

# 供水灰口铸铁管内壁初始腐蚀影响因素研究

杨玉龙, 汤晗青, 谷立芹, 王皓昉, 张土乔, 李 聪  
(浙江大学建筑工程学院 市政工程研究所, 浙江 杭州 310058)

**摘 要:** 以灰口铸铁挂片为研究对象,以《生活饮用水卫生标准》(GB 5749—2006)中规定值为参考值,分析 pH 值、溶解氧、余氯、温度、氯化钠浓度等因素对管壁初始腐蚀的影响,同时研究初始腐蚀过程中腐蚀量、腐蚀速率以及各个影响因素的变化规律。结果表明:随着溶解氧浓度、余氯浓度、氯化钠浓度以及温度的升高,挂片腐蚀量以及腐蚀速率变大;在 pH 值较小时,挂片腐蚀速率较快。在腐蚀过程中,溶液 pH 值基本呈现先上升后下降最后保持恒定的趋势;而且腐蚀速率的衰减与余氯、溶解氧浓度衰减呈正相关。运用灰色关联度分析方法就各因素对腐蚀的影响力大小进行排序,即溶解氧 > 温度 > pH 值 > 氯化钠 > 余氯,说明在试验条件下,溶解氧对于腐蚀的影响较大,温度次之,余氯的影响力最弱。

**关键词:** 供水管网; 灰口铸铁管; 腐蚀; 溶解氧; 余氯; 关联度

**中图分类号:** TU991 **文献标识码:** C **文章编号:** 1000-4602(2018)15-0049-06

## Influence Factors of Initial Internal Corrosion of Grey Cast Iron Pipes in Water Distribution System

YANG Yu-long, TANG Han-qing, GU Li-qin, WANG Hao-fang, ZHANG Tu-qiao,  
LI Cong

(Institute of Municipal Engineering, College of Civil Engineering and Architecture, Zhejiang University, Hangzhou 310058, China)

**Abstract:** Refer to the values specified in the *Standards for Drinking Water Quality* (GB 5749 - 2006), the influence of pH, DO, residual chlorine, temperature and NaCl concentration on the initial internal corrosion of the grey cast iron pipes were studied. The analyses on the corrosion mass, the corrosion rates and the sensitivity of the influence factors were carried out. The results showed that the corrosion mass and the corrosion rate increased with the increase of DO, residual chlorine, NaCl and temperature. A higher corrosion rate was observed in the acidic environment. During the corrosion process, pH demonstrated a pattern that firstly increased, then decreased, and finally remained constant. The decay of the corrosion rate was positively correlated to the decay of the residual chlorine and DO. The grey correlation analysis method was utilized to analyze the significance of various factors on the corrosion process, which in descending orders were DO > temperature > pH > NaCl > residual chlorine. The effect of dissolved oxygen on corrosion was greatest, followed by the temperature, and the influence of residual chlorine was the least.

**Key words:** water distribution system; grey cast iron pipe; corrosion; DO; residual chlorine; correlation

供水管网作为城市基本设施之一,其规模巨大、结构复杂、维护困难。其中,供水管道腐蚀情况直接影响供水水质<sup>[1]</sup>。根据《全国城市供水管网改造近期规划(2006年—2007年)》中的数据分析,我国铁质管材在供水管网中所占比例达到70%以上,而且大部分服务年限在30年以上。其中,由于灰口铸铁管机械加工性能良好、价格较低和易于制造,在一些城市,其占到总管段的一半,甚至是90%<sup>[2]</sup>。但是铸铁管在使用一定年限后会发生严重的腐蚀和结垢现象。管道被腐蚀,一方面降低了过水流量,增加了能耗,同时会使管壁变薄甚至破裂,从而引起爆管,造成外来微生物入侵;另一方面腐蚀产物与管网水发生反应,加快余氯的衰减,为微生物的生长提供了条件,使管道内壁易于生成生物膜<sup>[3]</sup>。因此,研究灰口铸铁管的腐蚀影响因素及机理,对于改善铁质管网供水水质具有重要意义<sup>[4]</sup>。

目前国内外研究分别集中在温度、pH值、微生物、余氯等因素对管道腐蚀的影响<sup>[5~8]</sup>。其中一些学者证明了某个腐蚀因素,或者是偏重介绍了腐蚀速率计算方法,但并没有进行多因素研究<sup>[9~11]</sup>。基于此,笔者以灰口铸铁挂片模拟实际供水灰口铸铁管道内壁,以《生活饮用水卫生标准》(GB 5749—2006)中规定值为参考值,分析pH值、溶解氧、余氯、温度、氯化钠浓度等因素对管壁腐蚀的影响。为缩短试验持续时间,笔者侧重研究管道在初始阶段的腐蚀情况,因此以36 h浸泡时间作为管网初始腐蚀时间界限;以某一种物理量为标准,在各个时间点监测各因素数值,观察各因素的相互影响,并采用灰色关联度法将几种腐蚀因素进行重要性排序,旨在为研究管道加速腐蚀提供参考。

## 1 试验材料与方法

### 1.1 试验材料

试验选用5 mm×25 mm×50 mm标准灰口铸铁挂片模拟管道内壁。为充分模拟管道,使挂片能够区分内壁和外壁,使用耐腐蚀的环氧树脂将挂片涂抹封闭,只保留其中一面来模拟管道内壁。具体处理方法如下:①将标准腐蚀挂片依次在蒸馏水和无水乙醇中用脱脂棉各擦洗两遍,之后用滤纸包好,置于干燥器中;②将环氧树脂和聚酰胺树脂以1:1

的比例充分混合,保证其中不含有气泡;③保留挂片的一面模拟管道内壁,其余5面使用混合好的环氧树脂涂抹,保证每片挂片上的脂层均匀,使其封闭无孔,置于通风处晾干。为配合后续试验,将其置于50℃烘箱中5 h后称量并记录初始质量 $M_0$ 。

### 1.2 试验方法

通过稀盐酸与氢氧化钠溶液调节溶液pH值(使用pH Meter酸度计测定);通过向水中通入高纯氧气改变溶解氧浓度(使用溶解氧仪测定);通过添加稀释后的次氯酸钠溶液调节余氯浓度(使用DR2800光度计测定);通过添加氯化钠固体的形式来改变氯化钠浓度;通过使用冰箱以及烘箱来调节试验所需温度。

取烧杯加入纯水,分别调节其pH值(4、6.5、7.5、8.5、10、12)、温度(5、15、25、35℃)以及溶解氧(5、10、15 mg/L)、余氯(0、1、2 mg/L)和氯化钠(0、50、150、250 mg/L)浓度等因素。因为正常金属与水接触就会产生腐蚀,所以将一组挂片放入纯水中作为对照试验;分析过程中皆去掉对照试验中的腐蚀量,以相对值比较。在每组试验中分别选取pH值、溶解氧、余氯、温度和氯化钠浓度等其中一个作为控制因素,设置一系列浓度梯度,其他因素不做处理;但是在每个取样点时,测定所有因素的值,以便于分析当某个因素为主要影响因素时其他因素的变化规律。在每组试验中,将3个标准灰口铸铁挂片分别放入3个条件相同的烧杯中做平行试验,剔除异常值,取3个挂片的平均值进行分析。挂片放置过程中,将挂片无涂抹面朝向烧杯口,使其与溶液完全接触,然后用保鲜膜将烧杯密封,并用锡纸将其包裹,创造无光环境。每个工况下进行7组试验,以便在取样点1、3、6、9、12、24、36 h取样。每个取样点分别测定烧杯中溶液pH值、溶解氧、余氯和氯化钠浓度。取样过程:在 $T_i$ 时间点将挂片取出,用纯水将挂片上的腐蚀产物清洗干净,再将挂片置于50℃烘箱中5 h后称量并记录最终质量 $M_i$ 。腐蚀量 $m_i$ 为初始质量 $M_0$ 与最终质量 $M_i$ 的差值。

平均腐蚀速率:

$$v = \frac{m_i}{T_i \times S} \quad (1)$$

其中,  $\bar{v}$  为平均腐蚀速率,  $\text{mg}/(\text{h} \cdot \text{m}^2)$ ;  $T_i$  为腐蚀时间,  $\text{h}$ ;  $S$  为挂片腐蚀面积,  $\text{m}^2$ 。

瞬时腐蚀速率:

$$v' = \frac{m_i - m_{i-1}}{S \times (T_i - T_{i-1})} \quad (2)$$

其中,  $v'$  为瞬时腐蚀速率,  $\text{mg}/(\text{h} \cdot \text{m}^2)$ ;  $T_{i-1}$  为前一个时刻腐蚀时间,  $\text{h}$ ;  $m_{i-1}$  为前一个时刻最终质量,  $\text{mg}$ 。

## 2 结果与讨论

对照组在取样点 1、3、6、9、12、24、36 h 时的挂片腐蚀量分别为 0.018、0.070、0.215、0.305、0.240、0.472、0.562 mg。

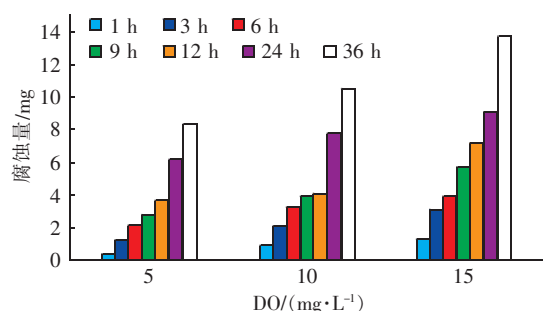
### 2.1 pH 值对铸铁片初始腐蚀的影响

为探究极端情况以及饮用水适宜范围内 pH 值对铸铁片初始腐蚀的影响,调节纯水 pH 值分别为 4、6.5、7.5、8.5、10、12,考察挂片腐蚀量、平均腐蚀速率及溶液 pH 值的变化。结果表明,不同 pH 值条件下,随着腐蚀时间的延长,挂片腐蚀量都呈增加趋势,且不同 pH 值之间差异不明显。分析原因可能是,当 pH 值在 4~10 范围内时,铁腐蚀主要是由于发生了析氧反应,而 pH 值并不是关键因素,因此各 pH 值之间腐蚀量差异不明显。在相同取样时间,各 pH 值条件下的平均腐蚀速率基本相同,且随着腐蚀时间的延长,平均腐蚀速率呈减小趋势。而对于 pH 值为 10 时的平均腐蚀速率,可以结合不同初始 pH 值下溶液 pH 值的变化规律分析。溶液中  $\text{OH}^-$  与  $\text{Fe}^{2+}$  结合生成  $\text{Fe}(\text{OH})_2$ ,进而生成  $\text{Fe}(\text{OH})_3$ ,后者会沉积在挂片上,抑制腐蚀的发生。当初始 pH 值为 4、6.5、7.5、8.5,腐蚀时间达到 12 h 后,溶液 pH 值基本相同(约为 8),溶液中  $\text{OH}^-$  浓度逐渐增加,平均腐蚀速率减缓;当初始 pH 值为 10 时,溶液 pH 值呈下降趋势,溶液中  $\text{OH}^-$  浓度逐渐降低,平均腐蚀速率增加;pH 值为 12 时,挂片基本没有产物析出。

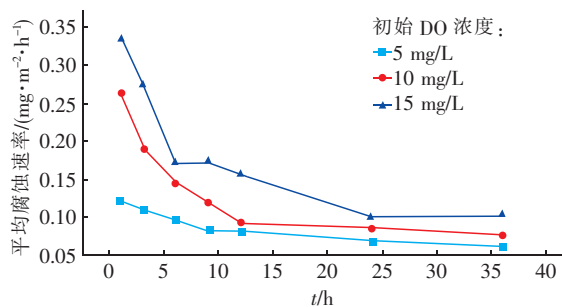
### 2.2 溶解氧对铸铁片初始腐蚀的影响

调节纯水初始 DO 浓度 ( $\text{DO}_0$ ) 分别为 5、10、15  $\text{mg/L}$ ,探究不同  $\text{DO}_0$  浓度下挂片腐蚀量、平均腐蚀速率以及溶液 DO 浓度的变化规律,结果见图 1。由图 1(a)可知,相同腐蚀时间下,随着 DO 浓度增加,挂片腐蚀量逐渐增加。腐蚀 36 h 后,DO 为 15  $\text{mg/L}$  时腐蚀量为 13.8 mg,约是 DO 为 5  $\text{mg/L}$  时的 1.5 倍。分析其原因是:当水中 DO 浓度较大时,有更多

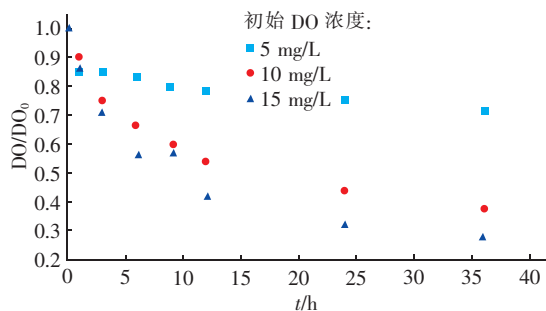
的氧原子获得电子生成  $\text{OH}^-$ ,结合失去电子的  $\text{Fe}^{2+}$  并最终生成  $\text{Fe}(\text{OH})_3$ ,因此挂片腐蚀量与 DO 浓度呈正相关。由图 1(b)和(c)可知,初始腐蚀时,挂片表面无氧化层覆盖,氧原子更易获得电子,从而腐蚀速率最快;随着溶液中 DO 浓度的降低,氧原子与挂片表面接触几率减少,同时由于  $\text{Fe}(\text{OH})_3$  的生成,进一步降低了氧原子获得电子的可能,造成腐蚀速率下降。平均腐蚀速率与 DO 消耗速率呈正相关。



a. 不同初始 DO 浓度下挂片腐蚀量随时间的变化



b. 不同初始 DO 浓度下挂片平均腐蚀速率随时间的变化



c. 不同初始 DO 浓度下溶液中 DO 浓度随时间的变化

图 1 溶解氧对铸铁片初始腐蚀的影响

Fig. 1 Influence of DO on corrosion of grey cast iron pipes

### 2.3 余氯对铸铁片初始腐蚀的影响

调节纯水初始余氯浓度分别为 0、1、2  $\text{mg/L}$ ,探究不同余氯浓度下挂片腐蚀量及溶液余氯浓度的变化规律。余氯既可以抑制管网内微生物的生长,同时也会促进管道内壁腐蚀。在腐蚀过程中,发生氧

化反应:  $\text{Fe} - 2\text{e}^- = \text{Fe}^{2+}$ , 以及还原反应:  $3\text{HClO} + \text{Fe}^{2+} + 5\text{e}^- = 3\text{Cl}^- + \text{Fe}(\text{OH})_3$ 。余氯浓度的增加会加剧挂片的腐蚀程度(见图2),不同余氯浓度下,腐蚀速率差异较大,说明余氯浓度对腐蚀速率有影响。对两种条件下溶液中余氯衰减进行拟合,二者皆符合指数衰减,当初始余氯含量为1 mg/L时衰减指数  $k=0.225$ ,初始余氯含量为2 mg/L时  $k=0.094$ 。造成这种现象的原因是:对于试验用灰口铸铁挂片,余氯浓度为2 mg/L时,HClO没有完全参与腐蚀,有一定富余量,造成后者衰减速率低于前者。

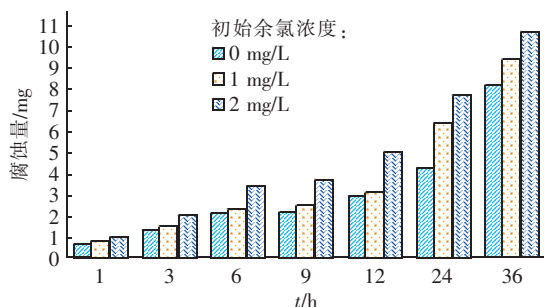


图2 不同初始余氯浓度下挂片腐蚀量随时间的变化

Fig. 2 Relationship between corrosion mass and initial residual chlorine

## 2.4 氯化钠浓度对铸铁片初始腐蚀的影响

调节纯水初始NaCl浓度分别为0、50、150、250 mg/L,探究不同NaCl浓度下挂片腐蚀量的变化规律。结果表明,随着时间的延长,挂片腐蚀量逐步增加,在氯化钠浓度为150 mg/L时,变化速率最大;而且随着氯化钠浓度的增加,挂片腐蚀量增加得越来越快,腐蚀速率加快,随着腐蚀时间的延长,差距越发明显。分析其原因是:在腐蚀过程中,NaCl没有直接参与电化学反应,只是作为电化学反应传输电子的介质,NaCl加快电子的传输,腐蚀速率加快。但当氯化钠浓度为250 mg/L时,其挂片腐蚀量略有下降,分析其原因是:在试验条件下,氯化钠浓度为150 mg/L左右时挂片腐蚀已达到较快速率,当继续

增大氯化钠浓度时,对于挂片腐蚀并没有一个明显的增强作用,即相对于该挂片腐蚀电化学反应中的电子转移数量,NaCl浓度处于富余水平;另外一方面可能是氯化钠浓度为150 mg/L时,挂片腐蚀进行到了一定程度,其表面积聚的覆盖物对腐蚀的继续进行具有一定的抑制作用,所以会出现提高氯化钠浓度而腐蚀量下降的现象。

## 2.5 温度对铸铁片初始腐蚀的影响

调节纯水初始温度分别为5、15、25、35℃,探究不同温度下挂片腐蚀量以及溶液温度的变化规律。结果表明,温度的升高会加剧挂片的腐蚀程度。25和35℃条件下挂片腐蚀量一直处于上升趋势,而其他两组在12 h后腐蚀量变化非常缓慢,直至稳定。腐蚀36 h时,35℃条件下挂片腐蚀量高达14.95 mg,25℃条件下为11.28 mg,而15和5℃条件下分别为5.03和4.09 mg。分析其原因是:在试验温度范围内,温度升高使得水体中各种微化学及物化反应速率加快,同时为微生物提供了更加舒适的生长环境,从而带动挂片腐蚀速率增大。

## 3 影响因素关联度分析

灰色关联度分析法是根据因素之间发展趋势的相似或相异程度,亦即“灰色关联度”,作为衡量因素间关联程度的一种方法,若两个因素的变化趋势具有一致性,即同步变化程度较高,二者关联程度较高,反之则较低<sup>[12]</sup>。

笔者运用灰色关联度分析方法确定各因素之间的关联度,分析各因素对挂片初始腐蚀的影响力。试验中以影响因素作为比较数列、腐蚀速率作为参考数列。选用均值化数据无量纲化处理<sup>[13]</sup>进行分析,探讨不同影响因素对灰口铸铁挂片平均腐蚀速率以及瞬时腐蚀速率的影响。具体分析过程如下:

① 将每个取样点的腐蚀速率及各影响因素值分别作为参考数列和比较数列排列组合,见表1。

表1 影响因素及腐蚀速率

Tab. 1 Influence factors and corrosion rate of each sampling point

平均腐蚀速率/ ( $\text{mg} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{h}^{-1}$ )	瞬时腐蚀速率/ ( $\text{mg} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{h}^{-1}$ )	pH 值	氯化钠/ ( $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$ )	余氯/ ( $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$ )	温度/ ℃	溶解氧/ ( $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$ )
0.089 34	0.091 61	9.0			18.2	4.04
0.113 08	0.113 08	7.69	250		19.7	4.47
0.054 55	0.027 87	7.24	50		18.6	3.94
0.335 13	0.335 13	8.74			18.8	12.87
...	...	...			...	...



续表 1 (Continued)

平均腐蚀速率/ ( $\text{mg} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{h}^{-1}$ )	瞬时腐蚀速率/ ( $\text{mg} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{h}^{-1}$ )	pH 值	氯化钠/ ( $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$ )	余氯/ ( $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$ )	温度/ $^{\circ}\text{C}$	溶解氧/ ( $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$ )
0.119 79	0.119 79	8.05	150		19.7	4.54
0.232 71	0.232 71	8.64		0.86	18.8	4.86
0.079 68	0.068 11	8.49		0.09	18.8	3.03
0.192 53	0.146 74	9.70		1.40	19.2	4.49

② 运用均值化进行数据无量纲化处理,然后进行关联系数计算,并最终得到各影响因素分别与平均腐蚀速率、瞬时腐蚀速率的关联度,如表 2、3 所示。

表 2 均值化处理后各因素与平均腐蚀速率的关联度  
Tab. 2 Correlation of various influence factors with average corrosion rate after equalization

项目	pH 值	氯化钠	余氯	温度	溶解氧
关联系数	0.827 286	0.734 405		0.858 549	0.882 381
	0.805 779	0.552 331		0.796 446	0.782 128
	0.841 349	0.903 159		0.899 795	0.915 322
	0.812 287	0.855 912		0.765 764	0.785 430
	0.771 178	0.913 724		0.726 841	0.757 520
	0.732 338	0.956 930		0.691 954	0.765 416
	...			...	...
	0.815 478		0.662 417	0.824 714	0.907 545
	0.405 888		0.836 847	0.401 249	0.418 028
	0.611 448		0.765 755	0.567 052	0.581 023
	0.728 246		0.709 342	0.683 765	0.653 622
	0.955 207		0.896 851	0.898 332	0.808 769
	0.909 530		0.974 453	0.880 088	0.774 031
关联度	0.790 74	0.742 38	0.726 19	0.793 04	0.817 00

表 3 均值化处理后各因素与瞬时腐蚀速率的关联度  
Tab. 3 Correlation of various influence factors with instantaneous corrosion after equalization

项目	pH 值	氯化钠	余氯	温度	溶解氧
关联系数	0.804 037	0.576 897		0.769 120	0.818 784
	0.765 961	0.554 304		0.732 885	0.792 518
	0.775 021	0.816 071		0.813 877	0.823 965
	0.768 771	0.736 201		0.748 548	0.747 131
	0.713 297	0.751 645		0.732 301	0.731 245
	0.702 859	0.679 247		0.694 319	0.698 914
	...			...	...
	0.470 296		0.537 659	0.462 266	0.484 609
	0.900 787		0.803 554	0.870 109	0.926 167
	0.886 785		0.752 248	0.963 601	0.913 739
	0.632 182		0.901 894	0.663 082	0.669 839
	0.800 282		0.768 560	0.831 720	0.845 450
	0.961 952		0.663 272	0.953 994	0.992 905
关联度	0.788 32	0.756 80	0.739 61	0.791 11	0.804 18

如表 2 所示,通过均值化处理得到 pH 值、氯化钠浓度、余氯浓度、温度、溶解氧浓度与平均腐蚀速率的关联度分别为 0.790 74、0.742 38、0.726 19、0.793 04、0.817 00。将影响因素按重要性从大到小排序为:溶解氧>温度>pH 值>氯化钠>余氯。

如表 3 所示,通过均值化处理得到 pH 值、氯化钠浓度、余氯浓度、温度、溶解氧浓度与瞬时腐蚀速率的关联度分别为 0.788 32、0.756 80、0.739 61、0.791 11、0.804 18。将影响因素按重要性从大到小排序为:溶解氧>温度>pH 值>氯化钠>余氯。

挂片平均腐蚀速率、瞬时腐蚀速率与各影响因素的关联度不同,说明腐蚀速率受各影响因素的影响程度不同,各因素对腐蚀速率起着不同的作用。而分别以平均腐蚀速率和瞬时腐蚀速率为评价指标,将几种影响因素按关联度从大到小排序的结果一致。

4 结论与展望

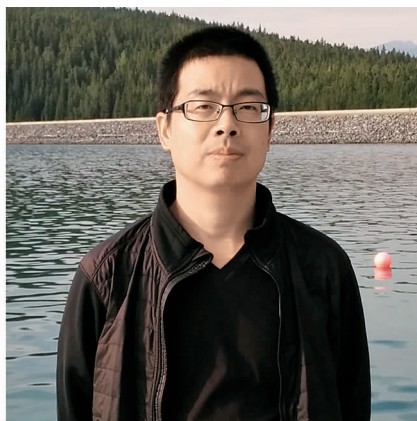
① 当水体中各影响因素浓度较高时,挂片腐蚀速率较快。随着腐蚀时间的延长,腐蚀速率下降,腐蚀量持续增加。不同 pH 值条件下,随着腐蚀时间的延长,挂片腐蚀量都呈现增加趋势,且差异不明显;相同腐蚀时间下,随着 DO 浓度的增加,挂片腐蚀量逐渐增加;余氯浓度的增加会加剧挂片的腐蚀程度,不同余氯浓度下,腐蚀速率差异较大;在试验浓度范围内,随着 NaCl 浓度的增加,腐蚀量增加,腐蚀速率加快。

② 使用灰色关联度分析方法,运用均值化数据无量纲化处理,分别将各影响因素对平均腐蚀速率、瞬时腐蚀速率的关联度进行计算,根据关联度大小排序均为溶解氧>温度>pH 值>氯化钠>余氯,表明在静态水环境中,以灰口铸铁挂片模拟实际供水管道内壁时,溶解氧对于腐蚀的影响较大,温度次之,而余氯的影响力最弱。

参考文献:

[ 1 ] 李亚峰,蒋白懿,赵洪宾,等. 灰口铸铁给水管道内壁

- 腐蚀试验[J]. 沈阳建筑大学学报:自然科学版, 2010,26(2):321-325.
- Li Yafeng, Jiang Baiyi, Zhao Hongbin, *et al.* Experimental study on internal corrosion of grey cast iron pipeline in water distribution[J]. Journal of Shenyang Jianzhu University: Natural Science, 2010, 26(2): 321-325 (in Chinese).
- [2] 邵煜, 张士乔, 俞亭超. 考虑腐蚀的埋地灰口铸铁管失效预测及可靠度分析[J]. 浙江大学学报:工学版, 2010,44(1):160-165.
- Shao Yu, Zhang Tuqiao, Yu Tingchao. Failure predication and reliability analysis of buried grey cast iron water mains considering corrosion[J]. Journal of Zhejiang University: Engineering Science, 2010, 44(1): 160-165 (in Chinese).
- [3] 赵志领, 赵洪宾, 何文杰, 等. 生长环作用下的给水管网水质特征[J]. 哈尔滨商业大学学报:自然科学版, 2008,24(5):532-534.
- Zhao Zhiling, Zhao Hongbin, He Wenjie, *et al.* Research on water quality characteristic effected by growing ring in water network[J]. Journal of Harbin University of Commerce: Natural Science Edition, 2008, 24(5): 532-534 (in Chinese).
- [4] 姜文超, 蒋晖, 吴津津, 等. 腐蚀铸铁管中饮用水水质变化规律试验研究[J]. 华中科技大学学报:自然科学版, 2013,41(6):117-121.
- Jiang Wenchao, Jiang Hui, Wu Jinjin, *et al.* Experimental study on quality variation of drinking water in corroded unlined iron pipes[J]. Journal of Huazhong University of Science and Technology: Nature Science Edition, 2013, 41(6): 117-121 (in Chinese).
- [5] Amin M A, Khaled K F, Mohsen Q, *et al.* A study of the inhibition of iron corrosion in HCl solutions by some amino acids[J]. Corros Sci, 2010, 52(5): 1684-1695.
- [6] Salama M M. An alternative to API 14E erosional velocity limits for sand laden fluids[J]. J Energy Resour Technol, 2000, 122(2): 71-77.
- [7] Tamura H. The role of rusts in corrosion and corrosion protection of iron and steel[J]. Corros Sci, 2008, 50(7): 1872-1883.
- [8] Sadiq R, Rajani B, Kleiner Y. Probabilistic risk analysis of corrosion associated failures in cast iron water mains[J]. Reliab Eng Syst Saf, 2004, 86(1): 1-10.
- [9] Klinesmith D E, McCuen R H, Albrecht P. Effect of environmental conditions on corrosion rates[J]. J Mater Civil Eng, 2007, 19(2): 121-129.
- [10] Dewald E, Mackinnon A, Tommasini R, *et al.* Marine sulfate-reducing bacteria cause serious corrosion of iron under electroconductive biogenic mineral crust[J]. Environ Microbiol, 2012, 14(7): 1772-1787.
- [11] Réguer S, Dillmann P E, Mirambet F. Buried iron archaeological artefacts: corrosion mechanisms related to the presence of Cl-containing phases[J]. Corros Sci, 2007, 49(6): 2726-2744.
- [12] 谢松云, 董大群. 基于灰关联分析的目标识别方法研究[J]. 系统仿真学报, 2002, 14(2): 257-261.
- Xie Songyun, Dong Daqun. A new approach to target recognition based on gray correlation analysis[J]. Journal of System Simulation, 2002, 14(2): 257-261 (in Chinese).
- [13] Schwartz M H, Koop S E, Bourke J L, *et al.* A nondimensional normalization scheme for oxygen utilization data[J]. Gait & Posture, 2006, 24(1): 14-22.



作者简介:杨玉龙(1973-), 男, 河南偃师人, 博士, 讲师, 主要从事市政给排水的教学与科研工作。

E-mail: yulongy@zju.edu.cn

收稿日期: 2018-01-13