

站场接地材料对埋地管道腐蚀速率及阴极保护的影响规律研究

赵 康

(国家管网集团联合管道有限责任公司西部分公司, 新疆 乌鲁木齐 830000)

[摘要] 为了解接地网对埋地管道阴极保护效果的影响,采用数值模拟计算方法,建立了站场接地系统及埋地管道腐蚀与阴极保护电场模型,考察了接地极材质、阳极地床形式等因素对埋地管道电位分布、腐蚀速率及阴极保护效果的影响规律。结果表明:电正性接地极材料会大大加速附近埋地管道的腐蚀速率,造成区域阴极保护无法达标,因此应避免采用;同时近地床的优化分布相对于远地床形式能更好地消除由接地系统造成的屏蔽区。以上结果可为接地材料的选择和站场区域阴极保护阳极地床的设计提供参考。

[关键词] 接地系统;数值模拟;阴极保护

[中图分类号] TG172 **[文献标识码]** A **doi:** 10.16577/j.issn.1001-1560.2023.0124

[文章编号] 1001-1560(2023)05-0196-05

Study on Effect of Station Grounding Materials on the Buried Pipeline Corrosion Rate and Cathodic Protection

ZHAO Kang

(Western Branch of National Pipeline Network Group United Pipeline Co., Ltd., Urumqi 830000, China)

Abstract: In order to understand the influencing laws of the cathodic protection effect of the grounding grid and the grounding buried pipelines, the numerical simulation calculation method was used to establish the electric field model of corrosion and cathodic protection of the station grounding system and the buried pipeline. The influencing law of the grounding electrode material and anode ground bed form and other factors on the electric potential distribution, corrosion rate and cathodic protection effect of the buried pipeline was investigated. Results indicated that the electropositive grounding materials would greatly accelerate the corrosion rate of buried pipeline nearby, causing the regional cathodic protection to fail to meet the standards. Therefore, the electropositive grounding materials should be avoided. At the same time, the optimal distribution of the near ground bed could better eliminate the shielding area caused by the grounding system, compared with the far ground bed. The above results could provide reference for the selection of grounding materials and the design of anodic ground bed for station regional cathodic protection system.

Key word: grounding system; numerical simulation; cathodic protection

0 前 言

随着油气输送系统规模和自动化水平的不断提高,站场内高低压配电及控制系统不断向网络化、智能化、集成化方向发展,使得站场接地系统规模庞大,结构错综复杂,站场内管道、通信、电气等系统联合接地作为一种经济有效的接地防护措施已在国内外得到了广泛的使用。站场区域阴极保护技术作为防止站场内埋地金属设施腐蚀的一种有效措施,在西方发达国家也同样已被强制使用。我国从 20 世纪 70 年代^[1]开始

在部分站场实施区域阴极保护,取得了很好的保护效果。于敏等^[2]在解决喇嘛甸油田地面设施腐蚀问题时,对区域阴极保护进行参数优选,使钢管的腐蚀速率降低了 5 倍;蔡德强等^[3]对岳 106 井站已建站场补加区域阴极保护,使得站场受到保护。然而区域阴极保护由于保护对象繁多,阴极保护电流需求大,地下金属结构复杂,干扰和屏蔽问题突出,导致阳极地床设计难度大^[4]。区域阴极保护存在以上特点的一个主要原因就是受站内联合接地和日益庞大的接地系统的影响。王飞等^[5]认为站场内庞大的接地网会使区域阴极保护

[收稿日期] 2022-11-17

[通信作者] 赵 康(1987-),高级工程师,从事油气站场及长输管道完整性管理工作,电话:18809360036, E-mail: zhaokang@pipechina.com.cn

率很难达到 100%，陈波等^[6]发现哈四联合站由于未考虑全裸接地网对阴极保护系统的影响，投产初期阴极保护系统有效保护效率仅有 60%。在美国、中国和巴基斯坦等国家大量报道了由于接地系统影响而导致阴极保护系统发生异常的事件^[7-12]。

站场内接地网的存在，不仅造成了大的阴极保护电流需求量，还带来了严重的屏蔽与干扰问题，严重影响了区域阴极保护的效果和系统的长期稳定运行。为了降低接地网对管网的影响，滕延平等^[13]采用电流环法、钳型电流表等电流测量方法及设备，对阴极保护存在绝缘故障的站场进行了排查，找出了故障位置。朱加祥等^[14]在设计大型已建油库的阴极保护系统时，认为确定管道的电流需求量和阳极地床的设计十分重要，使用馈电试验确定了不同库区所需要的保护电流密度，设计了合适的阳极地床以避免接地的干扰。随着计算机的发展，研究人员还能借助数值模拟技术研究接地系统对阴极保护系统的影响^[15-18]。刘瑶等^[19]结合现场馈电试验和数值模拟计算，对城镇燃气厂站进行阴极保护设计，并现场实际安装，实施后的阴极保护效果达到了理想效果。Cui 等^[20]利用 BEASY 软件分别研究了管道集中区的阴极屏蔽效应、阴极保护的影响以及直流杂散电流对管道腐蚀干扰的影响。本工作开展接地系统对埋地管道腐蚀危害及阴极保护效果的影响规律研究，通过腐蚀电流及阴极保护电场的数值模拟计算，研究确定接地网对埋地管道阴极保护效果的影响规律，对制定埋地管道区域阴极保护与接地网设计布置技术措施具有重要意义。

1 数值模拟

1.1 区域性阴极保护电位分布数学模型

针对阴极保护系统电场的分布情况，构建西部地区某站场的区域性阴极保护的数学模型，数学模型如式(1)所示：

$$\begin{cases} V: \frac{\partial^2 \phi}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \phi}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 \phi}{\partial z^2} = 0 \\ \Gamma_A: \phi = \phi_{a/s} = \phi_a - \Delta\phi_{a/s} \text{ 或 } \sigma_a \frac{\partial \phi}{\partial n} + J_a = 0 \\ \Gamma_C: \sigma_c \frac{\partial \phi}{\partial n} + f(\phi_c - \phi) = 0 \\ \Gamma_I: \partial\phi/\partial n = 0 \\ \phi_a - \phi_c = \Delta\phi_{\text{power}} \end{cases} \quad (1)$$

式(1)中， V 为计算求解的电解质区域， ϕ 为求解区域内各处的电位， x, y, z 为空间坐标； Γ_A 为包围辅助阳极

体的电解质边界， ϕ_a 为辅助/牺牲阳极体电位， $\Delta\phi_{a/s}$ 为辅助/牺牲阳极对电解质电位，即通常所说的阳极极化电位， J_a 为辅助阳极表面极化电流密度， σ_a 为辅助阳极附近电解质的电导率； Γ_C 为包围阴极体的电解质边界， ϕ_c 为阴极体电位， σ_c 为阴极附近电解质的电导率； Γ_I 为电解质绝缘边界； $\Delta\phi_{\text{power}}$ 为外加电源电压。

1.2 几何模型建立

本工作对该站场进行了调研，收集了整个站场内所有埋地构件的几何尺寸、分布位置、表面状况，土壤电阻率分布等基本信息，根据现场勘测与图档资料对比，确定了管网和接地网位置以及几何尺寸，如图 1 所示。建立了区域阴极保护数值模拟计算几何模型，如图 2 所示。站场区域中的埋地金属结构物为工艺管道、水平接地体和垂直接地极。

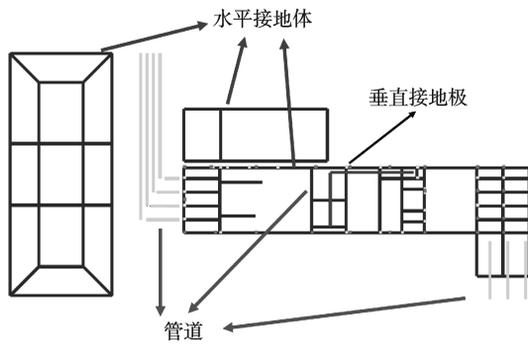


图 1 站场埋地管网和接地系统 1:1 模型
Fig. 1 The 1:1 models of the underground pipe network and grounding system

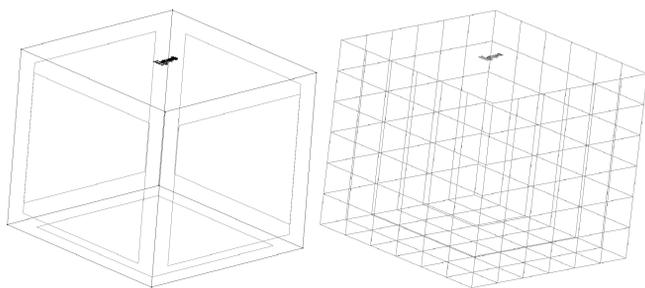


图 2 站场埋地管网和接地系统建模及网格划分
Fig. 2 Modeling and grid division of underground pipe network and grounding system

1.3 边界条件

本数值模拟中涉及辅助阳极、接地系统和管网等结构的边界条件。其中，辅助阳极采用恒电流密度边界条件，即阳极输出电流/阳极表面积；接地系统和管网均采用极化边界条件。

1.3.1 土壤电阻率

土壤电阻率是阴极保护建模中重要的参数，在站

场中,采用温纳四电极交流电法来测量站场土壤电阻率,测试所得土壤电阻率为 $80 \Omega \cdot \text{m}$ 。

1.3.2 极化曲线

使用站场的土壤,测试低碳钢(扁铁)、低电阻模块(碳)、铜接地(铜)、锌接地(锌包钢)、铜接地在该站场土壤环境的极化曲线,获得管道和接地网边界条件,如图3所示。

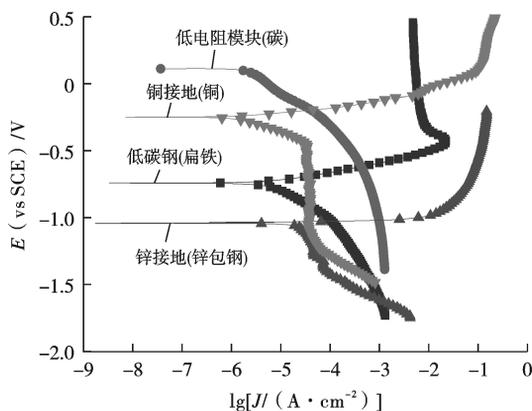


图3 管道和不同接地材料在土壤中的极化曲线
Fig. 3 Polarization curves of pipes and different ground materials in soil

2 计算结果与分析

2.1 无阴极保护时垂直接地极材料对管道电位和腐蚀速率的影响规律

由于垂直接地极全裸暴露于土壤中,与管线电连接,垂直接地极材料将影响管道的腐蚀行为。当垂直接地极材料的自然电位相对于管道自然电位正时,垂直接地极将作为阴极,管线成为阳极,管道将面临很大风险腐蚀。

设置不同垂直接地极材料均距离管道 0.68 m 。垂直接地极有 26 支,水平接地体采用扁铁材料,不同垂直接地极材料对埋地金属结构物电位和腐蚀速率的影响如表 1 所示。

表 1 垂直接地极对管道电位和管道腐蚀速率的影响

Table 1 Effect of vertical grounding pole on potential and corrosion rate of the network

垂直接地极材料	管道电位分布 (vs CSE)/V	管道最正 偏移/mV	腐蚀速率/ ($\text{mm} \cdot \text{a}^{-1}$)
低电阻模块(碳)	-0.560~-0.752	190	32.130
铜	-0.631~-0.754	120	3.548
低碳钢	-0.753~-0.754	0	0.065

当选用低电阻模块垂直接地极材料时,管道电位分布在 $-0.560 \sim -0.752 \text{ V}$ (vs CSE,下同),靠近垂直接

地极的管道电位正向偏移 190 mV ,其腐蚀速率为 32.130 mm/a ,影响范围为 3 m ,管道面临严重的腐蚀风险;当垂直接地极采用铜材料时,管道电位分布在 $-0.631 \sim -0.754 \text{ V}$,靠近垂直接地极的管道电位正向偏移 120 mV ,影响范围为 3 m ,其腐蚀速率为 3.548 mm/a ,与垂直接地极采用低电阻模块一样,铜接地材料会对附近管道造成严重的腐蚀;当垂直接地极和水平接地体均采用扁铁材料时,电位未发生偏移,管道发生自腐蚀,自腐蚀速率为 0.065 mm/a 。

2.2 有阴极保护时接地对管道阴极保护效果的影响规律

当垂直接地极材料自然电位正于管道的自然电位时,接地系统将对阴极保护系统造成影响。为此,考察了管道之间存在低电阻模块垂直接地极时对管道阴极保护效果的影响,垂直接地极与管道之间的间距很小,仅为 0.2 m ,如图 4 所示。

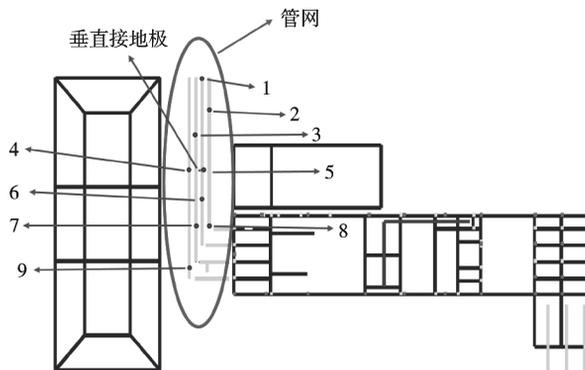


图4 选取管网9个(1~9号)有代表性位置点,记录低电阻模块垂直接地极位于管网中间时,管网在阳极地床保护下的阴极保护电位分布

Fig. 4 Protection potential distribution of the network under the protection of the anode ground bed of the 9 representative position points (1~9) when the vertical grounding pole of the low-resistance module was located in the middle of the network

计算结果如图 5 所示。在低电阻模块垂直接地极的影响下,管道电位分布为 $-0.224 \sim -0.694 \text{ V}$ (vs CSE),管道发生严重腐蚀;在距离管道 0.80 m 补加 1 支辅助阳极,额外输出电流为 0.16 A ,管道的阴极保护电流密度为 20.4 mA/m^2 ,管道电位分布为 $-0.685 \sim -1.224 \text{ V}$,4 号测试点位置过保护,5 号测试点为欠保护区域,垂直接地极对阴极保护系统产生屏蔽效应,靠近接地极的管道未能受到保护;在距离管道 0.80 m 处左右两次各补加一支辅助阳极,额外输出电流为 0.16 A ,管道的阴极保护电流密度为 20.4 mA/m^2 ,阴极保护电位为 $-0.791 \sim -1.228 \text{ V}$,管道在 2 号、3 号、4 号存在过保护,5 号位置存在欠保护,补加 2 支辅助阳极无法使管网受到保护。

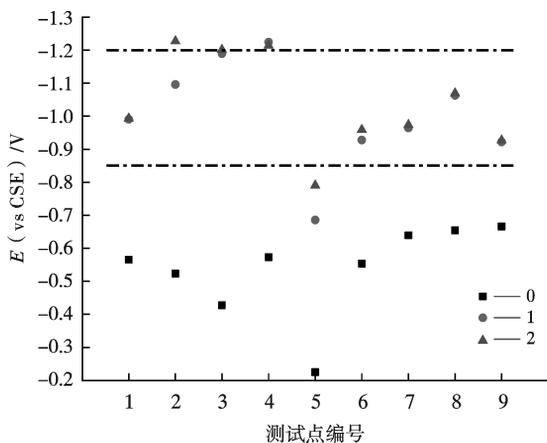


图5 补加1支、2支和不补加辅助阳极时管道测试点的阴极保护电位

Fig. 5 Cathodic protection potential at the test point of the pipeline when 0, 1 and 2 auxiliary anodes are added

以上计算结果说明,若低电阻模块垂直接地极位于密集管网中间,且与管道距离较小时,无法通过增加辅助阳极数量,使管道受到保护,为防止阴极保护系统失效,应将低电阻模块垂直接地极从管网中移除。

2.3 扁铁接地系统对阴极保护效果的影响规律

当水平采用镀锌扁铁材料,垂直接地采用低电阻模块时,考察了远阳极和近阳极2种地床形式对管道阴极保护效果的影响规律,测试点位置如图6所示。

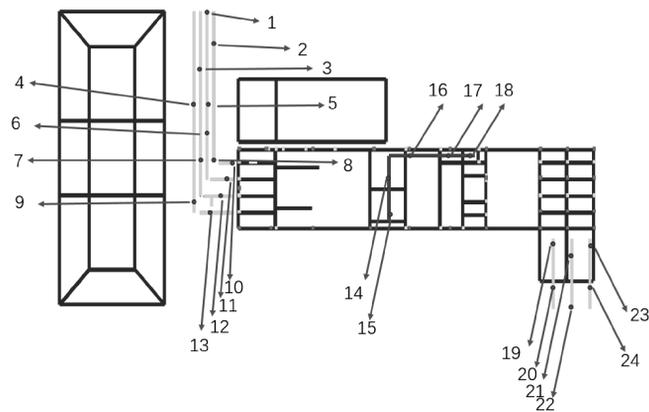


图6 选取管网24个(1~24号)有代表性位置点,记录远阳极地床和近阳极地床对管网的阴极保护电位分布的影响

Fig. 6 The effects of the far anode ground bed and the near anode ground bed on the distribution of cathodic protection potential of the 24 representative position points (1~24)

设置远阳极地床为4组,每组1支,长1 m,埋深1 m,距离管道15 m,计算结果如图7所示,地床总输出电流为20 A,管道附近没有接地网存在的地方处于过保护;其他管道由于有接地系统的存在,有部分阴极保护电流流入接地系统,管道处于欠保护,说明在存在低电阻模块接地极时,远阳极地床形式很难实现站场内

埋地管网各处达到理想的保护效果。

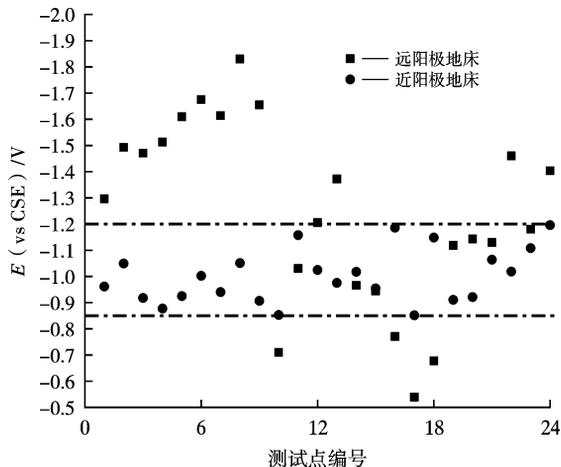


图7 远阳极和近阳极对管道测试点阴极保护电位的影响

Fig. 7 Effect of far anode and near anode on cathodic protection potential of pipeline test point

近阳极优化方案选用阳极4组,每组3支,长1 m,埋深1 m,距离管道1 m,总输出电流2.4 A,所有管线都在保护准则要求的范围内,达到了良好的保护效果,说明通过近阳极的优化分布,可以实现站场埋地管网各处达到理想的保护效果。

综上所述可以看到,站场区域阴极保护中,由于受到接地网的影响,若使用远阳极地床形式,接地网会对阴极保护电流产生屏蔽效应,造成管道存在欠保护区域,仅通过远阳极形式难以消除;而近阳极的优化分布能够减少接地网对管道的干扰,通过优化设计能够实现埋地管道各处达到理想的保护效果。

3 结论

本工作针对接地系统对站场区域阴极保护影响规律进行了数值模拟研究,结论如下:

(1)垂直接地极材料对管道腐蚀速率有较大的影响,当垂直接地材料为低电阻模块(石墨)或铜时,当垂直接地极与管道距离为0.68 m时,管道的腐蚀速率可高达3.548~32.130 mm/a,大大加速管道腐蚀,同时使得附近的管道无法达到理想的保护效果。当垂直接地极材料为低碳钢时,管道电位未发生偏移,垂直接地极不会引起管道电偶腐蚀,管道腐蚀为自腐蚀;

(2)站场区域阴极保护中,远阳极地床无法消除密集管网与接地影响造成的电流屏蔽,通过近阳极的优化分布可以消除电流屏蔽影响,使各个区域达到理想的保护效果。

[参 考 文 献]

- [1] 赵常英. 输油站场区域阴极保护[J]. 石油工程建设, 2010, 36(5): 48-50.
ZHAO C Y. Area cathodic protection system of oil transfer station [J]. Petroleum Engineering Construction, 2010, 36 (5): 48-50.
- [2] 于敏, 邵守斌, 张天宇. 站场区域阴极保护技术参数优选[J]. 油气田地面工程, 2016, 35(6): 65-66.
YU M, SHAO S B, ZHANG T Y. Optimization of cathodic protection technical parameters in station yard area [J]. Oil and Gas Field Surface Engineering, 2016, 35(6): 65-66.
- [3] 蔡德强, 何桥松, 刘念, 等. 已建站场增加区域阴极保护系统实践[J]. 天然气与石油, 2019, 37(4): 90-94.
CAI D Q, HE Q S, LIU N, et al. The practice of regional cathodic protection system is increased in established stations [J]. Natural Gas and Oil, 2019, 37(4): 90-94.
- [4] 吴广春, 杜艳霞, 路民旭, 等. 接地系统对区域阴极保护影响规律及解决措施研究现状[J]. 腐蚀与防护, 2014, 35(11): 1 065-1 068.
WU G C, DU Y X, LU M X, et al. Research status of influence law and solution of grounding system on regional cathodic protection [J]. Corrosion and Protection, 2014, 35 (11): 1 065-1 068.
- [5] 王飞. 区域阴极保护电流密度及阳极地床设计探讨[J]. 工程技术研究, 2017(6): 191-192.
WANG F. Discussion on regional cathodic protection current density and anode bed design [J]. Engineering and Technological Research, 2017(6): 191-192.
- [6] 陈波, 李果, 林涛, 等. 提高站场区域阴极保护效果实践与认知[J]. 天然气与石油, 2018, 36(3): 87-91.
CHEN B, LI G, LI T, et al. The practice and cognition of improving cathodic protection effect in stations [J]. Natural Gas and Oil, 2018, 36(3): 87-91.
- [7] 葛艾天, 刘权, 陈国桥. 铜接地系统对输油气站场埋地管道影响[J]. 天然气与石油, 2010, 28(2): 15-17.
GE A T, LIU Q, CHEN G Q. Influence of copper grounding system on buried pipeline of oil and gas station [J]. Natural Gas and Oil, 2010, 28(2): 15-17.
- [8] 熊金根, 许光达, 张楠. 锌包钢接地极在输油气站场的应用[J]. 石油工程建设, 2013, 39(6): 53-55.
XIONG J E, XUN G D, ZHANG N. Application of zinc-clad steel grounding pole in oil and gas station [J]. Petroleum Engineering Construction, 2013, 39(6): 53-55.
- [9] 郭军科, 于金山, 卢立秋, 等. 镀锌钢在土壤环境中的阴极保护效果评价[J]. 内蒙古电力技术, 2013, 31(4): 42-46.
GUO J K, YU J S, LU L Q, et al. Evaluation of cathodic protection effect of galvanized steel in soil environment [J]. Inner Mongolia Electric Power, 2013, 31(4): 42-46.
- [10] 董华清, 马书江, 徐焕辉. 在长输管道接地系统应用惰性材料的危害[J]. 全面腐蚀控制, 2019, 33(5): 21-24.
DONG H Q, MA S J, XU H H. Hazards of inert materials used in long distance pipeline grounding systems [J]. Total Corrosion Control, 2019, 33(5): 21-24.
- [11] 李雪, 李凯, 曾宇平, 等. 任丘合建站接地网与区域阴极保护系统兼容性分析[J]. 现代化工, 2015, 35(12): 176-177.
LI X, LI K, ZENG Y P, et al. Analysis of compatibility between ground network and regional cathodic protection system of co-built station [J]. Modern Chemical Industry, 2015, 35(12): 176-177.
- [12] 董洪稳, 曲超, 秦丕伟, 等. 接地材料在大型 LNG 储罐项目中的应用[J]. 科学管理, 2020(2): 189-190.
DONG H W, QU C, QIN P W, et al. Application of ground materials in large LNG storage tank projects [J]. Scientific Management, 2020(2): 189-190.
- [13] 滕延平, 李斌, 刘文会, 等. 电流法在站场阴极保护绝缘故障排查中的应用[J]. 管道技术与设备, 2018(3): 37-40.
TENG Y P, LI B, LIU W H, et al. Application of current method in fault detection of cathodic protection insulation in station [J]. Pipeline Technology and Equipment, 2018(3): 37-40.
- [14] 朱加祥, 贾光猛, 赵常英, 等. 已建特大型油库的区域阴极保护系统设计[J]. 腐蚀与防护, 2018, 39(9): 722-727.
ZHU J X, JIA G M, ZHAO C Y, et al. Design of regional cathodic protection system for a large oil depot [J]. Corrosion and Protection, 2018, 39(9): 722-727.
- [15] 王谦, 张德意, 黄一. 一种用于阴极保护数值模拟的高性能计算方法[J]. 腐蚀与防护, 2019, 40(4): 287-292.
WANG Q, ZHANG D Y, HUANG Y. A high performance computing method for numerical simulation of cathodic protection [J]. Corrosion and Protection, 2019, 40(4): 287-292.
- [16] 陈涛涛, 赵茜, 杜艳霞, 等. 某燃气门站区域阴极保护优化方案确定[J]. 腐蚀与防护, 2021, 42(11): 86-91.
CHEN T T, ZHAO Q, DU Y X, et al. The optimization scheme of cathodic protection in a gas gate station [J]. Corrosion and Protection, 2021, 42(11): 86-91.
- [17] 邓伟林, 邓勇刚, 任建, 等. 数值模拟在某油气处理厂区域阴极设计中的运用[J]. 材料保护, 2019, 52(10): 148-152.

- sion environment [J]. *Materials Protection*, 2018, 51 (12): 28-32
- [6] 康华伟. 汽车用冷轧 HSLA 钢带的涂装性能研究与分析 [J]. *材料保护*, 2021, 54(12): 132-136.
KANG H W. Research and analysis on coating performance of cold-rolled HSLA steel strip for automobile [J]. *Materials Protection*, 2021, 54 (12): 132-136.
- [7] 魏宝民, 何召龙, 王孝建, 等. 材料成分对热镀锌钢板性能及表面质量的影响 [J]. *中国冶金*, 2020, 30(10): 71-75.
WEI B M, HE Z L, WANG X J, et al. Effect of material composition on properties and surface quality of hot-dip galvanized steel sheet [J]. *China Metallurgy*, 2020, 30 (10): 71-75.
- [8] 康永林, 唐 荻, 王先进. 汽车板的成分组织及工艺控制 [J]. *轧钢*, 1996, 12(6): 53-56.
KANG Y L, TANG D, WANG X J. Composition, structure and process control of automobile plate [J]. *Steel Rolling*, 1996, 12 (6): 53-56.
- [9] 王 瑾, 罗晓阳, 赵小龙, 等. 磷、钛对含磷 IF 高强钢织构的影响 [J]. *中国冶金*, 2017, 27(2): 28-32.
WANG J, LUO X Y, ZHAO X L, et al. Effect of phosphorus and titanium on the texture of IF high-strength steel containing phosphorus [J]. *China Metallurgy*, 2017, 27 (2): 28-32.
- [10] 于 洋, 惠亚军, 王 畅, 等. 高强 IF 钢第二相粒子的应变诱导析出行为 [J]. *中国冶金*, 2018, 28(7): 13-18.
YU Y, HUI Y J, WANG C, et al. Strain induced precipitation behavior of the second phase particles in high-strength IF steel [J]. *China Metallurgy*, 2018, 28 (7): 13-18.
- [11] 胡华东. 热镀锌汽车外板烘烤硬化钢 H220BD+Z 产品开发 [J]. *钢铁钒钛*, 2018, 39(5): 157-161.
HU H D. Product development of baking hardened steel H220BD+Z for hot-dip galvanized automobile outer plate [J]. *Iron Steel Vanadium and Titanium*, 2018, 39 (5): 157-161.
- [12] 杨红来, 杨源华, 张亚君. 低合金高强钢冷轧产品 HC420LA 的研制与开发 [J]. *江西冶金*, 2020, 40(3): 18-22.
YANG H L, YANG Y H, ZHANG Y J. Research and development of cold rolled low alloy high strength steel product HC420LA [J]. *Jiangxi Metallurgy*, 2020, 40 (3): 18-22.
- [13] 马江南, 杨才福, 王瑞珍. 微合金钢回温变形时的组织转变和铁素体动态再结晶行为 [J]. *材料工程*, 2015, 43 (11): 24-31.
MA J N, YANG C F, WANG R Z. Microstructure transformation and dynamic recrystallization behavior of ferrite in microalloyed steel during warm deformation [J]. *Materials Engineering*, 2015, 43 (11): 24-31.
- [14] 康 涛, 陈 斌, 赵征志, 等. 600MPa 级低合金高强钢的组织调控与工艺优化 [J]. *中国冶金*, 2019, 29(9): 45-50.
KANG T, CHEN B, ZHAO Z Z, et al. Structure control and process optimization of 600MPa low alloy high strength steel [J]. *China Metallurgy*, 2019, 29 (9): 45-50.
- [15] 李春诚, 佟铁印, 王亚东, 等. 连退工艺对低合金高强钢 HC300LA 力学性能的影响 [J]. *中国冶金*, 2017, 27(3): 28-31.
LI C C, TONG T Y, WANG Y D, et al. Effect of continuous annealing process on mechanical properties of low alloy high strength steel HC300LA [J]. *China Metallurgy*, 2017, 27 (3): 28-31.
- [16] 尹翠兰, 康华伟. 平整横折纹产生原因分析与改进措施 [J]. *山东冶金*, 2011, 33(6): 23-24.
YIN C L, KANG H W. Cause analysis and improvement measures for flat horizontal crease [J]. *Shandong Metallurgical*, 2011, 33 (6): 23-24.
- [17] 陈小虎, 李守华, 曹晓恩, 等. 汽车用低合金高强钢 HC500LA 连续退火工艺 [J]. *材料热处理学报*, 2021, 42 (4): 132-137.
CHEN X H, LI S H, CAO X E, et al. Continuous annealing process of low alloy high strength steel HC500LA for automobile [J]. *Journal of Material Heat Treatment*, 2021, 42 (4): 132-137.

[编校:魏兆军]

(上接第 200 页)

- DENG W L, DENG Y G, REN J, et al. Application of numerical simulation in cathodic protection design of an oil and gas treatment station [J]. *Materials Protection*, 2019, 52 (10): 148-152.
- [18] 池 恒, 谷 丰, 崔 伟, 等. 某油气站场接地系统对区域阴极保护效果影响规律的计算分析及处理方法 [J]. *腐蚀与防护*, 2021, 42(1): 45-49.
CHI H, GU F, CUI W, et al. Calculation, analysis and treatment of the influence law of grounding system on regional cathodic protection effect in an oil and gas station [J]. *Corrosion and Protection*, 2021, 42 (1): 45-49.
- [19] 刘 瑶, 尹志彪, 邢琳琳, 等. 城镇燃气厂站区域阴极保护方案研究及应用 [J]. *城市燃气*, 2018(1): 21-27.
LIU Y, YIN Z B, XIN L L, et al. Research and application of regional cathodic protection scheme in urban gas station [J]. *City Gas*, 2018(1): 21-27.
- [20] CUI G, LI Z. Local cathodic protection design based on numerical simulation [J]. *Anti-Corrosion Methods and Materials*, 2015, 62(6): 407-415.

[编校:魏兆军]