国际标样数据进行了比较, 数据可以较好地符合, 能够清晰反映铝合金套筒界面处的应力和应变梯度变化. 针对常波长中子衍射测量试样外表面区域应力(变)偏差较大的技术问题, 利用蒙特卡罗方法进行了模拟实验, 提出了径向准直方法以提高测量精度. 通过细致分析两种晶面的中子衍射实测与解析计算结果, 我们发现晶间应变分配会引起应力测量的系统偏差, 通过准确地预估晶间应变分配可进一步提高应力测量精度. 若样品中存在微观应力和织构, 也会影响测量结果的准确性, 特别是在具有显著应力梯度的区域, 必须尽量减小试样中的衍射体积才能取得有效数据.

## 关键词

中子衍射  
7050 铝合金  
三维应力分布  
测量精度

中子衍射应力分析技术是目前无损检测多晶材料内部三维应力的独特技术手段. 中子和 X 射线衍射方法测量残余应力的原理基本相同, 均是根据衍射峰的位移计算应变, 然后再转化为应力. 但 X 射线衍射通常用于薄膜或材料表面的应力(变)测量<sup>[1]</sup>, 而中子衍射则可用于直接探测大块材料或工程部件内部(厘米量级)三维多尺度的应力(变)分布. 中子应力(变)分析相对于 X 射线和其他应力测试方法的主要特点如下: 穿透能力强, 在应用上适合工程部件内部应力的测量<sup>[2,3]</sup>; 非破坏性, 是工艺优化的有力诊断工具, 并可用来监视实际环境或加载条件下部件应力的发展变化状态; 空间分辨可调, 中子的空间分辨

通常可以与有限元模式的空间网格相匹配, 在检验有限元计算方面具有很大优势<sup>[4,5]</sup>; 可以方便地在高温、低温环境下进行工程材料研究, 解决材料中特定相的平均应力和晶间应力问题<sup>[6,7]</sup>. 通过近年来的发展, 中子衍射对钢材料和铝材料可以分别实现内部 25 mm 和 50~100 mm 的应变测量, 应变测量精度可以达到  $10^{-4}$ <sup>[8,9]</sup>.

中子衍射应力(变)测量的精度和准确性对工程部件的研究与应用至关重要, 因此需要准确的应力数据测量标准. 但与常规 X 射线表面残余应力测量不同的是, 中子衍射应力(变)测量目前既没有规范的测量方法, 也没有标准的测量设备, 不同测量设备只

**引用格式:** 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. 科学通报, 2013, 58: 1000-1006

Sun G A, Wang X L, Wu E D, et al. Three-dimensional stress distribution of surplus assembled 7050Al alloy ring and plug determined by neutron diffraction (in Chinese). Chin Sci Bull (Chin Ver), 2013, 58: 1000-1006, doi: 10.1360/972012-1006

能通过对标准应力样品的标定实现可靠的应力数据测量。但由于材料内部三维残余应力测量的复杂性,单独的中子衍射应力谱仪与测量方式很难保证应力数据标定测量的可靠性,因而国际合作研究项目——先进材料和标准的凡尔赛合作计划,就此专门组织了世界上7个国家的近20个中子散射机构开展了对统一的三维应力试样的中子衍射残余应力测量,然后通过比较分析各种测量方式或方法获取的数据确定残余应力测量的一致性和准确性<sup>[10]</sup>。而由Krumm提供的过盈配合7050铝合金套筒是此项研究中采用的主要标准样品<sup>[11]</sup>。由于我们国家当时并没有可用的中子衍射应力测试装置,因而未能参与此项目研究。然而随着我国中子散射平台即将投入使用,为了评价中子衍射应力分析装置技术参数和性能指标的适用性,在应用中子衍射技术开展材料和部件检测过程中获得准确可靠的实验结果,必须先期研制具有代表性的标准试样,探索并建立中子衍射应力(变)分析的规范化测试方法与误差分析,从而为开展各类实际工程部件内部残余应力的中子衍射测量打下基础并提供参考依据<sup>[12]</sup>。因此,本文利用两种中子衍射装置选择不同的晶面((200)和(311)晶面)和衍射体积开展实验,将实验数据与解析计算结果进行比较分析,期望在探索实验、数据分析和结果评价方法的同时,提升对三维应力分布特点和表征技术的认识。

## 1 材料与方法

过盈配合的铝合金套筒试样采用7050铝合金材料制备,合金的名义成分为(wt%):  $Al_{88.7}Zn_{6.2}Mg_{2.2}Cu_{2.3}Zr_{0.1}$ ,其他元素含量少于0.05%。铝合金套筒实物如图1所示,该试样的高度为50 mm,铝合金筒的外径为50 mm,内径为25 mm,设计铝合金塞与筒晶体取向相同,且铝合金塞的直径比筒外径大0.03 mm(对应半径界面偏差0.015 mm)。铝合金筒和塞的装配过程如下:先将铝合金筒放入液氮中,使其达到热平衡状态后移出加热至室温,再将其放入50℃的温控箱中;然后将铝合金塞放入液氮中,使其达到热平衡态后迅速移出并镶入加热膨胀的铝合金筒中,由于热胀冷缩的原因,装配过程中铝合金筒和塞之间并没有相互作用力。

为了避免因衍射几何引起的衍射峰“质偏移”,中子衍射应力(变)测量中通常需要待测晶面的衍射

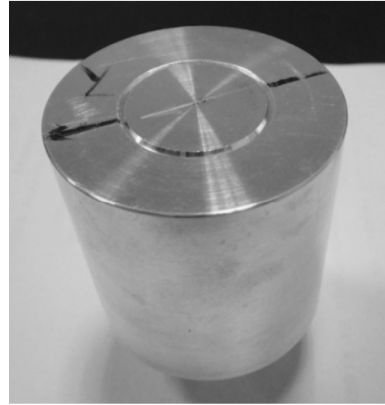


图1 7050 铝合金套筒实物图

角在 $90^\circ$ 附近。鉴于铝合金材料的面心立方结构,其晶间应变敏感性弱的晶面有(111), (311)和(422)等,而(200)晶面为应变敏感性强的晶面。为了对实验装置和测量方法取得更为清晰的认识,分别选择(311)和(200)晶面进行测量。利用澳大利亚布拉格研究所为中子衍射应力测量新建的专用谱仪 Kowari 测量 Al(311)晶面,设置其 Si(400)单色器起飞角为 $79^\circ$ ,相应中子波长为 $1.73 \text{ \AA}$ <sup>[13]</sup>。匈牙利固体物理与光学研究所的 ATHOS 装置利用的是冷中子,故选择其测量 Al(200)晶面,采用的中子波长为 $2.86 \text{ \AA}$ <sup>[11]</sup>。中子衍射实验测量方向设置如图2所示,分别测试样品径向(R)、环向(H)和轴向(A)的三维应变分布。

## 2 结果与讨论

中子衍射测量的弹性应变 $\varepsilon$ 由晶面间距 $d$ 的变化确定,在常波长模式下,由布拉格等式 $\lambda = 2d\sin\theta$ ,

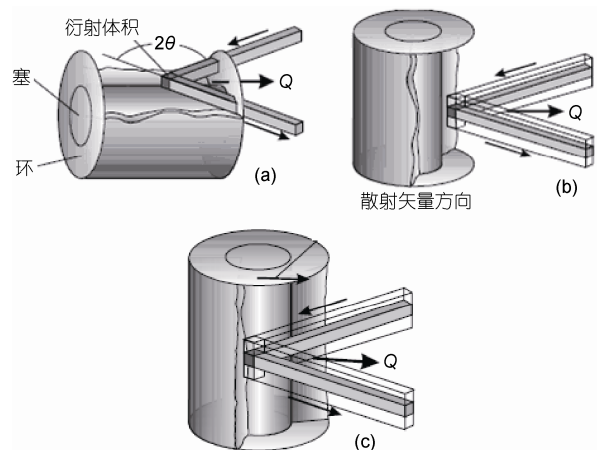


图2 中子衍射测量过盈配合铝合金套筒的几何设置

(a) 轴向; (b) 径向; (c) 环向

可得  $\varepsilon = \Delta d / d_0 = -\cot\theta_0 \Delta\theta$ , 根据衍射峰角度的变化可计算应变  $\varepsilon$  的数值. 中子衍射测量晶面(200)得到的衍射峰如图3所示, 图3中的衍射峰符合高斯函数特征, 扣除水平本底后通过高斯函数拟合可得到准确的衍射峰峰位. 结合利用7050铝合金粉末测定初始状态的无应力值  $d_0(\theta_0)$ , 由上述计算方式采用晶面(200)计算得到不同位置的应变分布如图4所示. 图4中中子衍射测量过程中样品定位误差在0.1 mm以内, 位置变化步距为5 mm. 图4中环向的切应变在铝合金筒和塞界面附近变化最为显著, 界面处的铝合金筒部分受拉应变, 其数值约为  $800\mu\varepsilon$ , 而铝合金塞部分为约  $-500\mu\varepsilon$  的压应变; 径向应变则表现为相反的变化, 虽然整体表现为压应变, 但在铝合金筒与塞过渡处具有明显的变化, 其中铝合金筒在界面处所受压力明显较大; 测量结果表明轴向的应变随位置变化不大.

中子衍射应变测量中通过改变入射束和衍射束方向的狭缝尺寸可以改变样品发生衍射部分的体积

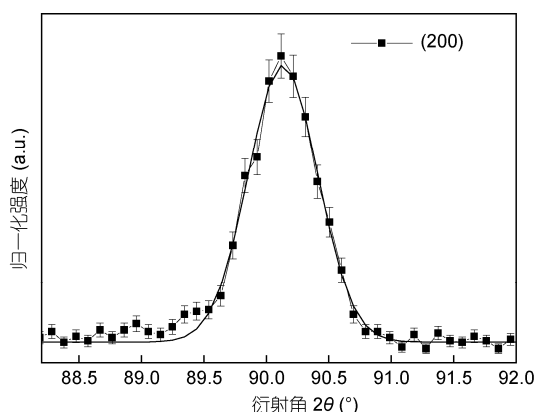


图3 中子衍射测量7050铝合金(200)晶面得到的衍射峰

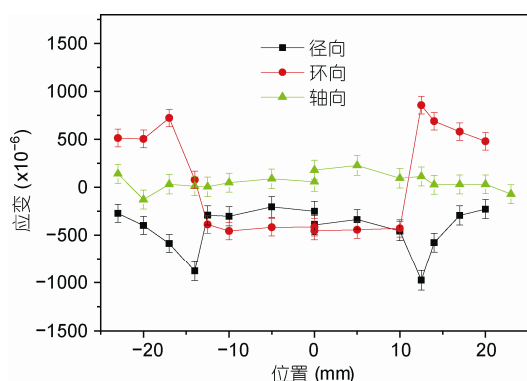


图4 利用晶面(200)计算得到7050铝合金套筒径向、环向和轴向的应变分布

和尺寸, 图4中测量径向和环向应变数据时选择样品发生衍射部分的体积为  $3\text{ mm} \times 3\text{ mm} \times 20\text{ mm}$  (宽 $\times$ 宽 $\times$ 高), 测量轴向时为  $3\text{ mm} \times 3\text{ mm} \times 6\text{ mm}$  (宽 $\times$ 宽 $\times$ 高). 上述中子衍射测量选择样品发生衍射部分的体积较大, 提高了探测速度, 但也降低了测量位置的空间分辨<sup>[10]</sup>. 为了能进行更细致的比对分析, 在中子衍射测量晶面(311)时采用了较小的入射和衍射束狭缝, 从而限定测量径向和环向时样品产生衍射部分的体积为  $2\text{ mm} \times 2\text{ mm} \times 10\text{ mm}$  (宽 $\times$ 宽 $\times$ 高), 测量轴向时为  $2\text{ mm} \times 2\text{ mm} \times 2\text{ mm}$  (宽 $\times$ 宽 $\times$ 高), 因而也可减小测量位置移动步距至2 mm. 利用中子衍射测量结果计算得到7050铝合金套筒径向、环向和轴向的细致应变分布情况如图5所示, 图5中各类应变分布变化趋势与图4基本一致. 仔细比较图4和5还可以发现中子衍射测量的应变分布存在不同之处: 一是图5中轴向应变在铝合金筒与塞界面处有所改变, 铝合金塞部分的轴向为拉应变, 其数值约为  $200\mu\varepsilon$ , 而在铝合金筒部分轴向为较小的压应变, 这在图4的应变数据中没有体现; 二是图5中铝合金筒在界面处的径向最大压应变数值比图4中的数据小, 该差异产生的原因除测量因素影响外, 应与样品自身存在各向异性有关, 这种各向异性受微观应变和织构影响<sup>[14,15]</sup>, 引起无应力参考值  $d_0$  的变化, 从而进一步影响径向应变计算结果的准确性. 图5中应变分布具有更好的空间分辨, 图中位置处于  $-10 \sim 10\text{ mm}$  之间的铝合金塞径向和环向应变均存在起伏, 进一步证实了样品自身具有微观应变. 另外, 图4中数据测量时由于发生衍射的样品体积较大和测量点位置距离较大, 使得测量径向和环向应变在铝合金套筒中心两侧的应变分布对称

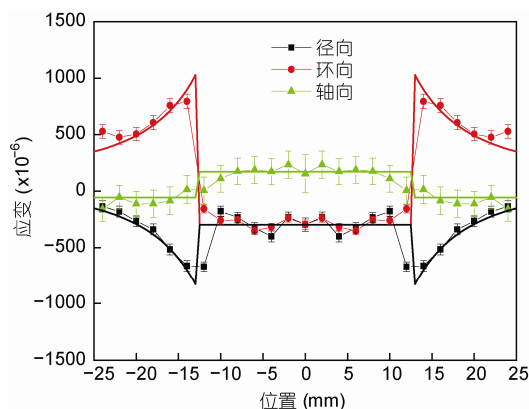


图5 利用晶面(311)计算得到7050铝合金套筒径向、环向和轴向的应变分布以及与理论解析计算值的比较 实线为解析理论计算结果, 测量点的连线为实验数据

性较差.

根据 VAMAS 组织提出的铝合金套筒弹性残余应变(力)的解析计算方法<sup>[10]</sup>, 套筒样品中的应力和应变可以采用如下方式计算, 平衡状态的铝合金套筒应力可以描述为

$$\sigma_z^{\text{plug}} = -\sigma_z^{\text{ring}}(K^2 - 1), \quad (1)$$

式中  $K = b/a$ , 其中  $a$  为铝合金筒的内径,  $b$  为铝合金筒的外径, 本文中  $a = 12.5 \text{ mm}$ ,  $b = 25 \text{ mm}$ . 铝合金套筒的轴向应力取决于装配过程中界面的摩擦力, 铝合金筒中的径向和环向应力之和应该是与中心点距离无关的常数, 这也是铝合金塞中的应力之和. 铝合金套筒的各类残余应变表达式如下.

铝合金筒的环向切应变:

$$\sigma_\theta^{\text{ring}} = \frac{1}{E} \left\{ \frac{p}{(K^2 - 1)} \left[ (1 - \nu) + (1 + \nu) \frac{b^2}{r^2} \right] - \nu \sigma_z^{\text{ring}} \right\}. \quad (2)$$

铝合金筒的径向应变:

$$\varepsilon_r^{\text{ring}} = \frac{1}{E} \left\{ \frac{p}{K^2 - 1} \left[ (1 - \nu) - (1 + \nu) \frac{b^2}{r^2} \right] - \nu \sigma_z^{\text{ring}} \right\}. \quad (3)$$

铝合金筒的轴向应变:

$$\varepsilon_z^{\text{ring}} = \frac{1}{E} \left[ \sigma_z^{\text{ring}} - \nu \left( \frac{2p}{K^2 - 1} \right) \right]. \quad (4)$$

铝合金塞的应变可用如下公式表示:

$$\varepsilon_\theta^{\text{plug}} = \varepsilon_r^{\text{plug}} = -\frac{1}{E} [(1 - \nu)p + \nu \sigma_z^{\text{plug}}], \quad (5)$$

$$\varepsilon_z^{\text{plug}} = \frac{1}{E} (\sigma_z^{\text{plug}} + 2\nu p). \quad (6)$$

(2)~(6)式中,  $E$  为弹性常数,  $\nu$  为泊松比,  $p$  为铝合金套筒过盈配合引起的界面压力,  $\sigma_z$  为铝合金筒的轴向应力.

根据文献[12]实验结果选择(311)晶面的弹性常数  $E_{(311)} = 71.1 \text{ GPa}$ , 泊松比  $\nu_{(311)} = 0.34$ , 结合国际标准组织对 7050 铝合金套筒国际标样测量结果的统计分析并考虑加工与装配温度等因素, 得到套筒实际过盈配合量为  $0.04 \text{ mm}$ , 比设计值  $0.03 \text{ mm}$  稍大, 近而得到铝合金套筒的界面压力  $p = 40 \text{ MPa}$ , 铝合金塞轴向应力  $\sigma_{zp} = -15 \text{ MPa}$ , 与之相平衡的铝合金筒轴向应力  $\sigma_{zr} = 5 \text{ MPa}$ . 采用上述公式和应力值计算得到的应变分布与中子衍射测量(311)晶面的应变分布结果比较如图 5 所示, 图中实验值与理论计算值可以很好地符合, 理论计算值穿过了大部分中子衍射实验测量点. 理论和实验的应变偏差主要分布在  $100 \mu\epsilon$  以内, 由于解析计算参数采用了国际标样的参数数据, 这种符合也说明本文套筒试样与国际标样的一致性.

需要特别指出的是, 国际上各实验室在测试标样过程中均未给出接近样品外表面位置处的应变数据<sup>[10]</sup>, 原因是测量此处时试样不能完全填充入射束和衍射束所形成的规范体积(图 6(a)), 此时产生衍射的有效体积中心与通常中子光路所形成的名义规范体积中心不能重合, 因而这种“表面效应”会引起较大的应变偏差. 图 4 和 5 给出了  $\pm 25 \text{ mm}$  处外表面位置的实验测量数据, 比较图 5 的实验和理论计算值可知, 此处的实测应变值产生了明显偏差, 最大值近  $300 \mu\epsilon$ . 国际上中子衍射测量应力(变)时均采用狭缝的方式限制样品处入射和衍射束的尺寸从而形成衍射体积, 为了探索如何减小这种由于实验设置而引起的测量偏差, 我们采用径向准直的方式代替狭缝, 并利用基于蒙特卡罗方法的中子射线追踪程序对近表面位置的实验测量进行了模拟, 结果如图 6(b)所示.

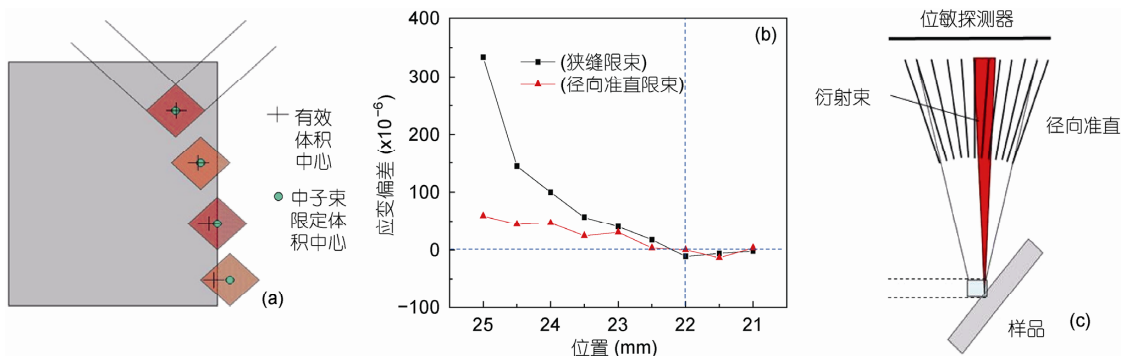


图 6 中子衍射测量近表面位置时的应变偏差分析

(a) 近表面的有效体积中心与中子束光路限定体积中心偏差示意图; (b) 狭缝和径向准直两种限束方式对近表面测量时应变偏差影响的蒙特卡模拟计算; (c) 径向准直在衍射束方向减小应变偏差的模型分析

模拟结果显示采用狭缝限束时,若中心位置位于外表面 25 mm 处,此时的应变偏差约  $340\mu\epsilon$ ,随着中心位置往样品内部偏移,应变偏差逐渐减小,模拟结果与实验值可以得到较好的符合.更为重要的是,由图 6(b)的计算结果可以看出,若利用径向准直的方式限定中子束,则近表面位置测量的应变偏差可以得到大大改善,在 25 mm 处的应变偏差可以减小到  $100\mu\epsilon$  以内.径向准直限束的原理和方式如图 6(c)所示,若在入射方向采用径向准直将可使波长分布更为均匀,减小衍射位置几何尺寸的影响;在衍射束方面,利用径向准直方式可以避免截取衍射峰,将衍射峰准确地传输到位敏探测器.因此,采用了聚焦单色模式的常波长中子谱仪在测量试样近表面位置应力(变)时,径向准直技术可以有效地减弱表面应变偏差现象<sup>[6]</sup>.

为了分析本文实验测量结果的可靠性和准确性,将利用样品(200)晶面测量得到的环向应变转化为应力,并与其他实验室对国际标样的测量结果进行了比较.由于中子衍射测量环向、径向和轴向应变方向均与对应的主轴相一致,因而相应的正应力值可根据测量的应变利用如下关系式计算:

$$\sigma_{\theta} = \frac{E_{hkl}}{(1+\nu_{hkl})(1-2\nu_{hkl})} [(1-\nu_{hkl})\epsilon_{\theta} + \nu_{hkl}(\epsilon_r + \epsilon_z)], \quad (7)$$

$$\sigma_r = \frac{E_{hkl}}{(1+\nu_{hkl})(1-2\nu_{hkl})} [(1-\nu_{hkl})\epsilon_r + \nu_{hkl}(\epsilon_{\theta} + \epsilon_z)], \quad (8)$$

$$\sigma_z = \frac{E_{hkl}}{(1+\nu_{hkl})(1-2\nu_{hkl})} [(1-\nu_{hkl})\epsilon_z + \nu_{hkl}(\epsilon_{\theta} + \epsilon_r)]. \quad (9)$$

晶面(200)的弹性常数取值  $E_{(200)}=65.1$  GPa,泊松比取值  $\nu_{(200)}=0.353$ ,利用关系式(7)~(9)计算得到环向应力如图 7 所示.图 7 中的环向应力与国际标样的应

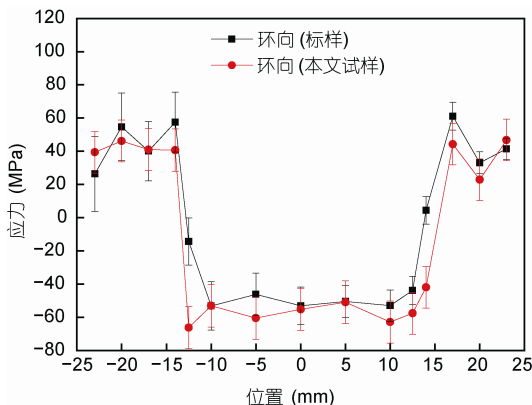


图 7 中子衍射测量 7050 铝合金套筒(200)晶面的环向应力与国际标样应力分布数据比较

力测量结果基本一致,相应位置最大应力偏差也在 20 MPa 以内,图中铝合金筒所受最大拉应力约为 60 MPa,铝合金塞所受压应力约为 -60 MPa,在铝合金筒和塞界面处存在显著的应力梯度和类型转变.

利用(7)~(9)式对(311)晶面应变转化得到的环向、径向和轴向正应力分布如图 8 所示.图 8 表明 7050 铝合金塞所承受的三类应力均为压应力,其中环向和径向的应力值均为 -40 MPa 左右,而轴向的应力值偏小,约为 -12 MPa,与前面所述解析理论计算时所采用的 -15 MPa 偏差很小.与应变分布相较而言,铝合金塞轴向应变为拉应变,但由于受径向和环向应变相互作用的影响,其轴向正应力仍表现为压应力.另一方面,7050 铝合金筒在过盈配合的界面处具有最大应力,其中环向拉应力和径向压应力数值分别约为 50 MPa 和 -50 MPa,之后随距离中心位置逐渐增大而减小,在外表面环向残余拉应力约 20 MPa,而径向压应力则趋于 0 MPa.

为了进一步分析应力测量的影响因素和误差来源,将计算(311)晶面应变分布时所采用的相关应力参数( $p = 40$  MPa,  $\sigma_{zp} = -15$  MPa 和  $\sigma_{zr} = 5$  MPa)用于计算(200)晶面的三维应力分布(图 9(a)).图 9(a)中铝合金塞部分的应力实验测量数据与计算结果相比表现为系统性的偏小,因而需要根据(200)晶面的实验数据进一步调整有关理论计算参数,使解析计算得到的应力值能够与实验测量结果较好地符合.优化得到的应力计算参数为  $p = 50$  MPa,  $\sigma_{zp} = -25$  MPa 和  $\sigma_{zr} = 7$  MPa,此时理论和实测值的符合程度如图 9(b)所示.由此可知,中子衍射测量应力(变)过程中会由于晶间应变分配不同而引起测量结果的系统偏差,通

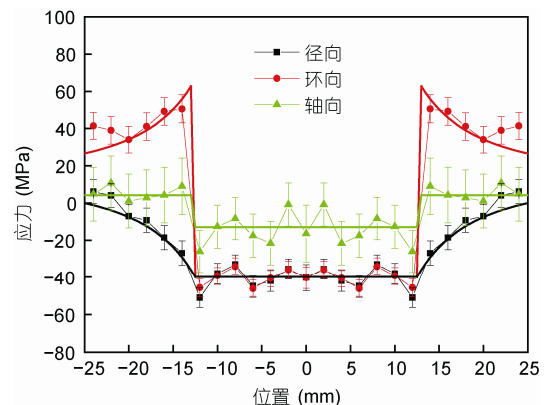


图 8 中子衍射测量 7050 铝合金套筒(311)晶面计算得到的环向、径向和轴向正应力分布

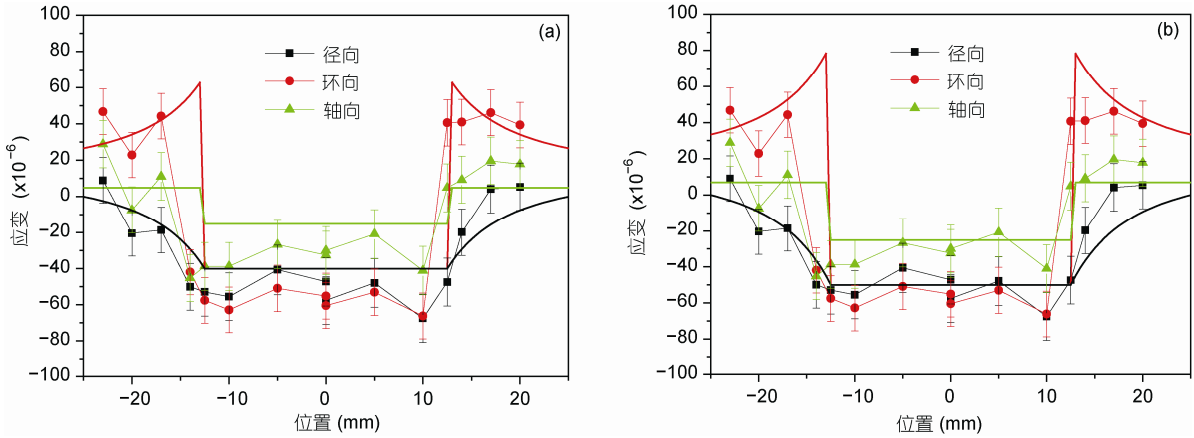


图9 中子衍射测量7050铝合金套筒(200)晶面计算得到的环向、径向和轴向正应力分布  
 (a) 采用与(311)晶面相同应力参数时的计算值和实测值比较; (b) 优化计算应力参数后的实测值与理论值比较

过测量(311)和(200)两种晶面给出的铝合金套筒界面压力 $p$ 和塞部轴向应力偏差均为10 MPa, 因此, 如果在实际工程部件测量时能够系统分析并估算出这种晶间应变引起的系统偏差, 将有助于获得更为准确可靠的内应力分布数据。

中子衍射测量应力过程中, 除如上所述受到样品微观应变和织构的影响外, 实际影响中子衍射应变测量不确定度的因素还包括衍射峰位确定方法、中子波长发散和定位方式等。另外, 发生衍射的样品尺寸不同也会引起中子强度衰减, 从而使得实际测量位置点出现偏差, 影响测量结果的准确性。图8和9中计算的铝合金塞部位三维应力分布均存在明显起伏, 各自的最大和最小值偏差均近20 MPa, 主要是由样品中存在微观应力引起。总体而言, 由于实验参数(如波长发散和数据拟合等)因素引起图8和9中的应力测量误差均未超过20 MPa。图9中铝合金筒和塞界面处的应力测量值与理论计算结果差异显著, 而在图8中可以得到较好的改善, 主要是因为此处存在显著的应力梯度, 图9中数据测量时又选择了较大的狭缝尺寸, 使产生衍射的试样体积偏大, 空间分辨较低。因而, 也就是说, 在具有较大应力梯度的区域, 若不能有效地减小试样中产生衍射的测量体积, 将会无法获得可靠的实验结果。

### 3 结论

利用中子衍射技术准确地给出了过盈配合7050铝合金套筒环向、径向和轴向的应力和应变分布, 实验结果能够清晰反映铝合金套筒界面处的应力和应变梯度变化。铝合金筒在界面处所受应力最大, 其中环向最大拉应力约50 MPa, 径向最大压应力为-50 MPa, 轴向应力约为5 MPa; 铝合金塞环向和径向应力均约为-40 MPa, 轴向应力约为-20 MPa。针对中子衍射难以获取试样外表面区域可靠应力测量结果的现实问题, 提出了采用径向准直技术降低实验误差的技术途径, 并利用蒙特卡罗实验模拟的方式进行了验证。中子衍射测量数据与解析计算结果以及国际标样测试数据均能较好地符合, 测量应力误差在20 MPa以内, 通过仔细比较晶面(311)和(200)的实测和理论值发现, 晶间应变分配会引起10 MPa的应力偏差, 如果能够对此进行系统分析和预估, 将可进一步改善应力测量精度。实验结果同时表明, 在具有显著应力梯度的位置必须尽量减小试样衍射体积, 才能获得可靠的实验数据; 当样品中存在微观应变和织构时也会对实验精度产生较大影响。本文所采用的中子衍射应力(变)测试和计算方法, 可为今后规范和拓展我国相关技术应用提供借鉴与参考。

### 参考文献

- Withers P J, Bhadeshia H K D H. Residual stress. Part 2—Nature and origins. Mater Sci Tech, 2001, 17: 366–375
- Borlado C R, Mompean F J, Lin R, et al. Neutron strain scanning on bimetallic tubes. Mat Sci Eng A, 2000, 288: 288–292

- 3 Martinez P M L, Borlado C R, Mompean F J. Measurement and modelling of residual stresses in straightened commercial eutectoid steel rods. *Acta Mater*, 2005, 53: 4415–4425
- 4 Park M J, Yang H N, Jang D Y, et al. Residual stress measurement on welded specimen by neutron diffraction. *J Mater Proc Tech*, 2004, 155-156: 1171–1177
- 5 Paradowska A, Price J W H, Ibrahim R, et al. A neutron diffraction study of residual stress due to welding. *J Mater Proc Tech*, 2005, 164-165: 1099–1105
- 6 Dutta M, Bruno G, Edwards L, et al. Neutron diffraction measurement of the internal stresses following heat treatment of a plastically-deformed Al/SiC particulate metal-matrix composite. *Acta Mater*, 2004, 52: 3881–3888
- 7 Oliver E C, Mori T, Daymond M R. Neutron diffraction study of stress-induced martensitic transformation and variant change in Fe-Pd. *Acta Mater*, 2003, 51: 6453–6464
- 8 Webster G A, Wimpory R C. Development of procedures for the measurement of residual stress by neutron diffraction. *Appl Phys A*, 2002, 74: 1227–1229
- 9 Withers P J, Bhadeshia H K D H. Residual stress. Part 1—Measurement techniques. *Mater Sci Tech*, 2001, 17: 355–365
- 10 Daymond M R, Johnson M W, Sivia D S. Analysis of neutron diffraction strain measurement data from a round robin sample. *J Strain Anal Eng Des*, 2002, 37: 73–85
- 11 Paranjpe S K. Measurement of residual stress in materials using neutrons. Technical Report. Vienna: IAEA in Austria, 2005
- 12 Pang J W L, Holden T M, Mason T E. *In-situ* generation of intergranular strains in an Al7050 alloy. *Acta Mater*, 1998, 46: 1503–1518
- 13 Robinson R A, Kennedy S J. Neutron scattering at Australia's replacement research reactor. *Physica B*, 2002, 311: 44–49
- 14 Houtte P V, Buyser L D. The influence of crystallographic texture on diffraction measurements of residual stress. *Acta Metal Mater*, 1993, 41: 323–336
- 15 Daymond M R, Bonner N W. Lattice strain evolution in IMI 834 under applied stress. *Mater Sci Eng A*, 2003, 340: 272–280
- 16 Pirling T. Stress determination with high lateral resolution using neutron diffraction. *Mater Sci Forum*, 2003, 226: 3975–3980

## Three-dimensional stress distribution of surplus assembled 7050Al alloy ring and plug determined by neutron diffraction

SUN GuangAi<sup>1,2</sup>, WANG XiaoLin<sup>1,2</sup>, WU ErDong<sup>3</sup>, LI Jian<sup>1</sup>, CHEN YanZhou<sup>1</sup>, CHEN Bo<sup>1</sup>, SHENG LiuSi<sup>2</sup>, LUZIN Vladimir<sup>4</sup> & GYULA Török<sup>5</sup>

<sup>1</sup>Key Laboratory for Neutron Physics of Chinese Academy of Engineering Physics, Institute of Nuclear Physics and Chemistry, Mianyang 621900, China;

<sup>2</sup>Department of Nuclear Science and Technology, University of Science and Technology of China, Hefei 230026, China;

<sup>3</sup>Institute of Metal Research, Chinese Academy of Science, Shenyang 110016, China;

<sup>4</sup>The Bragg Institute, Australian Nuclear Science and Technology Organisation, Kirrawee, DC NSW 2232, Australia;

<sup>5</sup>Research Institute for Solid State Physics and Optics, Budapest, H-1525-49, Hungary

The hoop, radial and axial stress and strain distribution of surplus assembled 7050Al alloy ring and plus were investigated by neutron diffraction method. The measured results from crystal planes (200) and (311) are coincided with the data obtained by analytical calculation and international standard sample experiment. The discontinuous stress and strain at the interference of ring and plug can be clearly shown by the neutron diffraction method. Monte Carlo method was used to simulate the neutron diffraction process to reduce the deviation of the stress at the surface. The results show that the measured accuracy can be improved when the slits are substituted by the radial collimation. Compared the results obtained from (311) and (200) with analytical calculation, it reveals that the stress distribution among crystal planes will cause system deviation. Therefore the experiment accuracy may be further improved if the inner plane stress could be evaluated. The results also indicate that the strain accuracy will be affected by microstress and texture, and the gauge volume should be reduced as small as possible at the region where the stress distribution is steep.

**neutron diffraction, 7050Al alloy, three-dimensional stress distribution, measured accuracy**

doi: 10.1360/972012-1006