

缺口件疲劳行为研究进展

谌理飞^{1,2}, 罗云蓉^{1*}, 付磊¹, 李秀兰¹, 张应迁³, 李辉¹

(1. 四川轻化工大学机械工程学院, 四川 自贡 643000; 2. 自贡硬质合金有限责任公司, 四川 自贡 643011; 3. 四川轻化工大学土木学院, 四川 自贡 643000)

摘要:综述了环境因素、载荷方式、工件几何形状以及工艺处理对缺口件疲劳行为的影响,并介绍了对缺口件疲劳寿命分析的方法和强化缺口件疲劳性能的工艺方法。对国内外有限元软件在研究缺口件疲劳行为方面的应用进行了简述,通过有限元模拟可以获得危险位置的应力应变分布,并将有限元模拟结果和寿命预测模型相结合,从而对缺口件疲劳寿命进行有效预测。最后总结目前研究成果,对缺口件研究的方向和前景进行展望。

关键词:缺口构件; 疲劳强度; 寿命预测; 强化处理; 有限元模拟

中图分类号: TG115.5, O346.2

文献标志码: A

文章编号: 1004-7638(2021)05-0197-08

DOI: 10.7513/j.issn.1004-7638.2021.05.031

开放科学(资源服务)标识码(OSID):



听语音
与作者互动
聊科研

Research progress of notched specimen fatigue

Chen Lifei^{1,2}, Luo Yunrong^{1*}, Fu Lei¹, Li Xiulan¹, Zhang Yingqian³, Li Hui¹

(1. College of Mechanical Engineering, Sichuan University of Science and Engineering, Zigong 643000, Sichuan, China; 2. Zigong Cemented Carbide Corporation Limited, Zigong 643011, Sichuan, China; 3. College of Civil Engineering, Sichuan University of Science and Engineering, Zigong 643000, Sichuan, China)

Abstract: In this paper, the effects of environmental factors, loading mode, workpiece geometry and technological treatment on fatigue behavior of notched parts are summarized, and the methods of fatigue life analysis of notched parts and the technological methods of strengthening fatigue performance of notched parts are introduced. The application of finite element software on studying the fatigue behavior of notched parts at home and abroad is briefly introduced. Stress and strain distribution of the dangerous position can be obtained through finite element simulation, and the fatigue life of notched parts can be effectively predicted by combining simulation results with the life prediction model. Finally, the current research progress are summarized and the research direction and prospect of notched parts are proposed.

Key words: notched components, fatigue strength, life prediction, strengthening treatment, finite element simulation

0 引言

疲劳失效是发生在机械工程领域中的一种十分

普遍的失效类型^[1], 工件在交变应力或应变的持续作用下, 疲劳裂纹往往萌生于缺口、键槽和台肩等截面变化形成的应力集中部位, 然后在应力应变集

收稿日期: 2020-06-03

基金项目: 国家自然科学基金项目(51701133); 四川省教育厅项目(16ZB0255、18ZA0352); 桥梁无损检测与工程计算四川省高校重点实验室项目(2018QYJ03、2018QZY01)。

作者简介: 谌理飞(1995—), 男, 四川广安人, 硕士研究生, 主要研究方向: 新型材料及结构的力学行为, E-mail: 672515464@qq.com; *通讯作者: 罗云蓉(1974—), 女, 四川内江人, 博士, 副教授, 主要研究方向: 新型材料及结构的力学行为, E-mail: 510862595@qq.com。

中场内扩展,最终导致材料疲劳断裂^[2]。在实际工作中,由于结构设计问题和实际需要,会存在很多带有缺口件的工件,另外由于机器在工作过程中可能会吸入一些细微的杂物,使得工件的一些部位会发生冲击损伤,此时在零件损伤处会产生应力集中^[3],在高频振动疲劳载荷作用下极易产生裂纹萌生和快速拓展,在短时间内使得零件发生疲劳断裂失效。

实际工程部件生产成本和试验成本都很高,所以用缺口试件的疲劳实验来研究应力集中对疲劳寿命的影响是比较可行的。自20世纪60年代Manson-Coffin方程提出后,众多国内外学者开展了缺口试件疲劳的研究工作。Chaves和Navarro^[4]通过对V型缺口试件的微观断裂力学和数值分析,提出了临界距离的概念。Gladskyi和Fatemi^[5]通过实验和模拟分析了缺口对轴向和扭转疲劳行为的影响。除了简单的疲劳分析,为了解释设计中的应力集中,设计者通常假定弹性体中的局部应力低于屈服极限,采用应力-寿命方法,形式简单,适用于承受低应力载荷以及寿命相对较长的高周疲劳。然而,这种方法不适用于局部应力超过屈服极限且塑性应变幅占大部分比例的低周疲劳^[6]。低周疲劳应采用基于应变的应变-寿命方法进行寿命预测。除了基于应力或者应变的寿命预测方法之外,断裂力学方法也在应力集中构件中广泛应用。断裂力学方法假定裂纹萌生于材料内部,当裂纹长度达到临界尺寸的时候,材料就失效。综合国内外学者的研究,笔者介绍了影响缺口工件疲劳寿命的因素,预测缺口件疲劳寿命的方法和数值模拟在缺口件方面的应用,最后对缺口件强化处理方面的研究进行了简述。

1 影响缺口件疲劳行为的因素

影响缺口件疲劳行为的因素有很多,包括工作环境、对缺口件的工艺处理、工件尺寸的影响以及缺口自身的因素影响因素,下面将进行分类简述。

1.1 工作环境对缺口件的影响研究

1.1.1 环境因素

恶劣的工作环境毫无疑问会加剧缺口件的损伤,比如高温环境和腐蚀环境等。李征^[7]和冯先锋^[8]都研究了2024-T351铝合金在潮湿环境中的缺口疲劳特性,结果表明,预腐蚀环境会加剧原有的表面缺陷和引入腐蚀坑,并在腐蚀疲劳试验中加剧,从而加速裂纹萌生和扩展。吴细毛等^[9]研究了X20CrMoV12.1在高温下的缺口疲劳性能,发现耐热钢随着在高温

环境下工作时间的增加,它的疲劳强度逐渐降低,原因是基体中固溶体主要合金元素Cr、Mn、V发生贫化,导致固溶强化效果降低,另外细小的碳化物逐步转变为分布在晶界的粗化球状碳化物,降低了晶界强度。DD6被广泛应用在航空发动机涡轮叶片上,长时间承受高温交变载荷,很容易导致涡轮叶片疲劳损伤的产生^[10]。史振学等^[11]研究了DD6单晶高温合金的缺口疲劳性能,研究表明,相同应力条件下,随着试验温度的升高,缺口疲劳寿命平均值下降。

1.1.2 应力比和应力幅

Kun Yang等^[12]研究了应力比对涡轮发动机叶片钛合金(Ti-8Al-1Mo-1V)缺口疲劳行为的影响,通过分析发现,几何缺口形状会促进表面裂纹的萌生,而高应力比会抑制钛合金的表面裂纹萌生,两者对裂纹起源位置的影响是竞争关系。对于缺口件而言,在低应力比情况下,其失效行为以疲劳为主,在中等应力比情况下,疲劳和循环蠕变共同控制破坏过程;在高应力比下,破坏过程由循环蠕变控制。Aye Thant Htoo等^[13-14]对2024-T4缺口件的疲劳寿命进行了研究,发现在较低的应力幅下,缺口根部发生弹性变形,只有单条裂纹源,而在较高的应力幅下,缺口根部则发生塑性变形,且具有多条裂纹源。

1.1.3 载荷方式

奚蔚等^[15]进行了缺口件寿命分布对材料属性、载荷和缺口半径三种不确定性设计变量的敏度分析,分析结果表明,对缺口件寿命分布影响程度的大小顺序依次为载荷、缺口半径和材料属性。由此可见载荷对缺口件的影响尤其重要。F.Berto等^[16]研究了40CrMoV13.9开槽试件的多轴疲劳强度,对V形缺口和半圆形缺口进行了拉扭复合疲劳试验,试验发现,拉扭复合载荷对试件的疲劳性能影响是最为严重的。另外,Gianni Nicoletto^[17]利用Ti6Al4V进行疲劳试验时发现,试件在循环弯曲载荷下的疲劳寿命比在循环拉伸下的寿命长。

1.2 工件自身及工艺处理的影响研究

1.2.1 工件尺寸及缺口形状

除了工作环境以外,影响缺口疲劳的因素还有很多,比如缺口形状、深度、工件的尺寸等。

黄伟等^[18]等利用空气炮实验系统模拟航空发动机风扇,压气机叶片在工作时遭受硬物冲击产生表面损伤,研究表明,表面损伤为疲劳裂纹的萌生及扩展提供了有利条件,且疲劳强度会随工件表面损伤厚度的增加而下降。莫立华等^[19]开启了具有人

工缺口的高强度钢瓶的疲劳试验, 发现新的疲劳裂纹在人工缺口的夹杂处萌生和扩展, 并发现缺口的形状、平滑度、夹杂物等对人工缺口钢瓶疲劳寿命都有着非常重要的影响。

黄宁等^[2]在试验中发现, 试件的厚度和尺寸越大, 发生疲劳破坏的概率就越大, 这是因为处于缺口高应力范围内的材料越多, 可能产生裂纹萌生的危险部位也越多, 而且应力集中的区域高应力区的体积也越大, 危险区域的缺陷也可能增加, 这些都会增加裂纹萌生的概率。

张庆玲等^[20]在对 Ti-15-3 钛合金的疲劳断裂行为的研究中, 发现光滑疲劳试样裂纹多起源于试样表面, 形成面源, 而具有中心孔和边缺口的试样疲劳裂纹则多起源于缺口根部并形成角源和线源。ad-eusz Łagoda 等^[21]分别开展了光滑、具有几何缺口、结构缺口和复杂缺口的 S355N 钢试件的疲劳试验, 结果发现, 定义疲劳缺口因子为循环周次的幂函数, 获得了单向轴拉压下的三种疲劳缺口因子, 以及循环弯曲下两种疲劳缺口因子, 可见缺口形状会影响疲劳缺口因子。

1.2.2 工艺处理

不同的工艺处理也会影响缺口件疲劳性能。刘晓燕等^[22]在研究 2Cr13 进行疲劳裂纹萌生及扩展速率时发现, 与 970 °C 淬火+710 °C 回火×6 h 工艺相比, 经过 970 °C 淬火+640 °C 回火×5 h 处理后, 2Cr13 的缺口疲劳裂纹萌生抗力有一定程度的提高。单朝辉等^[23]研究了 Al-Li 合金在不同时效状态下短裂纹的扩展规律以及缺口曲率半径对短裂纹扩展规律的影响, 研究表明, 在相同的时效温度下, 裂纹扩展速率随着时效时间增加而加快, 钝缺口萌生裂纹的扩展速率会随着应力强度因子的增加而逐渐变大, 而锐缺口的裂纹扩展速率在裂纹萌生后很快下降到最小值, 之后逐渐回升。

1.2.3 其它因素

Gbadebo Owolabi 等^[24]对镍基高温合金的研究表明, 一般含有夹杂物的构件的疲劳强度往往都是低于不含夹杂物的构件, 因为夹杂物在包裹体附近会产生较大的应力集中, 另外缺口疲劳因子和相关缺口敏感性指数都会随着缺口根部半径的增大而增大。与此同时, 材料的晶粒取向对材料的疲劳强度有重要的影响, 不同的晶粒取向, 失效概率也是不同的。

2 缺口件疲劳寿命预测

2.1 缺口件寿命分析方法

张成成等^[25]根据疲劳缺口效应的不同解释和相应的描述参数, 将缺口件疲劳寿命分析方法分为 3 大类: 局部应力应变法、应力梯度法以及临界域法。局部应力应变法的基本假设是: 若缺口件危险部位和光滑件受到的应力应变历程相同, 则它们的疲劳寿命相同。应力梯度法通过考虑缺口附近应力分布以及相对应力梯度的变化, 定义了表征缺口损伤程度的有效应力作为控制缺口疲劳寿命的损伤参数。临界域法^[26]定义缺口局部损伤区应力场中的某一特征应力应变作为控制缺口疲劳寿命的参数。

奚蔚等^[27-28]提出了一种由光滑件疲劳寿命试验数据预测缺口件疲劳寿命分布的有效应力法, 在此方法中, 可能萌生裂纹的表面被分解成一个个微元, 整个表面可看成是这些微元组成的一个串联模型, 按照串联概率失效模型, 缺口件的疲劳强度失效概率就可以由各微元的疲劳强度失效概率计算得到, 其中微元的疲劳强度失效概率是由光滑件的疲劳强度失效概率通过最薄弱环节理论计算得到的。在缺口件的疲劳强度失效概率表达式中引入了有效应力的概念, 用它查取光滑件的疲劳寿命试验数据, 就可以直接得到缺口件的疲劳寿命分布。并进行了材料 LY12CZ 的带中心孔缺口件的寿命算例分析, 预测结果和试验结果吻合良好。流程如图 1 所示。

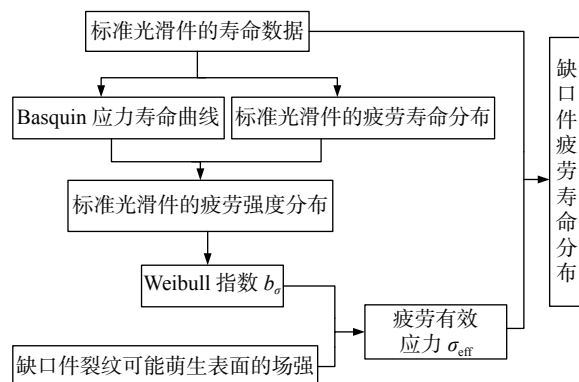


图1 缺口件疲劳寿命分布估算流程^[27]

Fig. 1 Calculation flowchart for fatigue life distribution of notched specimen^[27]

循环阻力曲线(Cyclic Resistance-curve, 循环 R 曲线)法^[29]是基于断裂力学的一种预测疲劳极限和相应的非扩展裂纹的一种方法。确定 R 曲线的方法主要有两种, 第一种是 Tanaka 等^[30]采用了多样本技术, 通过对多个测试样本结果进行插值得到一

个单循环 R 曲线。第二种试验流程是由 Taberning 等^[31]开发的,基于单一的测试技术。Mauro Mada 等^[29]将循环 R 曲线法应用于缺口构件的疲劳极限计算。首先是确定固有裂纹长度,在进行疲劳极限(σ_{e0})测试的完全光滑(抛光)试样中,可将其理解为最大的非扩展裂纹,计算得到 $\sigma_a = \sigma_{e0}$ 时的裂纹驱动力,根据循环 R 曲线和裂纹驱动曲线确定初始裂纹长度 a_i , a_i 可以假设为缺口处进行阻力曲线分析的初始裂纹长度,实际上 a_i 和循环 R 曲线是已知的,因此缺口的疲劳极限可以计算为满足裂纹驱动力与循环 R 曲线切向条件的施加应力作用下缺口的疲劳极限。

Medekshas 和 Balina^[32]用 Von.Mises 等效应力的方法预测了从 1.39 ~ 7.8 的大范围应力集中因子的缺口件低周疲劳寿命。用两种合金钢和两种钛合金的低周疲劳试验结果与有限元数值模拟结果进行比较分析。结果发现,采用有限元数值模拟和 Neuber 准则,用缺口根部的应变或者 Mises 等效应力可以较好的预测缺口构件的低周疲劳寿命。Adib 和 Pluvigne^[26]提出了预测各种缺口件疲劳寿命的体积法。采用有限元方法模拟出等效应力、等效塑性区以及应力梯度。还获得了整体有效塑性区以及塑性区的应力集中因子。该方法易于使用,能够获得不同缺口几何尺寸的偏于保守的试验结果。但是,该方法属于宏观力学方法,需要已知初始裂纹(非扩展裂纹)的有关条件。

2.2 缺口件疲劳寿命预测模型

S-N 曲线法^[33]和断裂力学逼近法^[34]作为评估结构件疲劳寿命的两种主要方法^[35-36],其中 S-N 曲线提供了应力幅值与循环周次之间的关系,而断裂力学逼近法主要采用 Paris 公式预测裂纹扩展。一般情况下, S-N 曲线适用于疲劳裂纹的所有阶段,而 Paris 公式只适用于裂纹扩展阶段^[35]。当仅从裂纹扩展阶段得到 S-N 曲线时, S-N 曲线法和断裂力学逼近法是相容的。Lim H J 等将两种方法相结合,提出了一种新的预测模型,即:

$$N_p = \int_{a_0}^{a_f} \frac{1}{C(\Delta K)^m} da = \int_{a_0}^{a_f} \frac{1}{C(\Delta \sigma F(a) \sqrt{\pi a})^m} da \quad (1)$$

式中, C 和 m 代表材料性质的 Paris 公式参数,通常由实验估算; a_0 为初始裂纹(缺口)长度; a_f 为裂纹扩展阶段结束时的临界裂纹长度; ΔK 是应力强度因子(SIF)的范围; $\Delta \sigma$ 为应力范围; $F(a)$ 取决于结构几何形状因素和裂纹长度, a 为裂纹长度。为了验

证此模型的有效性, Lim H J^[35]对带缺口的 6061-T6 铝板进行了试验,将试验结果和通过此模型预测的结果相对比,两者疲劳寿命相差约 5 000 周次(10.9%),验证了此模型有效可靠。

Liu Jianhui 等^[37]基于损伤力学提出了一种新的缺口构件疲劳寿命预测方法,即:

$$N_f = \frac{\alpha^{-1}}{l + \gamma + 1} \left[\frac{\sigma(2k_t + 3)(r - a)^2}{5Er^2} \right]^{-\gamma} \quad (2)$$

式中, α 、 l 、 γ 为与材料类型和加载条件有关的参数; r 和 a 分别为试件半径和切口深度; K_t 为应力集中系数; E 为弹性模量; σ 为名义应力。为了验证该预测方法的可行性,以 304 不锈钢、40Cr 和 Ti-6Al-4V 合金为试验材料进行试验,并将计算结果与试验结果进行了比较,发现了采用该模型估计的误差范围在 5% 以内,计算结果与试验结果吻合较好,验证了模型的有效性。

3 缺口件疲劳行为的数值模拟

众多学者采用了有限元来分析研究缺口件疲劳行为的影响因素。Hurley 等^[38]报道了用数值模拟方法对 Ti6264 缺口试件进行低周疲劳裂纹萌生寿命预测。他们开展了应变控制的无缺口试件的疲劳试验,并假定在应力-应变相当的情况下,无缺口试件与缺口试件具有相似的疲劳裂纹萌生寿命。之后根据 Neuber 准则,用非线性有限元分析方法获得了缺口处的应力应变状态。然后,再利用基于应变的 SWT 参数、Walker 参数以及 Golos 和 Ellyin 的塑性应变能密度参数对缺口试件进行寿命预测。结果表明:三种寿命预测模型都能较为精确地预测在 -1 和 0 应变比下的室温疲劳寿命。

Aye Thant Hto 等^[13,39]用 ABAQUS 对 Ti-6Al-4V 和 2024Al 合金缺口试样进行弹塑性分析,获得了缺口根部的应力分布,塑性变形分布以及应力比变化。研究表明,当名义应力幅值较大时,在缺口根部形成较大的塑性区,这种局部拉塑性变形会引起缺口根部的残余压应力,这将导致缺口根部局部应力比减小,然后提取出缺口根部的最大应力和应变幅,并结合 SWT 模型和断裂力学方法,成功预测了缺口件的疲劳寿命。

金丹等^[40]采用有限元法对缺口件多轴疲劳试验结果进行模拟,结果表明,在相同路径的条件下,缺口根部附近的应力梯度随着缺口半径的减小而增加,有效距离随着缺口半径的减小而减小。然后基

于试验及有限元模拟结果, 根据低周疲劳的特点, 缺口件的损伤取决于缺口根部附近一定区域内损伤的累积, 损伤累计的大小与区域内的应力场和应变场有关, 提出了基于应变梯度的有效距离确定的新方法, 得到:

$$\varepsilon_{ef} = \frac{1}{x_{ef}} \int_0^{x_{ef}} \varepsilon(x) [1 - \chi x] dx \tag{3}$$

$$\chi' = \frac{1}{\varepsilon(x)} \frac{d\varepsilon(x)}{dx} \tag{4}$$

$$x'_{ef} = \min \chi' \tag{5}$$

式中, $\varepsilon(x)$ 为缺口等分线 x 处的 Von Mises 等效应变; $[1 - \chi x]$ 为权函数, 表明破坏区域内各点对峰值应力的贡献程度; χ 为相对应力梯度; x_{ef} 为有效距离, 取相对应力梯度最小值; χ' 为相对应变梯度; x'_{ef} 为有效距离, 由相对应变梯度的最小值确定。采用该法得到的有效距离较应力梯度法得到的有效距离偏小, 疲劳寿命预测效果较好。

鲍宏琛等^[41] 建立三维有限元模型, 研究含中心圆孔和中心裂缝的各向同性复合材料层合板在拉伸载荷下的缺口尺寸效应及缺口形状效应, 发现两种模型下的层合板的强度都随缺口尺寸的增加而降低, 且缺口尺寸相同时, 裂缝层合板比圆孔层合板更容易破坏。如图 2 所示, 黑色部分表示破坏区域, 从图 2 可以看出, 裂缝层合板的破坏区域明显大于圆孔层合板, 这是因为裂缝层合板会引起更大的应力集中。

董琴等^[42] 建立了循环载荷下船体板裂纹尖端张开位移理论模型, 发现在循环载荷下应力比和应力幅值的增大均会对船体板裂纹尖端张开位移带来促进作用。Tariq Alshahbouni 等^[43] 采用 ANSYS 软件对 U 型疲劳传感器进行建模分析, 发现 U 形缺口半径和外加应力对疲劳寿命的影响很大, 最大等效应力随缺口半径的增大而减小。

4 缺口件的强化处理研究

为了提高金属材料和零部件的疲劳抗力, 学者经过试验证明, 残余应力对零件缺口疲劳强度的作

用十分显著, 引入有利的残余压应力是一种比较有效的方法^[44]。喷丸可有效地提高疲劳强度, 对缺口件效果尤其显著^[45]。徐可为等^[46] 在用 LY12CZ 铝合金试验时发现, 一次预过载拉伸后, 缺口件的疲劳寿命有所提高, 喷丸的强化效果优于预拉, 其原因可能与亚晶细化造成的屈服强度升高及残余压应力分布有关。王欣等^[47] 在研究粉末合金缺口疲劳时发现, 喷丸强化后疲劳强度得到提高, 表面硬度也明显增大, 试验中采用首次喷铸钢丸大强度 (A 试片, 0.21 mm), 第二次喷陶瓷丸小强度 (A 试片, 0.07 mm) 的工艺处理时, 表层的残余压应力场数值大, 表面硬化程度和深度都较大, 疲劳强化效果最好。

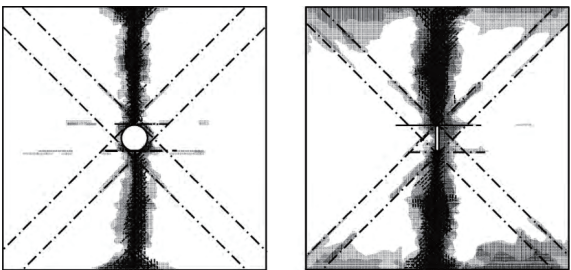


图 2 圆孔层合板与裂缝层合板破坏示意^[41]
Fig. 2 Schematic diagram of circular hole laminated plate and cracked laminated plate failure

超声深滚处理技术可以对零件表面损伤进行抗疲劳修复和强化作用^[48]。朱有利等^[49] 采用超声深滚处理技术对存在表面划伤的钛合金零件进行强化处理, 试验表明, 与未经超声深滚处理的试件相比, 经深滚处理后缺口试件的疲劳强度大幅度提高, 由 276 MPa 提高到 523 MPa。S.Blasón 等^[14] 采用缺口试样, 对深轧前后材料的疲劳行为进行了分析。研究表明, 深轧处理会引入残余压应力, 它可以延缓疲劳裂纹的萌生, 并降低裂纹扩展的速率, 对缺口件的疲劳寿命有明显的积极作用, 且应力幅越小, 疲劳寿命提高越明显。渗碳钢具有较高的疲劳强度, 但是缺口疲劳极限值较差, 冯忠信等^[50] 在研究 25MnTiBr 钢的时候, 发现经过表面滚压的试件, 其缺口疲劳极限可以提高 78%~121%, 如表 1 所示。

表 1 25MnTiBR 钢渗碳, 碳氮共渗及表面滚压的疲劳强度^[50]
Table 1 Fatigue strength of carburizing, carbonitriding and surface rolling of 25MnTiBR steel

热处理制度		光滑件疲劳极限		缺口疲劳极限	
热处理方式	回火温度/℃	(未滚压)/MPa	未滚压/MPa	滚压/MPa	提高比例/%
渗碳, 未回火		820	600	1 070	78.3
渗碳, 回火	200	700	480	1 060	120.8
碳氮共渗, 回火	180	840	550	1 000	81.8

5 总结与展望

1)综上所述,国内外学者已经对影响缺口件疲劳行为的因素开展了大量的研究,在探讨工作环境对缺口件疲劳行为的影响方面也有所发展。同时,众多学者还提出了许多缺口件疲劳寿命预测模型,并将有限元分析与试验相结合对缺口件疲劳行为进行研究,开展了一些对缺口件强化处理方面的研究。

2)可以从以下几方面进一步深入研究:①开展不同环境因素对缺口件疲劳行为影响的研究,深入了解不同环境对缺口件的影响机理,有针对性地做好防护作用。②在缺口件强化处理方面开展更多研究工作。③开展对缺口件表面涂层方面的研究,通过表面涂层保护工件,起到抑制裂纹源萌生的作用。④通过对缺口件尺寸或者形状做一定优化,改善应力集中现象。

参考文献

- [1] Luo Yunrong, Wang Qingyuan, Fu Lei, *et al.* Effect of seismic frequency on ultra-low cycle fatigue behavior of Q235 steel structure materials[J]. *Experimental Mechanics*, 2018, 33(5): 743–750.
(罗云蓉, 王清远, 付磊, 等. 地震频率对Q235钢结构材料超低周疲劳行为的影响[J]. *实验力学*, 2018, 33(5): 743–750.)
- [2] Huang Ning, Li Suyun. Fatigue behavior of notched parts[J]. *Journal of Nanchang University (Engineering & Technology Edition)*, 2018, 40(2): 174–178.
(黄宁, 李素云. 缺口件的疲劳行为[J]. *南昌大学学报(工科版)*, 2018, 40(2): 174–178.)
- [3] Zheng Ziming. Analysis of failure of steel plate parts caused by stress concentration[J]. *Automotive Technology and Materials*, 2017, (10): 32–35.
(郑子明. 应力集中导致钢板零件失效的问题分析[J]. *汽车工艺与材料*, 2017, (10): 32–35.)
- [4] Chaves V, Navarro A. Fatigue limits for notches of arbitrary profile[J]. *International Journal of Fatigue*, 2013, 48: 68–79.
- [5] Gladskyi M, Fatemi A. Notched fatigue behavior including load sequence effects under axial and torsional loadings[J]. *International Journal of Fatigue*, 2013, 55: 43–53.
- [6] Singh, Mn K. Notch tip stress strain analysis in bodies subjected to non-proportional cyclic loads microform[D]. Canada Waterloo: University of Waterloo, 1998.
- [7] Li Zheng, Xiong Changhong, Xu Jiandong, *et al.* Analysis of notch fatigue strength of aluminum alloy wire used for cable in wet environment[J]. *Casting Technology*, 2015, 36(8): 1950–1952.
(李征, 熊长虹, 许建东, 等. 电缆用铝合金导线在潮湿环境下的缺口疲劳强度分析[J]. *铸造技术*, 2015, 36(8): 1950–1952.)
- [8] Feng Xianfeng, Ye Xubin, Ye Dui, *et al.* Notch fatigue strength of aluminum alloy 2024-T351 in humid air [J]. *Journal of Materials Science and Engineering*, 2014, 32(3): 417–420.
(冯先锋, 叶序斌, 叶笃毅, 等. 潮湿空气环境下2024-T351铝合金的缺口疲劳强度[J]. *材料科学与工程学报*, 2014, 32(3): 417–420.)
- [9] Wu Ximao, Xie Guangzong, Zhang Guangping. Microstructure and notched fatigue strength of X20CrMoV12-1 steel[J]. *Journal of Materials Research*, 2008, (2): 220–224.
(吴细毛, 谢光宗, 张广平. X20CrMoV12-1钢的组织结构和缺口疲劳强度[J]. *材料研究学报*, 2008, (2): 220–224.)
- [10] Hu Lin, Gao Zhikun. Study on the genesis of crack and equiaxial crystal in rotor blade of DD6 single crystal alloy turbine[J]. *Aeroengine*, 2018, 44(6): 91–96.
(胡霖, 高志坤. DD6单晶合金涡轮转子叶片裂纹与内腔等轴晶成因研究[J]. *航空发动机*, 2018, 44(6): 91–96.)
- [11] Shi Zhenxue, Li Jiarong, Han Mei, *et al.* Notched fatigue properties of DD6 single crystal superalloy[J]. *Journal of Iron and Steel Research*, 2011, 23(S2): 345–348.
(史振学, 李嘉荣, 韩梅, 等. DD6单晶高温合金的缺口疲劳性能[J]. *钢铁研究学报*, 2011, 23(S2): 345–348.)
- [12] Yang K, Zhong B, Huang Q, *et al.* Stress ratio effect on notched fatigue behavior of a Ti-8Al-1Mo-1V alloy in the very high cycle fatigue regime[J]. *International Journal of Fatigue*, 2018, 116: 80–89.
- [13] Htoo A T, Miyashita Y, Otsuka Y, *et al.* Variation of local stress ratio and its effect on notch fatigue behavior of 2024-T4 aluminum alloy[J]. *International Journal of Fatigue*, 2016, 88: 19–28.
- [14] Blasón S, Rodríguez C, Belzunce J, *et al.* Fatigue behaviour improvement on notched specimens of two different steels

- through deep rolling, a surface cold treatment[J]. *Theoretical and Applied Fracture Mechanics*, 2017, 92: 223–228.
- [15] Xi Wei. Sensitivity analysis of fatigue life distribution of notched parts[J]. *Science, Technology and Engineering*, 2015, 15(14): 97–101.
(奚蔚. 缺口件疲劳寿命分布的敏度分析[J]. *科学技术与工程*, 2015, 15(14): 97–101.)
- [16] Berto F, Razavi S M J, Ayatollahi M R. Fatigue behaviour of notched specimens made of 40CrMoV13.9 under multiaxial loading[J]. *Procedia Structural Integrity*, 2017, 3: 85–92.
- [17] Nicoletto G. Directional and notch effects on the fatigue behavior of as-built DMLS Ti6Al4V[J]. *International Journal of Fatigue*, 2018, 106: 124–131.
- [18] Huang Wei, Chen Wei, Pan Hui, *et al.* Effect of external damage on high cycle fatigue strength of titanium alloy TC4[J]. *Mechanical Strength*, 2014, 36(3): 357–362.
(黄伟, 陈伟, 潘辉, 等. 外物损伤对钛合金TC4高周疲劳强度的影响研究[J]. *机械强度*, 2014, 36(3): 357–362.)
- [19] Mo Lihua, Gao Jie, Li Fengqi. Study on artificial notch fatigue test of high strength cylinder[J]. *Pressure Vessel*, 2005, (9): 13–15, 12.
(莫立华, 高杰, 李凤岐. 高强度钢瓶人工缺口疲劳试验的研究[J]. *压力容器*, 2005, (9): 13–15, 12.)
- [20] Zhang Qingling, Ju Xuening, Wang Qingru, *et al.* Fatigue fracture behavior of Ti-15-3 titanium alloy[J]. *Materials Engineering*, 1998, (3): 25–28.
(张庆玲, 居学宁, 王庆如, 等. Ti-15-3钛合金的疲劳断裂行为研究[J]. *材料工程*, 1998, (3): 25–28.)
- [21] Lagoda T, Bilous P, Blacha L. Investigation on the effect of geometric and structural notch on the fatigue notch factor in steel welded joints[J]. *International Journal of Fatigue*, 2017, 101: 224–231.
- [22] Liu Xiaoyan, He Xiaomei, Dong Jie. Fatigue crack initiation and propagation behavior of 2Cr13 steel[J]. *Thermal Processing Technology*, 2012, 41(2): 49–51, 54.
(刘晓燕, 何晓梅, 董洁. 2Cr13钢的疲劳裂纹萌生与扩展行为[J]. *热加工工艺*, 2012, 41(2): 49–51, 54.)
- [23] Shan Zhaohui, Wang Zhongguang, Zhang Yun, *et al.* Study on short fatigue crack behavior of Al-Li alloy[J]. *Journal of Materials Research*, 1994, (6): 524–526.
(单朝晖, 王中光, 张匀, 等. Al-Li合金缺口疲劳短裂纹行为的研究[J]. *材料研究学报*, 1994, (6): 524–526.)
- [24] Owolabi G, Okeyoyin O, Bamiduro O, *et al.* The effects of notch size and material microstructure on the notch sensitivity factor for notched components[J]. *Engineering Fracture Mechanics*, 2015, 145: 181–196.
- [25] Zhang Chengcheng, Yao Weixing. Method for fatigue life analysis of typical notched parts[J]. *Journal of Aeronautical Dynamics*, 2013, 28(6): 1223–1230.
(张成成, 姚卫星. 典型缺口件疲劳寿命分析方法[J]. *航空动力学报*, 2013, 28(6): 1223–1230.)
- [26] Adib H, Pluvineau G. Theoretical and numerical aspects of the volumetric approach for fatigue life prediction in notched components[J]. *International Journal of Fatigue*, 2003, 25(1): 67–76.
- [27] Xi Wei, Yao Weixing. Effective stress method for predicting the fatigue life distribution of notched parts[J]. *Chinese Journal of Solid Mechanics*, 2013, 34(2): 205–212.
(奚蔚, 姚卫星. 缺口件疲劳寿命分布预测的有效应力法[J]. *固体力学学报*, 2013, 34(2): 205–212.)
- [28] Xi Wei, Yao Weixing. A method for predicting the fatigue life of notched parts considering the size effect[J]. *Journal of Nanjing University of Aeronautics and Astronautics*, 2013, 45(4): 497–502.
(奚蔚, 姚卫星. 一种考虑尺寸效应的缺口件疲劳寿命预测方法[J]. *南京航空航天大学学报*, 2013, 45(4): 497–502.)
- [29] Madia M, Zerbst U. Application of the cyclic R-curve method to notch fatigue analysis[J]. *International Journal of Fatigue*, 2016, 82: 71–79.
- [30] Tanaka K, Akiniwa Y. Resistance-curve method for predicting propagation threshold of short fatigue cracks at notches[J]. *Engineering Fracture Mechanics*, 1988, 30(6): 863–876.
- [31] Tabernig B, Pippan R. Determination of the length dependence of the threshold for fatigue crack propagation[J]. *Engineering Fracture Mechanics*, 2002, 69(8): 899–907.
- [32] Medekshas H, Balina V. Assessment of low cycle fatigue strength of notched components[J]. *Materials & Design*, 2006, 27(2): 132–140.
- [33] Kwon K, Frangopol D M. Bridge fatigue reliability assessment using probability density functions of equivalent stress range based on field monitoring data[J]. *International Journal of Fatigue*, 2010, 32(8): 1221–1232.
- [34] Ayyub B M, Assakkaf I A, Kihl D P, *et al.* Reliability-based design guidelines for fatigue of ship structures[J]. *Naval*

- Engineers Journal, 2010, 114(2): 113–138.
- [35] Lim H J, Lee Y J, Sohn H. Continuous fatigue crack length estimation for aluminum 6061-T6 plates with a notch[J]. *Mechanical Systems and Signal Processing*, 2019, 120: 356–364.
- [36] Sun J, Ding Z, Huang Q. Corrosion fatigue life prediction for steel bar in concrete based on fatigue crack propagation and equivalent initial flaw size[J]. *Construction and Building Materials*, 2019, 195: 208–217.
- [37] Liu J, Zhang R, Wei Y, *et al.* A new method for estimating fatigue life of notched specimen[J]. *Theoretical and Applied Fracture Mechanics*, 2018, 93: 137–143.
- [38] Hurley P J, Whittaker M T, Williams S J, *et al.* Prediction of fatigue initiation lives in notched Ti 6246 specimens[J]. *International Journal of Fatigue*, 2008, 30(4): 623–634.
- [39] Htoo A T, Miyashita Y, Otsuka Y, *et al.* Notch fatigue behavior of Ti-6Al-4V alloy in transition region between low and high cycle fatigue[J]. *International Journal of Fatigue*, 2017, 95: 194–203.
- [40] Jin Dan, Gou Zhifei. A new method for fatigue life prediction of notched parts[J]. *Journal of Aeronautical Materials*, 2017, 37(2): 81–87.
(金丹, 猴之飞. 缺口件疲劳寿命预测新方法[J]. *航空材料学报*, 2017, 37(2): 81–87.)
- [41] Bao Hongchen, Liu Guangyan. Numerical simulation of gap size and shape effect of fiber reinforced composite laminates[J]. *Journal of Composite Materials*, 2017, 34(5): 987–995.
(鲍宏琛, 刘广彦. 纤维增强复合材料层合板缺口尺寸及形状效应数值模拟[J]. *复合材料学报*, 2017, 34(5): 987–995.)
- [42] Dong Qin, Yang Ping, Yu Zhifeng. CTOD theory and numerical simulation of ship notched plate considering cumulative plastic failure under cyclic loading[J]. *Ship Mechanics*, 2018, 22(7): 865–872.
(董琴, 杨平, 余志锋. 循环载荷下考虑累积塑性破坏的船体缺口板CTOD理论及数值模拟研究[J]. *船舶力学*, 2018, 22(7): 865–872.)
- [43] Alshahbouni T, Güngör A. Designing and modeling U-notch fatigue sensor to predict the fatigue life of structural components[J]. *Engineering Science and Technology, an International Journal*, 2019, 22(2): 405–415.
- [44] Zhang Dingquan. Effect of residual stress on fatigue strength of metal[J]. *Physical and Chemical Examination (Physical Volume)*, 2002, (6): 231–235.
(张定铨. 残余应力对金属疲劳强度的影响[J]. *理化检验(物理分册)*, 2002, (6): 231–235.)
- [45] Zhang D, Xu K, He J. Aspects of the residual stress field at a notch and its effect on fatigue[J]. *Materials Science & Engineering A*, 1991, 91(136): 79–83.
- [46] Xu Kewei, Zhang Hui, Hu Naisai. The effect of a pre overload on the notch fatigue strength of aluminum alloy before and after shot peening[J]. *Journal of Aeronautics*, 1993, (6): 317–320.
(徐可为, 张晖, 胡奈赛. 一次预过载对铝合金喷丸前后缺口疲劳强度的影响[J]. *航空学报*, 1993, (6): 317–320.)
- [47] Wang Xin, Wang Kechang, Luo Xuekun, *et al.* Effect of powder alloy FGH95 shot peening on high temperature notch fatigue property[J]. *Aviation Manufacturing Technology*, 2018, 61(z2): 40–45.
(王欣, 王科昌, 罗学昆, 等. 粉末合金FGH95喷丸强化对高温缺口疲劳性能的影响[J]. *航空制造技术*, 2018, 61(z2): 40–45.)
- [48] Li Li, Zhu Youli, Lv Guangyi, *et al.* Study on ultrasonic deep roll surface strengthening technology of TC4 titanium alloy[J]. *Materials Engineering*, 2008, (11): 68–70, 74.
(李礼, 朱有利, 吕光义, 等. TC4钛合金超声深滚表面强化技术的研究[J]. *材料工程*, 2008, (11): 68–70, 74.)
- [49] Zhu Youli, Bian Feilong, Wang Yanli, *et al.* Ultrasonic deep roll anti-fatigue strengthening treatment of surface small notch damage[J]. *Journal of Armored Force Engineering College*, 2014, 28(5): 82–86.
(朱有利, 边飞龙, 王燕礼, 等. 表面小缺口损伤的超声深滚抗疲劳强化处理[J]. *装甲兵工程学院学报*, 2014, 28(5): 82–86.)
- [50] Feng Zhongxin. Study on the influence of surface rolling on the notch fatigue strength of carburized steel[J]. *Journal of Xi'an Jiaotong University*, 1995, (8): 90–94.
(冯忠信. 表面滚压对渗碳钢缺口疲劳强度影响的研究[J]. *西安交通大学学报*, 1995, (8): 90–94.)