文章编号:1673-9469(2022)02-0025-06 DOI: 10.3969/j.issn.1673-9469.2022.02.004

表面自然腐蚀后带缺陷管钢的力学性能研究

卢召红[1],韩璐泽[1],徐 艳[1*],王尊策[1,2]

(1.东北石油大学,黑龙江 大庆 163318; 2.中国石油管道科技研究中心重点实验室,河北 廊坊 065000)

摘要:针对腐蚀对管道钢的力学性能的影响问题,对不同腐蚀程度的管道钢进行拉伸试验,研究不同腐蚀程度的管道钢其力学性能与腐蚀损失度之间的关系。并基于试验结果建立数值分析模型,分析腐蚀坑处应力状态。轴向拉力作用下,带腐蚀缺陷管道钢的断裂位置发生在深宽比最大的腐蚀坑处;表面腐蚀缺陷管钢的屈服强度、弹性模量与腐蚀损失度相关度较低,而屈服荷载和等效弹性模量随着腐蚀程度的增加而明显降低;腐蚀坑的最大深宽比是影响管钢腐蚀坑处的应力集中系数的主要因素。研究结果可为在役管线力学性能进行评估预测,对预防管道泄漏及生命周期提供分析依据。

关键词:腐蚀管钢;等效弹性模量;应力集中;深宽比;力学性能

中图分类号:TB304 **文献标识码**:A

A Study on Mechanical Properties Degradation of Pipe Steel with Surface Natural Corrosion Defects

LU Zhaohong[1], HAN Luze[1], XU Yan[1*], WANG Zunce[1,2]

(1. Northeast Petroleum University, Daqing, Heilongjiang 163318, China; 2. CNPC Key Laboratory of PetroChina Pipeline R&D Center, Langfang, Hebei 065000, China)

Abstract: Corrosion has a certain effect on the mechanical properties of pipe steel. In this paper, tensile tests were carried out on pipeline steels with different degrees of corrosion, and the relationship between the mechanical properties and corrosion loss of pipeline steels with different degrees of corrosion was studied. Based on the test results, a numerical analysis model was established to analyze the stress state at the corrosion pit. Under the action of axial tension, the fracture position of the pipeline steel with corrosion defects occurs at the corrosion pit with the largest aspect ratio. The results show that the yield strength and elastic modulus of pipe steel with surface corrosion defects have a low correlation with corrosion loss degree, but the yield load and equivalent elastic modulus decrease obviously with the increase of corrosion degree. The maximum depth to width ratio of the corrosion pit is the main factor affecting the stress concentration factor at the corrosion pit. The research results can be used to evaluate and predict the mechanical properties of pipelines in service, and provide an analysis basis for the prevention of pipeline leakage and life cycle.

Key words: corrosive pipe steel; equivalent elastic modulus; stress concentration; depth-width ratio; mechanical property change

油气输送管道是一种特殊的承压装备,如果发生泄漏不仅会带来大量的经济损失,而且泄漏所产生的环境污染会造成更加严重的二次灾害,在高后果区产生的损失更是不可估量。现役管道

收稿日期:2021-12-01

基金项目:国家自然科学基金资助项目(51578120);国家自然科学青年基金资助项目(11402051)

作者简介:卢召红(1976-),男,山东临沂人,博士,副教授,从事管道安全输送及新型组合结构技术方面的研究。

*通讯作者:徐艳(1978-),女,黑龙江龙江人,博士,教授,从事管道安全输送及计算流体力学方面的研究。

在运行过程中,由于运输介质的腐蚀性和外部环境的腐蚀作用,会影响管道的力学性能,导致其承压能力减弱,甚至会造成管道穿孔或破坏等后果[1-2]。腐蚀管道钢的力学性能与其锈蚀程度相关,目前,众多学者通过测量最大截面损失率、有效截面厚度或钢材体积损失率等方法对带腐蚀缺陷管钢的剩余强度进行预测评估[3-4],但对于腐蚀后的钢材变形性能未做细致研究。随着研究的不断深入,人们对于腐蚀钢的本构关系有了进一步的认识[5]。邱斌等[6]利用试验的方法研究腐蚀损失率对钢材力学性能的影响,通过对不同腐蚀程度的Q235试件进行拉伸试验,发现当腐蚀损失率小于4%时,锈蚀缺陷对钢材的屈服强度和抗拉强度没有明显的影响,当腐蚀损失率大于4%时,锈蚀后钢材的屈服强度和抗拉强度随锈蚀率的增大呈现明显的线性退化趋势。退化速率与锈蚀钢板表面锈蚀形貌特征密切有关[7]。Nakai等[8]发现锈坑对腐蚀钢材的强度和延性有显著影响,强度和延性随锈坑深度和密度的增大显著降低。Tatsuro等[9]对点蚀构件进行拉伸试验,得出随着点蚀蚀坑深度的增加,拉伸强度逐渐降低,总延伸率急剧下降。Zhang[10]根据弹塑性断裂力学中的Tresca屈服准则,讨论了均匀腐蚀管道在内压和轴向力共同作用下的剩余强度计算,给出了缺陷尺寸、缺陷下的最大允许工作压力和残余强度的计算公式。在此基础上,提出了基于可靠性的腐蚀管道剩余寿命预测方法。针对现役的钢制输送管道,由于无法精确测量出其腐蚀度和剩余力学性能指标,拟通过研究腐蚀损失率与钢材性能之间的影响,来推算出腐蚀损失程度对管道钢的力学性能的影响。腐蚀损失程度可根据管道所处的环境及保护措施,由腐蚀率推算得到,由此可对管道使用周期内各时间点的力学性能进行评估,为预防在役管道泄漏及维护提供参考依据。

本文通过拉伸试验的方法,分析不同腐蚀程度的API 5L X52N管钢力学性能,研究腐蚀损失率对带腐蚀缺陷管钢力学性能的影响,并分析腐蚀缺陷处的应力集中问题。

1 带腐蚀缺陷管钢材料力学性能试验

1.1 试验方法

试验材料为API 5L X52N管钢,图1(a)所示为埋地管线截取后放置室外自然环境自然腐蚀后的表观现象。图1(b)为带腐蚀的管道钢内表面清洗后的表观现象。

(a)带腐蚀缺陷的输油管道 (b)清洗后的带腐蚀管壁面貌

图1 带腐蚀缺陷管道图

Fig. 1 The piping drawing with corrosion defects

依照《金属材料室温拉伸试验方法》(GB/T 228.1—2010)[11]和《钢及钢产品力学性能试验取样位置及试样制备》(GB/T 2975—2018)[12]中对于切取圆钢管拉伸样坯中相关说明来确定拉伸样坯的相关参数,试件尺寸如图2所示。

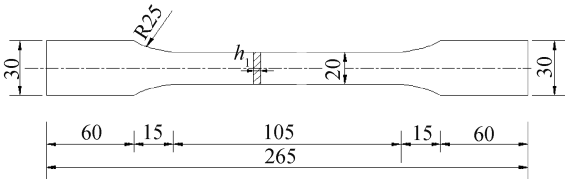


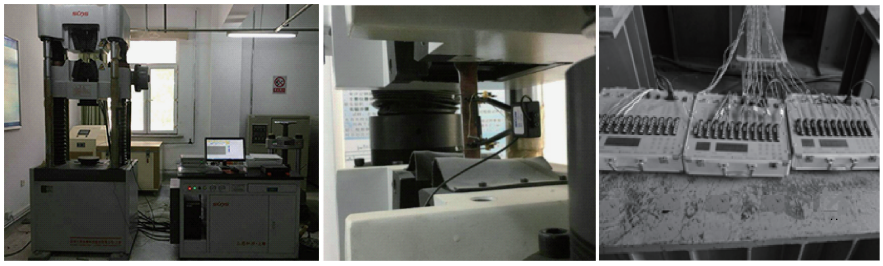
图2 试件设计加工图(单位:mm)

Fig. 2 The design chart of the specimens

利用失重法测定试件的腐蚀损失率η,建立腐蚀损失率η与腐蚀率η_s的关系。并用SuperView W1三维表面形貌仪扫描试件,借助Pro ENGINEER分析软件获取试件表面几何特征参数。

试验方法和步骤参照《金属材料室温拉伸试验方法》(GB/T 228.1—2010)[11],主要通过WAW-1000型电液伺服万能试验机、电子引伸计、DH3817Y数据采集系统等仪器对力和变形进行自动采集、记录。试验环境温度为室温。试件加载装置和数据采集系统如图3所示。

钢材弹性阶段和屈服阶段的加载速率设定为0.75 mm/min,塑性强化阶段的加载速率设定为0.5 mm/min。试件标距设定为50 mm,标距之间的变形利用引伸计进行测量,加载后期为防止引伸计损坏,降低拉伸加载速率为0.25 mm/min,直至试件拉断。试件的泊松比通过测量横向应变与纵向应变值,然后经过计算确定。



（a）试验加载装置图　　（b）试件安装图　　（c）数据采集系统图

图 3 试验加载装置和数据采集系统

Fig. 3 Specimen loading device and data acquisition system

1.2 试验结果及分析

根据试验方法测定各试件的数据参数并计算出各试件的腐蚀损失率 η,按腐蚀损失率从小到大的顺序给各个试件编号,其中 G001 为未腐蚀管钢;G10i 为腐蚀年限 1 年的管钢;G20i 为腐蚀年限 2 年的管钢。参照 Xu[13] 提出的方法,对选取的钢管试样表面腐蚀坑参数进行分析,得出各试样表面的最大腐蚀深度 d_{max}, 平均腐蚀深度 d_{av}, 最大腐蚀坑长度(拉伸方向) l_{max}, 最大腐蚀坑宽度(垂直于拉伸方向) ω_{max}。按公式(1)计算各试件最大坑深宽比 β_{max}, 并标注出位置,测量结果如表 1 所示。

$$\beta_{max} = \mathrm{MAX}\left(\frac{d_i}{\omega_i}\right) \tag{1}$$

表 1 各试件基本参数

Tab. 1 Basic parameters of each specimen

编号	η /%	d_{max} /μm	d_{av} /μm	l_{max} /μm	ω_{max} /μm	β_{max} $\times10^{-2}$
GS001	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
GS101	7.2	211.9	199.4	4 969.9	3 683.5	5.754
GS102	8.3	222.5	204.7	5 547.2	4 781.3	4.654
GS103	10.9	400.1	248.3	6 595.3	5 884.3	6.800
GS104	11.7	411.8	258.9	7 556.0	6 982.8	5.897
GS105	11.9	491.3	268.9	7 707.8	7 088.1	6.931
GS106	12.2	488.9	276.4	8 015.7	7 866.3	6.264
GS107	12.6	482.1	286.7	8 514.4	8 255.0	5.840
GS108	12.9	399.0	298.2	8 806.4	8 706.0	4.583
GS109	12.9	513.9	299.3	8 885.0	8 768.6	5.861
GS201	13.3	563.5	361.7	9 626.0	9 685.3	5.818
GS202	14.4	606.3	370.3	10 804.3	10 480.8	5.784
GS203	14.6	662.1	375.1	10 953.1	10 666.1	6.207
GS204	15.8	578.2	391.0	11 869.9	11 763.8	4.915
GS205	19.0	852.9	431.5	15 969.9	14 357.8	5.940
GS206	19.6	951.7	444.9	17 574.4	15 580.0	6.108
GS207	20.0	981.8	457.8	19 116.9	16 720.0	5.872
GS208	20.3	1076.3	459.9	19 489.7	18 251.7	5.897

图 4 为试件拉伸破坏形态,各试件拉伸破坏后均有明显的颈缩现象,随着腐蚀损失率的增大,断裂位置由试件中间向两侧不确定方向发展,且具有离散性。断裂位置与腐蚀损失率及腐蚀坑深宽比有关,一般发生在深宽比最大处。

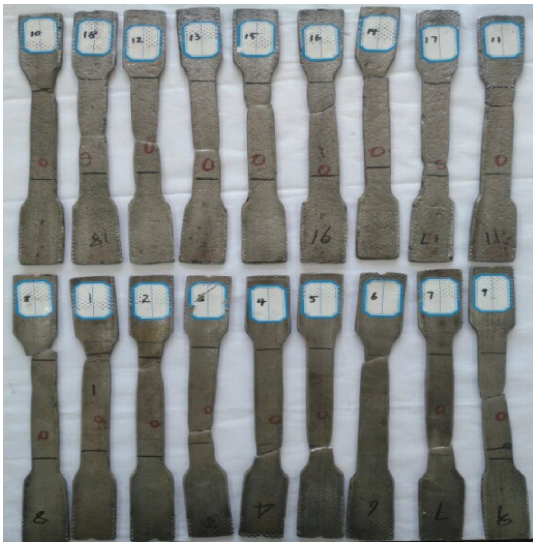


图 4 试件拉伸破坏形态图

Fig. 4 Tensile failure diagram of specimen

试件的屈服强度是根据每个试件在不同腐蚀情况下,通过拉伸试验测量得出的真实屈服强度。根据拉伸试验结果,得到腐蚀损失率与屈服强度以及屈服荷载之间的关系,如图 5 和图 6 所示。

图 5 曲线具有明显的离散性,而图 6 具有明显的下降趋势。由图 5 和图 6 分析可得,在腐蚀损失率在 22%范围内,随着腐蚀损失率的增大,构件的屈服荷载逐渐降低,但屈服强度与腐蚀损失率的相关程度较低。

图 7 与图 8 为试验测定的试件腐蚀坑最大深宽比与试件的屈服强度、腐蚀坑最大深宽比与极限强度的关系。试件截取选用的管道钢腐蚀条件基本相同,各试件腐蚀坑的最大深宽比多集中在

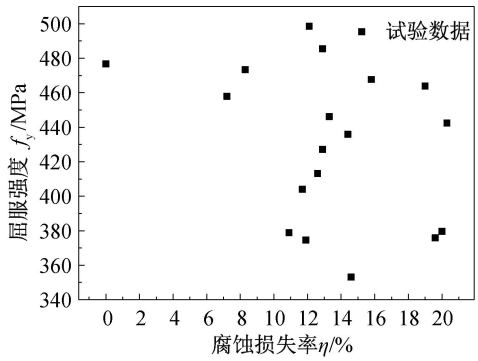


图 5 腐蚀损失率与屈服强度关系

Fig. 5 The relation between corrosion loss rate and yield strength

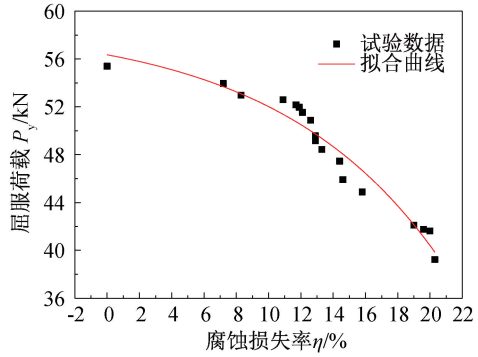


图 6 腐蚀损失率与屈服荷载关系

Fig. 6 The corrosion loss rates eta relationship with yield load

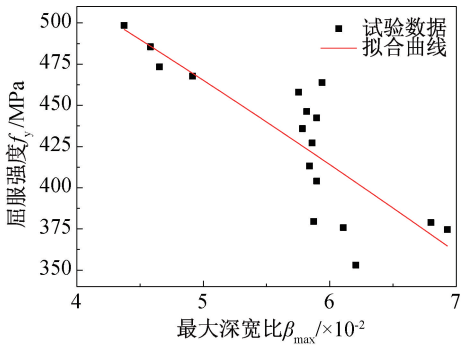


图 7 最大深宽比与屈服强度关系

Fig. 7 The relation between maximum depth-width ratio and yield strength

0.06 附近。但随着最大深宽比的增大,屈服强度和极限强度均明显减小,这与表面腐蚀坑引起的应力集中导致的钢材强度退化有关。

为了分析腐蚀钢材的力学性能,引入等效弹性模量,该等效弹性模量是指按结构的真实屈服承载力计算的弹性模量。定义试件的等效弹性模量 E_e[14] 如下式所示。

$$E_e = \frac{P_y L}{\Delta L \cdot A} = \frac{P_y L}{\Delta L \cdot 80} \tag{2}$$

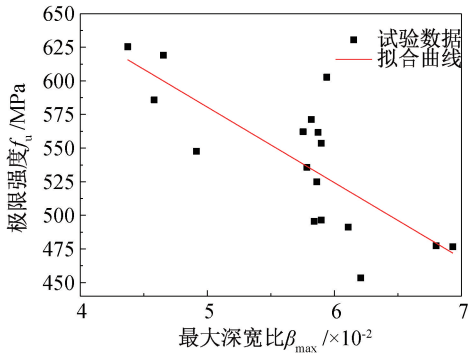


图 8 最大深宽比与极限强度关系

Fig. 8 The relation between maximum depth-width ratio and ultimate strength

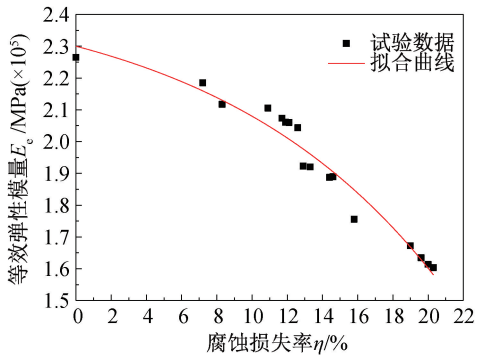


图 9 腐蚀损失率与等效弹性模量关系

Fig. 9 The relation between corrosion loss rate and equivalent elastic modulus

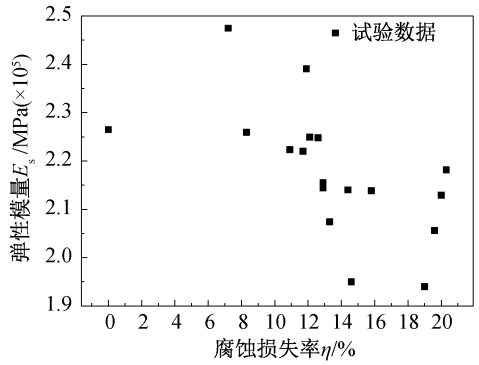


图 10 腐蚀损失率与弹性模量关系

Fig. 10 The relation between corrosion loss rate and elastic modulus

式中:p_y 为坑蚀管道钢试件的屈服承载力;ΔL 为试件沿长度方向的变形量;A 为试件面积。

如图 9 和图 10 所示,等效弹性模量随腐蚀损失率的增加而减小,而弹性模量与腐蚀损失率的相关度小。

为了分析等效弹性模量与材料弹性模量之间的关系,引入等效弹性模量与弹性模量的比值 ζ,

按照公式(3)计算并建立 η-ζ 关系,如图 11 所示。

$$\zeta = \frac{E_e}{E_s} \tag{3}$$

式中, E_s 是管钢的弹性模量。

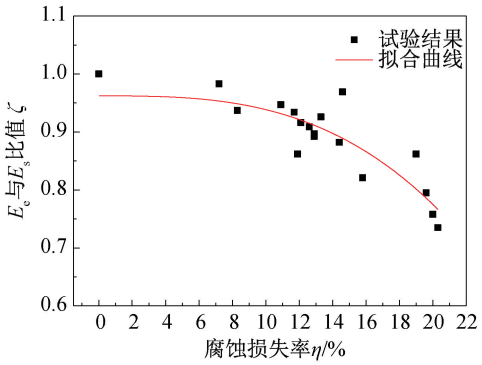


图 11　η-ζ 关系曲线

Fig. 11　η-ζ relation curve

利用“L-M”(Levenberg-Marquardt)算法将试验数据进行拟合并建立 η-ζ 非线性经验公式,如公式(4)所示。

$$\zeta' = 0.46 + 0.54e^{-\eta^{1.4}/124} \tag{4}$$

式中, ζ' 是基于公式计算得到的等效弹性模量与弹性模量的比值。

将等效弹性模量 E_e 作为材料的弹性模量,用于分析带腐蚀缺陷管道钢的力学性能,则有 E_e 与 E_s 之间的近似计算公式如(5)所示。

$$E_e = \zeta' E_s \tag{5}$$

利用公式可推算出含腐蚀缺陷管钢的等效弹性模量,只需测定腐蚀损失率,即可推出不同腐蚀缺陷的管钢在拉压作用下的力与变形关系。计算结果与试验值计算结果对比,公式计算结果与试验值基本吻合,如图 12 所示。

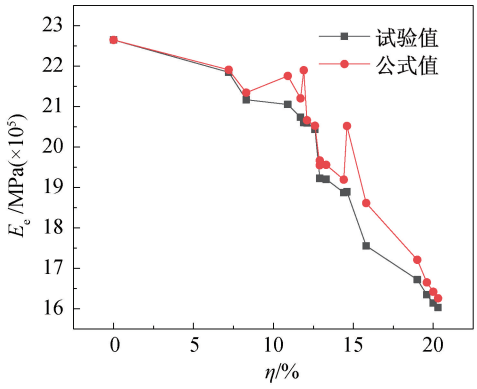


图 12　E_e 分析结果对比

Fig. 12　Comparison of E_e analysis results

2　管钢腐蚀坑处应力状态有限元分析

2.1　应力集中系数 K_t

在拉力作用下,带腐蚀缺陷的管钢在腐蚀坑处易产生应力集中现象,使管钢过早屈服或断裂。Cerit 等[5]利用有限元分析方法对应力集中问题进行研究,建立了一系列三维半椭圆点状腐蚀模型,系统地研究了在单轴拉伸作用下半椭圆形腐蚀坑处的应力分布情况,得出了腐蚀坑深宽比是影响应力集中系数的主要因素,并提出了应力集中系数 K_t 的计算式如公式(6)所示。

$$K_t = \frac{1 + 6.6d/\omega}{1 + 2d/\omega} \tag{6}$$

式中: d 为腐蚀坑的深度, ω 为半椭圆形腐蚀坑的宽度,垂直于受力方向的尺寸。

2.2　有限元模型的建立

利用 ABAQUS 有限元分析软件,建立带腐蚀缺陷管钢分析模型(图 13)。分析中使用的实体模型尺寸同试验试件尺寸,腐蚀坑采用三维半球形腐蚀坑,腐蚀坑深宽比根据试验测得的 β_{max} 值进行确定。在临界截面上,腐蚀坑处的应力集中系数 K_t,通过使用由横截面面积确定的最大名义应力 $\sigma_{s,max}$ 与未开孔的标准名义应力 σ_s 的比值来计算确定。由于坑的宽度 ω 远小于构件的尺寸,在计算净面积时可忽略不计。

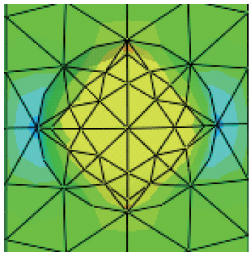


图 13　管钢腐蚀缺陷处有限元分析模型

Fig. 13　Finite element analysis model of corrosion defect of pipe steel

2.3　有限元结果分析

根据上述要求建立不同深宽比腐蚀坑处的应力分析模型。对带腐蚀缺陷的管钢试件进行全截面拉伸,分析管钢试件腐蚀坑处应力状态。

根据公式(6)和有限元分析计算出各试件腐蚀坑处的应力集中系数,如表 2 所示。从表 2 中数值可以看出,腐蚀坑处的应力集中系数随着最大深宽比的增加而增大。公式法和有限元分析得到的应力集中系数 K_t 基本一致,误差在 10%以内。

表 2 管钢试件腐蚀坑处应力集中系数

Tab. 2 Corrosion coefficient of steel pit at test tube

编号	d/μm	ω/μm	$\beta_{max}\times10^{-2}$	应力集中系数 K_t		
				公式法	FEM	误差/%
k01	238.3	5 447.6	4.374	1.185	1.103	7.4
k02	287.3	6 268.3	4.583	1.193	1.107	7.8
k03	416.3	8 469.9	4.915	1.206	1.140	5.8
k04	152.6	2 652.1	5.754	1.237	1.135	9.0
k05	347.1	5 943.6	5.840	1.241	1.149	8.0
k06	614.1	10 337.6	5.940	1.244	1.182	5.2
k07	685.2	11 217.6	6.108	1.250	1.186	5.4
k08	476.7	7 679.6	6.207	1.254	1.160	8.1
k09	288.1	4 236.7	6.800	1.275	1.174	8.2
k10	353.7	5 103.4	6.931	1.280	1.168	9.6

3 结论

1) 通过对含腐蚀缺陷的管钢进行拉伸试验,发现随着腐蚀损失率的增大,断裂位置由试件中间向两侧离散性发展,且其断裂位置一般发生在腐蚀坑最大深宽比处。含腐蚀缺陷的管钢随着腐蚀程度(腐蚀损失率22%以内)的增加,其屈服强度、弹性模量与腐蚀损失率的相关度较低,而屈服荷载和等效弹性模量随着腐蚀程度的增加而明显降低。

2)根据试验得到的等效弹性模量 E_e 与弹性模量 E_s 的比值 ζ,利用"L-M"算法建立 ζ' 与腐蚀损失率 η 之间的表达式,并且与试验结果相对比,得出公式计算结果与试验值基本吻合,利用该公式可推算出腐蚀缺陷管钢等效弹性模量。

3)腐蚀管道钢的屈服强度、极限强度与腐蚀坑最大深宽比有较大关系,随着最大深宽比的增大,屈服强度和极限强度均明显减小,这与表面腐蚀坑引起的应力集中所导致钢材的强度退化有关。利用软件模拟计算出的应力集中系数结果与利用公式计算出的结果基本一致,并且管钢腐蚀坑处的应力集中系数与腐蚀坑最大深宽比基本同幅度增大。

参考文献:

[1] APPUHAMY J, KAITA T, OHGA M, et al. Prediction of Residual Strength of Corroded Tensile Steel Plates[J]. International Journal of Steel Structures, 2011, 11(1): 65-79.

[2] BELACHeW C T, MOKHTAR C I, KARUPPANAN S. Strength Assessment of a Corroded Pipeline Through the Burst Test: Case Study[J]. Journal of Pipeline Systems Engineering and Practice, 2016, 7(3): 04016003.

[3] 张金源,秦晶晶,宋天旭. 管线钢腐蚀缺陷评价方法研究与应用[J]. 材料导报,2016,030(2):621-625.

[4] GARBATOV Y, SOARES C G, PARUNOV J, et al. Tensile Strength Assessment of Corroded Small Scale Specimens[J]. Corrosion Science, 2014, 85: 296-303.

[5] MAHMOODIAN M, LI C Q. Failure Assessment and Safe Life Prediction of Corroded Oil and Gas Pipelines[J]. Journal of Petroleum Science and Engineering, 2017, 151: 434-438.

[6] 邱斌,徐善华. 锈蚀钢板力学性能的退化规律[J]. 机械工程材料,2014,38(10):60-63.

[7] 叶继红,申会谦,薛素铎. 点蚀孔腐蚀钢构件力学性能劣化简化分析方法[J]. 哈尔滨工业大学学报,2016(12):70-75.

[8] NAKAI T, MATSUSHITA H, YAMAMOTO N, et al. Effect of Pitting Corrosion on Local Strength of Hold Frames of Bulk Carriers (1st Report)[J]. Marine Structures, 2004, 17(5): 403-432.

[9] NAKAI T, MATSUSHITA H, YAMAMOTO N. Effect of Pitting Corrosion on Local Strength of Hold Frames of Bulk Carriers (2nd Report)—Lateral-Distortional Buckling and Local Face Buckling[J]. Marine Structures, 2004, 17(8): 612-641.

[10] DONGSHAN Z. Residual Strength Calculation & Residual Life Prediction of General Corrosion Pipeline[J]. Procedia Engineering, 2014, 94: 52-57.

[11] GB/T 228.1—2010,金属材料室温拉伸试验方法[S].

[12] GB/T 2975—2018,钢及钢产品力学性能试验取样位置及试样制备[S].

[13] XU S, WANG Y, XUE Q. Evaluation Indicators and Extraction Method for Pitting Corrosion of Structural Steel[J]. J. Harbin Inst. Technol, 2015, 22: 15-21.

[14] 徐善华,任松波. 锈蚀后钢材弹性模量与屈服强度的计算模型[J]. 机械工程材料,2015,39(10):74-78.

[15] CERIT M, GENEL K, EKSI S. Numerical Investigation on Stress Concentration of Corrosion Pit[J]. Engineering Failure Analysis, 2009, 16(7): 2467-2472.

(责任编辑 周雪梅)