

引用格式 张海江,徐善华,王友德,等. 锈蚀钢材既有裂纹缺陷启裂准则研究[J]. 工业建筑,2025,55(1):169-175. ZHANG H J, XU S H, WANG Y D, et al. Research on the Crack Initiation Criteria for the Existing Crack Defects in Corroded Steels[J]. Industrial Construction, 2025,55(1):169-175 (in Chinese). DOI:10.3724/j.gyjzG24080902

锈蚀钢材既有裂纹缺陷启裂准则研究^{*}

张海江^{1,2} 徐善华² 王友德² 王皓² 李晗²

(1. 河北工程大学土木工程学院, 河北邯郸 056000; 2. 西安建筑科技大学土木工程学院, 西安 710000)

摘要 在恶劣环境中服役多年的钢结构工程,常常会同时遭受宏观裂纹和表面锈蚀的损伤作用。为恰当评价锈蚀钢结构中既有裂纹缺陷启裂门槛的降低程度,开展了锈蚀钢材既有裂纹缺陷启裂准则研究。通过含裂纹锈蚀钢板的拉伸试验和基于微观机理的断裂理论分析,建立了锈蚀钢材既有裂纹缺陷的启裂准则。结果表明,表面锈蚀大大降低了钢结构中既有裂纹缺陷的启裂临界荷载;根据锈蚀钢材裂尖区域孔洞萌生—变形的微观断裂机制,可以建立锈蚀钢材既有裂纹缺陷的启裂准则,且该启裂准则可以较好地计算含裂纹锈蚀钢板的断裂荷载。

关键词 锈蚀钢结构;裂纹缺陷;微观机制;启裂准则;断裂荷载

Research on the Crack Initiation Criteria for the Existing Crack Defects in Corroded Steels

ZHANG Haijiang^{1,2} XU Shanhua² WANG Youde² WANG Hao² LI Han²

(1. School of Civil Engineering, Hebei University of Engineering, Handan 056000, China;

2. School of Civil Engineering, Xi'an University of Architecture and Technology, Xi'an 710000, China)

Abstract: Steel structures that have been in service in the harsh environment for many years, often suffer from macroscopic cracks and surface corrosion damage at the same time. In order to properly evaluate the reduction degree of crack initiation threshold of existing crack defects in corroded steel structures, the paper studied the crack initiation criteria for existing crack defects in corroded steels. Through the tensile tests of cracked corroded steel plates, and the fracture analysis based on microscopic mechanism, the fracture initiation criterion for existed crack defects in corroded steels was established. The results showed that surface corrosion greatly reduced the critical loads of the existing cracks in the steel structure. According to the micro fracture mechanism of hole initiation and deformation in the crack tip region of the corroded steel plates, the crack initiation criteria for the existing crack defects of the corroded steel plates could be established, and the fracture loads of the corroded steel plates with cracks could be better calculated.

Keywords: corroded steel structures; crack defects; microscopic mechanism; crack initiation criterion; breaking load

^{*} 河北省青年科学基金项目(E2023402018);国家自然科学基金项目(52178165)。

第一作者:张海江,博士研究生,讲师,主要从事钢结构耐久性工作。

电子信箱:zhjiang1994@sina.com

收稿日期:2024-08-09

0 引言

钢结构因其轻质高强、工业化程度高、可重复使用的特点,在建筑工程领域得到了广泛应用。2020 年我国钢结构用钢量已达 8 900 万 t,预计 2025 年达到 1.4 亿 t 左右,2035 年达到每年 2 亿 t 以上^[1]。但由于钢结构耐腐蚀性较差,加之业主维护积极性普遍不高,因此在工业、海洋等恶劣环境中长期服役的钢结构工程,常常会面临严重的锈蚀问题。据统计,我国 2014 年的腐蚀总成本约为 21 278.2 亿元,占当年 GDP 的 3.34%,可见锈蚀问题的广泛性和严重性^[2-3]。表面锈蚀降低了钢结构中构件和节点的承载能力,是钢结构长期安全服役所面临的巨大挑战^[4-6]。

实际钢结构工程中常常存在着裂纹以及类似于裂纹的缺陷,比如疲劳裂纹、焊接缺陷等^[7-9]。因此在恶劣环境中服役多年的钢结构工程,往往会同时遭受着宏观裂纹和表面锈蚀的损伤作用。表面锈坑改变裂纹尖端的约束状态,增大裂纹尖端周围区域的力学场强度,因此会降低钢结构中既有裂纹缺陷的启裂门槛,加速钢结构中既有裂纹的扩展,使在役锈蚀钢结构工程存在巨大的断裂破坏隐患。

现有研究关注含裂纹金属板的力学性能,但并未考虑表面锈蚀的效应。为了恰当评价表面锈蚀对钢结构中既有裂纹缺陷启裂门槛的降低程度,本文开展了锈蚀钢材既有裂纹缺陷启裂准则研究。首先开展了含裂纹锈蚀钢板试件的形貌扫描试验和单调拉伸试验,获得其断裂荷载和断口特征;然后基于含裂纹钢板启裂时裂尖区域微观断裂机制,建立锈蚀钢材既有裂纹缺陷的启裂准则;最后利用含裂纹锈蚀钢板试件的单调拉伸试验结果,对锈蚀钢材既有裂纹缺陷启裂准则进行验证。

1 含裂纹锈蚀钢板的单调拉伸试验

1.1 试件制作

试验所用锈蚀钢材来自某废弃钢渣库厂房的车间走道梁,锈蚀钢材为 Q235 钢。本次试验设计加工了含中心裂纹的锈蚀钢板和含边缘裂纹的锈蚀钢板试件,如图 1 所示。试件尺寸和裂纹形式参考文献^[10-11],裂纹长度参考 GB/T 21143—2007《金属材料 准静态断裂韧度的统一试验方法》。由于加载方向垂直于裂纹平面,因此裂纹类型属于 I 型或张开型。试件均切自锈蚀槽钢的腹板部位,裂纹方向与钢板轧制方向垂直(图 2)。

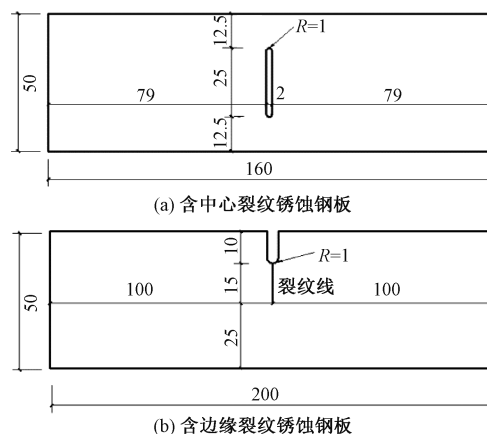


图 1 含裂纹锈蚀钢板试件尺寸 mm

Fig. 1 Sizes of corroded steel plates with cracks

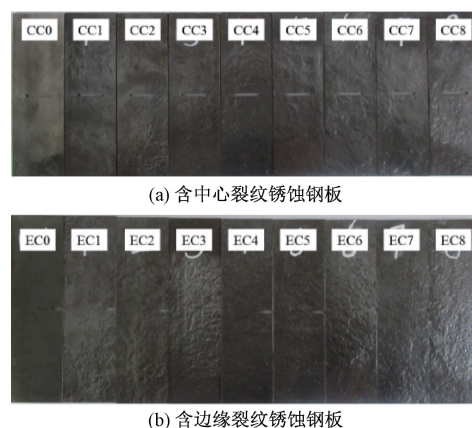


图 2 含裂纹锈蚀钢板试件

Fig. 2 Corroded steel plates with cracks

1.2 裂纹区域锈蚀形貌的测试

采用 ST400 三维扫描仪对试件 CC1~CC8 裂纹区域的锈蚀形貌进行扫描测试,形貌扫描结果如图 3 所示。获取锈蚀表面的相对高度信息后,可以计算出钢板裂纹区域的锈蚀程度参数,并将用于锈蚀钢板既有裂纹缺陷启裂准则的验证。参数计算范围为锈蚀钢板裂纹启裂和裂纹初步扩展的区域,因此计算结果用于表征试件锈蚀程度、分析试件断裂性能是恰当的。

1.3 含裂纹锈蚀钢板的单调拉伸试验

采用万能试验机进行加载,加载速率为 1 mm/min^[10-11]。试件在加载过程中,从裂纹启裂、裂纹扩展直至完全断裂,如图 4 所示。

图 5 为含裂纹锈蚀钢板在单调荷载下的断裂路径和断口形式。可以看到,试件断裂后的塑性变形区仅仅为裂纹尖端附近且位于裂纹扩展线两侧的一小块区域。断裂路径从垂直于加载方向的平面断裂逐渐转变到倾斜面撕裂;由于钢板锈蚀表面形貌具

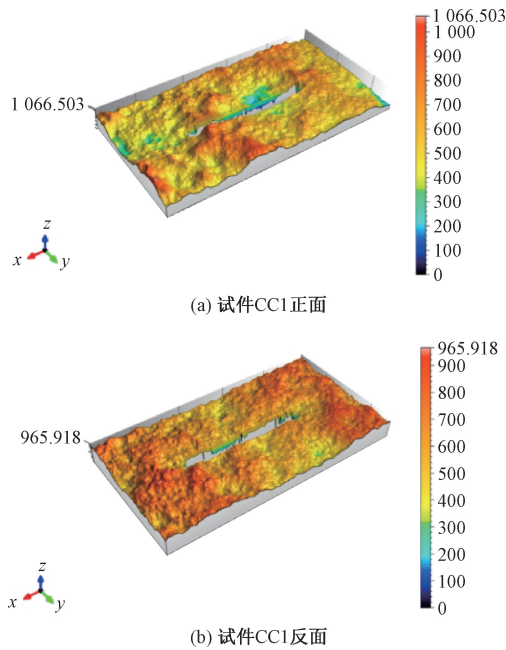


图 3 裂纹区域形貌扫描结果 μm
Fig. 3 Crack region topography scanning results

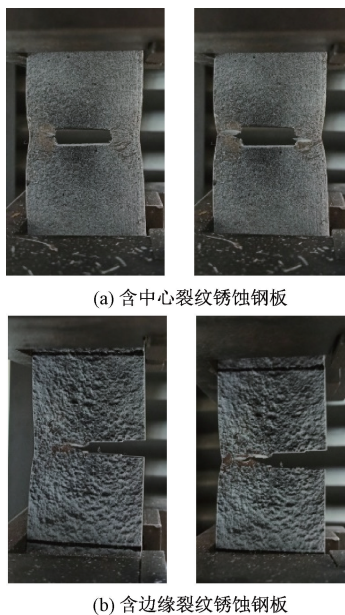


图 4 含裂纹锈蚀钢板试件的单调拉伸试验
Fig. 4 Monotonic tensile tests of corroded steel plates with cracks

有随机性,因此各个试件的断裂倾斜面方向也不相同。断口粗糙不平,具有韧性断裂的特征。

图 6 和图 7 分别给出了两组含裂纹锈蚀钢板试件 CC0~CC8 和 EC0~EC7 的荷载-位移曲线。可以看到,锈蚀后的含裂纹钢板极限承载能力和变形能力均出现了严重退化。荷载在达到极限值后迅速下降,表明裂纹在启裂后迅速扩展,试件失去继续承载的能力。

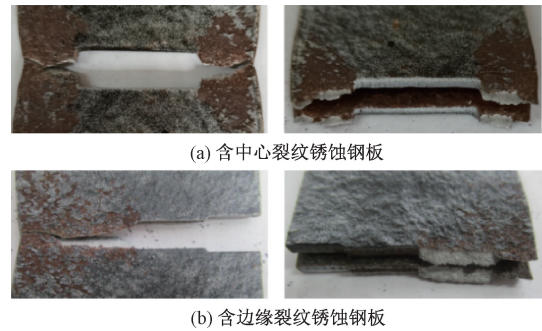


图 5 断裂试验后的含裂纹锈蚀钢板
Fig. 5 Corroded steel plates with cracks after fracture tests

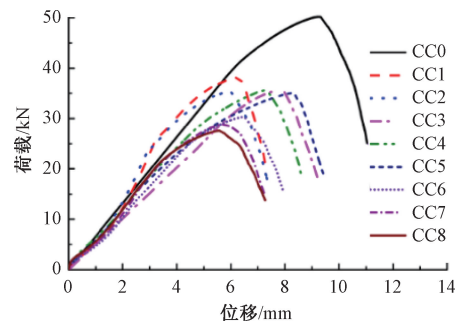


图 6 含中心裂纹锈蚀钢板荷载-位移曲线

Fig. 6 Load-displacement curves of corroded steel plates with central cracks

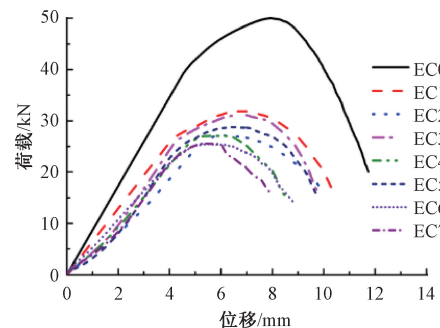


图 7 含边缘裂纹锈蚀钢板荷载-位移曲线

Fig. 7 Load-displacement curves of corroded steel plates with edge cracks

图 8、图 9 给出了含裂纹锈蚀钢板试件极限荷载退化率 Δ_F 随质量损失率 η_g 的变化曲线。可以看到,试件的质量损失率 η_g 越大,极限荷载 F_u 退化越严重。需要指出,本次试验截取的锈蚀钢材服役年限较长,锈蚀程度较大(质量损失率大于 25%),因此图 8、图 9 中的结论主要适用于高锈蚀程度的情况,在 0~25% 锈蚀程度下的合理性还需进一步讨论。

2 锈蚀钢材既有裂纹缺陷启裂准则

含裂纹钢板的启裂可以视为裂尖区域材料中微

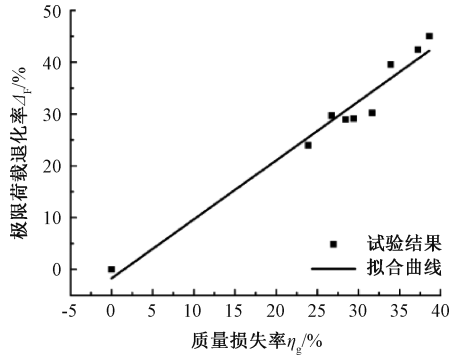


图8 含中心裂纹锈蚀钢板极限荷载退化率随质量损失率的变化趋势

Fig. 8 Variation trends of ultimate load degradation rates with mass loss rates of central-cracked corroded steel plates

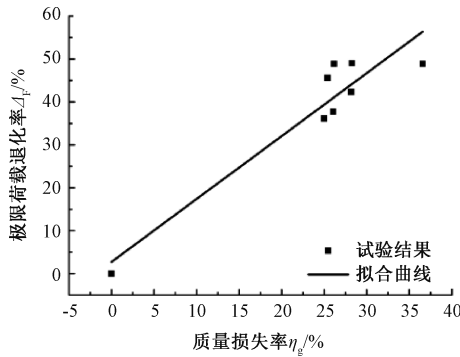


图9 含边缘裂纹锈蚀钢板极限荷载退化率随质量损失率的变化趋势

Fig. 9 Variation trends of ultimate load degradation rates with mass loss rates of edge-cracked corroded steel plates

观孔洞萌生、变形及其与裂纹尖端之间交互作用的过程^[11-12],如图10所示。在裂尖区域的应力场作用下,已萌生的孔洞快速变形,直至与裂尖贯通,裂纹向前扩展^[13-14]。

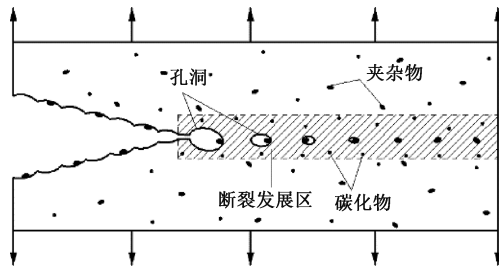


图10 裂尖区域钢材的微观断裂过程

Fig. 10 Micro fracture process of steel in crack tip region

2.1 锈蚀钢材裂纹尖端区域孔洞萌生模型

Argon等^[15]和Beremin^[16]认为当钢材中夹杂的粒子与基体之间的局部应力达到临界值 σ_c 时,微观孔洞萌生,该临界局部应力 σ_c 为:

$$\sigma_c = \sigma_m + \bar{\sigma} \quad (1)$$

式中: σ_m 为平均应力; $\bar{\sigma}$ 为Mises等效应力。

可见,裂尖区域微观孔洞萌生过程主要受到断裂位置局部等效应力 $\bar{\sigma}$ 以及应力三轴度 T 的影响。因此,锈蚀钢板裂纹前缘区域单位体积内成核孔洞数量 D_n^{cp} 可以表示为:

$$D_n^{cp} = D_n^{cp}(\bar{\sigma}, T) \quad (2)$$

需要指出的是,式(2)中局部等效应力以及应力三轴度均需考虑表面锈蚀的效应,上角标cp表示含裂纹钢板。

相关研究表明,尽管表面锈坑对裂尖应力三轴度 T 有影响,但 T 数值仅在0.95~1.7之间变动^[17],这一数值范围属于高应力三轴度,波动不大,故可以忽略 T 对锈蚀钢板裂纹前缘区域成核孔洞数量 D_n^{cp} 的影响,式(2)可以简化为:

$$D_n^{cp} = D_n^{cp}(\bar{\sigma}) \quad (3)$$

而锈蚀钢板裂纹前缘的局部场等效应力 $\bar{\sigma}$ 随远端(加载端)名义应力 σ_n 的增大而增大,且锈坑削弱钢板裂纹区域的横截面面积越大,局部场的等效应力增长速度越快^[17]。可见,局部场等效应力 $\bar{\sigma}$ 的增大速度与截面损伤系数 d_c 有关,即:

$$\bar{\sigma} = \bar{\sigma}(\sigma_n, d_c) \quad (4)$$

$$\text{其中 } d_c = \frac{S_0 - S_{cor}}{S_0} \times 100$$

式中: d_c 为含裂纹锈蚀钢板的截面损伤系数; S_0 为含裂纹钢板裂纹扩展平面的初始截面面积; S_{cor} 为考虑表面锈蚀后裂纹扩展平面的净截面面积。

综上所述,锈蚀钢板裂纹前缘区域单位体积内的成核孔洞数量 D_n^{cp} 可采用式(5)描述:

$$D_n^{cp} = R_n^{cp} d_c K^{cp} \left(\frac{\sigma_n}{\sigma_y} \right)^{n^{cp}} \quad (5)$$

式中: K^{cp} 和 n^{cp} 分别为描述局部场等效应力 $\bar{\sigma}$ 随远端(加载端)应力 σ_n 变化规律的系数; σ_y 为材料屈服应力; R_n^{cp} 为描述 D_n^{cp} 随 $\bar{\sigma}$ 变化规律的系数。

2.2 锈蚀钢材裂纹尖端区域孔洞变形模型

研究表明,金属材料基体中微观孔洞的体积扩张速度主要受应力三轴度 T 的影响。例如Rice等^[18]指出,球形孔洞半径的增长率可以表达为:

$$\frac{dR}{R} = C \exp(1.5T) d\varepsilon_p \quad (6)$$

式中: R 为孔洞瞬时半径; C 为材料常数; ε_p 为等效

塑性应变。再如 Chae 等^[19]汇总的 HY-100 钢在不同应力三轴度下孔洞面积分数随等效塑性应变的变化曲线,表明孔洞面积的增长速度和应力三轴度有关。

同时,材料基体中微观孔洞的形状改变同样会导致钢材的损伤软化,而决定微观孔洞形状改变的主要因素是偏应力状态。例如赵震等^[20]通过引入应力偏张量的方法对 Rice 等^[18]提出的模型进行了修正:

$$\int_0^{\varepsilon_{p,f}} \exp(1.5T) \left(1 + C_1 \left| \frac{\sigma'_3}{\sigma'_1} \right| \right) d\varepsilon_p = C \quad (7)$$

式中: σ'_1 为最大主应力的偏张量; σ'_3 为最小主应力的偏张量; C_1 和 C 为与材料有关的参数。

本文采用 Lode 应力参数 L 来表征偏应力状态。综合上述讨论,锈蚀钢板裂纹前缘区域由于孔洞变形导致的损伤 D_g^{cp} 可以表示为:

$$D_g^{cp} = D_g^{cp}(T, L) \quad (8)$$

式中: T 和 L 为考虑表面锈蚀影响的裂尖位置应力状态。

对于含裂纹锈蚀钢板,其断裂起始点的应力三轴度 T 和 Lode 应力参数 L 取决于裂尖区域锈坑的深度和形状,且应力状态参数 T, L 与锈坑几何参数之间存在着良好的数学关系,故式(8)可以转换为:

$$D_g^{cp} = D_g^{cp}(\lambda, \rho) \quad (9)$$

式中: λ 为锈坑深度与钢板厚度的比值; ρ 为锈坑深径比。

根据上述讨论,结合式(6)中的指数函数形式的孔洞扩张模型,锈蚀钢板裂纹前缘区域材料由于已萌生孔洞变形而导致的损伤可以定义为:

$$D_g^{cp} = A^{cp} \exp\left(Z_0 + C^{cp} \frac{\lambda}{\rho}\right) \quad (10)$$

式中: C^{cp} 、 A^{cp} 、 Z_0 为待定系数。

2.3 锈蚀钢材既有裂纹缺陷启裂准则的建立

根据锈蚀钢板裂纹尖端区域微观孔洞萌生—变形的断裂机制,结合其孔洞萌生模型和孔洞变形模型,可以建立锈蚀钢板既有裂纹缺陷的启裂准则:

$$D_c^{cp} = D_n^{cp} D_g^{cp} \quad (11)$$

将式(5)和式(10)代入式(11),即:

$$D_c^{cp} = A^{cp} \exp\left(Z_0 + C^{cp} \frac{\lambda}{\rho}\right) R_n^{cp} \left[d_c K^{cp} \left(\frac{\sigma_n}{\sigma_y} \right)^{n^{cp}} \right] \quad (12)$$

式中: D_c^{cp} 为锈蚀钢板中既有裂纹开始启裂时的临界损伤值,它与材料断裂韧性的好坏有关。令:

$$\eta^{cp} = \frac{D_c^{cp}}{A^{cp} R_n^{cp}} \quad (13)$$

则式(12)可以简化为:

$$\eta^{cp} = \exp\left(Z_0 + C^{cp} \frac{\lambda}{\rho}\right) \left[d_c K^{cp} \left(\frac{\sigma_n}{\sigma_y} \right)^{n^{cp}} \right] \quad (14)$$

结合式(5)中给出的启裂位置等效应力 $\bar{\sigma}$ 与远端(加载端)应力 σ_n 之间的关系,式(14)可以从远端名义应力 σ_n 的形式转换为启裂位置等效应力 $\bar{\sigma}$ 的形式,其积分形式的表达式为:

$$\eta^{cp} = \int_0^{\bar{\sigma}_f} \exp\left(Z_0 + C^{cp} \frac{\lambda}{\rho}\right) d\bar{\sigma} \quad (15)$$

式中: $\bar{\sigma}_f$ 为既有裂纹启裂时,裂尖区域断裂起始点的等效应力极限值。

由于钢材的本构关系中等效应力和等效塑性应变之间存在特定的数学关系,可以用代数方程来描述,因此式(15)可以等效转换为塑性应变 ε_p 的形式:

$$\eta^{cp} = \int_0^{\varepsilon_{p,f}} \exp\left(Z_0 + C^{cp} \frac{\lambda}{\rho}\right) d\varepsilon_p \quad (16)$$

当钢板未发生锈蚀时,锈坑几何参数 λ 为 0,于是式(16)在未锈蚀状态下的形式为:

$$\eta^{cp} = \int_0^{\varepsilon_{p,f}} \exp(Z_0) d\varepsilon_p \quad (17)$$

当钢板未发生锈蚀时,Rice 等^[18]提出的 VGM 断裂准则也适用于含裂纹钢板韧性断裂起始的预测^[21],其表达式为:

$$\eta = \int_0^{\varepsilon_{p,f}} \exp(1.5T) d\varepsilon_p \quad (18)$$

在裂纹尖端区域, T 可以取为 0.6。比较式(17)和式(18),便可以得到:

$$Z_0 = 1.5T = 0.9 \quad (19)$$

$$\eta^{cp} = \eta \quad (20)$$

因此,在锈蚀钢板既有裂纹缺陷的启裂准则式(14)中, η^{cp} 为与锈蚀状态无关的材料断裂韧度参数; Z_0 描述了未锈蚀状态下钢材的孔洞变形损伤速度; $C^{cp} \lambda / \rho$ 为孔洞变形损伤速度的锈蚀状态修正; K^{cp} 和 n^{cp} 描述的则是启裂位置等效应力 $\bar{\sigma}$ 随远端名义应力 σ_n 的变化规律,因此 K^{cp} 和 n^{cp} 为与裂纹体几何形式、材料塑性流动特性相关的参数。

由断裂准则式(14)可以得到锈蚀钢材既有裂纹缺陷启裂时的名义断裂应力 $\sigma_{n,f}$ 与截面损伤系数 d_c 和锈坑几何参数 λ / ρ 之间的关系:

$$\sigma_{n,f} = \sigma_y \left[\frac{\eta^{cp}}{d_c K^{cp} \exp\left(Z_0 + C^{cp} \frac{\lambda}{\rho}\right)} \right]^{\frac{1}{n^{cp}}} \quad (21)$$

式中: $\sigma_{n,f}$ 为名义断裂应力,其值为断裂荷载与钢板初始截面面积的比值。

3 锈蚀钢材既有裂纹缺陷启裂准则的验证

利用含裂纹锈蚀钢板试件 CC1~CC8 的形貌扫描试验和单调拉伸试验结果对锈蚀钢板既有裂纹缺陷启裂准则式(14)进行验证。

采用试验结果($\sigma_{n,f}/\sigma_y, d_c, \lambda/\rho$)校准启裂准则式(14)中的4个待定参数。试件 CC1~CC8 的形貌扫描试验和拉伸试验结果列于表1,根据数据($\sigma_{n,f}/\sigma_y, d_c, \lambda/\rho$)拟合出4个待定参数的取值,分别为 $\eta^{cp} = 1.330$ 、 $C^{cp} = 0.410$ 、 $K^{cp} = 0.335$ 、 $n^{cp} = 3.735$ 。

表1 试件 CC1~CC8 的试验结果($\sigma_{n,f}/\sigma_y, d_c, \lambda/\rho$)以及 $\sigma_{n,f}/\sigma_y$ 计算结果

Table 1 Tested results of $\sigma_{n,f}/\sigma_y, d_c, \lambda/\rho$ and calculation results of $\sigma_{n,f}/\sigma_y$ of specimens CC1-CC8

试件 编号	截面损伤 系数 d_c	锈坑几何 参数 λ/ρ	名义断裂应力 $\sigma_{n,f}/\sigma_y$	
			试验值	计算值
CC1	10.20	0.099	0.584	0.604
CC2	16.84	0.130	0.540	0.526
CC3	15.47	0.112	0.546	0.539
CC4	16.94	0.122	0.545	0.526
CC5	15.27	0.221	0.536	0.535
CC6	25.69	0.199	0.464	0.466
CC7	30.98	0.152	0.442	0.446
CC8	33.43	0.160	0.422	0.436

图11给出了含裂纹锈蚀钢板试件 CC1~CC8 根据拟合的待定参数在空间($\sigma_{n,f}/\sigma_y, d_c, \lambda/\rho$)中绘制的断裂轨迹图,图中的散点表示试验结果。根据启裂准则式(21)计算的名义断裂应力 $\sigma_{n,f}/\sigma_y$ 同样列于表1中。结果表明,使用本文提出的锈蚀钢材既有裂纹缺陷启裂准则计算的名义断裂应力平均相对误差为1.93%。

4 结 论

1)含裂纹锈蚀钢板的单调拉伸试验表明,表面锈蚀将大大降低钢结构中既有裂纹缺陷的启裂临界荷载;锈蚀程度越大,启裂临界荷载退化越严重。

2)建立了锈蚀钢材既有裂纹缺陷启裂微观损伤的量化模型,锈蚀钢材裂纹尖端微孔洞萌生和变形过程与钢板的裂纹截面损伤程度和裂尖局部锈坑的深度、形状有关。

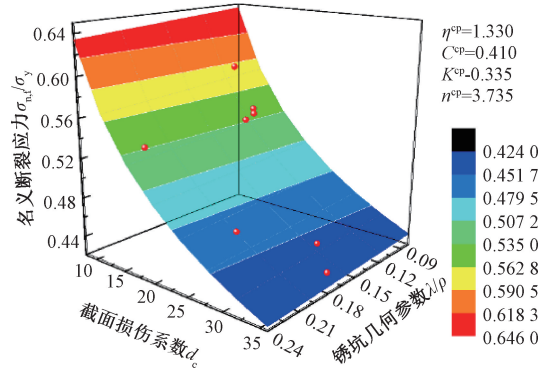


图11 含裂纹锈蚀钢板试件 CC1~CC8 在三维空间($\sigma_{n,f}/\sigma_y, d_c, \lambda/\rho$)中的断裂轨迹图

Fig. 11 Fracture trajectory diagram of corroded steel plates CC1-CC8 with cracks in three-dimensional space ($\sigma_{n,f}/\sigma_y, d_c, \lambda/\rho$)

3)基于微观断裂机制建立了锈蚀钢材既有裂纹缺陷的启裂准则。使用启裂准则,根据钢板的腐蚀形貌数据可以较好地计算含裂纹锈蚀钢板的断裂荷载。

参 考 文 献

[1] 刘毅. 2021年钢结构行业发展现状及2022年展望[R]. 北京:中国钢结构协会, 2022.

[2] 侯保荣. 中国腐蚀成本[M]. 北京:科学出版社, 2017.

[3] 侯保荣,路东柱. 我国腐蚀成本及其防控策略[J]. 中国科学院院刊, 2018, 33(6): 601-609.

[4] 徐善华, 张宗星, 李柔, 等. 锈蚀钢框架地震易损性评定方法[J]. 工程力学, 2018, 35(12): 107-115.

[5] 徐吉民, 幸坤涛, 高向宇, 等. 锈损冷弯薄壁卷边槽钢短柱受压承载力试验研究[J]. 工程力学, 2021, 38(4): 191-199, 210.

[6] 谢清清, 邓年春. 轴偏转角对吊索腐蚀钢丝力学性能影响研究[J]. 华东交通大学学报, 2023, 40(4): 103-111.

[7] 王伟, 廖芳芳, 陈以一. 基于微观机制的钢结构节点延性断裂预测与裂后路径分析[J]. 工程力学, 2014, 31(3): 101-108, 115.

[8] 刘希月, 王元清, 石永久. 基于微观机理的高强度钢材及其焊缝断裂预测模型研究[J]. 建筑结构学报, 2016, 37(6): 228-235.

[9] 白文畅, 袁周致远, 吉伯海, 等. 钢桥面板顶板-U肋焊缝裂纹萌生特征及扩展规律[J]. 华东交通大学学报, 2024, 41(1): 20-29.

[10] TORABI A R, CAMPAGNOLO A, BERTO F. Mixed mode I/II crack initiation from U-notches in Al 7075-T6 thin plates by large-scale yielding regime[J]. Theoretical and Applied Fracture Mechanics, 2016, 86: 284-291.

[11] BERTO F, LAZZARIN P. Recent developments in brittle and quasi-brittle failure assessment of engineering materials by means of local approaches[J]. Materials Science and Engineering R,

- 2014, 75(1): 1-48.
- [12] HÜTTER G, ZYBELL L, MÜHLICH U, et al. Consistent simulation of ductile crack propagation with discrete 3D voids [J]. Computational Materials Science, 2013, 80: 61-70.
- [13] RICE J R, JOHNSON M A. The role of large crack tip geometry changes in plane strain fracture [M]. Providence, Rhodes Island: Brown University, 1969.
- [14] PINEAU A, BENZERGA A A, PARDOEN T. Failure of metals I: brittle and ductile fracture [J]. Acta Materialia, 2016, 107: 424-483.
- [15] ARGON A S, IM J, SAFOGLU R. Cavity formation from inclusions in ductile fracture [J]. Metallurgical Transactions A, 1975, 6A: 825-837.
- [16] BEREMIN F M. Cavity formation from inclusions in ductile fracture of A508 steel [J]. Metallurgical Transactions A, 1981, 12A: 723-731.
- [17] 张海江. 锈蚀钢板韧性断裂机制与断裂模型研究 [D]. 西安: 西安建筑科技大学, 2022.
- [18] RICE J R, TRACEY D M. On the ductile enlargement of voids in triaxial stress fields [J]. Journal of the Mechanics and Physics of Solids, 1969, 17: 201-217.
- [19] CHAE D, KOSS D A. Damage accumulation and failure of HSLA-100 steel [J]. Materials Science and Engineering A, 2004, 366: 299-309.
- [20] 赵震, 谢晓龙, 李明辉. 空穴长大延性损伤新模型 [J]. 金属学报, 2007, 43(10): 1037-1042.
- [21] KANVINDE A M, DEIERLEIN G G. The void growth model and the stress modified critical strain model to predict ductile fracture in structural steels [J]. Journal of Structural Engineering, 2006, 132(12): 1907-1918.