

# 沥青混凝土路面损伤监测的碳基及其复合材料进展

金 娇<sup>1</sup>, 彭梧桐<sup>1</sup>, 潘 杰<sup>2</sup>, 史金明<sup>1</sup>, 肖梦承<sup>1</sup>

(1. 长沙理工大学交通运输工程学院, 长沙 410114;

2. 长沙理工大学国际学院, 长沙 410114)

**摘要:** 为推动沥青混凝土路面损伤监测技术的发展, 拓宽路面病害监测材料的选择范围, 对路面监测用碳基材料及其复合材料的种类、应用方式及现状进行梳理, 阐述该类材料在路面监测病害中的工作原理与应用特点, 分析不同碳基材料及其复合材料对路面结构性能的影响特征, 并针对沥青混凝土路面监测材料的选择与应用决策面临的问题与发展趋势进行详细的探讨与展望。

**关键词:** 碳基材料; 碳基复合材料; 沥青混凝土; 功能路面; 导电性能; 损伤监测

中图分类号: U 414

文献标志码: A

文章编号: 0254-0037(2022)06-0691-12

doi: 10.11936/bjutxb2021120023

## Review of Carbon Materials and Composites for Monitoring of Asphalt Concret Pavement Damage

JIN Jiao<sup>1</sup>, PENG Wutong<sup>1</sup>, PAN Jie<sup>2</sup>, SHI Jinming<sup>1</sup>, XIAO Mengcheng<sup>1</sup>

(1. School of Traffic & Transportation Engineering, Changsha University of Science and Technology, Changsha 410114, China;

2. International College, Changsha University of Science and Technology, Changsha 410114, China)

**Abstract:** To promote the development of asphalt concrete pavement damage monitoring technology and broaden the selection range of pavement disease monitoring materials, this paper combed the types, application methods, and current situation of carbon-based materials and their composites for pavement monitoring, expounded the working principle and application characteristics of these materials in road disease monitoring, and analyzed the influence characteristics of different carbon-based materials and their composites on pavement structural properties. The problems and development trend of the selection and application decision of asphalt concrete pavement monitoring materials were discussed in detail.

**Key words:** carbon materials; carbon-based composites; asphalt concrete; functional pavement; electrical conductivity; damage monitoring

混凝土作为一种优质的道路铺装材料, 在长期使用中容易产生各种类型的路面损伤. 在不出现明显缺陷的情况下, 往往不能准确判断路面内部状况. 当路面出现明显缺陷时往往已造成不可逆的损坏并产生较高修补或者重建费用. 因此, 提高混凝土的

自监测能力具有十分重要的意义. 如果在混凝土中掺入碳类等导电材料, 利用导电混凝土的压敏特性监测裂缝等病害的产生和发展, 可起到病害预警的作用. 导电混凝土是在普通沥青混凝土中加入一定量的导电材料, 使其具有一定的导电性能且不影响

收稿日期: 2021-12-23; 修回日期: 2022-02-21

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(52174237); 长沙市科技计划资助项目(kq2106042); 湖南省大学生创新资助项目(2021-2182)

作者简介: 金 娇(1988—), 女, 副教授, 主要从事道路材料方面的研究, E-mail: jinjiao@csust.edu.cn

其路用性能. 这种智能路面材料具有自愈合、融化冰雪、自诊断的特点<sup>[1-2]</sup>. 其中, 利用自热特性进行导电混凝土路面融冰雪已在一些工程中实践应用. 目前导电原理主要有渗流理论、有效介质理论、量子力学隧道效应理论和电场发射效应理论, 其中渗流理论认为, 导电材料的掺量在一定范围内时, 复合材料的导电性能变化与掺量增加比例并不连续, 掺量较少时, 导电性能增加缓慢, 随着导电相材料掺量不断增加, 在掺量达到某一值时, 复合导电材料的电阻率出现急剧下降, 渗流阈值表示临界导电材料添加范围. 因此, 渗透阈值有助于确定导电混合物中导电材料的最佳含量. 有效介质理论综合考虑导电相材料对复合材料的导电性能和基体材料的影响, 是一种较为全面的理论. 量子力学隧道效应认为, 在复合导电材料内部, 部分导电材料虽没有接触, 但间距较小(1 nm)时, 依然出现电子跃迁. 电场发射理论认为, 在隧道效应的基础上, 间隙为 10 nm 内的导电相材料颗粒之间会存在发射电场, 从而导致复合材料产生导电能力. 整体来看, 导电相复合材料的导电性能主要由接触效应和导电效应提供. 利用内部力学响应与阻力之间的关系对混凝土内部损伤进行预警, 可实现路面的自诊断<sup>[3-4]</sup>. 本文根据导电材料组分特点进行分类综述, 以探讨不同材料种类、掺量、形态、外界环境等因素对沥青混凝土导电性能和路用性能的影响.

## 1 常用碳基路用监测材料

导电沥青混凝土的材料设计要求在不牺牲基本力学性能的前提下优化电学和力学性能之间的平衡, 以实现多功能应用. 加入碳基材料, 正是为了在增强沥青各项路用性能的基础上, 赋予沥青混凝土导电性能, 将碳基复合材料电阻率随应力应变的变化关系原理应用于路面荷载和损伤监测.

### 1.1 碳纤维

碳纤维具有质量轻、强度高、模量高、耐高温、耐腐蚀、耐磨损等优点, 碳纤维在微观视角下呈细长的圆柱形, 直径约为 47  $\mu\text{m}$ , 表面有较浅的细长沟槽, 与沥青的接触角约为 48°, 其形貌图<sup>[5]</sup>和原样图<sup>[6]</sup>见图 1. 在沥青混合料中碳纤维与沥青有较好的裹附性. 碳纤维质量掺入量为 0.05% 时, 沥青软化点高达 57  $^{\circ}\text{C}$ , 沥青混合料抗车辙性能最大达到最大 1 420 次/mm, 抗弯强度最大达到 2.74 MPa, 冻融劈裂抗拉强度比峰值达到 90%, 说明碳纤维在该掺量下能明显增强沥青混凝土的路用性能, 但当碳纤维

质量掺量达到 0.1% 时, 极易出现团聚等现象<sup>[7]</sup>, 影响性能发挥.

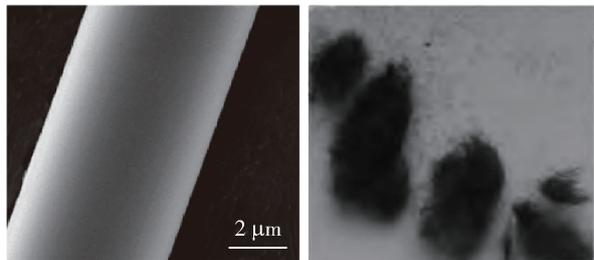


图 1 碳纤维形貌图<sup>[5]</sup>和原样图<sup>[6]</sup>

Fig. 1 Morphology of carbon fiber<sup>[5]</sup> and original sample<sup>[6]</sup>

### 1.2 石墨

石墨晶体结构为六边形层状结构, 具有较强的润滑性, 其形貌图<sup>[8]</sup>和原样图<sup>[9]</sup>见图 2, 与金属材料相比, 有耐腐蚀、耐高温的优点. 石墨导电沥青混凝土的力学性能显著降低, 具体表现为动态蠕变累积应变增加, 残余稳定性、残余劈裂强度和断裂能降低<sup>[10]</sup>. 因此, 从路用性能来看, 石墨并不适合单独加入沥青混凝土中, 鉴于石墨对复合导电性能的改善效果, 可以考虑复合其他物质进行研究.

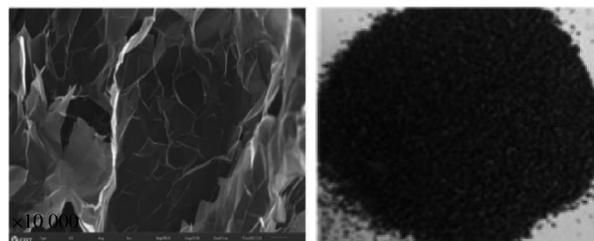


图 2 石墨形貌图<sup>[8]</sup>和原样图<sup>[9]</sup>

Fig. 2 Morphology of graphite<sup>[8]</sup> and original graphite<sup>[9]</sup>

### 1.3 (多壁)碳纳米管

碳纳米管具有高长径比、质量轻、高导电等性能, 是构成导电网络的理想材料, 常用于制作传感器等精密器具. 其形貌可看作是石墨烯片层弯曲形成, 如图 3 所示<sup>[11]</sup>. 田长进等<sup>[12-13]</sup>用碳纳米管、碳纳米管与石墨烯混合分别改性环氧树脂, 复掺质量分数为 0.3% 碳纳米管和 5% (M 级) 石墨烯、单掺质量分数为 0.9% 碳纳米管时均能较好地改善复合材料的导电性、拉敏性等. Xin 等<sup>[14]</sup>用多壁碳纳米管和环氧树脂复合制备一种监测沥青路面应变的传感器, 可有效检测 100 ~ 1 000 m 内的应变, 且具有高耐久性、重复性、响应灵敏性. 该传感器的最佳应变系数可达 26.04, 远高于传统金属应变传感器. 为碳纳米管质量掺量接近但不超过 2% 时, 能显著改善沥青的抗剪切和高温抗车辙性能, 而且碳纳米管对

沥青起到物理吸附和加筋作用,能改善沥青混合料的断裂性能<sup>[15]</sup>.但是碳纳米管价值高,导致碳纳米管沥青混凝土成本明显提高,而且纳米材料难以分散导致其制备工艺也更为复杂,这正是碳纳米管能明显改善混凝土材料的导电性能,却难以大规模应用到实际工程的原因.

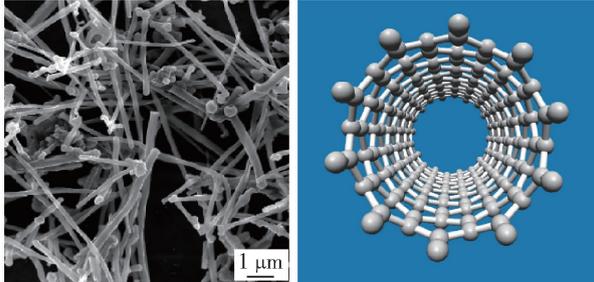


图3 碳纳米管形貌图和结构图<sup>[11]</sup>

Fig.3 Morphology and structure of carbon nanotubes<sup>[11]</sup>

### 1.4 石墨烯

石墨烯是一种六角形蜂巢晶格的二维层状结构,其形貌图和结构图<sup>[16]</sup>见图4,它具有高强度、高导电、高导热、疏水性,能与沥青胶结材料的非极性基团反应复合,能有效隔离氧气、水分等,提升其抗水损害和抗老化能力,通过温度传导避免温差引起的开裂<sup>[17]</sup>.但是,贾晓东等<sup>[18]</sup>用石墨烯纳米片改性沥青(物理改性),通过多重应力蠕变恢复试验、动态剪切流变试验、低温弯曲蠕变劲度试验、差示扫描量热仪试验等测定沥青改性后的相关性能.结果表明,随石墨烯纳米片含量增加,高温流动性降低,但同时低温受荷载形变恢复能力也降低.

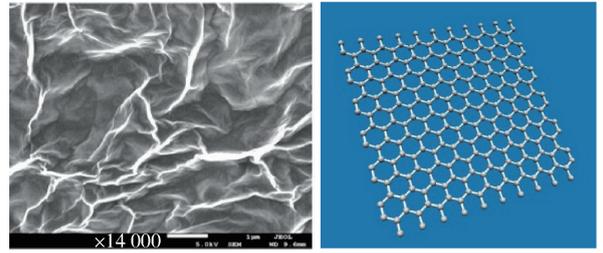


图4 石墨烯形貌图和结构图<sup>[16]</sup>

Fig.4 Morphology and structure of graphene<sup>[16]</sup>

刘克非等<sup>[19]</sup>研究发现,氧化石墨烯能减缓热氧老化对沥青三大指标的影响,显著提高沥青混合料的水稳定性,缓解低温抗裂性的不利影响.

4种常用碳基单掺最佳掺量与性能改善情况见表1.综合来看,对碳纤维和石墨改性沥青导电性的研究居多,但石墨粉较小的长宽比使其难以与混凝土内部结合形成导电通路网络,需要加大石墨剂量来提升复合材料的导电性.而单掺碳纤维质量分数超过1%、单掺石墨质量分数超过60%时,材料会出现团聚现象,分散性将制约它们的大规模使用.而且石墨的加入会显著降低沥青混合料的稳定性,使用较多的碳纤维作为单一导电添加剂会影响沥青混凝土密度,从而对沥青混凝土的力学性能产生不利影响.而碳纳米管和石墨烯需要克服由于巨大的比表面积和纳米粒径造成的团聚所产生的范德华力,另外其价格昂贵、不可回收等特点都会限制其路用开发.单独掺入碳基材料暂时没办法完全兼顾混合材料的路用性能、导电性能和经济性,因此复合型材料应运而生.

表1 碳基材料单掺路面的性能对比

Table 1 Performance comparison of single-doping carbon-based materials mixed in pavement

材料	最佳质量掺量/%	性能改善情况
碳纤维	0.05	碳纤维改善沥青软化点高达 57 ℃,沥青混合料抗车辙性能达到最大值 1 420 次/mm、抗弯强度达到最大值 2.74 MPa、冻融劈裂抗拉强度比峰值达到 90%,但碳纤维掺量超过 0.1% 易出现团聚现象 <sup>[7]</sup> .
石墨		单掺后虽导电性能虽有提升,但动态蠕变累积应变增加,残余稳定性和残余劈裂强度和断裂能降低,因此,不适用于单独掺入沥青混凝土中 <sup>[10]</sup> .
碳纳米管	≤2	碳纳米管显著改善沥青的抗剪切和高温抗车辙性能,而且碳纳米管能对沥青起到物理吸附和加劲作用,可以改善沥青混合料的断裂性能 <sup>[15]</sup> .
石墨烯	2	石墨烯降低其高温流动性,但同时降低低温受荷载形变恢复能力 <sup>[18]</sup> .而氧化石墨烯能减缓热氧老化对沥青三大指标的影响,显著提高沥青混合料的水稳定性,缓解低温抗裂性的不利影响 <sup>[19]</sup> .

## 2 碳基复合型路用监测材料

复合型路用导电材料根据其组分配合形式分为碳基-碳基复合、碳基-金属复合、水泥基-金属复合、多种碳基材料及其他物质与水泥基复合等几类。已有研究逐步探索适用于路面损害监测的材料搭配以及掺量,并分析不同温度、湿度、加载速率、循环加载对复合材料性能的影响规律。目前最佳配比为考虑掺加2、3种材料,在保持甚至改善力学性能的前提下,追求低成本下的高效导电性及稳定性。

### 2.1 碳基-碳基复合型

碳基-碳基复合材料作为复合型碳基材料的一种,具有高比强、高比模、抗蠕变、耐高温、耐疲劳、耐腐蚀、导电导热和线膨胀系数小等优异性能。

#### 2.1.1 碳纤维-石墨复合型

Liu等<sup>[10]</sup>研究碳纤维石墨沥青混合料的导电性与裂缝损伤之间的相关性,并通过直接和间接拉伸蠕变试验验证其力电敏感性。结果显示:混合料的电阻率与开裂程度存在较强的相关性,随应变的增大,电阻率逐渐降低,当混合料遭受临界破坏时,电阻率出现突然陡增。在未出现损伤阶段,电阻率与应变呈二次曲线变化规律,当应变值达到一定水平时,电阻率与应变基本呈线性关系。试件在损伤过程中,随着荷载作用时间的延长,荷载先逐渐增大到极限,然后逐渐减小;竖向应变值不断增大,而水平应变随着试样超过最大荷载而变化较小。电阻率在超过最大荷载后迅速增大<sup>[20]</sup>。

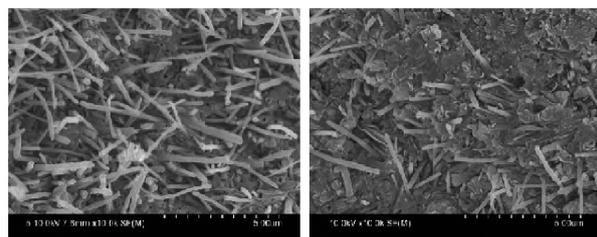
碳纤维和石墨复合的另一种方式是将碳纤维部分石墨化。韩瑞连等<sup>[21]</sup>通过低温热模压成型、炭化、石墨化将气相生长碳纤维和中间相沥青复合,相比传统碳纤维,其中气相生长碳纤维有极高的长径比和中空结构,因此具有高强度比、高导电导热等特性。研究发现,随气相生长碳纤维掺量增加,复合材料的导电性能和抗弯强度先增大后减小,最佳质量掺量为50%,此时复合材料的石墨化度为84.19%,弯曲模量为12 GPa,抗弯强度为77.5 MPa,电阻率最低为 $0.59 \times 10^{-5} \Omega \cdot \text{m}$ 。通过这种方式使复合材料中电阻率达到最低,且对力学性能有较好的提升,是不错的选择之一。气相生长碳纤维含量过多或过少时,会导致复合材料产生变形和错位剪切,使结构不紧密,从而产生大量孔洞,这可能是电阻率出现先增大后减小的原因。徐虎等<sup>[22]</sup>则将聚丙烯腈基碳纤维石墨化,发现由拉曼光谱图确定的石墨化度为2.8~4.8时,碳纤维石墨化程度越高,其电阻率越低。原

因主要在于:一方面,碳纤维石墨化越高,碳纤维中有超低电阻率的石墨碳含量越高;另一方面,碳纤维中非晶态过渡碳结构的芳香环共轭程度增加,使 $\pi$ 电子的迁移能力增强,从而导致电阻率降低。

因此将碳纤维与石墨复合到沥青混凝土中,碳纤维能弥补石墨沥青混凝土稳定性能、抗裂性能、抗拉强度、抗拉模量降低的影响。相同荷载循环次数下的动态蠕变累计应变及变化率由小到大依次为:碳纤维-石墨沥青混凝土、石墨沥青混凝土、普通沥青混凝土。当应变较低时,复合导电混凝土的疲劳寿命优于普通沥青混凝土;但当应变较大时,复合导电混凝土的疲劳寿命低于普通沥青混凝土的疲劳寿命。说明导电混凝土不适合繁忙的交通<sup>[10,20]</sup>。

#### 2.1.2 碳纤维-石墨烯复合型

雷妍等<sup>[23]</sup>用氧化石墨烯掺杂气相生长碳纤维复合沥青,探究不同掺量氧化石墨烯对复合材料力学性能和导电性能的影响情况,图5(a)(b)分别为未掺石墨烯和已掺石墨烯的碳纤维复合沥青电镜图。使用的气相生长碳纤维与传统碳纤维不同,传统的碳纤维是由沥青或聚合物高温分解而得,而气相生长碳纤维是由含碳气体分解而制得。传统碳纤维直径为7~15  $\mu\text{m}$ ,一般为实心碳层结构,而气相生长碳纤维直径较小,是中空结构。结果表明,在2.44%、4.76%、6.98%、9.09%、11.11%五种氧化石墨烯递增质量掺量下,复合材料的抗弯强度和电导率呈先增后减的趋势,且在质量掺量为9.09%时,抗弯和导电性能均为最佳,电阻率达到 $1.27 \times 10^{-5} \Omega \cdot \text{m}$ ,抗弯强度为85.7 MPa。



(a) 未掺石墨烯

(b) 石墨烯掺量为9.09%  
碳纤维复合沥青

图5 碳纤维复合沥青 SEM图<sup>[23]</sup>

Fig. 5 SEM images of carbon fiber composite asphalt<sup>[23]</sup>

### 2.2 碳基-金属复合型

将工业废料中的金属导电材料可持续性地应用于沥青混凝土中,在增强沥青混凝土导电性的同时降低材料成本。Ullah等<sup>[24]</sup>研究将碳纤维和铁尾矿混合加入沥青混凝土中,寻找出平衡其电学性能和力学性能的临界最佳掺量。图6为2种不同放大倍

数下碳纤维铁尾矿沥青泥合料电镜图<sup>[24]</sup>. 碳纤维铁尾矿混合物的渗流阈值范围为 0.2% ~ 0.8%, 但碳纤维质量掺量超过 0.4% 时高温抗车辙性能、水稳定性、动态稳定性均无法满足要求, 因此只有碳纤维掺量在 0.2% ~ 0.4% 时, 其复合材料可获得较好的电学性能和力学性能, 尤其在 0.4% 碳纤维质量掺量时, 不仅使复合材料具有较好的机械强度, 而且在加载过程中能对微小荷载做出响应. 不足的是铁尾矿等金属材料因易氧化而不具备耐久性.

钢纤维和石墨都能产生电阻率足够低的导电沥青混凝土, 钢纤维的桥接导电与石墨接触导电二者结合可以在更大范围内精确地控制沥青混凝土的电阻率. 图 7 为不同类型沥青混凝土结构示意图<sup>[25]</sup>, 其中: (a) 为未掺入导电填料的沥青混凝土, 不具导电性; (b) 为掺入较少钢纤维的沥青混凝土, 因其中钢纤维之间相互不搭接不具导电性; (c) 为掺入较多钢纤维的沥青混凝土, 因其中钢纤维之间相互搭接具导电性, 但电阻率不可控; (d) 为掺入较少钢纤维和石墨的沥青混凝土, 其因钢纤维与石墨组合搭接具有导电性且电阻率可控. 掺有钢纤维和石墨的沥青混凝土电阻率的变化率远小于单独掺入钢纤维

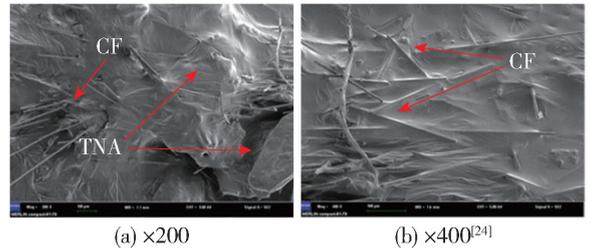


图 6 2 种不同放大倍数下碳纤维增强混合料的 SEM 图<sup>[24]</sup> (CF 为碳纤维, TNA 为铁尾矿混合集料)

Fig. 6 SEM images of CF reinforced mixture at two different magnification times<sup>[24]</sup>

或石墨沥青混凝土的电阻率的变化率. 当石墨体积掺量达到 6% 时, 加入更多的石墨导致电阻率迅速下降, 此时这种电阻率达到渗流阈值范围. 当石墨体积掺量增加到 18% 时, 沥青混凝土的电阻率已达到较低的  $1\ 600\ \Omega \cdot m$ . 选用 0.4% 的钢纤维掺量时石墨的最佳体积掺量为 14%. 复合沥青混凝土的导电性、马歇尔稳定性、抗车辙性能、间接抗拉强度和抗低温开裂性能均较素混凝土有显著提高. 石墨的加入提高了材料的永久变形抗力, 但稳定性和低温性能有所降低<sup>[26]</sup>.

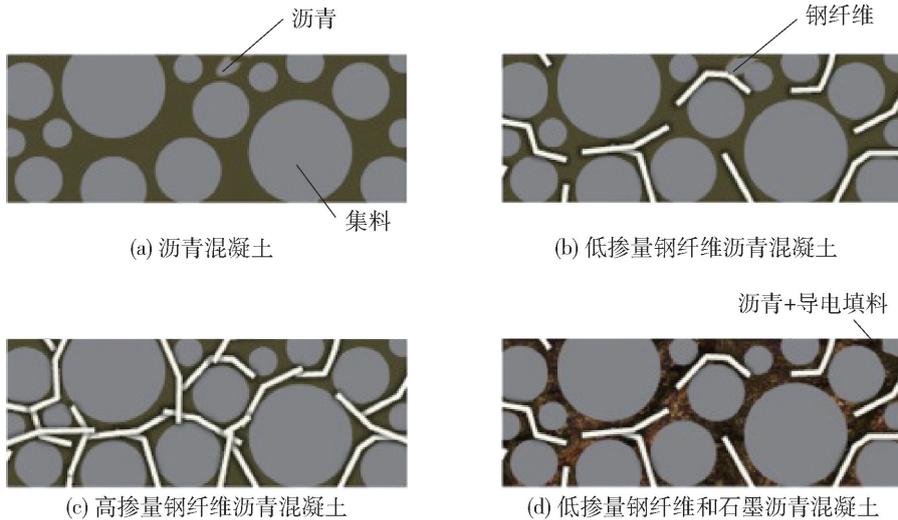


图 7 沥青混凝土中钢纤维与石墨的掺入方案<sup>[25]</sup>

Fig. 7 Mixing scheme of steel fiber and graphite in asphalt concrete<sup>[25]</sup>

### 2.3 碳基-碳基-金属复合型

为制备路用性能和导电良好的导电沥青混合料, 项丽<sup>[27]</sup>将石墨、碳纤维、钢渣加入沥青混合料中, 在不同掺量及配比中找出 3 种材料的最佳掺量. 通过单相复合沥青混合料、双相复合沥青混合料、三相复合沥青混合料依次找出石墨、碳纤维、钢渣的最佳掺量, 结合灰关联度分析(见表 2), 确定石墨、碳纤维、

钢渣三者的最佳掺量分别为 20%、0.35%、100% (石墨和碳纤维占沥青混合料体积分数、钢渣为代替普通骨料的体积比例), 电导率高达  $0.125\ S/m$ , 且导电率由高到低顺序为: 三相复合材料、碳纤维石墨复合材料、石墨复合材料. 石墨可以提高材料的永久抗变形能力, 但会降低稳定性和低温性能. 碳纤维大幅提高混合料的导电性能, 钢渣提升混合料的导电性、

表2 三相导电沥青混合料导电率中各材料的灰关联度<sup>[27]</sup>Table 2 Grey correlation degree of materials in conductivity of three-phase conductive asphalt mixture<sup>[27]</sup>

材料种类	石墨	碳纤维	钢渣
灰关联度	0.545 6	0.589 2	0.363 5

高温稳定性和水稳定性,降低低温抗裂性.

表3为上述不同多元碳基复掺路面的力电性能对比,除此之外,仍有一些碳基-水泥基复合型材料可添加到沥青路面中用于提高导电性能.

## 2.4 碳基—水泥基复合型

目前用于研究自监测路面的碳基材料主要包括

表3 碳基复掺路面的力电性能对比

Table 3 Comparison of mechanical and electrical properties of carbon-based composite pavement

材料	电阻率/( $\Omega \cdot m$ )	力电性能变化情况
碳纤维-石墨		碳纤维能弥补石墨沥青混凝土稳定性、抗裂性、抗拉强度、抗拉模量降低的影响. 混合料导电性与裂缝损伤相关性强,力电敏感性佳 <sup>[20]</sup>
碳基-碳基	$0.59 \times 10^{-5}$	能降低电阻率,且对力学性能有所提升. 当碳纤维石墨化度为84.19%时,弯曲模量为12 GPa,抗弯强度为77.5 MPa <sup>[21]</sup>
碳纤维-石墨烯	$1.27 \times 10^{-5}$	随石墨烯掺量递增,抗弯强度和电导率出现先增后减,在质量掺量为9.09%时,抗弯和导电2种性能均为最佳,抗弯强度为85.7 MPa <sup>[23]</sup>
碳基-金属		0.4%碳纤维质量掺量时,复合材料机械强度较好,且在加载过程中能对微小荷载做出响应. 不足的是铁尾矿等金属材料因易氧化而不具备耐久性 <sup>[24]</sup>
碳纤维-铁尾矿		0.4%的碳纤维质量掺量时石墨的最佳体积掺量为14%. 复合沥青混凝土的导电性、马歇尔稳定性、抗车辙性能、间接抗拉强度和抗低温开裂性能均较素混凝土有显著提高 <sup>[26]</sup>
石墨-钢纤维	1 600	石墨可以提高材料的永久抗变形能力,但会降低稳定性和低温性能. 碳纤维大幅提高混合料的导电性能,钢渣提升混合料的导电性、高温稳定性和水稳定性、降低低温抗裂性 <sup>[27]</sup>
碳基-碳基-金属	8	

碳纤维、(纳米)炭黑、(多壁)碳纳米管、石墨、石墨烯(纳米片)等材料. 作为导电填料的碳基材料,具有较好的耐久性、优异的耐碱性和导电性能,是理想的导电填料,碳基对水泥基复合材料具有增强、阻裂、增韧等改善,而且二者相容性好,因此以碳基材料为填料、以水泥为基体或再结合其他物质复合,可凭借压阻特性对应力及应变的响应用于路面应力应变、裂缝和动态质量的监测. 现有研究对碳基-水泥基复合型研究较多,以下从掺入物种类与数量、内部影响因素、外部影响因素3个方面分析对碳基水泥基复合型材料导电性能和力学性能的影响规律.

### 2.4.1 掺入物种类与数量

在水泥中加入单一碳基材料初步探索碳基水泥基混凝土路面的导电性能. 对于相同长径比<sup>[28]</sup>的

碳纤维,其电阻率随碳纤维质量含量的变化要分别进行讨论,当碳纤维含量低于渗流阈值(此处渗流阈值是指水泥基材料由绝缘相转换为导电相,电阻率突然陡降时所对应碳纤维的临界质量掺量)时,碳纤维水泥基复合材料电阻率随碳纤维质量含量增加而降低,但在达到渗流阈值时,电阻率不再显著降低. 渗流阈值范围成为导电碳基材料导电性的特征,渗流阈值越低,则说明碳基材料掺量越低,而且其复合材料也能获得较低的电阻率. Monteiro等<sup>[29]</sup>将炭黑作为填料与水泥复合,在15~45℃范围内可作压阻传感器对压缩荷载进行识别. 纳米炭黑在水泥砂浆中的渗流阈值范围为0.10%~0.75%,相比素水泥砂浆,质量掺量为0.5%超导炭黑砂浆的电阻变化率、压阻效应、抗压强度和抗折强度分别提升

102.42%、99.07%、26.24%和35.09%<sup>[30]</sup>。韩宝国等<sup>[31]</sup>首次研究乙炔炭黑水泥基复合材料的压敏性发现,乙炔炭黑体积掺量为15%时复合材料(初始平均电阻率为 $4.23 \Omega \cdot \text{m}$ )一次加载至破坏的电阻变化率最高可达55%,且弹性阶段的压敏性具有重复性。Han等<sup>[32]</sup>探讨碳纳米管/水泥复合材料对反复压缩荷载和脉冲荷载的传感性能,确定碳纳米管/水泥复合材料用于交通荷载监测的可行性。多壁碳纳米管在较佳的质量掺量0.2%左右时,表现出较优的机敏性<sup>[33]</sup>。通过分析形貌发现石墨烯与水泥结合紧密,通过循环加压发现当石墨烯质量掺量为0.6%时,石墨烯/水泥基复合材料具有典型的压敏性<sup>[34]</sup>。对比空白组,多层石墨烯/水泥基复合材料的抗压强度和抗弯强度最大可提高30.1%和11.6%,当多层石墨烯质量掺量为1.6%时复合材料的压敏性最优<sup>[35]</sup>。因此,(纳米)炭黑、碳纳米管、石墨烯均适合单掺入水泥基材料中,相比之下,少量炭黑不仅能达到较好的导电效果,而且对力学性能有较好的提升效果,同时使用炭黑成本较低。

单一碳基材料与水泥基材料的复合材料的电阻率等各方面性能可以得到改善,但存在电阻率稳定性差、制备成本高等问题。采用2种或3种碳基材料制备的复相混凝土的导电性能通常优于单一碳基材料制备的混凝土。易峰等<sup>[36]</sup>制备了磷酸盐水泥基碳纤维复合砂浆,提出碳纤维质量掺量为1%时压阻性能较好。掺入质量分数为4%的水泥基渗透结晶防水材料、质量分数为1%碳纤维的石墨水泥基复合材料的渗流阈值为20%左右,即石墨质量掺量为20%时,其电阻率为 $4.7 \Omega \cdot \text{m}$ <sup>[37]</sup>。左俊卿等<sup>[38]</sup>将碳纳米管与碳纤维混合后掺入水泥基材料中,发现碳纳米管质量掺量为0.5%时其温敏性和压敏性最优。硅灰的加入,能较好地增强碳纤维水泥基复合材料的抗压强度和温敏性<sup>[39]</sup>。加入水泥基渗透结晶防水材料的碳纤维石墨砂浆的体积电阻率随石墨量的增加而迅速减少,且在石墨质量掺量为20%~30%时,该复合材料的体积电阻率与压应力的对应关系具有重复性<sup>[37]</sup>。通过酸化处理使碳纳米管接枝羟基、羧基,比起接枝羧基和空白的碳纳米管,带有较多羟基基团的碳纳米管改性砂浆具有较强的机敏性<sup>[40]</sup>。Han等<sup>[41]</sup>将碳纳米管(carbon nanotube, CNT)和纳米炭黑(nano-carbon black, NCB)2种纳米材料按体积比40:60复合填入水泥砂浆中,发现CNT与NCB之间复合砂浆的渗流阈值为0.39%~1.52%,且CNT与NCB的复合体积

掺量为2.4%时,其复合材料应力和应变敏感性分别达到 $2.69\% \text{ MPa}^{-1}$ 和704。

#### 2.4.2 内部影响因素

相同含量的碳纤维长径比越高,其碳纤维水泥基复合材料导电率越高,应变灵敏度也越高<sup>[28]</sup>。就提升电学性能而言,粒径较小的超导炭黑优于粒径较大的特导炭黑<sup>[30]</sup>。小尺寸( $20 \text{ mm} \times 20 \text{ mm} \times 60 \text{ mm}$ )比大尺寸( $40 \text{ mm} \times 40 \text{ mm} \times 160 \text{ mm}$ )多壁碳纳米管水泥基复合材料的机敏性更优<sup>[33]</sup>。目前碳基材料在复合材料中的分散性是其大规模应用的制约因素之一。解决纳米碳基材料分散性问题的方式主要包括物理处理(搅拌结合超声处理)和化学处理(共价修饰和非共价修饰),也有研究权衡各种混合方式之后选用非共价表面修饰结合物理搅拌<sup>[42]</sup>。加入一定量的十二烷基硫酸钠在水性体系中对纳米碳纤维具有较好的分散作用<sup>[43]</sup>。为解决石墨烯在水泥基中的分散性问题,王琴等<sup>[44]</sup>利用合成的4种电荷密度和侧链长度不同的聚羧酸系减水剂(polycarboxylate superplasticizers, PCEs)来改善分散性,通过实验证明低电荷密度的PCEs由于聚羧酸基团与 $\text{Ca}^{2+}$ 的桥接效应不显著,结合PCEs间库仑力的排斥作用使得石墨烯的分散性较好,但带有长侧链的PCEs致使石墨烯的分散性较差,因此从减水剂影响石墨烯分散性的角度来看,应当选用低电荷密度和短侧链的PCEs加入石墨烯水泥基复合材料中。将石墨粉和黏土混合制成陶粒再复合碳纤维水泥基材料<sup>[45]</sup>,能显著改善压敏性,在低加载应力循环下电阻变化与应力变化对应良好,而在高加载应力循环下由于不可逆的裂纹等损伤导致电阻变化不恢复的增加。

#### 2.4.3 外部影响因素

将碳基水泥基复合材料运用到实际,就必须考虑到实际环境中温度、湿度和外加荷载等因素的影响。从单一外部因素到多种外部因素耦合,由浅入深尽可能模拟出复合材料真实的工作环境。已有研究一般用电阻率或者导电率及电阻变化率表征碳基水泥基复合材料的压敏性、温敏性、湿敏性。碳纤维水泥砂浆在养护至35 d后烘干2次(含水量较低)后的电阻率随时间单调增加<sup>[46]</sup>。王玉林等<sup>[47]</sup>研究分析不同含水量对碳纤维水泥基复合材料和纳米炭黑水泥基复合材料<sup>[48]</sup>压阻性的影响,复合材料在含水量极高或极低时表现为正压敏性,在一般含水量时表现为负压敏性,且中间存在正、负压敏性共存的过渡阶段。当材料体积电阻随拉应力的增大而增

大,或随压应力的增大而减小时,为正压敏性,反之为负压敏性. 相比空白组的水泥砂浆,0.5%质量掺量的超导炭黑<sup>[30]</sup>在单调加载和15 kN循环加载情况下的电阻率分别增加102.42%和99.07%. 在冻融循环下探索纳米炭黑、碳纤维、钢纤维混凝土材料监测损伤的性能,发现冻融作用下的阻抗变化率与冻融循环次数之间的关系符合指数衰减一阶曲线,相关系数为0.977~0.994<sup>[49]</sup>. 袁娇等<sup>[50]</sup>探究碳纳米管水泥基复合材料在不同温度和湿度状态下电阻率的变化情况,试验表明碳纳米管质量掺量为0.5%的复合材料在25~55℃内温敏性最佳,在0.6%~6%内湿敏性最佳. 在温度-湿度耦合作用下,随含水率的增加,温度致碳纳米管水泥基复合材料压敏性下降显著. 在循环荷载作用下,其电阻率随含水率(0~6.4%)增加先增加后减小;随温度(20~50℃)的增加而降低,压敏性能提升<sup>[51]</sup>. 相较掺入普通碳纳米管,掺入带有较多羟基基团的碳纳米管水泥基复合材料在单调加载和15 kN循环加载下电阻变化率分别提升22.0%和11.1%<sup>[40]</sup>. 李小霞等<sup>[52]</sup>研究温度、外加荷载对碳纤维和膨胀石墨复合水泥基材料导电性能的影响,在只考虑单一变量的情况下,碳纤维/膨胀石墨复合材料的导电率随温度升高、外加荷载的增大而逐渐增大. 魏剑等<sup>[53]</sup>将膨胀石墨和碳纤维加入到硫铝酸盐水泥中制成复合材料,在循环低温荷载作用下的导电率降低,分析可能是低温荷载导致材料内部产生微裂纹的原因.

### 3 道路检测应用进展

目前碳基及其复合材料用于混凝土路面损伤监测还处于室内研究阶段,室外场地探究较少. 唐宁<sup>[54]</sup>采用将石墨沥青混凝土放置于上下两电极之间的三明治结构电极形式,在曹妃甸工业区铺设试验路段. 从实际应用来看,测点的电阻率总体呈上升趋势. 但铺筑的导电沥青混凝土路面具有良好的路用性能和导电性能,能达到对路面损伤监测的要求. 预置下部电极与界面处理后路面实物如图8所示,其上部电极植入效果如图9所示.

李永琴<sup>[55]</sup>将碳纤维石墨沥青混凝土和分布式光纤传感器应用于桥面铺装开裂预警,工作原理为通过碳纤维石墨沥青混凝土电阻率与应变在不同阶段分别呈现出二次非线性、线性关系反推出桥面内部应力情况. 光纤分布图及碳纤维石墨沥青混凝土试验现场如图10、11所示.



图8 石墨沥青混凝土试验路下部电极埋设施工图<sup>[54]</sup>

Fig. 8 Construction drawings of graphite asphalt concrete test road with electrode buried in bottom<sup>[54]</sup>



图9 石墨沥青混凝土试验路上部电极埋铺施工图<sup>[54]</sup>

Fig. 9 Construction drawings of graphite asphalt concrete test road with electrode buried on top<sup>[54]</sup>

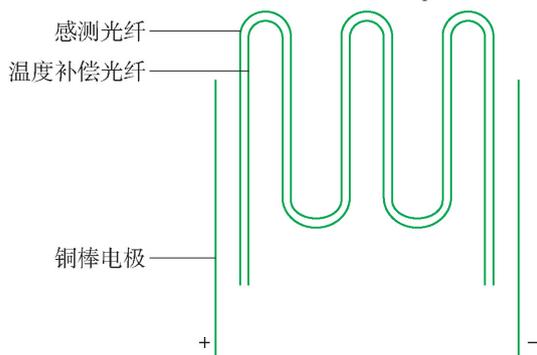


图10 碳纤维石墨混凝土试验路光纤分布图<sup>[55]</sup>

Fig. 10 Distribution of optical fiber in carbon fiber graphite concrete test road<sup>[55]</sup>



图11 碳纤维石墨混凝土试验路现场铺筑图<sup>[55]</sup>

Fig. 11 Field pavement of carbon fiber graphite concrete test road<sup>[55]</sup>

## 4 结论

上述各种材料掺入混凝土中,其导电、导热、压阻性能可用于监测内部损伤、升温除冰雪、监测动态荷载等。

1) 掺入碳基材料中以碳纤维和石墨居多,但石墨单独掺入会影响沥青混合料的稳定性,所以往往需要石墨与其他碳基材料复合掺入。对比碳纤维、石墨、碳纳米管、石墨烯来看,单掺时碳纤维和石墨烯在掺量较小情况下便能获得较好性能。纤维状材料的远程导电结合粉末状材料的近程导电使导电性能更加稳定。纳米材料导电性、灵敏性更高的同时成本也更高,一般多用于传感元件。

2) 从材料路用性能与导电性能来看,复合型导电材料普遍优于单掺导电材料,如石墨满足所需导电性能时,因掺量过大导致沥青混凝土路用性能不佳;碳纤维掺量过大时,因分散性导致沥青混凝土实际应用受到限制;常用钢渣、钢屑等金属材料容易钝化,从而影响沥青混凝土对导电性能的持续应用。掺入的材料应当充分考虑种类、形状特征、粒径、掺入量、分散性、使用成本等方面,并结合使用温度、湿度、荷载等作用情况进行选择,大范围推广应用仍需更深入的研究,重点应考虑使用石墨烯、碳纳米管等新型材料的应用研究。

3) 由于沥青混凝土路面属于多相复合体系,具有非均质、相分离等特点,将碳基类导电材料应用于沥青混凝土路面损伤监测时会增加整体路面结构的复杂性,导致监测过程中出现渗流阈值窄、损失鉴定量程不稳定、电极布设施工工艺复杂等问题,开展基于监测预警(损伤和荷载)、融冰化雪和裂缝自愈等多功能同时运作条件下的复杂相态路面结构系统设计方法研究,对沥青混凝土路面监测技术的发展具有重要意义。

## 5 展望

目前对沥青路面导电性能利用的研究偏重于解决融雪化冰、修复裂缝等已存问题,忽略了对重要结构进行动态化和周期化监测。反而耗费大量人力和物力对结构进行常规的检测,甚至用钻芯取样等操作对结构产生损害。所以在不损害材料性能的前提下对沥青路面结构健康进行早期监测预警,成为一个重点关注的问题。研究者们从加入单相的碳基材料到多相于碳基材料复合,保持或改善力学性能和路用性能的同时,利用导电性能对沥青混凝土路面

进行损伤、荷载监测。后续的重点研究包括进一步分析判断出损伤部位和损伤类型,进而通过电磁加热法等方法进行对应处置,除此之外,可利用其导电性用于发热路面融冰化雪、电光转换利用、防静电、电磁屏蔽等方面。在各功能兼具且相互间影响降至可控范围内,最终研究得出一种能集监测预警(损伤和荷载)、融冰化雪、裂缝自愈、电磁屏蔽等功能于一体的碳基复合材料。将沥青混凝土路面导电性能用于实际的损伤监测还存有较多问题,包括材料的分散性问题、制备工艺复杂程度、保持电阻率的稳定性、损伤部位的精准程度、损伤的类型、监测量程,以及对应的处置措施等,与此同时平衡好电学性能、力学性能、路用性能、经济成本的协调。最后制备过程的污染、报废后的回收利用都是不可忽视的问题。

## 参考文献:

- [1] 刘志胜,武胜兵,刘鹏飞,等. 导电沥青混凝土及其功能特性研究进展[J]. 材料导报, 2017, 31(增刊1): 374-378, 387.  
LIU Z S, WU S B, LIU P F, et al. Review on functional features of conductive asphalt concrete [J]. Materials Reports, 2017, 31(Suppl 1): 374-378, 387. (in Chinese)
- [2] 王海成,金娇,刘帅,等. 环境友好型绿色道路研究进展与展望[J]. 中南大学学报(自然科学版), 2021, 52(7): 2137-2169.  
WANG H C, JIN J, LIU S, et al. Research progress and prospect of environment-friendly green road[J]. Journal of Central South University(Science and Technology), 2021, 52(7): 2137-2169. (in Chinese)
- [3] 贾兴文,张新,马冬,等. 导电混凝土的导电性能及影响因素研究进展[J]. 材料导报, 2017, 31(21): 90-97.  
JIA X W, ZHANG X, MA D, et al. Conductive properties and influencing factors of electrically conductive concrete: a review[J]. Materials Reports, 2017, 31(21): 90-97. (in Chinese)
- [4] 宋鹏. 石墨烯导电沥青混凝土制备及性能研究[D]. 重庆: 重庆交通大学, 2019.  
SONG P. Study on preparation and properties of graphene conductive asphalt concrete [D]. Chongqing: Chongqing Jiaotong University, 2019. (in Chinese)
- [5] 胡晶,熊祎,陈春亮,等. 一体烧结式改性碳纤维陶瓷基复合材料的制备及其电热性能[J]. 材料科学与工程学报, 2021, 39(6): 953-960.  
HU J, XIONG Y, CHEN C L, et al. Preparation and electrothermal properties of one-step firing modified carbon fiber ceramic matrix composite[J]. Journal of Materials Science and Engineering, 2021, 39(6): 953-960. (in Chinese)
- [6] 韩知伯,丁一宁. 混杂纤维高性能导电混凝土裂缝监测的试验研究[J]. 工业建筑, 2012, 42(11): 102-105.

- HAN Z B, DING Y N. Experimental study on crack monitoring of hybrid fibers high performance concrete [J]. *Industrial Construction*, 2012, 42 (11): 102-105. (in Chinese)
- [7] 毕鹏. 碳纤维增强沥青混凝土路用性能研究[J]. *中外公路*, 2019, 39(1): 226-229.
- BI P. Study on road performance of carbon fiber reinforced asphalt concrete [J]. *Journal of China & Foreign Highway*, 2019, 39(1): 226-229. (in Chinese)
- [8] 蒯子函, 闫霆, 吴韶飞, 等. 硬脂醇/膨胀石墨复合相变材料的制备及储热性能[J]. *化工进展*, 2021, 40(增刊1): 301-310.
- KUAN Z H, YAN T, WU S F, et al. Fabrication and heat storage properties of stearyl alcohol/expanded graphite composite phase change materials [J]. *Chemical Industry and Engineering Progress*, 2021, 40(Suppl 1): 301-310. (in Chinese)
- [9] 胡定华, 许肖永, 林肯, 等. 石蜡/膨胀石墨/石墨片复合相变材料导热性能研究[J]. *工程热物理学报*, 2021, 42(9): 2414-2418.
- HU D H, XU X Y, LIN K, et al. Study on heat conductivity of paraffin/expanded graphite sheet composite material [J]. *Journal of Engineering Thermophysics*, 2021, 42(9): 2414-2418. (in Chinese)
- [10] LIU L Y, ZHANG X, XU L, et al. Investigation on the piezoresistive response of carbon fiber-graphite modified asphalt mixtures [J/OL]. *Construction and Building Materials*, 2021, 301: 124140. (2021-09-27) [2022-03-20]. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2021.124140>.
- [11] 刁加加, 常春蕊, 张志明, 等. 金掺杂降低碳纳米管接触电阻的实验研究[J]. *材料研究学报*, 2017, 31(7): 511-516.
- DIAO J J, CHANG C R, ZHANG Z M, et al. Reducing contact resistance of carbon nanotubes by Au doping [J]. *Chinese Journal of Materials Research*, 2017, 31(7): 511-516. (in Chinese)
- [12] 田长进, 管延华, 葛智, 等. 碳纳米管环氧树脂复合材料的拉敏性研究[J]. *复合材料科学与工程*, 2019(2): 69-74.
- TIAN C J, GUAN Y H, GE Z, et al. Study on the sensitivity of carbon nanotube epoxy resin composites [J]. *Composites Science and Engineering*, 2019(2): 69-74. (in Chinese)
- [13] 田长进, 卢青, 徐茜茜, 等. 碳纳米管石墨烯协同改性环氧树脂复合材料的机敏性研究[J]. *复合材料科学与工程*, 2018(10): 62-69.
- TIAN C J, LU Q, XU Q Q, et al. Study on the agility of carbon nanotube graphene synergistically modified epoxy resin composites [J]. *Composites Science and Engineering*, 2018(10): 62-69. (in Chinese)
- [14] XIN X, LIANG M, YAO Z, et al. Self-sensing behavior and mechanical properties of carbon nanotubes/epoxy resin composite for asphalt pavement strain monitoring [J/OL]. *Construction and Building Materials*, 2020, 257: 119404. (2020-10-10) [2022-03-20]. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.119404>.
- [15] 曹睿明, 陈小兵, 陈先华. 碳纳米管改性沥青及混合料的高温流变和断裂韧性试验 [J]. *江苏大学学报(自然科学版)*, 2020, 41(4): 473-477, 483.
- CAO R M, CHEN X B, CHEN X H. Experiment on high temperature rheology and fracture toughness of carbon nanotubes modified asphalt and mixture [J]. *Journal of Jiangsu University (Natural Science Edition)*, 2020, 41(4): 473-477, 483. (in Chinese)
- [16] 战岩, 俎鸿儒, 黄棣, 等. 水热法快速制备荧光氧化石墨烯量子点及其在细胞成像中的应用[J]. *光谱学与光谱分析*, 2018, 38(5): 1458-1462.
- ZHAN Y, ZU H R, HUANG D, et al. Rapid synthesis of graphene oxide quantum dots via hydrothermal strategy for cell imaging application [J]. *Spectroscopy and Spectral Analysis*, 2018, 38(5): 1458-1462. (in Chinese)
- [17] 黄伊琳, 梁立喆, 田植群, 等. 石墨烯改性沥青的研究及工程应用 [J]. *化工新型材料*, 2020, 48(8): 244-248, 253.
- HUANG Y L, LIANG L Z, TIAN Z Q, et al. Research and engineering application of graphene modified asphalt [J]. *New Chemical Materials*, 2020, 48(8): 244-248, 253. (in Chinese)
- [18] 贾晓东, 彭义雯. 石墨烯纳米片改性沥青的制备及性能研究 [J]. *化工新型材料*, 2020, 48(7): 244-247, 251.
- JIA X D, PENG Y W. Preparation and property analysis of asphalt modified by GNPs [J]. *New Chemical Materials*, 2020, 48(7): 244-247, 251. (in Chinese)
- [19] 刘克非, 朱俊材, 吴超凡, 等. 氧化石墨烯改性沥青及其混合料抗老化性能试验研究 [J]. *公路*, 2020, 65(2): 225-230.
- LIU K F, ZHU J C, WU C F, et al. Experimental study on aging resistance of graphene oxide modified asphalt and its mixture [J]. *Highway*, 2020, 65(2): 225-230. (in Chinese)
- [20] 闫东星. 导电沥青混凝土路用性能及力—电机敏特性研究 [J]. *公路*, 2019, 64(3): 33-37.
- YAN D X. Study on road performance and mechanical-electric agility of conductive asphalt concrete [J]. *Highway*, 2019, 64(3): 33-37. (in Chinese)
- [21] 韩瑞连, 刘秀军, 樊桢, 等. 气相生长碳纤维/中间相沥青碳复合材料的制备及性能研究 [J]. *化工新型材料*, 2016, 44(10): 49-51.
- HAN R L, LIU X J, FAN Z, et al. Study on the preparation of vapor grown carbon fiber/mesophase pitch composite [J]. *New Chemical Materials*, 2016, 44(10): 49-51. (in Chinese)
- [22] 徐虎, 张泽, 徐卫军. 聚丙烯腈基碳纤维石墨化程度

- 对其电阻率的影响[J]. 化工新型材料, 2021, 49(2): 158-160, 164.
- XU H, ZHANG Z, XU W J. Influence of graphitization degree of PAN based CF on its resistivity[J]. *New Chemical Materials*, 2021, 49(2): 158-160, 164. (in Chinese)
- [23] 雷妍, 刘秀军, 樊桢, 等. 石墨烯掺杂气相生长碳纤维中间相沥青基复合材料的性能研究[J]. 化工新型材料, 2017, 45(4): 35-37, 40.
- LEI Y, LIU X J, FAN Z, et al. Study on the preparation and property of graphene doped vapor grown carbon fiber mesophase pitch-based composite [J]. *New chemical materials*, 2017, 45(4): 35-37, 40. (in Chinese)
- [24] ULLAH S, YANG C, CAO L, et al. Material design and performance improvement of conductive asphalt concrete incorporating carbon fiber and iron tailings [J/OL]. *Construction and Building Materials*, 2021. (2021-08-08) [2022-03-20]. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2021.124446>
- [25] PARK P. Characteristics and applications of high-performance fiber reinforced asphalt concrete[D]. Ann Arbor: University of Michigan, 2012.
- [26] WANG H, YANG J, LIAO H, et al. Electrical and mechanical properties of asphalt concrete containing conductive fibers and fillers [J]. *Construction and Building Materials*, 2016, 122: 184-190.
- [27] 项丽. 三相导电沥青混合料的制备及性能研究[J]. 新型建筑材料, 2017, 44(7): 137-140.
- XIANG L. Study on the preparation and properties of three-phase conductive asphalt mixture [J]. *New Building Materials*, 2017, 44(7): 137-140. (in Chinese)
- [28] BAEZA F J, GALAO O, ZORNOZA E, et al. Effect of aspect ratio on strain sensing capacity of carbon fiber reinforced cement composites[J]. *Materials & Design*, 2013, 51: 1085-1094.
- [29] MONTEIRO A O, LOREDO A, COSTA P M F J, et al. A pressure-sensitive carbon black cement composite for traffic monitoring [J]. *Construction and Building Materials*, 2017, 154: 1079-1086.
- [30] 范杰, 李庚英. 纳米炭黑改性水泥砂浆的导电性与机敏性[J]. 新型建筑材料, 2017, 44(3): 106-109.
- FAN J, LI G Y. Conductivity and alertness of nano black modified cement mortar [J]. *New Building Materials*, 2017, 44(3): 106-109. (in Chinese)
- [31] 韩宝国, 陈伟, 欧进萍. 乙炔炭黑水泥基复合材料的压敏性[J]. 复合材料学报, 2008, 25(3): 39-44.
- HAN B G, CHEN W, OU J P. Piezoresistivity of cement-based materials with acetylene carbon black [J]. *Acta Materiae Compositae Sinica*, 2008, 25(3): 39-44. (in Chinese)
- [32] HAN B, YU X, KWON E. A self-sensing carbon nanotube/cement composite for traffic monitoring [J/OL]. *Nanotechnology*, 2009, 20(44): 445501. (2009-11-04) [2022-03-20]. <https://doi.org/10.1088/0957-4484/20/44/445501>.
- [33] 李云峰, 孙章平, 孙静, 等. 碳纳米管水泥基复合材料机敏性能研究[J]. 混凝土与水泥制品, 2016(3): 7-12.
- LI Y F, SUN Z P, SUN J, et al. Study on the smart properties of carbon nanotube cement matrix composites [J]. *Concrete and cement products*[J]. *China Concrete and Cement Products*, 2016(3): 7-12. (in Chinese)
- [34] 马颖, 安博星, 王丹, 等. 石墨烯/水泥复合材料的制备及电学、压敏性能研究[J]. 混凝土, 2015(9): 72-76.
- MA Y, AN B X, WANG D, et al. Preparation of graphene/cement composites and their electrical and pressure sensitive property [J]. *Concrete*, 2015(9): 72-76. (in Chinese)
- [35] 张翼, 张庭瑜. 多层石墨烯/水泥复合材料的制备及压敏性能研究[J]. 功能材料, 2020, 51(10): 10089-10093, 10151.
- ZHANG Y, ZHANG T Y. Preparation and pressure-sensitive properties of multilayer graphene/cement composites [J]. *Journal of Functional Materials*, 2020, 51(10): 10089-10093, 10151. (in Chinese)
- [36] 易峰, 丁铸. 磷酸盐水泥基碳纤维复合砂浆的压阻性能[J]. 新型建筑材料, 2017, 44(9): 44-48.
- YI F, DING Z. Study on piezoresistance effect of phosphate cement carbon fiber composite mortar [J]. *New Building Materials*, 2017, 44(9): 44-48. (in Chinese)
- [37] 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 X M, DONG X, SUN M Q, et al. Electrical characteristic and piezoresistivity of carbon fiber graphite cement-based composites containing CCCW [J]. *Acta Materiae Compositae Sinica*, 2009, 26(6): 138-142. (in Chinese)
- [38] 左俊卿, 周虹, 姚武, 等. CNT-CF 水泥基材料传感特性研究[J]. 材料导报, 2017, 31(22): 125-129.
- ZUO J Q, ZHOU H, YAO W, et al. Research on the sensing properties of CNT-CF/cement-based materials [J]. *Materials Reports*, 2017, 31(22): 125-129. (in Chinese)
- [39] 张一帆, 杜红秀, 石丽娜. 碳纤维及硅灰掺量对活性粉末混凝土强度和温敏性的影响[J]. 混凝土, 2019(7): 79-81.
- ZHANG Y F, DU H X, SHI L N. Effect of carbon fiber content and silica ash content on strength and temperature sensitivity of reactive powder concrete [J]. *Concrete*, 2019(7): 79-81. (in Chinese)
- [40] 范杰, 李庚英, 王中坤. 表面处理碳纳米管对水泥砂浆性能影响的研究[J]. 新型建筑材料, 2019, 46(8): 43-47.
- FAN J, LI G Y, WANG Z K. Effect of surface treatment

- of carbon nanotubes on the properties of cement mortar [J]. *New Building Materials*, 2019, 46(8): 43-47. (in Chinese)
- [41] HAN B, ZHANG L, SUN S, et al. Electrostatic self-assembled carbon nanotube/nano carbon black composite fillers reinforced cement-based materials with multifunctionality [J]. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, 2015, 79: 103-115.
- [42] 孙瑞平, 卫英慧, 郭陶明, 等. 碳纳米管水泥基复合材料的性能探讨[J]. *化工新型材料*, 2017, 45(3): 34-36.  
SUN R P, WEI Y H, GUO T M, et al. Exploration on property of carbon nanotubes reinforced cement-based composite[J]. *New Chemical Materials*, 2017, 45(3): 34-36. (in Chinese)
- [43] 王宝民, 马海楠, 张源. 十二烷基硫酸钠对纳米碳纤维的分散作用[J]. *材料导报*, 2014, 28(6): 21-25, 36.  
WANG B M, MA H N, ZHANG Y. Effects of sodium dodecyl sulfate on the dispersion of carbon nanofibers [J]. *Materials Reports*, 2014, 28(6): 21-25, 36. (in Chinese)
- [44] 王琴, 詹达富, 齐国栋, 等. 聚羧酸系减水剂对石墨烯分散性的影响(英文)[J]. *新型炭材料*, 2020, 35(5): 547-558.  
WANG Q, ZHAN D F, QI G D, et al. Impact of the microstructure of polycarboxylate superplasticizers on the dispersion of graphene[J]. *New Carbon Materials*, 2020, 35(5): 547-558. (in Chinese)
- [45] 何永佳, 吕林女, 金舜, 等. 导电功能集料碳纤维水泥基复合材料及其压敏性能[J]. *功能材料*, 2011, 42(11): 1958-1961.  
HE Y J, LÜ L N, JIN S, et al. Conductive functional aggregate carbon fiber cement matrix composites and their pressure-sensitive properties [J]. *Journal of Functional Materials*, 2011, 42(11): 1958-1961. (in Chinese)
- [46] 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 S Q, DONG C H, SONG Y J. Experimental study on the influence of water content on electrical conductivity of carbon fiber cement mortar [J]. *Highway*, 2020, 65(10): 303-305. (in Chinese)
- [47] 王玉林, 赵晓华, 兰四清. 碳纤维水泥基复合材料正、负压敏性与含水量的相关性研究[J]. *硅酸盐通报*, 2014, 33(6): 1341-1346.  
WANG Y L, ZHAO X H, LAN S Q. Correlation studies between pressure sensitivity properties and moisture content of carbon fiber reinforced cement-based composites [J]. *Bulletin of the Chinese Ceramic Society*, 2014, 33(6): 1341-1346. (in Chinese)
- [48] 王玉林, 赵晓华, 刘辉. 纳米碳黑水泥基复合材料压敏阻效应的若干特性研究[J]. *硅酸盐通报*, 2017, 36(11): 3902-3906.  
WANG Y L, ZHAO X H, LIU H. Some properties of piezoresistivity of cement-based composites with nano carbon black [J]. *Bulletin of the Chinese Ceramic Society*, 2017, 36(11): 3902-3906. (in Chinese)
- [49] DING Y, HUANG Y, ZHANG Y, et al. Self-monitoring of freeze-thaw damage using triphasic electric conductive concrete[J]. *Construction and Building Materials*, 2015, 101: 440-446.
- [50] 袁娇, 刘小艳, 陈玉泉, 等. 碳纳米管水泥基复合材料温敏及湿敏性能研究[J]. *混凝土与水泥制品*, 2020(4): 5-8.  
YUAN J, LIU X Y, CHEN Y Q, et al. Study on temperature and humidity sensitivity of carbon nanotube/cement composite (CN/CC) [J]. *China Concrete and Cement Products*, 2020(4): 5-8. (in Chinese)
- [51] 冯子强, 姚学亮, 卢青, 等. 环境及疲劳荷载对碳纳米管水泥基复合材料压敏性能的影响[J]. *公路交通科技*, 2017, 34(9): 30-36.  
FENG Z Q, YAO X L, LU Q, et al. Effect of environment and fatigue loading on piezoresistivity of carbon nanotubes/cement composite [J]. *Journal of Highway and Transportation Research and Development*, 2017, 34(9): 30-36. (in Chinese)
- [52] 李小霞, 常媛. 新型水泥基复合材料的制备及应力对其力学和热电性能的影响[J]. *硅酸盐通报*, 2020, 39(5): 1478-1482.  
LI X X, CHANG Y. Preparation of new cement-based composites and effects of stress on its mechanical and thermoelectric properties [J]. *Bulletin of the Chinese Ceramic Society*, 2020, 9(5): 1478-1482. (in Chinese)
- [53] 魏剑, 薛飞, 王佳敏, 等. 低温循环荷载对碳纤维增强硫铝酸盐水泥基复合材料热电性能的影响研究[J]. *硅酸盐通报*, 2018, 37(11): 3503-3509, 3521.  
WEI J, XUE F, WANG J M, et al. Effect of low temperature cyclic loads on thermoelectric properties of carbon fiber reinforced sulphoaluminate cementitious composites[J]. *Bulletin of the Chinese Ceramic Society*, 2018, 37(11): 3503-3509, 3521. (in Chinese)
- [54] 唐宁. 导电沥青混凝土的导电特性与工程应用研究[D]. 武汉: 武汉理工大学, 2014.  
TANG N. study on conductive characteristic and application of conductive asphalt concrete[D]. Wuhan: Wuhan University of Technology, 2014. (in Chinese)
- [55] 李永琴. 导电沥青混凝土的桥面铺装开裂预警技术研究[J]. *公路*, 2021, 66(2): 40-44.  
LI Y Q. Research on crack warning technology of conductive asphalt concrete bridge deck pavement [J]. *Highway*, 2021, 66(2): 40-44. (in Chinese)