

基于电化学阻抗谱的矿物掺合料混凝土水泥水化过程研究

姜凤娇^{1,2}, 贡金鑫¹, 张 文¹

(1. 大连理工大学建设工程学部, 辽宁 大连 116024; 2. 大连海洋大学信息工程学院, 辽宁 大连 116023)

摘要: 采用电化学阻抗谱方法对掺入粉煤灰或矿渣的混凝土水泥水化过程进行了研究, 从不同龄期混凝土电化学阻抗谱的特征出发, 分析了矿物掺合料对混凝土中水泥水化过程的电化学阻抗参数的影响, 讨论了混凝土结构的变化与发展. 研究表明: 不同粉煤灰或矿渣掺量的混凝土电化学阻抗谱具有相同的变化趋势. 在水化早期, 随着矿物掺合料掺量的增大, 阻抗参数 R_s 、 R_{ct} 和 σ 减小, 混凝土的总孔隙率增大, 结构变疏松; 水化后期, 由于矿物掺合料的二次水化作用, 阻抗参数 R_s 、 R_{ct} 和 σ 逐渐增大, 混凝土的总孔隙率减小, 结构变密实, 且随矿物掺合料掺量的增加混凝土微观结构的密实度越高.

关键词: 混凝土; 矿物掺合料; 水化过程; 电化学阻抗谱

中图分类号: TU528.35; TQ15

文献标志码: A

文章编号: 1006-7930(2016)04-0493-07

Study on the cement hydration processes of concrete with mineral admixtures based on electrochemical impedance spectroscopy

JIANG Fengjiao^{1,2}, GONG Jinxin¹, ZHANG Wen¹

(1. Faculty of Infrastructure Engineering, Dalian University of Technology, Dalian 116024, China;

2. College of Information Engineering, Dalian Ocean University, Dalian 116021, China)

Abstract: The cement hydration of concrete mixed with fly ash or slag was studied by means of the electrochemical impedance spectroscopy. Starting with the characteristics of electrochemical impedance spectrum, the influence of the mineral admixtures on electrochemical impedance parameters in the concrete cement hydration process was analyzed and the development and changes of the concrete structure was discussed. The results show the concrete electrochemical impedance spectroscopy with different quantity of fly ash or slag is the same in trend. During the early age of hydration, the impedance parameters R_s , R_{ct} and σ reduced and the total porosity of the concrete increased with the increases of the amount of mineral admixtures incorporated in concrete and the structure of concrete becomes loose. In the latest age of hydration, the impedance parameters R_s , R_{ct} and σ gradually increase because of the secondary hydration effects and the total porosity of the concrete decreased and the structure of concrete becomes compacted, and with the increase of mineral admixture content, the meso-structures of concrete becomes more compact.

Key words: concrete; mineral admixture; hydration process; Electrochemical Impedance Spectroscopy

高性能混凝土的需求和环保的呼声使粉煤灰和矿渣成为混凝土工程常用的掺合料, 利用矿渣或粉煤灰取代部分水泥制备高性能混凝土, 是提高混凝土材料性能的重要途径. 因此通过试验分析研究矿渣或粉煤灰掺入混凝土后水泥浆体水化过程和微观孔结构的变化^[1-5], 对混凝土微观结构研究具有重要意义. 文中利用交流阻抗谱法研究掺加矿物掺合料混凝土中水泥浆体水化反应的进程, 通过观察阻抗谱的变化, 研究矿物掺合料掺量对混凝土微观结构电化学阻抗参数和混凝土水化过程的影响, 以对矿物掺合料混凝土中水泥水化过程有更深入的理解.

1 基本原理

电化学阻抗谱是对试验样品在各种频率 ω 下施

加小振幅的正弦交流电压, 测量样品的正弦电流, 两者频率相同, 但相位不同, 比值称为复阻抗 $Z(\omega)$ ^[6]. 将不同频率下测得的复阻抗在复平面上表示, 所得图形称为Nyquist图, Nyquist图的特性反映研究试验样品的特性. 混凝土材料可以看成是一种孔中存在有电解质溶液的特殊电化学体系, 在混凝土试块两相对面放置惰性金属电极, 可根据不同龄期下测得的试件阻抗谱变化, 反映水泥水化过程中混凝土内部结构的变化^[2,7-9]. 由于混凝土材料组成的特殊性, 其Nyquist图呈现准Randles型, Randles型和准Randles型的主要区别在于:

(1) 用常相角元件 CPE 取代双层电容 C_d , 图谱中的高频段为一偏转的半圆或圆弧.

(2) 在法拉第阻抗中, 也用常相角元件取代

Warburg (Z_w) 阻抗, 图谱中低频斜线和实轴交角的偏离为 45° .

与混凝土中常见的 Randles 型与准 Randles 型相应的等效电路见图 1(a)和图 1(b), 图 2(a)和图 2(b)分别为 Randles 型与准 Randles 型 Nyquist 图.

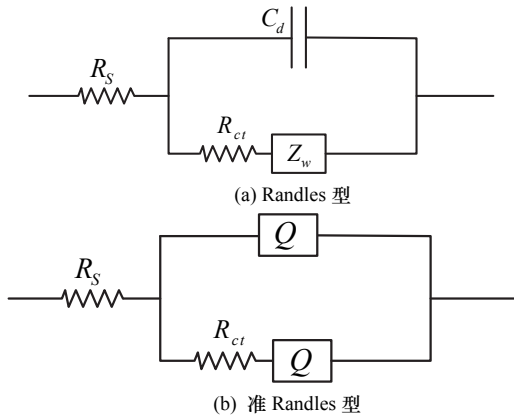


图 1 混凝土中的等效电路
Fig.1 Equivalent circuits of concrete

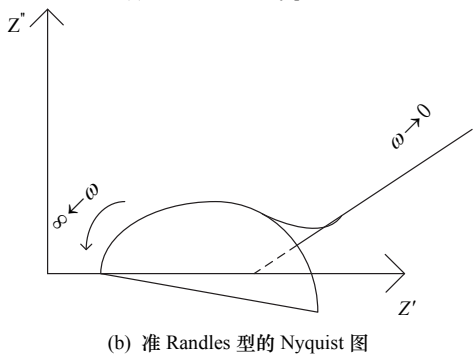
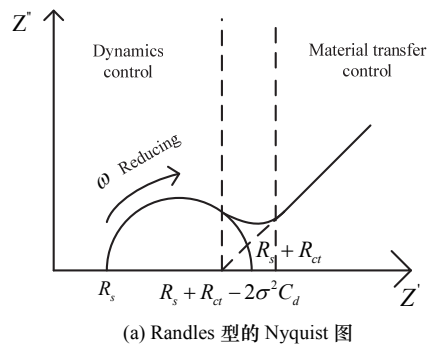


图 2 Nyquist 图

Fig.2 The Nyquist plot

本文采用图1(b)和图2(b)所示的准Randles型等效电路进行模拟分析. 准Randles型等效电路中电化学参数 R_s 、 R_{ct} 、 C_d 、 q 、 σ 和 p 的物理意义分别为: ① R_s 为水泥浆体的孔溶液中的电解质的电阻, 为Nyquist图中的高频曲线与实轴交点, R_s 与孔溶液中离子总浓度成反比, 也和水泥浆体总孔隙率成反比; ② R_{ct} 为水化电子进行电荷传递反应的电阻, 反映了活化过程的特征, 是Nyquist图中高频半圆的直径, R_{ct} 可间接反映 OH^- 离子的浓度以及水泥的

水化程度; ③ 双电层电容 C_d 为 C-S-H 凝胶的电容, 表征了水泥水化产物的电性质, 常用常相角元件 CPE 取代, 可表示为 $C_d = K(j\omega)^{-q}$, 可以用 K 的大小来相对代表 C_d 大小, 常相角指数 q 表征了高频段半圆的压扁度; ④ 扩散阻抗 Z_w ($Z_w = \sigma(j\omega)^{-1/2}$, σ 称为扩散阻抗系数), 体现了传质过程(即扩散过程)的特点, 由常相角元件 CPE 取代, 可以表达为 $Z_D = Q(j\omega)^{-p}$, 研究 Z_w 、 Z_D 的阻抗表达式, 依然可以用扩散阻抗系数 σ 来反映水泥浆体中连通的毛细结构的发展程度, 常相角指数 p 用来表征孔结构的空間特性, 即其复杂程度和密实度, 可由低频直线和实轴的夹角除以 $\pi/2$ 得到. 常相角元件的指数与混凝土水泥浆体孔结构的特征有关, 可体现水泥浆体孔结构的细微变化, 而指数和反映孔结构特征复杂程度与密实度分形维数间的关系为^[7-10]: $d_s=3-q$, $d=4-p$.

2 试验内容

水泥(C)采用普通硅酸盐水泥 PO42.5R; 细集料(S)采用细度模数 2.4 的河砂, 级配为 II 区; 粗集料(G)采用粒径 5~25 mm 的连续级配高品质石灰石碎石; 粉煤灰采用 II 级粉煤灰; 矿渣为粒化高炉矿渣; 水采用自来水. 试件配合比见表 1, 其中, C1 为普通混凝土, F1~F4 为掺粉煤灰的混凝土, K1~k4 为掺矿渣的混凝土, FK1~FK3 为掺矿渣和粉煤灰的复合混凝土.

制作掺加不同矿物掺合料、水胶比为 0.5 的混凝土立方体试件 (100 mm×100 mm×100 mm)

表 1 混凝土配合比
Tab 1 Mix proportion of concrete

编号	水胶比	胶凝材料用量 / kg · m ⁻³	胶凝材料各组分掺量			水 / kg · m ⁻³	砂 / kg · m ⁻³	石 / kg · m ⁻³
			水泥/%	粉煤灰/%	矿/%			
C1	0.5	445	100	0	0	222	570	1 157
F1	0.5	445	90	10	0	222	570	1 157
F2	0.5	445	80	20	0	222	570	1 157
F3	0.5	445	70	30	0	222	570	1 157
F4	0.5	445	60	40	0	222	570	1 157
K1	0.5	445	90	0	10	222	570	1 157
K2	0.5	445	80	0	20	222	570	1 157
K3	0.5	445	70	0	30	222	570	1 157
K4	0.5	445	60	0	40	222	570	1 157
FK1	0.5	445	60	10	30	222	570	1 157
FK2	0.5	445	60	20	20	222	570	1 157
FK3	0.5	445	60	30	10	222	570	1 157

各一个, 置于养护室养护, 测定试件不同水化龄期 (90 min、1 d、3 d、7 d、10 d、14 d、22 d、28 d、36 d、45 d、60 d、90 d、120 d、180 d) 时的阻抗

谱,使用 ZsimpWin 软件拟合,得到体现掺合料混凝土细观特征的阻抗参数— R_s 、 R_{ct} 、 C_d 、 q 和 σ 、 p 。

3 试验结果和分析

3.1 混凝土的不同水化阶段 Nyquist 图

为分析掺加不同矿物掺合料混凝土的电化学阻抗特点,对不同配合比混凝土试件不同龄期时的阻抗谱进行了测量,如图3所示。由于曲线形式类似,只给出了90 min、7 d和28 d时的试验结果。从图中可以看出,随着水化反应的进行,添加矿物掺合料混凝土的电化学阻抗曲线与普通混凝土的曲线呈现相似的规律^[2-3],水化过程分为早期、中期与后期三个阶段。不同配合比混凝土的水泥水化90 min时的Nyquist图如图3(a)所示。图中可看出,掺加矿物掺合料混凝土和普通混凝土水化早期的Nyquist图是相同的,均为一条直线,其等效电路均为电阻和电容串联电路,这说明水泥浆体的孔溶液未发生明显的电化学反应。

不同配合比的混凝土水泥水化7 d时的Nyquist图如图3(b)所示。图中可看出,水化中期,随着水化进程中电化学过程的进行,溶液中的过饱和 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 固相逐渐开始析出,C-S-H凝胶形成,高频段为具有一定曲率的曲线,电化学阻抗谱慢慢过渡到准Randles型,而且掺加矿物掺合料混凝土阻抗谱的半圆段直径小于普通混凝土阻抗谱的半圆段直径。

各种配合比混凝土中的水泥水化28 d时的Nyquist图如图3(c)所示。由图3(c)可看出,水化稳定期,各种配合比混凝土的电化学阻抗谱均为准Randles型。高频段出现由常相角元件导致的压扁半圆,表明各种混凝土的水泥浆体已形成相当数量的C-S-H凝胶;低频段阻抗谱从曲线转变为偏离 45° 的直线。

3.2 掺粉煤灰混凝土的阻抗参数及分析

3.2.1 参数 R_s

图4(a)示出粉煤灰不同掺量时混凝土水泥浆体孔溶液中的电解质电阻 R_s 的变化。由图4(a)可看出,在水化早期和中期阶段,粉煤灰的掺量越大,电阻 R_s 变化越不明显;水化28 d之后,同龄期粉煤灰混凝土的电阻 R_s 随粉煤灰掺量的增加而不断增大。由图4(a)可看出,在水化早期阶段,普通混凝土孔溶液电解质的电阻 R_s 大于掺加粉煤灰的混凝土,且随粉煤灰掺量的增加而增加,而孔溶液中电解质的电

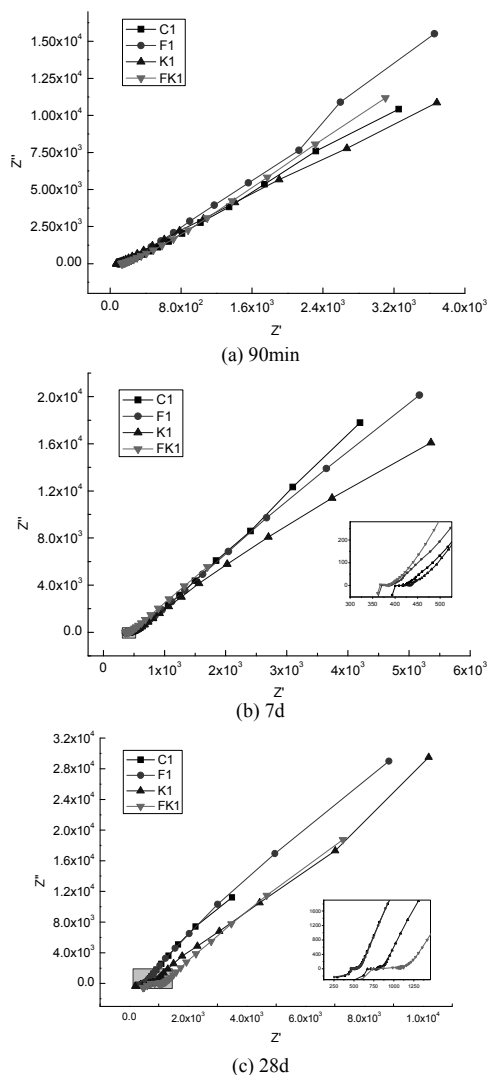


图3 混凝土不同龄期水泥水化的Nyquist图
Fig.3 Nyquist plots of concrete cement hydration at different ages

阻 R_s 减小。这一现象可解释为粉煤灰早期不参与水化反应,当用粉煤灰取代部分的水泥后,水泥熟料的矿物比例减小,导致单位体积浆体内的水化产物减少,水化产物颗粒的连接不够紧密,总孔隙率增大,从而 R_s 减小。水化中期阶段,不同掺量粉煤灰混凝土的电阻 R_s 与普通混凝土的电阻相差逐步减小。到稳定阶段,因为掺粉煤灰的混凝土的水泥熟料有效水灰比较大,水泥熟料水化速度较快,同时粉煤灰的二次水化效应发挥,产生较多的C-S-H凝胶,水泥浆体的胶结作用得到增强;而粉煤灰颗粒具有较水泥颗粒更小的粒径,可起到填隙效应与密实效应,降低了掺粉煤灰混凝土的孔隙率,内部微观结构更为致密,从而导致混凝土电阻 R_s 不断增大。同时伴随龄期增长,粉煤灰混凝土孔隙溶液电解质的电阻 R_s 表现为增大的趋势,总孔隙率逐渐减小,水泥浆体密实度增加,与普通混凝土 R_s 的变化趋势一致。

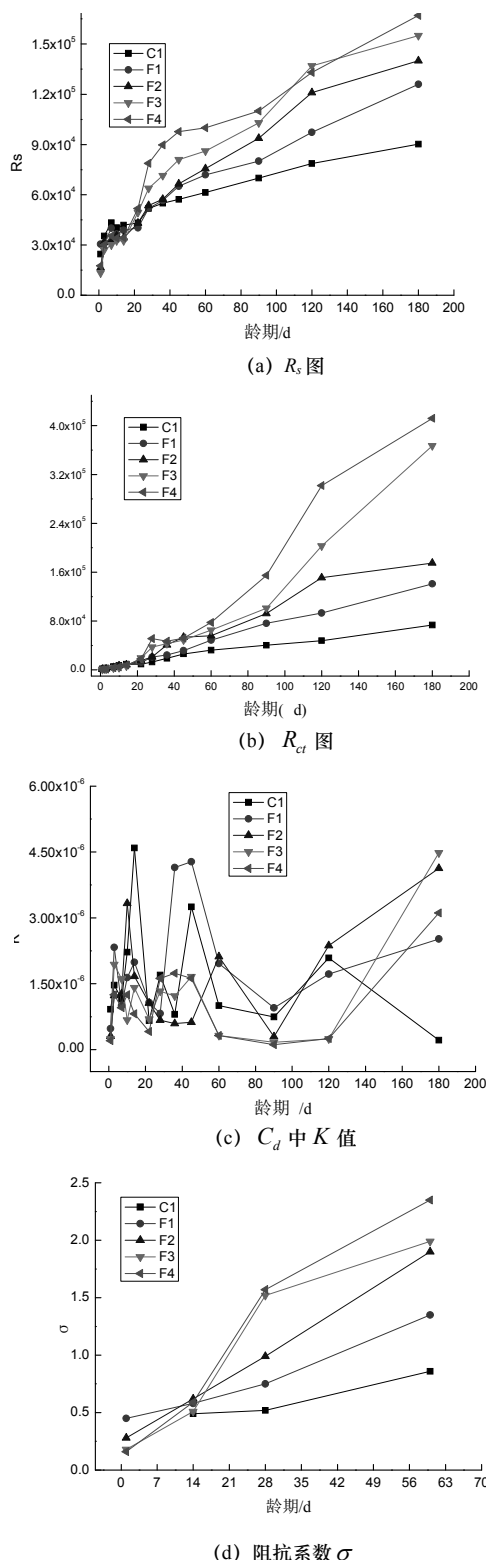


图4 粉煤灰混凝土不同龄期的电化学参数

Fig.4 Electrochemical parameters of concrete with fly ash at different ages

3.2.2 参数 R_{ct}

R_{ct} 为水化电子进行电荷传递反应的电阻, 图 4 (b) 示出不同粉煤灰掺量混凝土水泥浆体的 R_{ct} 值随龄期的变化. 由图 4 (b) 可以看出, 在水化早期,

由于水化程度很低, 各混凝土试件的 R_{ct} 值都很小, 粉煤灰掺量小的混凝土的 R_{ct} 值大于粉煤灰掺量大的混凝土, 且均小于普通混凝土的 R_{ct} 值, 说明粉煤灰掺量越大, 水泥水化程度越小, 混凝土的结构越疏松. 在水化稳定期, 粉煤灰混凝土的 R_{ct} 值大于普通混凝土, 伴随粉煤灰掺量增加而增大, 说明于此阶段粉煤灰已经开始出现二次水化反应, 与 R_s 的变化趋势相同. 随着龄期不断增长, 粉煤灰混凝土呈现与普通混凝土相同的变化趋势, 孔隙率逐渐减少, 结构逐渐致密, 水化电子发生电荷传递过程的电阻 R_{ct} 逐渐变大.

3.2.3 参数 C_d

C_d 为混凝土 C-S-H 凝胶的双电层电容参数. 该参数用常相角元件来代替, 即 $C_d = K(j\omega)^{-q}$ ($0 < q < 1$), 其中 K 为系数, q 为常相角指数, 两者反映了双电层电容的特点. 不同龄期时掺加粉煤灰混凝土的 K 值如图 4 (c) 所示. 由图可见, 受粉煤灰混凝土硬化水泥浆孔结构的影响, K 的值由平均孔径、孔溶液离子浓度变化和材料孔隙率决定, 多种因素的综合作用使 K 的值变化较小. 理论上, 伴随混凝土龄期增长, 总孔隙率减少, 凝胶孔增加, 毛细孔减少和平均孔径逐渐减小, 材料结构变得越来越密, K 值呈现减小的态势; 同时, 伴随混凝土龄期的增长, 孔溶液中的离子浓度越来越大, K 值呈现增大的趋势. 因为各种因素的综合作用, K 值的变化很小, 表明 C-S-H 凝胶的电性质相对比较稳定. 在水化后期, 普通混凝土的常相角指数接近于 1, 变化不是很大, 结构逐渐密实. 粉煤灰混凝土的结构比普通混凝土更致密. 由于本文研究的是曲线的变化趋势, 并不是某个具体的数值, 是否考虑 q 对结果无大的影响, 因而近似认为粉煤灰混凝土常相角指数 $q=1$.

3.2.4 扩散阻抗系数 σ

图 4 (d) 示出不同掺量粉煤灰混凝土扩散阻抗系数 σ 随龄期的变化. 由图 4(d) 可见, σ 随龄期的增加而增大, 表明掺粉煤灰的混凝土多孔介质中的离子扩散阻力不断增加, 水泥浆体逐渐致密, 这与普通混凝土 σ 的变化趋势是相同的. 水化早期阶段, 普通混凝土的孔隙率较粉煤灰混凝土低, 结构致密性好, 扩散阻抗系数相应较大, 混凝土粉煤灰掺量小时扩散阻抗系数大. 但由于粉煤灰混凝土的后期二次水化效应使其致密性增加, 使得粉煤灰掺

量高时扩散阻抗系数 σ 变的比普通混凝土大。

表 2 所示为常相角指数 p 和分形维数 d 。由表 2 可见, 对于不同粉煤灰掺量的混凝土, 两个参数呈现与普通混凝土相同的规律, 常相角指数 p 值均大于 $3/4$, 并有一定的变化趋势。14 d 以后, p 随粉煤灰掺量的增加而增大, 但 d 减小, 表明粉煤灰混凝土较普通混凝土的孔结构更接近于紧密的三维系统, 结构越紧密, 离子扩散就越困难。

表 2 粉煤灰混凝土的 p 和 d
Tab. 2 CPE index p and fractal dimension d of concrete with fly ash

龄期 /d	C1		F1		F2		F3		F4	
	p	d	p	d	p	d	p	d	p	d
7	0.85	3.15	0.84	3.16	0.84	3.16	0.83	3.17	0.82	3.18
14	0.84	3.16	0.85	3.15	0.85	3.15	0.84	3.16	0.85	3.15
28	0.86	3.14	0.86	3.14	0.86	3.14	0.86	3.14	0.88	3.12
45	0.83	3.17	0.84	3.16	0.85	3.15	0.85	3.15	0.86	3.14
60	0.85	3.15	0.83	3.17	0.85	3.15	0.85	3.15	0.86	3.14

3.3 矿渣混凝土的阻抗参数及分析

图 5 和表 3 为测得的不同掺量矿渣混凝土的水泥浆体水化过程的电化学阻抗谱。由图 5(a)可以看出, 矿渣混凝土和粉煤灰混凝土的阻抗谱具有相同的变化规律。水化早期, 矿渣混凝土内部微结构的形成及电阻的变化与水泥的水化过程有关, 水泥含量越大, 水化的产物越多, 混凝土的微观结构越致密, 电阻 R_s 越大。矿渣掺量增加, 水泥早期水化速度减小, 所以 R_s 变小; 随着龄期的增加, 矿渣掺量不同混凝土的 R_s 值差别不再显著; 14 d 以后, 矿渣的活性被氢氧化钙所激发, 二次水化过程明显, 电阻 R_s 超过普通混凝土, 矿渣掺量越大效果越显著, 龄期增长趋势也更明显。

表 3 矿渣混凝土水化过程中 σ 的变化
Tab. 3 Change of σ during hydration process of concrete with slag

龄期 /d	$\sigma / (\text{k}\Omega \cdot \text{cm}^2 \cdot \text{S}^{-1/2})$				
	C1	K1	K2	K3	K4
1	—	0.41	0.31	0.22	0.15
14	0.52	0.50	0.57	0.47	0.61
28	0.54	0.71	0.88	1.23	1.71
60	0.93	1.14	1.51	1.64	1.98

由图 5(b)和表 3 可以看出, 随着混凝土龄期的增长及矿渣掺量的增加, 电阻 R_{ct} 、扩散阻抗系数 σ 均增大, 表明混凝土水泥水化反应和矿渣二次水化, 使矿渣混凝土内部孔隙率减小, 密实度不断增加, 水泥浆孔溶液中的离子在多孔介质中的扩散阻力也在不断增大。由表 4 可知, 常相角指数 p 随矿渣掺量的增加而增大, 但分形维数 d ($d=4-p$) 减小, 进一步说明混凝土的孔结构越来越致密。由图 5(c)可看

出, 双电层电容在整个水化过程中基本不变。

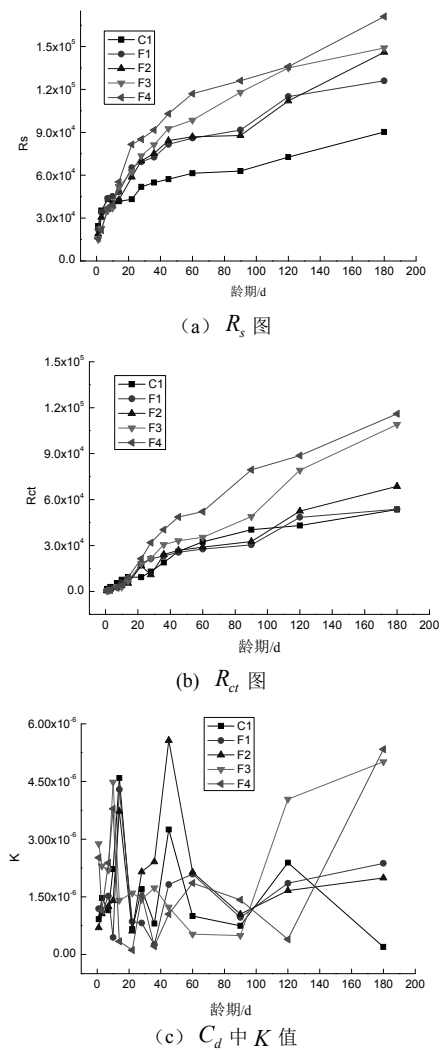


图 5 矿渣混凝土不同龄期的电化学参数
Fig.5 Electrochemical parameters of concrete with slag at different ages

表 4 矿渣混凝土水化过程中的 p 和 d 的变化
Tab. 4 Change of p and d during hydration process of concrete with slag

Ag e/d	C1		K1		K2		K3		K4	
	p	d	p	d	p	d	p	d	p	d
7	0.84	3.16	0.84	3.16	0.83	3.17	0.81	3.19	0.8	3.2
14	0.85	3.15	0.84	3.16	0.84	3.16	0.83	3.17	0.84	3.16
28	0.86	3.14	0.85	3.15	0.86	3.14	0.86	3.14	0.87	3.13
45	0.83	3.17	0.83	3.17	0.84	3.16	0.85	3.15	0.86	3.14
60	0.84	3.16	0.85	3.15	0.85	3.15	0.86	3.14	0.87	3.13

3.4 粉煤灰/矿渣复合混凝土的阻抗参数及分析

图 6(a)为复合混凝土中水泥孔溶液电解质的电阻 R_s 随龄期的变化。由图 6(a)可看出, 复合混凝土的电阻 R_s 同单掺粉煤灰或矿渣的情况相同, 随粉煤灰掺量的减小、矿渣掺量的增加呈增加的趋势。

图 6(b)示出不同龄期复合混凝土的 R_{ct} 值。由此可见, R_{ct} 与孔溶液电解质电阻 R_s 的变化规律相同, 即 R_{ct} 随着混凝土龄期增长、粉煤灰掺量减小和矿渣掺量增加而逐渐增大, 水化电子在电荷传递反应

中的阻力变大,反映了复合混凝土致密实性增加。

图 6(c)为不同龄期复合混凝土 C_d 中 K 值的变化。由此可以看出, K 值没有太大的变化,说明 C-S-H 凝胶的电性质较稳定。

复合混凝土扩散阻抗系数 σ 、常相角指数 p 和分形维数 d 随龄期的变化如图 6(d)和表 5 所示。由图 6 可看出,在 14 d 之后复合混凝土的 σ 随龄期而增长,随粉煤灰掺量的减小和矿渣掺量的增加而增大,变化趋势与 R_s 和 R_{ct} 相同。由表可以看出, p 随粉煤灰掺量而减小、矿渣掺量而增加, d 随粉煤灰掺量而减小,复合混凝土较之于普通混凝土更密实。

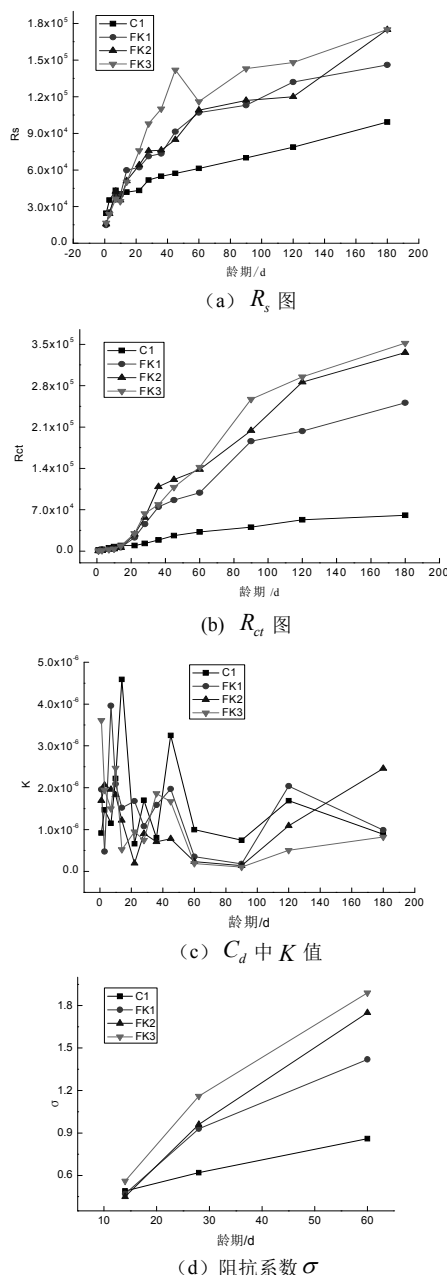


图 6 不同龄期复合混凝土的电化学参数

Fig.6 Electrochemical parameters of composite concrete at different ages

表 5 复合混凝土水化过程中 p 和 d 的变化

Tab. 5 Change of p and d during hydration process of composite concrete

龄期 /d	C1		FK1		FK2		FK3	
	p	d	p	d	p	d	p	d
14	0.85	3.15	0.84	3.16	0.83	3.17	0.81	3.19
28	0.86	3.14	0.86	3.14	0.87	3.13	0.89	3.11
60	0.84	3.16	0.83	3.17	0.84	3.16	0.85	3.15

4 结论

本文对掺矿物掺合料混凝土水泥水化过程中的电化学阻抗谱进行了研究。研究结论如下:

(1) 掺入矿物掺合料的混凝土没有改变水泥水化中 Nyquist 图的形状, 掺矿物掺合料混凝土的水泥水化过程分为早期、中期和后期三个阶段。早期阶段的高频段为一斜线, 因为未出现电化学反应; 中期阶段的高频段为一曲线, 普通混凝土圆弧段的曲率较矿物掺合料混凝土大; 后期稳定阶段的曲线较为完善, Nyquist 图形状维持准 Randles 型, 但矿物掺合料混凝土的半圆段直径比普通混凝土的半圆段直径大。

(2) 混凝土凝胶材料掺矿物掺和料(粉煤灰或矿渣)后, 水化进程中孔溶液电解质的电阻、进行电荷传递反应的电阻与扩散过程中阻抗系数呈现同一规律的变化。双电层电容常相角元件的系数随矿物掺合料掺量的增加和龄期的增长变化不大。早期阶段, 矿物掺合料混凝土的阻抗参数小于普通混凝土; 但随着龄期增长, 粉煤灰混凝土的阻抗参数随矿物掺和料掺量的增加而增大且明显大于普通混凝土的阻抗参数, 说明由于矿物掺和料的二次水化作用、填隙效应和密实效应使混凝土内部结构逐渐致密。

(3) 复合混凝土水泥水化过程的阻抗参数与单掺粉煤灰或矿渣的混凝土具有类似的变化规律。

参考文献 References

- [1] 王幻. 氯离子条件下混凝土的电化学阻抗谱研究[D]. 大连: 大连理工大学, 2014.
Wang Huan. Study on Electrochemical Impedance Spectroscopy of Concrete in Chloride Environment [D]. Dalian University of Technology, 2014
- [2] 贡金鑫, 张文. 混凝土水泥水化过程的电化学阻抗谱研究[J]. 混凝土, 2013(10): 77-80.
GONG Jinxin, ZHANG Wen. Study of hydration process of concrete by electrochemical impedance spectroscopy [J]. Concrete, 2013(10): 77-80.
- [3] 周丽霞, 王启才, 张粉芹. 矿物掺合料和孔结构对混凝土抗渗性的影响. [J]. 水力发电学报, 2010(6): 196-201

- Zhou Lixia, Wang Qicai, Zhang Fenqin. Effect of mineral admixture and pore structure on the permeability of concrete[J]. JOURNAL OF HYDROELECTRIC ENGINEERING, 2010(6): 196-201
- [4] 张震雷, 史美伦. 混凝土中矿物掺合料水合机理的交流阻抗研究[J]. 建筑材料学报, 2006, 9(3): 366-369.
ZHANG Zhenlei, SHI Meilun. Study of hydration mechanism of mineral admixture in concrete by AC impedance technique[J]. Journal of Building Materials, 2006, 9(3): 366-369.
- [5] 施惠生, 姚玉梅, 施韬. 高性能水泥硬化浆体微结构的交流阻抗研究[J]. 水泥技术, 2006(5): 33-35.
SHI Huisheng, YAO Yumei, SHI Tao. Microstructure investigation on cement past of high performance by using ac impedance spectroscopy[J]. Cement Technology, 2006(5): 33-35.
- [6] MacDonald D D. Reflection on the history of electrochemical impedance spectroscopy [J]. Electrochemical Acta, 2006, 51(8-9): 1376-1388.
- [7] 史美伦. 混凝土阻抗谱[M]. 北京: 中国铁道出版社, 2003
SHI Meilun. Impedance Spectroscopy of Concrete[M]. Beijing: China Railway Press, 2003.
- [8] 张莹, 史美伦. 水泥基材料水化过程的交流阻抗研究[J]. 建筑材料学报, 2000, 3(2): 109-112.
Zhang Ying, Shi Meilun. Study of the hydration process of cement-based material by AC impedance technique[J]. Journal of Building Materials, 2000, 3(2): 109-112.
- [9] Brantervik, Niklasson G A. Circuit models for cement based materials obtain from impedance spectroscopy[J]. Cement and Concrete Research, 1993, 23(3): 531-534
- [10] W.J. McCarter. The fractal surface of cementitious materials determined by impedance spectroscopy [J]. Advances in Cement Research, 1994, 6(24): 147-154.

(编辑 沈波)

(上接第492页)

- Analysis of Time Domain Indices of Real-time Hybrid Simulation[J]. Structural Engineers, 2013(2): 181-188
- [5] 潘鹏, 王涛, 中岛正爱. 在线混合实验进展: 理论与应用[M]. 北京: 清华大学出版社, 2013.
PAN Peng, WANG Tao, NAKASHIMA Masayoshi. Development of online hybrid test-theory and applications[M]. Beijing: Tsinghua University press, 2013.
- [6] 吴斌, 王倩颖. 实时子结构实验的研究进展[J]. 实验力学, 2007(12): 547-555.
WU Bin, WANG Qianying. Development of Real-time Substructure Testing[J]. Journal of Experimental Mechanics, 2007(12): 547-555.
- [7] Nakashima M, Takai H. Use of substructure techniques in pseudo dynamic testing[J]. BRI Research Paper, 1985, 111: 350-365
- [8] McKenna F. Object-oriented finite element analysis: frameworks for analysis, algorithms and parallel computing[D]. Berkeley: University of California, 1997: 10-12.
- [9] Mazzoni S, McKenna F, Scott M H, Fenves G L. OpenSees user manual[R]. PEER: University of California at Berkeley, 2000.
- [10] SCHELLENBERG A, KIM H K, TAKAHASHI Y, et al. OpenFresco Command Language Manual[M]. PEER: The Regents of the University of California, 2009: 5-34.
- [11] 孟凡涛, 赵建峰, 于广明. 实时子结构混合试验中的数值积分方法对比分析[J]. 地震工程与工程振动, 2011(10): 61-67
MENG Fantao, ZHAO jianfeng, YU Guangming. Study on numerical integration methods in real-time hybrid testing experiment[J]. Journal of Earthquake Engineering and Engineering Vibration, 2011(10): 61-67.

(编辑 沈波)