

DOI: 10.11835/j.issn.2096-6717.2023.032



开放科学(资源服务)标识码 OSID:



寒区导电混凝土研究现状与展望

路建国, 杨心莲, 蒲万丽, 万旭升, 王寅栋, 谭俐伶

(西南石油大学 土木工程与测绘学院, 成都 610500)

摘要:寒区道路、桥梁、水库大坝面板积雪结冰严重影响工程性能发挥,对工程安全运维产生较大影响。长期以来,大量使用除冰盐、融雪剂等除冰材料给环境造成较大污染。作为一种环保、高效融雪除冰技术,导电混凝土在保障工程安全、延长工程服役寿命、提升工程服务质量等方面发挥着重要作用。将导电混凝土用作寒冷地区房屋建筑材料,不仅兼具室内采暖功能,还能在一定程度上缓解能源紧张。综述常用导电混凝土的制备工艺,分析碳质类导电混凝土、金属类导电混凝土及复相导电混凝土的力-电-热性能,阐述导电材料对导电混凝土综合性能(包括导电性、抗冻性、耐久性)的影响机制。基于此,围绕高性能、低成本目标,提出寒区导电混凝土的研究构想:广泛使用回收碳纤维等回收材料,发展多相导电混凝土技术;将磁选粉煤灰、矿渣和硅灰等作为掺合料应用于导电混凝土中;开展低电压下导电混凝土的升温性能和导电性能研究;综合利用清洁能源(如太阳能、风能等)发电为导电混凝土提供电源;开展复杂工程环境下导电混凝土-岩土体-环境反馈机制研究。

关键词:寒区工程;导电混凝土;导电介质;掺合料;融雪除冰

中图分类号:TU528.59 **文献标志码:**A **文章编号:**2096-6717(2025)02-0162-12

Current status and prospects of research on conductive concrete in cold regions

LU Jianguo, YANG Xinlian, PU Wanli, WAN Xusheng, WANG Yindong, TAN Liling

(School of Civil Engineering and Geomatics, Southwest Petroleum University, Chengdu 610500, P. R. China)

Abstract: Snow and ice on roads, bridges and reservoir dam panels in cold regions seriously affect the performance of the project, and have a significant impact on the safe operation and maintenance of the project. The extensive use of de-icing materials, e. g., de-icing salt and snow melting agents, lead to serious environmental pollution. Conductive concrete, as an environmentally friendly and efficient snow/ice melting

收稿日期:2022-11-21

基金项目:国家自然科学基金(42101136);四川省自然科学基金(2022NSFSC0429);中国博士后科学基金(2021M692697);冻土工程国家重点实验室开放基金(SKLFSE202007);四川省科技计划项目(2021YFQ0021)

作者简介:路建国(1991-),男,副教授,主要从事寒区工程与多孔介质材料研究,E-mail:jianguog@swpu.edu.cn。

蒲万丽(通信作者),女,教授,E-mail:casper116@126.com。

Received: 2022-11-21

Foundation items: National Natural Science Foundation of China (No. 42101136); Natural Science Foundation of Sichuan Province (No. 2022NSFSC0429); China Postdoctoral Science Foundation (No. 2021M692697); Open Foundation of State Key Laboratory of Frozen Soil Engineering (No. SKLFSE202007); Sichuan Province Science and Technology Program (No. 2021YFQ0021)

Author brief: LU Jianguo (1991-), associate professor, mail research interests: cold region engineering and porous media materials, E-mail: jianguog@swpu.edu.cn.

PU Wanli (corresponding author), professor, E-mail: casper116@126.com.

technology, plays an important role in ensuring the safe operation and maintenance of engineering, extending the service life of the project, and improving the service quality of engineering. At the same time, the use of conductive concrete as building materials in cold areas has indoor heating function, which can alleviate the energy shortage to some extent. This paper reviews the preparation process of commonly-used conductive concrete, analyses the mechanical-electrical-thermal properties of some kinds of conductive concrete, e.g., carbonaceous conductive concrete, metallic conductive concrete and complex-phase conductive concrete, and then researches the influence of conductive materials on the mechanical performance of conductive concrete (e.g., conductivity, frost resistance, and durability). Based on the above analysis, the research concepts of conductive concrete in cold regions are proposed considering the goals of high performance and low cost: 1) Recycling materials, such as recycled carbon fiber, should be widely used to develop multiphase conductive concrete; 2) Magnetic separation fly ash, slag, and silica fume are extensively used as admixtures in conductive concrete; 3) Investigating the heating and conductivity performances of conductive concrete under the low charging voltage; 4) Utilizing comprehensive clean energy (e.g., solar energy, wind energy, etc.) to generate electricity for conductive concrete; 5) Exploring the conductive concrete-geotechnical-environment feedback mechanism under complicated engineering environment.

Keywords: cold region engineering; conductive concrete; conductive media; admixtures; snow and ice melting

导电混凝土是由胶凝材料、导电材料、骨料和水等组成,用导电材料部分或全部取代混凝土中的普通骨料,按照一定的配合比混合凝结而成的多相复合材料,具有预设的导电性能和一定的力学性能^[1]。

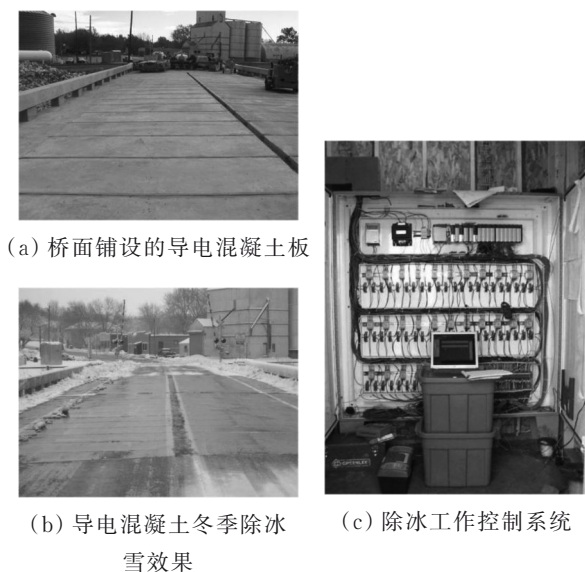
作为世界上第3冻土大国,中国的多年冻土和季节冻土面积约占国土总面积的75%^[2]。受恶劣环境影响,寒区工程基础设施的安全性和耐久性面临严峻挑战,冻害频发,机理复杂,如中国的新藏公路,路面经历着显著的季节性冻融循环,部分地区零星分布有岛状冻土、深季节冻土等^[3]。青海省共和—玉树高速公路横跨多个冻胀丘,冻胀丘下伏极厚的地下冰,对路基的稳定性形成潜在威胁^[4]。在公路融雪除冰方面,使用融雪剂和机械除冰雪是目前常用的方法,但存在环境污染和不能及时清除的弊端^[5]。使用导电混凝土电热融雪技术,兼具清洁、热源均匀稳定,对环境友好,后期运行、维护费用低等优点。近年来,以川藏铁路、共玉高速公路为代表的寒区铁路、公路建设快速发展。随着隧道工程建设向更高海拔和更高纬度地区推进,其面临的环境气候和工程地质条件也日益复杂^[6]。同时,中国水利水电工程建设重心也逐步向高寒高海拔地区转移,导电混凝土为坝体越冬层面温控问题提供了新的解决思路^[7]。此外,基于中国“三北”地区传统供暖方式存在的能源消耗大、环境污染重等问题,提出采用导电混凝土作为房屋建筑材料构建寒区生态供暖模式具有重要现实意义^[8]。基于此,笔者综述常用导电混凝土的制备工艺,阐述导电材料对

导电混凝土综合性能的影响机制等,在分析总结的基础上,提出寒区导电混凝土的研究构想,以期为寒区工程融雪除冰技术及房屋建筑室内采暖提供理论和技术支撑。

1 导电混凝土的应用领域

20世纪50年代末,前苏联掌握了以水玻璃和水泥作为基材的导电混凝土工艺,并广泛应用于电阻器、短路器和电腐蚀防护等领域^[9]。冬季路面撒盐除冰会造成混凝土的严重侵蚀,这激发了美欧等国科学家对混凝土电热性能的研究兴趣^[10]。2003年,美国内布拉斯加州(Nebraska)建造了利用导电混凝土进行融雪除冰的洛加马刺桥(Roca Spur桥),该桥铺装了约10 cm厚的导电混凝土镶嵌层(图1(a)),镶嵌层上装有温度和电流传感器,用于监测冬季暴风雪期间的加热性能,这是文献报道的导电混凝土技术在桥梁路面除冰工程中的首次应用^[11]。图1(b)、(c)分别为洛加马刺桥冬季除冰雪效果及除冰工作的控制系统。

通常,导电混凝土的导电机理:一方面,由分散在基体中的导电组分材料形成导电网络,通过隧道效应连接网络间的绝缘体传导;另一方面,通过水泥石传导^[13]。电导率是表征导电混凝土导电性能的直接参数,在干燥情况下传统混凝土的电导率为 $10^6 \sim 10^9 \Omega \cdot m$,潮湿状态下电导率为 $10^1 \sim 10^4 \Omega \cdot m$,属于电的不良导体^[10]。在传统混凝土中加入一定含量的导电材料,如碳纤维、石墨等,可以使混凝土具有导电性能。同时,为了改善导电混凝土的力学性能,可加入其他外加剂,如聚丙烯纤维、纳米材料

图 1 美国洛加马刺桥^[12]Fig. 1 Roca Spur Bridge (USA)^[12]

等,根据工程需要可配制出具有良好力学性能和优异电热性能的混凝土。此外,在实际工程中,还需兼顾导电混凝土的经济性、安全性及耐久性。在全球气候变化的背景下,第三极地区积雪变化为导电混凝土的发展带来了机遇和挑战,推动导电混凝土向多功能、智能化方向发展。导电混凝土可在复杂气候环境下的多类工程中得到应用,如寒区工程中的大坝面板除冰(图 2(a))、隧道衬砌防冻除冰(图 2(b))、机场跑道(或路面工程)融雪除冰(图 2(c))以及建筑室内采暖(图 2(d))等^[14]。

2 导电混凝土制备

近年来,导电混凝土的制备逐渐多样化,各种拌和工艺以及试验数据的测量方法也得到了长足

发展。如图 3 所示,导电混凝土的制备过程主要包括准备、制备和成型养护 3 个阶段。准备阶段主要包括准备原材料、设计配合比两项工作,其中,原材料种类和掺量的选择在导电混凝土的力-电性能上起着决定性作用。因此,为提高导电混凝土的力-电性能,必须掌握原材料的性质及功能,合理选择原材料并精准把控各种材料的掺量。特别地,跟普通混凝土相比,导电介质本身的性质和掺量对混凝土的强度影响较大,尤其是碳质类导电介质,由于自身强度较差,因此在混凝土中所占体积百分比对导电混凝土的强度起决定性作用^[15]。此外,外加剂的添加可以显著改善混凝土的化学性质,例如混凝土碳化性、抗冻性等^[16]。混凝土的配合比设计主要包括水灰比、砂率、单位用水量 3 个基本参数。在制备阶段,需要确定投料顺序,并因材施教确定制备工艺。最后,在一定的温度、湿度条件下进行成型养护,根据得出的试验数据(如电阻率等)对导电混凝土主要力-电性能进行分析,优化导电混凝土配合比设计。

混凝土导电介质的掺量、形态和分散程度、集料和掺合料的掺量、水灰比、龄期、养护制度、含水量以及环境温湿度等因素显著影响导电混凝土的力学性能、导电性能和电阻率的稳定性^[17]。目前对导电混凝土的研究很难同时满足力学性能和导电性能的要求,而且造价普遍较高,这也是限制导电混凝土技术在实际工程中应用的关键瓶颈之一。

2.1 导电介质

用于导电混凝土的导电介质应具有良好的导电性、足够的力学强度和温度稳定性,且不与胶凝材料发生化学反应。目前,对导电混凝土的研究更

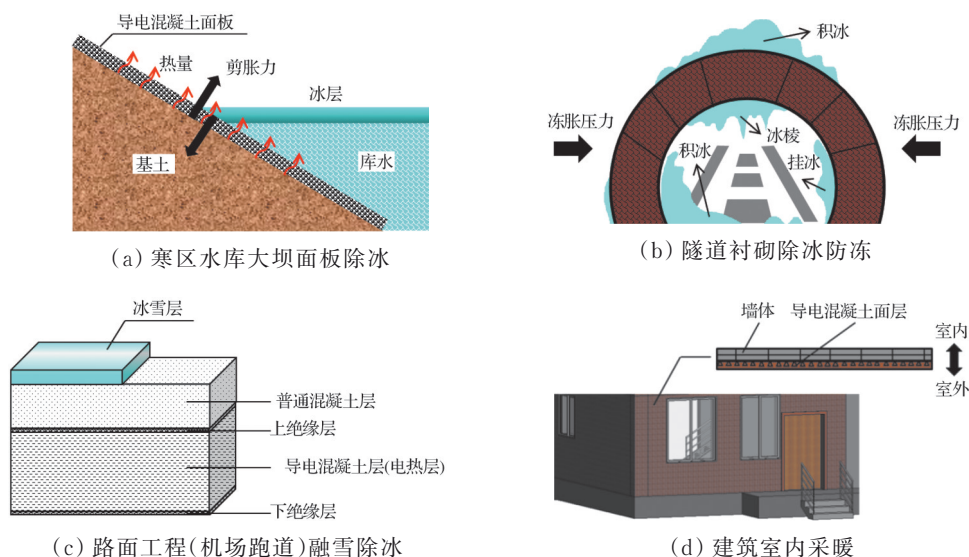


图 2 寒区导电混凝土的应用

Fig. 2 Applications of conductive concrete in cold regions

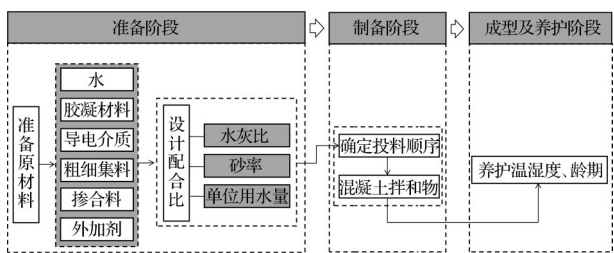


图 3 导电混凝土制备流程图

Fig. 3 Flow chart of conductive concrete preparation

多地聚焦在材料层面,侧重于导电介质的种类和掺量对其力-电-热性能的影响^[7]。为了平衡导电混凝土的各项性能,使其经济效益更佳,需要根据导电混凝土的具体应用综合考量,合理选择导电介质。目前常用的导电介质主要有碳纤维、钢纤维、石墨、炭黑、钢渣等,如图 4 所示。

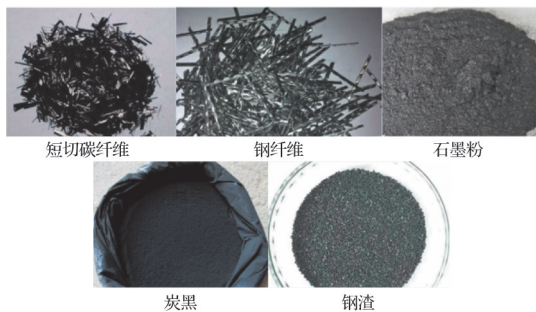


图 4 常用导电介质

Fig. 4 Widely-used conductive media

制备纤维类导电混凝土的关键是如何让纤维均匀分散到水泥浆体中。根据搅拌时纤维和水泥的投料顺序,纤维导电混凝土的制备工艺主要分为 3 种,见表 1,即半干拌法、干拌法和湿拌法。Liu 等^[18]在研究不同长度碳纤维对导电混凝土性能的影响中得出,当纤维体积比为 0.75% 时,纤维长度增加会略微降低导电混凝土的工作性能。Sassani 等^[19]认为,混凝土中碳纤维体积含量在 0.5%~0.75% 左右时,电阻率达到渗透阈值。也有学者认为,当碳纤维体积含量在 1.5%~2% 时,电阻率达到渗透阈值^[20]。在达到渗透阈值前,混凝土电阻率随着碳纤维掺量的增加而降低,但目前关于碳纤维导电混凝土渗透阈值的研究还没有统一定论。Faneca 等^[21]研究了几种不同类型的 PAN 基回收碳纤维发现,湿拌法比干拌法更有利于碳纤维的分

表 1 纤维类导电介质分散工艺^[22]

Table 1 Dispersion procedure of fiber-based conductive media^[22]

分散工艺	投料顺序
半干拌法(后掺法)	I 水泥+水搅拌,Ⅱ加入纤维搅拌
干拌法(同掺法)	I 纤维+水泥干拌,Ⅱ加入水搅拌
湿拌法(先掺法)	I 纤维+水搅拌,Ⅱ加入水泥搅拌

散,如图 5 所示。张丽琼^[22]在试验中发现,采用半干拌法(图 6)制备的碳纤维导电混凝土试样的导电性能仅次于湿拌法,干拌法制备的试样导电性能最差。史延田等^[23]研究发现,掺加 5% 和 10% 石墨的导电混凝土养护 28 d 时抗压强度降低了约 50% 和 77%,电阻率分别为未加石墨混凝土的 1/1 000 和 1/5 000,这主要是因为加入不同掺量的石墨会不同程度地降低导电混凝土的抗压强度。因此,石墨掺量大而导致混凝土抗压强度降低的问题必须解决。李滨等^[24]研发了一种新型炭黑轻集料混凝土,并对其力-电性能展开研究得出,当炭黑的体积掺量为 1.94% 时,混凝土抗压强度达到 34~38 MPa,电阻率为 82.6~100 $\Omega \cdot \text{cm}$,认为该材料可用于道路融雪除冰。Santillán 等^[25]在混凝土中加入黑色钢渣(钢铁生产中产生的废物)来替代骨料,试验结果表明,混凝土导电能力提高了近 70%,抗压强度提高了 14%。但在实际应用这种材料时必须考虑其重量,因为钢渣的比重会对工程结构的性能产生影响。

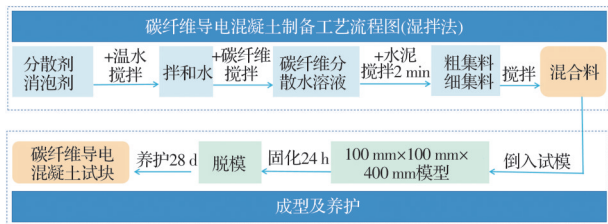


图 5 湿拌法制备碳纤维导电混凝土工艺流程图

Fig. 5 Flow chart of preparing carbon fiber conductive concrete by wet mixed method

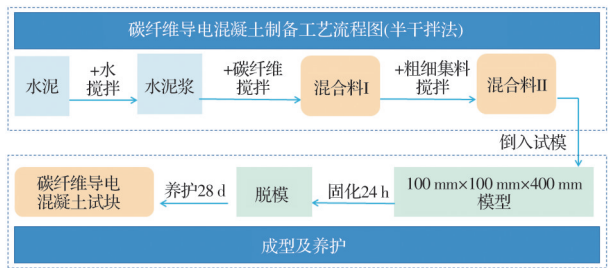


图 6 半干拌法制备碳纤维导电混凝土工艺流程图

Fig. 6 Flow chart of preparing carbon fiber conductive concrete by semi-dry mixed method

由于力学性能的缺陷和造价较高等原因,单一导电相混凝土的应用受到限制,为了解决这一问题并进一步提高导电混凝土的力学及导电性能,研究人员又进行了多相导电混凝土的研究。多相导电混凝土就是将两种及以上不同导电介质掺入混凝土中制成的导电混凝土,通过协同或互补提高导电混凝土的综合性能。叶嘉诚等^[26]通过对比拌和工艺,提出了三相导电混凝土的最佳拌和工艺:碳纤维和石墨采用半干拌法,钢纤维采用干拌法。卜胤

等^[27]探究了碳纤维-石墨-钢纤维三相复合导电混凝土的除冰雪性能,发现碳纤维对混凝土导电性影响最大,三者复合最佳掺量分别为 0.5%、3% 和 0.6%。卢召红等^[28]研究了碳纤维-钢渣导电混凝土强度及导电性发现,钢渣的掺入可有效降低碳纤维的使用量而不影响导电能力,从而降低导电混凝土的生产成本。Adari 等^[29]研究发现,石墨粉-钢纤维导电混凝土中,两者复合的最佳掺量分别为 5% 和 2%,此时导电混凝土的电热性能最好且机械性能不受影响。卢珍等^[30]研究发现,炭黑-碳纤维导电混凝土电阻率随着温度的升高逐渐减小,呈现明显的电阻负温度系数效应。目前,钢纤维主要与石墨复掺共同应用于导电混凝土。在对石墨-钢纤维导电混凝土的电热性能的研究中,Wu 等^[31]采用 48、60、110、220 V 四个测试电压水平进行电-热测试得出,加入 2% 钢纤维和 10% 石墨的混凝土电-热性能最佳。但由于试验主要目的在于研究不同石墨含量对混凝土性能的影响,故对钢纤维的含量没有做过多讨论。针对掺入一定量钢纤维-石墨的导电混凝土薄板,罗宝等^[32]探讨了不同的搅拌方法,认为干拌法更有利于钢纤维-石墨的均匀分布,如图 7 所示。

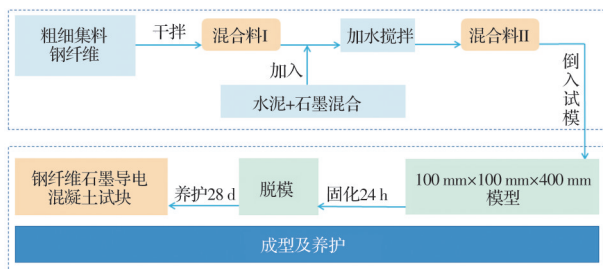


图 7 干拌法制备钢纤维-石墨导电混凝土工艺流程图

Fig. 7 Flow chart of preparing steel fiber-graphite conductive concrete by dry mixed method

2.2 掺合料

在导电混凝土中掺加适量的掺合料有助于改善导电混凝土的力学和电学性能,同时可提高混凝土的耐久性,部分种类掺合料的加入还可减少导电介质掺量,从而降低制备成本。掺合料是一种粉状矿物质,可分为活性掺合料和非活性掺合料两大类。活性掺合料主要有粒化高炉矿渣、火山灰质混合材料、粉煤灰等(图 8)。非活性掺合料在水泥中主要起填充作用,而不会损伤水泥性能,通常由石英砂、石灰岩等粉磨制备而成。

粉煤灰掺量需达到水泥质量的 30% 以上才能发挥作用,但其掺量过大会导致碳纤维导电混凝土的导电性和力学性能下降^[33]。因此,粉煤灰作为掺合料用于改善导电混凝土性能存在局限性。贾兴



图 8 常用活性掺合料

Fig. 8 Widely-used active admixtures

文等^[33]通过研究发现,制备碳纤维混凝土宜采用铁氧化物含量在 30%~36% 的磁选粉煤灰,其可降低混凝土中 20%~30% 的碳纤维掺量,有效降低制备成本。关于导电混凝土中硅灰的掺量,众多学者通过试验得到不同的最佳掺量,Farhad 等^[34]认为硅灰掺量以 13% 为佳,张丽琼^[22]则采用 15% 的硅灰掺量,而侯作富等^[35]研究认为内掺 20% 的硅灰效果更好。Xu 等^[36]研究发现,采用硅烷处理的碳纤维和硅灰,水泥膏体的抗拉强度比直接使用碳纤维和硅灰的水泥膏体提高了 56%,模量和延性提高了 39%,给碳纤维导电混凝土的进一步研究提供了启示。张苡铭等^[37]在钢纤维导电混凝土中掺入石墨烯复合材料,在一定程度上弥补了低掺量钢纤维在纤维搭接程度上的不足。

目前导电混凝土的电阻率稳定性、温度稳定性等问题尚未得到较为科学有效的解决,高昂的制备成本以及投入运行过程中大量的能耗也是导电混凝土仍未规模化应用的重要原因之一。同时,对导电混凝土导电介质和掺合料方面的研究正方兴未艾,无论是导电介质和掺合料的掺量、投料顺序,还是搅拌时间、搅拌方式等都没有统一的结论,亟待进一步研究。

3 导电混凝土的分类

导电混凝土中导电材料主要分为碳质类、金属类和聚合物类 3 种,目前研究较多的有碳质类和金属类导电材料^[17],其主要性能如表 2 和表 3 所示。可以看出,碳质类导电材料中碳纤维导电性最好,掺量少,但成本较高,且在混凝土中不易分散;炭黑和石墨价格便宜,但掺量过大时会导致混凝土强度降低;碳纳米材料同样也存在价格高等问题(表 2)。金属类导电材料导电性普遍较好,但存在易氧化、易钝化等问题,且银粉等贵金属价格普遍昂贵,不宜大范围使用(表 3)。复相导电混凝土可以有效解决单相导电混凝土存在的价格、强度、电阻率等方面的问题,给发展环境友好型与资源节约型导电混凝土技术提供了新的思路。

表 2 碳质类导电材料的主要性能

Table 2 Main properties of carbonaceous conductive materials

分类	导电材料	导电性能	价格	其他性能
碳纤维	聚丙烯腈(PAN)基	导电性良好,是沥青基碳纤维的 7 倍多 ^[22]	成本较高,是沥青基碳纤维的 5~10 倍 ^[20]	成品品质优异,工艺较简单,强度高、模量高、应用广泛 ^[38]
	沥青基	比 PAN 基碳纤维导电性差	成本较低	原料来源丰富,但制备工艺复杂,模量高但强度低,产品性能较低 ^[38]
	镀金属碳纤维	比普通碳纤维导电性好	成本较高	比普通碳纤维易分散 ^[17]
炭黑	乙炔炭黑	导电性好	价格低廉	加工难、掺量较大,但纯度高、性价比较高 ^[39]
石墨	天然石墨	导电性因产地而异	价格低廉	易获取、具有良好的化学惰性,但难粉碎、掺量较大 ^[39]
	人造石墨	导电性因加工方法而异	价格低廉	电阻率取决于纯度,掺量较大 ^[39]
碳纳米材料	碳纳米管	导电性良好	价格昂贵	分散极为困难,在搅拌过程中易折断 ^[17]
	纳米炭黑	导电性良好	价格较碳纳米管稍低	比表面积大,界面性能优,制备工艺复杂 ^[40]

表 3 金属类导电材料主要性能

Table 3 Main properties of metal-based conductive materials

分类	导电材料	导电性能	价格	其他性能
金属粉	银粉	导电性良好	价格昂贵	易氧化变质 ^[17]
	铁粉	导电性良好	成本低	易氧化,导致导电性能严重衰减 ^[17]
	纳米铜粉	导电性良好	成本高	易氧化 ^[17]
金属氧化物	TiO ₂ 、Fe ₃ O ₄	纯氧化物导电性相对较差 ^[17]	成本高	制备方法较为复杂 ^[17]
金属箔	铝箔	导电性好	成本高	色彩鲜艳、易氧化 ^[17]
金属纤维	不锈钢纤维、镀铜钢纤维	导电性好	价格高	在水泥基体中存在钝化问题,长期导电性能下降 ^[39]

3.1 碳纤维导电混凝土

碳纤维导电混凝土是在混凝土中掺入一定含量的碳纤维而制成的一种水泥基复合材料^[41]。作为一种高性能的碳质纤维材料,碳纤维具有良好的导电性、导热性,具备耐高温、耐腐蚀、抗氧化等性能。作为导电相材料,相比石墨、钢纤维、炭黑等,碳纤维有显著优势,有广阔的应用空间^[42],但由于碳纤维本身具备疏水性,在水泥浆体中不易分散,且成本较高,在应用上也存在一定局限。

Sassani 等^[19]研究了在加热路面系统中应用碳纤维导电混凝土替代传统路面除冰雪方法的可行性,通过有限元模型分析计算了导电混凝土路面的温度分布(图 9),发现在导电混凝土层和普通混凝土层之间存在热通量。Chen 等^[43]研究表明,碳纤维导电混凝土在被破坏时会引起纤维网络的变化,导致混凝土电阻增加。但该研究只表明了阻力的相对变化与负荷之间有很好的关联性,没有明确提出电阻和载荷的函数关系。Reza 等^[44]将电阻技术从金属断裂力学分析应用于混凝土内部损伤研究,发现导电混凝土电阻的变化对无牵引裂纹的拓展有响应,且碳纤维导电混凝土的电阻变化与变形密切相关。Wang 等^[45]基于碳纳米纤维混凝土导电性试验发现,碳纳米纤维的最佳掺量在 0.1% 到 0.3% 之间。目前,对碳纤维和碳纳米纤维导电混凝土的电导率研究大多是独立的。Wang 等^[46]比较研究了

两种复合材料的导电性能发现,当碳纤维和碳纳米纤维的含量相同时,碳纤维导电混凝土的电阻率比碳纳米纤维导电混凝土小。但该研究没有考虑耐久性、经济性等因素。

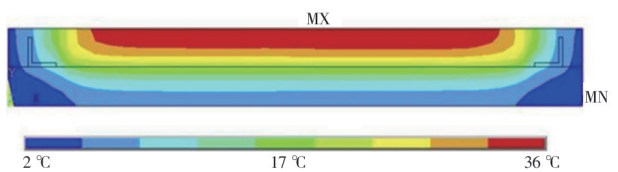


图 9 碳纤维导电混凝土加热路面系统温度分布^[19]

Fig. 9 Temperature distribution of pavement system heated by carbon fiber conductive concrete^[19]

碳纤维是制备路面除冰用导电混凝土的一种理想导电组分,但昂贵的价格限制了其应用。回收碳纤维的成本低于建筑用碳纤维,与原始碳纤维相比,节省成本 30%~40%^[47]。基于经济性考虑,研究人员将目光转向回收碳纤维,致力于降低碳纤维导电混凝土的制备成本。Faneca 等^[48]通过试验论证了利用回收碳纤维开发导电混凝土的可行性。王艳等^[49]发现回收碳纤维掺量为 0.4%~1.5% 时可获得良好、稳定导电性的混凝土,且导电性能几乎不受龄期、含水率的影响。杨久俊等^[50]研究了碳纤维梯度分布对水泥基材料热-电性能的影响发现,不发热区碳纤维的存在改变了体系的导热机制,从而显著节约了碳纤维的用量,并缓解了发热区与不发热区的温差应力,提高了材料生命周期,但该研究没

有提出一个完整的碳纤维梯度分布体系。海然^[51]研究发现,相对于相同纤维含量的均匀试件,梯度试件抗折强度提高了16.1%~40.3%;相对于相同纤维含量的层状试件,抗折强度提高了2.7%~6.2%。此外,梯度试件的导电率是均匀试件的3~29倍,层状试件的1.4~2.0倍。

3.2 钢纤维导电混凝土

钢纤维混凝土是在普通混凝土中掺配一定数量短而细的钢纤维所组成的一种性能优良的新型高强复合材料,由于钢纤维具有限制外力作用下水泥基料中裂缝扩展的能力,不仅使混凝土的抗拉、抗弯、抗剪强度等较普通混凝土显著提高,其抗冲击、抗疲劳、裂后韧性和耐久性也有较大改善^[52]。同时钢纤维还具有良好的导电性,在混凝土中掺入一定含量的钢纤维,可以有效增强混凝土的导电性能^[53]。因此,钢纤维混凝土在建筑、公路路面、桥梁、隧道等工程中得到广泛应用。但在施工过程中,由于钢纤维密度过高,振捣浇筑时往往沉在混凝土下部,不能均匀分布。在使用过程中钢纤维容易钝化,会导致电阻出现较大程度增加,不利于导电混凝土的耐久性。同时,在制造方面,大量的钢材损耗也会增加混凝土成本。

赵若红等^[54]通过对导电混凝土材料表面进行FESEM与EDS分析得出,随着钢纤维掺量的增加,钢纤维混凝土的抗压强度先升高后降低,在3%掺量时达到最高。但当钢纤维掺量达到4%时,开始出现纤维缠绕与聚团现象,钢纤维与混凝土的粘结变差。朱泽远等^[55]采用2.5%(占骨料和掺合料总量)掺量的钢纤维试件做融雪试验,所做沥青混凝土试件的电阻率为 $4.4\ \Omega\cdot\text{m}$,接通30.8 V电压的发热功率为 $269.5\ \text{W}/\text{m}^2$,约2 h即可融化1 cm厚的积雪。Bai等^[56]研究双层不锈钢纤维用于导电混凝土融雪除冰,通过试验指出,在 $-20\ ^\circ\text{C}$ 环境温度下输入功率为 $6.69\ \text{W}/\text{m}^2$,可使双层不锈钢纤维导电混凝土在100 min内融化6 mm厚的冰层。

3.3 石墨导电混凝土

石墨是一种具有高导电性和导热性的无机材料,容易获取且价格低廉,具备良好的化学惰性,与绝大多数酸、碱、盐都不会发生反应,不溶于有机或无机溶剂,具有良好的抗氧化性能^[57]。加入石墨后,混凝土导电性能显著改善,但混凝土的抗压强度随着石墨掺量的增加急剧降低,混凝土的和易性也受到影响^[23]。因此,虽然石墨价格低、来源广,但其应用场景十分有限,只适用于对混凝土强度要求不高的领域。

有学者尝试利用石墨导电混凝土制作室内采

暖地面,试验结果表明,随着石墨掺量的增加,导电混凝土的电阻降低^[58]。Liu等^[59]通过研究发现,石墨导电混凝土的电阻率随石墨粉的细度和掺量的增加而降低;同时,随着石墨粉的掺入,导电混凝土的强度下降。但试验中只采用了两种细度的石墨粉,石墨粉细度对混凝土电阻率的影响还需进一步验证。李仁福等^[60]研究石墨导电混凝土的导电性和石墨含量之间的关系发现,石墨掺量大于20%时,混凝土具有良好的导电性。El-Dieb等^[61]探究几种不同导电填料作为细骨料的部分替代物对混凝土的力-电性能、耐久性能的影响发现,在所有研究的混合设计中,使用体积比为7%的石墨替代骨料的混凝土具有最佳性能。黄永辉等^[62]将石墨烯作为导电相材料,发明了一种新型石墨导电混凝土,该混凝土比普通石墨导电混凝土力学强度更高,电阻率更稳定,耐久性更好。刘裕等^[63]发明了一种增强型石墨烯导电透水混凝土,该混凝土可有效提高普通透水混凝土强度,降低电阻率并延长使用年限,可用于北方道路除雪除冰。

3.4 复相导电混凝土

受材料性质的局限,单一导电相导电混凝土或多或少存在一些缺陷,而复掺两种或多种导电相材料可同时发挥几种材料的特性,起到相互补偿、相互促进的作用,更容易得到性能、成本等各方面都优异的导电混凝土。

吴献等^[64]在对比研究单掺炭黑和复掺碳纤维、炭黑导电介质的导电混凝土电-热性能中发现,复掺碳纤维和炭黑两种材料可以有效结合碳纤维导电纤维长径比大和炭黑颗粒短程导电的特点,大幅度降低导电混凝土的电阻率,可满足融雪化冰导电混凝土电阻率的要求。李红英等^[65]通过试验研究得出,将纤维类和颗粒类导电相材料复掺,可以发挥导电材料功能和尺度的互补特性,充分发挥导电材料的导电功能,同时又具有良好的力学性能。饶瑞等^[66]研究冻融循环对钢纤维-石墨复掺导电混凝土性能的影响得出,300次冻融循环后混凝土试块的质量损失率在3%左右,平均抗压强度降低了23.7%,钢纤维石墨导电混凝土的抗冻融能力优于素混凝土。张阳等^[67]进行导电混凝土试验发现,经过不同的冻融循环次数,钢纤维-石墨导电混凝土的电流呈3个典型阶段:缓慢增长阶段、快速增长阶段、稳定阶段;冻融循环使钢纤维-石墨混凝土电阻率增大,在相同电压下的发热功率降低。钢纤维-石墨导电混凝土导电机理如图10所示。Kim等^[69]研究发现,复掺碳纳米管和碳纤维水泥基复合材料比单掺碳纳米管导电率更稳定,但该研究没有提出两

相导电介质的最佳配合比。Fulham-Lebrasseur等^[70]结合几种不同导电介质研究导电混凝土混合设计得出,混合石墨粉、碳纤维、钢纤维和石墨烯掺加体积分数分别为6%、0.4%、1.2%、0.25%时可以在强度和电阻率之间取得最佳折中,此时电阻率为 $890\ \Omega\cdot\text{m}$,抗压强度为56.9 MPa。钱兴等^[71]在低电压(人体安全电压)下对钢纤维石墨导电混凝土进行升温试验发现,混掺钢纤维、石墨两种材料比单掺组分导电混凝土升温性能好,其中掺加质量分数为2%钢纤维和1.67%石墨的导电混凝土升温性能最优,且抗压强度满足设计要求。该研究为复杂工程环境下导电混凝土的安全应用提供了理论支撑。

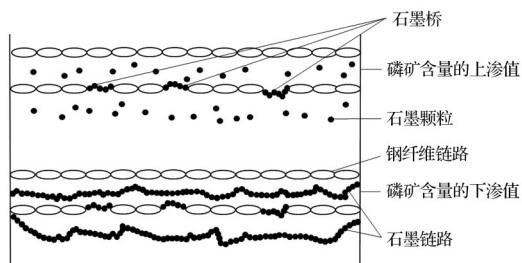


图10 钢纤维-石墨导电混凝土导电机理简图^[68]

Fig. 10 Schematic diagram of the conductive mechanism of steel fiber-graphite concrete^[68]

4 结论与展望

利用导电混凝土的电热效应解决寒区工程融雪除冰和防止混凝土冰冻害问题是确保寒区工程安全运维的重要技术之一。主要阐述了导电混凝土的几种常见制备工艺以及不同导电材料、配合比和不同掺合料作用下导电混凝土的力-电-热效应;分析总结了各种导电混凝土的主要性能及研究现状。目前,对碳质类、金属类导电混凝土导电性和强度的研究已经取得了一定成果,主要集中于复杂工程环境下的抗冻融及耐久性。尽管对于导电混凝土的研究已经有了一些成果和进展,但导电混凝土的制备及运行成本高、使用安全性等问题并没有得到根本解决。鉴于此,就未来寒区导电混凝土的发展提出如下展望,以图进一步降低导电混凝土的制备及运行成本。在低电压下开展导电性能研究,保证低能耗的同时也保证了实际运行时的安全性问题。

1)广泛使用回收碳纤维等回收利用材料,实现资源的变废为宝,并进一步发挥导电材料功能和尺度的互补特性,发展多相导电混凝土技术。综合材料性质及功能,将磁选粉煤灰、矿渣和硅灰等材料有机应用于导电混凝土中,进一步提高导电混凝土

的导电性能,降低制备成本。

2)开展低电压下导电混凝土的升温性能和导电性能研究。现有导电混凝土的试验研究大多采用的是高电压,不仅耗能高,而且在使用中难以保证安全性。因此,还需进一步探究如何在低电压下保证导电混凝土的升温性能和强度等。

3)综合利用当地太阳能、风能等清洁能源为导电混凝土提供电源,以降低导电混凝土融雪除冰的运行成本,并将理论与实际结合,进行实际工程的验证与优化,为后续大范围工程应用提供技术支撑。

4)综合考虑导电混凝土技术性能、经济环保、安全性、耐久性等客观因素,开展复杂工程环境下导电混凝土导电性及力学性能的研究。现有对导电混凝土的研究大多局限于室内的小板试验和室外单一大板的融雪化冰试验,缺乏实际工程的试验研究,对实际环境因素的模拟还比较单一。

参考文献

- [1] 崔素萍,刘永肖,兰名章,等.导电混凝土研究现状及发展前景[C]//华北地区硅酸盐学会第八届学术技术交流会,2005.
CUI S P, LIU Y X, LAN M Z, et al. Research status and development prospect of conductive concrete [C]// The 8th Academic and Technical Exchange Meeting of Silicate Society in North China, 2005. (in Chinese)
- [2] 刘骏宽,路建国,高佳佳,等.水工混凝土冰冻害机理及抗冻性能研究进展[J].长江科学院院报,2023,40(3):158-165.
LIU J N, LU J G, GAO J J, et al. Research and development of freezing damage mechanism and frost resistance of hydraulic concrete [J]. Journal of Yangtze River Scientific Research Institute, 2023, 40(3): 158-165. (in Chinese)
- [3] 柴明堂,马腾,李国玉,等.新藏公路路面病害空间分布及相互关系分析[J].冰川冻土,2022,44(6):1681-1693.
CHAI M T, MA T, LI G Y, et al. Spatial distribution and correlation analysis of pavement diseases in Xinjiang-Tibet highway [J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 2022, 44(6): 1681-1693. (in Chinese)
- [4] 吴吉春,盛煜.共和-玉树高速公路多格草段冻胀丘与公路路基的相互影响[J].冰川冻土,2021,43(2):453-462.
WU J C, SHENG Y. Interaction effect of frost mounds and embankment in section Duogerong Basin along Gonghe-Yushu Highway [J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 2021, 43(2): 453-462. (in Chinese)
- [5] 喻文兵,李双洋,冯文杰,等.道路融雪除冰技术现状

- 与发展趋势分析[J]. 冰川冻土, 2011, 33(4): 933-940.
- YU W B, LI S Y, FENG W J, et al. Snow and ice melting techniques of pavement: state of the art and development tendency [J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 2011, 33(4): 933-940. (in Chinese)
- [6] 庞小冲, 朱小明, 穆彦虎, 等. 寒区隧道保温设防长度工程实践与研究进展综述[J]. 冰川冻土, 2022, 44(3): 998-1010.
- PANG X C, ZHU X M, MU Y H, et al. Review on engineering practice and research progress on thermal insulation length of tunnels in cold regions [J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 2022, 44(3): 998-1010. (in Chinese)
- [7] 张梦溪, 李明超, 张津瑞, 等. 碾压式导电混凝土电热试验与供电模式分析[J]. 水利学报, 2021, 52(1): 103-110, 119.
- ZHANG M X, LI M C, ZHANG J R, et al. Experimental study on the electro-thermal performance of ERCC and its power supply mode analysis [J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2021, 52(1): 103-110, 119. (in Chinese)
- [8] 邓斐. 基于电热性能的导电混凝土制备研究[D]. 重庆: 重庆交通大学, 2016.
- DENG F. Study on preparation of conductive concrete based on electrothermal properties [D]. Chongqing: Chongqing Jiaotong University, 2016. (in Chinese)
- [9] 朱珊, 刘镒, 王吉迎. 导电混凝土的发展历程、种类与前景综述[J]. 建筑结构, 2022, 52(Sup1): 1633-1637.
- ZHU S, LIU Q, WANG J Y. A review of the development history, types and prospects of conductive concrete [J]. Building Structure, 2022, 52(Sup1): 1633-1637. (in Chinese)
- [10] 谭源福. 导电混凝土的研究综述[J]. 科技创新与应用, 2017(17): 68.
- TAN Y F. Review of research on conductive concrete [J]. Technology Innovation and Application, 2017(17): 68. (in Chinese)
- [11] TUAN C Y, YEHIA S. Evaluation of electrically conductive concrete containing carbon products for deicing [J]. ACI Materials Journal, 2004, 101(4): 287-293.
- [12] TUAN C. Roca spur bridge: the implementation of an innovative deicing technology [J]. Journal of Cold Regions Engineering, 2008, 22(1): 1-15.
- [13] 唐祖全, 钱觉时, 杨再富. 导电混凝土研究进展[J]. 重庆建筑大学学报, 2006, 28(6): 135-139.
- TANG Z Q, QIAN J S, YANG Z F. Research progress of electrically conductive concrete [J]. Journal of Chongqing Jianzhu University, 2006, 28(6): 135-139. (in Chinese)
- [14] 缪小平, 瞿冬毅, 范良凯. 碳纤维导电混凝土在机场道面的应用研究[J]. 混凝土与水泥制品, 2008(4): 41-45.
- MIAO X P, ZI D Y, FAN L K. Study on application of carbon fiber conductive concrete in airport pavement [J]. China Concrete and Cement Products, 2008(4): 41-45. (in Chinese)
- [15] 彭景元. 导电混凝土研究[J]. 建材与装饰, 2018(30): 63.
- PENG J Y. Study on conductive concrete [J]. Construction Materials & Decoration, 2018(30): 63. (in Chinese)
- [16] 朱法松. 外加剂和掺和料对水泥混凝土性能影响分析[J]. 江西建材, 2019(5): 23, 25.
- ZHU F S. Analysis of the influence of admixtures and admixtures on the performance of cement concrete [J]. Jiangxi Building Materials, 2019(5): 23, 25. (in Chinese)
- [17] 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 Review, 2017, 31(21): 90-97. (in Chinese)
- [18] LIU S H, GE Y C, WU M Q, et al. Properties and road engineering application of carbon fiber modified-electrically conductive concrete [J]. Structural Concrete, 2021, 22(1): 410-421.
- [19] SASSANI A, ARABZADEH A, CEYLAN H, et al. Carbon fiber-based electrically conductive concrete for salt-free deicing of pavements [J]. Journal of Cleaner Production, 2018, 203: 799-809.
- [20] 侯作富, 李卓球, 唐祖全. 融雪化冰用碳纤维混凝土的导电性能研究[J]. 武汉理工大学学报, 2002, 24(8): 32-34, 66.
- HOU Z F, LI Z Q, TANG Z Q. Study on electrical properties of carbon fiber electrically conductive concrete for deicing or snow-melting [J]. Journal of Wuhan University of Technology, 2002, 24(8): 32-34, 66. (in Chinese)
- [21] FANEC A G, SEGURA I, TORRENTS J M, et al. Development of conductive cementitious materials using recycled carbon fibres [J]. Cement and Concrete Composites, 2018, 92: 135-144.
- [22] 张丽琼. 碳纤维智能导电混凝土电热效应的研究[D]. 南京: 南京理工大学, 2007.
- ZHANG L Q. Study on electrothermal effect of intelligent carbon fiber conductive concrete [D]. Nanjing: Nanjing University of Science and Technology, 2007. (in Chinese)
- [23] 史延田, 张俊才, 廉璟坤. 石墨导电混凝土的制备与性能[J]. 黑龙江科技大学学报, 2014, 24(5): 503-506.
- SHI Y T, ZHANG J C, LIAN J K. Preparation and properties of graphite conductive concrete [J]. Journal of Heilongjiang University of Science and Technology, 2014, 24(5): 503-506. (in Chinese)
- [24] 李滨, 孙明清, 陈龙. 用于融冰化雪的炭黑轻集料导电

- 混凝土的配制和性能[J]. 混凝土, 2010(2): 121-123, 129.
- LI B, SUN M Q, CHEN L. Preparation and properties of lightweight aggregate concrete containing carbon black [J]. Concrete, 2010(2): 121-123, 129. (in Chinese)
- [25] SANTILLÁN N, SPERANZA S, TORRENTS J M, et al. Evaluation of conductive concrete made with steel slag aggregates [J]. Construction and Building Materials, 2022, 360: 129515.
- [26] 叶嘉诚, 刘宇彬, 齐曾清, 等. 三相导电混凝土拌和工艺及配合比试验研究[J]. 新型建筑材料, 2019, 46(3): 13-17, 35.
- YE J C, LIU Y B, QI Z Q, et al. Experimental study on mixing process and mix proportion of three-phase electrically conductive concrete [J]. New Building Materials, 2019, 46(3): 13-17, 35. (in Chinese)
- [27] 卜胤, 丁伟锐. 三相复合导电混凝土除冰雪性能研究[J]. 交通科技, 2017(6): 13-15.
- BU Y, DING W R. The research on deicing and snow melting properties for three-phase composite conductive concrete [J]. Transportation Science & Technology, 2017(6): 13-15. (in Chinese)
- [28] 卢召红, 张云峰. 碳纤维钢渣混凝土强度及导电性能研究[J]. 科学技术与工程, 2009, 9(9): 2510-2512.
- LU Z H, ZHANG Y F. Study on the compressive strength and electrical conductivity of carbon fiber-slag concrete [J]. Science Technology and Engineering, 2009, 9(9): 2510-2512. (in Chinese)
- [29] ADARI S K, URMILA P, BHARATHI K P P. Thermal properties of conductive concrete using graphite powder and steel fibers [J]. Journal of Building Pathology and Rehabilitation, 2023, 8(1): 9.
- [30] 卢珍, 吴献, 杨昆. 炭黑碳纤维复相导电混凝土的导电性能研究[J]. 混凝土, 2014(11): 81-83, 86.
- LU Z, WU X, YANG K. Study on the electric conduction function of carbon black and carbon fiber diphasic electrically conductive concrete [J]. Concrete, 2014(11): 81-83, 86. (in Chinese)
- [31] WU T, HUANG R, CHI M, et al. A study on electrical and thermal properties of conductive concrete [J]. Computers and Concrete, 2013, 12(3): 337-349.
- [32] 罗宝, 赵若红, 袁迪, 等. 不同施工工艺对碳纤维-石墨导电混凝土薄板电阻率的影响[J]. 新型建筑材料, 2017, 44(8): 123-126.
- LUO B, ZHAO R H, YUAN D, et al. Effect of different construction technology on resistivity of steel fiber-graphite conductive concrete sheet [J]. New Building Materials, 2017, 44(8): 123-126. (in Chinese)
- [33] 贾兴文, 吴洲, 马英, 等. 磁选粉煤灰对CFRC压敏性的影响[J]. 功能材料, 2013, 44(15): 2166-2169.
- JIA X W, WU Z, MA Y, et al. Effect of magnetic separation fly ash on the compression sensitivity of CFRC [J]. Journal of Functional Materials, 2013, 44(15): 2166-2169. (in Chinese)
- [34] FARHAD R, GORDON B B, JERRY A Y. Volume electrical resistivity of carbon fiber cement composites [J]. ACI Materials Journal, 2001, 98(1): 25-35.
- [35] 侯作富, 李卓球, 胡胜良. 硅灰对碳纤维导电混凝土电阻率和强度的影响[J]. 混凝土, 2003(2): 26-28.
- HOU Z F, LI Z Q, HU S L. Influence of silica fume on properties of carbon fiber electrically conductive concrete [J]. Concrete, 2003(2): 26-28. (in Chinese)
- [36] XU Y S, CHUNG D D L. Carbon fiber reinforced cement improved by using silane-treated carbon fibers [J]. Cement and Concrete Research, 1999, 29(5): 773-776.
- [37] 张苡铭, 俞乐华. 碳纤维-石墨烯导电混凝土受弯过程的力-电效应试验研究[J]. 混凝土, 2016(2): 52-55, 59.
- ZHANG Y M, YU L H. Mechano-electric effect of steel fiber and graphene reinforced conductive concrete during flexural process [J]. Concrete, 2016(2): 52-55, 59. (in Chinese)
- [38] 刘凯. 碳纤维/石墨烯导电沥青混凝土的制备及电热特性研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2018.
- LIU K. Preparation of carbon fiber/graphene conductive asphalt concrete and study on its electrothermal characteristics [D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2018. (in Chinese)
- [39] 季雨航, 晏凤元, 姜志炜, 等. 复相导电混凝土的力学及导电性能研究综述[J]. 江苏建材, 2019(2): 18-20.
- JI Y H, YAN F Y, JIANG Z W, et al. Summary of research on mechanics and electrical conductivity of composite conductive concrete [J]. Jiangsu Building Materials, 2019(2): 18-20. (in Chinese)
- [40] 王小英, 孙明清, 侯作富, 等. 电热混凝土复合材料的研究进展[J]. 硅酸盐通报, 2007, 26(1): 128-132.
- WANG X Y, SUN M Q, HOU Z F, et al. Advance in electrothermal concrete-matrix composite material [J]. Bulletin of the Chinese Ceramic Society, 2007, 26(1): 128-132. (in Chinese)
- [41] 侯作富. 融雪化冰用碳纤维导电混凝土的研制及应用研究[D]. 武汉: 武汉理工大学, 2003.
- HOU Z F. Research on development and application of carbon fiber conductive concrete for melting snow and ice [D]. Wuhan: Wuhan University of Technology, 2003. (in Chinese)
- [42] 侯作富, 李卓球, 胡胜良. 碳纤维导电混凝土大板的研制[J]. 江汉石油学院学报, 2003, 25(2): 121-122, 12.
- HOU Z F, LI Z Q, HU S L. Development of a carbon-fiber conductive concrete slab [J]. Journal of Jiangnan Petroleum Institute, 2003, 25(2): 121-122, 12. (in Chinese)

- [43] CHEN B, LIU J Y. Damage in carbon fiber-reinforced concrete, monitored by both electrical resistance measurement and acoustic emission analysis[J]. *Construction and Building Materials*, 2008, 22(11): 2196-2201.
- [44] REZA F, YAMAMURO J A, BATSON G B. Electrical resistance change in compact tension specimens of carbon fiber cement composites[J]. *Cement and Concrete Composites*, 2004, 26(7): 873-881.
- [45] WANG T J, XU J Y, ERLEI BAI, et al. Experimental study on electrical conductivity of carbon nanofiber reinforced concrete [J]. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 2019, 592(1): 012034.
- [46] WANG T J, XU J Y, BAI E L, et al. Study on the effects of carbon fibers and carbon nanofibers on electrical conductivity of concrete [J]. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 2019, 267(3): 032011.
- [47] ZHANG J, CHEVALI V S, WANG H, et al. Current status of carbon fibre and carbon fibre composites recycling [J]. *Composites Part B: Engineering*, 2020, 193: 108053.
- [48] FANECA G, IKUMI T, TORRENTS J M, et al. Conductive concrete made from recycled carbon fibres for self-heating and de-icing applications in urban furniture [J]. *Materiales De Construcción*, 2020, 70: 223.
- [49] 王艳, 张彤昕, 郭冰冰, 等. 回收碳纤维混凝土导电性[J]. *复合材料学报*, 2022, 39(6): 2855-2863.
- WANG Y, ZHANG T X, GUO B B, et al. Conductivity of recycling carbon fiber concrete [J]. *Acta Materiae Compositae Sinica*, 2022, 39(6): 2855-2863. (in Chinese)
- [50] 杨久俊, 海然, 张海涛, 等. 碳纤维梯度分布对水泥基材料热、电性能的影响[J]. *混凝土与水泥制品*, 2004(4): 30-33.
- YANG J J, HAI R, ZHANG H T, et al. Influence of carbon fiber gradient distribution on thermal and electrical properties of cement-based materials [J]. *China Concrete and Cement Products*, 2004(4): 30-33. (in Chinese)
- [51] 海然. 碳纤维梯度分布水泥基复合材料导电发热性能的研究[D]. 上海: 同济大学, 2006.
- HAI R. Study on electrical conductivity and heating properties of cement-based composites with gradient carbon fiber distribution [D]. Shanghai: Tongji University, 2006. (in Chinese)
- [52] 王元耀. 钢纤维混凝土在小纪电站的应用[J]. *水利天地*, 2013(7): 38-40.
- WANG Y Y. Application of steel fiber reinforced concrete in Xiaoji Hydropower Station [J]. *Hydro Science and Cold Zone Engineering*, 2013(7): 38-40. (in Chinese)
- [53] 张军. 用于公路桥梁融雪除冰的导电混凝土研究现状[J]. *山西建筑*, 2007, 33(9): 267-268.
- ZHANG J. Research status of electrically conductive concrete used in deicing and snow melting for highway bridges [J]. *Shanxi Architecture*, 2007, 33(9): 267-268. (in Chinese)
- [54] 赵若红, 钱兴, 傅继阳, 等. 钢纤维石墨导电混凝土微观结构及其机理分析[J]. *新型建筑材料*, 2014, 41(6): 41-44.
- ZHAO R H, QIAN X, FU J Y, et al. Analysis on the microstructure and mechanism of fiber and graphite in conductive concrete [J]. *New Building Materials*, 2014, 41(6): 41-44. (in Chinese)
- [55] 朱泽远, 王卓然, 段建平, 等. 碳纤维对导电沥青混凝土路面性能的影响[J]. *混凝土与水泥制品*, 2018(3): 54-57.
- ZHU Z Y, WANG Z R, DUAN J P, et al. Effects of steel fiber on pavement properties of conductive asphalt concrete [J]. *China Concrete and Cement Products*, 2018 (3): 54-57. (in Chinese)
- [56] BAI Y, CHEN W, CHEN B, et al. Research on electrically conductive concrete with double-layered stainless steel fibers for pavement deicing [J]. *ACI Materials Journal*, 2017, 114(6): 935-943.
- [57] 魏晓冬. 碳纤维导电混凝土在路面结构中的应用研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2010.
- WEI X D. Research on the Application of Carbon Fiber Concrete in Pavement Structure [D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2010. (in Chinese)
- [58] 郭传慧, 汤婉, 刘数华. 石墨粉导电混凝土的性能与微结构[J]. *硅酸盐通报*, 2017, 36(9): 3174-3179.
- GUO C H, TANG W, LIU S H. Properties and microstructure of conductive concrete containing graphite powder [J]. *Bulletin of the Chinese Ceramic Society*, 2017, 36(9): 3174-3179. (in Chinese)
- [59] LIU S H, WU M Q, RAO M J, et al. Preparation, properties, and microstructure of graphite powder-containing conductive concrete [J]. *Strength of Materials*, 2019, 51(1): 76-84.
- [60] 李仁福, 戴成琴, 于纪寿, 等. 导电混凝土采暖地面[J]. *混凝土*, 1998(1): 47-48.
- LI R F, DAI C Q, YU J S, et al. Conductive concrete heating ground [J]. *Concrete*, 1998(1): 47-48. (in Chinese)
- [61] EL-DIEB A S, EL-GHAREEB M A, ABDELRAHMAN M A H, et al. Multifunctional electrically conductive concrete using different fillers [J]. *Journal of Building Engineering*, 2018, 15: 61-69.
- [62] 黄永辉, 饶瑞, 刘春晖, 等. 一种石墨烯导电混凝土: CN106082837A [P]. 2016-11-09.
- HUANG Y H, RAO R, LIU C H, et al. Graphene electric-conduction concrete: CN106082837A [P]. 2016-11-09. (in Chinese).
- [63] 刘裕, 辛继宝, 候双双, 等. 一种增强型石墨烯导电透

- 水混凝土及其制备方法: CN108821691A [P]. 2018-11-16.
- LIU Y, XIN J B, HOU S S, et al. Reinforced graphene conductive water-permeable concrete and preparation method thereof: CN108821691A [P]. 2018-11-16. (in Chinese).
- [64] 吴献, 崔玉茜, 回国臣, 等. 炭黑导电混凝土和碳纤维炭黑导电混凝土电热试验[J]. 沈阳建筑大学学报(自然科学版), 2015, 31(3): 449-457.
- WU X, CUI Y X, HUI G C, et al. Experimental study on the electro-thermal behavior of conductive concretes with carbon black and carbon fiber-carbon black [J]. Journal of Shenyang Jianzhu University (Natural Science), 2015, 31(3): 449-457. (in Chinese)
- [65] 李红英. 导电混凝土的配制及力学和导电性能研究[J]. 防护工程, 2020, 42(3): 26-31.
- LI H Y. Study on preparation of conductive concrete and its mechanical and conductive properties [J]. Protective Engineering, 2020, 42(3): 26-31. (in Chinese)
- [66] 饶瑞, 张阳, 王海红, 等. 冻融对钢纤维石墨导电混凝土耐久性能的影响[J]. 混凝土与水泥制品, 2018(12): 45-48.
- RAO R, ZHANG Y, WANG H H, et al. The influence of freeze-thaw on durability of steel fiber reinforced graphite conductive concrete [J]. China Concrete and Cement Products, 2018(12): 45-48. (in Chinese)
- [67] 张阳, 刘春晖, 王海红, 等. 冻融循环对钢纤维-石墨导电混凝土发热性能的影响[J]. 混凝土与水泥制品, 2018(9): 61-64.
- ZHANG Y, LIU C H, WANG H H, et al. Effects of freeze-thaw cycle on thermal performance of steel fibergraphite conductive concrete [J]. China Concrete and Cement Products, 2018(9): 61-64. (in Chinese)
- [68] 洪雷. 石墨砂浆渗浇钢纤维混凝土导电机理研究[J]. 山东建筑工程学院学报, 2006, 21(4): 295-300, 306.
- HONG L. Study on the mechanism of the electrical conductivity of infiltrated steel fiber concrete [J]. Journal of Shandong Jianzhu University, 2006, 21(4): 295-300, 306. (in Chinese)
- [69] KIM G M, PARK S M, RYU G U, et al. Electrical characteristics of hierarchical conductive pathways in cementitious composites incorporating CNT and carbon fiber[J]. Cement and Concrete Composites, 2017, 82: 165-175.
- [70] FULHAM-LEBRASSEUR R, SORELLI L, CONCATORI D. Development of electrically conductive concrete and mortars with hybrid conductive inclusions [J]. Construction and Building Materials, 2020, 237: 117470.
- [71] 钱兴, 赵若红, 傅继阳. 低电压下钢纤维石墨导电混凝土升温性能研究[J]. 混凝土与水泥制品, 2013(6): 37-39.
- QIAN X, ZHAO R H, FU J Y. Heating performance research on conductive concrete adding steel fiber and graphite under low voltage [J]. China Concrete and Cement Products, 2013(6): 37-39. (in Chinese)

(编辑 王秀玲)