

GH4169 晶面衍射弹性常数计算与测量

陈 强¹, 叶益聪¹, 祝昌军²

(1. 国防科技大学 空天科学学院 材料科学与工程系, 湖南 长沙 410073)

(2. 中南大学 有色金属先进结构材料与制造协同创新中心, 湖南 长沙 410083)

摘 要: 根据复相材料细观力学模型, 预测了镍基高温合金等效弹性响应, 基于宏观应力-应变关系, 理论计算了 GH4169 及组分材料等效弹性性质参数, 即等效弹性模量 \bar{E} , 等效体积模量 \bar{K} , 等效剪切模量 \bar{G} 和泊松比 $\bar{\nu}$, 与文献报道的实验值进行对比分析。结果显示: GH4169 合金理论计算值 $\bar{E}=218.60$ GPa, $\bar{K}=180.20$ GPa, $\bar{G}=84.20$ GPa, $\bar{\nu}=0.298$ 与实验值偏差分别为 7.16%、10.69%、6.58%、0.67%; γ' 相理论计算值 $\bar{E}=201.10$ GPa, $\bar{K}=173.70$ GPa, $\bar{G}=76.93$ GPa, $\bar{\nu}=0.307$ 与实验值偏差分别为 1.42%、0.40%、2.00%、1.66%, 较小的误差证明了该模型的准确性; 进一步, 理论预测了镍基高温合金细观弹性响应, 基于单轴载荷作用下细观弹性应力-应变关系, 理论计算了 GH4169 合金 γ -(Ni-Cr-Fe)相(220)晶面衍射弹性常数, 即 $E_{220}=233.89$ GPa, $\nu_{220}=0.284$; 同时, 采用四点弯曲标定载荷应力, 结合 X 射线衍射应变实验测量了 γ -(Ni-Cr-Fe)相(220)晶面衍射弹性常数, 并与理论计算值对比分析。结果表明, 实验测量值 $E_{220}=248.00$ GPa、 $\nu_{220}=0.276$ 与理论值的偏差分别约为 5.69%、2.90%, 证实了该理论模型的准确性, 也为衍射法测量残余应力研究提供理论基础。

关键词: 镍基高温合金; 晶面衍射弹性常数; 四点弯曲; X 射线衍射

中图分类号: TG146.1*5

文献标识码: A

文章编号: 1002-185X(2021)09-3169-07

镍基高温合金具有优异的性能, 已经被广泛应用于结构材料的热段, 特别是燃气轮机、叶片、机罩等航空发动机零部件^[1,2]。其中, GH4169(国外牌号 Inconel 718)合金以其优良的高温力学性能、耐腐蚀性能等, 成为生产航空涡轮机用的主要原材料^[3]。然而, 残余应力的存在将影响镍基合金的性能及加工工艺, 如高应力水平促进了裂纹扩展, 缩短了孔洞扩展的时间^[4]; 残余压应力对 GH4169 微动疲劳(fretting fatigue, FF)的改善起着至关重要的作用^[5]; Krajewska-Spiewak 等人^[6]为了确定施工安全系数(基于随机相关), 研究了 Inconel 718 表层残余应力对结构安全系数的影响; 激光喷丸的 GH4169 合金表层出现了高幅值的残余应力, 高温保持后试样的残余应力不同程度降低, 但均高于未喷丸试样^[7]; Yu 等^[8]的热处理实验结果表明, γ' 析出相的立方形状越规则, 其尺寸越均匀, 热处理后的蠕变断裂寿命越长。

随着残余应力检测技术的日益成熟, 对残余应力的理论预测以及定量标定越来越引起学者们的广泛关注。其中, 实验测量残余应力的方法很多, 如以中子衍射^[9]、X 射线衍射^[10]等为代表的衍射法(无损法); 以钻孔法^[11]、纳米压痕法等为代表的常见的^[12]机械测量法(有损法)以及其他方法^[13]等。其中, 衍射法测

量构件残余应力结果相对准确, 具有对构件无损坏等优势, 较其他方法应用面更广, 普适性更高。根据衍射法测量材料残余应力原理, 衍射晶面的选择(hkl)以及与衍射晶面有关的弹性常数 E_{hkl} 、 ν_{hkl} , 直接影响材料残余应力测量的准确性^[14]。

细观力学的目的是建立可行的理论模型, 以便对材料的宏观性能与组分材料的微观结构之间的关系进行定性分析和定量计算, 从而为材料的性能设计和优化提供科学的理论依据^[15]。本研究基于多晶夹杂复相材料细观力学理论^[16], 预测了 GH4169 单轴载荷作用下等效弹性响应, 理论计算了 GH4169 及其组分材料的等效弹性性质参数, \bar{E} (等效弹性模量)、 \bar{K} (等效体积模量)、 \bar{G} (等效剪切模量)和 $\bar{\nu}$ (泊松比); 定性分析了组分材料细观弹性应力-应变关系, 理论计算了 γ -(Ni-Cr-Fe)相(220)晶面衍射弹性常数, $E_{(220)}$ 和 $\nu_{(220)}$; 结合 X 射线衍射应变测量装置, 采用四点弯曲加载宏观载荷应力, 对 GH4169 中 γ -(Ni-Cr-Fe)相 $E_{(220)}$ 、 $\nu_{(220)}$ 进行原位 X 射线衍射试验测量, 并与理论计算值对比分析, 从而验证模型的准确性, 进一步讨论试验精确标定残余应力所需的应力-应变关系。

1 两相模型

收稿日期: 2020-09-10

基金项目: 国家重点基础研究计划(2012CB619502); 国家科技重大专项(2014ZX04012011)

作者简介: 陈 强, 男, 1991 年生, 博士, 国防科技大学空天科学学院材料科学与工程系, 湖南 长沙 410073, E-mail: 13548774386@163.com

根据两相材料细观力学模型，引入代表体元 (representative volume element, RVE)^[17]对复相材料进行几何重构，对复相材料 RVE 进行体积平均得到多晶夹杂复相材料等效弹性性质，即

$$\bar{E} = \frac{9\bar{K}\bar{G}}{3\bar{K} + \bar{G}}, \quad \bar{\nu} = \frac{3\bar{K} - 2\bar{G}}{6\bar{K} + 2\bar{G}} \quad (1)$$

式中， \bar{K} 是复相材料整体的等效体积模量 (effect bulk modulus, GPa)； \bar{G} 为等效剪切模量 (effective shear modulus, GPa)； \bar{E} 、 $\bar{\nu}$ 分别是等效弹性模量 (effective elastic modulus, GPa) 和泊松比 (Poisson's ratio, dimensionless)。其中， \bar{K} 和 \bar{G} 由下式给出^[18]：

$$\frac{\bar{K}}{K_0} = 1 + \frac{f_1(K_1 - K_0)}{K_0 + \alpha(1 - f_1)(K_1 - K_0)} \quad (2)$$

$$\frac{\bar{G}}{G_0} = 1 + \frac{f_1(G_1 - G_0)}{G_0 + \beta(1 - f_1)(G_1 - G_0)}$$

$$\begin{aligned} \frac{1 + \nu_{hkl}}{E_{hkl}} = & \left(\frac{1 + \bar{\nu}}{\bar{E}} \right) + \frac{u^2}{2} [t_{11}(3u^2 - 1) + t_{12}(3v^2 - 1) + t_{13}(3w^2 - 1) + 3(t_{14}\nu w + t_{15}uw + t_{16}uv)] \\ & + \frac{v^2}{2} [t_{21}(3u^2 - 1) + t_{22}(3v^2 - 1) + t_{23}(3w^2 - 1) + 3(t_{24}\nu w + t_{25}uw + t_{26}uv)] \\ & + \frac{\nu w}{2} [t_{41}(3u^2 - 1) + t_{42}(3v^2 - 1) + t_{43}(3w^2 - 1) + 3(t_{44}\nu w + t_{45}uw + t_{46}uv)] \end{aligned} \quad (4)$$

$$\begin{aligned} & + \frac{uw}{2} [t_{51}(3u^2 - 1) + t_{52}(3v^2 - 1) + t_{53}(3w^2 - 1) + 3(t_{54}\nu w + t_{55}uw + t_{56}uv)] \\ & + \frac{\nu u}{2} [t_{61}(3u^2 - 1) + t_{62}(3v^2 - 1) + t_{63}(3w^2 - 1) + 3(t_{64}\nu w + t_{65}uw + t_{66}uv)] \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} -\frac{\nu_{hkl}}{E_{hkl}} = & \left(\frac{\bar{\nu}}{\bar{E}} \right) + \frac{u^2}{2} [t_{11}(1 - u^2) + t_{12}(1 - v^2) + t_{13}(1 - w^2) - (t_{14}\nu w + t_{15}uw + t_{16}uv)] \\ & + \frac{v^2}{2} [t_{21}(1 - u^2) + t_{22}(1 - v^2) + t_{23}(1 - w^2) - (t_{24}\nu w + t_{25}uw + t_{26}uv)] \\ & + \frac{w^2}{2} [t_{31}(1 - u^2) + t_{32}(1 - v^2) + t_{33}(1 - w^2) - (t_{34}\nu w + t_{35}uw + t_{36}uv)] \end{aligned} \quad (5)$$

$$\begin{aligned} & + \frac{\nu w}{2} [t_{41}(1 - u^2) + t_{42}(1 - v^2) + t_{43}(1 - w^2) - (t_{44}\nu w + t_{45}uw + t_{46}uv)] \\ & + \frac{uw}{2} [t_{51}(1 - u^2) + t_{52}(1 - v^2) + t_{53}(1 - w^2) - (t_{54}\nu w + t_{55}uw + t_{56}uv)] \\ & + \frac{\nu u}{2} [t_{61}(1 - u^2) + t_{62}(1 - v^2) + t_{63}(1 - w^2) - (t_{64}\nu w + t_{65}uw + t_{66}uv)] \end{aligned}$$

式中， $\bar{\nu}$ 、 \bar{E} 为复相材料的等效弹性常数； t_{ij} ($i, j=1, 2, 3 \dots 6$) 表示构成弹性相互作用因子 T_{ij} 的矩阵元素； (u, v, w) 是与衍射晶面 (h, k, l) 有关的晶面法向方向余弦，即

$$\begin{aligned} u = & \frac{bch\sqrt{[\cos\beta - \cos(\alpha + \gamma)][\cos(\alpha - \gamma) - \cos\beta]}}{D} \\ \nu = & \frac{(ak - bh\cos\alpha)c\sqrt{[\cos\beta - \cos(\alpha + \gamma)][\cos(\alpha - \gamma) - \cos\beta]}}{D\sin\sin\alpha} \quad (6) \\ w = & \frac{abl\sin^2\alpha - bch(\cos\gamma - \cos\alpha\cos\beta) - ack(\cos\beta - \cos\alpha\cos\gamma)}{D\sin\sin\alpha} \end{aligned}$$

式中， K_i 、 G_i ($i=0, 1$) 分别对应材料基体相 ($i=0$) 或增强相 ($i=1$) 的体积模量及剪切模量，两者都与组分材料的

单晶体弹性刚度有关；这里， $\alpha = \frac{1}{3} \frac{1 + \bar{\nu}}{1 - \bar{\nu}}$ ， $\beta = \frac{2}{15} \frac{4 - 5\bar{\nu}}{1 - \bar{\nu}}$ 。

进一步，根据已有细观力学理论基础，定义增强相细观弹性应力-应变关系：

$$\bar{\varepsilon}_1 = \bar{\varepsilon} + \varepsilon' = (\bar{S} + T) \cdot \bar{\sigma} \quad (3)$$

式中， $\bar{\varepsilon}_1$ 表示复相材料中增强相的平均应变； $\bar{\sigma}$ 、 $\bar{\varepsilon}$ 分别表示宏观载荷作用下材料整体的平均应力和应变； ε' 是由于组分材料弹性性质不同而引起的应变附加项； \bar{S} 表示材料等效弹性柔度张量； T 表示材料晶体之间弹性相互作用因子。

基于复相材料细观应力-应变分析，定义组分材料晶面衍射弹性常数如公式 (4)、(5) 表示。

$$\begin{aligned} D^2 = & (abl\sin\alpha)^2 + (cbh\sin\beta)^2 + (ack\sin\gamma)^2 - 2abc \cdot \\ & [chk(\cos\alpha - \cos\beta\cos\gamma) + akl(\cos\beta - \cos\alpha\cos\gamma) \\ & + bhl(\cos\gamma - \cos\alpha\cos\beta)] \end{aligned}$$

a 、 b 、 c 以及 α 、 β 、 γ 为晶体结构参数。

综上，联立公式 (4)、(5) 和 (6) 即可求得晶面衍射弹性常数 E_{hkl} 和 ν_{hkl} ，详细推导过程可参见文献 [16]。

2 GH4169 晶面衍射弹性常数理论计算

由公式(4)和(6)可知, GH4169 组分材料晶面衍射弹性常数, 与其等效弹性性质参数有关。根据 Kröner-Reuss 模型^[19], $K_i, G_i(i=0, 1)$ 可分别由 γ' -Ni₃(AlTi) 第二相与 γ -(Ni-Cr-Fe)基体相弹性刚度求得, 所需的弹性刚度常数如表 1 所示。

如表 1 所示, γ' 和 γ 均为典型的体心立方 bcc 结构, 借助 Kröner-Reuss 模型的推导^[19], 可以计算得到 γ' 和 γ 相的体积模量和剪切模量。进一步, 联立公式 (1) 和 (2), 计算得到 GH4169 及其组分材料的等效弹性常数, 并与文献报道的实验值对比, 如表 2 所示。

从表 2 中可以看出 GH4169 等效弹性性质参数与文献报道的实验值接近, $\bar{E}, \bar{K}, \bar{G}, \bar{\nu}$ 与实验值的误差分别为 7.16%、10.69%、6.58%、0.67%, 进而证明了两相模型中复相材料等效弹性性质细观力学理论计算的准确性。

在公式 (5) 中, 对于 γ 相颗粒与周围晶体弹性相互作用因子 T_{ij} 可以用下式求得:

$$T = (C_0 - C_1 + C_0 \cdot S^{E-1})^{-1} \cdot (I - C_0 \cdot \bar{S}) \cdot B_0^{-1} \quad (7)$$

式中, C_0, C_1 分别表示 γ 相以及 γ' 相的弹性刚度常数; \bar{S} 表示 GH4169 整体弹性柔度常数; S^E 表示 Eshelby 夹杂张量^[23]; I 为单位六阶矩阵; B_0 表示宏观载荷应力作用在 γ 相中的应力集中张量, 即

$$B_0 = \left(\frac{K^0}{(K^0 - \bar{K})\alpha + \bar{K}}, \frac{G^0}{(G^0 - \bar{G})\beta + \bar{G}} \right) \quad (8)$$

表 1 γ' 和 γ 相的弹性刚度常数

Table 1 Elastic stiffness constants of γ' and γ phase

Phase	Elastic stiffness constant/GPa			Reference
	C_{11}	C_{12}	C_{44}	
γ	248	149	125	[20]
γ'	223	149	125	[21]

表 2 GH4169 及组分材料的等效弹性性质参数

Table 2 Effective elastic property parameters of GH4169 and its components

Material	Effective elastic property parameters			
	\bar{E} /GPa	\bar{K} /GPa	\bar{G} /GPa	$\bar{\nu}$
γ ^{Cal.}	223.00	182.00	86.22	0.295
γ' ^{Cal.}	201.10	173.70	76.93	0.307
γ' ^{EXP.} _[21]	204.00	173.00	78.50	0.302
GH4169 ^{Cal.}	218.60	180.20	84.20	0.298
GH4169 ^{EXP.} _[22]	204.00	162.80	79.00	0.300

Note: Cal.: the calculated values in this work; Exp.: the experimental values in report

可以转化为六阶矩阵表示。

进一步, 对于体心立方结构的 γ 相, 与衍射晶面 (h, k, l) 有关的晶面法向方向余弦可以简化为:

$$(u, v, w) = \frac{(h, k, l)}{\sqrt{h^2 + k^2 + l^2}} \quad (9)$$

联立公式(4)、(5)、(7)~(9), 可得到 γ -(Ni-Cr-Fe)相晶面衍射弹性常数显函数:

$$\frac{1 + \nu_{hkl}}{E_{hkl}} = \left(\frac{1 + \bar{\nu}}{\bar{E}} \right) + t_{11} - t_{12} - 3 \left(t_{11} - t_{12} - \frac{t_{44}}{2} \right) \Gamma \quad (10)$$

$$-\frac{\nu_{hkl}}{E_{hkl}} = - \left(\frac{\bar{\nu}}{\bar{E}} \right) + t_{12} + \left(t_{11} - t_{12} - \frac{t_{44}}{2} \right) \Gamma \quad (11)$$

式中, $\bar{E}, \bar{\nu}$ 分别是 GH4169 合金等效弹性模量和泊松比; $\Gamma = u^2 v^2 + v^2 w^2 + w^2 u^2$ 。

综上, 根据多晶夹杂复相材料细观力学模型可以计算得到(220)晶面衍射弹性常数: $E_{220} = 233.89$ GPa, $\nu_{220} = 0.284$ 。

3 GH4169 晶面衍射弹性常数实验测量

3.1 实验样品制备

将试验用 GH4169 高温合金, 组分元素如表 3 所示, 按照 GB/T15970.2-200, 切割成 130 mm×15 mm×3 mm 的样品。为确定两相合金成分, 对 GH4169 样品进行 XRD 射线衍射物相分析 (XRD, D/max2550pc), 其结果如图 1 所示。

对比文献[24], 最终确定 GH4169 高温合金为典型的两相合金。

表 3 实验用 GH4169 组成元素

Table 3 Chemical composition of the experimental GH4169 superalloy (wt%)

Ni	Cr	Fe	Nb+Ta	Mo	Ti	Co	Al	Si
51.55	19.62	Bal	5.08	3.03	1.08	<1.0	0.58	0.17

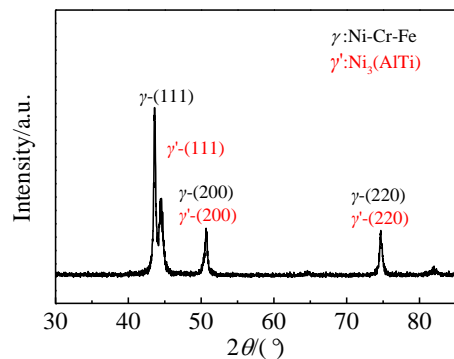


图 1 GH4169 高温合金 X 射线衍射图谱

Fig.1 XRD pattern of GH4169 superalloy

3.2 GH4169 四点弯曲标定载荷应力

利用四点弯曲方法标定实验样品单轴载荷下的宏观应力,如图 2 所示。其中,图 2a 是无应力加载时的试样,图 2b 是四点弯曲载荷作用示意图。

根据 GB/T15970.2-200 金属和合金的腐蚀-应力腐蚀试验第 2 部分:弯梁试样的制备和应用,四点弯曲标定材料样品表面的宏观载荷应力为:

$$\sigma_{\phi} = \Delta y / \left[\frac{(3H^2 - 4A^2)}{12Et} - \frac{h^2}{4Et} \right] \quad (12)$$

式中, Δy 表示样品试样弯曲状态下的顶点到无应力时的样品表面的距离,也表示螺纹旋进的距离; H 表示四点弯曲夹具的外距; h 表示四点弯曲夹具内距; A 表示内、外两支点的距离; t 表示样品厚度,各参数大小如表 4 所示。按照公式 (12) 所述实验原理,计算得到 GH4169 单轴载荷应力,如表 5 所示。

3.3 GH4169 原位 X 射线应变测量

首先,在进行宏观应力标定的同时,用残余应力测试仪(x-stress 3000 made in Finland)对处于不同弯曲状态下的试样进行一系列衍射应变测量,设定不同辐射角 ψ ,即: $0^\circ, \pm 14.5^\circ, \pm 20.7^\circ, \pm 25.7^\circ, \pm 30^\circ$,其结果如图 3 所示。

根据 X 射线衍射双倾法^[25],在平面应力状态下,定义 $\phi\psi$ 方向的应变 $\varepsilon_{\phi\psi}$:

$$\varepsilon_{\phi\psi} = \frac{\Delta d}{d} = \frac{1}{2} \cot \theta_0 (2\theta_{\psi} - 2\theta_0) \quad (13)$$

其平面应力状态为:

$$2\theta_{\psi} = -\frac{2(1+\nu_{hkl})}{E_{hkl}} \sigma_{\phi} \sin^2 \psi \cdot \tan \theta_0 + \frac{2\nu_{hkl}}{E_{hkl}} (\sigma_{11} + \sigma_{22}) \tan \theta_0 + 2\theta_0 \quad (14)$$

这里, $2\theta_0$ 表示无应力时的衍射角; σ_{ϕ} 表示宏观载荷

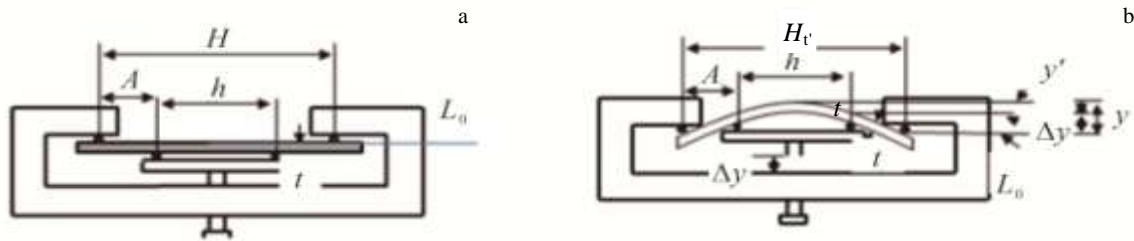


图 2 四点弯应力加载示意图

Fig.2 Schematics of four-point bending stress loading: (a) without loading and (b) during loading

表 4 四点弯曲试验参数

Table 4 Experimental parameters of four-point bending

Parameter	H/mm	h/mm	A/m	E/GPa	t/mm	σ /MPa	Δy /m
Magnitude	119.43	59.29	31.86	204	2.80	Cal.	Mea.

Note: Cal.: the calculated value; Mea.: the measured value

表 5 GH4169 四点弯曲应力测定值

Table 5 Four-point bending stress measurement of GH4169

Order	σ /MPa	E/GPa	h/mm	H/mm	A/m	t/mm	Δy_1 /m
a	218.00	204.00	119.43	59.29	31.86	0.00091	2.80
b	281.00	204.00	119.43	59.29	31.86	0.00117	2.80
c	340.00	204.00	119.43	59.29	31.86	0.00141	2.80
d	434.00	204.00	119.43	59.29	31.86	0.00181	2.80
e	470.00	204.00	119.43	59.29	31.86	0.00196	2.80

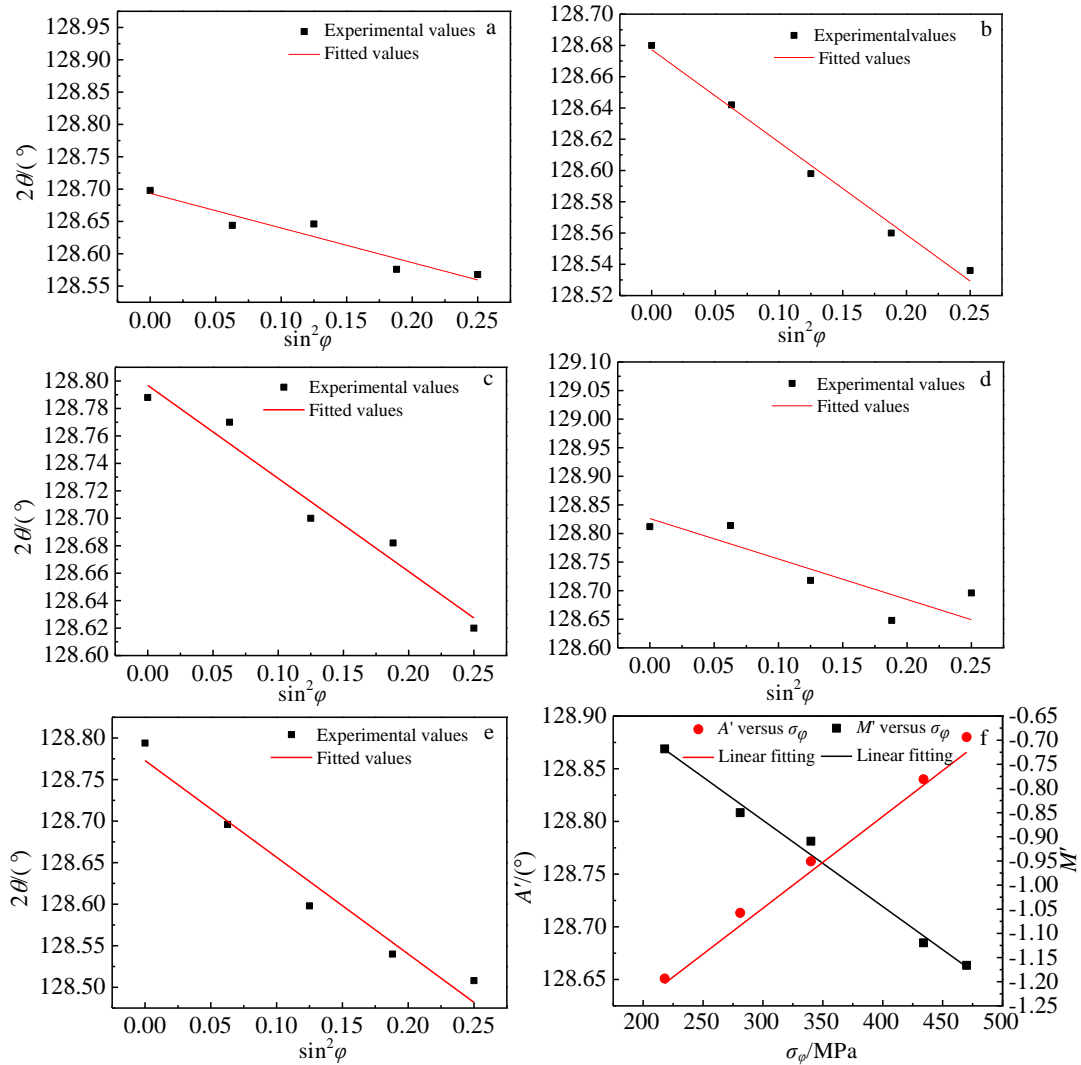


图3 γ 相(220)衍射晶面实验测量结果

Fig.3 Experimental measurement results for (220) diffraction plane of γ phase: (a) $\sigma=218$ MPa, (b) $\sigma=281$ MPa, (c) $\sigma=340$ MPa, (d) $\sigma=434$ MPa, (e) $\sigma=470$ MPa; (f) the diffraction data fitting of (220) crystal plane

应力; σ_{11} 和 σ_{22} 表示样品表面的正应力; v_{hkl} 、 E_{hkl} 分别表示实验测量得到的晶面衍射弹性常数。

最后, 拟合 $2\theta \sim \sin^2\varphi$ 直线上的数据点, 得到直线的斜率 M 和纵截距 A :

$$\frac{1+v_{hkl}}{E_{hkl}} = \left(-\frac{\pi}{360 \tan \theta_0} \right) \frac{\partial M'}{\partial \sigma_\varphi} \tag{15}$$

$$\frac{v_{hkl}}{E_{hkl}} = \left(\frac{\pi}{360 \tan \theta_0} \right) \frac{\partial A'}{\partial \sigma_\varphi}$$

式中, $\frac{\partial M'}{\partial \sigma_\varphi}$ 是不同线性拟合直线的斜率 M 与宏观载荷

应力 σ_φ 线性拟合的直线斜率; $\frac{\partial A'}{\partial \sigma_\varphi}$ 表示不同线性拟合直线的纵截距 A 与宏观载荷应力 σ_φ 线性拟合的直线斜

率; E_{hkl} 和 v_{hkl} 分别为本次试验测量得到的晶面衍射弹性常数。

结合图 3f 中线性拟合的数据, $\frac{\partial M'}{\partial \sigma_\varphi} = -0.00178$;

$\frac{\partial A'}{\partial \sigma_\varphi} = 0.00083$, 截距 A 与应力 σ 直线的纵截距为

128.47° , 即 $\theta_0 = 128.47^\circ$, 得到 GH4169 高温合金 γ 相 (220) 晶面衍射弹性常数为 $E_{220} = 248.00$ GPa, $v_{220} = 0.276$ 。

4 分析与讨论

GH4169 高温合金及组分材料的等效弹性性质参数, 即 $\bar{E} = 218.60$ GPa(等效弹性模量)、 $\bar{K} = 182.20$ GPa(等效体积模量)、 $\bar{G} = 84.20$ GPa(等效剪切模量)和

$\bar{\nu}=0.298$ (泊松比); γ 相的 $\bar{E}=223.60$ GPa(等效弹性模量)、 $\bar{K}=182.00$ GPa(等效体积模量)、 $\bar{G}=86.22$ GPa(等效剪切模量)和 $\bar{\nu}=0.295$ (泊松比); γ' 相的 $\bar{E}=201.10$ GPa(等效弹性模量)、 $\bar{K}=173.70$ GPa(等效体积模量)、 $\bar{G}=76.93$ GPa(等效剪切模量)和 $\bar{\nu}=0.307$ (泊松比)。结果显示: γ 相的 \bar{E} 、 \bar{K} 、 \bar{G} 较 GH4169 高温合金的大, 而 γ' 相的 \bar{E} 、 \bar{K} 、 \bar{G} 较 GH4169 高温合金的小, γ' 相与 γ 相的联合影响使得 GH4169 高温合金的等效弹性常数介于两者之间;GH4169 高温合金组分材料 γ 相(220)晶面衍射弹性常数理论预测值分别为 $E_{220}=233.89$ GPa, $\nu_{220}=0.284$ 与实验测量值 $E_{220}=248.00$ GPa, $\nu_{220}=0.276$ 误差分别约为 5.69%, 2.90%, 较小的实验误差证明了该模型的准确性。

模型预测值与试验测量值存在一定的误差, 这可能是由于多晶夹杂复相材料细观力学模型假设与材料真实情况存在一定的差异, 组分材料弹性刚度常数的大小, 试验测量过程中宏观载荷应力的计算误差以及 X 射线衍射应变测量的系统误差等因素, 导致试验测量结果存在一定的偏差。

5 结 论

1) 基于多晶夹杂复相材料细观力学模型, GH4169 合金理论计算值 \bar{E} , \bar{K} , \bar{G} , $\bar{\nu}$ 与文献报道的实验值偏差分别为 7.16%、10.69%、6.58%、0.67%。

2) γ -(Ni-Cr-Fe)相(220)晶面衍射弹常数 E_{220} 以及 ν_{220} , 理论计算值与本试验测量值对比分析, E_{220} 实验测量值与理论计算值的偏差约为 5.69%; ν_{220} 实验测量值与理论计算值偏差约为 2.90%, 较小的误差证实了理论模型的科学与准确性, 从而为衍射法测量残余应力提供了理论依据。

参考文献 References

- [1] Reed R C. *The Superalloys Fundamentals and Applications*[M]. New York : Cambridge University Press, 2006: 217
- [2] Wang Huiyang(王会阳), An Yunqi(安云岐), Li Chengyu(李承宇) *et al. Material Reports*(材料导报)[J], 2011, 25(S2): 482
- [3] Zhao Xingbao(赵新宝), Gu Yuefeng(谷月峰), Lu Jintao(鲁金涛) *et al. Rare Metal Materials and Engineering*(稀有金属材料与工程)[J], 2015, 44(3): 768
- [4] Yu Z, Wang X M, Yue Z F. *Mechanics of Materials*[J], 2020, 149: 103 563
- [5] Yang J, Liu D, Zhang X *et al. International Journal of Fatigue*[J], 2020, 133: 105 373
- [6] Krajewska-Spiwak J, Gawlik J. *Advances in Manufacturing*[M]. Switzerland: Springer Nature, 2018: 933
- [7] Huang Shu(黄舒), Sheng Jie(盛杰), Zhou Jianzhong(周建忠) *et al. Rare Metal Materials and Engineering*(稀有金属材料与工程)[J], 2016, 45(12): 3284
- [8] Yu J, Sun X, Zhao N *et al. Materials Science & Engineering A*[J], 2007, 460: 420
- [9] Dong Ping(董平), Wang Hong(王虹), Li Jian(李建) *et al. Rare Metal Materials and Engineering*(稀有金属材料与工程)[J], 2016, 45(12): 3197
- [10] Yang Bin(杨斌), Han Yuelin(韩月林), Cai Quan(蔡泉) *et al. Rare Metal Materials and Engineering*(稀有金属材料与工程)[J], 2019, 48(1): 205
- [11] Liu Xiaoyan(刘晓燕), Zhao Xicheng(赵西成), Yang Xirong(杨西荣) *et al. Rare Metal Materials and Engineering*(稀有金属材料与工程)[J], 2017, 46(3): 97
- [12] Luo Lei(罗雷), Zhao Xicheng(赵西成), Liu Xiaoyan(刘晓燕) *et al. Rare Metal Materials and Engineering*(稀有金属材料与工程)[J], 2017, 46(5): 201
- [13] Xiao Peng(肖鹏), Wang Yumin(王玉敏), Lei Jiafeng(雷家峰) *et al. Rare Metal Materials and Engineering*(稀有金属材料与工程)[J], 2011, 40(9): 1540
- [14] Gn äpel-Herold T, Creuziger A A, Iadicola M. *Journal of Applied Crystallography*[J], 2012, 45(2): 197
- [15] Xu W, Jia M, Zhu Z *et al. Materials & Design*[J], 2018, 145: 108
- [16] Chen Q, Liu L, Zhu C *et al. Metals*[J], 2018, 8(10): 822
- [17] Ju J W, Chen T M. *Acta Mechanica*[J], 1994, 103(1-4): 103
- [18] Mori T, Tanaka K. *Acta Metallurgica*[J], 1973, 21(5): 571
- [19] Lin Zheng(林政), Liu Min(刘旻). *A New Study on Elastic Constants of Materials*(材料弹性常数之新探)[M]. Beijing: Science Press, 2011: 110
- [20] Lenkkeri J T. *Journal of Physics F: Metal Physics*[J], 1981, 11(10): 1991
- [21] Kayser F X, Stassis C. *Physica Status Solidi (a)*[J], 1981, 64(1): 335
- [22] Shi Changxu(师昌绪), Yan Minggao(颜鸣皋), Liu Bocao(刘伯操). *China Aeronautical Materials Handbook (Second Edition)* (中国航空材料手册, 第 2 版)[M]. Beijing: Standards Press of China, 2001: 323
- [23] Eshelby J D. *Proceedings of the Royal Society A*[J], 1957, 241(1226): 376
- [24] Lv P, Sun X, Cai J *et al. Surface and Coatings Technology*[J], 2017, 309: 401
- [25] Noyan I C, Cohen J B. *Residual Stress: Measurement by Diffraction and Interpretation*[M]. New York-Berlin-Heidelberg-Loudon-Paris-Tokyo: Springer-Verlag, 2013: 117

Measurement and Calculation for Crystal Plane Diffraction Elastic Constants of GH4169

Chen Qiang¹, Ye Yicong¹, Zhu Changjun²

(1. Department of Materials Science and Engineering, College of Aerospace Science and Engineering, National University of Defense Technology, Changsha 410073, China)

(2. Nonferrous Metal Oriented Advanced Structural Materials and Manufacturing Cooperative Innovation Center, Central South University, Changsha 410083, China)

Abstract: According to the micromechanics of composites, the effective elastic response of Ni-base superalloy was predicted and the parameters of effective elastic properties of GH4169 as well as its constituent materials namely effective elastic modulus \bar{E} , effective bulk modulus \bar{K} , effective shear modulus \bar{G} and Poisson's ratio $\bar{\nu}$, were also theoretically calculated on the basis of macroscopic stress-strain relationship. Compared with the theoretical calculation and the experimental measurement in article, the results show that the errors of the theoretical calculated values of GH4169 alloy $\bar{E}=218.60$ GPa, $\bar{K}=180.20$ GPa, $\bar{G}=84.20$ GPa, $\bar{\nu}=0.0298$ and the experimental values are 7.16%, 10.69%, 6.58%, 0.67%, respectively; the errors of γ' phase theoretical calculated values $\bar{E}=201.10$ GPa, $\bar{K}=173.70$ GPa, $\bar{G}=76.93$ GPa, $\bar{\nu}=0.307$ and the experimental values are 1.42%, 0.40%, 2.00%, 1.66%, respectively, which proves the accuracy of the theory. Furthermore, the mesomechanical elastic response of Ni-base superalloy was predicted in theory and the crystal plane diffraction elastic constants of γ -(Ni-Cr-Fe) phase of GH4169 alloy, $E_{220}=233.89$ GPa, $\nu_{220}=0.284$ were also calculated theoretically based on mesomechanical stress-strain relationship of Ni-base superalloy under uniaxial loading. Simultaneously, the diffraction elastic constants of the (220) crystal plane of γ -(Ni-Cr-Fe) phase were experimentally measured with the combination of four-point bending to calibrate the load stress and X-ray diffraction for diffraction strain measurement. Contrasted between the theoretical and experimental, the results demonstrate that the experimental $E_{220}=248.00$ GPa, $\nu_{220}=0.276$ and that difference between the theoretical calculation is 5.69%, 2.90%, respectively, which proves the accuracy of the theoretical model and also provides a theoretical basis for the study of residual stress measurement by diffraction method as well.

Key words: Ni-based superalloy; crystal plane diffraction elastic constants; four-point bending; in situ X-ray diffraction

Corresponding author: Zhu Changjun, Ph. D., Lecturer, Nonferrous Metal Oriented Advanced Structural Materials and Manufacturing Cooperative Innovation Center, Central South University, Changsha 410083, P. R. China, E-mail: zhu2571203285@163.com