

文章编号: 1000-0887(2004) 08\_0809\_06

# 多晶体光滑表面疲劳微裂纹形核机理研究<sup>\*</sup>

岳珠峰

(西北工业大学 工程力学系, 西安 710072)

(本刊编委岳珠峰来稿)

摘要: 建立晶体学模型来研究多晶体承受均匀外载时光滑表面疲劳微裂纹形核的机理。由于晶粒取向的不相同, 即使承受均匀外载, 多晶体内将产生不均匀的应力, 变形也不均匀。在疲劳载荷的作用下, 表面粗糙度随疲劳周次逐渐增加, 变形逐渐集中到若干部位, 即局部化, 形成微裂纹。

关键词: 晶体学模型; 疲劳微裂纹; 形核; 粗糙度; 局部化

中图分类号: TG116 文献标识码: A

## 引言

相当多的试验研究表明, 在疲劳载荷作用下, 微裂纹形核于试样表面, 表面的加工质量对疲劳响应和疲劳寿命影响很大。表面的加工质量可归于表面初始粗糙度。由于表面初始粗糙度的存在, 使得表面区应力分布不均匀和存在应力集中区, 由此导致疲劳裂纹的形核。经典的唯象模型无法解释多晶体承受均匀外载时光滑表面疲劳微裂纹形核的机理。

在单调静载荷作用下, 承受均匀外载的多晶体光滑表面将变得粗糙, 其表面粗糙度与变形量成正比<sup>[1~6]</sup>。究其原因是多晶体内的晶粒取向各不相同, 即使承受均匀外载, 多晶体内的应力也不均匀, 导致变形不均匀。迄今对疲劳载荷下的表面粗糙度的演化规律及其与疲劳微裂纹形核机理联系缺乏研究。本文即开展这方面的工作。

## 1 晶体学本构模型和参数

### 1.1 晶体学本构模型

晶体学本构模型的一般描述可见[7~9]。下面只给出主要方面。

假定滑移系的滑移率  $\dot{\gamma}^{(a)}$  和分切剪切应力  $\tau^{(a)}$  有关, 定义为:

$$\dot{\gamma}^{(a)} = \dot{\gamma}_0^{(a)} \left[ \frac{\tau^{(a)}}{g^{(a)}} \right]^{1/m}, \quad (1)$$

$g^{(a)}$  是滑移系抗剪应力,  $m$  是应变率敏感指数,  $\dot{\gamma}_0^{(a)}$  是剪切应变系数。当应变率敏感指数  $m$  很低时, 材料响应和率无关。

在此, 我们认为  $g^{(a)}$  仅和滑移量  $\gamma$  有关, 即

\* 收稿日期: 2002\_01\_23; 修订日期: 2004\_03\_30

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(50005016, 50375124)

作者简介: 岳珠峰(1965—), 男, 江苏丹阳人, 教授, 博士

(Tel/Fax: + 86\_29\_88495540; E\_mail: zfyue@nwpu.edu.cn)

$$g^{(\alpha)} = g^{(\alpha)}(\gamma), \quad (2)$$

其中

$$\gamma = \sum_{\alpha} |\dot{\gamma}^{(\alpha)}|. \quad (3)$$

进一步

$$\dot{g}^{(\alpha)} = \sum_{\beta} h_{\alpha\beta} |\dot{\gamma}^{(\alpha)}|, \quad (4)$$

其中,  $h_{\alpha\beta}$  是  $\gamma$  的函数, 即

$$h_{\alpha\beta} = q_{\alpha\beta} h_{\beta}, \quad (\beta \text{ 不求和}), \quad (5)$$

$q_{\alpha\beta}$  是潜在硬化的极值,  $h_{\beta}$  是单硬化率, 这里选取:

$$h_{\beta} = h_0 \left[ 1 - \frac{g^{(\alpha)}}{\tau_s} \right]^{\beta}, \quad (6)$$

其中  $h_0$  和  $\tau_s$  及  $\beta$  为模型参数。

以上本构模型被编制成商用有限元程序(ABAQUS)的用户子程序(UMAT)。此程序已用于镍基单晶的力学行为<sup>[9, 10]</sup>以及滚压表面粗糙度的分析<sup>[8]</sup>。如果模型采用合适的参数, 有限元结果和试验结果吻合较好, 能较准确地预测滚压的表面粗糙度。

## 1.2 模型参数

以面心立方晶体(FCC)为计算对象。晶粒的弹性模量、泊松比、剪切模量为(Al 材)<sup>[10]</sup>:

$$E = 62.78 \text{ GPa}, \quad \nu = 0.33, \quad G = 28.3 \text{ GPa},$$

应变率敏感指数  $m = 0.02$ , 剪切系数  $\dot{\gamma}^{(\alpha)} = 0.003 \text{ s}^{-1}$ 。

晶体材料参数:

$$h_0 = 111.6 \text{ MPa}, \quad \tau_s = 108.81 \text{ MPa}, \quad \beta = 1.3, \quad g_{\omega} = 35 \text{ MPa}$$

## 1.3 晶粒的取向

晶体颗粒的取向见[1], 并列于附录。

# 2 模 型

模型见图1, 共250个20节点等参单元。

该模型为一长方体( $0.05 \times 0.01 \times 0.004 \text{ mm}^3$ )。边界条件如下: 左边面是单方向的约束, 后面是第2个方向约束, 底面是第3个方向约束。加载: 顶面和前侧面是自由面, 右侧面是加载面, 产生拉伸\_压缩应变,  $R = -1$ ,  $\epsilon_{\max}^* = 0.1$ 。如果模

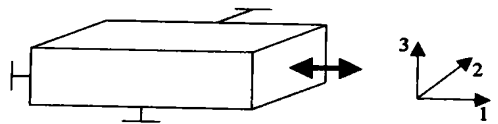


图1 模型

型材料各向同性, 该边界条件将只产生相同的应力和应变。每个单元为一个晶粒, 最初单元是  $0.002 \times 0.002 \times 0.002 \text{ mm}^3$ , 晶粒大小  $0.002 \times 0.002 \times 0.002 \text{ mm}^3$ 。晶粒的取向以附录中的晶粒取向为样本, 一个子程序来产生随机分布的晶粒取向, 确保模型中的晶粒取向不相关。

## 3 结果分析

图2 给出不同疲劳周次时的 Mises 应力分布。图中可以发现, 随机地取一些单元, 此时的

Mises 分布不均匀。如果模型中的晶粒取向相同, 该模型及边界条件和载荷条件将产生均匀分布的应力。图中显示, 拉压时, 有的单元的应力变化较大, 有的基本上不变。这表明, 不同晶粒对疲劳拉/压载荷的响应是不同的, 预示着试样的局部将发生较大的变形。

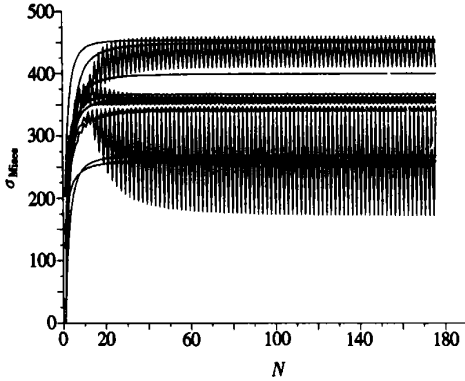


图2 Mises 应力分布随疲劳周次的变化情况(随机单元)

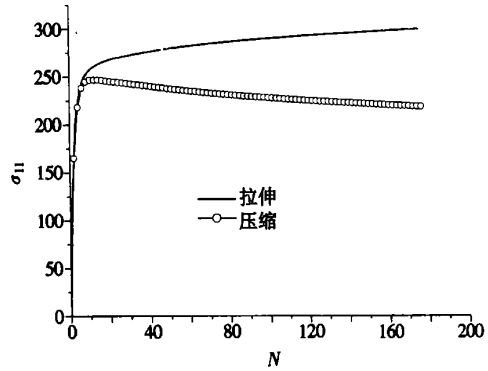


图3 最大拉伸和压缩应变时施载面所施加的平均拉伸和压缩应力随疲劳周次的变化情况

图3给出了最大拉伸和压缩位移时的施载面所施加的平均拉伸和压缩应力随疲劳周次的变化情况。在疲劳开始时, 拉伸应力随疲劳周次的增加而增加, 逐渐趋于一稳定值; 压缩应力在少数几个疲劳周次后即开始下降, 拉伸应力和压缩应力之间的差距增大。图中已显示拉伸和压缩的不对称。

图4给出了一组试样表面构形图, 对应图1的上自由面。此时对应的疲劳周次为176。从图中可以发现, 试样的变形是不均匀的。图中  $n$  从0到5在上自由表面对应于前侧面(为约束面)到后侧面(为自由面)。在图中, 我们定义  $d_{\max}$  表示微裂纹最深处。

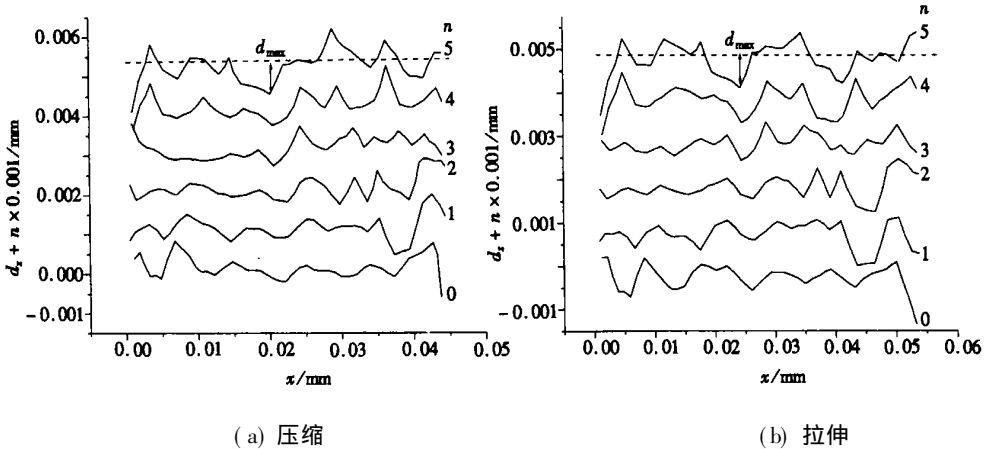


图4 试样上自由表面构形图

考查结果发现, 在上自由表面和后侧自由面的棱处的变形最深。为此特研究该棱在不同疲劳周次(间隔25)的变形图, 示于图5(a)和5(b)。从图中可以清楚地看出, 微裂纹将在  $x = 0.022 \text{ mm}$  处形核。图5(a)和5(b)表示微裂纹的点为同一点, 并考虑拉伸和压缩变形。进一步考虑图4中的  $d_{\max}$  的变化情况, 结果示于图6。随疲劳周次的增加,  $d_{\max}$  几呈线性增加。

图7给出上自由表面粗糙度  $R_a$  随疲劳周次的变化情况。 $R_a$  的定义为

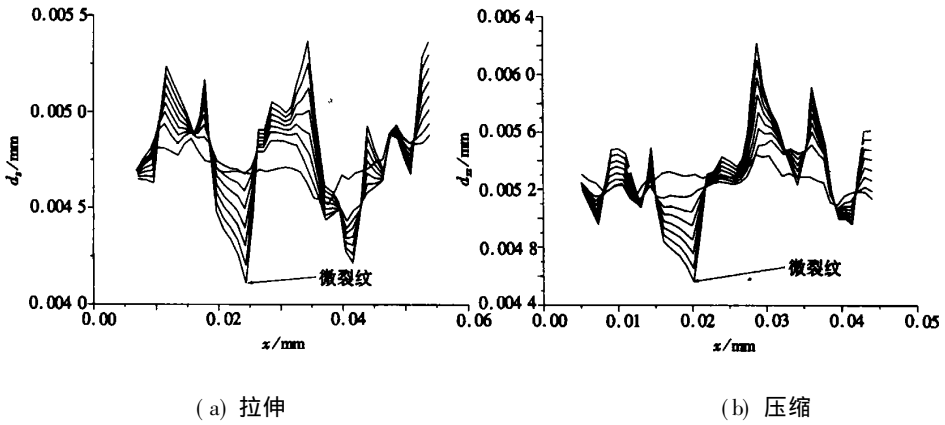


图 5 不同疲劳周次(每隔 25)表面上棱的变形图(图中(a)和(b)的微裂纹为同一点)

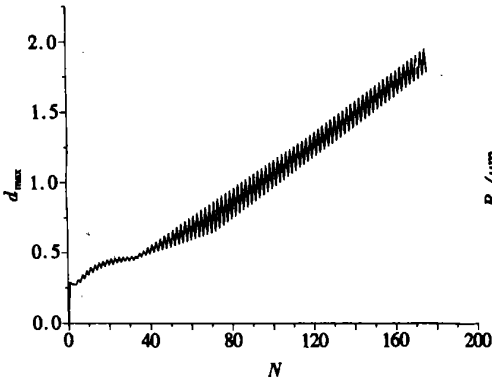


图 6 最大微裂纹深度 ( $d_{\max}$ ) 随疲劳周次变化情况

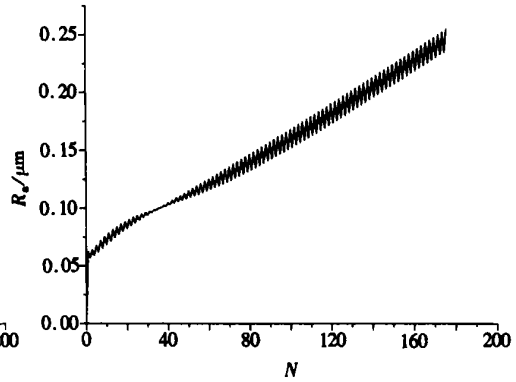


图 7 表面粗糙度随疲劳周次的变化情况

$$R_a = \frac{1}{L} \int |d - \bar{d}| dx,$$

式中  $\bar{d}$  为平均值,  $L$  为试样长度。

表面粗糙度  $R_a$  为一平均值, 平均地表示表面的粗糙程度。为了更好地理解光滑表面疲劳微裂纹形核的机理, 将图 6 和 7 同时示于图 8 中。图 8 显示  $d_{\max}$  的增加远远大于  $R_a$  的增加, 即变形逐渐集中到若干部位, 即局部化, 形成微裂纹。

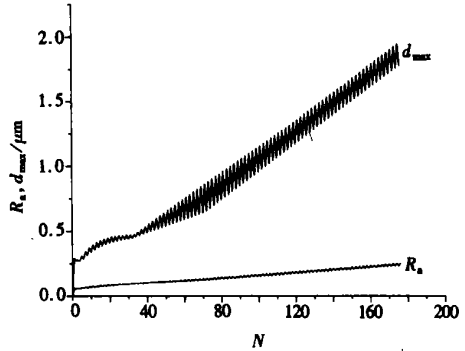


图 8  $d_{\max}$  和  $R_a$  的比较

## 4 结 论

建立晶体学模型来研究多晶体承受均匀外载时光滑表面疲劳微裂纹形核的机理。晶粒取向的不同导致变形也不均匀。在疲劳载荷的作用下, 表面粗糙度随疲劳周次逐渐增加, 变形逐渐集中到若干部位, 即局部化, 形成微裂纹。

附 录  
晶体取向<sup>[1]</sup>

表 1

晶体序号	$\varphi/(\circ)$	$\theta/(\circ)$	$\phi/(\circ)$	晶体序号	$\varphi/(\circ)$	$\theta/(\circ)$	$\phi/(\circ)$
1	62.10	91.28	- 81.55	40	72.14	71.87	- 100.85
2	41.49	84.59	- 81.17	41	144.03	144.03	63.10
3	92.86	88.15	- 179.08	42	73.63	70.88	- 114.02
4	1.41	92.01	- 2.14	43	81.18	78.53	174.14
5	86.45	82.08	175.39	44	53.63	49.12	- 113.54
6	- 104.61	77.96	172.15	45	73.37	91.74	177.01
7	32.13	84.92	- 8.02	46	151.95	102.49	67.10
8	49.96	78.30	- 77.31	47	17.76	67.99	- 12.10
9	39.14	113.93	104.81	48	96.13	72.63	- 174.86
10	93.72	105.93	170.27	49	30.56	117.34	97.57
11	67.23	76.53	- 93.59	50	57.39	138.95	- 177.70
12	65.04	159.50	84.15	51	85.10	104.69	170.84
13	- 98.15	64.07	161.85	52	8.77	81.15	- 19.28
14	96.05	91.77	172.99	53	87.52	94.98	165.24
15	89.67	79.81	- 179.59	54	51.96	79.41	- 103.82
16	- 3.42	123.10	- 30.12	55	85.94	103.55	171.40
17	33.59	65.61	0.20	56	46.69	109.62	160.83
18	60.31	110.91	- 157.16	57	14.11	63.44	- 15.09
19	69.30	117.52	- 158.58	58	99.82	101.39	155.68
20	81.27	96.29	168.14	59	21.80	55.83	- 114.08
21	22.91	86.02	- 15.13	60	45.79	109.19	158.89
22	67.17	73.63	- 76.94	61	21.80	66.44	- 9.29
23	59.26	74.48	- 105.55	62	21.80	64.87	- 128.95
24	28.58	114.06	83.65	63	28.50	98.26	29.31
25	26.91	64.57	- 16.89	64	19.20	76.33	- 40.89
26	58.18	66.90	- 90.70	65	16.84	82.26	- 27.75
27	- 94.55	71.89	- 172.58	66	74.36	104.65	168.37
28	74.50	8.27	- 178.64	67	144.48	106.56	70.68
29	- 93.21	72.99	150.88	68	22.23	101.01	25.06
30	31.27	110.00	107.91	69	14.00	83.61	7.04
31	74.51	70.82	- 117.70	70	41.10	130.14	79.13
32	74.52	87.17	- 174.25	71	92.56	91.13	169.93
33	27.20	94.44	- 53.56	72	21.10	111.63	13.25
34	20.21	79.67	- 8.33	73	149.85	96.55	69.23
35	23.09	112.77	10.45	74	88.77	93.27	179.05
36	43.11	113.34	125.35	75	43.76	51.45	- 93.77
37	36.86	138.31	83.68	76	27.69	64.28	- 12.38
38	23.54	113.13	11.22	77	- 5.76	101.65	- 3.69
39	25.15	93.77	- 19.56				

## [参 考 文 献]

- [1] Becker R. Effects of strain localization on surface roughening during sheet forming[J]. *Acta Mater*, 1998, **46**(5): 1385—1401.
- [2] Lo S\_W, Hong T\_C. Surface roughening and contact behavior informing of aluminum sheet[J]. *J Tribology*, 1999, **121**(2): 224—233.
- [3] Wittridge N J, Knutsen R D. A microstructure based analysis of the surface roughening behavior of an aluminium alloy during tensile deformation[J]. *Mat Sci Eng, Ser A*, 1999, **269**(2): 205—216.
- [4] Arkulis G E, Dorogobid V G. Variations in the roughness of intermediate layer surface during pack rolling[J]. *Russ Met*, 1969, **3**(1): 71—74.
- [5] Akeret R Y. The matt side of aluminium foils[J]. *Aluminium*, 1992, **4**(2): 318—321.
- [6] YUE Zhu\_feng. Phenomenological anisotropic study of surface finish in pack rolling[J]. *J Materials Science and Technology*, 2003, **19**(1): 133—136.
- [7] Asaro R J. *Micromechanics of Crystal and Polycrystals* [M]. *Advances in Applied Mechanics*, London: Academic Press, 1983, 23.
- [8] Peirce D, Asaro R J, Needleman A. An analysis of non\_uniform and localized deformation in ductile single crystal[J]. *Acta Metall*, 1983, **30**(7): 1951—1973.
- [9] Yue Z F, Lu Z Z. Finite element creep damage study of nickel\_base single crystal structures under multiaxial stress states[J]. *Mat Sci Tech*, 2003, **19**(8): 1012—1016.
- [10] Brandes E A, Brook G B. *Smithells Metals Reference Book* [M]. Chapter 15. Boston: Martinus Nijhoff Publishers, 1992, 1—8.

## On the Study of the Initiation of the Micro Crack on the Smooth Surface of Polycrystalline

YUE Zhu\_feng

(Department of Engineering Mechanics, Northwestern Polytechnical University,  
Xi'an 710072, P. R. China)

**Abstract:** Crystallographic plasticity was applied to study the initiation of micro cracks on the smooth surface of polycrystalline under uniform applied stress. Even under the uniform external stress, due to the different crystallographic orientations of the grains in the polycrystalline, there is un\_uniform stress distribution and the deformation is also not uniform. Under the fatigue loading, the roughness increases with the number of fatigue, and deformation will localize in some places, where micro cracks form.

**Key words:** crystallographic plastics; micro fatigue crack; initiation; roughness; localization