基于性能退化的沥青类防腐层保护效能影响规律的研究

张玉星[1,2]，车　明[1]，葛宝玉[3]，张慎颜[1]，李　旭[1]，王　杰[1]
（1. 北京市燃气集团有限责任公司，北京　100011；2. 北京科技大学新材料技术研究院，北京　100083；
3. 北京安科腐蚀技术有限公司，北京　102211）

[摘　要]　国内众多在役沥青防腐层管道的牺牲阳极阴极保护系统均已失效，或即将失效，重新更换牺牲阳极系统时若仍按照原有设计施工，可能会导致部分管道无法受到有效地保护。根据现场管道防腐层的面电阻率随时间变化规律，预测未来20 a内防腐层面电阻率变化情况，采用模拟计算的方法，预估已经运行15 a后管道的保护距离随时间的变化，为阴极保护系统重新设计提供依据。结果表明：在役沥青防腐层的面电阻率随埋地时间延长而降低，且降低速率逐渐减小；防腐层破损率随埋地时间的延长而增加，且增加速率逐渐增大；单组牺牲阳极保护系统运行15 a后管道的单侧保护距离为50 m，随着管道继续服役，单侧保护距离显著降低，第20，25，30，35 a时，单侧保护距离依次降为28.0，19.0，14.0，11.5 m；当阳极距离管道1~4 m范围内，随着距离的增加，管道上的电位分布更加均匀，且保护距离增加；未来20~35 a内，更换牺牲阳极系统的时间对阳极寿命基本无影响，阳极寿命预估为23 a左右。

[关键词]　沥青防腐层面电阻率；管道保护距离；牺牲阳极；阳极寿命预估
[中图分类号]　TG174　　[文献标识码]　A　　doi：10.16577/j.issn.1001-1560.2022.0126
[文章编号]　1001-1560(2022)05-0063-07

Study on the Influence Law of Asphalt Anti-Corrosion Coating Protection Efficiency Based on Performance Degradation

ZHANG Yu-xing[1,2], CHE Ming[1], GE Bao-yu[3], ZHANG Shen-yan[1], LI Xu[1], WANG Jie[1]
(1. Beijing Gas Group Co., Ltd., Beijing 100011, China;
2. Institute for Advanced Materials Technology, University of Science and Technology Beijing, Beijing 100083, China;
3. Beijing AnkocorrTechnology Co., Ltd., Beijing 102211, China)

Abstract: In China, the sacrificial anode cathodic protection systems of many pipelines in service with asphalt coating have failed or are about to fail. If the sacrificial anode systems are replaced according to the original design, some pipelines could not be effectively protected. In this work, based on the surface resistivity change rule of the anticorrosive layer of on-site pipeline with time, the change of resistivity of the as-mentioned anticorrosive layer in the next 20 years was predicted. The change of protection distance of pipeline after 15 years of operation with time was estimated using simulation calculation, which provided a basis for the redesign of cathodic protection system. Results showed that the surface resistivity of anticorrosive layer of asphalt coating decreased with the prolonging of burried time, and the decreasing rate decreased gradually; the damage rate of anticorrosion coating increased with the prolonging of buried time, and the increase rate rised gradually. After 15 years of operation single group sacrificial anode protection system, the single-side protection distance of the pipeline was 50 m. And then with the continuous service of the pipeline, the single-side protection distance decreased significantly. After 20, 25, 30 and 35 years of operation, the single-side protection distance declined to 28.0, 19.0, 14.0 and 11.5 m, respectively. When the distance between the anode and the pipeline was in the range of 1~4 m, with the increase of such distance, the potential distribution on the pipeline became more and more uniform, and the protection distance increased. Furthermore, in the next 20~35 years, the replacement time of sacrificial anode system would have little impact on the anode life, which was estimated to be about 23 years.

Key words: asphalt anti-corrosion layer resistivity; pipeline protection distance; sacrificial anode; anode life prediction

[收稿日期]　2021-11-26
[通信作者]　葛宝玉(1990-)，工程师，硕士，从事油气管线的腐蚀与防护工作，电话：15216807587，E-mail：geby@ancorr.cn

0 前 言

20 世纪 90 年代前,埋地管道几乎都采用沥青类防腐层[1,2],随后 3PE(三层结构聚乙烯,3-layer Polyethylene)防腐层逐渐进入大众视野[3],21 世纪以来,国内逐渐采用 3PE、FBE(熔结双氧粉末,Fusion Bond Epoxy)等新型防腐层[4]。国内大部分沥青类防腐层管道运行超过 20 a,甚至 50 a,沥青类管道大部分牺牲阳极阴极保护系统已达到设计寿命的年限,在更换牺牲阳极阴极保护系统时,若仍沿用原有的设计方案,可能会导致部分管道无法受到有效地保护,主要因为沥青类防腐层在老化后会出现防腐层裂化、脆化[5];同时,由于管道埋地前期沥青涂层质量较好,牺牲阳极的保护距离较长,但随着年限的增加,防腐层质量变差,牺牲阳极系统改造时若仍按照原设计方案执行,可能导致更换后的牺牲阳极阴极保护系统不能满足阴极保护的需求,或虽能当时满足阴极保护的需求,但因后续防腐层老化,使用过程中牺牲阳极的保护距离逐渐变短,最终仍无法满足管道的保护需求。

目前对在役管道防腐层退化规律研究较少,本工作对近 40 a 的沥青类防腐层管道的面电阻率的变化规律进行总结,得出沥青类防腐层面电阻率与时间的关系,预测已运行 15 a 的 DN500 管道后续近 20 a 的面电阻率变化情况,同时利用模拟计算的方法预测管道后续 20 a 内的单侧保护距离变化情况,同时探索影响保护距离的因素,以为牺牲阳极系统后续更换提供参考依据。

1 试 验

1.1 防腐层退化规律总结

根据现场近 40 a 来沥青防腐层的面电阻率检测结果,总结防腐层面电阻率随时间的变化规律,并根据其规律预估管道后续 20 a 内面电阻率随时间的变化情况。

1.2 现场阴极保护电位检测

选取现场 DN500 管道,长度 800 m 范围内仅有 1 组(4 支/组)牺牲阳极保护此段管道,断开此段管道前后牺牲阳极,利用断路器控制此处牺牲阳极组与管道之间的连接,通断周期为 12 s/3 s,测量阳极一侧管道的断电电位,按照-850 mV(vs CSE)最小保护电位准则[6]判断管道受到有效保护的距离。

1.3 数值模拟计算

利用 BEASY 软件,根据管道直径、深度、长度,建立模型,以管道相同材质材料在土壤的极化行为作为阴极边界条件,以实测土壤电阻率作为介质的边界条件,以开路电位为-1 550 mV(vs CSE)的镁合金阳极作为阳极边界条件。

模拟计算模型:管径 DN500、长度 800 m、土壤电阻率 36 Ω·m。阳极距离管道中心距离 2 m,阳极间距 3 m,管道每侧各 2 支镁合金牺牲阳极。

根据现场检测结果校准模型的阴极边界条件,即涂层破损率,结合防腐层退化规律模拟计算未来 20 a 管道的保护距离变化,得出不同防腐层面电阻率时管道的保护距离,并模拟计算牺牲阳极与管道之间距离对保护距离的影响。

1.4 镁合金牺牲阳极寿命预估

牺牲阳极 4 支/组,净重 14 kg,牺牲阳极尺寸、质量符合 GB/T 17731[7]的要求,牺牲阳极形状为梯形,尺寸为:700 mm×102 mm×(100+120) mm,阳极表面积为 3 199.4 cm^2。

根据法拉第第一定律,牺牲阳极的消耗计算采用以下公式:

$$W = \frac{I \times t \times 8\ 766}{U \times Z \times Q} \tag{1}$$

式中:W 为阳极重量,kg;I 为电流输出,A;t 为设计寿命,a;U 为利用系数,0.85;Z 为理论电容量(镁阳极,2 200 A·h/kg;锌阳极,827 A·h/kg;铝阳极,2 500 A·h/kg);Q 为理论阳极效率(镁阳极,50%;锌阳极,90%;铝阳极,90%);$Q \times Z$ 为实际电容量。

镁合金牺牲阳极实际电容量受输出电流影响,实际电容量根据阳极电流密度与实际电容量关系曲线[8](图 1)查得。

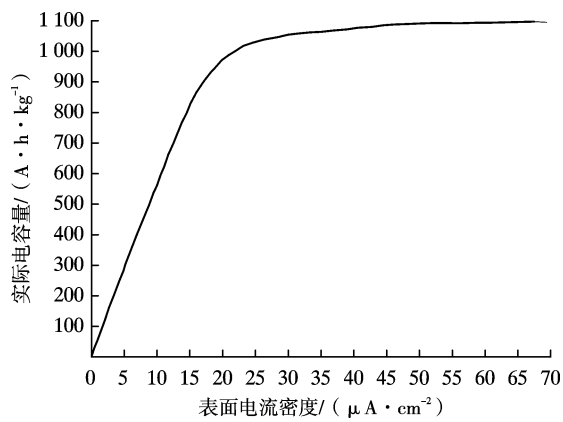


图 1 镁阳极实际电容量与表面电流密度的关系

Fig. 1 Relationship between actual capacitance and surface current density of magnesium anode

2 结果与讨论

2.1 防腐层面电阻率变化规律

沥青类防腐层随着运行时间的增长逐渐硬化、脆化,防腐层的面电阻率降低,现假设防腐层老化均匀且

其面电阻率的降低是因为防腐层破损引起,因沥青防腐层老化后呈现粉末状态,故认为防腐层的破损率与其面电阻率成反比。

现场测量的面电阻率(选频-变频法测得)随时间的变化如图2所示。

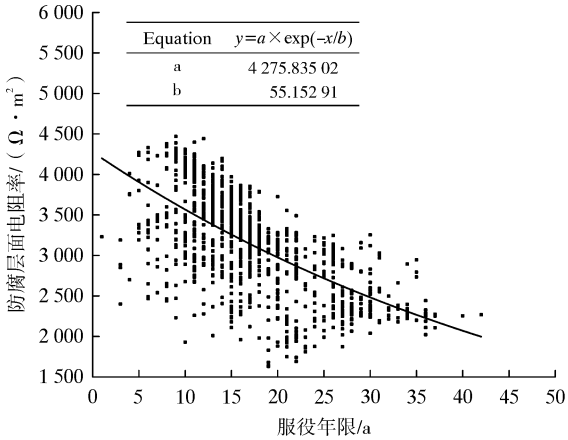


图2 服役年限与面电阻率的关系

Fig. 2 Relationship between service life and surface resistivity

通过非线性拟合得到的防腐层面电阻率与时间关系的公式:

$$R=4\ 275.8\exp(-x/55.2) \tag{2}$$

式中:R 为选频-变频法测得的面电阻率,$\Omega\cdot m^2$;x 为时间,a。

根据CJJ 95-2013[9]中4.3.2节防腐层绝缘性能评价(见表1)。由表1的防腐层评价等级可大致推算出:电流-电位法测得的防腐层面电阻率值近似为选频-变频法测得的面电阻率值的1/2,即得出电流-电位法测得的防腐层面电阻率值与时间的关系:

$$R_1 \approx \frac{R}{2}=2\ 137.9\exp(-x/55.2) \tag{3}$$

式中:R_1 为电流-电位法测得的面电阻率,$\Omega\cdot m^2$;x 为时间,a。

由图2可知,面电阻率的变化范围较大,同一时间点,选频-变频法测得的面电阻率相对于规律曲线[式(2)]波动约±400 $\Omega\cdot m^2$,电流-电位法波动范围为±200 $\Omega\cdot m^2$。

表1 石油沥青防腐层绝缘性能的评价指标

Table 1 Insulation performance evaluation index of petroleum asphalt anticorrosion coating

检测方法	防腐层等级				
	Ⅰ(优)	Ⅱ(良)	Ⅲ(可)	Ⅳ(差)	Ⅴ(劣)
电流-电位法测面电阻率 R/($\Omega\cdot m^2$)	≥5 000	2 500≤R<5 000	1 500≤R<2 500	500≤R<1 500	<500
选频-变频法测面电阻率 R/($\Omega\cdot m^2$)	≥10 000	6 000≤R<10 000	3 000≤R<6 000	1 000≤R<3 000	<1 000
老化程度及表现	基本无老化	老化轻微,无剥离和损伤	老化较轻,基本完整,沥青发脆	老化较严重,有剥离和较严重的吸水现象	老化和剥离严重,轻剥即掉

2.2 模拟计算模型建立与校准

管径DN500,管道长度为800 m,采用4支14 kg镁合金牺牲阳极为1组,阳极的电位为-1 550 mV,阳极处于管道中间位置,每支阳极间距为3 m,阳极距离管道中心2 m。

管道于2006年建立,2021年测试时该段管道的面电阻率平均值为1 414.5 $\Omega\cdot m^2$(电流-电位法),现场阴极保护电位测试结果如表2所示。

表2 DN500管道现场测试的阴极保护电位数据

Table 2 Cathodic protection potential data of DN500 pipeline field test

距离/m	2	10	30	50	70
断电电位(vs CSE)/mV	-1 040	-936	-861	-851	-840

由式(3)得知,$x=16$ 时,$R_1=1\ 599.9\ \Omega\cdot m^2$,根据对现场管段的测试得知,该段面电阻率平均值为1 414.5 $\Omega\cdot m^2$,土壤电阻率为36 $\Omega\cdot m$。

对式(3)进行修正,得到公式(4):

$$R_2=R_1-185.4=2\ 137.9\exp\left(-\frac{x}{55.2}\right)-185.4 \tag{4}$$

式中:R_2 为电流-电位法实测的面电阻率,$\Omega\cdot m^2$,x 为时间,a。

根据式(4)得到面电阻率随时间的变化曲线如图3所示。由图3可知,面电阻率随着服役时间的延长,整体呈现逐渐下降趋势,且下降速率逐渐减缓。

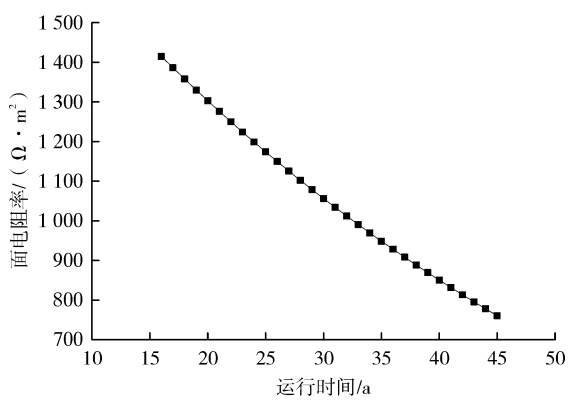


图3 面电阻率随时间的变化曲线

Fig. 3 Curve of surface resistivity changing with time

根据现场测试的阴极保护电位数据,对模型的阴极边界条件进行校准,使其管道电位分布与现场阴极保护电位分布基本一致,最终得到较符合现场电位分布的模拟计算结果如图 4 所示。由图 4 可知,阳极附近管道电位的变化较大,随着距离增加,阴极保护电位有下降趋势,但变化较小,按照-850 mV (vs CSE)准则,此时模型的保护距离约50 m。

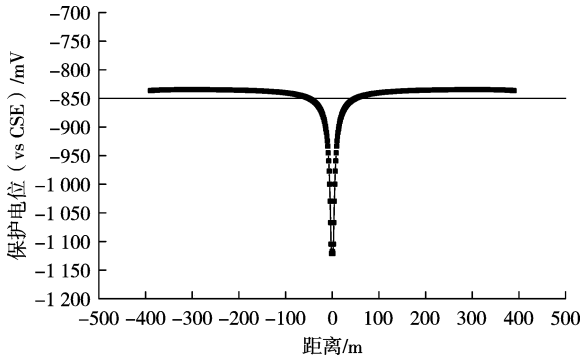


图 4 DN500-0.8 km 管道的电位分布

Fig. 4 Potential distribution diagram of DN500-0.8 km pipeline

模拟计算得到的阴极保护数据如表 3 所示。

表 3 模拟计算与现场测试值对比

Table 3 Comparison between simulated calculation and field test values

距离/m	2	10	30	50	70
测量断电电位(vs CSE)/mV	-1 040	-936	-861	-851	-840
模拟计算断电电位(vs CSE)/mV	-1 067	-930	-862	-850	-844
模拟计算结果误差/%	2.60	0.64	0.10	0.10	0.50

由表 3 可知,阳极附近 70 m 范围内电位分布基本与现场一致,且模拟计算结果误差小于 10%,故认为模型可靠,此时涂层破损率约为 8.55×10^{-4},防腐层面电阻率 R_2 为 1 414.545 Ω·m^2。假设对于沥青防腐层,面电阻率变化与涂层破损率变化呈反比例变化,此时在役防腐层破损率随管道在役时间的变化曲线见图 5。

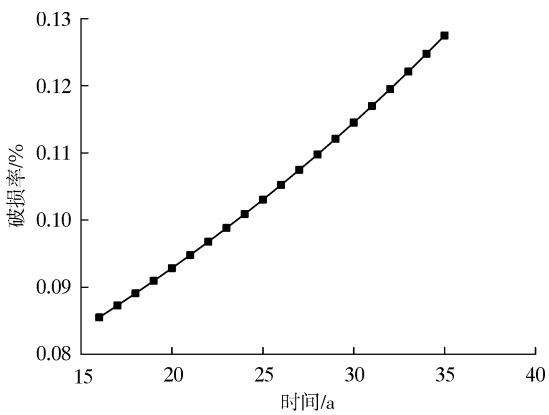


图 5 破损率随时间的变化曲线

Fig. 5 Variation curve of breakage rate over time

由图 5 可知,涂层破损率随着管道在役时间的增加逐渐变大,且增速呈现逐步增加趋势,即随着管道在役时间的增加,防腐层破损的速率逐渐增加,说明随着管道埋地时间的增加,防腐层老化越来越严重,阴极保护系统所需的电流密度会逐渐增加。

2.3 单侧保护距离及阳极寿命预估

假设土壤电阻率不变,利用模拟计算的方法对 DN500-0.8 km 管道未来 20 a 的保护距离进行预估,预估结果见图 6、表 4。

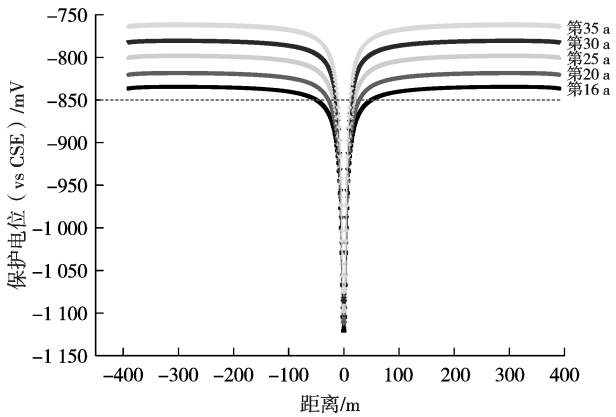


图 6 不同时间段 DN500-0.8 km 管道的表面电位分布曲线

Fig. 6 Surface potential distribution curves of DN500-0.8 km pipeline in different time periods

表 4 管道表面电位分布及有效保护距离随时间的变化

Table 4 Potential distribution on pipeline surface and effective protection distance change with time

时间	阴极保护电位(vs CSE)/V		单侧保护距离/m	阳极发生电流/mA
	最正值	最负值		
第 16 a	-834.63	-1 120.9	50.0	183.67
第 20 a	-818.46	-1 110.7	28.0	187.92
第 25 a	-798.81	-1 098.3	19.0	193.10
第 30 a	-779.92	-1 086.2	14.0	198.10
第 35 a	-761.82	-1 074.4	11.5	202.85

由图 6、表 4 可知,保护电位随着时间的增加,电位整体正向偏移,目前单组牺牲阳极单侧保护距离仅 50 m,即管道的有效保护距离约 100 m。

单组牺牲阳极单侧有效保护范围随管道埋地时间变化如图 7 所示。假设牺牲阳极能稳定运行,由图 7 可知,第 16~25 a 内,单组牺牲阳极的单侧保护距离迅速下降,从 50.0 m 降至 19.0 m,第 25~35 a 内,单组牺牲阳极的单侧保护距离下降速率较慢,从 19.0 m 下降至 11.5 m。

面电阻率降低,破损率增加,引起牺牲阳极的电流

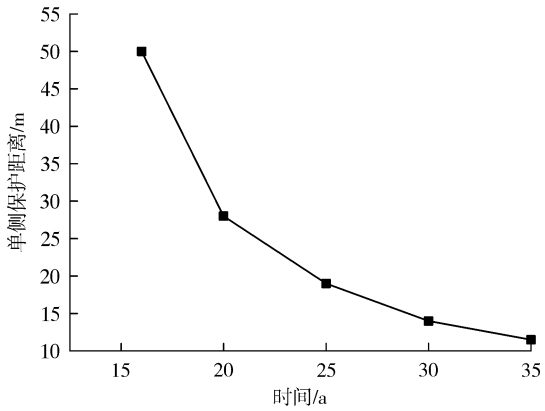


图7 阴极保护有效距离随时间的变化

Fig. 7 The effective distance of cathodic protection varies with time

输出增加,根据图1查知的不同电流密度时的电容量变化情况,对牺牲阳极寿命进行预估,结果见表5。

假设条件不变的情况下,由表5可知,虽然面电阻率变化引起破损率变化,但镁合金牺牲阳极的输出,实际电容量也随之变化,最终阳极寿命维持不变,即在16~35 a范围内任意年限更换牺牲阳极,阳极的寿命预估均为23 a。

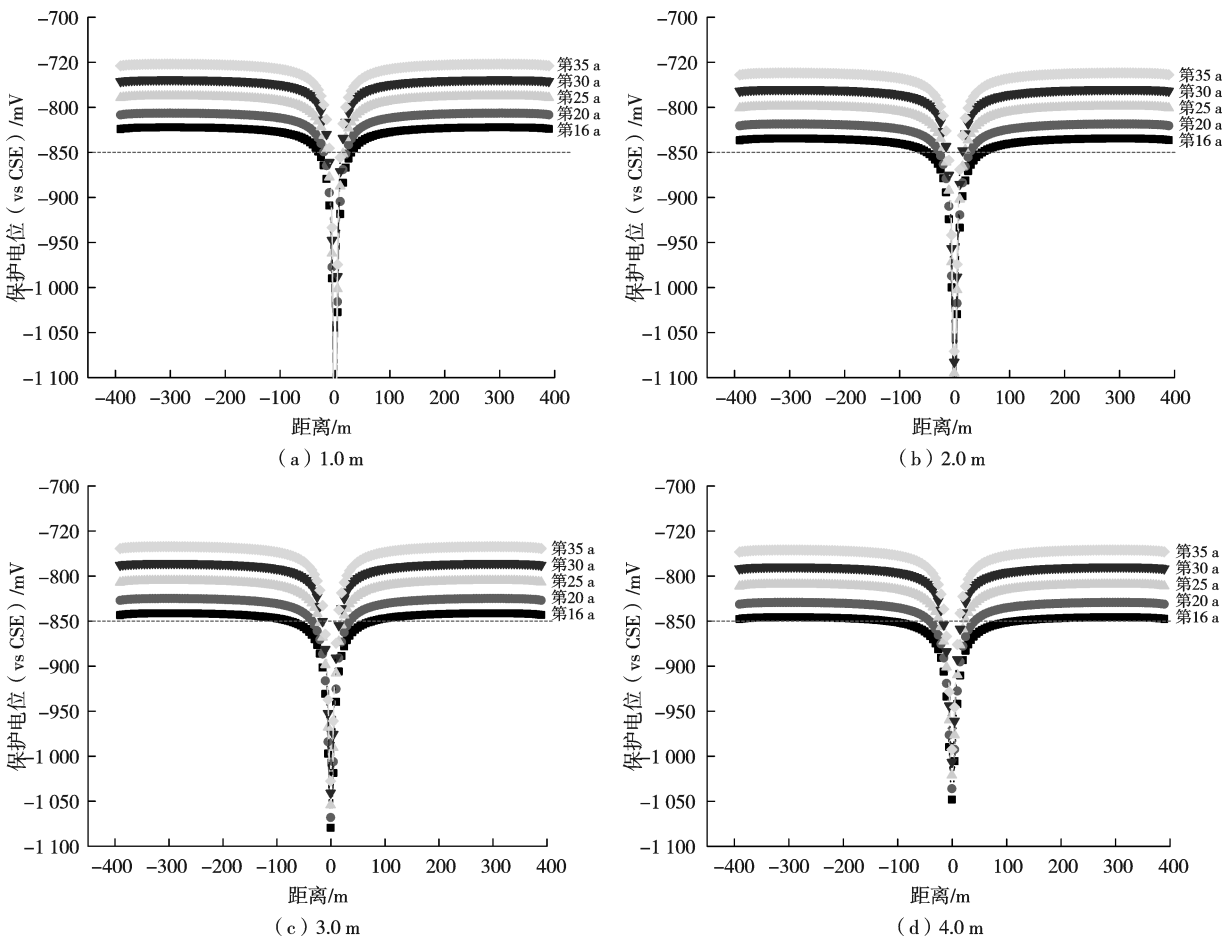
表5 不同年限时的牺牲阳极寿命预估

Table 5 Estimated sacrificial anode life at different ages

时间	阳极发生电流/mA	阳极电流密度/(μA·cm^{-2})	实际电容量/(A·h·kg^{-1})	阳极寿命预估/a
第16 a	183.67	14.4	792	23.4
第20 a	187.92	14.7	809	23.4
第25 a	193.10	15.1	830	23.3
第30 a	198.10	15.5	845	23.2
第35 a	202.85	15.9	866	23.2

2.4 阳极与管道中心距离对保护距离的影响

依据GB/T 21448-2017[6],一般情况下,牺牲阳极宜距离管道外壁3.0~5.0 m,最小不宜小于0.5 m,模拟计算阳极距离管道中心分别为1.0,2.0,3.0,4.0 m时的管道表面电位分布见图8。



(a) 1.0 m (b) 2.0 m (c) 3.0 m (d) 4.0 m

图8 阳极距离管道中心不同距离时管道表面电位分布随时间的变化

Fig. 8 Changes of potential distribution on pipeline surface with time at different distances between anode and pipeline center

对图8模拟计算结果进行总结,其结果见表6。从表6可知,在1.0~4.0 m范围内,电位分布随着牺牲阳极离管道的距离增加而更均匀,牺牲阳极距离管道越近,越容易使牺牲阳极附近电位区间变化更大;阳极寿命预估约23 a,基本保持不变。牺牲阳极的单侧保护距离随阳极距离管道中心距离变化情况见图9。

表 6 阳极与管道中心不同距离的电位分布及保护距离

Table 6 Potential distribution and protection distance at different distances between anode and pipe center

距离/m	时间/a	电位分布(vs CSE)/mV	保护距离/m	阳极发生电流/mA	实际电容量/(A·h·kg^{-1})	阳极寿命预估/a
	16	-822.26~-1 211.80	30.0	13.7	766	23.6
	20	-806.50~-1 204.00	20.5	14.1	785	23.7
1	25	-787.47~-1 194.50	15.0	14.4	792	23.3
	30	-769.23~-1 185.20	12.0	14.8	811	23.3
	35	-752.04~-1 176.30	10.0	15.1	830	23.3
	16	-834.63~-1 120.90	50.0	14.4	792	23.4
	20	-818.46~-1 110.70	28.0	14.7	809	23.4
2	25	-798.81~-1 098.30	19.0	15.1	830	23.3
	30	-779.92~-1 086.20	14.0	15.5	845	23.2
	35	-761.82~-1 074.40	11.5	15.9	866	23.2
	16	-841.28~-1 079.30	77.0	14.7	809	23.4
	20	-824.96~-1 068.10	35.0	15.0	829	23.4
3	25	-805.01~-1 054.20	21.5	15.4	840	23.1
	30	-785.78~-1 040.80	15.5	15.8	865	23.2
	35	-767.36~1 027.70	12.5	16.2	879	23.0
	16	-845.66~-1 048.00	117.0	14.9	813	23.2
	20	-829.25~-1 036.00	41.0	15.2	839	23.4
4	25	-809.11~-1 021.10	23.0	15.7	854	23.1
	30	-789.67~-1 006.60	16.5	16.1	872	23.0
	35	-771.04~-992.52	13.0	16.5	885	22.8

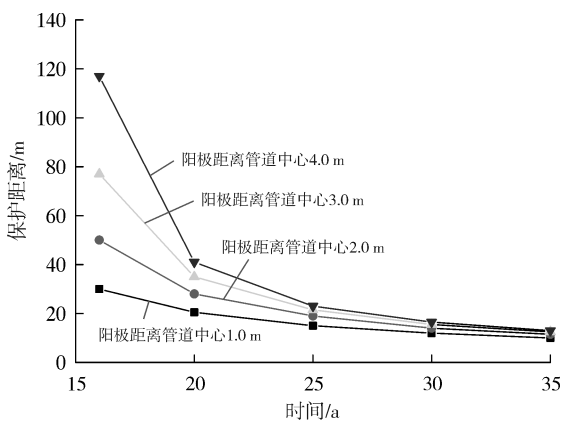


图 9 阳极与管道中心不同距离时保护距离随年限的变化

Fig. 9 Change of protection distance with age when anode is at different distance from pipe center

由图 9 可知,阳极与管道中心的距离变化对单组牺牲阳极单侧保护距离随时间的变化趋势不变,均为保护距离随管道运行时间的增加而显著降低,并随着时间的延长降低的速率逐渐减小。阳极与管道中心距离对管道单侧保护距离的影响如图 10 所示。

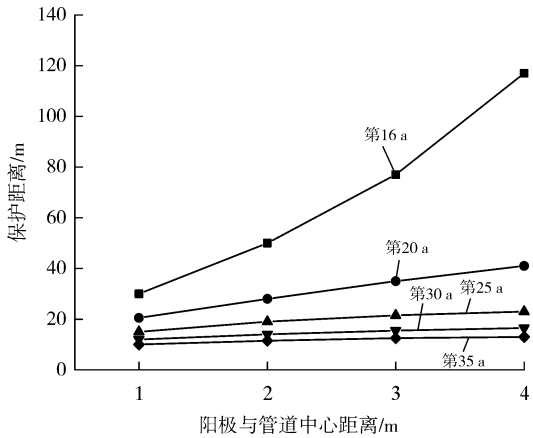


图 10 不同年限时保护距离随阳极与管道中心距离的变化

Fig. 10 Protection distance varies with the distance between anode and pipe center in different years

由图 10 可知,牺牲阳极的单侧保护距离随阳极与管道中心距离的增大而增加,在使用前期(第 16~25 a)变化较明显,使用后期(第 25~35 a)变化较小。

2.5 防腐层面电阻率与单侧保护距离的关系

防腐层在同一时间段其面电阻率波动范围为±200 Ω·m^2(电流-电位法测量值),故当 DN500 管道运行 15 a 后,结合式(3),未来 20 a 面电阻率变化范围为 934.0~1 799.9 Ω·m^2,现场测得 DN500 管道的面电阻率为1 414.5 Ω·m^2,防腐层破损率约 0.085 5%,假设防腐层的面电阻率与破损率成反比,得出防腐层面电阻率与破损率的关系见图 11。

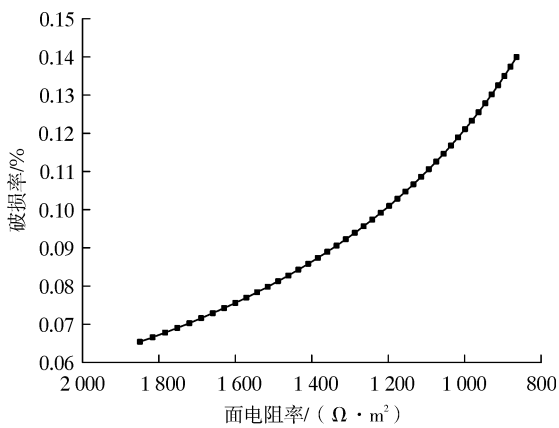


图 11 防腐层的面电阻率与破损率的关系

Fig. 11 Relationship between resistivity and breakage rate of anticorrosion layer

从图 11 可知,随着防腐层面电阻率的降低,防腐层的破损率逐渐增加,且增速逐渐增大,说明防腐层的面电阻率与破损率并不是直接的线性关系。随着防腐层面电阻率的降低,防腐层破损老化速率逐渐增加。

模拟计算不同面电阻率时的电位分布情况见图12,面电阻率与管道受保护距离及阳极发生电流的关系见图13。

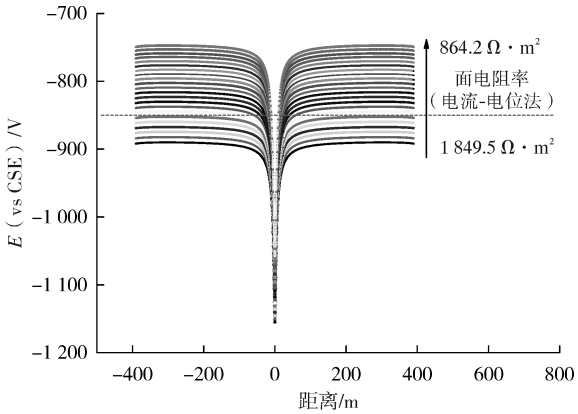


图12 不同面电阻率时的电位分布情况

Fig. 12 Potential distribution at different surface resistivity

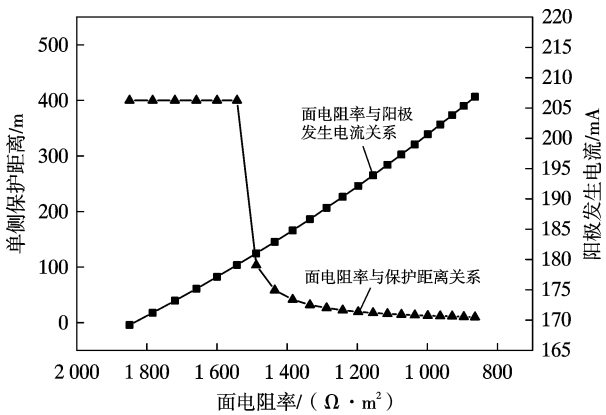


图13 面电阻率与管道受保护距离及阳极发生电流的关系

Fig. 13 Relationship between surface resistivity and pipeline protection distance and anode current generation

采用断电电位-850 mV (vs CSE)作为阴极保护有效性的判别标准,结合图12与图13可知,随着防腐层面电阻率的降低,管道最正保护电位逐渐正向移动,当面电阻率大于1 500 Ω·m²时,单组(4支/组)牺牲阳极对DN500管道的单侧保护距离均大于400 m,当面电阻率为1 500~1 400 Ω·m²时,单侧保护距离开始显著下降,面电阻率小于1 400 Ω·m²时,单侧保护距离变化不明显。依据数值模拟结果,防腐层性能退化导致保护距离明显缩短。

从图13可知,随着防腐层的老化,即防腐层面电阻率的降低,牺牲阳极的发生电流逐渐增加。但增加的电流满足不了因防腐层退化所需的保护电流,故在后续的牺牲阳极阴极保护系统改造时不应完全参照最初的阴极保护系统设计方案。

考虑到老旧管道的自腐蚀电位较正的情况,将管地电位控制在略负于自腐蚀电位的情况下一定程度上可以缓解腐蚀风险,因此建议针对服役年限较长的管道在阴极保护有效性标准的选择上适当降低对阴极保护电位的要求。

3 结 论

(1)沥青防腐层面电阻率(电流-电位法)随时间变化符合公式 $R=4\ 275.8\exp(-x/55.2)$,选频-变频法测得的面电阻率近似为电流-电位法的2倍。

(2)对于现场测试段DN500-0.8 km管道,后续10 a内单侧保护距离变化显著,从50.0 m降至19.0 m,后续10~20 a内单侧保护距离变化减缓,从19.0 m降至11.5 m。

(3)牺牲阳极距离管道中心1.0~4.0 m范围内,牺牲阳极的单侧保护距离随阳极距离管道中心距离增加而增加,且距离越大,管道的保护电位分布越均匀,牺牲阳极的寿命基本不变。

(4)根据防腐层的面电阻率变化规律模型预估防腐层面电阻率随时间的变化情况,根据面电阻率与单侧保护距离之间关系预测不同面电阻率时管道的受保护距离,为后续牺牲阳极系统的改造提供参考。

(5)管道的自腐蚀电位相对较正,将管地电位控制在略负于自腐蚀电位的情况下一定程度上可以缓解腐蚀风险,因此建议针对服役年限较长的管道在阴极保护有效性标准的选择上适当降低对阴极保护电位的要求。

[参 考 文 献]

[1] 刘继旺,孙嘉瑞.石油沥青在不同土壤中老化因素的分析.全国土壤腐蚀试验网站资料汇编(第二集)[M].上海:上海交通大学出版社,1992:18.
LIU J W, SUN J R. Analysis of aging factors of petroleum bitumen in different soils. China soil corrosion test website data compilation (second volume) [M]. Shanghai:Shanghai Jiaotong University Press,1992:18.

[2] 陈群尧.仪器对埋地管道石油沥青防腐层失效的研究[J].防腐保温技术.2002,10(1):34-39.
CHEN Q Y. Study on failure of petroleum asphalt anticorrosion coating for buried pipeline by instrument[J]. Anticorrosion and Insulation Technology, 2002,10(1):34-39.

[3] 高 伟,王小红.管道防腐涂层的现状与展望[J].管道技术与设备.2012,12(4):32-35.
GAO W, WANG X H. Current situation and prospect of pipeline anti-corrosion coating[J]. Pipeline Technology and Equipment, 2012,12(4):32-35.

(下转第79页)

WANG S L, FEI J Y, LING X H, et al. Research progress on high - performance corrosion - resistant pipes and super 13Cr [J]. Corrosion Science and Protection Technology, 2013, 25(4): 322-326.

[18] XU L, WANG B, ZHU J, et al. Effect of Cr content on the corrosion performance of low-Cr alloy steel in a CO_2 environment[J]. Applied Surface Science, 2016, 379: 39-46.

[19] 程雅雯, 赵会军, 张 璇, 等. 原油含水率和温度对X80钢腐蚀实验研究[J]. 油气田地面工程, 2016, 35(10): 101-104.
CHENG Y W, ZHAO H J, ZHANG X, et al. Experimental study on corrosion behavior of X80 steel by water content and temperature of crude oil[J]. Oil-Gasfield Surface Engineering, 2016, 35(10): 101-104.

[20] 陈丽群, 孙 雷, 张立强. 天然气中水含量影响因素及脱水工艺探讨[J]. 油气藏评价与开发, 2013, 3(1): 59-64.
CHEN L Q, SUN L, ZHANG L Q. Influence factors of water content in natural gas and discussion of the dehydration process[J]. Reservoir Evaluation and Development, 2013, 3(1): 59-64.

[21] CHOI Y S, NESIC S, LING S. Effect of H_2S on the CO_2 corrosion of carbon steel in acidic solutions[J]. Electrochimica Acta, 2011, 56(4): 1 752-1 760.

[22] 宁雯宇, 邢晓凯, 杨正然, 等. 高含水超稠油乳状液析水特性研究[J]. 科学技术与工程, 2015, 15(6): 177-180.
NING W Y, XING X K, YANG Z R, et al. The study of characteristics of the precipitated water of high water super heavy oil emulsion[J]. Science Technology and Engineering, 2015, 15(6): 177-180.

[23] 闫 伟, 邓金根, 袁俊亮, 等. 油套管钢长周期CO_2腐蚀速率的测试及准确计算方法[J]. 材料保护, 2014, 47(8): 71-74.
YAN W, DENG J G, YUAN J L, et al. Method foraccurate calculation of corrosion rate of oil tubing steel induced by long-term carbon dioxide exposure[J]. Materials Protection, 2014, 47(8): 71-74.

[24] 刘晓玮, 蔡庆伍, 武会宾, 等. CO_2分压对X80管线钢腐蚀性能的影响[J]. 腐蚀与防护, 2012, 33(6): 502-506.
LIU X W, CAI Q W, WU H B, et al. Effect of CO_2 partial pressure on corrosion resistance of X80 pipeline steel[J]. Corrosion and Protection, 2012, 33(6): 502-506.

[25] 胡建春, 胡松青, 石 鑫, 等. CO_2分压对碳钢腐蚀的影响及缓蚀性能研究[J]. 青岛大学学报(工程技术版), 2009, 24(2): 90-93.
HU J C, HU S Q, SHI X, et al. Influence of CO_2 partial pressure on carbon steel corrosion and corrosion inhibition performance[J]. Journal of Qingdao University(Engineering and Technol), 2009, 24(2): 90-93.

[26] YONG H, AMIR S, RICHARD B, et al. Protectiveness, morphology and composition of corrosion products formed on carbon steel in the presence of Cl^-, Ca^{2+} and Mg^{2+} in high pressure CO_2 environments[J]. Applied Surface Science, 2018, 455: 667-682.

[27] 杨世洲, 李春福, 李 辉, 等. 2205双相不锈钢在酸性H_2S环境下的应力腐蚀行为及开裂机理[J]. 稀有金属材料与工程, 2018, 47(3): 904-909.
YANG S Z, LI C F, LI H, et al. Stress corrosion behavior and cracking mechanism of 2205 duplex stainless steel in acidic H_2S environment[J]. Rare Metal Materials and Engineering, 2018, 47(3): 904-909.

[编校:范宏义]

(上接第69页)

[4] 胡士信,董 旭.我国管道防腐层技术现状[J].油气储运,2004,7(2):4-8.
HU S X, DONG X. Current Status of Pipeline Coating Technology in China[J]. Oil and Gas Storage and Transportation, 2004,7(2):4-8.

[5] 李广炜.沥青防腐层龟裂原因分析[J].油气储运,1996,15(12):29-30.
LI G W. Analysis of cracking of asphalt coating[J]. Oil and Gas Storage and Transportation, 1996,15(12):29-30.

[6] GB/T 21448-2017,埋地钢质管道阴极保护技术规范[S].
GB/T 21448 - 2017, Technical specification for cathodic protection of buried steel pipeline [S].

[7] GB/T 17731-2015,镁合金牺牲阳极[S].
GB/T 17731 - 2015, Sacrificial anode for magnesium alloy [S].

[8] 冯洪臣.阴极保护系统维护:第二版[M].北京:中国石化出版社,2021:28-29.
FENG H C. Cathodic Protection System Maintenance (Second edition) [M]. Beijing: China Petrochemical Press, 2021:28-29.

[9] CJJ95-2013.城镇燃气埋地钢质管道腐蚀控制技术规程[S].
CJJ 95 - 2013, Technical specification for corrosion control of urban gas buried steel pipeline [S].

[编校:范宏义]