

高矿化水环境下除油器内强制电流 阴极保护技术应用

宋刚¹, 高秋英^{2,3}, 曾文广^{2,3}, 刘强^{2,3}, 刘强⁴

(1. 中国石油化工集团公司生产经营管理部, 北京 100728;

2. 中国石油化工股份有限公司西北油田分公司, 新疆 乌鲁木齐 830011;

3. 中国石油化工集团公司碳酸盐岩缝洞型油藏提高采收率重点实验室, 新疆 乌鲁木齐 830011;

4. 安科工程技术研究院(北京)有限公司, 北京 102209)

[摘要] 塔河油田污水处理系统介质工况复杂苛刻,除油器采用强制电流阴极保护技术可以有效控制站场腐蚀、延长使用寿命及提高除油效率。利用理论和实践相结合的研究方法,结合国内外标准规范,从设计、施工、评价3方面出发,提出了强制电流参数的计算方式、辅助阳极块的选取、恒电位仪的选取,介绍了辅助阳极块安装位置和安装形式,总结了施工质量控制关键点和要求,分析探讨了强制电流阴极保护技术现场应用情况,从应用前必要性分析、现场参数确定、效果评价3个层次分析其在塔河油田的适用性。事实证明:现场应用后有效控制了污水处理系统设备腐蚀问题,保障了油气处理系统的安全和稳定运行。

[关键词] 油田;强制电流阴极保护;除油器

[中图分类号] TG174.41 **[文献标识码]** A **doi:** 10.16577/j.issn.1001-1560.2022.0233

[文章编号] 1001-1560(2022)08-0178-05

Application of Forced Current Cathodic Protection Technology in Oil Remover under Highly Mineralized Water Environment

SONG Gang¹, GAO Qiu-ying^{2,3}, ZENG Wen-guang^{2,3}, LIU Qiang^{2,3}, LIU Qiang⁴

(1. Production and Operation Management Department of China Petroleum and Chemical Corporation, Beijing 100728, China;

2. Northwest Company of China Petroleum and Chemical Corporation, Urumqi 830011, China;

3. Key Laboratory of Enhanced Oil Recovery in Carbonate Fractured-Vuggy Reservoirs, SINOPEC, Urumqi 830011, China;

4. Safetech Research Institute Co., Ltd., Beijing 102209, China)

Abstract: The working condition of medium in the Tahe Oilfield sewage treatment system is complicated and harsh, and the forced current cathodic protection technology can effectively control the station corrosion, prolong the service life and improve the oil removal efficiency. Based on the research method of combining theory with practice and taking into account the relevant domestic and foreign standards and codes, the calculation method of the forced current parameters, the selection of the auxiliary anode block and the selection of the potentiostat were put forward from the aspects of design, construction and evaluation. The installation position and form of the auxiliary anode block were introduced, the key points and requirements of the construction quality control were summarized, and the field application of the forced current cathodic protection technology was analyzed and discussed. Besides, its applicability in Tahe Oilfield was analyzed from three levels: pre-application necessity analysis, field parameter determination and effect evaluation. It was proved that after applying the above-mentioned technology, the corrosion problem of sewage treatment system was effectively controlled, the safe and stable operation of the oil and gas processing system was ensured.

Key words: oil field; forced current cathodic protection; oil remover

[收稿日期] 2022-02-26

[基金项目] 国家重大专项“塔里木盆地碳酸盐岩油气田提高采收率关键技术示范工程”(2016ZX05053);中国石化重点项目课题“站内设备腐蚀评估与防护技术研究”(319016-5)资助

[通信作者] 高秋英(1980-),副研究员,硕士研究生,主要从事油田腐蚀与防护技术研究工作,电话:0991-3161043,E-mail: gaoqy.xbsj@sinopec.com

0 前言

塔河油田产出水矿化度可达 230 000 mg/L, 含氯 140 000 mg/L, 易于结垢、结盐, 造成碳钢设备腐蚀, 污水处理系统具有低 pH 值(5.5~6.1)、含 H₂S、CO₂ 及曝氧的特点, 现场挂片监测来水平均腐蚀速率和点腐蚀速率均达到 NACE RP 0775-2005 规定的严重水平^[1]。近几年, 压力容器的腐蚀呈现逐年上升趋势, 约 80% 腐蚀主要集中在压力容器的内壁本体。除油器是油田开发油气水集输处理工艺中重要的压力设备之一, 其内部结构复杂, 且处理的介质腐蚀性强, 工况苛刻。除油器本体频繁发生腐蚀穿孔致使设备功能无法正常发挥, 干扰了生产的平稳运行, 并导致每年除油器检维修成本费用的大幅度增加, 同时带来安全和环保隐患。

针对除油器内腐蚀问题, 可供选择的成熟技术通常有 3 种: (1) 内涂层防护技术, 但涂料在高氯离子环境下防腐效果较差, 且内构件结构较为复杂, 施工难度大, 施工质量难以保证^[2]; (2) 缓蚀剂防护技术, 除油器内部流体流态及流速变化大, 无法达到理想的防护效果^[3]; (3) 牺牲阳极防护技术, 除油器各部位会因距离牺牲阳极位置的远近不同导致保护电流分布不均匀, 个别位置存在死角, 保护不到位。同时, 阳极材料消耗大更换频繁, 更换过程难度较大, 阳极块成本较高, 经济性较差^[4]。因此有必要优选一种可从本质上控制污水处理系统除油器腐蚀的技术, 减少设计使用年限内腐蚀穿孔对生产和安全带来的不利影响, 有效延长除油器运行服役期限。

强制电流阴极保护技术通过施加直流电源提供保护电流, 用于改变周围环境的电位, 使得需要保护的设备的电位一直处在低于周围环境的状态下, 强行抑制设备表面的腐蚀电化学反应, 来实现对阴极的保护^[5], 具有在苛刻复杂环境中适应性强、能够灵活控制阴极保护电流从而实现精准控制、保护范围大、可在不影响生产平稳运行的前提下进行长期有效保护的优点, 在塔河油田复杂腐蚀环境和特殊工况要求下具有明显的适用性, 并已取得了明显的经济与社会效益。

1 除油器内部阴极保护设计

1.1 强制电流阴极保护系统组成

强制电流阴极保护系统主要包括直流输出电源设备——带液晶视窗的防爆控制箱的恒电位仪、辅助阳极、参比电极、阳极电缆、阴极电缆、防爆接线箱。

1.2 强制电流基本参数确定

将接地系统纳入保护范围的前提下, 根据除油器内壁面积所设计的保护电流密度为 20~50 mA/m²; 阴极保护电流按照下式进行计算^[6]:

$$I = F \sum_{i=1}^n S_i J_i \quad (1)$$

式中: I 为总保护电流数值, A; F 为电流裕量, 取 1.2; S_i 为被保护表面积数值, m²; J_i 为被保护结构所需电流密度, A/m²。

以塔河油田某除油器为例, 其材质为 Q345R, 处理污水具有高矿化度(2.1×10⁵ mg/L)、高 Cl⁻(1.3×10⁵ mg/L)、低 pH 值(5.5~6.1)、含 H₂S、CO₂ 及的特点。将电压表接地极连接在 Ag/AgCl 参比电极上, 将电压表的正极与被除油器连接, 最后将电压表调至 2 V 的量程上读取除油器本体自然电位为 -1.20~-0.55 V, 根据实践经验, 保护电位比自然电位负 0.20~0.30 V, 由此得出除油器的保护电位为 -1.50~-0.85 V(相对于 Ag/AgCl 参比电极)。

1.3 辅助阳极选择

塔河油田污水处理系统除油器处理介质苛刻, 传统的辅助阳极消耗速度快, 达不到设计要求的服役年限。贵金属氧化物辅助阳极可根据介质环境调整阳极表面氧化物成分, 增强环境适应性, 拥有耐酸性能、消耗率非常低和输出电压稳定等优点, 因此选用贵金属氧化物辅助阳极。

根据除油器各个仓室来计算保护面积:

$$(1) \text{ 缓冲隔板与进水缓冲仓面积: } S_1 = S_{\text{封头}} + S_{\text{隔板}} + S_{\text{筒体}}$$

$$(2) \text{ 粗粒化仓面积: } S_2 = S_{\text{筒体}} + S_{\text{隔板}} + S_{\text{油水圈}} + S_{\text{支架}}$$

$$(3) \text{ 除油段与沉降仓面积: } S_3 = S_{\text{筒体}} + S_{\text{隔板}} + S_{\text{挡板}} + S_{\text{支架}}$$

$$(4) \text{ 出水缓冲仓内外侧面积: } S_4 = S_{\text{出水缓冲仓}}$$

$$(5) \text{ 出水缓冲仓与外壳壳体处面积: } S_5 = S_{\text{封头}} + S_{\text{隔板}} + S_{\text{筒体}}$$

$$\text{整个除油器需要保护的面积: } S = S_1 + S_2 + S_3 + S_4 + S_5 \quad (2)$$

按照除油器保护面积, 考虑强制电流阴极保护电流的均匀分布和保护效果, 同时兼顾现场施工便捷等因素。

辅助阳极质量计算:

$$W_a = \frac{T_a \times \omega_a \times I}{K} \quad (3)$$

式中: W_a 为辅助阳极总质量, kg; T_a 为辅助阳极设计寿

命, a ; ω_a 为辅助阳极消耗率, $\text{kg}/(\text{A} \cdot \text{a})$; I 为保护电流, A ; K 为辅助阳极利用系数, 取 $0.70 \sim 0.85$ 。

辅助阳极块数量通过 W_a/G 计算得出, 其中 G 表示每块辅助阳极块的质量。

根据各仓室的功能、内构件不同, 在保证保护电流的前提下设置安装位置、安装方式有所不同, 详见图 1~图 4。为避免因水流冲刷产生大幅摆动损伤辅助阳极, 在支架上垫有经过防水处理的木方, 并用 $6 \text{ m}^2 \text{ BV}$ 电线将辅助阳极焊接阳极支架上。

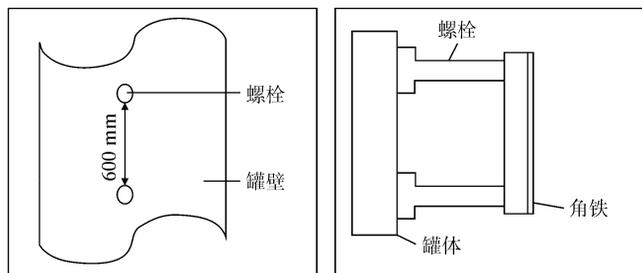


图 1 进水缓冲仓内辅助阳极块安装位置示意图

Fig. 1 Installation diagram of auxiliary anode block in inlet buffer bin

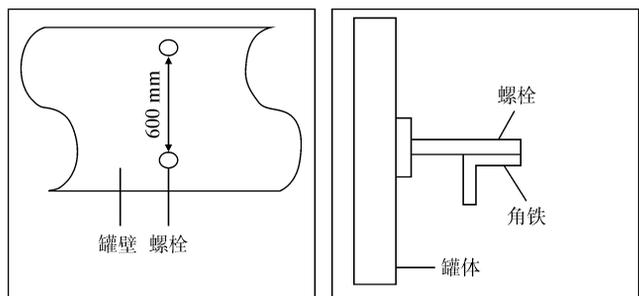


图 2 粗粒化仓内辅助阳极安装位置示意图

Fig. 2 Installation diagram of auxiliary anode in coarse-granulating chamber

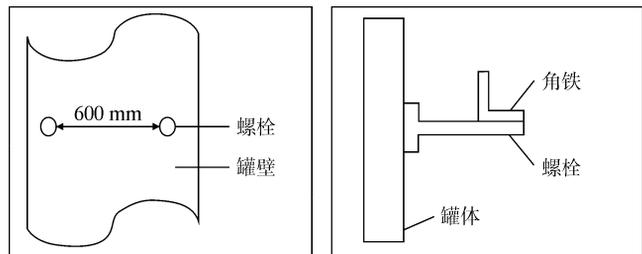


图 3 除油仓、沉降仓内辅助阳极块焊接安装示意图

Fig. 3 Welding installation diagram of auxiliary anode block in oil removal tank and settling tank

1.4 恒电位仪选取

水环境中接水电阻:

$$R = (\rho/2L)(\ln 4L/r - 1) \quad (4)$$

其中: R 为单只阳极接水电阻, Ω ; ρ 是介质电阻率,

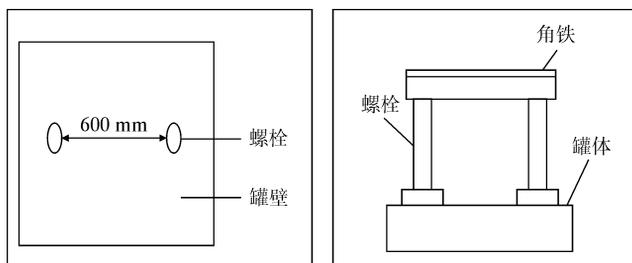


图 4 锥形反应筒内辅助阳极安装示意图

Fig. 4 Installation diagram of auxiliary anode in conical reaction cylinder

$\Omega \cdot \text{m}$; L 为阳极长度, m ; r 为阳极等效半径, m 。

$$R_c = \frac{R}{n} \delta \quad (5)$$

其中: R_c 为阳极组接水电阻, Ω ; n 是管状贵金属氧化物阳极数; δ 为系数, 取 1.12 。

阴极保护回路电阻:

$$R_{\text{总}} = R_c + R_{\text{导线}} + R_{\text{界面}} \quad (6)$$

其中: R_c 为阳极组接水电阻, Ω ; $R_{\text{导线}}$ 为导线自身电阻, Ω ; $R_{\text{界面}}$ 为阳极组与导线连接界面处电阻, Ω 。

恒电位仪负荷 $P = I^2 \cdot R$, 根据计算结果选用最大输出电流和最大输出电压的恒电位仪^[7]。

1.5 施工安装设计要求

除油器内壁焊接支架, 将辅助阳极和参比电极捆扎在支架上; 阴极电缆、阳极电缆、参比电缆及零位电缆需穿越除油器内壁隔板的穿线孔, 所有穿线孔在穿线后均用环氧树脂封堵; 将加药管线与除油器罐体连接处改造为三通, 将阳极电缆和参比电缆引出除油器接至恒电位仪, 三通处需加绝缘法兰并用环氧树脂密封, 实现接口连接的密封和绝缘^[8]。

1.6 调试工作

对阴极、阳极、参比电极进行检查, 主要检查罐体的通电点以及接线情况等, 在保证这些都准确无误之后, 进行送电调试工作。在初期的调试工作中, 首先进行低电压的送电, 这主要是由于大型的除油器处理介质矿化度高, 罐体的内部导电性能是非常强的, 罐体就是一个强大的导体, 所以需要等除油器内壁被充分地极化之后, 才能够产生绝缘的功能, 才可以在罐壁表面上形成一个具有绝缘性质的钝化膜, 这样电流在通过内壁时强度就会大大地降低并且可以将其稳定在一定的范围之内, 至少可以稳定几天的时间, 使得电位逐渐地达到规定值之后, 输出的电流与电压也会随之稳定, 表明调试工作成功。

2 现场应用效果探讨

2.1 技术必要性分析

污水处理系统3号高效聚结除油器在强腐蚀性介质环境下投产不到2a就频繁发生腐蚀穿孔,内构件被腐蚀,被迫停用,除油器腐蚀穿孔后采用更换内构件处理,影响现场污水处理系统运行同时还产生高额费用,仅更换除油器内构件费用高达63万元,抢维修和治污费等各类经济损失高达193.85万元。另一方面除油器腐蚀穿孔后,除油效率不高,仅靠过滤器处理后的污水水质不能稳定达标,还污染后端过滤器的滤料,处理水质不能稳定达标导致注水井注水压力上升、吸水能力下降,水井酸化堵等措施工作量增加,造成采油成本增大^[9]。

2017年在联合站污水处理系统3号除油器进行了强制电流阴极保护技术安装施工,经过近20d调试,达到设计保护电流及保护电位,投入正常运行。

2.2 强制电流参数计算

强制电流保护参数确定:

(1)3号除油器最大保护电流量 5.9 A $I = J \cdot S = 50 \times 10^{-3} \times (1.5^2 \pi \times 2 \times 1.2 + 3\pi \times 9.6) \approx 5.9(\text{A})$ 。

(2)保护电流密度 $J_p = \frac{I}{S} = \frac{5.9}{168.7} \times 1000 = 35\text{ mA/m}^2$ 。

(3)保护电位 $-0.85 \sim -1.50\text{ V}$ 之间(相对于Ag/AgCl参比电极)。

(4)单支阳极接水电阻 $0.9\ \Omega$, $R = (\rho/2L)(\ln 4L/r - 1) = 50/(2 \times 75)(\ln 4 \times 75/8.2 - 1) \approx 0.9\ \Omega$ 。

(5)阳极组接水电阻 $0.1\ \Omega$, $R_c = \frac{R}{n} \delta = \frac{0.9}{10} \times 1.12 \approx 0.1\ \Omega$ 。

(6)阴极保护回路电阻 $1.5\ \Omega$, $R_{\text{总}} = R_c + R_{\text{导线}} + R_{\text{界面}} \approx 1.5\ \Omega$ 。

(7)恒电位仪负荷 $P = I^2 \cdot R \approx 55\text{ W}$,根据计算结果选用最大输出电流10A,最大输出电压20V的恒电位仪。

按照3号除油器规格、尺寸和内壁面积,通过式(2)计算出内壁面积为 376.8 m^2 ,设定每块辅助阳极块重量为8.2kg,得到块数为10,设计辅助阳极10支,辅助阳极支架共10套,完成阴极保护所需主要材料清单见表1。考虑强制电流阴极保护电流的均匀分布、保护效果,同时兼顾现场施工便捷等因素,安装位置分别是进水缓冲仓1套,粗粒化仓2套(内有滤料),除油段2

套,沉降仓2套,锥形反应筒内1套,出水缓冲仓2套,具体见图5。

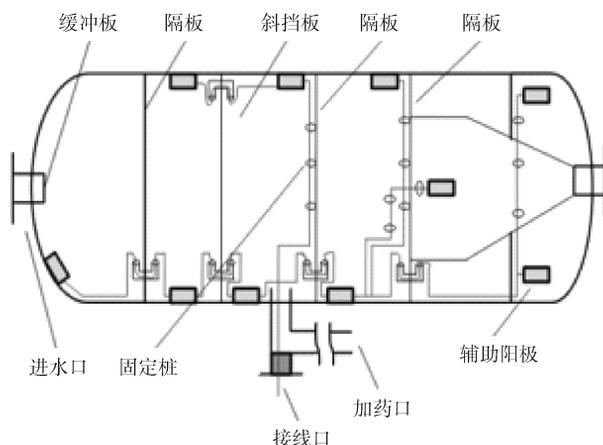


图5 除油器内贵金属辅助阳极块设计安装分布图

Fig. 5 Design and installation distribution diagram of precious metal auxiliary anode block in oil remover

表1 3号除油器强制电流阴极保护材料清单

Table 1 List of forced current cathodic protection materials for 3# oiler

序号	名称	单位	数量	型号
1	恒电位仪	台	1	20 V/10I
2	管状贵金属氧化物阳极	块	10	25×1 000 mm
3	Ag/AgCl 参比电极	支	2	25×200 mm
4	阳极电缆	m	150	
5	阴极电缆	m	150	
6	防爆接线箱	台	1	
7	测试桩	台	1	

2.3 效果评价

截止2021年2月底,安装强制电流阴极保护装置的3号除油器稳定运行达上千d,运行期间未发生腐蚀穿孔现象;同期投产的另一台除油器,其内防护措施采用的是环氧涂层,未采用强制电流阴极保护技术,投产不到半年发生了10余次刺漏穿孔,导致系统不能平稳运行,除油效率下降,后端过滤器滤料污染严重。在此期间处理水质不达标,严重影响注水生产,最终过滤器投产1年时间后,被迫停产检修更换滤料,给站场安全清洁生产带来极大风险,同时还增加了抢维修工作量和费用。

综上,有效实现除油器腐蚀防护,有效控制了压力容器腐蚀造成的腐蚀穿孔和内构件腐蚀,降低了穿孔刺漏导致站场内环境污染和生产安全风险,保证了污水处理系统正常运行,降低了站场管理操作难度,其节能降耗、降本的社会效益显著。从投入产出比看,该项

技术的成功实施发挥了除油器的最大潜能,提高了一号联污水处理系统的运行效率,消除了水质处理不达标的安全隐患,为企业安全生产、节能降耗发挥了重要作用,具有显著的经济效益和社会效益。

3 结论与建议

(1)除油器作为油田产出水处理工艺中重要的压力设备之一,在塔河油田高矿化度、低 pH 值、易于结垢、结盐的复杂腐蚀环境下,除油器本体内壁及内构件频繁发生的腐蚀穿孔,致使设备功能无法正常发挥,带来安全和环保隐患,严重影响现场正常的生产运行。

(2)通过实际勘测及理论计算,设置了 3 号除油器内强制电流阴极保护参数,并选取贵金属氧化物辅助阳极在现场应用材料,现场安装并实施,运行效果良好,有效控制了除油器内壁腐蚀。

(3)与同期投产,相同介质环境和工况、但是未采用强制电流阴极保护技术的除油器运行情况对比,该技术具有相对较好的防腐优势,运行期间控制腐蚀效果明显,经济效益显著,同时处理水质达到回注要求,保障了现场注水生产,也为塔河油田站内设备电化学防腐技术推广的应用提供了参考。

[参 考 文 献]

- [1] 高秋英,管善峰,宫如波,等.塔河油田腐蚀工况下碳钢的硫酸盐还原菌腐蚀行为实验[J].油气储运,2020,39(10):1142-1147.
- GAO Q Y, GUAN S F, GONG R B, et al. Corrosion behavior of carbon steel by sulfate reducing bacteria under corrosion condition in Tahe Oilfield[J]. Oil & Gas Storage and Transportation, 2020, 39(10): 1142-1147.
- [2] 张春霖,张旭军.新型油水分离器在油田污水处理中的应用实验[J].石油化工环境保护,2003(1):30-33.
- ZHANG C L, ZHANG X J. Application test of new-style oil-water separator in oilfield treating drainage of oil field[J]. Environmental Protection Petrochemical Industry, 2003(1):30-33.
- [3] 耿方志,孟江,高秋英,等.基于防腐的油田污水改性研究[J].天然气技术与经济,2019,13(4):46-50.
- GENG F Z, MENG J, GAO Q Y, et al. Anti-corrosion-based oilfield wastewater modification[J]. Natural Gas Technology and Economy, 2019, 13(4):46-50.
- [4] 丰国斌.一种新型高效除油器的研制与应用[J].工业用水与废水,2003(5):69-72.
- FENG G B. Development and application of a new high-effi-

ciency oil remover[J]. Industrial Water & Wastewater, 2003(5):69-72.

- [5] 张惠生,刘春华,吴明财.谈阴极保护技术在分离器防腐中的应用[J].内蒙古石油化工,2004(3):94.
- ZHANG H S, LIU C H, WU M C. Application of cathodic protection technology in separator anticorrosion[J]. Inner Mongolia Petrochemical Industry, 2004(3):94.
- [6] GB/T 21448-2017,埋地钢制管道阴极保护技术规范[S].
- GB/T 21448-2017, Specification for cathodic protection for underground steel pipelines[S].
- [7] SY/T 6964-2013,石油天然气站场阴极保护技术规范[S].
- SY/T 6964-2013, Specification of cathodic protection for petroleum & gas station[S].
- [8] 闫冰.高效层叠式除油器设计[D].大庆:东北石油大学,2017.
- YAN B. Efficient cascading degreaser design[D]. Daqing: Northeast Petroleum University, 2017.
- [9] 姚彬,高秋英,杨祖国,等.不同腐蚀环境下压力容器材质耐蚀性评价[J].材料保护,2019,52(3):142-148.
- YAO B, GAO Q Y, YANG Z G, et al. Evaluation of corrosion resistance of pressure vessel materials under different corrosive environments[J]. Materials Protection, 2019, 52(3):142-148.

[编 校 : 魏 兆 军]

(上 接 第 177 页)

- [5] GB 50991-2014,埋地钢质管道直流干扰防护技术标准[S].
- GB 50991-2014, Technical standard for DC interference mitigation of buried steel pipeline[S].
- [6] GB/T 50698-2011,埋地钢质管道交流干扰防护技术标准[S].
- GB/T 50698-2011, Technical standard for AC interference mitigation of buried steel pipeline[S].
- [7] 冯洪臣.电力输送系统对埋地管道的干扰与防护:中国电机工程学会电磁环境专委会研讨会报告[C].北京:[出版单位不详],2021.
- FENG H C. Mitigation of Stray Current Interfered by Power Transmission System to Pipeline: Report on the Symposium of Electromagnetic Environment Special Committee of China Society of Electrical Engineering[C].Beijing: [s.n.], 2021.
- [8] GB/T 21448-2017,埋地钢质管道阴极保护技术规范[S].
- GB/T 21448-2017, Specification of cathodic protection for buried steel pipelines[S].

[编 校 : 宋 媛]