

弹性应力下 304L 不锈钢点蚀行为的有限元模拟研究

李嘉栋¹, 林冰¹, 张世贵², 王莹莹¹, 朱元强¹, 聂臻³, 唐鋈磊¹

(1.西南石油大学 化学化工学院, 成都 610500; 2.中国航发航空科技股份有限公司, 成都 610500; 3.中国石油集团科学技术研究院有限公司, 北京 100083)

摘要: **目的** 通过有限元理想化建模和模拟计算, 采用四点弯曲的应力加载方式, 获得了不同弹性拉应力条件下, 304L 不锈钢薄板上点蚀坑内最大等效应力的变化规律和点蚀坑几何形状的变化情况, 以及采用轴向拉伸的应力加载方式, 获得了不同弹性拉应力条件下, 304L 不锈钢管道上随着蚀坑形状和尺寸的变化, 点蚀坑内最大等效应力的变化规律。**方法** 采用有限元法分别构建出具有半球体、圆锥体或圆柱体点蚀缺陷的 304L 不锈钢薄板和管道模型, 并采用有限元仿真的方法系统研究了不同弹性拉应力对 304L 不锈钢薄板和管道模型上点蚀坑内的应力分布规律, 以及通过模拟计算得出点蚀坑内最大等效应力的变化情况, 用以分析点蚀在力学影响下的生长扩展机理。**结果** 随着弹性拉应力的增加, 304L 不锈钢薄板模型上半球体点蚀坑内的最大等效应力从 68.508 MPa 增至 328 MPa, 圆锥体点蚀坑内的最大等效应力从 115.960 MPa 增至 554.610 MPa, 圆柱体点蚀坑内的最大等效应力从 97.244 MPa 增至 466.200 MPa。半球体、圆锥体和圆柱体点蚀坑的最大等效应力增长斜率分别为 2.01、3.40、2.86。随着弹性拉应力的增加, 304L 不锈钢表面产生的点蚀坑逐渐从应力集中区域延伸扩展, 从而发生形状改变。此外, 在点蚀坑尺寸相似的情况下, 304L 不锈钢管道模型上半球体和圆锥体点蚀坑, 在无轴向弹性拉应力作用下的最大等效应力分别为 26.421、49.029 MPa, 在轴向弹性拉应力作用下的最大等效应力分别为 135.920、300.850 MPa。但当点蚀坑尺寸增大时, 圆锥体点蚀坑的最大等效应力在无轴向弹性拉应力条件下从 49.029 MPa 下降到 36.355 MPa, 在轴向弹性拉应力作用下从 135.920 MPa 下降至 212.140 MPa。**结论** 随着弹性拉应力的增加, 304L 不锈钢薄板模型上半球体、圆锥体和圆柱体点蚀坑内的最大等效应力逐渐增加, 其中圆锥体点蚀坑内的最大等效应力最高。此外, 随着弹性拉应力的增加, 304L 不锈钢表面产生的点蚀坑形状在应力集中的影响下逐渐从圆孔形状转变为长条形状。在不同的弹性拉应力条件下, 304L 不锈钢管道模型上圆锥体点蚀均比半球体点蚀的应力集中程度更大并且最大等效应力更高。但是, 随着圆锥体点蚀坑尺寸的增加, 点蚀坑内的最大等效应力逐渐减小。

关键词: 有限元; 弹性拉应力; 304L 不锈钢; 点蚀; 应力集中; 最大等效应力

中图分类号: TG172 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-3660(2021)02-0327-11

DOI: 10.16490/j.cnki.issn.1001-3660.2021.02.035

收稿日期: 2020-10-15; 修订日期: 2020-12-28

Received: 2020-10-15; Revised: 2020-12-28

基金项目: 西南石油大学 2020 年“启航计划”(618)

Fund: 2020 “Scientific Research Starting Project” of SWPU (618)

作者简介: 李嘉栋 (1995—), 男, 硕士研究生, 主要研究方向为电化学、腐蚀与防护、表面工程。

Biography: LI Jia-dong (1995—), Male, Master degree, Research focus: electrochemistry, corrosion and protection, surface engineering.

通讯作者: 唐鋈磊 (1983—), 男, 博士, 教授, 主要研究方向为电化学、腐蚀与防护、表面工程、新能源材料、航空材料。邮箱: tangjunlei@126.com

Corresponding author: TANG Jun-lei (1983—), Male, Doctor, Professor, Research focus: electrochemistry, corrosion and protection, surface engineering, new energy materials, aviation materials. E-mail: tangjunlei@126.com

引文格式: 李嘉栋, 林冰, 张世贵, 等. 弹性应力下 304L 不锈钢点蚀行为的有限元模拟研究[J]. 表面技术, 2021, 50(2): 327-337.

LI Jia-dong, LIN Bing, ZHANG Shi-gui, et al. Study on finite element simulation of pitting behavior of 304L stainless steel under elastic tensile stress[J]. Surface technology, 2021, 50(2): 327-337.

Study on Finite Element Simulation of Pitting Behavior of 304L Stainless Steel under Elastic Tensile Stress

LI Jia-dong¹, LIN Bing¹, ZHANG Shi-gui², WANG Ying-ying¹,
ZHU Yuan-qiang¹, NIE Zhen³, TANG Jun-lei¹

(1.School of Chemistry and Chemical Engineering, Southwest Petroleum University, Chengdu 610500, China;

2.AECC AERO Science and Technology Co., Ltd, Chengdu 610500, China;

3.Research Institute of Science and Technology Co., Ltd, PetroChina Group, Beijing 100083, China)

ABSTRACT: Through the idealized finite element modeling and simulation calculation, four point bending stress loading method was used to obtain the maximum equivalent stress and the change of pitting pit geometry in 304L stainless steel sheet under different elastic tensile stress conditions, and the axial tensile stress loading method was used to obtain the change law of maximum equivalent stress with the change of shape and size in the pitting pit on 304L stainless steel pipe under different elastic tensile stress conditions. The models of 304L stainless steel sheet and pipe with hemispherical, cone or cylinder pitting defects are constructed by using finite element method. The stress distribution in pitting pits of 304L stainless steel sheet and pipe model under different elastic tensile stress is systematically studied by using finite element simulation method, and the change of maximum equivalent stress in pitting pit is obtained by simulation calculation in order to analyze the growth and propagation mechanism of pitting under the influence of mechanics. With the increase of elastic tensile stress, the maximum equivalent stress in the hemispherical pit of 304L stainless steel model increases from 68.508 MPa to 328 MPa, that in the cone pit increases from 115.960 MPa to 554.610 MPa, and that in the cylinder pit increases from 97.244 MPa to 466.200 MPa. The maximum equivalent stress growth slopes of the hemisphere, cone and cylinder are 2.01, 3.40 and 2.86, respectively. Moreover, with the increase of the elastic tensile stress, the pitting pits on the surface of 304L stainless steel gradually extend from the stress concentration area, resulting in the shape change. In addition, under the condition of similar pit size, the maximum equivalent stress of the hemisphere and cone of 304L stainless steel pipe model is 26.421 MPa and 49.029 MPa without axial elastic tensile stress, and 135.920 MPa and 300.850 MPa under the action of axial elastic tensile stress. However, with the increase of pit size, the maximum equivalent stress of cone pit decreases from 49.029 MPa to 36.355 MPa without axial elastic tensile stress, and decreases from 212.140 MPa to 135.920 MPa under the action of axial elastic tensile stress. It can be concluded that with the increase of elastic tensile stress, the maximum equivalent stress in the pitting pits of hemisphere, cone and cylinder on 304L stainless steel sheet model increases gradually, with the highest in the cone pit. Moreover, with the increase of elastic tensile stress, the pitting pit shape on the surface of 304L stainless steel gradually changes from the round hole to the strip under the influence of stress concentration. Under different elastic tensile stress conditions, the stress concentration and maximum equivalent stress of the cone pitting on 304L stainless steel pipe model are higher than that of the hemispherical pitting. However, the maximum equivalent stress in the pit decreases with the increase of the pit size.

KEY WORDS: finite element; elastic tensile stress; 304L stainless steel; pitting; stress concentration; maximum equivalent stress

304L 不锈钢因具有良好的耐蚀性、延展性、可制造性,使其成为许多行业的理想合金选择^[1]。304L 不锈钢的耐均匀腐蚀能力良好,应力条件下均匀腐蚀的影响也较小,但在应力条件下不锈钢耐局部腐蚀的能力较差,容易产生点蚀^[2]。然而,在工业实际中 304L 不锈钢大多都是在弹性拉应力下服役的,而且弹性拉应力下 304L 不锈钢点蚀行为的研究相对较少^[3]。所以,探索弹性拉应力对 304L 不锈钢点蚀行为的影响,具有很大的研究意义。例如, T. Suter 等^[4]研究了弹性拉应力对 304L 不锈钢在 NaCl 溶液中点蚀行为的影响。Shimpei Tokuda 等^[5]研究了弹性拉应力对 304L

不锈钢在 $MgCl_2$ 溶液中点蚀形成的影响。

ANSYS 是一种可以进行静态、动态结构分析且具有多种类型综合分析能力的多功能有限元计算机程序^[6]。而且,有限元方法的思想是将有限个节点相互联系而形成的单元来代替复杂的对象,然后通过网格划分的方式对单元形状中复杂的内部结构问题加以综合求解^[7-8]。ANSYS 应用广泛,可以进行应力状态下材料腐蚀失效行为的研究分析^[9],也可以进行二维或三维模型的建立与应用,比如:点蚀发展的模型以及点蚀至 SCC 发展过程的模型^[10-11]。所以,利用有限元方法对弹性拉应力下 304L 不锈钢点蚀行为进

行模拟研究具有可行性。例如, Shu Guo 等^[12]采用有限元模拟研究了弹性拉应力对 304L 不锈钢点蚀底部应力集中效果的影响。Haitao Wang 等^[13]同样采用有限元方法, 模拟研究了弹性拉应力作用下 304L 不锈钢点蚀底部应力集中对点蚀生长的影响。此外, 304L 不锈钢在管道方面也有广泛的应用^[14-15], 管道在复杂环境中发生局部腐蚀的同时也会受到多种外力的共同作用, 从而使管道的安全性能下降^[16]。因此, 有限元的分析方法也常用于研究管道的应力分布和判断最大等效应力是否会使管道失效。

大多数学者所做的研究主要集中在腐蚀环境中应力对不锈钢点蚀行为的影响, 但对应力条件下不锈钢点蚀坑内应力分布对点蚀生长行为影响的研究却相对较少。在众多研究应力条件下不锈钢点蚀行为的方法中, 有限元分析具有表征点蚀坑内应力微观特征的独特能力。而且与其他方法相比, 有限元模拟的可视化界面可以清晰地显示应力条件下, 不锈钢点蚀坑的应力分布情况, 为研究不锈钢点蚀在弹性应力下的生长机理提供了有效的分析方法。本文通过 ANSYS 有限元软件建立了具有点蚀缺陷的 304L 不锈钢薄板和管道模型。采用四点弯曲的应力加载方式, 研究了弹性拉应力下 304L 不锈钢薄板模型上点蚀坑的几何形状, 对最大等效应力变化规律的影响以及弹性拉应力变化对点蚀坑形貌的影响。另外, 采用轴向拉伸的应力加载方式, 研究了弹性拉应力下 304L 不锈钢管道模型上, 点蚀坑类型和尺寸变化对应力分布和最大等效应力的影响。

1 实验方法

1.1 材料与腐蚀实验

实验室采用 304L 不锈钢作为腐蚀实验的样品, 样品的成分组成和力学性能如表 1 和表 2 所示。样品采用激光切割获得, 尺寸为 300 mm×50 mm×1.4 mm。

表 1 304L 不锈钢化学成分
Tab.1 Chemical composition of 304L stainless steel

wt. %							
C	Si	Mn	Cr	Ni	S	P	Fe
0.03	1.00	2.00	18.00	8.00	0.03	0.035	Bal.

表 2 304L 钢的基本力学性能要求 (20 ℃)^[3,17]

Tab.2 Basic mechanical property requirements of 304L steel (20 ℃)^[3,17]

Parameters	Numerical value
Tensile strength/MPa	520
Yield strength/MPa	205
Young modulus/MPa	1.95×10 ⁵
Poisson ratio	0.3
Density/(kg·m ⁻³)	7930

腐蚀实验包括弹性拉应力条件下的浸泡实验和电化学实验, 其中电化学实验采用动电位极化测试, 腐蚀溶液为 3.5%NaCl 溶液, 实验温度为 20 ℃, 弹性拉应力采用四点弯曲的应力加载方式。腐蚀实验后对样品表面的局部腐蚀形貌进行观察, 用于总结在弹性拉应力作用下 304L 不锈钢表面产生不同形状的点蚀坑。基于实验结果, 对 304L 不锈钢产生的点蚀坑进行理想化建模并进行有限元模拟研究。

图 1 展示了腐蚀实验应力加载方式的示意图。挠度在文中是指 304L 不锈钢长板在受到四点弯曲应力载荷时, 304L 不锈钢长板正中间位置处上升凸起的位移量。通过控制挠度 (0、0.7、2.0、2.7、3.4 mm) 加载不同的拉应力 (0、34、96、130、163 MPa)。最大应力分布于两个内支点之间, 该区域应力处处相同、均匀分布。从内支点到外支点, 试样所受应力呈线性下降。两内支点间的最大弹性应力见公式 (1)^[17], 弹性应力与屈服应力之间的关系见公式 (2)。

$$\sigma_{\max} = \frac{12Ety}{3H^2 - 4A^2} \tag{1}$$

$$Y = \frac{\sigma_{\max}}{\sigma_{0.2}} \times 100\% \tag{2}$$

式中: A 为内外支点间的距离, mm; E 为材料的弹性模量, MPa; t 为试样厚度, mm; y 为试样最大挠度, mm; H 为两外支点间的距离, mm; Y 为屈服程度, %; $\sigma_{0.2}$ 为材料屈服极限, MPa。

通过计算可得, 内支点区域内的应力分别为 0 MPa (0% $\sigma_{0.2}$)、34 MPa (16.64% $\sigma_{0.2}$)、96 MPa (46.84% $\sigma_{0.2}$)、130 MPa (63.24% $\sigma_{0.2}$)、163 MPa (79.64% $\sigma_{0.2}$), 均在弹性应变范围内。

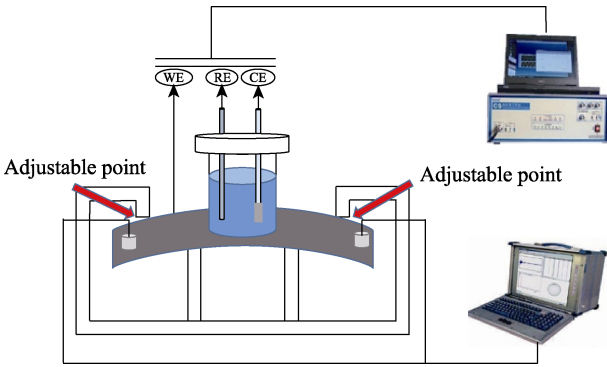


图 1 四点弯曲应力实验示意图

Fig.1 Schematic diagram of four point bending stress experiment

1.2 点蚀坑的几何模型

点蚀坑的形成过程极其复杂, 形貌多样且不规则, 而 304L 不锈钢的初始点蚀坑尺寸大小通常在数微米到数百微米范围内^[18]。本文通过浸泡实验获得了 304L 不锈钢在无外加应力时点蚀萌发阶段的几种典型形貌, 如图 2 所示, 分别类似半球体、圆锥体和圆

柱体。对于 304L 不锈钢, 在亚稳态点蚀坑的发展阶段, 点蚀坑扩展生长形成半球体点蚀坑, 许多文献理想化为半球形模型^[19], 也有文献发现为圆锥体形状

的, 如果发生次生蚀孔, 还可能在外观上呈现圆柱体^[20]。现场获得的很多宏观腐蚀形貌也表明, 它们很可能是起源于上述 3 种典型的点蚀坑初期形貌, 如图 3 所示。

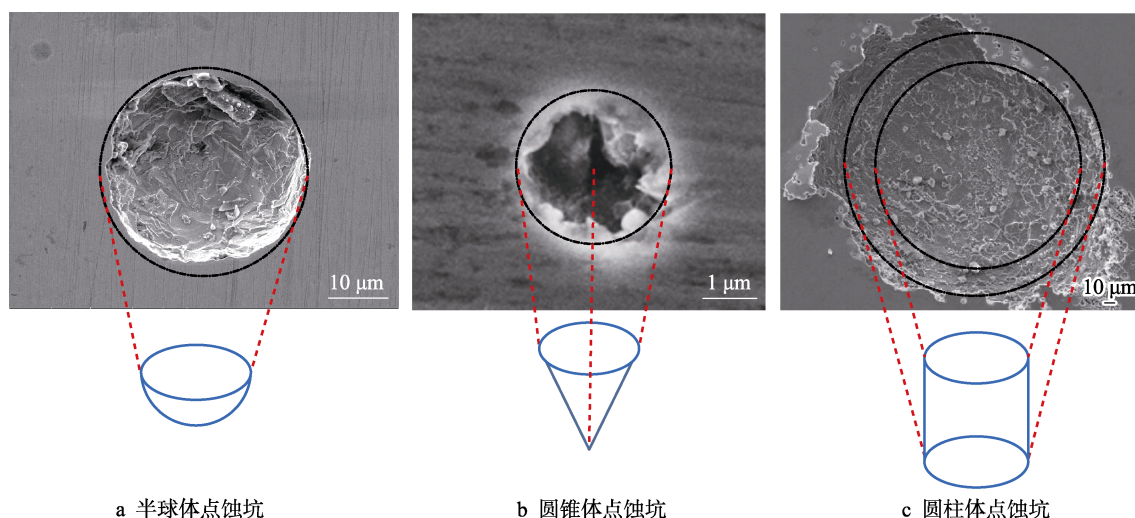


图 2 实验中获得了几种典型点蚀萌发阶段的形貌

Fig.2 Morphology of several typical pitting germination stages obtained in the experiment: a) hemisphere pitting, b) cone pitting, c) cylinder pitting

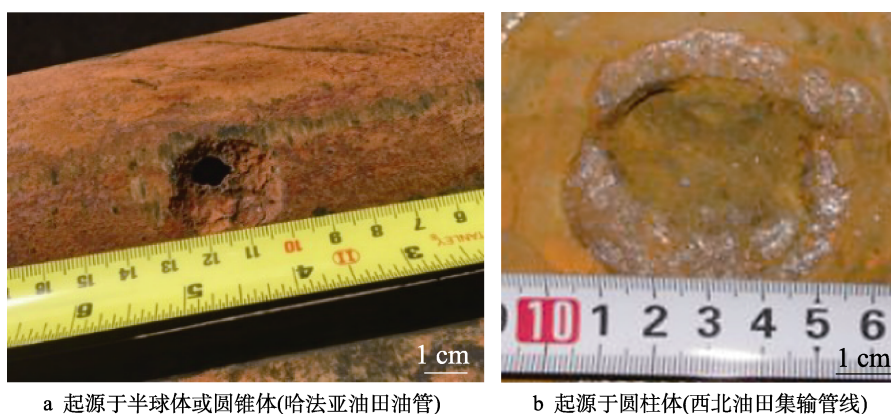


图 3 可能起源于几种典型点蚀形状的宏观腐蚀形貌

Fig.3 Macroscopic corrosion morphology may be originated from several typical pitting shapes: a) originated from hemisphere or cone (Halfaya Oilfield tubing), b) originated from cylinder (Northwest Oilfield gathering pipeline)

因此, 本文将实验中观察到的 304L 不锈钢点蚀坑的几何形状理想化为半球体、圆锥体、圆柱体, 用于有限元建模, 其三维模型如图 4 所示。304L 不锈钢薄板的点蚀坑模型尺寸根据点蚀生长的早期阶段进行设计, 稳态点蚀由亚稳态点蚀发展而来, 根据 1.1 节中所述四点弯曲腐蚀实验中 304L 不锈钢薄板

上产生的三种类型的点蚀尺寸和文献中的结果^[21], 设计了微米级点蚀坑模型, 各模型尺寸如表 3 所示。不锈钢管道通常应用于实际腐蚀环境中, 考虑到腐蚀时间的扩展属性, 在不锈钢管上设计了生长到毫米级的半球体和圆锥体点蚀坑模型, 各模型尺寸如表 4 所示。

表 3 四点弯曲腐蚀实验中 304L 不锈钢薄板的理想化点蚀坑模型参数

Tab.3 Parameters of idealized pitting pit model for 304L stainless steel sheet in four point bending corrosion test

Pitting model	Size
Hemisphere	Radius: 25 μm
Cone	Bottom radius: 30 μm Height: 30 μm
Cylinder	Bottom radius: 35 μm Height: 45 μm

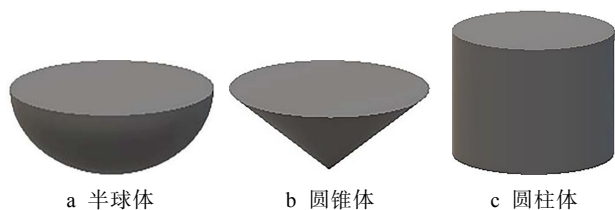


图 4 不同形状点蚀坑的理想化三维模型

Fig.4 Idealized 3D model of pitting pits with different shapes: a) hemisphere, b) cone, c) cylinder

表 4 304L 不锈钢管道的理想化点蚀坑尺寸参数
Tab.4 Idealized pitting size parameters of 304L stainless steel pipeline

Pitting model	Size
Hemisphere	Radius: 1 mm
Cone	Bottom radius: 1 mm, 2 mm, 4 mm Height: 1 mm, 2 mm, 4 mm

1.3 薄板和管道的几何模型及相关参数

四点弯曲腐蚀实验中使用的 304L 不锈钢试样尺寸参数如表 5 所示，用于薄板模型建模。管道模型 的尺寸参数来源于某 LNG 接收站的 BOG 增压机入口管 线^[22]。由于管道的分析只选取腐蚀管道的某一小段， 所以根据圣维南原理^[23]，为了消除边界效应，设计管 道的长度为管道外径的 2~4 倍，本文取 1000 mm，如 表 6 所示。建立的 304L 不锈钢薄板与管道有限元模 型如图 5 所示。

表 5 实验室 304L 不锈钢薄板尺寸参数
Tab.5 Dimension parameters of laboratory 304L stainless steel sheet

Parameters	Numerical value
Length	300
Width	150
Thickness	1.5

表 6 BOG 增压机入口管线管道尺寸参数
Tab.6 Size parameters of inlet pipeline of BOG booster

Parameters	Numerical value
Diameter	273
Wall thickness	5.10
Length	1000

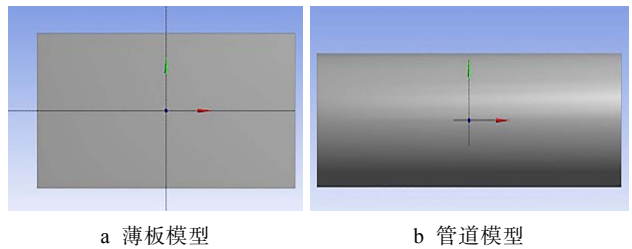


图 5 304L 不锈钢有限元模型
Fig.5 Finite element model of 304L stainless steel: a) thin plate model, b) pipeline model

1.4 应力加载模型

304L 不锈钢薄板应力加载模型的参数与实验一 致。管道及管件由于设计误差或者安装误差，可能产 生轴向应力，根据 GB 50253—2014《输油管道工程

设计规范》，管道结构所用的许用拉应力不应超过其 最低屈服强度的 60%。因此，本文对 304L 不锈钢薄 板和管道施加的弹性拉应力的数值参数如表 7 所示， 三维加载模型如图 6 所示。

表 7 对 304L 不锈钢薄板和管道施加弹性拉应力的数值 参数

Tab.7 Numerical parameters of elastic tensile stress on 304L stainless steel sheet and pipe

Model	Elastic tensile stress
Stainless steel sheet	34, 96, 130, 163
Stainless steel pipe	0, 82

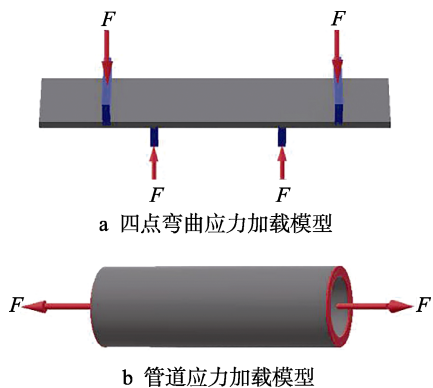


图 6 304L 不锈钢薄板四点弯曲应力加载模型和管道应力 加载模型
Fig.6 Four point bending stress loading model (a) and pipe stress loading model (b) of 304L stainless steel sheet

2 结果与讨论

2.1 304L 不锈钢薄板模型上的点蚀坑模型 分析

304L 不锈钢薄板模型上半球体、圆锥体、圆柱 体点蚀坑的应力分布如图 7—9 所示。表 8 列出了不 同弹性拉应力和点蚀坑几何形状条件下模拟计算得 出的最大等效应力。304L 不锈钢薄板模型上半球体 点蚀坑的应力分布如图 7 所示。在不同弹性拉应力作 用下，由于应力集中而产生的最大等效应力主要出现 在半球体点蚀坑的底部和垂直于拉伸应力方向的肩 部，这与应力腐蚀开裂中半球体点蚀坑模型的应力分 析结果一致^[24]。图 7 中半球体点蚀坑内应力分布变化 结合表 8 中相应的最大等效应力，结果表明，随着弹 性拉应力的增加，应力集中程度逐渐增大，导致半球 体点蚀坑内的最大等效应力逐渐增加。当不锈钢薄板 模型外加 34 MPa（图 7a）或 96 MPa（图 7b）的弹 性拉应力时，半球体点蚀坑内的最大等效应力仍处于 弹性应力范围内，应力对点蚀坑的形状变化没有直接 影响。但当不锈钢薄板模型外加 130 MPa（图 7c）或 163 MPa（图 7d）的弹性拉应力时，半球体点蚀坑内

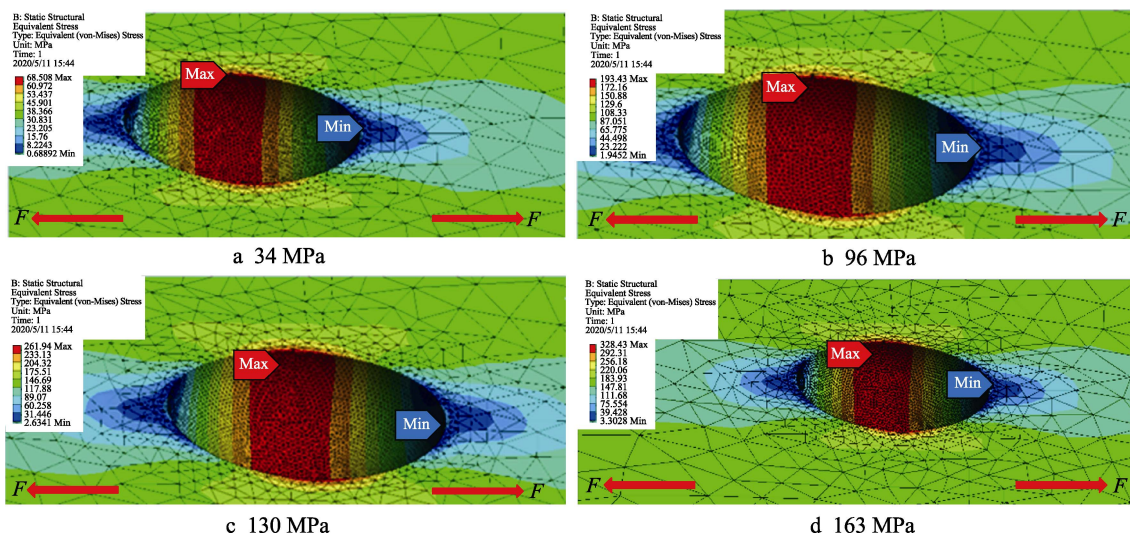


图7 不同弹性拉应力下304L不锈钢薄板模型上半球体点蚀坑应力云图

Fig.7 Stress nephogram of hemispherical pitting pits on a 304L stainless steel sheet model under different elastic tensile stresses

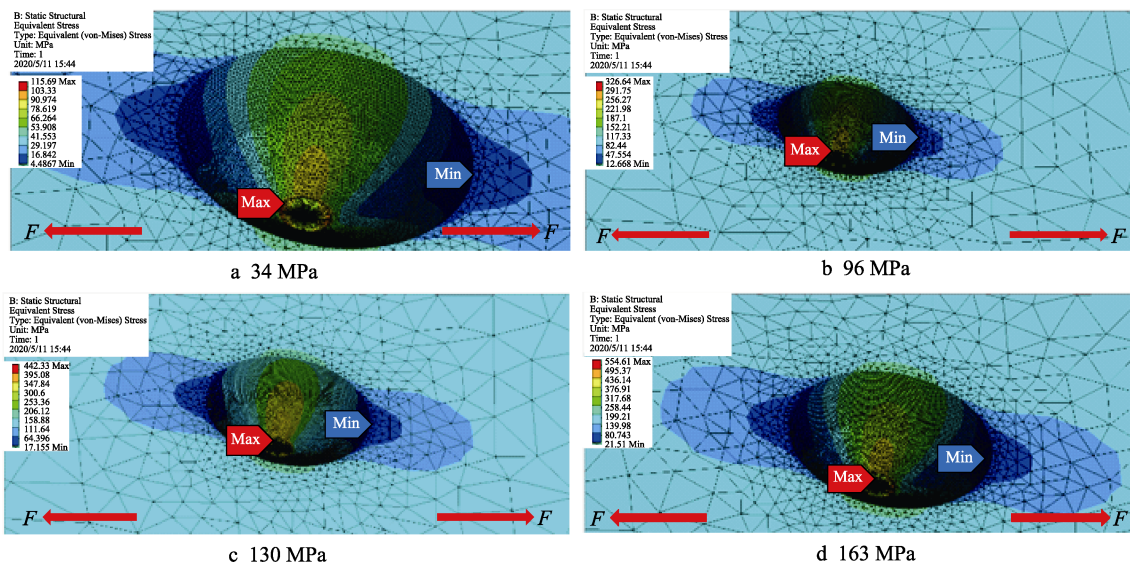


图8 不同弹性拉应力下304L不锈钢薄板模型上圆锥体点蚀坑应力云图

Fig.8 Stress nephogram of cone pitting pits on a 304L stainless steel sheet model under different elastic tensile stresses

的最大等效应力则超过了304L不锈钢的屈服强度而处于塑性应力范围内,进而促进点蚀坑向应力集中方向扩展变形^[13]。

304L不锈钢薄板模型上圆锥体点蚀坑的应力分布如图8所示,圆锥体点蚀坑在弹性拉应力作用下,由于应力集中而产生的最大等效应力主要出现在圆锥体点蚀坑底部的尖端区域,这与半球体点蚀坑显著不同。但相似的是垂直于拉伸应力方向的肩部区域应力集中程度较大。图8中圆锥体点蚀坑应力分布变化结合表8中相应的最大等效应力,结果表明,随着弹性拉应力的增加,不锈钢薄板模型上的圆锥体点蚀坑内底部尖端处的应力集中程度逐渐增大,导致最大等效应力逐渐增加。当不锈钢薄板模型外加34 MPa(图8a)的弹性拉应力时,圆锥体点蚀坑内的最大等效应力处于弹性应力范围之内。但当不锈钢薄板模型外加

96 MPa(图8b)、130 MPa(图8c)或163 MPa(图8d)的弹性拉应力时,圆锥体点蚀坑内的最大等效应力则超过了304L不锈钢的屈服强度而达到塑性应力范围内,圆锥体点蚀坑会在最大等效应力的影响下趋向于向底部尖端区域扩展变形,促使圆锥体点蚀坑朝着点蚀坑底部尖端处向下扩展延伸。

304L不锈钢薄板模型上圆柱体点蚀坑的应力分布如图9所示,在弹性拉应力作用下,由于应力集中而产生的最大等效应力主要出现在圆柱体点蚀坑底部边缘区域,垂直于拉伸应力方向的区域应力也相对更大,但最大应力区域处于10点钟到2点钟方向之间。图9中圆柱体应力分布变化结合表8中相应的最大等效应力,结果表明,随着弹性拉应力的增加,不锈钢薄板上圆柱体点蚀坑内的底部边缘区域的应力集中程度逐渐增大,导致最大等效应力逐渐增加。当

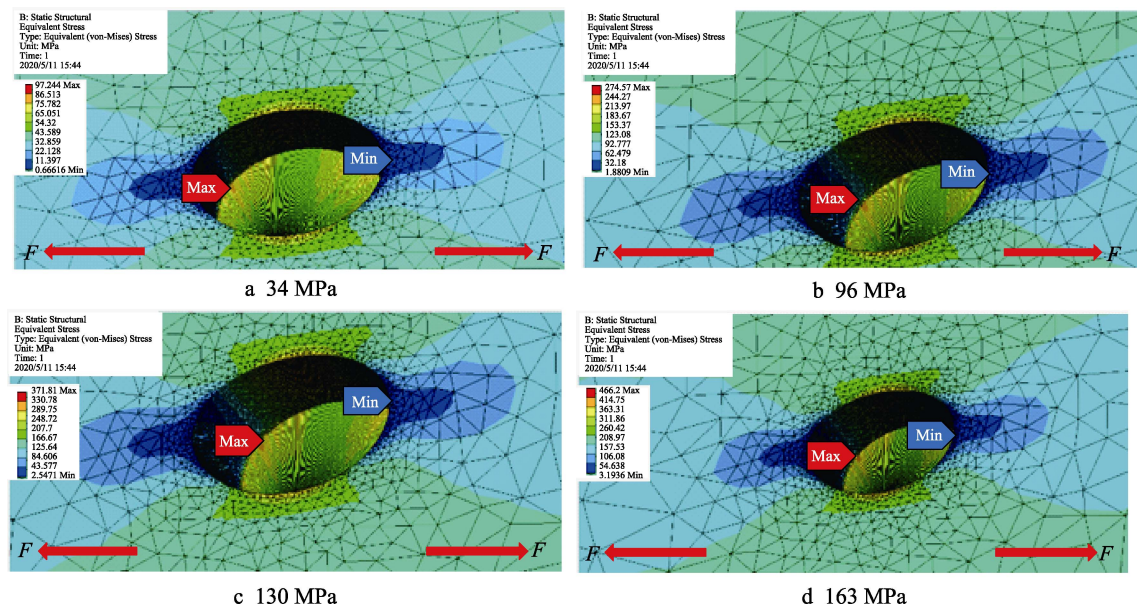


图 9 不同弹性拉应力下 304L 不锈钢薄板模型上圆柱体点蚀坑应力云图

Fig.9 Stress nephogram of cylinder pitting pits on a 304L stainless steel sheet model under different elastic tensile stresses

表 8 不同弹性应力作用下 304L 不锈钢薄板模型上点蚀坑内的最大等效应力

Tab.8 Maximum equivalent stress in pitting pit of 304L stainless steel sheet model under different elastic stresses MPa

Pitting morphology	34 MPa	96 MPa	130 MPa	163 MPa
Hemisphere	68.508	193.430	261.940	328.430
Cone	115.960	326.640	442.330	554.610
Cylinder	97.244	274.570	371.810	466.200

不锈钢薄板模型外加 34 MPa（图 9a）的弹性拉应力时，圆柱体点蚀坑内的最大等效应力低于屈服应力。但当不锈钢薄板模型外加 96 MPa（图 9b）、130 MPa（图 9c）和 163 MPa（图 9d）的弹性拉应力时，圆柱体点蚀坑内的最大等效应力则超过了 304L 不锈钢的屈服强度而达到塑性应力范围内，圆柱体点蚀坑会在塑性应力的影响下趋向于向底部边缘区域扩展变形，促使圆柱体点蚀坑朝着底部边缘区域逐渐扩展，坑内体积逐渐增大。

以上分析结果均表明，304L 不锈钢薄板模型上各种点蚀坑都会成为弹性拉应力作用下应力集中的主要区域，这也是高氯环境中不锈钢应力腐蚀的特征之一^[25-26]。基于点蚀坑几何形状对应力分布的影响，应力集中情况会随着点蚀坑形状的不同而不同，但其分布区域主要处于垂直于外加应力的方向，其中圆柱体模型的应力集中区域范围的相对分散程度最大，半球体次之，锥体点蚀坑的应力集中区域范围相对集中。而且，随着弹性拉应力的增加，所有形状点蚀坑内的应力集中程度都增大，最大等效应力随之增加^[12]。

304L 不锈钢薄板上半球体、圆锥体、圆柱体点蚀坑模型内最大等效应力与薄板上施加的弹性应力

关系如图 10 所示。从图 10 中可知，所有形状点蚀坑内的最大等效应力均随弹性拉应力的增加而增加，最大等效应力和所施加的弹性应力正相关。当不锈钢薄板模型外加 34 MPa 的拉应力时，半球体、圆锥体、圆柱体点蚀坑内的最大等效应力均处于弹性应力范围内。当不锈钢薄板的外加拉应力增加到 96 MPa 时，半球体点蚀坑模型中的最大应力仍在弹性应力范围内，而圆锥体和圆柱体点蚀坑模型内的最大等效应力都增大至塑性应力范围内。但当进一步增加不锈钢薄板模型的外加弹性拉应力至 130 MPa 时，三种类型点蚀坑的最大等效应力都超过了屈服强度。当外加拉应力达到 163 MPa 时，半球体和圆柱体点蚀模型的最大拉应力分别为 328.430 MPa 和 466.200 MPa，而圆锥体点蚀坑内的最大等效应力为 554.610 MPa，超过了 304L 不锈钢的抗拉强度，可能会导致圆锥体尖端产

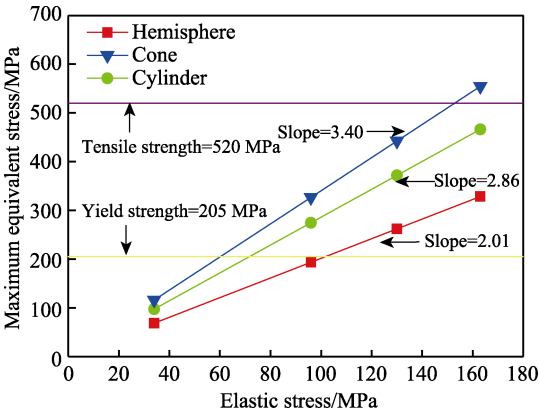


图 10 不同弹性拉应力下 304L 不锈钢薄板模型上点蚀坑内的最大等效应力变化

Fig.10 Maximum equivalent stress variation in pitting pits of 304L stainless steel sheet model under different elastic tensile stresses

生断裂裂纹。通过对弹性应力和最大等效应力进行拟合可以发现,圆锥体点蚀坑内的最大等效应力的增长幅度和曲线斜率明显高于具有半球体和圆柱体的点蚀坑。这是由于圆锥体点蚀坑的应力集中于底部尖端区域,应力的集中程度相较于半球体和圆柱体的点蚀坑更高,更容易产生高的最大等效应力。相比较而言,半球体模型的应力集中程度最低,随弹性拉应力增加而增加的幅度也最小,即该类型的点蚀扩展可能受力学条件的影响相对较小。圆柱体点蚀坑模型的应力集中程度处于半球体和圆锥体点蚀坑模型之间。

图 11 是通过扫描电镜观察获得的不同弹性拉应

力作用下 304L 不锈钢在 3.5%NaCl 溶液中动电位极化后的表面点蚀形貌。从图 11a 中可以看到,当没有施加弹性拉应力时,304L 不锈钢薄板上产生的点蚀坑表面形状较为规则并趋近于圆形,即半球体点蚀坑模型。当施加 34 MPa (图 11b) 和 96 MPa (图 11c) 的弹性拉应力时,304L 不锈钢薄板上产生的点蚀坑几何形状开始变得不规则。但当施加的弹性拉应力达到 130 MPa (图 11d) 和 163 MPa (图 11e 所示) 时,304L 不锈钢薄板上产生的点蚀坑越来越多地呈现长条形状,且延伸扩展方向与拉伸应力方向接近垂直。

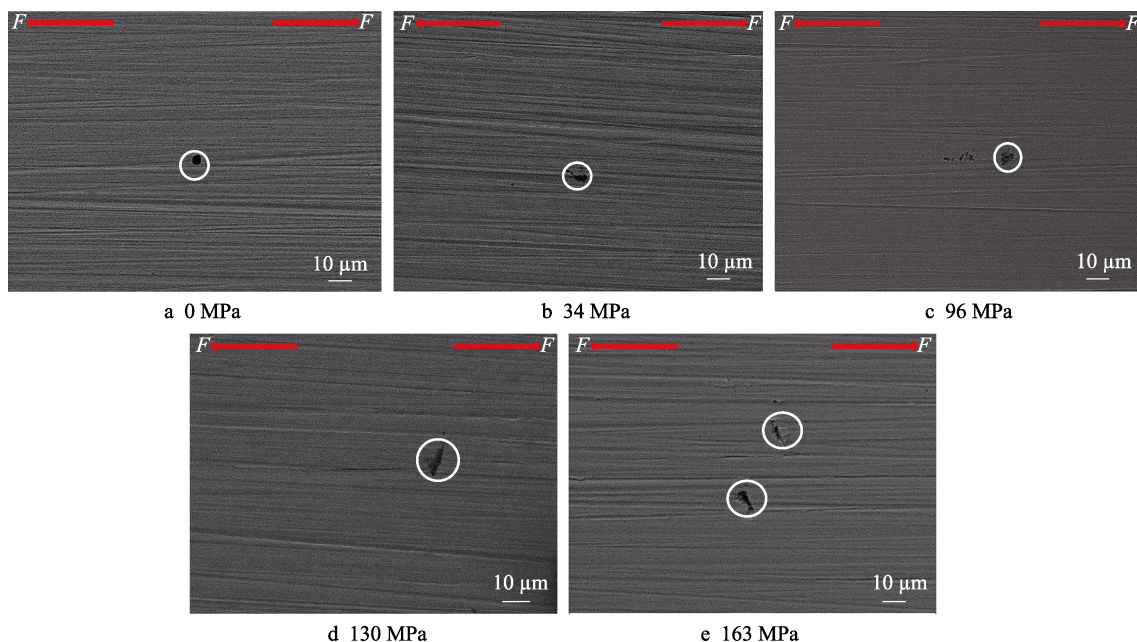


图 11 不同弹性拉应力下 304L 不锈钢在 3.5%NaCl 溶液中动电位极化测试后的表面点蚀形貌^[30]

Fig.11 Pitting morphology of 304L stainless steel under different elastic tensile stresses after potentiodynamic polarization test in 3.5wt.%NaCl solution^[30]

以上结果表明,在弹性拉应力条件下,点蚀坑在应力集中的影响下容易向应力集中部位扩展,这主要是因为弹性应力能够增加不锈钢阳极溶解的速率^[5,27]。力学因素可以改变金属阳极过程的反应活化能,首先是应力集中区域原子序列发生形变,晶格缺陷增多使得原子活化能提高;二是应力集中区域,表面钝化膜可能会发生不同程度的损坏,这使得钝化膜破裂位置优先腐蚀溶解^[28]。因此,点蚀坑容易在最大等效应力区域优先扩展,导致点蚀坑几何形状趋于不规则^[13]。当点蚀坑内的最大等效应力超过屈服强度而处于塑性应力范围内时,会促使点蚀坑沿着应力集中方向显著发生塑性变形扩展^[29]。所以,四点弯曲应力腐蚀实验中获得的结果与力学模拟结果可以很好地相互支持。

2.2 304L 不锈钢管道模型上的点蚀坑模型分析

根据 304L 不锈钢薄板模型的研究结果,在三种

典型的点蚀坑模型中选择应力集中程度相对分散较低的半球体点蚀坑和应力集中程度相对集中较大的圆锥体点蚀坑进行有限元分析。

图 12 显示了有限元计算的半球体和圆锥体点蚀坑的形状以及不同圆锥体尺寸对 304L 不锈钢管道上点蚀坑应力分布云图的影响。表 9 列出了不同应力和尺寸条件下 304L 不锈钢管道模型上半球体和圆锥体点蚀坑的最大等效应力。不锈钢管道模型在未施加轴向拉应力时具有垂直于轴向的周向应力,如图 12a、c、e、g 所示,这是由于管道外表面有一定的弯曲程度,导致外表面受到微小的围绕管道的周向拉伸应力。不锈钢管道外表面的半球体和圆锥体点蚀模型,受到该微小的周向拉应力时,也会导致蚀坑内出现应力集中。在周向拉伸应力的作用下,半球体点蚀坑内的最大等效应力位于蚀坑底部和垂直于周向拉伸应力方向的肩部区域,圆锥体点蚀坑内的应力集中区域与半球形点蚀坑类似,但位于圆锥体点蚀坑内的底部

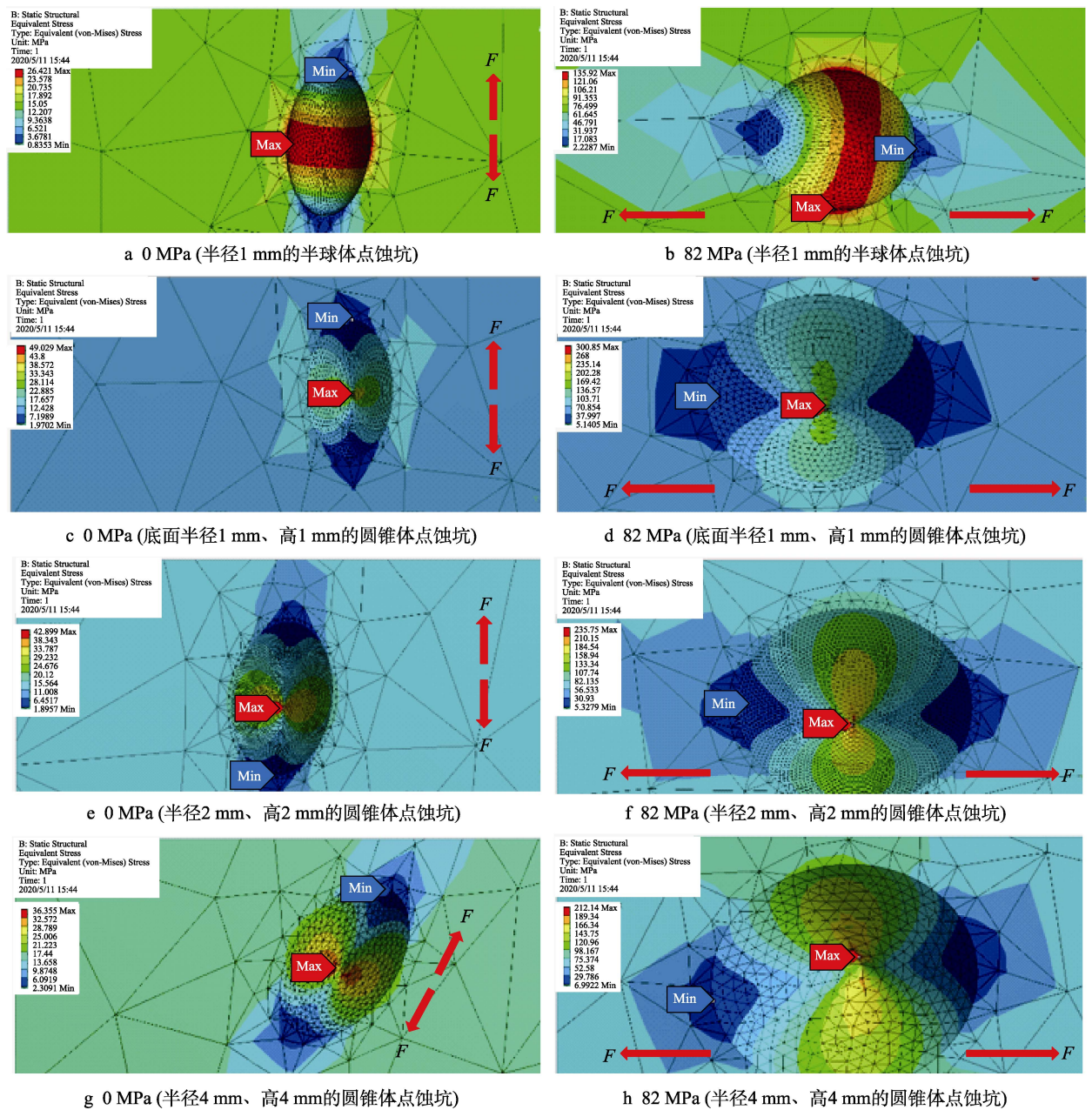


图 12 应力、形状和尺寸对 304L 不锈钢管道上点蚀坑应力分布云图的影响

Fig.12 Effects of stress, shape and size on the stress distribution nephogram of pitting pits on 304L stainless steel pipeline: (a) and (b) are hemispherical pitting pits with a radius of 1 mm; (c) and (d) are pits with a radius of 1 mm and a height of 1 mm; (e) and (f) are pits with a radius of 2 mm and a height of 2 mm; (g) and (h) are pits with a radius of 4 mm and a height of 4 mm

尖端区域的最大等效应力显著大于半球形点蚀坑。但当对不锈钢管道模型施加平行于管长度方向的轴向弹性拉应力时,半球体点蚀坑内的最大等效应力位于底部和垂直于拉伸应力方向的肩部区域,圆锥体点蚀坑内垂直于轴向拉伸应力的肩部区域的应力集中程度较大,最大等效应力仍位于圆锥体点蚀坑内的底部尖端区域。半球体和圆锥体点蚀坑内产生的最大等效应力是微小周向拉伸应力作用下所产生的最大等效应力的 5 倍以上,如表 9 所示。因此,相较于管道表面的周向拉伸应力,施加的轴向弹性拉应力对点蚀坑内应力集中的影响程度更大。当两种应力同时存在时,轴向弹性拉应力对点蚀坑内的应力分布起主要影

表 9 不同弹性应力条件下 304L 不锈钢管道上半球体和圆锥体点蚀坑的最大等效应力

Tab.9 Maximum equivalent stress of hemispherical and cone pitting pits on the 304L stainless steel pipe under different elastic stresses			MPa	
Pitting type and size	0 MPa	82 MPa		
Hemisphere (Radius:1 mm)	26.421	135.920		
Cone (Bottom radius: 1 mm, Height: 1 mm)	49.029	300.850		
Cone (Bottom radius: 2 mm, Height: 2 mm)	42.899	235.750		
Cone (Bottom radius: 4 mm, Height: 4 mm)	36.355	212.140		

响作用,周向拉应力所产生的应力集中效应则比较小,甚至可以忽略。

尺寸相似的半球形点蚀模型(图12a、b)和圆锥形点蚀模型(图12c、d)中,应力分布变化和最大等效应力(表9)的结果表明,相较于半球体点蚀坑,304L不锈钢管道模型上的圆锥体点蚀坑由于底部尖端的应力集中程度较高,有更高的最大等效应力,这与薄板模型中获得的结果一致。所以,选择304L不锈钢管道模型上的圆锥体点蚀坑,进一步研究点蚀坑尺寸变化对点蚀坑内最大等效应力的影响。

不锈钢管道模型在外加轴向弹性拉应力(图12d、f、h)和无外加应力(图12c、e、g)的条件下,圆锥体点蚀坑尺寸变化对应力分布的影响结合表9中相应的最大等效应力的结果表明:在外加轴向弹性拉应力和无外加应力的条件下,随着圆锥体点蚀坑尺寸的增加,点蚀坑内垂直于拉伸应力方向的肩部区域的应力集中程度较大,且应力集中区域的面积也逐渐增大,但点蚀坑尖端区域的最大等效应力却逐渐减小。原因是随着圆锥体点蚀坑尺寸的增加,点蚀坑坑口宽度和坑内表面积增大,应力在点蚀坑内的分布区域变大,应力集中程度减弱。此外,在轴向弹性拉应力作用下,圆锥体点蚀坑内的最大等效应力处于塑性应力范围内,304L不锈钢管道模型上圆锥体点蚀坑容易在塑性应力的影响下扩展变形,促使形状发生转变。但随着圆锥体点蚀坑尺寸的增加,最大等效应力减小,导致点蚀坑扩展变形的程度逐渐下降。

3 结论

1)随着弹性拉应力的增加,304L不锈钢薄板模型上半球体、圆柱体、圆锥体点蚀坑内的最大等效应力逐渐增大。其中,圆锥体点蚀坑内的最大等效应力位于底部尖端区域,应力集中程度相较于半球体和圆柱体的点蚀坑较高。所以,圆锥体点蚀坑容易产生更高的最大等效应力,并且最大等效应力的增长趋势也最大。

2)当304L不锈钢薄板上加载的弹性拉应力达到130 MPa后,所有点蚀坑模型的局部最大等效应力都超过了304L不锈钢材料的屈服强度,点蚀坑的形貌将趋向于发生变形,且形变扩展方向与最大等效应力方向一致。在不同弹性拉应力作用下,半球体点蚀坑的最大等效应力均出现在底部和垂直于拉伸应力方向的肩部,这会使半球体点蚀坑肩部容易扩展变形,逐渐延伸变长呈现长条形状,腐蚀实验结果与半球体点蚀的有限元模拟结果提供了相互支持。

3)弹性拉应力条件下,304L不锈钢管道模型上圆锥体点蚀的应力集中程度比半球体更高。对于圆锥体点蚀,其坑尺寸以毫米级增加时,将使得应力集中程度减弱,最大等效应力逐渐变小,应力对蚀坑变形生长的影响变小。

参考文献:

- [1] SCATIGNO G G, DONG P, RYAN M P, et al. The effect of salt loading on chloride-induced stress corrosion cracking of 304L austenitic stainless steel under atmospheric conditions[J]. *Materialia*, 2019, 8: 100509.
- [2] 张东海, 刘睿, 程从前, 等. 拉应力对2205双相不锈钢耐点蚀性能的影响[J]. *表面技术*, 2016, 45(3): 12-16.
ZHANG Dong-hai, LIU Rui, CHENG Cong-qian, et al. Effect of tensile stress on pitting resistance of 2205 duplex stainless steel[J]. *Surface technology*, 2016, 45(3): 12-16.
- [3] 唐鋆磊, 曹东, 王虎, 等. 弹性应力下304L不锈钢在3.5%NaCl溶液中的点蚀行为[J]. *材料保护*, 2018, 51(10): 16-21.
TANG Jun-lei, CAO Dong, WANG Hu, et al. Pitting corrosion behavior of 304L stainless steel in 3.5%NaCl solution under elastic stress[J]. *Materials protection*, 2018, 51(10): 16-21.
- [4] SUTER T, WEBB E G, BÖHNI H, et al. Pit initiation on stainless steels in 1 mol/L NaCl with and without mechanical stress[J]. *Journal of the Electrochemical Society*, 2001, 148(5): B174-B185.
- [5] TOKUDA S, MUTO I, SUGAWARA Y, et al. Effect of applied stress on pitting corrosion behavior of type 304 stainless steel in chloride environment[J]. *ECS transactions*, 2017, 80(10): 1407-1413.
- [6] 李录贤, 刘书静, 张慧华, 等. 广义有限元方法研究进展[J]. *应用力学学报*, 2009(1): 96-108.
LI Lu-xian, LIU Shu-jing, ZHANG Hui-hua, et al. Research progress of generalized finite element method[J]. *Chinese journal of applied mechanics*, 2009(1): 96-108.
- [7] 孙海涛. 油套管水压试验装置结构设计及力学性能研究[D]. 大庆: 大庆石油学院, 2009.
SUN Hai-tao. Research on mechanical properties and structure design of petroleum tube and casing hydrostatic test unit[D]. Daqing: Northeast Petroleum University, 2009.
- [8] 崔佳乐. 兰姆波单一模态的激励及与缺陷相互作用的研究[D]. 大连: 大连理工大学, 2015.
CUN Jia-le. Study on the excitation of single mode lamb wave and the interaction of lamb wave with defects[D]. Dalian: Dalian University of Technology, 2015.
- [9] 张洪明, 钟秉章. 普通埋藏式压力管道有限元分析方法探讨[J]. *昆明冶金高等专科学校学报*, 1996, 12(1): 7-11.
ZHANG Hong-min, ZHONG Bing-zhang. Discussion on finite element analysis method of common buried pressure pipeline[J]. *Journal of Kunming Metallurgy College*, 1996, 12(1): 7-11.
- [10] CALEYO F, VELAZQUEZ J C, VALOR A, et al. Probability distribution of pitting corrosion depth and rate in underground pipelines: A Monte Carlo study[J]. *Corrosion science*, 2009, 51(9): 1925-1934.
- [11] TURNBULL A, MCCARTNEY L N, ZHOU S. A model

- to predict the evolution of pitting corrosion and the pit-to-crack transition incorporating statistically distributed input parameters[J]. *Corrosion science*, 2006, 48(8): 2084-2105.
- [12] SHU G, WANG H, HAN E H, et al. Computational evaluation of the influence of various uniaxial load levels on pit growth of stainless steel under mechano-electrochemical interactions[J]. *Journal of the Electrochemical Society*, 2018, 165(9): C515-C523.
- [13] WANG H, HAN E H. Simulation of metastable corrosion pit development under mechanical stress[J]. *Electrochimica acta*, 2013, 90: 128-134.
- [14] 马海强, 李伟. 304L 薄壁不锈钢管的焊接[J]. 大型铸锻件, 2010(1): 41-42.
MA Hai-qiang, LI Wei. The welding technology of the thin wall pipe of 304L stainless steel[J]. *Heavy castings and forgings*, 2010(1): 41-42.
- [15] 张仁勇, 王霞, 施岱艳, 等. 316L 不锈钢管的膨胀性能[J]. 材料工程, 2014(6): 79-83.
ZHANG Ren-yong, WANG Xia, SHI Dai-yan, et al. Expansion property of 316L stainless steel pipe[J]. *Journal of materials engineering*, 2014(6): 79-83.
- [16] 赵鹏程, 帅健, 唐雨, 等. 轴向应力对腐蚀缺陷管道极限内压的影响[J]. 中国安全科学学报, 2019, 29(3): 70-75.
ZHAO Peng-cheng, SHUAI Jian, TANG Yu, et al. Impact of axial stress on ultimate internal pressure of corroded pipelines[J]. *China safety science journal*, 2019, 29(3): 70-75.
- [17] PENG Y W, CHEN C M, LI X Y, et al. Effect of low-temperature surface carburization on stress corrosion cracking of AISI 304 austenitic stainless steel[J]. *Surface coatings technology*, 2017, 328: 420-427.
- [18] 王威. 316L 不锈钢点蚀的电化学行为及其影响因素研究[D]. 成都: 西南石油大学, 2014.
WANG Wei. Electrochemical behavior and influencing factors of pitting corrosion of 316L stainless steel[D]. Chengdu: Southwest Petroleum University, 2014.
- [19] LI L, LI X G, DONG C F, et al. Computational simulation of metastable pitting of stainless steel[J]. *Electrochimica acta*, 2009, 54(26): 6389-6395.
- [20] CUI J, YANG F, YANG T H, et al. Numerical study of stainless steel pitting process based on the lattice Boltzmann method[J]. *International journal of electrochemical science*, 2019, 14(2): 1529-1545.
- [21] GHAHARI M, KROUSE D, LAYCOCK N, et al. Synchrotron X-ray radiography studies of pitting corrosion of stainless steel: Extraction of pit propagation parameters[J]. *Corrosion science*, 2015, 100: 23-35.
- [22] 吕能, 刘强, 李德君, 等. BOG 增压机 304L 管线开裂失效分析[J]. 热加工工艺, 2018, 47(19): 252-254.
LYU Neng, LIU Qing, LI De-jun, et al. Cracking failure analysis of 304L pipeline in BOG compressor[J]. *Hot working technology*, 2018, 47(19): 252-254.
- [23] TIMOSHENKO S P, GOODIER J N. 弹性理论[M]. 第3版. 北京: 清华大学出版社, 2004.
TIMOSHENKO S P, GOODIER J N. *Theory of elasticity* [M]. Third edition. Beijing: TsingHua University Press, 2004.
- [24] CERIT M, GENEL K, EKSI S. Numerical investigation on stress concentration of corrosion pit[J]. *Engineering failure analysis*, 2009, 16(7): 2467-2472.
- [25] HUANG Y H, TU S T, XUAN F Z. Modeling and simulation of pit chemistry of 304 austenitic stainless steel under applied stress in sodium chloride solution[J]. *Nuclear engineering and design*, 2013, 257: 45-52.
- [26] 李岩, 方可伟, 刘飞华. Cl⁻对 304L 不锈钢从点蚀到应力腐蚀转变行为的影响[J]. 腐蚀与防护, 2012(11): 955-959.
LI Yan, FANG Ke-wei, LIU Fei-hua. Influence of Cl⁻ on development behavior from pitting corrosion to stress corrosion cracking of 304L stainless steel[J]. *Corrosion & protection*, 2012(11): 955-959.
- [27] FENG X, LU X, ZUO Y, et al. The effect of deformation on metastable pitting of 304 stainless steel in chloride contaminated concrete pore solution[J]. *Corrosion science*, 2016, 103: 223-229.
- [28] 林昌健, 冯祖德, 林福龄, 等. 18/8 型不锈钢在受力形变条件下腐蚀电化学行为的研究[J]. 电化学, 1995(4): 439-446.
LIN Chang-jian, FENG Zu-dei, LIN Fu-ling, et al. Study on electrochemical corrosion behavior of 18/8 stainless steel under stress and deformation[J]. *Journal of electrochemistry*, 1995(4): 439-446.
- [29] ZHU L K, YAN Y, QIAO L J, et al. Stainless steel pitting and early-stage stress corrosion cracking under ultra-low elastic load[J]. *Corrosion science*, 2013, 77: 360-368.
- [30] 曹东. 弹性应力下 304L 不锈钢点蚀行为的研究[D]. 成都: 西南石油大学, 2015.
CAO Dong. Study on pitting behavior of 304L stainless steel under elastic stress[D]. Chengdu: Southwest Petroleum University, 2015.