

DOI:10.19344/j. cnki. issn1671-5276.2024.05.024

基于晶体塑性模型的 304 不锈钢疲劳寿命预测

田宏伟¹,段红燕¹,刘洋¹,张增旺¹,何宏¹,岳顺强¹,赵英健¹,李静²

(1. 兰州理工大学 机电工程学院,甘肃 兰州 730050; 2. 中国人民解放军 32269 部队,甘肃 兰州 730030)

摘 要:基于晶体塑性理论生成的多晶体代表性单元,通过模拟拉伸试验获得具有宏观性能的晶体塑性材料参数;采用累积塑性应变作为疲劳指示因子进行疲劳寿命预测。结果表明:通过疲劳指示因子预测的疲劳寿命在试验获得的疲劳寿命的 ± 2 倍误差范围之内,模拟结果在可接受范围之内。

关键词:晶体塑性模型;疲劳指示因子;疲劳寿命预测

中图分类号:TH114 **文献标志码:**B **文章编号:**1671-5276(2024)05-0118-04

Fatigue Life Prediction of 304 Stainless Steel Based on Crystal Plasticity Model

TIAN Hongwei¹, DUAN Hongyan¹, LIU Yang¹, ZHANG Zengwang¹, HE Hong¹, YUE Shunqiang¹, ZHAO Yingjian¹, LI Jing²

(1. School of Mechanical and Electrical Engineering, Lanzhou University of Technology, Lanzhou 730050, China;

2. PLA Unit 32269, Lanzhou 730030, China)

Abstract:Based on the polycrystalline representative element generated by the crystal plasticity theory, simulating tensile tests are conducted to obtain the crystalline plastic material parameters with macroscopic properties. Cumulative plastic strain is used as the fatigue indicator parameters to predict the fatigue life. The results show that the fatigue life predicted by the fatigue indicator parameter is within the error range of ± 2 times the fatigue life gained by the test, and the simulation result is within the acceptable range.

Keywords:crystal plasticity model; fatigue indicator parameters; fatigue life predication

0 引言

304 不锈钢作为一种用途很广的金属材料,广泛应用于航空、航天、机械设备、化工和轻工业等行业。但由于 304 不锈钢多被应用于较为复杂及多变的工作环境,可能受到循环载荷的影响。疲劳失效主要因为产生许多微裂纹,然后微裂纹扩展合并为主裂纹,最后主裂纹稳定扩展导致结构失效直至完全断裂^[1]。

几十年以来,金属材料的疲劳问题一直是一个重要的研究课题。人们深入研究了材料在不同载荷条件、试样几何形状等的疲劳行为,并提出了各种疲劳理论。不同学者对此进行了大量的研究,但主要是通过宏观模型进行描述的,不能很好地描述宏观变形中的微观变形机制。晶体塑性理论考虑了晶粒在滑移系上的物理本质,有助于理解微观机制与宏观变形之间的关系^[2]。

晶体塑性方法是一种系统的方法,它将微观尺度的材料性能(包括晶粒和形貌)与微观尺度的力学行为联系起来^[3-4]。随着有限元软件的发展,晶体塑性有限元方法已经成为一个强有力的

工具,被广泛应用于各种多晶材料的介观力学模拟之中,用来研究材料的微观结构在外力作用下的演化规律。随着现代工业对安全要求的不断提高,工程部件希望能够具有更长的疲劳寿命,对于高周疲劳,超过 80% 的疲劳寿命将在疲劳萌生阶段被消耗。所以,本文将基于 Voronoi 原理建立晶体塑性多晶体模型,通过模拟单轴拉伸来确定晶体塑性材料参数,采用该模型来预测不同应力幅的疲劳裂纹萌生对寿命的影响。

1 晶体塑性理论

1.1 运动学

在笛卡儿坐标系中考察单晶体的变形。任一质点处的变形可用变形梯度 $\mathbf{F}$ 表示为

$$\mathbf{F} = \frac{\partial \mathbf{x}}{\partial \mathbf{X}} \quad (1)$$

上述变形梯度可分解为

$$\mathbf{F} = \mathbf{F}^e \cdot \mathbf{F}^p \quad (2)$$

式中: $\mathbf{F}^e$ 为变形梯度的弹性分量; $\mathbf{F}^p$ 为塑性分量。

而变形的速率可用速度梯度 $\mathbf{L}$ 表示为

$$\mathbf{L} = \dot{\mathbf{F}}^e + \mathbf{L}^p \quad (3)$$

第一作者简介:田宏伟(1998—),男,山西吕梁人,硕士研究生,研究方向为机械强度理论,2425964517@qq.com。

式中: L^e 表示速度梯度的弹性分量; L^p 表示速度梯度的塑性分量。

其中:

$$L^e = \dot{F}^e \cdot F^{e-1} \quad (4)$$

$$L^p = \sum_{\alpha=1}^N \dot{\gamma}^{(\alpha)} s^{*(\alpha)} m^{*(\alpha)} \quad (5)$$

式中: N 为滑移系的数量; $\dot{\gamma}^{(\alpha)}$ 是滑移系 α 的滑移速率; $s^{*(\alpha)}$ 和 $m^{*(\alpha)}$ 分别为晶体变形时滑移面的滑移方向向量和法线向量。

未变形时,对于滑移系 α ,滑移面的滑移方向的单位向量为 $s^{(\alpha)}$,法线方向的单位向量为 $m^{(\alpha)}$,变形后分别为 $m^{*(\alpha)}$ 和 $s^{*(\alpha)}$,它们之间的关系为:

$$s^{*(\alpha)} = F^e \cdot s^{(\alpha)} \quad (6)$$

$$m^{*(\alpha)} = m^{(\alpha)} \cdot F^{e-1} \quad (7)$$

1.2 硬化准则

基于 Schmid 定律,以率相关黏塑性模型作为多晶体材料的硬化模型,滑移系 α 的滑移速率 $\dot{\gamma}^{(\alpha)}$ 与 Schmid 应力可以定义为

$$\dot{\gamma}^{(\alpha)} = \dot{\gamma}_0^{(\alpha)} \operatorname{sgn}(\tau^{(\alpha)} / g^{(\alpha)}) \left| \tau^{(\alpha)} / g^{(\alpha)} \right|^n \quad (8)$$

式中: $\dot{\gamma}_0^{(\alpha)}$ 代表滑移系 α 中的参考切应变率; $g^{(\alpha)}$ 为描述当前滑移系强度的变量; n 为率敏感系数。

应变硬化用强度 $g^{(\alpha)}$ 的演化来描述:

$$\dot{g}^{(\alpha)} = \sum_{\beta=1}^N h_{\alpha\beta} \dot{\gamma}^{(\beta)} \quad (9)$$

式中 $h_{\alpha\beta}$ 为滑移硬化模量,当 $\alpha=\beta$ 时, $h_{\alpha\beta}=h_{\alpha\alpha}$, $h_{\alpha\alpha}$ 称为自硬化模量;当 $\alpha \neq \beta$ 时, $h_{\alpha\beta}$ 称为潜硬化模量。

自硬化模量描述为

$$h_{\alpha\alpha} = h(\gamma) = h_0 \operatorname{sech}^2 \left| \frac{h_0 \gamma}{\tau_s - \tau_0} \right| \quad (10)$$

式中: h_0 为初始硬化模量; τ_0 为初始临界分解剪应力; τ_s 为饱和流动应力; γ 为所有滑移系上的累积剪切塑性应变。

潜硬化模量用下式来描述:

$$h_{\alpha\beta} = qh(\gamma) (\alpha \neq \beta) \quad (11)$$

式中 q 为常数。

2 多晶体有限元模型

2.1 Voronoi 图

Voronoi 图是将空间进行剖分的一种方法,使空间成为无数多面体的集合。它是根据邻近原则进行切分的,使每一个多面体区域内的任意点到与之对应点目标的距离比任何其他目标都近^[5]。

因它的几何形状接近晶体组织,所以用它来建立材料微观的多晶体模型。Voronoi 图的定义为

$$V(P_i) = \cap_{i \neq j} \{p \mid d(p, p_i) < d(p, p_j)\} \quad (12)$$

$$(i, j = 1, 2, \dots, n)$$

式中: p 和 p_i 为 Voronoi 平面上的互不相同的点; $d(p, p_i)$ 表示 p 与 p_i 的欧几里得距离; $V(P_i)$ 为点 p_i 的 Voronoi 多边形。

基于 Voronoi 原理,本文采用 Neper 软件模块生成的代表性体积单元,模型尺寸为 $300 \mu\text{m} \times 300 \mu\text{m} \times 20 \mu\text{m}$,晶粒数量为 200 个,通过随机函数为多晶体模型赋予了随机取向,代表性体积单元如图 1 所示。

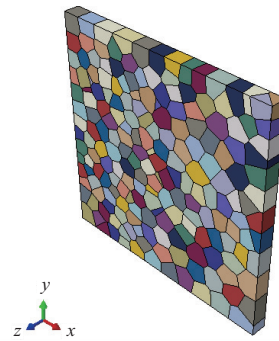


图 1 代表性体积单元

2.2 材料参数

本节使用代表性体积单元来模拟拉伸试验曲线从而标定材料参数。如图 2 所示,单轴拉伸试件规格采用国家标准 GB/T228.1—2010 规定的尺寸。拉伸试验按照位移加载的方式进行加载,加载速率为 0.001 s^{-1} ,拉伸过程采用引伸计进行测量。

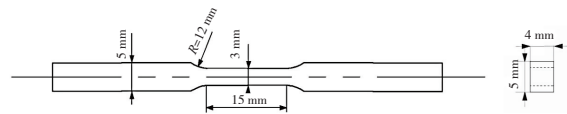


图 2 拉伸试样的尺寸图

在有限元软件模拟拉伸需要对模型进行边界条件的施加。对此结合实际拉伸变形,在模拟拉伸时,约束左下角在 x 、 y 和 z 方向的结点,防止刚体运动,底部的结点固定在 y 方向,在 y 方向上表面施加位移载荷,其他表面不受约束,如图 3 所示。

多晶体模型标定需要均匀化处理,采用代表性体积单元进行多次单轴拉伸模拟,利用 Python 编程对运算结果进行后处理分析,调整待定的晶

体塑性参数,从而求得材料的应力-应变关系。

$$\Sigma = \langle \sigma^g \rangle = \sum_{i=1}^m f^g \sigma^g \quad (13)$$

$$E = \langle \varepsilon^g \rangle = \sum_{i=1}^m f^g \varepsilon^g \quad (14)$$

式中: m 表示单元的数量; f^g 表示各个单元的面积占模型总面积的百分比; σ^g 和 ε^g 分别表示各个单元上计算的应力与应变。304不锈钢的弹性常数选取为 $C_{11} = 209 \text{ GPa}$, $C_{12} = 133 \text{ GPa}$, $C_{44} = 121 \text{ GPa}$ ^[6]。

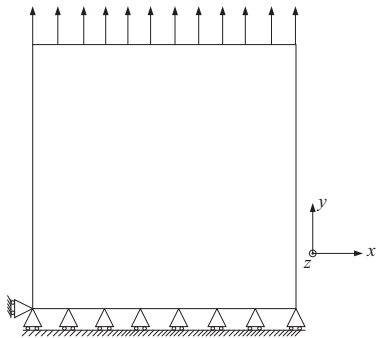


图3 边界条件

晶体塑性本构模型参数通过试错法对比模拟结果与试验结果,当模拟的应力-应变曲线和试验曲线吻合时,标定了晶体塑性参数,如表1所示。图4所示为单轴拉伸模拟与实验结果对比,表明模拟和实验吻合度很高。

表1 304不锈钢的晶体塑性本构参数

h_0/MPa	τ_s/MPa	τ_0/MPa	N	$\dot{\gamma}^\alpha$
360	205	125	50	0.001

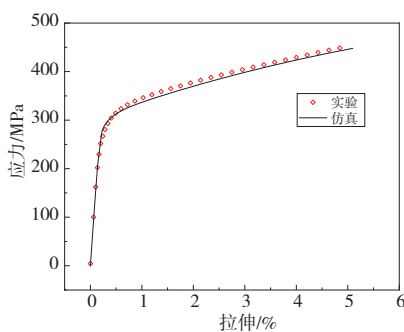


图4 拉伸曲线对比

3 基于晶体塑性理论的疲劳寿命预测

塑性应变和局部应力对于裂纹的萌生起非常大的作用。累积塑性应变 P_{ac} 表示所有滑移系统

中切应力引起的累积塑性变形。可采用基于累积塑性应变准则的疲劳指示因子(FIP)对不同应力幅的304不锈钢的疲劳寿命进行预测。

$$P_{ac} = \int_0^t \sqrt{\frac{2}{3}} L_p : L_p dt \quad (15)$$

$$D_{FIP} = \Delta P_{ac} = P_{ac}|_{N+1} - P_{ac}|_N \quad (16)$$

$$N_f = \frac{P_{ac}|_c}{D_{FIP}} \quad (17)$$

式中: D_{FIP} 是稳定加载循环中 P_{ac} 的增量; $P_{ac}|_c$ 是发生断裂失效时的临界塑性应变; $P_{ac}|_N$ 是 ΔP_{ac} 趋于稳定时所累积的塑性应变。临界塑性应变可用试验获得寿命的数据来确定。

图5所示为晶体塑性有限元模型在应力比 $R=-1$,应力幅度 $\sigma_a=220 \text{ MPa}$ 时,在30个循环载荷之后CPFEM的累积塑性应变分布。SDV126表示累积塑性应变。可以看出,晶粒间的塑性应变分布是不均匀的。这是因为这200个晶粒取向不同导致在受力时晶粒变形不均匀。多晶体的塑性变形应变不仅由晶粒自身的取向决定,还受到与之相邻其他晶粒的影响。为了满足变形协调,容易造成变形不均匀。

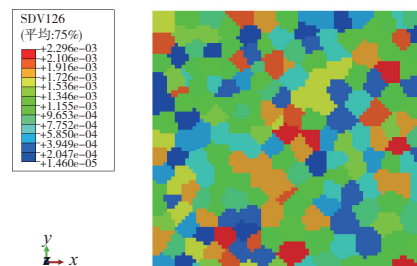


图5 单轴循环载荷下的累积塑性应变分布

对晶体塑性有限元模型的 y 方向循环拉伸-压缩疲劳载荷,应力幅值分别为240 MPa、230 MPa、220 MPa和210 MPa。图6所示的是晶体塑性多晶体模型的累积塑性应变在不同应力幅值的单轴循环载荷下的变化。可以明显看出,塑性应变随着载荷循环的累积而增加;应力幅值越大,累积塑性应变越大。根据GILLNER等^[7]的研究,在最初的几个循环之后,局部累积塑性应变的增量几乎保持不变。因此,在本研究中假定累积塑性切应变为常数增量。

304不锈钢的疲劳试验结果如表2所示。基于累积塑性应变准则的疲劳指示因子(FIP)对多晶体模型预测得到的疲劳寿命和试验结果对比如图7所示。图中显示,此方法预测的疲劳寿命数据点均落在试验结果的 ± 2 倍误差范围之内,表明

基于疲劳指示因子对疲劳寿命预测的结果在可接受的范围之内,这说明此方法具有良好的预测精度。

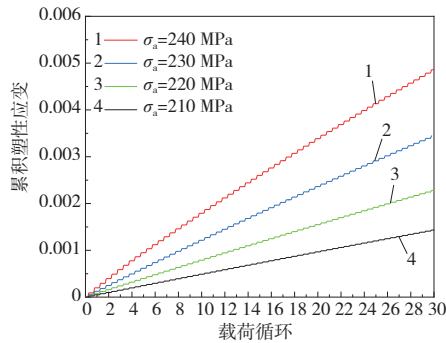


图6 不同应力幅值下循环30次后的累积塑性应变

表2 304 不锈钢的疲劳试验结果

试样序号	应力幅值/MPa	疲劳寿命/次
1	250	23 742
2	250	35 959
3	240	63 863
4	240	64 156
5	230	144 352
6	230	134 673
7	220	5 000 000
8	220	229 268
9	210	5 000 000
10	210	234 424

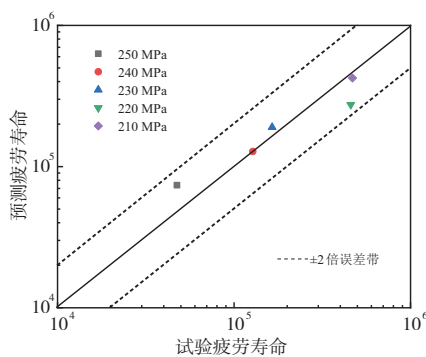


图7 预测和试验结果的疲劳寿命对比

4 结语

1)应用 Voronoi 原理建立代表性体积单元晶体塑性多晶体模型,通过单轴模拟拉伸来拟合宏观拉伸并获得晶体塑性材料参数。

2)疲劳指示因子在循环一定周次后,单周增量处于一个稳定值,使得基于线性累积理论的疲劳指示因子能够更好地用于疲劳裂纹萌生的寿命预测。采用累积塑性应变预测试件的疲劳寿命结果与实验吻合度较好。

参考文献:

- [1] LU J, WEI S, BECKER A A. Material characterisation and finite element modelling of cyclic plasticity behaviour for 304 stainless steel using a crystal plasticity model[J]. International Journal of Mechanical Sciences, 2016,105:315-329.
- [2] 郑松林. 晶体塑性有限元在材料动态响应研究中的应用进展[J]. 高压物理学报,2019,33(3):104-124.
- [3] ROTERS F, EISENLOHR P, HANTCHERLI L, et al. Overview of constitutive laws, kinematics, homogenization and multiscale methods in crystal plasticity finite - element modeling: theory, experiments, applications [J]. Acta Materialia, 2010,58(4):1152-1211.
- [4] YUAN G J, ZHANG X C, CHEN B, et al. Low-cycle fatigue life prediction of a polycrystalline nickel - base superalloy using crystal plasticity modelling approach[J]. Journal of Materials Science & Technology, 2020, 38: 28-38.
- [5] 郑战光,汪兆亮,冯强,等. 一种基于 Voronoi 图的多晶体有限元建模方法[J]. 广西大学学报(自然科学版),2016,41(2):460-469.
- [6] REN Z K, FAN W W, HOU J, et al. A numerical study of slip system evolution in ultra-thin stainless steel foil[J]. Materials, 2019,12(11):1819.
- [7] GILLNER K, MÜNSTERMANN S. Numerically predicted high cycle fatigue properties through representative volume elements of the microstructure[J]. International Journal of Fatigue, 2017,105:219-234.

收稿日期:2023-03-16