第 49 卷第 7 期　　硅　酸　盐　学　报　　Vol. 49，No. 7
2021 年 7 月　　JOURNAL OF THE CHINESE CERAMIC SOCIETY　　July，2021
http://www.gxyb.cbpt.cnki.net　　DOI：10.14062/j.issn.0454-5648.20200834

# 碳纤维–碱激发砂浆自感知性能

刘卫森[1]，郭英健[1]，胡　捷[2]，马玉玮[1]，傅继阳[1]

(1. 广州大学，广州大学风工程与工程振动研究中心，广州 510006；2. 华南理工大学材料科学与工程学院，广州 510640)

**摘　要：**采用短切碳纤维(CF)作为导电材料制备碱激发矿渣/粉煤灰复合导电砂浆，研究了碳纤维掺量、应力加载幅值和加载速率对碳纤维–碱激发导电砂浆导电性能、力学性能与自感知性能的影响。结果表明：碳纤维体积分数为 0.2%时，碱激发导电砂浆达到渗流阈值，形成导电通路，且在不同加载速率和应力幅值作用下均表现出稳定的自感知性能和较高的灵敏度。当应力幅值为 12.0 MPa、加载速率为 2.0 kN/s 时，自感知性能最优，应变灵敏度可达 175.0，比碳纤维–水泥砂浆高 1 个数量级。

**关键词：**碱激发矿渣/粉煤灰；碳纤维；导电性；灵敏度
**中图分类号：**TB332　　**文献标志码：**A　　**文章编号：**0454–5648(2021)07–1510–09
**网络出版时间：**2021–06–25

## Self-Sensing Property of Carbon Fiber–Alkali Activated Mortar

*LIU Weisen*[1], *GUO Yingjian*[1], *HU Jie*[2], *MA Yuwei*[1], *FU Jiyang*[1]
(1. Wind Engineering and Engineering Vibration Research Center of Guangzhou University, Guangzhou University, Guangzhou 510006, China; 2. School of Materials Science and Engineering, South China University of Technology, Guangzhou 510640, China)

**Abstract:** Chopped carbon fiber (CF) was used as a conductive material to prepare alkali-activated slag/fly ash conductive mortar. The effects of carbon fiber content, stress loading amplitude and loading rate on the conductivity, mechanical properties and self-sensing properties of carbon fiber−alkali-activated conductive mortar were investigated. The results show that the alkali-activated conductive mortar reaches the percolation threshold and forms a conductive path when the volume fraction of carbon fiber is 0.2%. The mixture has a stable self-sensing performance with a high gauge factor at different loading rates and stress amplitudes. The self-sensing performance of alkali-activated slag/fly ash is the optimum with a gauge factor of 175, which is one order of magnitude greater than that of carbon fiber−cement mortar, when the stress amplitude is 12 MPa and the loading rate is 2.0 kN/s.

**Keywords:** alkali-activated slag/fly ash; carbon fiber; electrical conductivity; gauge factor

自感知混凝土是一种集结构和传感功能于一体的混凝土材料，通过在成型过程中掺入具有导电功能的组分，如碳纤维[1–6]、石墨[7]、炭黑[8]等，使其具备特殊功能，在外力作用下能够感应自身应力/应变/内部损伤等，可用于混凝土结构构件的健康监测[9]。与其它传感器(如电阻应变片、光纤光栅、压电材料等)相比，自感知混凝土与传统的混凝土具有天然的相容性，其耐久性与普通混凝土相似，由其组成的智能结构材料无须再埋设传感器，是传统混凝土结构向结构材料智能化发展的一个重点方向。

传统的水泥基材料本身并不具备自感知特性(其电阻率在 $10^5$~$10^7$ Ω·cm[10])，需要依靠掺入的导电组分在基体材料内部形成导电网络来提高整体的导电性。以往研究一般通过加入一些含碳或金属的材料[11–13]，如高碳含量的粉煤灰[14]、钢渣粉[15]和硅灰等来提升基体材料导电性，但改善效果有限。碱激发材料是近年出现的最具发展潜力的绿色胶凝材料之一，它是以一种/几种富含硅铝酸盐固体(如：矿渣、粉煤灰、偏高岭土等)为原料，以硅酸钠、氢氧化钠或碳酸钠为激发剂，在碱性条件下反应生成

收稿日期：2020–11–05。　修订日期：2021–04–22。
基金项目：国家自然科学基金(52078149)资助。
第一作者：刘卫森(1992—)，男，硕士研究生。
通信作者：马玉玮(1984—)，女，博士，副教授。

**Received date**: 2020–11–05.　**Revised date**: 2021–04–22.
**First author:** LIU Weisen (1992–), male, Master candidate.
**E-mail:** 2111816160@e.gzhu.edu.cn
**Correspondent author:** MA Yuwei (1984–) female, Ph.D., Associate Professor.
**E-mail:** yuwei_ma@gzhu.edu.cn

的无机胶凝材料，具备早强快凝、结构密实、耐酸碱腐蚀等优点，同时可最大程度降低二氧化碳排放，是近年来新型无机胶凝材料的研究热点[16–18]。相较于水泥混凝土，碱激发材料孔溶液中含有丰富的离子(如钠离子，氢氧根离子，硅酸根离子等)，因此会具备更好的导电性。Rovnaník 等[19]研究发现碱激发矿渣比水泥具有更优异的导电性与自感知性能，更适合用来制 16 备自感知混凝土。此外，Vilaplana 等[20]比较了 0.29%(体积分数)与 0.58%碳纤维掺量的碱激发材料与水泥的电阻率，发现碳纤维地聚物的电阻率比碳纤维水泥低 1~2 个数量级，具备优异的压敏性能。因此，碱激发材料是制备自感知混凝土的理想基体材料。

目前大部分关于碱激发材料的研究都将其作为普通水泥混凝土的绿色替代材料，而关于碱激发基自感知混凝土的相关研究较少，特别是针对其电学性能及自感知性能的研究尚未系统展开。本工作以矿渣、粉煤灰为原材料，采用短切碳纤维制备了碱激发矿渣/粉煤灰导电砂浆，研究了碳纤维–碱激发矿渣/粉煤灰砂浆的导电性能和早期工程性能，分析了碱激发矿渣/粉煤灰导电砂浆在不同荷载范围和加载速率下的自感知性能。

# 1　实验

## 1.1　样品制备

原材料主要包括高炉矿渣、粉煤灰、标准砂、碳纤维、甲基纤维素、磷酸三丁酯和碱性激发剂，其中，粉煤灰和高炉矿渣化学成分见表 1。按照水灰比 0.4 确定碱性激发剂的总水量，碱性激发剂由硅酸钠溶液($Na_2O$:12.19%，$SiO_2$:28.10%)，氢氧化钠[NaOH，分析纯，纯度(质量分数)＞98.00%)和纯净水]按比例配备，充分搅拌后常温静置 24 h 以上备用。采用聚丙烯腈基碳纤维作为导电相，化学成分见表 2。

将高炉矿渣、粉煤灰、标准砂按质量比 7.0:3.0:13.5 混合拌匀，然后逐步加入混合碳纤维的碱性激发剂进行搅拌，加入甲基纤维素和磷酸三丁酯作为分散剂与消泡剂，完全加入后搅拌 3 min。将新拌砂浆注入到 40.0 mm×40.0 mm×160.0 mm 的试模中，插入 40.0 mm×50.0 mm×0.2 mm 的钛网电极，振捣成型，密封后在标准条件下养护 28 d 得到碳纤维–碱激发导电砂浆。碳纤维体积掺量选取为 0、0.1%、0.2%、0.3%、0.4%、0.5%，共 6 个掺量。取 PⅡ 42.5 硅酸盐水泥作为对比组化学成分见表 1，采用水灰比 0.4，灰砂比 1.00:1.35，掺入体积分数为 0.3%碳纤维。

## 1.2　样品表征

用 S–3400–II 型扫描电子显微镜研究碳纤维的分散程度。用 PW3040/60 型 X 射线粉末衍射仪分析原材料及产物物相组成。用 ASAP2460 多站扩展式比表面与孔隙度分析仪分析反应产物的孔结构。用直流电源四电极法[21]测量试件的导电性，如图 1 所示。用 INSTRON–5984 型万能材料试验机进行力学试验和压敏试验。试件密封养护 28 d 后，用 2.5 kN/s 加载速率测试样品力学性能直至试件破坏，在循环荷载作用下进行导电砂浆的自感知压敏试验，循环荷载加载速率分别采用 0.2、0.4、0.6、0.8 kN/s 和 2.0 kN/s，应力幅值分别有 6.0、12.0 MPa，试件纵向受压，沿受力方向粘贴应变片。在循环加载过程中，同时采集砂浆试块的电阻变化率、应变和应力。

# 2　结果与讨论

## 2.1　导电性能

图 2 为碳纤维掺量对碱激发导电砂浆和水泥砂浆在不同龄期电导率的影响。由图 2 可知，随着碳纤维掺量的增加，碳纤维在基体材料中形成通路的几率随之增加，导电砂浆的电导率逐渐增长趋势。

表 1　粉煤灰、矿渣和水泥的化学成分

Table 1　Chemical composition of the fly ash, slag and Portland cement used in this study　　*w*/%

| Oxide | $SiO_2$ | $Al_2O_3$ | CaO | $Fe_2O_3$ | MgO | $SO_3$ | $Na_2O$ | $K_2O$ | Others | L.I. |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| Fly ash | 55.0 | 15.1 | 13.4 | 6.0 | 2.8 | 0.7 | 1.6 | 3.8 | 1.7 | 1.5 |
| Slag | 34.4 | 16. 9 | 38.1 | 0.4 | 6.2 | 2.3 | 0.2 | 0.4 | 1.1 | –1.5 |
| Cement | 21.7 | 6.2 | 62.0 | 3.5 | 1.5 | 2.9 | | 0.6 | 1.6 | 3.5 |

*w*—Mass fraction.

表 2　碳纤维的性能

Table 2　Properties of carbon fiber used in this study

| Diameter/μm | Tensile strength/GPa | Young's modules/GPa | *w*(carbon)/% | Elongation at break/% | Density/(g·cm$^{-3}$) | Electrical Resistivity/(Ω·cm) |
|---|---|---|---|---|---|---|
| 7.0 | 3.0–3.5 | 220–240 | ≥95 | 1.50 | 1.77 | $1.5\times10^{-3}$ |

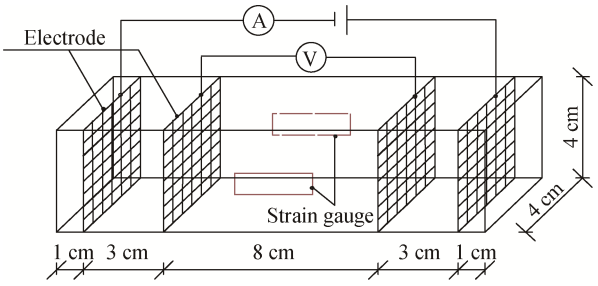
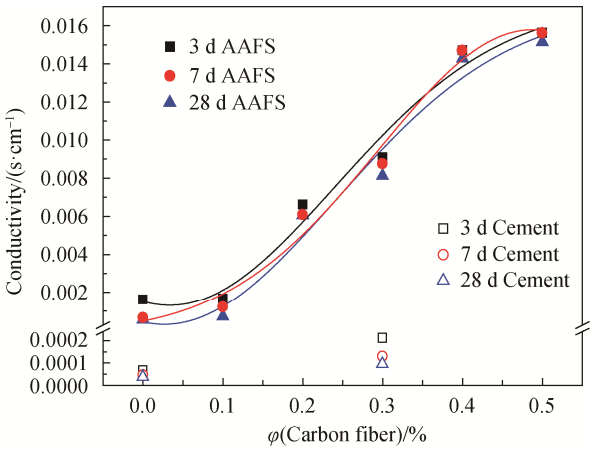



图 1 碳纤维–碱激发导电砂浆(CF–AAFS)电极布设及测试方法

Fig. 1 Specimen of CF–AAFS conductive mortar




φ—Volume fraction.

图 2 碳纤维掺量对碱激发矿渣/粉煤灰砂浆和水泥砂浆 3、7 d 与 28 d 的导电性能的影响

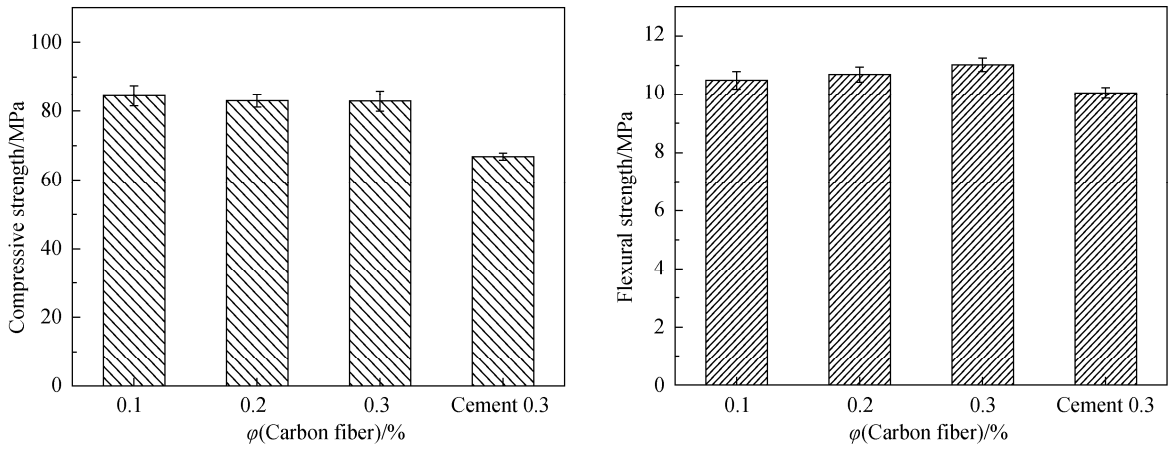
Fig. 2 Effect of carbon fiber content on the electrical conductivity of alkali-activated slag/fly ash mortar and cement mortar at the age of 3, 7 d and 28 d

当碳纤维体积掺量在 0.2%~0.4%时，碱激发矿渣/粉煤灰砂浆的电导率出现显著上升，这时碳纤维在碱激发材料中形成导电通路，达到渗流阈值；继续增加碳纤维掺量，电导率增长趋势变缓。随着养护龄期增加，碱激发材料的电导率稍有下降，这与碳纤维水泥材料相类似。与碳纤维掺量为 0.3%的水泥砂浆相比，相同碳纤维掺量的碱激发矿渣/粉煤灰砂浆的电导率高出 1 个数量级。陈兵等[22]采用长度 1.0 mm 的碳纤维，制备了碳纤维–水泥砂浆，研究发现当碳纤维掺量为 1.0%时，水泥砂浆的导电率达到渗流阈值 0.006 0 $(\Omega\cdot cm)^{-1}$，与本研究结果相比，碱激发矿渣/粉煤灰砂浆达到同样导电性能，碳纤维掺量仅为 0.2%，明显优于水泥砂浆。

## 2.2 力学强度

图 3 为不同碳纤维掺量的碱激发矿渣/粉煤灰砂浆 28 d 的抗压强度与抗折强度。由图 3a 可知，碱激发矿渣/粉煤灰 28 d 强度均可达到 80.0 MPa 以上。随着碳纤维掺量的增加，碱激发矿渣/粉煤灰的抗压强度稍有下降，这是由于碳纤维的掺入带入了一定量气泡，在基体内部造成气泡孔，影响了基体材料内部致密程度。与水泥砂浆相比，相同碳纤维掺量的碱激发矿渣/粉煤灰砂浆 28 d 的抗压强明显优于碳纤维–水泥砂浆的抗压强度(66.8 MPa)；

由图 3b 可知，碱激发矿渣/粉煤灰砂浆 28 d 抗折强度均高于 10.0 MPa，优于水泥砂浆的抗折强度。碳纤维的掺入可增强碱激发矿渣/粉煤灰的抗折强度，碳纤维能提高胶凝材料的强度和延性。文献[23]研究表明：碳纤维具有很强的抗裂作用，当混凝土基体内出现裂缝时，碳纤维能有效地缓解裂缝尖端的应力集中，并将应力传递到未开裂部位，吸收更多的能量，改善断裂韧性，从而提高混凝土的抗折强度。




(a) Compressive strength (b) Flexural strength

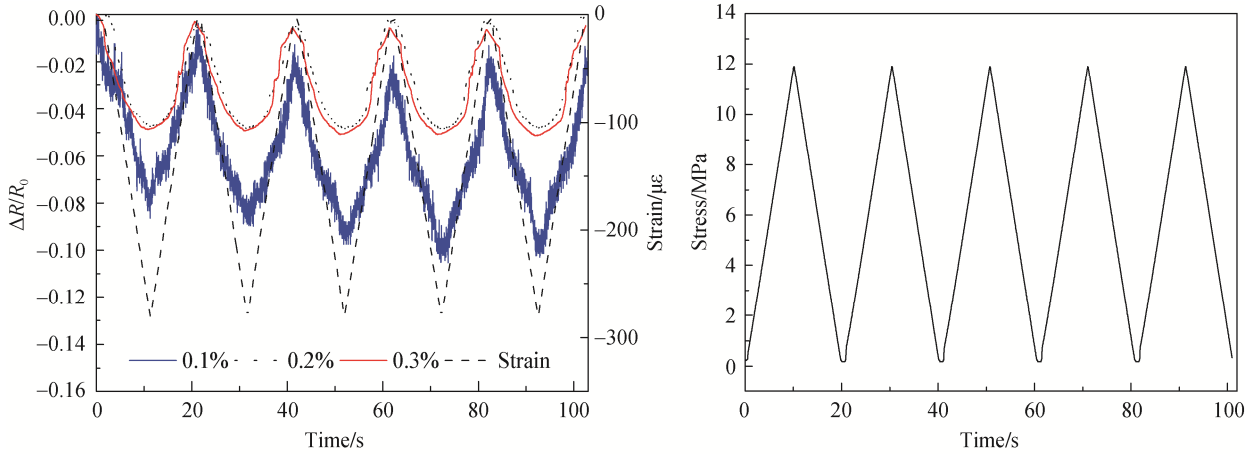
图 3 碳纤维掺量对碱激发矿渣/粉煤灰砂浆与水泥砂浆 28 d 抗压强度和抗折强度的影响

Fig. 3 Effect of carbon fiber content on the compressive strength and flexural strength of alkali-activated slag/fly ash mortar and cement mortar at the age of 28 d

### 2.3 自感知性能

2.3.1 碳纤维掺量对自感知性能的影响　图 4 为不同碳纤维掺量的碱激发矿渣/粉煤灰砂浆在应力幅值 0~12.0 MPa 的循环荷载作用下电阻变化率与应力应变时程关系曲线。由图 4 可知，当碳纤维掺量为 0.1%时，碱激发矿渣/粉煤灰砂浆的电阻变化率波动幅度较大，其电阻变化率幅值高出碳纤维掺量为 0.2%与 0.3%碱激发砂浆的 1 倍以上，灵敏度较高；但电阻变化率离散性较大，且电阻变化率幅值随时间增加呈现逐步增大趋势，碳纤维在碱激发材料基体中未形成连通的良好导电网络。当碳纤维掺量为 0.2%和 0.3%时，电阻变化率曲线较为光滑，虽然电阻变化率幅值较小(约为–0.04)，但其重现性好，稳定性较高。

图 5 为循环荷载作用下,碱激发矿渣/粉煤灰砂浆电阻变化率幅值[Peak($\Delta R/R_0$)]随加载周期数的变化规律。由图 5 可知，当碳纤维掺量为 0.1%时，碱激发材料电阻变化率幅值随加载周期增加出现明显下降，而碳纤维掺量为 0.2%和 0.3%时，电阻变化率幅值变化较小，表明此时碳纤维掺量达到渗流阈值，在碱激发基体内部形成了连通的良好导电网络，有效提升了其自感知的稳定性。




(a) Resistance change rate and strain　　(b) Stress loading mode

图 4　循环荷载作用下不同碳纤维掺量碱激发矿渣/粉煤灰砂浆电阻变化率随应变与应力时程变化曲线

Fig. 4　Change of resistance change rate with strain and stress for alkali-activated slag/fly ash mortar with different carbon fiber content under cyclic loading

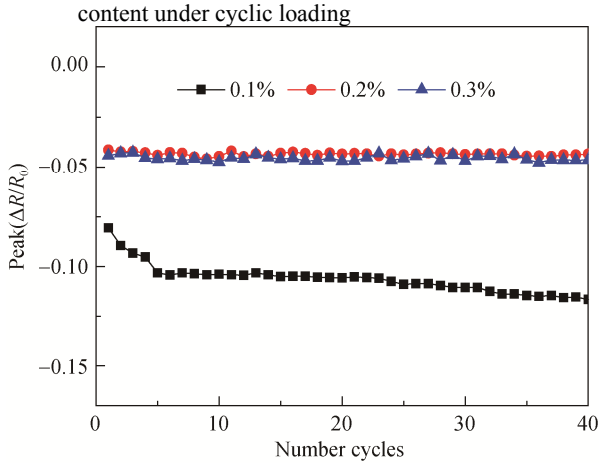



图 5　循环荷载作用下电阻变化幅值[Peak($\Delta R/R_0$)]随加载周期变化曲线

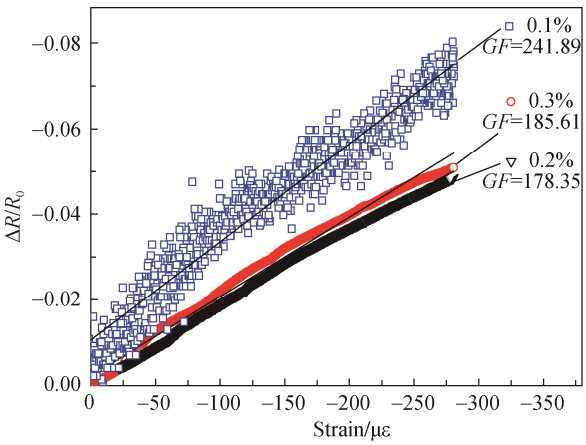
Fig. 5　Amplitude of the resistance change[Peak($\Delta R/R_0$)] with the loading period

压敏复合材料的灵敏度是指单位电阻变化率与单位应变的比值，通常用应变系数(Gauge Factor)进行表征。

$$GF = \frac{\Delta R / R_0}{\varepsilon}$$

式中：$GF$ 为应变系数；$\Delta R$ 为电阻变化；$R_0$ 为初始电阻；$\varepsilon$ 为纵向应变。

图 6 为不同碳纤维掺量的碱激发矿渣/粉煤灰砂



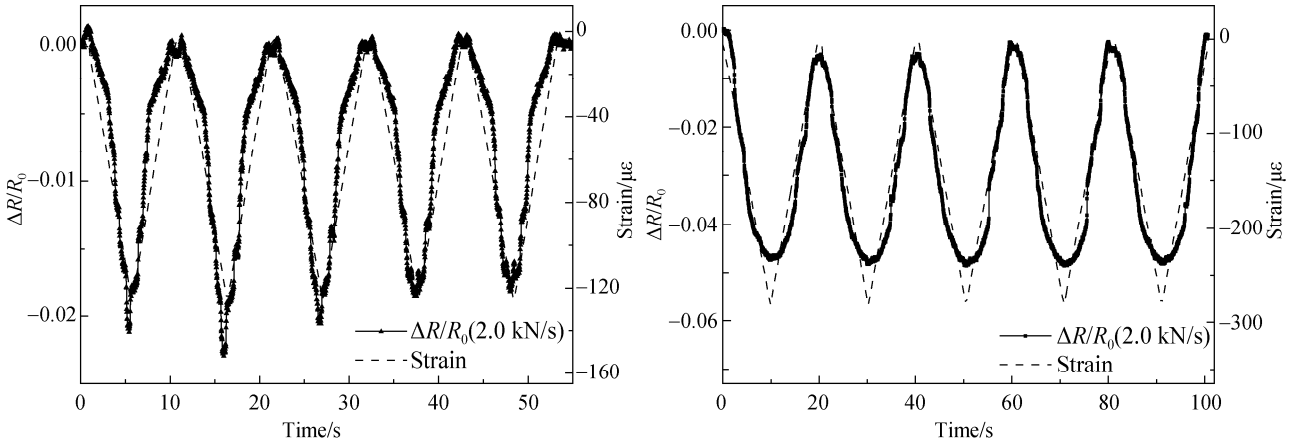

*GF* is gauge factor.

图 6　不同碳纤维掺量的碱激发矿渣/粉煤灰砂浆电阻变化率与应变关系曲线

Fig. 6　Relationship between resistance change rate and strain of alkali-activated slag/fly ash mortar with different carbon fiber content

浆电阻变化率与应变之间关系曲线。由图 6 可知，当碳纤维体积掺量为 0.1%时，碱激发矿渣/粉煤灰的应变系数(*GF*)数值最大(241.9)，但数据呈不稳定波动，数据之间离散性较大，重复性较差。当碳纤维体积掺量为 0.2%与 0.3%时，碱激发矿渣/粉煤灰砂浆的电阻变化率–应变数据点集中在一个特定区域，数据分布越来越狭窄，应变系数稳定在 180.0 左右，且循环加载过程中数据离散型较小，重复性较好，精度越来越高。

2.3.2 应力幅值对自感知性能的影响 图 7 为应力幅值为 6.0 MPa 和 12.0 MPa 循环荷载作用下碳纤维–碱激发矿渣/粉煤灰砂浆(碳纤维体积掺量 0.2%)电阻变化率随应变与应力的时程关系曲线。由图 7 可知，应力幅值为 6.0 MPa 与 12.0 MPa 时，试件的电阻变化率均与应变之间存在良好的对应关系，图 7b 中应力幅值 12.0 MPa 的电阻变化率幅值(约为–0.045)较图 7a 中应力幅值为 6.0 MPa 时提高 1 倍(约为–0.020)，表明电阻变化率幅值与应变幅值之间具有很好对应性，具有良好的感知性能。同时观察到应力幅值为 12.0 MPa 时的电阻变化率变化曲线更光滑，且重现稳定性更高。




(a) 6.0 MPa (b) 12.0 MPa

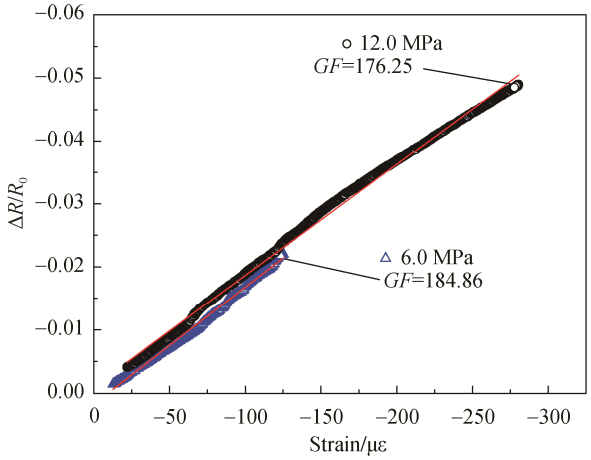
*φ*(Carbon fiber) is 0.2%.; loading rate is 2.0 kN/s.

图 7 在不同应力幅值循环加载下碳纤维–碱激发矿渣/粉煤灰电阻变化率和应变的时程变化

Fig. 7 Time course variation of resistance change rate and strain of carbon fiber alkali–activated slag/fly ash under cyclic loading with different stress amplitude

图 8 为加载速率为 2.0 kN/s、不同应力幅值条件下碳纤维–碱激发矿渣/粉煤灰砂浆电阻变化率与应变之间的关系曲线。由图 8 可知，在不同应力幅值下，碱激发矿渣/粉煤灰砂浆电阻变化率–应变数据点均具有较好的线性关系，数据离散性小，精确度较高。电阻变化率与应变的斜率代表应变灵敏度，随着应力幅值由 6.0 MPa 增加到 12.0 MPa，碱激发矿渣/粉煤灰应变灵敏度稍有下降，但基本稳定在 180.0 左右，表明碳纤维–碱激发矿渣/粉煤灰砂浆具有稳定和规律的自感知性能。

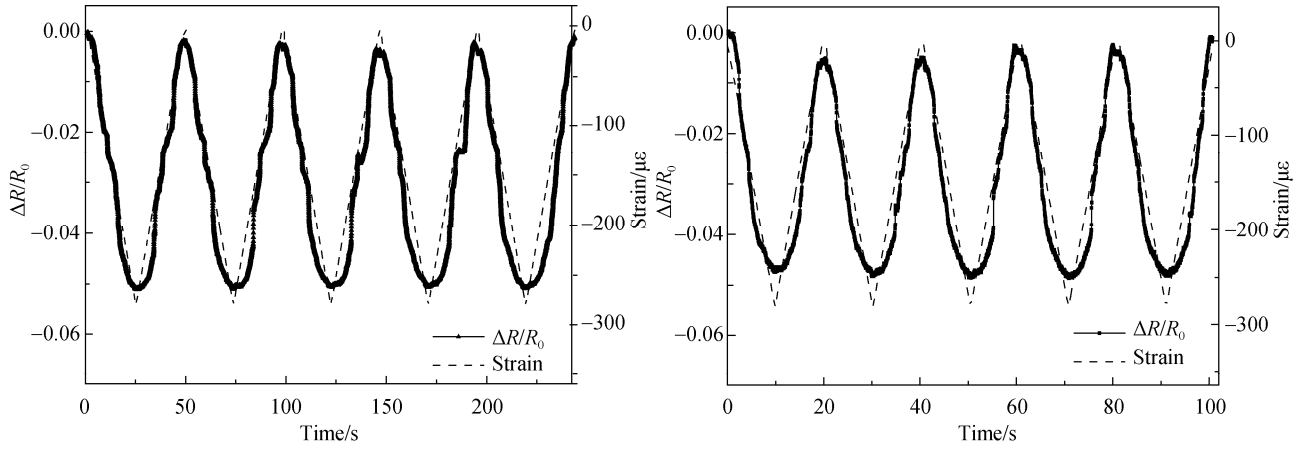
2.3.3 加载速率对自感知性能的影响 图 9 为不同加载速率循环荷载作用下碱激发矿渣/粉煤灰砂浆的电阻变化率随应变时程关系曲线。由图 9 可知，加载速率为 0.8 kN/s 和 2.0 kN/s 时，试件电阻变化率与应变之间均存在良好的对应关系，电阻变化率幅值在–0.050 左右，表明电阻变化率与应变之间具有很好的一一对应关系，显示出良好的感知性能。当荷载加载速率为 2.0 kN/s 时，碱激发砂浆的电阻变化率响应曲线更光滑，且重现性与稳定性更高。在循环荷载作用下，碱激发矿渣/粉煤灰砂浆电阻变化率与应变的良好对应现象。




*φ*(Carbon fiber) is 0.2%.

图 8 碳纤维–碱激发矿渣/粉煤灰电阻变化率在应力幅值为 6.0 MPa 和 12.0 MPa 循环荷载作用下电阻变化率与应变之间关系曲线

Fig. 8 Change of resistance change rate and strain of alkali–activated slag/fly ash mortar under loading with a stress amplitude of 6.0 MPa and 12.0 MPa




(a) 0.8 kN/s　　(b) 2.0 kN/s

$\varphi$(Carbon fiber) is 0.2%; Stress amplitude is 12.0 MPa.

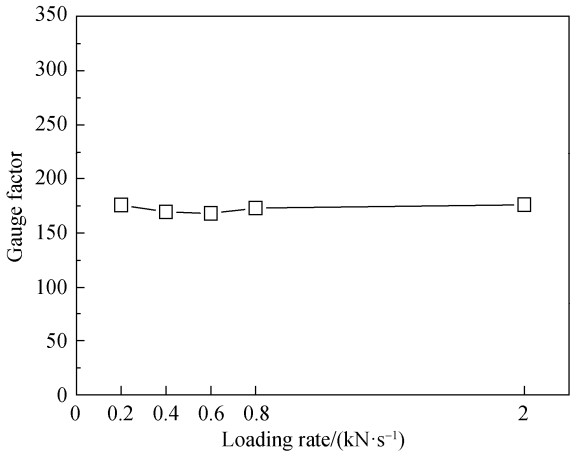
图 9　碱激发矿渣/粉煤灰的电阻变化率在不同加载速率的循环荷载作用下随应变时程关系曲线

Fig. 9　Change of resistance change rate of alkali-activated slag/fly ash with time and strain under cyclic loading with different loading rates

图 10 为碱激发矿渣/粉煤灰砂浆(碳纤维体积掺量 0.2%)在等应力幅值(12.0 MPa)不同加载速率下的 GF 的变化规律。由图 10 可知，随着加载速率从 0.2 kN/s 增加到 2.0 kN/s，碳纤维–碱激发矿渣/粉煤灰的 GF 逐渐趋于稳定状态，表明较高的加载速率可以使碳纤维–碱激发矿渣/粉煤灰具有更稳定的压敏性能。同时，不同加载速率下碳纤维–碱激发矿渣/粉煤灰的 *GF* 保持在 175.0。Baeza 等[22]采用长度为 0.6 mm 的碳纤维制备碳纤维–水泥砂浆，当导电率达到渗流阈时，其 GF 仅在 17.0 左右，碳纤维–碱激发矿渣/粉煤灰与之相比则高出 1 个数量级。

2.3.4　导电性能和自感知性能的对比表　碳纤维碱激发矿渣/粉煤灰砂浆与碳纤维水泥砂浆的导电性能和自感知性能的对比见表 3。碱激发矿渣/粉煤灰砂浆的在碳纤维掺量为 0.2%时，导电性达到 $6.0\times10^{-3}$ $(\Omega\cdot cm)^{-1}$，较 Han[24]和 Pisello 等[25]使用其他碳基导电材料制备的水泥复合材料的导电性高出 2~3 个数量级，与 Baeza 等[26]和陈兵等[22]使用碳纤维制备的水泥复合材料相比，当取得同样导电性能时，碱激发矿渣/粉煤灰砂浆需要的碳纤维更少。

碳纤维碱激发矿渣/粉煤灰砂浆在应力幅值为 12.0 MPa 循环载荷下取得应力敏感系数 12.5 Ω/MPa 远比 Han 等[24]和 Pisello 等[25]得到的结果要小，表明碳纤维碱激发矿渣/粉煤灰砂浆对应力的感知更精准。另外碳纤维碱激发矿渣/粉煤灰砂浆的应变系数高达 180.0，远高于 Baeza[22]在应力幅值 5.0 MPa 下得到的应变系数 29.9。




$\varphi$(Carbon fiber) is 0.2%.

图 10　碱激发矿渣/粉煤灰砂浆在不同加载速率下的应变系数

Fig. 10　Gauge factor of alkali-activated slag/fly ash under different loading rate

**表 3　导电性能和自感知性能对比**

**Table 3　Performance list of Electrical conductivity and self–sensing**

| Material composition | Conductive material | Dosage/% | Conductivity/$(\Omega\cdot cm)^{-1}$ | Self-sensing properties/$(\Omega\cdot MPa^{-1})$ | References |
|---|---|---|---|---|---|
| Cement | Carbon nanotubes | *w* is 0.5 | $9\times10^{-5}$ | 170.0 | [23] |
| Cement | Carbon-based admixtures | *w* is 1.5 and 2.0 | $2.7\times10^{-6}$ and $5.0\times10^{-7}$ | $4.3\times10^{4}$ and $1.6\times10^{6}$ | [24] |
| Cement | Carbon fiber is 0.7 mm | $\varphi$ is 1.0 | 0.006 0 | | [22] |
| Cement | Carbon fiber is 1.2 mm | *w* is 0.5 $\varphi$ is 0.3 | 0.009 6 | *GF*=29.9 | [22] |
| Alkali-activated slag/fly ash | Carbon fiber is 0.6–0.7 mm | $\varphi$ is 0.2 | 0.006 0 | 12.5 *GF* =180.0 | |

*GF* is gauge factor.

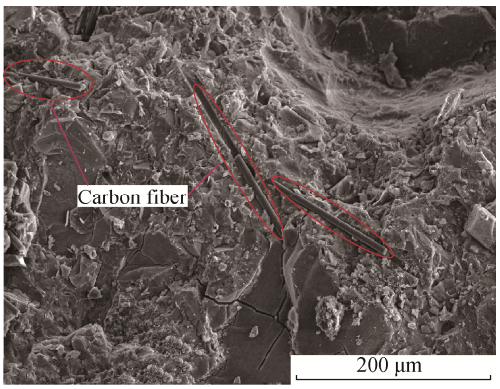
### 2.4 导电机理分析

混凝土是由多种材料制备而成的混合体，因此其导电机理比较复杂，是多种导电机理共同作用的结果。材料中只要存在电荷或自由粒子等载流子[27]，就可以在电场的作用下产生电流：金属材料的载流子是自由电子，无机材料的载流子可以是电子、离子。混凝土的导电机理主要包括以下方式：离子导电，通过孔溶液中各种离子的定向运动形成；电子导电，通过导电相中的电子传输形成；空穴导电，邻近价电子在电场作用下填补空位而形成；三者的作用随着混凝土内部各种组成材料的变化而变化。当导电相较少时，混凝土离子导电和空穴导电占主导地位；当导电相较多时，则连续导电相的电子导电和空穴导电将占主导地位。

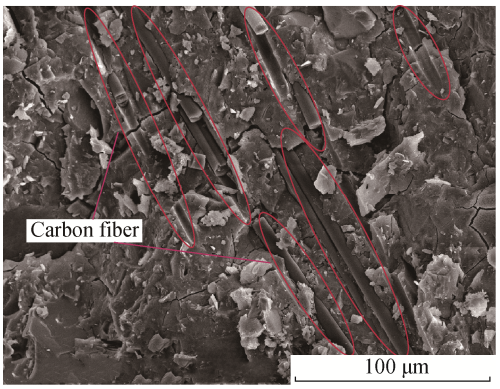
图 11 为不同碳纤维掺量的碱激发矿渣/粉煤灰砂浆的 SEM 照片。由图 11 可知，当碳纤维体积掺量为 0.1%时，碱激发基体材料中碳纤维不能相互搭接形成导电通路，碱激发材料电阻率较高，此时，基体内部主要导电方式为离子导电和空穴导电，在荷载压力作用下，电子需要克服相邻碳纤维的间隔势垒进行跃迁，内部基体、裂缝和孔隙受到拉伸或压缩时，势垒变化大，因此电阻率变化较大，此时，压敏性表现更敏感，但势垒的变化不均匀及离子导电的不稳定传输，导致电子跃迁不稳定，表现为压敏数据的离散型较大，重复性较差。当碳纤维掺量为 0.2%与 0.3%时，相邻的碳纤维相互搭接形成通路，碱激发矿渣/粉煤灰砂浆导电性明显提升，达到渗流阈值，此时，碱激发材料的电阻率已经达到较低值，在荷载作用下通过碳纤维的拉伸或拔出并不能明显改变其电阻率，基体拉压形变对电子迁移影响降低，碱激发材料的压敏灵敏度下降，但压敏的稳定性得到明显提升，电阻变化率—应变数据点集中在一个特定区域，精度越来越高，提升了压敏的稳定性。

图 12 为碱激发矿渣/粉煤灰 XRD 谱，由图 12 可见，碱激发矿渣/粉煤灰的反应产物主要是含铝的水化硅酸钙凝胶(C—A—S—H)，在 $2\theta$ 为 30°左右产生 1 个峰包，主要是由结晶度较差的 C—S—H 凝胶组成。除此以外，其他晶相均为原材料中自身所含有的晶体组成。

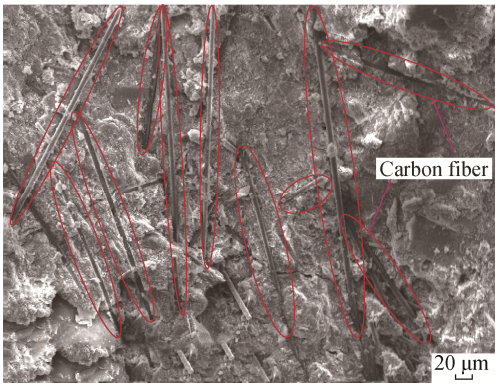
图 13 为碱激发矿渣/粉煤灰反应产物的吸脱附等温线和孔径分布图。由图 13 可知，碱激发矿渣/粉煤灰中存在着大量凝胶孔，在 2 nm 处有 1 个明显的特征峰，Rovnaník 等[17]比较了碱激发矿渣与普通




(a) 0.1%




(b) 0.2%




(c) 0.3%

图 11 碱激发矿渣/粉煤灰砂浆中不同掺量碳纤维分布的 SEM 照片

Fig. 11 SEM images of the distribution of carbon fiber with different content in alkali-activated slag/fly ash mortar

硅酸盐水泥的孔结构，发现碱激发矿渣中小于 5 nm 的凝胶孔的数量是水泥的 10 倍以上，凝胶孔并不会影响材料的力学性能，但可能会对材料的导电性能具有较大影响。在 Rovnaní 等[17]的研究中，认为碱激发材料具有较优异的导电性能可能包括 2 方面的原因：1) 碱激发材料孔溶液中存在着各种离子，且离子浓

度远高于普通硅酸盐水泥材料的离子浓度，如 $Na^+$，$OH^-$，$Ca^{2+}$，$Mg^{2+}$，$Al^{3+}$等，在外部电场作用下，离子会通过胶凝材料内部中大量存在的微孔(凝胶孔)溶液进行运动，从而导电；2) 矿渣中含有金属微粒，如铁微粒，镁微粒，铝微粒，在胶凝材料中分散均匀，Bernal 等[28]使用高分辨率 X 射线荧光显微镜对高炉矿渣中嵌入的不同颗粒进行了表征，证明了有不参与碱活化的金属铁纳米粒子的存在，在外部电场作用下，电子可以通过金属微粒进行迁移，能进一步提升胶凝材料的导电性。另一方面，有研究表明[29]，碳纤维在碱性溶液浸泡下，会增加其比表面积使碳纤维变得相对软化，此时分散剂较易进入到纤维表面，使得分散剂中的活性基团更易吸附在碳纤维表面，提高分散效率，不容易产生聚集或团簇。

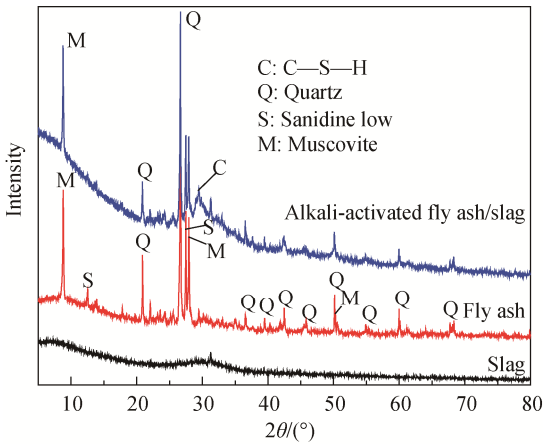
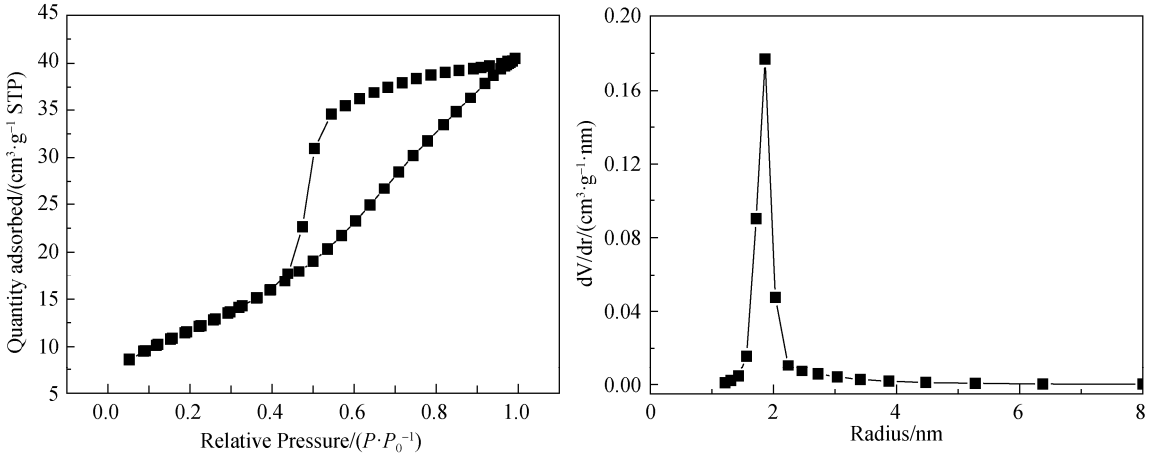



图 12　原材料及碱激发矿渣/粉煤灰反应产物的 XRD 谱

Fig. 12　XRD patterns of raw material and alkali-activated slag/fly ash reaction products




(a) Nitrogen adsorption and desorption isotherm　　(b) Pore size distribution.

*P* is pressure.

图 13　氮气吸附采集的碱激发矿渣/粉煤灰反应产物的孔结构

Fig. 13　Pore structure of alkali-activated slag/fly ash reaction products derived from the BJH gas adsorption method

## 3　结论

1) 少量碳纤维掺入可明显增强碱激发矿渣/粉煤灰砂浆的导电性能与自感知性能，当碳纤维体积掺量为 0.2% 时即达到导电的渗流阈值，相比于同掺量碳纤维的水泥砂浆其导电性能高出 1 个数量级。达到渗流阈值后(碳纤维掺量 0.2%)，碳纤维之间形成连通网络，其导电方式以电子导电为主，离子导电和空穴导电作用降低，碳纤维–碱激发砂浆应变敏感度有所下降，但压敏性能表现更稳定、重现性更好。

2) 碱激发矿渣/粉煤灰砂浆 28 d 强度均可达到 80.0 MPa 以上，碳纤维具有很强的抗裂作用，能有效改善断裂韧性，随着碳纤维掺量的增加，碱激发材料抗折强度提升，抗压强度稍有下降，但仍高于碳纤维水泥砂浆的抗压强度。

3) 随加载速率和应力幅值的增大，碳纤维–碱激发矿渣/粉煤灰的压敏性和应变灵敏度更趋于稳定。同时，碳纤维–碱激发矿渣/粉煤灰的应变系数表现出极高的稳定性，在加载条件 12.0 MPa 和 2.0 kN/s 时，压敏性能和应变灵敏度均最优，相比碳纤维水泥砂浆的高出 1 个数量级。

**参考文献**:

[1] YILDIRIM G, ÖZTÜRK O, AL–DAHAWI A, et al. Self-sensing capability of engineered cementitious composites: effects of aging and loading conditions[J]. Constr Build Mater, 2020, 231: 117–132.

[2] WEN S, CHUNG D. Self-sensing of flexural damage and strain in carbon fiber reinforced cement and effect of embedded steel reinforcing bars[J]. Carbon, 2006, 44(8): 1496–1502.

[3] CHEN P W, CHUNG D. Carbon fiber reinforced concrete for smart structures capable of non-destructive flaw detection[J]. Smart Mater

Struct, 1993, 2(1): 22.

[4] 韩宝国, 关新春, 欧进萍. 纳米氧化钛与碳纤维水泥石的电阻率及压敏性[J]. 硅酸盐学报,2004, 7: 884–887.
HAN Baoguo, GUAN Xinchun, OU Jinping. J Chin Ceram Soc, 2004, 7: 884–887.

[5] 毛起, 杨元霞, 李卓球, 等. 碳纤维增强水泥压敏性影响因素的研究[J]. 硅酸盐学报, 1997, 25(6): 734–742.
MAO Qi, YANG Yuanxia, LI Zhuoqiu, et al. J Chin Ceram Soc, 1997, 25(6): 734–742.

[6] 王秀峰, 王永兰, 金志浩. 碳纤维增强水泥复合材料的机敏性[J]. 硅酸盐学报, 1998, 26(2): 253–257.
WANG Xiufeng, WANG Yonglan, JIN Zhihao. J Chin Ceram Soc, 1998, 26(2): 253–257.

[7] 范晓明, 董旭, 孙明清, 等. 掺 CCCW 的碳纤维石墨水泥基复合材料的导电及压阻特性[J]. 复合材料学报, 2009, 26(6): 138–142.
FAN Xiaoming, DONG Xu, SUN Mingqing, et al. Acta Mater Compos Sin(in Chinese), 2009, 26(6): 138–142.

[8] WEN S,CHUNG D. Partial replacement of carbon fiber by carbon black in multifunctional cement-matrix composites[J]. Carbon, 2007, 45(3): 505–513.

[9] 韩宝国, 丁思齐, 董素芬, 等. 本征自感知混凝土在高铁土建基础设施原位监测中的应用展望[J]. 中国铁路, 2019, 11: 68–76.
HAN Baoguo,DING Xiqi, DONG Sufen, et al. China Railway(in Chinese), 2019, 11: 68–76.

[10] HAN B, DING S, Yu X. Intrinsic self-sensing concrete and structures: A review[J]. Measurement, 2015, 59: 110–128.

[11] DU J, TANG C, JIA B, et al. Preparation and long-term stability study of steel fiber/graphite conductive concrete[J]. Key Eng Mater, 2016, 680: 361–364.

[12] 白应华, 涂锐, 陈伟. 整体式钢纤维导电砼力学及导电性能研究[J]. 湖北工业大学学报, 2018, 1: 79–82.
BAI Yinghua, TU Rui, CHEN Wei. Hubei Univ Technol(in Chinese), 2018, 1: 79–82.

[13] QIAN J S, LI C T, TANG Z Q, et al. Experimental study on electric conductive concrete made from steel slag quenching with wind[J]. J Build Eng, 2005, 3: 004.

[14] 孔德玉, 张俊芝, 倪彤元, 等. 碱激发胶凝材料及混凝土研究进展[J]. 硅酸盐学报, 2009, 37(1): 151–159.
KONG Deyu, ZHANG Junzhi, NI Tongyuan, et al. J Chin Ceram Soc, 2009, 37(1): 151–159.

[15] YEHIA S, TUAN C Y, FERDON D, et al. Conductive concrete overlay for bridge deck deicing: mixture proportioning, optimization, and properties[J]. ACI Mater J, 2000, 97(2): 172–181.

[16] PROVIS J L , DEVENTER J. Alkali activated materials [M]. Berlin: Springer Netherlands, 2014: 8–49.

[17] MA Y, YANG X, HU J, et al. Accurate determination of the “time-zero” of autogenous shrinkage in alkali-activated fly ash/slag system[J]. Compos Part B–Eng, 2019, 177: 107–367.

[18] LI N, SHI C, ZHANG Z. Understanding the roles of activators towards setting and hardening control of alkali-activated slag cement[J]. Compos Part B–Eng, 2019, 171: 34–45.

[19] ROVNANÍK P, KUSÁK I, BAYER P, et al. Comparison of electrical and self-sensing properties of Portland cement and alkali-activated slag mortars[J]. Cem Concr Res, 2019, 118: 84–91.

[20] VILAPLANA J L, BAEZA F J, GALAO O, et al. Self-sensing properties of alkali activated blast furnace slag (BFS) composites reinforced with carbon fibers[J]. Materials, 2013, 6(10): 4776–4786.

[21] WEN S, CHUNG D. Electrical-resistance-based damage self-sensing in carbon fiber reinforced cement[J]. Carbon, 2007, 45(4): 710–716.

[22] 陈兵, 吴科如, 姚武. 碳纤维水泥基复合材料导电性能研究[J]. 混凝土与水泥制品, 2002, 06: 36–39.
CHEN Bing, WU Keru, YAO Wu. China Concr Cem Prods (in Chinese), 2002, 6: 36–39.

[23] KIZILKANAT, A. B. Experimental evaluation of mechanical properties and fracture behavior of carbon fiber reinforced high strength concrete[J]. Period Polytechn Civil Eng, 2016, 60(2): 289–296.

[24] HAN B, ZHANG K, YU X , et al. Electrical characteristics and pressure-sensitive response measurements of carboxyl MWNT/cement composites[J]. Cem Concr Comp, 2012, 34(6): 794–800.

[25] PISELLO A L, ALESSANDRO A D, SAMBUCO S, et al. Multipurpose experimental characterization of smart nanocomposite cement-based materials for thermal-energy efficiency and strain-sensing capability[J]. Sol Energ Mater Sol C, 2017, 161: 77–88.

[26] BAEZA F J, GALAO O, ZORNOZA E, et al. Effect of aspect ratio on strain sensing capacity of carbon fiber reinforced cement composites[J]. Mater Des, 2013, 51: 1085–1094.

[27] 贾兴文. 含 $Fe_{(1-\delta)}O$ 废渣砂浆的导电性和机敏性研究[D]. 重庆: 重庆大学, 2009.
JIA Xingwen. Electrical conductivity and smart properties of $Fe_{(1-\delta)}O$ waste mortar[D]. Chongqing: Chongqing University (in Chinese, dissertation), 2009.

[28] BERNAL S A, ROSE V, PROVIS J. L. The fate of iron in blast furnace slag particles during alkali-activation[J]. Mater Chem Phys, 2014, 146(1–2): 1–5.

[29] 胡志军, 王松凌, 杨柳青, 等. 不同化学处理对碳纤维分散及成纸性能的影响[J]. 纸和造纸, 2010, 7: 19–21.
HU Zhijun, WANG Songling, YANG Liuqing, et al. Paper Paper Mak (in Chinese), 2010, 7: 19–21.