

水泥基材料抗压强度与交流阻抗参数的关系研究

王瑞攀^{1,2}, 何富强³, 戴李宗^{1,2}

(1. 厦门大学材料学院, 厦门 361005; 2. 福建省防火阻燃材料重点实验室, 厦门 361005;

3. 厦门理工学院土木工程与建筑系, 厦门 361024)

摘要: 研究了标准养护条件下不同 W/B (水胶比) 水泥浆体的 7 d 和 28 d 抗压强度和交流阻抗响应, 并对阻抗谱进行了解析。结果表明水泥浆体的强度随 W/B 的增大而减小, 且呈良好的线性关系。不同 W/B 的水泥浆体试件的 R_{CCP} 、 R_{DP} 、 C_{mat} 和 C_{DP} 与 W/B 均成良好的幂函数关系。采用 R_{CCP} 和 R_{DP} 表征的水泥浆体试件非连通孔和连通孔所占比例基本相同。且同一龄期不同 W/B 的水泥浆体抗压强度与各阻抗参数也有良好的幂函数关系。因此, 可望采用交流阻抗参数预测不同 W/B 的水泥浆体抗压强度, 从而为水泥浆体强度预测提供一种新的方法。

关键词: 水泥基材料; 抗压强度; 阻抗参数

中图分类号: TU528

文献标识码: A

文章编号: 1001-1625(2019)05-1362-07

DOI:10.16552/j.cnki.issn1001-1625.2019.05.011

Study on the Relationship between Compressive Strength and AC Impedance Parameters of Cement-Based Materials

WANG Rui-pan^{1,2}, HE Fu-qiang³, DAI Li-zong^{1,2}

(1. College of Materials, Xiamen University, Xiamen 361005, China; 2. Fujian Provincial Key Laboratory of Fire Retardant Materials, Xiamen 361005, China; 3. School of Civil Engineering and Architecture, Xiamen University of Technology, Xiamen 361024, China)

Abstract: The 7 d and 28 d compressive strength and AC impedance response of cement paste with different W/B (water-binder ratio) under standard curing conditions were studied, impedance spectra were also analyzed. The results show that: the strength of the cement specimens decreases with the increase of W/B and has a good linear relationship. R_{CCP} , R_{DP} , C_{mat} and C_{DP} and W/B of different W/B cement paste specimens have a good power function relationship. The ratio of non-communicating pores and communicating pores of cement specimens characterized by R_{CCP} and R_{DP} is basically the same. The compressive strength of cement paste with different W/B at the same age has a good power function relationship with each impedance parameter. Therefore, it is expected that the AC impedance parameters can be used to predict the compressive strength of cement pastes with different W/B, thus providing a new method for strength prediction of cement specimens.

Key words: cement-based material; compressive strength; impedance parameter

1 引言

孔结构对水泥基材料的性能有重要影响, 尤其是水泥浆体的强度与其孔隙率、孔径分布、孔径尺寸及孔表面积等均有密切关系^[1]。至今为止, 不同研究者对水泥基材料的孔结构与强度的关系进行了研究, 其中周焕海等^[2]研究了碱矿渣水泥浆体的孔结构与强度间的关系, 发现随着浆体孔隙率降低, 强度增大, 然而当 100 ~ 220 nm 的大孔增多时, 虽然孔隙率降低, 强度还是会下降。刘冬梅等^[3]研究了磷渣对水泥浆体强度和孔结构的影响, 结果表明磷渣的掺入使浆体 7 d 的孔隙率增加, 大孔所占比例增大。孙道胜等^[4]研究了甲

基金项目: 福建省杰出青年基金(2015J06012); 博士后基金(2017M612140); 厦门市科技计划项目(3502Z20183001); 福建省石墨烯技术研发项目(闽发改高技(2017)105号); 福建省自然科学基金(2016J01257)

作者简介: 王瑞攀(1989-) 男, 博士研究生, 主要从事水泥基材料交流阻抗测试研究, 混凝土配合比设计与耐久性研究。E-mail: 986821260@qq.com.

酸钙对水泥浆体抗压强度、水化及孔结构的影响,而李辉等^[5]研究了钢渣矿渣水泥孔结构对水泥强度影响,得到的结果基本类似,也即随着孔隙率的增大和大孔比例的增加,水泥浆体强度降低。周艳香等^[6]研究了矿物掺合料粉煤灰和矿粉对混凝土孔结构的影响,发现随着矿物掺合料的掺量由10%增大到20%,混凝土结构的无害孔和少害孔的数量逐渐增加。戴雨辰等^[7]研究了泡沫混凝土的孔隙率随水胶比变化,发现混凝土的抗压强度随平均孔径的增大呈现先提高后降低趋势。此外,其他研究者也研究了不同掺合料对砂浆^[8]和混凝土^[9-11]孔结构与强度间关系的影响。

传统的用于水泥基材料孔结构测试方法主要有压汞法(MIP)和氮吸附法(BET),但是这两种方法均需要破坏试件,且只能测试局部试件的孔结构特征,并不能反映试件整体的孔结构特征,有极大的局限性。GUPING等研究了阻抗谱与孔结构的关系^[12],随后又研究了阻抗与孔隙率、孔溶液电导率等间的关系^[13],均得到了良好的效果。但是并没有建立水泥基材料强度与交流阻抗参数间的关系,且在水泥基材料中究竟是连通孔控制强度还是总孔隙率对强度影响更大,至今为止并没有研究者给出明确的结论。本文采用交流阻抗测试方法测试了标准养护条件下,不同水胶比的水泥浆体试件7d和28d龄期时的交流阻抗谱和抗压强度,并对阻抗谱拟合参数与水胶比及抗压强度间的关系进行了分析,以期采用交流阻抗测试方法表征水泥浆体试件的抗压强度。

2 实验

2.1 原材料

实验采用水泥浆体为P·O 42.5水泥浆体,满足中国国家标准《通用硅酸盐水泥》(GB 175-2007)^[14],其化学组成和物理指标如表1和表2所示。

表1 水泥的化学组成

Material	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	SO ₃	Na ₂ O _{eq}	f-CaO	Loss	Cl ⁻
Cement	22.89	4.58	3.51	64.05	2.15	2.40	0.52	0.90	1.13	0.012

表2 水泥的物理指标

Material	细度 0.08%	密度 / (g/cm ³)	比表面积 / (m ² /kg)	标准稠度 / %	安定性雷氏法 / mm	凝结时间 / min		3 d 强度 / MPa	
						初凝	终凝	抗压	抗折
Cement	0.9	3.15	341	24.8	0.1	140	189	26.2	5.4

2.2 实验方法

本实验成型水胶比分别为0.25、0.30、0.35、0.40、0.45、0.50、0.55的水泥浆体试件,每个W/B成型2组试件,每组3个试件,试件尺寸为40 mm × 40 mm × 160 mm,成型后用塑料薄膜覆盖并放置于室内养护($T = (21 \pm 3) ^\circ\text{C}$, $RH \geq 75\%$), 1 d后拆模,放于标准养护室($T = (20 \pm 2) ^\circ\text{C}$, $RH \geq 95\%$)养护至规定龄期。

待到规定龄期后,选取一组试件用于交流阻抗测试,试件连接方式见文献[15],电极与试件间的填充介质为导电胶,其主要成份为无机硅铝酸盐材料。测试时激励电压为500 mV,测试频率范围为1 Hz ~ 10 MHz,采用对数扫描,每个量级测试15个点,并取三个试件交流阻抗谱均值作为测试结果。每个龄期用于交流阻抗测试的试件应保持不变,同时测试每个龄期水泥浆体试件的抗压强度。对测得的阻抗谱采用文献[16]中的方法,判断高频圆弧的频率范围,随后对得到的高频圆弧采用Song^[17]提出的等效电路($R_{CCP}C_{mat}(R_{CP}C_{DP})$)进行拟合分析,等效电路如图1所示。图中 R_{CCP} 代表连通孔电阻, C_{mat} 代表水泥浆体试件电容, R_{CP} 代表非连通孔电阻, C_{DP} 代表非连通孔电容。

3 结果与讨论

3.1 水泥浆体试件的抗压强度与W/B关系

不同W/B水泥浆体7d和28d抗压强度如表3所示,并将抗压强度与W/B作图,如图2所示。从图2中可以看出,随着W/B的增大,水泥浆体强度也逐渐增大,且呈良好的线性关系,如表4所示。从表4中可

可以看出 28 d 抗压强度与 W/B 线性关系的 a 值小于 7 d 龄期,这说明在 28 d 龄期时,水泥浆体试件抗压强度随 W/B 增大而降低较快。

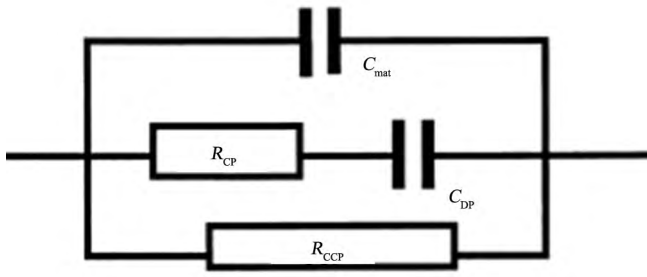


图 1 等效电路

Fig. 1 Equivalent circuit

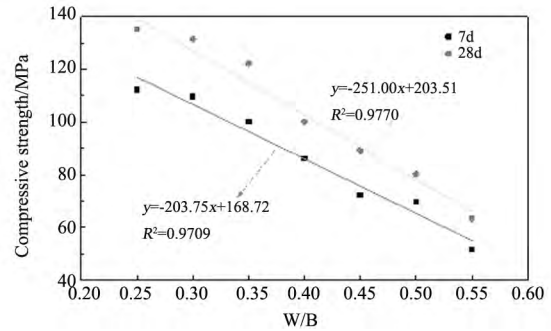


图 2 抗压强度与 W/B 关系

Fig. 2 Relationship between compressive strength and W/B

表 3 不同 W/B 水泥浆体试件 7 d 和 28 d 强度

Tab. 3 Compressive strength of cement paste specimens with different W/B for 7 d and 28 d /MPa

W/B	0.25	0.30	0.35	0.40	0.45	0.50	0.55
7 d 强度	112.3	109.7	100.2	86.3	72.2	69.8	51.7
28 d 强度	135.3	131.5	122.2	100.1	89.1	80.2	63.4

表 4 水泥浆体试件 7 d 和 28 d 抗压强度与 W/B 拟合关系式

Tab. 4 Correlation between compressive strength and W/B of cement paste specimens for 7 d and 28 d

W/B	拟合方程	a	b	R ²
7 d	y = ax + b	-203.75	168.72	0.9709
28 d	y = ax + b	-251.00	203.51	0.9770

3.2 水泥浆体试件的交流阻抗谱图

不同龄期不同 W/B 的水泥浆体试件交流阻抗谱如图 3 所示。从图中可以看出,7 d 和 28 d 龄期的 Nyquist 图均有两个圆弧,且其截止频率在 10³ ~ 10⁴ Hz 范围,高频圆弧为水泥浆体试件基体阻抗,而低频圆弧则为电极-试件间接触阻抗,具体理论分析详见文献 [16]。在同一龄期,不同 W/B 水泥浆体试件的 Nyquist 图圆弧直径随着 W/B 的减小而逐渐增大,这是由于随着 W/B 的减小,孔隙率减低,水泥浆体阻抗增大,圆弧直径增大。

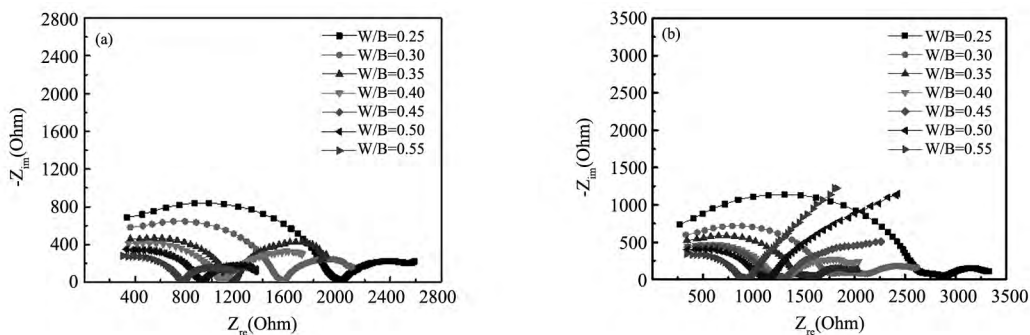


图 3 不同水胶比水泥浆体试件 Nyquist 图 (a) 7 d; (b) 28 d

Fig. 3 Nyquist plots of cement specimens with different W/B

3.3 水泥浆体的交流阻抗谱分析

采用图 1 所示的等效电路对测得的 7 d 和 28 d 龄期阻抗谱进行拟合,拟合得到的不同 W/B 水泥浆体试件的阻抗参数如表 5 所示。从表 5 中可以看出,拟合的 Chi-sqr 均在 10⁻⁴,拟合效果良好。将表 5 中的拟合参数与 W/B 作图,如图 4 和图 5 所示。从图中可以看出各拟合参数均随 W/B 的增大而逐渐减小,7 d 和 28 d 的规律基本一致,这是由于在同一龄期,随着 W/B 的增大,水泥浆体的孔隙率也增大。相应的其连通孔量增加,连通孔电阻 R_{CCP} 减小,非连通孔量也增多,相应的非连通孔电阻 R_{CP} 减小。

表 5 不同 W/B 水泥浆体试件阻抗谱拟合参数

Tab. 5 Fitting parameters of impedance spectra of cement paste specimens with different W/B

龄期	W/B	R_{CCP}/Ω	C_{mat}/F	R_{CP}/Ω	C_{DP}/F	Chi-sqr
7 d	0.25	1895	1.79E-11	11020	5.64E-12	1.78E-04
	0.30	1480	1.87E-11	7832	6.52E-12	1.44E-04
	0.35	1112	1.99E-11	4972	8.86E-12	1.08E-04
	0.40	1022	2.07E-11	3906	1.14E-11	1.65E-04
	0.45	873	2.14E-11	3000	1.34E-11	1.47E-04
	0.50	872	2.13E-11	3022	1.41E-11	1.88E-04
	0.55	734	2.23E-11	2140	1.78E-11	2.04E-04
28 d	0.25	2554	1.78E-11	11470	6.44E-12	2.27E-04
	0.30	1661	1.89E-11	7338	6.98E-12	2.09E-04
	0.35	1374	1.94E-11	5593	7.56E-12	1.76E-04
	0.40	1137	2.00E-11	4510	9.24E-12	1.99E-04
	0.45	1096	1.99E-11	4339	9.84E-12	2.36E-04
	0.50	999	2.03E-11	3852	1.08E-11	2.37E-04
	0.55	839	2.06E-11	3218	1.21E-11	2.28E-04

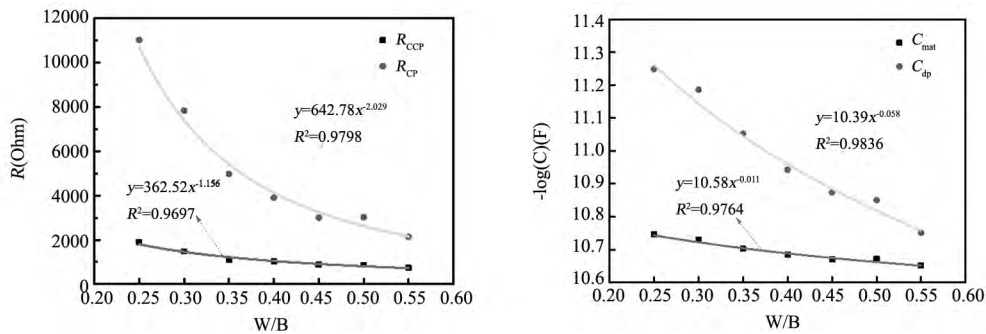


图 4 水泥浆体试件 7 d 龄期阻抗参数与 W/B 的关系

Fig. 4 Relationship between impedance parameters and W/B of cement paste specimens at 7 d

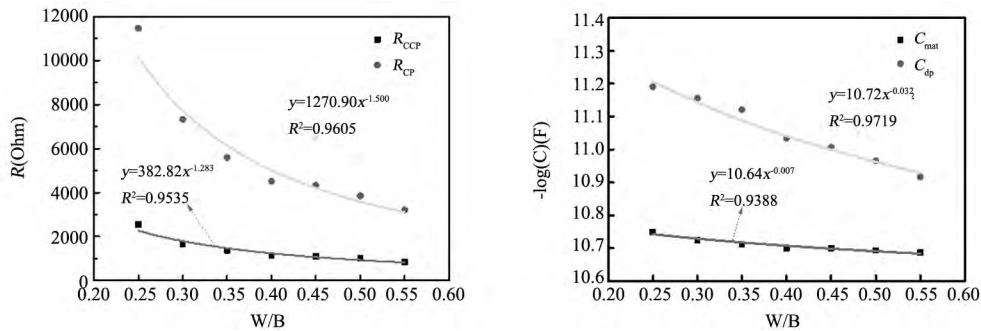


图 5 水泥浆体试件 28 d 龄期阻抗参数与 W/B 的关系

Fig. 5 Relationship between impedance parameters and W/B of cement paste specimens at 28 d

从图中还可以看出,水泥浆体试件基体电容 C_{mat} 和非连通孔电容 C_{DP} 也随 W/B 的增大而逐渐减小。对于水泥浆体试件基体电容 C_{mat} 而言,这是由于随着水化的进行,水泥浆体试件中将会形成孔隙,且孔结构中将被自由水填充并与溶解其中的离子形成孔溶液,因此,水泥浆体试件可看作是孔溶液填充于水泥当中,其基体电容受到孔结构及孔中填充介质孔溶液的影响。这些因素对介电性能的影响可用混合物法则来描述^[18],如式(1)所示:

$$\log \varepsilon = \sum_i v_i \log \varepsilon_i \tag{1}$$

式中 v_i 为第 i 相的含量; ε_i 为第 i 相的介电常数。

20 °C 时水的介电常数为 80,而水泥的介电常数为 1.5 ~ 2.1 之间,因此水泥浆体试件的孔溶液可看作是高电介质常数(孔溶液)分布于低电介质常数基质(水泥)中,整个材料的介电特性表现为孔溶液和水泥混合物的作用,材料的介电常数 C_{mat} 随着孔溶液的增加而增大。对于水泥浆体试件中的非连通孔电容 C_{DP} 而言,随

着 W/B 的增大,非连通孔中的凝胶层厚度 d 逐渐增大,且连通孔数量也逐渐减小。

对图 5 中的各参数随 W/B 变化关系进行拟合分析,水泥浆体试件阻抗参数随 W/B 变化呈现 $y = ax^b$ 的幂函数关系,如表 6 所示。从表 6 中可以看出,各阻抗参数随 W/B 变化的拟合系数均大于 0.9388,拟合效果优异。因此可基于此拟合方程推测不同 W/B 的阻抗参数。

表 6 不同 W/B 水泥浆体 7 d 和 28 d 抗压强度与 W/B 关系

Tab. 6 Relationship between compressive strength and W/B of cement paste at 7 d and 28 d

龄期	参数	拟合方程	a	b	R ²
7 d	R _{CCP}	$y = ax^b$	362.52	-1.156	0.9697
	R _{CP}	$y = ax^b$	642.78	-2.029	0.9798
	C _{mat}	$y = ax^b$	10.58	-0.011	0.9764
	C _{DP}	$y = ax^b$	10.39	-0.058	0.9836
28 d	R _{CCP}	$y = ax^b$	382.82	-1.283	0.9535
	R _{CP}	$y = ax^b$	1270.90	-1.500	0.9605
	C _{mat}	$y = ax^b$	10.64	-0.007	0.9388
	C _{DP}	$y = ax^b$	10.72	-0.032	0.9719

3.4 水泥浆体试件的孔结构变化

孔结构对水泥浆体试件的强度有重要影响。将上述测得的 7 d 和 28 d 不同 W/B 水泥浆体试件抗压强度与拟合得到的相应龄期的阻抗参数作图,如图 6 所示。从图中可以看出,对于不同龄期的连通孔电阻 R_{CCP} 和非连通孔电阻 R_{CP},均随抗压强度的增大而增大。

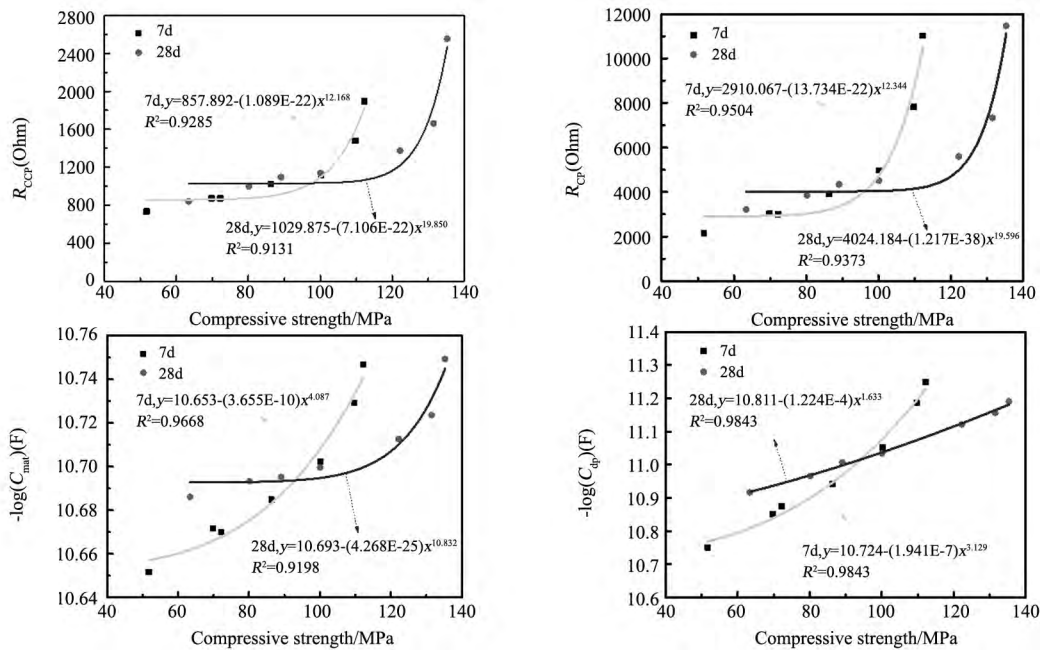


图 6 水泥浆体试件不同龄期阻抗参数与抗压强度的关系

Fig. 6 Relationship between impedance parameters and compressive strength of cement paste specimens at different ages

由于 R_{CCP} 表征的是连通孔电阻, R_{CP} 表征的是非连通孔电阻,分别计算 7 d 和 28 d 龄期同一 W/B 的水泥浆体试件的 $R_{CP} / (R_{CCP} + R_{CP})$,见表 7,可以得到在 7 d 龄期时 $R_{CP} / (R_{CCP} + R_{CP})$ 值在 0.745 ~ 0.853 之间变化,在 0.799 附近变化,也即 7 d 龄期不同 W/B 的水泥浆体试件中连通孔所占比例基本相同,均在 79.9% 左右,相应的非连通孔占总孔隙率的比例为 20.1% 左右。同样可以计算在 28 d 龄期时 $R_{CP} / (R_{CCP} + R_{CP})$ 值在 0.793 ~ 0.818 之间变化,在 0.805 附近变化,也即 28 d 龄期不同 W/B 的水泥浆体试件中非连通孔所占比例基本相同,均在 80.5% 左右,相应的连通孔占总孔隙率的比例为 19.5% 左右。总体来看,随着水化龄期的增长, $(R_{CCP} + R_{CP})$ 增大,这表明水泥浆体的总孔隙率减小^[19]。

表 7 同一 W/B 水泥浆体试件 7 d 和 28 d 龄期 R_{CCP} 和 R_{CP} 间的关系

Tab. 7 Relationship between R_{CCP} and R_{CP} of the same W/B cement paste specimens at 7 d and 28 d

龄期	W/B	0.25	0.30	0.35	0.40	0.45	0.50	0.55
7 d	R_{CCP}	1895	1480	1112	1022	873	872	734
	R_{CP}	11020	7832	4972	3906	3000	3022	2140
	$R_{CCP} + R_{CP}$	12915	9312	6084	4928	3873	3894	2874
	$R_{CCP} / (R_{CCP} + R_{CP}) / \%$	14.7	15.9	18.3	20.7	22.5	22.4	25.5
	$R_{CP} / (R_{CCP} + R_{CP}) / \%$	85.3	84.1	81.7	79.3	77.5	77.6	74.5
	R_{CCP}	2554	1661	1374	1137	1096	999	840
28 d	R_{CP}	11470	7338	5593	4510	4339	3852	3218
	$R_{CCP} + R_{CP}$	14024	8999	6967	5647	5435	4851	4057
	$R_{CCP} / (R_{CCP} + R_{CP}) / \%$	18.2	18.5	19.7	20.1	20.2	20.6	20.7
	$R_{CP} / (R_{CCP} + R_{CP}) / \%$	81.8	81.5	80.3	79.9	79.8	79.4	79.3

3.5 水泥浆体试件抗压强度与阻抗参数的关系

将表 3 和表 5 中同一龄期不同 W/B 水泥浆体试件的阻抗拟合参数与相应 W/B 的抗压强度作图,可以得到 7 d 和 28 d 龄期水泥浆体试件各阻抗拟合参数与抗压强度关系如图 6 所示。从图 6 中可以看出 R_{CCP} 和 R_{CP} 均随抗压强度的增加而增大,对于水泥浆体试件基体电容 C_{mat} 和非连通孔电容 C_{DP} , $-\log(C_{mat})$ 和 $-\log(C_{DP})$ 也随水泥浆体试件的抗压强度增大而增大。

对同一龄期不同 W/B 的水泥浆体试件抗压强度与各阻抗参数进行拟合分析,抗压强度与各阻抗参数有良好的幂函数关系,如表 8 所示。从表 8 中可以看出,各幂函数的拟合系数 R^2 均大于 0.9131,拟合效果优异。这说明,对于在标准条件下养护 7 d 和 28 d 的水泥浆体试件,可用相同养护条件下对应龄期不同 W/B 试件阻抗参数对试件抗压强度进行预测,从而为标准养护条件下水泥浆体试件抗压强度的测试提供一种新的途径。

表 8 各拟合参数与 7 d 和 28 d 不同 W/B 水泥浆体试件抗压强度关系($y = a - bx^c$)

Tab. 8 Relationship between the fitting parameters and the compressive strength of different W/B cement paste at 7 d and 28 d ($y = a - bx^c$)

参数	龄期	a	b	c	R^2
R_{CCP}	7 d	857.89	1.09E-22	12.17	0.9285
	28 d	1029.88	7.11E-40	19.85	0.9131
R_{CP}	7 d	2910.07	13.73E-22	12.344	0.9504
	28 d	4024.18	1.22E-38	19.60	0.9373
$-\log(C_{mat})$	7 d	10.65	3.66E-10	4.09	0.9668
	28 d	10.69	4.27E-25	10.83	0.9198
$-\log(C_{DP})$	7 d	10.72	1.94E-7	3.13	0.9843
	28 d	10.81	1.22E-4	1.63	0.9843

4 结 论

本文测试了标准养护条件下 7 d 和 28 d 龄期不同 W/B 水泥浆体试件的抗压强度和交流阻响应,并对阻抗结果进行了拟合分析,可以得到如下结论:

(1) 同一龄期不同 W/B 水泥浆体试件的抗压强度与 W/B 有优异的线性关系。同一龄期不同 W/B 水泥浆体试件的交流阻抗参数均随 W/B 的增大而减小,符合优异的幂函数关系。

(2) 采用 R_{CCP} 和 R_{CP} 表征水泥浆体试件孔结构,在 28 d 龄期时,不同 W/B 的水泥浆体试件中连通孔所占比例基本相同,均在 79.9% 左右,相应的非连通孔占总孔隙率的比例为 20.1% 左右。

(3) 水泥浆体试件的 7 d 和 28 d 龄期的抗压强度与相应试件的阻抗参数均满足优异的幂函数关系。因此可采用水泥浆体试件的交流阻抗参数对试件抗压强度进行预测。

参 考 文 献

[1] 李永鑫, 陈益民, 贺行洋, 等. 粉煤灰-水泥浆体的孔体积分形维数及其与孔结构和强度的关系[J]. 硅酸盐学报, 2003, 31(8): 774-779.

- [2] 周焕海,唐明述,吴学权,等.碱-矿渣水泥浆体的孔结构和强度[J].硅酸盐通报,1994,13(3):15-19.
- [3] 刘冬梅,方坤河,张雷.磷渣对水泥浆体强度和孔结构的影响[J].水泥,2006(8):4-6.
- [4] 孙道胜,许炜,王爱国,等.甲酸钙对水泥浆体抗压强度、水化及孔结构的影响[J].安徽建筑工业学院学报(自然科学版),2013,21(6):54-58.
- [5] 李辉,邱杨,宋强.钢渣矿渣水泥孔结构对水泥强度影响的试验研究[J].混凝土,2010(4):45-47.
- [6] 周艳香,戚伟利,王树栋.矿物掺合料对混凝土孔结构特性影响研究[J].兰州工业学院学报,2017,24(6):28-31+49.
- [7] 戴雨辰,高培伟,林辉,等.泡沫混凝土孔结构对抗压强度的影响研究[J].新型建筑材料,2018,45(3):130-133.
- [8] 张凌,孙海燕,龚爱民,等.火山灰水泥砂浆孔结构与其强度相关性的研究[J].中国农村水利水电,2013(4):88-90+94.
- [9] 何俊辉.道路水泥混凝土微观结构与性能研究[D].西安:长安大学,2009.
- [10] 冯庆革,卢凌寰.混凝土孔结构对强度影响的灰色系统研究[A].中国硅酸盐学会.《硅酸盐学报》创刊 50 周年暨中国硅酸盐学会 2007 年学术年会论文摘要集[C].中国硅酸盐学会,2007:1.
- [11] 郭剑飞.混凝土孔结构与强度关系理论研究[D].杭州:浙江大学,2004.
- [12] Gu P, Xie P, Beaudoin J J, et al. Impedance spectroscopy (II): microstructural characterization of hydrating cement-silica fume systems [J]. Cement and Concrete Research, 1993, 23: 157-168.
- [13] Gu P, Xu Z Z, Xie P, et al. Application of A. C. impedance techniques in studies of porous cementitious materials: (I): influence of solid phase and pore solution on high frequency resistance [J]. Cement and Concrete Research, 1993, 23: 531-540.
- [14] GB175-2007 通用硅酸盐水泥[S].2007.
- [15] He F, Wang R, Shi C, et al. Error evaluation and correction of stray impedance during measurement and interpretation of AC impedance of cement-based materials [J]. Cement and Concrete Composites, 2016, 72: 190-200.
- [16] He F, Wang R, Zhang R, et al. Effect of the sample-electrode contact impedance on the appearance of dispersion in the AC impedance spectroscopy of cement-based materials [J]. Journal of Sustainable Cement-Based Materials, 2018, 7: 323-339.
- [17] Song G. Equivalent circuit model for AC electrochemical impedance spectroscopy of concrete [J]. Cement and Concrete Research, 2000, 30(11):1723-1730.
- [18] 李军奇,赵错,徐洁,等.孔结构对氮化硅陶瓷介电性能的影响[J].稀有金属材料与工程,2007(S1):557-559.
- [19] 刘小金.用交流阻抗方法研究碱激发矿渣水泥浆体水化和微观结构[D].长沙:湖南大学,2015.

(上接第 1361 页)

- [6] 高丹盈,张明,朱海堂.钢筋钢纤维高强混凝土梁疲劳试验研究及刚度计算[J].建筑结构学报,2013,34(8):142-149.
- [7] 梅迎军,赵翔,代超,等.弯曲荷载作用下钢纤维聚合物混凝土疲劳寿命[J].公路交通科技,2015,32(9):20-25.
- [8] Alessandro P F, Andrea G, Bernardino C. Fiber volume fraction and ductility index in fiber-reinforced concrete round determined panels [J]. Procedia Structural Integrity, 2016, 2: 2857-2864.
- [9] Ciancio D, Manca M, Buratti N, et al. Structural and material properties of mini notched round determinate panels [J]. Construction and Building Materials, 2016, 113: 395-403.
- [10] Fausto M, Giovanni P. Derivation of a simplified stress-crack width law for fiber reinforced concrete through a revised round panel test [J]. Cement and Concrete Composites, 2015, 58: 95-104.
- [11] American society for testing and material, standard test method for flexural toughness of fiber reinforced concrete(using centrally loaded round panel) [S]. ASTM Committee C09. 42, West Conshohocken, PA, 2003.
- [12] GB 50152-2012. 混凝土结构试验方法标准[S].北京:中国建筑工业出版社,2012.
- [13] Medeiros A, Zhang X, Ruiz G, et al. Effect of the loading frequency on the compressive fatigue behavior of plain and fiber reinforced concrete [J]. International Journal of Fatigue, 2015, 70: 342-350.
- [14] 高镇同,熊峻江.疲劳可靠性[M].北京:航空航天大学出版社,2002.