

文章编号:1007-9629(2022)09-0924-07

锈坑对钢筋高温后力学性能的影响

刘崇勋, 巴光忠*, 郑欣欣, 周家欣
(上海海事大学 海洋科学与工程学院, 上海 201306)

摘要:为了研究高温后钢筋锈坑的应力分布,通过机械加工来模拟锈蚀钢筋并研究了钢筋在高温后力学性能的变化,最后采用有限元软件计算了模拟锈坑的应力分布.结果表明:对于带有单个模拟锈坑的试件,相同条件下双曲线形锈坑的应力集中系数大于椭圆形锈坑;当模拟锈坑的宽度相同时,其应力集中系数随着深宽比的增大而增大;当经历 800 °C 的高温作用后,模拟锈坑的应力集中系数较常温时下降了 10% 左右;对于带有 2 个模拟锈坑的试件,锈坑夹角在 30°~90° 时的应力集中系数明显增加.

关键词:热轧钢筋;锈坑;高温;应力集中系数;有限元分析

中图分类号:TU511.32

文献标志码:A

doi:10.3969/j.issn.1007-9629.2022.09.006

Effect of Corrosion Pits on Mechanical Properties of Steel Bar after Exposure to High Temperature

LIU Chongxun, BA Guangzhong*, ZHENG Xinxin, ZHOU Jiaxin

(College of Ocean Science and Engineering, Shanghai Maritime University, Shanghai 201306, China)

Abstract: In order to study the stress distribution of steel bar with corrosion pit after exposure to high temperature, specimens with artificial corrosion pits were prepared, then the high temperature was exposed and tensile tests were conducted to investigate the variability in mechanical properties. The stress distribution near the artificial corrosion pits was simulated by finite element analysis. The results show that for the specimens with single artificial corrosion pit, its stress concentration factor of the specimen with hyperbolic corrosion pit is greater than that with elliptical pit. When the width of the artificial corrosion pit is constant, the stress concentration factor increases with the increase of depth to width ratio. After experiencing 800 °C, the stress concentration factor is reduced by about 10%. For the specimen with two artificial corrosion pits, the stress concentration factor significantly increases when the angle of corrosion pits is between 30° and 90°.

Key words: hot-rolled steel bar; corrosion pit; high temperature; stress concentration factor; finite element analysis

钢筋锈蚀是导致混凝土结构破坏的最主要因素,对建筑结构的适用性及安全性有重要的影响^[1].目前,关于锈坑形态对钢筋力学性能影响的研究主要集中在常温环境下,对高温后锈坑形态影响钢筋力学性能的研究较少^[2].罗小勇等^[3]认为,锈蚀钢筋的力学性能与最小残余截面积相关,仅用平均锈蚀率

难以准确衡量钢筋变形能力的退化.袁迎曙等^[4]以锈坑的自然锈蚀表观特征为依据,加工模拟锈蚀钢筋,进一步分析了坑状锈蚀钢筋性能退化的机理.Liu等^[5]通过三维扫描技术得到锈蚀钢筋的高精度三维模型,对锈坑形状进行了拟合,发现锈坑的最优拟合曲线是双曲线.Cerit等^[6-8]和Huang等^[9]针对椭圆形

收稿日期:2021-07-08; 修订日期:2021-09-26

基金项目:国家自然科学基金资助项目(51708319)

第一作者:刘崇勋(1997—),男,河南南阳人,上海海事大学硕士生.E-mail: liuchongxun_zx@163.com

通讯作者:巴光忠(1984—),男,江苏宿迁人,上海海事大学讲师,硕士生导师,博士.E-mail: gzba@shmtu.edu.cn

锈坑对钢筋力学性能的影响进行研究,发现锈坑的深宽比是影响应力集中系数的主要参数,并拟合出了相关公式.马亚飞等^[10]通过机械加工不同形状缺口的钢筋来模拟局部锈蚀对钢筋力学性能的影响,发现缺口的形状对应力集中系数有一定的影响.

火灾作为一种发生频率较高的灾害,通常会造成严重的财产损失,所以对建筑结构抗火性能的研究一直是国内外学者研究的重要课题^[11-12].部分既有锈蚀混凝土结构仍有可能经历火灾(高温)作用,高温后锈蚀钢筋的力学性能是评估结构残余性能的基础.本文选取工程中常用的HRB400钢筋来加工模拟锈蚀试件,然后分别进行高温加热试验和拉伸试验,研究其力学性能的变化规律.同时,采用有限元软件对模拟锈坑的应力分布进行仿真模拟,得到温度、模拟锈坑形状和位置等对钢筋应力分布的影响,以期在高温后锈蚀钢筋的力学性能评估提供相关依据.

1 试验研究

1.1 试件制作

原材料为HRB400级热轧螺纹钢筋,尺寸为 $\phi 9 \times 110$ mm,常温下屈服强度为425 MPa,极限强度为620 MPa,伸长率为22.4%.钢筋的化学组成如表1所示.试验以机械加工的缺口来模拟锈蚀钢筋的锈坑,模拟锈坑的形状选取双曲线(H)和椭圆形(E)2种^[3-11,13].试件形状如图1所示,模拟锈坑的形状尺寸如图2所示,同一形状缺口以深度(d_p)和宽度(b_p)的比值深宽比(d_p/b_p)作为变量进行比较,相关参数如表2所示.

表1 钢筋的化学组成
Table 1 Chemical composition of steel bar

							w/%
Fe	C	Si	Mn	P	S	Ceq	
97.284	0.210	0.570	1.410	0.038	0.038	0.450	

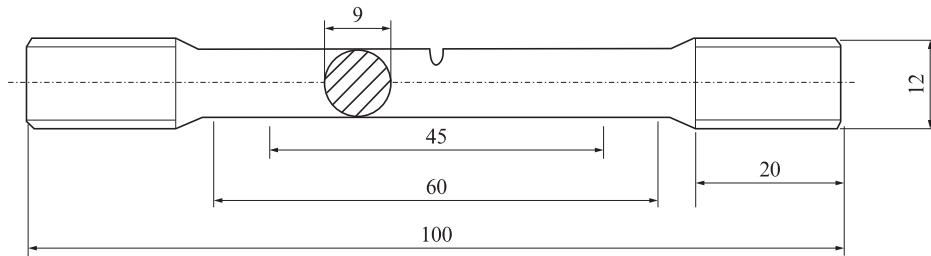


图1 试件形状示意图

Fig. 1 Schematic diagram of specimen(size: mm)

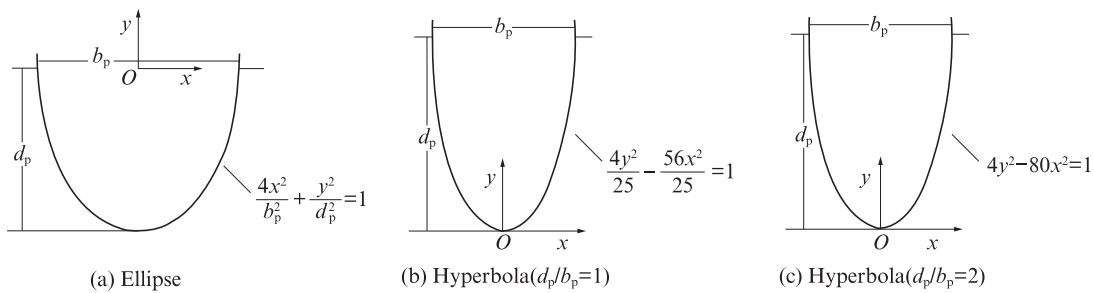


图2 模拟锈坑的形状和尺寸

Fig. 2 Shapes and sizes of artificial corrosion pits

表2 模拟锈坑的参数

Table 2 Parameters of artificial corrosion pits

Shape	d_p / mm	b_p / mm	Shape	d_p / mm	b_p / mm
Ellipse(groove)	2.0	2.0	Hyperbola(groove)	2.0	2.0
Ellipse(groove)	4.0	2.0	Hyperbola(groove)	4.0	2.0

1.2 试验设备

力学性能试验采用Zwick Z250TEW型250 kN万能材料试验机,最大载荷为100 kN,棒材试件的夹

持范围为0~15 mm.

热处理设备是普通的马弗炉,加热温度范围为100~1 000 °C,控温精度为 ± 1 °C.

1.3 试验方法

试验包括热处理与静力拉伸试验2部分.

(1)为了探究温度对带锈坑试件力学性能的影响,选取了20(室温)、200、400、600、700、800 °C等6个温度.将试件放入普通的马弗炉内,以10 °C/min的加热速率进行升温,达到目标温度后保温20 min,

然后停止加热并在炉内自然冷却到室温。

(2) 钢筋静力拉伸试验依据 GB/T 228—2002 《金属材料—室温拉伸实验方法》，在万能材料试验机上进行。在试件的原始标距上做上标记，用于观察断裂位置，标距为 45 mm，拉伸试验加载速率为 0.002 s⁻¹，试验中实时记录应力-应变(σ-ε)曲线。

2 数值分析

2.1 数值计算工况

有限元分析选用的软件是 ANSYS Workbench，三维模型在 Creo 6.0 软件中建立，为了探究模拟锈坑对钢筋力学性能的影响，建立了单个锈坑和 2 个锈坑 2 种模型，模拟锈坑仿真模型的参数如表 3、4 所示。同时，考虑热处理对模拟锈坑钢筋力学性能的影响，增加 6 个数值仿真温度，分别为 20、200、400、600、700、800 °C。单个模拟锈坑的仿真模型标距取 45 mm，锈坑的形状和尺寸如图 2 所示。考虑模拟锈坑角度对钢筋力学性能的影响，取深度为 2 mm 的椭圆形锈坑，深宽比为 0.5，相邻锈坑的径向轴线夹角 θ 为 0°、15°、30°、45°、60°、90° 和 180°，相邻锈坑模型和剖视图如图 3 所示。数值分析的模型单元采用 SOLID186 高阶单元，该单元具有模拟几乎不可压缩弹塑性材料和完全不可压缩超弹性材料变形的能力，可以很好地应用在模拟钢筋拉伸的过程中。

2.2 钢筋本构模型

有限元分析的前提是提供准确的钢筋本构模型。在拉伸过程中，试件任一瞬时的面积 A 与标距 L

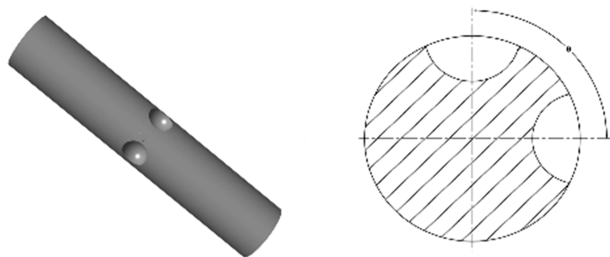


图3 相邻模拟锈坑模型和剖视图
Fig. 3 Model and sectional view of adjacent artificial corrosion pit

表3 单个模拟锈坑的数值模拟参数
Table 3 Parameters of corrosion pit simulation model of single artificial corrosion pit

Shape	d _p /mm	b _p /mm	Shape	d _p /mm	b _p /mm
Ellipse(groove)	1.0	0.5	Ellipse(groove)	2.0	4.0
Ellipse(groove)	1.0	1.0	Hyperbola (groove)	2.0	2.0
Ellipse(groove)	2.0	1.0	Hyperbola (groove)	2.0	4.0
Ellipse(groove)	2.0	2.0			

表4 相邻模拟锈坑的数值模拟参数
Table 4 Parameters of corrosion pit simulation model of adjacent artificial corrosion pits

Shape	d _p /mm	b _p /mm	θ/(°)	Shape	d _p /mm	b _p /mm	θ/(°)
Ellipse(pit)	2.0	4.0	0	Ellipse(pit)	2.0	4.0	60
Ellipse(pit)	2.0	4.0	15	Ellipse(pit)	2.0	4.0	90
Ellipse(pit)	2.0	4.0	30	Ellipse (pit)	2.0	4.0	180
Ellipse(pit)	2.0	4.0	45				

是在变化的，而通过试验得到的名义应力 σ₀ 和名义应变 ε₀ 是按照初始面积 A₀ 和标距 L 计算的，因此任一瞬时的真实应力 σ 和真实应变 ε 与相应的名义应力 σ₀ 和名义应变 ε₀ 存在差异，在塑性阶段这种差异会逐渐增大。在均匀变形阶段，真实应力定义为 σ，根据塑性变形体积 V 不变的假设，真实应力 σ 和真实应变 ε 的转换关系如式(1)、(2)所示。

$$\sigma = PL/A_0 L_0 = \sigma(1 + \epsilon_0) \quad (1)$$

$$\epsilon = \int_{L_0}^L \frac{dL}{L} = \ln(1 + \epsilon_0) \quad (2)$$

根据上述的转换关系和试验得到的应力-应变关系，可以得到在各个温度作用后未锈蚀钢筋的真实应力-应变关系(见图 4)，并作为数值分析材料应力-应变曲线。

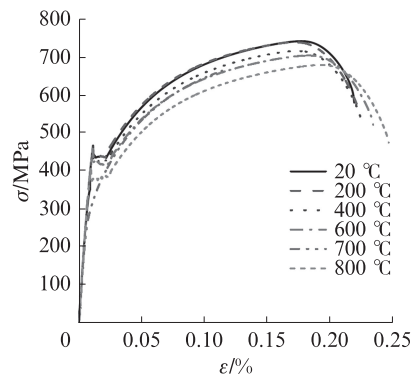


图4 真实应力-应变曲线
Fig. 4 True stress-strain curves

2.3 数值模型验证

利用本文的试验结果验证数值模拟的准确性。将不同温度下数值仿真的结果与试验值进行比较，结果如图 5 所示。由图 5 可见：温度和模拟锈坑形状对屈服荷载和极限荷载都有影响；随着温度的增加，屈服荷载和极限荷载整体呈现减小的趋势，但在 700 °C 时屈服荷载急剧下降，极限荷载出现急剧增加，然后随着温度的增加又恢复整体趋势；在弹性阶段载荷-位移曲线的试验值与仿真计算值符合较好，本文数值模拟对象是弹性阶段的钢筋性能，所以可以认为本文数值模拟是准确的。

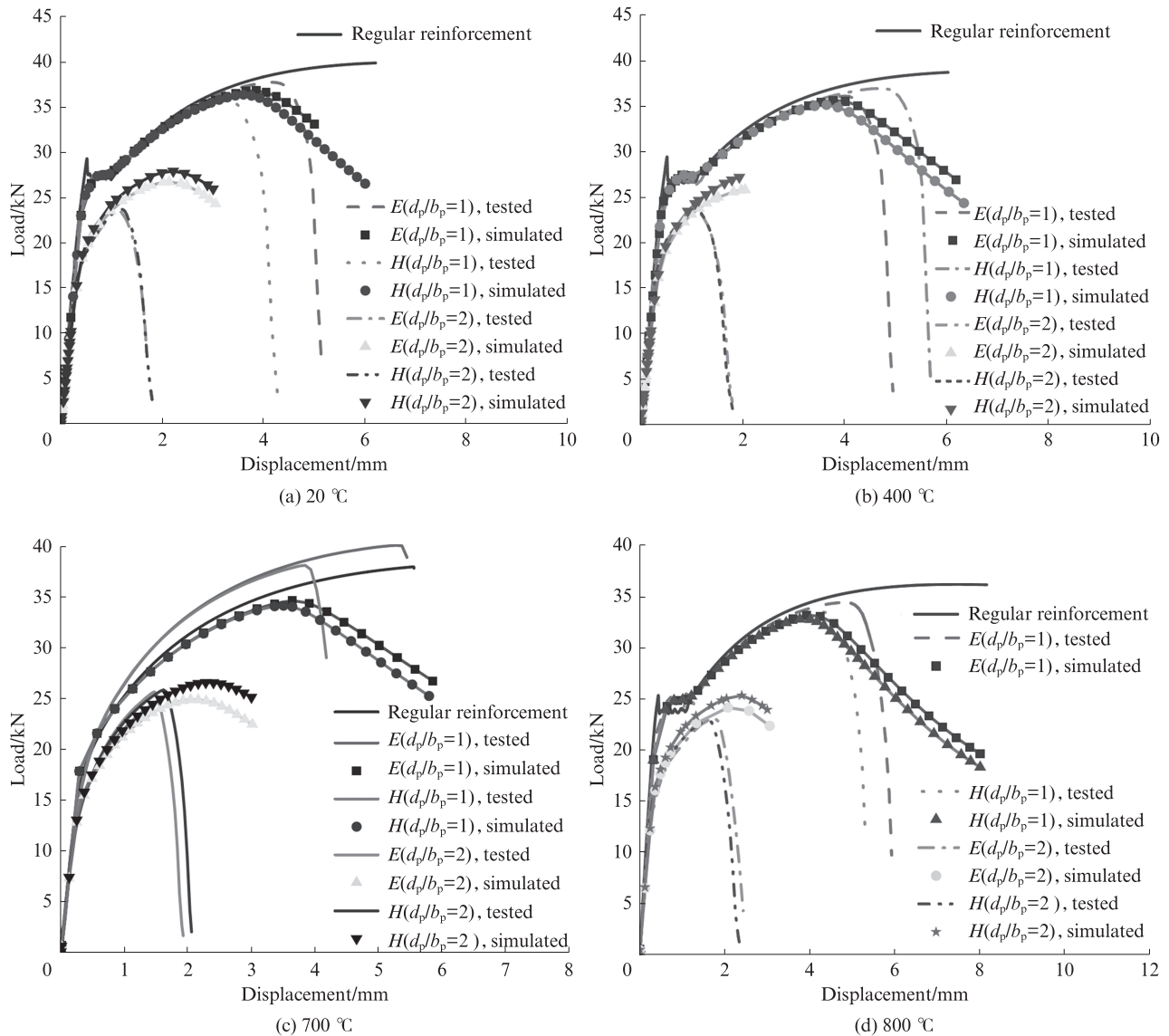


图5 不同温度下载荷-位移曲线试验值与计算值的比较

Fig. 5 Comparison between experimental values and simulated values of load-displacement curves at different temperatures

3 数值模拟结果

3.1 模拟锈坑的应力分布

3.1.1 单个模拟锈坑的应力分布

通过数值仿真可以得到模拟锈坑的应力分布图,如图6所示.由图6可见,模拟锈坑的应力最大值在锈坑底部,最小值在沿载荷施加方向的锈坑边缘,与椭圆形锈坑应力最大值位于底部相同^[5].

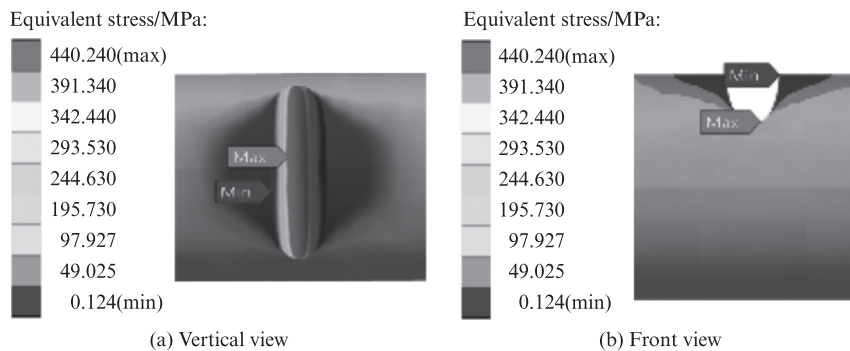


图6 模拟锈坑的应力分布

Fig. 6 Stress distribution at artificial corrosion pit

3.1.2 相邻模拟锈坑的应力分布

图7为相邻模拟锈坑的径向截面应力分布图。其中相邻锈坑的夹角 θ 分别为 0° 、 15° 、 30° 、 45° 、 60° 、 90° 和 180° 。由图7可见：当模拟锈坑之间的夹角 θ 为

15° 、 30° 和 90° 、 180° 时，相邻锈坑对应力分布影响较小，锈坑附近应力集中的位置在2个锈坑的底部；在 $30^\circ\sim 90^\circ$ 时，随着 θ 的增大，应力集中的位置在锈坑的相交部位。

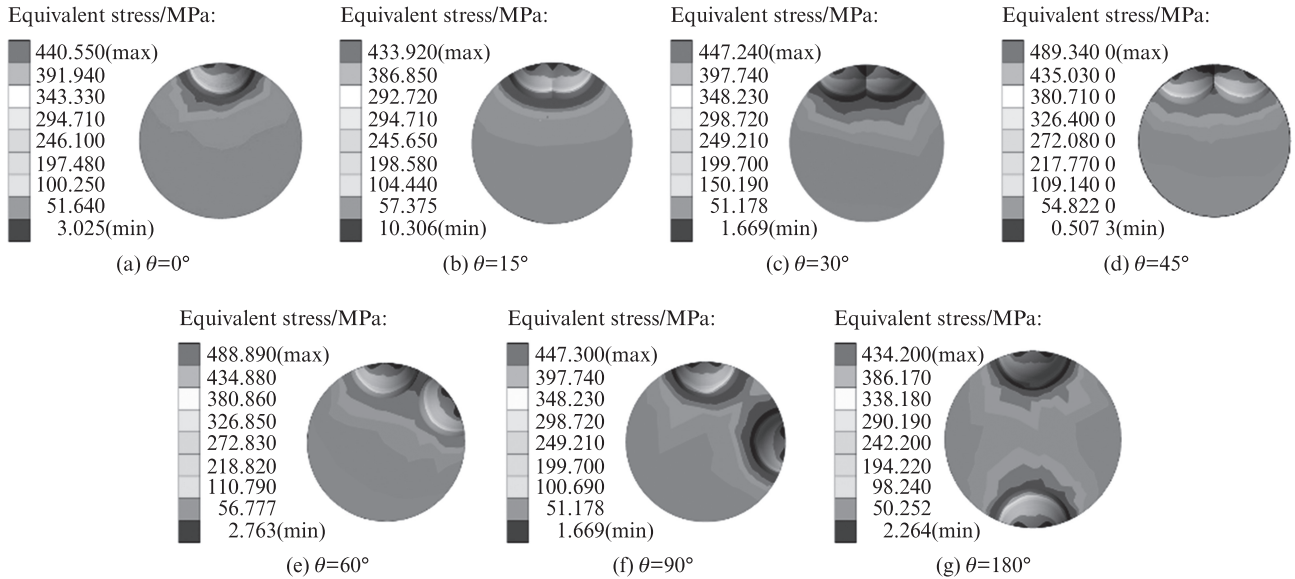


图7 相邻模拟锈坑的径向截面应力分布图

Fig. 7 Stress distributions of radial section of adjacent artificial corrosion pits

3.2 应力集中系数

应力集中系数(α)受材料类型、缺口几何形状和温度等因素的影响,其求解公式如式(3)所示,其中 σ_{max} 为局部最大弹性应力^[14]。

$$\alpha = \frac{\sigma_{max}}{\sigma_0} \quad (3)$$

3.2.1 单个模拟锈坑的应力集中系数

图8为单个模拟锈坑的应力集中系数。由图8可见：不同类型模拟锈坑的应力集中系数在 $20\sim 700^\circ\text{C}$ 温度范围内基本保持不变,在 800°C 时下降较为明显,约为室温下的10%；当经历的温度相同时,对于

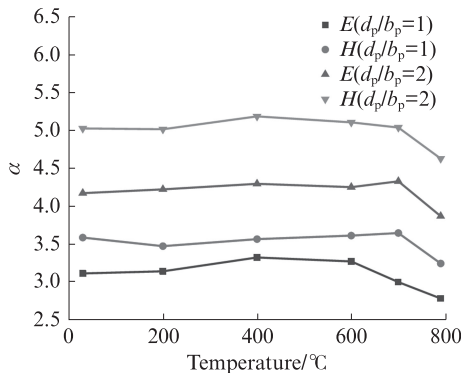


图8 单个模拟锈坑的应力集中系数

Fig. 8 Stress concentration factor of single artificial corrosion pit

开口宽度相同的相同形状锈坑,随着深宽比的增加,锈坑的应力集中系数会变大；当深宽比和开口宽度相同时,双曲线形锈坑的应力集中系数比椭圆形的大,锈坑形状对应力集中系数有所影响^[10]。

为了探究相同深宽比下,模拟锈坑的开口宽度 b_p 对应力集中系数的影响,在相同深宽比下建立了开口宽度为0.5、1.0、2.0 mm的椭圆形模拟锈坑模型,具体参数如表3所示,计算得到深宽比对应力集中系数的影响,如图9所示。由图9可见：深宽比为1、开口宽度为1.0、2.0 mm的锈坑,在 $20\sim 600^\circ\text{C}$ 温度范围内,应力集中系数随着开口宽度增大而增大且变化趋势基本保持一致,在经历 $600\sim 800^\circ\text{C}$ 后,不同开口宽度锈坑的应力集中系数变化趋势出现了较大的偏差。开口宽度为2.0 mm锈坑的应力集中系数在 $600\sim 700^\circ\text{C}$ 温度范围内急剧下降,并在 800°C 时有所增加；不同开口宽度的锈坑,应力集中系数随温度变化的趋势基本一致,开口宽度越大,应力集中系数越大；相同的深宽比下,应力集中系数随着开口宽度的增大而增大,深宽比较小时,温度对应力集中系数的变化趋势影响较大。

3.2.2 相邻模拟锈坑的应力集中系数

图10为相邻模拟锈坑的应力集中系数。由图10可见：(1)在相邻夹角 θ 为 $0^\circ\sim 30^\circ$ 时,应力集中系数缓

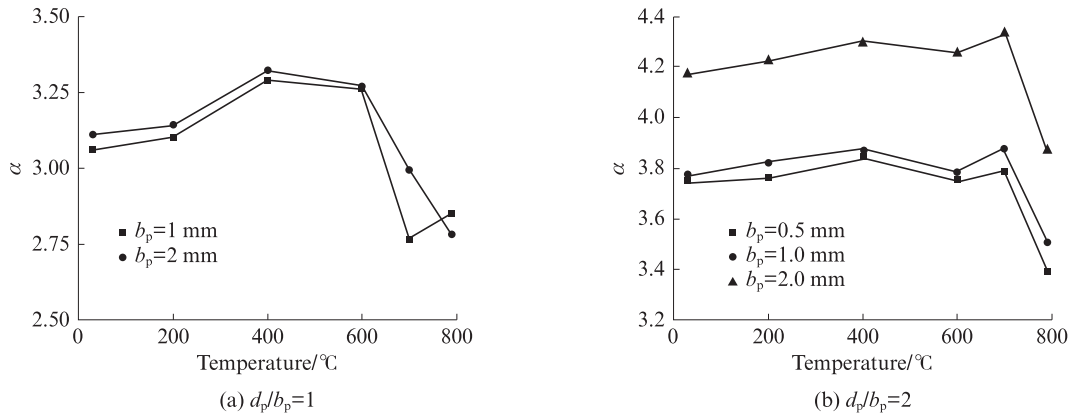


图9 深宽比对应力集中系数的影响
Fig. 9 Effect of opening width on stress concentration factor

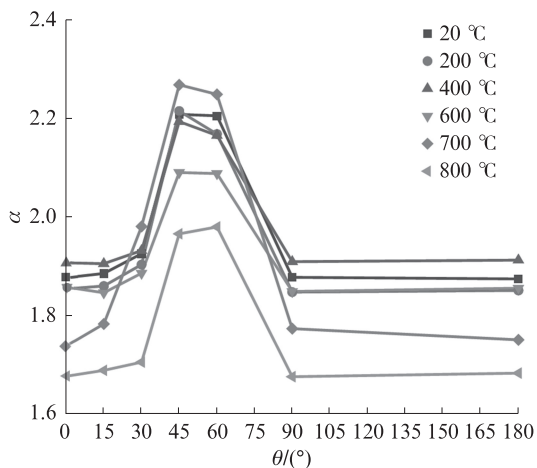


图10 相邻模拟锈坑的应力集中系数
Fig. 10 Stress concentration factor of adjacent artificial corrosion pits

慢增加(700 $^{\circ}\text{C}$ 除外);在30 $^{\circ}$ ~90 $^{\circ}$ 之间时,应力集中系数先增加后减小,最大值出现在45 $^{\circ}$ ~60 $^{\circ}$ 之间,在90 $^{\circ}$ ~180 $^{\circ}$,应力集中系数基本保持不变,且与单个锈坑($\theta=0^{\circ}$)时的值一样。(2)随着温度的增加,应力集中系数也会发生相应的变化;当温度在20~600 $^{\circ}\text{C}$ 时,模拟锈坑的应力集中系数在 θ 为0 $^{\circ}$ ~30 $^{\circ}$ 和90 $^{\circ}$ ~180 $^{\circ}$ 时相对变化很小,变化值为2%;在这个相邻夹角区域,700、800 $^{\circ}\text{C}$ 的高温作用对应力集中系数影响相对较大,变化的幅度为10%;模拟锈坑的最大应力集中系数随着温度的增加逐渐减小,在800 $^{\circ}\text{C}$ 时较常温时减小了10%;在700 $^{\circ}\text{C}$ 时应力集中系数突然增加,是因为700 $^{\circ}\text{C}$ 作用后钢筋的材料性能发生了明显变化,造成应力集中系数发生突变。

4 结论

(1)单个模拟锈坑底部的应力最大,在沿载荷施加方向锈坑边缘处最小,越靠近锈坑底部,应力越大。

双曲线形锈坑的应力集中系数要明显大于相同尺寸下的椭圆形锈坑。

(2)温度、锈坑宽度和深宽比对单个模拟锈坑的应力集中系数都有影响。当经历的温度小于700 $^{\circ}\text{C}$ 时,锈坑的应力集中系数基本保持不变,在经历800 $^{\circ}\text{C}$ 的高温作用后,锈坑的应力集中系数约下降10%。当锈坑宽度相同时,应力集中系数随着深宽比的增加而增加。当深宽比不同时,温度对小深宽比锈坑的应力集中系数影响较大。

(3)对于带有2个模拟锈坑的试样,当锈坑夹角在30 $^{\circ}$ ~60 $^{\circ}$ 时,应力集中系数明显增加。随着夹角的增大,应力集中系数迅速减小。整体上随着温度的增加,应力集中系数逐渐减小,但在700 $^{\circ}\text{C}$ 时由于材料性能变化明显,导致应力集中系数最大。

参考文献:

[1] DU F Y, JIN Z Q, SHE W, et al. Chloride ions migration and induced reinforcement corrosion in concrete with cracks: A comparative study of current acceleration and natural marine exposure[J]. Construction and Building Materials, 2020, 263: 120099.

[2] 欧阳祥森, 张艳芳, 邹洪波. 基于数值模拟的锈蚀钢筋力学性能退化分析[J]. 湖南工程学院学报(自然科学版), 2018, 28(2): 65-69.

OUYANG Xiangshen, ZHANG Yanfang, ZHOU Hongbo. Degradation analysis of mechanical properties of corroded bars based on numerical simulation[J]. Journal of Hunan Institute of Engineering(Natural Science), 2018, 28(2):65-69. (in Chinese)

[3] 罗小勇, 刘晋宏, 聂经纶. 锈蚀钢筋截面分布特征及轴向拉伸力学性能[J]. 建筑材料学报, 2019, 22(5):730-736.

LUO Xiaoyong, LIU Jinhong, NIE Jinglun. Cross-section distribution characteristics and tensile behavior of corroded reinforcing steel bars[J]. Journal of Building Materials, 2019, 22(5):730-736. (in Chinese)

- [4] 袁迎曙,贾福萍,蔡跃. 锈蚀钢筋的力学性能退化研究[J]. 工业建筑, 2000(1):43-46.
YUAN Yingshu, JIA Fuping, CAI Yue. Deterioration of mechanical behavior of corroded bar[J]. Industrial Construction, 2000(1):43-46. (in Chinese)
- [5] LIU X G, ZHANG W P, GU X L, et al. Probability distribution model of stress impact factor for corrosion pits of high-strength prestressing wires[J]. Engineering Structures, 2021, 230:111686.
- [6] CERIT M, GENEL K, EKSI S. Numerical investigation on stress concentration of corrosion pit [J]. Engineering Failure Analysis, 2009, 16(7):2467-2472.
- [7] CERIT M. Numerical investigation on torsional stress concentration factor at the semi elliptical corrosion pit [J]. Corrosion Science, 2013, 67:225-232.
- [8] CERIT M. Corrosion pit-induced stress concentration in spherical pressure vessel[J]. Thin-Walled Structures, 2019, 136:106-112.
- [9] HUANG Y F, WEI C, CHEN L J, et al. Quantitative correlation between geometric parameters and stress concentration of corrosion pits [J]. Engineering Failure Analysis, 2014, 44: 168-178.
- [10] 马亚飞, 王强, 王磊, 等. 不同缺口类型钢筋力学性能试验及数值分析[J]. 建筑材料学报, 2019, 22(2):245-253.
MA Yafei, WANG Qiang, WANG Lei, et al. Experimental and numerical analysis on mechanical behavior of different notched steel bars [J]. Journal of Building Materials, 2019, 22(2): 245-253. (in Chinese)
- [11] DEMIR U, GOKSU C, UNAL G, et al. Effect of fire damage on seismic behavior of cast-in-place reinforced concrete columns [J]. Journal of Structural Engineering, 2020, 146(11):4020232.
- [12] 李国强, 王卫永. 钢结构抗火安全研究现状与发展趋势[J]. 土木工程学报, 2017, 50(12):1-8.
LI Guoqiang, WANG Weiyong. State-of-the-art and development trend of fire safety research on steel structures[J]. China Civil Engineering Journal, 2017, 50(12):1-8. (in Chinese)
- [13] 代红超. 锈蚀钢筋力学性能退化机理及随机本构关系[D]. 上海:同济大学, 2008.
DAI Hongchao. Mechanisms of mechanical property degradation and stochastic intrinsic relationships of rusted steel bars [D]. Shanghai: Tongji University, 2008. (in Chinese)
- [14] 董志航, 廖志忠. 理论应力集中系数的有限元求法[J]. 航空兵器, 2005(3):15-18.
DONG Zhihang, LIAO Zhizhong. Theoretical stress concentration factor with FEA[J]. Aero Weaponry, 2005(3): 15-18. (in Chinese)