

DOI:10.19853/j.zgjsps.1000-4602.2025.11.004

# 金属供水管道内壁腐蚀行为与多因素预测模型

郭育硕, 韩小蒙, 舒诗湖

(东华大学 环境科学与工程学院, 上海 201620)

**摘要:** 金属供水管道在我国城镇供水管网中占有较大比例,针对灰口铸铁管道和碳钢管道进行静态烧杯实验和动态模拟实验,采用失重法和“图片+ImageJ软件”方法探究不同条件下金属试片的腐蚀程度。结果表明,动态模拟实验组与静态烧杯实验组的腐蚀速率存在显著差异;腐蚀速率均随温度、外加微生物量和电化学电位等因素发生变化。应用统计分析和建模技术,基于Python并利用实验数据建立线性回归、随机森林回归、决策树回归和支持向量机回归等多因素预测模型。其中,随机森林回归模型在多方面表现最佳,均方误差(MSE)为74.71,决定系数( $R^2$ )为0.85;决策树回归模型性能中等,MSE为85.62, $R^2$ 为0.82,这些模型有助于准确预测腐蚀速率,使得预防和维护工作更具有针对性。

**关键词:** 金属供水管道; 微生物腐蚀; 电化学腐蚀; 多因素预测模型

**中图分类号:** TU991 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-4602(2025)11-0024-07

## Corrosion Behavior of Inner Wall of Metal Water Supply Pipes and Multi-factor Prediction Model

GUO Yu-shuo, HAN Xiao-meng, SHU Shi-hu

(School of Environmental Science and Engineering, Donghua University, Shanghai 201620, China)

**Abstract:** Metal water supply pipes constitute a significant proportion of urban water supply networks in China. Static beaker experiments and dynamic simulation experiments were carried out on gray cast iron pipes and carbon steel pipes. The corrosion degree of metal test specimens under various conditions was investigated using the weight loss method and the “image + ImageJ software” analysis approach. There was a marked disparity in the corrosion rate observed between the dynamic simulation experimental group and the static beaker experimental group. The corrosion rates varied depending on factors such as temperature, additional microbial quantity, and chemical potential. By leveraging statistical analysis and modeling techniques in conjunction with Python, multi-factor prediction models including linear regression, random forest regression, decision tree regression, and support vector machine regression were developed based on experimental data. Among the models, the random forest regression model demonstrated superior performance across all metrics, achieving a mean square error (MSE) of 74.71 and a coefficient of determination ( $R^2$ ) of 0.85. The decision tree regression model showed moderate performance, with a MSE of 85.62 and an  $R^2$  value of 0.82. These models help accurately predict the

基金项目: 上海市科委社发重点项目(19DZ1204400)

通信作者: 舒诗湖 E-mail: shushihu@dhu.edu.cn

corrosion rate, making the prevention and maintenance work more targeted.

**Key words:** metal water supply pipe; microbiological corrosion; electrochemical corrosion; multi-factor prediction model

给水管道的腐蚀是指在水管内部和外部表面发生的一系列化学反应,导致管道材料失效和损坏。管道腐蚀可能由多种因素引起,如水质、管道材料、操作和维护等。腐蚀会导致管道壁厚减少、管道变形、管道泄漏和水质变差等问题,给供水安全带来威胁<sup>[1]</sup>。在给水管道的腐蚀中,微生物腐蚀和电化学腐蚀是最常见的两种形式<sup>[2]</sup>。微生物腐蚀和电化学腐蚀之间存在相互作用,微生物可以在金属表面形成生物膜,该生物膜可以作为电化学腐蚀的阳极,从而加速电化学腐蚀。Li等<sup>[3]</sup>认为,生物膜由细胞外聚合物(EPS)和嵌入的无梗细胞组成。EPS在生物膜的形成、成熟和维持过程中发挥着重要作用。EPS包括多糖、蛋白质、脂类和核酸,它们有时形成凝胶状黏液,EPS的存在是造成腐蚀的重要因素之一。铁管腐蚀是自然发生的,通常是一个复杂的电化学过程,阳极为铁基,阴极为水中存在的氧化剂。Zhang等<sup>[4]</sup>发现,微生物腐蚀中最常见的氧化剂包括溶解氧(DO)、氯(Cl<sub>2</sub>)、次氯酸(HOCl)和次氯酸根离子(OCl<sup>-</sup>),它们能在管壁内与零价铁快速反应。

目前,国内科研人员在使用试片法探究金属腐蚀速率过程时,大多仍使用失重法进行研究<sup>[5]</sup>。这种方法的基本原理是通过测量金属样品在腐蚀环境中的质量损失来确定腐蚀速率。通过比较腐蚀前后的样品质量来计算腐蚀速率。腐蚀速率通常以单位时间内损失的质量(mg/a)来表示<sup>[6]</sup>。笔者提出一种将iPhone 13 Pro的后置摄像头与图像处理软件ImageJ相结合的方法,用来测量金属试片表面的腐蚀面积。通过自然静态实验、微生物静态实验、原电池电化学实验和管道动态模拟实验,比较不同条件下金属试片的腐蚀行为,考察不同因素对给水管道的腐蚀影响,旨在为腐蚀控制和预防提供参考,并为管道材料的选择、防护涂层的设计和腐蚀控制策略的制订提供科学依据。

收集管道腐蚀数据,包括不同条件下的腐蚀速率、水质参数、管道材料信息和微生物活动水平等。然后,应用统计分析和建模技术,利用Python建立针对上述数据的多因素预测模型,包括线性回归模

型、随机森林回归模型、决策树回归模型和支持向量机回归模型等。这些模型可将不同因素之间的关系进行数学建模,从而能够更好地了解哪些因素对管道腐蚀具有主导作用,哪些因素可能相互作用,以及它们如何影响腐蚀速率。通过上述模型,可以预测在不同操作条件下管道腐蚀的程度,这有助于提前采取控制措施,减轻腐蚀带来的问题。在具体的多因素预测模型分析中,将详细讨论各模型的性能和适用性,以确定哪个模型最适合数据集。预测结果将有助于更全面地明确管道腐蚀机理,以期管道腐蚀问题的解决提供科学支持。

## 1 材料和方法

### 1.1 实验材料

反应溶液来源于上海市松江区自来水,浊度、铁、锰、余氯和菌落总数等97项生活饮用水卫生指标全部100%达标。

实验培养基为铁细菌选择培养基(Winogradsky培养基),其主要成分为(NH<sub>4</sub>)<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>(0.5 g)、NaNO<sub>3</sub>(0.5 g)、K<sub>2</sub>HPO<sub>4</sub>(0.5 g)、MgSO<sub>4</sub>·7H<sub>2</sub>O(0.5 g)、CaCl<sub>2</sub>·6H<sub>2</sub>O(0.5 g)、柠檬酸铁铵(10.0 g),蒸馏水为1 000 mL,pH为7.0。培养基使用前放入高温蒸汽灭菌锅中灭菌。

实验采用自制的模拟管网反应器,见图1。

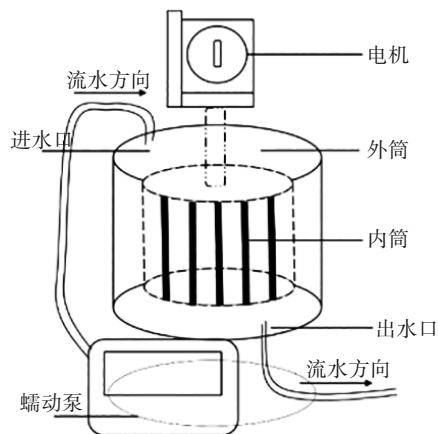


图1 自制的模拟管网反应器示意

Fig.1 Schematic diagram of homemade simulated pipeline reactor

电机转速为0~100 r/min;采用锡纸包裹玻璃外

筒,玻璃外筒直径为20 cm,高度为20 cm;内筒外覆20个试片,内筒直径为15 cm,高度为15 cm;进水口处连接蠕动泵,蠕动泵转速为0.1~100 r/min。

## 1.2 实验方法

自然静态实验:使用1号A3碳钢50 mm×25 mm×2 mm和2号一级灰口铸铁50 mm×25 mm×3 mm规格的腐蚀试片,实验前用丙酮去除试片表面铁锈,依次采用600、800、1 200目的砂纸打磨光滑,将试片浸泡在无水乙醇中,再置于干净的滤纸上用冷风吹干。在无菌台上进行30 min紫外消毒,之后置于干燥器中保存4 h以上<sup>[7]</sup>。分别放置烧杯中,烧杯内灌入可淹没试片的自来水后对烧杯进行密封,环境温度为常规室温。每3 d为一个周期,使用电子天平记录试片质量,并用手机观测其表面腐蚀情况。

电化学静态实验:除锈除菌过程同上。使用厚0.1 mm、长100 mm、宽40 mm的纯锌片作为负极构建原电池反应器,促进溶液中电流的产生。再将锌片和待测的金属试片放入烧杯中以模拟电化学环境,实验过程中保证锌片与金属试片无接触,烧杯内灌入可淹没试片的自来水后密封烧杯,环境温度为常规室温。每3 d为一个周期,使用电子天平记录试片质量,并用手机观测其表面腐蚀情况。

微生物静态实验:除锈除菌过程同上,之后放于烧杯中,烧杯内灌入可淹没试片的自来水,对烧杯进行密封,环境温度为常规室温。通过培养铁细菌,向烧杯的封闭环境中加入浓度为1 500 CFU/mL的铁细菌菌液1 mL,每3 d为一个周期,使用电子天平记录试片质量,并用手机摄像头观测其表面腐蚀情况。

动态实验:在正常环境条件下,利用管道模拟发生器进行实验,通过设置固定的转速模拟自来水在实际管道中的流动,通过蠕动泵实现水循环,每天更换一次水源,蠕动泵白天工作,晚上停止。

管道模拟发生器上配置长为15 cm、下宽为1.5 cm、上宽为1.1 cm、厚度为0.2 cm、角度为45°的试片16根。除锈除菌过程同上,使用电子天平记录试片每天质量的变化,以期绘制出试片腐蚀损失曲线。每天使用手机摄像头对腐蚀试片进行观测,主要观察其表面腐蚀区面积的变化。采用传统失重法<sup>[7]</sup>计算腐蚀速率。

## 2 结果与讨论

### 2.1 表面腐蚀面积占比的动态变化

#### 2.1.1 静态烧杯实验

静态烧杯实验中金属试片表面腐蚀面积的变化如图2所示。

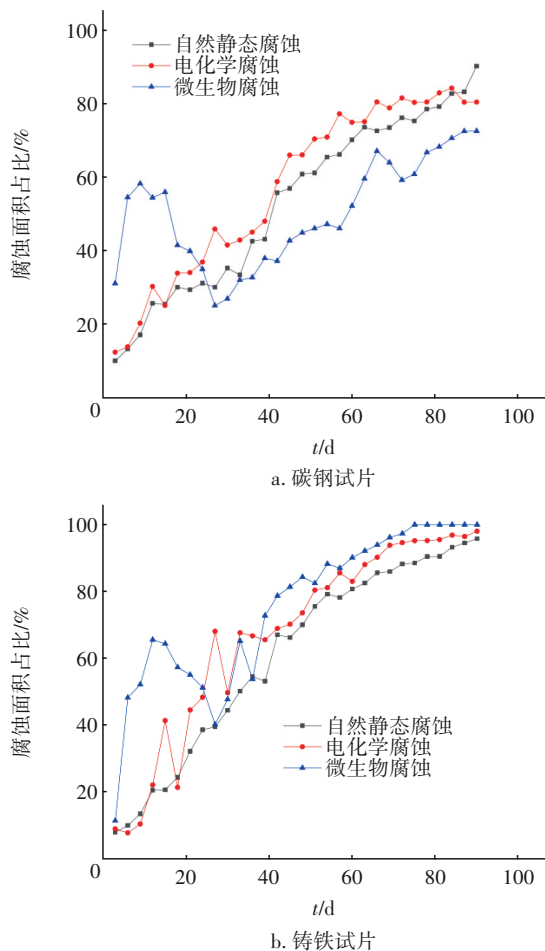


图2 静态烧杯实验中金属试片表面腐蚀面积的变化  
Fig.2 Change in surface corrosion area of metal test specimens in static beaker experiments

从图2(a)可以看出,添加铁细菌的碳钢试片表面腐蚀面积占比在实验初始阶段显著增加,远超未添加铁细菌的对照组和电化学腐蚀实验组。然而,在实验进行至约25 d时,观察到添加铁细菌的试片表面腐蚀面积占比降至最低,甚至低于其他两组。这一现象可以通过韩文滔<sup>[7]</sup>的研究结果来解释。本实验中,铁细菌在生长过程中可能经历不同的生长阶段。实验初期,铁细菌可能处于对数生长期,其代谢活动明显促进了对金属试片的腐蚀。然而,随着时间的推移,铁细菌进入生长稳定期,而后进入衰亡期。在衰亡期,大量的铁细菌死亡可能导致其

代谢活动减弱,进而影响腐蚀过程。因此,上述腐蚀现象可以解释为由于铁细菌在一定时间后失去或部分失去活性所引起的。

在铸铁试片静态实验中,出现了与之前碳钢试片实验相反的结果,如图2(b)所示。添加铁细菌铸铁试片的表面腐蚀面积占比在大多数时间段内明显高于其他两组,仅在15~25 d表现出腐蚀面积减小的现象。铸铁与碳钢之间碳含量明显不同,导致了在铸铁基体中更有利于铁细菌的生长和金属腐蚀。碳钢与铸铁两组实验中均出现了金属试片表面腐蚀面积占比先增后减的情况,特别是在添加铁细菌的烧杯实验组中,这种表面腐蚀面积占比先增加后减小的现象尤为显著。这一现象可能与铁细菌的活动有关,铁细菌通常分泌EPS,这些物质可以附着在金属表面,并与腐蚀产物一起形成一种黏附性层,其可能会阻止腐蚀介质直接接触金属表面,从而减缓腐蚀过程。因此,铁细菌的活动和EPS的生成可能导致了铸铁试片表面腐蚀面积占比不寻常的变化趋势<sup>[8-9]</sup>。

### 2.1.2 动态模拟实验

动态模拟实验中金属试片表面腐蚀面积的变化如图3所示。

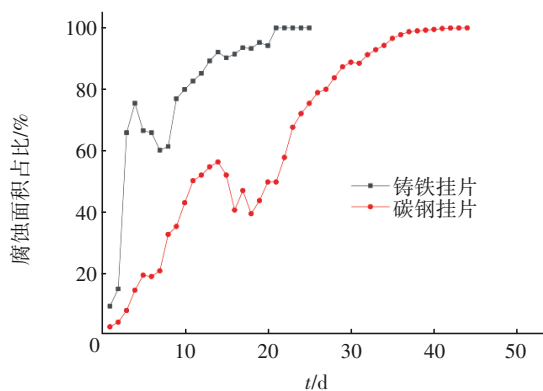


图3 动态模拟实验中金属试片表面腐蚀面积的变化

Fig.3 Change in surface corrosion area of metal test specimens in dynamic simulation experiments

从图3可以看出,铸铁试片在21 d后的表面腐蚀率达到100%,而碳钢试片则在44 d后表面腐蚀率才开始趋近于100%,这表明铸铁试片的腐蚀速率远远快于碳钢试片。这种差异可能是铸铁和碳钢不同的化学成分和晶体结构所致。铸铁通常更加富含碳和硅等元素,因此在某些环境条件下更容易发生腐蚀。动态模拟实验中碳钢与铸铁试片表

面腐蚀面积的增速明显快于静态烧杯实验组。有研究表明,在动态模拟实验中,流体流动会将腐蚀产物从金属表面冲走,保持金属表面暴露,促进了腐蚀过程<sup>[10]</sup>。而在静态烧杯实验组中,流体几乎不流动,腐蚀产物可能在金属表面积累,减缓了腐蚀速率。动态实验组中的高流速通常会增加溶解氧浓度,这会进一步促进氧化腐蚀反应。静态实验组的溶解氧浓度较低,因此氧化反应速率相对较慢<sup>[11]</sup>。

## 2.2 腐蚀速率的动态变化

### 2.2.1 静态烧杯实验

金属试片在静态烧杯实验中腐蚀速率的变化如图4所示。

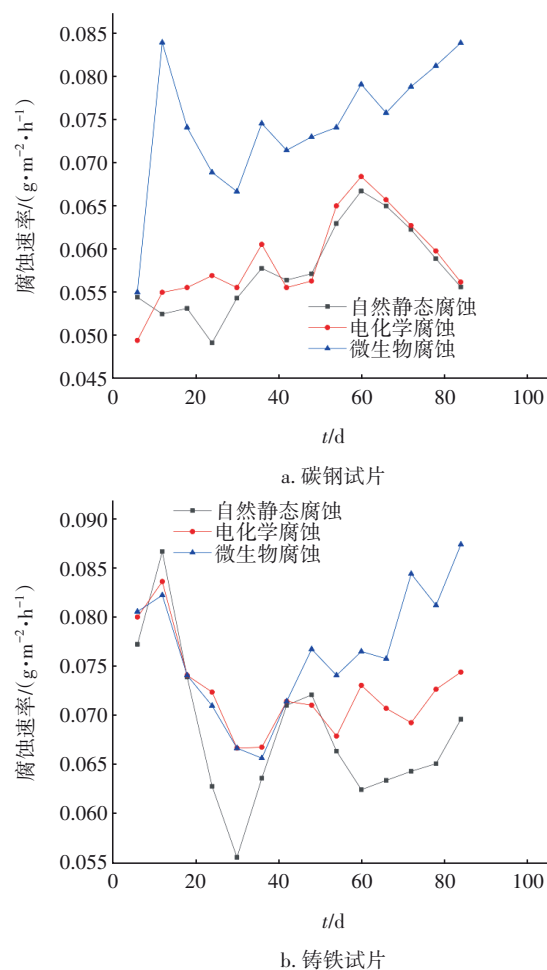


图4 金属试片在静态烧杯实验中腐蚀速率的变化

Fig.4 Change in corrosion rate of metal test specimens in static beaker experiments

从图4(a)可以看出,在添加铁细菌的烧杯实验中,通过失重法计算的碳钢试片腐蚀速率明显高于其他两组,特别是在第6~12天,腐蚀速率达到



0.084 g/(m<sup>2</sup>·h)。这表明铁细菌在此期间迅速生长并引起金属试片的显著腐蚀<sup>[12]</sup>。通过失重法和表面腐蚀面积占比两种腐蚀程度量化方法对添加铁细菌的碳钢试片实验组进行对照的结果显示,这两种方法为腐蚀程度的动态变化分析提供了不同的视角,表明它们是独立的腐蚀分析方法,可以用于综合评估不同角度的腐蚀行为。

从图4(b)可以看出,失重法测得的腐蚀速率显示了不同实验组之间的差异,其中30 d后微生物实验组的腐蚀速率大于电化学实验组,而电化学实验组的腐蚀速率大于自然静态实验组。三个实验组的腐蚀速率在0~30 d均表现出先增加后减小的趋势,其中自然静态实验组腐蚀速率在30 d时降至0.056 g/(m<sup>2</sup>·h),出现明显低谷。这一现象可能是由于多个因素的相互作用,包括腐蚀速率的变化与腐蚀产物的积累、环境条件的变化(如pH和腐蚀介质浓度的波动)、电化学反应的演化以及腐蚀过程的动态性<sup>[13]</sup>。

### 2.2.2 动态模拟实验

在动态模拟实验中金属试片腐蚀速率的变化如图5所示。

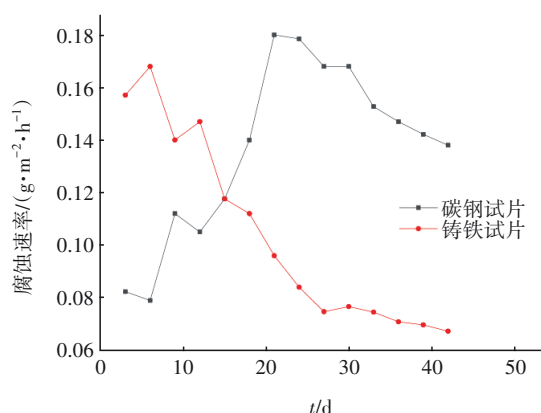


图5 在动态模拟实验中金属试片腐蚀速率的变化

Fig.5 Change in corrosion rate of metal test specimens in dynamic simulation experiments

从图5可以看出,在3~10 d,铸铁试片的腐蚀速率远高于碳钢试片,表明铸铁试片在腐蚀初期受到更快速的侵蚀。然而,在接近20 d时,铸铁试片表面腐蚀面积占比逐渐接近100%,导致其腐蚀速率迅速下降。与此同时,碳钢试片的腐蚀速率增加明显,并在后续明显超过铸铁试片的腐蚀速率。最终,随着碳钢试片表面腐蚀面积占比逐渐接近100%,其腐蚀速率也逐渐减小,直至实验结束。

### 2.3 多因素预测模型

根据上述实验所得数据,使用不同的多因素预测模型来预测腐蚀面积,包括线性回归模型、随机森林回归模型、决策树回归模型和支持向量机回归模型,以确定哪种模型更适合数据集<sup>[14]</sup>。

线性回归模型是一种基本的回归方法,用于建立腐蚀面积与多个因素之间的线性关系。模型的均方误差(MSE)为202.47,决定系数( $R^2$ )为0.56,预测公式见式(1),预测结果如图6所示。

$$\begin{aligned} \text{腐蚀面积占比预测值} = & -75.886 + 0.604 \times \text{时间} + \\ & 6.514 \times \text{温度} - 0.022 \times \text{外加微生物量} - 39.143 \times \\ & \text{外加电化学电位} - 125.480 \times \text{减少的质量} + \\ & 6.447 \times \text{试片含碳量} \end{aligned} \quad (1)$$

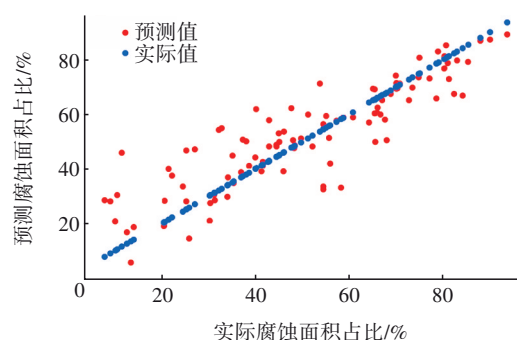


图6 线性回归模型预测结果

Fig.6 Prediction results of linear regression model

随机森林回归模型采用集成学习方法,结合多个决策树模型来进行预测。模型的MSE为74.71,  $R^2$ 为0.85,预测公式见式(2),预测结果如图7所示。

$$\begin{aligned} \text{腐蚀面积占比预测值} = & 0.6091 \times \text{时间} + 0.2259 \times \\ & \text{温度} + 0.0156 \times \text{外加微生物量} + 0.0114 \times \text{外加} \\ & \text{电化学电位} + 0.0414 \times \text{减少的质量} + 0.0966 \times \\ & \text{试片含碳量} \end{aligned} \quad (2)$$

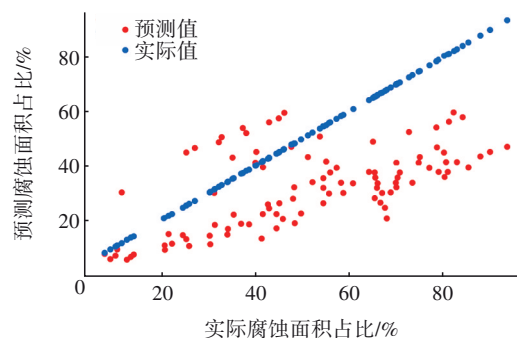


图7 随机森林回归模型预测结果

Fig.7 Prediction results of random forest regression model

决策树回归模型采用树状结构来分析数据并

进行预测。模型的MSE为85.62,  $R^2$ 为0.82, 预测公式见式(3), 预测结果如图8所示。

$$\begin{aligned} \text{腐蚀面积占比预测值} = & 0.71 \times \text{时间} + 0.12 \times \text{温度} + \\ & 0.02 \times \text{外加微生物量} + 0.01 \times \text{外加电化学电位} + \\ & 0.03 \times \text{减少的质量} + 0.11 \times \text{试片含碳量} \end{aligned} \quad (3)$$

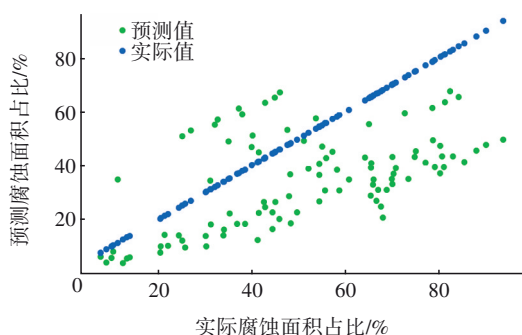


图8 决策树回归模型预测结果

Fig.8 Prediction results of decision tree regression model

支持向量机回归模型采用支持向量机方法来拟合数据。模型的MSE为222.84,  $R^2$ 为0.52, 预测公式见式(4), 预测结果如图9所示。

$$\begin{aligned} \text{腐蚀面积占比预测值} = & 0.6692 \times \text{时间} + 3.7914 \times \\ & \text{温度} - 0.0052 \times \text{外加微生物量} + 0.8005 \times \text{外加} \\ & \text{电化学电位} - 0.2950 \times \text{减少的质量} + 4.7125 \times \\ & \text{试片含碳量} \end{aligned} \quad (4)$$

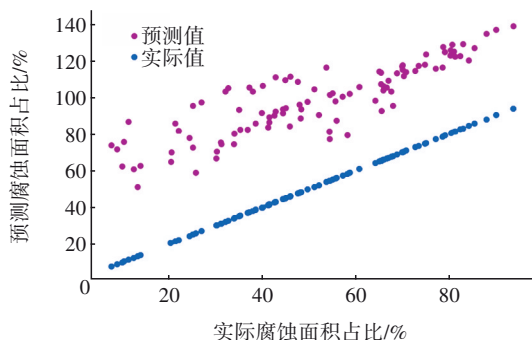


图9 支持向量机回归模型预测结果

Fig.9 Prediction results of of support vector machine regression model

综上所述,各种回归模型的性能表现各异。线性回归模型的MSE较高,  $R^2$ 较低,适用于初步预测,但对非线性关系的捕捉有限。随机森林回归模型在各方面表现最佳,MSE较低,  $R^2$ 较高,擅长处理非线性关系和高维数据。决策树回归模型性能中等,属于较易解释模型,结构透明、易于追溯预测过程,MSE和  $R^2$ 适中。支持向量机回归模型拟合能力强,但性能较差,MSE较高,  $R^2$ 较低,需要更多数据和参

数进行调整。模型的选择应根据应用场景和需求来权衡,随机森林回归模型可满足高准确性需求,决策树回归模型可提供更多的可解释性,线性回归模型和支持向量机回归模型用于初步预测。

### 3 结论

① 在动态模拟实验中,由于受不同溶液溶解氧浓度和水流动力学特性的影响,金属试片的腐蚀速率明显高于静态烧杯实验。这也符合给水管中流动腐蚀更容易发生且速度更快的一般观察。然而,在两种实验条件下,观察到了金属试片表面腐蚀面积占比变化趋势相似,即先增加后减小。这种趋势在添加铁细菌的实验组和动态模拟实验组中尤为明显,表明腐蚀过程可能受多种因素的影响,如腐蚀产物的积累、环境参数的变化和腐蚀过程的动态性。

② 在烧杯实验中,通过引入铁细菌,金属试片的腐蚀速率显著提高,表明微生物在给水管腐蚀防治中至关重要。另一方面,在采用锌片作为负极的实验组中,同样观察到腐蚀速率的增加。然而,由于原电池电极之间的差异有限,并且电解液采用自来水,因此增效并不显著。可见,在特定条件下,电化学反应的效率受多种因素的制约。

③ 失重法与金属试片表面腐蚀面积占比的动态变化呈现差异,这两种方法提供了多维度的腐蚀机理探究视角。然而,不论采用何种方法,两者均表现为在实验初期腐蚀速率显著增加,随后逐渐减小的趋势。

④ 为了更好地防治管道腐蚀,进行机器学习和预测模型的建立,发现相较于线性回归模型和支持向量机回归模型,随机森林和决策树回归模型更适合该类研究的预测分析,可准确预测腐蚀速率。

### 参考文献:

- [1] 郭浩. 供水管道电化学腐蚀机理研究[D]. 天津: 天津大学, 2016.  
GUO Hao. Research on Electrochemical Corrosion Mechanism of Water Supply Pipes[D]. Tianjin: Tianjin University, 2016(in Chinese).
- [2] 杨玉龙, 汤晗青, 谷立芹, 等. 供水灰口铸铁管内壁初始腐蚀影响因素研究[J]. 中国给水排水, 2018, 34(15): 49-54.  
YANG Yulong, TANG Hanqing, GU Liqin, et al.

- Influence factors of initial internal corrosion of grey cast iron pipes in water distribution system[J]. *China Water & Wastewater*, 2018, 34(15): 49-54(in Chinese).
- [3] LI Y C, XU D K, CHEN C F, *et al.* Anaerobic microbiologically influenced corrosion mechanisms interpreted using bioenergetics and bioelectrochemistry: a review[J]. *Journal of Materials Science & Technology*, 2018, 34(10): 1713-1718.
- [4] ZHANG H Y, LIU D B, ZHAO L T, *et al.* Review on corrosion and corrosion scale formation upon unlined cast iron pipes in drinking water distribution systems [J]. *Journal of Environmental Sciences*, 2022, 117: 173-189.
- [5] 郭浩, 田一梅, 张海亚, 等. 铁质金属供水管道的内腐蚀研究进展[J]. *中国给水排水*, 2020, 36(12): 70-75.  
GUO Hao, TIAN Yimei, ZHANG Haiya, *et al.* Research progress on internal corrosion of iron-metal pipes of water distribution systems [J]. *China Water & Wastewater*, 2020, 36(12): 70-75(in Chinese).
- [6] 何旭. 利用挂片失重法对CO<sub>2</sub>腐蚀规律的研究[J]. *当代化工*, 2017, 46(4): 616-618.  
HE Xu. Study on CO<sub>2</sub> corrosion rule by weight loss of test piece[J]. *Contemporary Chemical Industry*, 2017, 46(4): 616-618(in Chinese).
- [7] 韩文滔. 供水管网中铁细菌对管道腐蚀机理的研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2014.  
HAN Wentao. Research on the Pipe Corrosion Caused by Iron Bacteria in Water Distribution Systems [D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2014 (in Chinese).
- [8] 张少通, 李伟英, 徐心远, 等. 铁细菌对供水系统金属管材腐蚀行为的影响[J]. *净水技术*, 2022, 41(9): 59-66, 173.  
ZHANG Shaotong, LI Weiying, XU Xinyuan, *et al.* Effect of iron bacteria on corrosion behavior of metal-pipe materials in water supply system [J]. *Water Purification Technology*, 2022, 41(9): 59-66, 173 (in Chinese).
- [9] 许萍, 翟羽佳, 高飞, 等. 电化学微生物腐蚀的胞外电子转移机制研究进展[J]. *腐蚀科学与防护技术*, 2017, 29(3): 307-312.  
XU Ping, ZHAI Yujia, GAO Fei, *et al.* Advances in extracellular electron transfer mechanism of electrical microbial influenced corrosion [J]. *Corrosion Science and Protection Technology*, 2017, 29(3): 307-312 (in Chinese).
- [10] 郭浩, 李雪, 刘星飞, 等. 流速对球墨铸铁供水管道腐蚀行为的影响机理[J]. *材料保护*, 2018, 51(9): 40-44, 93.  
GUO Hao, LI Xue, LIU Xingfei, *et al.* Effect of water flow velocity on the corrosion mechanism of ductile iron pipes in water distribution system [J]. *Materials Protection*, 2018, 51(9): 40-44, 93 (in Chinese).
- [11] 佟慧妍. 给水管网闭塞水中铸铁腐蚀机理研究[D]. 天津: 天津大学, 2015.  
TONG Huiyan. Corrosion Mechanism of Cast Iron in Occluded Water in Drinking Water Distribution Systems [D]. Tianjin: Tianjin University, 2015 (in Chinese).
- [12] 黄烨, 刘双江, 姜成英. 微生物腐蚀及腐蚀机理研究进展[J]. *微生物学通报*, 2017, 44(7): 1699-1713.  
HUANG Ye, LIU Shuangjiang, JIANG Chengying. Microbiologically influenced corrosion and mechanisms [J]. *Microbiology China*, 2017, 44(7): 1699-1713 (in Chinese).
- [13] 齐北萌. 供水系统铸铁管材的腐蚀行为及影响因素研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2014.  
QI Beimeng. Study on the Corrosion Behavior and Influencing Factors of Iron Pipes in Water Distribution Systems [D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2014 (in Chinese).
- [14] 张金龙, 王丹丹, 魏晨亮, 等. X65钢多因素协同腐蚀行为和腐蚀预测模型研究[J]. *材料保护*, 2023, 56(8): 97-102, 132.  
ZHANG Jinlong, WANG Dandan, WEI Chenliang, *et al.* Study on multivariate synergistic corrosion behavior and corrosion prediction model of X65 steel [J]. *Materials Protection*, 2023, 56(8): 97-102, 132 (in Chinese).

作者简介: 郭育硕(2000—), 男, 河南新乡人, 硕士研究生, 主要研究方向为给水管网系统模拟。

E-mail: 15836099987@163.com

收稿日期: 2024-02-27

修回日期: 2024-05-22

(编辑: 任莹莹)