

# 直流杂散电流干扰缓解方法及其适用性

李伟, 杜艳霞<sup>✉</sup>, 王洁军

北京科技大学新材料技术研究院, 北京 100083

<sup>✉</sup>通信作者, E-mail: duyanxia@ustb.edu.cn

**摘要** 通过室内模拟试验装置, 研究源于强制电流阴极保护系统的直流杂散电流对外部无阴极保护管道干扰的缓解方法, 包括跨接电阻法、牺牲阳极法和金属屏蔽线法。文中主要考察跨接电阻、牺牲阳极位置和材质、金属屏蔽线位置和连接方式等对不同干扰类型的缓解效果和规律, 讨论不同缓解方法的适用性, 并对不同干扰类型提出推荐方法及适用条件, 可为实际工程应用提供借鉴。

**关键词** 埋地管道; 阴极保护; 杂散电流; 缓蚀

**分类号** TG172.84

Mitigation methods and their applicability for DC stray current interference

LI Wei, DU Yan-xia<sup>✉</sup>, WANG Jie-jun

Institute for Advanced Materials and Technology, University of Science and Technology Beijing, Beijing 100083, China

<sup>✉</sup> Corresponding author, E-mail: duyanxia@ustb.edu.cn

**ABSTRACT** Through indoor simulated experimental equipment, mitigation methods which contained the bond resistor method, galvanic anode method and metallic shield method were studied to mitigate DC stray current interference caused by the impressed current cathodic protection system on pipelines without cathodic protection at the external. The influences of bond resistance, galvanic anode location and materials, metallic shield location and connecting methods on the mitigation and regularity for different types of interference were investigated, and the applicability for different mitigation methods was also analyzed. In addition, it can also provide reference for practical engineering with putting forward recommendations and application conditions for different types of interference.

**KEY WORDS** buried pipelines; cathodic protection; stray current; corrosion inhibition

管道运输作为能源输送的主要手段, 具有一次性投入少、运输成本低、安全性高等优势, 尤其适合长距离输送易燃易爆的石油和天然气。随着国民经济的日益发展, 我国能源工业已经进入快速发展期, 各种油气管线建设迎来空前的高峰期。截至2014年底, 我国境内已建成油气管道总里程达11.7万公里<sup>[1]</sup>。管道运输过程中最常见的问题是埋地管道的腐蚀问题, 为了减缓管道腐蚀常常采用防腐层和阴极保护联合保护的方法对管道进行保护<sup>[2-4]</sup>, 保证管道的安全运行。其中, 强制电流阴极保护技术已广泛应用于各种油气管线的保护工程中。但是, 由于地理位置以及其他条件

的限制, 在油气管道的设计和建设过程中不可避免的会出现并行和交叉的情况, 形成所谓的“公共走廊”<sup>[5-6]</sup>。管道密集的交叉和并行, 且不同管线隶属关系不同, 常采用不同的阴极保护系统进行保护, 使得埋地油气管道间阴极保护系统干扰问题日益突出<sup>[7]</sup>。

埋地管线的强制电流阴极保护是由外部电源通过阳极地床经过土壤对被保护管道施加足够的阴极电流对其进行保护, 但源于阴极保护系统泄露的直流杂散电流, 可能会对外部没有保护措施的金属结构物引起直流干扰腐蚀。目前国内外普遍认为, 阴极保护系统对外界的直流干扰包括阳极干扰、阴极干扰、阴/阳极

混合干扰等类型, 尤其在地下金属管网和金属结构物分布密集时, 干扰更为复杂。这些干扰的出现可能会导致阴极保护系统无法正常运行, 被保护管线可能出现欠保护或过保护现象, 使得管道发生腐蚀的风险增大, 甚至可能出现局部穿孔或防腐层剥离的情况<sup>[8]</sup>。因此, 直流杂散电流干扰问题成为实际生产中急需解决的问题。

近年来, 国内外围绕源于阴极保护系统的干扰开展了部分研究。毕武喜等<sup>[9]</sup>采用阴极保护电位、地电位梯度、土壤电阻率测量等方法对国内某处典型的油气管道阴极保护干扰进行检测, 通过分析证明该段管道阴极保护干扰属于典型的阳极干扰, 干扰源为附近管道的阳极地床。采用临时阳极地床试验对治理方案的效果进行预评估, 并建议将阳极地床移至输油站北侧距管道一定距离的位置, 以彻底消除该处阳极干扰。Metwally 等<sup>[10]</sup>研究不同阴极保护系统间干扰的影响因素, 并对阳极干扰进行重点分析。结果表明, 强制电流阴极保护系统会对附近没有进行保护的结构物造成直流杂散电流腐蚀。随着土壤电阻率的降低腐蚀越严重。建议通过增加地床阳极数量以提高阳极电流密度和增大干扰源阳极与结构物间的距离来保护结构物。Adey 等<sup>[11]</sup>通过计算机建模方法对海底结构物的阴极保护系统及系统中回路电流进行研究, 主要目的是为了确保在海上浮式生产储油船(FPSO)的整体运行过程中, 船壳体的强制电流阴极保护系统与海底的牺牲阳极阴极保护系统间的相互干扰降到最低水平, 并为船壳体的关键部位设计了可行的阴极保护系统, 尤其是牺牲

阳极寿命的设计。

目前, 国内外关于直流杂散电流干扰的研究主要集中于杂散电流对外部金属结构物的干扰规律研究, 而关于直流干扰缓解方法的研究, 尤其是不同方法适用性的研究较少。因此, 本文通过室内模拟试验考察跨接电阻、牺牲阳极位置和材质、金属屏蔽线位置和连接方式等对不同干扰类型的缓解效果和规律, 获得不同排流方法的适用条件, 为相关领域的实际问题解决提供重要的理论依据和借鉴意义。对于消除隐患、确保长输油气管道及阴极保护系统的安全有效运行具有重要意义。

## 1 试验装置与方法

### 1.1 模拟试验装置

试验在尺寸为  $845 \text{ mm} \times 625 \text{ mm} \times 445 \text{ mm}$  的塑料试验箱中进行, 采用  $\phi 32 \text{ mm}$  的 Q235 钢管模拟油气输送管道。取两段长度为  $220 \text{ mm}$  的涂层钢管模拟被干扰管道, 每段钢管等距离设置 4 个测试点, 测试点间距为  $60 \text{ mm}$ , 两段管道分别用“管道 A”和“管道 B”表示(被干扰管道); 取长度为  $640 \text{ mm}$  的无涂层钢管模拟受阴极保护的管道, 等距离设置 10 个测试点, 测试点间距仍为  $60 \text{ mm}$ , 该管道用“管道 C”表示(干扰源)。管道 A 和管道 B 分别靠近试验箱边缘并有一定距离, 且管道 A 与管道 B 空间上呈垂直关系; 管道 A 与管道 C 平行且相距一段距离, 其间为阴极保护系统的辅助阳极; 管道 B 与管道 C 的一端垂直相交。试验装置示意图及实物图如图 1 所示。

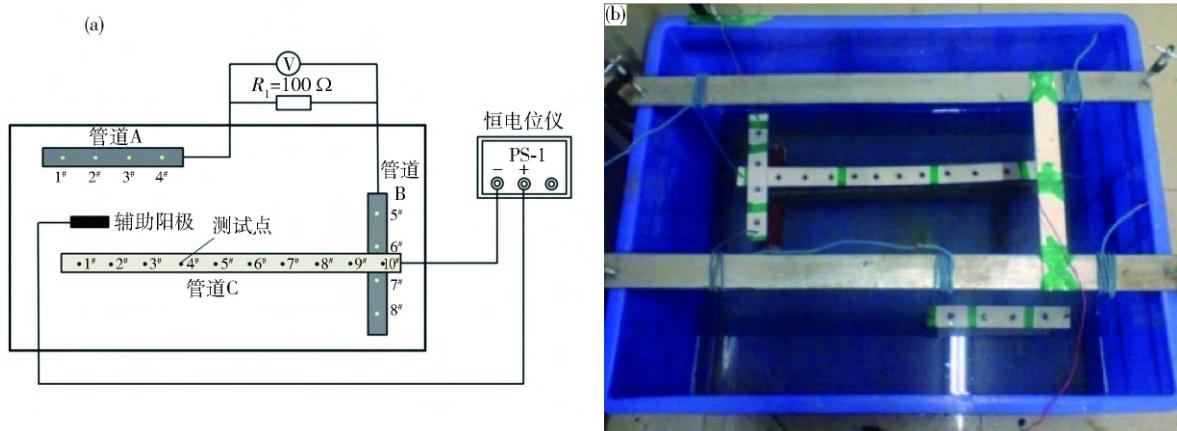


图 1 试验装置示意图( a )及实物图( b )

Fig. 1 Schematic diagram ( a ) and photo ( b ) of experimental equipment

试验用土壤模拟液采用普通自来水, 其电阻率为  $18.24 \Omega \cdot \text{m}$ , 试验温度为室温, 约为  $25^\circ\text{C}$ 。参比电极为饱和甘汞电极(SCE)。用 Fluke 289C 型数字电压表测量管/电解质电位, 用 PS-1 型恒电位/恒电流仪给管道 C 施加阴极保护, 恒流输出, 采用石墨作为辅助阳极。在管道 A 和管道 B 之间串联电阻  $R_1 = 100 \Omega$  通过

测量电阻  $R_1$  两端的电压可以确定经电解质流入管道 A 的杂散电流的大小; 在管道上方固定盐桥, 用于在固定点测量管/电解质电位的变化。

### 1.2 试验过程

#### 1.2.1 自然腐蚀

在图 1 所示的试验装置中进行自然腐蚀电位测量

与干扰模拟试验。在阴极保护系统断开时,模拟各管道的自然腐蚀状态,待各管道在模拟液中极化稳定2 h之后,测量并记录管道A、管道B和管道C的自腐蚀电位。

### 1.2.2 稳态直流干扰模拟试验

自腐蚀电位测量结束后,接通阴极保护系统,恒电位仪设置为恒电位输出,控制电位设置为-1.10 V,给管道C施加阴极保护。待各管道极化稳定2 h之后,测量并记录管道A、管道B和管道C的电位。

### 1.2.3 干扰缓解试验

在试验中,分别采用跨接电阻排流法、牺牲阳极排流法、金属屏蔽线排流法等干扰缓解方法,研究跨接电阻、牺牲阳极位置及材质、金属屏蔽线位置及连接方式对干扰缓解效果的影响。为了评价排流方法的缓解效果,采用国标GB 50991—2014<sup>[12]</sup>评价准则:在管道未施加阴极保护时,当任意点上的管地电位较自然电位正向或负向偏移超过20 mV,确认为存在直流干扰。试验过程如下。

(1) 跨接电阻排流试验。图2为跨接电阻排流试验装置示意图。如图2所示,首先在管道C与管道B之间串联一个跨接电阻 $R_2$ ,将管道C与管道B进行跨接,管道A和管道B纳入阴极保护范围之内。然后将恒电位仪设置为恒流输出,输出电流和上述单独施加阴极保护时的电流一致。待整个系统的管道极化稳定2 h后,测量并记录电阻 $R_1$ 和 $R_2$ 的电压,记流经电阻 $R_1$ 的电流(即由电解质流入管道A的杂散电流)为 $I_1$ ,流经跨接电阻 $R_2$ 的电流(即由管道B流出经跨接线返回恒电位仪的电流)为 $I_2$ ,由管道B流出至电解质的电流 $I_b$ 为电流 $I_2$ 和 $I_1$ 之差(即跨接前 $I_2=0$ , $I_1 \approx I_b$ ;跨接后 $I_b \approx I_2 - I_1$ )。测量并记录管道A、管道B和管道C的电位。选取的跨接电阻值分别为10000、1000、262.4、100、10、1和0.1 Ω,得到不同跨接电阻对干扰缓解效果的影响规律。

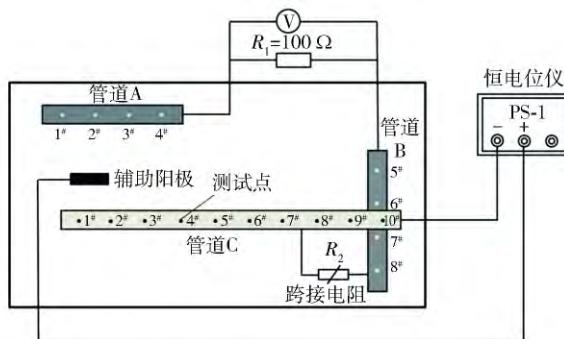


图2 跨接电阻排流试验装置示意图

Fig. 2 Schematic diagram of bond resistor mitigation experiment equipment

(2) 牺牲阳极排流试验。图3为牺牲阳极排流试验装置示意图。牺牲阳极试样的尺寸为8 mm × 8 mm × 40 mm,牺牲阳极的材质分别为Mg合金和Zn合金。牺

牲阳极排流试验共分为四组,牺牲阳极分别设在阳极干扰处(管道A附近)和阴极干扰处(管道B附近)。其具体连接方式分别为:(I) Zn合金牺牲阳极与管道A连接;(II) Mg合金牺牲阳极与管道A连接;(III) Zn合金牺牲阳极与管道B连接;(IV) Mg合金牺牲阳极与管道B连接。每组试验中,测量并记录每段管道的电位,测量 $R_1$ 两端的电压,可得到流经 $R_1$ 的电流 $I_1$ ,得到不同位置和材质的牺牲阳极对干扰缓解效果的影响规律。

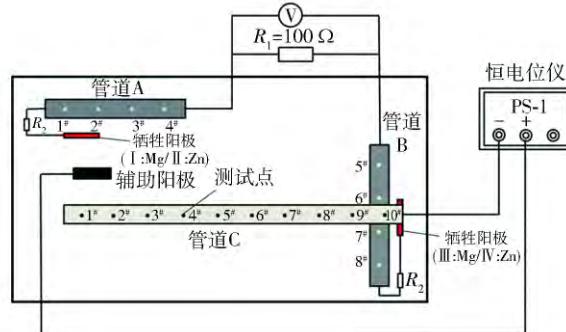


图3 牺牲阳极排流试验装置示意图

Fig. 3 Schematic diagram of galvanic anode mitigation experiment equipment

(3) 金属屏蔽线排流试验。图4为金属屏蔽线排流试验装置示意图。试验采用8 mm × 8 mm × 100 mm的Q235钢作为金属屏蔽线,金属屏蔽线分别设在阳极干扰处(管道A附近)和阴极干扰处(管道B附近)。其具体连接方式分别为:(I) 屏蔽线设在阳极干扰处并与管道A连接;(II) 屏蔽线设在阳极干扰处并与管道C连接;(III) 屏蔽线设在阳极干扰处并与辅助阳极连接;(IV) 屏蔽线设在阴极干扰处并与管道B连接;(V) 屏蔽线设在阴极干扰处并与管道C连接;(VI) 金属屏蔽线设在阴极干扰处并与辅助阳极连接。测量并记录每段管道的电位,测量 $R_1$ 两端的电压,可得到流经 $R_1$ 的电流 $I_1$ ,得到金属屏蔽线的位置和连接方式对干扰缓解效果的影响规律。

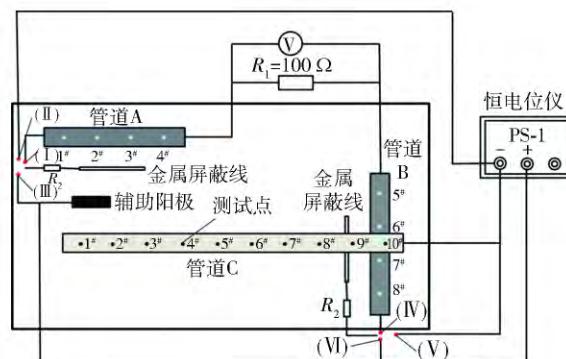


图4 金属屏蔽线排流试验装置示意图

Fig. 4 Schematic diagram of metallic shield mitigation experiment equipment

## 2 结果讨论与分析

### 2.1 自然腐蚀与干扰模拟试验

图5为管道C的自腐蚀电位及其施加阴极保护后的电位。从图5中可以看出,管道C的自腐蚀电位约为-0.74 V (SCE),施加阴极保护后管道电位发生负向偏移,管道的阴极保护电位在-0.91~ -1.13 V (SCE)之间变化,表明管道得到保护。

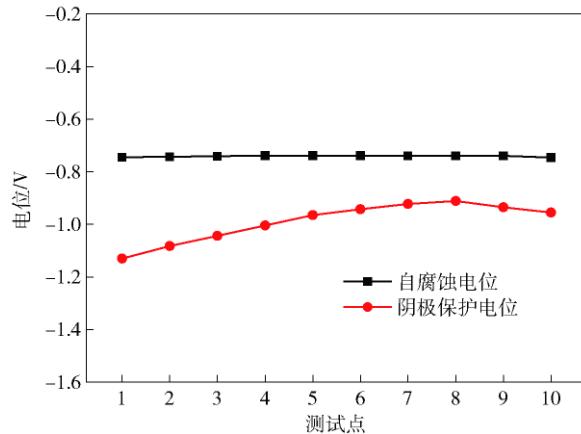


图5 管道C的自腐蚀电位及阴极保护电位

Fig.5 Free corrosion potential and cathodic protection potential of Pipe C

图6为管道A和管道B的自腐蚀电位及其被干扰后的电位。从图6中可以看出,管道A和管道B的自腐蚀电位均为-0.61 V (SCE),受到干扰之后,管道A的电位在-1.23~ -1.49 V (SCE)之间变化,管道B的电位在-0.33~ -0.48 V (SCE)之间变化。管道A的电位整体负向偏移600 mV以上,最大达到884 mV,属于典型的阳极干扰;管道B的电位整体正向偏移100 mV以上,最大达到293 mV,属于典型的阴极干扰。测得通过电阻 $R_1$ 的杂散电流大小为0.759 mA。

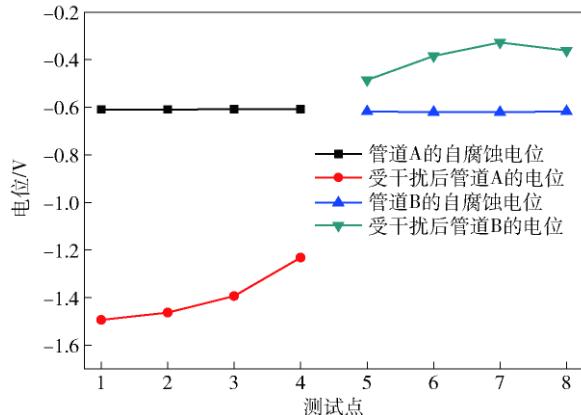


图6 管道A和管道B的自腐蚀电位及其被干扰后的电位

Fig.6 Free corrosion potential and potential under interference of Pipe A and Pipe B

图7为管道C施加阴极保护后试验装置的电流回路示意图。如图7所示,从辅助阳极流出至电解质的

总电流 $I_{cp}$ 主要通过两个路径回到恒电位仪:一是大部分电流(即管道C的阴极保护电流 $I'_{cp}$ )由电解质流入管道C后经导线返回到恒电位仪;二是少部分的电流由电解质流入管道A(导致管道A产生阳极干扰),流经电阻 $R_1$ ,再从管道B流出至电解质(导致管道B产生阴极干扰),再由电解质流入管道C后经导线返回到恒电位仪,该部分电流即为导致管道A和管道B产生干扰的直流杂散电流 $I_1$ 。根据电流守恒,则 $I_{cp}$ 、 $I'_{cp}$ 和 $I_1$ 满足以下关系式:

$$I_{cp} = I'_{cp} + I_1. \quad (1)$$

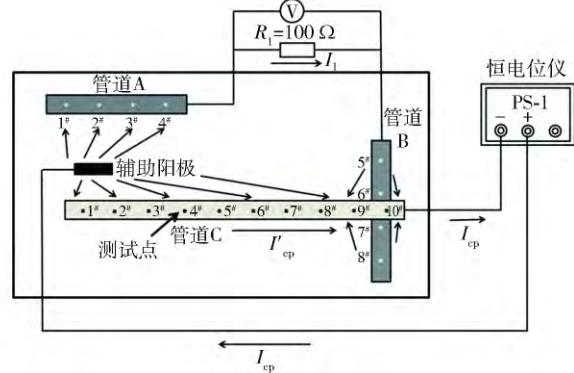


图7 管道C施加阴极保护后试验装置的电流回路示意图

Fig.7 Schematic diagram of the current circuit of experiment equipment after CP was applied on Pipe C

### 2.2 不同排流方法对干扰缓解效果的影响规律

#### 2.2.1 跨接电阻对干扰缓解效果的影响规律

图8为不同跨接电阻下的管道电位。从图中可以看出,随着跨接电阻 $R_2$ 的降低,管道C的电位发生明显的正移(如图8(a)所示),管道A与管道B的电位发生明显的负向偏移(如图8(b)和图(c)所示)。表明管道C的阴极保护效果有些减轻,但仍处于保护状态,同时管道A的阳极干扰加剧,而管道B的阴极干扰得到较好的缓解。

表1为不同跨接电阻下的电流 $I_1$ 、 $I_2$ 和 $I_b$ 。从表中可以看出,当 $262.4 \Omega < R_2 < 10000 \Omega$ 时,随着跨接电阻 $R_2$ 的减小,由电解质流入管道A的杂散电流 $I_1$ 逐渐增多,导致管道A电位负向偏移程度增大,其阳极干扰加剧。同时,流经跨接电阻 $R_2$ 的电流 $I_2$ 逐渐增多,由管道B流出至电解质的电流 $I_b$ 逐渐减少,管道B的电位发生负向偏移,管道B的阴极干扰得到缓解。当 $R_2 = 262.4 \Omega$ 时,由管道B流出至电解质的电流几乎为零,表明管道B此时基本没有阴极干扰。当 $R_2 < 262.4 \Omega$ 时,流经管道B的电流方向发生反转,表明电流开始由电解质流入管道B。但是,当跨接电阻 $R_2$ 过小时,由电解质流入管道B的电流 $I_b$ 增多,管道B发生阳极干扰。

结合以上规律分析可以看出:跨接电阻过大时,管道A仍处于阳极干扰状态,管道B阴极干扰无法得到

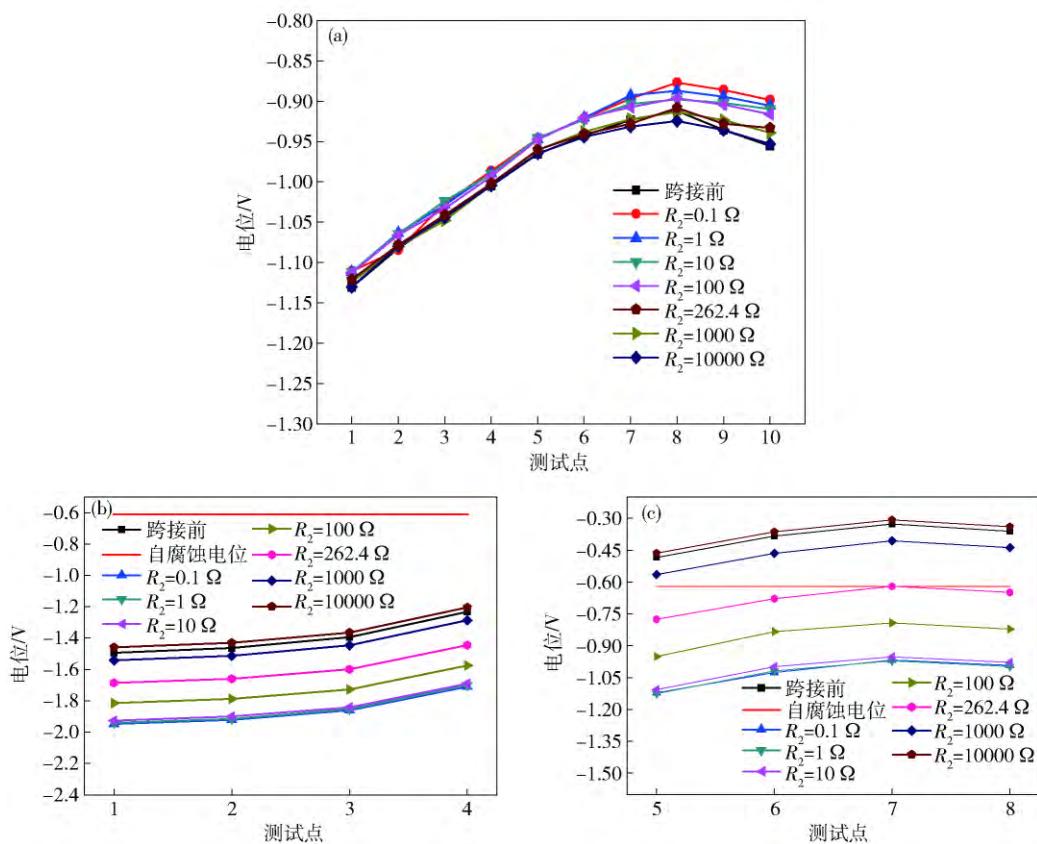


图 8 不同跨接电阻下的各管道电位. (a) 管道 C; (b) 管道 A; (c) 管道 B

Fig. 8 Potential of each pipe for different bond resistors: (a) Pipe C; (b) Pipe A; (c) Pipe B

缓解; 跨接电阻过小时, 会导致管道 A 的阳极干扰加剧, 管道 C 的阴极保护水平降低, 管道 B 也处于阳极干扰状态. 在实际工程应用中, 跨接电阻过大时两段跨接管道和无跨接情形相当, 跨接电阻过小时两段跨接管道相当于直接用导线连接起来, 两种情况均不利于干扰的缓解, 因此在跨接保护时必定存在一个合理的电阻, 它既可以缓解被干扰结构物的阴极干扰, 又不会引入太多杂散电流, 将其他管道的阳极干扰降到较低水平, 但无法消除阳极干扰, 这个电阻称为最优跨接电阻. 此次模拟试验中的最优电阻值为  $262.4 \Omega$ .

表 1 不同跨接电阻下的电流  $I_1$ 、 $I_2$  和  $I_b$ Table 1 Data of  $I_1$ ,  $I_2$  and  $I_b$  for different bond resistors

| 序号 | 跨接电阻/ $\Omega$ | $I_1$ /mA | $I_2$ /mA | $I_b$ /mA |
|----|----------------|-----------|-----------|-----------|
| 1  | 10000          | 0.749     | 0.073     | -0.676    |
| 2  | 1000           | 0.945     | 0.608     | -0.337    |
| 3  | 262.4          | 1.373     | 1.470     | 0.097     |
| 4  | 100            | 1.765     | 1.942     | 0.177     |
| 5  | 10             | 2.129     | 2.575     | 0.446     |
| 6  | 1              | 2.149     | 2.682     | 0.533     |
| 7  | 0.1            | 2.165     | 2.780     | 0.615     |

## 2.2.2 牺牲阳极的位置和材质对干扰缓解效果的影响规律

图 9 为不同牺牲阳极排流方式下各管道的电位.

如图 9(a) 所示, 四种牺牲阳极排流方式下管道 C 的电位变化幅度较小, 表明牺牲阳极的位置和材质对阴极保护系统影响较小.

当牺牲阳极在阳极干扰处与管道 A 连接时( 方式( I) 和( II) ), 如图 9(b) 所示, 使用 Zn 合金牺牲阳极使管道 A 的电位正向偏移, 阳极干扰有所缓解, 但缓解程度有限; 使用 Mg 合金牺牲阳极使管道 A 的电位几乎不发生变化, 阳极干扰未得到缓解; Zn 合金缓解阳极干扰效果相对比 Mg 合金好. 同时 Zn 和 Mg 牺牲阳极与管道 A 相连时, 如图 9(c) 所示, 管道 B 的电位分布未发生较大变化, 其阴极干扰未得到缓解甚至加剧. 以上结果表明, 当牺牲阳极设阳极干扰处, 并与比其电位更低的受阳极干扰的管道相连时, 缓解干扰的程度可能有限甚至可能无缓解.

当牺牲阳极在阴极干扰处与管道 B 连接时( 方式( III) 和( IV) ), 如图 9(b, c) 所示, 管道 A 与管道 B 的电位偏移程度比牺牲阳极在阳极干扰处与管道 A 连接时大, 同时管道 B 的电位均负向偏移至安全电位以内, 且 Mg 合金缓解阴极干扰效果比 Zn 合金更好. 在阴极干扰处使用牺牲阳极排流时, 管道 A 的电位负向偏移程度增加, 表明此时更多的杂散电流从电解质流入管道 A, 其阳极干扰加剧( 如图 9(b) 所示).

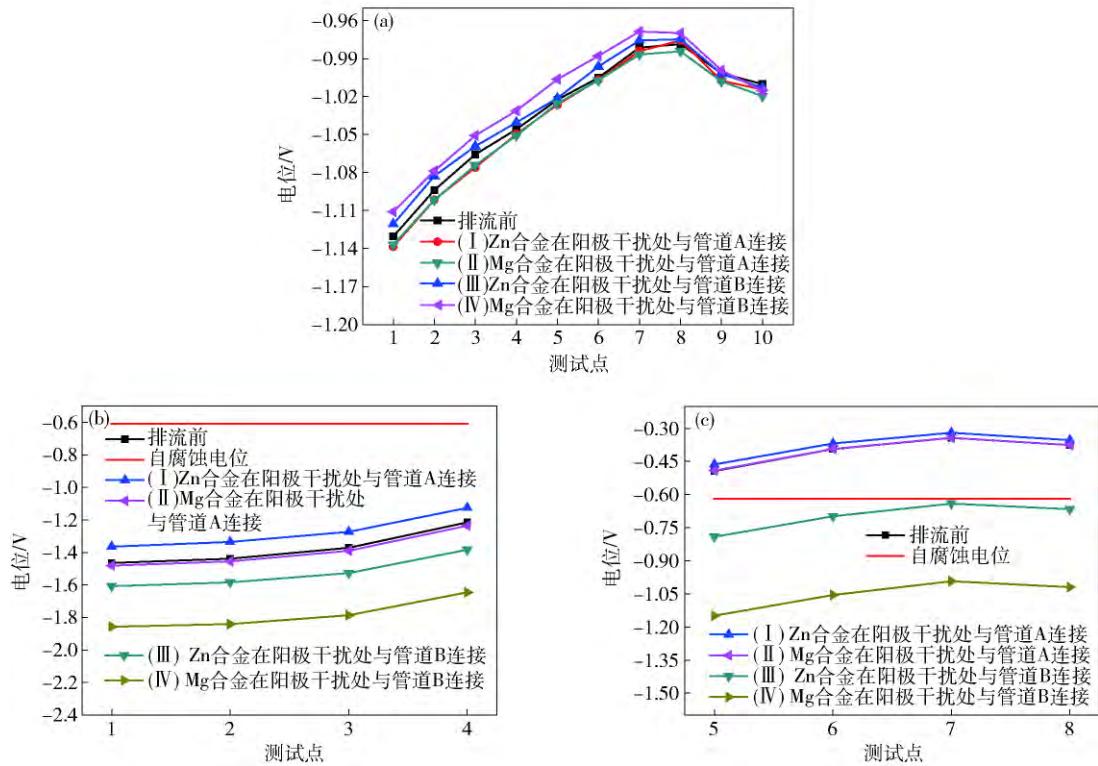


图9 不同牺牲阳极排流方式下各管道的电位. (a) 管道 C; (b) 管道 A; (c) 管道 B

Fig.9 Potential of each pipe for different galvanic anode mitigation schemes: (a) Pipe C; (b) Pipe A; (c) Pipe B

表2 为四种牺牲阳极排流方式下杂散电流  $I_1$  值. 如表2 所示, 当牺牲阳极设在管道 A 附近时, 与施加排流措施前相比杂散电流增幅不大, 分别仅为 3.2% 和

0.54%; 当牺牲阳极设在管道 B 附近时, 杂散电流量增加幅度较大, 增幅分别为 66.2% 和 169.7%.

表2 四种牺牲阳极排流方式下杂散电流  $I_1$  值Table 2  $I_1$  through  $R_1$  in four galvanic anode mitigation schemes

| 参量          | 排流前    | 阳极干扰处(管道 A 附近) |       | 阴极干扰处(管道 B 附近) |        |
|-------------|--------|----------------|-------|----------------|--------|
|             |        | Zn 阳极          | Mg 阳极 | Zn 阳极          | Mg 阳极  |
| $I_1$ /mA   | 0.7997 | 0.825          | 0.804 | 1.329          | 2.157  |
| 相比排流前杂散电流增幅 |        | 3.2%           | 0.54% | 66.2%          | 169.7% |

图10 为牺牲阳极在不同位置排流时的等效电路图. 牺牲阳极和管道间存在电位差, 牺牲阳极和被干

扰管道相连时, 在管道和牺牲阳极之间形成一个原电池, 其电动势即为牺牲阳极和管道间的电位差. 从图

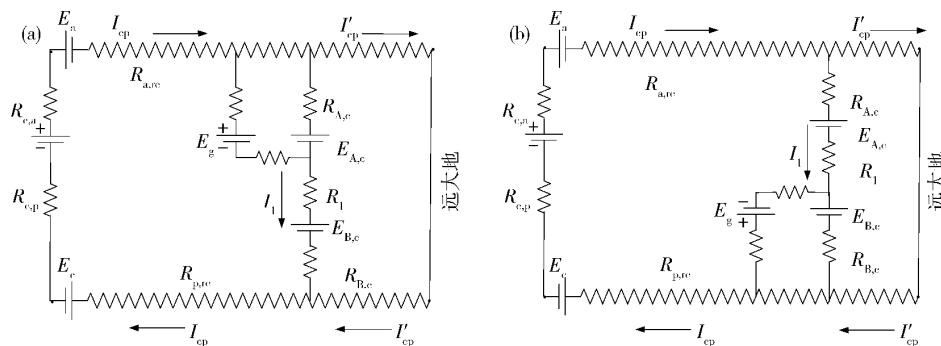


图10 牺牲阳极在不同位置排流时的系统回路等效电路图. (a) 阳极干扰处(管道 A 附近时); (b) 阴极干扰处(管道 B 附近时)

Fig.10 Equivalent circuit diagram of galvanic anode mitigation set at each zone: (a) anode interference zone (near Pipe A); (b) cathodic interference zone (near Pipe B)

10( a) 和图( b) 中可以看出,当牺牲阳极设在阳极干扰处或阴极干扰处时,杂散电流回路总电阻接近,且接入牺牲阳极后回路总电阻降低,由电解质流入回路的杂散电流量增加。但是,两种情况下牺牲阳极材质不同时电位差不同,杂散电流回路的电动势也会发生改变,因此对杂散电流的影响也不同。

如图 10( a) 所示,当牺牲阳极设在阳极干扰处时,管道 A 阳极干扰处的电位  $E_{A_{\text{c}}}$  比牺牲阳极较负,但由于牺牲阳极与管道阳极干扰处间的电位差较小,杂散电流回路的电动势也较小,对回路中杂散电流的流向和大小影响甚小,所以此时阴、阳极干扰缓解效果不明显甚至无缓解。如图 10( b) 所示,当牺牲阳极设在阴极干扰处时,管道 B 阴极干扰处的电位  $E_{B_{\text{c}}}$  比牺牲阳极的电位更正,牺牲阳极与管道 B 阴极干扰处间的电位差增大,杂散电流回路的电动势增加,导致由电解质流入管道 A 的杂散电流增加,此时管道 A 所受阳极干扰加剧。同时,由管道 B 流出至电解质的杂散电流减少,此时管道 B 所受阴极干扰得到缓解。

在图 10 中,  $E_a$  为辅助阳极电位,  $E_g$  为牺牲阳极电位,  $E_{A_{\text{c}}}$  为管道 A 阳极干扰处的电位,  $E_{B_{\text{c}}}$  为管道 B 阴极干扰处的电位,  $R_{c_{\text{p}}}$  和  $R_{c_{\text{a}}}$  为电缆电阻,  $R_{a_{\text{re}}}$  为辅助阳极对地电阻,  $R_{A_{\text{c}}}$  为管道 A 阳极干扰处(杂散电流流入

处)的对地电阻,  $R_{B_{\text{c}}}$  为管道 B 阴极干扰处(杂散电流流出处)的对地电阻,  $R_{p_{\text{re}}}$  为管道 C 对地电阻。

以上试验结果表明,采用牺牲阳极排流法缓解直流杂散电流干扰时,缓解阴极干扰效果明显。但是,由于牺牲阳极与受干扰管道间电位差的存在,以及回路电阻的影响,使得由电解质流入受阳极干扰管道的杂散电流量增加,导致管道阳极干扰加剧。

### 2.2.3 金属屏蔽线位置和连接方式对干扰缓解效果的影响规律

图 11 为金属屏蔽线设在阳极干扰处不同连接方式下各管道的电位。当屏蔽线与管道 A 相连时,管道 C 的电位发生小幅度的正向偏移,表明此连接方式对阴极保护系统的保护效果没有明显的影响;管道 A 的电位发生正向偏移,阳极干扰得到明显的缓解;同时管道 B 的电位也发生正向偏移,阴极干扰加剧。当屏蔽线与管道 C 相连时,管道 C 的电位正向偏移程度较大,表明此时阴极保护系统的保护水平受到较大的影响;管道 A 的电位发生正向偏移,其所受阳极干扰得到缓解;管道 B 的电位发生负向偏移,其所受阴极干扰得到缓解。当金属屏蔽线与辅助阳极相连时,管道 A 的电位发生负向偏移,阳极干扰加剧;管道 B 的电位发生正向偏移,其阴极干扰也加剧。

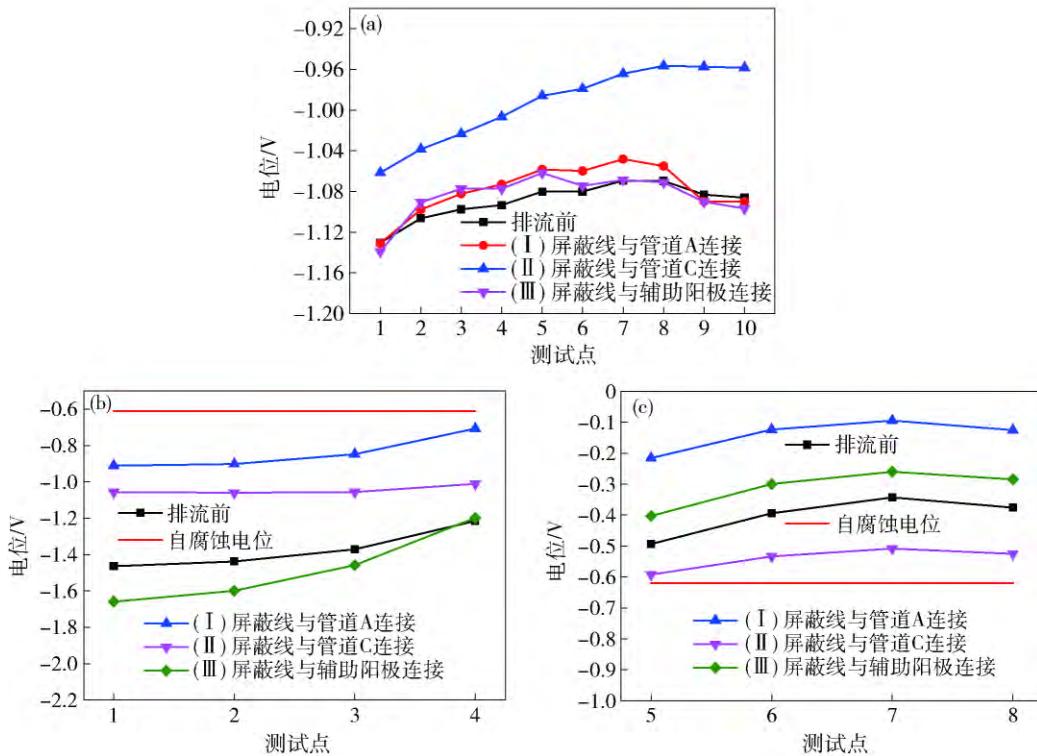


图 11 金属屏蔽线设在阳极干扰处不同连接方式下各管道的电位。(a) 管道 C; (b) 管道 A; (c) 管道 B

Fig. 11 Potential of each pipe for different mitigation schemes when the metallic shield was set at the anode interference zone: (a) Pipe C; (b) Pipe A; (c) Pipe B

图 12 为金属屏蔽线设在阴极干扰处不同连接方式下各管道的电位。当屏蔽线与管道 B 相连时,与缓

解前相比,管道 C 的电位发生小幅度的正向偏移,表明此连接方式对阴极保护系统的保护效果也没有明显

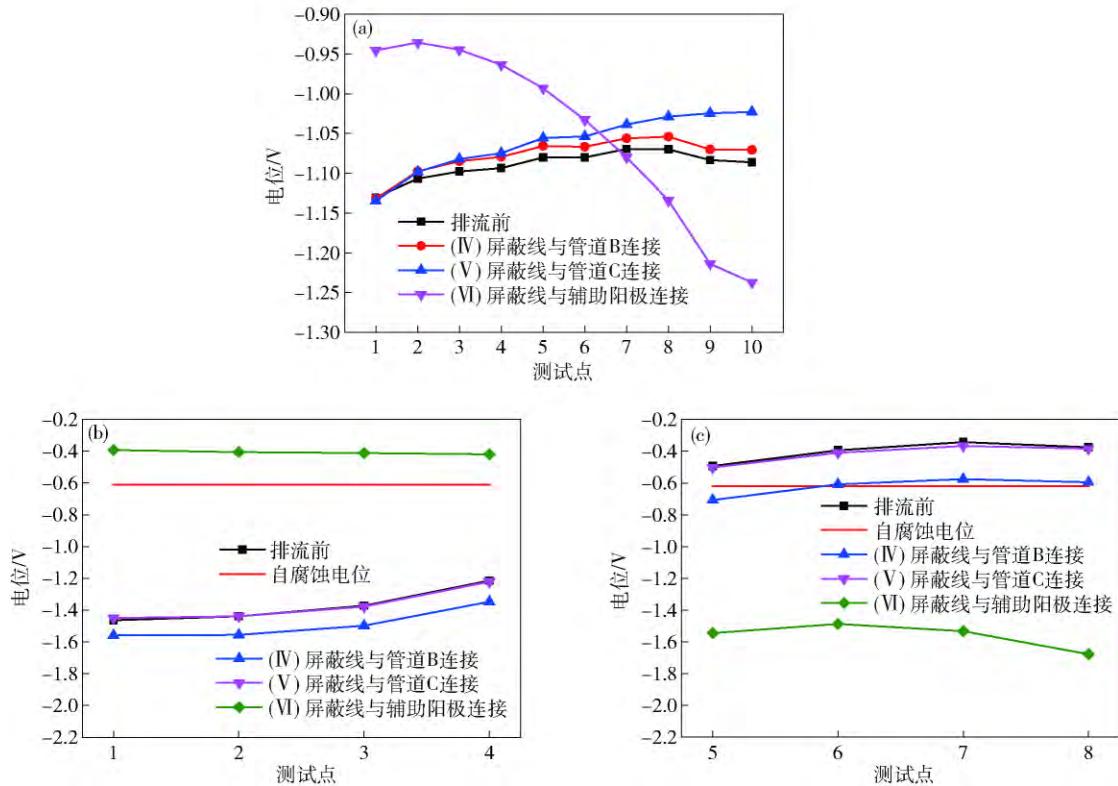


图 12 金属屏蔽线设在阴极干扰处不同连接方式下各管道的电位. (a) 管道 C; (b) 管道 A; (c) 管道 B

Fig. 12 Potential of each pipe for different mitigation schemes when the metallic shield was set at the cathodic interference zone: (a) Pipe C; (b) Pipe A; (c) Pipe B

的影响; 管道 A 的电位发生负向偏移, 其所受阳极干扰加剧; 管道 B 的电位发生也发生负向偏移, 其所受阴极干扰得到一定的缓解. 当屏蔽线与管道 C 相连时, 管道 A 和管道 B 的电位均没有发生明显的偏移, 表明无论阳极干扰或是阴极干扰均没有得到缓解; 管道 C 的电位发生一定的正向偏移, 表明此时阴极保护系统的保护效果有所降低. 当屏蔽线与辅助阳极相连时, 管道 C 的电位分布发生改变, 表明此时管道 C 的阴保电位分布受到明显的影响. 管道 A 的电位发生正向偏移并高于自腐蚀电位, 同时管道 B 的电位负向偏移程度较大并低于自腐蚀电位, 表明管道 A 由阳极干扰状态变成阴极干扰, 管道 B 由阴极干扰状态变成阳极干扰.

表 3 为金属屏蔽线不同排流方式下流经电阻  $R_1$  的电流  $I_1$ . 从表 3 中可以看出, 当屏蔽线设在阳极干扰处时, 方式( I )下杂散电流值  $I_1$  最大, 方式( III )下次之, 方式( II )下杂散电流值  $I_1$  最小. 在( I )与( III )两种排流方式下杂散电流较大, 表明从管道 B 流出的电流较多, 从而在两种连接方式下阴极干扰加剧(如图 11( c )所示). 当屏蔽线设在阴极干扰处时, ( IV )与( VI )两种排流方式下杂散电流值大小接近, ( V )方式最小. ( VI )方式下杂散电流值为负值, 表明电流流向发生改变, 出现图 12( b )和图( c )中管道 A 由阳极干扰状态变成阴极干扰和管道 B 由阴极干扰状态变成阳极干扰的情况.

表 3 金属屏蔽线不同排流方式下流经电阻  $R_1$  的电流  $I_1$ Table 3  $I_1$  through  $R_1$  in different metallic shield mitigation schemes

| 参量                | 排流前   | 阳极干扰处(管道 A 附近) |          |           | 阴极干扰处(管道 B 附近) |         |          |
|-------------------|-------|----------------|----------|-----------|----------------|---------|----------|
|                   |       | 方式( I )        | 方式( II ) | 方式( III ) | 方式( IV )       | 方式( V ) | 方式( VI ) |
| $I_1 / \text{mA}$ | 0.858 | 2.657          | 0.166    | 1.362     | 1.231          | 0.869   | -1.335   |

### 3 结论

(1) 跨接电阻排流法对阴极干扰能进行有效的缓解, 但同时可能加剧其他受干扰结构物的阳极干扰. 跨接排流时存在最优电阻, 其值可以根据实际工程在

现场进行排流试验确定. 跨接保护后阴极保护系统不再保持原有的独立性, 在进行阴极保护有效性评估时需要综合考虑, 跨接电阻需要定期检查.

(2) 牺牲阳极设在阴极干扰处缓解阴极干扰效果明显, 且 Mg 合金比 Zn 合金缓解效果更佳, 但牺牲

阳极排流法无法对阳极干扰进行有效的缓解甚至可能加剧阳极干扰。

(3) 金属屏蔽线设在阳极干扰处且与干扰源阴极相连,可有效缓解阳极干扰;在阳极干扰区不宜将金属屏蔽线与干扰源阳极相连,在阴极干扰区则不宜将金属屏蔽线与干扰源阴极相连,否则会加剧干扰。

## 参 考 文 献

- [1] Gao P , Wang P H , Wang H Y , et al. Progress in China's oil and gas pipeline construction in 2014. *Int Pet Econ* , 2015( 3) : 68  
(高鹏,王培鸿,王海英,等. 2014年中国油气管道建设新进展. *国际石油经济*,2015(3):68)
- [2] Yan M C , Wang J Q , Han E H , et al. Characteristics and evolution of thin layer electrolyte on pipeline steel under cathodic protection shielding disbonded coating. *Acta Metall Sin* , 2014 , 50( 9) : 1137  
(闫茂成,王俭秋,韩恩厚,等. 埋地管线阴极保护屏蔽剥离涂层下薄液腐蚀环境特征及演化. *金属学报*,2014,50(9):1137)
- [3] Chen X , Gao F , Wang Y , et al. Transient numerical model for crevice corrosion of pipelines under disbonded coating with cathodic protection. *Mater Des* , 2016 , 89: 196
- [4] Suban M , Bozic S , Zajec A , et al. Crack analysis in thermite welding of cathodic protection. *Nucl Eng Des* , 2012 , 246( 4) : 123
- [5] Zhu M , Du C W , Li X G , et al. Effect of alternating current frequency on corrosion behavior of X65 steel in  $\text{CO}_3^{2-}/\text{HCO}_3^-$  solution. *J Mater Eng* , 2014( 11) : 85  
(朱敏,杜翠薇,李晓刚,等. 交流电频率对X65钢在 $\text{CO}_3^{2-}/\text{HCO}_3^-$ 溶液中腐蚀行为的影响. *材料工程*,2014(11):85)
- [6] Wang X H , Yang G Y , Huang H , et al. AC stray current corrosion law of buried steel pipeline. *J Chin Soc Corros Prot* , 2013 , 33( 4) : 293  
(王新华,杨国勇,黄海,等. 埋地钢质管道交流杂散电流腐蚀规律研究. *中国腐蚀与防护学报*,2013,33(4):293)
- [7] Li D D , Bi W X , Qi H S , et al. Numerical simulation of cathodic protection interference in cross/parallel pipeline. *Oil Gas Storage Transp* , 2014 , 33( 3) : 287  
(李丹丹,毕武喜,祁惠爽,等. 交叉并行管道阴极保护干扰数值模拟. *油气储运*,2014,33(3):287)
- [8] Wu Y S , Cao B. *Cathodic Protection and Anode Protection: Principles, Techniques and Engineering Applications*. Beijing: China Petrochemical Press ,2007  
(吴荫顺,曹备. 阴极保护和阳极保护:原理、技术和应用. 北京:中国石化出版社,2007)
- [9] Bi W X , Liu Y F , Zhao J , et al. Detection and analysis of anodic interference of an oil and gas pipeline cathodic protection. *Corros Prot* , 2013 , 34( 12) : 1111  
(毕武喜,刘月发,赵君,等. 油气管道阴极保护阳极干扰检测与分析. *腐蚀与防护*,2013,34(12):1111)
- [10] Metwally I A , Al-Mandhari H M , Gastli A , et al. Factors affecting cathodic-protection interference. *Eng Anal Boundary Elem* , 2007 , 31( 6) : 485
- [11] Adey R A , Baynham J , Jacob R. Prediction of interactions between FPSO and subsea cathodic protection systems // *CORROSION 2008*. NACE International , 2008: 1
- [12] Ministry of Housing and Urban-Rural Development. GB 50991—2014 *Standard for DC Interference Mitigation of Buried Steel Pipelines*. Beijing: China Planning Press ,2014  
(中华人民共和国住房和城乡建设部. GB 50991—2014 埋地钢质管道直流干扰防护技术标准. 北京:中国计划出版社,2014)