

通用硅酸盐水泥基材料低频介电性能的研究进展

席 翔^{1,2,5}, 储洪强¹, 冉千平^{2,3}, 张文一⁴, 蒋林华¹, CHUNG D.D.L.⁵

(1. 河海大学力学与材料学院, 南京 211100, 中国; 2. 江苏省建筑科学研究院有限公司, 高性能土木工程材料国家重点实验室, 南京 210008, 中国; 3. 东南大学材料科学与工程学院, 南京 211189, 中国; 4. 北京理工大学机电学院, 北京 100081, 中国; 5. 纽约州立大学布法罗分校机械与航空航天工程学院, 布法罗 14260-4400, 美国)

摘 要: 介电性能描述了水泥基材料中的极化现象, 即正负电荷中心发生分离的现象。目前, 国内外学者针对通用硅酸盐水泥基材料的低频介电性能开展了大量研究, 涉及水泥基材料的微结构、水泥水化过程、受力状态等, 但缺少对最新成果的归纳整理和综合评述。本文通过综述近 20 年来国内外学者对通用硅酸盐水泥基材料低频介电性能的最新研究成果, 对介电常数的测量方法进行介绍, 分析了通用硅酸盐水泥基材料中的极化机理, 讨论了骨料、水灰比、应力/应变和温度等因素对通用硅酸盐水泥基材料介电性能的影响规律。结果表明: 孔隙溶液中的离子是影响通用硅酸盐水泥基材料介电性能的主要原因, 通过离子的移动形成的电偶极子以串联的方式连接。骨料和外掺物通过影响微结构影响介电性能。温度升高和压应力会增强介电性能, 温度降低和拉应力会减弱介电性能。最后针对今后需要深入开展的相关研究提出建议。

关键词: 水泥基材料; 介电性能; 介电常数; 极化; 电导率

中图分类号: TU528 文献标志码: A 文章编号: 0454-5648(2023)08-2074-16

网络出版时间: 2023-04-28



Low-Frequency Dielectric Behavior of Common Portland Cement-Based Materials: A Review

XI Xiang^{1,2,5}, CHU Hongqiang¹, RAN Qianping^{2,3}, ZHANG Wenyi⁴, JIANG Linhua¹, CHUNG D.D.L.⁵

(1. College of Mechanics and Materials, Hohai University, Nanjing 211106, China; 2. State Key Laboratory of High Performance Civil Engineering Materials, Jiangsu Research Institute of Building Science Co., Ltd., Nanjing 210008, China; 3. School of Materials Science and Engineering, Southeast University, Nanjing 211189, China; 4. School of Mechatronical Engineering, Beijing Institute of Technology, Beijing 100081, China; 5. Department of Mechanical and Aerospace Engineering, University at Buffalo, the State University of New York, Buffalo 14260-4400, U.S.A.)

Abstract: Dielectric behavior pertains to the polarization of cement-based materials, in which the positive and negative charge centers are separated. Recent work on the dielectric behavior of common Portland cement-based materials in a low frequency regime were carried out, including the dependence of dielectric behavior on microstructures, hydration process, loadings, etc. This review represented the results of dielectric behavior of common Portland cement-based materials over the past decade and introduced the dielectric measurement method and the dependence of polarization on aggregates, water cement ratio, stress/strain, and temperature. It is indicated that some movable ions in pore solution dominate the dielectric behavior, in which the electric dipoles are in series. Aggregates and admixtures affect dielectric behavior due to relevant changes in microstructures. Heating and compression strengthen the dielectric behavior, while cooling and tension weaken the dielectric behavior. In addition, some related future research aspects were also prospected.

Keywords: cement-based materials; dielectric behavior; electrical permittivity; polarization; electrical conductivity

水泥基材料是土木工程结构中应用最广泛的材料。其力学性能和耐久性等性能指标获得大量的关

注^[1]。不同于功能材料, 水泥基材料属于结构材料, 具有体积大、制备材料易获得、制备过程简单等优

收稿日期: 2023-01-01。 修订日期: 2023-02-14。

基金项目: 国家自然科学基金(52079048); 江苏省重点研发计划项目(BE2020780)。

第一作者: 席 翔(1993—), 男, 博士, 讲师。

Received date: 2023-01-01. Revised date: 2023-02-14.

First author: XI Xiang (1993—), male, Ph.D., Lecturer.

E-mail: xiangxi93@hhu.edu.cn

点。目前,在世界各国正在推进诸如“智慧城市”、“智慧海洋”、“智慧水利”等智能化设施建设的背景下,开发水泥基材料的非结构功能特性具有广阔的前景^[2]。水泥基材料的非结构功能特性包括声、光、热、电、磁等。具体应用包括自感知^[3]、融雪化冰^[4]、电磁屏蔽^[5]、能量的采集、存储与转化^[6-7]等。

水泥基材料的电学性能包括导电性能和介电性能。介电性能描述了材料中的极化现象,即正负电荷中心的分离。外部环境如应变和温度对极化的影响分别为正压电效应和热释电效应。水泥基材料本身的导电性能较差,是因为溶解在孔隙溶液中的阴阳离子含量较低。为提高水泥基材料的导电性能,研究人员在水泥基材料中混掺了金属和碳材料(石墨家族),如镍纳米线^[8]、碳纤维^[9]、石墨烯^[3]、碳纳米管^[10]等提高水泥基材料的电导率,用于压敏自感知、电热性能等研究。碳材料因为碳原子 sp^2 的杂化形成的大 π 键能释放出自由电子,因而具有导电性。电子是量子粒子,其迁移率优于阴阳离子,当 2 个导电相距离足够近时,即使不接触也能发生“量子隧道”效应^[11]。因此,碳材料等导电相的加入极大改善了水泥基材料的导电性能。水泥基材料的介电性能源于水泥基材料中正负电荷中心的分离,即极化。极化过程产生电容,而电容与介电常数有关。除非有特殊说明,否则本文提到的介电常数均指相对介电常数。水泥基材料的介电性能受导电性能的影响。一般而言,导电性能越好的水泥基材料其内部的极化越弱,这归因于电导率导致的介电损耗。极化弱并不表明介电常数小,因为介电常数衡量的是极化发生的难易程度,正如速度和加速度的关系。著名物理学家 Jonscher^[12]在 1999 年理论证明高导电材料具有极高化率。20 年后 Eddib 等^[13]和 Xi 等^[14]首次通过实验的方法测出了连续碳纤维(沥青基和聚丙烯腈基)的介电常数高达几千至几万。他们将碳材料中的极化归因于部分载荷子和原子的相互作用导致的空间极化,并发现这种作用多发生在材料的“异质性”处,如晶界^[15]、相界^[16]等。纤维增强水泥基材料中存在大量的纤维-水泥界面,这些界面对水泥基材料的力学性能和导电性能有较大的影响。纤维-水泥界面容易滋生孔隙,导致水泥基材料的力学强度下降并使水泥基材料中钢筋对腐蚀的抵抗能力下降。在拉应力作用下,纤维-水泥界面中纤维的“拔出”增大了接触电阻率,从而导致材料的体积电阻率随拉应力的增大而增大。

但关于纤维-水泥界面对水泥基材料介电性能的影响还鲜有报道。

本文涉及到的交流介电频率为远低于微波和无线电波的低频频率,即常用电子设备的工作频率。高频下电磁波以辐射为主,在低频下则以传导为主。基于电磁波在高、低频下传播方式的不同,在高、低频下介电常数的测量方法也不相同。高频下的介电常数常采用传输线法测量^[17],低频下则采用数字电桥(LCR)等阻抗分析仪测量电容等参数^[13-16]。

水泥与水拌和后会发生一系列物理化学反应,形成复杂的微观结构。水化过程是一个极复杂的过程,在早期(水化过程开始 3 h 前)、中期(水化 3 h 至 20~30 h)和后期(水化开始 30 h 以后)进行着不同的化学过程,水化过程的产物 C-S-H 则是一种成分多变的无定形物质。史美伦教授等系统性地研究了水泥基材料水化过程的交流阻抗特性^[18-21]。研究发现水化初期水泥净浆的状态和 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 溶液相同,不发生电化学反应,电极表面的水偶极子跟不上交流电频率从而出现负电容。在中期阶段, C-S-H 凝胶表面存在的大量水偶极子在高频下出现更明显的阻滞现象,表现在负电容比早期的负电容更大。到了后期,水泥净浆中形成了完整、连续的毛细网络,孔隙溶液中 OH^- 等离子可以进行电荷传递过程,此时 Nyquist 谱表现为典型的 Randles 型,即高频半圆与低频斜线相结合。28 d 后,水泥净浆的 Nyquist 谱的曲线基本不变,仅在位置上和半圆的直径上稍有变化。

水泥基材料固化后的介电性能能感知外部刺激(如应力/应变、温度、振动、湿度等),有利于实现基于极化的自感知功能^[22-28]。基于极化的自感知和基于电阻的自感知不同:基于电阻的自感知需要水泥基材料的电阻率足够低^[3, 8-10],因此要求其中导电相的含量达到逾渗阈值。5 mm 长的短切碳纤维在水泥净浆中的逾渗阈值(体积分数)在 0.5%到 1.0%之间。但目前存在的大多数水泥基结构中并不含有导电相,而且碳纤维等导电相的加入会增加水泥基材料制备的成本并降低水泥基材料的和易性;其次,基于电阻的自感知对电接触的质量要求较高,因为低质量的电接触会导致过高的接触电阻。基于极化的自感知不需要水泥基材料中含有导电相,而且对电极与材料之间电接触的要求比基于电阻的低。此外,基于电阻的自感知还存在因直流极化导致的电阻率随时间增长而增大的问题^[3, 29-31]。因

此, 基于极化的自感知比基于电阻的自感知拥有更广阔的应用范围。

水泥基材料的介电性能主要受水泥浆体的微结构和孔隙溶液的离子浓度影响。Keddam 等^[32]发现将硬化水泥净浆放在加热炉中 150 °C 干燥 1 h 后介电常数会减小, 这是因为水分蒸发后留下了干涸的孔隙, 导致材料孔隙率和孔隙体积增大。同时, 水泥基材料内部游离水的逸出也会产生物理热开裂, 水泥基材料微结构的劣化会降低水泥基材料的抗压强度并减弱其介电性能^[26]。相反, 孔隙溶液中离子浓度的增大一定程度上能增强水泥基材料的介电性能。如 Wang 等^[33]发现氯离子的“入侵”增大了碳纤维填充硬化水泥净浆的电容, 这是因为离子浓度的增大增强了复合材料的极化能力。此外, 氯离子与水化产物之间反应生成 Friedel 盐也会增大材料的电容, 因为其降低了水泥基材料孔隙率。正是因为孔隙溶液中的离子影响介电性能, 基于交流阻抗的方法被广泛用来感知水泥基材料中的离子扩散, 如氯离子、硫酸根离子等^[34–37]。

基于以上讨论, 本文结合近 20 年来水泥基材料介电性能的相关研究, 首先介绍低频下水泥基材料介电常数的测量方法及相关误区, 然后介绍直流、交流条件下水泥基材料的极化机理, 再介绍影响水泥基材料介电性能的因素, 如水灰比、功能填料、矿物掺和料、聚合物改性剂、骨料、温度、应力/应变, 最后提出对未来研究的建议。如无特殊说明, 本文讨论的水泥基材料均指通用硅酸盐水泥基材料。

1 介电参数的测量方法与误区

1.1 介电常数的测量方法

介电常数是材料介电性能的重要指标之一, 它描述了材料中发生极化的难易程度。介电常数可通过 LCR 测量仪来测量。LCR 测量仪可测量特定频率下复阻抗的虚数和实数部分, 其中虚数部分受电容和电感的影响。对于水泥基材料, 在水泥基体中不掺有磁性填料的情况下, 电容的影响最大。电容与介电常数直接相关, 它们关系如式(1)所示:

$$C_v = \frac{\varepsilon_0 \kappa A}{l} \quad (1)$$

式中: C_v 为体积电容; ε_0 为真空中的介电常数 (8.85×10^{-12} F/m); κ 为介电常数; A 为被测材料的横截面积; l 为被测长度。

需要注意的是, 利用 LCR 测量仪测得的电容中

耦合了体积电容和接触电容(电极与被测材料之间的电容), 因此需要将体积电容从电容测量值中解耦出来。方法采用多段测量法, 即保证横截面积不变的条件测量材料不同长度的电容值, 根据电容串联公式可得电容测量值和体积电容、接触电容的关系如式(2)所示。测量原理图如图 1 所示。

$$\frac{1}{C_m} = \frac{1}{C_v} + \frac{2}{C_i} \quad (2)$$

式中: C_m 为电容测量值; C_i 为接触电容。

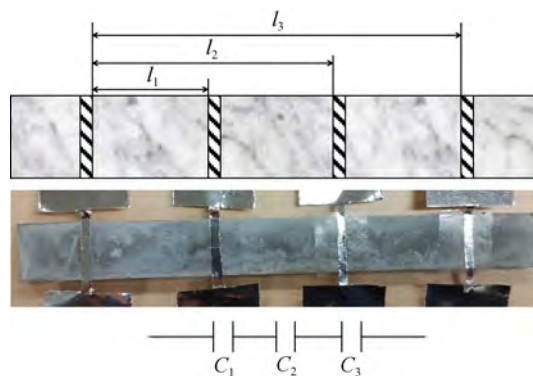


图 1 串联电容法测量相对介电常数原理图

Fig. 1 Schematic of permittivity measurement using capacitors in series

联合式(1)和式(2)可得电容测量值和介电常数的关系, 如式(3)所示。测量多段 l 值的电容 C_m , 绘制 $1/C_m$ 对 l 散点图, 再做直线拟合。通过直线斜率可计算介电常数 κ 和接触电容 C_i 。

$$\frac{1}{C_m} = \frac{l}{\varepsilon_0 \kappa A} + \frac{2}{C_i} \quad (3)$$

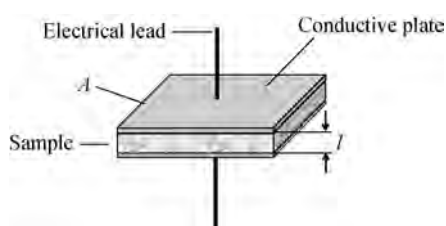
以上方法是基于将被测材料的横截面积固定, 然后测量不同长度材料的电容。另一种方法是将被测材料的长度固定, 通过改变被测材料的横截面积来计算介电常数。如此一来, 将式(3)进行变形得到下式:

$$C_m = \frac{\varepsilon_0 \kappa A C_i}{l C_i + 2 \varepsilon_0 \kappa A} \quad (4)$$

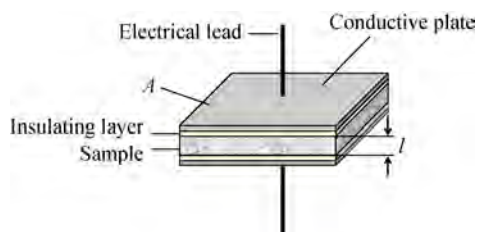
当 $C_i \gg (2 \varepsilon_0 \kappa A)/l$, 式(4)变为式(1), 此时电容的测量值即为体积电容, 但这需要电接触质量趋于完美, 关于电极结构的误区详见 1.3。图 1 采用的是共面测量法。另一种方法是采用平行板电容器法, 一般称之为“三明治”方法, 同样也可以应用式(3)和式(4), 即固定横截面积改变测量长度或固定测量长度改变横截面积。共面法更容易应用于现存的水泥基材料。

1.2 关于 LCR 测量仪的使用误区

介电参数测量的误区之一是认为 LCR 测量仪对低电阻率的材料测量方法与高电阻率的材料测量方法一样。当不导电的基体材料中含有导电填料时, LCR 测量的数据并不可靠, 尤其是当导电填料的体积分数达到或大于逾渗阈值时。LCR 测量仪被设计用来测量电容器的电容, 但作为电容器的材料均为非导体材料, 因此市面上的 LCR 测量仪均可直接测量非导体材料的电容, 如介电陶瓷材料, 而不能直接测量导体材料的电容。非导体材料电容测量原理为平行板电容器原理, 如图 2a 所示。若测量导体材料的电容, 需要在 LCR 测量仪的金属夹具和导体材料之间铺设一层绝缘层, 如环氧树脂等, 如图 2b 所示。对于具体的电容测量范围和对应的阻抗范围, 应提前查阅具体使用的 LCR 测量仪的使用说明书或是与厂家沟通, 以避免测量的精度下降等问题。



(a) Capacitance measurement method for non-conductive materials



(b) Capacitance measurement method for conductive materials, with an insulating film being located between the specimen and the electrode.

图 2 利用 LCR 测量非导体和导体材料电容的方法原理图
Fig. 2 Capacitance measurement methods for non-conductive and conductive materials using an LCR meter

导电连续性影响材料的导电性能, 而极化连续性影响材料的介电性能。导电连续性描述了载荷子在材料内部移动的能力, 导电连续性越好, 材料的导电性能越好。极化连续性描述的是电偶极子之间相互作用的能力。导电连续性和极化连续性都会受到材料异质结构的影响, 但极化连续性受到的影响更大。例如, 当多晶石墨中的单位体积内的晶界面积增大 900% 时, 体积电阻率增大 36%, 而介电常数增大 1 200%^[15]; 金属铜在经历 37% 的冷轧

后, 体积电阻率增大 6%, 而介电常数增大 13%^[38]。水泥基材料的导电连续性已有大量报道, 但极化连续性却鲜有报道。

1.3 关于电极结构形式的误区

根据式(3)可知, 接触电容越大, 对电容测量值的影响越小, 即电接触质量越高。对于理想电接触而言, 接触电容应为无穷大。但实际电接触的电容并非无穷大, 因此导致在介电常数测量中出现认为接触电容为无穷大的误区, 此误区下的测量通常会导致体积电容被低估。在基于介电性能的自感知行为研究中, 体积电容和接触电容都会随着外部刺激(应力/应变、温度等)的变化而变化, 因此, 将接触电容从电容测量值中解耦出来对理解介电机理尤为重要。

金属通常被用来作为电极, 但金属的适应性较差, 导致电极和被测材料不能完美接触。虽然通过施加压力可以改善电接触, 但外力同样也会影响被测材料的介电性能。Liu 等^[39]利用两片柔性石墨片将水泥基材料夹在中间制成“三明治”结构。柔性石墨相比于金属有更高的适应性, 更适合作为电极^[40-41]。没有任何表面是绝对光滑, 即使是经过精加工的表面也存在凹凸峰, 使得电极与被测材料之间的接触实际上只是有限个凹凸峰之间的接触, 在未接触的部分则被介电常数仅为 1 的空气填充, 这也是实际接触电容并非无穷大的原因。但即使是柔性石墨, 也只是在宏观层面改善了电接触, 在微观上并没有根本地解决问题^[42]。电接触根据有无压力分为压力接触型和非压力接触型。压力接触型是指利用外力使电极与水泥基材料紧密接触, 并且外力越大两接触面间的空隙越小, 接触电阻率越小。非压力接触型是指利用导电液体如银胶^[43]作为电极。非压力接触型的优点在于利用液体的流动性填充两表面间的空隙, 因此相比于压力接触型, 非压力接触型的接触电阻率更小。银漆相比于银胶具有更好的流动性, 因此被广泛用来作为研究水泥基材料导电性能的电极^[10,44-45]。在介电常数测量中, 银漆同样被用来作为金属铜和水泥基材料之间的电极^[38]。但不管选用何种电极, 都应该想办法将接触电容去除, 从而保证介电参数测量的准确性^[46]。

电接触的质量也会影响水泥基材料的电热性能。水泥基材料在通电(交流或直流)条件下会产生大量焦耳热, 可用于路面的融雪化冰^[47-49]。电接触质量越差, 电极和水泥基材料之间的接触电阻越大, 导致在电接触处产生的焦耳热越大^[50]。当接触电阻

大于水泥基材料的体积电阻时,在同样时间内电接触处产生的焦耳热将大于水泥基材料产生的焦耳热。此时,水泥基材料不再是热源,而是散失电接触处热量的媒介。因此,接触电阻是影响水泥基材料电热性能的重要因素之一。然而很多关于水泥基材料电热性能的研究并未考虑接触电阻的影响^[47–49]。

1.4 阻抗测量中的误区

在阻抗测量中,复阻抗的实数部分是电阻,虚数部分是电抗。阻抗谱分析是研究在一定频率范围内频率对阻抗的影响。阻抗谱分析的手段之一为电化学阻抗谱(EIS)。在 EIS 分析中,通常需要记录每个频率下的实数和虚数部分,然后绘制成 Nyquist 谱。然而,分析 Nyquist 谱并没有解决 1.2 和 1.3 中遇到的问题。例如文献[39]中的阻抗测量仅使用 2 个电极,并没有去除接触电容的影响,认为各个频率下的电接触处的接触电容均为无穷大,忽视了电接触对介电测量的影响。再者,用于拟合的电路模型并不唯一,导致对材料中发生的极化现象的解释缺少普遍性。

Ford 等^[51]和 Coverdale 等^[52]测量水泥净浆在早龄期的介电常数约为 10^5 。他们将此巨大的介电常数称为“介电放大”现象,并归因于 C–S–H 胶凝结构的影响。但实际上,这是由于阻抗测量误区产生的错误数值。由于早龄期的水泥净浆中含有大量自由水,因此材料的电阻率较低^[53]。而阻抗分析仪并不能直接用来测量低电阻率材料的阻抗,从而导致错误的电容测量值以及相应错误的介电常数。Bhattacharya 等^[54]和 Sachdev 等^[55]同样错误地报道石墨填充水泥净浆的介电常数高达 10^8 。正确的测量方法应是在电极材料和被测样品之间用绝缘层隔开,提高整个测量系统的电阻率,以保证电容测量的准确性。Haddad 等^[56]在使用绝缘层的条件下测量出石墨填充水泥净浆的介电常数为 17 (50 Hz)。

2 水泥基材料的极化机理

极化是材料内部发生正负电荷中心分离的现象。在直流电下发生的极化称为直流极化,主要归因于载荷子的移动或极性分子的排列。在直流电作用下带正电的载荷子和带负电的载荷子运动方向相反,它们共同导致了极化。在水泥基材料的两端施加直流电场会导致内部可以移动的阴阳离子朝着不同的方向运动,但阴阳离子无法进入金属导线而在材料的两端汇聚,导致材料内部正负电荷中心发生

分离,即极化。因载荷子的移动产生的极化称为“载荷子极化”^[12,57];因极性分子的排列产生的极化称为“偶极极化”^[12,58]。通过上述 2 种极化的数学模型可计算出介电常数^[12]。

2.1 交流极化

在交流电作用下,“载荷子极化”中载荷子在一定范围内做往复运动,“偶极极化”中电偶极子在排列的方向上做往复式偏转运动。随着交流电频率增大,“载荷子极化”中载荷子做往复运动的距离减小,导致极化程度减小;“偶极极化”中电偶极子的偏转跟不上电场方向的变化,同样导致极化程度减小。极化程度减小的表现形式为介电常数随着交流电频率的增大而减小^[57,59],但介电常数也有可能在减小的过程中出现增大的现象,这归因于在某些特定频率下的共振电磁吸收作用^[60–61]。对于金属和碳材料等导电性能优异的材料,极化归因于部分载荷子(电子或空穴)与原子的相互作用。若不存在相互作用则载荷子将在闭合回路中移动而不会发生极化^[62]。而对于水泥基材料而言,如果闭合回路中使用金属作为电连接材料,则极化的发生可不依赖于载荷子(阴阳离子)与原子的相互作用;但如果闭合回路中电连接材料为离子导体,则极化依赖于这种相互作用,否则阴阳离子将在回路中移动而不会产生极化^[63]。

介电常数与电容有关,而电容与参与极化的电量有关[式(5)]。带 1 个单位电荷的载荷子的电量为 1.9×10^{-19} C,因此,可计算出参与极化的载流子浓度。

$$C_v = \frac{Q}{V} \quad (5)$$

式中: Q 为参与极化的电荷电量; V 为施加的交流电压。

以水灰比为 0.45 的硬化水泥净浆为例,假设所有参与极化的阴阳离子均存在于孔隙溶液中并且 1 个离子所带的电量与 1 个电子所带的电量相同;当其介电常数为 26.98,测量距离为 5.72 mm 时,参与交流极化的载荷子浓度为 3.1×10^{-13} ;并且,参与极化的离子浓度随着测量距离的增大而减小^[64]。

2.2 直流极化

直流电下的极化与交流电下的极化不同:1) 直流极化下载荷子移动的距离比交流极化下的大;2) 直流极化只能用表观电阻率来表征,因为并不存在“直流介电常数”。表观电阻率与电阻率不同,后者是材料的固有属性而前者是因极化而产生。直流

极化原理如图 3 所示, 对水泥基材料通直流电时, 材料内部的阴阳离子在电场作用下移动, 阳离子朝着负极移动而阴离子朝着正极移动, 因此材料内部逐渐建立一个与外电场方向相反的极化电场, 从而削弱了材料的导电性能, 表现在电阻或电阻率随着通电时间的增长而增大。当极化进行一段时间后, 内部极化电场趋于稳定, 表观电阻也趋于稳定, 此时电场极性发生变换的瞬间, 内部极化电场与外部电场方向一致, 材料的导电性能得到增强, 导致表观电阻出现突降, 甚至小于材料本身的体积电阻。之后, 阴阳离子各朝着相反的方向运动, 反向极化电场开始建立, 导致表观电阻再次增大。

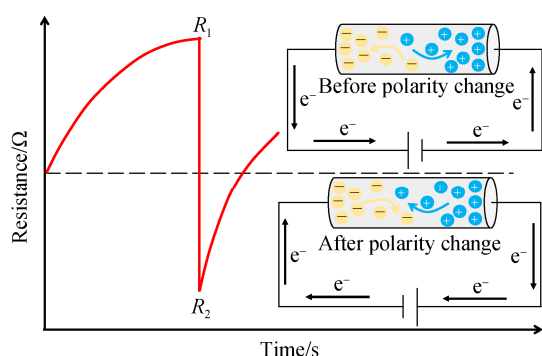


图 3 直流极化与去极化下表观电阻随时间的变化
Fig. 3 Apparent resistance vs. direct current time

水泥基材料的直流极化现象一直存在于压敏自感知的研究中, 极化导致电阻率随着通电时间增长而增大, 因此需要将电阻率的变化从应力/应变和直流极化的耦合影响中解耦出来, 通常采用的方法是等待表观电阻率趋于稳定后再进行压敏试验^[65-66]; 或者在压敏试验前施加预应力来减小极化程度^[67]; 或者采用交流电阻率来研究压敏性能, 因为交流电阻率比直流电阻率更为稳定^[68-70]; 或者通过加热干燥的方法去除水泥基材料中的水分降低直流极化对电阻测量的影响^[71-72]。参与直流极化的载荷子浓度虽然不能直接计算, 但其与极化过程中电阻率的增长有关, 因此可根据表观电阻率的增长率来计算参与极化的载荷子浓度, 具体计算方法详见文献[73]。对于水灰比为 0.35 的硬化水泥净浆, 测量长度为 5.72 mm, 直流电大小为 1 μ A, 通电时间为 570 s 条件下参与直流极化的载荷子浓度为 4.5×10^{-14} ^[74]。通过对比发现, 参与交流极化的载荷子浓度大于参与直流极化的载荷子浓度, 这是因为交流极化下载荷子移动的距离小于直流极化下载荷子移动的距离, 载荷子移动距离越大, 移动过程中

遇到阻碍的可能性越大, 这些阻碍通常源于材料的异质性^[74-75]。

2.3 极化中电偶极子的分布形式

在章节 2.2 中提到水泥基材料在直流电作用下会在内部形成一个反向的极化电场。然而, 在没有外加直流电的情况下, 水泥基材料内部自发地存在着一个内电场^[6]。当测量电极反转, 其内电场极性随之反转, 说明水泥基材料具有驻极体的特性, 即自发极化。对于传统的介电材料而言, 一般需要通过在硅油环境下通高强电场的方式才能让材料内部出现极化电场。但当极化结束后, 材料内部的电场强度随着时间的延长而减小, 表明去极化过程自然发生。说明材料的极化状态为热力学不平衡状态, 而去极化状态为热力学平衡状态。水泥基材料中的内电场并不需要外部极化来产生和维系, 说明水泥基材料的极化状态为热力学平衡状态, 相似的现象也出现在石墨^[75]、银锡合金^[76]、碳纤维^[77]及其聚合物基和碳基复合材料^[78]、柔性石墨^[79]等中。水泥基材料中的驻极体由电偶极子构成, 电偶极子又是由孔隙溶液中溶解的离子与原子相互作用构成。驻极体中的电偶极子可能的分布形式如图 4 所示, 分为多个微小的电偶极子串联排列或整个电偶极子单独存在。

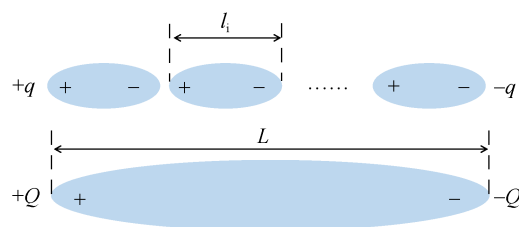


图 4 驻极体中电偶极子可能的排布形式
Fig. 4 Possible alignments of electric dipoles in an electret

由极化 γ 产生的电场强度 E_γ 可以通过以下方式计算:

由极化产生的偶极矩 μ 为:

$$\mu = \eta q l \quad (6)$$

式中: q 为单位正电荷所带的电量 (1.6×10^{-19} C); η 为所带单位电荷的数量, 则 ηq 为电偶极子两端的电量; l 为测量的长度。

对 l 进行微分可得:

$$\frac{d\mu}{dl} = \eta q \quad (7)$$

根据定义, 极化 γ 为单位体积内的偶极矩, 因此由式(6)可得:

$$\frac{d\mu}{dl} = \left(\frac{d\gamma}{dl} \right) V = \eta q \quad (8)$$

式中: N 为被测材料的体积。

由此, 电场强度 E_γ 可通过式(9)计算^[80]:

$$\gamma = \varepsilon_0 (\kappa - 1) E_\gamma \quad (9)$$

式中: ε_0 为真空中的介电常数(8.85×10^{-12} F/m); κ 为相对介电常数。

联合式(8)和式(9)可得:

$$\frac{dE_\gamma}{dl} = \frac{\eta q}{\varepsilon_0 (\kappa - 1) V} \quad (10)$$

对文献[6]中的数据进行拟合可求得硬化水泥净浆的 dE_γ/dl 为 (31.74 ± 1.09) V/m², 计算所使用的体积为 3.84×10^{-6} m³, 但文献[6]中的介电常数为表观介电常数, 不适用于此处计算, 因此采用文献[81]中的介电常数值 28.6(文献[6, 81]中的硬化水泥净浆的水灰比均为 0.35)。由此可计算出硬化水泥净浆的 η 为 412 ± 14 。文献[77]报道了碳纤维的 η 值为 0.16, 这是因为碳纤维的电导率比硬化水泥净浆的大, 因此无法在内部维系较大的内电场。硬化水泥净浆的 ηq 为 2.6×10^{-17} C, 由此可见电偶极子两端的电量很小, 表明水泥基材料中的电偶极子应符合图 4 中的串联模型, 即单个电偶极子的长度 l_i 远远小于测量的材料长度 l 。对经典电容公式 $C=Q/V$ 进行变形可得 $1/C=V/Q$, 当测量距离 l 增大, V 随之增大, 只有当 Q 不变时, $1/C$ 才会与 l 成线性增大的关系。说明电偶极子之间通过串联形式连接, 由此, 无论测量距离多大, 电量始终为单个电偶极子的电量(中间的部分由等量的正负电荷相互抵消)。如果驻极体中只有一个电偶极子, 那么 Q 会随着 l 的增大而增大, 如此一来 $1/C$ 与 l 之间就不是简单的线性关系, 这与众多实验现象不符。

3 水灰比、功能填料、矿物掺和料、

聚合物改性剂和骨料对水泥基材料介电性能的影响

3.1 水灰比的影响

图 5 为水灰比对硅酸盐硬化水泥净浆直流极化的影响。由图 5 可见: 水灰比越小, 表观电阻率的增长率越小, 表明极性水分子对极化下载荷子的移动起到阻碍作用; 对于同一水灰比, 表观电阻率的增长速度随着通电时间的增长而逐渐减小, 这是因为极化形成的电场阻碍电荷子的移动, 即阻碍极化

的进一步发展^[74]。

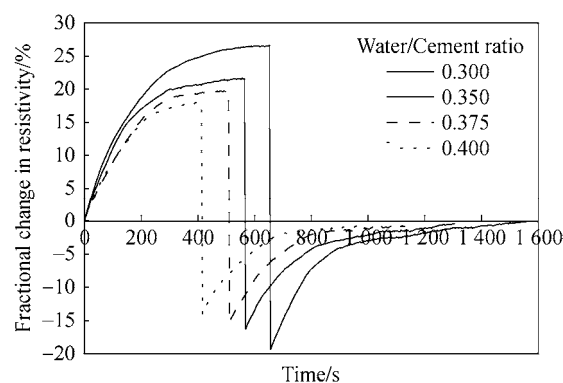


图 5 水灰比对表观电阻率的影响(电流: 1 μ A)^[74]

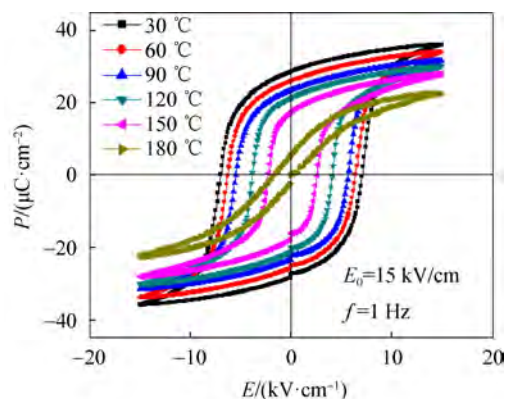
Fig. 5 Effect of water/cement ratio on the apparent resistivity of cured cement paste (current: 1 μ A)^[74]

当水灰比为 0.35 时, 硬化水泥净浆的介电常数为 28.6 ± 3.4 ^[81]; 当水灰比为 0.45 时, 硬化水泥净浆的介电常数为 26.98 ± 0.90 ^[64]。水泥基材料的电导率会随着水化过程的进行而减小, 这归因于孔隙体积以及自由水含量逐渐减小^[82–86]; 水泥基材料的介电常数同样随着水化过程的进行而减弱^[18–21], 这是因为孔隙体积和自由水含量的减小导致孔隙溶液变稠, 使得电荷子移动变得困难。由此可见, 水泥基材料的导电性能和介电性能均与电荷子的浓度以及迁移率有关。当水泥基材料水化结束后, 其介电常数因为相同的原因随着环境湿度的增大而增大^[87]。水泥基材料中的可蒸发水主要包括化学结合水、物理吸附水和毛细孔水。Gu 等^[88]发现养护后水泥净浆的介电常数与其内部的可蒸发水含量近似成线性关系, 即可蒸发水含量越大, 介电常数越大。

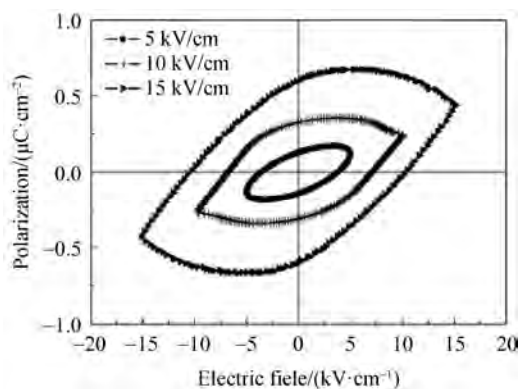
3.2 功能填料的影响

在水泥基材料直流极化条件下, 表观电阻率随着去极化的过程而增大^[74]。当表观电阻率大于初始电阻率时, 表明材料具有铁电性能, 即极化方向随着外电场方向的改变而改变, 且与外电场改变后极化方向改变需要的时间无关。图 5 表明硬化水泥净浆不具有铁电性能, 但在水泥净浆中添加短切碳纤维后出现了铁电性能^[81]。值得注意的是, 水泥基材料在直流电下的铁电性能与传统陶瓷材料在交流电下的铁电性能的曲线形态不同, 后者通常为电滞回线^[89–91]。图 6 为陶瓷材料、陶瓷填充水泥基材料和碳纤维填充水泥基材料的铁电性能曲线^[81, 92–93]。陶瓷等非导体材料的铁电性能不在讨论的范围之内。Wen 等^[81]发现使用结晶度更高、导电性更好的碳纤维填充水泥净浆没有表现出铁电性

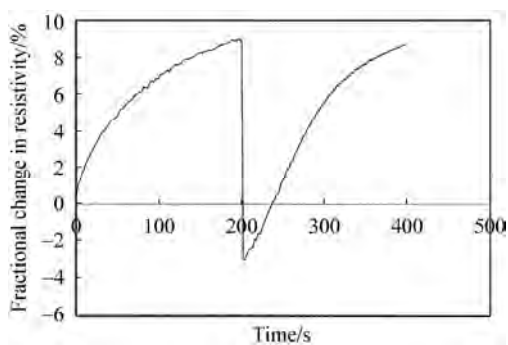
能,具体原因还有待进一步研究。Yang 等^[76]首次在银锡合金中发现了类似的直流电作用下的铁电性能。银锡合金是电子导体,载荷子浓度和迁移率更大。其他如碳纤维^[94]、石墨^[95]等虽然均为电子导体,但铁电性能却很弱。



(a) Effect of temperature on ferroelectric behavior of $\text{Pb}(\text{Mg}_{1/3}\text{Nb}_{2/3})\text{O}_3\text{-PbTiO}_3$ (PMN-PT) (AC electric field: 15 kV/cm, AC frequency: 1 Hz)^[92]



(b) Effect of AC electric field on ferroelectric behavior of cured cement paste containing 50% (in volume) BiTO_3 ^[93]



(c) DC current induced ferroelectric behavior of cured cement paste containing 0.5% by mass of cement (DC current: 70 nA)^[81]

图 6 几种材料的铁电性能曲线^[81, 92-93]

Fig. 6 Ferroelectric curves of three materials^[81, 92-93]

碳纤维水泥基材料是一种混合型导体材料,载荷子为孔隙溶液中的阴阳离子以及碳纤维中的电子/空穴^[96-98]。碳纤维水泥基材料中有不同种类的

载荷子,表明其为混合电介质材料。短切碳纤维(0.48%)的加入使硬化水泥净浆的介电常数从 21 增大至 54 (10 kHz),当碳纤维的体积分数增大至 0.95% (大于逾渗阈值)时,复合材料的介电常数从 59 减小至 49^[38]。碳纤维的加入增大了水泥基材料的介电常数,其原因可归结于碳纤维本身的介电常数很大,如 Eddib 等^[13]发现沥青基碳纤维的介电常数高达 4 960,而 Xi 等^[14]发现聚丙烯腈基碳纤维的介电常数更是高达 12 230,是因为聚丙烯腈基碳纤维的石墨化程度比沥青基碳纤维的高。但当碳纤维含量大于逾渗阈值时,复合材料的介电常数出现略微下降,可能是因为导电性提高后导致的介电损耗^[99]。由此可见,水泥基材料的导电性能会影响其介电性能,这符合 Kramers-Kronig 关系^[100],即复介电常数的实部为本文中提到的介电常数,虚部为介电损耗。材料的介电损耗包括电导率和偶极摩擦^[101]。

3.3 矿物掺和料的影响

在水泥基材料中添加矿物掺和料可达到减少水泥用量,改善混凝土的工作性能;降低胶凝材料水化热;提高混凝土的抗渗性和抗化学腐蚀能力等目的。矿物掺和料同样也会影响水泥基材料的介电常数,主要通过影响水泥基材料的孔隙率、孔隙尺寸、孔隙连接性以及孔隙溶液的成分等。矿物掺和料与水泥基体之间的界面也会影响介电常数^[102]。研究人员发现,影响水泥基材料介电常数的矿物掺和料包括硅灰^[103-104]、粉煤灰^[105]、磨细矿渣^[105]等。

硅灰是水泥基材料常用的掺和料之一,能起到细化孔隙结构的作用^[103],用于减小材料的渗透性并改善抗压模量和强度^[104]。Wen 等^[38]发现添加 15%(质量分数)的硅灰后硬化水泥净浆的介电常数由 29 减小至 21。这主要是因为: 1) 部分水泥被硅灰取代导致介电性能被“稀释”; 2) 孔隙尺寸减小阻碍了载荷子的移动; 3) 二氧化硅颗粒阻碍了载荷子的移动。硅灰同样会减弱直流电下的极化性能^[81]。在含硅灰的水泥净浆中添加 0.5%(体积分数)的纳米石墨片会使复合材料的介电常数从 22 降低至 11,因为纳米石墨片阻碍了载荷子的运动^[56]。即使在纳米石墨片与水泥基体接触的情况下,水泥基孔隙溶液中的离子也无法进入纳米石墨片,因此,少量的纳米石墨片并不会改变复合材料的电阻率^[56]。

史美伦等^[106]发现混凝土的力学强度与其结构中的 C-S-H 凝胶的静电力直接相关,因此, C-S-H 凝胶内的电容便与力学强度相关,通过对电容的测定

可分析混凝土中矿物掺和料的活性。钟伟荣等^[105]发现含粉煤灰、钢渣微粉、矿渣微粉的混凝土抗压强度与电容呈 6 阶多项式关系。史美伦等^[107–109]发现, 在干燥状态下矿物掺和料具有电解质的阻抗谱特征, 同时其阻抗值处在电介质的阻抗范围内, 因此矿物掺和料的电学特性介于电介质与电解质之间。在含水的状态下, 不同矿物掺和料进行水化反应的速率不同, 在同等时间内消耗的水量也不相同, 因此不同矿物掺和料加水调成浆体后的阻抗谱可以用来标志水化反应速率: 水化反应速率越大, 电阻越小, 则形成的凝胶越多, 容抗越小, 电容越大。矿物掺和料的细度对水泥水化过程也有影响, 如粉煤灰磨细后有碱性物质溶入孔溶液中, 抑制了水化过程。

3.4 聚合物改性剂的影响

聚合物改性剂通常用于改善水泥基材料的韧性以及抗渗性^[110–111]。常用的聚合物改性剂并不导电, 因此其在水泥基材料中会阻碍载荷子的移动, 但聚合物改性剂却能增大水泥基材料的介电常数。甲基纤维素和乳胶是 2 种常用的聚合物改性剂, 前者通常在混合水泥灰之前先被溶解在水中, 后者为丁苯共聚物, 在混合水泥灰之前先被分散在水中但不会被溶解。Wang 等^[64]发现 1.4%(质量分数)的甲基纤维素能使硬化水泥净浆(水灰比 0.45)的介电常数从 27 增大至 52(2 kHz), 14%(质量分数)的乳胶能使硬化水泥净浆(水灰比 0.45)的介电常数从 27 增大至 43(2 kHz)。水泥基材料介电性能得到增强归因于甲基纤维素/乳胶–水泥基体界面电容的存在。从文献[64]中关于介电常数的电路模型可知聚合物与水泥基体之间的界面对复合材料介电性能的影响要大于聚合物本身的影响。该等效电路模型中水泥基体、聚合物、聚合物–水泥基体界面三者为并联关系, 串联模型下的结果与试验结果不符。随着聚合物/水泥比例增大, 聚合物–水泥基体界面和聚合物对复合材料的介电常数影响增大, 而水泥对复合材料介电常数的影响减小。对于相同聚合物/水泥比例, 甲基纤维素的影响比乳胶的大, 主要是因为均匀分散在水中的纳米尺度的甲基纤维素导致复合材料中单位体积内甲基纤维素–水泥基体界面面积更大^[64]。无论空间电荷极化是否存在, 在界面处都存在着界面电容。通过甲基纤维素和乳胶对水泥基材料介电性能影响的研究发现, 水泥基材料的介电性能不仅依赖于孔隙溶液中阴阳离子的移动, 还依赖于聚合物–水泥基体界面。

3.5 骨料的影响

粗(砾石等)、细(河砂等)骨料通常用于结构型水泥基材料中, 它们能增强材料、减小干缩并降低材料成本^[112]。目前, 骨料对水泥基材料介电性能的影响研究鲜有报道。Cao 等^[113]认为骨料对水泥基材料的介电性能起到“稀释”的作用, 这归因于骨料颗粒中的同质性和水泥基体中的异质性。异质性有利于增强材料的介电性能, 因为部分载荷子可与异质结构处的原子发生相互作用, 如晶界、相界等^[15]。通常情况下, 水泥基材料中骨料含量从低到高为: 水泥净浆、砂浆、混凝土, 因此水泥基材料的介电常数从低到高为: 混凝土、砂浆、水泥净浆。在水泥净浆中添加细骨料会增加其电阻率并增强其在直流下的极化^[15]。直流电下极化的增强可能是因为电阻率越大, 材料内部能维系的极化电场也越大。但电阻率越大, 介电常数未必越大, 因为影响介电常数有别的因素^[16, 67]。Cao 等^[113]发现在水泥净浆中添加细骨料会减缓直流电下的去极化过程。直流电下的去极化过程比极化过程缓慢是因为离子被捕获, 这也是水泥基材料中驻极体形成的原因^[6]。

4 温度对水泥基材料介电性能的影响

Cao 等^[113]发现在直流电作用下, 50 °C 时硬化水泥净浆表观电阻率的增长率比在室温下的大。在交流电作用下, 硬化水泥净浆的介电常数也随着温度的升高而增大, 电极布置包括平行板电容器结构(“三明治”结构)^[114]和共平面结构^[6]。三明治结构测量下的介电常数是有效介电常数, 因为该测量结构几乎不受边缘电场的影响^[115]; 而共面测量法因受边缘电场的影响, 导致测量的介电常数为表观介电常数, 但共面法更适合大型结构的测量。温度对水泥基材料在交流/直流电下的介电常数的影响主要归因于温度对离子的影响, 而不是对极性水分子排列的影响。水泥基材料的介电常数随着温度的升高而增大, 这表明温度升高增强了载荷子的迁移率。文献[6, 114]中的温升最高仅为 70 °C, 而水泥基结构在更高温度下的介电性能更为复杂, 因为高温会导致水泥基材料的热损伤^[116]。温度对介电常数的影响一般定义为热介电常数^[117]。热介电常数不同于热释电效应^[118], 后者是温度变化导致了极化电量的变化, 表现形式为材料的输出电压随温度变化, 但并不需要介电常数随温度变化, 但二者都表现出了温度对材料介电性能的影响, 基于此影响可实现材料

对自身温度的自感知以及研制将热能转化为电能的装置^[118]。

从图 7 可以看出硬化水泥净浆(水灰比 0.35)的电容测量值、接触电容和表观介电常数均随温度的升高而增大、温度的降低而减小^[6], 表明了温度对硬化水泥净浆介电性能的影响具有可逆性, 而可逆性是将水泥基材料实现温度自感知的重要要求之

一。在同样温升的条件下, 表观介电常数的增长率(20%)大于电容测量值的增长率(13%), 这是因为温升除了增大水泥净浆的体积电容, 还增大了电极与水泥净浆之间的接触电容。接触电容的增大是因为温升增加了介电层的流动性, 改善了电极与被测材料之间的接触, 由此可见, 接触电容并非理想假设中的无穷大^[6]。

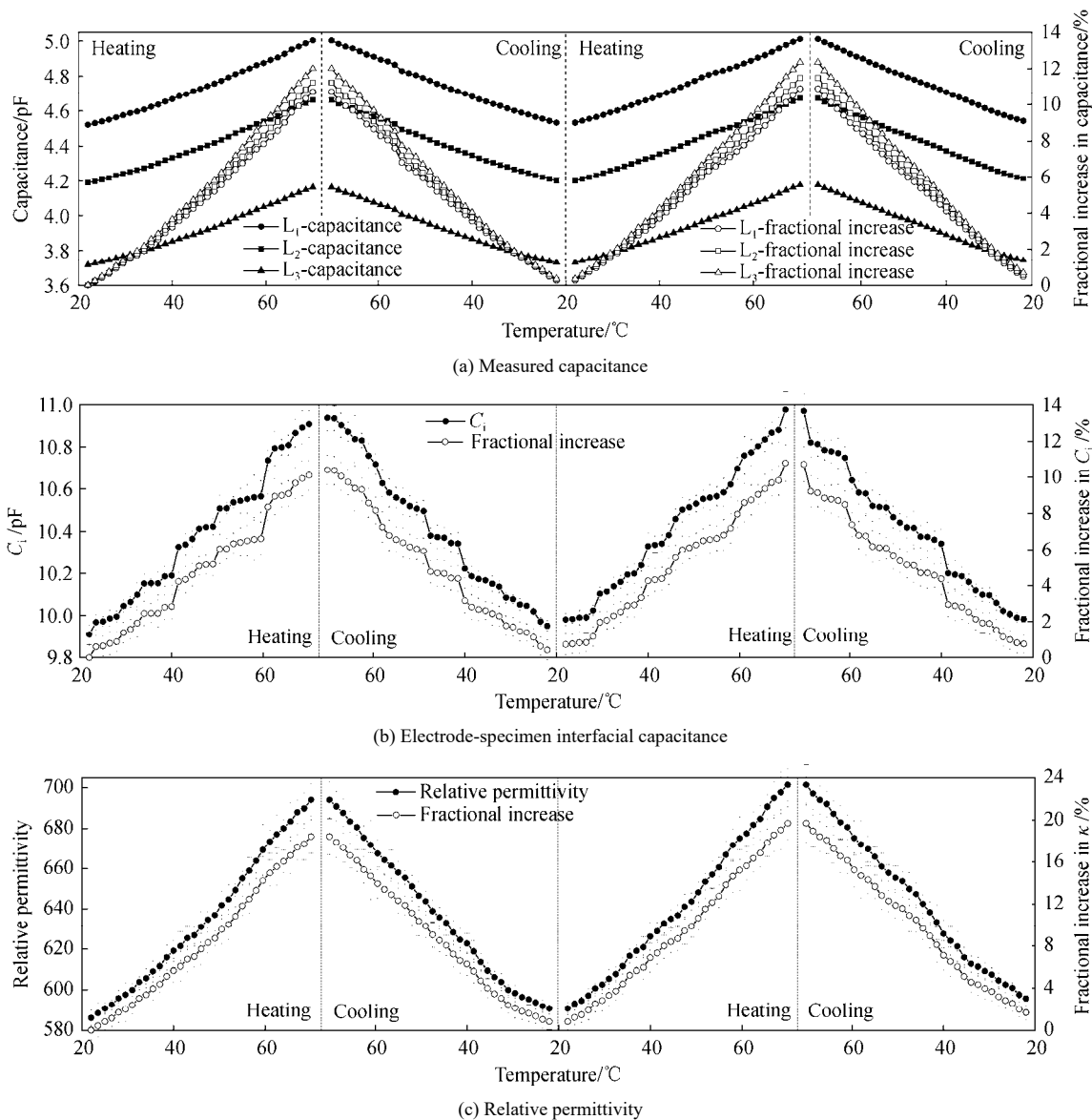


图 7 温度对硬化水泥净浆介电性能的影响(水灰比: 0.35)^[6]

Fig. 7 Effect of temperature on dielectric behavior of cured cement paste (water/cement ratio=0.35)^[6]

5 应力/应变对水泥基材料介电性能的影响

应力/应变对水泥基材料介电性能的影响分为在直流电下的影响以及在交流电下的影响。在直流

电作用下, Wang 等^[67]发现压应力能减小水泥基材料表观电阻率的增长率, 在交流电下则表现为水泥基材料的电容随压应力的增大而增大^[22]。由此可见, 压应力对水泥基材料在直流电和交流电下介电性能的影响截然不同。从图 8a 可以看出, 在低载荷下硬化水泥净浆的电容随压应力变化而发生的

改变是可逆的。但在高载荷下(图 8b)表现出了一定程度的不可逆性,原因是高载荷下水泥基材料内部出现了不可逆的损伤如裂纹等。图 8a 中电容能监测到的最小应力变化为 0.2 kPa,该灵敏度高于基于电阻的含短切碳纤维的水泥基材料对压应力的灵敏度^[119]。水泥基材料电容随应力/应变的变化而改变主要是因为水泥基材料的介电常数随应力/应变的变化而改变。介电常数随应力/应变的变化而改变的现象称为压介效应^[120],这与传统的压电效应不同,后者是参与极化的电量随应力/应变的变

化而改变,而并不要求介电常数也随之变化。研究人员将压电陶瓷 PZT 加入到水泥基材料中得到的压电现象属于后者,表现形式为水泥基材料的输出电压随应力/应变的变化而改变^[121–123]。1997 年 Fu 等^[124]首次报道了含短切碳纤维的硬化水泥净浆的电抗在力的方向上随着压应力增大而增大。电抗与电容成负相关,因此可以推断含短切碳纤维的硬化水泥净浆的电容在力的方向上随着压应力的增大而减小,但这与后来报道的水泥基材料的电容在力的方向上随压应力的增大而增大的结论相

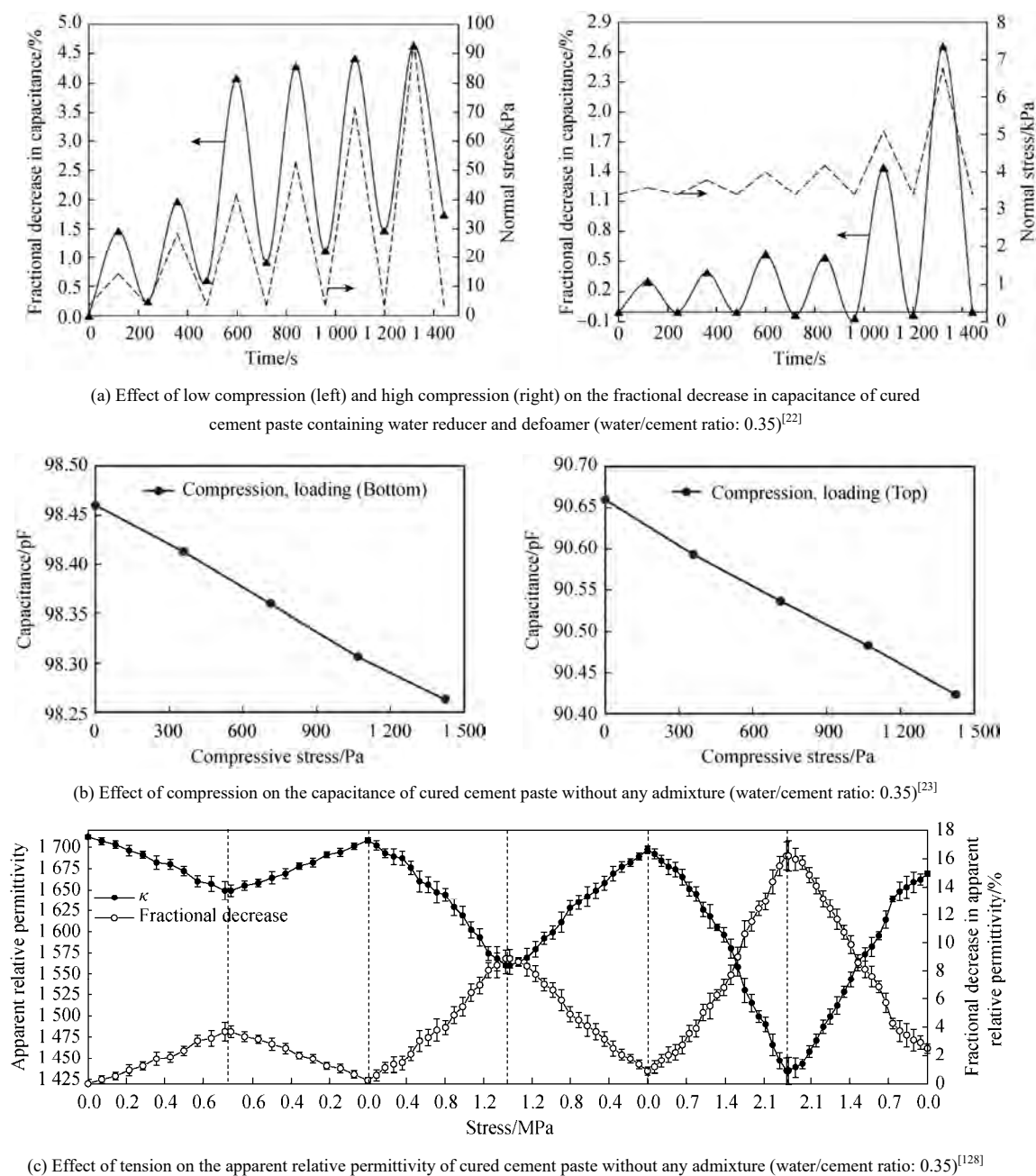


图 8 应力/应变对硬化水泥净浆介电性能的影响^[22–23, 129]

Fig. 8 Effect of stress/strain on the dielectric behavior of cured cement paste^[22–23, 129]

反。Wen 等^[125-126]在 2002 年报道了硬化水泥净浆(包括无外掺物和含外掺物碳纤维、碳纳米纤维和钢纤维)的介电常数在力的方向上随着压应力的增大而增大。2011 年 Wang 等^[127]报道了含碳纤维和粉煤灰的硫铝酸钙水泥的介电常数在力的方向上也随压应力的增大而增大。2018 年 Wen 和 Shi 等^[22-23]报道了不含任何外掺物的硬化水泥净浆的电容在与力方向垂直的方向上随着压应力的增大而减小(图 8a 和 8b)。根据 Possion 效应, 在力方向上的电容随着压应力的增大而增大。2022 年 Chung^[128]报道了不含任何外掺物的硬化水泥净浆的电容和介电常数在力的方向上随着拉应力的增大而减小(图 8c)。在力方向上电容在拉应力和压应力下的相反表现符合 Possion 效应的特征。但 1997 年报道的电抗随压应力的增大而增大, 与 2002 年后系列报道的电容随压应力的增大而增大相矛盾, 这可能与阻抗的测量有关。阻抗是一个复数量, 其值由实部(电阻)和虚部(与电容成负相关)组成。实验发现^[124], 阻抗的实部和虚部均随压应力的增大而增大, 但压应力下电阻的增大与大量关于基于电阻的自感知水泥基材料的结论相悖: 自感知水泥基材料的电阻随着压应力的增大而减小^[129]。其原因主要为 1997 年的报道中使用的是二电极法, 没有去除电接触对抗测量的影响。由此可见, 无论是否含有碳纤维等导电外掺物, 水泥基材料的电容在力方向上随压应力的增大而增大, 随拉应力的增大而减小。从图 8 可以看出, 电容随应力/应变变化而发生的改变具有一定的可逆性, 其原因归结于应力/应变变化下可逆的微结构的改变, 例如孔隙结构的改变, 从而影响载荷子的移动。

6 结论与展望

本文从理论和实验层面综述了近 20 年来水泥基材料在低频条件下介电性能的研究概况。极化是介电性能最主要的表现形式, 在直流电或交流电下均会产生极化, 但交流电下的极化弱于直流电下的极化, 因为载荷子在交流电和直流电作用下的运动形式不同。直流电下的极化通常会影响到导电水泥基材料的应用, 例如会导致在自感知研究中的电阻率在未受载时随通电时间的增长而增大。交流电下的极化则有利于研究基于电容或介电常数的自感知行为。但水泥基材料是一种复杂的多相材料, 水泥的种类、成分、骨料、掺和料、外加剂等均会影响水泥基材料的微观结构, 进而影响其介电性能。介电

性能比导电性能对材料的微观结构更敏感, 故在后续的研究中, 需要注意以下几点:

- 1) 胶凝材料的种类, 如硅酸盐水泥、铝酸盐水泥、硫铝酸盐水泥等对水泥基材料介电性能的影响。
- 2) 纤维增强水泥基材料中, 纤维排布的择优取向对复合材料介电性能的影响。
- 3) 在基于电容或介电常数的应力/应变研究中, 如何减轻边缘电场对介电参数测量的影响。
- 4) 电接触的质量优化设计, 一方面需尽可能地增大接触电容, 另一方面需保证电极材料和水泥基材料之间连接的可靠性。

相信随着研究的不断深入以及多学科之间的交叉融合, 上述问题终将得到解决, 为推广应用水泥基材料的介电性能奠定理论基础。

参考文献:

- [1] 同月苹, 王艳, 张少辉. 隧道衬砌纤维混凝土力学性能与耐久性能的研究进展[J]. 材料科学与工程学报, 2022, 40(3): 528-536.
TONG Yueping, WANG Yan, ZHANG Shaohu. J Mater Sci Eng(in Chinese), 2022, 40(3): 528-536.
- [2] EBOLOR A. Backcasting frugally innovative smart sustainable future cities[J]. J Clean Prod, 2023, 383: 135300.
- [3] 刘金涛, 黄存旺, 杨杨, 等. 三维石墨烯-碳纳米管/水泥净浆的压敏性能[J]. 复合材料学报, 2022, 39(1): 313-321.
LIU Jintao, HUANG Cunwang, YANG Yang, et al. Acta Mater Compos Sin(in Chinese), 2022, 39(1): 313-321.
- [4] SAJID H U, JALAL A, KIRAN R, et al. A survey on the effects of deicing materials on properties of Cement-based materials[J]. Constr Build Mater, 2022, 319: 126062.
- [5] 王飞, 代伟, 毛英辉, 等. 防护工程电磁屏蔽混凝土电磁损耗及屏蔽性能研究. 混凝土, 2022, 12: 185-188.
WANG Fei, DAI Wei, MAO Yinghui, et al. Concrete, 2022, 12: 185-188.
- [6] XI X, CHUNG D D L. Deviceless cement-based structures as energy sources that enable structural self-powering[J]. Appl Energy, 2020, 280: 115916.
- [7] ZHANG E Q, TANG L P. Rechargeable concrete battery[J]. Buildings, 2021, 11(3): 103.
- [8] 曹亚龙, 徐金霞, 蒋林华, 等. 自感知镍纳米线/水泥基复合材料的制备及压敏性能[J]. 复合材料学报, 2018, 35(4): 957-963.
CAO Yalong, XU Jinxia, JIANG Linhua, et al. Acta Mater Compos Sin(in Chinese), 2018, 35(4): 957-963.
- [9] 董必钦, 殷慧, 邢锋, 等. 碳纤维水泥基复合材料电阻特性的研究[J]. 建筑材料学报, 2007, 10(5): 538-542.
DONG Biqin, YIN Hui, XING Feng, et al. J Build Mater(in Chinese), 2007, 10(5): 538-542.
- [10] 秦煜, 阮鹏臻, 唐元鑫, 等. 碳纳米管水泥基复合材料导电特性影响因素研究进展[J]. 硅酸盐学报, 2021, 49(2): 411-419.
QIN Yu, RUAN Pengzhen, TANG Yuanxin, et al. J Chin Ceram Soc, 2021, 49(2): 411-419.

- [11] SALAMI N, SHOKRI A, ESRAFIAN M. Vertical quantum tunneling transport based on MoS₂/WTe₂ nanoribbons[J]. *Phys Lett A*, 2022, 445: 128228.
- [12] JONSCHER A K. Dielectric relaxation in solids[J]. *J Phys D: Appl Phys*, 1999, 32(14): R57–R70.
- [13] EDDIB A A, CHUNG D D L. Electric permittivity of carbon fiber[J]. *Carbon*, 2019, 143: 475–480.
- [14] XI X, CHUNG D D L. Colossal electric permittivity discovered in polyacrylonitrile (PAN) based carbon fiber, with comparison of PAN-based and pitch-based carbon fibers[J]. *Carbon*, 2019, 145: 734–739.
- [15] XI X, CHUNG D D L. Role of grain boundaries in the dielectric behavior of graphite[J]. *Carbon*, 2021, 173: 1003–1019.
- [16] CHUNG D D L, XI X. Factors that govern the electric permittivity of carbon materials in the graphite allotrope family[J]. *Carbon*, 2021, 184: 245–252.
- [17] MAKUL N. Dielectric permittivity of various cement-based materials during the first 24 hours hydration[J]. *Open J Inorg Non-Met Mater*, 2013, 3: 53–57.
- [18] 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. *J Build Mater(in Chinese)*, 2000, 3(2): 109–112.
- [19] 史美伦, 张莹. 水泥水化早中期的交流阻抗研究(I): 起始期的交流阻抗响应分析[J]. *建筑材料学报*, 2002, 5(3): 210–214.
SHI Meilun, ZHANG Ying. *J Build Mater(in Chinese)*, 2002, 5(3): 210–214.
- [20] 史美伦, 张莹. 水泥水化早中期的交流阻抗研究(II): 诱导期到减速期的交流阻抗响应[J]. *建筑材料学报*, 2002, 5(4): 331–335.
SHI Meilun, ZHANG Ying. *J Build Mater(in Chinese)*, 2002, 5(4): 331–335.
- [21] 陈向荣, 史美伦, 贺鸿珠, 等. 水硬性胶凝材料水化性质评估的阻抗方法[J]. *建筑材料学报*, 2011, 14(1): 22–25.
CHEN Xiangrong, SHI Meilun, HE Hongzhu, et al. *J Build Mater(in Chinese)*, 2011, 14(1): 22–25.
- [22] CHUNG D D L, WANG Y L. Capacitance-based stress self-sensing in cement paste without requiring any admixture[J]. *Cem Concr Compos*, 2018, 94: 255–263.
- [23] SHI K R, CHUNG D D L. Piezoelectricity-based self-sensing of compressive and flexural stress in cement-based materials without admixture requirement and without poling[J]. *Smart Mater Struct*, 2018, 27(10): 105011.
- [24] CHUNG D D L. Self-sensing concrete: From resistance-based sensing to capacitance-based sensing[J]. *Int J Smart Nano Mater*, 2021, 12(1): 1–19.
- [25] WANG Y L, CHUNG D D L. Capacitance-based defect detection and defect location determination for cement-based material[J]. *Mater Struct*, 2017, 50(6): 1–13.
- [26] WANG Y, CHUNG D D L. Capacitance-based nondestructive detection of aggregate proportion variation in a cement-based slab[J]. *Compos Part B: Eng*, 2018, 134: 18–27.
- [27] VOSS A, POUR-GHAZ M, VAUHKONEN M, et al. Electrical capacitance tomography to monitor unsaturated moisture ingress in cement-based materials[J]. *Cem Concr Res*, 2016, 89: 158–167.
- [28] VOSS A, HÄNNINEN N, POUR-GHAZ M, et al. Imaging of two-dimensional unsaturated moisture flows in uncracked and cracked cement-based materials using electrical capacitance tomography[J]. *Mater Struct*, 2018, 51(3): 68.
- [29] 杨森, 王远贵, 齐孟, 等. 氧化石墨烯对多壁碳纳米管掺配水泥砂浆强度、压敏性能与微观结构的影响[J]. *复合材料学报*, 2022, 39(5): 2340–2355.
YANG Sen, WANG Yuanguai, QI Meng, et al. *Acta Mater Compos Sin(in Chinese)*, 2022, 39(5): 2340–2355.
- [30] 赵昕, 黄存旺, 傅佳丽, 等. 石墨烯水泥基复合材料的电学性能[J]. *建筑材料学报*, 2022, 25(1): 8–15.
ZHAO Xin, HUANG Cunwang, FU Jiali, et al. *J Build Mater(in Chinese)*, 2022, 25(1): 8–15.
- [31] 刘卫森, 郭英健, 胡捷, 等. 碳纤维-碱激发砂浆自感知性能[J]. *硅酸盐学报*, 2021, 49(7): 1510–1518.
LIU Weisen, GUO Yingjian, HU Jie, et al. *J Chin Ceram Soc*, 2021, 49(7): 1510–1518.
- [32] KEDDAM M, TAKENOUTI H, NÓVOA X R, et al. Impedance measurements on cement paste[J]. *Cem Concr Res*, 1997, 27(8): 1191–1201.
- [33] WANG H, SHEN J L, LIU J Z, et al. Influence of carbon nanofiber content and sodium chloride solution on the stability of resistance and the following self-sensing performance of carbon nanofiber cement paste[J]. *Case Stud Constr Mater*, 2019, 11: e00247.
- [34] HU X, SHI C J, YUAN Q, et al. AC impedance spectroscopy characteristics of chloride-exposed cement pastes[J]. *Constr Build Mater*, 2020, 233: 117267.
- [35] DONG B Q, WU Y S, TENG X J, et al. Investigation of the Cl⁻ migration behavior of cement materials blended with fly ash or/and slag via the electrochemical impedance spectroscopy method[J]. *Constr Build Mater*, 2019, 211: 261–270.
- [36] MELARA E K, MENDES A Z, ANDRECZEVECZ N C, et al. Monitoring by electrochemical impedance spectroscopy of mortars subjected to ingress and extraction of chloride ions[J]. *Constr Build Mater*, 2020, 242: 118001.
- [37] HOU W, HE F Q, LIU Z Q. Characterization methods for sulfate ions diffusion coefficient in calcium sulphoaluminate mortar based on AC impedance spectroscopy[J]. *Constr Build Mater*, 2021, 289: 123169.
- [38] XI X, CHUNG D D L. Effects of cold work, stress and temperature on the dielectric behavior of copper[J]. *Mater Chem Phys*, 2021, 270: 124793.
- [39] LIU W, YIN J N, WANG J H, et al. Dielectric and piezoelectric behavior of PVDF-modified 3-3 type cement-based piezoelectric composites[J]. *Smart Mater Struct*, 2021, 30(12): 125021.
- [40] 张然, 刘磊, 刘岩. 膨胀石墨制备及其对柔性石墨抗拉强度的影响[J]. *非金属矿*, 2021, 44(3): 60–63.
ZHANG Ran, LIU Lei, LIU Yan. *Non Met Mines(in Chinese)*, 2021, 44(3): 60–63.
- [41] CHUNG D D L. A review of exfoliated graphite[J]. *J Mater Sci*, 2016, 51(1): 554–568.
- [42] LEONG C K, AOYAGI Y, CHUNG D D L. Carbon black pastes as coatings for improving thermal gap-filling materials[J]. *Carbon*, 2006, 44(3): 435–440.
- [43] WANG S K, PANG D S, CHUNG D D L. Hygrothermal stability of electrical contacts made from silver and graphite electrically conductive pastes[J]. *J Electron Mater*, 2007, 36(1): 65–74.

- [44] WANG L N, ASLANI F. Electrical resistivity and piezoresistivity of cement mortar containing ground granulated blast furnace slag[J]. *Constr Build Mater*, 2020, 263: 120243.
- [45] TAO J, WANG X H, WANG Z D, et al. Graphene nanoplatelets as an effective additive to tune the microstructures and piezoresistive properties of cement-based composites[J]. *Constr Build Mater*, 2019, 209: 665–678.
- [46] CHUNG D D L. Pitfalls and methods in the measurement of the electrical resistance and capacitance of materials[J]. *J Electron Mater*, 2021, 50(12): 6567–6574.
- [47] 秦昭巧, 陈新杰, 储洪强等. 镀镍碳纤维水泥基材料的电热性能研究[J]. *硅酸盐通报*, 2022, 41(3): 802–809.
- QIN Zhaoqiao, CHEN Xinjie, CHU Hongqiang, et al. *Bull Chin Ceram Soc(in Chinese)*, 2022, 41(3): 802–809.
- [48] 刘状壮, 张有为, 季鹏宇, 等. 电热型融雪路面技术研究综述[J]. *长安大学学报(自然科学版)*, 2022, 42(3): 14–25.
- LIU Zhuangzhuang, ZHANG Youwei, JI Pengyu, et al. *J Chang Univ Nat Sci Ed(in Chinese)*, 2022, 42(3): 14–25.
- [49] 袁小亚, 张维福, 曹潘磊, 等. 复掺石墨烯/氧化石墨烯改性砂浆电学与融雪化冰性能研究[J]. *功能材料*, 2021, 52(12): 12100–12110.
- YUAN Xiaoya, ZHANG Weifu, CAO Panlei, et al. *J Funct Mater(in Chinese)*, 2021, 52(12): 12100–12110.
- [50] WANG S, WEN S, CHUNG D D L. Resistance heating using electrically conductive cements[J]. *Adv Cem Res*, 2004, 16: 161–166.
- [51] FORD S J, HWANG J H, SHANE J D, et al. Dielectric amplification in cement pastes[J]. *Adv Cem Based Mater*, 1997, 5(2): 41–48.
- [52] COVERDALE R T, GARBOCZI E J, JENNINGS H M, et al. Computer simulation of impedance spectroscopy in two dimensions: Application to cement paste[J]. *J Am Ceram Soc*, 1993, 76(6): 1513–1520.
- [53] WANG A D, CHUNG D D L. Dielectric and electrical conduction behavior of carbon paste electrochemical electrodes, with decoupling of carbon, electrolyte and interface contributions[J]. *Carbon*, 2014, 72: 135–151.
- [54] BHATTACHARYA S, SACHDEV V K, CHATTERJEE R, et al. Decisive properties of graphite-filled cement composites for device application[J]. *Appl Phys A*, 2008, 92(2): 417–420.
- [55] SACHDEV V K, SHARMA S K, BHATTACHARYA S, et al. Electromagnetic shielding performance of graphite in cement matrix for applied application[J]. *Adv Mater Lett*, 2015, 6(11): 965–972.
- [56] HADDAD A S, CHUNG D D L. Decreasing the electric permittivity of cement by graphite particle incorporation[J]. *Carbon*, 2017, 122: 702–709.
- [57] 孙云龙, 李忠华, 索长友. 电导非线性对HVDC电缆绝缘空间电荷动态过程的影响[J]. *电机与控制学报*, 2019, 23(7): 27–37.
- SUN Yunlong, LI Zhonghua, SUO Changyou. *Electr Mach Control(in Chinese)*, 2019, 23(7): 27–37.
- [58] 查俊伟, 田娅娅, 刘雪洁, 等. 本征型耐高温聚酰亚胺储能电介质研究进展[J]. *高电压技术*, 2021, 47(5): 1759–1770.
- ZHA Junwei, TIAN Yaya, LIU Xuejie, et al. *High Volt Eng(in Chinese)*, 2021, 47(5): 1759–1770.
- [59] GUIHARD V, TAILLADE F, BALAYSSAC J P, et al. Permittivity measurement of cementitious materials with an open-ended coaxial probe[J]. *Constr Build Mater*, 2020, 230: 116946.
- [60] 黄威, 王轩, 李永清, 等. 微波吸收材料电磁特性响应规律及影响因素研究进展[J]. *材料导报*, 2023, 37(7): 21090051.
- HUANG Wei, WANG Xuan, LI Yongqing, et al. *Mater Rep(in Chinese)*, 2023, 37(7): 21090051.
- [61] WU Y H, HAN M G, LIU T, et al. Studies on the microwave permittivity and electromagnetic wave absorption properties of Fe-based nano-composite flakes in different sizes[J]. *J Appl Phys*, 2015, 118(2): 023902.
- [62] CHUNG D D L, XI X. A review of the colossal permittivity of electronic conductors, specifically metals and carbons[J]. *Mater Res Bull*, 2022, 148: 111654.
- [63] PENG Y Z, GONG F Y, WANG Z, et al. Experimental study on time-dependent dc resistivity of cement-based material considering microstructure and ion concentration[J]. *Constr Build Mater*, 2023, 363: 129830.
- [64] WANG M, CHUNG D D L. High electric permittivity of polymer-modified cement due to the capacitance of the interface between polymer and cement[J]. *J Mater Sci*, 2018, 53(10): 7199–7213.
- [65] DONG W K, LI W G, VESSALAS K, et al. Piezoresistivity deterioration of smart graphene nanoplate/cement-based sensors subjected to sulphuric acid attack[J]. *Compos Commun*, 2021, 23: 100563.
- [66] LIU L Y, XU J X, YIN T J, et al. Improved conductivity and piezoresistive properties of Ni-CNTs cement-based composites under magnetic field[J]. *Cem Concr Compos*, 2021, 121: 104089.
- [67] WANG H, ZHANG A L, ZHANG L C, et al. Electrical and piezoresistive properties of carbon nanofiber cement mortar under different temperatures and water contents[J]. *Constr Build Mater*, 2020, 265: 120740.
- [68] AMANI N, VIPULANANDAN C, PLANK J. Monitoring the hydration and strength development in piezoresistive cement admixed with superplasticizer and retarder additives[J]. *J Petroleum Sci Eng*, 2020, 195: 107601.
- [69] DONG W K, LI W G, GUO Y P, et al. Mechanical properties and piezoresistive performances of intrinsic graphene nanoplate/cement-based sensors subjected to impact load[J]. *Constr Build Mater*, 2022, 327: 126978.
- [70] DONG W K, LI W G, GUO Y P, et al. Piezoresistive performance of hydrophobic cement-based sensors under moisture and chloride-rich environments[J]. *Cem Concr Compos*, 2022, 126: 104379.
- [71] LUO J L, KWOK L C, LI Q Y, et al. Piezoresistive properties of cement composites reinforced by functionalized carbon nanotubes using photo-assisted Fenton[J]. *Smart Mater Struct*, 2017, 26(3): 035025.
- [72] COPPOLA L, BUOSO A, CORAZZA F. Electrical properties of carbon nanotubes cement composites for monitoring stress conditions in concrete structures[J]. *Appl Mech Mater*, 2011, 82: 118–123.
- [73] CHUNG D D L, XI X. Electric poling of carbon fiber with and without nickel coating[J]. *Carbon*, 2020, 162: 25–35.
- [74] XI X, OZTURK M, CHUNG D D L. DC electric polarization of cured cement paste being unexpectedly hindered by free water[J]. *J Am Ceram Soc*, 2022, 105(2): 1074–1082.
- [75] XI X, CHUNG D D L. Dielectric behavior of graphite, with assimilation of the AC permittivity, DC polarization and DC electret[J]. *Carbon*, 2021, 181: 246–259.

- [76] YANG W Y, CHUNG D D L. First report of the ferroelectric behavior of a metal, as shown for solder[J]. *J Mater Sci: Mater Electron*, 2021, 32(12): 16979–16989.
- [77] XI X, CHUNG D D L. Electret behavior of unpoled carbon fiber with and without nickel coating[J]. *Carbon*, 2020, 159: 122–132.
- [78] XI X, CHUNG D D L. Electret behavior of carbon fiber structural composites with carbon and polymer matrices, and its application in self-sensing and self-powering[J]. *Carbon*, 2020, 160: 361–389.
- [79] XI X, CHUNG D D L. Electret, piezoelectret, dielectricity and piezoresistivity discovered in exfoliated-graphite-based flexible graphite, with applications in mechanical sensing and electric powering[J]. *Carbon*, 2019, 150: 531–548.
- [80] CHUNG D D L, DUONG D Q. Observation of electric polarization continuity in graphite[J]. *Mater Chem Phys*, 2023, 297: 127357.
- [81] WEN S H, CHUNG D D L. Electric polarization in carbon fiber-reinforced cement[J]. *Cem Concr Res*, 2001, 31(1): 141–147.
- [82] HUANG L M, TANG L P, LÖFGREN I, et al. Real-time monitoring the electrical properties of pastes to map the hydration induced microstructure change in cement-based materials[J]. *Cem Concr Compos*, 2022, 132: 104639.
- [83] LEE N K, TAFESSE M, LEE H K, et al. Electrical resistivity stability of CNT/cement composites after further hydration: A simple evaluation with an accelerated method[J]. *Constr Build Mater*, 2022, 317: 125830.
- [84] FARQAD Y, WEI X S. Early strength development and hydration of cement pastes at different temperatures or with superplasticiser characterised by electrical resistivity[J]. *Case Stud Constr Mater*, 2022, 16: e00911.
- [85] 何丽, 陈庆, 蒋正武. 基于水化进程的硬化水泥浆体电导率动态计算模型[J]. *建筑材料学报*, 2022, 25(1): 1–7.
HE Li, CHEN Qing, JIANG Zhengwu. *J Build Mater(in Chinese)*, 2022, 25(1): 1–7.
- [86] 赵树青, 董春晖, 宋元金. 含水量对碳纤维水泥砂浆导电性能影响的试验研究[J]. *公路*, 2020, 65(10): 303–305.
ZHAO Shuqing, DONG Chunhui, SONG Yuanjin. *Highway(in Chinese)*, 2020, 65(10): 303–305.
- [87] HU A, FANG Y H, YOUNG J F, et al. Humidity dependence of apparent dielectric constant for DSP cement materials at high frequencies[J]. *J Am Ceram Soc*, 1999, 82(7): 1741–1747.
- [88] GU P, BEAUDOIN J J. Dielectric behaviour of hardened cement paste systems[J]. *J Mater Sci Lett*, 1996, 15(2): 182–184.
- [89] 窦占明, 肖文荣, 赵小榕, 等. Mn掺杂对 $0.77\text{NaNbO}_3-0.23\text{BaTiO}_3$ 铁电陶瓷电卡性能的影响[J]. *硅酸盐学报*, 2022, 50(12): 3199–3205.
DOU Zhanming, XIAO Wenrong, ZHAO Xiaorong, et al. *J Chin Ceram Soc*, 2022, 50(12): 3199–3205.
- [90] 倪波, 张晓燕, 甄茹, 等. A位无序高熵钙钛矿氧化物的介电及铁电性能[J]. *硅酸盐学报*, 2022, 50(6): 1475–1480.
NI Bo, ZHANG Xiaoyan, ZHEN Ru, et al. *J Chin Ceram Soc*, 2022, 50(6): 1475–1480.
- [91] 杨利, 陈超, 江向平, 等. 相界附近结构演化及淬火对 $\text{BiFeO}_3-\text{BaTiO}_3$ 压电陶瓷结构与电学性能的影响[J]. *硅酸盐学报*, 2022, 50(6): 1533–1541.
YANG Li, CHEN Chao, JIANG Xiangping, et al. *J Chin Ceram Soc*, 2022, 50(6): 1533–1541.
- [92] LIU R, GU C, TIAN X, et al. Temperature dependent scaling behavior of $0.67\text{PMN}-0.33\text{PT}$ relaxor ferroelectric ceramics[J]. *Ceram Int*, 2022, 48: 22411–22416.
- [93] RIANYOI R, POTONG R, JAITANONG N, et al. Dielectric and ferroelectric properties of 1-3 Barium titanate–Portland cement composites[J]. *Curr Appl Phys*, 2011, 11(3): S48–S51.
- [94] CHUNG D D L, XI X. Electric poling of carbon fiber with and without nickel coating[J]. *Carbon*, 2020, 162: 25–35.
- [95] XI X, CHUNG D D L. Dynamics of the electric polarization and depolarization of graphite[J]. *Carbon*, 2021, 172: 83–95.
- [96] WEN S, CHUNG D D L. The role of electronic and ionic conduction in the electrical conductivity of carbon fiber reinforced cement[J]. *Carbon*, 2006, 44: 2130–2138.
- [97] 王聪聪, 杜红秀, 石丽娜, 等. 碳纤维-钢纤维水泥基复合材料电学性能试验研究[J]. *硅酸盐通报*, 2022, 41(8): 2690–2705.
WANG Congcong, DU Hongxiu, SHI Lina, et al. *Bull Chin Ceram Soci(in Chinese)*, 2022, 41(8): 2690–2705.
- [98] 左俊卿, 房霆宸, 廖刚. CNT-CF/水泥基材料导电性能研究[J]. *硅酸盐通报*, 2019, 38(12): 3922–3926.
ZUO Junqing, FANG Tingchen, LIAO Gang. *Bull Chin Ceram Soc(in Chinese)*, 2019, 38(12): 3922–3926.
- [99] 蔡红雷, 闫晓鑫, 张安江, 等. CB/CNTs/PP导电高聚物力/温度作用下介电性能的研究[J]. *功能材料*, 2019, 50(11): 11024–11029.
CAI Honglei, YAN Xiaoxin, ZHANG Anjiang, et al. *J Funct Mater(in Chinese)*, 2019, 50(11): 11024–11029.
- [100] AGARWAL P, ORAZEM M E, GARCIA-RUBIO L H. Application of measurement models to impedance spectroscopy: III. evaluation of consistency with the Kramers-Kronig relations[J]. *J Electrochem Soc*, 1995, 142(12): 4159–4168.
- [101] HUBBARD J B. Friction on a rotating dipole[J]. *J Chem Phys*, 1978, 69(3): 1007–1009.
- [102] LEWIS T J. Interfaces: nanometric dielectrics[J]. *J Phys D: Appl Phys*, 2005, 38(2): 202–212.
- [103] CHUNG D. Review: Improving cement-based materials by using silica fume[J]. *J Mater Sci*, 2002, 37: 673–682.
- [104] FALLAH-VALUKOLAEI S, MOUSAVI R, ARJOMANDI A, et al. A comparative study of mechanical properties and life cycle assessment of high-strength concrete containing silica fume and nanosilica as a partial cement replacement[J]. *Structures*, 2022, 46: 838–851.
- [105] 钟伟荣, 贺伟荣, 史美伦, 等. 混凝土矿物掺合料活性的阻抗谱研究[J]. *粉煤灰*, 2006, 18(4): 18–19.
ZHONG Weirong, HE Weirong, SHI Meilun, et al. *Coal Ash China(in Chinese)*, 2006, 18(4): 18–19.
- [106] 史美伦, 张雄, 李平江, 等. 胶凝材料的组成、力学性能与交流阻抗谱的关系[J]. *硅酸盐通报*, 1999, 18(4): 14–17.
SHI Meilun, ZHANG Xiong, LI Pingjiang, et al. *Bull Chin Ceram Soc(in Chinese)*, 1999, 18(4): 14–17.
- [107] 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. *J Build Mater(in Chinese)*, 2006, 9(3): 366–369.
- [108] 张震雷, 史美伦. 交流阻抗谱表征磨细矿渣胶凝活性的研究[J]. *建筑材料学报*, 2005, 8(5): 583–585.
ZHANG Zhenlei, SHI Meilun. *J Build Mater(in Chinese)*, 2005, 8(5): 583–585.

- [109] 李平江, 史美伦, 陈志源. 粉煤灰细度与其火山灰活性的关系[J]. 建筑材料学报, 2004, 7(2): 207–209.
LI Pingjiang, SHI Meilun, CHEN Zhiyuan. J Build Mater(in Chinese), 2004, 7(2): 207–209.
- [110] CHUNG D D L. Use of polymers for cement-based structural materials[J]. J Mater Sci, 2004, 39(9): 2973–2978.
- [111] 张璐, 毛倩瑾, 伍文文, 等. 吸水性微胶囊界面修饰提高水泥基材料抗渗性研究[J]. 硅酸盐通报, 2022, 41(8): 2663–2671.
ZHANG Lu, MAO Qianjin, WU Wenwen, et al. Bull Chin Ceram Soc(in Chinese), 2022, 41(8): 2663–2671.
- [112] 刘加平, 刘建忠, 韩方玉, 等. 基于钢-混凝土组合结构轻量化的粗骨料超高性能混凝土研究进展与应用[J]. 建筑结构学报, 2022, 43(9): 36–44.
LIU Jiaping, LIU Jianzhong, HAN Fangyu, et al. J Build Struct(in Chinese), 2022, 43(9): 36–44.
- [113] CAO J Y, CHUNG D D L. Electric polarization and depolarization in cement-based materials, studied by apparent electrical resistance measurement[J]. Cem Concr Res, 2004, 34(3): 481–485.
- [114] WEN S H, CHUNG D D L. Pyroelectric behavior of cement-based materials[J]. Cem Concr Res, 2003, 33(10): 1675–1679.
- [115] WANG Y L, CHUNG D D L. Effect of the fringing electric field on the apparent electric permittivity of cement-based materials[J]. Compos B Eng, 2017, 126: 192–201.
- [116] 刘雅琦, 王淑娟, 李立新. 高炉镍铁渣和钢纤维改性混凝土的耐热性和热损伤规律[J]. 硅酸盐通报, 2021, 40(7): 2320–2330.
LIU Yaqi, WANG Shujuan, LI Lixin. Bull Chin Ceram Soc(in Chinese), 2021, 40(7): 2320–2330.
- [117] 赵宁, 乔双, 马雯, 等. 热释电材料性能及应用研究进展[J]. 稀有金属, 2022, 46(9): 1225–1234.
ZHAO Ning, QIAO Shuang, MA Wen, et al. Chin J Rare Met(in Chinese), 2022, 46(9): 1225–1234.
- [118] LEE J, KIM H J, KO Y J, et al. Enhanced pyroelectric conversion of thermal radiation energy: Energy harvesting and non-contact proximity sensor[J]. Nano Energy, 2022, 97: 107178.
- [119] SHI Z Q, CHUNG D D L. Carbon fiber-reinforced concrete for traffic monitoring and weighing in motion[J]. Cem Concr Res, 1999, 29(3): 435–439.
- [120] CHUNG D D L, XI X. Piezopermittivity for capacitance-based strain/stress sensing[J]. Sens Actuat A Phys, 2021, 332: 113028.
- [121] 胡鹏兵, 陈娟, 孙航, 等. 基于压电陶瓷的地聚合物砂浆强度发展监测研究[J]. 硅酸盐通报, 2021, 40(9): 2905–2910.
HU Pengbing, CHEN Juan, SUN Hang, et al. Bull Chin Ceram Soc(in Chinese), 2021, 40(9): 2905–2910.
- [122] 徐先洋, 钱霖, 张峰, 等. 1-3型水泥基压电复合材料在冲击载荷下的电学响应[J]. 压电与声光, 2017, 39(3): 433–436.
XU Xianyang, QIAN Lin, ZHANG Feng, et al. Piezoelectr Acoustoopt(in Chinese), 2017, 39(3): 433–436.
- [123] PAN H H, GUAN J C. Stress and strain behavior monitoring of concrete through electromechanical impedance using piezoelectric cement sensor and PZT sensor[J]. Constr Build Mater, 2022, 324: 126685.
- [124] FU X L, MA E M, CHUNG D D L, et al. Self-monitoring in carbon fiber reinforced mortar by reactance measurement[J]. Cem Concr Res, 1997, 27(6): 845–852.
- [125] WEN S H, CHUNG D D L. Cement-based materials for stress sensing by dielectric measurement[J]. Cem Concr Res, 2002, 32(9): 1429–1433.
- [126] WEN S H, CHUNG D D L. Piezoelectric cement-based materials with large coupling and voltage coefficients[J]. Cem Concr Res, 2002, 32(3): 335–339.
- [127] WANG S D, LU L C, CHENG X. Effect of ultra-fine fly ash on the dielectric behavior of CFSC under stress[J]. Adv Mater Lett, 2012, 2(1): 12–16.
- [128] CHUNG D D L. First review of capacitance-based self-sensing in structural materials[J]. Sens Actuators A, 2023, 354: 114270.
- [129] CHUNG D D L. A critical review of electrical-resistance-based self-sensing in conductive cement-based materials[J]. Carbon, 2023, 203: 311–325.