DOI: 10.19951/j.cnki.1672-9331.20220602001

第21卷第5期

2024年10月

文章编号:1672-9331(2024)05-0065-10

引用格式:叶群山,吴千里,周剑波,等.多相复合导电沥青混合料的伏安特性及电热特性研究[J].长沙理工大学学报(自然科学版), 2024,21(5):65-74.

Citation : YE Qunshan, WU Qianli, ZHOU Jianbo, et al. Research on voltage-current characteristics and electrothermal characteristics of multiphase composite conductive asphalt mixtures [J]. J Changsha Univ Sci Tech (Nat Sci), 2024, 21(5):65-74.

多相复合导电沥青混合料的伏安特性及 电热特性研究

叶群山,吴千里,周剑波,吴文华

(长沙理工大学 交通运输工程学院,湖南 长沙 410114)

摘 要:【目的】研究导电沥青混合料的电学性能,推广导电沥青路面。【方法】将石墨烯、碳纤维和钢渣作为 导电相,制备多相复合导电沥青混合料并对其进行通电试验,确定碳纤维和石墨烯的最佳掺量,表征导电 沥青混合料在交流电下的伏安特性和电热特性。【结果】对于导电沥青,导电相单丝絮状碳纤维和石墨烯的 最佳掺量分别为0.5%和0.8%(质量分数);对于导电沥青混合料,导电相针片状碳纤维的最佳掺量为0.35% (质量分数)。导电沥青混合料中的导电相掺量越高,试件尺寸越大,其伏安特性的线性度越高。导电沥青 混合料的电热效应主要由碳纤维产生,试件通电后温度分布不均匀,靠近电极两端升温最快。【结论】多相 复合导电沥青混合料具有良好的升温性能。本研究成果可为多相复合导电沥青混合料在电热型融雪路面 中的应用提供一定借鉴和参考。

关键词:导电沥青混合料;石墨烯;碳纤维;最佳掺量;伏安特性;电热特性 **中图分类号:**U414 **文献标志码:**A

Research on voltage-current characteristics and electrothermal characteristics of multiphase composite conductive asphalt mixtures

YE Qunshan, WU Qianli, ZHOU Jianbo, WU Wenhua

(School of Traffic & Transportation Engineering, Changsha University of Science & Technology, Changsha 410114, China)

Abstract: [**Purposes**] This paper aims to study the electrical properties of conductive asphalt mixtures and promote conductive asphalt pavements. [**Methods**] Multiphase composite conductive asphalt mixtures were prepared by using graphene, carbon fiber, and steel slag as conductive phases and subjected to electrical tests, so as to determine the optimal contents of carbon fiber and graphene and characterize the voltage-current characteristics and electrothermal characteristics of conductive asphalt mixtures under altermating current power. [Findings] For conductive asphalt, the optimal contents of conductive monofilament flocculent carbon fiber and graphene are 0.5% and 0.8% (mass fraction), respectively. For conductive asphalt mixtures, the optimal content of conductive phase needle sheet carbon fiber is 0.35% (mass fraction). Higher content of the

收稿日期:2022-06-02;修回日期:2022-06-03;接受日期:2022-06-05

基金项目:湖南省教育厅科学研究重点项目(20A012);长沙市科技计划项目(kq2014107);交通运输部道路结构和材料重点实验室计划项目(kfi140301)

通信作者:叶群山(1978—)(ORCID:0000-0002-8196-9109),男,副教授,主要从事路面新材料和新结构技术、沥青与沥青混合料、路面及桥面沥青加铺技术等方面的研究。E-mail: yequnshan@csust.edu.cn

conductive phase in the conductive asphalt mixture indicates a larger specimen size and higher linearity of its voltage-current characteristics. The electrothermal effect of conductive asphalt mixtures is mainly generated by carbon fibers. The temperature distribution of the specimen is not uniform after energization, and the temperature rise is fastest near the electrodes ends. [Conclusions] Multiphase composite conductive asphalt mixtures have good heating performance. The research results can provide some references for applying multiphase composite conductive asphalt mixtures in electrothermal snow-melting pavement.

Key words: conductive asphalt mixture; graphene; carbon fiber; optimal content; voltagecurrent characteristic; electrothermal characteristic

Foundation items: Project (20A012) supported by Key Scientific Research Program of Education Department of Hunan Province; Project (kq2014107) supported by Science and Technology Plan Program of Changsha; Project (kfj140301) supported by Key Laboratory of Road Structure and Material of Ministry of Transport

Corresponding author: YE Qunshan (1978—) (ORCID: 0000-0002-8196-9109), male, associate professor, research interest: new pavement materials and new structure technology, asphalt and asphalt mixture, pavement and bridge deck asphalt surfacing technology. E-mail:yequnshan@csust.edu.cn

0 引言

冬季道路积雪一直是危害行车安全的重要因 素之一。因此,如何快速消除路面冰雪是道路工 程领域非常重要的问题^[1]。目前,常见的清除积 雪手段主要有化学药剂法和机械除雪法两种,但 这两种方法易污染环境,成本也较大,不适合大规 模使用^[2-3]。导电沥青路面的出现为绿色、高效除 雪带来可能,已经成为实现主动融雪路面技术^[4-7] 的有效途径之一。

导电沥青混凝土的研究起源于国外。近年 来,SASSANI等^[8]、ALI NOTANI等^[9]使用碳纤维制 备了一种能在40V电压下有效除冰的沥青混凝 土。研究结果表明,在制备过程中,碳纤维较短导 致需要更高的压实功,这意味着在制备这种沥青 混凝土时需要更高的能耗。此外,他们的研究未 深入考虑传导热对融雪效果的影响。除碳纤维之 外,石墨烯也是一种具有潜力的导电材料。当石 墨烯被沥青插层和剥离后,同样可以使沥青具备 一定的导电性^[10],这为导电沥青混凝土的制备提 供了新的选择。ARABZADEH等^[11]利用碳纤维制 备导电沥青胶浆,发现将碳纤维掺量(文中无特殊 说明,掺量均为质量分数)保持在0.75%才可以用 于融雪。在沥青混合料研究中,冯新军等^[12]、查旭 东等^[13]认为当9mm碳纤维的掺量为0.053%~ 0.065%时,沥青混合料即可满足路面融雪化冰要求;当碳纤维掺量为0.100%时,沥青混合料的相关路用性能达到最优。另有研究表明,碳纤维与 其他导电材料复掺会进一步提高沥青混合料的导 电性^[14]。吴义华等^[15]在研究道路导电融冰层时, 发现电压越大融雪越快,但电压过大易产生短路。 谭忆秋等^[16]通过对导电沥青胶浆和混合料施加不 同直流电压,发现电压与电流并非成线性关系,这 说明使用合适的电压对提高融雪效率有着深远的 影响。然而,该研究并未对交流电压下的导电沥 青混合料的伏安特性进行研究。

综上所述,目前对导电沥青混合料的融雪性 能研究主要集中在融雪效率方面,对其电学行为 的研究较少。因此,本研究使用石墨烯、碳纤维和 钢渣制备多相复合导电沥青混合料,并研究其在 交流电下的伏安特性和通电升温过程的特点,对 完善导电沥青混凝土融雪工作和促进融雪路面的 推广具有一定的积极作用。

1 材料及方法

1.1 试验材料

沥青为湖南宝利集团生产的70^{*}基质沥青;石 墨烯(graphene,G)为深圳宏达昌科技生产的单层 石墨烯,该石墨烯通过化学法制得;碳纤维 (carbon fiber,CF)为日本东丽公司产的聚丙烯腈 (polyacrylonitrile, PAN) 基短切碳纤维,其长度为 9~12 mm; 钢渣来自湘潭钢铁集团有限公司,其通 过热闷法获得,且已经过破碎和陈化处理。钢渣 本身具有较高的强度,因此用其制备的导电沥青 混合料展现出良好的路用性能^[17]。此外, 钢渣富 含金属氧化物,这使得其导电性能远比普通集料 的优越。在沥青混合料体系中, 钢渣能够与其他 导电相材料协同作用,进一步提升整体导电性能。因此,使用钢渣作为集料制备的沥青混合料的导电性能尤为优越。本试验选取的钢渣粒径集中在0.075~9.500 mm,9.500 mm以上粒径的集料采用石灰岩。本文所采用的沥青、石墨烯、碳纤维的主要物理指标分别见表1、表2和表3。

表1 70[#]基质沥青主要物理指标 Table 1 Main physical indexes of 70[#] matrix asphalt

		1 2	1			
针入度(25℃,100g,5s)/	软化点(环球	15℃延度	卅戶揭生南/04	烘后针入度比	闪点(开口)/℃	
0.1 mm	法)/℃	$(5 \text{ cm} \cdot \text{min}^{-1})/\text{cm}$	洪 归钡大平/%	值/%		
69.1	48.2	153	0.05	67.0	>285	

表 2	石墨烯主要物理指标
-----	-----------

Table 2Main physical indexes of graphene

堆积密度	粒度D50	碳的质量	含水率	公同山	单层率
$/(g \cdot cm^{-3})$	/µm	分数/%	1%	22字 12	1%
0.01~0.02	7~12	>98	≤2	9 500	>80

表3 ⇒	碳纤	·维	主	.要:	物	理	指	标
------	----	----	---	-----	---	---	---	---

 Table 3
 Main physical indexes of carbon fiber

抗拉强度/	电阻率/	碳的质量	伸长	密度/
GPa	$(\Omega \cdot m)$	分数/%	率/%	$(g \cdot cm^{-1})$
3.6~3.8	$1.5 \times 10^{-4} \sim 2.5 \times 10^{-4}$	≥95	1.5	1.60~1.76

1.2 导电试件电阻率计算方法

本试验使用铜网作为电极,且在导电沥青及 混合料试件成型前,将电极预先埋置在模具两端。 试件成型后,电极与试件贴合紧密,从而极大程度 地减小了接触电阻。由于不同尺寸试件的电阻不 同,为了方便对比,本试验在使用万用表测量试件 电阻后,按式(1)计算电阻率ρ,即

$$\rho = RS/L \tag{1}$$

式中:R为试件电阻, Ω ;S为试件横截面积, m^2 ;L为试件垂直于横截面积方向的长度, m_\circ

2 导电沥青及混合料的导电性能

2.1 导电沥青的导电性能

碳纤维分为单丝絮状和针片状两种,其类型 不仅影响自身分散,也直接影响集料的导电性能。 因此,本文采用这两种碳纤维制备导电沥青,并分 别对其电阻率进行测试。这两种碳纤维导电沥青 电阻率曲线如图1所示。

由图1可以看出,两种碳纤维导电沥青的渗流 阈值均为0.4%~0.5%。然而,单丝絮状的碳纤维 导电沥青电阻率远比针片状的小,这表明在导电 沥青中,单丝絮状碳纤维因自身团聚造成的不利 影响相对较小。这是因为单丝絮状碳纤维具有较 大的长径比,更容易形成桥接作用,从而提高沥青 的导电性能。相比之下,长径比较小的针片状碳 纤维之间的桥接现象则较少。因此,单丝絮状碳 纤维更适合用作导电沥青的导电相,且0.5%可作 为其最佳掺量。



图1 不同碳纤维导电沥青电阻率曲线 Fig. 1 Resistivity curve of conductive asphalt with different

carbon fibers

本试验制备导电沥青的具体步骤如下:首 先,将 300 g沥青加热至 160 ℃,在剪切仪转速 为 1 000 r/min 的条件下分别加入质量分数为 0、 0.6%、0.8%、1.0%(按沥青质量计)的石墨烯,同时 加入质量分数为 10.0%(按石墨烯质量计)的十二 烷基苯磺酸钠(作为分散剂);然后,将转速增加到 5 000 r/min,持续剪切 1 h;最后,待剪切完成,掺入 质量分数为 0.5%(按沥青质量计)的碳纤维,并使 用玻璃棒手动搅拌均匀,制得不同石墨烯掺量下的 碳纤维-石墨烯复合导电沥青。这些导电沥青的电 阻率见表4。

由表4可知,在固定碳纤维掺量为0.5%的情况下,随着石墨烯掺量的提高,复合导电沥青的电阻率降低。当石墨烯质量分数为0.8%时,导电沥青的渗流阈值出现,此时其电阻率接近未掺石墨烯时的一半。因此,在导电沥青中,石墨烯的最佳掺量为0.8%。对于单掺碳纤维的导电沥青,导电通路仅由碳纤维构建的三维桥接体系形成,而沥青为绝缘体,且包裹在碳纤维表面,这在一定程度上阻断了导电通路。根据隧道效应理论,当导电材料之间的距离达到1nm时,则会出现电子跃迁。然而,实际研究发现,即便距离大于1nm,仍有可能形成导电通路。石墨烯加入沥青后会分散在沥青中,可以作为电子传递的媒介,能大大增强被沥青包裹的碳纤维的导电性,进而有效提高导电通路形成的概率。

表 4	不同石墨烯掺量下复合导电沥青的电阻率
Table 4	Resistivity of composite conductive asphalt with
	different graphene contents

uniorent gruphene contente						
石墨烯质量	沥青电阻率/	石墨烯质量	沥青电阻率/			
分数/%	$(\Omega \cdot m)$	分数/%	$(\Omega \cdot m)$			
0.0	7.01	0.8	3.62			
0.6	6.82	1.0	2.62			

2.2 导电沥青混合料的导电性能

本试验采用细粒式沥青混合料AC-13。首先, 根据《公路沥青路面施工技术规范》(JTG F40— 2004)中的级配中值作为目标级配,固定石墨烯的 质量分数为沥青的0.8%,钢渣体积分数为89.0%, 油石比为5.7%。然后,通过掺入不同类型、不同掺 量的碳纤维,制得不同的碳纤维-石墨烯复合导电 沥青混合料。马歇尔试件电阻率的测试结果如图 2所示。

由图2可以看出,掺入质量分数为0.20%的针 片状或单丝絮状碳纤维时,导电沥青混合料均出 现渗流阈值。然而,在增强沥青混合料的导电效 果方面,针片状碳纤维表现更好。特别地,当针片 状碳纤维的质量分数为0.35%时,该导电沥青混 合料的电阻率小于4.0 Ω·m。然而,这与其在导电 沥青中的导电性能结果相反。造成这种差异的原 因具体如下:尽管碳纤维自身缺陷较少,但在受到 较强作用力时,其表面易受损并产生开口和裂纹 等缺陷,从而导致其易于折断且强度降低。在导 电沥青制备过程中,使用玻璃棒手动搅拌对碳纤 维的变形影响较小。然而,在使用剪切仪对混合 料快速搅拌过程中,碳纤维不断受到集料的挤压 推移,承受着较大的剪切力。针片状碳纤维由无 数根单丝并列形成,具有较高的强度,在搅拌过程 中其变形较小。相比之下,单丝絮状碳纤维易弯 折甚至断裂,导致实际长度低于原来的9~12 mm。 此外,研究结果表明,当碳纤维长度为9 mm时,导 电混合料的导电性能最好。综上所述,相较于单 丝絮状碳纤维导电沥青混合料,针片状碳纤维导 电沥青混合料呈现出更优越的导电性能。



图 2 不同碳纤维-石墨烯复合导电沥青混合料电阻率的 变化曲线

Fig. 2 Variation curves of resistivity of different carbon fibergraphene composite conductive asphalt mixtures

3 导电沥青混合料交流电下的伏安特性

对于导电沥青混合料而言,其电流与外加电 压之间表现出一定的非线性特征。为了验证这一 点,本文对制得的不同掺量的针片状碳纤维-石墨 烯复合导电沥青混合料试件进行伏安特性测试, 试验结果如图3所示。因在理论上当电压为0V 时,电流为0mA,故本研究使用过原点的直线拟合。

由图3可以看出,复合导电沥青混合料的电流 与外加电压的线性程度随碳纤维掺量的增加而提 高。值得注意的是,图中每个对应点的纵坐标与 横坐标的比值反映了此时试件的电阻大小。单相 导电材料本身就存在微弱的非线性伏安特性。然 而,在复合导电材料中,当导电相材料掺量超过渗 流阈值时,各导电材料相互影响和耦合,这一作用 会使非线性伏安特性的程度降低。当碳纤维质量 分数为0.15%时,试件电阻总体上随着电压增大 而减小。这是因为此时在试件内部除了接触形成 的导电通路,外加电场下的隧穿效应也起到重要 作用,原本无序排列的载流子变得有序,从而使试 件导电性能增强,电阻减小。因此,伏安特性表现 出微弱的非线性特征。当碳纤维质量分数达到 0.30%时,导电相材料主要通过接触形成导电通 路,隧穿效应在整个导电网络形成中的作用降低。 因此,复合导电沥青混合料伏安特性的线性度进 一步提高。 为进一步对复合导电沥青混合料的伏安特性进行研究,本文选择碳纤维质量分数为0.35%的复合导电沥青混合料,制备用于车辙试验和马歇尔试验的试件。本试验所使用的车辙板和马歇尔试件均为标准试件尺寸,其中马歇尔试件为101.6 mm (直径)×63.5 mm(高)的圆柱体试件,车辙板试件为300 mm×300 mm×50 mm的长方体试件,试验结果如图4所示。由图4可以看出,试件尺寸对导电沥青混合料的伏安特性也有一定的影响,具体











69

投稿网址:http://cslgxbzk.csust.edu.cn/cslgdxxbzk/home

表现为试件尺寸越大,其伏安特性的线性度越明 显。这是因为在试件尺寸较大的情况下,导电通 路的形成具有更多可能性。

4 导电沥青混合料的电热效应

4.1 马歇尔试件通电升温效果

路用性能为沥青混合料的基本性能。大量 研究表明,石墨烯、纤维材料和钢渣均能提升沥 青混合料的路用性能^[18-20]。本文对碳纤维质量分 数为0.35%、石墨烯质量分数为0.8%和钢渣体积 分数为89.0%的导电沥青混合料进行车辙试验、 浸水马歇尔试验和三点弯曲试验,结果显示该沥青 混合料的动稳定度为2603.3次/mm,浸水残留稳定 度为90.13%,15℃下弯曲劲度模量为245.35 MPa。 这表明该沥青混合料具有良好的路用性能。下



(a) 未通电原图

文将对该导电沥青混合料的电热性能进行研究。

对导电沥青混合料通电可以将电能转化为 热能,具体表现为试件温度上升。图5展示了初 始电阻为60.32 Ω的马歇尔试件在38 V交流电压 条件下的升温效果图。由图5可以看出,试件的 温度分布并不均匀,热点主要集中在碳纤维较多 的位置,在多因素耦合作用下,导体周围形成了 复杂的温度场。在通电加热过程中,产热与导热 同时进行,促进了热量分散到整个试件。这与铺 装电网通电产生的温度场有显著不同,铺装电网 通电形成的温度场具有对称性^[20]。然而,由于导 电沥青混合料中导电相材料的分布不均匀,在多 因素耦合作用下的温度场通常也是不对称的。 基于这一特征,后续可以利用沥青混合料通电后 的红外热像图,来辅助判断混合料中导电相的分 散情况。



(b) 通电10 s
 (c) 通电4 min
 图5 马歇尔试件通电生热效果图
 Fig. 5 Heating effect of Marshall specimen after energization

在通电加热过程中,马歇尔试件中心点和温 度最高点的温度记录见表5。由表5可知,马歇尔 试件的升温效果显著。在加热8min后,试件表面 最高温度便可达到47.0℃,而中心监测点温度则 升至22.9℃。在整个通电过程中,这两个点位的 升温速率分别为3.00、1.19℃/min,这表明该导电 沥青混合料具有良好的升温效果。

表5 马歇尔试件部分点的温度变化

Table 5	Temperature change of some points of	Marshall
	specimen	°C

specimen					
记录的点位	不同加热时间的温度				
	$10 \mathrm{~s}$	2 min	4 min	6 min	8 min
中心点	13.6	15.5	17.6	20.3	22.9
温度最高点	23.5	33.4	37.1	41.0	47.0

4.2 车辙板试件通电升温效果

本文对初始电阻为100.05 Ω的车辙板试件施 加了38 V的交流电压,并在试件表面不同点位(从 左到右垂直于电极端的1/2点、1/4点和边缘点)贴 上温度探头,测量车辙板试件升温效果。图6所示 为车辙板试件温度记录点具体位置示意图。图7 所示为该试验相关记录数据结果。

由图7可以看出,车辙板试件边缘点升温速度 最快,2h内温度上升了4.1℃;其次是1/4点,上升 了3.2℃;最后是1/2点,上升了2.6℃。该试验结 果表明越靠近电极的部分升温越快,这与马歇尔 试件加热的试验结果相同。这可能与车辙板不同 部分的电压降不同有关。车辙板的电流并不是处

处相等的,其内部并非单纯类似于电阻串联的结 构。因此,在导电沥青混凝土实际运用中,可考虑 在路面分段铺设电极,通过多段通电的方法使



车辙板试件温度记录点示意图 Fig. 6 Temperature recording points for rutting plate



图7 车辙板试件不同位置温度变化曲线

Fig. 7 Temperature change curves of different positions for rutting plate specimens

路面升温更均匀,融雪速度更快,同时可避免部分 路面升温过快、温度过高,从而防止加速沥青的老 化。此外,为了保证热量的充分利用,还应在导电 沥青混凝土层下铺设隔热层,以减少热量向下传 播,从而避免造成浪费。

4.3 导电沥青混合料融雪化冰试验

融雪是导电沥青混凝土最基本的功能。室外 融雪试验最能反映导电沥青混凝土的融雪性能。 本试验具体步骤如下:首先,在车辙板试件上下表 面中心点贴上温度探头后,将试件放置在室外,并 控制其上积雪的厚度达到40 mm;接着,待积雪完 成后,用钢尺削去多余的雪,在此过程中不可过分 挤压积雪,避免雪的密度发生明显变化;然后,用 泡沫板围住车辙板试件以减少热量损失;最后,对 车辙板试件施加38V的交流电。试件的初始电阻 为124.3 Ω,试验日期为2021年12月27日,天气 阴,时间为17:22到20:22,试验初始时环境温度 为1.8℃,结束时环境温度为-1.1℃,风力为1级。 图8展示了不同通电时间下的融雪情况,其中插直 尺的试件为通电试验组,插三角尺的试件为未通 电对照组。试验开始后,每隔一段时间(具体见图 8)记录一次试件表面积雪融化情况。



(a) 0 min



(d) 180 min

图8 不同通电时间下融雪试验图 Fig. 8 Snow-melting tests with different energization durations

由图8可以看出,较未通电的对照组,通电试 验组的积雪在通电114 min后明显减少,部分车辙 板表面已裸露;随着通电时间的增加,试件表面积 雪进一步减少,在通电180 min后,试件表面几乎 无连续积雪。这表明导电沥青混凝土能有效处理 路面积雪,进而改善行车安全问题。同时还可以 发现,电极两端的积雪最先融化,然后是试件中间 部分积雪融化,这与车辙板试件升温试验结果一

致。因而,相比于铺设垂直于行车方向的电极,更 应该有针对性地选择在轮迹可能较多的地方铺设 平行于行车方向的电极,这样能使该处的积雪快 速融化,从而实现提前通车的目标。

在导电沥青混合料融冰化雪试验过程中,试 件温度与试件边缘雪层厚度随时间的变化情况如 图9所示。由图9可以看出,试件边缘雪层厚度随 通电时间的增长而减小。试件上表面温度总体呈 先小幅度上升后逐渐下降的趋势,该变化趋势反 映了雪层初始吸热融化的状态,之后达到一个动 态平衡,此时冰雪与水共存,冰雪吸热的同时迅速 转变为水相。试件下表面温度呈先上升后下降的 变化趋势,温度先上升是通电后的正常电热现象, 后下降可能是因为上表面积雪融化产生的水渗入 车辙板试件内部,使其下表面温度降低。





5 讨论

本文对导电沥青混合料的伏安特性和电热特 性开展了研究。结果表明,导电沥青混合料具有 一些独特的电学特性。本文对混合料在交流电下 的非线性伏安特性的机理分析是基于经验和理论 的。室外融雪试验受地理、环境等因素的影响,在 强风、极寒条件下,该导电沥青混合料的融雪效果 还有待验证。此外,后续可以根据有效介质理论 和电场发射理论,以及结合数据和模型,来解释沥 青混合料的伏安特性。同时,应更多地运用红外 热像图来监测和提高沥青混合料中导电相分散的 均匀性,以确保该导电沥青混合料的电热性能和 特点在更多条件下得到有效验证。

6 结论

本文使用石墨烯、碳纤维和钢渣制备了多相 复合导电沥青混合料,并深入研究了其在交流电 下的伏安特性和通电升温过程的特点。得到以下 结论: 1)利用石墨烯、碳纤维和钢渣可以制得导电 性能优良的导电沥青及导电沥青混合料。对于导 电沥青,导电相单丝絮状碳纤维和石墨烯的最佳 掺量分别为0.5%和0.8%;对于导电沥青混合料, 导电相针片状碳纤维的最佳掺量为0.35%。此外, 不同种类的碳纤维对沥青及混合料的电阻率的影 响存在显著差异。

2)多相复合导电沥青混合料试件在低掺量导电相下,伏安特性呈明显的非线性,随导电相掺量的增加,线性程度增加。此外,导电沥青混合料的伏安特性还与试件尺寸有关,尺寸越大,其伏安特性的线性程度越高。

3)导电沥青混合料具有良好的升温性能,其 电热效应主要由碳纤维产生。试件通电后温度分 布并不均匀,表现出多个部分急速升温带动整体 升温,以及靠近电极的两端升温快、温度高等现 象。同时,该复合导电沥青混合料可以在38V的 交流电下有效融雪,其融雪表现与通电升温特点 一致。该研究成果可为多相复合导电沥青混合料 在电热型融雪路面中的应用提供一定借鉴和 参考。

[参考文献]

 [1] 谭忆秋,张驰,徐慧宁,等.主动除冰雪路面融雪化 冰特性及路用性能研究综述[J].中国公路学报, 2019,32(4):1-17.DOI:10.19721/j.cnki.1001-7372.2019.04.001.

TAN Yiqiu, ZHANG Chi, XU Huining, et al. Snow melting and deicing characteristics and pavement performance of active deicing and snow melting pavement[J]. China Journal of Highway and Transport, 2019, 32 (4) : 1-17. DOI: 10.19721/j. cnki. 1001-7372.2019.04.001.

[2] 李萍,魏西应,念腾飞,等.季节性冻土区沥青路面融雪剂凝冰点测试[J].硅酸盐通报,2019,38(5):1561-1567.DOI:10.16552/j.cnki.issn1001-1625.2019.05.043.

LI Ping, WEI Xiying, NIAN Tengfei, et al. Freezing point test of deicers on asphalt pavement in seasonal frozen region [J]. Bulletin of the Chinese Ceramic Society, 2019, 38(5): 1561-1567. DOI: 10.16552/j. cnki.issn1001-1625.2019.05.043.

[3] 王庆,李文凯.盐-雾耦合作用对沥青混合料路用性能的影响[J].长沙理工大学学报(自然科学版),
 2020,17(4):9-15.DOI:10.3969/j.issn.1672-9331.2020.04.002.

WANG Qing, LI Wenkai. Influence of salt-fog coupling on pavement performance of asphalt mixture [J]. Journal of Changsha University of Science & Technology (Natural Science), 2020, 17(4): 9-15. DOI:10.3969/j.issn.1672-9331.2020.04.002.

 [4] 琚花花.干湿复合橡胶粉改性沥青混合料性能及抑 冻破冰试验研究[J].新型建筑材料,2020,47(9): 89-93.

JU Huahua. Study on performance and antifreeze and ice breaking performance of dry and wet composite rubber powder modified asphalt mixture [J]. New Building Materials, 2020, 47(9): 89-93.

 [5] 刘状壮,沙爱民,蒋玮.蓄盐沥青路面研究进展:盐 化物材料、混合料及其性能与评价[J].中国公路学 报,2019,32(4):18-31,72.DOI: 10.19721/j. cnki.1001-7372.2019.04.002.

LIU Zhuangzhuang, SHA Aimin, JIANG Wei. Advances in asphalt pavements containing salts: additives, mixtures, performances, and evaluation [J]. China Journal of Highway and Transport, 2019, 32 (4) : 18-31, 72. DOI: 10.19721/j. cnki. 1001-7372.2019.04.002.

[6] 查旭东,蔡良,曹艳霞.碳纤维导电SBS改性沥青混
 合料性能试验[J].长沙理工大学学报(自然科学版),2014,11(1):10-15,23.DOI:10.3969/j.
 issn.1672-9331.2014.01.002.

ZHA Xudong, CAI Liang, CAO Yanxia. Performance experiments of carbon fiber-reinforced conductive SBS modified asphalt mixture [J]. Journal of Changsha University of Science & Technology (Natural Science), 2014, 11(1): 10-15, 23. DOI: 10.3969/j.issn.1672-9331.2014.01.002.

[7] 黄维蓉,杨玉柱,宋鹏,等.石墨烯-碳纤维导电沥 青混凝土电热性能研究[J].化工新型材料,2021, 49(8): 269-273. DOI: 10.19817/j. cnki. issn1006-3536.2021.08.058.

HUANG Weirong, YANG Yuzhu, SONG Peng, et al. Study on electrothermal property of rGO-CF conductive asphalt concrete [J]. New Chemical Materials, 2021, 49 (8) : 269-273. DOI: 10.19817/j. cnki. issn1006-3536.2021.08.058.

- [8] 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. DOI: 10.1016/j. jclepro.2018.08.315.
- [9] ALI NOTANI M, ARABZADEH A, CEYLAN H, et al. Effect of carbon-fiber properties on volumetrics and ohmic heating of electrically conductive asphalt concrete[J]. Journal of Materials in Civil Engineering,

2019, 31 (9) : 04019200. DOI: 10.1061/(ASCE) MT.1943-5533.0002868.

- [10] 韩建博,朱福,陈文怡.石墨烯对沥青混合料改性机 理研究综述[J].长沙理工大学学报(自然科学版), 2023,20(1):40-47.DOI:10.19951/j.cnki.1672-9331.20220519005.
 HAN Jianbo, ZHU Fu, CHEN Wenyi. A review on the modification mechanism of graphene to asphalt mixture [J]. Journal of Changsha University of Science & Technology (Natural Science), 2023, 20(1):40-47. DOI: 10.19951/j.cnki.1672-9331.20220519005.
- [11] ARABZADEH A, CEYLAN H, KIM S, et al. Electrically-conductive asphalt mastic: temperature dependence and heating efficiency [J]. Materials & Design, 2018, 157: 303-313. DOI: 10.1016/j. matdes.2018.07.059.
- [12] 冯新军,查旭东,程景.PAN基碳纤维导电沥青混凝 土的制备及性能[J].中国公路学报,2012,25(2);
 27-32.DOI: 10.19721/j.cnki.1001-7372.2012.02.004.
 FENG Xinjun, ZHA Xudong, CHENG Jing.
 Preparation and performance of PAN-based carbon fiber conductive asphalt concrete [J]. China Journal of Highway and Transport, 2012, 25(2): 27-32.DOI: 10.19721/j.cnki.1001-7372.2012.02.004.
- [13] 查旭东,陈勇强,程景.短切PAN基碳纤维导电沥青 混合料性能试验研究[J].功能材料,2012,43(7): 872-876.DOI: 10.3969/j.issn.1001-9731.2012.07.015. ZHA Xudong, CHEN Yongqiang, CHENG Jing. Experimental research on performances for conductive asphalt mixture with chopped PAN-based carbon fiber [J]. Journal of Functional Materials, 2012, 43(7): 872-876.DOI: 10.3969/j.issn.1001-9731.2012.07.015.
- [14] 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 Dongxing. Study of road performance and force-electrical sensitivity characteristics of conducting asphalt concrete[J]. Highway, 2019, 64(3):33-37.
- [15] 吴义华,王博,罗传熙,等.钢筋骨架增强的碎石融 冰功能层融冰效果研究[J].武汉理工大学学报(交 通科学与工程版),2018,42(6):952-955.DOI: 10.3963/j.issn.2095-3844.2018.06.011.
 WU Yihua, WANG Bo, LUO Chuanxi, et al. Research on ice melting effect of crushed stone function layer with reinforced steel frame [J]. Journal of Wuhan University of Technology (Transportation Science & Engineering), 2018,42(6):952-955.DOI: 10.3963/ j.issn.2095-3844.2018.06.011.
- [16] 谭忆秋,刘凯,王英园.碳纤维/石墨烯导电沥青混 凝土的非线性伏安特性[J].建筑材料学报,2019, 22(2):278-283.

TAN Yiqiu, LIU Kai, WANG Yingyuan. Nonlinear voltammetric characteristics of carbon fiber/graphene conductive asphalt concrete [J]. Journal of Building Materials, 2019, 22(2): 278-283.

- [17] 刘明金,柯望,李闯民.基于路用性能的掺钢渣透水 沥青混合料设计[J].公路与汽运,2021(3):68-73, 77.DOI:10.3969/j.issn.1671-2668.2021.03.017.
 LIU Mingjin, KE Wang, LI Chuangmin. Design of steel slag-mixed permeable asphalt mixture based on road performance[J]. Highways & Automotive Applications, 2021 (3): 68-73, 77. DOI: 10.3969/j.issn.1671-2668.2021.03.017.
- [18]余琦,许立,高金仓,等.建筑垃圾再生集料沥青稳 定碎石基层性能研究[J].交通科学与工程,2021, 37(2):1-7,97.DOI: 10.16544/j.cnki.cn43-1494/ u.2021.02.001.

YU Qi, XU Li, GAO Jincang, et al. Pavement performance of asphalt treated permeable base using construction waste recycled aggregate [J]. Journal of Transport Science and Engineering, 2021, 37(2): 1-7, 97. DOI: 10.16544/j.cnki.cn43-1494/u.2021.02.001.

[19] 周志刚, 蔡扬发, 谭军. 聚酯纤维对橡胶改性沥青混 凝土性能的影响[J]. 长沙理工大学学报(自然科学 版), 2021, 18(2): 1-8. DOI: 10.19951/j. cnki. cslgdxxbzkb.2021.02.001.

ZHOU Zhigang, CAI Yangfa, TAN Jun. Effect of polyester fiber on performance of rubber modified asphalt concrete [J]. Journal of Changsha University of Science & Technology (Natural Science), 2021, 18 (2) : 1-8. DOI: 10.19951/j. cnki. cslgdxxbzkb. 2021.02.001.

- [20] 李科,黄维蓉,任海生.机械剥离石墨烯对沥青性能的影响研究[J].中外公路,2022,42(4):233-236.
 DOI: 10.14048/j.issn.1671-2579.2022.04.043.
 LI Ke, HUANG Weirong, REN Haisheng. Study on effect of graphene by mechanical peeling method on properties of asphalt [J]. Journal of China & Foreign Highway, 2022, 42(4):233-236. DOI: 10.14048/j. issn.1671-2579.2022.04.043.
- [21] 李赏, 韩文博, 姚亚军, 等. 基于电阻网法的路面融 雪化冰系统数值模拟[J]. 公路交通科技, 2016, 33
 (1): 49-56. DOI: 10.3969/j. issn. 1002-0268.2016. 01.008.

LI Shang, HAN Wenbo, YAO Yajun, et al. Numerical simulation of road deicing system based on resistor network [J]. Journal of Highway and Transportation Research and Development, 2016, 33 (1) : 49-56. DOI: 10.3969/j.issn.1002-0268.2016.01.008.

(责任编辑:刘平;校对:彭三军)