

# 晶体取向和载荷模式对 $\text{Ni}_3\text{Al}$ 合金 单晶体疲劳行为的影响\*

张广平 王中光

(中国科学院金属研究所材料疲劳与断裂国家重点实验室, 沈阳 110015)

**摘要** 在名义 I 型和 I/II 复合型载荷下研究了晶体取向和加载模式对  $\text{Ni}_3\text{Al}$  合金单晶体疲劳开裂行为的影响. 结果表明: 疲劳开裂行为强烈地依赖于晶体取向和加载模式. 在单晶体中, 疲劳裂纹总是沿着具有最大切应力的滑移面开裂. 根据单晶体的实验结果, 解释了用三种主要的复合型断裂准则所预测的多晶体在复合型加载下的疲劳开裂行为.

**关键词** 晶体取向, 复合型加载,  $\text{Ni}_3\text{Al}$  合金单晶体, 疲劳开裂

金属间化合物  $\text{Ni}_3\text{Al}$  的屈服应力随温度增加的反常效应引起了人们的关注, 并得到了广泛的研究<sup>[1-3]</sup>. 但用于高温材料, 疲劳性能是一个至关重要的问题. 近年来, 一些研究者就温度和环境对  $\text{Ni}_3\text{Al}$  的疲劳开裂行为进行了研究<sup>[4-6]</sup>, 但都是在名义 I 型加载模式下进行的. 很显然, 从实际工程应用的角度出发, 有必要对  $\text{Ni}_3\text{Al}$  在复合型加载模式下的疲劳行为进行研究, 目前这方面的工作在国内外开展得很少. 本文采用单晶体的  $\text{Ni}_3\text{Al}$  合金, 一方面研究晶体取向、加载模式对其疲劳开裂行为的影响, 另一方面旨在以单晶体作为模型材料探讨多晶体复合型加载下的疲劳开裂机理.

## 1 实验方法

$\text{Ni}_3\text{Al}$  基合金单晶体用 Bridgman 方法生长, 成分(原子分数, %)为: Ni 75, Al 16.7, Cr 8, B 0.3. 晶体在 1250 °C 氩气保护下均匀化处理 120 h, 经 Laue 背散射方法定向后, 用电火花线切割机切成单边缺口的三点弯曲试样. 采用三种方式切取晶体试样, 分别用  $A = (\bar{1}00)[010]$ ,  $B = (110)[001]$ ,  $C = (110)[\bar{1}10]$  表示. 其中晶面即缺口平面, 晶向即缺口所指方向. 每种取向的  $\{111\}$  滑移面的位置如图 1 所示, 图中  $X_1$  和  $X_2$  轴分别为缺口所指方向和缺口平面法向方向. 用液压伺服岛津试验机在对称(即 I 型)和反对称(即 I/II 复合型)三点弯曲两种加载模式下进行疲劳实验. 应力比  $R (= P_{\min} / P_{\max})$  为 0.1, 频率为 20Hz. 疲劳开裂行为用扫描电子显微镜 (SEM) 进行分析. 晶体学开裂面的面指数可根据图 1 中各  $\{111\}$  面与试样观察表面的交线确定.

\* 国家自然科学基金资助项目 59223001

收到初稿日期: 1996-09-24, 收到修改稿日期: 1996-11-11

本文通讯联系人: 张广平, 沈阳(110015)中国科学院金属研究所

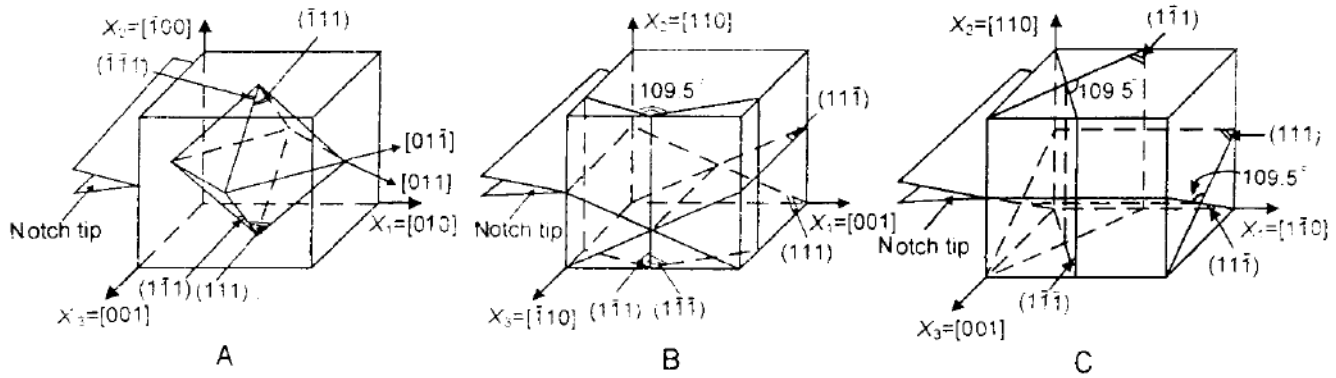


Fig.1 A, B, C 三种取向晶体中 $\{111\}$ 滑移面的位置

Fig.1 The position of  $\{111\}$  slip planes in A =  $(\bar{1}00)[010]$ , B =  $(110)[001]$  and C =  $(110)[\bar{1}\bar{1}0]$  orientation

## 2 实验结果

### 2.1 名义 I 型和复合 I/II 型加载下的疲劳开裂路径

对于 A 取向的试样, 从图 2a 可看出, 在 I 型加载模式下, 单晶体的疲劳开裂宏观上表现为垂直于远场拉伸方向的 I 型裂纹路径, 但根据图 1a 的各 $\{111\}$ 面与试样观察表面的交线分析可知, 微观上疲劳开裂却是沿着两组 $\{111\}$ 滑移面交替进行的. 而在 I/II 型加载模式下, 疲劳开裂先是沿着 $(\bar{1}11)$ 滑移面发生, 而后又沿着 $(\bar{1}\bar{1}1)$ 滑移面进行(图 2b).

从图 2c 和图 1b 可以看出, 取向 B 的试样无论在名义 I 型或是在复合 I/II 型的载荷作用下, 疲劳开裂均沿 $(111)$ 滑移面开裂 (除在 I 型载荷下的起始阶段), 反映出在该取向的单晶体中开裂路径对所加的复合型载荷( $K_{II}/K_I=0.17$ ,  $K_I$  和  $K_{II}$  分别为裂纹尖端 I 型和 II 型应力场强度因子)的不敏感性.

在 I 型加载模式下, C 取向试样的疲劳裂纹扩展主要是沿着 $[\bar{1}\bar{1}0]$ 方向(见图 2e), 而从图 1c 中的各 $\{111\}$ 滑移面与远场拉伸方向的晶体学取向关系可知, 这种平行于 $[\bar{1}\bar{1}0]$ 方向的 $\{111\}$ 开裂面实际上会受到 I/III 复合型载荷的作用. 当施加复合 I/II 型载荷时, 裂纹路径发生了显著的变化, 由图 2f 可看出宏观的开裂方向与 $[\bar{1}\bar{1}0]$ 方向大约成  $80^\circ$ , 裂纹扩展主要沿平行于 $[110]$ 方向的 $(1\bar{1}1)$ 或 $(11\bar{1})$ 滑移面进行.

### 2.2 断口形貌

图 3a, b 分别为 A 取向试样在 I 型和 I/II 型加载模式下的疲劳断口形貌. 从图 3a 可看出, I 型载荷作用下的疲劳断口由不同取向的 $\{111\}$ 小平面对组成, 说明裂纹扩展时裂纹尖端同时有非共面的 $\{111\}\langle 110\rangle$ 滑移系统开动; 而在 I/II 型载荷下, 断口由许多长直的解理台阶组成(见图 3b 左半部). 它们在高倍下的形貌(见图 3b 右半部)表明, 由于开裂沿 $(111)$ 面扩展, 裂纹尖端会产生 I, II, III 混合型位移, 从而导致了裂纹面的摩擦接触、台阶棱角钝化. 图 3c, d 是 B 取向在 I 型和 I/II 型载荷作用下的断口形貌, 断口平面由许多长直的解理台阶组成. 在 C 取向的试样中, 在 I 型载荷下断口平面为一 $\{111\}$ 平面, 其上存在许多共面的 $\{111\}$ 小平面对(见图 3e). 在 I/II 型载荷作用下, 断口平面由许多长条棱脊台阶组成(见图 3f). 由图 1c

可知, 这些台阶是由于裂纹沿 $(\bar{1}11)$ 和 $(\bar{1}\bar{1}1)$ 面同时开裂的结果. 另外, 断口平面还存在着许多明显的二次裂纹.

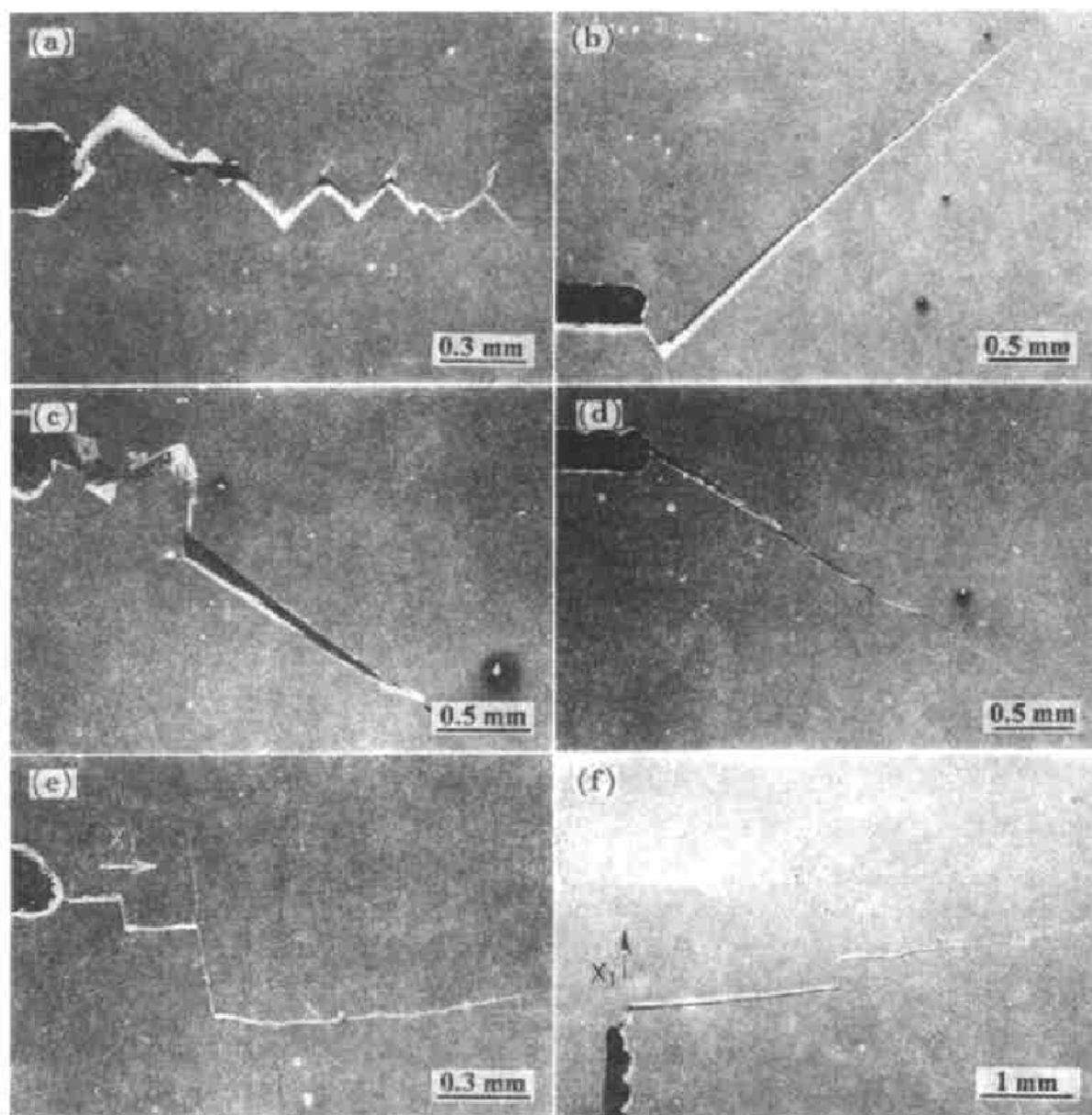


Fig.2 A, B, C 三种取向  $\text{Ni}_3\text{Al}$  合金单晶体中开裂路径的 SEM 观察

Fig.2 SEM micrographs showing crack paths in  $\text{Ni}_3\text{Al}$  alloy single crystal with orientation A (a,b), B(c,d) and C(e,f) under nominal mode I loading (a, c, e) and mixed mode I/II loading (b, d, f)

### 3 讨 论

在本实验中, 虽然由于三点弯曲试样的限制,  $K_{II}/K_I$  仅为 0.17, 但 A 取向和 C 取向试样的疲劳开裂路径却发生了明显的变化, 而在 B 取向的试样中, 裂纹路径并没有发生变化. 从断口分析上看, 所有取向试样的宏观断裂面都是由单一的 $\{111\}$ 面或几个 $\{111\}$ 面组成的. 为了更深入地了解这种开裂行为, 可将缺口近似为一裂纹, 根据所加的载荷模式、试样的晶体学取

向关系以及任意模式载荷下的裂纹尖端应力场<sup>[7]</sup>和 Peach-Koehler 方程<sup>[8]</sup>,可计算出裂纹尖端十二个 $\{111\}$   $\langle 110 \rangle$  滑移系上的分解切应力.表 1 列出了三种晶体取向在 I 型和 I/II 型载荷下十二个滑移系中具有较大的分解切应力的滑移系以及实际所观察到的断裂面.从中可看出:断裂都是发生在具有较大的分解切应力的 $\{111\}$ 平面上.另外,还可看出:复合型载荷的施加促进了裂纹尖端滑移的局部化以及开裂沿某一 $\{111\}$ 滑移面发生.

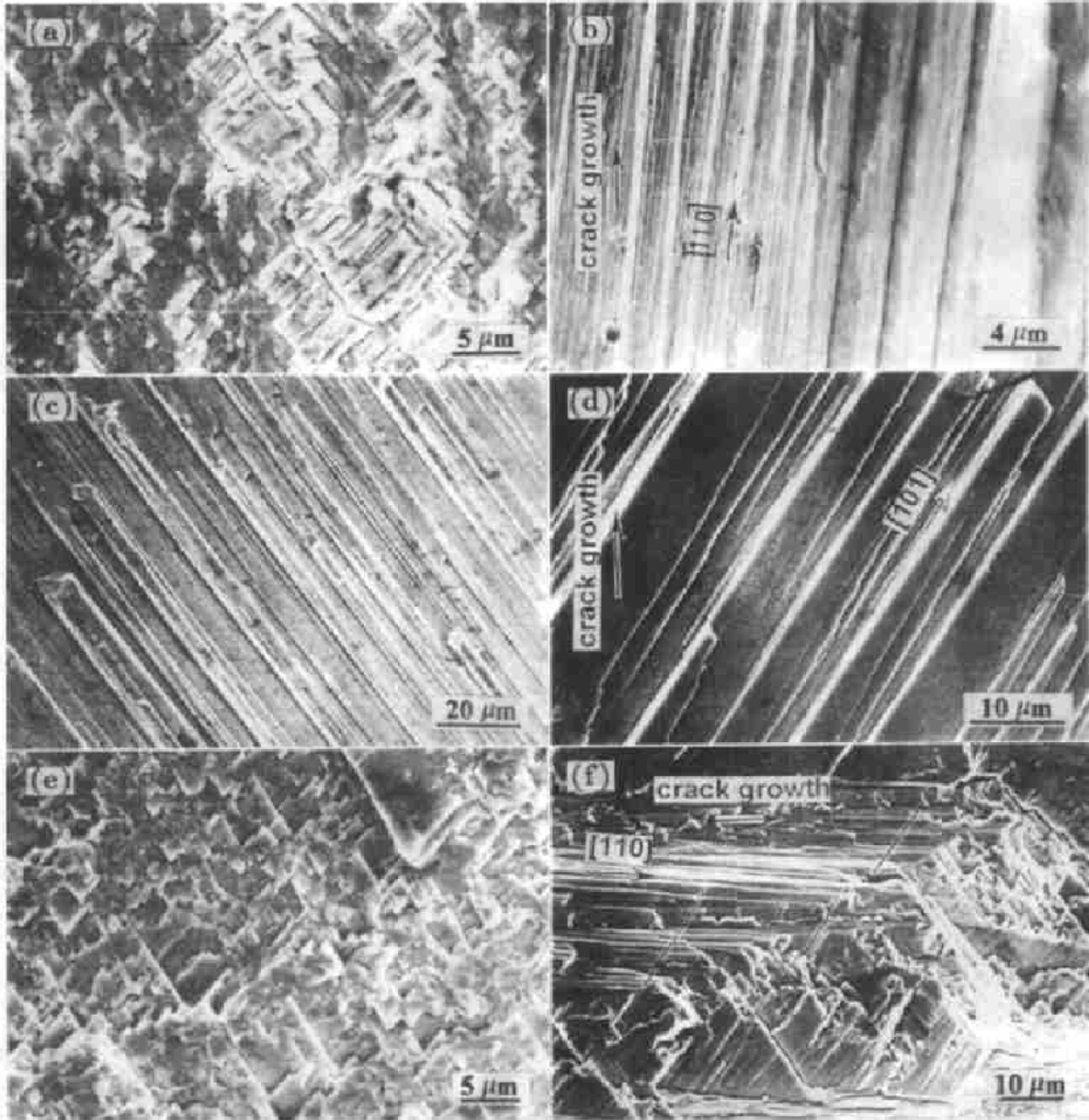


Fig.3 A,B,C 三种取向  $\text{Ni}_3\text{Al}$  合金单晶体的 SEM 断口形貌观察

Fig.3 SEM fractographs of  $\text{Ni}_3\text{Al}$  alloy single crystals with orientation A (a,b), B(c,d) and C (e, f) under nominal mode (a,c,e) loading and mixed mode I/II loading (b,d,f)

根据三个传统的复合型断裂准则,即最大正应力准则<sup>[9]</sup>、应变能密度因子准则<sup>[10]</sup>、最大应变能释放率准则<sup>[11]</sup>,在复合型加载条件下,多晶体材料中的裂纹总是沿着具有最大正应力的平面开裂.但在本实验中,单晶体的开裂显然是沿着具有最大切应力的平面进行.因此,

可以认为多晶体中的裂纹首先在一个晶粒内沿取向有利的滑移面开裂, 当裂纹扩展至相邻的晶粒时, 将沿此晶粒内某一具有最大切应力的滑移面扩展. 而对于具有各种取向晶粒的多晶材料, 最大正应力会促使这些具有最大切应力的滑移面不断分离, 因此控制着宏观的开裂路径.

**表 1** 三种取向单晶体在 I 型和 I / II 型载荷下十二个滑移系中具有较大的分解切应力的滑移系以及实际所观察到的断裂面

**Table 1** Slip systems with the highest and second highest resolved shear stresses ( $\tau_{\text{rss}}$ ) and the observed fracture planes for three oriented specimens under nominal mode I and mixed mode I / II loading

Specimens	Load Mode	$\frac{K_{II}}{K_I}$	Slip Systems	$\frac{ \tau_{\text{rss}} \cdot \sqrt{2\pi r} }{K_I}$
A	I	0	S3*, S5*, S7*, S12*	1.440
			S1, S4, S8, S11	1.062
	I / II	0.17	S3, S12*	1.543
			S5*, S7	1.341
B	I	0	S1, S3, S11, S12	1.033
			S4, S5, S7*, S8*	1.029
	I / II	0.17	S7*, S8*	1.125
			S3, S11	1.121
C	I	0	S4, S5, S7*, S8*	1.400
			S1, S3, S11, S12	1.062
	I / II	0.17	S5*, S7	1.543
			S4*, S8	1.341
			S3, S12*	1.236

\* The plane in slip system is the observed fracture plane

S1 = ( $\bar{1}\bar{1}$ 1)[ $\bar{1}$ 10], S2 = ( $\bar{1}\bar{1}$ 1)[101], S3 = ( $\bar{1}\bar{1}$ 1)[011], S4 = ( $\bar{1}\bar{1}$ 1)[110], S5 = ( $\bar{1}\bar{1}$ 1)[011], S6 = ( $\bar{1}\bar{1}$ 1)[10 $\bar{1}$ ],

S7 = (111)[0 $\bar{1}$ 1], S8 = (111)[ $\bar{1}$ 10], S9 = (111)[ $\bar{1}$ 01], S10 = ( $\bar{1}\bar{1}$ 1)[101], S11 = ( $\bar{1}\bar{1}$ 1)[110], S12 = ( $\bar{1}\bar{1}$ 1)[0 $\bar{1}$ 1]

## 4 结 论

(1) 晶体学取向和施加的载荷模式对 Ni<sub>3</sub>Al 基合金单晶体疲劳开裂行为有强烈的影响, II 型载荷分量的施加促进了裂纹尖端滑移的局部化以及沿取向有利的滑移面开裂的倾向.

(2) 无论在名义 I 型或复合 I / II 型的载荷下, Ni<sub>3</sub>Al 基合金单晶体都发生解理断裂. 开裂沿着某一{111}面或几个{111}面发生.

(3) 在复合型载荷下, 单晶体的开裂总是沿着具有最大切应力的{111}滑移面进行, 这不同于多晶体, 开裂是沿着复合型断裂准则所预测的最大正应力平面进行.

## 参考文献

- 1 Westbrook J H. *Trans Metall Soc AIME*, 1957; 209: 898
- 2 Flinn P A. *Trans Metall Soc AIME*, 1960; 218: 145
- 3 Copley S M, Kear B H. *Trans Metall Soc AIME*, 1967; 239: 977
- 4 Zhang G P, Wang Z G, Li G Y. *Acta Metall Mater*, 1997; 45: 1705
- 5 Kuruvilla A K, Stoloff N S. *Scr metall*, 1987; 21: 873
- 6 Matuszyk W, Camus G, Duquete D J, Stoloff N S. *Metall Trans*, 1990; 21A: 2967
- 7 Paris P C, Sih G C. *ASTM STP* 381, 1965; 30
- 8 Peach M D, Koehler J S. *Phys Rev*, 1950; 80: 436
- 9 Erdogan F, Sih G C. *J Basic Eng*, 1963; 85: 519
- 10 Sih G C. *Int J Fracture*, 1974; 10: 305
- 11 Hussain M A, Pu S L, Underwood J. *ASTM STP* 560, 1974; 2

## EFFECTS OF CRYSTAL ORIENTATION AND LOAD MODE ON FATIGUE BEHAVIOR IN Ni<sub>3</sub>Al ALLOY SINGLE CRYSTALS

ZHANG Guangping, WANG Zhongguang (State Key Laboratory for Fracture and Fatigue of Materials, Institute of Metal Research, Chinese Academy of Sciences, Shenyang 110015)

(Manuscript received 1996-09-24, in revised form 1996-11-11)

**ABSTRACT** Fatigue tests under nominal I and mixed mode I / II loading were carried out on Ni<sub>3</sub>Al alloy single crystals. The effects of crystal orientation and load mode on the fatigue cracking behavior were studied. It was found that the crack paths are dependent on both crystal orientation and applied load mode. Fatigue cracking in single crystals under mixed mode I / II loading always occurs on the planes with maximum resolved shear stress rather than on those with maximum normal stress. The cracking behavior predicted by main mixed mode criteria in polycrystalline materials under a mixed mode can be explained from the present results.

**KEY WORDS** crystal orientation, mixed mode loading, Ni<sub>3</sub>Al alloy single crystal, fatigue cracking

---

Correspondent : ZHANG Guangping, Institute of Metal Research, Chinese Academy of Sciences, Shenyang 110015