

# Research Progress on Soil Resistivity Affecting Stray Current Corrosion of Buried Pipeline

Qiong Feng<sup>1</sup>, Yaping Zhang<sup>1\*</sup>, Hao Yu<sup>1</sup>, Lianqing Yu<sup>1</sup>, Yan Li<sup>2</sup>

<sup>1</sup>College of Science, China University of Petroleum (East China), Qingdao Shandong

<sup>2</sup>College of Mechanical and Electrical Engineering, China University of Petroleum (East China), Qingdao Shandong

Email: [\\*zhangyp@upc.edu.cn](mailto:zhangyp@upc.edu.cn)

Received: Oct. 12<sup>th</sup>, 2015; accepted: Oct. 26<sup>th</sup>, 2015; published: Oct. 29<sup>th</sup>, 2015

Copyright © 2015 by authors and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

## Abstract

Using four-electrode method to measure soil resistivity can decrease the influence caused by non-uniformity of soil compositions. Generally, soil resistivity is inversely proportional to the stray current corrosion. Factors which can affect soil resistivity may make differences to stray current corrosion, such as water content, salt content, porosity, temperature, PH value of soil and the types of salt. Within a certain range, as the water content, water saturation, salinity, temperature and porosity increase, soil resistivity decreases and then stray current corrosion aggravates. However, different types of salt have different influences on stray current corrosion. This paper analyzes how the acidic salt, alkaline salt and the salt containing Cl<sup>-</sup> affect stray current corrosion, and puts forward the outlook for the research of complex salt types.

## Keywords

Buried Pipeline, Stray Current Corrosion, Soil Resistivity, Environmental Factors

# 土壤电阻率对埋地管道杂散电流腐蚀影响的研究进展

封琼<sup>1</sup>, 张亚萍<sup>1\*</sup>, 余豪<sup>1</sup>, 于濂清<sup>1</sup>, 李焰<sup>2</sup>

\*通讯作者。

<sup>1</sup>中国石油大学(华东)理学院, 山东 青岛

<sup>2</sup>中国石油大学(华东)机电工程学院, 山东 青岛

Email: [\\*zhangyp@upc.edu.cn](mailto:zhangyp@upc.edu.cn)

收稿日期: 2015年10月12日; 录用日期: 2015年10月26日; 发布日期: 2015年10月29日

## 摘要

用四电极法测量土壤电阻率能减小因土壤组成的不均匀性而产生的影响, 一般认为土壤电阻率与杂散电流腐蚀成反比关系。土壤电阻率的影响因素如含水量、含盐量、孔隙率、温度、土壤PH值及盐分类型等会对杂散电流腐蚀程度产生一定的影响。在一定范围内, 土壤电阻率随着含水量、饱和度、含盐量、温度、孔隙率的增大而减小, 杂散电流腐蚀也会随之加剧。而不同盐分类型对杂散电流腐蚀程度产生的影响将会不尽相同, 本文分析了酸性盐、碱性盐以及含Cl<sup>-</sup>的盐等对杂散电流腐蚀的影响, 并对复杂盐分类型的研究提出了展望。

## 关键词

埋地管道, 杂散电流腐蚀, 土壤电阻率, 环境因素

## 1. 引言

随着城市轨道交通网络化的出现和运营, 城市地铁发展速度迅猛, 地铁埋地管道杂散电流腐蚀问题日趋突出。地铁杂散电流经钢轨流入大地, 会对地铁隧道的结构钢筋以及地铁周围土壤中埋设的金属构件、管道设施和电缆等造成严重的电化学腐蚀, 这不仅会降低地铁钢筋混凝土主体结构的强度和耐久性, 也会缩短埋地金属管道的使用寿命, 甚至酿成灾难性的后果。土壤电阻率是杂散电流腐蚀性能综合体现的结果, 能比较综合地反映出某一地区土壤环境的腐蚀特点, 研究土壤电阻率的作用规律对研究杂散电流腐蚀具有一定的积极意义。本文通过对杂散电流腐蚀的腐蚀机理及土壤电阻率进行介绍, 并重点评述土壤电阻率对于埋地管道杂散电流腐蚀的相关影响, 以及土壤电阻率的影响因素对杂散电流腐蚀影响产生的变化。

## 2. 杂散电流腐蚀

杂散电流是指由原定的正常电路漏失而流入它处的电流。在正常情况下, 电流自电源的正极通过电力机车的架空线再沿铁轨回流到电源负极。但是当铁轨与土壤间绝缘性能不良时, 有一部分电流就会从铁轨漏失到土壤中, 这部分电流就是杂散电流[1]。杂散电流是由外部复杂多变的情况产生, 按产生方式不同可分为交流、直流和地电流杂散电流。同样的电流强度条件下, 直流杂散电流的腐蚀破坏作用更剧烈。直流杂散电流的主要来源包括: 以铁轨为导体的直流电气化铁路、地下电车轨道、有轨电车、无轨电车的接地装置、直流电源分布系统、直流焊接系统、电解和电镀车间、阴极保护装置等。其产生原因一般可以分为两种情况: 电流泄漏和电位梯度。

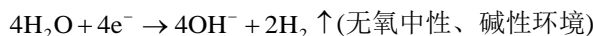
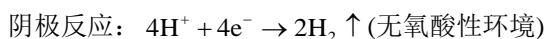
如果在铁轨附近埋有金属管道等构件, 杂散电流便由此良导体通过, 然后再经土壤及轨道流回到电源负极。在这种情况下, 相当于产生两个串联电解池, 即:

路轨(阳极)|土壤|管道(阴极);

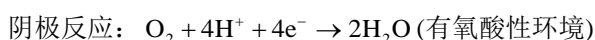
管道(阳极)|土壤|路轨(阴极)。

如图 1 所示, 杂散电流进入金属管道的地方带负电, 这一区域称为阴极区, 处于阴极区的管道一般不会受到影响, 若阴极区的电位值过大时, 管道表面会析出氢, 造成防腐层的脱落。当杂散电流经金属管道回流至变电所时, 金属管道带正电成为阳极区, 金属以离子的形式溶于周围介质中造成金属体的电化学反应。因此杂散电流的危害主要是对金属管道、混凝土管道的结构钢筋、电缆等产生电化学反应, 其电化学反应过程发生如下反应:

#### 1) 析氢反应



#### 2) 吸氧反应



### 3. 土壤电阻率

土壤电阻率是表征土壤固有物理特性的重要参数, 其大小直接影响着土壤的导电性能。它不仅是接地工程的重要参数, 还能比较综合地反映出某一地区土壤环境的腐蚀特点, 是杂散电流腐蚀性能综合体现的结果, 因此可以把土壤电阻率作为埋地金属管道杂散电流腐蚀评估的重要因素之一[2] [3]。

#### 3.1. 土壤电阻率的测量方法

目前主要采用四电极法对土壤电阻率进行测量, 其优点是减小了因土壤组成的不均匀性而对测试结果产生的影响。土壤电阻率的室内测试是通过测量恒定电流下两电极间土体的电压降, 然后根据欧姆定律计算出土壤电阻率的大小, 即  $\rho = RS/L = \Delta VS/IL$ 。公式中  $L$  为电极间距, 单位  $\text{m}$ ;  $S$  为电极截面积, 单位  $\text{m}^2$ ;  $\Delta V$  为土体间电压降, 单位  $\text{V}$ ;  $I$  为电流强度, 单位  $\text{A}$ 。如图 2 所示:

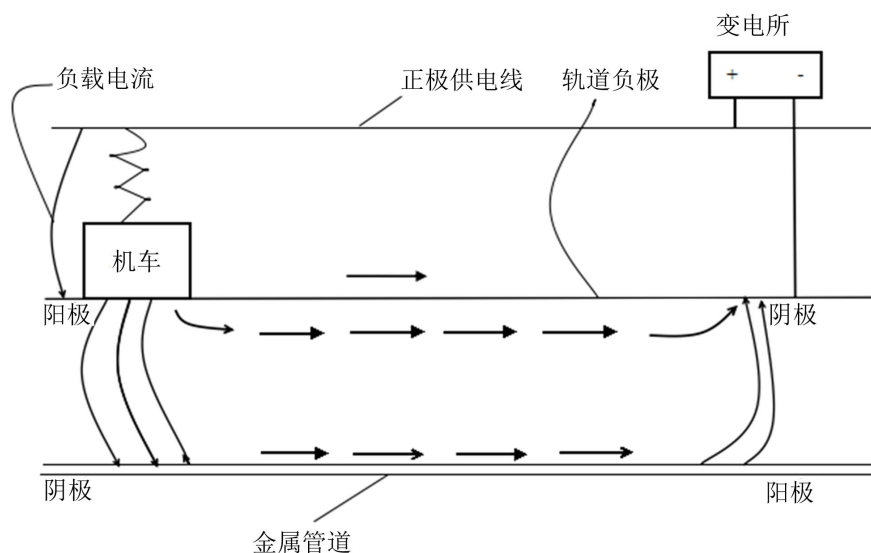


Figure 1. Schematic diagram of stray current from DC transportation system

图 1. 直流运输系统杂散电流示意图

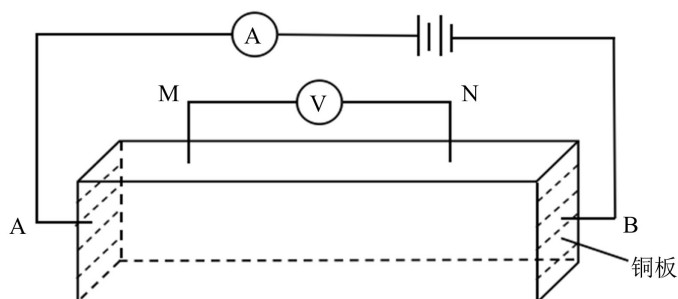


Figure 2. Four-electrode arrangement for measure the soil resistivity  
图 2. 四电极法测土壤电阻率原理图

### 3.2. 土壤电阻率的影响因素

土壤电阻率与土壤组成、湿度、可溶性盐、酸碱度的性质和含量都有比较密切的联系。土壤的固相组成变化不大,不会成为土壤电阻率最敏感的作用因素,而对土壤电阻率影响作用较大的因素当属液相。液相中影响土壤电阻率的因素有很多,如:孔隙率、含水量、盐分组成、温度、盐分浓度、饱和度、土壤矿物类型、土壤 PH 值等。

房纯纲等[4]通过土性参数测试得出土壤电阻率与黏粒含量、含水量、孔隙率呈负相关。聂向辉等[5]利用直流四电极法测量了不同含水量情况下大港地区土壤的电阻率。饶平等[6]通过室内试验测出膨胀土与红粘土在不同温度、含水量条件下的电阻率变化情况。缪林昌等[7]提出了一种饱和/非饱和土壤电阻率模型的构想,得出膨胀土的电阻率主要与土骨架、孔隙水的电阻率以及膨胀土的含水量、饱和度和孔隙率等有关。郭秀军等[8]通过室内模拟试验得出土壤电阻率的变化与含水量、饱和度、粒度成分、密实度等呈反比关系,但是对于不同成分的土壤有不同的规律。

Wyckoff 和 Botset 等[9]利用气体扩散法测量岩石的相对渗透率为目的进行了试验,他们首先将砂样用含高压二氧化碳的盐水饱和,后来降低压力,二氧化碳便逐渐从盐水中析出,在孔隙中形成双相混合溶液,通过测量被排除盐水的体积即可算得砂样的含水饱和度,由此得到含水饱和度与电阻率之间的关系,即随着含水饱和度的增加,土壤电阻率呈减小趋势。Kelle、Frischknecht 等[10]认为土壤电阻率与其基本的物理力学参数密切相关,包括孔隙率、孔隙形状、孔隙结构、孔隙液电阻率、饱和度、固体颗粒成分、颗粒定向性、颗粒形状及胶结状态等。储旭等[11]通过对不同土壤的测定分析了含水率和电势梯度对电阻率的影响,并拟合出含水率小于液限时土壤电阻率的计算公式为:

$$\rho = \frac{1}{dw + e} E^{-(gw+h)} \quad (1)$$

式(1)中  $d$ 、 $e$ 、 $g$ 、 $h$  为常数,  $w$  为含水率,即含水率小于液限时,土壤电阻率随含水率的增大而减小。

李玲等[12]对影响盐渍土电阻率的因素(含水量、含盐量、干密度)进行了研究,得出土壤电阻率随含水量、饱和度的增加呈减小趋势,在孔隙液未饱和阶段随含盐量增加而下降,在过饱和阶段变化不明显,各因素互相影响,共同作用。

综上所述,目前科研人员对含水量、孔隙率、温度、饱和度、含盐量等因素做了大量的工作,研究结果表明含水量是影响土壤电阻率的最重要因素,其他因素对土壤电阻率也有较大的影响。在一定范围内,土壤电阻率随着含水量、饱和度、含盐量、温度、孔隙率的增大而减小。然而有关盐分类型对土壤电阻率的研究极少。土壤中溶解的溶质类型和数量才是决定土壤电阻率的重要因素,因此对盐分类型的研究有待进一步探讨。

#### 4. 土壤电阻率与杂散电流腐蚀的关系

土壤电阻率与杂散电流对土壤腐蚀程度成反比关系。通常随着土壤电阻率的减小，土壤中的盐分会随之增加，导电性也会增强，埋地管道金属的腐蚀速率加快。Seon Yeob Li 等[13]通过数值模拟的方法在距离管道中心 5 cm 处增加 30 A 的阳极电流来研究土壤电阻率对杂散电流腐蚀的影响，结果表明，随着土壤电阻率的减小，被保护管道中的电流密度和电势都随之增大。A.Lin Cao 等[14]利用单一灵敏度分析预测的方法得出增大土壤电阻率能减缓埋地管道的杂散电流腐蚀。A.Metually 和 A.H.Al-Badi [15]将传统的阴极保护体系与脉冲阴极保护体系进行比较来研究土壤电阻率对杂散电流腐蚀阴极保护的影响，结果表明，脉冲电流同样随着土壤电阻率的减小而增大，不过钢管的极化较土壤电阻率的影响较大些。万德立等[16]对大庆榆树林油田榆二联至宋一联段输油管道进行现场勘查分析，得出结论：土壤电阻率较高处，杂散电流从管道泡夹层薄弱或破损处流入，电流流入部位是阴极，不受腐蚀；土壤电阻率较低处，电流从泡夹层薄弱或破损处流出管道，致使排出电流的管道部位成为阳极而遭受腐蚀穿孔。李福军等[17]对大庆油田进行土壤电阻率测试及现场连续监测发现土壤电阻率与杂散电流腐蚀有直接的关系，土壤电阻率越小，金属的腐蚀速率越大。通过绘制土壤电阻率测试曲线得出低电阻率层(10  $\Omega \cdot m$  以下)的土壤具有强腐蚀性。总之，土壤电阻率与杂散电流腐蚀之间有着十分密切的联系，土壤电阻率越小，土壤中离子导电性越强，杂散电流腐蚀越严重。

目前的相关研究主要侧重于土壤电阻率与杂散电流腐蚀之间的关系，而土壤电阻率是随土壤环境因素变化的参数，探究不同土壤环境因素下土壤电阻率变化对杂散电流腐蚀的影响是今后研究的趋势。

#### 5. 土壤环境因素对杂散电流腐蚀的影响

不同土壤环境因素下土壤电阻率会发生改变，而土壤电阻率是表征杂散电流腐蚀程度的重要参数，因此杂散电流腐蚀与影响土壤电阻率的因素存在着十分密切的联系。

含水量是对杂散电流腐蚀程度影响最大的因素，其对土壤电阻率的影响主要包括三方面：含水量影响导电通路截面积的带电离子溶液的黏度；流入土体的水中原有的带电离子种类和数量；土壤融入水中的带电离子种类和数量。



如式(2)和(3)所示，水既能充当杂散电流腐蚀阴阳极反应的反应物，也可以作为电极反应的反应溶剂，加速离子迁移率。在一定范围内，含水量的增加，为离子移动提供良好的通路，土壤电阻率减小，电流扩散阻力随之减小，因此杂散电流腐蚀程度会加重。然而，含水量过高则会影响土壤通气状况。如果土壤完全被水饱和，因氧的扩散受到抑制而致使腐蚀性减弱[18]。

土壤温度是杂散电流腐蚀程度另一重要影响因素。在土壤拓扑结构不发生变化以及水在土壤中呈静止状态的环境下，当土壤温度在 0℃ 以下时，土壤电阻率随着温度下降而增大，土壤中液态水含量降低使得土壤中携带的电荷数减少，因此腐蚀会加剧；当土壤温度在 0℃ 时，土壤电阻率发生突变，随着温度的升高，土壤电阻率呈现先减小后增大的趋势，腐蚀程度先减缓后进一步加剧[19] [20]。

土壤孔隙率对杂散电流腐蚀程度产生的影响比较复杂。一些学者认为孔隙率对土壤电阻率的影响与含水量、含盐量有关，因此对腐蚀影响程度的研究要依环境而定。还有一些学者认为孔隙率越大越会加速腐蚀过程，但同时也更易生成具有保护能力的腐蚀产物层而使土壤电阻率增大，阻碍阳极的溶解，使腐蚀速度减慢。对于孔隙率小的土壤也有可能发生严重的腐蚀，这往往需要考虑更加复杂的因素如：氧浓度差、微生物腐蚀等[21]。

土壤 PH 值对杂散电流腐蚀程度的影响不可忽视。一般来说,在酸性土壤中,随着土壤 PH 值的减小,土壤电阻率减小,腐蚀性增强。在中性或碱性土壤环境下,土壤 PH 值的变化会引起埋地管道钝化膜的膜电阻、离子传递电阻和扩散电阻的变化从而对埋地管道腐蚀产生一定的影响[22]。

在低土壤 PH 值下,腐蚀膜的形成机理为:



在高土壤 PH 值下,腐蚀膜的形成机理为:

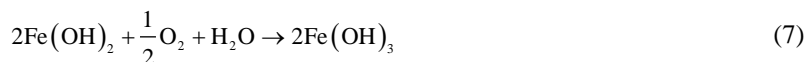
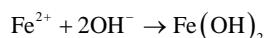


很明显,增大土壤 PH 值,对式(4)和(5)的反应均有促进作用。在低土壤 PH 值下,埋地管道表面被水化物  $\text{Fe}(\text{OH})_2$  覆盖;在高土壤 PH 值下,金属管道易与土壤中的  $\text{HCO}_3^-$  结合生成  $\text{FeCO}_3$ , 继而被氧化成  $\gamma\text{-Fe}_2\text{O}_3/\text{Fe}_3\text{O}_4$ 。腐蚀膜对埋地管道具有一定的保护作用,而氧化物膜比水化物膜更致密,因此随着土壤 PH 值的增大,土壤电阻率会增大,金属腐蚀会大大减弱。

含盐量对杂散电流腐蚀程度产生的影响也比较大。土壤化学性质与土壤中离子总量是土壤电阻率最主要的影响因素。可溶性盐可在水中电离,产生自由移动的离子,增加了土壤中可导电粒子数目,土壤导电性增强。随着含盐量的增加导电性会随之增强,电阻率发生较大变化,埋地管道的腐蚀程度将会加剧。但是随着含盐量继续增大到一定程度,电阻率变化速率将会减小,腐蚀将会减缓,这主要是因为含盐量在增加的同时粘度也随之增加,致使离子迁移率减小。

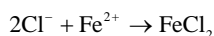
盐分类型对腐蚀影响程度不容小觑。目前的相关研究往往忽视了土壤中存在的复杂盐分类型对杂散电流腐蚀的影响,然而土壤中溶质类型和数量才是决定土壤电阻率的重要因素,对杂散电流腐蚀也有相当大的影响。不同盐分在土壤中溶解度的不同,易与土壤中部分离子形成微溶性物质,与土壤中自由离子结合发生化学反应等情况使得土壤中离子导电性发生变化从而影响土壤电阻率,对电化学腐蚀程度产生一定程度影响。

通常溶液中含有单盐导致盐分溶解度下降,相反,溶液中含有“复盐”时,则加大了盐分离子的溶解度。酸性盐能加速管道金属的溶解反应,而碱性盐会减缓管道金属的溶解反应。



如式(6)所示,酸性条件加速了氢去极化过程,阳极金属溶解反应也会加速。如式(7)所示,碱溶液中金属易形成难溶性的  $\text{Fe}(\text{OH})_2$ , 再逐渐被氧化成氧化物,对金属具有一定的保护作用。其次因为氧电极电位与氢电极电位要比在酸性介质中的电位更负,与金属阳极溶解反应的平衡电位之间的电位差比酸性介质的小,即腐蚀“推动力”要小一些,腐蚀速度也会小一些[21]。

含  $\text{Cl}^-$  的盐往往对腐蚀做出的“贡献”较大。如式(8)所示:



由于  $\text{Cl}^-$  半径小,穿透力强,能破坏钝化膜与  $\text{Fe}^{2+}$  结合生成  $\text{FeCl}_2$ , 与阴极区的  $\text{OH}^-$  生成  $\text{Fe}(\text{OH})_2$ , 同时释放出  $\text{Cl}^-$ 。新的  $\text{Cl}^-$  又向阳极区迁移,使金属溶解出更多  $\text{Fe}^{2+}$ 。如此往复,对腐蚀具有催化作用[23]。

总之,盐分类型对杂散电流腐蚀程度的影响不尽相同,对更复杂的盐分如强酸弱碱盐、弱酸强碱盐、

卤素盐等的研究有待进一步探讨。

综上所述,土壤电阻率在不同土壤环境因素和杂散电流腐蚀之间架起了无形的桥梁,将土壤环境与杂散电流腐蚀紧密地联系起来,弥补了杂散电流腐蚀在不同土壤环境下作用规律的空白。不同土壤因素下杂散电流腐蚀程度会发生变化。

## 6. 建议和展望

土壤电阻率影响因素的复杂性和多样性决定了腐蚀研究的艰巨性,尽管科研人员对此提出了多种设想,但也仅仅从宏观层面分析了含水量、含盐量、孔隙率、温度、土壤 PH 值对杂散电流腐蚀的影响,腐蚀机理尚不明确,规律性也尚不清晰。此外,目前关于盐分类型对土壤电阻率的影响主要考虑了单盐以及简单“复盐”构成对其影响作用,缺乏对土壤中多种复杂盐分综合作用的研究。由于不同地区土壤盐渍化水平不同,土壤中不可能只存在单一盐分或简单“复盐”作用,这为杂散电流腐蚀的研究增加了障碍。因此设计实验近似模拟土壤环境来研究不同土壤环境因素作用下的腐蚀机制显得十分必要。

## 7. 结论

1) 杂散电流腐蚀的本质是电化学腐蚀的电解过程。阳极区埋地金属管道会遭受严重的腐蚀。不同环境下电化学反应机理会发生变化。

2) 土壤电阻率直接影响着土壤的导电性,能综合反应某一地区土壤环境的腐蚀效果,可以将它作为评估由杂散电流引起土壤腐蚀的重要指标。

3) 一般认为土壤电阻率越小,杂散电流腐蚀越严重。但是应该指出,土壤电阻率并不是影响杂散电流腐蚀的唯一因素,因此评价杂散电流腐蚀时需要综合考虑各种可能的影响因素。

4) 影响土壤电阻率的因素有很多,不同的土壤因素对杂散电流腐蚀的作用效果会产生不同。土壤电阻率是联结不同土壤环境因素和杂散电流腐蚀的纽带,因此从影响土壤电阻率的环境因素入手来解决杂散电流腐蚀问题将成为今后研究杂散电流腐蚀的一种重要手段。此外,对复杂盐分类型的讨论也有待进一步研究。

## 基金项目

国家自然科学基金面上项目(21476262)和青岛市科技成果转化引导项目(No. 14-2-4-108-jch);大学生创新计划项目(2015)。

## 参考文献 (References)

- [1] 林玉珍,杨德钧,著(2007)腐蚀和腐蚀控制原理.中国石化出版社,北京,212-213.
- [2] Roberger, P.R. (2008) Corrosion engineering principles and practice. McGraw-Hill Companies, New York, 390.
- [3] 王凤平,康万利,敬和民(2008)腐蚀电化学原理、方法及应用.化学工业出版社,北京,150.
- [4] 房纯纲,贾永梅,周晓文,等(2003)汉江遥堤电导率与土性参数相关关系的研究.水利学报,6,119-122.
- [5] 聂向辉,杜鹤,杜翠薇,等(2008)大港电阻率的测量及其导电模型.北京科技大学学报,30,982-983.
- [6] 饶平平,陈小亮,欧刚(2007)膨胀土与红粘土电阻率室内试验比较.山西建筑,33,125.
- [7] 缪林昌,严明良,崔颖(2007)重塑膨胀土的电阻率特性测试研究.岩土工程学报,29,1414-1417.
- [8] 郭秀军,吴水娟,马媛媛(2012)生活垃圾渗滤液污染砂土电阻率法量化检测研究.岩土工程学报,33,2067-2070.
- [9] Wyskoff, R.D. and Botset, H.G. (1936) The flow of gas-liquid mixtures through unconsolidated sands. *Physics*, 7, 325-345. <http://dx.doi.org/10.1063/1.1745402>
- [10] 韩立华(2005)电阻率法在污染土评价与处理中的应用研究.东南大学博士学位论文,南京.

- [11] 储旭, 刘斯宏, 王柳江, 等 (2010) 电渗法中含水率和电势梯度对土体电阻率的影响. *河海大学学报(自然科学版)*, **5**, 575-578.
- [12] 李玲 (2012) 盐渍土电阻率特性研究. 硕士学位论文, 兰州大学, 兰州.
- [13] Li, S.Y. and Kim, Y.-G. (2013) Numerical modeling of stray current corrosion of ductile iron pipe induced by foreign cathodic protection system. *Metals and Materials International*, **19**, 717-729.
- [14] Cao, A.L., Zhu, Q.F. and Zhong, S.T. (2010) BP neural network predictive model for stray current density of a buried metallic pipeline. *Anti-Corrosion Methods and Materials*, **57**, 234-237. <http://dx.doi.org/10.1108/00035591011075869>
- [15] Metually, A. and Al-Badi, A.H. (2010) Analysis of different factors affecting cathodic protection for deep well casings. *Materials and Corrosion*, **61**, 245-251. <http://dx.doi.org/10.1002/maco.200905272>
- [16] 万德立, 白清东, 王勇, 等 (2005) 大庆榆树林油田榆二联至宋一联段输油管线失效原因分析. *管道技术与设备*, **4**, 37-39.
- [17] 李福军, 路明旭, 陈月勋 (2008) 大庆油田电泵井套管杂散电流腐蚀测试分析. *材料保护*, **10**, 66-71.
- [18] 张秀莲, 李季, 于东良 (2010) 土壤对埋地管道腐蚀性的调查与分析. *煤气与热力*, **3**, 38-41.
- [19] 曹晓斌, 吴广宁, 付龙海, 等 (2007) 温度对土壤电阻率影响的研究. *电工技术学报*, **9**, 1-5.
- [20] 司马文霞, 骆玲, 袁涛, 等 (2012) 土壤电阻率的温度特性及其对直流接地极发热的影响. *高电压技术*, **5**, 1192-1197.
- [21] 张学栋, 姜述孟 (1988) 用四电极法测试降水在土壤中的渗透规律. *水土保持学报*, **1**, 71-79.
- [22] 宋庆伟, 刘云, 陈秀玲, 等 (2008) PH 值对 X80 管线钢土壤腐蚀行为的影响. *全面腐蚀控制*, **4**, 63-66.
- [23] 杜荣归, 刘玉, 林昌健 (2006) 氯离子对钢筋腐蚀机理的影响及其研究进展. *材料保护*, **6**, 45-50.