

DOI: 10.7672/sgjs2026070153

混凝土电阻率影响因素及测试方法对比研究*

赵立雷

(中铁十八局集团第三工程有限公司,河北 涿州 072750)

[摘要] 为解决传统混凝土性能评估方法存在破损检测、周期长等问题,聚焦混凝土电阻率这一关键电学特性,系统研究其测试方法及影响因素。通过对比两点单轴法、温纳探针法(四点法)与外电极法的测试精度及适用性,验证温纳探针法的优越性。采用正交试验,探究水胶比、养护龄期及骨料级配对电阻率的影响规律,并建立多元线性回归预测模型。结果表明:温纳探针法变异系数仅3.5%,测试精度最高,可兼顾实验室与现场非破损检测;影响混凝土电阻率的因素显著性排序为水胶比>养护龄期>骨料级配,水胶比每增大0.1,电阻率降低16%~18%,养护龄期从7d延长至90d时电阻率降幅达22.0%;建立的回归模型拟合度高,预测相对误差小于4%。

[关键词] 混凝土;导电性;电阻率;正交试验;回归模型

[中图分类号] TU755.2

[文献标识码] A

[文章编号] 2097-0897(2026)07-0153-05

Comparative Study on Influencing Factors of Concrete Resistivity and Testing Methods

ZHAO Lilei

(China Railway 18th Bureau Group Third Engineering Co., Ltd., Zhuozhou, Hebei 072750, China)

Abstract: To solve the problems of damage and the long cycle of traditional concrete performance evaluation methods, this paper focuses on the key electrical characteristics of concrete resistivity and systematically studies its test methods and influencing factors. The superiority of the Wenner probe method was verified by comparing the test accuracy and applicability of the two-point uniaxial method, the Wenner probe method (four-point method), and the outer electrode method. The L9(33) orthogonal test was used to explore the influence of water-binder ratio, curing age, and aggregate gradation on resistivity, and a multiple linear regression prediction model was established. The results indicate that the coefficient of variation of the Wenner probe method is only 3.5%, and the test accuracy is the highest, which can take into account both laboratory and on-site non-destructive testing. The order of significance of the factors affecting the resistivity of concrete is water-binder ratio > curing age > aggregate gradation. For every 0.1 increase in water-binder ratio, the resistivity decreases by 16%~18%, and the resistivity decreases by 22.0% when the curing age is extended from 7 days to 90 days. The established regression model has a high degree of fitting, and the relative error of prediction is less than 4%.

Keywords: concrete; conductivity; resistivity; orthogonal test; regression model

0 引言

混凝土作为土木工程领域应用最广泛的建筑材料,其耐久性直接决定结构的服役寿命与安全性能^[1]。在复杂服役环境中,混凝土易受氯离子侵蚀、干湿循环、裂缝扩展等因素影响,导致内部微观结构劣化,进而引发结构性能下降^[2]。传统混凝土

性能评估多采用破损检测,如钻芯法、抗压强度试验等^[3-4],存在测试周期长、对结构造成损伤、难以现场实时监测等局限性。

混凝土电导率反映其传导离子电流的能力,与内部孔隙结构、孔隙溶液离子浓度、饱和度等微观特性密切相关,且测试过程具有非破损、快速、可现场操作等优势,已成为混凝土性能评估的重要手段。电阻率作为电导率的倒数,是量化混凝土导电性能的关键参数,其测试结果可间接反映混凝土的

* 中铁十八局集团有限公司 2024 年度科研创新项目(2024-031)

[作者简介] 赵立雷,高级工程师,E-mail: 1142517305@qq.com

[收稿日期] 2026-01-20

密实度、抗渗透性、内部缺陷等关键性能参数^[5]。因此,系统研究混凝土电阻率的特性、测试方法及影响因素,建立电阻率与混凝土宏观性能的关联模型,对于推动混凝土结构耐久性评估技术的发展、优化工程设计与施工质量控制具有重要的理论意义与工程价值。

国内外已有大量学者对混凝土电阻率展开系列研究。罗大明等^[6]通过试验验证了电阻率法比传统的氯离子侵蚀测试法更容易获得混凝土电学特性。温维康等^[7]发现在低温条件下,冻结混凝土在外部荷载作用下的变形与破坏过程,及其相对电阻率的变化能够反映内部裂纹与孔隙水的状态。监测混凝土的相对电阻率有助于更直观地揭示试样的损伤与破坏发展,从而成为冻结混凝土结构安全预警的有效手段。Luo等^[8]采用再生碳纤维提升了混凝土的电导率,但随着再生碳纤维长度增加,混凝土电导率反而下降。张路等^[9]采用改进的交流电测试电阻率的试验方法,发现在相同掺量下,硅灰对珊瑚骨料混凝土电阻率的影响最大,矿渣次之,粉煤灰最小。蔡汉生等^[10]对深井接地极混凝土的电阻率进行研究,得出固结期内及完全固结但被水浸渍的混凝土电阻率随通电时间的延长而升高。此外,完全固结后的干燥混凝土不含水分,不发生极化反应,其电阻率随温度升高而降低。付传清等^[11]发现,混凝土初期电阻率的变化还与矿粉或粉煤灰掺量有关,混凝土电阻率随时间的变化,是水泥颗粒中的离子溶入孔隙水导致孔溶液电阻率下降,与水化产物不断充填、孔隙率逐步降低,从而使混凝土电阻率逐步增大的综合结果,这一过程能够解释不同龄期混凝土的宏观特性。然而,现有研究多集中于单一因素对电阻率的影响或测试方法的优化,缺乏多因素耦合作用下的系统分析,且电阻率与混凝土各项性能的量化关联模型仍需完善,基于电阻率的综合性能评估体系尚未完全建立。

1 混凝土电阻率测试方法及试验对比

1.1 主流测试方法原理及操作流程

1.1.1 两点单轴法

两点单轴法是实验室中测量混凝土电阻率的常用方法,其核心原理是将混凝土试件置于2个平行金属电极之间,施加交流电流,测量电极间的电位差,计算电阻值后结合几何常数得出电阻率。

操作流程如下:①制备圆柱形或棱柱形混凝土试件,尺寸根据试验需求确定,本文采用 $\phi 100 \times 200$ 的圆柱形试件(见图1);②将试件养护至规定龄期,测试前调整试件含水率至目标状态(如饱和面干状

态);③在试件两端放置金属电极,电极与试件接触面铺设湿润海绵,确保电极与试件接触良好,减少接触电阻;④连接交流电源及电位测量仪器,施加频率为0.5~10kHz的交流电流,记录施加的电流值(I)及电极间的电位差(V);⑤根据欧姆定律 $R=V/I$ 计算电阻值,结合几何常数 $k=A/L$ (A 为试件横截面面积, L 为试件高度)。

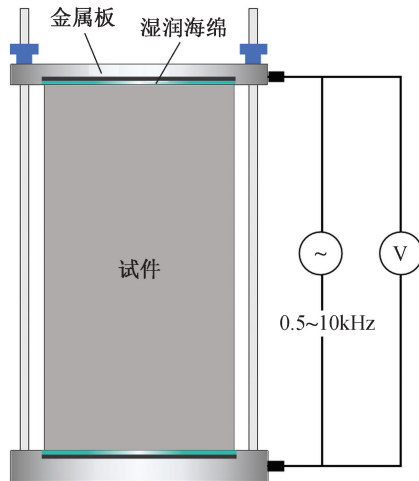


图1 两点测试法

Fig. 1 Two-point test method

1.1.2 温纳探针法(四点法)

温纳探针法是现场及实验室均适用的非破损测试方法,采用4个等间距布置的电极,通过施加电流与测量电位差分离的方式,减少接触电阻及混凝土电容特性对测试结果的影响,测试精度更高,如图2所示。操作流程如下:①选取混凝土试件表面平整区域,将4个金属电极按等间距 a (本文采用38mm)垂直布置于试件表面;②通过外部2个电极向混凝土施加频率为13Hz的交流电流(0.01~10kHz可调),通过内部2个电极测量电位差;③对于半无限均质材料,几何常数 $k=a/\gamma$ (其中, γ 为无量纲几何修正系数,本文取1.0);④根据测量的电流值与电位差计算电阻,结合几何常数得出电阻率;⑤为减少测试误差,在试件表面选取8个不同位置进行测试,取平均值作为最终电阻率值。

1.1.3 外部电极法

外部电极法主要用于已浇筑混凝土结构的现场测试,利用结构内部的钢筋骨架作为1个电极,外部放置圆形金属圆盘电极,通过测量两电极间的电阻计算电阻率。操作流程如下:①将圆形金属圆盘电极(直径50mm)放置于混凝土表面,电极与表面铺设湿润海绵以保证接触良好;②将测试仪器的一端连接金属圆盘电极,另一端连接结构内部的钢筋骨架,确保钢筋骨架具有良好的导电性;③施加交

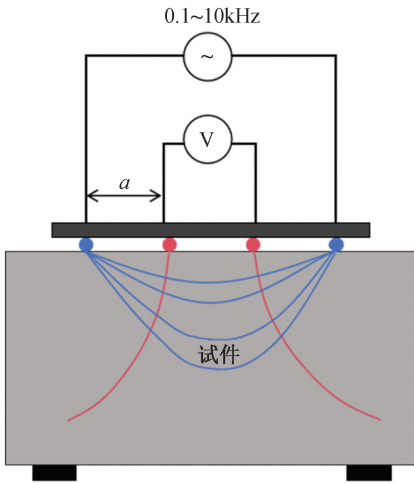


图2 四点测试法

Fig. 2 Four-point test method

流电流,测量两电极间的电阻值;④根据钢筋保护层厚度与钢筋直径确定几何常数,波尔德(Polder)规范规定:当圆盘电直径、钢筋直径及保护层厚度为1~5cm时,单元常数应为0.1m。该方法要求结构内部钢筋之间保持连续性,以确保测量结果准确。

1.2 测试方法对比试验

1.2.1 试验材料及试件制备

试验采用P·O 42.5普通硅酸盐水泥,细骨料为天然河砂,细度模数2.6,表观密度 $2\ 650\text{kg}/\text{m}^3$;粗骨料为碎石,粒径5~25mm,表观密度 $2\ 700\text{kg}/\text{m}^2$;拌合水为自来水,水胶比为0.5。按照配合比制备 $\phi 100\times 200$ 圆柱形试件,标准养护(温度 $20\pm 2^\circ\text{C}$,相对湿度95%以上)至28d龄期,测试前将试件置于饱和面干状态。

1.2.2 试验方案与测试结果

采用上述3种测试方法对混凝土试件进行电阻率测试,每种方法测试5个试件,每个试件测试3次,取平均值作为单试件测试结果,最终计算每种方法的平均电阻率及变异系数,对比测试精度与稳定性。测试结果如表1所示。

表1 3种测试方法的电阻率测试结果对比

Table 1 Comparison of resistivity test results from three testing methods

测试方法	平均电阻率/ ($\times 10^6$ ohm·mm)	最大值/ ($\times 10^6$ ohm·mm)	最小值/ ($\times 10^6$ ohm·mm)	变异 系数/%	适用性
两点法	1.25	1.42	1.10	6.8	实验室
四点法	1.22	1.30	1.15	3.5	实验室、 现场
外部电极法	1.38	1.65	1.20	9.2	现场

由表1可知,3种测试方法得出的混凝土电阻

率平均值接近,但测试精度与适用性存在显著差异。四点法的变异系数最小(3.5%),测试精度最高,这是因为该方法通过分离电流施加于电位测量电极,有效减少了接触电阻及混凝土电容特性对测试结果的干扰,且测试过程为非破损,无需制备专用试件,可同时适用于实验室与现场测试。两点法的变异系数为6.8%,测试精度次之,其测试结果稳定,但需制备标准圆柱形或棱柱形试件,且测试过程中电极与试件的接触状态对结果影响较大,仅适用于实验室条件下的测试,难以应用于现场已浇筑结构。外电极法的变异系数最大(9.2%),测试精度最低,主要原因是该方法的几何常数依赖于钢筋保护层厚度与钢筋直径,而实际结构中保护层厚度存在不均匀性,且钢筋骨架的导电性受连接状态等因素影响较大,导致测试结果波动较大。该方法仅适用于现场粗略评估,无法满足高精度测试需求。

综合对比分析,四点法具有测试精度高、适用范围广、非破损等优势,是混凝土电阻率测试的优选方法,后续试验均采用四点法。

2 混凝土电阻率影响因素试验研究

2.1 试验设计

2.1.1 试验变量与水平

混凝土的导电性能主要取决于其内部孔隙溶液的离子迁移能力,受材料组成、孔隙结构及含水状态共同影响。为明确材料配合比与养护过程对导电性能的影响机制,本研究在固定含水状态(饱和面干)条件下,选取水胶比、养护龄期及骨料级配3个关键因素,探究其如何通过改变混凝土的孔隙结构与孔隙溶液特性,进而影响其导电性能,并以电阻率作为核心指标进行量化表征。

采用正交试验设计,选取水胶比、养护龄期及骨料级配3个关键影响因素,每个因素设置3个水平,探究各因素对混凝土电阻率的影响规律及权重。试验因素与水平如表2所示。

表2 正交试验因素与水平

Table 2 Orthogonal test factors and levels

因素	水平1	水平2	水平3
水胶比A	0.4	0.5	0.6
养护龄期B/d	7	28	90
骨料级配C	连续级配 (5~25mm)	粗骨料偏多 (10~25mm 占比70%)	细骨料偏多 (5~10mm 占比70%)

2.1.2 试件制备与养护

采用 $L_9(3^3)$ 正交表(3因素3水平,共9组试验),每组制备3个 $\phi 100\times 200$ 圆柱形试件。试验材

料为:P·O 42.5 普通硅酸盐水泥、天然河砂(细度模数 2.6)、碎石骨料、聚羧酸系高效减水剂(掺量 0.5%)。

试件浇筑后振捣密实,置于标准养护室(温度 $20\pm 2^\circ\text{C}$,相对湿度 95% 以上)养护至规定龄期。测试前所有试件统一调整至饱和面干状态(排除含水率干扰,确保试验变量唯一)。

2.1.3 测试方法

采用四点法测试,电极间距 38mm,交流电流频率 13Hz,每个试件选取 6 个测试点(简化测试流程,保证精度),每个点测试 3 次,取平均值作为试件电阻率。测试环境温度控制在 $20\pm 1^\circ\text{C}$,避免温度干扰。

2.2 试验结果与分析

2.2.1 正交试验结果

各组合的电阻率测试结果如表 3 所示。由表 3 可见,不同水胶比、养护龄期及骨料级配组合下,混凝土电阻率呈现显著差异,取值范围为 $1.40\times 10^6\sim 2.68\times 10^6\text{ohm}\cdot\text{mm}$,极差达 $1.28\times 10^6\text{ohm}\cdot\text{mm}$,表明试验所选三因素对电阻率均产生一定调控作用。整体来看,正交试验数据呈现出清晰的因素关联规律,为后续单因素影响显著性分析及多因素回归模型构建提供了可靠的原始数据支撑,也验证了试验设计的合理性与有效性。

表 3 正交试验电阻率测试结果

Table 3 Orthogonal test resistivity test results

试验编号	水胶比 A	养护龄期 B	骨料级配 C	电阻率/ ($10^6\text{ohm}\cdot\text{mm}$)
1	0.4	7	连续级配	2.68
2	0.4	28	粗骨料偏多	2.35
3	0.4	90	细骨料偏多	2.12
4	0.5	7	粗骨料偏多	2.05
5	0.5	28	细骨料偏多	1.78
6	0.5	90	连续级配	1.62
7	0.6	7	细骨料偏多	1.82
8	0.6	28	连续级配	1.55
9	0.6	90	粗骨料偏多	1.40

2.2.2 单因素影响分析

计算各因素不同水平下的电阻率平均值,分析单一因素的影响规律,结果如表 4 所示。

1) 水胶比

水胶比是最显著影响因素(极差 0.79),随着水胶比增大,电阻率呈线性下降。水胶比从 0.4 增至 0.6 时,电阻率从 $2.38\times 10^6\text{ohm}\cdot\text{mm}$ 降至 $1.59\times 10^6\text{ohm}\cdot\text{mm}$,降幅达 33.2%,水胶比平均每增大 0.1,电阻率降低 16%~18%。核心原因是水胶比增大导致孔隙率升高,离子迁移通道更畅通。

表 4 各因素不同水平电阻率平均值

Table 4 Average resistivity at different levels of each factor

因素	水平 1	水平 2	水平 3	极差	影响显著性排序
水胶比 A	2.38	1.82	1.59	0.79	1
养护龄期 B/d	2.18	1.89	1.70	0.48	2
骨料级配 C	1.95	1.93	1.81	0.14	3

2) 养护龄期

养护龄期影响次之(极差 0.48),电阻率随龄期延长单调递减。7d 龄期电阻率 $2.18\times 10^6\text{ohm}\cdot\text{mm}$,28d 降至 $1.89\times 10^6\text{ohm}\cdot\text{mm}$,90d 降至 $1.70\times 10^6\text{ohm}\cdot\text{mm}$,90d 较 7d 降幅达 22.0%。原因是水泥水化逐渐充分,孔隙溶液离子浓度提升,同时水化产物填充孔隙但不影响连通性,离子迁移能力增强。

3) 骨料级配

骨料级配影响最小(极差 0.14),不同级配电阻率差异小。细骨料偏多的混凝土电阻率最低($1.81\times 10^6\text{ohm}\cdot\text{mm}$),连续级配次之($1.95\times 10^6\text{ohm}\cdot\text{mm}$),粗骨料偏多略高($1.93\times 10^6\text{ohm}\cdot\text{mm}$)。主要源于细骨料填充效果好,孔隙连通性稍优,离子迁移阻力略小。

2.2.3 多因素回归分析

基于简化后的试验数据,建立电阻率(ρ)与水胶比(A)、养护龄期(B)、骨料级配(C)的多元线性回归模型(骨料级配量化:连续级配=1,粗骨料偏多=2,细骨料偏多=3):

$$\rho = 3.52 - 3.28A - 0.06B + 0.02C \quad (1)$$

回归系数 $R^2 = 0.92$,显著性统计量 F 值为 48.7,显著性概率值 $P < 0.01$,表明拟合度高、统计学意义显著。各因素影响程度:水胶比(3.28) > 养护龄期(0.06) > 骨料级配(0.02),与极差分析一致。

选取 3 组未参与建模的配合比验证模型,结果如表 5 所示,相对误差均小于 4%,预测精度可靠。

表 5 回归模型验证结果

Table 5 Regression model validation results

水胶比	养护龄期/d	骨料级配	实测值/ ($10^6\text{ohm}\cdot\text{mm}$)	预测值/ ($10^6\text{ohm}\cdot\text{mm}$)	相对误差/%
0.45	45	连续级配	1.85	1.78	3.8
0.50	30	粗骨料偏多	1.76	1.70	3.4
0.55	60	细骨料偏多	1.34	1.36	1.5

3 结语

混凝土导电性与内部微观结构、服役性能密切相关,其电阻率作为评价导电性能的核心评价参数,在结构耐久性评估中具有不可替代的作用。本文通过系统的试验研究与数据分析,明确了混凝土

电阻率的测试方法优化方向及关键影响因素规律,主要结论如下。

1) 3种主流电阻率测试方法中,温纳探针法的测试精度最高(变异系数3.5%),且具有非破损、适用范围广等优势,适用于实验室及现场测试;两点单轴法测试结果稳定,但仅适用于实验室标准试件测试;外电极法测试精度较低(变异系数9.2%),仅适用于现场粗略评估。

2) 水胶比是影响混凝土电阻率的最关键因素。随着水胶比从0.4增大至0.6,电阻率从 $2.38 \times 10^6 \text{ohm} \cdot \text{mm}$ 降至 $1.59 \times 10^6 \text{ohm} \cdot \text{mm}$,降幅达33.2%,水胶比平均每增大0.1,电阻率降低16%~18%。这一规律源于水胶比增大导致混凝土内部孔隙率升高,孔隙网络连通性增强,为离子迁移提供了更畅通的通道,从而降低了电阻率。

3) 骨料级配对混凝土电阻率的影响最小(极差0.14),不同级配条件下电阻率差异较小。其中细骨料偏多的混凝土电阻率最低($1.81 \times 10^6 \text{ohm} \cdot \text{mm}$),连续级配($1.95 \times 10^6 \text{ohm} \cdot \text{mm}$)与粗骨料偏多($1.93 \times 10^6 \text{ohm} \cdot \text{mm}$)的电阻率略高,这与细骨料的填充效果更优、孔隙连通性更佳密切相关。

4) 基于正交试验数据建立的多元线性回归模型具有较高的可靠性。模型拟合度 $R^2 = 0.92$, F 值为48.7($P < 0.01$),统计学意义显著,且经3组独立配合比验证,预测相对误差均小于4%,可准确估算不同水胶比、养护龄期及骨料级配组合下混凝土的电阻率值,为工程实践提供了便捷的预测工具。

本研究系统揭示了材料配合比与养护龄期对混凝土电阻率的定量影响规律。电阻率直接反映混凝土内部孔隙结构的连通性与离子迁移难易程度。理论上,较高的电阻率通常意味着更密实的微观结构和更曲折的离子迁移路径,是具备更优抗渗性及更高耐久性的重要结构基础,可有效延缓混凝土结构内部钢筋的锈蚀。因此,通过本文模型优化配合比以获得较高的电阻率,有望成为提升混凝土内抗渗能力的一种间接手段。在工程实践中,可将电阻率作为快速、非破损评价混凝土均质性与密实度的辅助指标,用于配合比优化效果对比或大批量生产的质量控制筛查。对于耐久性有严格要求的工程,建议结合电阻率测试与其他直接耐久性试验方法(如氯离子扩散系数测定),进行综合评估与决策。

参考文献:

[1] AZEEM A, AKHTAR J N, AHMAD KHAN R. Mechanical and

durability enhancement in zeolite-based concrete reinforced with Alkali-treated Abaca fibre [J]. Journal of building engineering, 2026, 119: 115215.

[2] 张大川, 易忠来, 李化建, 等. 高速铁路服役混凝土耐久性检测指标与现场检测方法研究进展 [J]. 材料导报, 2026, 40(1): 70-83.

ZHANG D C, YI Z L, LI H J, et al. Research progress on durability evaluation indicators and on-site testing methods for in-service concrete in high-speed railways [J]. Materials reports, 2026, 40(1): 70-83.

[3] 陶姜宁. 建筑工程质量检测中的混凝土强度检测技术分析 [J]. 上海建材, 2025(6): 144-146.

TAO J N. Analysis of concrete strength testing technology in construction quality inspection [J]. Shanghai building materials, 2025(6): 144-146.

[4] 张少雄, 陈力莹, 崔文斌, 等. 某混凝土楼板缺陷检测与加固研究 [J]. 施工技术(中英文), 2025, 54(12): 52-56.

ZHANG S X, CHEN L Y, CUI W B, et al. Defect detection and reinforcement of a concrete floor [J]. Construction technology, 2025, 54(12): 52-56.

[5] 徐良. 水库土石坝背面混凝土表面渗流电阻率成像检测方法 [J]. 黑龙江水利科技, 2025, 53(7): 35-37.

XU L. Imaging detection method for seepage resistivity of concrete surface on back of earth-rock dam in reservoir [J]. Heilongjiang hydraulic science and technology, 2025, 53(7): 35-37.

[6] 罗大明, 李凡, 牛荻涛. 电阻率法计算内养护混凝土氯离子扩散系数 [J]. 华中科技大学学报(自然科学版), 2024, 52(4): 136-142.

LUO D M, LI F, NIU D T. Calculation of chloride diffusion coefficient of internal curing concrete based on electrical resistivity [J]. Journal of Huazhong University of Science and Technology (nature science edition), 2024, 52(4): 136-142.

[7] 温维康, 付兴府, 罗滔. 单轴压缩下冻结混凝土电阻率变化规律研究 [J]. 中国农村水利水电, 2024(11): 204-209.

WEN W K, FU X F, LUO T. Study on the change law of resistivity of frozen concrete under uniaxial compression [J]. China rural water and hydropower, 2024(11): 204-209.

[8] LUO M, ZHAO W B, JI A, et al. Enhancing concrete conductivity with recycled carbon fibers: a study on material and environmental variables [J]. Construction and building materials, 2025, 494: 143350.

[9] 张路, 牛荻涛, 文波, 等. 改性珊瑚骨料混凝土的电阻率模型 [J]. 材料导报, 2022, 36(1): 74-79.

ZHANG L, NIU D T, WEN B, et al. Resistivity model of modified coral aggregate concrete [J]. Materials reports, 2022, 36(1): 74-79.

[10] 蔡汉生, 滕芸, 贾磊, 等. 深井型直接地极固井混凝土电阻率变化规律 [J]. 南方电网技术, 2017, 11(9): 23-29.

CAI H S, TENG Y, JIA L, et al. Electrical resistivity variation law of well cementing concrete of DC deep well grounding electrode [J]. Southern power system technology, 2017, 11(9): 23-29.

[11] 付传清, 陈军, 金贤玉, 等. 早龄期混凝土的电阻率特性和微观形貌研究 [J]. 混凝土, 2015(4): 32-36.

FU C Q, CHEN J, JIN X Y, et al. Electrical resistivity property and microstructure development of young concrete [J]. Concrete, 2015(4): 32-36.