

镍粉水泥基复合材料压阻特性

李逸飞¹, 石新波², 徐 凡², 温 泉², 肖会刚¹, 冯 硕³(1. 哈尔滨工业大学土木工程学院, 哈尔滨 150006; 2. 黑龙江省建工集团有限责任公司, 哈尔滨 150000;
3. 山东大学土建与水利学院, 济南 250061)

摘 要: 随着智能建筑材料的发展, 镍粉-水泥基复合材料因其独特的电导和压电性能而备受关注, 但目前对其导电机理及在复杂应力状态下的电性能变化规律尚不完全明晰。本工作探究了镍粉-水泥基复合材料的电导特性、导电机理及其压电耦合效应的本构模型。通过调整镍粉添加比例(0%, 5%, 10%, 15%, 17%, 20%, 23%, 体积分数), 制备了一系列镍粉-水泥复合浆料, 并在 200 Gs 的磁场环境中完成成型处理, 经过电阻测试表明该复合材料电阻在顺磁感线方向和逆磁感线方向有明显差异, 且渗滤阈值约为 15%。随后对体积掺量 15% 的镍粉-水泥复合材料元件进行单轴受压试验和四点受弯试验。结果表明: 在承受压力的初始阶段, 材料电阻近乎直线下降, 直至应变临近最大压缩应变时电阻迅速上升, 此下降过程中的电阻变化率可高达约 70%; 在受弯曲载荷作用时, 随着荷载升高, 样品电阻表现出细微波动, 整体呈下降趋势并逐渐放缓, 在接近失效时电阻急剧增加; 电阻降至最低值时, 样品电阻减少的幅度仅有 1%。基于试验观察, 深入分析了镍粉水泥基复合材料电阻变化的内在机制, 并建立了电阻随应变变化的数学表达式。

关键词: 镍粉; 水泥; 导电机理; 力电本构模型

中图分类号: TB33; TQ172.7 文献标志码: A 文章编号: 0454-5648(2025)04-1247-11

网络出版时间: 2025-03-24



混凝土本身具有极高的电阻率, 因而不具备自感知的特性, 但通过在复合混凝土中引入导电相元素及利用水泥基质作为传导介质, 可以赋予混凝土自我感知的能力^[1]。有研究指出, 混凝土的导电性实质上是离子传导、电子传导及空穴传导三者共同作用的结果^[2], 而这些传导机制又深受施工方法、外界环境及组成材料等多种因素的制约, 展现出复杂的机理、高度的不确定性以及相对较低的电导水平^[3]。鉴于此, 为了提升混凝土的自感知效能, 常规做法是在混凝土配料中融入高效的导电元件^[4-6]。目前在自感应混凝土材料技术中, 最广泛采纳的导电传感元件主要分为碳质材料和金属材料 2 大类, 前者涵盖了石墨、碳纤维以及纳米级炭黑, 而后者包含钢纤维、金属应变传感器、铜丝网格及钢渣等^[7]。值得注意的是, 混凝土本质上不完全属于绝缘或导电材料, 其电导性质受构成材质与周遭环境的双重影响, 当混凝土的孔隙度与含水量增高, 特别是存

在大量互相连通的孔隙时, 导电性会显著增强^[8]。自感知混凝土材料中最为常见的感知方式是应变自感知, 当材料发生应变时, 体系中的导电相受到挤压, 或是间距减小, 或是形状变化, 使电阻发生改变, 外部接收到电信号变化后, 便可通过信号变化反推材料的应变大小^[9]。然而, 目前包括应变自感知混凝土在内的水泥基应变自感知材料在导电机理的探索上有所欠缺, 往往无法将电阻的变化与体系应变很好的对应起来^[10-12]。

镍粉是一种具有良好导电性的金属颗粒, 在常温下化学性质相对稳定, 不易与其他物质发生反应。由于镍粉具有高导电性, 当它被添加到涂料中时, 可以形成良好的电磁屏蔽层, 这种导电涂料可以应用于需要导电性能的场景, 如电子设备的防静电涂层、电磁波屏蔽涂层等^[13]。同时, 镍本身具有良好的耐腐蚀性, 因此含有镍粉的导电涂料也能在一定程度上提高涂层的耐腐蚀性, 延长使用寿命^[14]。相

收稿日期: 2024-11-24。 修订日期: 2024-12-19。

基金项目: 国家自然科学基金联合基金重点项目(U24A20165)。

第一作者: 李逸飞(1995), 男, 博士研究生。

通信作者: 肖会刚(1977), 男, 博士, 教授。

Received date: 2024-11-24. Revised date: 2024-12-19.

First author: LI Yifei (1995-), male, Doctoral candidate.

E-mail: liyifei81@163.com

Correspondent author: XIAO Huigang (1977-), male, Ph.D., Professor.

E-mail: Xiaohg@hit.edu.cn

较于纤维状导电添加剂,微米级别的高纯度球形镍粉因其更优的分散性和在局部结构中的稳定性,尤其在磁场导向下能实现有序排列^[15–17]。本工作聚焦外加磁场影响下镍粉增强水泥基复合材料电阻形成机制的探索,并在此基础上推导复合材料的电阻值,进而在分析多项影响因素的基础上,实现了对复合材料电阻值的解析。实验结果揭示,镍粉在磁场引导下展示出电阻的各向异性特征,为开发沿特定方向导电的水泥基组件提供了可能。此外,当镍粉掺杂量接近渗流阈值时,所制备的复合材料组件展现出卓越的压电效应,其电阻变化趋势与依据量子隧道效应原理建立的力电耦合本构模型预测高度吻合。

1 实验

1.1 原材料

采用的水泥为天鹅牌 P·O 42.5 等级普通硅酸盐水泥(亚泰集团哈尔滨水泥有限公司)。减水剂为山东莱阳宏翔建筑外加剂厂提供的聚羧酸高效减水剂,经测定,减水率约为 20%。使用的导电填料为符合 GB/T 7160—2008 国家质量标准的微米级高纯度镍粉,镍含量高达 99.999%。镍粉由河北邢台南宫复梵金属材料有限公司提供,松装密度为 1.40~1.68 g/cm³。经测定,镍粉粒度均匀,化学性质稳定。表 1 为镍粉的物理化学特性。

表 1 镍粉基本参数

Table 1 Basic properties of Ni powder

Partical size/ μm	Density/($\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$)	Resistivity/($10^{-6}\Omega\cdot\text{cm}$)	Shape
3	8.9	7.0	Spherical

1.2 配合比设计

采用常规自来水作为拌合用水,并将水与水泥的质量比例(即水灰比)设定为 0.4,以统一水泥自身的导电性能。搅拌过程使用哈尔滨工业大学土木工程材料实验室配备的水泥砂浆搅拌设备来进行。设计了 7 组试样序列,通过逐步增加镍粉的体积分数,具体设定为 0%、5%、10%、15%、17%、20%及 23%,每组序列制备 3 份试样,以增强实验数据的代表性和可重复性。此处所述的体积分数,明确界定为镍粉体积占镍粉、水及水泥总体积的比例。表 2 为各原材料的具体质量配比。

1.3 制备方法

将水泥、镍粉粉末、水以及添加剂合并并进行

表 2 各物质组成与配比

Table 2 Composition and ratio of each substance

Sample No.	Volume dosage of Ni/%	Mass/g		
		Cement	Water	Ni
N0	0	100.60	80.46	53.40
N5	5	95.28	76.24	106.80
N10	10	90.00	82.00	160.20
N15	15	87.88	70.30	181.56
N17	17	86.82	69.46	192.24
N20	20	84.72	67.78	213.60
N23	23	81.54	65.22	245.64

搅拌及分散处理,之后注入模具中。随后,将模具嵌入磁场线圈内静置 24 h,最后脱模进行养护处理。制备开始时,先快速搅拌混合物 5 min,得到混合物 A。接下来,逐步添加镍粉末(占比分别为 0%, 5%, 10%, 15%, 17%, 20%, 23%)至水泥中,持续快速搅拌直至色彩均匀无变化,确保镍粉均匀分散,定义为混合物 B。此时,将混合物 A 导入混合物 B 内,重复快速搅拌约 5 min,此间减水剂不仅增强流动性,还能促使水泥与镍粉聚集体的二次解聚,形成镍粉水泥浆,标记为混合物 C。此混合物 C 需置于真空干燥箱,在 20 °C 抽真空 15 min 以排除气泡,强化混合物的致密度。随后,将无气泡的混合物 C 注入尺寸为 20 mm×20 mm×40 mm 与 20 mm×20 mm×80 mm 的模具,并覆盖保鲜膜以防水分蒸发。针对每种镍粉比例,准备 2 套样本。一组在无磁场(0 Gs,作为对照组)环境下,另一组则在 200 Gs 磁场中固化约 24 h,接着常温下静置 48 h 脱模,转入 60 °C 蒸汽养护箱中保湿养护 3 d,再于标准环境养护 4 d,最后于 60 °C 真空干燥箱中干燥约 24 h,直至质量稳定不再减轻。

1.4 测试方法

电阻测试采用粘贴导电胶带的方法连接试件与电桥。修整养护完毕的样品表面使其平滑,利用乙醇清除残留碎屑后,于样品垂直磁场的两侧表面涂覆导电银胶。在胶体未凝固之前,立刻贴上双面导电胶带,胶带边缘超出样品顶端一段,使其便于利用电桥夹具固定。随后,将此试件连接至能够缓解极化效应的数字电桥,该电桥配置为交流电信号,以实施电阻测量。

单轴压缩测试在哈尔滨工业大学的土木建材实验室里,利用压力实验装置执行。加载速率维持在 0.5 kN/s,直至样品达到破坏。试验中,施力的方向与电阻测量路径保持一致,于样品相对侧表层对称地粘贴 2 枚应变片,其布局与电阻检测方向一致,

以此监测受力轴向上样品的应变变化。此外,于样品背面增设一枚应变片,其轴线与电阻及压力加载轴呈垂直布置,用于评估样品在垂直于主应力方向上的应变情况。

试件在弯矩作用下的压阻特性采用四点受弯试验,同样在压力机上进行,加载速率 0.2 kN/s。电阻测量不再使用导电胶带,而是采用铜网电极,将两铜网电极放置在试件成型前安置在模具中,电极的安置点位于试件弯曲变形的纯弯矩作用区域,通过将这些电极整合进电桥系统中,实现探索并记录在纯弯载荷效用下电阻值的变化趋势。同时,在试件底面中心位置粘贴应变片记录应变变化。

2 结果与讨论

水泥基复合材料体系构成中,镍粉嵌入主要成分水泥内部,形成立体的导电网络。大量研究表明^[18],以导电颗粒为导电填料的水泥基材料的导电机理可归纳为 3 类主要方式: 1) 离子借助水泥凝胶间的孔隙水溶液实现传导; 2) 导电颗粒表面与水泥凝胶界面间的电子跃迁; 3) 导电颗粒直接接触形成的连续导电通路。通常,这些导电机理并非孤立存在,而是相互耦合,共同影响复合材料的导电性能,电阻试验可进一步确认并分析这些传导途径对材料导电性能的具体影响。

2.1 有无磁场作用下电阻测试结果

图 1 为在无外部磁场干预情况下,各镍粉添加比例对水泥基材料电阻率影响的实测数据。研究结果显示,调整镍粉与水泥间的体积比例,材料整体电阻率表现出随镍粉添加量增加而显著下降的趋势,这一过程可细分为 3 个清晰阶段: 1) 镍粉掺入量占比低于 10% 阶段,材料电阻率由初始的 $2500 \text{ k}\Omega\cdot\text{cm}$ 逐步减至 $250 \text{ k}\Omega\cdot\text{cm}$,电阻下降速度相对平缓; 2) 当镍粉掺比提升至 10%~17% 区间,电阻率下降速度陡增,数值范围缩小至 $0.98 \text{ k}\Omega\cdot\text{cm}$; 3) 镍粉占比超过 17% 后,电阻率的减幅趋于平和,即使镍粉掺比增至 23%,相比 17% 时的电阻率,变化幅度也仅为原值的 10 倍。电阻在 10%~17% 之间变化最剧烈,根据渗滤理论,可以认为在 10% 处开始形成导电通路,在 15% 左右形成间距合适的通路,因此可以初步判定渗滤阈值掺量为 15%。

试验结果部分证实了 3 种传导机制的存在性。在镍粉掺量极低的情形下,由于镍粉颗粒间的极大间隔,复合材料的导电性主要依赖于离子于水泥凝

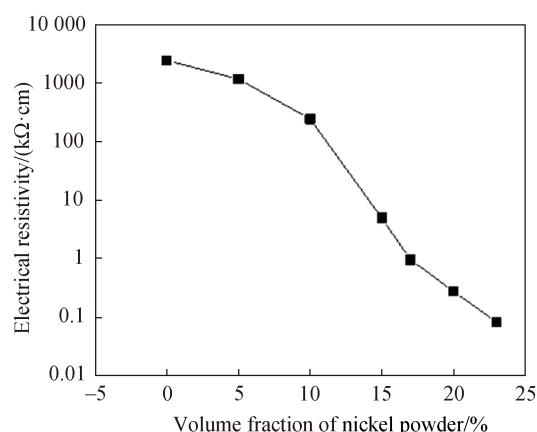


图 1 电阻随镍粉掺量变化情况

Fig. 1 Changes in resistance with nickel powder content

胶体界面以及孔隙溶液内的传导。随着镍粉掺量的增加,颗粒间隙的缩小虽然促使电子在镍粉与水泥凝胶体界面间的传导成为主导的导电模式,但是,当镍粉掺量显著增多,进而使得镍粉颗粒间形成紧密接触或直接碰触时,传导方式转变为电子在镍粉颗粒构建的导电网络中流动。此外,当镍粉掺量增加至某一阈值后,由于镍粉颗粒间距离的缩减空间有限,因而电阻率对镍粉掺量的敏感度降低,导致其变化率趋于平稳^[19]。

Dong 等^[20]探讨了含水率对复合水泥基材料导电性能的影响,揭示了如下规律:在导电组分比例较低的情况下,复合材料的电阻率随着含水率的增大而显著下降;然而,当导电组分充足时,含水率的变化对电阻的影响则微乎其微。这些发现表明,导电机理会因导电填料含量的增加而发生转换,且含水率对导电性质的影响呈现出多元化的特征。鉴于含水率的显著作用及其难以精确预估的特性,实验中采取干燥处理以消除其影响。在实际应用层面,可在传感器组件表面覆盖环氧树脂涂层,以此减轻材料内部电解质溶液的干扰。

对于前述的 3 种导电方式,第 1 种在镍粉达到一定量时作用微小,且已对试件干燥处理因而可以忽略。第 3 种方式符合通道导电理论,但主要研究镍粉含量未超过渗滤区间的情况且分散均匀,难以形成大量导电链,因此,重点研究第 2 种导电方式,即将现象归因于“隧道效应”^[21]的作用原理:在镍粉添加量极少的情况下,镍粉粒子间分布稀疏,此时复合材料的导电机理主要依赖于离子在水泥基质的孔隙溶液及界面区域的迁移;随着镍粉掺量的微增,尽管镍粉间距减小但仍维持分离状态,导电途

径转变为电子在镍粉与水泥基质界面的跃迁；而当镍粉添加量继续大幅提升，镍粉颗粒接近乃至相互接触，形成连续的导电网络，导电模式转为依赖于镍粉颗粒间直接的电子传递。至此，由于镍粉间距已极为有限，继续增加镍粉比例对缩短间距效果甚微，故电阻率的下降趋势随之放缓^[22–25]。

图 2 为逆磁场方向与顺磁场方向电阻率。在镍粉添加比例恒定的条件下，试样沿磁场方向的电阻率相较于垂直磁场方向更低。这是由于镍粉颗粒在磁场引导下发生定向排列，导致顺磁场方向的镍粉间距缩紧，相反方向的电阻因而增大。这一现象与隧道效应原理相符，因此，观察到的模式与理论预期相吻合。

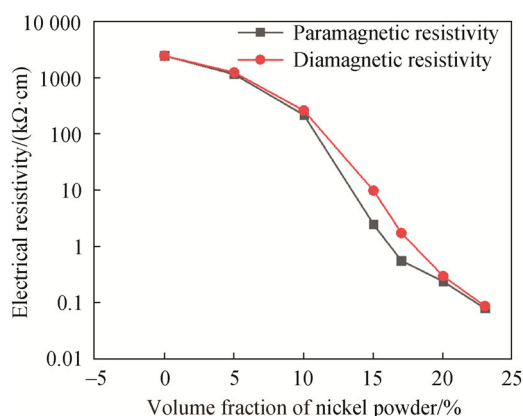


图 2 逆磁场方向与顺磁场方向电阻率

Fig. 2 Resistivity in the direction of reverse and parallel magnetic fields

图 3 为不同镍粉掺杂比率下单个试样逆向与顺向磁场电阻率的比率变化。观察到，当镍粉掺入比例低于 10% 或高于 20% 时，2 个方向上的电阻率比值维持在 1.0~1.2 的窄幅区间内；然而，掺量达到 15% 时，这一比值骤升至 4。其原因在于，镍粉含量过低时，形成的导电路径有限，镍粉排列方向的变化对总导电性影响微弱；反之，镍粉含量过高，导电网络已高度发达，镍粉转向与否对导电性能的改善不甚显著。这一现象恰好验证了隧道效应的预测，并且展现出电阻率强烈的方向依赖性，非常适合于敏感监测应用。基于以上分析，选择镍粉体积掺量为 15% 的试样作为后续深入研究的目标。

2.2 镍粉水泥基复合材料的电阻计算

镍粉水泥基复合材料可以看做多条电阻并联在一起，每条电阻由导电单元串联组成，导电单元是 2 个镍粉颗粒与它们之间的间隙所形成的导电通路^[26]。依据隧道效应原理，复合材料内部的电阻特

性源自 2 部分：镍粉颗粒本身的电阻贡献及镍粉颗粒间的通道电阻。考虑到镍粉颗粒自身的电阻相对微乎其微，本工作在分析时予以舍去，专注于探讨镍粉颗粒间相互作用所形成的电阻部分，认为每条导电通路是由颗粒间电阻串联而成。鉴于本研究中镍粉已与水泥均匀混合且在磁场作用下实现有序排列，故可排除镍粉聚集效应以及水泥基体的微观构造影响。据此，图 4 为镍粉颗粒在水泥基质中的分布情形的理想化预设。

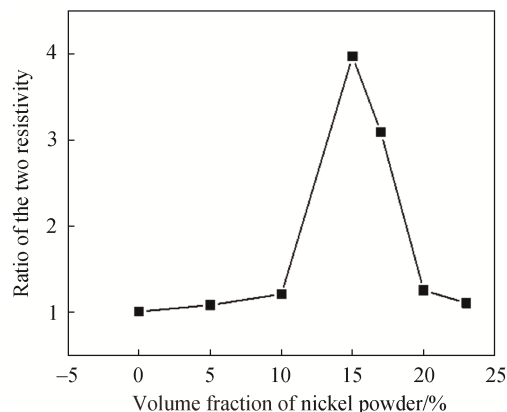


图 3 逆磁场方向与顺磁场方向电阻率比值

Fig. 3 Ratio of resistivity in the direction of reverse magnetic field and parallel magnetic field

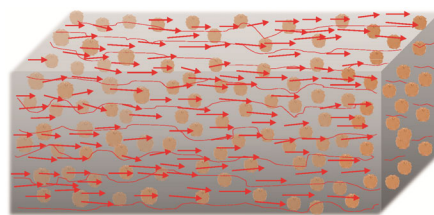


图 4 镍粉在水泥中分布状态及导电模式

Fig. 4 Distribution state and conduction mode of nickel powder in cement

$$R_i = (n-1)r \quad (1)$$

式中： R_i 为第 i 条电阻； n 为每条电阻的包含的导电单元个数； r 为镍粉颗粒间的电阻值。

假设则复合材料体系共有 m 条电阻，则总电阻 R 可以表示为：

$$R = \frac{1}{\frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} + \frac{1}{R_3} + \dots + \frac{1}{R_m}} = \frac{n-1}{m}r = kr \quad (2)$$

式中： $k = \frac{n-1}{m}$ 。

传导体系的电阻特性关键取决于构成颗粒间的间距，这一电阻表现紧密遵循 Simmons 所提出的隧道效应普遍法则^[27]：

$$J=[3(2m\phi)^{1/2}/2s](e/h)^2U\exp[-(4\pi s/h)(2m\phi)^{1/2}] \quad (3)$$

式中: J 为颗粒间电流的密度; m 为电子质量; e 为电子电荷量; h 为普朗克常数; ϕ 为间隙势垒; s 为间隙宽度; U 为电压。

经隧道效应理论计算出的导电单元阻值大小为:

$$r = \frac{U}{AeJ} = as \exp(bs) \quad (4)$$

式中: r 为经间隙宽度调整后的两间隙间电阻值;

$a = \frac{2}{3}(2m\phi)^{-1/2}(e/h)^{-2}A_e^{-1}$, 对指定材料为常数, A_e 为电流通过的有效面积; $b = (4\pi/h)(2m\phi)^{1/2}$, 给定材料的属性视为恒定。将公式(4)整合入公式(2)中得到:

$$R = kas \exp(bs) \quad (5)$$

由此可知材料电阻 R 与初始电阻 R_0 之比为:

$$\frac{R}{R_0} = (1-\varepsilon)(1-bs_0\varepsilon + \frac{b^2s_0^2}{2}\varepsilon^2 - \dots) \quad (6)$$

由于 $s=s_0(1-\varepsilon)$, ε 为应变, 代入式(6), 得到:

$$\frac{R}{R_0} = (1-\varepsilon)\exp(-bs_0\varepsilon) \quad (7)$$

将公式 $e^x = 1 + \frac{x}{1!} + \frac{x^2}{2!} + \frac{x^3}{3!} + \dots, -\infty < x < \infty$

代入式(7):

$$\begin{aligned} \frac{R}{R_0} &= (1-\varepsilon)(1-bs_0\varepsilon + \frac{b^2s_0^2}{2}\varepsilon^2 - \dots) \\ &= 1 + A\varepsilon + B\varepsilon^2 + C\varepsilon^3 + \dots \end{aligned} \quad (8)$$

式中: A 、 B 、 C 为多项式系数。

依据式(8), 复合物材料的电阻能够被建模为应变值的多项式形式。有研究者成功运用应变的三次多项式方程来拟合镍粉水泥基复合材料电阻变化的实验数据^[28], 取得了良好的拟合效果。这一公式有效揭示了镍粉水泥基材料在承受拉伸或压缩应力时电阻变化的行为模式, 而公式中的参数可通过实施压力-电阻试验来精确标定。

2.3 镍粉水泥复合材料压阻性能分析

图 5 为无磁场环境下, 对试件实施单轴压缩测试所得的材料应力-应变曲线和压阻特性结果。试件在荷载作用下会产生应变、裂缝以及破坏, 导致尺寸和形状发生改变, 不便于计算电阻率, 因此在此图表中, 选用电阻变化率 ΔR 作为纵轴指标, 可以消除由非负载因素可能导致的电阻测量偏差。

$$e^x = 1 + \frac{x}{1!} + \frac{x^2}{2!} + \frac{x^3}{3!} + \dots, -\infty < x < \infty \quad (9)$$

在压缩过程的初期, 电阻几乎是直线下降的,

直至应变逼近最大压缩应变值时, 电阻突然显著增长, 此下降阶段电阻变化率可高达近 70%。具体而言, 镍粉水泥复合材料在受压初期, 由于压应变效应促使镍粉颗粒间距缩减, 故材料体系的电阻随之减小。然而, 随着压力持续增强, 混凝土内部开始形成细微裂纹, 随着裂纹扩大, 这些裂纹干扰并切断了镍粉颗粒之间的导电路径, 导致电阻值增加。在其共同影响下, 材料的电阻变化过程可以划分为 3 个阶段。在第 1 阶段, 材料保持弹性状态, 试件内部没有或仅有少量微裂缝, 此时镍粉之间的距离减小起着主要作用, 导致电阻随压力的增加而降低。进入第 2 阶段, 材料内部的微裂缝逐渐增多, 应力应变曲线的斜率开始下降, 裂缝和缺陷阻碍电阻的进一步降低。应变和缺陷的共同作用使得材料的电阻变化相对平缓。到了第 3 阶段, 复合材料达到其抗压强度, 应力开始下降的同时应变仍持续增加。此时, 试件开始出现明显的裂纹, 并不断蔓延、联通, 材料逐渐破坏, 电阻也随之迅速增大。当试件完全破坏后, 测得的电阻值高于其初始电阻。

综上所述, 镍粉水泥基材料受压时的应力-应变曲线与电阻变化率曲线的趋势高度相关。随着应变增加, 镍粉之间的距离逐渐减小, 这使电子更容易突破水泥基体形成的势垒, 导致材料阻值下降。材料因荷载作用产生的裂纹则会使电阻增加。材料电阻达到最低点时, 对应应力-应变曲线顶点附近, 材料已经过塑性变形, 处于破坏阶段的初始状态。在进入破坏阶段后, 联通的裂纹阻断了导电通道, 使电阻快速增加。对图 5 电阻变化率-应变曲线进行多项式拟合, 仅 4 次多项式拟合, 评定系数 R^2 便可高达 0.994。对试件在极值前, 即试件临近破坏前的曲线进行拟合, 仅 2 次多项式即可达到 0.995。

图 6 为在 200 Gs 磁场影响下成型的试件所进行的压缩电阻测试结果。与无磁场条件下的复合材料试件的压阻曲线相比, 无磁场时的灵敏度为 215, 而在磁场作用增强至 200 Gs 后, 灵敏度略微上升至 232.8。尽管两者电阻变化的最大值均落在 60%至 70%的相近区间, 未见显著差异, 但经磁场处理的试件压阻曲线呈现出更高的平滑度, 表明其压阻行为模式更为清晰, 电阻值波动较小。这一改进归因于磁场导向作用下, 原本无序分布的椭球形镍粉颗粒得以有序旋转与排列, 导致受压过程中颗粒间距的减小及隧道效应势垒的变化更加有序且稳定。在材料状态与电阻变化的关系上, 图 5 和图 6 展示出了相同的趋势。对比发现, 电阻下降趋势的减缓和

阻值的回升,总是晚于应力增加的减缓和应力的下降,这是由于压力对材料有密实作用,因此裂缝产生初期电阻不会很快增加。当裂缝扩大、联通,压力对裂缝的压密不能弥补裂缝的扩展,电阻才逐渐提升。对图 6 曲线进行多项式拟合,仅 4 次多

项式拟合,评定系数 R^2 可达 0.99 以上,其中对数据达到极小值前的部分进行的拟合,仅 2 次多项式 R^2 便达到 0.999 以上,极值前明显接近线性变化,这表明试件在接近破坏前后的导电模式发生了改变。

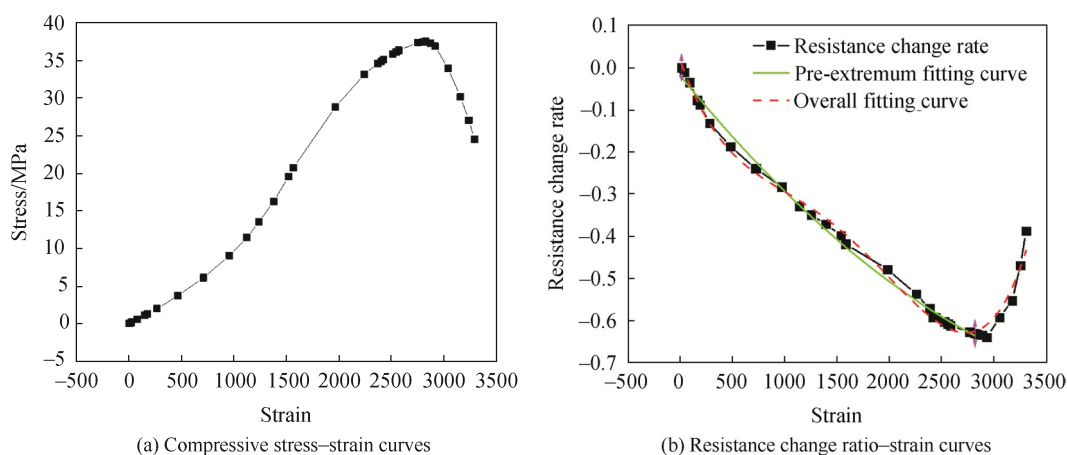


图 5 镍粉水泥基材料在受压荷载下应力-应变、电阻变化率-应变曲线

Fig. 5 Stress-strain and electrical resistivity change ratio-strain curves of nickel powder-cement-based materials under compressive loading

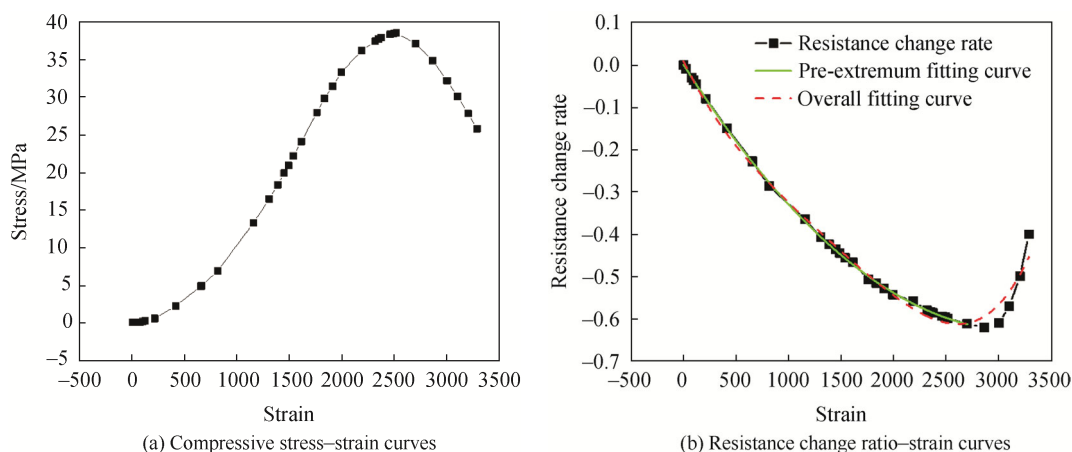


图 6 200 Gs 磁场作用成型的试件在受压荷载下应力-应变、电阻变化率-应变曲线

Fig. 6 Stress-strain and resistivity change ratio-strain curves of specimens formed under the influence of a 200 Gs magnetic field under compressive loading

2.4 镍粉水泥复合材料电本构模型

复合导电材料系统可视为多条纵向电阻的并联集合。即便纵向裂纹出现,导致传感组件分裂为若干片段,这些碎片仍能通过两端的电极相连,形成并联导电回路,从而纵向裂纹对电阻变化的直接影响相对有限^[29-31]。然而,材料同样可能形成横向裂纹,当这些裂纹较细小时,在承受压力负荷时会被挤压闭合,对电阻的影响微乎其微^[32]。然而,一旦发展出显著的大裂纹,则会截断导电路径,标志着材料接近其破坏极限。



图 7 轴心受压住纵向裂缝

Fig. 7 Axial compression covers longitudinal cracks

由式(8)可以推知, 受压后电阻与初始电阻的比值为 $R/R_0=1+A\varepsilon+B\varepsilon^2+C\varepsilon^3+\dots$, 鉴于混凝土在达到其极限拉伸或压缩应变前, 变形程度一般较小, 意味着 ε 的值相对较低, 故 R/R_0 的值接近于 1, 变动范围有限。因此, 采用电阻变化率 $(R-R_0)/R_0$ 来衡量体系电阻的变动, 能提供一个更为精确且直观的反映。

$$\frac{R-R_0}{R_0} = \frac{R}{R_0} - 1 = A + B\varepsilon^2 + C\varepsilon^3 + \dots \quad (10)$$

电阻变化与应变的比值被定义为灵敏度。通过分析电阻变化对于应变变化的响应趋势, 可以观察到这一比值大体围绕着系数 A 上下波动。

$$\frac{\Delta R - R_0}{\varepsilon} = A + B\varepsilon^2 + C\varepsilon^3 + \dots \quad (11)$$

显然, 在材料中形成裂缝之前, 灵敏度数值基本紧密贴近 A 值, 不会有太大偏差。针对轴向压缩压阻测试中弹性阶段收集的数据, 仅采用一次多项式进行拟合, 便能实现高达 0.99 以上的高拟合精度。不过, 一旦裂缝萌生, 电阻的变化模式则如图 8 所示, 呈现不同的态势。

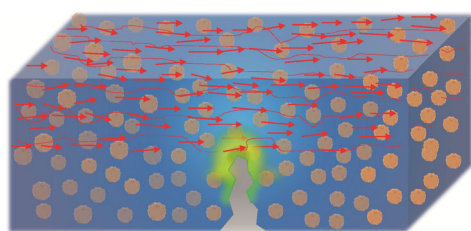


图 8 裂缝对电阻的影响
Fig. 8 Effect of crack on resistance

当一些电阻路径因裂缝而中断, 参与并联的电阻数量随之下降, 这会引致总的导电路径削减, 相应地, 公式 $R=kr$ 中的比例系数 k 值增大, 意味着电阻值 R 将按比例提升:

$$\begin{aligned} \frac{R}{R_0} &= \frac{k}{k_0} \cdot \frac{s}{s_0} \exp[b(s-s_0)] \\ &= \frac{k}{k_0} (1 + A + B\varepsilon^2 + C\varepsilon^3 + \dots) \end{aligned} \quad (12)$$

很显然, 当 k 的值超过了 k_0 , 这意味着 A 的值出现了增长, $A = \frac{k}{k_0} A_0$, 随着裂缝的扩展, 越来越多的电阻路径遭到隔断, 导致系数 k 显著增大, 进而促使 A 值也随之上升, 因此电阻值也将增大。根据公式 $k=(n-1)/m$, m 是导电链条数量, 其会随着裂缝发展而减小, 进引起 k 值增大, 而 $A=kA_0/k_0$, 因此, A 值的动态变化直接映射出了试件内部裂缝发展的

程度。

2.5 镍粉水泥复合材料纯弯状态下压阻性能分析

图 9 为未经磁场处理的弯曲试件在受力过程中的电阻变化率曲线, 其中纵坐标表示电阻比 R/R_0 。随着负载的增强, 试件电阻表现出轻微波动, 并展现出虽整体下降但渐趋平缓的态势, 直至最终在即将损坏时电阻急剧攀升。电阻降至最低点时, 仅减少了 1% 的初始电阻值。在加载初期试件处于弹性阶段时, 受弯矩作用试件截面下部承受拉力, 镍粉颗粒间距扩大, 导致下部电阻增加; 而截面上部承受压力, 颗粒间距缩小, 促使上部电阻减小。二者的综合效果使得整个试件的电阻平缓下降。但是当荷载增加, 受拉区产生微裂缝, 由于拉力不具备压实作用, 因此电阻即刻受到裂缝影响, 电阻下降趋势减缓, 随着缺陷增加, 曲线出现极小值点, 随后电阻升高并在临近破坏时急剧增大。与受压试件相比, 受弯试件的电阻变化曲线显得更为平缓, 且最大电阻变化率显著减小, 这是因为受拉区和受压区的综合作用使总电阻下降幅度减小, 且水泥基材料的抗拉极限应变远低于其抗压极限, 导致微裂缝出现较早^[33]。受拉区域的缺陷在拉应力作用下迅速扩展, 破坏了导电路径, 使得受弯试件电阻增加的现象在早期就受到了缺陷影响, 这在一定程度上平衡了由整体应变引起的电阻下降, 使电阻的下降趋势更加平直。直到试件接近其抗拉极限应变, 横向裂缝迅速扩展, 从而引发了图中所示电阻迅速上升的现象。

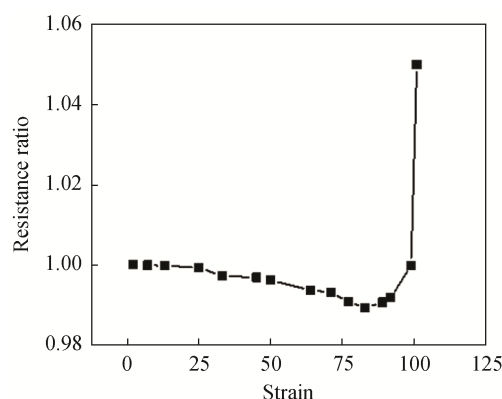


图 9 镍粉水泥基材料在弯曲荷载作用下电阻变化
Fig. 9 Resistance change of nickel powder cement-based material under bending load

200 Gs 磁场作用下成型的试件的试验结果如图 10 所示。在磁场下成型的试件电阻变化趋势与无磁场情况基本一致, 随着荷载的递增, 试件的电阻也

呈现出逐渐减小的趋势，且减小的幅度相比无磁场条件下稍大，在达到最小值时，电阻下降的比例也维持在大约 1%。随后，电阻开始上升，并在试件接近破坏时急剧增加。然而，初期电阻变化曲线显得更为平滑，电阻变化的波动性或不确定性明显地减小。

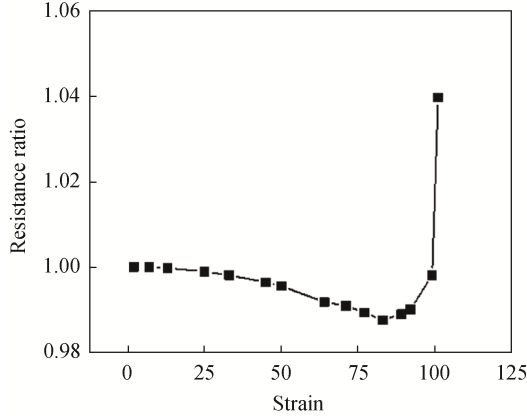


图 10 200 Gs 磁场成型镍粉水泥基材料受弯荷载电阻变化
Fig. 10 Resistance change of 200 Gs magnetic field formed nickel powder cement-based materials under bending load

2.6 镍粉水泥复合材料纯弯状态下力电本构模型

元件受弯时，中性轴以上受压缩短，中性轴以

$$\begin{aligned} \frac{R_1}{R_{01}} &= \frac{1}{\left[\frac{1}{(n-1)r_1} + \frac{1}{(n-1)r_2} + \dots + \frac{1}{(n-1)r_m} \right] \cdot \frac{n-1}{m} r_0} = \frac{m}{\frac{as_0 \exp(bs_0)}{as_1 \exp(bs_1)} + \frac{as_0 \exp(bs_0)}{as_2 \exp(bs_2)} + \dots + \frac{as_0 \exp(bs_0)}{as_m \exp(bs_m)}} \\ &= \frac{m}{\frac{s_0 \exp(bs_0)}{s_0(1-\varepsilon) \exp[bs_0(1-\varepsilon)]} + \dots + \frac{s_0 \exp(bs_0)}{s_0(1-\varepsilon) \exp[bs_0(1-m\varepsilon)]}} = \frac{m}{\frac{1}{1+A\varepsilon+B\varepsilon^2+\dots} + \dots + \frac{1}{1+Am\varepsilon+Bm^2\varepsilon^2+\dots}} \end{aligned} \quad (14)$$

考虑到应变 ε 的值非常微小，可以忽略 ε 的平方及其更高阶的微小项，因此上述公式简化为：

$$\frac{R_1}{R_{01}} = \frac{m}{\frac{1}{1+A\varepsilon} + \dots + \frac{1}{1+Am\varepsilon}} \quad (15)$$

同理，可以推得：

$$\frac{R_2}{R_{02}} = \frac{m}{\frac{1}{1-A\varepsilon} + \dots + \frac{1}{1-Am\varepsilon}} \quad (16)$$

因此计算出受弯后总电阻 R 与初始电阻 R_0 之比：

$$\frac{R}{R_0} = \frac{m}{\sum_{i=1}^m \frac{1}{1-i^2 A^2 \varepsilon^2}} \quad (17)$$

对于上式，于 Jupyter Notebook 编译器中使用 python 程序对试件破坏前的阶段进行了模拟，效果如图 12 红线所示。模拟曲线于试验曲线的决定系数

下受拉伸长，导致上半部镍粉间距减小，下半部分镍粉间距增大，如图 11 所示。

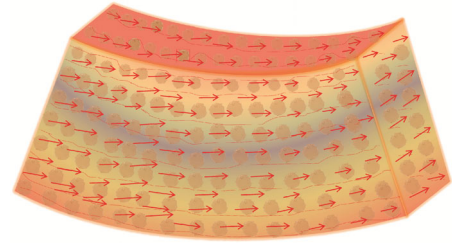


图 11 纯弯区段变形示意

Fig. 11 Schematic diagram of deformation in the pure bending section

试件截面上任意点的应变值与其至中性轴的垂直距离成正比关系。假设复合材料体内每条导电路径的镍粉颗粒数为 n ，共有 $2m$ 条电流流通的路径，其中受压区域和受拉区域各自分布 m 条路径。假定受压区域中，最靠近中性轴的导电路径所经历的应变记作 ε 。在这里，用 R_1 来表示受压区域的电阻， R_2 代表受拉区域的电阻； R_{01} 和 R_{02} 分别代表受压区与受拉区的初始电阻值。复合材料整体的电阻则是由受压区和受拉区电阻并联的结果，因此可以表示为：

$$R_{01} = \frac{n-1}{m} r_0 \quad (13)$$

R^2 为 0.9572，说明公式预测的结果较为准确。

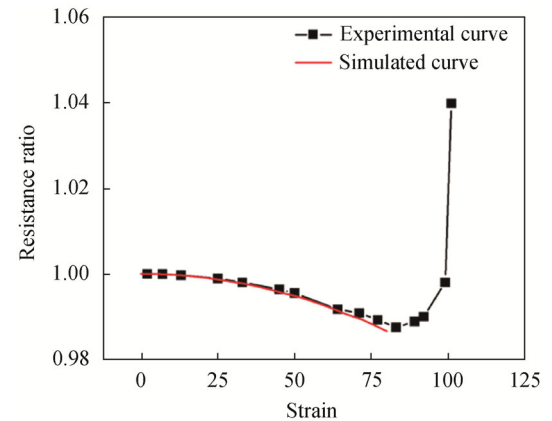


图 12 磁场成型试件受弯试验曲线与模拟曲线
Fig. 12 Bending test curve and simulation curve of magnetic field forming specimen

式(17)为试件出现裂缝前的电阻-应变关系。裂

缝的形成导致裂缝区域内的水泥失去承载力和导电功能。裂缝常常始于受拉区域的下部, 并迅速向上扩展, 减少了有效导电路径的数量 m , 同时中性轴位置随之上移, 如图 13 所示, 对应于图 9、图 10 曲线中临近和达到极值点之后的状态。因此, 裂缝出现后, 电阻与应变之间关系需要重新评估与计算。

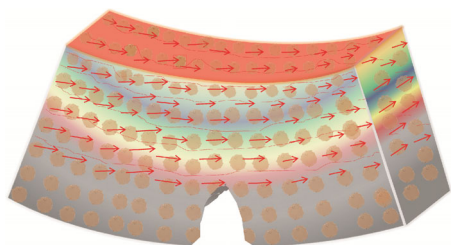


图 13 受弯试件开裂后电阻

Fig.13 Resistance of bending specimen after cracking

假设系统最初的电阻值为 R_0 , 且包含 $2m_0$ 条导电路径。当裂缝产生后, 实际参与导电的有效路径减至 $2m$ 条。在无应变作用的前提下, 这些路径的总电阻记为 R_m , 据此可得:

$$R_m = \frac{n-1}{2m} r_0, R_0 = \frac{n-1}{2m_0} r_0, \text{ 则 } R_m = \frac{m_0}{m} R_0. \text{ 通过}$$

之前计计算, 可以得出裂缝形成后电阻 R 与 R_m 之间的关联表达式:

$$\frac{R}{R_m} = \frac{m}{\sum_{i=1}^m \frac{1}{1-i^2 A^2 \varepsilon^2}} \quad (18)$$

将 $R_m = \frac{m_0}{m} R_0$ 代入上式:

$$\frac{R}{R_0} = \frac{m_0}{\sum_{i=1}^m \frac{1}{1-i^2 A^2 \varepsilon^2}} \quad (19)$$

依据水泥的材料力学原理, 材料破坏瞬间, 受拉区域边缘的应变将达到其最大拉伸应变值。设定裂缝顶端处水泥的应变为该材料的极限拉应变值,

得 $\varepsilon = \frac{\varepsilon_t}{m}$, 代入公式(18)可得:

$$\frac{R}{R_0} = \frac{m_0}{\sum_{i=1}^m \frac{1}{1-i^2 A^2 \left(\frac{\varepsilon_t}{m}\right)^2}} \quad (20)$$

式(20)中, 变量 m 代表了裂缝延伸的深度, 它是反映材料当前损伤状态的关键指标。一旦通过实验确定了初始值 m_0 及系数 A , 就可以借助电阻测量来实时推算 m 的数值, 进而追踪裂缝发展的深度。

因此, 结合式(17)与式(20), 得以探索一条途径,

即利用电阻变化的监测来反映受弯构件的应力分布、应变状态以及裂缝的发展程度。

3 结论

通过电阻测试找到了镍粉水泥复合材料的适宜掺量, 并利用磁场定向作用改善了复合材料的压阻性能。之后, 通过单调受压试验和四点弯曲试验深入分析了复合材料的导电机理和力电本构模型。具体结论如下:

1) 镍粉水泥复合材料的最佳体积掺入比例约为 15% 这一渗滤阈值附近, 并与隧道效应理论高度契合。通过 200 Gs 磁场导向, 复合材料沿磁场方向的电阻率显著下降, 而垂直磁场方向的电阻率相应增加。在掺量为 15% 附近, 其电阻率比值(逆磁场与顺磁场方向)达到峰值, 该比值为 4 左右。通过隧道效应原理对渗滤区间的材料的电阻与应变的力电本构模型进行推导, 并展开为多项式函数的形式。

2) 当镍粉水泥复合材料的体积掺量为 15% 时, 其在受压作用下的电阻-应变曲线展现出先降后升的趋势。在弹性响应阶段, 电阻随应变的减小近乎呈线性关系, 最大减幅超过了 60%。200 Gs 磁场预先定向的试件的电阻变化曲线相较于未经磁场处理的试件, 表现出了更高的平滑度和线性特征。此外, 未经磁场处理试件的灵敏度为 215, 而经过磁场处理后的试件灵敏度提升到了 232.8, 显示出一定的性能优化。

3) 当镍粉水泥复合材料的掺量为 15% 并承受弯曲荷载时, 其电阻-应变曲线表现出微弱下降随后急剧上升的特点, 初期电阻下降幅度仅约 1%, 随即快速增加。经过磁场定向处理的受弯试样, 其电阻-应变曲线相较于未经磁场处理的试样, 更为平滑且规律性更强。基于单轴压缩及纯弯曲加载状态下观测到的电阻-应变行为, 成功建立了这 2 种荷载工况下的力电本构模型。

参考文献:

- [1] 谢昊威. 钢纤维对智能混凝土裂缝自监测性能的影响[D]. 大连: 大连理工大学, 2018.
XIE Haowei. Influence of steel fiber on self-monitoring performance of intelligent concrete cracks[D]. Dalian: Dalian University of Technology, 2018.
- [2] 李健. 钢渣混凝土的压敏性研究[D]. 重庆: 重庆大学, 2005.
Li Jian. Study on the Piezoresistivity of Steel Slag Concrete[D]. Chongqing: Chongqing University, 2005.
- [3] 肖会刚. 水泥基纳米复合材料压阻特性及其自监测智能结构系统[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2006.

- Xiao Huigang. Piezoresistive Characteristics and Self-Monitoring Smart Structural System of Cement-Based Nanocomposites[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2006.
- [4] 杨叶. 智能聚合物混凝土的自感知特性及应用研究[D]. 南京: 南京理工大学, 2018.
- YANG Ye. Study on self-sensing characteristics and application of intelligent polymer concrete[D]. Nanjing: Nanjing University of Science and Technology, 2018.
- [5] 薛常喜. 自感知镍粉水泥基复合材料及其应用研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2013.
- XUE Changxi. Study on self-sensing nickel powder cement-based composite and its application[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2013.
- [6] 熊明攀. 微纳米镍粉—水泥基智能复合材料的导电和压阻性能研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2013.
- XIONG Mingpan. Conductive and Piezoresistive Properties of Micro/Nano Nickel Powder-Cement-Based Smart Composites[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2013.
- [7] 丁天庭, 李启华, 陈树东. 磨细钢渣对混凝土力学性能和耐久性影响的研究[J]. 硅酸盐通报, 2017, 36(5): 1723–1727.
- DING Tianting, LI Qihua, CHEN Shudong. Bull Chin Ceram Soc, 2017, 36(5): 1723–1727.
- [8] 李长太. 钢渣混凝土的导电性与压敏性研究[D]. 重庆: 重庆大学, 2004.
- LI Changtai. Study on electrical conductivity and pressure sensitivity of steel slag concrete [D]. Chongqing: Chongqing University, 2004.
- [9] 周白露, 丁华柱, 陈乔, 等. 磨细钢渣粉对混凝土力学性能的影响[J]. 粉煤灰, 2016, 28(6): 13–15.
- ZHOU Bailu, DING Huazhu, CHEN Qiao, et al. Coal Ash, 2016, 28(6): 13–15.
- [10] 张亚楠, 李军超, 王庆菲, 等. SMA 智能混凝土材料裂缝监测与修复机理和试验研究[J]. 固体力学学报, 2020, 41(2): 170–181.
- ZHANG Yanan, LI Junchao, WANG Qingfei, et al. Chin J Solid Mech, 2020, 41(2): 170–181.
- [11] 欧进萍. 重大工程结构智能传感网络与健康监测系统的应用[J]. 中国科学基金, 2005, 19(1): 8–12.
- OU Jinping. Bull Natl Sci Found China, 2005, 19(1): 8–12.
- [12] 韩宝国, 林泽, 欧进萍. 镍粉复合水泥基材料的压敏性研究[J]. 稀有金属材料与工程, 2009, 38(S1): 265–270.
- HAN Baoguo, LIN Ze, OU Jinping. Rare Met Mater Eng, 2009, 38(S1): 265–270.
- [13] 王云洋, 薛常喜, 牛建伟, 等. 水泥基传感器与混凝土的应变协调性分析[J]. 哈尔滨工业大学学报, 2015, 47(9): 95–100.
- WANG Yunyang, XUE Changxi, NIU Jianwei, et al. J Harbin Inst Technol, 2015, 47(9): 95–100.
- [14] 王云洋. 水泥基传感器及智能混凝土柱模拟与试验研究[D]. 大连: 大连理工大学, 2017.
- WANG Yunyang. Simulation and experimental study on cement-based sensor and intelligent concrete column[D]. Dalian: Dalian University of Technology, 2017.
- [15] Scalet G, Niccoli F, Garion C, Chiggiato P, Maletta C, Auricchio F. A three-dimensional phenomenological model for shape memory alloys
- [16] MATERAZZI A L, UBERTINI F, D'ALESSANDRO A. Carbon nanotube cement-based transducers for dynamic sensing of strain[J]. Cem Concr Compos, 2013, 37: 2–11.
- [17] GEIS M W, EFREMOW N N, KROHN K E, et al. A new surface electron-emission mechanism in diamond cathodes[J]. Nature, 1998, 393: 431–435.
- [18] DONG W K, LI W G, TAO Z, et al. Piezoresistive properties of cement-based sensors: Review and perspective[J]. Constr Build Mater, 2019, 203: 146–163.
- [19] 付尧. CNTs-CB/环氧树脂和镍粉/环氧树脂复合材料压敏特性与机理研究[D]. 大连: 大连理工大学, 2021.
- FU Yao. Study on pressure-sensitive characteristics and mechanism of CNTs-CB/epoxy resin and nickel powder/epoxy resin composites[D]. Dalian: Dalian University of Technology, 2021.
- [20] 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.
- [21] Ruschau G R, SYoshikawa S, Newnham R E. Resistivities of RUSCHAU G R, YOSHIKAWA S, NEWNHAM R E. Resistivities of conductive composites[J]. J Appl Phys, 1992, 72(3): 953–959.
- [22] RYVKINA N, TCHMUTIN I, VILČÁKOVÁ J, et al. The deformation behavior of conductivity in composites where charge carrier transport is by tunneling: Theoretical modeling and experimental results[J]. Synth Met, 2005, 148(2): 141–146.
- [23] GARAS V Y, VIPULANANDAN C. Behavior of piezoresistive cement based materials[C]/Earth & Space 2006. League City/Houston, Texas, USA. American Society of Civil Engineers, 2006: 1–8.
- [24] WHITTINGTON H W, MCCARTER J, FORDE M C. The conduction of electricity through concrete[J]. Mag Concr Res, 1981, 33(114): 48–60.
- [25] XIE P, GU P, BEAUDOIN J J. Electrical percolation phenomena in cement composites containing conductive fibres[J]. J Mater Sci, 1996, 31(15): 4093–4097.
- [26] 邢思朋, 祝斯月, 李苗苗, 等. 智能混凝土研究进展[J]. 价值工程, 2020, 39(31): 256–257.
- XING Sipeng, ZHU Siyue, LI Miaomiao, et al. Value Eng, 2020, 39(31): 256–257.
- [27] 梁坤. 混凝土导电特性及其影响因素试验研究[D]. 成都: 西南交通大学, 2018.
- LIANG Kun. Experimental study on electrical conductivity of concrete and its influencing factors[D]. Chengdu: Southwest Jiaotong University, 2018.
- [28] LIU Y, LIU W B, LIU K J, et al. Extremely low-frequency electromagnetic fields affect the miRNA-mediated regulation of signaling pathways in the GC-2 cell line[J]. PLoS One, 2015, 10(10): e0139949.
- [29] DUAN W, LIU C, WU H, et al. Effects of exposure to extremely low frequency magnetic fields on spermatogenesis in adult rats[J]. Bioelectromagnetics, 2014, 35(1): 58–69.
- [30] LIU Y, LIU W B, LIU K J, et al. Effect of 50 Hz extremely low-frequency electromagnetic fields on the DNA methylation and DNA methyltransferases in mouse spermatocyte-derived cell line GC-2[J]. Biomed Res Int, 2015, 2015: 237183.
- [31] IARC Working Group on the Evaluation of Carcinogenic Risks to low-frequency(ELF) electric and magnetic fields[J].Scandinavian Journal of Work Environment & Health, 2002, 28(4): 285.
- [32] Fan X, Ke T, Gu H B. Multifunctional, ultra-tough organohydrogel FAN X, KE T, GU H B. Multifunctional, ultra-tough organohydrogel E-skin reinforced by hierarchical goatskin fibers skeleton for energy harvesting and self-powered monitoring[J]. Adv Funct Materials, 2023, 33(42): 2304015.
- [33] DONG D D, YANG Y, ZHANG H, et al. Nanocatalysts induced self-triggering leather skin for human-machine interaction[J]. Chem Eng J, 2023, 454: 140269.

Pressure Sensitive Characteristics of Nickel Powder Cement-Based Composites

LI Yifei¹, SHI Xinbo², XU Fan², WEN Quan², XIAO Huigang¹, FENG Shuo³

(1. School of Civil Engineering, Harbin Institute of Technology, Harbin 150060, China;

2. Heilongjiang Provincial Construction Engineering Group Co., Ltd., Harbin 150000, China;

3. School of Civil Engineering and Water Conservancy, Shandong University, Jinan 250061, China)

Extended Abstract

Introduction Abnormal strain and structural cracks are common precursors to engineering accidents in concrete structures. However, traditional strain and crack detection methods exhibit a lag, and discovering structural abnormalities in a timely manner incurs high labor costs. Consequently, strain self-sensing cement-based materials have garnered widespread attention from researchers due to their intelligent and automated characteristics. Nevertheless, current cement-based strain self-sensing materials lack exploration in conduction mechanisms, often failing to establish a good correlation between changes in electrical resistance and system strain. Therefore, in this paper, nickel powder, which exhibits excellent durability and conductivity, is selected as the conductive component for the preparation of cement-based strain self-sensing materials. The study explores its conduction mechanism and various electromechanical constitutive models under different states, providing an important reference for correlating the electromechanical relationship of strain self-sensing materials.

Methods The cement used is Swan Brand P·O 42.5 ordinary Portland cement, and the water reducer is polycarboxylate superplasticizer with a water reduction rate of 18%–29%. The nickel powder adopts micrometer-grade high-purity ultrafine conductive nickel powder, with a Ni purity of 99.999% and a loose bulk density of 1.40–1.68 g/cm³. The execution standard is GB/T 7160—2008.

Mix cement, nickel powder, water, and admixtures, then stir and disperse them before pouring the mixture into molds. Place the molds into a magnetic field coil and let them sit for a day before demolding and curing. During preparation, mix rapidly for 5 min to form Mixture 1. Then add nickel powder (with volume fractions of 0%, 5%, 10%, 15%, 17%, 20%, and 23%) to the cement and mix rapidly until the color of the mixture is uniform and no longer changes. This indicates that the nickel powder is fully dispersed and evenly distributed, forming Mixture 2. Pour Mixture 1 into Mixture 2 and mix rapidly for another 5 min. In this step, the water reducer increases fluidity while allowing re-dispersion of agglomerated cement and nickel powder particles, forming a nickel powder cement slurry called Mixture 3. Place Mixture 3 in a vacuum drying oven, adjust the temperature to 20 degrees Celsius, and vacuum for 15 min to eliminate bubbles and fully compact the mixture. Pour the defoamed Mixture 3 into molds with dimensions of 20 mm×20 mm×40 mm and 20 mm×20 mm×80 mm, and seal with plastic wrap to reduce water loss. Prepare two sets of test pieces for each volume fraction, allowing them to form under magnetic field strengths of 0 Gs (blank control) and 200 Gs for about 24 h. Then let them sit at room temperature for 2 d before demolding. Cure them in a 60 °C steaming box for 3 d, then cure under standard conditions for 4 d. Finally, dry them in a vacuum drying oven at 60 °C for about 24 h until the weight no longer decreases.

Result and discussion With the increase of the volume fraction of nickel powder, the resistivity changes can be roughly divided into three stages, namely, the stage of slow resistivity decrease, the stage of rapid resistivity decrease, and the stage of resistivity decrease again but at a slow rate. The rapid resistivity decrease stage of nickel powder cement-based materials conforms to the percolation theory, and the percolation threshold is between 15% and 17%. In this paper, the percolation threshold is taken as 15%. Near the percolation threshold, the conduction mechanism accords with the tunneling effect theory. For specimens formed under the action of a 200 Gs magnetic field, their resistivity in the direction along the magnetic field will decrease, while their resistivity in the direction against the magnetic field will increase. The measured maximum ratio between resistivity in the direction against the magnetic field and resistivity in the direction along the magnetic field is close to 4. Based on the tunneling effect and percolation theory, this paper derives an equation representing the change of resistance with strain, namely, the electromechanical constitutive model, and expresses this relationship as a polynomial function of strain. The parameters of the polynomial are determined using piezoresistive experiments. A four-point bending test is used to obtain piezoresistive curves of specimens with a 15% doping level formed under no magnetic field and under a 200 Gs magnetic field when subjected to pure bending loads. Based on the bending resistance variation of specimens with and without a magnetic field, this paper proposes an electromechanical constitutive equation representing the bending resistance variation rate and strain value. Subsequently, a supplementary equation for resistance variation after cracking of pure bending specimens is proposed, forming the basic theory for monitoring strain and cracks in bending members.

Conclusions The specific conclusions are as follows: The optimal mixing ratio for nickel powder cement is approximately 15%. Around this ratio, the conductive behavior of the material conforms to the tunneling effect theory. Through magnetic field treatment, the resistivity of the material decreases in the direction of the magnetic field and increases in the perpendicular direction. When this material is compressed, its resistance first decreases and then increases. During the elastic stage, the relationship between resistance and strain is nearly linear, with a maximum decrease rate exceeding 60%. The material treated with a magnetic field exhibits a smoother performance under compression. When the material is bent, its resistance also decreases initially and then increases, but the decrease rate is very small, only about 1%. The material treated with a magnetic field demonstrates a more stable resistance change when bent. Based on these experimental results, we have derived the electromechanical constitutive relationship of the material under uniaxial compression and pure bending loads.

Keywords nickel powder; cement; magnetic field; electromechanical constitutive model