

# 混凝土电渗排水的水分迁移规律试验初探

鲁鑫乐\*, 康鲜维, 边瑾博, 关建勋, 孙佳伟#

西京学院土木工程学院, 陕西 西安

收稿日期: 2024年11月18日; 录用日期: 2024年12月14日; 发布日期: 2024年12月20日

## 摘要

本试验旨在研究混凝土电渗排水过程中的水分迁移规律并确定影响因素最优水平组合。自制电渗试验装置, 设置水灰比、缓凝剂、阳极钢筋直径、通电电压、阴阳电极间距、通电起始时间、通电持续时间七种因素, 通过正交试验设计和部分因素全面试验, 以混凝土电渗排水量为指标, 研究阳极钢筋直径、通电电压、阴阳电极间距三种因素的最好水平、最优水平组合及对指标影响的重要程度。试验依据电解水和电渗基本原理进行, 采用商品河砂、石子和P.O 42.5普通硅酸盐水泥配制C35混凝土试样。试验结果将为地下厂房超高竖井混凝土电脱膜施工组织提供参考依据, 有望提高工程质量和效率, 同时也为混凝土电渗排水技术的进一步优化提供了理论基础和实践指导。

## 关键词

混凝土电渗排水, 正交试验, 电极, 电压, 最优水平

# Experimental Research Scheme of Water Migration Rule in Electroosmotic Drainage of Concrete

Xinle Lu\*, Xianwei Kang, Jinbo Bian, Jianxun Guan, Jiawei Sun#

School of Civil Engineering, Xijing University, Xi'an Shaanxi

Received: Nov. 18<sup>th</sup>, 2024; accepted: Dec. 14<sup>th</sup>, 2024; published: Dec. 20<sup>th</sup>, 2024

## Abstract

The purpose of this experiment is to study the law of water migration in the process of concrete electroosmotic drainage and determine the optimal level combination of influencing factors. Seven factors, including water-cement ratio, retarder, diameter of anode steel, energized voltage, distance between

\*第一作者。

#通讯作者。

文章引用: 鲁鑫乐, 康鲜维, 边瑾博, 关建勋, 孙佳伟. 混凝土电渗排水的水分迁移规律试验初探[J]. 土木工程, 2024, 13(12): 2272-2281. DOI: 10.12677/hjce.2024.1312250

anode and cathode electrodes, energized starting time, and energized duration, were set up in a self-made electroosmotic test device. Through orthogonal test design and comprehensive test of some factors, the electroosmotic displacement of concrete was taken as the index. The optimum level and combination of the three factors of anode bar diameter, current voltage, and electrode distance between anode and cathode were studied. The test was carried out according to the basic principles of electrolytic water and electroosmosis, using commercial river sand, stone, and P.O 42.5 ordinary Portland cement with C35 concrete samples. The test results will provide a reference for the construction organization of concrete electrode membrane in the ultra-high vertical shaft of the underground powerhouse, which is expected to improve the quality and efficiency of the project and also provide a theoretical basis and practical guidance for further optimization of concrete electroosmotic drainage technology.

## Keywords

Concrete Electroosmotic Drainage, Orthogonal Test, Electrode, Voltage, Optimal Level

Copyright © 2024 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

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



Open Access

## 1. 引言

电渗技术在土体固结中的应用较为成熟,已经形成了较为固定的研究体系。俄国科学家 Reuss 于 1949 年发现多孔介质会吸附溶液中的正负离子,溶液相对带电并朝定方向运动;1983 年美国 Casagrande 等将电渗法应用于实际土体加固工程;我国从上世纪 80 年代开始在土体固结中应用电渗法。在 1983 年的中国土木工程学会第四届土力学及基础工程学术会议上,上海铁道学院的王引生等就上海软粘土地基电渗法机理进行了研究,验证了电渗水射泵排水成功;1990 年铁道部第一勘测设计院孙全德译著的湿陷性黄土地基加固系列方法中谈到了电渗法及处理效果;浙江大学龚晓南教授团队等在软粘土电渗固结方面做了大量试验研究,将电渗加固后的土体作浸水处理,发现浸水不影响加固后土体的压缩特性等[1]-[4]。

但是,电渗技术在混凝土滑模施工中的相关研究文献和工程应用甚少,混凝土中电渗反应机理研究基础和工程经验不足。目前最常用的理论表述是,未凝固的混凝土内部会产生水的电解、金属电极的腐蚀以及离子迁移等一系列物理化学反应和过程。

## 2. 研究现状

在国外,电渗法在混凝土滑膜中的应用还是比较成熟的。2012 年法国 University of Artois 的 Yannick Vanhove 教授团队做了电渗透法在混凝土脱模中的应用试验,试验选择了普通混凝土 C25/30,电极材料为钢棒,试验温度为  $20^{\circ}\text{C} \pm 2^{\circ}\text{C}$ ,研究了七种不同的电压(从 1 到 20 V)下模具张力/电导率等,试验结果表明,通电电压、混凝土配合比等各种参数和环境温度等脱模的条件直接影响混凝土表面质量。法国 Laboratory of Civil Engineering 的学者研究温度对混凝土构件电脱模的影响,埃及开罗 Building Research Center 的学者、土耳其 Eskişehir Osmangazi University 的学者等对水泥浆体电阻率也做了大量研究[5]-[7]。

近十年,国内针对不同电极材料对电渗效果差异影响的研究陆续涌现。其中,浙江大学陶燕丽等专门针对铁、石墨、铜、铝四种电极材料对土体电渗过程的作用机理进行研究,试验结果发现电渗透电极腐蚀现象在电渗试验中是非常普遍的现象,不同电极均出现腐蚀现象,而电极的腐蚀会导致电极与土体脱落引起电势损失,导致不同电极材料的电渗效果不同,并得出了铜电极(阳极)在土中电渗后出现电化学钝化现象,铁电极相对较好[8]-[12]。但是,目前国内相关研究全部为电渗法在土体中的应用。

综上所述,得出以下主要结论:

- 1) 国内外混凝土电脱模普遍使用铜棒、钢筋作为阳极电极材料。
- 2) 室内试验主要测试最佳电极化参数, 包括通电电压、电流、通电时间、提升时间、电极材料、位置、电极插入深度、混凝土塌落度、试验温度等。
- 3) 滑模试验装置模拟调压并滑模施工工序, 主要包括滑模模板与吊架、电解器(输出电压为 0~36 V, 输出电流 1~15 A 直流)、电流电压、模板提升力等测量系统。
- 4) 试验结果普遍以分析阴阳极混凝土通电过程现象描述为主。

本试验研究混凝土电渗排水过程中的水分迁移规律, 确定影响因素最优水平组合。自制试验模型, 设置水灰比、缓凝剂、阳极钢筋直径、通电电压、阴阳电极间距、通电起始时间、通电持续时间 7 种因素, 每种因素考虑 3~5 个水平, 通过正交试验设计和部分因素全面试验, 分析影响排水效果的主控因素、各因素最佳水平组合及水分迁移规律, 以期为地下厂房超高竖井混凝土电脱膜施工组织提供参考依据。

### 3. 试验原理

电流通过电解质溶液或熔融的电解质而在阴、阳两极上引起还原氧化反应的过程称为电解。电解过程是在电解池中进行, 当离子到达电极时, 失去或获得电子, 发生氧化还原反应(阴极得电子发生还原反应, 阳极失电子发生氧化反应)。

#### 1) 电解水基本原理

电解水时, 由于纯水的电离度很小, 导电能力低, 属于典型的弱电解质。在阳极, 发生氧化反应, 电解水产生  $H^+$  和电子  $e^-$  即:



这样电子在电场力的作用下流向电源,  $H^+$  存在阳极附近。  $e^-$  电子通过电源, 克服电场力做功(消耗电能), 最后流向阴极。碱性电解质溶液中, 在阴极,  $2H_2O + 2e^- = 2OH^- + H_2$ , 这样  $OH^-$  聚集在阴极附近。因此, 在电场力的作用下, 水化阳离子会定向向阴极移动, 即阳离子带动周围水分子移动, 水分子通过摩擦力的作用再带动周围水分子向阴极移动(宏观表现为水的粘滞性), 在阴极, 阳离子得到电子把水从水化离子中释放出来。在阴极有排水通道, 水就会从阴极排出去。电解水:  $2H_2O = 2H_2 \uparrow + O_2 \uparrow$ , 此过程有四个关键部分: 电极、隔膜、电解质溶液和电解池, 调节电解池的电极材料, 电解质溶液中的电解质成分, 隔膜都有利于反应的发生[13] [14]。

#### 2) 电渗基本原理

通过在混凝土中施加直流电, 混凝土中自由水相对于骨料从阳极流向阴极, 称为混凝土电渗现象。对于混凝土来说, 混凝土拌合物中存在许多毛细孔道, 毛细孔壁表面带有负电荷, 而孔壁周围的水膜中的水分子因极化而带正电, 这层水膜称为双电层。双电层外面的水称为自由水, 它在动力作用下可以流动。当对混凝土拌合物施加外电场后, 由于毛细孔壁是固定的, 双电层中的阳离子向阴极迁移, 同时对溶剂施加单向推力, 使之同向流动, 产生电渗[15] [16]。因此, 通过电渗作用, 混凝土拌合物中的自由水分不断向阴极表面聚集, 形成电渗水膜。

### 4. 试验装置

试验采用自制的电渗试验装置, 主体由可拆装木板底座、钢板底座、有机玻璃桶(对半拼接)和盛水器四部分组成。木板与钢板同尺寸, 外直径 270 mm, 内直径 170 mm, 厚 40 mm, 槽深 30 mm, 其中钢板槽内打 2 mm 深、10 mm 宽分布导水刻痕, 底部打 5 mm 孔径导水槽。有机玻璃桶外径 170 mm, 壁厚 10 mm, 长 300 mm。盛水器为带盖塑料量杯, 盖上设有直径为 5 mm 的进水孔。采用稳压直流电源 MS3610DS 给电极持续稳定供电, 输出电压 0~36 V 可调, 电流 0~10 A 可调, 功率为 300 W。阳极采用  $\phi 12 \sim 25$  不同

直径的钢筋, 阴极连通钢板底座。为防止混凝土随电渗过程流失, 而导致排水堵塞和影响量测精度, 在阴极钢板与混凝土试样间, 设置反滤层, 包括受腐蚀影响较小且导电性优良的铜板, 铜板 2 mm 厚, 内直径 150 mm 范围内均匀打孔过流, 并用滤纸或反滤土工布包裹。

## 5. 试验方案

### 5.1. 试验材料

为配制 C35 混凝土试样, 采用商品河砂(含水率 2%)、石子(粒径 10~20 mm 连续级配)、PO42.5 普通硅酸盐水泥。

### 5.2. 试验方案

1) 锁定水灰比(0.5)、缓凝剂(0%)、通电起始时间(浇入完成立即通电)、通电持续时间(120 min) 4 种因素及水平, 以混凝土电渗排水量为指标, 通过正交试验设计, 研究阳极钢筋直径、通电电压、阴阳电极间距 3 种因素的最好水平, 最优水平组合, 对指标(排水量)影响的重要程度。

正交试验方案: 3 因素 3 水平, 设计正交试验  $L_9(3^3)$ , 详见表 1 和表 2。每轮平行试验 3 次, 空白试验 1 次, 正交试验共计 36 次。试验结束, 对正交试验结果进行极差和方差分析。

**Table 1.** Test factors and levels

**表 1.** 试验因素及水平

水平	因素	1	2	3
		阳极钢筋直径	通电电压	阴阳电极间距
1		16 mm	9 V	100 mm
2		20 mm	12 V	150 mm
3		25 mm	24 V	200 mm

**Table 2.** Orthogonal test

**表 2.** 正交试验

试验编号	因素 1 阳极钢筋直径(mm)	因素 2 通电电压(V)	因素 3 阴阳电极间距(mm)
1	1 (16)	1 (9)	1 (100)
2	2 (20)	2 (12)	2 (150)
3	3 (25)	3 (24)	3 (200)
4	1 (16)	2 (12)	3 (200)
5	2 (20)	3 (24)	1 (100)
6	3 (25)	1 (9)	2 (150)
7	1 (16)	3 (24)	2 (150)
8	2 (20)	1 (9)	3 (200)
9	3 (25)	2 (12)	1 (100)

2) 以正交试验分析结果, 锁定阳极钢筋直径、通电电压、阴阳电极间距 3 种因素的最优水平组合, 以混凝土电渗排水量为指标, 分别对水灰比、缓凝剂、通电起始时间、通电持续时间 4 种因素进行单因素全面试验, 研究 4 种因素对指标(排水量)的影响规律。

单因素全面试验: 每轮平行试验 3 次, 空白试验 1 次, 单因素及水平方案详见表 3。

**Table 3.** Single factor comprehensive test  
**表 3.** 单因素全面试验

试验编号	因素 4 水灰比	因素 5 缓凝剂	因素 6 通电起始时间	因素 7 通电持续时间
1	0.45	0%	浇入完成立即通电	120 min
2	0.50	0%	浇入完成立即通电	120 min
3	0.55	0%	浇入完成立即通电	120 min
4	0.50	0.1%	浇入完成立即通电	120 min
5	0.50	0.1%	浇入完成立即通电	120 min
6	0.50	0.1%	浇入完成立即通电	120 min
7	0.50	0%	浇入完成立即通电	120 min
8	0.50	0%	10 min	120 min
9	0.50	0%	45 min	120 min
10	0.50	0%	1.5 h	120 min
11	0.50	0%	6 h	120 min
12	0.50	0%	浇入完成立即通电	10 min
13	0.50	0%	浇入完成立即通电	20 min
14	0.50	0%	浇入完成立即通电	30 min
15	0.50	0%	浇入完成立即通电	60 min
16	0.50	0%	浇入完成立即通电	90 min

## 6. 试验步骤

1) 按试验装置设计图纸组装模型。将排水胶管伸入钢板底端导水槽, 但不能超过钢槽内壁, 以免堵塞排水通道, 使用热熔胶小心地连接, 并用夹子夹紧, 以免漏水。使用防水密封胶将模型所有接缝处密封, 尤其钢板与有机玻璃桶之间, 静止 8 小时以上。而后, 使用热熔胶将钢筋固定在设计位置(见图 1)。

2) 按设计配合比, 称取水、水泥、砂、石。干料进搅拌机, 上盖, 搅拌 30 秒。倒入水(或外加剂等), 继续搅拌 90 秒。最后出料。

3) 基本恒定的室温( $20^{\circ}\text{C} \pm 2^{\circ}\text{C}$ )环境中, 为保证混凝土最佳密实效果, 分三层浇入模型, 每层捣实。最后, 放置在振动台上振动 30 秒以内(需用沙袋临时固定), 以免混凝土发生泌水。

4) 浇入完成的模型连同钢筋平稳放置于试验台架指定位置处。迅速将钢筋通过导线连接到直流电源

的正极，钢板连接到负极，排水胶管接入盛水器(此时夹子不松)。

5) 松开夹子，天平迅速去皮，接通电源。每次试验做到电压同时施加到所有平行试验模具上(见图 2)。

6) 电子天平记录软件迅速点击获取数据，所有平行试验模具同时开始自动记录混凝土排水质量。试验结果与分析见表 4~8。



Figure 1. Installation of the test device  
图 1. 试验装置安装

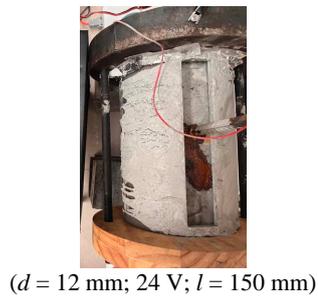


Figure 2. Experimental observations  
图 2. 试验观测

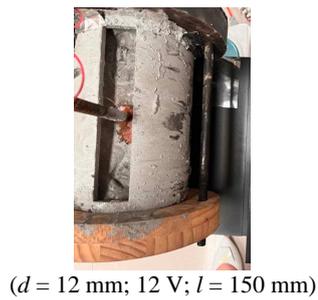
Table 4. Test phenomena  
表 4. 试验现象

采集照片	现象简要描述		
	阳极铁锈	阳极气泡	泌水过滤情况
 (d = 12 mm; 36 V; l = 150 mm)	大量	大量	 发现：泌水总量越大，过滤情况越差，因此，考虑杂质对泌水总量有影响。解决方案是严格做好滤纸边缘处理。

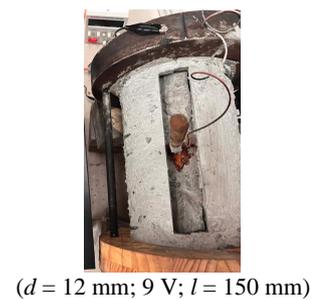
续表



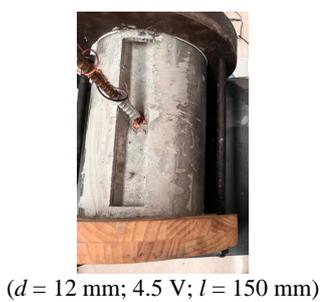
大量      大量



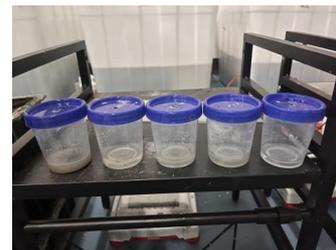
少量      少量



少量      少量



少量      几乎无



发现：泌水总量越大，过滤情况越差，因此，考虑杂质对泌水总量有影响。解决方案是严格做好滤纸边缘处理。

**Table 5.** Power-on duration test  
**表 5.** 通电持续时间测试试验

编号	因子 1 阳极钢筋直径(mm)	因子 2 通电电压(V)	因子 3 阴阳电极间距(mm)	泌水总量 (g)	通电持续时间 (min)
1	12	36 电流 0.526 A	150	16.99	100

**Table 6.** Partial orthogonal test 1  
**表 6.** 部分正交试验 1

正交编号	因子 1 阳极钢筋直径 (mm)	因子 2 通电电压(V)	因子 3 阴阳电极间距 (mm)	泌水总量 (g)	通电持续时间 (min)	通电起始时间 (min)
1	2023-6-21-3	1 (16)	1 (9)	14.37	120	7
	2023-6-21-4		电流 3: 0.132 A 电流 4: 0.107 A	1 (100)	5.95	120
2	2023-6-21-1	2 (20)	2 (12)	5.81	100	27
	2023-6-21-2		电流 1: 0.117 A 电流 2: 0.143 A	2 (150)	2.64	100
3	2023-6-21-5	3 (25)	3 (24)	8.63	120	浇注完成即通电
4	2023-6-22-5	1 (16)	2 (12) 电流 0.119 A	-	-	-
6	2023-6-22-4	3 (25)	1 (9) 电流 0.154 A	-	-	-
7	2023-6-22-6	1 (16)	3 (24) 电流 0.400 A	-	-	-
9	2023-6-22-3	3 (25)	2 (12) 电流 0.280 A	-	-	-

**Table 7.** Partial orthogonal test 2  
**表 7.** 部分正交试验 2

正交编号	因子 1 阳极钢筋直径 (mm)	因子 2 通电电压(V)	因子 3 阴阳电极间距 (mm)	泌水总量 (g)	通电持续时间 (min)	通电起始时间 (min)
1	2023-6-21-3	1 (16)	1 (9)	14.37	120	7
	2023-6-21-4		电流 3: 0.132 A 电流 4: 0.107 A	1 (100)	5.95	120
2	2023-6-21-1	2 (20)	2 (12)	5.81	100	27
	2023-6-21-2		电流 1: 0.117 A 电流 2: 0.143 A	2 (150)	2.64	100
3	2023-6-21-5	3 (25)	3 (24)	8.63	120	浇注完成即通电
4	2023-6-28-4	1 (16)	2 (12) 电流 0.103 A	1.90	120	浇注完成即通电
5	2023-6-28-5	2 (20)	3 (24) 电流 0.575 A	9.17	120	20 min
6	2023-6-28-6	3 (25)	1 (9) 电流 0.133 A	6.16	120	浇注完成即通电
7	2023-6-28-7	1 (16)	3 (24) 电流 0.306 A	3.47	120	10 min

续表

8	2023-6-28-8	2 (20)	1 (9) 电流 0.120 A	3 (200)	4.32	120	20 min
9	2023-6-28-9	3 (25)	2 (12) 电流 0.165 A	1 (100)	5.17	120	10 min

**Table 8.** Partial orthogonal test current data (collected every 10 min)

**表 8.** 部分正交试验电流数据(每间隔 10 min 采集)

正交编号	因子 1 阳极钢筋直径(mm)	因子 2 通电电压(V)	因子 3 阴阳电极间距(mm)
4	2023-6-28-4	1 (16)	2 (12) 电流 1: 0.103 A 电流 2: 0.107 A 电流 3: 0.107 A 电流 4: 0.108 A 电流 5: 0.106 A
5	2023-6-28-5	2 (20)	3 (24) 电流 1: 0.575 A 电流 2: 0.575 A 电流 3: 0.575 A 电流 4: 0.540 A 电流 5: 0.516 A
6	2023-6-28-6	3 (25)	1 (9) 电流 1: 0.133 A 电流 2: 0.131 A 电流 3: 0.131 A 电流 4: 0.101 A 电流 5: 0.103 A
7	2023-6-28-7	1 (16)	3 (24) 电流 1: 0.306 A 电流 2: 0.352 A 电流 3: 0.352 A 电流 4: 0.325 A 电流 5: 0.304 A
8	2023-6-28-8	2 (20)	1 (9) 电流 1: 0.120 A 电流 2: 0.120 A 电流 3: 0.120 A 电流 4: 0.119 A 电流 5: 0.119 A
9	2023-6-28-9	3 (25)	2 (12) 电流 1: 0.165 A 电流 2: 0.158 A 电流 3: 0.158 A 电流 4: 0.161 A 电流 5: 0.156 A

## 7. 结论

1) 试验采用的自制电渗试验装置, 为研究提供了可靠的实验平台。通过对装置各部分的设计和优化,

如可拆装木板底座、钢板底座、有机玻璃桶和盛水器等，以及采用稳压直流电源等设备，保证了试验的准确性和可重复性。

2) 通过正交试验设计对阳极钢筋直径、通电电压、阴阳电极间距三种因素进行研究。试验结果的极差和方差分析可确定对混凝土电渗排水量指标影响的重要程度，从而找出主控因素。这将有助于在实际工程中重点关注和优化这些关键因素，以提高混凝土电渗排水的效率和效果。

3) 根据正交试验结果，确定最佳水平组合，为地下厂房超高竖井混凝土电脱膜施工组织提供参考依据。这种最佳水平组合的确定，可以在保证施工质量的前提下，最大限度地提高排水效率，减少施工时间和成本。同时，也为类似工程提供了可借鉴的经验和技术参数。

## 基金项目

国家级大学生创新创业训练计划资助项目(202412715001)。

## 参考文献

- [1] Casagrande, I.L. (1949) Electro-Osmosis in Soils. *Géotechnique*, **1**, 159-177. <https://doi.org/10.1680/geot.1949.1.3.159>
- [2] Bjerrum, L., Moum, J. and Eide, O. (1967) Application of Electro-Osmosis to a Foundation Problem in a Norwegian Quick Clay. *Géotechnique*, **17**, 214-235. <https://doi.org/10.1680/geot.1967.17.3.214>
- [3] Topçu, İ.B., Uygunoğlu, T. and Hocaoglu, İ. (2016) Electrical Resistivity of Fly Ash Blended Cement Paste at Hardening Stage. *Materials Science*, **22**, 458-462. <https://doi.org/10.5755/j01.ms.22.3.10771>
- [4] 陶燕丽, 周建, 龚晓南. 电极材料对电渗过程作用机理的试验研究[J]. 浙江大学学报(工学版), 2014, 48(9): 1618-1623.
- [5] Goudjil, N., Djelal, C., Vanhove, Y., Kada, H. and Heloun, N. (2014) Impact of Temperature on the Demoulding of Concrete Elements with a Polarization Process. *Construction and Building Materials*, **54**, 402-412. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2013.12.034>
- [6] Hocine, T., Amiri, O., Ait-Mokhtar, A. and Pautet, A. (2012) Influence of Cement, Aggregates and Chlorides on Zeta Potential of Cement-Based Materials. *Advances in Cement Research*, **24**, 337-348. <https://doi.org/10.1680/adcr.11.00031>
- [7] Goudjil, N., Vanhove, Y., Djelal, C. and Kada, H. (2012) Electro-Osmosis Applied for Formwork Removal of Concrete. *Journal of Advanced Concrete Technology*, **10**, 301-312. <https://doi.org/10.3151/jact.10.301>
- [8] 齐文浩. 基于远程监控的电解水制氢温度控制系统设计[D]: [硕士学位论文]. 太原: 中北大学, 2024.
- [9] 周静. 钢混凝土试件双向电渗法试验研究[D]: [硕士学位论文]. 重庆: 重庆交通大学, 2023.
- [10] 贺志伟. 基于双向电渗法的混凝土耐久性提升方法研究[D]: [硕士学位论文]. 西安: 长安大学, 2019.
- [11] 唐先习, 杜腾飞, 张寿红, 等. 不同因素对青藏铁路环湖段路基内水分变化及冻胀规律影响研究[J]. 水利与建筑工程学报, 2024, 22(4): 92-98.
- [12] 刘小荟, 彭晓彤, 汪洪伟, 等. 基于正交试验的免蒸压加气混凝土的制备与性能优化[J]. 中国粉体技术, 2024, 30(6): 74-84.
- [13] 田正宏, 毛龙, 彭志海. 电渗结合透水模板成型混凝土表观质量试验[J]. 建筑材料学报, 2014, 17(6): 1001-1008.
- [14] 张林, 胡黎明. 环境化学条件对软土电渗排水影响的试验研究[J]. 水力发电学报, 2024, 43(6): 33-42.
- [15] 魏一聪. 高效的电解水制氢技术实验研究[D]: [硕士学位论文]. 北京: 北京建筑大学, 2019.
- [16] 张豆豆. 基于电渗技术的混凝土衬砌隧道(井巷)慢渗控制机理与试验研究[D]: [硕士学位论文]. 北京: 中国矿业大学, 2023.