

表面缺口试件局部应变评估与疲劳寿命预测

丁明超¹ 边曙光¹ 才 龙² 黄嘉兴¹ 杨利坡¹ 王黎明³

(1. 燕山大学 机械工程学院, 秦皇岛 066004)

(2. 秦皇岛优益重工科技有限公司, 秦皇岛 066200)

(3. 中国铁路沈阳局集团有限公司山海关维修段, 秦皇岛 066200)

摘要:【目的】Neuber 准则和等效应变能密度(Equivalent Strain Energy Density, ESED)准则是目前评估缺口应变、开展疲劳寿命预测的基础理论,但鲜见关于缺口根部剩余厚度对表面缺口试件疲劳寿命预测结果的影响的研究报道。优化缺口试件疲劳寿命预测精度,对 TC4 钛合金表面缺口试件的疲劳寿命评估至关重要。【方法】首先,设计缺口位于基体表面的 TC4 钛合金表面缺口试件,并对其开展疲劳试验,得到疲劳寿命的试验值;其次,分别采用 Neuber 准则和 ESED 准则,计算缺口处的应变,结合 Manson-Coffin 公式开展疲劳寿命预测,并检验基于上述 2 种准则的疲劳寿命预测精度;最后,对 ESED 准则进行修正,并对基于修正的 ESED 准则的疲劳寿命预测结果的精度进行分析。【结果】基于 Neuber 准则的疲劳寿命预测结果整体分布在 2 倍离散带以内,未出现过于保守的预测现象,且随着缺口宽度的增大,预测结果由偏安全至偏危险;基于未修正的 ESED 准则的疲劳寿命预测结果均分布于 8 倍离散带以外,且存在明显的过大预测问题;缺口根部剩余厚度与曲率半径之比与疲劳寿命试验值之间存在较强的相关性,基于该规律提出的修正 ESED 准则的疲劳寿命预测结果主要分布在 2 倍离散带以内,且预测整体偏于安全,预测精度与可靠性得到明显提高。

关键词: Neuber 准则; ESED 准则; 表面缺口; 有限剩余厚度; 疲劳寿命预测

中图分类号: TB31; TB125; TH186 **DOI:** 10.16579/j.issn.1001.9669.2026.05.003

0 引言

对缺口试件进行疲劳寿命预测的关键在于准确评估缺口根部的应力、应变状态。直至今日,Neuber 准则和等效应变能密度(Equivalent Strain Energy Density, ESED)准则仍被广泛应用。HAN 等^[1]发现修正的 Neuber 准则和 ESED 准则对单侧边半圆形缺口试件的疲劳寿命的预测较保守,并提出应变场强(Strain Field Intensity, SNFI)法。董永刚等^[2]将 Neuber 准则和 Smith-Watson-Topper(SWT)模型相结合,预测了组合式支承辊套内、外表面的疲劳寿命,其结果与 Fe-Safe 有限元分析结果的误差较小。唐晶等^[3]将考虑热力学原理的局部应力、应变公式与 ESED 准则相结合,构建基于混合硬化模型的 N5L1 型槽槽缺口局部应力、应变的计算方法。王亚茹^[4]开展了 G20Mn5QT 型铸钢缺口试件和 T 形铸钢管节点的疲劳试验,对比发现,修正 Neuber 准则和 ESED 准则的预测结果分布在 2 倍分散带以外,且预测值远小于试验值。蔡福海等^[5]以起重机桁架臂的疲劳裂纹为研究对象,应用局部应力-应变法

(Local Stress-Strain Approach, LSSA),结合 Neuber 准则,建立了起重机疲劳裂纹萌生寿命的算法模型。

在利用 Neuber 准则进行局部应力、应变评估及疲劳寿命预测中,用于预测缺口试件疲劳强度的缺口疲劳系数 K_t 至关重要。缺口疲劳系数 K_t 的计算方法主要有 Neuber 法和 Peterson 法。熊哈懿等^[6]在修正 Neuber 准则的基础上,结合能量法原理,给出修正应变疲劳曲线的弹性部分,并提出缺口应变疲劳系数 $K_{t\epsilon}$ 法。李行等^[7]将不同尺寸的缺陷引入光滑 EA4T 型车轴钢试样中,发现利用 Neuber 法会得到较为保守的疲劳强度预测值。王凌峰^[8]开展了模拟叶片和真实叶片的疲劳极限试验,发现 Neuber 法和 Peterson 法对弯曲疲劳试验件疲劳强度的预测结果均偏危险。周松等^[9]也发现 Peterson 法对含缺陷试样的疲劳极限的预测结果偏大。

除经典的 Neuber 准则和 ESED 准则外,近十几年来,提出的临界距离理论得到学界的广泛关注。WU 等^[10]研究改进的临界距离理论(Modified Theory of Critical Distance, MTCDD),以估算考虑缺口灵敏度系

收稿日期: 2024-06-12

基金项目: 中央引导地方科技发展资金项目(科技创新基地项目)(23621019G,246Z2205G); 河北省自然科学基金青年项目(E2024203147)

作者简介: 丁明超,男,1990 年生,山东五莲人,博士,讲师; 主要研究方向为材料与构件的疲劳寿命预测、增材修复件的疲劳寿命预测; E-mail:dingmc@ysu.edu.cn。

引用格式: 丁明超,边曙光,才龙,等. 表面缺口试件局部应变评估与疲劳寿命预测[J]. 机械强度,2026,48(5):22-29.

DING Mingchao, BIAN Shuguang, CAI Long, et al. Local strain assessment and fatigue life prediction of surface notched specimens[J].

Journal of Mechanical Strength, 2026, 48(5): 22-29.



免费获取

数和多轴应力效应的试样的疲劳寿命。徐友坤等^[11]指出,当利用临界距离法预测含表面缺陷的车轴试样的疲劳极限时,点法的误差较大,而线法具有更高的预测精度,能够满足工程需求。廖鼎等^[12]通过将 Fatemi-Socie 模型与临界距离理论(Theory of Critical Distance, TCD)相结合,建立一种多轴载荷作用下含缺口结构疲劳寿命的预测方法。

然而,值得注意的是,现有的 Neuber 准则、ESED 准则及 TCD 通常假设缺口位于宽度或厚度是缺口深度的 3 倍以上的板(以下简称“无限板”)上。此时,缺口根部的剩余尺寸(剩余厚度、剩余宽度)较大,对缺口根部应力、应变状态的影响可以忽略。然而,若缺口深度不明显小于构件的宽度或厚度,缺口处的应力、应变状态不再仅受缺口自身几何特征的影响,有限剩余尺寸对应力集中的描述至关重要。针对这种情况,现有方法对疲劳寿命的预测结果尚不可知。

为此,本文设计了缺口位于基体表面的表面缺口试件,并开展疲劳试验。对于该试件,缺口根部的剩余厚度有限(1~3 mm)。分别采用 Neuber 准则和 ESED 准则计算缺口处的应变,并结合 Manson-Coffin 公式开展疲劳寿命预测,检验 2 种准则对表面缺口试件的适用性,并进行改进。

1 缺口试件疲劳寿命预测理论

1.1 缺口应力-应变模型

1961 年提出的 Neuber 准则和 1985 年提出的 ESED 准则至今仍是研究远场载荷和缺口根部应力-应变作用关系的重要基础理论。NEUBER^[13]在研究剪切应变棱柱体的应力、应变问题时,提出了 Neuber 准则,其表达式为

$$K_t^2 = K_\sigma K_\varepsilon \quad (1)$$

式中, K_t 为缺口理论应力集中系数; K_σ 为缺口根部的应力集中系数; K_ε 为缺口根部的应变集中系数。 K_σ 、 K_ε 和名义应变 e 的计算式分别为

$$\begin{cases} K_\sigma = \frac{\sigma}{S} \\ K_\varepsilon = \frac{\varepsilon}{e} \\ e = \frac{S}{E} \end{cases} \quad (2)$$

式中, σ 为缺口根部应力; S 为远场名义应力; ε 为缺口根部应变; E 为弹性模量。进而,式(1)可改写为

$$\sigma \varepsilon = \frac{K_t^2 S^2}{E} \quad (3)$$

若局部塑性主要由弹性材料包围,则缺口根部的应变能密度不会发生显著变化,基于此假设的 ESED 准则^{[14]93-100}表达式为

$$\frac{(K_t S)^2}{E} = \frac{\sigma^2}{E} + \frac{2\sigma}{n+1} \left(\frac{\sigma}{K} \right)^{\frac{1}{n}} \quad (4)$$

式中, n 为循环应变强化指数; K 为循环强度系数。

尽管 Neuber 准则和 ESED 准则直接建立了名义应力与局部应力、应变的关系,但尚无法计算缺口处的应力、应变,它们的计算仍需要与材料的 Ramberg-Osgood 公式相结合。对于具有非线性硬化行为的材料,在疲劳循环加载条件下,材料的循环应力-应变曲线可用 Ramberg-Osgood 表述^[15],其表达式为

$$\frac{\Delta \varepsilon}{2} = \frac{\Delta \sigma}{2E} + \left(\frac{\Delta \sigma}{2K} \right)^{\frac{1}{n}} \quad (5)$$

式中, $\Delta \sigma$ 为缺口根部应力的范围; $\Delta \varepsilon$ 为缺口根部应变的范围。

为满足疲劳循环载荷加载的适用条件,HOFFMANN 等^[16]指出,用应力、应变范围替换单轴应力-应变,修正 Neuber 准则,即

$$\Delta \sigma \cdot \Delta \varepsilon = \frac{K_t^2 (\Delta S)^2}{E} \quad (6)$$

式中, ΔS 为远场名义应力的范围。

同理,疲劳循环加载下的 ESED 准则可修正为

$$\frac{K_t^2 (\Delta \sigma)^2}{4E} = \frac{(\Delta \sigma)^2}{4E} + \frac{\Delta \sigma}{n+1} \left(\frac{\Delta \sigma}{2K} \right)^{\frac{1}{n}} \quad (7)$$

在 Neuber 准则中,采用 K_t 衡量缺口的应力集中程度。但是, K_t 依赖于缺口构件的几何形状,且没有考虑到缺口的疲劳性能。因此,TOPPER 等^[17]建议用疲劳缺口系数 K_f 代替 K_t ,得到修正的 Neuber 准则,其表达式为

$$\Delta \sigma \cdot \Delta \varepsilon = \frac{K_f^2 (\Delta S)^2}{E} \quad (8)$$

K_f 可采用 Neuber 法^[18]和 Peterson 法^[19]求解,其表达式分别为

$$\begin{cases} \text{Neuber法: } K_f = 1 + \frac{K_t - 1}{1 + \sqrt{a_n/\rho}} \\ \text{Peterson法: } K_f = 1 + \frac{K_t - 1}{1 + a_p/\rho} \end{cases} \quad (9)$$

式中, a_n 为 Neuber 准则的材料参数; a_p 为 Peterson 法的材料参数; ρ 为缺口根部的曲率半径。

综上所述,采用应力集中系数 K_t 或疲劳缺口系数 K_f 描述缺口的应力集中程度,结合材料循环应力-应变曲线,联立 Neuber 准则或 ESED 准则,可得到缺口根部的应力、应变。

1.2 疲劳寿命预测模型

LSSA 已成功应用于含有应力集中零件的萌生寿命评估。LSSA 认为,在循环载荷下,当零件缺口底部的局部应力-应变响应与光滑试件的应力-应变响应一致时,含缺口零件的裂纹萌生寿命等于光滑试件的寿命^[20]。材料在弹性阶段与塑性阶段应变与疲劳寿命

的关系可由 Manson-Coffin 公式表示,即

$$\varepsilon_a = \varepsilon_a^e + \varepsilon_a^p = \frac{\sigma_f'}{E} (2N)^b + \varepsilon_f' (2N)^c \quad (10)$$

式中, ε_a 为总应变幅值; ε_a^e 为弹性应变幅值; ε_a^p 为塑性应变幅值; σ_f' 和 b 分别为疲劳强度系数和疲劳强度因子, 可通过材料的疲劳试验获得, 也可通过拟合材料的 $S-N$ 曲线获得, b 的值一般为 $-0.05 \sim -0.12$, 材料的强度越高, b 的值越大; N 为疲劳寿命预测值。在缺少材料试验数据的情况下, 疲劳强度系数 σ_f' 约为断裂时的真实应力 $\sigma_f^{[21]1-3}$, 即 $\sigma_f' \approx \sigma_f$; ε_f' 和 c 分别为疲劳延性系数和疲劳延性因子, 可通过材料应力比 $R = -1$ 的疲劳试验获得^{[21]1-3}, c 的典型值为 $-0.7 \sim -0.5$ 。

考虑到实际工况下构件平均应力带来的影响, MORROW^[22] 提出平均应力修正模型, 即

$$\varepsilon_a = \frac{\sigma_f' - \sigma_m}{E} (2N)^b + \varepsilon_f' (2N)^c \quad (11)$$

式中, σ_m 为平均应力。

综上所述, 利用 Neuber 准则或 ESED 准则, 得到缺口根部的应力、应变, 结合式 (11), 可开展缺口试件疲劳寿命预测。

2 表面缺口试件疲劳试验

TC4 钛合金具有耐腐蚀性强、密度小、比强度高及韧性较好等优点, 是制造航空发动机压气机叶片等关键零部件的主要材料。试验原材料为厚度为 5 mm 的钛板, 热处理工艺为加热至 840 °C、保温 1 h、空冷。钛板生产制造满足 GB/T 3621—2007 的要求, 抗拉强度为 1 040 MPa, 屈服强度为 998 MPa, 弹性模量为 115 GPa。

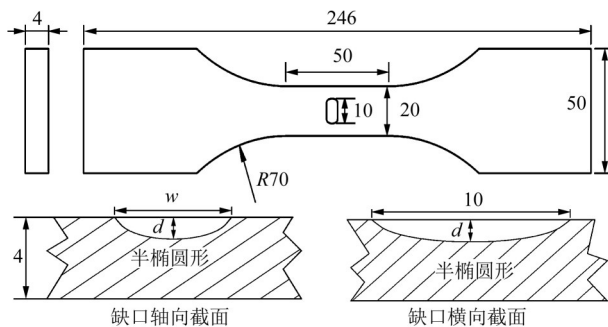
由《中国航空材料手册》可知, 室温下 TC4 钛合金的循环强度系数 K 为 1 420 MPa; 循环应变强化指数 n 为 0.07。 $\sqrt{a_N}$ 可取 0.22 mm, a_p 可取 0.255 mm^[23]。

为凸显剩余厚度对疲劳寿命的影响, 设计了表面缺口试件, 如图 1(a) 所示。缺口位于有限厚度板件的表面, 缺口轴向截面和横向截面均为半椭圆形。将缺口横向长度固定为 10 mm, 以便于研究; 缺口的宽度 w 和深度 d 为变量。将试件整体厚度固定为 4 mm, 配合不同的缺口深度, 可反映剩余厚度对疲劳寿命的影响, 如表 1 所示。表 1 中, $\sigma_{\max}$ 为疲劳试件的最大加载名义应力。

利用三维软件设计表面缺口试件的几何模型, 利用数控 (Computer Numerical Control, CNC) 加工中心制备试件, 采用精抛光将试件表面粗糙度 R_a 控制在 0.2 μm 以下, 试件的纵向与轧制方向一致。本试验

中, 缺口根部曲率半径 ρ 由椭圆形短轴顶点处的最大曲率半径确定, ρ 的计算式为

$$\rho = \frac{(w/2)^2}{d} \quad (12)$$



(a) 表面缺口试件尺寸



(b) 疲劳试件实物

图 1 表面缺口疲劳试件

Fig. 1 Surface-notched fatigue specimen

疲劳试验按照 GB/T 3075—2008 执行。采用 MTS 伺服液压试验机进行疲劳拉伸试验, 加载频率为 60~80 Hz。在室温环境下进行试验, 试验过程中未发现明显的温升, 因此可采用风扇进行适当降温。疲劳试件的最大加载名义应力 $\sigma_{\max}$ 为 520、570 MPa, 应力比 $R = 0$ 。

表 1 疲劳试件缺口尺寸与应力水平

Tab. 1 Notch size and stress level of the fatigue specimen

试件	d/mm	w/mm	K_t	数量	$\sigma_{\max}/\text{MPa}$
S4	1	4	2.289	10	520 和 570
M6	1.8	6	2.509	7	520 和 570
M10	1.8	10	2.054	3	570
M15	1.8	15	1.831	3	570
B6	3	6	2.920	7	520 和 570
B10	3	10	2.444	3	570
B15	3	15	2.048	3	570

3 基于 Neuber 准则的疲劳寿命预测

在利用 Neuber 准则进行缺口试件疲劳寿命预测的过程中, 有 3 个指标可以描述缺口应力集中的程度: K_t 、采用 Neuber 法计算的 K_f 及采用 Peterson 法计算的 K_e 。作为一种缺口应力状态受剩余厚度影响的特殊缺口形式, 利用 3 个指标分别对应的方法预测表面缺口试件疲劳寿命的准确性仍需验证。图 2 所示为根据 Neuber 准则, 分别采用 3 种缺口应力集中描述方法预

测的表面缺口试件疲劳寿命的结果。

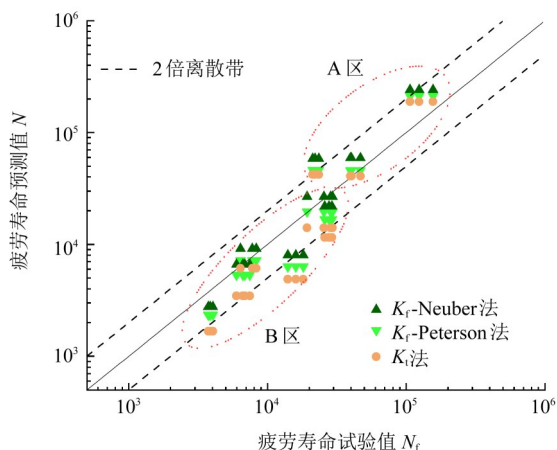


图2 Neuber准则下疲劳寿命预测结果

Fig. 2 Prediction results of the fatigue life by the Neuber rule

由图2可知,根据Neuber准则预测的疲劳寿命的结果主要分布在2倍离散带以内,满足实际工程需求。误差分布图可分为2个部分:位于离散带上方的A区,包括M15系列、B15系列和M10系列试件,此时疲劳寿命预测值大于试验值;位于离散带下方的B区,包括S4系列、B10系列、M6系列和B6系列试件,此时,疲劳寿命预测值大部分小于试验值。为详细解释这一结果,图3所示为同一加载应力下,疲劳寿命预测误差与缺口宽度、缺口深度的关系。

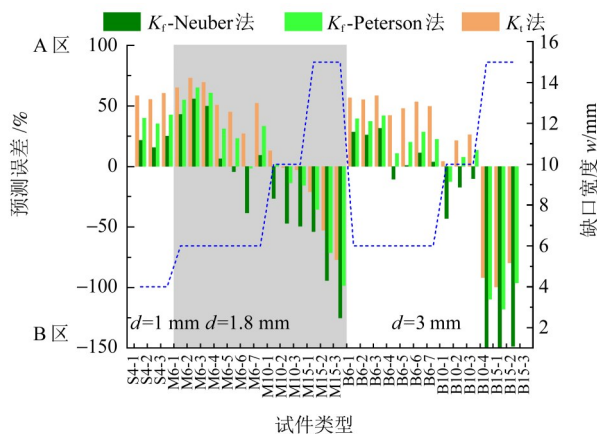


图3 误差与缺口宽度、缺口深度的关系

Fig. 3 Relation between the error and the notch width and depth of the notch

图3中,以3种缺口深度 $d=1, 1.8, 3$ mm将关系图分为3个部分。由图3可知,在缺口深度 d 分别为1.8、3 mm下,随着缺口宽度由6 mm增大到15 mm,利用3种应力集中描述方法得到的预测结果的预测误差由+50%左右逐步变化至-80%左右,部分预测结果的预测误差已低于-100%。可见,缺口宽度会影响Neuber准则的疲劳寿命预测结果。

一般情况下,Neuber准则的解被视为缺口应力、

应变的上限值^{[24]357-373[25]},疲劳寿命的预测结果会过于保守。但是,Neuber准则在TC4钛合金表面缺口试件上展现出不同的效果,预测结果主要分布在2倍离散带以内。如图4所示,在相同缺口深度下,随着缺口宽度 w 的增大,应力集中系数 K_t 逐步变小,缺口应力的集中程度减轻。此时,根据Neuber准则计算的缺口应变由大变小,导致疲劳寿命的预测值逐渐大于试验值,形成预测结果由偏安全向偏危险转变。

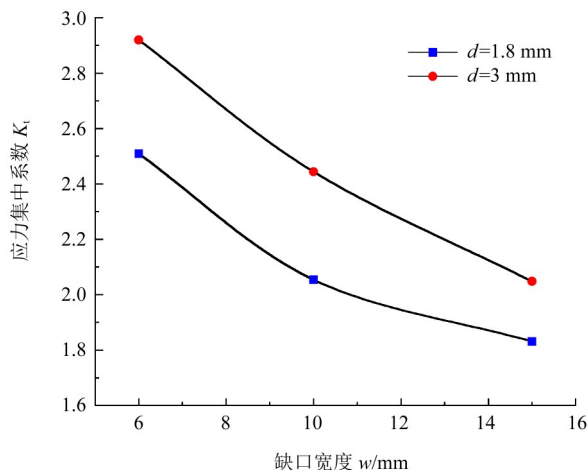


图4 w 与 K_t 的关系

Fig. 4 Relation between w and K_t

另外,对于由3种描述应力集中的方法(K_f -Neuber法、 K_f -Peterson法、 K_t 法)预测的疲劳寿命,由 K_f -Neuber法预测的疲劳寿命最长;由 K_f -Peterson法预测的疲劳寿命次之;由 K_t 法预测的疲劳寿命最短。对于应力集中程度较轻的A区(K_t 包括1.831、2.048和2.054),3种方法的预测精度相近,且预测结果均偏危险。对于应力集中程度较重的B区(K_t 包括2.289、2.444、2.509和2.920),3种方法的预测精度存在明显差异。

图5所示为3种应力集中描述方法的数值差异。由图5可知,由 K_f -Neuber法预测的应力集中程度最轻;由 K_f -Peterson法预测的应力集中程度次之;由 K_t 法预测的应力集中程度最重。对于应力集中系数较小的A区试件,3种方法的计算数值差异较小;但对于应力集中程度较大的B区试件,3种方法的数值差异明显变大。直接采用 K_t 法会将应力集中程度描述得过重,导致B区试件的疲劳寿命预测值偏于保守。总体而言,考虑缺口疲劳性能的 K_f -Neuber法和 K_f -Peterson法具有预测优势,B区试件的预测结果主要分布于2倍离散带以内。由于 K_f -Peterson法的预测结果位于3种方法中间,利用 K_f -Peterson法预测疲劳寿命的预测精度略高于 K_f -Neuber法。

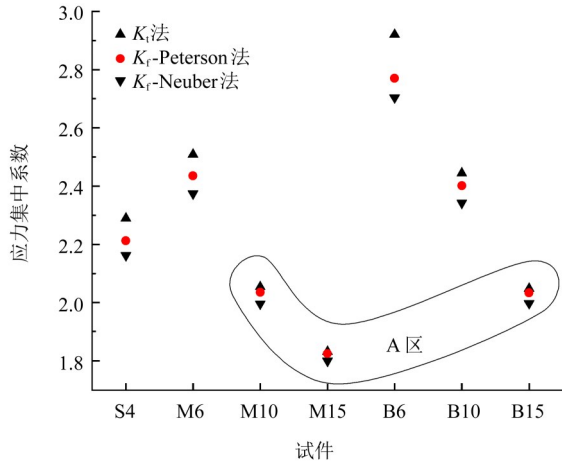


图5 3种应力集中描述方法结果

Fig. 5 Results of three stress concentration description methods

4 基于 ESED 准则的疲劳寿命预测与修正

4.1 基于 ESED 准则的疲劳寿命预测

联立式(5)、式(7)、式(11),可得基于 ESED 准则的表面缺口试件疲劳寿命的预测结果,如图6所示。

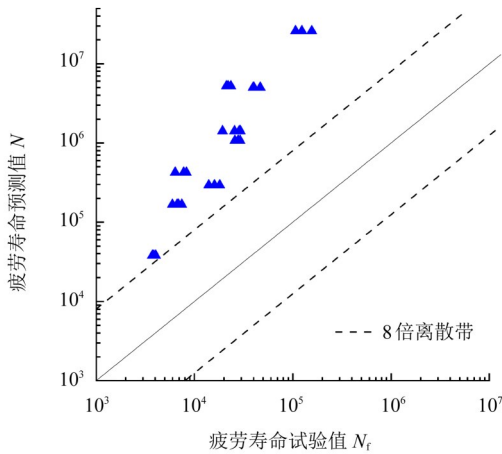


图6 基于 ESED 准则的疲劳寿命预测结果

Fig. 6 Fatigue life prediction results based on ESED criterion

由图6可知,采用 ESED 准则预测的表面缺口试件的疲劳寿命分布于8倍离散带以外,疲劳寿命的预测值远大于试验值。一般情况下,采用 ESED 准则得到的局部应变结果应被视为应变的下限值^{[24]357-373},故疲劳寿命的预测结果将过于危险。由此可见,利用 ESED 准则预测表面缺口试件疲劳寿命的结果与现有研究结果一致。

4.2 修正 ESED 准则

严重的应力集中现象必定导致缺口根部塑性区域尺寸的增大,进而影响局部应变评估结果的准确性。为此,文献[14]⁹³⁻¹⁰⁰中采用塑性区修正系数 C_p 对应变能密度进行修正,以反映塑性区域增加的尺寸。 C_p 的计算式为

$$C_p = 1 + \frac{\Delta r_p}{r_p} \quad (13)$$

式中, r_p 为塑性区域尺寸的1阶近似; Δr_p 为由应力集中引起塑性变形而产生的塑性区域尺寸的增加量。基于此, ESED 准则[式(7)]可被修正为

$$C_p \frac{K_t^2 (\Delta \sigma)^2}{4E} = \frac{(\Delta \sigma)^2}{4E} + \frac{\Delta \sigma}{n+1} \left(\frac{\Delta \sigma}{2K} \right)^{\frac{1}{n}} \quad (14)$$

然而, Δr_p 的计算式较为烦琐,且 r_p 与 I 型裂纹的应力强度因子有关,不易计算。因此,提出一种基于较易获得参数的 ESED 准则修正方法具有重要意义。尽管式(13)考虑了塑性变形的增加量,但其核心在于进一步反映应力集中对应变能密度的影响。因此,针对缺口根部剩余厚度有限这一特殊缺口形式,需要进一步改进应力集中的描述方法。对于无限板上的椭圆形孔,应力集中系数 K_t 的计算式为

$$K_t = 1 + 2 \sqrt{\frac{d}{\rho}} \quad (15)$$

由式(15)可知,缺口深度 d 和缺口根部曲率半径 ρ 决定了椭圆形孔的应力集中程度。对于表面缺口试件,除缺口根部曲率半径外,缺口根部剩余厚度的变化是影响应力集中程度的另一关键参数。因此,尝试采用参数 $t-d$ (t 为表面缺口疲劳试件的厚度)来衡量缺口剩余厚度的变化对应力集中程度的影响,结合曲率半径 ρ 这一参数,实现对 ESED 准则的修正。

图7所示为在相同疲劳载荷和2种缺口深度下,疲劳寿命试验值 N_i 与参数 $(t-d)/\rho$ 的关系。由图7可知,疲劳寿命试验值 N_i 与 $(t-d)/\rho$ 的关系近似为幂函数关系,这说明以 $(t-d)/\rho$ 为关键变量修正 ESED 准则,能极大概率提高预测精度。

基于式(13)、式(15),结合图7,提出考虑缺口根部剩余厚度影响的应力集中修正参数 C_i 。 C_i 的表达式为

$$C_i = 1 + \left(\frac{t-d}{\rho} \right)^m \quad (16)$$

式中, m 为修正指数。由图7可知, m 应为负数。为确定 m 的具体数值,以表面缺口试件疲劳寿命试验值为目标值,以所有预测误差的绝对值的平均值为评价指标,采用试错法逐步逼近,以确定 m 的值。

设定 m 的可能取值为-0.8、-0.1、-0.05、-0.04、-0.03、-0.02 和 -0.01,依次代入式(16),用 $1 + [(t-d)/\rho]^m$ 替换式(14)中的 C_p ,并联立式(5)、式(11),可得不同的 m 值下表面缺口试件疲劳寿命的预测结果。计算每个 m 值下每个试件的疲劳寿命预测误差的绝对值 V_{Error} , V_{Error} 的计算式为

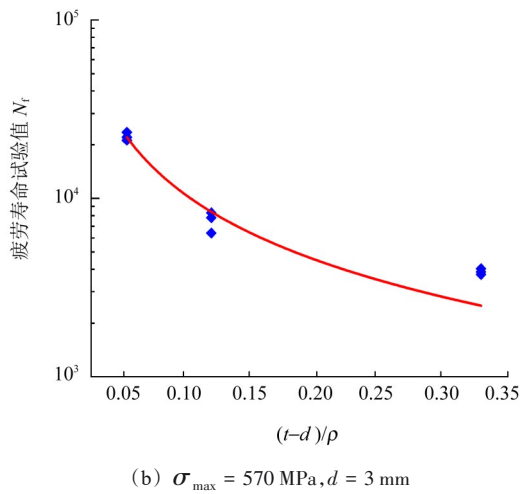
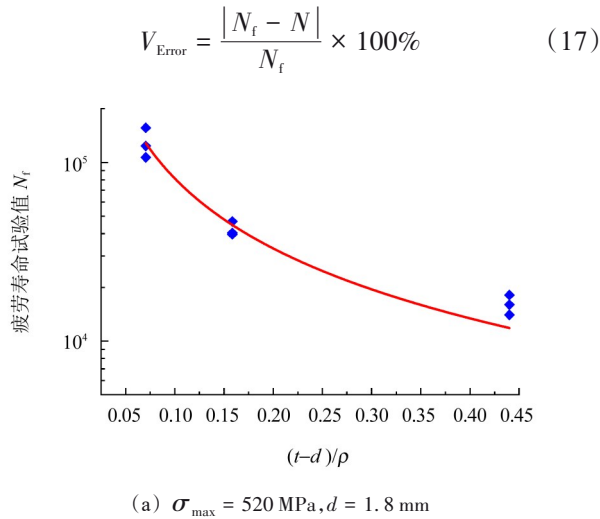


图 7 $(t-d)/\rho$ 与 N_f 的关系
Fig. 7 Relation between $(t-d)/\rho$ and N_f

图 8 所示为 m 值与预测误差平均值的关系。由图 8 可知, 总体而言, m 值与表面缺口试件疲劳寿命预测误差的平均值之间存在明显规律。当 m 值由 -0.8 增至 -0.01 时, 预测误差平均值由 92% 急剧减小至 44% , 随后缓慢增大至 47% 。由此可知, 表面缺口试件的疲劳寿命的平均误差随着 m 值的增大呈先急剧减小、后缓慢增加的趋势, 具有明显的拐点。由图 8 可知, 这个拐点位于 -0.05 与 -0.04 之间, 取 -0.05 和 -0.04 的平均值 -0.045 作为 m 的取值。最终可得, TC4 钛合金表面缺口试件的应力集中修正参数 C_1 为

$$C_1 = 1 + \left(\frac{t-d}{\rho} \right)^{-0.045} \quad (18)$$

图 9 所示为基于采用式 (18) 修正的 ESED 准则的 TC4 钛合金表面缺口试件疲劳寿命的预测结果。由图 9 可知, 修正 ESED 准则的预测结果主要分布在 2 倍离散带以内。相比 ESED 准则, 基于修正 ESED 准则的预测结果的准确性大大提高, 且其预测结果均位于 2 倍离散带的下方, 偏于安全。

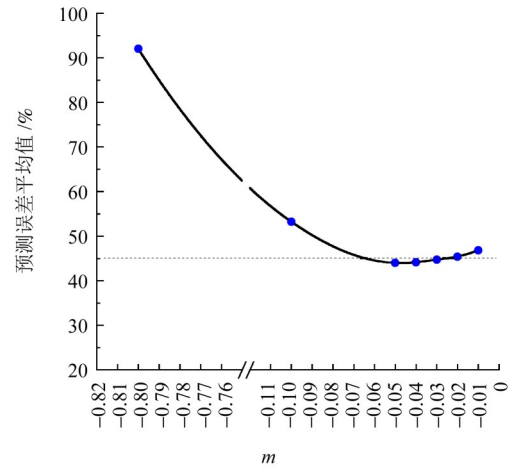


图 8 m 值与预测误差平均值的关系

Fig. 8 Relation between the value of m and the average prediction error

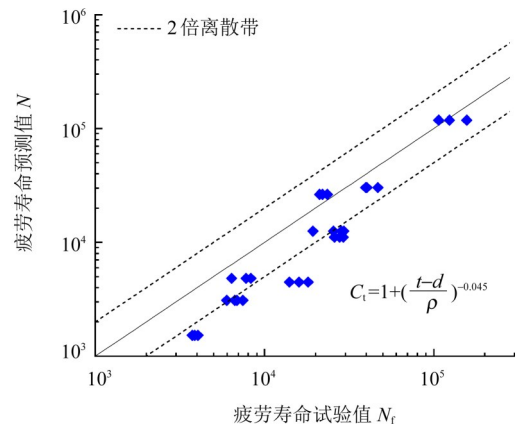


图 9 基于修正 ESED 准则的疲劳寿命预测结果

Fig. 9 Fatigue life prediction results based on corrected ESED criterion

5 结论

为揭示缺口根部有限剩余厚度对缺口试件疲劳寿命的影响规律, 开展了 TC4 钛合金表面缺口试件疲劳试验, 结合 Manson-Coffin 公式, 检验了 Neuber 准则和 ESED 准则的预测精度, 得到的主要结论如下:

1) 采用 Neuber 准则的疲劳寿命预测结果主要分布在 2 倍离散带以内, 并未出现预测结果过于安全现象。在相同缺口深度下, 随着表面缺口宽度的增加, 应力集中程度逐渐降低, 基于 Neuber 准则的预测结果由偏安全转至偏危险。

2) 基于 ESED 准则的疲劳寿命预测结果主要分布在 8 倍离散带以外, 与现有研究结果一致。

3) 变量 $(t-d)/\rho$ 与疲劳寿命试验值之间的关系非常明显。基于修正 ESED 准则的疲劳寿命预测结果主要分布在 2 倍离散带以内, 预测精度得到明显提高。

参考文献(References)

- [1] HAN Q H, WANG Y R, YIN Y, et al. Fatigue tests on notched specimens of G20Mn5QT cast steel and life prediction by a new strain-based method [J]. Archives of Civil and Mechanical Engineering, 2020, 20(4): 113.
- [2] 董永刚, 黄鑫磊, 宋剑锋, 等. 基于有限元仿真及局部应力应变法的组合式支承辊套内外表面疲劳寿命预测[J]. 塑性工程学报, 2021, 28(3): 198-204.
- DONG Yonggang, HUANG Xinlei, SONG Jianfeng, et al. Fatigue life prediction of inner and outer surface of composite back-up roller sleeve based on finite element simulation and local stress strain method[J]. Journal of Plasticity Engineering, 2021, 28(3): 198-204. (In Chinese)
- [3] 唐晶, 王恭义, 程凯, 等. 一种基于混合硬化本构模型的汽轮机轮盘榫槽疲劳寿命预测方法[J]. 材料科学与工程学报, 2022, 40(1): 77-82.
- TANG Jing, WANG Gongyi, CHENG Kai, et al. A method for predicting fatigue life of turbine rotor wheel groove based on mixed hardening constitutive model[J]. Journal of Materials Science and Engineering, 2022, 40(1): 77-82. (In Chinese)
- [4] 王亚茹. 铸钢疲劳寿命评估方法及T形铸钢管节点疲劳性能研究[D]. 天津: 天津大学, 2020: 68-69.
- WANG Yaru. Study on fatigue life evaluation method of cast steel and fatigue performance of cast steel tubular T-joints[D]. Tianjin: Tianjin University, 2020: 68-69. (In Chinese)
- [5] 蔡福海, 原维晨, 王欣, 等. 起重机桁架臂疲劳裂纹形成寿命影响因素分析[J]. 机械强度, 2015, 37(1): 144-148.
- CAI Fuhai, YUAN Weichen, WANG Xin, et al. Influencing factor analysis of fatigue crack initiation life on crane lattice boom[J]. Journal of Mechanical Strength, 2015, 37(1): 144-148. (In Chinese)
- [6] 熊哈懿, 郑云, 侯兆新. 基于局部应力应变法的钢结构疲劳裂纹形成寿命预测[J]. 钢结构, 2019, 34(6): 25-28.
- XIONG Hanyi, ZHENG Yun, HOU Zhaoxin. Fatigue crack initiation life prediction of steel structure based on local stress-strain method [J]. Steel Construction, 2019, 34(6): 25-28. (In Chinese)
- [7] 李行, 张继旺, 徐俊生, 等. 缺陷对EA4T车轴钢疲劳性能的影响[J]. 西南交通大学学报, 2021, 56(3): 627-633.
- LI Hang, ZHANG Jiawang, XU Junsheng, et al. Effect of defect on fatigue property of EA4T axle steel [J]. Journal of Southwest Jiaotong University, 2021, 56(3): 627-633. (In Chinese)
- [8] 王凌峰. 外物损伤对不锈钢叶片高周疲劳性能的影响[D]. 南京: 南京航空航天大学, 2018: 62-64.
- WANG Lingfeng. Research on influence of foreign object damage on stainless steel blade high cycle fatigue property[D]. Nanjing: Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 2018: 62-64. (In Chinese)
- [9] 周松, 张新钰, 回丽, 等. 含缺陷的TB6钛合金疲劳性能研究和强度评估[J]. 热加工工艺, 2021, 50(12): 39-43.
- ZHOU Song, ZHANG Xinyu, HUI Li, et al. Fatigue performance research and strength evaluation of TB6 titanium alloy with defects [J]. Hot Working Technology, 2021, 50(12): 39-43. (In Chinese)
- [10] WU Y W, LIU Y X, WANG W, et al. High cycle fatigue life prediction of single-crystal specimen based on TCD method and crystal plasticity theory [J]. International Journal of Aerospace Engineering, 2023, 2023: 1-14.
- [11] 徐友坤, 鲁连涛, 曾东方, 等. 基于临界距离法的含表面缺陷车轴试样疲劳强度预测[J]. 机械强度, 2022, 44(4): 825-830.
- XU Youkun, LU Liantao, ZENG Dongfang, et al. Fatigue strength prediction of railway axle specimen with surface notch by TCD [J]. Journal of Mechanical Strength, 2022, 44(4): 825-830. (In Chinese)
- [12] 廖鼎, 朱顺鹏, 高杰维, 等. 耦合临界平面-临界距离理论的缺口结构疲劳寿命预测[J]. 机械强度, 2023, 45(2): 454-461.
- LIAO Ding, ZHU Shunpeng, GAO Jiewei, et al. Fatigue life prediction of notched structure using combined critical plane-critical distance approach [J]. Journal of Mechanical Strength, 2023, 45(2): 454-461. (In Chinese)
- [13] NEUBER H. Theory of stress concentration for shear-strained prismatical bodies with arbitrary nonlinear stress-strain law [J]. Journal of Applied Mechanics, 1961, 28(4): 544-550.
- [14] MOLSKI K, GLINKA G. A method of elastic-plastic stress and strain calculation at a Notch root [J]. Materials Science and Engineering, 1981, 50(1): 93-100.
- [15] RAMBERG W, OSGOOD W R. Description of stress-strain curves by three parameters [R]. Washington D. C.: National Advisory Committee for Aeronautics, 1943: 9.
- [16] HOFFMANN M, SEEGER T. Stress-strain analysis and life predictions of a notched shaft under multiaxial loading [C]//Multiaxial Fatigue: Analysis and Experiment. Warrendale: Society of Automotive Engineers Inc., 1989: 81-96.
- [17] TOPPER T H, WETZEL R M, MORROW J D. Neuber's rule applied to fatigue of notched specimens [J]. Journal of Materials, 1969, 1(4): 200-209.
- [18] NEUBER H. Theory of notch stresses: principles and applications [M]. 2nd ed. Berlin: Springer Verlag, 1958: 1-226.
- [19] PETERSON R E. Notch sensitivity [M]//SINES G, WAISMAN J L. Metal Fatigue. New York: McGraw-Hill, 1959: 293-306.
- [20] TOPPER T H, GOWDA C V. Local stress-strain approach to fatigue analysis and design [C]//Proceedings of the ASME Design Engineering Conference. New York: ASME, 1977: 5.
- [21] 吴承伟, 关振群, 郭杏林, 等. 大型离心压缩机叶轮叶片疲劳可靠性分析[J]. 装备制造技术, 2008(8): 1-3.
- WU Chengwei, GUAN Zhenqun, GUO Xinglin, et al. Fatigue reliability analysis of blades of large centrifugal compressor [J]. Equipment Manufacturing Technology, 2008(8): 1-3. (In Chinese)
- [22] MORROW J D. Fatigue properties of metals [M]//GRAHAM J A. Fatigue Design Handbook. Warrendale: Society of Automotive

- Engineers Inc., 1968:21-29.
- [23] 包珍强. 缺口对 TC4 高循环疲劳强度的影响及预测方法研究 [D]. 南京:南京航空航天大学,2014:1-73.
- BAO Zhenqiang. Effect of notch geometry to the high cycle fatigue strength of TC4 and prediction [D]. Nanjing: Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 2014: 1-73. (In Chinese)
- [24] MOFTAKHAR A, BUCZYNSKI A, GLINKA G. Calculation of elasto-plastic strains and stresses in notches under multiaxial loading [J]. International Journal of Fracture, 1994, 70 (4) : 357-373.
- [25] 李友胜. 双轴加载下缺口应力应变分析的改进方法[J]. 机械强度,2017,39(4):961-965.
- LI Yousheng. A modified method for calculating stresses and strains of notch under biaxial loading condition [J]. Journal of Mechanical Strength,2017,39(4):961-965. (In Chinese)

Local strain assessment and fatigue life prediction of surface notched specimens

DING Mingchao¹ BIAN Shuguang¹ CAI Long² HUANG Jiaying¹ YANG Lipo¹ WANG Liming³

(1. School of Mechanical Engineering, Yanshan University, Qinhuangdao 066004, China)

(2. Qinhuangdao Youyi Heavy Industry Technology Co., Ltd., Qinhuangdao 066200, China)

(3. Shanhaiguan Maintenance Subdivision of China Railway Shenyang Group Co., Ltd., Qinhuangdao 066200, China)

Abstract: [Objective] The Neuber criterion and the equivalent strain energy density (ESED) criterion serve as fundamental theories for evaluating notch strain and predicting fatigue life. However, few studies have been reported the influence of the remaining thickness at the notch root on the fatigue life prediction results of specimens with surface notches. Optimizing the accuracy of fatigue life prediction for notched components is crucial for assessing the fatigue life of TC4 titanium alloy specimens with surface notches. [Methods] Firstly, TC4 titanium alloy specimens with surface notches on the substrate were designed, and fatigue tests were carried out to obtain tested fatigue life values. Secondly, the strains at the notch were calculated using the Neuber criterion and the ESED criterion respectively. Fatigue life prediction was performed in combination with the Manson-Coffin formula, and the fatigue life prediction accuracy based on the two criteria was verified. Finally, the ESED criterion was modified, and the accuracy of fatigue life prediction results based on the revised ESED criterion was analyzed. [Results] Fatigue life prediction results based on the Neuber criterion generally fall within the 2 times scatter band, without excessive conservatism. Moreover, as the notch width increases, the predictions shift from conservative to nonconservative. Fatigue life prediction results using the unmodified ESED criterion all lie outside the 8 times scatter band and exhibit significant overprediction. A strong correlation exists between the remaining thickness to radius of curvature at the notch root, and the tested fatigue life. The modified ESED criterion proposed based on this correlation yields fatigue life prediction results that mainly lie within the 2 times scatter band, with overall conservative estimates, and the prediction accuracy and reliability are significantly improved.

Key words: Neuber rule; ESED rule; Surface notch; Limited remaining thickness; Fatigue life prediction

Corresponding author: DING Mingchao, E-mail: dingmc@ysu.edu.cn

Fund: Central Guiding Local Science and Technology Development Fund Project (Science and Technology Innovation Base Project) (23621019G, 246Z2205G); Hebei Provincial Natural Science Foundation Youth Project (E2024203147)

Received: 2024-06-12

(编辑:刘星泽)