

# 基于二维面探的高温合金 GH4169 残余应力分析

叶璋, 王婧辰, 陈禹锡, 高玉魁

(同济大学 航空航天与力学学院, 上海 200092)

**摘要:** **目的** 通过二维面探 X 射线衍射法测试高温合金 GH4169 的残余应力。**方法** 由于 GH4169 是 Ni 基高温合金, Ni 合金在 Cr 靶下有较强衍射峰, 因此采用 Cr 靶来测试 GH4169 合金的残余应力。二维面探仪有 500 个探测头, 均匀分布在一个面上, 根据每一个探测器测得的衍射角变化, 就能得到 500 个方向上的应变值, 再根据应力与应变之间的关系, 就可以计算出材料的残余应力。**结果** GH4169 合金的德拜环只有一个衍射峰, 而且衍射峰的强度随着角度  $\alpha$  的变化而变化。这说明该材料的应力取向不均匀, 存在较为明显的织构。该材料表面主应力方向上的残余应力测试值为  $-968$  MPa, 误差为 62 MPa; 切向上的残余应力测试值为 24 MPa, 误差为 43 MPa。由于测试的 GH4169 合金是经过喷丸处理的, 主应力方向上受残余压应力, 而其测试结果确为负值, 说明此次测试结果可信。**结论** 通过二维面探 X 射线衍射方法测试材料残余应力从原理和实际操作上都是可行的, 并成功测试出 GH4169 合金的残余应力。经喷丸处理后的 GH4169 材料受残余压应力的作用, 且应力分布不均匀, 存在较为明显的织构。

**关键词:** 高温合金; GH4169; X 射线衍射; 二维面探; 残余应力; 喷丸

**中图分类号:** TG115.22 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-3660(2016)04-0001-04

**DOI:** 10.16490/j.cnki.issn.1001-3660.2016.04.001

## Residual Stress Analysis of High Temperature Alloy GH4169 by Two-dimensional Detector Method

YE Zhang, WANG Jing-chen, CHEN Yu-xi, GAO Yu-kui

(School of Aerospace Engineering and Applied Mechanics, Tongji University, Shanghai 200092, China)

**ABSTRACT:** **Objective** To measure the residual stress of GH4169, a kind of high temperature alloy, using two-dimensional detector method. **Methods** Because GH4169 is a high temperature nickel base alloy which has a strong diffraction peak under the Cr target, this paper used Cr target to obtain the residual stress of GH4169 alloy. Using 500 detection heads uniformly distributed on a surface to measure diffraction angle changes, the portable X-ray machine could get the values of strain in 500 directions. According to the relationship between stress and strain, the residual stress of the material could be calculated. **Results** The Debye ring of GH4169 alloy has only one diffraction peak and its intensity changed with the changes of angle  $\alpha$ . This result showed that the stress orientation of the material was not uniform, with obvious texture. The residual stress in the principal stress direction of the material surface was  $-968$  MPa with an error of 62 MPa, and the tangential residual stress was 24 MPa with an error of 43 MPa. Shot peened GH4169 alloy was affected by the residual compressive stress, which was consistent with the experiment results.

收稿日期: 2016-03-23; 修订日期: 2016-04-05

Received: 2016-03-23; Revised: 2016-04-05

基金项目: 国家自然科学基金项目(11372226); 航空科学基金项目(2014ZE38008); 中央高校基本科研业务费专项资金资助

Fund: Supported by the National Natural Science Foundation of China (11372226), Aeronautical Science Foundation of China (2014ZE38008) and the Fundamental Research Funds for the Central Universities

通讯作者: 高玉魁(1973—), 男, 博士, 教授, 主要研究方向为表面工程。

Corresponding author: GAO Yu-kui (1973—), Male, Ph. D., Professor, Research focus: surface engineering.

**Conclusion** It was feasible to measure the residual stress of the material from the principle and the practical operation by the two-dimensional detector method which effectively measured the residual stress of GH4169 alloy. Moreover, shot peened GH4169 alloy was affected by the residual compressive stress, the distribution of which was not uniform and had obvious texture.

**KEY WORDS:** high temperature alloy; GH4169; X-ray diffraction; 2-D detector; residual stress; shot peening

残余应力是指在没有外加载荷和力矩的作用下,材料自身为保持平衡而存在的弹性应力。它对疲劳、应力腐蚀和微动磨损具有重要影响,并主要来源于本身温度分布不均形成的热应力、弹塑性变形不均导致的机械应力以及相变不均导致的相变应力,包括时间不均和体积不均<sup>[1]</sup>。

GH4169 是镍基高温合金的一种,其美国牌号为 Inconel718,是目前航空、航天等领域应用最为广泛且用量最大(占高温合金年产量的 1/3)的高温合金材料。独特的合金成分设计使其具有良好的综合性能,即较高的强度、抗蠕变性能和疲劳寿命,尤其在 650℃ 温度以下,其力学性能具有很好的稳定性<sup>[2-4]</sup>。

测定材料内残余应力与测算零件在外加载荷下的内应力不同,后者可以根据力学公式来推导计算或者利用应变仪等直接测量,而残余应力则难以通过这样的途径获得。目前具有实际应用价值的残余应力测试方法主要是 X 射线衍射法、中子散射法、应力松弛法、磁弹法、应力敏感法、压痕法等,文中采用的是 X 射线衍射法。

传统的 X 射线衍射法是通过改变  $\psi$ , 测得在同一个  $\phi$  方向上不同  $\psi$  角下的衍射角,从而进一步计算出不同  $\psi$  角下的应变  $\varepsilon_{\psi\phi}$ ,最后拟合数据,得到被测材料在  $\phi$  方向上的残余应力<sup>[1,5]</sup>。1978 年, Taira<sup>[6]</sup> 等首次提出用二维面探方法来进行 X 射线衍射应力分析,后来该方法又被扩展为单次曝光法并被多次改进<sup>[7-8]</sup>。二维面探方法采用二维探测器,只需要在固定角度  $\psi_0$  上进行单次测量,收集一个面上的衍射角变化,就能计算出材料的残余应力。与传统的一维线探方法相比,面探方法具有测量时间短、仪器小巧易携带等一系列优点。由于不需要转动  $\psi$ , 二维面探方法对测量一些几何外形复杂的零件具有更大优势。文中将采用二维面探方法测试经喷丸的 GH4169 的残余应力,同时由于二维面探可以测试一个面上 360° 的衍射峰变化,因而可以反映出材料的晶粒取向等特性。

## 1 基于 X 射线二维面探的残余应力测试原理

X 射线二维面探残余应力测试方法在机理上和

传统线探方法一致,都是通过衍射角和应变之间的布拉格方程关系来计算残余应力。二者区别在于:一维线探需要改变测试角来进行多次测量;二维面探则只需要在测试角  $\psi_0$  下单次曝光,测试一个二维面上的衍射角变化,就能计算出测试方向  $\phi_0$  上的残余应力。图 1a 显示了二维探测面下的完整德拜环,其光路如图 1b 所示,其中  $\eta$  表示衍射角的补角,  $\vec{n}$  表示产生衍射的衍射面的法线方向。

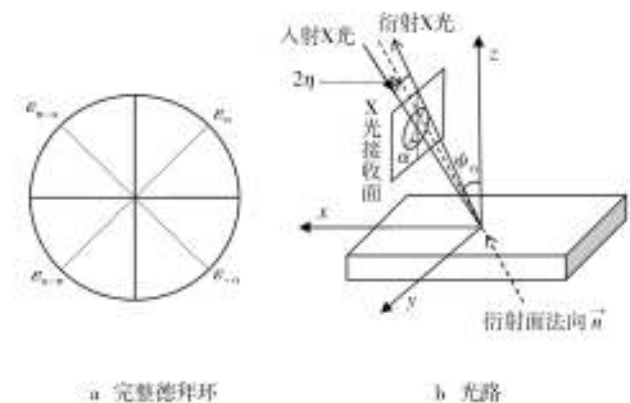


图 1 二维面探 X 射线衍射残余应力测试仪光路

Fig. 1 X-ray optics for residual stress measurement by two-dimensional detector method: a) complete Debye-Scherrer ring, b) light path

布拉格方程反映了晶面间距和衍射角的关系,它的微分形式则表明了衍射角变化和材料应变的关系,如式(1)所示<sup>[1]</sup>:

$$\varepsilon = \frac{\Delta d}{d} = -(\theta - \theta_0) \frac{1}{\tan \theta_0} \quad (1)$$

在确定了测试角  $\psi_0$  后,就可以通过向量加法得到在测试面  $\psi_0$  上所有发生衍射的衍射面方向  $\vec{n}(n_1, n_2, n_3)$ <sup>[9-13]</sup>, 其中:

$$\begin{cases} n_1 = \cos \eta \sin \psi_0 - \sin \eta \cos \psi_0 \cos \alpha \\ n_2 = \sin \eta \sin \alpha \\ n_3 = \cos \eta \cos \psi_0 + \sin \eta \sin \psi_0 \cos \alpha \end{cases} \quad (2)$$

对于测试面上不同的  $\alpha$  方向,都有其对应的衍射面,各个衍射面上的衍射角变化对应了这些面上的应变。由弹性力学应变张量计算法则,不同方向上的应变可以由  $x, y, z$  三个方向上的应变表示:

$$\varepsilon_\alpha = n_1^2 \varepsilon_x + n_2^2 \varepsilon_y + n_3^2 \varepsilon_z + 2n_1 n_2 \gamma_{xy} + 2n_2 n_3 \gamma_{yz} + 2n_1 n_3 \gamma_{xz} \quad (3)$$

平面应力状态下有  $\gamma_{yz} = \gamma_{xz} = 0$ , 将公式(2)代入公式(3)后得到:

$$\varepsilon_\alpha = \left[ \left( \frac{1}{E} \sin^2 \eta \cos^2 \psi_0 - \frac{\nu}{E} \sin^2 \eta \sin \psi_0 \right) \cos^2 \alpha + \left( \frac{1+\nu}{2E} \sin 2\eta \sin 2\psi_0 \right) \cos \alpha + \frac{1}{E} \cos^2 \eta \sin^2 \psi_0 - \frac{\nu}{E} \cos^2 \eta \cos^2 \psi_0 - \frac{\nu}{E} \sin^2 \eta \sin^2 \alpha \right] \sigma_x + \left[ \frac{1}{E} \sin^2 \eta \sin^2 \alpha - \frac{\nu}{E} (\cos^2 \eta + \sin^2 \eta \cos^2 \alpha) \right] \sigma_y + \frac{1+\nu}{E} \left( \frac{1}{2} \sin 2\eta \sin \psi_0 \sin \alpha - \sin^2 \eta \cos \psi_0 \sin \alpha \cos \alpha \right) \tau_{xy} \quad (4)$$

定义  $a_1$  和  $a_2$  如公式(5)所示, 将公式(4)代入公式(5), 可以得到 X 射线二维面探采用的残余应力分析方法, 如公式(6)所示。

$$\begin{cases} a_1 = \frac{1}{2} [(\varepsilon_\alpha - \varepsilon_{\pi+\alpha}) + (\varepsilon_{-\alpha} - \varepsilon_{\pi-\alpha})] \\ a_2 = \frac{1}{2} [(\varepsilon_\alpha - \varepsilon_{\pi+\alpha}) - (\varepsilon_{-\alpha} - \varepsilon_{\pi-\alpha})] \end{cases} \quad (5)$$

$$\begin{cases} \sigma_x = -\frac{E}{1+\nu} \frac{1}{\sin 2\eta} \frac{1}{\sin 2\psi_0} \left[ \frac{\partial a_1(0)}{\partial \cos \alpha} \right] \\ \tau_{xy} = \frac{E}{2(1+\nu)} \frac{1}{\sin 2\eta} \frac{1}{\sin \psi_0} \left[ \frac{\partial a_2(0)}{\partial \sin \alpha} \right] \end{cases} \quad (6)$$

二维面探仪有 500 个探测头, 均匀分布在一个 360° 面上。根据每一个探测器测得的衍射角变化, 就能得到 500 个方向上的应变值, 代入公式(5)后, 就可以计算出 125 个  $a_1$ , 将  $a_1$  对  $\cos \alpha$  作偏导, 就可以计算出材料的残余应力<sup>[14-15]</sup>。

## 2 试验材料及方法

文中测试的是经喷丸后的 GH4169 合金, 其力学和衍射特性见表 1。Ni 合金在 Cr 靶和 Mn 靶下都有较强的衍射峰, 而在 Mn 靶下衍射峰对应的衍射角较大, 因此其测试精度较 Cr 靶高。由于实验器材的约束, 二维面探采用 Cr 靶来测试 GH4169 合金的残余应力, 测试条件为: 管电压 30 kV, 管电流 1 mA, 照射面直径 4 mm, X 射线入射角 30°。

表 1 GH4169 合金力学和衍射特性

Tab.1 Mechanical and diffractive properties of GH4169 alloy

Target Material	Crystal structure	Diffraction line (hkl)	Young's module /GPa	Poisson's ratio (ν)	Diffraction angle (2θ) / (°)
Chromium	FCC	311	214.6	0.30	150.88
Manganese	FCC	311	214.6	0.30	152

## 3 结果与讨论

二维面探各测试探头之间相隔 0.72°, 得到 X 射线衍射下 GH4169 的完整德拜环如图 2a 所示。从图 2a 中可以看出, GH4169 合金的分析结果只有一个衍射峰, 而且衍射峰的强度  $I$  随着角度  $\alpha$  的变化而变化。这说明该材料的应力取向不均匀, 存在较为明显的织构。从图 2b 中可以看出, 虽然衍射峰强度  $I$  随角度  $\alpha$  的变化而变化, 但是在各个方向上都有明显的衍射峰, 因此其残余应力的测试依然是有效的。

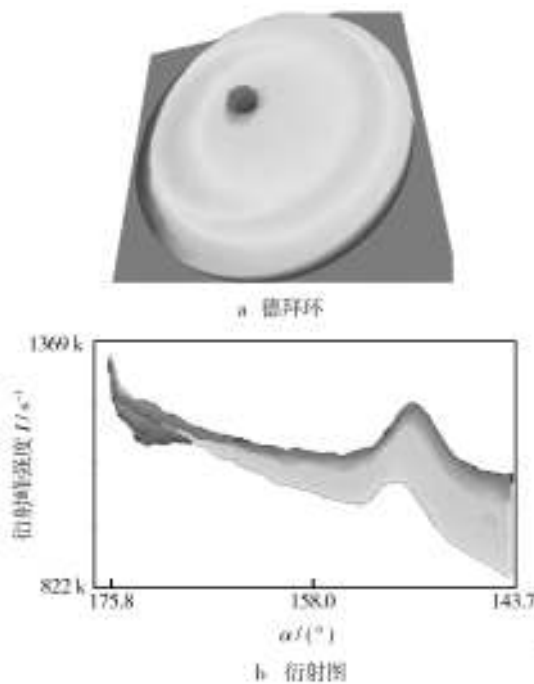


图 2 二维面探分析结果

Fig.2 Analysis results of two-dimensional detector : a) Debye-Scherrer ring, b) diffraction

将二维面探得到的各个方向上的衍射角代入公式(1), 就可以计算出各个方向上的应变, 再将应变代入公式(5), 对  $a_1$  和  $\cos \alpha$  进行线性拟合, 结果如图 3 所示。

将图 3 所示拟合曲线的斜率计算结果代入公式(6), 就能计算出残余应力的数值, 计算结果见表 2。

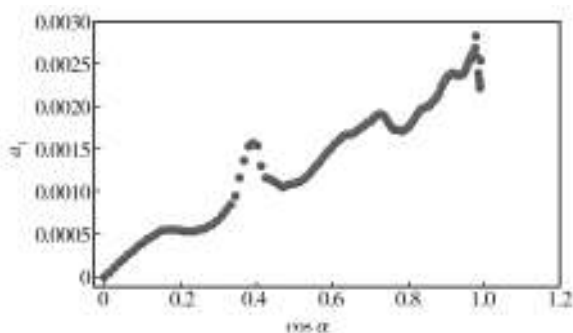


图3 GH4169材料残余应力测试的 $a_1$ - $\cos \alpha$ 曲线

Fig.3  $a_1$ - $\cos \alpha$  diagram of the residual stress test of GH4169 material

从分析结果看,该材料表面正应力方向的残余应力值为负数,而本次测试的GH4169材料是经过喷丸处理的,其正应力方向的残余应力确应为残余压应力,说明用二维面探测测试GH4169残余应力的结果可信。

表2 残余应力分析结果

Tab.2 Analysis results of residual stress

Stress	Residual stress	Standard Deviation
	/MPa	/MPa
Positive stress	-968	62
Shearing stress	24	43

## 4 结论

1) 通过二维面探X射线衍射方法测试材料残余应力,从原理和实际操作上都是可行的。文中成功测试出GH4169合金的残余应力。

2) 分析表明,经喷丸处理后的GH4169材料受残余拉应力,且应力分布不均匀,存在较为明显的织构。

3) 二维面探只需要一次曝光就能得到材料完整的德拜环,操作方便,时间短,而且所得到的德拜环可以反映出材料的X射线衍射学特征,同时也可以反映出织构等材料的晶体学特征,具有较大的优越性。

## 参考文献

- [1] 高玉魁. 表面完整性理论与应用[M]. 北京: 化学工业出版社, 2014.  
GAO Y K. Surface Integrity Theory and Its Application [M]. Beijing: Chemical Industry Press, 2014.
- [2] LIU Wen-chang, XIAO Fu-ren, YAO Mei. Quantitative Phase Analysis of Inconel 718 by X-ray Diffraction[J]. Journal of Materials Science Letters, 1997, 16: 769.
- [3] LI R B, YAO M, LIU W C, et al. Isolation and Determination for  $\sigma$ ,  $\gamma'$ ,  $\gamma''$  Phases in Inconel 718[J]. Scripta Materialia, 2002, 46: 635.
- [4] CAI D Y, NIE P L, SHAN J P, et al. Precipitation and Residual Stress Relaxation Kinetics in Shot-peened Inconel 718[J]. Journal of Materials Engineering and Performance, 2006, 15(5): 614—617.
- [5] CULLITY B D. Elements of X-ray Diffraction[M]. 2nd. USA: Addison-Wesley Publishing, 1978.
- [6] TAIRA S, TANAKA K, YAMASAKI T. A Method of X-ray Microbeam Measurement of Local Stress and Its Application to Fatigue Crack Growth Problems[J]. Japan Society of Materials Science, Journal, 1978, 27: 251—256.
- [7] SASAKI T, KOBAYASHI Y. X-ray Multiaxial Stress Analysis Using Two Debye Rings[J]. JCPDS-International Centre for Diffraction Dat, 2009, 53: 248—255.
- [8] SASAKI T. New Generation X-ray Stress Measurement Using Debye Ring Image Data by Two-Dimensional Detection[J]. Materials Science Forum, 2014, 783: 2103—2108.
- [9] SASAKI T, HIROSE Y. X-ray Triaxial Stress Analysis Using Whole Diffraction Ring Detected with Imaging Plate[J]. Transactions of the Japan Society of Mechanical Engineers, 1995, 61(590): 2288—2295.
- [10] TANAKA K, MATSUI M, TAKA T. X-ray Stress Measurement of WC-Co Alloys[J]. Journal of the Society of Materials Science, Japan, 1993, 42(472): 96—102.
- [11] SASAKI T, LIN Z, HIROSE Y. Calculation of X-ray Elastic Constants of Composite Materials Using Eshelby/Mori-Tanaka Model[J]. Journal of the Society of Materials Science, Japan, 1998, 47(2): 197—203.
- [12] SASAKI T, HIROSE Y. X-ray Triaxial Stress Analysis Using Whole Diffraction Ring Detected with Imaging Plate[J]. The Japan Society of Mechanical Engineers, 1995, 61: 181—187.
- [13] HANABUSA T, NISHIOKA K, FUJIWARA H. Criterion for the Triaxial X-ray Residual Stress Analysis[J]. Zeitschrift für Metallkunde, 1983, 74: 307—313.
- [14] KAKITA D, SASAKI T, IWAFUCHI K, et al. Triaxial Residual Stress in Rails Measured with X-ray Method, Proceedings of the 41st Symposium on X-ray Studies on Mechanical Behavior of Materials[J]. The Society of Materials Science, Japan, 2006, 7: 67—72.
- [15] KURAMOTO M, SASAKI T, UMEZU J, et al. Influence of Different Grinding Processes on Residual Stress[J]. Journal of the Society of Materials Science, Japan, 1985, 34(380): 499—505.