

doi: 10.3969/j.issn.1001-3849.2021.08.013

## 管道阴极保护与外涂层相互影响的研究进展

王春兰, 谢燕婷, 王兴灿\*, 杨金荣

(中检集团康泰安全科技有限公司, 福建 福州 350008)

**摘要:** 阴极保护和外涂层是长输管道防腐的必要措施, 本文讨论了管道外涂层和阴极保护共存时相互作用、相互影响的因素。首先总结了管道外涂层种类、缺陷和环境对阴极保护电流渗透的影响, 其次概述涂层的剥离、缝隙、破损和硫酸盐还原菌对阴极保护性能的影响, 然后概括了管道钢阴极保护对涂层结合力、涂层剥离、涂层电阻和应力腐蚀断裂的影响。指出了研究管道外涂层和阴极保护相互作用的重点问题。

**关键词:** 阴极保护; 管道; 涂层; 剥离

**中图分类号:** TG174.41

**文献标识码:** A

## Research Progress on the Interaction Between Cathodic Protection and Outer Coating of Pipeline

WANG Chunlan, XIE Yanting, WANG Xingcan\*, YANG Jinrong

(Kangtai Safety Technology Co., Ltd., China Inspection Group, Fuzhou 350008, China)

**Abstract:** Cathodic protection and outer coating were the necessary measures to prevent corrosion of long-distance pipelines. In this paper, the interactional factors related to the coexist of cathodic protection and outer coating was discussed. Firstly, the influences of pipeline outer coating types, defects and environment on cathodic protection current penetration were introduced. Secondly, the effect of coating peeling, cracks, damage and sulfate-reducing bacteria on cathodic protection performance were summarized. Thirdly, the effects of pipeline steel cathodic protection on coating adhesion, peeling, the resistance and stress corrosion fracture were clarified. Finally, the key issues were pointed out in further studying the interaction between pipeline outer coating and pipeline cathodic protection.

**Keywords:** cathodic protection; pipelines; coatings; disbondment

管线钢表面涂层中往往存在微小针孔, 使用过程中由于腐蚀介质存在, 管线钢局部位置还可能出现严重缺陷或损伤, 导致防腐层剥离失效、管道穿孔等现象, 易引起管道油气泄漏、爆炸。阴极保护与有机涂层被广泛联合用于保护埋藏的长输油品金属管道, 涂层对阴极保护电流的渗透有巨大的影响, 如果阴极保护电流全部被屏蔽, 则阴极保护无法渗透到管线钢而给予管线钢恰当的保护电位。阴极保护施

加不当可以加速涂层的阴极剥离, 在管道破裂区域产生的额外应力可能导致应力腐蚀断裂<sup>[1]</sup>。生产实际中, 企业技术人员希望多了解国内外关于阴极保护和管道涂层相互作用的详细情况和影响因素, 以促进管道防腐设计和施工过程中的技术改革和进步。因此, 本文归纳了影响阴极保护电流渗透和阴极保护性能的因素, 总结了阴极保护对管道外涂层性能的影响。

收稿日期: 2021-01-11

修回日期: 2021-03-29

作者简介: 王春兰(1980—), 女, 硕士, 工程师, Email: 15266732@qq.com

通讯作者: 王兴灿, Email: wangxc@fj.ccic.com

## 1 影响阴极保护电流渗透性的因素

通过涂层的阴极保护电流能够产生引起钢钝化的碱性环境,并且涂层的渗透性越高,pH增加越快。在现场,尽管有氧气透过涂层,但当剥离时,可渗透涂层仍可提供足够的阴极电流以保护钢管免受腐蚀<sup>[2]</sup>。通过施加更高的阴极电位,在剥离的涂层下面引起电解质中阴极电流的更深渗透,可以在剥离涂层下实现更高水平的保护<sup>[3,4]</sup>。若剥离区局部环境pH>9,表明阴极保护电流可穿透剥离区到达管道表面;而若局部pH值保持近中性,则表明剥离涂层屏蔽阴极保护,阴极保护电流不能深入剥离区<sup>[4]</sup>。

### 1.1 涂层种类的影响

涂料对水的渗透性排序为熔结环氧涂层(FBE)>中密度聚乙烯涂层>高性能复合涂层,腐蚀环境的水具有导电性,FBE涂层和中密度聚乙烯涂层都可渗透阴极保护电流<sup>[5]</sup>。高性能复合涂层由于聚乙烯的添加显著提高了涂层的致密性,从而导致较小的水蒸气透过率和阴极保护电流的渗透性<sup>[3,5]</sup>。煤焦油搪瓷涂层则不渗透阴极保护电流<sup>[6]</sup>。

### 1.2 涂层缺陷的影响

涂层剥离间隙越大,阴极保护电流渗透距离越大。当剥离长度或直径较小时,电流可以穿透整个涂层剥离区域。距离管道破损点越近、破损点面积越大、相同面积下破损点数越少的三种情况下,管道阴保电位都发生正向偏移<sup>[7]</sup>。小于1 mm的煤焦油搪瓷涂层缺陷,可以屏蔽超过70%的阴极保护电流,而对于超过4 mm的较大缺陷,电流可以穿过缺陷渗透到钢中发挥防腐作用。在FBE涂层整个厚度上形成人造针孔,可以显著增加阴极保护电流的渗透性,使pH值升高到足以使钢钝化的碱性环境。

### 1.3 环境电阻率的影响

较大剥离区厚度和较高溶液电导率有利于剥离区的阴极保护电流的渗透,在高电阻率酸性土壤环境中,剥离防腐层下的阴极保护仅限于破损点附近,剥离区深处管体处于自腐蚀状态<sup>[4]</sup>。随着土壤水分的增加,土壤电阻率出现先减小后增大的趋势,相应的阴极保护电位随着土壤电阻率的变化先负向偏移再正向偏移<sup>[7]</sup>。土壤的粘度大会对阴极保护渗透产生抑制作用。阴极保护电流渗透随pH值的增加和距离漏涂点的增加而减小,隧道形涂层在剥离区内发生氢积聚,聚积的氢气能有效阻止阴极保护电流

穿透剥离层,易引发应力腐蚀开裂<sup>[8]</sup>。

### 1.4 杂散电流的影响

在较小的交流电流密度下,交流会致阴极保护电流渗透到缝隙中,随着交流电流密度增加,阴极保护逐渐被剥离涂层处沉积的腐蚀产物屏蔽阻塞,从而不能渗透到达剥离缝隙<sup>[9]</sup>。

## 2 影响阴极保护性能的因素

当施加的阴极保护电位更负时,溶液的pH值会更高,剥离涂层下的pH值达到9.5以上时,剥离涂层区域内的腐蚀速率将变得不明显<sup>[10]</sup>。

### 2.1 剥离缝隙的影响

管道涂层带破损点的剥离区内阴极保护电流主要集中在破损点区域,难以到达剥离涂层下缝隙区域的底部,缝隙深处管体处于自腐蚀状态。剥离的开口附近保护电位为-950~-810 mV(vs SCE,下同),有轻微腐蚀,中部区域保护电位为-810~-750 mV,发生点蚀,在开口的远端区域,保护电位为-750~-730 mV,发生均匀腐蚀<sup>[11]</sup>。随着涂层剥离间隙尺寸的减小,pH下降,阴极保护作用升高。但在间隙尺寸小于1.6 mm的狭窄剥离下,尽管阴极保护更好,腐蚀速率却显著上升<sup>[11]</sup>。随时间增加,缝隙内保护电位减小,阴极保护不能到达缝隙底部的情况随着缝隙长度的增加和开口尺寸的减小而提高<sup>[12]</sup>。

### 2.2 涂层剥离与破损

涂层具有剥离缺陷的碳钢阴极保护效果随浸泡时间延长逐渐降低直至最后消失,而涂层具有破损缺陷时阴极保护效果随浸泡时间延长优于剥离涂层缺陷。在-0.85 V(vs. SCE)极化电位下,破损率为1%的试样阴极极化对破损处涂层的破坏作用大于对钢基体的保护作用,未达到预期保护效果。对于破损率为5%的试样,由于涂层的破损面积较大,其静电屏蔽作用和IR电压降减弱,使电力线能够到达被保护的金属,从而减缓金属的腐蚀<sup>[13]</sup>。

## 3 阴极保护对管道外涂层性能的影响

通过涂层的阴极保护电流促进了高碱度局部环境的形成,因此阴极保护防止管道钢腐蚀包括三个阶段:氧气耗尽、增加pH值致使管线钢钝化和电化学保护。

### 3.1 对涂层电阻的影响

阴极保护电流加剧了涂层的劣化,相比于没有

阴极保护的情况,阴极保护运营第一年可使管道涂层的接触电阻降低约100倍<sup>[14]</sup>。阴极保护会导致完好环氧清漆涂层的阻抗下降,具有阴极保护的带有有机涂层的碳钢电极比没有阴极极化的交流阻抗谱劣化进行得更快<sup>[15]</sup>。

### 3.2 对涂层剥离的影响

阴极保护过程中阴极反应产生的界面碱性环境会导致涂层的剥离,但阴极保护在涂层缺陷处形成的钙质膜层可以减弱管线钢的腐蚀<sup>[16]</sup>。在腐蚀性溶液中,有缺陷涂层在开路电位和低阴极保护电位下,很少或只有轻微的涂层剥离,但当阴极保护电位达到氢释放电位水平时,氢的逸出会加速涂层的阴极剥离<sup>[17]</sup>。对于没有破损的涂层,析氢电极反应过程对涂层的影响很小,而已破损的涂层会在析氢反应中加速剥离<sup>[18]</sup>。

另有研究表明,在饱和湿度盐渍土环境中,破损涂层随着腐蚀的进行逐渐被剥离,阴极保护会加速剥离速度。中等湿度的盐渍土中,破损涂层则能够得到完全的阴极保护,但剥离处仍会加重剥离。在低含水量的土壤中,所有涂层短期内都没有腐蚀发生<sup>[19]</sup>。

### 3.3 对钢/涂层界面结合力的影响

阴极保护电流在涂层和金属界面发生阴极反应的产物,会降低钢/涂层的界面性能,导致粘附力下降,涂层易发生阴极剥离<sup>[20]</sup>。施加阴极保护而产生的碱性环境,也会减弱涂层与管线钢的结合力<sup>[21]</sup>。研究表明,管道露天存放2年后的3PE环氧粉末涂层仍然粘接很牢,而运行两年的管段阴极保护电位负于-1.38 V时3PE涂层会全部脱落。分析结果显示,阴极保护的金属/聚合物界面不是被碱侵蚀破坏,而是被氧还原的中间体所引起的强氧化侵蚀破坏<sup>[22]</sup>。

### 3.4 对管线钢抗应力腐蚀断裂的影响

在阴极保护下,剥离涂层的中间部分由于有效的阴极保护和弱的氢析出而具有较低的应力腐蚀开裂(SCC)敏感性<sup>[23]</sup>。研究<sup>[24]</sup>显示,在剥离涂层下X70管线钢可以在碳酸盐/碳酸氢盐溶液中钝化,施加阴极保护后,可以增强钢的氢离子活性,降低钢的钝化性。施加的应力使点蚀电位负向移动,并减小了钝化电位范围。另外,在阴极保护电位过负时,缝隙中的电位和pH值受到缝隙中氢气泡电屏蔽的强烈影响,导致钢的电位增加进入SCC范围内,阴极

保护中断后,钢电位正移且pH降低,钢会进入pH-SCC的易感区<sup>[25]</sup>。

## 4 结束语

阴极保护和涂层相互作用的问题较复杂,通常在管线钢使用过程中涂层破损的数量少但是面积大,阴极保护电流比较集中,易造成过保护。而新制备的涂层往往有微小针孔,是否可以将不渗透电流的绝缘涂层表面形成数量、密度和直径(纳米级)适宜的用于渗透阴极保护电流的孔隙,达到分散阴极保护电流的目的,从而既解决阴极保护电流的渗透问题,又避免阴极保护电流在局部区域过大,造成涂层结合力下降、涂层剥离甚至发生管线钢应力腐蚀断裂的情况。

综合研究结果,可以发现涂层剥离形成的缝隙比涂层破损的危险性更大,所以应该研究管线钢使用过程中如何避免涂层形成缝隙腐蚀。其次研究如何提高管线钢和涂层的结合力、如何避免管线钢中有杂散电流、开发抗硫酸盐还原菌腐蚀的涂层、如何采取非焊接的方式连接管道等。最后,同行专家和工程技术人员应该在研究和实践过程中不断完善涂层在不同表面状况、不同涂层种类、不同环境下的阴极保护的标准。

## 参考文献

- [1] Saleem B, Ahmed F, Rafiq M A, et al. Stress corrosion failure of an X52 grade gas pipeline[J]. Engineering Failure Analysis, 2014, 46, 157-165.
- [2] Song F M. Predicting the chemistry, corrosion potential and corrosion rate in a crevice formed between substrate steel and a disbonded permeable coating with a mouth[J]. Corrosion science, 2012, 55, 107-115.
- [3] Kuang D, Cheng Y F. Study of cathodic protection shielding under coating disbondment on pipelines[J]. Corrosion Science, 2015, 99, 249-257.
- [4] 于利宝, 徐兆东, 孙海星, 等. 剥离PE防腐层破损点下钢管管线的阴极保护[J]. 全面腐蚀控制, 2016, 30(11): 41-44.  
Yu L B, Xu Z D, Sun H X, et al. Cathodic protection of steel pipeline beneath disbonded polyethylene coating[J]. Total Corrosion Control, 2016, 30(11): 41-44 (in Chinese).
- [5] Fu A Q, Cheng Y F. Characterization of the permeability



- of a high performance composite coating to cathodic protection and its implications on pipeline integrity[J]. *Progress in Organic Coatings*, 2011, 72, 423-428.
- [6] Yin K, Yang Y, Cheng Y F. Permeability of coal tar enamel coating to cathodic protection current on pipelines[J]. *Construction and Building Materials*, 2018, 192, 20-27.
- [7] 张曼曼. 埋地管道防腐层破损对阴极保护参数影响规律研究[D]. 天津: 中国民航大学机场学院, 2016.
- [8] 刘波, 王树立, 杨燕, 等. 涂层孔隙率对钢质套管穿越段管道阴保电位影响规律的数值模拟[J]. *腐蚀与防护*, 2016, 37(12): 961-965.
- Liu B, Wang S L, Yang Y, et al. Numerical simulation of the influence rule of coating porosity on cathodic potential of pipeline in steel casing[J]. *Corrosion & protection*, 2016, 37(12): 961-965 (in Chinese).
- [9] Kuang D, Cheng Y F. Effect of alternating current interference on coating disbondment and cathodic protection shielding on pipelines[J]. *Corrosion Engineering, Science and Technology*, 2015, 50(3): 211-217.
- [10] Varela F, Tan M Y J, Forsyth M. Understanding the effectiveness of cathodic protection under disbonded coatings [J]. *Electrochimica acta*, 2015, 186, 377-390.
- [11] Ashari R, Eslami A, Shamanian M. Corrosion and electrochemical conditions of pipeline steel under tape coating disbondments: effect of disbondment gap size and morphology[J]. *Journal of Pipeline Systems Engineering and Practice*, 2020, 11(1): 04019051.
- [12] Wang W H, Shen K L, Yi J, et al. A mathematical model of crevice corrosion for buried pipeline with disbonded coatings under cathodic protection[J]. *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*, 2016, 41, 270-281.
- [13] 刘杰, 李相波, 王佳, 等. 阴极极化对人为破损907A涂层钢腐蚀行为的影响[J]. *装备环境工程*, 2010, 7(3): 1-5.
- Liu J, Li X B, Wang J, et al. Effect of cathodic polarization on corrosion behavior of 907A steel with coating of artificial defect[J]. *Equipment Environmental Engineering*, 2010, 7(3): 1-5 (in Chinese).
- [14] Wei B, Mustafin F M, Bykov L I. Experimental study of changes in contact resistance of underground pipeline coatings[J]. *Oil & Gas Business*, 2015, 2, 156-178.
- [15] Narozny M, Zakowski K, Darowicki K. Application of electrochemical impedance spectroscopy to evaluate cathodically protected coated steel in seawater[J]. *Construction and Building Materials*, 2018, 181, 721-726.
- [16] Shi W, Lyon S B. Investigation using localised SVET into protection at defects in epoxy coated mild steel under intermittent cathodic protection simulating intertidal and splash zones[J]. *Progress in Organic Coatings*, 2017, 102, 66-70.
- [17] Mahdavi F, Forsyth M, Mike Y J T. Understanding the effects of applied cathodic protection potential and environmental conditions on the rate of cathodic disbondment of coatings by means of local electrochemical measurements on a multi-electrode array[J]. *Progress in Organic Coatings*, 2017, 103, 83-92.
- [18] 王远志, 许海波, 王廷勇. 土壤环境中阴极保护电位对涂层的影响[J]. *材料开发与应用*, 2005, 20(1): 43-46.
- Wang Y Z, Xu H B, Wang T Y. Influence of cathodic voltage on the coat of steel samples in soil[J]. *Material Development and Application*, 2005, 20(1): 43-46 (in Chinese).
- [19] 曾冬冬. 阴极保护条件下3PE防腐层埋地管道补口腐蚀行为研究[D]. 长沙: 湖南大学化学化工学院, 2014.
- [20] Belec L, Joliff Y. Numerical study on the evaluation of thermal and mechanical stresses during the welding of coated pipelines[J]. *Progress in Organic Coatings*, 2017, 111, 336-342.
- [21] 张丽. 外加电流阴极极化下环氧富锌涂层的失效行为研究[D]. 北京: 北京化工大学材料科学与工程学院, 2013.
- [22] Nakache M, Aragon E, Belec L, et al. Degradation of rubber to metals bonds during its cathodic delamination, validation of an artificial ageing test[J]. *Progress in Organic Coatings*, 2011, 72(3), 279-286.
- [23] Ma H C, Zhao B, Liu Z Y, et al. Local chemistry-electrochemistry and stress corrosion susceptibility of X80 steel below disbonded coating in acidic soil environment under cathodic protection [J]. *Construction and Building Materials*, 2020, 243, 118203.
- [24] Fu A Q, Cheng Y F. Electrochemical polarization behavior of X70 steel in thin carbonate/bicarbonate solution layers trapped under a disbonded coating and its implication on pipeline SCC[J]. *Corrosion Science*, 2010, 52, 2511-2518.
- [25] Yan M, Wang J, Han E, et al. Local environment under simulated disbonded coating on steel pipelines in soil solution[J]. *Corrosion Science*, 2008, 50(5): 1331-1339.