



DOI:10.12404/j.issn.1671-1815.2402268

引用格式:董欢,马贵阳,孙东旭.交流杂散电流与应力耦合对涂层破损管道腐蚀行为影响[J].科学技术与工程,2025,25(3):1039-1046.
Dong Huan, Ma Guiyang, Sun Dongxu. Effect of AC stray current and stress coupling on corrosion behavior of coated damaged pipelines[J].
Science Technology and Engineering, 2025, 25(3): 1039-1046.

交流杂散电流与应力耦合对涂层 破损管道腐蚀行为影响

董欢,马贵阳,孙东旭*

(辽宁石油化工大学石油与天然气工程学院,抚顺113005)

摘要 由于埋地管线与高压电线、城市轨道交通供电系统等电力设施选址类似,导致埋地管道越来越频繁地受到来自电力设施产生的杂散电流影响。通过模拟分析交流杂散电流对管道涂层破损处腐蚀量的影响,研究了交流电流大小、土壤电导率、管道内压、应力、接地极距离和管道半径等参数对腐蚀的影响。结果显示,当管道应力小于屈服强度时,应力对交流杂散电流的腐蚀影响较小,但管道形变增加后,应力将引起严重腐蚀。交流电流越大,管道涂层缺陷处腐蚀量越大。交流电频率越小,管道涂层缺陷处腐蚀量越大。接地极距离管道越近,管道涂层缺陷处腐蚀量越大。土壤的电导率越大,管道涂层缺陷处腐蚀量越大。管道半径越小,管道涂层缺陷处腐蚀量越大。研究成果对确保交流杂散电流影响下油气输送管道的安全运行具有重要意义。

关键词 交流杂散电流;应力;涂层破损;数值模拟
中图分类号 TE88; **文献标志码** A

Effect of AC Stray Current and Stress Coupling on Corrosion Behavior of Coated Damaged Pipelines

DONG Huan, MA Gui-yang, SUN Dong-xu*

(School of Petroleum and Natural Gas Engineering, Liaoning Petrochemical University, Fushun 113005, China)

[Abstract] Due to the similarity in site selection between underground pipelines and power facilities such as high-voltage power lines and urban rail transit power supply systems, underground pipelines are increasingly affected by stray currents generated by power facilities. The impact of AC stray currents on the corrosion rate of pipeline coating defects were simulated and analyzed. The effects of parameters such as AC current magnitude, soil conductivity, internal pressure of the pipeline, stress, distance to grounding electrode, and pipeline radius on corrosion were investigated in the study. The results indicate that when the stress on the pipeline is less than the yield strength, the effect of stress on the corrosion caused by AC stray currents is relatively small. However, after the deformation of the pipeline increases, serious corrosion will be induced by stress. The greater the AC current, the greater the corrosion at the defects of the pipeline coating. The lower the AC frequency, the greater the corrosion at the defects of the pipeline coating. The closer the distance to the grounding electrode, the greater the corrosion at the defects of the pipeline coating. The higher the soil conductivity, the greater the corrosion at the defects of the pipeline coating. The smaller the pipeline radius, the greater the corrosion at the defects of the pipeline coating. These research findings are of significant importance for ensuring the safe operation of oil and gas transportation pipelines under the influence of AC stray currents.

[Keywords] AC stray current; stress; coating damage; numerical simulation

近几十年来,随着国家经济的快速发展,各个行业对石油、天然气和电力等能源的需求不断上升。为满足各个行业对于能源的需求和促进能源结构的调整,地下油气长输管道的铺设距离快速

增长^[1-2],同时高压交流输电的里程也在不断扩大。然而,受限于空间和地理条件,埋地管线与高压电线、城市轨道交通供电系统等电力设施平行和交叉铺设越来越多,导致埋地管道遭受来自电

收稿日期:2024-03-30 修订日期:2024-05-22

基金项目:国家自然科学基金(52274062);辽宁省博士科研启动基金(2023-BS-198);辽宁省教育厅基本科研项目(LJKMZ20220734)

第一作者:董欢(1999—),男,汉族,安徽芜湖人,硕士研究生。研究方向:杂散电流对涂层破损管线钢腐蚀。E-mail:854880293@qq.com。

*通信作者:孙东旭(1991—),男,汉族,辽宁鞍山人,博士,副教授,硕士研究生导师。研究方向:油气管道完整性管理、管线钢腐蚀与防护和LNG储运工艺等。E-mail:dx_sun@sina.cn。

力设施产生的交流杂散电流的干扰越来越多^[3-6]。这种交流杂散电流会加速金属管道的腐蚀,导致油气管道壁厚减薄,甚至可能引发腐蚀穿孔,导致油气泄露,从而造成能源资源的浪费和环境的污染,甚至危及人员的生命安全^[7-8]。因此,解决和应对交流杂散电流对管道的干扰问题变得十分紧迫和重要。

韦博鑫等^[9]发现 X80 管线钢在交流电正半轴发生氧化反应负半轴发生还原反应,且氧化反应的影响远大于还原反应。当 X80 管道在酸性土壤中,给管道一定的交流干扰,管道的腐蚀电流密度会迅速上升且当施加的交流电干扰大于等于 80 A/m^2 ,管道的腐蚀电流密度比没有交流干扰的腐蚀电流密度大几倍甚至几十倍。徐成^[10]的研究表明,在交流杂散电流的作用下,当缺陷面积不变,杂散电流密度从 0 增加到 30 A/m^2 时,缺陷处的剥离面积显著增加。当杂散电流密度大于 30 A/m^2 时,剥离面积基本保持不变。这说明存在一临界电流密度,使涂层剥离面积达到最大值。Zhu 等^[11]研究发现,在交流干扰的情况下,管线钢容易发生点蚀现象,并且在凹坑和涂层剥落处,钢材的应力腐蚀开裂敏感性会随着交流电流密度的增加而增加。由于杂散电流腐蚀受多种因素影响,目前尚未找到合理的解决方法,特别是在交流腐蚀机理方面,国内外学者尚未形成较为统一的共识。在实际的管道施工运行环境中,交流干扰必然会对涂层破损管道的腐蚀行为产生影响。此外,目前的多数研究还未考虑管道应力与交流电耦合对管道腐蚀的影响。因此,针对交流杂散电流与应力耦合下对涂层破损管道的腐蚀研究,是当前需要重点关注的方向。本研究利用数值模拟方法,分析了交流杂散电流与应力耦合对涂层破损处管线钢腐蚀规律的影响,为埋地管道的安全运行提供了理论支持。

1 模型

1.1 几何模型和边界条件

本项目构建一个由 $30 \text{ m} \times 20 \text{ m} \times 35 \text{ m}$ 矩形构成的三维土壤结构,将土壤作为一个整体,不考虑其电阻率的影响,构建出一个由土壤、埋地管线、交流输电线路等构成的三维模型(图 1)。交流杂散电流接地极以一个圆柱体来代替其半径 0.6 m 、高 5 m ,分别在距离长方体土壤中心左右两端各 14.5 m 的地方设置接地极,埋深设置为 4 m 。埋地管道以水平圆柱表示半径 0.6 m 、长 15 m ,其位置设在长方体土壤中心,在埋地管道外部设置涂层。在 2 m 和 11 m 的管线上留有 2 m 长的暴露段,用于模拟管道

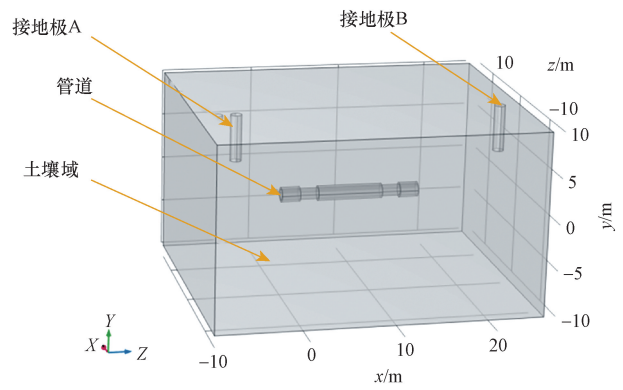


图 1 土壤、埋地管道、交流系统接地极三维模型图

Fig. 1 3D model of soil, buried pipeline, and grounding pole of AC system

涂层的破损。

边界条件为绝缘边界条件,电流输入端子;将法向电流为 0 的土壤区的 6 个平面作为电绝缘边界,也就是交流电接地电流仅在土壤区及管线内存在,而在土壤区之外,则电流为 0。设定接地极 A、B 分别作为电压输出终端,赋予一个接地极 A 一定大小的电流,并设置另一个接地极 B 电流为 0,表示电流从接地极 A 流入土壤又返回接地极 B。在管道受轴向应变的前提下采用小塑性形变模型,同时在管道域内设置一定大小的内压。此外,在管道外设置一个更大圆柱体,以模拟管道外的涂层。

1.2 控制方程、本构方程及腐蚀速率

由于在现实的环境中,土地的环境状况比较复杂,而且会被各个方面的因素所干扰。为了方便进行研究和分析,将埋地的金属管道受到交流杂散电流干扰的数学模型简化为:①在土壤介质中,各种因素都是稳定不变的,只有接地流对其产生了影响,并且在附近的土壤中,会产生一个稳定的静磁场;②从接地极处流出到土中的电流符合欧姆法则,没有源点和汇点,在计算范围之外的土体电势就是天然电势。

在此基础上,利用小塑性模型对管内区域进行了应力模拟,并以阳极与阴极半电池反应的塔菲尔公式为基础,构建了相应的数学模型,如表 1 所示。

1.3 模型求解

有关参数如表 2 所示,构建土壤、埋地管线、交流杂散电流系统接地极的三维数学模型,并进行求解:①网格剖分,对埋地管线、交流杂散电流接地极采用自由三角形和极细化网格剖分,剩余区域则利用自由四面体和较细化进行剖分;②设定求解器,先使用稳态求解器进行初步计算,然后使用瞬态求解器对管道涂层破损处 100 h 后的腐蚀量进行计算。

表 1 控制方程表达式
Table 1 Expression of control equation

名称	符号	表达式
接地极电流密度	F_v	$F_v = A \sin(\omega t)$
电流密度	i_{app}	$i_{app} = F_v / (2\pi rL)$
硬化函数	σ_{yhard}	$\sigma_{yhard} = \sigma_{exp} \left(\varepsilon_p + \frac{\sigma_c}{E} \right) - \sigma_{ys}$
局部阳极电流密度	i_a	$i_a = i_{0a} 10^{\frac{\eta_a}{A_a}}$
阳极反应的过电位	η_a	$\eta_a = \phi_s - \phi_1 - E_{eq0a}$
局部阴极电流密度	E_{eqa}	$E_{eqa} = E_{eq0a} - \frac{\Delta P_m V_m}{zF} - \frac{TR}{zF} \ln \left(\frac{v\alpha}{N_0} \varepsilon_p + 1 \right)$
阴极反应的过电位	i_c	$i_c = i_{0c} 10^{\frac{\eta_c}{A_c}}$
极反应平衡电位	η_c	$\eta_c = \phi_s - \phi_1 - E_{eq0c}$
阴极反应的交换电流密度	i_{0c}	$i_{0c} = i_{0c,ref} 10^{\frac{s_c V_m}{F(-A_c)}}$

注: A 为交流电电流; ω 为交流电的角频率; t 为时间; F_v 为交流电电流; r 为半径; L 为长度; σ_{exp} 为实验应力-应变曲线; ε_p 为塑性变形; σ_c 为 von Mises 应力; E 为杨氏模量; σ_{ys} 为高强度合金钢的屈服强度; i_{0a} 为交换电流密度; A_a 为阳极 Tafel 斜率; η_a 为阳极反应的过电位; ϕ_s, ϕ_1 分别为阳、阴两级电位; E_{eq0a} 为阳极反应的标准平衡电位; ΔP_m 为引起弹性变形的超压; V_m 为钢的摩尔体积; z 为钢的电荷数; T 为绝对温度 (298.15 K); R 为理想气体常数; F 为法拉第常数; α 为系数; v 为方向相关因子; N_0 为初始位错密度; i_{0c} 为交换电流密度; A_c 为阴极 Tafel 斜率; $i_{0c,ref}$ 为没有外部应力/应变的情况下阴极反应的参考交换电流密度。

表 2 交流杂散电流系统干扰模拟工况参数表

Table 2 Parameters of stray current interference simulation condition of AC unipolar system

参数	名称	数值	参数	名称	数值
R_1	管道电阻	4×10^{-7}	b_c	氢析出的 Tafel 斜率	-207
R_2	土壤电阻	200	ΔP_m	导致弹性变形的过压	806×10^6
L	接地极到管道的距离	22	V_m	摩尔体积	7.13×10^{-6}
i_c	接地电流	200	z_m	电荷数目	2
R_3	涂层电阻	5 000	T	温度	298.15
d_{isp}	位移	0.001	n_u	方向相关因子	0.45
E_{eq0a}	无应力条件下相对于 SCE 的铁溶解平衡电位	-0.859	α	系数	1.67×10^{11}
E_{eq0c}	无应力条件下相对于 SCE 的氢析出平衡电位	-0.644	N_0	初始位错密度	1×10^8
i_{0a}	铁溶解的交换电流密度	2.353×10^{-3}	ΔE_{eqae}	弹性变形引起的平衡电位	-0.009 926 9
b_a	铁溶解的 Tafel 斜率	118	σ	电解质电导率	0.096
i_{0c}	氢析出的交换电流密度	1.457×10^{-2}	r	管道半径	0.6
P	管道内部压力	4×10^6	L_1	接地极长度	5

1.4 模型验证

文献[12]通过搭建小型实验模型对受到交流杂散电流干扰涂层破损处金属基体经行实验,选取管道涂层破损处的位置进行模型验证(10、50、90、120 min)。保持模型设置的计算参数与文献[12]一致,将模拟结果与实际测量数据经行对比,结果如表3所示。由表3可知,现场实测数据与模拟结果之间的误差小于5%,模型可用于后续研究。

表 3 模型验证结果

Table 3 Model validation results

涂层破损处的位置/m	时间/min	电位/V		误差/%
		模拟	实验	
2	10	-0.728	-0.766	4.9
4	50	-0.732	-0.764	4.2
2	90	-0.858	-0.899	4.6
4	120	-0.821	-0.844	2.7

2 结果与讨论

2.1 无内压条件下交流电大小不同时管道腐蚀的规律

设置交流系统的接地极电流大小是变化的,将土壤电导率、管道半径分别设置为 0.005 S/m、0.6 m、管道与接地极相距 6 m、管道埋深 5 m,接地极埋深为 4 m,模拟得到沿管道 100 h 后管道涂层破损处腐蚀情况和管道腐蚀的曲线如图 2、图 3 所示。

由图 2、图 3 可知,直流杂散电流在涂层缺陷处呈现出不均匀的分布,尤其是缺陷边缘处的杂散电流密度明显高于缺陷中心处。因此,可以推断管道缺陷边缘处受到直流杂散腐蚀的影响最为严重,而管道缺陷的中心处腐蚀相对较轻,结果与李丹丹[13]的结论基本一致。由图 2、图 3 可见,当接地电流从 30 A

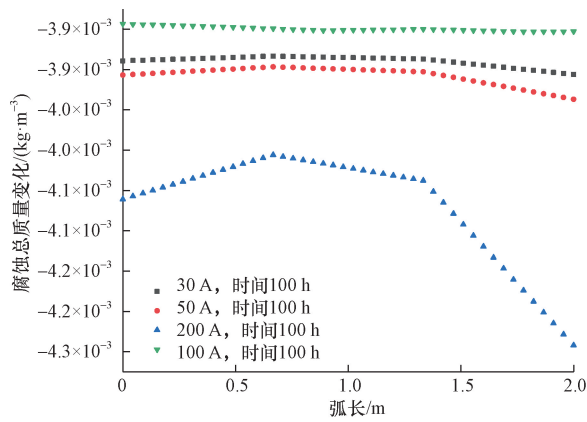


图2 无内压时管道被腐蚀 100 h 后质量变化
Fig. 2 Quality change of pipeline corroded for 100 hours without internal pressure

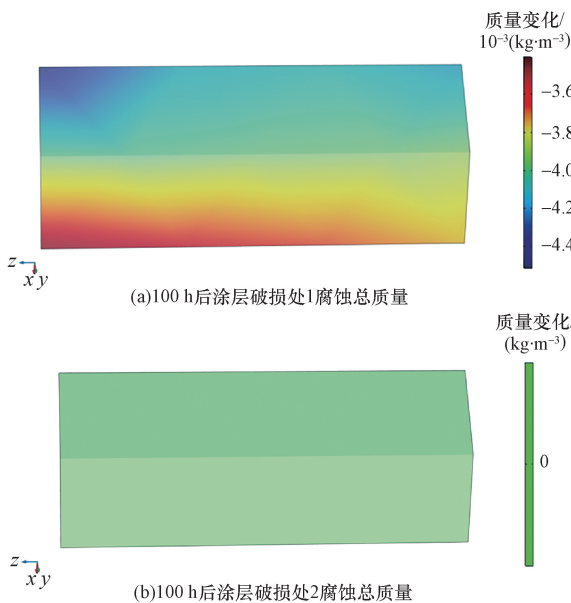


图3 无内压时接地极电流为 30 A 时涂层破损处被腐蚀 100 h 后质量变化

Fig. 3 The ground electrode current is 30 A under no internal pressure and the coating at the damaged area corrodes, with mass change observed after 100 hours

增加到 50 A 时,管道涂层破损处的腐蚀量随着电流的增加而增加,这时候涂层破损处发生均匀腐蚀,当电流增加到 100 A 时管道涂层破损处的腐蚀量反而比 30、50 A 时小,当电流增加到 200 A 时管道涂层破损处的腐蚀量远大于 30、50、100 A 时的管道涂层破损处的腐蚀量。通过分析得出结论与直流杂散电流相似,交流杂散电流虽然管道被腐蚀初期,管道表面不断形成沉淀物,但随着沉淀物的不断生成,管道表面生成一层沉淀物膜阻碍了反应的进行。当接地极电流增大时,使管道破损处产生沉淀物膜,使电流不易到达管道破损处,从而使反应速度降低,但是当接地电流增加到足够

大时,会击穿产物膜,从而使反应速度增加。

2.2 无内压条件下不同参数对管道腐蚀规律的影响

其他参数不变的情况下,分别对交流电频率、土壤的电导率等干扰参数进行调整,研究各种干扰参数对管道涂层缺陷处腐蚀规律的影响,结果如图 4 所示。从图 4(a)可以看出,在不考虑其他因素的情况下,仅改变频率,涂层破损管道的腐蚀量随着频率的增加而减小,但是对腐蚀量的影响很小。从图 4(b)可以看出,接地极入地电流不会改变,流进到土壤中的总的电流值也不会改变,所以流入管道涂层的缺陷中的电压幅值会随土壤电导率的增加而增加,也就是说,在该缺陷中的电流密度与该土壤电导率呈正比例。随着土壤电导率的增大,从接地极进入土壤中的电流基本不发生变化,而从土壤进入管道中的电流增加,导致管道的腐蚀量增加。由图 4(c)可以看出土壤的导电系数为 0.005 ~ 0.010 S/m 时管道的腐蚀量曲线近乎约等于直线,管道发生均匀腐蚀。由图 4(c)可知杂散电流从土壤流至涂层缺陷 1,又从涂层缺陷 1 流入管道,最后从涂层缺陷 2 流入土壤。因此管道距离接地极越远,接地极电流越难从土壤流到缺陷 1 处,缺陷 1 处的杂散电流密度越小,管道的腐蚀量越小,管道越不容易被腐蚀。但可以清晰地看到当接地极距离管道存在一个范围,当接地极距离管道处于这个范围的时候,管道破损处的中心处也会发生严重的腐蚀。通过对交流杂散电流系统的腐蚀机理分析,可知管道涂层缺陷 1 为电化学反应的阳极区,发生氧化反应,管道被溶解。由图 4(d)可见当改变管道半径时,由于涂层缺陷大小不变,管径小的管道比管径大的管道的缺陷深度深,管道缺陷处的腐蚀量会随着半径的增大而减小,结果与赵书华等^[14]的结论基本吻合。半径小的管道,涂层缺陷处发生严重的均匀腐蚀而管径大的管道局部不容易被腐蚀。

2.3 有内压条件下交流电大小不同时管道腐蚀的规律

保持其他参数不变的情况下,设置管道轴向应力是随时间变化的函数,管道的内压为 4 MPa,模拟得到沿管道 100 h 后管道涂层破损处腐蚀情况和管道腐蚀的曲线如图 5 ~ 图 7 所示。油气管道的一般的设计压力 1.6 ~ 10 MPa,很少有超过 10 MPa,所以在本模拟中将管道内压设为 4 MPa,用来模拟正常管道应力对管道腐蚀的影响。

由图 5 可见当电流在 0 ~ 50 A 时管道缺陷处基本上发生均匀腐蚀,且 100 A 以上是管道发生局部腐

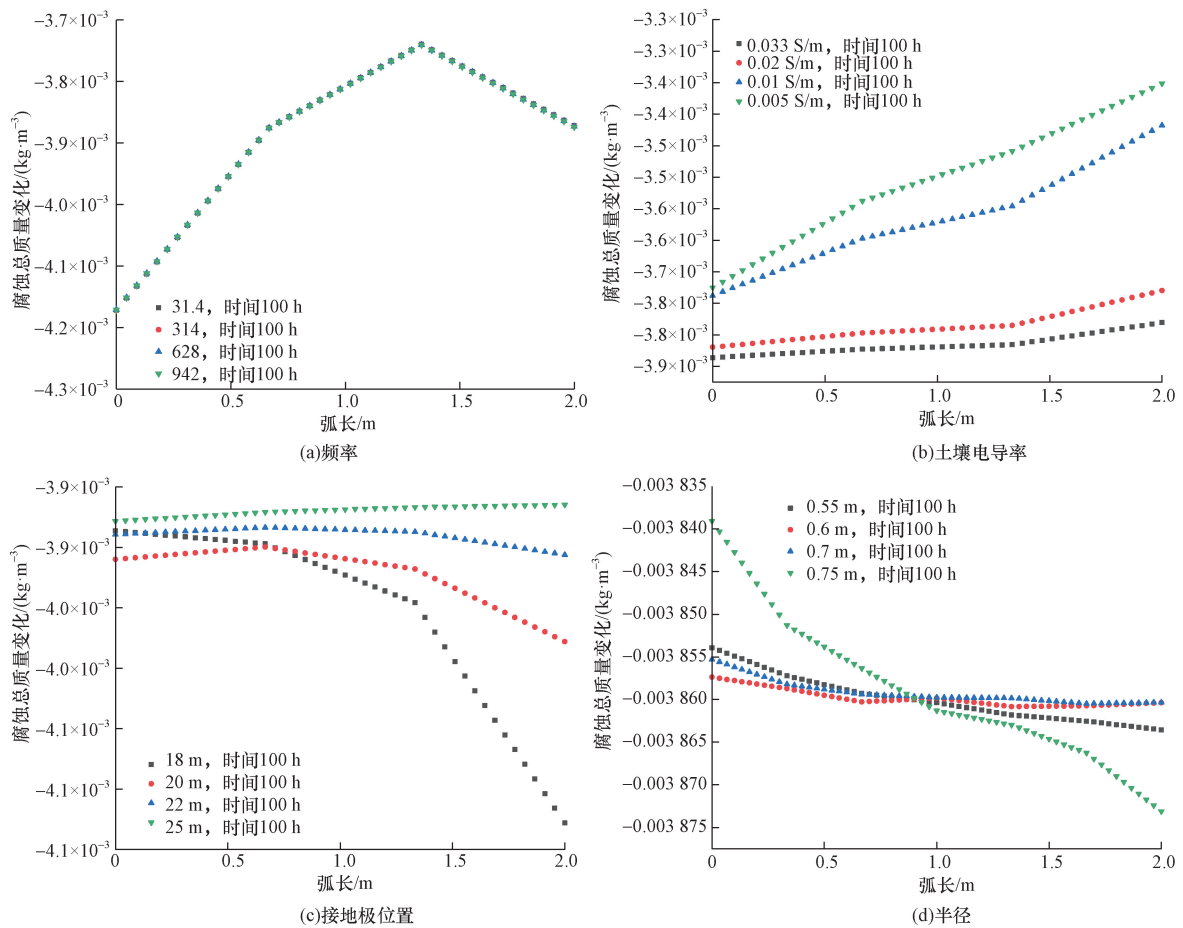


图4 无内压时土壤电导率、接地极位置、频率、半径对管道被腐蚀 100 h 后质量变化
 Fig. 4 The effect of soil conductivity, ground electrode position, frequency, and radius on pipeline mass change after 100 hours of corrosion under no internal pressure

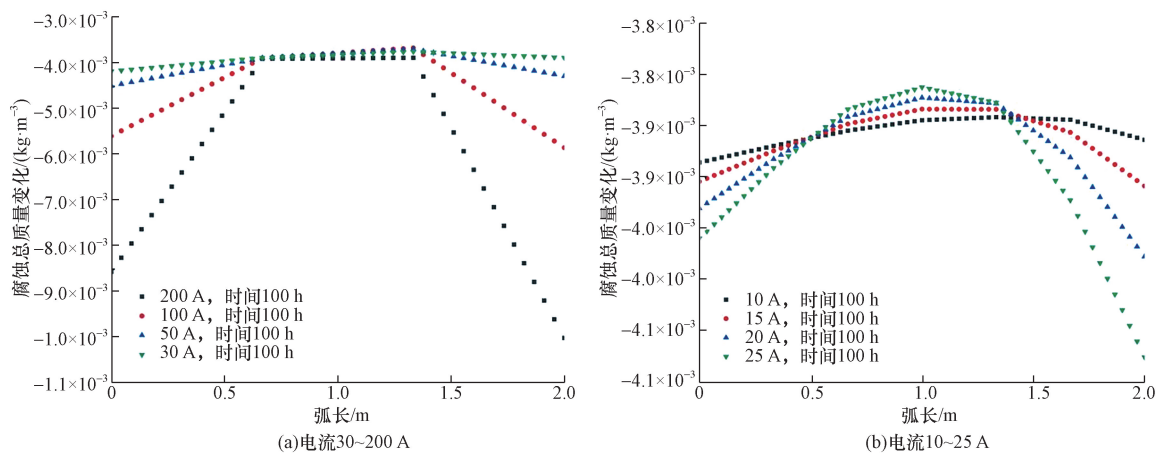


图5 有内压时管道被腐蚀后 100 h 后质量变化
 Fig. 5 Mass change of the pipeline after 100 hours of corrosion under internal pressure

蚀甚至点蚀。将图5与图2、图6与图3比较可知,在有应力的情况管道破损处的腐蚀量呈梯形趋势,而没有应力影响的条件下管道破损处的腐蚀量呈直线型,且发现电流击穿产物膜存在以极值,再有应力干扰的情况下会使这个极值前移。分析可

知在有应力影响的情况下,管道更容易被腐蚀。应力腐蚀的阳极平衡电位由弹性和塑性变形项的阳极平衡电位加上铁溶解的平衡电位,阴极的交换电流密度变形为包含应力因子的阴极交换电流密度。应力腐蚀通过影响这两项来影响管道腐蚀的速率。

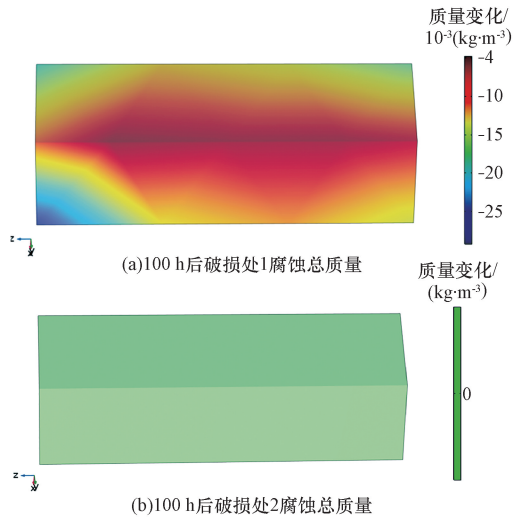


图6 有内压时接地极电流为30 A时涂层破损处被腐蚀100 h后质量变化

Fig. 6 Mass change at the damaged coating after 100 hours of corrosion with a 30 A ground electrode current under internal pressure

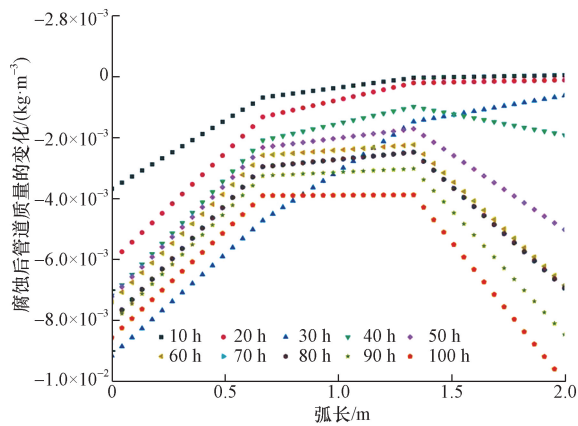


图7 接地极电流200 A时随时间变化涂层破损处的电位的腐蚀总质量的变化图

Fig. 7 Changes in the total corrosion mass of the potential at the coating damage location over time at a grounding electrode current of 200 A

与前文图2不同的当接地电流增大时,管道会产生产物膜,在应力的干扰下管道的产物膜更容易被击穿且可以清晰地看出管道破损的边缘处的腐蚀速率明显大于中间处的腐蚀速率。由图7可以看出当电流过大时,管道破损处的产物膜会被击穿,会增加管道腐蚀速率。

2.4 有内压条件下不同参数对管道腐蚀规律的影响

其他参数不变的情况下,分别对交流电的频率、土壤的电导率等参数进行调整,来研究各个参数对管道破损处腐蚀量的影响,结果如图8所示。

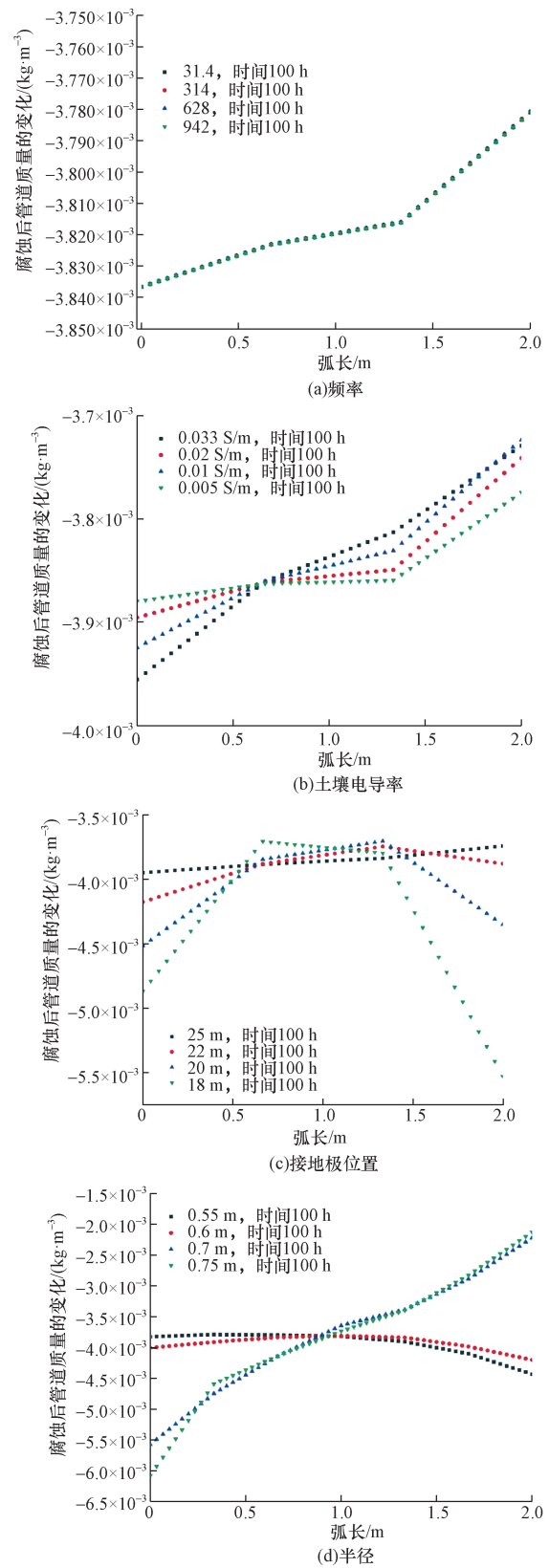


图8 有内压时土壤电导率、接地极位置、频率、半径对管道被腐蚀100 h后质量变化

Fig. 8 The effect of soil conductivity, ground electrode position, frequency, and radius on pipeline mass change after 100 hours of corrosion under internal pressure

由图 8(a) 可知改变交流电频率的大小, 与前文类似, 涂层破损管道的腐蚀量随着频率的增加而减小, 但是对腐蚀量的影响很小; 由图 8(b) 可以看到不同的土壤电导率反应的是土壤传递电流能力的强弱, 随着土壤电导率增加, 在接地极流出电流相同的情况下, 流到管道涂层破损处的电流就越多。所以管道在土壤电导率不同的情况下, 管道腐蚀速度不同, 且土壤电导率越大管道被腐蚀的越剧烈。通过对比图 4(b) 可知在没有应力条件的情况下改变土壤电导率对管道破损处的腐蚀反而更加剧烈。由图 8(c) 可见管道随着距离接地极越近, 管道的腐蚀量也在增大。而且与前文类似管道破损的边缘处更容易遭到腐蚀。通过对图 8(d) 分析可知, 由于涂层缺陷的大小不变, 改变管道半径, 管径小的管道涂层缺陷深度比管径大的管道深, 所以涂层破损时管径小的管道更容易被腐蚀。比较有内压和无内压条件下, 半径为 0.7 m 时管道的腐蚀量曲线发现在有内压条件下, 管道更容易被腐蚀。当在实际施工中对管线的选择上, 在施工环境许可的情况下, 要尽可能选择直径大的管线; 在进行管线维修中, 要着重注意管线涂层裂缝的深度。通过比较图 8(a) ~ 图 8(d) 可以发现当改变参数使流入管道破损点处的电流增大, 会使管道的腐蚀速率增加, 当流入管道破损处的电流大到一定的程度时, 产物的生成速率大于产物的溶解速率或者被氧化的速率, 反而导致管道的腐蚀速率减小, 最后当电流大到一定程度时, 会击穿产物膜, 导致管道腐蚀速率增加。

2.5 内压不同时管道腐蚀的规律

保持其他参数不变, 仅改变管道内压, 研究内压对管道涂层缺陷处腐蚀量大小和电流密度分布影响, 结果如图 9 所示。管道内压很小时, 对管道涂

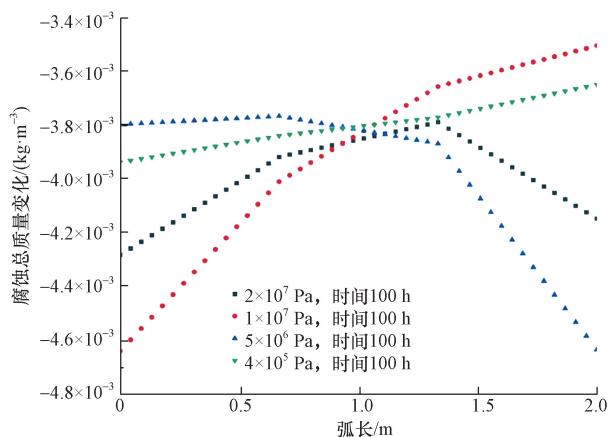


图 9 管道内压不同时 100 h 的腐蚀总质量的变化图

Fig. 9 Changes in total corrosion mass for 100 h under different internal pressures in pipelines

层破损处的腐蚀几乎没有影响, 随着管道内压的增加, 使管道发生变形时会导致涂层破损处的金属基体被严重腐蚀。当内压小于管道的屈服应力时, 对管道的弹性和塑性变形项的阳极平衡电位加上铁溶解的平衡电位和阴极的交换电流密度变形为包含应力因子的阴极交换电流密度几乎不变, 管道涂层破损处发生均匀腐蚀。当管道内压大于管道的屈服应力时, 管道发生变形, 管道的弹性和塑性变形项的阳极平衡电位加上铁溶解的平衡电位, 阴极的交换电流密度变形为包含应力因子的阴极交换电流密度会发生较大的变化, 从而使管道破损处发生严重的腐蚀。

2.6 交流杂散电流腐蚀机理分析

交流杂散电流通过接地极流入土壤, 由于管线钢涂层破损区域金属基体暴露, 电导率较高, 接地电流更容易从缺陷处流入管道中, 且腐蚀性介质更容易接触到金属基体。在腐蚀性物质和交流杂散电流共同作用下, 金属基体开始出现腐蚀现象, 腐蚀产物随之生成。随着反应的进行, 腐蚀产物不断生成至一定量后, 它们会覆盖住缺陷, 使得氧气无法继续向腐蚀产物深处渗透。但是在这种情况下, 氧气还是可以通过涂层并在缺陷周围聚集, 造成缺陷边缘富含氧气而中心区域缺乏氧气, 由此产生了独立的阳极区与阴极区。阳极区域表现出金属溶解过程, 呈酸性。相反, 阴极区域则是氢氧根的生成, 呈碱性, 导致涂层附着力下降使得金属裸露面积增大, 从而进一步加剧了金属基体的腐蚀。

3 结论

通过采用数值模拟方法, 深入地分析了在管道有无应力条件下接地极电流、土壤电导率、管道接地极距离与交流电频率等因素对管道涂层破损处电流密度和腐蚀量的影响。电气系统接地极电流大小、管道与接地极位置、土壤电导率、管道半径、应力均对有涂层缺陷管道的杂散电流密度分布和腐蚀量有显著影响。具体结论如下:

(1) 当交流电的频率增加时, 管道破损处的腐蚀量反而减小, 但与其他因素相比频率对管道的腐蚀影响较小。

(2) 当接地极电流在一定范围内增加时, 接地电流越大, 导致杂散电流密度值也越大, 从而使得管道涂层缺陷处的腐蚀量增加。同时, 当交流电过大时, 可能会导致管道防腐涂层击穿, 进而加剧腐蚀问题。

(3) 管道与接地极的位置距离较近时, 流入缺陷处的电流增大, 导致杂散电流密度值增大, 进而引发管道涂层缺陷处的腐蚀加剧。因此, 在实际工

程中应避免接地极与管道相距过近。

(4)当土壤的电导率增大时,缺陷处的流入电流增大,导致交流杂散电流密度值增大,从而提高了管道涂层缺陷处的腐蚀量。因此,在管道建设时,应优先选择土壤电导率较小的区域进行建设。

(5)管道的半径也对腐蚀问题有影响。随着管径的增加,缺陷处的流入电流减小,使得杂散电流密度值减小,从而降低了涂层缺陷处的腐蚀量。

(6)当管道应力小于管道的屈服应力时,管道不会发生形变,且管道的阳极平衡电位和阴极的交换电流密度几乎不变。然而,当管道内压大于管道的屈服应力时,管道会发生变形,导致阳极平衡电位和阴极交换电流密度发生较大的变化,进而造成管道破损处的严重腐蚀。因此,在管道施工过程中需要尽量减小施工应力。

参 考 文 献

- [1] 刘金英, 张伟, 孙晓辉. 石油长输管道腐蚀与防护措施[J]. 现代职业安全, 2019, (8): 83-85.
Liu Jinying, Zhang Wei, Sun Xiaohui. Corrosion and protective measures for long distance oil pipeline[J]. Modern Occupational Safety, 2019, (8): 83-85.
- [2] Ashari R, Eslami A. Anisotropy in mechanical properties and corrosion of X-52 pipeline steel at different pipe angles[J]. Protection of Metals and Physical Chemistry of Surfaces, 2019, 55: 546-553.
- [3] 彭平, 曾祥君, 倪砚茹, 等. 考虑地铁杂散电流影响的变压器直流偏磁电流建模方法[J]. 电力科学与技术学报, 2021, 36(1): 192-198.
Peng Ping, Zeng Xiangjun, Ni Yanru, et al. Modeling method for transformer DC bias current considering the influence of stray current in subway[J]. Journal of Power Science and Technology, 2021, 36(1): 192-198.
- [4] 汤彬坤, 冯阳, 赖文沁, 等. 埋地管道杂散电流干扰的研究进展[J]. 失效分析与预防, 2022, 17(2): 134-140.
Tang Binkun, Feng Yang, Lai Wenqin, et al. Research progress on stray current interference in buried pipelines[J]. Failure Analysis and Prevention, 2022, 17(2): 134-140.
- [5] 廉永乐, 王明, 李帅, 等. 多电源系统切换时中性线不同接地方式对不间断电源电路性能影响的仿真分析[J]. 科学技术与工程, 2023, 23(13): 5579-5598.
Lian Yongle, Wang Ming, Li Shuai, et al. Simulation analysis of the influence of different grounding methods of neutral lines on the performance of uninterrupted power supply circuits during the switching of multi-power systems[J]. Science Technology and Engineering, 2023, 23(13): 5579-5598.
- [6] 何海洋, 王钰文, 陈林燕, 等. 基于试验的天然气管集输管道失效机理分析[J]. 科学技术与工程, 2023, 23(35): 15044-15051.
He Haiyang, Wang Yuwen, Chen Linyan, et al. Failure mechanism analysis of natural gas gathering and transportation pipelines based on experiments[J]. Science Technology and Engineering, 2023, 23(35): 15044-15051.
- [7] 万红霞, 李婷婷, 宋东东, 等. 杂散电流对埋地管道的腐蚀及排流方式的研究进展[J]. 表面技术, 2021, 50(4): 125-134.
Wan Hongxia, Li Tingting, Song Dongdong, et al. Research progress on corrosion and drainage methods of buried pipelines by stray currents[J]. Surface Technology, 2021, 50(4): 125-134.
- [8] 张春生, 申龙涉, 郭慧军, 等. 埋地油气管道外腐蚀原因及防腐技术的研究进展[J]. 当代化工, 2011, 40(2): 99-102.
Zhang Chunsheng, Shen Longshe, Guo Huijun, et al. Research progress on the causes of external corrosion of buried oil and gas pipelines and anti-corrosion technologies[J]. Contemporary Chemical Industry, 2011, 40(2): 99-102.
- [9] 韦博鑫, 许进, 高立群, 等. 交流杂散电流对 X80 管线钢的腐蚀行为影响[J]. 装备环境工程, 2021, 18(4): 21-27.
Wei Boxin, Xu Jin, Gao Liqun, et al. The effect of AC stray current on the corrosion behavior of X80 pipeline steel[J]. Equipment Environmental Engineering, 2021, 18(4): 21-27.
- [10] 徐成. 交直流杂散电流与应力耦合作用下 X70 管线钢腐蚀及涂层剥离行为研究[D]. 北京: 北京工业大学, 2019.
Xu Cheng. Research on corrosion and coating peeling behavior of X70 pipeline steel under the coupling effect of AC/DC stray current and stress[D]. Beijing: Beijing University of Technology, 2019.
- [11] Zhu M, Yuan Y, Zhang Q, et al. Information of AC interference on crack initiation behavior of pipeline steel in high pH solution[J]. International Journal of Electrochemical Science, 2019, 14(1): 18-76.
- [12] Wang C T, Xu S Y, Wei L, et al. Towards understanding of corrosion behaviors of Q235A pipeline steel subjected to simulated direct stray current interference in different electrolytes[J]. International Journal of Pressure Vessels and Piping, 2023, 202(4): 917.
- [13] 李丹丹. 高压直流输电线路对某埋地金属管道的干扰规律研究[D]. 成都: 西南石油大学, 2014.
Li Dandan. Study on the interference law of HVDC transmission line to a buried metal pipeline[D]. Chengdu: Southwest Petroleum University, 2014.
- [14] 赵书华, 黎少飞, 王树立, 等. 高压直流输电接地流对油气管道干扰及腐蚀规律数值模拟[J]. 油气储运, 2022, 41(4): 458-465.
Zhao Shuhua, Li Shaofei, Wang Shuli, et al. Numerical simulation of interference and corrosion law of high-voltage direct current grounding current on oil and gas pipelines[J]. Oil and Gas Storage and Transportation, 2022, 41(4): 458-465.