

基于电磁场方法的混凝土性能调控研究进展

肖其远, 龙广成, 董荣珍, 谢友均, 曾晓辉, 马昆林, 唐 卓, 蔡雨欣

(中南大学土木工程学院, 长沙 410083)

摘 要: 现代科学技术的快速发展, 促进了物理化学、电磁学、信息学等多学科知识在混凝土中的应用, 助推了混凝土性能提升和技术发展。本文结合现代混凝土结构与材料的数字化、智慧化发展趋势, 着重综述了电场、磁场等方法调控新拌混凝土流变性及硬化混凝土性能的研究进展, 展望了电磁场调控混凝土性能的前景及亟待解决的问题, 以期为现代混凝土结构的智慧建造提供先进混凝土材料技术支撑。

关键词: 电场; 磁场; 混凝土; 流变性; 力学性能; 调控

中图分类号: TU528 文献标志码: A 文章编号: 0454-5648(2022)11-2981-11

网络出版时间: 2022-08-31



Research Progress on Concrete Performance Control Based on Electromagnetic Field Method

XIAO Qiyuan, LONG Guangcheng, DONG Rongzhen, XIE Youjun, ZENG Xiaohui, MA Kunlin, TANG Zhuo, CAI Yuxin

(School of Civil Engineering, Central South University, Changsha 410083, China)

Abstract: Concrete performance can be improved via the application of multidisciplinary knowledge such as physical chemistry, electromagnetism, and informatics in concrete. This review represented the development of informatization and intelligence of modern concrete material structure, and the research work on the preparation methods in the electric field, magnetic field, etc. to control the rheological properties of fresh concrete and hardened concrete. In addition, the advanced concrete material-technical support for the intelligent construction of modern concrete engineering structures was also discussed.

Keywords: electric field; magnetic field; concrete; rheology; mechanical properties; regulation

随着工程结构建造技术的不断发展, 对混凝土材料性能提出了更高要求, 推动着混凝土性能调控和提升技术的创新发展。新拌混凝土的工作性和硬化混凝土的力学与耐久性是工程结构对混凝土材料性能的基本要求, 从而实现工程结构的均匀密实浇筑成型和承担荷载长期作用目标。工程结构建造技术不断朝着高效化、数字化、智慧化以及服役的长寿命化发展, 促进了新拌混凝土工作性能的提升, 从干硬性、低塑性、大流动性到自密实性混凝土的发展, 硬化混凝土的强度、耐久性也不断增加。大流动度混凝土浇筑入模后常出现模板压力大、组份易产生离析、拆模时间延长等问题, 造成施工安全

风险增加和硬化后匀质性降低^[1-3]。尤其是近年来兴起了诸如“3D 打印”、“数字制造”和“自动化建造”等建造新技术^[4-7], 更是对混凝土性能提出了实时调控的要求。

混凝土材料性能的增强, 除了得益于矿物掺合料和化学外加剂的应用外, 还有赖于相关人员发展的各种源于力学^[13-20]、热力学^[21-28]、声力学^[29]、电学^[30-37]、微波^[38-43]、化学^[8, 44-45]及磁学^[46-58]等原理的外部激励调控混凝土性能的方法。其中, 减水剂、缓/促凝剂、引气剂等各类化学外加剂既能调控拌合物性能也能影响硬化混凝土, 极大得促进了混凝土设计和生产^[8]。振动等机械力改变颗粒运动和液化

收稿日期: 2022-04-10。 修订日期: 2022-04-13。

基金项目: 国家自然科学基金(52178261); 湖南省重点研发计划(2020wk2005)。

第一作者: 肖其远(1995—), 男, 博士研究生。

通信作者: 龙广成(1973—), 男, 博士, 教授。

Received date: 2022-04-10. Revised date: 2022-04-13.

First author: XIAO Qiyuan (1995—), male, Doctoral candidate.

E-mail: xqy_leo@qq.com

Correspondent author: LONG Guangcheng (1973—), male, Ph.D., Professor.

E-mail: longguangcheng@csu.edu.cn

作用,降低了颗粒间的摩擦力和塑性黏度,增加了拌合物流动性^[9,14]。鉴于水泥等胶凝材料水化作用的温度依赖性,通过改变环境温度可调控混凝土体系水化进程、凝结时间及强度的发展^[21],如采用较高温度的蒸汽养护生产预制混凝土构件,但应避免过高温度带来的不利影响^[22]。新拌水泥基材料的屈服应力和塑性黏度随温度的升高而非线性增长,且与水胶比有关^[13–25]。功率超声的空化效应对水泥浆体具有分散作用,能使絮凝结构解凝从而降低黏度,但有可能造成体系骨料沉降^[29]。微波(300 MHz~300 GHz)可以用来调控水泥水化速率,提高其早期强度^[38–40]。上述调控方法的运用,极大地促进了混凝土技术发展。然而,化学外加剂主要依赖于胶材组份、外加剂以及水之间的物理、化学作用效应,具有显著的时间依赖性,并受环境温湿度、材料品质、操作计量等因素的影响;机械力作用对于性能的调控效果有限;此外温度控制和微波作用对于设备的依赖性限制了其在工程中的应用,难以满足隧道预切槽^[10]、3D 打印^[7]和智慧建造^[6]等现代建筑技术发展对混凝土性能调控提出的更高要求。于是,利用电场、磁场等外部激励调控混凝土性能的技术得以出现^[30,46–47]。

结合上述混凝土智能化发展的需求,本文着重综述了电场、磁场调控新拌混凝土性能和硬化混凝土性能的技术现状,并对电、磁场调控方法在混凝土材料中的应用进行了展望,期望助力混凝土朝着更智能化、更绿色化方向发展,从而满足现代混凝土工程结构智慧建造需求。

1 基本原理

1.1 电场作用原理

早龄期(尤其是硬化前)水泥基材料是由固相、液相和气相组成的复杂非匀质多相体系,其中的水、溶解离子及多类固相等能够构成电响应体系。通常电场对早龄期水泥基材料体系具有 Joule 热效应、电化学反应等,以下阐述相关原理。

1) Joule 热效应

孔溶液中的离子或外加导电物质能够在早龄期水泥基材料中形成连续的导电通路提高体系电导率^[59],从而在电场作用下产生 Joule 热效应,提高体系温度而促进水泥水化^[60–62],如式(1)所示。

$$Q = I^2 R t = \frac{U^2 t}{R} \quad (1)$$

其中: Q 为产生的热量(J); I 为电流(A); R 为电阻(Ω); U 为电压(V); t 为时间(s)。

2) 电化学反应

水泥基材料的水化过程是发生在固/液界面上的化学反应,包括传质过程(反应物在溶液中的迁移过程)和电荷传递过程(反应物在固体表面的吸附、反应、脱附过程)^[63]。在电子/离子(电极/电解质)等物质组成的新拌水泥基材料复合导体中体系中,电荷在电子/离子界面的双电层间传递需克服一定的阻力,电荷的转移又会导致电解质中的离子不均匀分布,发生由高浓度向低浓度转移的扩散过程^[64]。因此,外加电场作用会对水泥基材料水化过程中的电化学反应产生影响。张国防等^[65]认为在水泥基材料中发生的电化学反应是伴随水化过程的 C–S–H 凝胶中电子的水化反应,在水泥基材料中只有 C–S–H 凝胶中的水化电子才能进行电荷传递反应,水化电子数与凝胶的数量及凝胶中的水量成正比,与孔溶液中的 OH^- 浓度成反比^[66]。张莹等^[67]研究发现在水化早期, C–S–H 凝胶开始大量形成时其表面会吸附电场作用下产生的定向水偶极子,同时水化产生的 OH^- 开始发生电化学反应。水偶极子会在电极表面定向排列,电极表面的定向水偶极子会随交流电场的变化而运动^[68]。

1.2 磁场作用原理

1) Lorentz's 力

磁场通过 Lorentz's 力对运动电荷(如 Ca^{2+} 等)产生作用力,从而影响水化过程中分子的重组过程^[49],带电粒子在磁场和黏性力作用下的运动方程如式(2)所示^[69],加速了碳酸钙^[70]和石膏^[71]等难溶的弱酸盐的结晶成核效应,如:0.19 T 的磁场通过量子效应影响质子的自旋弛豫使碳酸钙在水中的结晶速率提高、晶体尺寸减小^[70],小于 2 T 的磁场就能够促进室温下石膏微晶体的排列^[71],这种作用效应可能能够揭示磁场直接影响水泥水化速率和水化产物形貌的作用机理^[48]。

$$m \frac{d^2 \mathbf{x}}{dt^2} + m \beta \frac{d\mathbf{x}}{dt} + q \frac{d\mathbf{x}}{dt} \times \mathbf{B} + \mathbf{F}_{\text{end}} + \mathbf{F}_{\text{noise}} = 0 \quad (2)$$

其中: $\mathbf{x}$ 是位置矢量; m 是粒子质量; β 是黏性阻力(由于热运动碰撞产生); q 是粒子电荷; $\mathbf{B}$ 是磁感应强度; $\mathbf{F}_{\text{end}}$ 是结合位点的分子间作用力; $\mathbf{F}_{\text{noise}}$ 是热运动引起的作用力。Lorenz 力作用阐释了静磁场在 1~10 MT 范围内对离子结合动力学的影响。

2) 磁流变效应

Jacob Rabinow^[72]于 1948 年发现磁流变(MR)液。MR 通常由悬浮在载液中的微米级磁性颗粒组成。在外加磁场作用下,磁性颗粒的磁偶极子会在

几十毫秒的极短时间内快速沿着磁场线排列,使磁性粒子形成平行于外加磁场的链状或柱状结构从而控制流体的运动^[73],促使流体从牛顿流体转变为 Bingham 流体的类固体材料状态,并具有剪切屈服应力^[74]。在磁场下作用下的 MR 塑性黏度可以增加 $10^5 \sim 10^6$ 倍,屈服应力增加到 100 kPa^[75]。MR 凭借其独特且优异的性能已应用于许多领域,如精密抛光,流体制动器,减震器和地震振动控制等^[76-78]。

近年来研究者从磁流变效应的研究中得到启示,发现磁场可以控制掺入水泥浆体中的磁性颗粒的运动进而实时调控水泥浆体的流变性 & 结构构筑行为,取得了可喜成果^[24, 56]。

2 电磁场作用对新拌混凝土流变性能的影响

2.1 电场作用的影响

有关外加电场对新拌水泥基材料流变性的研究成果还不多见。Rozynek 等^[79]进行了直流电场诱导高岭土和埃洛石在硅油中的结构和流变性试验,发现屈服应力随电场和分散颗粒含量的提高而增加,且水含量既不会改变填充物的结构也不影响电导率和介电常数。最近, Xiao 等^[30]开展了交流电场作用对新拌水泥浆体流变性的影响研究,发现电场作用 20 min 后浆体的流变性能显著变化,其中屈服应力呈指数增加,如图 1 所示,显著区别于未施加电场作用试样的流变性能变化规律。

根据前述电场与水泥体系之间的相互作用原理,电场作用下水泥浆体流变性的变化可能主要来自于电场的 Joule 热效应以及电化学效应,加速了水泥及辅助性胶凝组分的早期水化,促进絮凝结构生成从而影响拌合物的流变性,这已为一些研究者试验证实。Cınar 等^[36]发现电场作用促进水泥水化生成更多的 C-S-H 凝胶、氢氧化钙和钙矾石等水化产物。Heritage 等^[80]研究发现电场作用后水化产物的钙硅比 Ca/Si 随着电压增大(0~80 V)而逐渐增大。

2.2 磁场的影响

2.2.1 未掺磁性颗粒体系 对于未掺磁性颗粒体系的水泥体系,一些研究者发现磁化水能够改善水泥基材料的流动性以及力学性能等^[48, 81-83]。水分子是强极性分子,经磁化后氢键键角减小到 105° 以下,水分子间的距离增大,由于自身极性而产生的吸引力减少,在外加磁场作用下,水分子的电偶极矩增大,水分子的定向极化程度提高^[81, 84],常温下每个水分子团约含 100 个由氢键连接的水分子,水经磁化后水

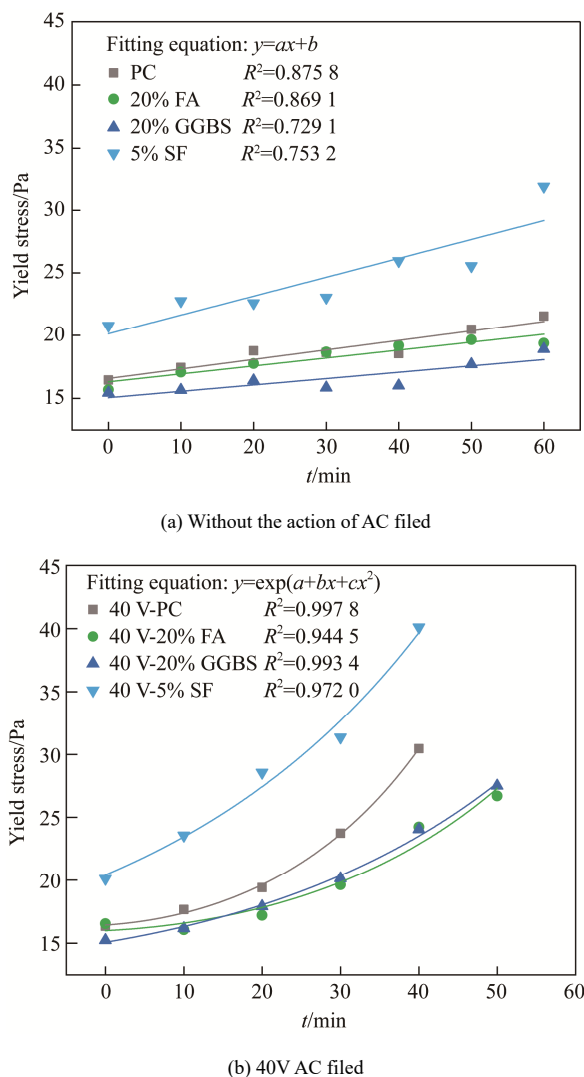


图 1 交流电场作用下新拌浆体屈服应力的变化^[25]
Fig. 1 Yield stress of fresh cement paste under the action of AC field^[25]

分子团簇中部分氢键被破坏,被分割成单个的水分子或含水分子数较少的水分子团簇^[48, 84]。上述水分子自身结构和氢键作用的变化以及水分子团簇结构变小,强烈影响着水的物理性质,如电导率、渗透性、表面张力、温度和黏度等,使磁化水的表面张力、黏度减小,活性增强,从而提高水泥颗粒的分散度,并且磁化水更容易透过水合层渗透进水泥颗粒中^[49, 83]。Barham 等^[81]将磁化水应用于掺硅灰的钢筋混凝土,表明磁化水使钢渣混凝土的流动性提高了 5%。Su 等^[48]研究发现 0.8 T 和 1.2 T 磁化水能改善砂浆的流动度以及掺粉煤灰混凝土的早期强度,1.2 T 磁场处理的磁化水改善效果优于 0.8 T 磁场。Ahmed^[83]发现使用 1.2 T 磁化水拌制的混凝土坍落度较自来水拌和的混凝土提高了 37% 以上。Afshin 等^[85]也发现磁化水能够增加混凝土的坍落

度,且在保持相同的坍落度和抗压强度的情况下,使用磁化水可以将水泥用量减少 28%。Khorshidi 等^[86]发现磁化水能增加水泥浆的流动性和抗压强度均达 10%。Esfahani 等^[87]与上述研究结果类似,发现在保证扩展度不变的情况下,使用磁化水可以减少自密实混凝土 10%的用水量,减少 30%的减水剂用量,使 SCC 的抗压强度提高 9%~16%。Ghorbani 等^[88]也发现磁化水改善了自密实混凝土的黏度和流动性,其另一项研究^[89]表明随着磁化水通过磁水器的次数增加这种改善效果越好。Barham 等^[81]将磁化水应用于掺硅灰的混凝土,表明磁化水使混凝土的流动性提高了 5%。Chen 等^[50]发现磁场能够对钢渣混凝土拌合物产生“微振动”作用影响流变性能。

水与水泥颗粒接触后,C₃A 和 C₄AF 开始与石膏形成钙矾石,在这个过程中,铁的溶解浓度增加,使水泥浆表现出轻微的磁性,Nair 等^[24]指出 Fe₂O₃ 含量为 2.7%的硅酸盐水泥的饱和磁化值仅为 0.7 C·cm³,水泥基材料自身难以与磁场之间产生相互作用,磁场似乎无法影响水泥的水化过程,Jiao 等^[57]研究表明 0.5 T 的磁场对水泥浆体的结构演变几乎没有影响。因此,大部分研究者使用磁化水来对水泥基材料间接施加磁场作用。

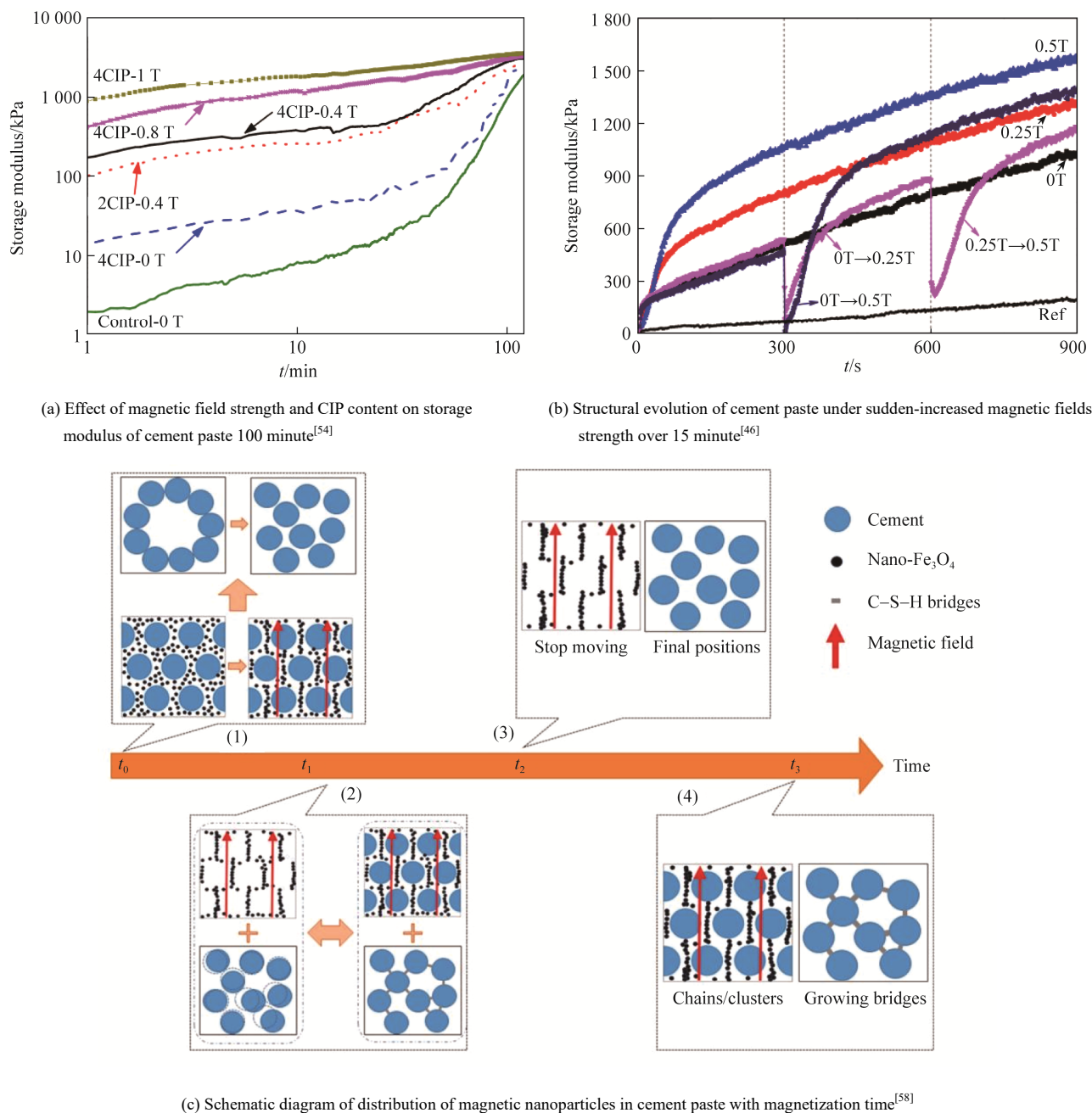
2.2.2 外掺磁性颗粒体系 上述研究表明仅靠水泥基材料自身难以对外部磁场作用产生显著响应。各类铁粉是 MR 研究的重点^[73,90–91]。因而,各相关人员进行水泥基材料流变性能的磁场调控时,掺用铁磁性物质作为磁场响应颗粒,如羰基铁粉(CIP)、四氧化三铁粉和氢还原铁粉等。

Nair 等^[47,53–54]使用 CIP 开发了通过磁场“按需实时调控”流变性能的磁流变水泥基材料。其将 CIP 以 4%的体积掺量添加到水灰比 0.4 的水泥浆中,施加外加磁场强度的同时进行小振幅振荡剪切(SAOS)实验,发现水泥浆的流变性能随外部磁场的变化而变化,如磁场强度从 0 T 增加到 0.2 T 时,浆体的屈服应力增加 12 倍,而磁场强度增加到 1 T 时该值增加了 120 倍。早期磁流变效应与 CIP 掺量具有显著的对应关系,加水拌和后 30 min 内,磁性颗粒掺量增加一倍,剪切模量也增加了 1 倍,如图 2a 所示。但随着水化的进行,90 min 后外加磁场对浆体流变性能的影响被水化、絮凝和触变的作用所抵消,浆体的流变性能无法再对外部磁场激励做出响应。若在早期撤去磁场,水泥浆的黏弹性损失较小。Nair 认为磁场之所以能在早龄期水泥基材料中发生磁流

变效应,主要是磁场通过 Lorenz 力促进 CIP 在浆体中形成链状或柱状结构,且由于水泥浆体是具有屈服应力的 Bingham 流体,能够一定程度上维持已经形成的链、柱状结构的完整性^[54]。此外,Nair 研究发现磁场以及掺入的磁性颗粒 CIP 对早期水化速率以及水化产物的形成没有显著影响,并且低掺量下也不影响强度发展^[54]。

此后,Jiao 也使用 SAOS 技术对水灰比 0.4 的浆体进行了更深入的探索,研究了纳米 Fe₃O₄ 作为磁性响应颗粒的水泥浆在磁场作用下的流变性能以及早期结构构筑行为的演变,表明随着絮凝结构形成以及水化进行,浆体的储能模量逐渐增加,相位角逐渐减小,恒定磁场与纳米 Fe₃O₄ 间的作用会加剧这种变化^[46,57],认为纳米 Fe₃O₄ 颗粒在受到磁场作用后会克服水泥浆体悬浮液的黏弹性应力引起的阻力从而发生移动,并在形成链或团簇结构的过程产生“微搅拌”作用,破坏水泥颗粒间的 C–S–H 桥和絮凝网络;另一方面,当磁场突降时,磁场对磁性颗粒的约束作用减小,储能模量下降,于是磁场诱导产生的增强结构表现出与触变性相似的可逆性质^[46,58],如图 2b 和图 2c 所示。

2.2.3 影响机理 一些学者针对磁场调控水泥浆体流变性的机理进行了深入分析。研究发现磁化水能够提高水泥水化生成的 Ca(OH)₂ 晶体的分散度,并促使 Ca(OH)₂ 晶体的形貌由常见的六方片状转变为短柱状^[48],进而细化毛细孔孔隙^[83],磁化水的极化程度越高水化产物微观结构越致密^[89]。Soto-Bernal 等^[49]认为磁场通过 Lorenz 力控制离子运动从而影响了水泥水化期间的分子重组过程,提高了水化温度,加速了水泥水化,磁场作用后的水泥浆中 Al—O 键、2CaO·SiO₂ 和 3CaO·Al₂O₃ 的含量升高,且随着磁场强度提高 C–S–H 凝胶的数量越多、孔隙越少、微观结构越致密。Jiao^[56]和 Nair^[54]均认为在磁场作用下,磁性颗粒在水泥浆体中能够排列成链、柱状结构。Jiao 在研究中证实了水泥浆体中磁性颗粒在磁场作用下团聚和迁移行为并阐释了相关机理,并使用 X 射线光谱(EDX)及基于变化系数(COV)的图像分析定量测定了磁场作用后纳米 Fe₃O₄ 在硬化水泥浆中的团簇分布,证明水泥浆体的磁流变效应和 COV 定量的纳米 Fe₃O₄ 颗粒团簇的形成之间存在线性相关性^[56],认为高磁场强度和高剪切速率是造成纳米颗粒团聚的 2 个主要影响因素^[55],还发现对于水泥悬浮液,2 个相邻纳米 Fe₃O₄ 颗粒之间的磁力与磁化强度呈正相关,但与颗粒大小无关^[58]。所以水泥浆体对外

图 2 磁场和磁性纳米颗粒对水泥浆流变性能的影响及机理^[58]Fig. 2 Influence of magnetic field and magnetic nanoparticles on the rheological properties of cement paste and the mechanism^[58]

加磁场的响应主要由纳米 Fe_3O_4 颗粒的晶体结构和磁性决定, 含有较大粒径和较高磁性的纳米 Fe_3O_4 颗粒的水泥浆体通常表现出更明显的磁流变特性^[57]。

研究者进一步计算分析了磁场与磁性颗粒作用对新拌水泥浆体流变性的影响。Bingham 塑性流体中的球形粒子在重力作用下受到的黏性阻力^[92], 如式(3)所示。假设所有磁性粒子以立方顺序排列在水泥粒子之间的空隙中, 则粒子间具有相同的间距 $h(\text{m})$, 那么磁性粒子在磁场作用下的磁动力 F_{particle} , 如式(4)表示^[58, 93]。当磁动力 F_{particle} 等于黏弹性水泥

悬浮液应力引起的黏性阻力 F_D 时, 磁性颗粒开始运动, 得到磁性粒子的运动速度, 如式(5)所示^[58]:

$$F_D = 3\pi d^2 \left[\frac{\eta_{\text{pl}} v}{d} + \tau_{\text{pl}} \right] \quad (3)$$

$$F_D = 3\pi d^2 \left[\frac{\eta_{\text{pl}} v}{d} + \tau_{\text{pl}} \right] \quad (4)$$

$$v = \frac{d}{\eta_{\text{pl}}} \left[\frac{\mu_0 (\rho M)^2}{72} \cdot \left(\frac{6\phi_{\text{MNPs}}}{\pi} \right)^{\frac{4}{3}} - \tau_{\text{pl}} \right] \quad (5)$$

其中: η_{pl} 和 τ_{pl} 分别是 Bingham 悬浮液的塑性黏度

(Pa·s)和屈服应力(Pa); d 、 ρ 、 M 和 $\phi_{\text{MNP}s}$ 分别为磁性粒子的平均粒径(m)、密度(kg/m^3)、每单位质量的磁化强度(Am^2/kg)和体积分数; μ_0 为介质的磁导率(N/A^2),以水泥浆为介质时可认为等于真空值($4\pi \times 10^{-7} \text{ N/A}^2$)。

基于上述, Jiao 等^[58]计算发现降低水灰比会导致粒子运动速度降低, 聚羧酸醚减水剂含量大于等于 0.6%时, 纳米 Fe_3O_4 颗粒能够打破水泥颗粒之间的 C-S-H 桥, 水泥浆体可以对外部磁场表现出流变响应, 计算参数与实验结果形成良好对应关系。

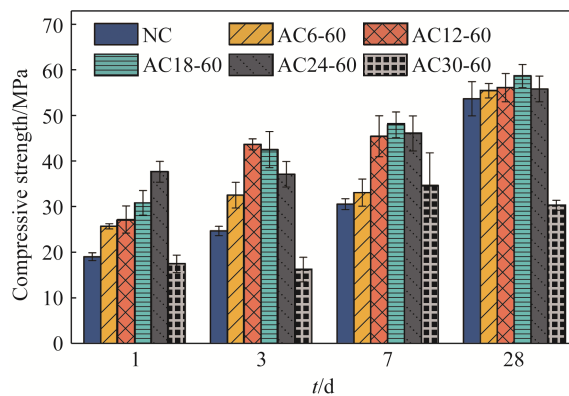
3 电磁场作用对硬化混凝土性能的影响

3.1 电场作用的影响

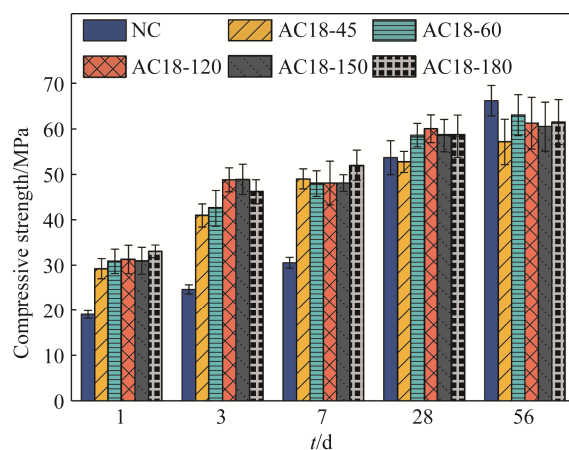
目前研究认为, 利用电场对早龄期水泥基材料的 Joule 热效应能够提高体系温升, 促进水化作用, 从而有利于早期强度发展, 尤其是能够改善低温环境下体系的水化凝结、硬化过程^[35–36], 这种影响效应认为主要来自于新拌水泥基材料中溶解离子的导电性^[31, 61–62, 94–95], 以及外加的碳纤维^[34, 35, 96]、碳纳米管^[34, 35, 96]、石墨烯^[36]、炭黑^[37]和钢纤维^[97]等产生的导电强化作用, 并且与蒸汽养护以及蒸压养护等方式相比具有显著的经济效益^[31, 98–99]。

3.1.1 未掺导电介质体系 Wadhwa 等^[62]于 1987 年报道了电场对硅酸盐水泥混凝土强度发展的影响, 结果表明与(27±2) °C 恒温水养相比, 电场作用样品可在 24 h 内达到恒温水养试样 2 d 抗压强度的 60%~70%, 并且不损害 28 d 强度。Bredenkamp^[41]、Heritage 等^[80]等也表明电场作用有利于提高混凝土的早期强度, 并且与作用时间、混凝土水灰比的等因素有关。Wilson 等^[95]研究指出电场作用具备加热速度快、混凝土构件受热相对均匀、操作方便等特点, 并提出了包括静置期、加速升温期、恒温期和自然降温期的养护制度。Kovtun 等^[61]的研究表明, 电场作用可显著促进碱激发粉煤灰混凝土的强度发展, 控制内部温度不超过 60 °C, 28 d 抗压强度可达到 48.5 MPa, 而对比组 28 d 抗压强度仅 10.9 MPa。Uygunoglu 等^[94]研究了不同电压对混凝土凝结时间的影响, 使用 40~100 V 的交流电作用 24 h, 随着电压的升高, 凝结时间大幅度缩短, 试样 1 d 抗压强度得到提高, 28 d 抗压强度降低。Yang 等^[98]研究了交流电电压和频率对水泥基材料性能的影响, 使用 6~30 V, 频率 45~180 Hz 的交流电作用 8 h, 发现交流电作用后 1 d 强度增长率为 53.8%~70.8%。然而

电压过大会导致内部温度过高造成热损伤, 使电场作用样品在 28 d 后的强度低于标养试样, 如图 3 所示, 且该研究认为电场频率对早期强度和微观结构几乎没影响。



(a) 60 Hz, 6–30 V



(b) 18 V, 45–180 Hz

图 3 不同电压和频率的交流电作用后样品的抗压强度^[98]

Fig. 3 Compressive strength of the specimens by an alternating current with different voltages and frequencies^[98]

3.1.2 掺导电介质体系 虽然水泥基材料中有 Ca^{2+} 和 OH^- 等导电离子, 但体系的电阻率仍然偏高而影响导电效果。研究^[62, 95]表明, 新拌混凝土的电阻率高达 500~5 000 Ω/cm , 而且随着水化的进行, 电阻率还将快速增加。因此, 一些研究者掺入碳纳米管(CNTs)、碳纤维、炭黑和石墨烯等具有优良电热特性的物质来提高水泥基材料的电导率。Kim 等^[100]将 CNTs 水泥块埋于圆柱形砂浆中进行直流电养护, 控制最高温度不超过 60 °C, 砂浆 24 h 强度提高了 40%, 其认为通电功率是影响电养护效果最主要的因素, 通过有限元模拟发现圆柱体砂浆温度分布均匀, 温差小, 表明该养护方法将有可能有效降低大

体积混凝土的温度梯度导致的热裂缝。

Liu 等^[34-36, 96, 101]使用石墨烯纳米片或碳纳米管与碳纤维的组合构建稳定的导电网络, 在 $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$ 低温环境下对水泥基材料进行了一系列的电场作用研究, 发现功率为 30 W 的电场作用 1 d 和 2 d 后的抗压强度分别达到 35.3 MPa 和 49.2 MPa , 而对比组在 $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$ 低温下无法凝结硬化, 其发现电场作用后的样品无论最可几孔径还是总孔隙率较标准养护样品均降低。Çınar 等^[37]使用最高 90 V 的交流电, 在 $-10\text{ }^{\circ}\text{C}$ 、 $0\text{ }^{\circ}\text{C}$ 以及 $22\text{ }^{\circ}\text{C}$ 的环境温度下对掺导电炭黑的混凝土进行养护, 也为低温环境下能够顺利进行混凝土施工提供了有效方法。研究发现随着电压升高, 凝结时间缩短, 但由于炭黑与水泥基体无法形成有效的粘结, 且炭黑掺量越高吸水率就越高, 导致混凝土强度越低, 明确了不小于 90 V 的电场在 $-10\text{ }^{\circ}\text{C}$ 的低温下才可使混凝土凝结。

上述研究表明, 利用电场的 Joule 热效应能够有效促进混凝土早期强度的增加, 尤其有利于低温下混凝土的水化、凝结硬化, 保证力学性能的增长。然而, 电场对水泥混凝土微观结构的影响以及长期性能的影响结果还需要进一步试验和实践验证。此外, 合理的电场作用制度还有待建立, 一些研究^[41, 80, 95, 98, 100]认为常温预养护 $2\sim 6\text{ h}$ 后再施加电场作用, 能够使水泥基材料获得较致密的微观结构和良好的力学性能。

3.2 磁场作用的影响

磁场作用对硬化混凝土性能的影响也为一些学者关注。使用磁化水作为拌和水能将水泥基材料抗压强度提高 $10\%\sim 50\%$ ^[82-83, 86], 还能减少掺硅灰的钢筋混凝土的空隙含量, 增强钢筋和混凝土的粘结强度^[81]。磁化水的作用效果受磁场的强度和方向、水流速度及流动时间等影响^[85-87, 89]。普遍认为, 相比起普通拌合水, 磁化水具有更小的表面张力和黏性, 且具有较小的团簇结构甚至单分子结构, 使水泥颗粒周围的水层厚度更薄^[49, 83, 89], 有助于水泥颗粒相互分散, 磁化水分子更容易通过水化层渗透到水泥颗粒中^[48]。

研究发现磁场不仅能够调节钢纤维取向, 还能使铁磁性物质产生“微振动”效应。Ferrandez 等^[102]评估了磁场作用下含钢纤维的再生细骨料砂浆的弯曲强度, 通过磁场对钢纤维在新拌水泥砂浆中的取向进行调控, 使砂浆的抗压强度提高了 6% , 抗弯强度提高了 10% 。Villar 等^[103-104]提出了 1 种理论模型可以预测磁场作用下混凝土中钢纤维的最终取

向。Abavisani 等^[52]研究发现交变磁场能使新拌砂浆中的絮凝体或带电粒子产生“微振动”, 但是在新拌阶段施加各类与荷载方向不同的交变磁场, 对硬化后性能影响均很小, 而将交变磁场施加在硬化混凝土上时抗压强度提高了约 8% 。此外还报道了相较于测试过程中没有施加磁场的钢筋混凝土(RC)柱, 磁场作用 RC 柱的抗压强度增加了 11% , 跨中挠度降低至屈服时的 38.6% , 此后在失效时整体挠度增加了 45% ^[105]。铁磁性物质如钢渣^[50]和钢片^[106]在交变磁场作用下于新拌混凝土中产生“微振动”效应, 起到振捣密实的作用。

磁场的作用效果与磁场的作用方向, 以及施加磁场时混凝土的状态有关。Abavisani 等^[52]研究认为交变磁场施加方向与作用力方向对混凝土抗压强度影响很大, 若作用力方向与磁场施加方向平行, 硬化后钢纤维混凝土的抗压强度降低了 11% , 而方向相互垂直时硬化后钢纤维混凝土的抗压强度提高 17% 。Hajforoush 等^[107]的研究取得与 Abavisani 等相似的结论, 其综合研究了磁场对新拌及硬化后掺钢纤维混凝土各项性能的影响, 将 0.5 T 恒定磁场施加在掺 1.5% 钢纤维的新拌混凝土上 120 s 后再撤去磁场养护至 28 d , 发现抗压强度、弹性模量和抗弯强度分别提升了 18% 、 18% 和 16% , 吸水率和渗透系数分别降低了 11% 和 18% ; 标养至 28 d , 测试过程中再施加磁场能将抗压强度和弹性模量均提高 9.7% 。

4 工程应用

利用电磁场方法调控混凝土性能的工程应用逐渐丰富。Liu 等通过一系列研究发现电场加速养护尤其适用于低温下的混凝土施工^[35-36]和修复加固工程^[34], 能够有效保证冬季混凝土施工质量。Tian 等^[99, 108]对比研究了 Joule 热养护、蒸汽养护以及蒸汽养护对活性粉末混凝土的影响, 发现电养护 3 h 和蒸压养护 3 h 的活性粉末混凝土抗压强度与高温蒸汽养护 3 d 样品强度相当, 且 Joule 热养护试件的强度略高于蒸压养护。此外, 通过电养护制作的活性粉末混凝土板($0.1\text{ m}\times 1\text{ m}\times 1\text{ m}$)成本较蒸汽养护降低 40% 以上^[99], 具有显著的经济效益。Xiao 等^[25]研究发现交流电场能够显著影响新拌水泥浆的流变性, 认为合适的交流电场将是提高新拌混凝土浇筑后稳定性以及促进 3D 打印混凝土和数字化施工等新型建筑技术发展的一种新方式。West 等^[109-110]设计制作了磁场调控装置, 该装置可在混凝土找平期

间将钢纤维取向排列在特定的水平面上制成高韧性道路混凝土。Wijffels 等^[11]研究发现骨料不会阻止磁场作用下纤维旋转和成链的取向行为,且能够桥接裂纹的“良好取向纤维”的数量决定了自密实混凝土梁承受弯曲荷载的能力。

5 结语与展望

电磁场方法调控混凝土性能显示出独特的优越性,为助力现代工程结构朝着智慧化、数字化发展提供了新的有力途径。然而,利用电磁场方法调控混凝土性能仍有大量的相关理论和技术工作亟待开展,未来亟需加强以下方面研究工作:

1) 进一步揭示电磁场作用对水泥基材料性能与微结构的影响规律及机理。交流电场作用后新拌水泥基材料温度升高、水化加速,微结构快速形成,这些变化除了电场的 Joule 热效应外,有关电化学等方面的影响效应仍不是十分清楚;磁场作用下硬化混凝土力学性能与耐久性能变化的机理也尚不明确。

2) 水泥基材料是一个固、液、气多相共存且经时变化的复杂系统,其中固相通常不具导电、导磁特性。因此,需要结合水泥基材料体系的物相组成及其电磁响应特征,深入探索增强其电磁响应的新原理与新方法,为高效利用电磁场调控水泥基材料的结构与性能提供理论和技术支撑。

3) 进一步发展便捷、精准的实时监测方法,掌握电磁场作用下水泥基材料的微结构与性能演变规律,以更好地理解电磁场与水泥基材料体系之间的相互作用效应及机理。

参考文献:

- [1] 龙广成, 谢友均. 自密实混凝土[M]. 北京: 中国科学出版社, 2013.
- [2] ASSAAD J J. Correlating thixotropy of self-consolidating concrete to stability, formwork pressure, and multilayer casting[J]. J Mater Civ Eng, 2016, 28(10): 4016107.
- [3] HAN J, YAN P. Influence of segregation on the permeability of self-consolidating concrete[J]. Constr Build Mater, 2021, 269: 121277.
- [4] BUSWELL R A, Silva D A, Leal W R, BOS F P, et al. A process classification framework for defining and describing digital fabrication with concrete[J]. Cem Concr Res, 2020: 134: 106068.
- [5] BIRANCHI P, LIM J, TAN M. Mechanical properties and deformation behaviour of early age concrete in the context of digital construction[J]. Compos Part B: Eng, 2019, 165: 563–571.
- [6] TIMOTHY W, ROUSSEL, BOS F P, et al. Digital concrete: A review[J]. Cem Concr Res, 2019, 123: 105780.
- [7] GEERT D S, LESAGE K, MECHTCHERINE V, et al. Vision of 3D printing with concrete — Technical, economic and environmental potentials[J]. Cem Concr Res, 2018, 112: 25–36.
- [8] AİTCIN P C, FLATT R J. Science and Technology of Concrete Admixtures[M]. Elsevier Science, 2015.
- [9] LI Zhuguo, CAO Guodong. Rheological behaviors and model of fresh concrete in vibrated state[J]. Cem Concr Res, 2019, 120: 217–226.
- [10] 王秀英, 郑维翰, 张隽玮, 等. 预切槽法开挖黄土隧道的切槽方式研究[J]. 中国铁道科学, 2018, 39(3): 49–56.
- [11] WANG Xiuying, ZHENG Weihang, ZHANG Junwei, et al. China Railway Sci (in Chinese), 2018, 39(3): 49–56.
- [12] AUSTIN S A, GOODIER C I, ROBINS P J. Low-volume wet-process sprayed concrete: Pumping and spraying[J]. Mater Struct, 2005, 38(2): 229–237.
- [13] MELBYE T A, DIMMOCK R H. Modern advances and applications of sprayed concrete[J]. Shotcrete: Engineering Developments, 2020: 7–29.
- [14] SECRIERU E, COTARDO D, MECHTCHERINE V, et al. Changes in concrete properties during pumping and formation of lubricating material under pressure[J]. Cem Concr Res, 2018, 108: 129–139.
- [15] KOCH J A, CASTANEDA D I, EWOLDT R H, et al. Vibration of fresh concrete understood through the paradigm of granular physics[J]. Cem Concr Res, 2019, 115: 31–42.
- [16] TATTERSALL G H, BAKER P H. The effect of vibration on the rheological properties of fresh concrete[J]. Mag Concr Res, 1988, 40(143): 79–89.
- [17] HANOTIN C, RICHTER S K D, MICHOT L J, et al. Viscoelasticity of vibrated granular suspensions[J]. J Rheol, 2014, 59(1): 253–273.
- [18] PICHLER C, RÖCK R, LACKNER R. Apparent power-law fluid behavior of vibrated fresh concrete: Engineering arguments based on Stokes-type sphere viscometer measurements[J]. J Non-Newton Fluid, 2017, 240: 44–55.
- [19] PANG X, CUELLO J W, IVERSON B J. Hydration kinetics modeling of the effect of curing temperature and pressure on the heat evolution of oil well cement[J]. Cem Concr Res, 2013, 54: 69–76.
- [20] PANG X, MEYER C, DARBE R, et al. Modeling the effect of curing temperature and pressure on cement hydration kinetics[J]. Aci Mater J, 2013, 110(2): 229–235.
- [21] KIM J H, KWON S H, KAWASHIMA S, et al. Rheology of cement paste under high pressure[J]. Cem Concr Compos, 2017, 77: 60–67.
- [22] AİTCIN P C, MINDESS S. Sustainability of Concrete[M]. Crc Press, 2011.
- [23] XIANG Y, XIE Y, LONG G, et al. Hydration phase and pore structure evolution of hardened cement paste at elevated temperature[J]. J Cent South Univ, 2021, 28(6): 1665–1678.
- [24] NEHDI M, MARTINI S A. Estimating time and temperature dependent yield stress of cement paste using oscillatory rheology and genetic algorithms[J]. Cem Concr Res, 2009, 39(11): 1007–1016.
- [25] NEHDI M, MARTINI S A. Estimating time and temperature dependent yield stress of cement paste using oscillatory rheology and genetic algorithms[J]. Cem Concr Res, 2009, 39(11): 1007–1016.
- [26] NEHDI M, MARTINI S A. Effect of temperature on oscillatory shear behavior of ortland cement paste incorporat-ing chemical

- admixtures[J]. *J Mater Civ Eng*, 2007, 19(12): 1090–1100.
- [26] MA S, KAWASHIMA S. A rheological approach to study the early-age hydration of oil well cement: Effect of temperature, pressure and nanoclay[J]. *Constr Build Mater*, 2019, 215: 119–127.
- [27] WU D, FALL M, CAI S J. Coupling temperature, cement hydration and rheological behaviour of fresh cemented paste backfill[J]. *Miner Eng*, 2013, 42: 76–87.
- [28] MA S, YU T, WANG Y, et al. Phase evolution of oil well cements with nano-additive at elevated temperature/pressure[J]. *Aci Mater J*, 2016, 113(5): 571–578.
- [29] PETERS S. The influence of power ultrasound on setting and strength development of cement suspensions[D]. Weimar: Bauhaus-Universität, 2017.
- [30] XIAO Q, LONG G, FENG R, et al. Effect of alternating current field on rheology of fresh cement-based pastes[J]. *J Build Eng*, 2022, 48: 103771.
- [31] BREDENKAMP S, KRUGER K, BREDENKAMP G L. Direct electric curing of concrete[J]. *Mag Concr Res*, 1993, 45(162): 71–74.
- [32] GOUDJIL N, DJELAL C, VANHOVE Y, et al. Impact of temperature on the demoulding of concrete elements with a polarization process[J]. *Constr Build Mater*, 2014, 54: 402–412.
- [33] GOUDJIL N, VANHOVE Y, DJELAL C, et al. Electro-osmosis applied for formwork removal of concrete[J]. *J Adv Concr Technol*, 2012, 10(9): 301–312.
- [34] LIU Y, WANG M, TIAN W, et al. Ohmic heating curing of carbon fiber/carbon nanofiber synergistically strengthening cement-based composites as repair/reinforcement materials used in ultra-low temperature environment[J]. *Compos Part A: Appl Sci Manuf*, 2019, 125: 105570.
- [35] LIU Y, WANG M, WANG W. Ohmic heating curing of electrically conductive carbon nanofiber/cement-based composites to avoid frost damage under severely low temperature[J]. *Compos Part A: Appl Sci Manuf*, 2018, 115: 236–246.
- [36] LIU Y, WANG M, WANG W. Electric induced curing of graphene/cement-based composites for structural strength formation in deep-freeze low temperature[J]. *Mater Des*, 2018, 160: 783–793.
- [37] ÇINAR E, UYGUNOĞLU T, ŞİMŞEK B, et al. Effect of carbon black on electrical curing of fresh concrete for cold regions[J]. *Constr Build Mater*, 2020, 247: 118572.
- [38] BUTTRESS A, JONES A, KINGMAN S. Microwave processing of cement and concrete materials—towards an industrial reality?[J]. *Cem Concr Res*, 2015, 68: 112–123.
- [39] MAKUL N, RATTANADECHO P, AGRAWAL D K. Applications of microwave energy in cement and concrete—A review[J]. *Renewable Energy Rev*, 2014, 37: 715–733.
- [40] LEUNG C K Y, PHEERAPHAN T. Determination of optimal process for microwave curing of concrete[J]. *Cem Concr Res*, 1997, 27(3): 463–472.
- [41] WU X, DONG J, TANG M. Microwave curing technique in concrete manufacture[J]. *Cem Concr Res*, 1987, 17(2): 205–210.
- [42] LEUNG C K Y, PHEERAPHAN T. Microwave curing of Portland cement concrete: experimental results and feasibility for practical applications[J]. *Constr Build Mater*, 1995, 9(2): 67–73.
- [43] MUTHUKRISHNAN S, RAMAKRISHNAN S, SANJAYAN J. Effect of microwave heating on interlayer bonding and buildability of geopolymer 3D concrete printing[J]. *Constr Build Mater*, 2020, 265: 120786.
- [44] BOUKENDAKDJI O, KADRI E, KENAI S. Effects of granulated blast furnace slag and superplasticizer type on the fresh properties and compressive strength of self-compacting concrete[J]. *Cem Concr Compos*, 2012, 34(4): 583–590.
- [45] ZHANG J, GAO X, YU L. Improvement of viscosity-modifying agents on air-void system of vibrated concrete[J]. *Constr Build Mater*, 2020, 239: 117843.
- [46] JIAO D, EL CHEIKH K, SHI C, et al. Structural build-up of cementitious paste with nano-Fe₃O₄ under time-varying magnetic fields[J]. *Cem Concr Res*, 2019, 124: 105857.
- [47] NAIR S D, FERRON R D. Set-on-demand concrete[J]. *Cem Concr Res*, 2014, 57: 13–27.
- [48] SU N, WU C. Effect of magnetic field treated water on mortar and concrete containing fly ash[J]. *Cem Concr Compos*, 2003, 25(7): 681–688.
- [49] SOTO-BERNAL J J, GONZALEZ-MOTA R, ROSALES-CANDELAS I, et al. Effects of static magnetic fields on the physical, mechanical, and microstructural properties of cement pastes[J]. *Adv Mater Sci Eng*, 2015, 2015(2): 1–9.
- [50] CHEN J, WANG J, JIN W. Study of magnetically driven concrete[J]. *Constr Build Mater*, 2016, 121: 53–59.
- [51] ABAVISANI I, REZAIFAR O, KHEYRODDIN A. Alternating magnetic field effect on fine-aggregate steel chip-reinforced concrete properties[J]. *J Mater Civ Eng*, 2018, 6(30): 04018087.
- [52] ABAVISANI I, REZAIFAR O, KHEYRODDIN A. Alternating magnetic field effect on fine-aggregate concrete compressive strength[J]. *Constr Build Mater*, 2017, 134: 83–90.
- [53] NAIR S D, FERRON R D. Real time control of fresh cement paste stiffening: Smart cement-based materials via a magnetorheological approach[J]. *Rheol Acta*, 2016, 55(7): 571–579.
- [54] NAIR S D. Adaptive Performance of Cement-based Materials Using a Magnetorheological Approach[D]. The University of Texas at Austin, 2013.
- [55] JIAO D, LESAGE K, YARDIMCI M Y, et al. Rheological properties of cement paste with nano-Fe₃O₄ under magnetic field: Flow curve and nanoparticle agglomeration[J]. *Materials*, 2020, 13(22): 5164.
- [56] JIAO D, LESAGE K, YARDIMCI M Y, et al. Quantitative assessment of the influence of external magnetic field on clustering of nano-Fe₃O₄ particles in cementitious paste[J]. *Cem Concr Res*, 2021, 142: 106345.
- [57] JIAO D, LESAGE K, YARDIMCI M Y, et al. Structural evolution of cement paste with nano-Fe₃O₄ under magnetic field—Effect of concentration and particle size of nano-Fe₃O₄[J]. *Cem Concr Compos*, 2021, 120: 104036.
- [58] JIAO D, LESAGE K, YARDIMCI M Y, et al. Rheological behavior of cement paste with nano-Fe₃O₄ under magnetic field: Magneto-rheological responses and conceptual calculations[J]. *Cem Concr Compos*, 2021, 120: 104035.
- [59] SURYANTO B, MCCARTER W J, STARRS G, et al. Electrochemical impedance spectroscopy applied to a hybrid PVA/steel fiber

- engineered cementitious composite[J]. *Mater Des*, 2016, 105: 179–189.
- [60] LEE H, PARK S, CHO S, et al. Correlation analysis of heating performance and electrical energy of multi-walled carbon nanotubes cementitious composites at sub-zero temperatures[J]. *Compos Struct*, 2020, 238: 111977.
- [61] KOVTUN M, ZIOLKOWSKI M, SHEKHOVTSOVA J, et al. Direct electric curing of alkali-activated fly ash concretes: A tool for wider utilization of fly ashes[J]. *J Clean Prod*, 2016, 133: 220–227.
- [62] WADHWA S S, SRIVASTAVA L K, GAUTAM D K, et al. Direct electric curing of *in-situ* concrete[J]. *Build Res Inf*, 1987, 20(2): 97–101.
- [63] 李闯, 范颖芳, 李秋超. 基于电化学阻抗谱的偏高岭土水泥性能研究[J]. *建筑材料学报*, 2020, 23(4): 755–762.
- LI Chuang, FAN Yingfang, LI Qiuchao. *J Build Mater* (in Chinese), 2020, 23(4): 755–762.
- [64] 姜凤娇. 混凝土水泥水化、氯离子扩散及钢筋锈蚀的电化学分析[D]. 大连理工大学, 2020.
- JIANG Fengjiao. *Electrochemical analysis of cement hydration, chloride diffusion and corrosion of steel corrosion* (in Chinese, dissertation). Dalian: Dalian University of Technology, 2020.
- [65] 张国防, 王培铭. 羟乙基甲基纤维素对水泥水化产物形成的影响[J]. *建筑材料学报*, 2010, 13(5): 573–577.
- ZHANG Guofang, WANG Peiming. *J Build Mater* (in Chinese), 2010, 13(5): 573–577.
- [66] 张国防, 王培铭. 羟乙基甲基纤维素影响水泥水化进程的交流阻抗研究[J]. *建筑材料学报*, 2014, 17(1): 9–14.
- ZHANG Guofang, WANG Peiming. *J Build Mater* (in Chinese), 2014, 17(1): 9–14.
- [67] 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.
- [68] 徐光宪, 王祥云. *物质结构*[M]. 北京: 高等教育出版社, 1987: 446–457.
- [69] PILLA A A, MUEHSAM D J, MARKOV M S. A dynamical systems/Larmor precession model for weak magnetic field bioeffects: Ion binding and orientation of bound water molecules[J]. *Bioelectrochem Bioenerg*, 1997, 43(2): 239–249.
- [70] LUNDAGER M H E. Crystallization of calcium carbonate in magnetic field in ordinary and heavy water[J]. *J Cryst Growth*, 2004, 267(1/2): 251–255.
- [71] UYEDA C, KANO S, HISAYOSHI K, et al. Efficiency of magnetic alignment found in various paramagnetic and dia-magnetic solids detected by simple rotational oscillation of sample in microgravity[J]. *Mater Trans*, 2007, 48(11): 2893–2897.
- [72] RABINOW J. The magnetic fluid clutch[J]. *Electri Eng*, 1948, 67(12): 1167–1167.
- [73] DESHMUKH S S. Development, characterization and applications of magnetorheological fluid based “smart” materials on the macro-to-micro scale[D]. Massachusetts Institute of Technology, 2006.
- [74] BICA I, LIU Y D, CHOI H J. Physical characteristics of magnetorheological suspensions and their applications[J]. *J Ind Eng Chem*, 2013, 19(2): 394–406.
- [75] GENÇ S, PHULÉ P P. Rheological properties of magnetorheological fluids[J]. *Smart Mater Struct*, 2002, 11(1): 140.
- [76] KHEDKAR Y M, BHAT S, ADARSHA H. A review of magnetorheological fluid damper technology and its applications[J]. *Int Rev Mech Eng*, 2019, 13(4): 256–264.
- [77] KUMAR J S, PAUL P S, RAGHUNATHAN G, et al. A review of challenges and solutions in the preparation and use of magnetorheological fluids[J]. *Int J Mech Mater Eng*, 2019, 14(1): 1–18.
- [78] DE Vicente J, KLINGENBERG D J, HIDALGO-ALVAREZ R. Magnetorheological fluids: A review[J]. *Soft Matter*, 2011, 7(8): 3701–3710.
- [79] ROZYNEK Z, ZACHER T, JANEK M, et al. Electric-field-induced structuring and rheological properties of kaolinite and halloysite[J]. *Appl Clay Sci*, 2013, 77: 1–9.
- [80] IAN HERITAGE F M K A. Thermal acceleration of portland cement concretes using direct electronic curing[J]. *ACI Mater J*, 2000, 97(1): 37–40.
- [81] BARHAM W S, ALBISS B, LATAYFEH O. Influence of magnetic field treated water on the compressive strength and bond strength of concrete containing silica fume[J]. *J Build Eng*, 2021, 33: 101544.
- [82] 李月光, 伊书国, 张霖波, 等. 磁化水水泥混凝土研究现状与发展前景[J]. *材料科学与工程学报*, 2019, 37(2): 331–338.
- LI Yueguang, YI Shuguo, ZHANG Linbo, et al. *Chi J Mater Sci Eng* (in Chinese), 2019, 37(2): 331–338.
- [83] AHMED H I. Behavior of magnetic concrete incorporated with Egyptian nano alumina[J]. *Constr Build Mater*, 2017, 150: 404–408.
- [84] ZHOU K X, LU G W, ZHOU Q C, et al. Monte Carlo simulation of liquid water in a magnetic field[J]. *J Appl Phys*, 2000, 88(4): 1802–1805.
- [85] AFSHIN H, N M G, KHORSHIDI N. Improving mechanical properties of high strength concrete by magnetic water technology[J]. *Sci Iranica Trans A: Civ Eng*, 2010, 17(1): 74–79.
- [86] KHORSHIDI N, ANSARI M, BAYAT M. An investigation of water magnetization and its influence on some concrete specificities like fluidity and compressive strength[J]. *Comput Concr*, 2014, 13(5): 649–657.
- [87] ESFAHANI A R, REISI M, MOHR B. Magnetized water effect on compressive strength and dosage of superplasticizers and water in self-compacting concrete[J]. *J Mater Civ Eng*, 2018, 30(3): 4018001–4018008.
- [88] GHOLHAKI M, KHEYRODDIN A, HAJFOROUSH M, et al. An investigation on the fresh and hardened properties of self-compacting concrete incorporating magnetic water with various pozzolanic materials[J]. *Constr Build Mater*, 2018, 158(15): 173–180.
- [89] GHORBANI S, GHORBANI S, TAO Z, et al. Effect of magnetized water on foam stability and compressive strength of foam concrete[J]. *Constr Build Mater*, 2019, 197: 280–290.
- [90] KOZISSNIK B, BOHORQUEZ A C, DOBSON J, et al. Magnetic fluid hyperthermia: Advances, challenges, and opportunity[J]. *Int J Hyperther*, 2013, 29(8): 706–714.
- [91] LAURENT S, DUTZ S, HÄFELI U O, et al. Magnetic fluid hyperthermia: Focus on superparamagnetic iron oxide nanoparticles[J].

- Adv Colloid Interface Sci, 2011, 166(1/2): 8–23.
- [92] HE Y B, LASKOWSKI J S, KLEIN B. Particle movement in non-Newtonian slurries: the effect of yield stress on dense medium separation[J]. Chem Eng Sci, 2001, 56(9): 2991–2998.
- [93] RANKIN P J, HORVATH A T, KLINGENBERG D J. Magnetorheology in viscoplastic media[J]. Rheol Acta, 1999, 38(5): 471–477.
- [94] UYGUNOĞLU T, HOCAOĞLU İ. Effect of electrical curing application on setting time of concrete with different stress intensity[J]. Constr Build Mater, 2018, 162: 298–305.
- [95] WILSON J G, GUPTA N K. Equipment for the investigation of the accelerated curing of concrete using direct electrical conduction[J]. Measurement, 2004, 35(3): 243–250.
- [96] TIAN W, LIU Y, QI B, et al. Enhanced effect of carbon nanofibers on heating efficiency of conductive cementitious composites under ohmic heating curing[J]. Cem Concr Compos, 2021, 117: 103904.
- [97] CECINI D, AUSTIN S A, CAVALARO S, et al. Accelerated electric curing of steel-fibre reinforced concrete[J]. Constr Build Mater, 2018, 189: 192–204.
- [98] YANG Z, XIE Y, HE J, et al. Experimental investigation on mechanical strength and microstructure of cement paste by electric curing with different voltage and frequency[J]. Constr Build Mater, 2021, 299: 123615.
- [99] TIAN W, LIU Y, WANG M, et al. Performance and economic analyses of low-energy ohmic heating cured sustainable reactive powder concrete with dolomite powder as fine aggregates[J]. J Clean Prod, 2021, 329: 129692.
- [100] KIM G M, YANG B J, RYU G U, et al. The electrically conductive carbon nanotube (CNT)/cement composites for accelerated curing and thermal cracking reduction[J]. Compos Struct, 2016, 158: 20–29.
- [101] LIU Y, TIAN W, WANG M, et al. Rapid strength formation of on-site carbon fiber reinforced high-performance concrete cured by ohmic heating[J]. Constr Build Mater, 2020, 244: 118344.
- [102] FERRÁNDEZ D, SAIZ P, Morón C, et al. Inductive method for the orientation of steel fibers in recycled mortars[J]. Constr Build Mater, 2019, 222: 243–253.
- [103] VILLAR V P, MEDINA N F, HERNÁNDEZ-OLIVARES F. A model about dynamic parameters through magnetic fields during the alignment of steel fibres reinforcing cementitious composites[J]. Constr Build Mater, 2019, 201: 340–349.
- [104] VILLAR V P, MEDINA N F. Alignment of hooked-end fibres in matrices with similar rheological behaviour to cementitious composites through homogeneous magnetic fields[J]. Constr Build Mater, 2018, 163: 256–266.
- [105] ABAVISANI I, REZAIFAR O, KHEYRODDIN A. Magneto-electric control of scaled-down reinforced concrete beams[J]. Aci Struct J, 2017, 114(1): 233–244.
- [106] ABAVISANI I, REZAIFAR O, KHEYRODDIN A. Alternating magnetic field effect on fine-aggregate steel chip-reinforced concrete properties[J]. J Mater Civ Eng, 2018, 30(6): 040180876.
- [107] HAJFOROUSH M, KHEYRODDIN A, REZAIFAR O. Investigation of engineering properties of steel fiber reinforced concrete exposed to homogeneous magnetic field[J]. Constr Build Mater, 2020, 252: 119064.
- [108] TIAN W, LIU Y, WANG W. Multi-structural evolution of conductive reactive powder concrete manufactured by enhanced ohmic heating curing[J]. Cem Concr Compos, 2021, 123: 104199.
- [109] WEST R. P. ZHANG S J, MANDL J. Aligning long steel fibres in fresh concrete[C].//Cement Combinations for Durable Concrete: Proceedings of the International Conference held at the University of Dundee, Scotland, UK on 5–7 July 2005. Thomas Telford Publishing, 2005: 467–476.
- [110] WEST R P. Design issues in the alignment of steel fibres in concrete slabs using a magnetic field[C].//Concrete Floors And Slabs: Proceedings of the International Seminar held at the University of Dundee, Scotland, UK on 5–6 September 2002. Thomas Telford Publishing, 2002: 35–44.
- [111] WIJFFELS M J H, WOLFS R J M, SUIKER A S J, et al. Magnetic orientation of steel fibres in self-compacting concrete beams: Effect on failure behaviour[J]. Cem Concr Compos, 2017, 80: 342–355.