

DOI: 10.11835/j.issn.2096-6717.2021.256



开放科学(资源服务)标识码 OSID:



# 基于直流阶跃暂态电阻法的混凝土渗透性表征

曾涛<sup>1</sup>, 方正<sup>1</sup>, 熊光启<sup>1</sup>, 王冲<sup>1</sup>, 郝挺宇<sup>2</sup>, 周帅<sup>1</sup>

(1. 重庆大学材料科学与工程学院, 重庆 400045; 2. 中冶建筑研究总院有限公司, 北京 100088)

**摘要:** 渗透性是影响混凝土耐久性的最重要指标, 当前工程中所用混凝土渗透性试验方法, 无论是水渗透性还是氯离子渗透性, 其测试过程都存在耗时长、操作不便的缺点。为解决混凝土渗透性实时、原位监测的问题, 利用基于直流阶跃暂态电阻法所测混凝土电阻率表征混凝土渗透性, 分析了水胶比、矿物掺合料掺量、混凝土饱和度、环境温度等不同因素对各龄期混凝土暂态电阻率的影响规律, 将暂态电阻率与混凝土各龄期的强度、吸水速率、抗水渗透性、抗氯离子渗透性等性能建立联系。结果表明, 暂态电阻法测试结果与现有混凝土渗透性方法测试结果具有较高的关联性, 提出了暂态电阻法测试结果用于混凝土渗透性评价的推荐值, 验证了暂态电阻法可用于评价混凝土抗渗透性。

**关键词:** 混凝土; 暂态电阻法; 混凝土渗透性; 混凝土电阻率

**中图分类号:** TU502 **文献标志码:** A **文章编号:** 2096-6717(2024)02-0165-11

## Permeability characterization of concrete based on the DC-step transient resistance method

ZENG Tao<sup>1</sup>, FANG Zheng<sup>1</sup>, XIONG Guangqi<sup>1</sup>, WANG Chong<sup>1</sup>, HAO Tingyu<sup>2</sup>,  
ZHOU Shuai<sup>1</sup>

(1. College of Materials Science and Engineering, Chongqing University, Chongqing 400045, P. R. China;

2. Central Research Institute of Building and Construction, MCC., Beijing 100088, P. R. China)

**Abstract:** Permeability is the most important index affecting the durability of concrete. At present, the test methods of concrete permeability, whether water permeability or chloride permeability, have the disadvantages of time-consuming and operation inconvenience. To solve the problem of real-time and in situ monitoring of concrete permeability, this paper studied the evaluation technology of concrete permeability by the resistivity based on the DC-step transient resistance method. The influences of different water-binder ratios, mineral admixtures, water saturation and ambient temperature on the electrical resistivity of concrete were researched. The relationships between the resistivity and the strength, capillary water absorption rate, water permeability and chloride permeability resistance were analyzed. The results show a good association between the transient resistance test and the current permeability methods. The recommended values of transient resistance for evaluation of concrete permeability are proposed, and it is verified that the transient resistance can be used to

**收稿日期:** 2021-09-03

**基金项目:** 重庆市技术创新与应用示范专项(cstc2019jscx-msxmX0114)

**作者简介:** 曾涛(1995-), 男, 主要从事混凝土耐久性研究, E-mail: 247800963@qq.com。

王冲(通信作者), 男, 教授, 博士生导师, E-mail: wangchxn@126.com。

**Received:** 2021-09-03

**Foundation item:** Technology Innovation and Application Demonstration Program of Chongqing (No. cstc2019jscx-msxmX0114)

**Author brief:** ZENG Tao (1995-), main research interest: durability of concrete, E-mail: 247800963@qq.com.

WANG Chong (corresponding author), professor, doctoral supervisor, E-mail: wangchxn@126.com.

evaluate the permeability of concrete.

**Keywords:** concrete; transient resistance method; permeability of concrete; resistance of concrete

混凝土强度和耐久性是在结构服役期间可靠度的重要影响因素。根据大量工程实践经验,现阶段混凝土结构毁坏的原因并非强度不够,而是耐久性较差。混凝土渗透性直接影响混凝土耐久性,而材料内部微观结构决定了混凝土的渗透性。混凝土内部的孔隙率和孔隙连通程度影响了使用过程中混凝土和钢筋是否容易受环境中有害介质的侵蚀。例如,保护层碳化和氯离子侵入,会导致混凝土中的钢筋锈蚀,因而产生膨胀、开裂、剥落、强度降低和结构破坏等劣化情况<sup>[1-2]</sup>。当前混凝土耐久性检测要么采用小尺寸试件导致评价结果失真,要么直接在实体结构上钻芯取样进行测试,但对混凝土结构造成一定程度的扰动,且测试成本相对较高。此外,测试试验程序复杂,测试时间耗时较长等原因,给测试带来各种不确定因素,以至测试精度难以保证。因此,需要研究更简单、更低成本且可靠的混凝土渗透性评价技术。

混凝土结构内部分布着大量连通或闭合的孔隙,孔隙中存在大量饱和氢氧化钙与其他离子(如 $\text{Na}^+$ 、 $\text{K}^+$ 、 $\text{Cl}^-$ )组成的电解质溶液。电解质溶液中的游离离子在外加电场作用下发生电解迁移,内部孔隙结构的差别将展现出混凝土间不同的电学性能,具体表现为电阻率、电导率等特性的差异。鉴于混凝土内部结构与其电学参数之间的关系,混凝土电学性能测试方法有潜力成为一种快速检测、在线监测和有效评价混凝土孔结构变化的新技术。目前已有许多电学方法被开发应用于混凝土各项性能的测试,李路帆等<sup>[3]</sup>利用电感检测超高性能纤维混凝土中钢纤维的分布,罗萍萍等<sup>[4]</sup>用电磁法分析了混凝土中钢筋的锈蚀程度,金伟良等<sup>[5]</sup>利用电流密度表征混凝土裂缝电沉积产物的分布特性,刘志勇等<sup>[6]</sup>利用电阻率法研究早期水泥净浆孔结构的演变,Yousuf等<sup>[7]</sup>用电阻率表征凝结时间等。电学方法用于混凝土氯离子渗透性评价也有很多研究,董必钦等<sup>[8]</sup>用电化学阻抗谱研究混凝土氯离子渗透,尹暖暖等<sup>[9]</sup>研究了基于交流电原理的混凝土抗

氯离子渗透性测试方法。通过电阻率评价混凝土的渗透性和耐久性近年来受到很多关注<sup>[10-11]</sup>,不过这些研究所用基本都是直流电阻,测试时电极表面和混凝土表面接触时会形成电容效应<sup>[12]</sup>,不消除该效应影响,测试结果重现性难以保障。为解决这一问题,宋家茂等<sup>[13]</sup>、任雪梅等<sup>[14]</sup>采用基于直流阶跃法的暂态电阻率评价了抗氯离子渗透性,该方法可有效排除电极试件界面产生的电容影响,提高电阻率测量精确度。不过,该方法尚未用于混凝土水渗透性的评价研究,也未能进一步提出具体的渗透性评价指标。笔者系统研究了将直流阶跃暂态电阻法用于混凝土渗透性评价的技术。

## 1 原材料及试验方法

### 1.1 原材料和配合比

胶凝材料采用重庆富皇公司生产的P·O 42.5R普通硅酸盐水泥、河北建投沙河发电责任有限公司生产的F类Ⅱ级粉煤灰和金泰城环境资源股份有限公司生产的S95级矿粉,各胶凝材料的化学组成如表1所示;细集料采用石灰石质机制砂,细度模数为2.9;粗集料选用5~20 mm连续级配、表面粗糙且质地坚硬的石灰岩碎石,表观密度为 $2780 \text{ kg/m}^3$ ,堆积密度为 $1690 \text{ kg/m}^3$ ;外加剂采用天津冶建建材公司生产的聚羧酸减水剂。

为探究混凝土电阻率的影响因素,试验设计了0.30、0.40、0.50、0.60不同水胶比试验组;在矿物掺合料的影响研究中,粉煤灰及矿粉的内掺比例为0%、20%、30%、40%;水泥混凝土强度与材料内部结构具有较强关系,因此本试验设计了C30、C40、C50、C60共4个强度等级的混凝土,以探究混凝土抗压强度与电阻率之间的相关性。试验用混凝土配合比如表2所示,其中WC代表不同水胶比组,FA代表不同粉煤灰掺量组,SL代表不同矿粉掺量组,聚羧酸减水剂按胶凝材料质量分数的0.6%~1.0%掺入,新拌混凝土坍落度控制在70~90 mm范围内进行试件成型。

表1 胶凝材料的化学成分

Table 1 Chemical compositions of cementitious materials

材料	化学成分/%									
	$\text{SiO}_2$	$\text{Al}_2\text{O}_3$	$\text{Fe}_2\text{O}_3$	CaO	$\text{SO}_3$	MgO	$\text{K}_2\text{O}$	$\text{Na}_2\text{O}$	$\text{P}_2\text{O}_5$	LOI
水泥	27.97	7.94	2.92	52.26	3.08	3.13	1.08	0.25		3.66
粉煤灰	48.54	27.12	11.08	3.19	1.63	0.63	1.42	1.05	0.58	4.88
矿粉	33.08	13.29	1.93	38.31	2.22	7.87	0.31	0.28	0.17	1.76

表2 混凝土配合比

Table 2 The mix proportions of the concrete

编号	W/B	水泥/(kg/m <sup>3</sup> )	粉煤灰/(kg/m <sup>3</sup> )	矿粉/(kg/m <sup>3</sup> )	细集料/(kg/m <sup>3</sup> )	粗集料/(kg/m <sup>3</sup> )	水/(kg/m <sup>3</sup> )
WC-03	0.30	380	0	0	717	1 075	114
WC-04	0.40	380	0	0	717	1 075	152
WC-05	0.50	380	0	0	717	1 075	190
WC-06	0.60	380	0	0	717	1 075	228
FA-00	0.40	380	0	0	717	1 075	152
FA-20	0.40	304	76	0	717	1 075	152
FA-30	0.40	266	114	0	717	1 075	152
FA-40	0.40	228	152	0	717	1 075	152
SL-00	0.40	380	0	0	717	1 075	152
SL-20	0.40	304	0	76	717	1 075	152
SL-30	0.40	266	0	114	717	1 075	152
SL-40	0.40	228	0	152	717	1 075	152
C30	0.60	400	0	0	589	1 250	240
C40	0.50	400	0	0	589	1 250	200
C50	0.40	400	0	0	589	1 250	160
C60	0.30	400	0	0	589	1 250	120

## 1.2 直流阶跃暂态电阻法测试

电阻率测试中,采用圆形不锈钢片为测试电极,电极面积约为38 cm<sup>2</sup>,测试时在电极和混凝土试样之间放入由饱和氢氧化钙溶液浸湿的海绵片,使二者充分接触且减少测试中极化作用的影响。电阻率测试试件规格有两种,分别为 $\phi 100$  mm $\times$ 50 mm的圆柱体试样及100 mm $\times$ 100 mm $\times$ 100 mm的立方体试样。电阻率测试采用中冶建筑研究总院高性能混凝土研究院研发的Smart I型混凝土电阻率测试仪,仪器基于直流阶跃暂态测量法(下文简称暂态电阻法)得到混凝土的体电阻率<sup>[13,15]</sup>。测试仪器如图1所示,采用的实测参数设置如表3所示。除饱水度及温度影响试验外,电阻率测试均提前一天将试件从养护室取出后浸于水中,抹干表面保持饱和面干状态,整个测试过程平均在5 min内完成,保证测试温度在(20 $\pm$ 2) $^{\circ}$ C。



图1 暂态电阻测试仪

Fig. 1 Transient resistance tester

表3 暂态电阻测试设置参数

Table 3 Parameters of transient resistance tester

采样点数	采样次数	通电延时/ms	断电延时/ms
5	2	100	70

不同饱水度试验中,将标准养护后试件于(110 $\pm$ 2) $^{\circ}$ C条件下烘干至恒重,后浸入(20 $\pm$ 2) $^{\circ}$ C的水中,并每隔规定时间取出擦去表面水分称重,测试其电阻率,测试时温度为(20 $\pm$ 2) $^{\circ}$ C;在研究温度对电阻率影响试验中,将28 d标准养护后试件浸入含水的密封盒中,置于不同温度条件下24 h后取出测试,测试环境温度均为(20 $\pm$ 2) $^{\circ}$ C。

每次测试前,使用规格为100 mm $\times$ 100 mm $\times$ 100 mm的3块立方体石灰岩试件作为标定物对仪器进行检测校准,每个基准试样电阻率测试结果均处于2 300  $\Omega\cdot$ m至2 500  $\Omega\cdot$ m时,则确定仪器处于正常状态,可进行后续电阻率测试。每次校准后将基准石灰岩试件置于温度为(20 $\pm$ 2) $^{\circ}$ C的水中保存。

## 1.3 混凝土强度和渗透性测试

### 1.3.1 力学性能试验方法

依据《混凝土物理力学性能试验方法标准》(GB/T 50081—2019)<sup>[16]</sup>,采用100 mm $\times$ 100 mm $\times$ 100 mm的立方体试件进行抗压强度测试。

### 1.3.2 耐久性能试验方法

1) 吸水性能试验 参考《混凝土物理力学性能试验方法标准》(GB/T 50081—2019)<sup>[16]</sup>,成型100 mm $\times$ 100 mm $\times$ 100 mm规格试件,标准养护28 d后,放入(110 $\pm$ 2) $^{\circ}$ C的烘箱中烘至恒重。将试件放入水温(20 $\pm$ 2) $^{\circ}$ C的水槽中,水面没过试件30 mm,浸泡至规定时间后取出擦净称重,并计算吸水速率。

2) 渗透性评价 根据《普通混凝土长期性能和耐久性能试验方法标准》(GB/T 50082—2009)<sup>[17]</sup>中所述的抗水渗透试验及抗氯离子渗透试验来评价混凝土的渗透性。其中抗水渗透试验选择逐级加压

法;抗氯离子渗透试验选择RCM法及电通量法。

## 2 试验结果与讨论

### 2.1 混凝土电阻率的影响因素

#### 2.1.1 饱水度对混凝土电阻率的影响

不同饱水程度的混凝土试样电阻率变化规律如图 2 所示。图中 4 组不同水胶比混凝土的电阻率

变化规律均为电阻率随饱水度降低而快速增大。当混凝土烘干处理至饱水度为 0% 时,4 组不同水胶比混凝土电阻率均上升至 2 500 Ω·m 左右,为饱水状态时的 5~10 倍,可知混凝土电阻率的变化对孔隙饱水程度较为敏感。此外,混凝土电阻率与饱水度呈现类似指数函数关系,当饱水度小于 50 % 时,混凝土电阻率随饱水度的变化更加剧烈<sup>[18]</sup>。

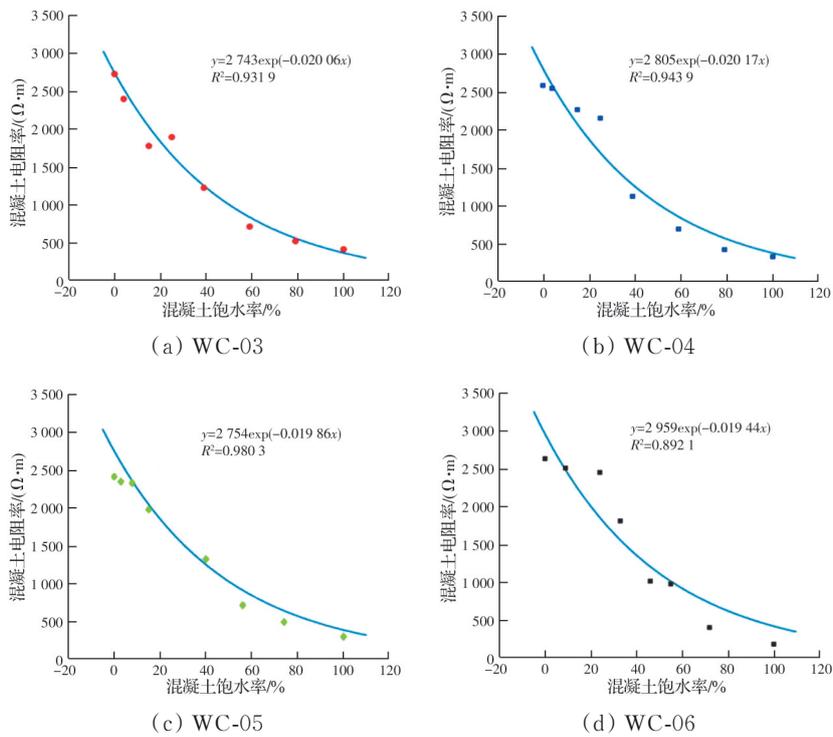


图 2 饱水度对混凝土电阻率的影响

Fig. 2 Effect of water saturation on resistivity of concrete

#### 2.1.2 测试温度对混凝土电阻率的影响

不同水胶比试样饱 Ca(OH)<sub>2</sub> 溶液后在不同温度下对混凝土电阻率进行测试,以减弱孔溶液电阻率及饱水度对测试结果的影响。图 3 为不同温度条件下混凝土电阻率的变化。图中 4 组不同水胶比混凝土电阻率均随着温度的升高而降低。其原因为孔隙溶液中存在大量的自由离子,连通的孔隙溶液是

混凝土导电的主要路径。自由离子的活性受温度影响,温度越高,孔隙溶液中各种导电离子活性增强,混凝土的导电性增强,混凝土的电阻率相应减小<sup>[19]</sup>。

#### 2.1.3 水胶比对混凝土电阻率的影响

图 4 为不同水胶比组混凝土在 180 d 养护龄期内的电阻率变化图,从图 4 中可以看出,不同水胶比混凝土的电阻率在 180 d 内均随养护龄期的增加而增长。混凝土电阻率的增长速率在前 28 d 内处于较高水平,之后逐渐减小。在养护 90 d 后,混凝土电阻率的增长趋势进一步减小。混凝土电阻率增长速率主要受混凝土中水泥的水化过程影响:早期水泥水化较快,浆体的孔隙率快速降低且孔溶液中的离子大量参与水化反应,导致电阻率迅速增加;随着水泥混凝土整体水化程度提升,材料密度增加,水化速度明显放慢,导致孔隙率减小速度放慢,电阻率增加的速度也相应减小。28 d 后水泥水化反应速率较低,孔隙结构及混凝土内部液相环境开始趋于稳定<sup>[20]</sup>,则电阻变化率随之减小。

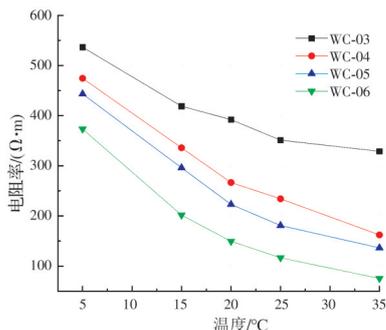
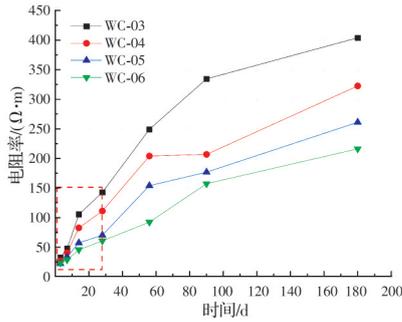
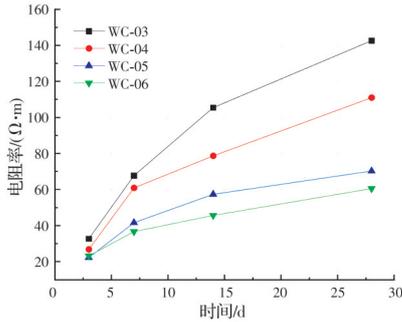


图 3 不同温度下混凝土电阻率变化

Fig. 3 Variation of resistivity of concrete under different temperature



(a) 不同水胶比下混凝土电阻率



(b) 前期混凝土电阻率

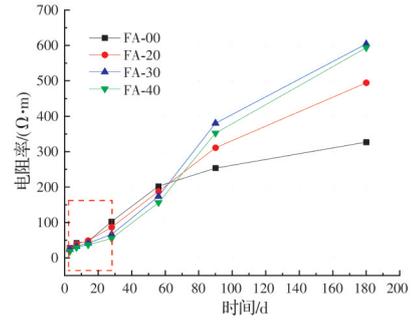
图 4 不同水胶比组混凝土 180 d 养护龄期内的电阻率变化  
Fig. 4 Variation of resistivity of concrete with different W/B ratios within the curing period of 180 d

对比不同组别,可以看到电阻率随着水胶比的增大而减小,水胶比为 0.30 时混凝土电阻率远高于其他组别,约为水胶比 0.60 试验组的 2 倍。水胶比越大,混凝土中的孔隙率和孔径越大,混凝土的孔隙率越高,混凝土的密实度越差,导致混凝土的电阻率较小。

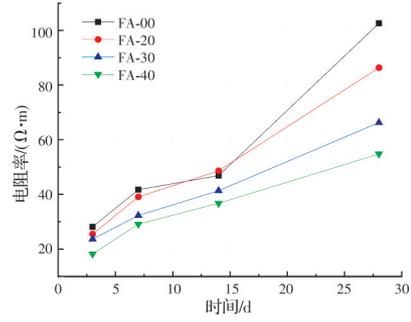
#### 2.1.4 粉煤灰对混凝土电阻率的影响

不同粉煤灰掺量组混凝土在 180 d 养护龄期内的电阻率变化如图 5 所示,从图 5 中可以看出,不同粉煤灰掺量组混凝土的电阻率在前 56 d 较为接近,未掺粉煤灰的基准组混凝土电阻率要略高于试验组,说明粉煤灰掺入会降低混凝土早期电阻率。从 56 d 龄期开始,基准组的电阻率增长速率开始明显减小,而掺入粉煤灰的试验组混凝土电阻率增长速率开始明显提升。养护龄期到达 90 d 时,掺入粉煤灰的试验组混凝土电阻率均有较大增长,且电阻率超过基准组。最终 180 d 龄期时掺入粉煤灰的试验组混凝土电阻率均远高于基准组混凝土,说明粉煤灰掺入提升了混凝土后期电阻率。

导致以上现象的原因有两个方面:其一,粉煤灰反应速率慢,前期主要起到填充作用,粉煤灰反应主要需通过与水泥水化反应产物  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  发生,此反应显然会滞后于水泥水化反应。56 d 内基准组混凝土中水泥水化较快,而加入粉煤灰后混凝土的



(a) 不同粉煤灰掺量下混凝土电阻率变化



(b) 早龄期混凝土电阻率

图 5 粉煤灰掺量对 180 d 龄期混凝土电阻率的影响  
Fig. 5 Influence of fly ash replacement on resistivity of concrete at the age of 180 d

水化反应总体变得缓慢,因此,在早期掺入粉煤灰的混凝土电阻率小于基准组混凝土。56 d 龄期后,随着粉煤灰与  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  的二次水化反应不断进行,主要生成的 C—S—H 凝胶填充了水化反应阶段产生的孔隙及由水化放热引起的微裂缝,进一步改善了混凝土的密实性;另外,随着二次水化反应的加深,水化产物  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  逐渐被消耗,混凝土孔溶液中的  $\text{Ca}^{2+}$  和  $\text{OH}^-$  的浓度降低,导致混凝土电阻率进一步提高<sup>[21]</sup>。

#### 2.1.5 矿粉对混凝土电阻率的影响

不同矿粉掺量组混凝土 180 d 养护龄期电阻率变化如图 6 所示。从图中可以看出,试验组内基本保持随矿粉掺量增加电阻率增大的规律。与粉煤灰的掺入不同,掺有矿粉的试验组前期电阻增长速率

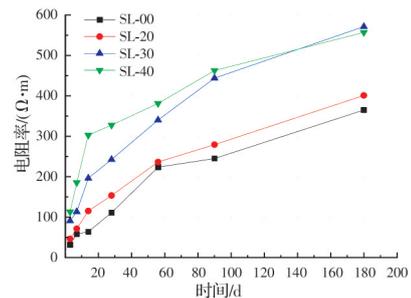


图 6 掺量对 180 d 龄期混凝土电阻率影响

图 6 Influence of ground slag replacement on resistivity of concrete at the age of 180 d

就远远高于基准组,且掺有矿粉的试验组在一开始就获得了较高的电阻率。在养护3 d时,掺有30%、40%矿粉试验组的混凝土电阻率就已增加至基准组的2倍,养护7 d时掺有40%矿粉试验组电阻率甚至达到了基准组的3倍多。这说明矿粉的加入对混凝土早期电阻率有较大影响。从7 d开始,掺入矿粉的试验组混凝土电阻率增长速率几乎同时开始下降,此后,龄期一直保持稳定的增长速率。养护至180 d时,3个试验组的电阻率均高于基准组,特别地,30%、40%矿粉掺量试验组的电阻率增长至近 $580 \Omega \cdot \text{m}$ ,远高于基准组数据。矿粉与粉煤灰掺入时混凝土电阻率上的差异主要源于水化机理的不同,矿粉的活性较高,可在更早时间发生二次水化反应,一定程度上增加混凝土的密实度,改变混凝土液相环境。此外,试验用的矿粉较细,比表

面积大,表面活性高,可作为水泥水化的晶核,为其水化生成C-S-H凝胶提供成核位点,从而加快了水泥的水化<sup>[22]</sup>。矿粉活性较高,可与 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 持续发生二次水化反应,使混凝土电阻率在养护后期仍保持一定增长率。

## 2.2 暂态电阻法评价混凝土性能

### 2.2.1 暂态电阻法评价混凝土强度

根据不同强度等级混凝土试验数据给出混凝土电阻率和抗压强度随龄期的发展规律,如图7所示。总体上,混凝土强度随电阻率的增长而增大。从图中可以看出,虽然混凝土电阻率和强度均随养护龄期的增长而增加,但二者规律有所不同。差异在于电阻率的增长速率虽有减缓,但始终保持较高水平,而强度在前14 d就达到90 d混凝土强度的80%左右,之后处于缓慢增长状态。

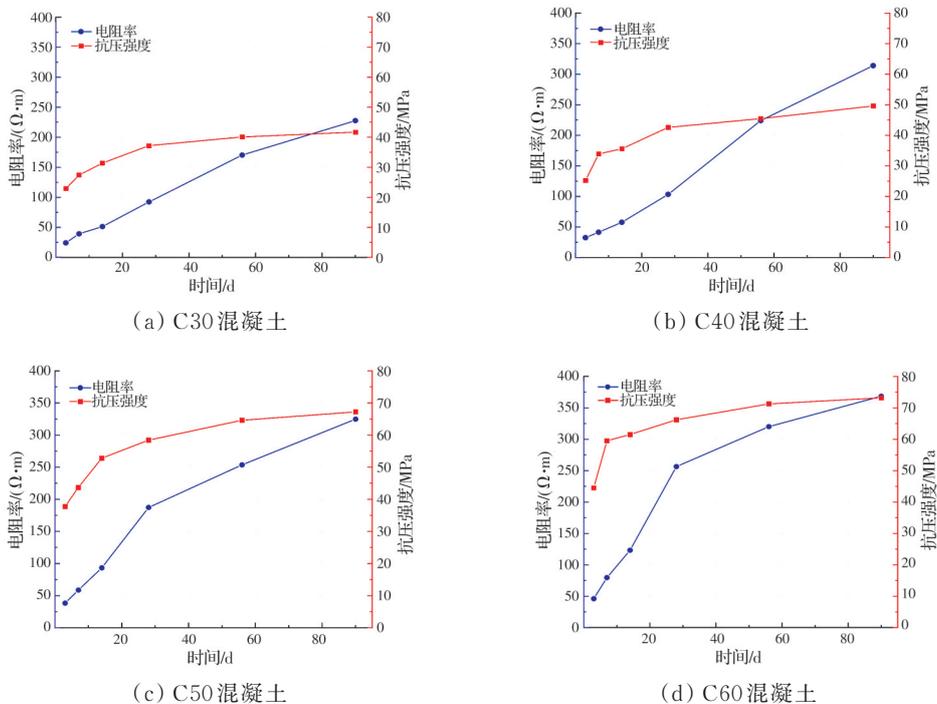


图7 混凝土电阻率-抗压强度随养护龄期的变化

Fig. 7 Variations of resistivity and compressive strength of concrete with the increase of curing ages

图8为混凝土电阻率和强度之间的对应关系,可发现两者之间存在线性关系,据此可提出两者的数学关系,如式(1)所示。

$$y = 0.11053x + 32.1241, \quad R^2 = 0.64139 \quad (1)$$

式(1)拟合结果显示相关系数只有0.64,这主要是因为影响混凝土电阻率与抗压强度之间的因素虽有重叠却不完全一致,导致强度与电阻率的相关性并不高。例如,混凝土的孔隙率对电阻率和抗压强度均有影响,反映在混凝土早期电阻率和强度均随着水泥快速水化而增加<sup>[23]</sup>。此外,混凝土界面过渡区(ITZ)是影响混凝土强度的主要因素之一,但

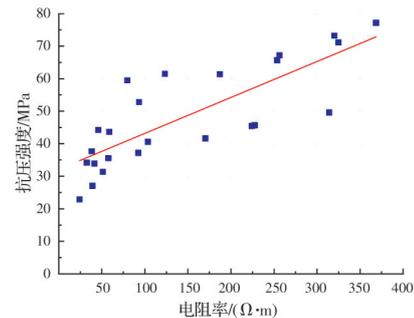


图8 混凝土电阻率与抗压强度的关系

Fig. 8 Correlation between resistivity and compressive strength of concrete

对混凝土电阻率的影响并不明显<sup>[24]</sup>;混凝土孔溶液的离子组成对电阻率影响较大,但对强度影响并不明显。此影响因素的差异性导致了混凝土在后期强度增长速率的减缓而电阻率仍保持较高的增长速率。

2.2.2 暂态电阻法与混凝土吸水性能

各组混凝土试样吸水后质量及电阻率随时间

的变化规律如图 9 所示。混凝土试样吸水前 24 h 内,电阻率迅速下降,这是因为水泥基材料的电阻率在饱和度较低时更敏感。50 h 后,随着混凝土吸水总量增加,试样的电阻率逐渐放缓,此阶段混凝土吸水后质量增长变缓,混凝土已经处于较高饱水状态,因此混凝土电阻率变化不大。

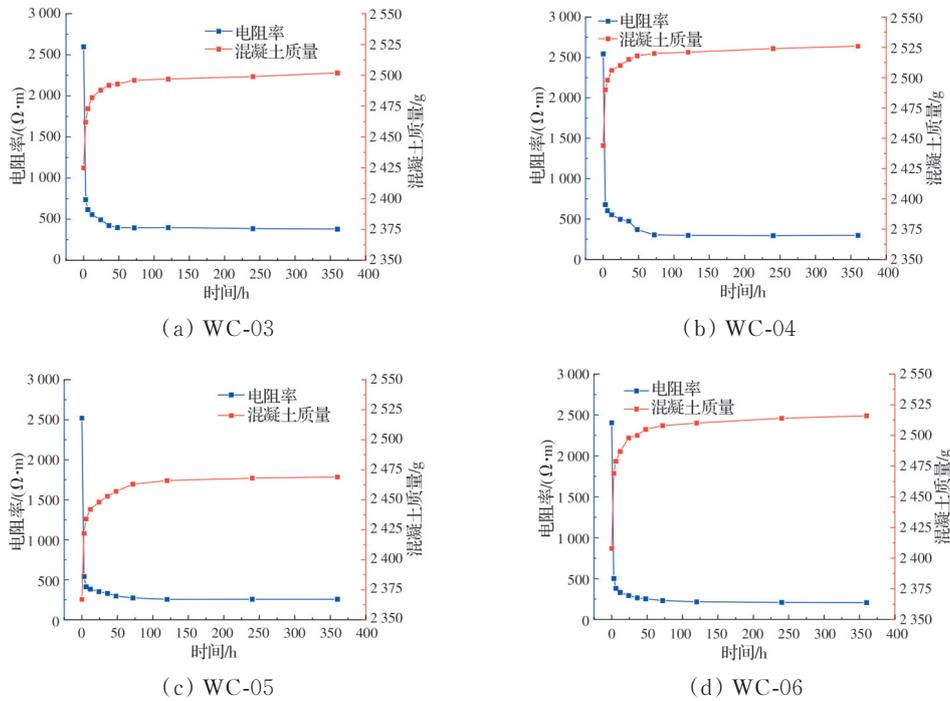


图 9 混凝土电阻率与混凝土吸水后质量变化

Fig. 9 Concrete resistivity and weight of concrete after water absorption

通过计算求得曲线上各时间点的斜率得到各时间点混凝土吸水速率。将完全干燥的混凝土和开始吸收水分后湿润状态下混凝土的吸水速率与电阻率变化对应关系分别作图,如图 10 所示,可以

看到两种状态下呈现以下不同规律,其关系如(2)和式(3)所示。

$$y = -0.0396x + 116.25049, \quad R^2 = 0.85351 \quad (2)$$

$$y = 0.0133 \times e^{0.0089x}, \quad R^2 = 0.7981 \quad (3)$$

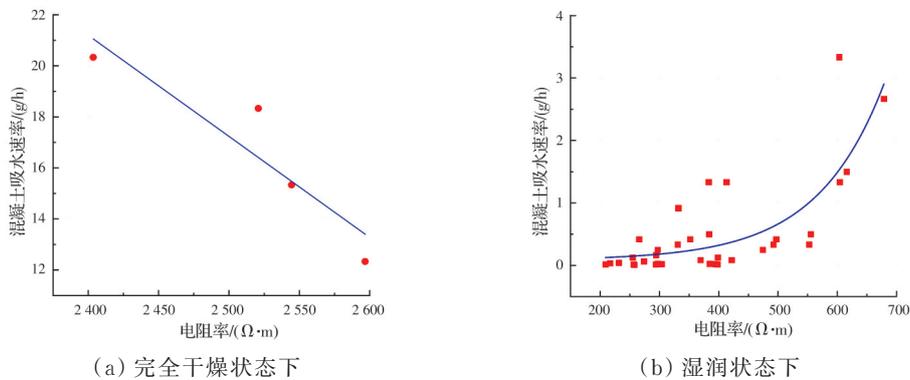


图 10 潮湿混凝土的电阻率与吸水速率的相关性

Fig. 10 Correlation between resistivity and water absorption rate of wet concrete

从图 10 中可以看出,完全干燥状态下混凝土的吸水速率与电阻率几乎呈现线性关系,相关系数达 0.85。吸水速率随着电阻率的增加而减少,这是因为完全干燥的混凝土内部没有孔溶液,电流无法通

过孔溶液导电,此时电阻率仅与混凝土的密实度有关,孔隙率越大的混凝土电阻率越小,吸水性能较强。湿润状态下混凝土的吸水速率与电阻率呈指数关系,两者相关系数接近 0.80。

2.2.3 暂态电阻法评价混凝土抗水渗透性

暂态电阻法测试结果与抗水渗透试验得到的抗渗等级之间关系如图 11 所示,可以发现两者之间存在较强线性关系,可提出两者的数学关系,如式(4)所示。

$$y = 0.05262x - 3.78417, \quad R^2 = 0.75828 \quad (4)$$

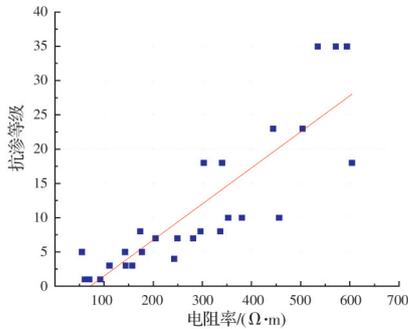


图 11 混凝土电阻率与抗渗等级的相关性  
Fig. 11 Correlation between resistivity and impermeability grade

从图 11 中可以看出两者相关系数为 0.76,具有较高相关系数。与抗水渗透试验方法比较,使用暂态电阻法测量混凝土的电阻率以反映混凝土渗透性的方法易于操作且省时,因此具有一定的发展前景。根据混凝土抗渗等级与暂态电阻法测试结果建立关系,并得到用于评价混凝土渗透性的推荐值,如表 4 所示。

表 4 暂态电阻法用于评价混凝土抗渗等级推荐值

Table 4 Recommended values for evaluating the impermeability grade by transient resistance method

抗渗等级	电阻/(Ω·m)
<P4	<150
P4	150~250
P6	250~300
P8	300~350
P10	350~400
P12	400~450
>P12	>450

2.2.4 暂态电阻评价混凝土电通量

暂态电阻法测量的结果与电通量之间的关系如图 12 所示,从中可以看出,总体上,混凝土电通量随着混凝土电阻率的增长而减小。通过对比图 12(a)、(b)试验数据可知,水胶比越大,后期混凝土的电阻率越低,也拥有更大的电通量。此结果是由于水胶比越大,混凝土的孔隙率越大,电流越容易通过混凝土。通过图 12(c)、(d)的对比可以看到,加入矿物掺合料的混凝土电通量发展规律异于普通混凝土,矿粉混凝土的电通量一直处于较低的状态,加入粉煤灰的试验组在前 28 d 龄期电通量测试值较大,而 56 d 左右时,电通量快速降低到了 500 C 左右。矿粉和粉煤灰活性及二次水化特性的差异使两组试样在各龄期的密实性与基准组混凝土不同<sup>[25]</sup>。

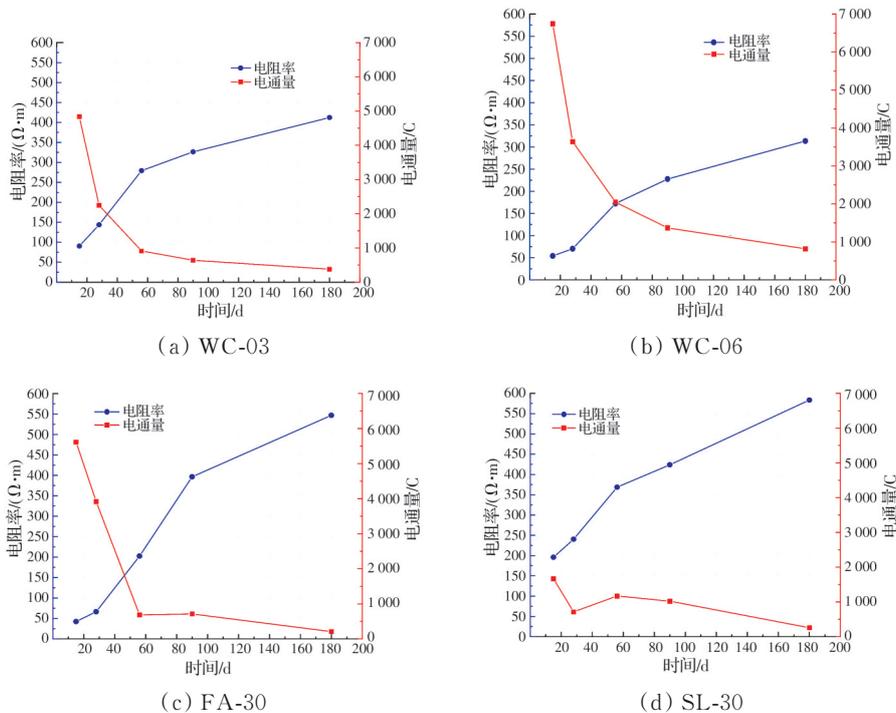


图 12 不同龄期混凝土电阻率和电通量

Fig. 12 Resistivity and electric flux of concrete under different ages

以电阻率和电通量两者的相对值作图,见图 13,可以发现两者之间存在明显的反比例函数关系,可提出两者的数学关系,如式(5)所示。

$$y = 161\ 715.126\ 12x^{-0.879\ 26}, R^2 = 0.908\ 53 \quad (5)$$

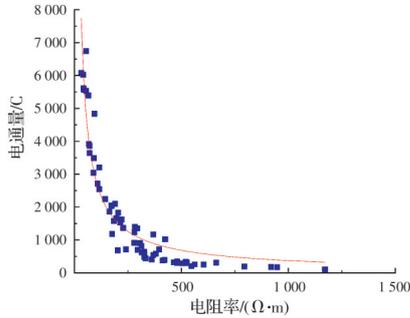


图 13 混凝土电阻率与电通量的相关性

Fig. 13 Correlation between concrete resistivity and electric flux

从图 13 可以看出,各配合比混凝土的电通量和电导率具有较好的相关性,其相关系数高达 0.91。由此可见,暂态电阻法能够准确地反映混凝土氯离

子渗透性。根据库伦量评价混凝土抗氯离子渗透性试验,建立暂态电阻法用于评价混凝土的抗氯离子渗透性的推荐值<sup>[26]</sup>,如表 5 所示。

表 5 暂态电阻法用于评价混凝土抗氯离子渗透性能推荐值

Table 5 Recommended value of transient resistance method for evaluating resistance of chloride penetration

库伦量/C	氯离子渗透性	电阻/(Ω·m)
>4 000	高	< 50
2 000~4 000	中等	50~150
1 000~2 000	低	150~300
100~1 000	很低	300~1 200
< 100	可忽略	>1 200

### 2.2.5 混凝土电阻率与氯离子扩散系数的相关性

利用暂态电阻法测试了 28、56、90、180 d 共 4 个龄期同批次混凝土的电阻率和氯离子渗透系数,结果如图 14 所示。从图 14 可以看出,混凝土氯离子扩散系数总体上随混凝土电阻率的增长而减小。

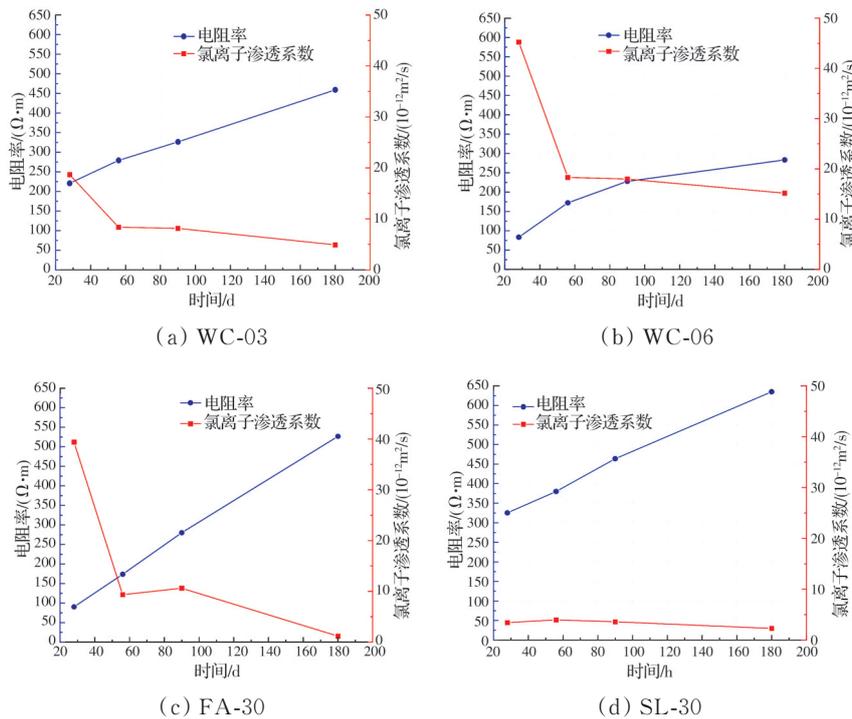


图 14 混凝土电阻率和氯离子扩散系数

Fig. 14 Resistivity and chloride diffusion coefficient of concrete

根据 RCM 所得的氯离子扩散系数与电阻率建立关系,如图 15 所示,可发现两者间存在明显的反比例函数关系,通过拟合可提出两者的数学关系如式(6)所示。

$$y = 16\ 096.169\ 03x^{-1.312\ 15}, R^2 = 0.816\ 67 \quad (6)$$

从图 15 可以看出,暂态电阻法所测混凝土电阻率与氯离子扩散系数的相关性很高,相关系数达到

0.82,说明暂态电阻法测试结果可用于表征混凝土抗氯离子渗透系数。根据文献[27]提出的氯离子扩散系数标准,建立暂态电阻法用于评价混凝土抗氯离子渗透性的推荐值,如表 6 所示。

综合试验结果可知,暂态电阻法测试结果与现行的抗水渗透性法、电通量法、RCM 法的测试结果均具有较好的相关性,说明暂态电阻法可用于混凝

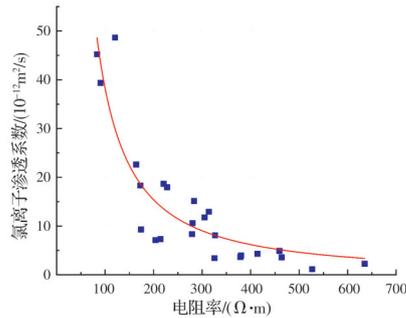


图15 混凝土电阻率与氯离子扩散系数的相关性

Fig. 15 Correlation between resistivity and chloride diffusion coefficient

表6 暂态电阻法用于评价混凝土氯离子扩散系数推荐值

Table 6 The recommended value of transient resistance method for evaluating chloride diffusion coefficient

氯离子扩散系数/ ( $10^{-12} \text{ m}^2/\text{s}$ )	渗透性	电阻/( $\Omega \cdot \text{m}$ )
< 2	抗氯离子渗透性能非常好	> 600
2~8	抗氯离子渗透性能较好	300~600
8~16	抗氯离子渗透性能一般	200~300
> 16	不适用于严酷环境	< 200

土的渗透性能检测。与传统的方法相比,暂态电阻法具有快速检测、无破损等优点,且仅用常规的抗压强度测试试件就能完成测试,无需特殊的试件处理,测试方法简单,测试成本低。

### 3 结论

1)在试验条件下,结果显示不同水胶比、矿物掺合料的掺入、测试温度的改变都对混凝土电阻率有较明显的影响。其中混凝土饱水度是影响混凝土电阻率的敏感因素。混凝土饱水度从100%降至0的过程中,其电阻率从300  $\Omega \cdot \text{m}$ 上升至2 500  $\Omega \cdot \text{m}$ 左右。

2)混凝土抗压强度随电阻率的增长而增加,二者具有一定线性关系,但相关系数不够高。混凝土吸水性能可分为完全干燥状态与湿润状态。当混凝土湿润时,两者呈指数函数关系,相关性接近0.80。

3)在混凝土渗透性表征方面,混凝土电阻率与抗渗等级之间呈线性关系,相关系数为0.76;混凝土的电通量与电阻率呈反比例函数关系,相关系数为0.91;氯离子渗透系数随着混凝土电阻率的增大而减小,两者也呈反比例关系,相关系数为0.82。可见,暂态电阻法测试结果与混凝土抗渗性能试验结果的相关性普遍较高,说明暂态电阻法可以用于表征混凝土渗透性能。

### 参考文献

- [1] 张鹏, WITTMANN Folker H, 李荣旭, 等. 混凝土构件中钢筋锈蚀的中子断层扫描成像[J]. 建筑材料学报, 2016, 19(6): 1019-1022.  
ZHANG P, WITTMANN F H, LI R X, et al. Neutron tomography of steel corrosion in steel reinforced concrete [J]. Journal of Building Materials, 2016, 19(6): 1019-1022. (in Chinese)
- [2] 许晨, 岳增国, 金伟良, 等. 碳化环境中混凝土钢筋锈蚀速率监测研究[J]. 建筑材料学报, 2012, 15(4): 527-532, 552.  
XU C, YUE Z G, JIN W L, et al. Study on the real-time dynamic monitoring of corrosion rate of reinforcement in carbonation environment [J]. Journal of Building Materials, 2012, 15(4): 527-532, 552. (in Chinese)
- [3] 李路帆, 夏骏, 濮琦. 基于磁探针电感检测法检测UHPFRC中纤维的空间分布[J]. 混凝土与水泥制品, 2018(5): 53-57.  
LI L F, XIA J, PU Q. Detection of spatial distribution of fibers in UHPFRC based on magnetic probe inductance detection [J]. China Concrete and Cement Products, 2018(5): 53-57. (in Chinese)
- [4] 罗萍萍, 林旭梅, 刘振东, 等. 基于电磁法的钢筋混凝土腐蚀度检测研究[J]. 测控技术, 2018, 37(2): 110-113.  
LUO P P, LIN X M, LIU Z D, et al. Research on corrosion detection of reinforced concrete based on electromagnetic method [J]. Measurement & Control Technology, 2018, 37(2): 110-113. (in Chinese)
- [5] 金伟良, 彭文浩, 毛江鸿, 等. 不同电流密度下混凝土裂缝电沉积产物的分布特性[J]. 土木与环境工程学报(中英文), 2019, 41(3): 127-133.  
JIN W L, PENG W H, MAO J H, et al. Distribution characteristics of electrodeposition products of concrete cracks under different current densities [J]. Journal of Civil and Environmental Engineering, 2019, 41(3): 127-133. (in Chinese)
- [6] 刘志勇, 张云升, 孙国文, 等. 电阻率法研究早期水泥净浆孔结构的演变过程[J]. 土木建筑与环境工程, 2012, 34(5): 148-153.  
LIU Z Y, ZHANG Y S, SUN G W, et al. Resistivity method for monitoring the early age pore structure evolution of cement paste [J]. Journal of Civil, Architectural & Environmental Engineering, 2012, 34(5): 148-153. (in Chinese)
- [7] YOUSUF F, WEI X S, ZHOU J Y. Monitoring the setting and hardening behavior of cement paste by electrical resistivity measurement [J]. Construction and Building Materials, 2020, 252: 118941.
- [8] 董必钦, 庄钊涛, 顾镇涛, 等. 矿渣混凝土氯离子渗透的电化学阻抗谱分析[J]. 深圳大学学报(理工版), 2019, 36(3): 268-273.

- DONG B Q, ZHUANG Z T, GU Z T, et al. Electrochemical impedance spectroscopy analysis of Cl<sup>-</sup> penetration in slag concrete [J]. Journal of Shenzhen University (Science and Engineering), 2019, 36(3): 268-273. (in Chinese)
- [9] 尹暖暖, 万小梅, 赵铁军, 等. 基于交流电原理的混凝土抗氯离子渗透性测试方法[J]. 混凝土与水泥制品, 2020(2): 86-89.
- YIN N N, WAN X M, ZHAO T J, et al. A testing method for chloride resistance of concrete based on alternating current mechanism [J]. China Concrete and Cement Products, 2020(2): 86-89. (in Chinese)
- [10] TIBBETTS C M, PARIS J M, FERRARO C C, et al. Relating water permeability to electrical resistivity and chloride penetrability of concrete containing different supplementary cementitious materials [J]. Cement and Concrete Composites, 2020, 107: 103491.
- [11] XIAO L Z, REN Z, SHI W C, et al. Experimental study on chloride permeability in concrete by non-contact electrical resistivity measurement and RCM [J]. Construction and Building Materials, 2016, 123: 27-34.
- [12] 李化建, 谢永江, 易忠来, 等. 混凝土电阻率的研究进展[J]. 混凝土, 2011(6): 35-40.
- LI H J, XIE Y J, YI Z L, et al. Advance in research on electrical resistivity of concrete [J]. Concrete, 2011(6): 35-40. (in Chinese)
- [13] 宋家茂, 张勇, 张润, 等. 基于直流阶跃法的混凝土电阻率与抗氯离子渗透性评价[J]. 混凝土, 2020(3): 59-62, 68.
- SONG J M, ZHANG Y, ZHANG R, et al. Research on relation of anti-chloride permeability and concrete resistivity based on DC-step input [J]. Concrete, 2020 (3): 59-62, 68. (in Chinese)
- [14] 任雪梅, 宋家茂, 郝挺宇. 高抗蚀硅酸盐水泥提高混凝土抗渗性能机理研究[J]. 混凝土与水泥制品, 2020(5): 10-12.
- REN X M, SONG J M, HAO T Y. Investigation on mechanism of permeability of concrete with high corrosion resistant Portland cement [J]. China Concrete and Cement Products, 2020(5): 10-12. (in Chinese)
- [15] 郝挺宇, 吴志刚, 丁宝峰, 等. 一种混凝土电阻率测量方法及其装置:CN101576587 [P].2009-11-11.
- HAO T Y, WU Z G, DING B F, et al. A method for measuring the resistivity of concrete and its apparatus: CN101576587 [P].2009-11-11.
- [16] 混凝土物理力学性能试验方法标准:GB/T 50081—2019 [S]. 北京:中国建筑工业出版社,2019.
- Standard for test methods of concrete physical and mechanical properties: GB/T 50081—2019 [S]. Beijing: China Architecture & Building Press,2019.
- [17] 普通混凝土长期性能和耐久性能试验方法标准:GB/T 50082—2009 [S]. 北京:中国建筑工业出版社,2009.
- Standard for test methods of long-term performance and durability of ordinary concrete: GB/T 50082—2009 [S]. Beijing: China Architecture & Building Press. (in Chinese)
- [18] 李美利. 混凝土潮湿养护效率的电阻率评价方法研究 [D]. 重庆: 重庆大学, 2011.
- LI M L. Electrical resistance method to assess moist curing efficiency of concrete [D]. Chongqing: Chongqing University, 2011. (in Chinese)
- [19] HOPE B B, IP A K, MANNING D G. Corrosion and electrical impedance in concrete [J]. Cement and Concrete Research, 1985, 15(3): 525-534.
- [20] LOTHENBACH B, WINNEFELD F. Thermodynamic modelling of the hydration of Portland cement [J]. Cement and Concrete Research, 2006, 36(2): 209-226.
- [21] SKIBSTED J, SNELLINGS R. Reactivity of supplementary cementitious materials (SCMs) in cement blends [J]. Cement and Concrete Research, 2019, 124: 105799.
- [22] 汪琰皓. 基于不同掺合料的水泥体系强度效应研究 [D]. 武汉: 武汉科技大学, 2018.
- WANG Y H. Study on strength effect of cement system based on different blending materials [D]. Wuhan: Wuhan University of Science and Technology, 2018. (in Chinese)
- [23] 王雪芳, 郑建岚, 罗素蓉. 矿物掺合料对混凝土电阻率的影响[J]. 福州大学学报(自然科学版), 2008, 36(3): 408-412.
- WANG X F, ZHENG J L, LUO S R. Effects of the mineral admixtures on the electrical resistivity of concrete [J]. Journal of Fuzhou University (Natural Science Edition), 2008, 36(3): 408-412. (in Chinese)
- [24] RAMEZANIANPOUR A A, PILVAR A, MAHDIKHANI M, et al. Practical evaluation of relationship between concrete resistivity, water penetration, rapid chloride penetration and compressive strength [J]. Construction and Building Materials, 2011, 25(5): 2472-2479.
- [25] EHTESHAM S, RASHEEDUZZAFAR H. Corrosion resistance performance of fly ash blended cement concrete [J]. ACI Materials Journal, 1994, 91(3): 264-272.
- [26] Standard test method for electrical indication of concrete's ability to resist chloride ion penetration:ASTM. C 1202 [S]. West Conshohocken Pennsylvania: ASTM International, 2012.
- [27] Concrete, mortar and cement-based repair materials: chloride migration coefficient from non-steady-state migration experiments : NT Build 492 (1999-11) [S]. Nordtest, Espoo, Finland, 1999.