

doi:10.11835/j.issn.1674-4764.2013.04.019

矿物掺和料-水泥浆体电学特性与其微结构的关系

李化建^{1,2}, 万广培³, 谢永江^{1,2}, 黄佳木³

(1. 中国铁道科学研究院 铁道建筑研究院, 北京 100081; 2. 高速铁路轨道技术国家重点实验室, 北京 100081;
3. 重庆大学 材料科学与工程学院, 重庆 400045)

摘要:采用循环伏安法和交流阻抗法系统研究了粉煤灰、矿渣粉和石灰石粉水泥浆体的电学特性, 通过等效电路对电学测试结果进行拟合, 并将拟合所得浆体电学参数与浆体化学结合水和压汞所测孔结构之间的相关性进行比较。结果表明: 浆体的化学结合水与其电阻率具有较好的正相关性, 即化学结合水越多, 水化程度越大, 浆体电阻率越高; 粉煤灰和矿渣粉可以提高浆体电阻率, 而石灰石粉在 5% 掺量下对浆体电阻率无影响; 随着水化龄期的延长, 浆体孔溶液电阻增大, 其变化规律与浆体电阻率一致; 浆体凝胶电容和凝胶电阻与 C-S-H 凝胶含量有关, 二者有很好的负相关性; 随着水化龄期的延长, 浆体孔结构曲折程度提高, 交流阻抗法所测得常相角指数减小, 压汞测得的分形维数增大。

关键词:矿物掺和料; 浆体; 循环伏安; 交流阻抗; 电学特性; 微结构

中图分类号: TU528 **文献标志码:** A **文章编号:** 1674-4764(2013)04-0121-07

Relationship Between Electrical Property and Microstructure of Mineral Admixtures-Cement Paste

Li Huajian^{1,2}, Wan Guangpei³, Xie Yongjiang^{1,2}, Huang Jiamu³

(1. Railway Engineering Research Institute, China Academy of Railway Science, Beijing 100081, P. R. China;
2. State Key Laboratory for Track Technology of High-Speed Railway, Beijing 100081, P. R. China;
3. College of Material Science and Engineering, Chongqing University, Chongqing, 400044, P. R. China)

Abstract: The electrical properties of fly ash, slag and limestone powder-cement paste were studied by the methods of Cyclic Voltammetry and AC Impedance Spectroscopy. The results of electrical test were fitted by equivalent circuit. The correlations between electrical parameters of paste and unevaporable water content, pore structure by mercury porosimetry were compared. The results show that there is a positive relation between the unevaporable water content and the electrical resistivity of paste. If the unevaporable water content is higher, the hydration degree is higher and the electrical resistivity of paste is higher. The electrical resistivity of paste is increased with fly ash and slag, and it is unaffected with limestone powder of 5% dosage. The resistance R_s of pore solution of paste is increased with the prolongation of hydration, and the changes of resistance R_s and the electrical resistivity are unanimous. The resistance R_p and electrical capacitance C of gel are related to C-S-H content, and there is a negative relation between the resistance R_p and electrical capacitance C of gel. The complexity of pore structure of paste is increased with the prolongation of hydration. The constant phase angle exponent P by AC Impedance Spectroscopy is decreased and the value of fractal dimension by mercury porosimetry is increased.

Key words: mineral admixture; paste; cyclic voltammetry; AC impedance spectroscopy; electrical property; microstructure

收稿日期: 2013-01-20

基金项目: 国家自然科学基金项目(50908229); 铁道部科技开发计划项目(2008G031-N、2010G024); 江苏省土木工程材料重点实验室开发基金项目(TMCL201001)

作者简介: 李化建(1976-), 男, 博士, 副研究员, 主要从事建筑材料研究, (E-mail) chinasailor@163.com.

水泥基材料可以作为一个电化学体系。在外加电压作用下,水泥基材料内电解质溶液中的离子发生电解迁移,使水泥基材料具有不同的电学特性,主要表现为电阻率、孔溶液电阻、凝胶电阻、凝胶电容、常相角指数和扩散阻抗系数的不同,电学特性在一定程度上可以反映水泥基材料的微结构。鉴于水泥基材料电学特性与其结构性能之间关系,混凝土电学特性已成为一种快速无损检测、在线监测和有效评价水泥基材料微结构形成与发展的新技术^[1-4]。目前研究主要集中在粉煤灰、矿渣粉等活性矿物掺和料对水泥基材料电学特性影响等方面^[5],很少有对比研究不同电学测试方法所测浆体的电学性能以及浆体电学参数与其微结构之间的关系。粉煤灰和矿渣粉等活性掺和料具有火山灰效应^[6],可以促使水泥基材料二次水化,改善孔结构,增加密实程度,提高水泥基材料的电阻率^[7-9]。而随着自密实混凝土的推广和应用,石灰石粉等惰性掺和料在混凝土中也得到了大量的使用^[10-11],但关于石灰石粉-水泥

浆体电学参数的研究较少。采用循环伏安法和交流阻抗法对比研究了粉煤灰、矿渣粉和石灰石粉水泥浆体的电学特性,通过等效电路对交流阻抗法测试电学结果进行拟合,根据浆体电学参数分析了浆体的水化和微结构特征,并与化学结合水和压汞法所测孔结构进行比较,旨在为通过电学特性研究矿物掺和料对水泥基材料微观结构的影响提供依据。

1 试验

1.1 试验原材料

水泥为北京琉璃河水泥厂的金隅牌 P·O 42.5 级硅酸盐水泥,比表面积 344 m²/kg;粉煤灰为秦皇岛电厂生产的 I 级灰,细度为 13%(45 μm 筛筛余);矿渣粉为嘉华 S95 矿渣粉,比表面积为 492 m²/kg;石灰石粉产自江苏,比表面积为 411 m²/kg。外加剂采用天津雍阳聚羧酸减水剂,减水率为 28%。水泥、石灰石粉、粉煤灰和矿渣粉的化学组成如表 1 所示。

表 1 水泥和矿物掺和料的化学组成

种类	烧失量/%	SO ₃ /%	Cl ⁻ /%	Na ₂ O+0.658 K ₂ O/%	f-CaO/%	CaO/%	MgO/%	Fe ₂ O ₃ /%	Al ₂ O ₃ /%	SiO ₂ /%
水泥	3.07	2.66	0.016	0.81	0.93	59.02	4.38	2.89	5.46	32.25
石灰石粉	40.02	—	—	—	—	56.05	—	—	—	—
粉煤灰	0.53	0.51	0.004	2.18	0.03	3.38	1.46	7.58	19.6	59.65
矿渣粉	0.44	0.2	0.013	0.36	—	36.71	11.31	0.72	14.22	20.82

注:石灰石粉所测烧失量为碳酸钙中 CO₂ 的含量。

1.2 试验配合比

为克服高速铁路轨道板中钢筋网感应电阻缩短轨道电路传输距离的问题,高速铁路无砟轨道轨道板用混凝土应具备高电阻特性。为模拟轨道板混凝土中浆体的情况,以轨道板混凝土用胶凝材料组成、水胶比和减水剂用量为基础,设定浆体水胶比为 0.31,减水剂掺量为 0.7%,并设计了如表 2 所示的浆体胶凝材料组成比例。

表 2 浆体中胶凝材料的组成比例

编号	水泥/%	石灰石粉/%	粉煤灰/%	矿渣粉/%
L1	100	\	\	\
L2	95	5	\	\
L3	80	20	\	\
L4	80	\	20	\
L5	80	\	\	20

1.3 试验方法

1) 电阻率

用辰华 CHI660 多功能电化学工作站测量浆体

的电阻率 ρ ,试件尺寸为 20 mm×20 mm×20 mm。测试方法为循环伏安法,该方法在一定微小电压范围内对浆体进行电位扫描通过计算该曲线在开路电位附近线性回归的斜率的相反数,求得极化电阻 R ,根据公式 $\rho = AR/L$ 计算浆体电阻率,式中 A 为浆体截面积, L 为浆体长度。循环伏安电学参数如表 3。

2) 交流阻抗

通过辰华 CHI660 多功能电化学工作站测试浆体的交流阻抗,试件尺寸为 20 mm×20 mm×20 mm。交流阻抗电学参数如表 4。水泥基材料电学性质可用图 1 的等效电路来表示,图 1 中 R_s 为孔溶液电阻,表征水泥基材料孔溶液和孔隙特征; R_p 为凝胶电阻,表征水泥基材料水化过程; C 为凝胶电容,表征水泥基材料凝胶的电容; P 为常相角指数,表征水泥基材料孔隙的复杂程度^[5]。4 个电学参数的值通过 Zview 交流阻抗谱专业软件拟合后求出。对所得数据进行处理可得到扩散阻抗系数 K ,表征水泥基材料阻碍离子传输的能力。

表3 循环伏案法试验参数

初始电位/V	高电位/V	低电位/V	扫描速度/(V·s ⁻¹)	扫描次数	测试间隔/V	灵敏度(A·V ⁻¹)
0.5	0.5	-0.5	0.1	2	0.01	1×10 ⁻⁴

表4 交流阻抗法试验参数

初始电位/V	最高效率/Hz	最低频率/Hz	振幅/V	稳定时间/s
0	100 000	1	0.005	2

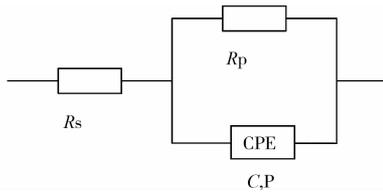


图1 水泥基材料电化学等效电路

3) 化学结合水

试件尺寸为 10 mm×10 mm×60 mm,把试件养护到规定的龄期将其破坏,取试件中间部分的碎片立即放入无水乙醇中停止水化。将停止水化后的浆体碎片磨细,在烘箱(105℃)中烘至恒重,取出放入马弗炉中,升温至 900℃并恒温 30 min,冷却后称重,按式(1)计算浆体中化学结合水的量 W^[12]。

$$W = \frac{G_{105} - G_{900}}{G_{900}}(100 - y_i z_i) - y_i z_i \quad (1)$$

其中:W 为试样的化学结合水量,%;G₁₀₅ 为试样在 105℃烘干至恒重时的重量,g;G₉₀₀ 为试样在 900℃灼烧 30 min 后的重量,g;y_i 为浆体胶凝材料各组分的百分比,%;z_i 为浆体胶凝材料各组分的烧失量,%。

4) 孔结构

采用 AutoPore IV 9500 压汞仪测量浆体的孔结构。试件尺寸为 10 mm×10 mm×60 mm,把试件养护到规定的龄期将其破坏,取试件中间部分的水泥石块立即放入无水乙醇中停止水化。将停止水化后的水泥石块置于真空干燥箱(65℃)中烘至恒重,然后使用压汞仪测量其孔结构。

2 试验结果与分析

2.1 矿物掺和料-水泥浆体电阻率

水泥基材料浆体电阻率如图 2 所示。从图 2 可知:1)在 5%的掺量下,石灰石粉对浆体电阻率基本无影响,掺量为 20%时,石灰石粉对浆体前期电阻无影响,但会降低后期电阻率,56 d 时石粉浆体电阻率为基准的 72.6%。石灰石粉属于低活性物质,具有稀释作用^[13],取代水泥后浆体实际水灰比增加,

掺量过多会降低浆体中总的水化产物的量,后期的水化产物不足以填充大量的孔隙,使浆体的孔隙率增加,进而降低了浆体的电阻率。2)掺量为 20%的矿渣粉和粉煤灰可以提高浆体的电阻率,水化 28 d 时,提高幅度分别为 53.8%、17.5%,56 d 提高幅度更为明显,达到 63.9%、33.3%,矿渣粉对浆体电阻率的提高作用要优于粉煤灰。其原因为矿渣粉、粉煤灰不仅具有一定的细度,可以产生良好的填充效应^[14],还具有火山灰活性,可以二次水化,生成的二次水化产物填充在浆体内,进一步提高浆体的电阻率。

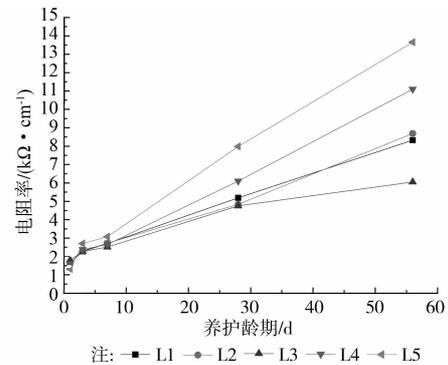


图2 水泥基材料浆体电阻率

水泥基材料浆体化学结合水和电阻率之间的相关性如图 3 所示。由图 3 可知,浆体电阻率与其化学结合水之间有很好的正相关性(相关系数为 0.761),即浆体的水化程度越高,浆体越密实,其阻碍离子迁移的能力越强,浆体的电阻率越高。

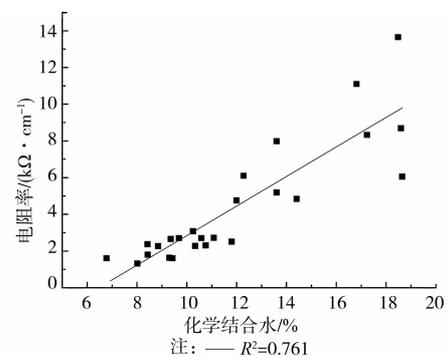


图3 水泥基材料浆体化学结合水和电阻率之间的相关性

2.2 矿物掺和料-水泥浆体孔溶液电阻

水泥基材料浆体孔溶液电阻 R_s 如图 4 所示。水泥浆体孔溶液中电解质的电阻 R_s 与孔溶液中离

子的总浓度和浆体的总孔隙率成反比^[5]。由图 4 可知:1)随着养护龄期的增加,浆体的孔溶液电阻 R_s 都显著增大。其主要原因是在浆体中,随着水泥水化反应的进行,生成的水化产物会填充在浆体孔隙内,使浆体孔隙率降低,孔隙曲折程度增加,而且水化产物对离子还有一定的吸附作用^[15],水化产物越多,孔溶液电阻 R_s 越大。随着水化的进行,水化产物填充于孔结构中,浆体的密实度逐渐提高,孔隙率逐渐减少,表现为孔溶液电阻随龄期而增大。2)掺量为 5% 时,石灰石粉对浆体孔溶液电阻 R_s 基本无影响,当掺量为 20% 时,会降低浆体孔溶液电阻 R_s ,随龄期延长,降低效果越来越明显,56 d 时降低幅度达 19.8%。原因是由于石灰石粉使单位浆体体积内水化产物数量减少,掺量越多,结构总孔隙率越高,孔溶液电阻 R_s 越小。3)矿渣粉-水泥浆体的孔溶液电阻 R_s 高于基准浆体孔溶液电阻 R_s ,56 d 时增幅则达 74.3%;7 d 之前粉煤灰-水泥浆体的孔溶液电阻 R_s 略低,但 56 d 时要高出基准浆体 53.2%。矿物掺和料的火山灰效应、填充效应以及稀释效应综合影响浆体的孔结构。矿渣粉的填充效应和火山灰效应会增加浆体的水化产物数量、降低总孔隙率。而粉煤灰的前期活性较低,稀释作用显著,降低了粉煤灰-水泥浆体的溶液电阻 R_s 。随着水化的进行,粉煤灰-水泥浆体的二次水化增加了水化产物,浆体的总孔隙率降低,使孔溶液电阻 R_s 升高。另外,粉煤灰和矿渣粉不仅本身对离子有一定的吸附作用,其二次水化产物也会吸附一定的离子,进一步增大孔溶液电阻 R_s 。

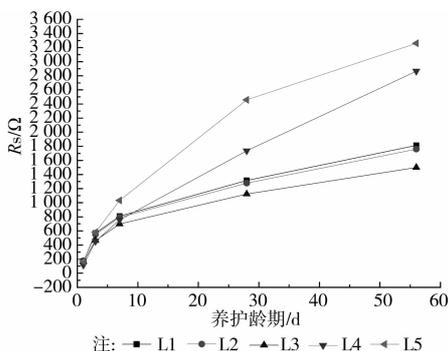


图 4 水泥基材料浆体孔溶液电阻 R_s

水泥基材料浆体电阻率与孔溶液电阻之间的相关性如图 5 所示。由图 5 可知,二者之间有很好的正相关性,相关系数达 0.945。

水泥基材料浆体 28 d 孔径分布如表 5 所示。由表 5 可知:1)5% 掺量的石灰石粉对浆体的孔径分布基本无影响,当掺量为 20% 时,浆体中大于

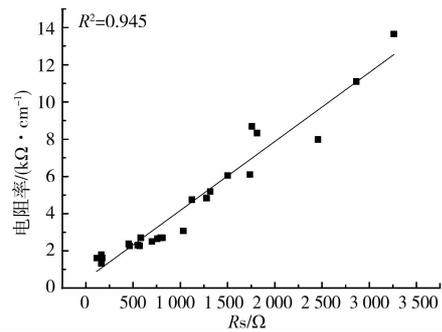


图 5 水泥基材料浆体电阻率与孔溶液电阻 R_s 之间的相关性

200 nm 的孔百分比增加。石灰石粉没有活性,不能促使浆体二次水化,水化产物不足以填充较多的孔隙,致使浆体中大孔数量增加。2)20% 掺量的粉煤灰和矿渣粉都会使浆体中小于 20 nm 的孔所占比例增加。粉煤灰和矿渣粉都具有二次水化效应,提高浆体水化程度,而 28 d 时矿渣粉的活性较高,较多的二次水化产物填充在孔隙内,致使总孔隙率减少,小孔所占的比例增加,对孔结构的优化作用明显。

表 5 水泥基材料浆体 28 d 孔径分布 %

编号	<20 nm	20~50 nm	50~200 nm	>200 nm
L1	46.1	49.7	2	2.3
L2	49.3	46.1	1.9	2.3
L3	48.6	46.7	1.4	3.4
L4	52	43	2.9	2.1
L5	64.7	32.4	0	2.6

2.3 矿物掺和料-水泥浆体凝胶电阻

水泥基材料浆体凝胶电阻 R_p 如图 6 所示。凝胶电阻 R_p 为水化电子进行电荷传递反应的电化学反应电阻,与浆体中 C-S-H 凝胶中离子浓度有关。由图 6 可知:1)龄期为 1 d 时,除了矿渣粉浆体外,其他浆体的凝胶电阻 R_p 都大于基准浆体;2)石灰石粉掺量由 5% 增大到 20% 时,浆体凝胶电阻 R_p 显著增大;3)56 d 时,矿渣粉浆体凝胶电阻 R_p 最大,20% 石灰石粉浆体凝胶电阻 R_p 最小。水化早期,浆体水化程度低,凝胶含量少,凝胶间离子浓度低,此时水化产物越多,离子浓度越大,凝胶电阻 R_p 越小。由于掺和料对水泥的稀释作用大于火山灰效应,单位体积浆体内水化产物数量减少,而且这种稀释作用随掺量的增加会变得明显。矿渣粉的活性较高,使整个浆体水化更充分,早龄期生成的 C-S-H 凝胶数量较多,离子浓度相对较高,所以其 1 d 凝胶电阻 R_p 值较小。水化后期水化产物增多,C-S-

H凝胶对离子的吸附能力占主要地位,C-S-H凝胶越多,电阻 R_p 越大,56 d时,矿渣粉浆体的水化程度最高,凝胶电阻 R_p 最大。

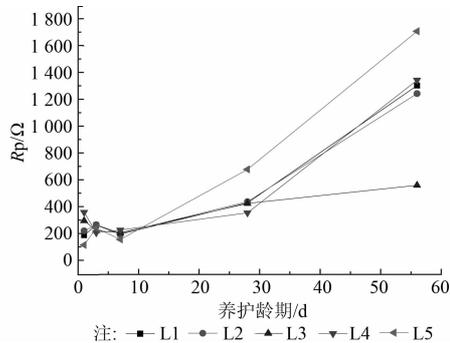


图6 水泥基材料浆体凝胶电阻 R_p

2.4 矿物掺和料-水泥浆体凝胶电容

水泥基材料浆体凝胶电容 C 如图7所示。凝胶电容 C 为水化电子进行电荷传递反应的电容,与浆体中的C-S-H凝胶的含量有关^[16]。由图7可知:1)除了矿渣粉浆体外,其他浆体的凝胶电容 C 都小于基准浆体;2)浆体凝胶电容 C 随水化的进行先增大后减小。这主要是因为龄期为1 d时,浆体中的C-S-H凝胶的含量决定的凝胶电容,矿渣粉的活性较高,使整个浆体水化更充分,生成的C-S-H凝胶数量较多,所以其1 d凝胶电容 C 较大。随着水化反应的进行,C-S-H凝胶数量的数量逐渐增多,相当于增大了电极板面积,所以凝胶电容增大。在这个过程中矿渣粉浆体中的水化产物最多,所以其凝胶电容最大。但是当浆体中水化产物C-S-H凝胶足够多时,浆体中大量的连通孔变为不连通孔^[17],整个浆体中相当于存在大量的电容,这些电容为串联关系,这就会导致整个浆体的凝胶电容减小。

龄期1 d时浆体中凝胶电容 C 和凝胶电阻 R_p 之间的相关性如图8所示。由图8可知,1 d龄期时,凝胶电容 C 和凝胶电阻 R_p 有很好的负相关性,相关系数为0.908,这说明在水化早期凝胶电容和凝胶电阻的主导影响因素是相同的,都由体系中C-S-H凝胶数量决定。

2.5 矿物掺和料-水泥浆体常相角指数

水泥基材料浆体常相角指数 P 如图9所示。在多孔结构中, D_s 为多孔介质的分数维值, $D_s = 4 - P$,可以用 P 来表征空间的复杂程度和填充能力^[5]。由图9可知:1)随着水化反应的进行,浆体常相角指数 P 减小;2)前期矿渣粉浆体常相角指数 P 较小。这主要是因为随着水化反应的进行,浆体的孔结构

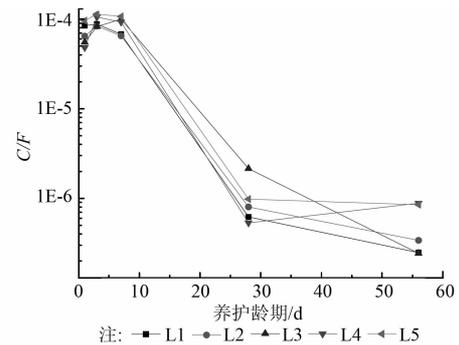


图7 水泥基材料浆体凝胶电容 C

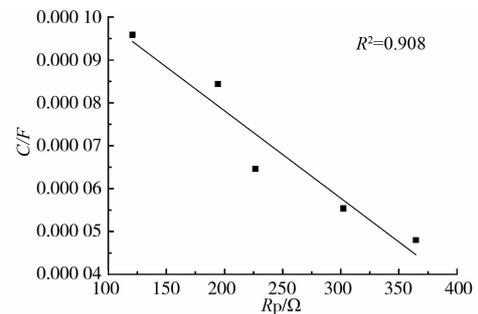


图8 净浆1 d凝胶电阻和凝胶电容之间的相关性

会变的曲折,其复杂程度会显著提高,常相角指数 P 减小,而矿渣粉浆体水化程度较高,生成的水化产物填充在孔隙内,优化了浆体的孔结构,常相角指数 P 较大。

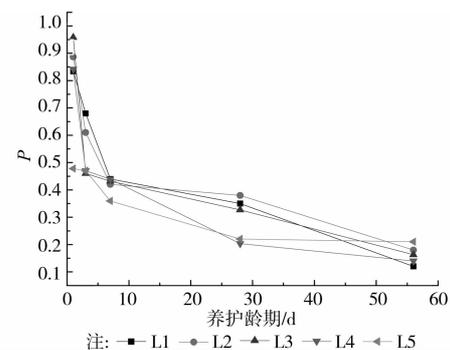


图9 水泥基材料浆体常相角指数 P

28 d时龄期浆体分形维数与长相角指数的相关性如图10所示。根据压汞测孔的实验数据可以得出孔隙体积的分形维数,也可以用来评价体系孔的复杂程度^[18]。由图10可知长相角指数和分形维数有一定的相关性,相关系数为0.679,长相角指数同分形维数一样,可以在一定程度上表征孔隙的复杂程度。

2.6 矿物掺和料-水泥浆体扩散阻抗系数

水泥基材料浆体扩散阻抗系数 K 如图11所示。扩散阻抗系数 K 反映流体中溶质在多孔介质

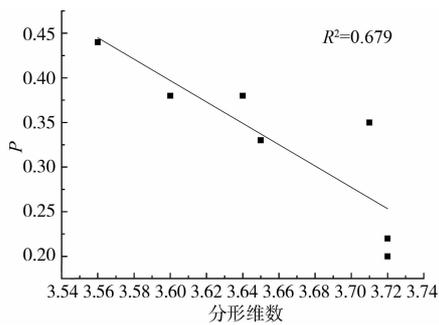


图 10 净浆 28 d 常相角指数和分形维数之间的相关性

中扩散所受的阻力^[19]。由图 11 可知:1)随着水化反应的进行,浆体扩散阻抗系数 K 增大;2)28 d 以后矿渣粉浆体扩散阻抗系数 K 最大。其主要原因是,随着水化程度逐渐增大,浆体孔结构变得复杂,密实度提高,溶质扩散所受的阻力增大,表现为扩散阻抗系数 K 增大。由于掺和料颗粒粒径较小,具有明显的填充效应,使浆体变得密实,所以水化前期填充效应起主导作用,较细掺和料浆体的扩散阻抗系数 K 较大。随着水化反应的进行,越来越多的水化产物填充在浆体的孔隙内,增大了密实度。矿渣粉的活性较高,促进了浆体的水化,水化产物和二次水化产物的量最多,所以扩散阻抗系数 K 最大。

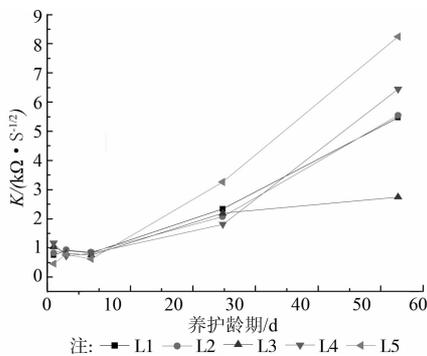


图 11 水泥基材料浆体扩散阻抗系数 K

3 结 论

1)矿物掺和料-水泥浆体的电学参数与其孔结构、水化程度之间具有内在关系,可以用浆体电学参数来表征浆体的微结构及其水化程度。

2)矿物掺和料-水泥浆体的电阻率与化学结合水量之间具有很好的相关性(相关系数为 0.761),即水化程度越大,电阻率越高。粉煤灰和矿渣粉可以提高浆体的电阻率,石灰石粉在 5% 掺量下对浆体电阻率无影响。

3)随着水化龄期的延长,浆体孔溶液电阻增大,矿物掺和料对浆体孔溶液电阻的影响与矿物掺和料

填充效应、火山灰效应和稀释效应的综合作用。矿物掺和料-水泥浆体孔溶液电阻与其电阻率变化规律一致,二者相关系数为 0.945。

4)浆体凝胶电容和凝胶电阻与 C-S-H 凝胶含量有关,水化早期浆体的凝胶电容和胶凝电阻之间具有很好的负相关性。

5)随着水化龄期的延长,浆体中孔结构曲折程度提高,表现为交流阻抗所测常相角指数减小以及压汞测得的分形维数增大。

6)随着水化龄期的延长,浆体中溶质扩散所受的阻力增大,浆体扩散阻抗系数增大。

参考文献:

- [1] Jain J, Neithalath N. Electrical impedance analysis based quantification cation of microstructural changes in concretes due to non-steady state chloride migration [J]. Materials Chemistry and Physics, 2011, 129: 569-579.
- [2] Xiao L Z, Li Z J. Early-age hydration of fresh concrete monitored by non-contact electrical resistivity measurement [J]. Cement and Concrete Research, 2008, 38: 312-319.
- [3] Neithalath N, Jain J. Relating rapid chloride transport parameters of concretes to microstructural features extracted from electrical impedance [J]. Cement and Concrete Research, 2010, 10: 1041-1051.
- [4] Ramezani-pour 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: 2472-2479.
- [5] 姚玉梅,施惠生,施韬. 粉煤灰水泥硬化浆体微结构交流阻抗研究[J]. 粉煤灰综合利用, 2006, 6: 3-5.
Yao Y M, Shi H S, Shi T. Study on the microstructure of fly ash-cement paste by alternating current impedance spectroscopy [J]. Fly Ash Comprehensive Utilization, 2006, 6: 3-5.
- [6] Erdo gdu Ş, Arslantürk C, Kurbetci Ş. Influence of fly ash and silica fume on the consistency retention and compressive strength of concrete subjected to prolonged agitating [J]. Construction and Building Materials, 2011, 25: 1277-1281.
- [7] 耿健,丁庆军,孙炳楠,等. 高阻抗高抗渗混凝土及其微结构特征[J]. 硅酸盐学报, 2010, 38(4): 638-643.
Geng J, Ding Q J, Sun B N, et. al. Microstructure characteristics of concrete with high impedance and impermeability [J]. Journal of the Chinese Ceramic Society, 2010, 38(4): 638-643.

- [8] 丁华涛. 地铁用高阻抗高抗渗混凝土的研究[D]. 武汉:武汉理工大学, 2008.
- [9] Mohammad S, Mohammad T, Amir H, et al. Concrete mix proportions with ultra-high electrical resistivity [C]//11 DBMC International Conference on Durability of Building Materials and Components, Turkey, 2008.
- [10] Zhang Y, Zhang X. Research on effect of limestone and gypsum on C_3A , C_3S and PC clinker system [J]. Construction and Building Materials, 2008, 22: 1634-1642.
- [11] Ramezani-pour A A, Ghiasvand E, Nickseresht I, et al. Influence of various amounts of limestone powder on performance of Portland limestone cement concretes [J]. Cement & Concrete Composites, 2009, 31: 715-720.
- [12] 王冲, 蒲心诚, 陈科, 等. 超低水胶比水泥浆体材料的水化进程测试[J]. 材料科学与工程学报, 2008, 26(6): 852-857.
Wang C, Pu X C, Chen K, et al. Measurement of hydration progress of cement paste materials with extreme-low W/B [J]. Journal of Materials Science and Engineering, 2008, 26(6): 852-857.
- [13] Lawrence P, Cyr M, Ringot E. Mineral admixtures in mortars; Effect of inert materials on short-term hydration [J]. Cement and Concrete Research, 2003, 33: 1939-1947.
- [14] Kwan A K H, Fung W W S. Packing density measurement and modelling of fine aggregate and mortar [J]. Cement and Concrete Composites, 2009, 31: 349-357.
- [15] 胡蝶, 麻海燕, 余红发, 等. 矿物掺和料对混凝土氯离子结合能力的影响[J]. 硅酸盐学报, 2009, 37(1): 129-134.
Hu D, Ma H Y, Yu H F, et al. Influence of mineral admixtures on chloride binding capability [J]. Journal of the Chinese Ceramic Society, 2009, 37(1): 129-134.
- [16] Sánchez I, Nóvoa X R, Vera G D, et al. Microstructural modifications in portland cement concrete due to forced ionic migration tests. Study by impedance spectroscopy [J]. Cement and Concrete Research, 2008, 38: 1015-1025.
- [17] Song G L. Equivalent circuit model for AC electrochemical impedance spectroscopy of concrete [J]. Cement and Concrete Research, 2000, 30: 1723-1730.
- [18] 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.
Li Y X, Chen Y M, He X Y, et al. Pore volume fractal dimension of fly ash-cement paste and its relationship between the pore structure and strength [J]. Journal of the Chinese Ceramic Society, 2003, 31(8): 774-779.
- [19] 施惠生, 方泽锋. 煤矸石-水泥体系早期水化的交流阻抗研究[J]. 同济大学学报: 自然科学版, 2005, 33(4): 441-444.
Shi H S, Fang Z F. Study on early hydration in system of cement-coal stone by alternating current impedance spectroscopy [J]. Journal of Tongji University: Natural Science, 2005, 33(4): 441-444.

(编辑 胡玲)