

考虑附加强化效应的金属材料多轴低周疲劳寿命预测模型*

MULTIAXIAL LOW CYCLE FATIGUE LIFE PREDICTION MODEL OF THE METAL MATERIAL CONSIDERING ADDITIONAL STRENGTHENING EFFECT

程 琴** 高建雄*** 袁逸萍 刘媛媛 杨浩进 衡 飞

(新疆大学 机械工程学院, 乌鲁木齐 830017)

CHENG Qin GAO JianXiong YUAN YiPing LIU YuanYuan YANG HaoJin HENG Fei

(School of Mechanical Engineering, Xinjiang University, Urumqi 830017, China)

摘要 针对等效应变模型在多轴非比例加载时不能考虑到材料的附加强化作用,而造成疲劳寿命预测误差较大的缺陷,基于临界面理论,将最大剪切应变幅作为主要的疲劳损伤参量。同时,将相位差、最大法向应力和剪切应力组成一个附加损伤系数作为次要损伤参量,来反映金属材料在多轴非比例加载下产生的附加强化效应;损伤系数中最大剪切面上的剪切应力对最大法向应力进行归一化处理来反映两个应力相互作用对疲劳寿命的影响。提出的模型在不引入额外的经验拟合常数的情形下,不仅保留了等效应变模型参数的所有优点,还有助于发现裂纹产生的机制和反映裂纹延伸方向。采用6种均为薄壁圆管的金属材料数据对提出的模型和3种经典模型进行数据验证,对比分析后的结果显示,提出的模型相对另外3种模型,得到的预测结果精确度更高且数据分布更稳定。

关键词 多轴疲劳 等效应变 非比例附加强化 剪切力 相位差

中图分类号 TB114.3

Abstract For the equivalent strain model, the additional strengthening effect of the material cannot be considered during multiaxial non-proportional loading, resulting in a defect with a large error in fatigue life prediction, based on the pro-interface theory, the maximum shear strain amplitude was used as the main fatigue damage parameter. At the same time, the phase difference, maximum normal stress and shear stress were composed of an additional damage coefficient as a secondary damage parameter to reflect the additional strengthening effect of the metal material under multiaxial non-proportional loading, and the shear stress on the maximum shear surface in the damage coefficient normalized the maximum normal stress to reflect the influence of the interaction between the two stresses on the fatigue life. The proposed model not only retains all the advantages of the equivalent model parameters without introducing additional empirical fitting constants, but also helps to discover the mechanism of crack generation and reflect the direction of crack elongation. The proposed model and three classical models were verified by using six kinds of metal material data of thin-walled round tubes, after analyzing the data verification results of each model, it is found that the prediction results of the proposed model have higher accuracy and more stable data distribution.

Key words Multiaxial fatigue; Equivalent strain; Non-proportional additional reinforcement; Shear force; Phase difference

Corresponding author: GAO JianXiong, E-mail: jianxiongga0888@163.com

The project supported by the National Natural Science Foundation of China (No. 52065062), the Key Research and Development Program of Xinjiang Uygur Autonomous Region (No. 2021B01003), and the Natural Science Foundation of Xinjiang Uygur Autonomous Region (No. 2020D01C056).

Manuscript received 20221221, in revised form 20230203.

0 引言

研究表明,大多数工程结构的破坏形式为疲劳失

效。各行业为了提高工程构件的实用性和安全性,早期对单轴疲劳进行了大量的实验。但是,由于外载荷复杂性,很多工程构件均为多轴应力状态,特别是在

*20221221收到初稿,20230203收到修改稿。国家自然科学基金项目(52065062),新疆维吾尔自治区重点研发项目(2021B01003),新疆维吾尔自治区自然科学基金项目(2020D01C056)资助。

**程 琴,女,1998年生,四川荣县人,汉族,新疆大学硕士研究生,主要研究方向为疲劳寿命预测。

***高建雄(通信作者),男,1988年生,甘肃庆阳人,汉族,新疆大学副教授,硕士研究生导师,主要研究方向为疲劳强度与寿命预测、结构及系统可靠性评估。

多轴非比例加载状况下,会使金属材料的应变主轴部分开始转动,使金属材料内部多个滑移系运动,位错结构也受影响,导致稳定性变差,进而使金属材料内部形成附加的强化效应,最后造成寿命的降低^[1]。因此,在多轴非比例载荷下对工程复杂结构失效情况的研究,有着十分重要的工程利用价值^[2-4]。

目前,在进行多轴疲劳寿命预测时,用到的方法主要有3类^[5-7]:等效应变法、能量法、临界面法。近年来,临界面法被认为是较为有效的一类方法,比较前两类方法的缺点,其优势主要是将应力、应变作为损伤参数来考察多轴疲劳的损伤面,有助于发现裂纹产生的机制和反映裂纹延伸方向^[8-9],有着一定的物理含义且在多轴低周加载下预测精度高。大量学者基于临界面法从不同角度提出了不同的预测模型。BROWN M W等^[10]745-755将临界平面上的切应变和正应变作为预测疲劳寿命的损伤参数,同时把临界平面的概念代入了多轴低周疲劳领域中。KANDIL F A等^[11]203-205将一个加载循环过程中具有最大剪切应变的水平面描述为临界面,将BROWN M W等^[10]745-755给出的参数加以线性简化,得到了著名的Kandil-Brown-Miller(KBM)模型。FATEMI A等^[12]149-158提出将法向应力最大值代入模型中来考虑模型在非比例加载下的附加强化效应,提出了Fatemi-Socie(FS)模型。GATES N R等^[13]研究了多轴疲劳损伤中剪切应力与法向应力的相互作用对寿命的影响,提出将FS模型中的最大法向应力对剪切力进行归一化,在预测精度提高的同时使疲劳破坏的物理意义更加明确。李静等^[14]考虑了等效应变模型中在多轴非比例加载环境下相位差对疲劳寿命的重要作用,大大提高了等效应变模型在多轴非比例加载环境下的预测精确度。LAZZARIN P等^[15]将基于剪应力的多轴疲劳评估方法扩展到低周疲劳中,考虑同一平面的最大剪切应力振幅和最大法向应力,得到了较好的预测结果。早期提出的经典模型大多只考虑了应变对疲劳破坏的作用,然而,裂纹的萌生和扩展与剪切和法向应力/应变分量的相互作用机制有关。如果仅以最大剪切应变为损伤参量不能完全反映非比例附加硬化效应和疲劳裂纹扩展的物理机制。近年来,诸多学者在工程构件处于多轴加载,尤其是在非比例加载下分别考虑了相位差、法向应力和剪切应力相互作用对疲劳寿命的影响后,使模型的预测能力在不同程度上有所提高。

因此,针对等效应变模型处于多轴非比例加载情况时没有考虑附加强化的效果,导致疲劳寿命预测误差较大的缺点。基于临界面理论,同时考虑相位差、

最大法向应力和剪切应力,引入一个附加损伤系数进行修正,在不引入任何额外的经验拟合常数的情况下,保持了等效应变模型参数的所有优点,充分表征了材料裂纹的萌生和扩展机制。

1 临界面的确定

承受拉-扭载荷的薄壁圆管试件的厚度远小于外径时,最大的损伤平面始终垂直于外部平面,如图1所示。

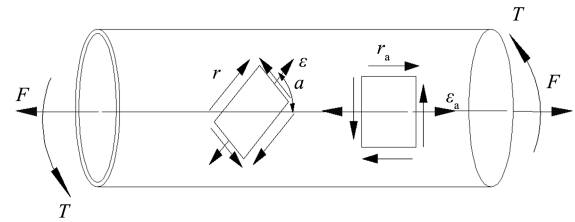


图1 拉-扭试件的应变状态

Fig. 1 Strain state of the tension-torsion test piece

拉伸-扭转载荷下的应变状态可表示为^[16]

$$\sigma = \begin{bmatrix} \sigma_x & \tau_{xy} & 0 \\ \tau_{xy} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}, \varepsilon = \begin{bmatrix} \varepsilon_x & \gamma_{xy}/2 & 0 \\ \gamma_{xy}/2 & -\nu_{\text{eff}}\varepsilon_x & 0 \\ 0 & 0 & -\nu_{\text{eff}}\varepsilon_x \end{bmatrix} \quad (1)$$

式中, σ_x 为材料受到的轴向应力; τ_{xy} 为材料受到的剪切应力; ε_x 为材料受到的轴向应变; γ_{xy} 为材料受到的剪切应变。

当材料受到多轴载荷时,应力-应变状态应由弹塑性泊松比 ν_{eff} 表示, ν_{eff} 定义为

$$-\nu_{\text{eff}} = \frac{\nu_e \varepsilon_e + \nu_p \varepsilon_p}{\varepsilon_e + \varepsilon_p} \quad (2)$$

式中, ε_e 为与材料弹性有关的应变; ε_p 为与材料塑性有关的应变; ν_e 为与材料弹性有关的泊松比; ν_p 为与材料塑性有关的泊松比。

将所选试件的任意平面和试件轴向形成的夹角定义为 θ ,则可根据已知的 θ ,将任意一个平面上的轴向应力、应变和剪切应变表示为

$$\sigma_\theta = \frac{\sigma_x}{2} + \frac{\sigma_x}{2} \cos 2\theta + \frac{\tau_{xy}}{2} \sin 2\theta \quad (3)$$

$$\varepsilon_\theta = \frac{1 - \nu_{\text{eff}}}{2} \varepsilon_x + \frac{1 + \nu_{\text{eff}}}{2} \varepsilon_x \cos 2\theta + \frac{\gamma_{xy}}{2} \sin 2\theta \quad (4)$$

$$\frac{\gamma_\theta}{2} = \frac{1 + \nu_{\text{eff}}}{2} \varepsilon_x \sin 2\theta - \frac{\gamma_{xy}}{2} \cos 2\theta \quad (5)$$

使用式(3)~式(5)可获得拉伸型和剪切型临界平面上的应力-应变响应。在正弦条件加载下,任意平面上剪切型的应变变程最大值以及法向上正应变的变程可以表示为

$$\Delta\gamma_{\max} = \varepsilon_a \{ [\lambda \cos 2\theta \cos \varphi - (1 - \nu_{\text{eff}}) \sin 2\theta]^2 + (\lambda \cos 2\theta \sin \varphi)^2 \}^{1/2} \quad (6)$$

$$\Delta \varepsilon_n = \frac{1}{2} \varepsilon_a \{ [2(1 + \nu_{\text{eff}}) \cos^2 \theta - 2\nu_{\text{eff}} + \lambda \sin 2\theta \cos \varphi]^2 + (\lambda \sin 2\theta \sin \varphi)^2 \}^{1/2} \quad (7)$$

$$\lambda = \gamma_a / \varepsilon_a \quad (8)$$

式中, φ 为相位差; λ 为拉-扭加载条件下得到的切应变和法向应变之比; γ_a 为得到的剪切应变自身加载幅值; ε_a 为得到的轴向应变自身加载幅值。

根据已经求得的最大剪切应变的变程 $\Delta \gamma_{\text{max}}$ 对位向角 θ 进行求导计算, 位向角 θ 的表达式为

$$\theta = \frac{1}{4} \arctan^2 \frac{\lambda(1 + \nu_{\text{eff}}) \cos \varphi}{(1 + \nu_{\text{eff}})^2 - \lambda^2} \quad (9)$$

通过式(6)~式(10)求薄壁管状试件的临界面的方向和控制疲劳损伤时所需的应变参数, 并选择具备最大剪切应变幅度的水平面为模型的临界平面。

2 经典临界面理论

2.1 等效应变模型

解决工程中的单轴拉伸疲劳问题时, 通常建立材料的宏观力学相关参数和寿命之间的关系, 将等效应变方程应用于寿命预测中^[17], 一般的形式可表示为

$$\frac{\Delta \varepsilon_{\text{eq}}}{2} = \frac{\sigma'_f}{E} (2N_f)^b + \varepsilon'_f (2N_f)^c \quad (10)$$

式中, $\Delta \varepsilon_{\text{eq}}$ 为所选临界面上将应变经过等效后得到一个应变幅度; σ'_f 、 b 分别为与材料的疲劳强度相关的系数以及指数; ε'_f 、 c 分别为与材料的疲劳延性相关的系数以及指数; N_f 为材料经过实验后得到的疲劳寿命值; E 为与材料自身特性相关的弹性模量。

2.2 FS 模型

FATEMI A 等^[12]^[159-165] 把临界面上的最大法向应力值当成次要的损伤参数, 该损伤参数在反映材料的附加强化效应的同时, 还能够以具有物理意义的方式解释平均应力的影响, 其表达式为

$$\frac{\Delta \gamma_{\text{max}}}{2} \left(1 + k \frac{\sigma_{n, \text{max}}}{R_e} \right) = \frac{\tau'_f}{G} (2N_f)^{b_0} + \gamma'_f (2N_f)^{c_0} \quad (11)$$

式中, $\Delta \gamma_{\text{max}}$ 为临界面上剪切型的应变变程最大值; $\sigma_{n, \text{max}}$ 为临界面上法向应力最大值; k 为与材料自身特性有关的实验经验参数, k 值在实验资料不足时可取为 1^[18]; R_e 为与材料自身特性有关的屈服强度; τ'_f 、 b_0 分别为与材料自身特性有关的剪切型表示疲劳强度相关的系数以及指数; γ'_f 、 c_0 分别为与材料自身特性有关的剪切型表示疲劳延性相关的系数以及指数; G 为材料的剪切模量。

2.3 KBM 模型

KANDIL F A 等^[11]^[206-210] 以任意具有最大剪切应变范围的受载水平面作为临界平面, 并同时考察了临界平面上法向应力范围的影响, 其表达式为

$$\frac{\Delta \gamma_{\text{max}}}{2} + s^* \Delta \varepsilon_n = [1 + \nu_e + (1 - \nu_e) s^*] \frac{\sigma'_f}{E} (2N_f)^b + [1 + \nu_p + (1 - \nu_p) s^*] \varepsilon'_f (2N_f)^c \quad (12)$$

式中, s^* 为模型经验系数; $\Delta \varepsilon_n$ 为轴向应变范围。

3 基于临界面法的多轴疲劳损伤模型

3.1 法向应力、剪应力对疲劳损伤的影响

45 钢的法向应力、法向应变、剪切应力和剪切应变在比例路径和非比例路径下相对于 θ 的变化趋势, 如图 2 所示。

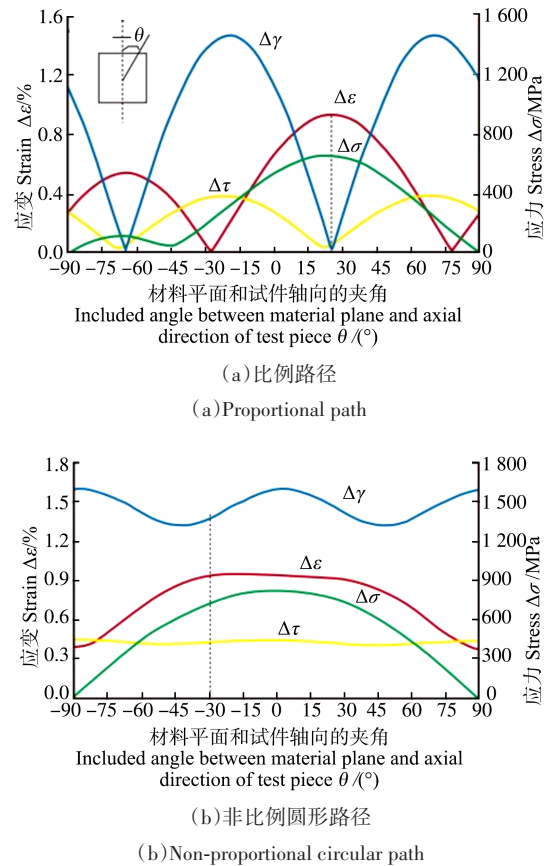


图 2 应力和应变范围随位向角 θ 的变化

Fig. 2 Variations of stress and strain range with the change of angle θ

如图 2(a) 所示, 在比例加载路径下, 法向应变和法向应力在某个同一角度时, 两者都存在最大值。由此可知, 轴向应力/应变对材料疲劳寿命的影响占主要影响作用。如图 2(b) 所示, 在非比例圆形加载路径下, 此时平面上的剪切应变和应力与比例路径下相反, 最大法向应变平面 (以虚线表示) 上, 不只法向应力、应变值较大, 剪切应力、应变值也相对较高。综上所述, 在多轴低周加载条件下, 除了有学者已经提出的最大法向应力是疲劳破坏的影响因素外, 剪切应力的作用对疲劳损伤的贡献也不容忽视, 在非比例加载下对多轴疲劳寿命有一定的影响。

将最大法向应力 $\sigma_{n, \text{max}}$ 和剪切力 $\Delta \tau$ 组合成一个

具有明确的物理意义的影响因子 η ,表达式为

$$\eta = \sqrt{1 + \frac{\sigma_{n,\max}}{2G\Delta\gamma}} \quad (13)$$

式中,剪切应力范围使用 $G\Delta\gamma$ 代替 $\Delta\tau$,来说明材料本构行为的变化对疲劳损伤的影响。在弹性变形下, $G\Delta\gamma$ 在较长寿命下等于 $\Delta\tau$,但当循环或非比例硬化发生时,按基于应变的数量归一化 $\sigma_{n,\max}$ 预测损伤增加。当两个应力分量随材料硬化成比例变化时会导致相同的损伤值。当剪切应变范围接近零时,可能计算出较大的损伤值,如果通过对产生疲劳所需的剪切应变范围施加适当的限制后,则可以克服这个数学问题。

3.2 相位差对疲劳损伤的影响

SHANG D G等^[19]建议首先选取具有最大剪切的应变幅的平面,同时此平面中的法向应变为最大值,满足这两点的平面视为临界平面,建立疲劳损伤模型时将最大剪应变的应变幅作为首要损伤参数。采用等效变准则把临界平面上的切应变最大值 $\Delta\gamma_{\max}$ 与法向应变的变程 ε_n^* 组成等效变幅,其表达式为

$$\frac{\Delta\varepsilon_{\text{eq}}}{2} = \sqrt{\varepsilon_n^{*2} + \frac{\Delta\gamma_{\max}^2}{12}} \quad (14)$$

式中, ε_n^* 为法向应变的变程,表达式为

$$\varepsilon_n^* = \Delta\varepsilon_n (1 + \cos\varphi)/2 \quad (15)$$

式中, φ 为相位角。

此模型中仅存在应变分量反应疲劳损伤,在单轴和比例加载下有着较好的预测精度,但在多轴非比例加载下,若相位差呈现不断增大的趋势,则会导致寿命预测的误差逐渐增大,具有一定的局限性。因此,建立一个与相位差有关的影响因子 ξ ,来反映多轴非比例加载下的相位差的变化对寿命产生的影响,具体表达式为

$$\xi = \sqrt{1 + \sin\frac{\varphi}{2}} \quad (16)$$

将两个影响因子组合成一个反映材料附加强化效应的非比例附加损伤系数 f_{np} ,具体表达式为

$$f_{\text{np}} = \sqrt{\eta\xi} = \sqrt{\left(1 + \frac{\sigma_{n,\max}}{2G\Delta\gamma}\right)\left(1 + \sin\frac{\varphi}{2}\right)} \quad (17)$$

将45钢的数据代入得到非比例附加损伤系数 f_{np} 随相位差增长的变化趋势,如图3所示。

由图3可知,非比例附加损伤系数 f_{np} 随着相位差的增大而增大,有效地表征了多轴非比例加载下相位差对疲劳寿命的影响。经验证后发现,其他5种材料均以不同程度随着相位差的增大而增大。同时,曲线的斜率能够直观地反映材料的附加强化程度是否明显。

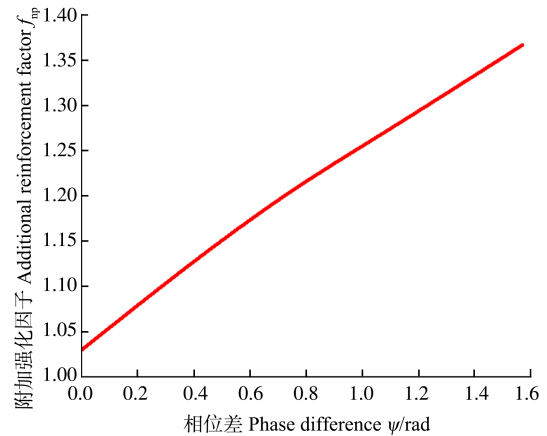


图3 45钢的非比例附加损伤系数随相位差的变化

Fig. 3 Change of non-proportional additional damage coefficient of 45 steel with phase difference

将所提出的附加损伤系数 f_{np} 加入式(14)中加以修正,得到了一个新的能够反映材料附加强化效应的疲劳寿命预测模型,表达式为

$$\frac{\Delta\varepsilon_{\text{eq}}}{2} \sqrt{\left(1 + \frac{\sigma_{n,\max}}{2G\Delta\gamma}\right)\left(1 + \sin\frac{\varphi}{2}\right)} = A \frac{\sigma_f'}{E} (2N_f)^b + B \varepsilon_f' (2N_f)^c \quad (18)$$

式中, $\Delta\varepsilon_{\text{eq}}/2$ 为等效应变的变程。最大法向应力 $\sigma_{n,\max}$ 可用疲劳寿命的函数来表示^{[17]147-156}:

$$\sigma_{n,\max} = \frac{\sigma_f'}{2} (2N_f)^b \quad (19)$$

A、B计算式为

$$A = \frac{1 + \nu_e}{\sqrt{3}} + 1 - \nu_e \quad (20)$$

$$B = \frac{1 + \nu_p}{\sqrt{3}} + 1 - \nu_p \quad (21)$$

4 数据验证

选用6种均为应变控制加载的薄壁圆管试件,6种材料分别为纯钛^[20]、304不锈钢^[21-22]、410不锈钢^[23]、45钢^[24]、GH4169^[25-26]、7075-T651^[27-28],将材料数据代入提出的模型和3种经典模型中进行数据验证。

与材料自身特性有关的力学性能、疲劳性能参数分别如表1和表2所示。

将6种材料数据分别代入各模型中得到预测寿命和实验寿命之间的对比结果,如图4所示。

由图4(a)可知,等效应变模型的预测结果整体上都在偏于危险的一侧,只有极少数点位于3倍因子内。如图4(b)和图4(c)所示,FS模型与KBM模型的预测结果中有部分数据点位于3倍因子以内,但也有相当一部分的数据点处于3倍因子之外,整体的预测结果较分散。如图4(d)所示,提出的模型的点几乎

表 1 材料的力学性能参数

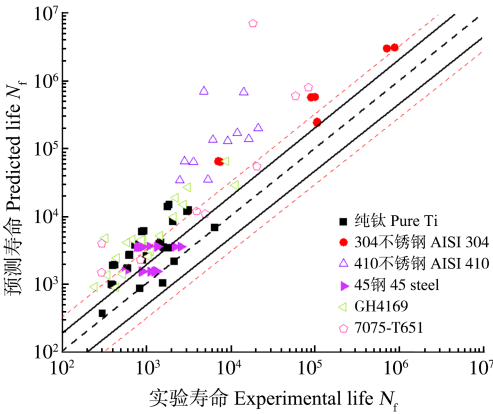
Tab. 1 Mechanical property parameter of materials

材料 Material	弹性模量 Modulus of elasticity E/GPa	屈服强度 Yield strength R_e/MPa	泊松比 Poisson's ratio	材料经验系数 Material empirical coefficient k	模型经验系数 Model empirical coefficient s^*
纯钛 Pure Ti	112	475	0.4	0.6	0.3
304 不锈钢 AISI 304	185	352	0.3	0.85	0.6
410 不锈钢 AISI 410	200	205	0.3	1	0.6
45 钢 45 steel	190	370	0.3	1	0.7
GH4169	182	1 000	0.325	0.47	0.3
7075-T651	70.7	501	0.33	0.78	0.3

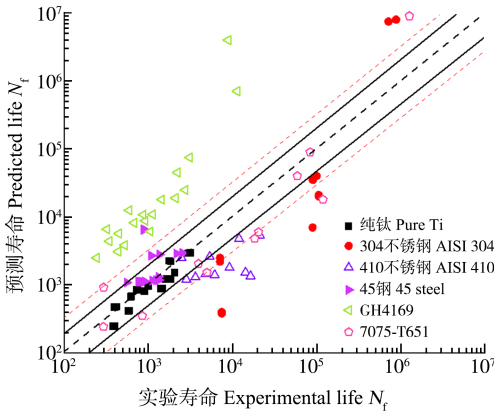
表 2 材料的疲劳性能参数

Tab. 2 Fatigue property parameter of materials

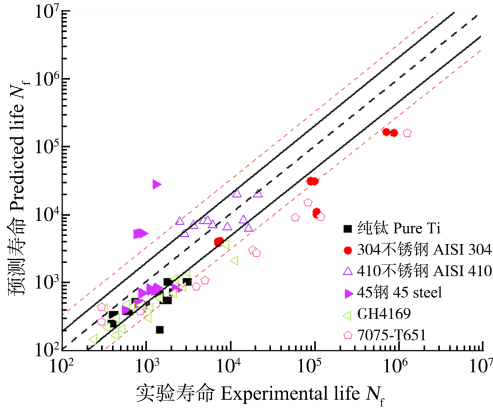
材料 Material	疲劳强度系数 Fatigue strength coefficient σ'_f/MPa	疲劳延性系数 Fatigue ductility coefficient $\varepsilon'_f/\text{MPa}$	疲劳强度指数 Fatigue strength exponent b	疲劳延性指数 Fatigue ductility exponent c
纯钛 Pure Ti	647	0.548	-0.033	-0.646
304 不锈钢 AISI 304	1 000	0.171	-0.114	-0.402
410 不锈钢 AISI 410	705	0.157	-0.058	-0.44
45 钢 45 steel	843	0.327	-0.104 7	-0.545 8
GH4169	1 565.2	0.162	-0.086	-0.58
7075-T651	540.5	0.22	-0.08	-0.542



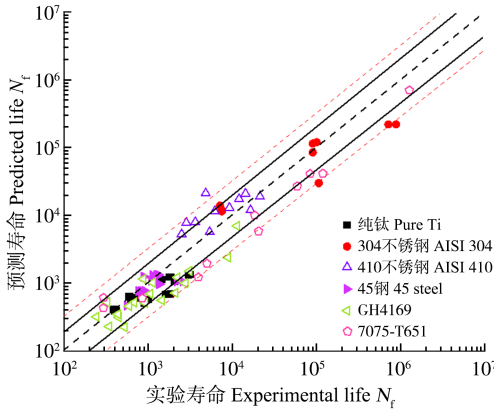
(a) 等效应变模型
(a) Equivalent strain model



(b) FS 模型
(b) FS model



(c) KBM 模型
(c) KBM model



(d) 提出的模型
(d) Proposed model

图 4 预测寿命与实验寿命对比

Fig. 4 Comparison between predicted life and experimental life

都在 3 倍因子内, 预测数据结果分布紧凑, 相对于另外 3 种模型的预测精度更好。

5 分析与讨论

为了检验文中提出模型的正确性和准确性, 采用统计学的方法来研究 4 种多轴疲劳寿命模型的误差, 本研究定义平均误差因子 $\bar{E}$ 如下:

$$E_i = \begin{cases} N_p/N_t, N_p \geq N_t \\ N_t/N_p, N_p < N_t \end{cases}, \bar{E} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n E_i \quad (22)$$

式中, N_p 为所选模型的寿命预测值; N_t 为所选模型的寿命实验值; n 为代入所选模型中总的寿命个数。在比例和非比例加载条件下, 各个模型计算得到平均误差因子 $\bar{E}$ 的结果, 如表 3 和表 4 所示。

表 3 比例加载下的平均误差因子 $\bar{E}$

Tab. 3 Average error factor $\bar{E}$ under proportional loading

材料 Material	等效应变模型 Equivalent strain model	FS 模型 FS model	KBM 模型 KBM model	提出的模型 Proposed model
纯钛 Pure Ti	3.3	1.18	1.65	1.91
304 不锈钢 AISI 304	3.09	6.48	2.34	3.57
410 不锈钢 AISI 410	2.35	2.45	1.79	1.93
45 钢 45 steel	1.53	1.24	2.85	2.23
GH4169	2.24	2.99	2.06	1.89
7075-T651	3.05	3.86	6.21	2.5

表 4 非比例加载下的平均误差因子 $\bar{E}$

Tab. 4 Average error factor $\bar{E}$ under non-proportional loading

材料 Material	等效应变模型 Equivalent strain model	FS 模型 FS model	KBM 模型 KBM model	提出的模型 Proposed model
纯钛 Pure Ti	4.34	1.36	2.52	1.19
304 不锈钢 AISI 304	7.73	2.79	7.51	1.52
410 不锈钢 AISI 410	4.12	1.96	2.96	3.15
45 钢 45 steel	2.05	1.97	1.55	1.19
GH4169	4.14	2.31	2.5	1.79
7075-T651	8.36	2.85	5.08	2.14

由表 3、表 4 可知, 等效应变模型和 KBM 模型在比例加载时的预测效果良好。但在非比例加载下两者的平均误差因子 $\bar{E}$ 值相对于比例加载下增大, 预测误差增大, 预测能力显著下降。FS 模型和提出的模型相对于前两种模型预测能力更好, 但提出模型的平均误

差因子值 $\bar{E}$ 更稳定, 集中在 2 倍因子附近, 预测效果良好。

6 结论

引入由相位差、剪应力和最大法向应力组成的附加损伤系数对等效应变模型进行修正, 对比研究了 3 个典型多轴疲劳寿命预测模型, 并通过对不同种类的薄壁圆管型金属材料试件的多轴疲劳测试数据加以分析检验, 得出了如下结论:

1) 通过引入临界面上的相位差、剪应力和最大法向应力共同组成了一个能够反映金属材料在多轴非比例加载下的附加强化效应的附加强化损伤系数, 使疲劳寿命预测结果的精度大大提升, 修正过后的模型保留了等效应变模型中参数的全部优点和物理解释, 且没有引入任何额外的经验拟合常数。

2) 将 6 种不同材料的数据分别代入 4 种模型后发现, 等效应变模型的预测误差最大, KBM 模型次之。相对于 3 种模型中预测能力较好的 FS 模型, 本文提出的模型的数据点分布更加紧凑, 大部分数据点都位于 2 倍因子附近。

3) 采用统计学方法对比各模型的误差因子值 $\bar{E}$, 发现提出的模型引入附加强化损伤系数后, 得到的预测精度相对另外 3 种模型更高, 且分散性较小。

参考文献 (References)

- [1] LI J, ZHANG P Z, SUN Q, et al. A modification of Shang-Wang fatigue damage parameter to account for additional hardening [J]. International Journal of Fatigue, 2010, 32(10): 1675-1682.
- [2] 卢梦凯, 张洪武, 郑勇刚. 应变局部分化分析的嵌入强间断多尺度有限元法[J]. 力学学报, 2017, 49(3): 649-658.
LU MengKai, ZHANG HongWu, ZHENG YongGang. Embedded strong discontinuity model based multiscale finite element method for strain localization analysis [J]. Chinese Journal of Theoretical and Applied Mechanics, 2017, 49(3): 649-658 (In Chinese).
- [3] 朱文洁, 吕俊男, 李 群. 基于 M 积分的脆性材料微缺陷等效损伤面积/体积表征[J]. 力学学报, 2018, 50(2): 297-306.
ZHU WenJie, LÜ JunNan, LI Qun. The calibration of microdefects induced equivalent damage area/volume of brittle materials by using the M-integral [J]. Chinese Journal of Theoretical and Applied Mechanics, 2018, 50(2): 297-306 (In Chinese).
- [4] 古 斌, 郭宇立, 李 群. 基于构型力断裂准则的裂纹与夹杂干涉问题[J]. 力学学报, 2017, 49(6): 1312-1321.
GU Bin, GUO YuLi, LI Qun. Crack interacting with an individual inclusion by the fracture criterion of configurational force [J]. Chinese Journal of Theoretical and Applied Mechanics, 2017, 49(6): 1312-1321 (In Chinese).
- [5] 张小元, 张克实, 黄世鸿, 等. Q235 结构钢低周多轴疲劳寿命评估方法的实验研究[J]. 广西大学学报(自然科学版), 2013, 38(4): 982-990.

- ZHANG XiaoYuan, ZHANG KeShi, HUANG ShiHong, et al. Experimental research on life evaluation for low cycle multiaxial fatigue of Q235 steel [J]. Journal of Guangxi University (Natural Science Edition), 2013, 38(4): 982-990 (In Chinese).
- [6] YU Z Y, ZHU S P, LIU Q, et al. A new energy-critical plane damage parameter for multiaxial fatigue life prediction of turbine blades [J]. Materials (Basel), 2017, 10(5): E513.
- [7] BANVILLET A, LAGODA T, MACHA E, et al. Fatigue life under non-Gaussian random loading from various models [J]. International Journal of Fatigue, 2004, 26(4): 349-363.
- [8] INCE A. Computational multiaxial fatigue modelling for notched components [J]. Modeling and Numerical Simulation of Material Science, 2013, 3(3A): 14-22.
- [9] 赵而年, 瞿伟康, 周 强. 基于临界面损伤参量的金属材料多轴疲劳寿命预测 [J]. 华南理工大学学报 (自然科学版), 2017, 45(2): 130-136.
- ZHAO ErNian, QU WeiLian, ZHOU Qiang. Multiaxial fatigue life prediction of metallic materials based on critical plane damage parameter [J]. Journal of South China University of Technology (Natural Science Edition), 2017, 45(2): 130-136 (In Chinese).
- [10] BROWN M W, MILLER K J. A theory for fatigue failure under multiaxial stress-strain conditions [J]. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, 1973, 187(1): 745-755.
- [11] KANDIL F A, BROWN M W, MILLER K J. Biaxial low cycle fatigue fracture of 316 stainless steel at elevated temperatures [J]. The Metal Society, 1982, 280: 203-210.
- [12] FATEMI A, SOCIE D F. A critical plane approach to multiaxial fatigue damage including out-of-phase loading [J]. Fatigue & Fracture of Engineering Materials & Structures, 1988, 11(3): 149-165.
- [13] GATES N R, FATEMI A. On the consideration of normal and shear stress interaction in multiaxial fatigue damage analysis [J]. International Journal of Fatigue, 2017, 100: 322-336.
- [14] 李 静, 孙 强, 李春旺, 等. 一种新的多轴疲劳寿命预测方法 [J]. 机械工程学报, 2009, 45(9): 285-290.
- LI Jing, SUN Qiang, LI ChunWang, et al. New prediction method for multiaxial fatigue life [J]. Journal of Mechanical Engineering, 2009, 45(9): 285-290 (In Chinese).
- [15] LAZZARIN P, SUSMEL L. A stress-based method to predict lifetime under multiaxial fatigue loadings [J]. Fatigue & Fracture of Engineering Materials & Structures, 2003, 26(12): 1171-1187.
- [16] LIU J H, LÜ X, WEI Y B, et al. A novel model for low-cycle multiaxial fatigue life prediction based on the critical plane-damage parameter [J]. Science Progress, 2020, 103(3): 36850420936220.
- [17] 尚德广, 王德俊. 多轴疲劳强度 [M]. 北京: 科学出版社, 2007: 82-156.
- SHANG DeGuang, WANG DeJun. Multiaxial fatigue strength [M]. Beijing: Science Press, 2007: 82-156 (In Chinese).
- [18] JIANG Y Y, HERTEL O, VORMWALD M. An experimental evaluation of three critical plane multiaxial fatigue criteria [J]. International Journal of Fatigue, 2007, 29(8): 1490-1502.
- [19] SHANG D G, WANG D J. A new multiaxial fatigue damage model based on the critical plane approach [J]. International Journal of Fatigue, 1998, 20(3): 241-245.
- [20] SHAMSAEI N, GLADSKYI M, PANASOVSKYI K, et al. Multiaxial fatigue of titanium including step loading and load path alteration and sequence effects [J]. International Journal of Fatigue, 2010, 32(11): 1862-1874.
- [21] SOCIE D F. Multiaxial fatigue damage models [J]. Journal of Engineering Materials and Technology, 1987, 109(4): 293-298.
- [22] 姜 潮, 邓 群, 李博川. 考虑非比例附加损伤的多轴低周疲劳寿命模型 [J]. 力学学报, 2015, 47(4): 634-641.
- JIANG Chao, DENG Qun, LI BoChuan. A new multiaxial fatigue life prediction model based on the nonproportional additional damage [J]. Chinese Journal of Theoretical and Applied Mechanics, 2015, 47(4): 634-641 (In Chinese).
- [23] ALBINMOUSA J, ADINOYI M J, MERAH N. Multiaxial low-cycle-fatigue of stainless steel 410 alloy under proportional and non-proportional loading [J]. International Journal of Pressure Vessels and Piping, 2021, 192: 104393.
- [24] SHANG D G, SUN G Q, DENG J, et al. Multiaxial fatigue damage parameter and life prediction for medium-carbon steel based on the critical plane approach [J]. International Journal of Fatigue, 2007, 29(12): 2200-2207.
- [25] 徐 桑, 朱顺鹏, 郝永振, 等. 基于临界面-损伤参量法的高压涡轮盘多轴疲劳寿命预测 [J]. 航空学报, 2018, 39(9): 82-89.
- XU Shen, ZHU ShunPeng, HAO YongZhen, et al. Multiaxial fatigue life prediction of an HPT disc based on critical plane-damage parameter [J]. Acta Aeronautica et Astronautica Sinica, 2018, 39(9): 82-89 (In Chinese).
- [26] SUN G Q, SHANG D G. Prediction of fatigue lifetime under multiaxial cyclic loading using finite element analysis [J]. Materials & Design, 2010, 31(1): 126-133.
- [27] ZHAO T W, JIANG Y Y. Fatigue of 7075-T651 aluminum alloy [J]. International Journal of Fatigue, 2008, 30(5): 834-849.
- [28] LI J, WANG X, LI K, et al. A modification of Matak criterion for considering the effect of mean shear stress under high cycle fatigue loading [J]. Fatigue & Fracture of Engineering Materials & Structures, 2021, 44(7): 1760-1782.