

中子衍射残余应力无损测量技术及应用

李峻宏, 高建波, 李际周, 刘蕴韬, 陈东风

(中国原子能科学研究院 核物理研究所 中子散射实验室, 北京 102413)

摘要: 中子衍射作为一门实验技术, 在描述材料内部残余应力方面有巨大的潜力, 是允许工程师或材料科学家进行三维、无损、深度地获取材料内部残余应力分布状态的少数技术之一。回顾了中子衍射测量残余应力的发展历史, 概述了中子衍射残余应力分析方法的基本原理与特点, 并简单介绍了其在材料科学和工程应用领域的应用情况。最后根据国际国内中子源及中子谱仪的发展趋势, 展望了此技术的应用领域与未来前景。

关键词: 中子衍射; 残余应力; 残余应变

中图分类号: O571.56 **文献标识码:** A **文章编号:** 1674-3962(2009)12-0010-05

Technology and Application of Nondestructive Residual Stress Measurement by Neutron Diffraction

LI Junhong, GAO Jianbo, LI Jizhou, LIU Yuntao, CHEN Dongfeng
(Department of Nuclear Physics, China Institute of Atomic Energy, Beijing 102413, China)

Abstract: Neutron diffraction is an experimental technique with immense potential for characterization of residual stress in materials. To material scientists and engineers currently, neutron diffraction is the method of choice for measuring stresses, which allows three-dimensional, non-destructive and deeper measurements. The history of residual stress measurement by neutron diffraction is reviewed; the principle and characteristics are described for the analysis of residual stress by neutron diffraction; and the application of this technique in materials science and engineering is also briefly introduced. Finally, possible applications of the technique are discussed according to the worldwide developing trend for neutron sources and instruments.

Key words: neutron diffraction; residual stress; residual strain

1 前言

内应力是没有外力或外力矩作用而在物体内部存在并保持自身平衡的应力。目前有关内应力的分类方法是德国学者 Macherlauch (马赫劳赫) 1973 年提出的, 他将内应力按其平衡范围分为 3 类: 第 I 类内应力(记为 σ_r^I)、第 II 类内应力(记为 σ_r^{II}) 和第 III 类内应力(记为 σ_r^{III})^[1]。英美文献将第 I 类内应力称为宏观应力, 第 II 类和第 III 类内应力统称为微观应力。国内工程界通常将第 I 类内应力称为残余应力; 科技文献则把第 II 类内应力称为微观应力、微观结构应力; 而第 III 类内应力名称尚未统一, 可称为晶格畸变应力、超微观应力、晶内亚结构应力等。

残余应力是关乎机械部件及工程的质量、寿命和工程安全的重要因素, 如何准确有效地测量残余应力的大小与分布是材料科学家和工程师十分关心的问题。根据对被测试样是否会造成损坏分类, 可将残余应力测试方法分为有损测试和无损测试。有损测试主要以机械方法为主, 包括盲孔法、环芯法、弯曲法等; 无损测试大多属于物理方法, 包括 X 射线衍射、同步辐射、中子衍射、磁性法、超声法等。

与 X 射线、同步辐射相比, 中子具有更强的穿透能力, 更有利于测量材料或工程部件内部的应力状态。中子衍射作为一门实验技术, 在描述材料内部残余应力方面具有巨大的潜力。它能得到其它手段不能获取的结构体应变状态信息, 将工程师的梦想变成现实。这种技术的主要优势在于^[2]: ①对于大多数工程材料而言, 穿透能力在厘米的量级; ②无损测量, 并能监视现实环境和加载条件下残余应力的演化; ③提供容易调整的空间分辨, 适合解决工程部件的应力梯度问题; ④可测定大块材料内宏观应力、特殊相应力及晶粒间的应力。

收稿日期: 2009-11-30

基金项目: 国家重点基础研究发展计划(2010CB833105)资助

通信作者: 陈东风, 男, 1968 年生, 博士, 研究员, 博士生导师

对大多数材料来说，中子的穿透能力比常规 X 射线要强数个量级^[3]，因此对工程应用来说，它可延伸至结构部件内几个厘米的深处去获取残余应变信息，而且原则上中子的穿透本领能够允许自由地选择材料内部应变的测量方向，这种技术已被证明是产品设计和开发、加工过程优化、失效评估的强有力工具。常规应用包括焊接、塑性结构变形、收缩配合组件、汽车部件(如曲轴)、离心机、薄板金属成型和表面处理(如渗氮和喷丸)等引起的残余应力测量。

由于中子衍射残余应力测定方法依赖于具有热中子通量足够高的中子源，故受到所使用中子源通量的限制，其发展史见图 1，目前最高中子源的通量可达到 $10^{15} \text{ n} \cdot \text{cm}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ ^[4]。中子源强度发展史曲线走向的趋势表明，今后下一代散裂中子源(如美国橡树岭国家实验室散裂中子源(SNS)和计划中的欧洲散裂中子源(ESS))的通量将提高 3 个量级，表明中子衍射测量残余应力在工业应用和开发上潜在能力的巨大飞跃。

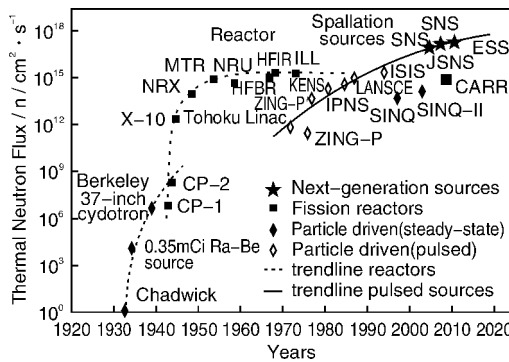


图 1 中子源强度发展史(散裂源用热通量峰值描述)
Fig. 1 Historical overview of the development of the intensity of neutron sources (Spallation sources are characterized by their peak thermal flux)

在最近的几十年间中子衍射已发展成为一种可供选择的技术并与常规 X 射线衍射、同步辐射形成了互补关系，但直到上世纪 80 年代早期才有中子衍射测量残余应力实验装置的报导。最早的相关文章是由 Allen^[5]、Pintschovius^[6] 和 Krawitz^[7] 等人在 1981 年发表的，随后逐渐出现了更多、更深入的成果^[8-14]。1985 年出现一篇关于这方面研究的综述文章^[15]。最早关注此新兴技术的会议是 1981 年在美国举办的第 20 届军方首长会议^[6-7]。1991 年北大西洋公约组织(NATO)在牛津召开了“利用中子衍射测量残余和加载应力”的先进研究研讨会^[16]，回顾了当时这一领域的进展以及新出现的一些问题，此后逐渐形成了国际上非常流行的讨论会和欧洲残余应力系列会议。近 10 年来，越来越多的中子散

射实验室开始建立专门的中子衍射残余应力测量分析装置，应用领域主要分为工程应用和材料科学研究^[17-28]。

2 中子衍射残余应力测量基本原理及特点

2.1 基本原理

中子衍射测量残余应力的基本原理与 X 射线应力测定方法相同，当波长为 λ 的中子束通过多晶材料样品时，对应晶面间距 d ，在满足布拉格关系的位置出现衍射峰。应变测量是在散射矢量的方向上，它平分入射束和衍射束的夹角，如图 2 所示^[29]。

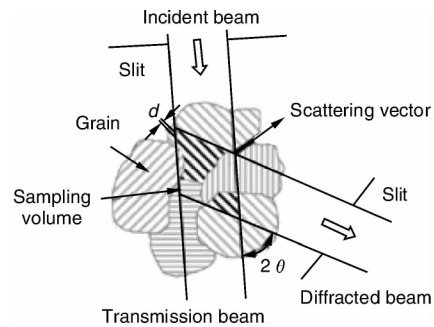


图 2 中子衍射原理

Fig. 2 Principles of neutron diffraction

从样品测得晶面间距 d 的变化可以计算出应变 ε 的大小：

$$\varepsilon = \frac{d - d_0}{d_0} \quad (1)$$

式中， d_0 为无应力标准样品的晶面间距值。

中子衍射使用的中子由裂变或散裂产生，前者主要指稳态的核反应堆，后者通常指散裂源。对稳态反应堆产生的中子，用单色器选择某一固定波长的中子束，样品晶面间距的变化 (Δd) 会引起相应的衍射峰峰位偏移 ($\Delta\theta$)。用这种方法测量样品某一晶面的衍射峰，并使用高斯/洛伦兹拟合程序来确定衍射峰的峰位。因此弹性应变为：

$$\varepsilon = \frac{\Delta d}{d_0} = \frac{\sin\theta_0}{\sin\theta} - 1 = -\Delta\theta \cot\theta_0 \quad (2)$$

式中， θ_0 为无应力标准样品的布拉格衍射峰的峰位。

对散裂源上的飞行时间谱仪，一束脉冲包含了一定波长范围(速度为 v)的中子，测量是在固定的散射角 2θ 处(通常为 90°)。在这种情形下，记录下慢化剂和探测器之间中子飞行时间的变化，并得到一个衍射全谱，如图 3 所示^[30]。飞行时间 t 与晶面间距 d 成正比 $t \propto \sin\theta \cdot d$ ，因此弹性应变计算公式为：

$$\varepsilon = \frac{\Delta d}{d_0} = \frac{t - t_0}{t_0} \quad (3)$$

式中， t_0 是无应力标准样品飞行时间。应变可从单个衍

射峰或 Rietveld 全谱拟合方法得到。

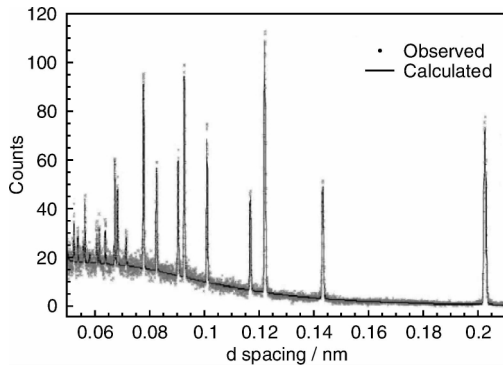


图 3 飞行时间谱图
Fig. 3 Time-of-flight pattern

为了计算应变的绝对值，必须知道无应力的晶格间距 d_0 的值，而且，通常完全确定一点的应变张量，必须在 6 个方向上完成 6 次不同的测量^[31]，坐标系统定义如图 4 所示。定义 S_i 为样品坐标系， S_1 和 S_2 在样品表面上，并且相互垂直， S_3 与 $S_1 - S_2$ 平面垂直。定义 L_i 为实验室坐标系， L_3 在 $S_1 - S_2$ 平面上的投影为 S_ϕ ，与 S_1 的夹角为 ϕ ， L_3 与 S_3 的夹角为 ψ 。 L_3 为 neutron 衍射面的法线方向，即应变测量方向。

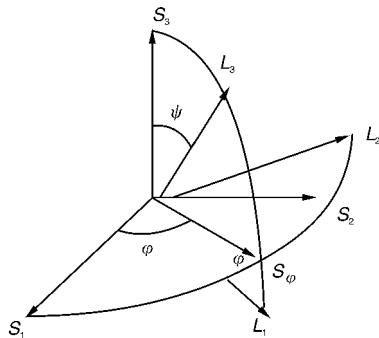


图 4 坐标系统的定义
Fig. 4 The definition of reference system

根据 ϕ 和 ψ 角，在给定方向上的应变为：

$$\varepsilon_{\phi\psi} = \sin^2\psi\cos^2\phi\varepsilon_{xx} + \sin^2\psi\sin^2\phi\varepsilon_{yy} + \cos^2\psi\varepsilon_{zz} + \sin^2\psi\sin 2\phi\varepsilon_{xy} + \sin 2\psi\sin\phi\varepsilon_{yz} + \sin 2\psi\cos\phi\varepsilon_{zx} \quad (4)$$

当主方向已知时，3 个方向的测量已经足够确定一个完整的应力张量。

$$\sigma_{xx} = \frac{E}{(1+\nu)(1-2\nu)} [(1-\nu)\varepsilon_{xx} + \nu(\varepsilon_{yy} + \varepsilon_{zz})] \quad (5)$$

应力与应变的误差计算公式为：

$$\delta\sigma_{xx} = \text{ctg}\theta_0 \times [(\delta\theta_{xx})^2 + (\delta\theta_0)^2]^{1/2}$$

$$\delta\sigma_{xx} = \left[\left(\frac{E}{1+\nu} \delta\varepsilon_{xx} \right)^2 + \left(\frac{E\nu}{(1+\nu)(1-2\nu)} \right)^2 (\delta\varepsilon_{xx}^2 + \delta\varepsilon_{yy}^2 + \delta\varepsilon_{zz}^2) \right]^{1/2} \quad (6)$$

σ_{yy} 、 σ_{zz} 、 $\delta\varepsilon_{yy}$ 、 $\delta\varepsilon_{zz}$ 、 $\delta\sigma_{yy}$ 和 $\delta\sigma_{zz}$ 可依次类推。式中 E 为弹性模量， ν 为泊松比。

2.2 测量特点

中子衍射测量残余应力的缺点是中子源的强度比较弱，测量需要的时间比较长，中子源的建造和运行也需要投入很大一笔经费，这些因素在一定程度上限制了中子衍射残余应力测量分析的应用。另外，中子衍射需要的样品取样体积比较大，空间分辨通常在 10 mm^3 左右，而 X 射线衍射则为 10^{-1} mm^3 ，所以中子衍射对材料表面残余应力的测量几乎无能为力，只有在距表面 1 mm 及以上区域测量时才具有优势。中子衍射残余应力测量也受中子源的限制，不像常规 X 射线衍射装置那样具有便携性，无法去工作现场进行实验测量。

X 射线应力分析的标准方法— $\sin^2\psi$ 法，在中子衍射残余应力测量中很少应用，主要原因有 2 点^[32]：①需要测量多个 ψ 角的应变，花费时间太多；② $\sin^2\psi$ 法应用主要限制在非常薄的样品。当中子束穿过样品，束流衰减的程度强烈地依赖 ψ ，因此，只有非常有限的 ψ 角范围才可被厚的样品接受（例如 $0 \leq \sin^2\psi \leq 0.25$ 和 $0.75 \leq \sin^2\psi \leq 1$ ），这样给出的信息也并不比从 d 与 $\sin^2\psi$ 关系的 2 个端点（即 $\sin^2\psi = 0, 1$ ）得到的信息多。

$\sin^2\psi$ 法主要用来研究微观应力，因为微观应力经常和 d 与 $\sin^2\psi$ 不成线性关系相联系。另外，当样品表面存在剪应力、主轴方向未知或有达不到的测量方向时，需要使用这种方法来进行测量。

3 中子衍射测量残余应力的应用及前景

残余应力对工程部件性能有着重要的影响，现在相当多的工作者致力于发展新的测量方法，这样可获得残余应力的信息并将其体现到设计过程中，尤其是航空、核电和其它关系到重要安全的工业领域。中子衍射是较少的允许工程师或材料科学家进行三维、无损、深度地获取材料内部残余应力分布状态的技术之一。近年来，利用中子衍射进行工程应力测量的需求显著增长，如图 5 所示，图中总结了每年在主要期刊上发表的中子衍射测量工程残余应力的文章数量^[3]。

衍射方法的本质集中在特殊的亚微晶或晶粒的晶面间距上，相对于散射几何具有特殊的取向，这种技术对基础研究和应用材料科学研究提供了独一无二的洞察力。晶粒选择特性方便其区分多相材料中不同的相对应变的响应，假设这些相在晶体学上是可以区分检测的。多相工程材料的一个典型的例子就是双向不锈钢，它包含 50/50 混合的面心立方奥氏体相和体心立方铁素体相。中子衍射方便对双相材料中各自不同相的应力/应

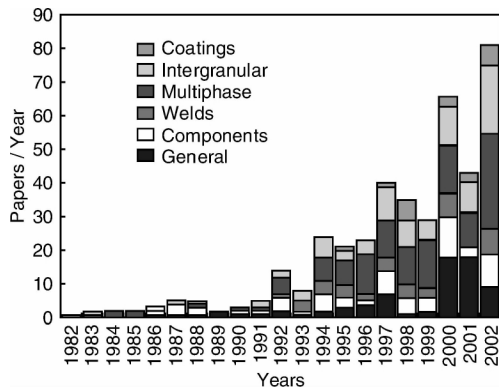


图 5 每年在主要期刊上发表的中子衍射测量工程残余应力的文章数量

Fig. 5 Number of papers that describe engineering residual stress measurements by neutron diffraction published per year in major journals

变进行研究, 因此能够提供有价值的信息, 例如对低周疲劳机理的认识。实际上许多工程材料都由两相或多相组成, 这正能发挥中子衍射的特长。

复合材料是另一类多相材料, 它们内部的重要信息也可以由中子衍射方法获取。在这种情形下一个相和基体的特性, 被加入的另外一个相所改变, 常被称为加强相。这种加强相可能具有不同的形态, 从小的亚微米尺寸颗粒到连续的纤维或尺度与结构本身差不多的层。如果这些相是结晶体, 那么无论什么复合材料, 中子衍射技术都可以了解每种成分各自对应变的响应。最常见的例子就是金属基复合材料中的 Al/SiC 系列^[33-35], 其微观机理已被中子衍射技术所广泛研究。

对某些相的晶体学敏感性也使此技术成为研究这些复合系统有吸引力的手段, 通过加某些变化, 如外力, 温度或电磁场, 复合系统中的一个相会受到某种激发, 其物理力学性质或结构会发生变化, 被称为“智能”复合材料。例如: 系统中的一相拥有压电、磁致伸缩或形状记忆特性, 其中形状记忆特性就是利用相转变的一个例子。虽然利用衍射研究相转变已经很长时间了, 但只是近几年中子衍射才开始研究它们的微观机理。通过探测固体内部的情况, 特别适合研究微观机理与正在发生相转变的关联性。如中子衍射已被用来监控嵌入在 NiTi 纤维中发生的相转变, 且这种转变与观察到的复合材料宏观响应直接相关^[36-37]。在这种情形下, 中子衍射技术具备更灵活的对环境变化的适应性。由于中子很容易地穿透样品室的壁和炉子的热屏蔽层, 因此相对容易开展原位下的研究。

可以说中子衍射测量残余应变/应力的应用领域非常广泛, 例如: 焊接结构、复合材料和其它多相材料、塑性变形部件和材料、近表面应力、原位和加工过程及

寿命评估等。随着新一代中子源和一批专用中子残余应力新谱仪的不断出现, 有可能用此方法去进行更广泛深入的应用。

4 总结与展望

目前国际上利用中子衍射方法测量残余应力/应变的仪器设备和实验技术发展得很快, 开展了许多材料科学和工程领域的应用研究。未来的发展主题将主要包括: 基本变形机制的理解, 如与疲劳行为和裂纹扩展相联系的晶粒间应力和微观应变的评价; 相转变方面的理解, 如用作智能材料的形状记忆合金的超塑性; 界面特性, 如用于热障涂层的厚涂层和等离子喷涂材料; 先进材料的特性, 如用于涡轮叶片的镍基高温合金和复合材料等。

中国原子能科学研究院新建的中国先进研究堆 (CARR) 即将临界, 其主要用途是进行中子散射实验研究。中子残余应力谱仪为首批建造的谱仪之一, 这将为国内开展工程应用和材料科学研究提供设备基础和实验平台, 促进今后国内在此领域中的深入研究。

参考文献 References

- [1] Zhang Dingquan(张定铨), He Jiawen(何家文). *X-Ray Diffraction Analysis and Function of Residual Stress in Materials*(材料中残余应力的 X 射线衍射分析和作用)[M]. Xi'an: Xi'an Jiaotong University Press, 1997.
- [2] Hutchings M T. Neutron Diffraction Measurements of Residual Stress Fields-the Engineer's Dream Come True [J]. *Neutron News*, 1992, 3: 14-19.
- [3] Hutchings M T, Withers P J, Holden T M, et al. *Introduction to the Characterization of Residual Stress by Neutron Diffraction*[M]. Boca Raton: CRC Press, 2005.
- [4] Carpenter J M, Yelon W B. Neutron sources [J], *Methods of Experimental Physics*, 1986, 23A: 99-196.
- [5] Allen A J, Andreani C, Hutchings M T, et al. Measurement of Internal Stress Within Bulk Materials Using Neutron Diffraction [J]. *NDT Int*, 1981, 15: 249-254.
- [6] Pintschovius L, Jung V, et al. Determination of Residual Stress Distributions in the Interior of Technical Parts by Means of Neutron Diffraction, in *Residual Stress and Stress Relaxation*[C]//28th Army Materials Research Conference. New York: Plenum Press, 1981.
- [7] Krawitz A D, Brune J E, Schmanck M J. Measurement of Stress in the Interior of Solids with Neutrons in *Residual Stress and Stress Relaxation*[C]//28th Army Materials Research Conference. New York: Plenum Press, 1981.
- [8] Schmanck M J, Krawitz A D. Measurement of Stress Gradient Through the Bulk of an Aluminum Alloy Using Neutrons [J]. *Metal Trans A*, 1982, 13: 1069-1075.
- [9] Pintschovius L, Jung V. Residual Stress Measurements by Means of Neutron Diffraction [J]. *Mater Sci Eng*, 1983, 61: 43-50.

- [10] Pintschovius L, Scholtes B, Schroder R. Determination of Residual Stresses in Quenched Steel Cylinders by Means of Neutron Diffraction, Microstructural Characterization of Materials by Non-Destructive Techniques[C]//5th Riso International Symposium on Materials Science. Roskilde; Risoe National Laboratory, 1984; 419-424.
- [11] MacEwen S R, Faber J, Turner A P. The Use of Time-of-Flight Neutron Diffraction to Study Grain Interaction Stresses[J]. *Acta Metall*, 1983, 31: 657-676.
- [12] Allen B L, Lord W. Finite Element Modeling of Pulsed Eddy Current Phenomena[C]// Tenth Annual Review of Progress in Quantitative Nondestructive Evaluation. New York: Plenum Press, 1983; 561-568.
- [13] Holden T M, Powel B M, *et al.* Internal Strain Measurements in over Rolled Cold-Worked Zr2.5% Nb Pressure Tubes by Neutron Diffraction, Microstructural Characterization of Materials by Non-Destructive Techniques[C]// 5th Riso International Symposium on Materials Science. Roskilde; Risoe National Laboratory, 1984; 291-294.
- [14] Holt R A, Dolling G, *et al.* Assessment of Residual Stress in Incoloy-800 Tubing Using x-Ray and Neutron Diffraction, Microstructural Characterization of Materials by Non-Destructive Techniques[C]// 5th Riso International Symposium on Materials Science. Roskilde; Risoe National Laboratory, 1984; 295-300.
- [15] Allen A J, Hutchings M T, Windsor. Neutron Diffraction methods for the Study of Residual Stress Fields[J]. *Adv Physics*, 1985, 34: 445-473.
- [16] Hutchings M T, Krawitz A D. Measurement of Residual and Applied Stress Using Neutron Diffraction[J]. *NATO ASI Series E: Applied Sciences*, 1992; 216.
- [17] Borlado C R, Mompean F J, Ru Lin, *et al.* Neutron Strain Scanning on Bimetallic Tubes[J]. *Materials Science and Engineering*, 2000, A288: 288-292.
- [18] Coats D L, Krawitz A D. Effect of Particle Size on Thermal Residual Stress in WC-Co Composites[J]. *Materials and Engineering A*, 2003, 359: 338-342.
- [19] Pang J W L, Preuss M, Withers P J, *et al.* Effects of Tooling on the Residual Stress Distribution in an Inertia Weld[J]. *Materials Science and Engineering A*, 2003, 356: 405-413.
- [20] Giovanni Bruno, Ricardo Fernandez, Gaspar GonzalezDoncel. Gauge Volume Effects in Residual Stress Determination by Neutron Diffraction: The Strength Differential Effect in Metal Matrix Composites[J]. *Materials Science and Engineering A*, 2006, 437: 100-108.
- [21] Paggett J W, Krawitz A D, Drake E F, *et al.* In Situ Loading Response of WC - Ni: Origins of Toughness[J]. *International Journal of Refractory Metals & Hard Materials*, 2006, 24: 122-128.
- [22] Wain Nick, Radaelli Paolo G, Todd Richard I. In Situ Neutron Diffraction Study of Residual Stress Development in MgO/SiC Ceramic Nanocomposites During Thermal Cycling[J]. *Acta Materialia*, 2007, 55: 4 535-4 544.
- [23] Withers Philip J. Mapping Residual and Internal Stress in Materials by Neutron Diffraction[J]. *C R Physique*, 2007, 8: 806-820.
- [24] Schneider L C R, Hainsworth S V A, Cocks A C F. Neutron Diffraction Measurements of Residual Stress in a Powder Metallurgy Component[J]. *Scripta Materialia*, 2005, 52: 917-921.
- [25] Bartolome J F, Bruno G, DeAza A H. Neutron Diffraction Residual Stress Analysis of Zirconia Toughened Alumina (ZTA) Composites [J]. *Journal of the European Ceramic Society*, 2008, 28: 1 809-1 814.
- [26] James M N, Hughes D J, Chen Z. Residual Stresses and Fatigue Performance [J]. *Engineering Failure Analysis*, 2007, 14: 384-395.
- [27] Grosse M, Ottlinger P. Strain Measurements at Railway Wheels [J]. *Materials Science and Engineering A*, 2006, 437: 88-92.
- [28] James Wall, Hahn Choo, Terry N Tiegs, *et al.* Thermal Residual Stress Evolution in a TiC - 50 vol% Ni₃Al Cemet[J]. *Materials Science and Engineering A*, 2006, 421: 40-45.
- [29] Price John W H, Paradowska Anna, *et al.* Residual Stresses Measurement by Neutron Diffraction and Theoretical Estimation in a Single Weld Bead[J]. *International Journal of Pressure Vessels and Piping*, 2006, 83: 381-387.
- [30] Webster G A, Wimpory R C. Non-Destructive Measurement of Residual Stress by Neutron Diffraction[J]. *Journal of Materials Processing Technology*, 2001, 117: 395-399.
- [31] Gianni Albertini, Giovanni Bruno, Adele Carrabo, *et al.* Determination of Residual Stresses in Materials and Industrial Components by Neutron Diffraction[J]. *Meas Sci Technol*, 1999, 10: R56-R73.
- [32] Hauk Viktor. *Structural and Residual Stress Analysis by Nondestructive Methods Evaluation-Application-Assessment*[M]. Amsterdam: Elsevier, 1997.
- [33] Withers P J, Jensen D J, Lilholt H, *et al.* The Evaluation of Internal Stresses in a Short Fibre Metal Matrix Composite by Neutron Diffraction[C]// *Proceedings ICCM VI/ECCM2*. London: Elsevier, 1987; 255-264.
- [34] Povirk G L, Stout M G, Bourke M, *et al.* Thermally and Mechanically Induced Residual Strains in Al-SiC Composites[J]. *Acta Metall*, 1992, 40: 2 391-2 412.
- [35] Lorentzen T, Clarke A P. Thermally and Mechanically induced Residual Strains in Al-SiCp Composites[J]. *Composites Sci Technol*, 1998, 58: 345-353.
- [36] Dunand D C, Mari D, Bourke M A M, *et al.* NiTi and NiTi-TiC Composites[J], *Met Mater Trans A*, 1996, 27: 2 820-2 836.
- [37] Armstrong W D, Lorentzen T, Brondsted P, *et al.* An Experimental and Modeling Investigation of the External Strain, Internal Stress and Fiber Phase Transformation Behaviour of a NiTi Actuated Aluminum Metal Matrix Composite[J]. *Acta Metall*, 1998, 46: 3 455-3 466.