

运用渐进回归正交法建立再生水管道腐蚀速率模型

胡 珊¹, 田一梅¹, 高佳祺¹, 李 强², 李玉涛²

(1. 天津大学 环境科学与工程学院, 天津 300350; 2. 天津中水有限公司, 天津 300221)

摘 要: 以 Cl^- 、 SO_4^{2-} 、pH 值和总硬度为典型水质因素, 通过正交试验分析模拟再生水动态管网中上述水质因素对腐蚀速率的影响。通过正交极差分析发现, 各水质因素对腐蚀速率的影响程度由大到小为: pH 值 > 总硬度 > SO_4^{2-} > Cl^- 。利用渐进优化多元线性回归法对得到的数据进行分析, 建立了拟合度为 0.998 的再生水管道腐蚀速率水质因素影响数学统计模型。同时, 采用再生水厂原水进行验证试验, 并将获取的数据代入模型, 结果表明该模型误差较低, 模拟效果较好。

关键词: 再生水管道; 腐蚀速率; 渐进优化多元线性回归; 正交试验

中图分类号: TU992 **文献标识码:** C **文章编号:** 1000-4602(2018)09-0090-06

Establishment of Corrosion Rate Model of Reclaimed Water Pipe by Progressive Regression Orthogonal Method

HU Shan¹, TIAN Yi-mei¹, GAO Jia-qi¹, LI Qiang², LI Yu-tao²

(1. School of Environmental Science and Engineering, Tianjin University, Tianjin 300350, China;

2. Tianjin Reclaimed Water Co. Ltd., Tianjin 300221, China)

Abstract: Taking Cl^- , SO_4^{2-} , pH and total hardness as the typical water quality factors, the influence of water quality factors of simulated reclaimed water dynamic pipeline on the corrosion rate was analyzed by orthogonal test. It was discovered by orthogonal range analysis that the sequence of influence degree of each water quality factor on the corrosion rate was as follows: pH > total hardness > SO_4^{2-} > Cl^- . After analyzing the data by using optimized progressive multiple linear regression method, a corrosion rate mathematical statistical model of reclaimed water pipe influenced by water quality factors with 0.998 fit degree was established. Meanwhile, raw water obtained from a reclaimed water treatment plant was used in the verification test, and the associated data was put into the model. The results showed that low error and good simulation effect were achieved by the model.

Key words: reclaimed water pipe; corrosion rate; optimized progressive multiple linear regression; orthogonal experiment

作为国际公认的“第二水源”, 大力发展再生水回用技术是解决我国水资源短缺问题的重要举措。然而, 由于再生水水质成分复杂^[1], 管网供水量未达到设计规模使得管网水停留时间较长, 易引起管

道腐蚀结垢, 从而影响管网水质。影响再生水管道腐蚀的因素众多且关系复杂^[2,3]。目前, 在供水管道和油气管道研究领域, 针对环境因素对腐蚀速率的影响并建立预测模型成果较多^[4~7], 而针对再

生水管道腐蚀的研究大多数仍停留在对试验现象的定性描述阶段^[8~10]。

因此笔者运用数学模型分析了再生水管道水质因素与管道腐蚀速率的关系,并选取 Cl^- 、 SO_4^{2-} 、pH 值和总硬度作为典型水质因素^[11~13],运用正交设计确定各因素水平,利用正交编码简化试验,结合渐进优化多元线性回归法对试验数据进行优化,从而建立模型。另外,采用某再生水厂的原水对该模型进行了试验验证,发现试验结果与正交试验腐蚀速率趋势相同,且模型拟合度较优。

1 建模方法

采用四因素三水平的正交方法 $L_9(3^4)$,结合多元回归分析手段建立回归方程,并从数学角度定量描述各因素对因变量产生的影响^[14]。

根据试验指标 y ,选择需要考察的因素 $x_j(j=1, 2, \dots, m)$,并确定各因素的取值范围。设因素 x_j 的变化范围为 $[x_{j(-1)}, x_{j(1)}]$,其中 $x_{j(-1)}$ 、 $x_{j(1)}$ 分别为 x_j 的水平下限与水平上限。因素的平均值即零水平值 $x_{j(0)}$ 和上、下水平之间的差距 Δx_j 分别按式(1)和式(2)计算。

$$x_{j(0)} = \frac{x_{j(1)} + x_{j(-1)}}{2} \quad (1)$$

$$\Delta x_j = x_{j(1)} - x_{j(0)} = x_{j(0)} - x_{j(-1)} \quad (2)$$

重新编码各因素对应的水平,使上水平为 1,下水平为 -1,零水平为 0,则因素 x_j 的编码 z_j 按式(3)表示。

$$z_j = \frac{x_j - x_{j(0)}}{\Delta x_j} \quad (3)$$

重新编码后变量 z_j 的取值范围为 $[-1, 1]$,编码将因变量 y 与因素 $x_j(j=1, 2, \dots, m)$ 各水平之间的回归转换为因变量 y 与编码 $z_j(j=1, 2, \dots, m)$ 之间的回归。正交试验的水平因素设计见表 1。

表 1 正交试验编码设计

Tab. 1 Code table of orthogonal experiment

序 号	A	B	C	D
1	-1	-1	-1	-1
2	-1	0	0	0
3	-1	1	1	1
4	0	-1	0	1
5	0	0	1	-1
6	0	1	-1	0
7	1	-1	1	0
8	1	0	-1	1
9	1	1	0	-1

设建立的模型满足多元线性回归方程,其四元二项式见式(4)。

$$y = b_0 + b_1 x_1 + b_2 x_2 + b_3 x_3 + b_4 x_4 + b_{11} x_1^2 + b_{12} x_1 x_2 + b_{13} x_1 x_3 + b_{14} x_1 x_4 + b_{22} x_2^2 + b_{23} x_2 x_3 + b_{24} x_2 x_4 + b_{33} x_3^2 + b_{34} x_3 x_4 + b_{44} x_4^2 \quad (4)$$

对表 1 进行扩展,增加单因素作用和双因素交互作用,并按照试验结果填入对应的目标 y 值。通过各因素项的方差排序结果,首先选取前 5 项进行线性回归。

判断回归结果中各项的重要性,取舍其中显著性水平在 0.05 以上的项。第 1 次剔除最不重要项,同时按方差排序增加排序第 6 的项,再次进行第 2 次线性回归。重复上述剔除、增加、回归过程,当所有项均参加过回归后,便只是剔除、回归过程,直到回归方程的复相关系数 R 显著性水平达到 0.05 甚至 0.01 的水平,且回归方程的偏相关系数显著为止^[15]。

2 正交试验

2.1 试验设计

在实验室搭建再生水管网腐蚀动态模型,以电解池为核心装置,检测不同水平水质因素条件下的腐蚀速率。试验分为短期正交试验和长期验证试验。选择 Cl^- 、 SO_4^{2-} 、pH 值和总硬度作为正交试验的控制指标。

根据天津市某再生水厂的出厂水水质波动范围,确定了正交试验各因素的水平梯度。正交试验用水采用实验室模拟配水,验证试验用水采用再生水厂原水。正交试验共设计了 9 组,每组试验周期为 5 d;验证试验每 5 d 更换一次水,试验周期共 45 d。腐蚀速率的测定采用电化学法,期间通过水质快速测定方法检测各因素随时间的变化情况。当每组试验进行到第 120 小时的节点时,通过强极化测量得到极化曲线,并结合 Tafel 外推法和软件拟合计算瞬时腐蚀速率。

2.2 极差分析

对正交试验腐蚀速率进行极差分析(见表 2),并探讨不同因素水平对管网腐蚀的影响。

从表 2 可以看出,各因素对腐蚀速率的影响程度由大到小为:pH 值 > 总硬度 > SO_4^{2-} > Cl^- 。可以看出,pH 值的影响最重要,这与腐蚀初始阶段的腐蚀速率有关。

表2 腐蚀速率极差分析结果

Tab.2 Range analysis results of corrosion rate

序号	总硬度(以 CaCO ₃ 计)/ (mg·L ⁻¹)	SO ₄ ²⁻ / (mg· L ⁻¹)	Cl ⁻ / (mg· L ⁻¹)	pH 值	腐蚀速率/ (mm·a ⁻¹)
1	100	50	150	6	0.213 79
2	100	150	200	7.5	0.220 93
3	100	250	250	9	0.183 56
4	200	50	200	9	0.150 69
5	200	150	250	6	0.236 97
6	200	250	150	7.5	0.218 96
7	300	50	250	7.5	0.160 48
8	300	150	150	9	0.141 47
9	300	250	200	6	0.210 66
K ₁	0.618 28	0.524 96	0.574 22	0.661 42	
K ₂	0.606 62	0.599 37	0.582 28	0.600 37	
K ₃	0.512 61	0.613 18	0.581 01	0.475 72	
k ₁	0.206 09	0.174 99	0.191 41	0.220 47	
k ₂	0.202 21	0.199 79	0.194 07	0.200 12	
k ₃	0.170 89	0.204 39	0.193 67	0.158 57	
极差	0.035 2	0.024 8	0.002 7	0.061 9	

腐蚀初期,水体中的各种离子与尚未形成钝化膜的管道金属表面直接接触,水体酸性环境促使铁发生溶解,增强金属阳极的去极化效应^[16],导致前

表3 正交扩展编码表及方差分析结果

Tab.3 Extended orthogonal table and variance analysis results

序号	z_1	z_2	z_3	z_4	$z_1 z_2$	$z_1 z_3$	$z_1 z_4$	$z_2 z_3$	$z_2 z_4$	$z_3 z_4$	z_1^2	z_2^2	z_3^2	z_4^2	y
1	-1	-1	-1	-1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	0.213 8
2	-1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0.220 9
3	-1	1	1	1	-1	-1	-1	1	1	1	1	1	1	1	0.183 6
4	0	-1	0	1	0	0	0	0	-1	0	0	1	0	1	0.150 7
5	0	0	1	-1	0	0	0	0	0	-1	0	0	1	1	0.237 0
6	0	1	-1	0	0	0	0	-1	0	0	0	1	1	0	0.219 0
7	1	-1	1	0	-1	1	0	-1	0	0	1	1	1	0	0.160 5
8	1	0	-1	1	0	-1	1	0	0	-1	1	0	1	1	0.141 5
9	1	1	0	-1	1	0	-1	0	-1	0	1	1	0	1	0.210 7
k ₁	0.170 9	0.204 4	0.193 7	0.158 6	0.212 2	0.187 1	0.177 6	0.198 7	0.198 7	0.198 7	0.188 5	0.189 7	0.192 5	0.189 5	
k ₀	0.202 2	0.199 8	0.194 1	0.200 1	0.193 8	0.193 8	0.197 6	0.192 1	0.195 8	0.192 3	0.202 2	0.199 8	0.194 1	0.200 1	
k ₋₁	0.206 1	0.175 0	0.191 4	0.220 5	0.172 0	0.162 5	0.197 1	0.189 7	0.180 7	0.189 2					
方差	0.015 8	0.012 9	0.001 2	0.025 8	0.016 4	0.013 5	0.009 3	0.003 8	0.007 9	0.003 9	0.006 9	0.005 1	0.000 8	0.005 3	
排序	3	5	13	1	2	4	6	12	7	11	8	10	14	9	

根据初步得到的方差分析结果, z_1 、 z_2 、 z_4 、 $z_1 z_2$ 、 $z_1 z_3$ 为方差排序前5位的影响因素。以该5项影响因素为基础,进行多元线性回归分析。需要注意的

期腐蚀速率较高。氯离子与硫酸根离子的作用微弱,是由于该腐蚀性阴离子的腐蚀机理为局部减薄,破坏了金属表面的钝化膜,并与垢下金属发生腐蚀反应^[1,3,17,18]。然而反应前期钝化膜不够致密,对水中离子的阻隔作用微弱,故这两种离子的作用有所下降。硫酸根离子对腐蚀反应的正向作用比氯离子更为明显,初步推测是由于硫酸根离子在硬度较大的条件下参与垢层的形成,同时硫酸根离子本身电荷量较高,具有更强的电子转移能力,因此与总硬度对腐蚀作用的影响比较接近。

3 建立模型

3.1 建模过程

在多元线性回归公式(4)中有 $b_0 \sim b_{44}$ 共15个需要求解的系数,然而由于只有9组试验,最多只可求解9个未知量,故需简化操作。结合试验得到的腐蚀速率数据,将进行正交编码后的因素用 z 表示,并建立扩展的编码正交表(见表3)。根据扩展的编码表选出最重要、对腐蚀速率影响最大的多个因素作用项。该试验选取5个较重要因素作用项,若拟合度不能达到要求则需进一步增加因素作用项的个数。

是,方差分析只能定性解决各因素的影响程度,并不能很好地代表数学上拟合结果的相似程度,因此需要不断舍弃拟合效果不佳的组合,选用最贴近试验

结果的数学模型。以第1次渐进回归分析为例,首先建立新的回归分析(见表4)。在Matlab中使用多元线性回归分析,结果见表5。

表4 第1次渐进回归分析

Tab.4 The first progressive regression analysis

序号	z_1	z_2	z_4	$z_1 z_2$	$z_1 z_3$	腐蚀速率/ ($\text{mm} \cdot \text{a}^{-1}$)
1	-1	-1	-1	1	1	0.213 8
2	-1	0	0	0	0	0.220 9
3	-1	1	1	-1	-1	0.183 6
4	0	-1	1	0	0	0.150 7
5	0	0	-1	0	0	0.237 0
6	0	1	0	0	0	0.219 0
7	1	-1	0	-1	1	0.160 5
8	1	0	1	0	-1	0.141 5
9	1	1	-1	1	0	0.210 7

表5 第1次回归分析结果

Tab.5 The first regression results

项 目	系数	标准差	P 值	拟合度 R
常数项	0.193 0	0.005 28	0.000 04	0.960 6
z_1	-0.017 6	0.006 46	0.072 23	
z_2	0.013 6	0.010 55	0.287 91	
z_4	-0.034 8	0.012 92	0.074 43	
$z_1 z_2$	-0.005 4	0.010 55	0.643 10	
$z_1 z_3$	-0.002 2	0.016 85	0.903 01	

由表5可知, $z_1 z_3$ 作用项的显著性最差,同时标准差所代表的数据波动性也不佳,在拟合度仅为0.960 6的情况下应舍去,增加方差排序为第6位的 $z_1 z_4$ 因素作用项进行第2次渐进回归分析。依此类推,直到拟合度较高、标准差较小且最不显著项的 P 值尽量低于0.5。后续渐进回归分析见表6。

表6 第2~10次线性回归结果分析

Tab.6 The second to tenth regression results

次 数	舍弃项	标准误差	R	R^2
2	$z_1 z_4$	0.015 4	0.962 9	0.927 3
3	$z_2 z_4$	0.013 3	0.972 4	0.945 5
4	$z_1 z_2$	0.012 1	0.977 1	0.954 6
5	z_4^2	0.008 5	0.988 8	0.977 7
6	z_2^2	0.009 0	0.987 7	0.975 6
7	z_1^2	0.009 0	0.987 7	0.975 6
8	$z_3 z_4$	0.003 0	0.998 5	0.997 1
9	z_3	0.010 3	0.983 3	0.966 8
10		0.010 4	0.983 1	0.966 5

由表6可知,当进行到第8次线性回归时, R 与 R^2 达到最大的0.998附近,且有最小的标准误差。

根据每次回归结果,舍弃效果较差的因素作用项,最终得到的回归结果见表7。

表7 最佳线性回归结果

Tab.7 The best regression results

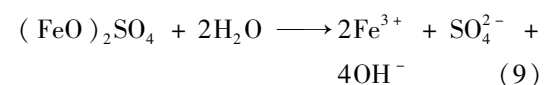
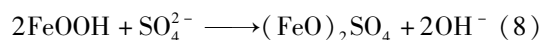
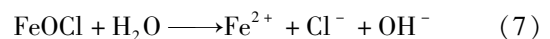
项 目	系数	标准差	P 值	拟合度 R
常数项	0.193 0	0.001 01	0.000 03	0.998 6
z_1	-0.029 09	0.001 75	0.000 48	
z_2	0.014 70	0.001 24	0.001 29	
z_4	-0.030 95	0.001 24	0.000 14	
$z_3 z_4$	-0.011 22	0.001 96	0.010 59	
$z_2 z_3$	-0.011 72	0.001 96	0.009 37	

根据表7可列出基本公式,但其中的 z 项并非直接对应的各因素,而是式(1)中提到的编码值,取值为1、0、-1,故需利用式(3)转换为对应的初始4种影响因素,得到的数学模型见式(5)。

$$y = 0.089\ 16 - 2.909 \times 10^{-4} x_1 + 69.158 \times 10^{-4} x_2 + 1.474 \times 10^{-3} x_3 + 8.59 \times 10^{-3} x_4 - 1.496 \times 10^{-4} x_3 x_4 - 2.344 \times 10^{-6} x_2 x_3 \quad (5)$$

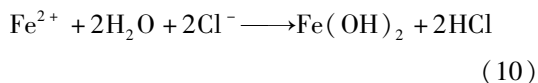
3.2 模型分析

式(5)说明4种水质影响因素对腐蚀速率均能产生不同程度的影响,也表明对影响因素的选取是相对合理的。除单因素作用,模型中还包含了交互作用项 $x_3 x_4$ 与 $x_2 x_3$ 。其中, $x_2 x_3$ 交互作用项体现为腐蚀性阴离子 Cl^- 和 SO_4^{2-} 对腐蚀的共同影响。研究表明, Cl^- 和 SO_4^{2-} 的腐蚀机理类似^[19],即随着腐蚀性阴离子浓度的增大,水体中离子活性升高,离子强度增强,迁移速率增加,进而加速腐蚀进程。而最主要的机理还是基于腐蚀性阴离子对钝化膜的破坏作用:以主要成分为 FeOOH 的管垢为例,体积较小的 Cl^- 和 SO_4^{2-} 能够穿透钝化膜层,取代钝化膜层金属离子间的氢键,遭受破坏后的管垢 FeOOH 的活性基团暴露,与腐蚀性阴离子发生微界面化学反应,导致亚铁离子或铁离子的释放。相关反应见式(6)~(9)。



$x_3 x_4$ 交互作用项为 Cl^- 和pH值的共同作用,可理解为随着腐蚀的进行,电负性较大的活性阴离子 Cl^- 易被吸附在金属表面某些点上,破坏钝化膜产

生 Cl^- 的点蚀现象^[10]。而 Cl^- 的点蚀又会进一步构成金属基体的微酸性环境,加剧腐蚀,见式(10)。



3.3 模型验证

验证试验原水水质如下:总硬度(以 CaCO_3 计)、 SO_4^{2-} 、 Cl^- 分别为 293.4、221.0、145.5 mg/L, pH 值为 7.6。将原水水质指标代入腐蚀速率数学模型,可得腐蚀速率为 0.178 8 mm/a。

运用动电位扫描法测定稳定阶段(3~45 d)的平均腐蚀速率为 0.179 5 mm/a,与腐蚀速率数学模型结果之间的标准差为 0.008。模拟值与试验值的相对误差为 0.4%,故可认为该模型较好地反映了再生水管网的腐蚀倾向与腐蚀风险。

4 结论

① 通过对正交试验结果进行极差分析可知,典型水质因素对腐蚀速率影响程度由大到小为:pH 值 > 总硬度 > SO_4^{2-} > Cl^- 。

② 通过渐进优化线性回归分析及重新编码,建立了因素影响的初期稳定腐蚀速率数学模型,该数学模型的拟合度为 0.998,与验证试验结果的相对误差为 0.4%,说明模型能够较好地反映再生水水质范围内各因素对稳定腐蚀速率的影响。

参考文献:

- [1] 刘喆,石宝友,郑红,等. 市政再生水对铸铁材料的腐蚀特性研究[J]. 中国给水排水,2011,27(15):64-68.
Liu Zhe, Shi Baoyou, Zheng Hong, et al. Corrosion of cast iron in reclaimed municipal wastewater[J]. China Water & Wastewater, 2011, 27(15): 64-68 (in Chinese).
- [2] 崔勇,余康华,张子潇,等. 铸铁管输配再生水铁溶出颗粒物特征研究[J]. 环境科学学报,2016,36(8):2932-2940.
Cui Yong, Yu Kanghua, Zhang Zixiao, et al. Characteristics of iron particulates released from unlined cast iron pipe in a pilot-scale reclaimed water distribution system [J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 2016, 36(8): 2932-2940 (in Chinese).
- [3] 甘庆午. 再生水输配系统特点及化学稳定性研究[D]. 北京:北京工业大学,2014.
Gan Qingwu. The Study of the Reclaimed Water Pipe-

lines Characteristics and the System Stability Analysis [D]. Beijing: Beijing University of Technology, 2014 (in Chinese).

- [4] 刘扬. 水质变化对腐蚀管段中铁释放的影响[D]. 天津:天津大学,2010.
Liu Yang. The Effect of Water Quality Variation on Iron Release in Corroded Pipes [D]. Tianjin: Tianjin University, 2010 (in Chinese).
- [5] 蒋白懿,叶友林,李亚峰,等. 利用灰关联定权组合模型预测城镇给水管网腐蚀速率[J]. 沈阳建筑大学学报:自然科学版,2010,26(2):335-338.
Jiang Baiyi, Ye Youlin, Li Yafeng, et al. Corrosion prediction for pipeline in water supply of town by grey relational weight-making combination forecasting model [J]. Journal of Shenyang Jianzhu University: Natural Science, 2010, 26(2): 335-338 (in Chinese).
- [6] 罗思敏,于水利. 饮用水管道寿命预测机理模型的分析[J]. 供水技术,2016,10(3):1-6.
Luo Simin, Yu Shuili. Analysis of mechanistic models for lifetime prediction of drinking water pipes [J]. Water Technology, 2016, 10(3): 1-6 (in Chinese).
- [7] 禹浩,李自力,王太源,等. BP 网络在油田集输管道结垢预测中的应用[J]. 石油化工腐蚀与防护,2010,27(6):57-60.
Yu Hao, Li Zili, Wang Taiyuan, et al. Application of back-propagation neural network in prediction of fouling in oilfield gathering pipelines [J]. Corrosion & Protection in Petrochemical Industry, 2010, 27(6): 57-60 (in Chinese).
- [8] 王绍华,赵庆良,任艳琴. 再生水水质对冷却水系统结垢的影响研究[J]. 环境保护科学,2011,37(1):14-17.
Wang Shaohua, Zhao Qingliang, Ren Yanqin. Effect of reclaimed water quality on scale deposit in cooling water circulation system [J]. Environmental Protection Science, 2011, 37(1): 14-17 (in Chinese).
- [9] 宋雅荣,田一梅,史昱骁. 再生水氯消毒对管网腐蚀的影响[J]. 中国科技论文,2016,11(3):336-340, 357.
Song Yarong, Tian Yimei, Shi Yuxiao. Effect of reclaimed water chlorination on pipeline corrosion [J]. China Sciencepaper, 2016, 11(3): 336-340, 357 (in Chinese).
- [10] 付正辉,黄奎,孙冠中,等. 再生水消毒对循环冷却水系统的腐蚀速率研究[J]. 腐蚀科学与防护技术, 2015, 27(1): 64-68.

- Fu Zhenghui, Huang Kui, Sun Guanzhong, *et al.* Corrosion of stainless steel 316L in disinfected recycling water [J]. Corrosion Science and Protection Technology, 2015, 27(1): 64–68 (in Chinese).
- [11] 陈环宇, 魏宗元, 何晓芳, 等. 给水管网中污染物在管垢上的累积和释放[J]. 环境科学学报, 2015, 35(10): 3088–3097.
- Chen Huanyu, Wei Zongyuan, He Xiaofang, *et al.* Accumulation and release of contaminants in pipe scales of drinking water distribution system [J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 2015, 35(10): 3088–3097 (in Chinese).
- [12] 杨帆, 石宝友, 王东升, 等. 水质化学组分变化对管道铁释放及管垢特征的影响[J]. 中国给水排水, 2012, 28(23): 59–64.
- Yang Fan, Shi Baoyou, Wang Dongsheng, *et al.* Effect of water chemistry changes on iron release and corrosion scale properties of old cast iron pipes [J]. China Water & Wastewater, 2012, 28(23): 59–64 (in Chinese).
- [13] 刘星飞, 田一梅, 郭浩, 等. 球墨铸铁给水管内腐蚀实验研究[J]. 腐蚀科学与防护技术, 2015, 27(5): 459–462.
- Liu Xingfei, Tian Yimei, Guo Hao, *et al.* Tap water corrosion of ductile iron for water-supply pipe [J]. Corrosion Science and Protection Technology, 2015, 27(5): 459–462 (in Chinese).
- [14] 詹俊勇, 高建和. 正交实验与多元线性回归方法在开式压力机机身优化设计中的应用[J]. 机械工程师, 2009, (11): 23–25.
- Zhan Junyong, Gao Jianhe. Application of the orthogonal experiment and multivariate linear regression method in the optimum design of the open-type press frame [J]. Mechanical Engineer, 2009, (11): 23–25 (in Chinese).
- [15] 郭俊旺, 刘旭峰, 魏彩云. 正交设计 $L_9(3^4)$ 的渐进优化线性回归方法[J]. 计算机与应用化学, 2010, 27(11): 1503–1508.
- Guo Junwang, Liu Xufeng, Wei Caiyun. Parameters optimization in regression of linear equation based on experiments designed by orthogonal $L_9(3^4)$ [J]. Computers and Applied Chemistry, 2010, 27(11): 1503–1508 (in Chinese).
- [16] 尚修竹. 城市供水系统水质变化对供水管网管道腐蚀影响的研究[D]. 西安: 西安建筑科技大学, 2013.
- Shang Xiuzhu. The Impact of Water Quality Variation on Water Supply Pipeline Corrosion [D]. Xi'an: Xi'an University of Architecture and Technology, 2013 (in Chinese).
- [17] 牛春晓. 再生水管网中氯消毒剂衰减规律和腐蚀机理研究[D]. 北京: 北京建筑大学, 2015.
- Niu Chunxiao. Study on the Corrosion Mechanism and Residual Chlorine Decay in Reclaimed Water [D]. Beijing: Beijing University of Civil Engineering and Architecture, 2015 (in Chinese).
- [18] 孙慧芳, 石宝友, 吴永丽, 等. 硫酸根、溶解氧和余氯对管垢铁释放的影响[J]. 中国给水排水, 2013, 29(22): 58–63.
- Sun Huifang, Shi Baoyou, Wu Yongli, *et al.* Effects of sulphate, dissolved oxygen and residual chlorine on iron release from cast iron pipes with different scale characteristics [J]. China Water & Wastewater, 2013, 29(22): 58–63 (in Chinese).
- [19] 米子龙. 水源切换对给水管网水质铁稳定的影响及控制特性研究[D]. 北京: 清华大学, 2015.
- Mi Zilong. Characteristics of Iron Stability Caused by Water Source Switch and Iron Release Control in Drinking Water Distribution Systems [D]. Beijing: Tsinghua University, 2015 (in Chinese).



作者简介: 胡珊(1992–), 女, 福建福州人, 硕士研究生, 主要研究方向为再生水管道腐蚀及模拟。

E-mail: shannon_1023@163.com

收稿日期: 2017–09–26