

文章编号:1007-9629(2022)11-1203-07

建筑固废材料的阻抗谱与力学性能和 孔隙结构的关系

刘 琼^{1,2}, 程圣博¹, 肖建庄^{2,3,*}, 孙 畅^{1,3}

(1. 上海理工大学 环境与建筑学院, 上海 200093; 2. 同济大学 土木工程学院, 上海 200092;
3. 同济大学 国家土建结构预制装配化工程技术研究中心, 上海 200092)

摘要:测试了不同建筑固废材料(加气砖、红砖、砂浆)的电化学阻抗谱,从Nyquist曲线中提取关键信息及参数,结合力学性能、压汞试验数据进行对比分析,揭示了阻抗谱参数与力学性能和微观结构的关系.结果表明:固废材料的抗压强度越高,电荷传递电阻(R_{ct2})越大,二者呈线性相关关系;固废材料中可溶性盐越多,孔溶液电阻(R_s)越小,砂浆的 R_s 值均在 $0.3\ \Omega$ 以下,而加气砖和红砖的 R_s 均大于 $55.0\ \Omega$.试件尺寸也会影响试件与电解质之间的接触电阻,主要体现在高频区圆弧直径的变化,试件尺寸越大,高频区圆弧直径越小.另外,建立了固废材料阻抗谱参数与抗压强度、孔隙率之间的内在关系,可以实现对固废材料性能的智能检测与快速评估.

关键词:建筑固废;电化学阻抗谱;水泥基材料;等效电路模型

中图分类号:TU528.01

文献标志码:A

doi:10.3969/j.issn.1007-9629.2022.11.014

Relationship between Electrochemical Impedance Spectra of Varied Building Solid Wastes and Their Mechanical Property and Pore Structure

LIU Qiong^{1,2}, CHENG Shengbo¹, XIAO Jianzhuang^{2,3,*}, SUN Chang^{1,3}

(1. School of Environment and Architecture, University of Shanghai for Science and Technology, Shanghai 200093, China; 2. College of Civil Engineering, Tongji University, Shanghai 200092, China; 3. National Engineering Technology Research Center for Prefabrication Construction in Civil Engineering, Tongji University, Shanghai 200092, China)

Abstract: By studying the electrochemical impedance spectrum variation law of different building solid wastes (aerated brick, red brick, mortar), the key information and parameters are extracted from the Nyquist curves, combined with the mechanical properties and mercury pressure test data, and the relationship between the impedance spectral parameters and mechanical properties and microstructure was revealed. The results show that the higher the compressive strength of the solid waste, the greater the charge transfer resistance (R_{ct2}), and they have a linear relationship. In addition, the more soluble salts of the material, the smaller the pore solution resistance (R_s), the R_s value of the mortar is below $0.3\ \Omega$, and the R_s value of aerated bricks and red bricks are greater than $55.0\ \Omega$. The size of the specimen affects the contact resistance between the specimen and the electrolyte, mainly reflected in the change of the arc diameter in the high-frequency region, the larger the specimen, the smaller the arc diameter of the high-frequency region. The intrinsic relationship between the impedance spectrum parameters of the building solid wastes and the compressive strength and porosity established can realize the intelligent detection and rapid evaluation

收稿日期:2022-04-28; 修订日期:2022-07-20

基金项目:国家土建结构预制装配化工程技术研究中心开放课题资助项目(2020CPCCE-K03)

第一作者:刘 琼(1980—),男,河南南阳人,上海理工大学讲师,博士.E-mail:lq612@usst.edu.cn

通讯作者:肖建庄(1968—),男,山东沂南人,同济大学教授,博士生导师,博士.E-mail:jzx@tongji.edu.cn

of the performance of the building solid wastes.

Key words: building solid waste; electrochemical impedance spectroscopy; cement-based material; equivalent circuit model

在中国,每年排放的建筑固废达20亿 $t^{[1]}$,种类较多且成分复杂,其中废弃混凝土和废弃黏土砖占据了较大比例.近年来,大量使用的加气砖也成为建筑固废的一种主要组成.固废的大量排放不仅危害环境,还占用了大量的土地资源.为保护环境协调发展,建筑固废的再生回收利用已成为未来建筑行业的必经之路 $^{[2]}$.当下,建筑固废资源化的目标便是以最小的能量投入,实现物质与材料的循环利用.研究固废材料的力学性能和耐久性,以及相关评价和预测方法,可以为固废资源化处理提供方向和指导.

研究发现,水泥基材料的力学性能和耐久性与其微观结构之间有着紧密的联系.近年来,基于电学检测手段的非破坏性和技术上的简易性,其在水泥基材料中的应用引起了越来越多的关注 $^{[3]}$.电化学阻抗谱(EIS)作为一种无损检测技术,已被证明是研究水泥浆体、砂浆和混凝土微观结构和力学性能的有力手段 $^{[4-5]}$.阻抗谱是一种表示交流阻抗测量数据的图,它可以揭示水泥基材料的孔隙结构以及离子电导率的变化 $^{[6]}$.Nyquist曲线是阻抗谱的一种常用表现形式,其横坐标是被测阻抗的实部,通常用 Z' 表示;纵坐标是被测阻抗的虚部,通常用 Z'' 表示.阻抗谱呈现的阻抗数据由固相产生的响应和液相产生的响应共同作用 $^{[7]}$.EIS技术和用于模拟系统介电响应的等效电路相结合,能够灵敏地跟踪离子迁移期间水泥基材料的微观结构以及外部电解质在界面处发生的变化 $^{[8]}$.等效电路模型的建立对于阻抗谱参数的分析非常重要,拓宽了该技术的应用范围 $^{[9]}$.选取适当的拟合电路,可以从测量的阻抗谱中提取水泥基材料样品的微观结构

和界面特性信息 $^{[10]}$.

建筑固废材料的应用越来越普遍,但其性能的评价和预测手段仍较缺乏,尤其是基于无损检测的技术.本文测试了加气砖、红砖和砂浆这3种建筑固废材料的电化学阻抗谱,从图像和拟合数据中提取关键信息及参数,结合压汞试验的微观孔结构进行对比分析,建立阻抗谱参数与孔隙率的联系.通过分析阻抗谱和压汞试验数据,获取其微观结构的差异,并结合材料的力学性能进行分析,可以实现对固废材料性能的智能检测与评估.

1 试验

1.1 试件制备与EIS测试

原材料为废弃加气砖、红砖及砂浆.钻取直径为10、15、20 mm,高度与直径相同的圆柱体试件,分别记作S、M、L组,每组3个试件.在试件顶面中心钻细孔,插入直径1.1 mm,长度130 mm的铜导线,插入深度为试件高度的1/2,铜导线和圆柱体试件之间用石墨导电胶粘结,静置10 h以上,待石墨导电胶凝固后,清洗试件并将其放入饱和 $Ca(OH)_2$ 水溶液中保持饱水状态.

采用上海辰华有限公司生产的CHI604E型电化学分析仪,进行阻抗谱测量,测试频率为1 Hz~1 MHz.试件接入三电极电解池并连接分析仪,三电极包括甘汞电极、铂电极以及作为工作电极的试件,电解池中为饱和 $Ca(OH)_2$ 水溶液.试件浸入 $Ca(OH)_2$ 水溶液的深度为试件高度的一半,以避免铜丝及石墨导电胶接触 $Ca(OH)_2$ 水溶液.试验环境温度 $(20\pm 3)^\circ C$,湿度 $(60\pm 3)\%$.试件制作和EIS测试过程如图1所示.

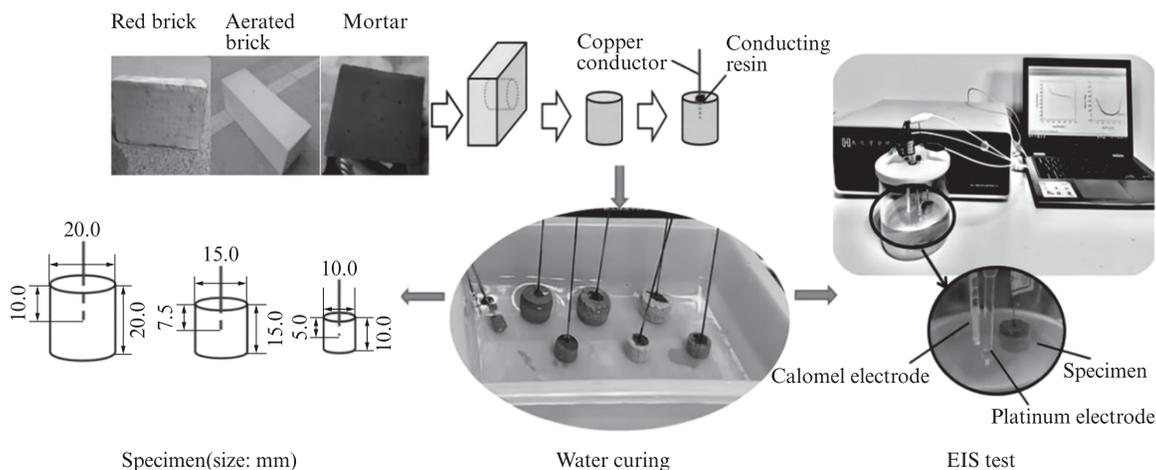


图1 试件制作和EIS测试过程

Fig. 1 Specimen preparation and EIS test process

1.2 性能测试

在废弃加气砖、红砖和砂浆上切取尺寸为 40 mm × 40 mm × 160 mm 的棱柱体试件,采用 WDW-100 型电子万能试验机测试其抗压强度和弹性模量.取以上 3 种固废材料烘干、称重,求出密度,根据 GB/T 14685—2011《建筑用卵石、碎石》,用液体比重天平法求出表观密度,得到孔隙率,结果如表 1 所示.

由表 1 可知,加气砖的密度较小,仅为 0.51 g/cm³,砂浆的密度最大,达到 1.98 g/cm³,红砖的密度介于二

者之间,为 1.75 g/cm³;加气砖有较大的孔隙率,达到了 70.41%,红砖的孔隙率为 33.80%,而砂浆的孔隙率仅为 13.80%;加气砖的抗压强度仅为砂浆的 12.6%.不难发现,3 种固废材料的密度、孔隙率与抗压强度、弹性模量之间有明显的规律性,孔隙率越大的材料,其质地越疏松,抗压强度和弹性模量也越低.另外,将废弃加气砖、红砖和砂浆取样进行压汞试验,仪器采用美国康塔仪器公司生产的 PoreMaster33GT 压汞仪,汞表面张力取 480 × 10⁻³ N/m,接触角取 140°.

表 1 加气砖、红砖和砂浆的物理性能
Table 1 Physical properties of aerated brick, red brick and mortar

Material	Density/(g·cm ⁻³)	Apparent density/(g·cm ⁻³)	Porosity(by volume)/%	Compressive strength/MPa	Elastic modulus/GPa
Aerated brick	0.51	1.73	70.41	3.12	1.23
Red brick	1.75	2.64	33.80	5.38	2.53
Mortar	1.98	2.79	13.80	24.82	20.35

2 结果与分析

2.1 阻抗谱 Nyquist 曲线

3 种固废材料的阻抗谱曲线见图 2.由图 2 可知,3 种固废材料基本呈现出水泥基材料的准 Randles 型曲线的特征,即高频区圆弧衔接低频区直线.进一步观察可见:加气砖试件的高频区圆弧直径最小,不同尺寸试件的高频区圆弧直径均在 1 000.0 Ω 以下;红砖试件的高频区圆弧直径稍大,为 1 000.0~5 000.0 Ω;砂浆试件的高频区圆弧直径最大,均值为 3 000.0~10 000.0 Ω.对比同种材料不同尺寸试件的阻抗谱曲线可以发现,试件尺寸越小,高频区圆弧直径越大.

提取图 2 中各试件 Nyquist 曲线的起始点阻抗、高频/低频拐点阻抗和低频区直线斜率,并对每组 3 个试件的上述参数取平均值,结果见表 2.由表 2 可知:加气砖阻抗谱起始点阻抗较小,均在 200.0 Ω 以下,图像上表现出起始点的位置更靠近原点;红砖的

起始点阻抗均在 240.0 Ω 以上,最大达到了 554.3 Ω;砂浆的起始点阻抗均在 230.0 Ω 以上,S 组最大,达到了 372.3 Ω.另外,对比高频/低频拐点阻抗发现,加气砖的拐点阻抗也最小,低于 1 000.0 Ω;红砖其次,均低于 3 200.0 Ω,L 组数值最小,为 1 218.7 Ω;砂浆的拐点阻抗远远高于加气砖和红砖,S 组和 M 组拐点阻抗分别达到了 7 690.0 Ω 和 5 590.0 Ω. Nyquist 曲线的起始点阻抗表征孔溶液电阻,由于加气砖孔隙率较高,连通孔较多,孔径(*d*)也较大,结合压汞试验结果,其孔径均大于 10 μm,因此孔溶液电阻较低;与之相反,砂浆的孔径最小,孔隙率最低,因此其孔隙导电通路最曲折,表现出的起始点阻抗最大.

在标准的 Randles 型曲线中,低频区直线的斜率为 1.0^[3].由表 2 可见:砂浆的低频区直线斜率最小;红砖次之,均值约 1.6;加气砖的最大.低频区直线的斜率是由工作电极上的 Warburg 阻抗所致,即电解液中离子向电极表面扩散的阻抗,当工作电极表面较粗糙时,在低

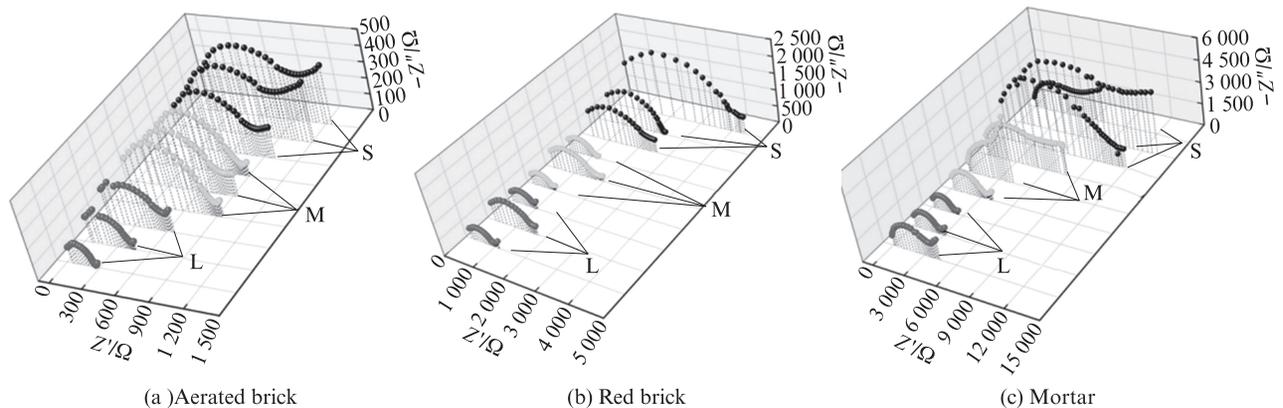


图 2 3 种固废材料的阻抗谱曲线
Fig. 2 EIS curves of 3 building solid wastes

表2 起始点阻抗、高频/低频拐点阻抗和低频区直线斜率
Table 2 Starting point impedance, high frequency/low frequency inflection point impedance and low frequency region straight line slope

Material	Size	Starting point impedance/ Ω	Inflection point impedance/ Ω	Slope
Aerated brick	S	136.3	950.0	2.3
	M	155.0	902.0	2.5
	L	187.7	451.3	2.8
Red brick	S	554.3	3 113.3	1.8
	M	266.7	1 372.3	1.7
	L	248.7	1 218.7	1.2
Mortar	S	372.3	7 690.0	0.8
	M	369.0	5 590.0	0.6
	L	234.0	2 990.3	0.9

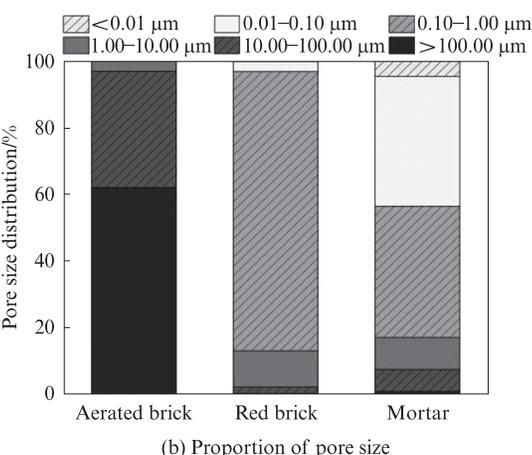
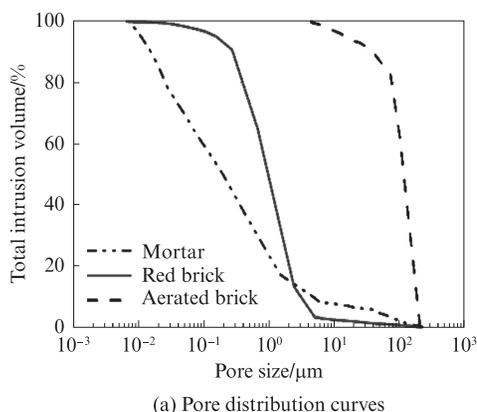


图3 压汞测试结果

Fig. 3 MIP test results

2.3 等效电路模型选择

在EIS测试中,当水泥基材料试件接入这种微小的电压时,会形成复杂的电化学体系^[12].一般来说,水泥基材料的微观结构非常复杂,难以表征全面的电化学特征.通过选择既有的等效电路模型,可以解释试件的固相、液相和固液界面的阻抗特性^[13].

图4(a)为在简化水泥基材料微结构模型的基础上提出的等效电路模型^[5],可以表示为 $R_s(QW_1(R_{ct}W_2))$.图中 Q 代表电极与电解质之间的介电电容, R_s 代表孔溶液电阻, R_{ct} 构成了水泥基材料中凝胶材质中的电荷传递电阻, W 可解释为电解质中离子扩散的阻抗.在此基础上,通过增减电路元件和连接方式,得到拟合程度较高的等效电路,从而更好地揭示材料的阻抗特性.考虑到加气砖试件较粗糙,为了消除固体电极双层电容的频响特性与纯电容的差异,加设了对常相角元件CPE的考量^[4],等效电路模型可表示为 $R_s(QW_4(W_1)(R_{ct1}W_2)(R_{ct2}W_3)(CPE))$,如图4(b)所示.试件尺寸影响接触面电阻 R_{ct2} ,电荷传递电阻 R_{ct1} 与 R_{ct2} 并联,等效

频电压作用下,工作电极更多地表现出电容的特点,因此低频区直线斜率较大^[11].在由3种固废材料制作的工作电极中,加气砖的孔隙率最高、孔径最大,因而其表面更加粗糙,在EIS谱低频区直线的斜率最大.

2.2 压汞分析

通过压汞试验,测试3种试件的孔径分布,如图3所示.由图3可知:加气砖中100.00 μm 以上的孔隙占比约60%,加气砖的孔隙平均尺寸和孔隙率也为3种材料中最大,且不存在1.00 μm 以下的孔隙,试验过程中也发现,当压力过大时,加气砖试件被压碎;红砖的孔径主要集中在0.10~1.00 μm ,占比80%以上,几乎不存在0.01 μm 以下和100.00 μm 以上的孔隙;砂浆的孔隙分布曲线较为平缓,0.01~0.10 μm 和0.10~1.00 μm 区间的孔隙居多,各占40%左右,几乎不含100.00 μm 以上的孔隙.

电路模型可表示为 $R_s(R_{ct1}W_1)(R_{ct2}W_2)(QW_3)$,如图4(c)所示.串联与并联等效电路的选择通常取决于电荷传递的路径^[14],在砂浆试件中,同时考虑电荷在C-S-H凝胶中的电荷传递和固液界面2种通路^[3,10],等效电路模型可表示为 $R_s(QW_4(W_1)(R_{ct1}W_2)(R_{ct2}W_3))$,如图4(d)所示.相比图4(b),图4(d)中减少了并联接入电路的CPE元件.采用以上4种等效电路模型对EIS数据进行拟合,结果如图4(e)所示.由图4(e)可见,图4(d)中 $R_s(QW_4(W_1)(R_{ct1}W_2)(R_{ct2}W_3))$ 模型的拟合误差基本在3.5%以下,所有数据均有较好的拟合结果.

2.4 拟合分析

根据阻抗谱的特性确定了所对应的等效电路模型,也就确定了等效电路中包含的简单复合元件及等效元件.如果在不同频率范围内选取阻抗谱数据,并用圆和直线方程来拟合这些数据,就可解析出不同频率段所对应的简单复合元件中等效电路的参数值.对每组3个试件按 $R_s(QW_4(W_1)(R_{ct1}W_2)(R_{ct2}W_3))$ 模型进行拟合,结果如图5所示.

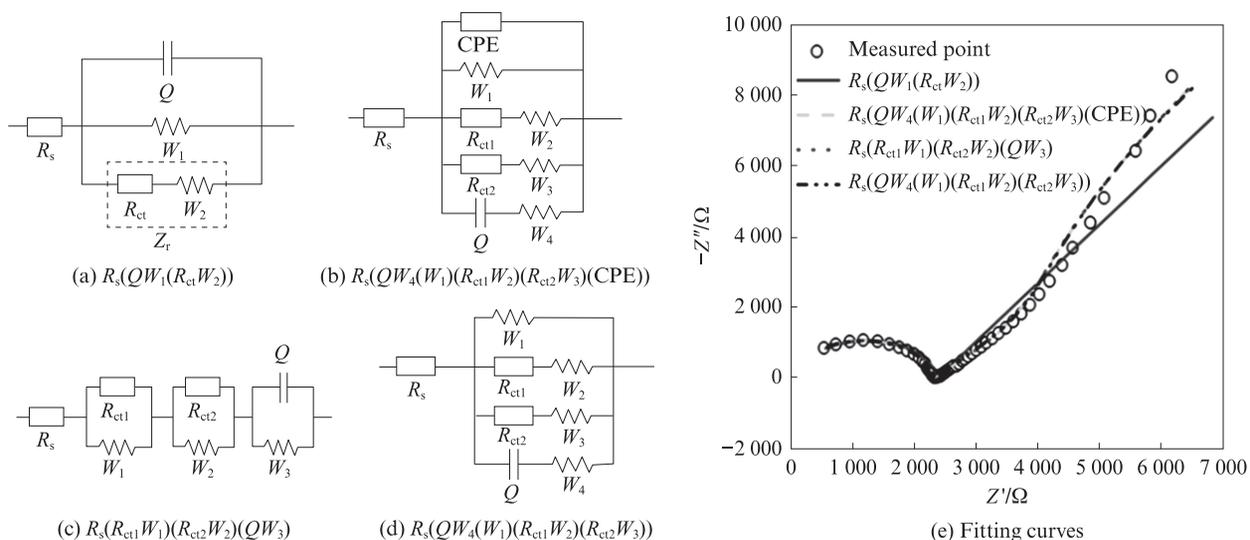


图 4 电化学等效电路模型和拟合结果

Fig. 4 Modeling and fitting of electrochemical equivalent circuit

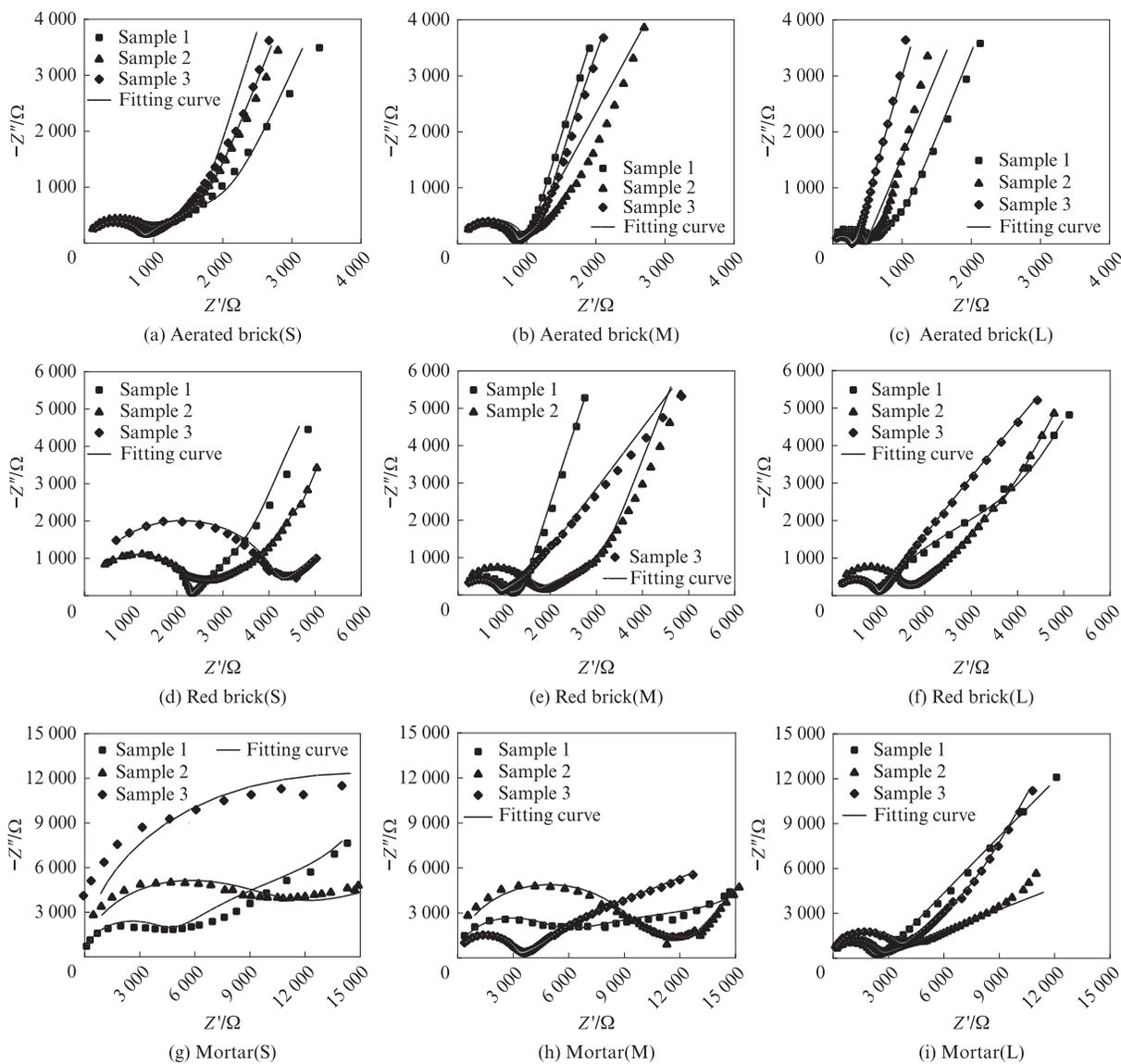


图 5 阻抗谱拟合曲线

Fig. 5 Fitting curves of Nyquist plot

拟合参数 Q 、 R_s 、 R_{ct1} 、 R_{ct2} 见表3. 电极上的法拉第阻抗由各支路上的法拉第阻抗并联组成, 电极上的非法拉第阻抗仅来自双层电容, 此时整个电极系统的阻抗 Z 可以表示为:

$$Z = R_s + \frac{1}{Q + \frac{1}{\frac{1}{R_{ct1}} + \frac{1}{R_{ct2}}}} \quad (1)$$

双层电容 Q 是电解质与电极交换电荷的界面, 决定了电子和离子在不同电位下的平衡分布^[15]. 由表3可见, 不同固废材料之间 R_s 值相差明显, 砂浆的 R_s 值远远小于加气砖和红砖, 红砖的 R_s 值最大, 加气砖的 R_s 值介于前面二者之间. 孔溶液中可溶性盐的种类和含量会影响其电导率^[16], 根据表3中 R_s 值的差异可以判断, 砂浆中可溶性盐最多, 红砖中可溶性盐最少.

R_{ct2} 构成了组成电极内部胶凝材质的电荷传递电阻^[17], 其数值对应阻抗谱高频区圆弧直径. 本文提出的电路模型中也考虑了导电路径, 如连续导电路径、不连续导电路径和“绝缘体”导电路径. 砂浆试件考虑其物质组成, 同组试件 R_{ct1} 和 R_{ct2} 的数值相对离散, 推测是由于接触电阻和电荷传递电阻的不稳定性所致. 对于试验数据中出现的尺寸效应, 可以解释为当试件尺寸较小时, 阻抗谱高频区圆弧直径是由固液接触电阻和电荷传递电阻共同作用的结果^[18], 在电化学体系中, 电极面积与电阻的乘积是更易比较的参数. 在3种尺寸下, 固废材料呈现的差异趋同.

2.5 电学参数与力学性能和孔隙率之间的关系

等效电路拟合得到的阻抗谱参数中, R_{ct2} 与所

表3 EIS拟合结果

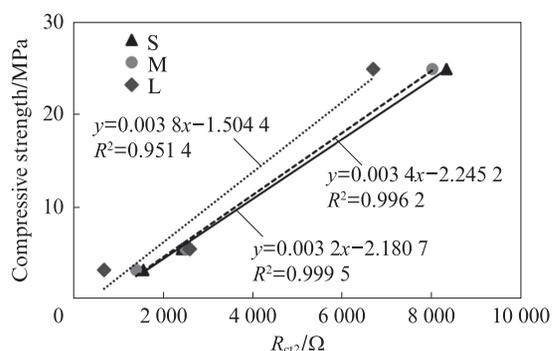
Table 3 Fitting results for EIS

Material	Size	$Q/\mu\text{F}$	R_s/Ω	R_{ct1}/Ω	R_{ct2}/Ω
Aerated brick	S	0.81	57.5	1 967.3	1 565.7
	M	3.6	74.1	2 235.0	1 404.3
	L	9.3	76.2	977.0	687.3
Red brick	S	4.7	77.4	1 922.8	2 428.0
	M	6.9	101.9	1 936.4	2 509.5
	L	2.4	112.0	—	2 606.0
Mortar	S	5.2	0.1	16 200.0	63 500.0
	M	21.0	0.3	24 490.0	22 033.4
	L	39.0	0.3	9 100.0	6 710.0

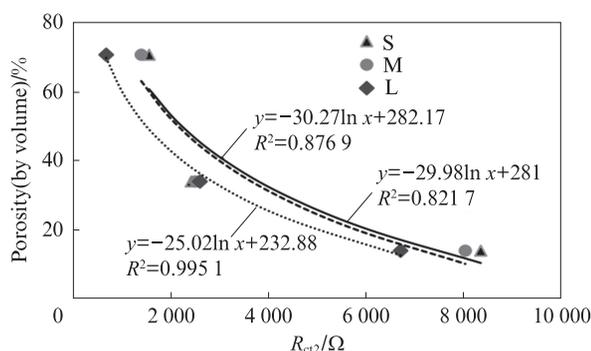
述固废材料的孔隙结构关系最密切, 因此与材料的力学性能密切相关. 建立3种尺寸固废材料 R_{ct2} 与抗压强度之间的关系, 如图6(a)所示. 由图6(a)可见, 二者之间存在正比例关系, 用一次线性方程分别针对3种尺寸试件的参数进行拟合, 均得到相关系数 (R^2) 较高的线性方程. 对于S、M组试件, R^2 均达到99%以上, 对于L组试件, R^2 达到95%以上.

采用对数方程对 R_{ct2} 与孔隙率之间的关系进行拟合, 结果如图6(b)所示. 由图6(b)可见, 对于L组试件, 拟合相关系数 R^2 达到99%以上, 对于S、M组试件, R^2 则低于90%.

综合以上分析, 本研究中采用3种尺寸的试件进行阻抗谱测试, 其阻抗谱参数 R_{ct2} 与抗压强度呈线性关系, 与孔隙率呈对数关系, 这为固废材料无损检测和性能预测奠定了基础.



(a) R_{ct2} and compressive strength



(b) R_{ct2} and porosity

图6 阻抗谱参数与力学性能和孔隙率的关系

Fig. 6 Relationship between EIS parameters and mechanical property and porosity

3 结论

(1) 对比加气砖、红砖和砂浆这3种建筑固废材料的电化学阻抗谱(EIS)曲线, 主要表现在高频区圆弧直径和低频区直线斜率的差异: 加气砖高频区圆

弧直径最小, 砂浆最大, 红砖介于二者之间; 加气砖低频区直线斜率最大, 砂浆最小, 红砖介于二者之间. 高频区圆弧直径与抗压强度和弹性模量呈正相关, 与低频区直线斜率呈负相关.

(2) 利用 $R_s(QW_4(W_1)(R_{ct1}W_2)(R_{ct2}W_3))$ 等效电

路模型对EIS参数进行拟合,建立其与3种固废材料力学性能之间的联系,孔隙溶液电阻 R_s 可表征固废材料中可溶性盐的含量,砂浆中可溶性盐含量最高,则其 R_s 最低;红砖中可溶性盐含量最低,则其 R_s 最高.组成电极内部胶凝材质的电荷传递电阻 R_{ct} 值对应阻抗谱高频区圆弧直径,孔隙率较高的加气砖 R_{ct} 值较低,孔隙率较低的砂浆 R_{ct} 值较高; R_{ct} 值与抗压强度呈线性关系,与孔隙率呈对数关系.

(3)3种固废材料阻抗谱随尺寸变化呈现一定的规律性,一般来说,随着试件尺寸的增大,高频区圆弧直径减小,考虑电阻与试件表面积呈负相关关系.

(4)本文所建立的固废材料交流阻抗谱参数与抗压强度和孔隙率间的关系,可为固废材料的智能检测与快速评估提供依据.

参考文献:

- [1] 肖建庄. 再生混凝土[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2008: 18-29.
XIAO Jianzhuang. Recycled concrete [M]. Beijing: China Architecture and Building Press, 2008: 18-29. (in Chinese)
- [2] 陈家珑. 我国建筑垃圾资源化利用现状与建议[J]. 建设科技, 2014(1): 8-12.
CHEN Jialong. Situation and suggestion of construction and demolition wastes recycling in China [J]. Construction and Technology, 2014(1): 8-12. (in Chinese)
- [3] 史美伦. 混凝土阻抗谱[M]. 北京: 中国铁道出版社, 2003: 90-128.
SHI Meilun. Concrete impedance spectrum [M]. Beijing: China Railway Press, 2003: 90-128. (in Chinese)
- [4] 曹楚南, 张鉴清. 电化学阻抗谱导论[M]. 北京: 科学出版社, 2002: 21-36.
CAO Chunan, ZHANG Jianqing. An introduction to electrochemical impedance spectroscopy [M]. Beijing: Science Press, 2002: 21-36. (in Chinese)
- [5] HU X, SHI C J, LIU X J, et al. A review on microstructural characterization of cement-based materials by AC impedance spectroscopy[J]. Cement and Concrete Composites, 2019, 100: 1-14.
- [6] 巴明芳, 张丹蕾, 赵启俊, 等. 碳化与氯盐复合作用下硫氧镁胶凝材料的护筋性[J]. 建筑材料学报, 2021, 24(5): 946-951.
BA Mingfang, ZHANG Danlei, ZHAO Qijun, et al. Corrosion resistance of steel bars of magnesium oxy-sulfate cementitious material under the combined action of carbonation and chloride salt [J]. Journal of Building Materials, 2021, 24(5): 946-951. (in Chinese)
- [7] 冯兴国, 范琦琦, 杨洋, 等. 交变温度对细骨料珊瑚混凝土中钢筋耐腐蚀性能的影响[J]. 建筑材料学报, 2021, 24(5): 525-531.
FENG Xingguo, FAN Qiqi, YANG Yang, et al. Effect of alternating temperature on the corrosion performance of reinforcements in fine coral aggregate concrete [J]. Journal of Building Materials, 2021, 24(5): 525-531. (in Chinese)
- [8] DONG B Q, QIU Q W, GU Z T, et al. Characterization of carbonation behavior of fly ash blended cement materials by the electrochemical impedance spectroscopy method [J]. Cement and Concrete Composite, 2016, 65: 118-127.
- [9] MCCARTER W J, BROUSSEAU R. The A.C. response of hardened cement paste [J]. Cement and Concrete Research, 1990, 20(6): 891-900.
- [10] CHI L, WANG Z, LU S. Development of mathematical models for predicting the compressive strength and hydration process using the EIS impedance of cementitious materials [J]. Construction and Building Materials, 2019, 208: 659-668.
- [11] SHI M L, CHEN Z Y, SUN J. Determination of chloride diffusivity in concrete by AC impedance spectroscopy [J]. Cement and Concrete Research, 1999, 29(7): 1111-1115.
- [12] 张震雷, 史美伦. 混凝土中矿物掺和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. (in Chinese)
- [13] ORTEGA J M, ALBALADEJO A, PASTOR J C. Influence of using slag cement on the microstructure and durability related properties of cement grouts for micropiles [J]. Construction and Building Materials, 2013, 38: 84-93.
- [14] HUANG J, GAO Y, LUO J. Review—Impedance response of porous electrodes: Theoretical framework, physical models and applications [J]. Journal of the Electrochemical Society, 2020, 167: 166503.
- [15] DONG B Q, GU Z T, QIU Q W, et al. Electrochemical feature for chloride ion transportation in fly ash blended cementitious materials [J]. Construction and Building Materials, 2018, 161: 577-586.
- [16] WALDEMAR P, MAKSYMILIAN F, MARTA R. Determination of percolation threshold in cement composites with expanded graphite by impedance spectroscopy [J]. Cement and Concrete Composites, 2022, 125: 104328.
- [17] BERROCAL C G, HORNBOSTEL K, GEIKER M R, et al. Electrical resistivity measurements in steel fiber reinforced cementitious materials [J]. Cement and Concrete Composites, 2018, 89: 216-229.
- [18] OZYURT N, MASON T O, SHAH S P. Non-destructive monitoring of fiber orientation using AC-IS: an industrial-scale application [J]. Cement and Concrete Research, 2006, 36(9): 1653-1660.