

电热沥青膜材料开发及其性能研究

王黎明*, 吴文杰

(东北林业大学 土木工程学院, 黑龙江 哈尔滨 150040)

摘要: 为提高电加热融冰雪路面的效率和解决既有方案的不足, 提出了一种电热沥青膜除冰雪方案, 并对其材料组成和材料性能进行了深入研究. 电热沥青膜所用导电胶浆由石墨、短切碳纤维与沥青混合而成, 其电阻率低至 $1 \times 10^{-2} \Omega \cdot m$, 可按黏层或封层工艺铺设于层间. 模拟工程状态进行的导电性能试验表明, 按黏层用量铺设的沥青膜即可达到融冰功率所需的电阻值, 且其连续性不受施工过程显著影响. 同时, 力学性能试验表明, 导电胶浆铺设的沥青膜完全满足层间抗剪切和抗拉拔的技术要求.

关键词: 道路工程; 电热沥青膜; 抗剪切试验; 电阻率; 碳纤维; 石墨

中图分类号: U414

文献标识码: A

doi: 10.7511/dllgxb201704010

0 引言

冬季的降雪积冰严重影响道路交通安全和顺畅通行, 而人为促进消融并配合机械清扫是除冰雪的基本途径. 在促进路面冰雪融化方面, 目前除了撒除冰盐或融雪剂的化学方法, 工程领域还发展了电热、流经管加热、路面外源加热等物理方法. 其中, 由来已久的电热法简单高效, 应用相对广泛^[1], 且随着路面分布式发电等能源技术的进展也不乏发展前景. 基于不同的供电和铺设方式, 道路工作者先后提出了3种不同的典型加热结构: 导电发热电缆、导电发热沥青或水泥铺装层、电热格栅^[2]. 为将融冰雪功能与路面工作特性相结合, 电热路面要同时考虑用电安全、高效融冰雪、结构耐久性以及建设与运营成本可控的技术要求^[3]. 理论上来说, 不论哪种电热方式, 为消融同条件下的等量路面冰雪所消耗的能量相同. 但是, 不同电热方式对满足上述四方面的技术要求各有侧重, 也就存在截然不同的技术优势和不足, 寻找更优的技术方案一直是工程研究的主要目标. 由此, 本文提出一种采用电热沥青膜的改进技术方案, 并论述基于该方案的材料开发与性能研究.

1 既有电热方式的特点及电热沥青膜

1.1 既有的电热方式

(1) 导电发热电缆

有绝缘层的发热电缆可以方便地接入电路来产出热能, 原理简单, 应用亦不复杂, 19世纪60年代初国外就有用于桥面融冰雪的实践^[4]. 目前, 国内外已经形成了一定规模的发热电缆采暖和融冰雪供需市场. 但是, 发热电缆用于沥青路面融冰雪也存在明显的技术缺陷. 首先, 由于沥青路面的工作特性, 需要将发热电缆埋置在一定深度(4~6 cm)之下才能有效保护电缆自身和结构的耐久性, 而沥青混合料本身导热不良, 埋深与电缆绝缘层对其向上传热效率影响巨大, 进而形成结构耐久性与融冰雪效率的一对矛盾. 其次, 电缆铺设间距视融冰雪所需单位面积上的加热功率与电缆的线发热功率而定, 通常为10~20 cm^[5]. 间距过大使电缆间冰雪在一定环境条件下无法完全消融或局部加热温度过高, 间距过小则建设成本上升, 这也形成一对矛盾. 同时, 发热电缆以串联或局部串联接入电路, 损坏后局部失效面积较大.

(2) 导电发热沥青铺装层

导电沥青混合料概念源于导电水泥混凝土, 可追溯到19世纪60年代^[6], 通过在路面材料中掺入

石墨、导电纤维及导电集料等导电性物质实现绝缘体向导体的转变^[7-8],从而通电发热。导电沥青混合料或导电水泥混凝土的路用性能^[9]与普通路面材料无明显的差异,用于铺装层不影响结构受力,局部破损失效范围较小,从而保证结构耐久性无虞。

通过接入直流或交流浮地电路,理论上允许把非绝缘的导电发热系统设计成磨耗层,但是当前用作磨耗层的实践还只是限于导电水泥混凝土^[10-11]。相对而言,导电沥青混合料用于表层时的老化、开裂等问题对电阻率都有显著影响^[12],同时,按照跨步电压设计的开放式浮地电路并非绝对安全(或至少使人心心理上如此),导电沥青混合料作为表层的研究方案基本都停留在理论分析及小板试验阶段。出于安全考虑,大多数研究还是将其设定成夹在有一定绝缘能力的路面材料结构层之间的“三明治”方案^[13]。“三明治”方案难以避免发热层相当大的自身蓄热与向上传热的双重耗能,相对而言能耗高而效率低^[14]。

(3) 电热格栅

电热格栅方案源于发热电缆。由于发热电缆分布稀疏导致表面加热不均匀,而绝缘保护层降低了加热效率;当使用分布密集而纤细的电缆(电阻丝)时,又担心腐蚀与沥青路面的变形将损伤电缆或整个加热系统。碳纤维强度高、模量大、热转化效率高,随着碳纤维工业的发展,出现了用碳纤维发热线代替发热电缆,用碳纤维丝代替电阻丝的探索性研究。蔡浩田^[15]提出在1.5~2.0 cm 水泥混凝土下铺设连续碳纤维丝作为融冰雪热源的技术设想,Zhao等^[16]提出将碳纤维发热线埋置在路面结构中使碳纤维丝通电实现发热,姜宝龙^[17]又将其发展为单向导电的格栅。这种格栅制作简单、安装容易,除了发热功能之外,对沥青路面的受力也有利。分析表明,电热格栅自身很少蓄热且均匀分布的特性使其比“三明治”式导电沥青混合料铺装层和发热电缆的效率有所提高。但是,用少量涂料或沥青黏附在格栅上的碳纤维丝未被有效绝缘或为不可靠绝缘,当前按照可靠绝缘的发热电缆进行的电路与结构设计的系统存在安全问题,且局部损坏即会导致大面积失效的可能。

1.2 电热沥青膜

电热沥青膜是作者提出的新方案,它采用导电沥青胶浆,按封层或黏层工艺铺设在沥青上面层与沥青下面层或是磨耗层与下承层之间,接入直流或者交流的浮地电路。相对于发热电缆和电热格栅,电热沥青膜方案不改变路面结构,应用工

艺简单,发热均匀,局部损坏后系统不失效;而相对于导电沥青混合料铺装层,电热沥青膜自身的蓄热很少,发热与传热效率更高,成本也低得多。其布置方案如图1所示。

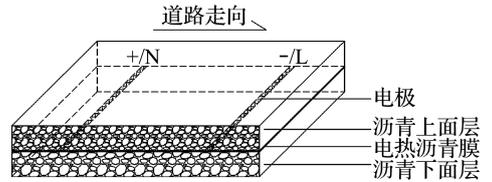


图1 电热沥青膜方案示意图

Fig.1 Schematic diagram of the electric heating asphalt film scheme

电热沥青膜的接电方式与“三明治”结构的导电沥青混合料铺装层相同,为了产生足够的单位面积热功率,导体断面远小于后者的电热沥青膜必须采用电阻率足够低的材料,否则就要突破安全电压或采用密集布置的电极。因此,用于电热沥青膜的导电沥青材料的开发就成为了本方案的技术关键。

2 电热沥青膜材料的开发

2.1 材料开发目标

若已知输入电压且设定目标发热功率(设电热转化效率100%),可按式(1)计算导体的电阻;已知导体尺寸的情况下,则可进一步由式(2)推算导体的电阻率。

$$R=U^2/P \quad (1)$$

$$\rho=RS/L \quad (2)$$

式中: R 为电阻, Ω ; U 为电压, V ; P 为功率, W ; ρ 为电阻率, $\Omega \cdot m$; S 为导体横截面积, m^2 ; L 为导体长度, m 。

研究表明,在典型冬季负温环境下,能够有效持续融雪的路面发热功率为 $300 \sim 400 W/m^2$ ^[2,10]。设目标发热功率不低于 $400 W/m^2$,每米的输入电压为 $72 V$ (按跨步电压为 $36 V$ 安全电压控制),算得每平方米导电黏层的电阻应小于 13Ω ;若电热沥青膜厚度为 $1 \sim 2 mm$ (按黏层兼起封层作用时的用量为 $1 \sim 2 L/m^2$ 计),则此时电热沥青膜材料的电阻率要低于 $1.3 \times 10^{-2} \sim 2.6 \times 10^{-2} \Omega \cdot m$ 。在这个目标基础之上,电阻率越低则越有利于在低电压条件下提高发热功率或节省电极材料。

铺设在沥青铺装层间,起到黏结、防水、加热功能的材料还应考虑常温与特定加热温度下的抗剪切和抗拉拔能力。根据仿真与化冰试验分析,融冰雪时层间电热沥青膜最高加热温度远低于夏季

高温天气时的温度,所以电热沥青膜的抗剪与抗拉拔强度至少要优于黏层材料.另外鉴于施工过程中上层热铺沥青混合物可能对已成型电热沥青膜的影响,开发目标中还应加入电热沥青膜抗施工扰动能力的探究.

除导电和力学指标外,施工工艺相关指标及改善措施如乳化或稀释也应被考虑,限于篇幅本文暂不讨论.

2.2 组成材料选择

出于功能、成本两方面考虑,电热沥青膜的基础材料选用石油沥青.而为使属于绝缘材料的沥青导电则需根据复合材料导电机理添加导电材料.复合材料的导电机理主要可分为3种:a.隧道效应理论或场致发射效应理论;b.通道理论;c.渗流理论^[18].前两种理论从微观角度来解释复合材料的导电现象,用于描述弱导电效应或是伴随导电的情况.而渗流理论解释的是宏观上当复合材料中导电组分达到足够的比例——渗滤阈值,复合材料内导电材料相互接触形成良好导电网络的情况.

为不影响路用性能并达到合适的电阻率,与本文相近的导电沥青混合物开发中^[19],常用的添加材料包括导电纤维、导电集料和导电填料3类.其中,金属纤维、碳纤维及钢渣等是按照理论c添加的导电材料;而石墨或炭黑通常是按照理论a和b所添加的材料.显然,若使电热沥青膜这种沥青胶浆的电阻率尽可能小,按理论c考虑的接触导电是最有效的形式,因此本研究选取单丝丰富的碳纤维作为主要的导电添加材料,进一步根据理论a和b,引入石墨来增强导电效果与传热效果.

同时选择这两种导电添加材料的理论依据是:(1)石墨粉末粒子弥补碳纤维丝不能完全搭接的缺点,而碳纤维为石墨颗粒间发生跃迁的电子提供流通路径,两者互相作用提高沥青胶浆的导电性;(2)沥青胶浆中可容纳分散的纤维丝和石墨的数量都受限,过多则影响分散均匀性及基础路用性能,均匀分布于沥青中的石墨可以减少沥青与纤维的离析,起到稳定体系的作用;(3)两种添加材料的化学性质稳定,不与沥青发生化学反应,高温下仍可保持本身特性,有利于电热沥青膜的耐久性,同时普遍认为纤维可显著提高复合材料的力学性能;(4)控制成本也是同时选择这两种导电添加材料的考虑因素.

理论上,除石墨与碳纤维掺量之外,碳纤维长度对胶浆的导电性和力学性能也将产生影响,相同掺量时碳纤维越长越有利于相互搭接形成导电

网络降低材料的电阻率.作者同时采用6 mm和12 mm两种规格的碳纤维进行的胶浆导电对比试验也证明:相同掺量条件下(2%碳纤维,5%~10%石墨)后者比前者的电阻率降低1/3~1/2.但是,考虑胶浆与混合料的不同,较长纤维不利于搅拌分散和薄膜成型时的施工,本研究选取了较短的6 mm碳纤维.

表1、表2、表3分别列出了本研究所采用的石油沥青、短切碳纤维和石墨的技术参数.

表1 石油沥青技术参数

Tab.1 Technical parameters of petroleum asphalt

针入度(25℃, 5 s)/0.1 mm	软化点/℃	延度(15℃)/cm	布氏黏度(mPa·s, 135℃)
87.3	46.2	>100	310

表2 短切碳纤维技术参数

Tab.2 Technical parameters of short carbon fiber

单丝直径/ μm	抗拉强度/GPa	抗拉模量/GPa	含碳量/%($\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$)	密度/ $(\text{g}\cdot\text{cm}^{-3})$	体积电阻率/ $(\Omega\cdot\text{cm})$
7.0~10.0	3.6~3.8	240~280	≥ 95	1.76	1.5×10^{-3}

表3 石墨技术参数

Tab.3 Technical parameters of graphite

型号	含碳量/%	电阻率/ $(\Omega\cdot\text{cm})$	粒径/ μm	密度/ $(\text{g}\cdot\text{cm}^{-3})$	吸油量/ $(\text{g}\cdot 100^{-1}\text{g}^{-1})$
CDP-1	99.2	3.89×10^{-3}	7	2.16	60

2.3 以导电性为控制指标的配比优化

涂川俊等^[20]、程景^[21]的相关研究及试验表明,沥青混合物中石墨的掺量不宜超过沥青用量的25%,而碳纤维的掺量宜在1%~3%.同时在国内相关研究中,普遍采用渗滤阈值确定导电材料的最佳掺量.本研究采用同样的理论,设计了两因素多水平均匀试验方法以寻求碳纤维与石墨的最佳掺量及其导电性影响规律.其中,碳纤维掺量 c_1 取沥青质量的1%、2%和3%3个水平;而石墨掺量 c_2 取0~20%,级差5%,5个水平.

2.3.1 试件制备 试拌表明,保证胶浆充分混合的条件是较低的沥青黏度与足够的搅拌时间,保证碳纤维均匀分散的拌合投料工序是熔融热沥青→石墨→碳纤维.制备时沥青加热温度高于150℃,每步搅拌时间宜控制在3~5 min.

将熔融态的胶浆浇筑于5 cm×2 cm×1 cm的长条形陶瓷模具中并修平表面,条形模具两端

放入与截面大小相同的网状金属电极并引出导线,试件冷却至室温后以伏安法测电阻。

2.3.2 配比优化 按照前述试验方法得到的测试结果列于表4。

表4 各掺配比例下胶浆电阻率测试结果

Tab.4 The test results of mortar resistivity at different mixing ratios

碳纤维 掺量/%	不同石墨掺量下电阻率/($10^{-2} \Omega \cdot m$)				
	0	5%	10%	15%	20%
1	5.31	4.12	3.76	3.53	3.41
2	2.73	1.12	0.94	0.87	0.85
3	1.50	0.82	0.78	0.73	0.71

测试结果显示,碳纤维与石墨掺量都对电阻率具有明显的影响。不同石墨掺量情况下,3%碳纤维掺量的电阻率相对1%碳纤维掺量平均下降78%,而相对2%碳纤维掺量平均下降69%;2%与3%碳纤维掺量相对1%碳纤维掺量的差距为9%,由此可以确定碳纤维的导电渗滤阈值为1%~2%。不同碳纤维掺量情况下,胶浆电阻率随石墨掺量提高而降低,但5%石墨掺量处具有明显的拐点,这说明石墨的渗滤阈值在5%左右。按 $1.3 \times 10^{-2} \sim 2.6 \times 10^{-2} \Omega \cdot m$ 的目标,同时考虑成本控制,2%的碳纤维与5%的石墨是最优的配比组合。该配比电阻率达到目标指标的低限,完全满足作为电热沥青膜的导电性要求。

3 导电层的导电及力学性能

采用导电胶浆制作黏层模型试件,黏层材料用量用 Q 表示,进行不同胶浆用量下的导电性试验与抗剪切、抗拉拔试验,以检验材料在结构中的导电性和力学表现。同时,试件的制作方法模拟实际施工过程,以检验施工扰动的影响。

3.1 试件准备

试件准备步骤如下:a.首先制备尺寸为 $30 \text{ cm} \times 30 \text{ cm} \times 5 \text{ cm}$ 的SMA-16轮碾成型试件;b.按电热沥青膜厚度估算胶浆用量,将熔融胶浆均匀涂敷于受碾表面,在一对平行边缘粘贴1 cm宽铜网作为电极并引出导线;c.涂敷后的黏层表面稀疏洒布石屑;d.置涂敷黏层的试件于 $30 \text{ cm} \times 30 \text{ cm} \times 10 \text{ cm}$ 试模底部作为复合试件下层,在剩余槽深内投入SMA-13混合料,轮碾压成型作为复合试件上层;e.室温冷却后脱模。复合车辙试件示意图见图2。

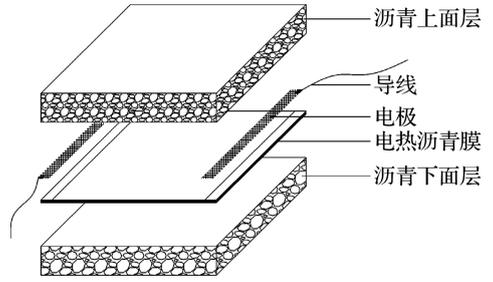


图2 复合车辙试件示意图

Fig.2 Schematic diagram of compound rutting sample

所制试件先用于测电阻,然后切割成 $10 \text{ cm} \times 10 \text{ cm} \times 10 \text{ cm}$ 的试块进行抗剪切和抗拉拔试验。为进行力学性能对比评价,按除c步骤之外的前述方法,以90#基质沥青、普通乳化沥青和SBR乳化沥青为黏层材料制作对比组试件。

3.2 导电性能

取 $0.4 \sim 2.0 \text{ L/m}^2$ 的5组不同导电胶浆用量,按前述方法制作复合试件,以模拟黏层沥青膜厚度为 $0.4 \sim 2.0 \text{ mm}$ (胶浆密度约为 1 g/cm^3)的情况,按伏安法测得电阻来验证制成沥青膜后是否能达到预期目标,并检验施工扰动对沥青膜导电性的影响。试验表明, 0.4 L/m^2 组无法形成连续沥青膜,电路表现为断路。将其他4组数据与计算电阻绘于图3。

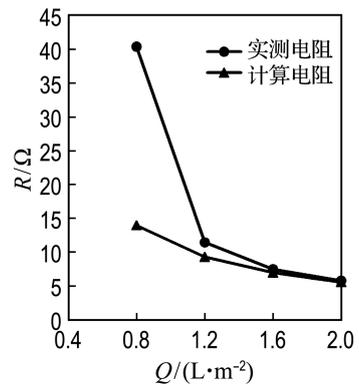


图3 实测电阻与计算电阻对比

Fig.3 Contrast of measured resistance and calculated resistance

图3数据显示实测沥青膜电阻随导电胶浆用量的变化较为显著,用量为 0.8 L/m^2 时的电阻较 1.2 L/m^2 高得多,而 0.4 L/m^2 组表现为断路,所以推断这是由沥青膜厚度与连续性状态所引致的结果。当胶浆用量超过 1.2 L/m^2 后沥青膜的电阻变化不再明显,实测结果亦与计算结果差异不大,其电阻率计算结果差异也可能是沥青

膜估算厚度的误差所致. 上述分析说明, 若需形成连续的导电通路, 导电沥青胶浆的用量至少要达到 1.2 L/m^2 .

另一方面, 层间沥青膜的导电连续性可能会在上层施工时被破坏. 但是当导电胶浆用量高于 1.2 L/m^2 时, 实测电阻与按电阻率计算所得电阻相差无几. 因此可以认为: 当导电胶浆用量高于 1.2 L/m^2 时, 上层铺筑不会对沥青膜的导电连续性造成显著影响, 其抗施工扰动能力较强.

3.3 抗剪切性能

抗剪切试验温度为 25°C , 采用异形夹具以 $\theta=45^\circ$ 斜剪模拟实际受力状态, 加载速率为 20 mm/min , 其试验装置示意图见图 4, 试验结果绘于图 5.

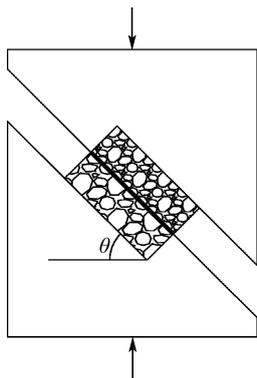


图 4 抗剪切试验装置示意图

Fig. 4 Schematic diagram of shear test device

由图 5 可见, 4 种材料的抗剪强度都在 $0.8 \sim 1.2 \text{ L/m}^2$ 取得峰值, 而导电沥青胶浆的峰值相对偏后, 该最大抗剪强度用量能同时保证达到合理的电阻率水平. 导电沥青胶浆的抗剪强度小于 SBR 乳化沥青, 但好于普通乳化沥青和 90# 基质沥青, 满足目标要求.

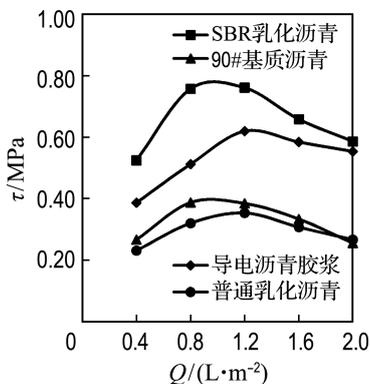


图 5 抗剪强度对比曲线

Fig. 5 Contrast curves of anti-shear strength

3.4 抗拉拔性能

抗拉拔试验的试验温度为 25°C , 以环氧树脂粘贴试件顶部和底部于夹具上, 然后进行直接拉伸, 加载速率为 20 mm/min , 其试验装置示意图见图 6, 试验结果绘于图 7.

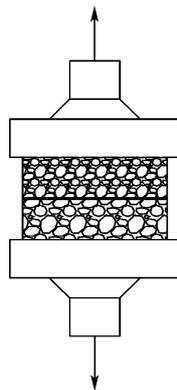


图 6 抗拉拔试验装置示意图

Fig. 6 Schematic diagram of anti-drawing test device

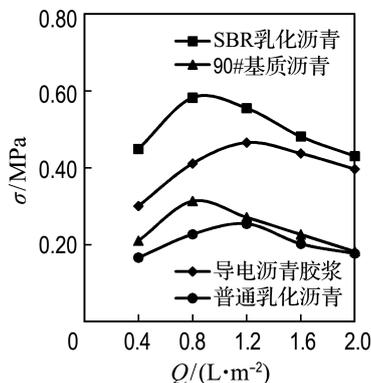


图 7 抗拉拔强度对比曲线

Fig. 7 Contrast curves of anti-drawing strength

由图 7 可知, 不同黏层材料的抗拉拔强度随用量的变化趋势与抗剪强度基本相同, 随用量的增加表现为先增大再减小, 存在一个 $0.8 \sim 1.2 \text{ L/m}^2$ 的最优用量范围. 与抗剪强度相同, 导电沥青胶浆的抗拉拔强度峰值也出现在 1.2 L/m^2 . 上述的强度峰值恰好与合理电阻水平相契合, 充分满足预期设想. 同时其强度高于 90# 基质沥青与普通乳化沥青, 也达到了目标需求.

4 材料成本分析

按第 3 章结论, 同时满足导电与力学性能指标的导电沥青胶浆的建议用量为 $1.2 \sim 1.6 \text{ L/m}^2$, 取中间用量 1.4 L/m^2 ; 而胶浆中含碳纤维 2%、石墨 5%, 即每平方米使用碳纤维约 26 g , 使

用石墨约 65 g,按沥青 4 000 元/t、碳纤维 150 元/kg、石墨 20 元/kg 计,则电热沥青膜的成本约为 10.8 元/m²;若考虑电热沥青膜本身替代黏层或封层,则增加的成本仅为 5.2 元/m²。

就材料成本将电热沥青膜方案与同为“三明治”结构的导电沥青混合料方案进行对比,后者的碳纤维用量约为混合料用量的 0.1%^[12,17-18,21],按 5 cm 层厚计算的碳纤维用量约为 120 g/m²,增加的成本为 18 元/m²。可见导电胶浆的材料成本不到导电沥青混合料的 1/3。另外同为“三明治”结构的两种方案的接电方式接近或相同,但电热沥青膜结构的单位面积电阻为 550~1 100 Ω,而导电沥青混合料为 1 000~2 000 Ω(按 5 cm 层厚、电阻率 50~100 Ω·m),这样前者所耗用的电极材料的用量(长度)约为后者的一半。

5 结 论

(1)提出了通电加热融冰雪的电热沥青膜方案,该方案采用开放的浮地电路,相对发热电缆或电热格栅具有不影响路面结构,局部损伤不失效的优点;相对导电沥青混合料方案自身蓄热少、能耗低。

(2)基于试验得出适于电热沥青膜的材料优化配比为石墨 5%、6 mm 碳纤维 2%,该配比的电阻率约为 $1 \times 10^{-2} \Omega \cdot m$,达到导电性能要求。

(3)通过黏层复合试件的导电与力学性能测试试验,验证了电热沥青黏层在路面结构中的导电性能。同时,满足薄层结构导电性能的胶浆用量需高于 1.2 L/m²,该用量与抗剪切和抗拉拔试验的峰值用量相契合,从而使电热沥青膜(黏层)能同时满足导电发热的功能性要求和作为黏层的力学性能要求,并且该用量下电热沥青膜连续性得到保证,具有一定抗施工扰动能力。

(4)满足相同发热功率要求的电热沥青膜的材料所增加成本不到导电沥青混合料铺装层方案的 1/3,且耗用的电极材料相对更少。

综上所述,采用所提出的电热沥青膜方案和所开发的导电沥青胶浆铺筑融雪化冰路面值得进一步研究。

参考文献:

[1] PAN Pan, WU Shaopeng, XIAO Feipeng, *et al.* Conductive asphalt concrete: A review on structure design, performance, and practical applications [J]. *Journal of Intelligent Material Systems and*

Structures, 2015, **26**(7):755-769.

- [2] XU Shilang, YU Wenting, SONG Shide. Numerical simulation and experimental study on electrothermal properties of carbon/glass fiber hybrid textile reinforced concrete [J]. *Science China Technological Sciences*, 2011, **54**(9):2421-2428.
- [3] DERWIN D, BOOTH P, ZALESKI P, *et al.* Snowfree, heated pavement system to eliminate icy runways [C]// *FAA In-Flight Icing/Ground De-Icing International Conference and Exhibition*. Chicago: SAE International, 2003.
- [4] MINSK L D. Heated Bridge Technology: Report on ISTE A Sec. 6005 Program: FHWA-RD-99-158 [R]. Washington D C: Federal Highway Administration, 1999.
- [5] 李炎锋, 武海琴, 王贯明, 等. 发热电缆用于路面融雪化冰的实验研究 [J]. *北京工业大学学报*, 2006, **32**(3):217-222.
- LI Yanfeng, WU Haiqin, WANG Guanming, *et al.* Experimental study on the electrical road heating system for snow melting [J]. *Journal of Beijing University of Technology*, 2006, **32**(3):217-222. (in Chinese)
- [6] YEHIA S, TUAN C Y. Conductive concrete overlay for bridge deck deicing [J]. *ACI Materials Journal*, 1999, **96**(3):382-390.
- [7] HUANG Baoshan, CHEN Xingwei, SHU Xiang. Effects of electrically conductive additives on laboratory-measured properties of asphalt mixtures [J]. *Journal of Materials in Civil Engineering*, 2009, **21**(10):612-617.
- [8] WANG Haopeng, YANG Jun, LIAO Hui, *et al.* Electrical and mechanical properties of asphalt concrete containing conductive fibers and fillers [J]. *Construction and Building Materials*, 2016, **122**:184-190.
- [9] WU Shaopeng, MO Liantong, SHUI Zhonghe, *et al.* Investigation of the conductivity of asphalt concrete containing conductive fillers [J]. *Carbon*, 2005, **43**(7):1358-1363.
- [10] 唐祖全, 李卓球, 侯作富, 等. 导电混凝土电热层布置对路面除冰效果的影响 [J]. *武汉理工大学学报*, 2002, **24**(2):45-48.
- TANG Zuquan, LI Zhuoqi, HOU Zuofu, *et al.* Influence of setting of electrical conductive concrete heating layer on effectiveness of deicing [J]. *Journal of Wuhan University of Technology*, 2002, **24**(2):45-48. (in Chinese)
- [11] TUAN C Y. Electrical resistance heating of conductive concrete containing steel fibers and shavings [J]. *ACI Materials Journal*, 2004,

- 101(1):65-71.
- [12] 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 Ning. Study on conductive characteristic and application of conductive asphalt concrete [D]. Wuhan: Wuhan University of Technology, 2014. (in Chinese)
- [13] CAGGIANO M F. Route 130 Bridge Snowfree Installation Electrical Analysis Recommendations; FHWA 1998-008 [R]. Trenton: New Jersey Department of Transportation, 1998.
- [14] 康厚荣, 张谢东, 李红. 导电碳纤维抗凝冰路面除冰性能比较研究[J]. 武汉理工大学学报(交通科学与工程版), 2013, 37(4):676-679.
KANG Hourong, ZHANG Xiedong, LI Hong. Melting ice performance study of carbon fiber anti-ice asphalt pavement [J]. *Journal of Wuhan University of Technology (Transportation Science & Engineering)*, 2013, 37(4):676-679. (in Chinese)
- [15] 蔡浩田. 具有融雪功能的连续碳纤维电热混凝土路面板的研制[J]. 玻璃钢/复合材料, 2009(2):56-60.
CAI Haotian. Research on snow-melting concrete road panels by heating electrically continuous carbon fibers [J]. *Fiber Reinforced Plastics/Composites*, 2009(2):56-60. (in Chinese)
- [16] ZHAO Hongming, WANG Songgen, WU Zhimin, *et al.* Concrete slab installed with carbon fiber heating wire for bridge deck deicing [J]. *Journal of Transportation Engineering*, 2010, 136(6):500-509.
- [17] 姜宝龙. 碳纤维/玻璃纤维格栅增强沥青混凝土加热电阻稳定性研究[D]. 大连:大连理工大学, 2013.
JIANG Baolong. Study on resistance stability of carbon/glass fiber geogrid reinforced asphalt concrete [D]. Dalian: Dalian University of Technology, 2013. (in Chinese)
- [18] 叶家军, 吴学伟, 丁庆军, 等. 导电沥青混合料导电机理及电热性能研究[J]. 武汉理工大学学报, 2009, 31(9):16-20.
YE Jiajun, WU Xuewei, DING Qingjun, *et al.* Electrically conductive mechanism and electrothermal performance of conductive asphalt mixtures [J]. *Journal of Wuhan University of Technology*, 2009, 31(9):16-20. (in Chinese)
- [19] GARCÍA Á, SCHLANGEN E, VAN DE VEN M, *et al.* Electrical conductivity of asphalt mortar containing conductive fibers and fillers [J]. *Construction and Building Materials*, 2009, 23(10):3175-3181.
- [20] 涂川俊, 夏金童, 卢学峰. 复合型炭系导电发热涂料的研究[J]. 中南大学学报(自然科学版), 2005, 36(1):25-28.
TU Chuanjun, XIA Jintong, LU Xuefeng. Conductive and heating coating with compound carbon-fillers [J]. *Journal of Central South University (Science and Technology)*, 2005, 36(1):25-28. (in Chinese)
- [21] 程景. PAN基碳纤维导电沥青混凝土研究[D]. 长沙:长沙理工大学, 2010.
CHENG Jing. Research on conductive asphalt concrete with PAN-based carbon fiber [D]. Changsha: Changsha University of Science & Technology, 2010. (in Chinese)

Material development and performance study for electric heating asphalt film

WANG Liming*, WU Wenjie

(School of Civil Engineering, Northeast Forestry University, Harbin 150040, China)

Abstract: In order to improve the efficiency of electric heating system for deicing pavement and solve problems of current techniques, an electric heating asphalt film scheme for deicing is proposed and the advanced study on its material components and performance is carried out. The electric heating asphalt film is made of conductive mortar which is a mixture of graphite, short carbon fiber and asphalt. The film whose resistivity could be low as $1 \times 10^{-2} \Omega \cdot m$ can be paved between layers by the construction technology of tack coat or seal coat. Conductive performance tests conducted by the engineering state simulation prove that it has achieved the resistance value of deicing power when it is paved with the dosage of tack coat and the construction process does not significantly affect its continuity. At the same time, the mechanical property tests show that the asphalt film made of conductive mortar can fully meet the interlayer anti-shear and anti-drawing technical requirements.

Key words: road engineering; electric heating asphalt film; shear test; resistivity; carbon fiber; graphite