

疏水防冻路面封层制备与评价方法研究

吴松¹, 韩森^{*1}, 王康², 张琛¹, 姚杨宜¹, 黄可¹, 李杨¹

(1. 长安大学公路学院, 陕西西安 710064;

2. 长安大学理学院, 陕西西安 710064)

摘要: 针对我国冬季道路降雪结冰导致交通事故的问题, 研究制备了一种疏水防冻路面封层(hydrophobic antifreeze pavement sealing layer, HAPSL). 测试水滴滑落时间比较其疏水效果, 表征疏水性能; 采用层间剪切试验、直接拉拔试验和钢球锤击防覆冰试验比较其降低冰层与路面间黏附力的效果, 表征防冻性能. 采用车辙试验、低温弯曲蠕变试验、冻融劈裂试验以及铺砂法、摆式摩擦仪(BPT)分别验证稳定性和抗滑性能. 结果表明: HAPSL具有较强的疏水及防冰抑冰性能, 能够延缓道路结冰, 降低冰层与路面间的黏附力; 虽然对稳定性和抗滑性能有一定的不利影响, 但均满足规范要求, 能够确保道路的正常使用. HAPSL具有实用价值, 可为其他疏水路面、自融雪路面的研究和铺筑提供参考.

关键词: 道路工程; 疏水剂; 乳化沥青; 防冻路面; 路用性能

中图分类号: U414

文献标识码: A

doi: 10.7511/dllgxb201905011

0 引言

道路行车安全问题是世界各国道路工作者们关注的主要问题之一. 近年来, 全球气候变化多端, 极端天气频繁造访, 我国冬季降雪增多, 由降雪导致的道路结冰问题严重. 道路表层降雪结冰后, 道路的部分抗滑性能损失, 汽车的制动距离增大, 对汽车的动力性以及安全性产生危害, 增加汽车使用成本, 也容易出现交通事故, 由此造成道路通行能力下降, 并且给行人安全造成严重威胁. 同时, 在清除道路积雪结冰时, 耗费诸多人力、物力, 这些对我国经济的平稳发展造成了严重的不利影响.

国内外除冰雪方法主要分为主动型和被动型两类. 被动型方法有撒融雪剂、人工及机械清除等, 虽然除冰效果较好, 但是容易对环境及道路本身造成危害. 主动型融雪技术中, 盐化物融雪路面存在盐化物成分析出规律不易掌握和耐久性不强等弊端; 热力融雪路面前期投资较大, 同时设备需要经常维护; 橡胶颗粒混合料铺筑路面则会发生弹性颗粒从道路中剥落现象^[1]. 因此国内外学者都致

力于研制更加有效和环保的自防冻和疏水路面.

国内外学者对融雪防冰路面做了大量的研究. 基于路面热性能的融雪防冰路面有以下几种: Li等^[2]开发了一种包括碳纳米纤维聚合物(CNFP)的新型道路除冰系统, 并基于瞬态热传导理论开发了复合介质热传导数学模型; Mohammed等^[3]研究了一种用于除冰融雪的新型电阻加热方法, 将碳纤维嵌入混凝土测试其加热性能; Gao等^[4]测试了含有钢丝绒纤维沥青混合物的微波加热性能; Xu等^[5]研究了一种用于热质耦合融雪过程的模拟方法, 可以准确预定特定深度的系统热耗, 在实现特定融雪特性的过程中避免过高的热通量; Liu等^[6]研究了加拿大多个城市使用地热能桩融雪系统清洁技术的可行性, 发现其性能较好. 基于热能对道路冰雪进行融化, 除冰效果较好, 但是耗能较大, 并且需添加电阻、纤维等材料, 造成道路成本增加.

基于路面自应力混凝土材料的融雪防冰路面有以下几种: Sun等^[7]研究了感应加热和微波加

收稿日期: 2019-04-01; 修回日期: 2019-07-21.

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51578076); 中央高校基本科研业务费专项资金资助项目(300102219207).

作者简介: 吴松(1994-), 男, 硕士生, E-mail: 1576638950@qq.com; 韩森*(1958-), 男, 博士, 教授, 博士生导师, E-mail: hyram_hs@chd.edu.cn.

热自愈沥青混合料的冰雪融化特性,评价混合料自愈性能;Chen等^[8]用沥青黏合剂和聚氨酯制备混凝土,研究其路面表层的除冰防冰性能;李耘禄^[9]通过室内融冰、盐析出、冻结试验等研究了多孔抑冰集料抑冰抗滑磨损层的抑冰除雪性能。基于自应力混凝土材料的路面,裂缝表面上融化的冰水阻止了裂缝的自愈,发挥融雪防冰的作用有限。

基于路面涂层的融雪防冰路面有以下几种:李月光等^[10]研究了ZnO超疏水材料路面抗凝冰技术的疏水防冰性能;Gao等^[11]研究了超疏水性沥青混凝土在不同工况下的防冰和除冰性能;Zakerzadeh等^[12]研究了不同疏水涂层和不同喷涂量的疏水性能;Peng等^[13]研究了在沥青路面上制备超疏水有机硅涂层的防冰性能;杨晓飞^[14]研究了疏水乳化沥青涂层不同喷涂量的融雪除冰性能。对于路面涂层,耐磨耗性能较差,耐久性不足,而且对于路面的抗滑性能损失较大。因此本研究制备一种疏水乳化沥青混合料封层,研究其疏水及防冰抑冰性能,并对路用性能进行验证。

1 试验过程

1.1 试验原材料

试验所需的主要材料有乳化剂、沥青、疏水剂、界面剂和水。

(1)乳化剂为山东优索化工科技有限公司生产的十八烷三甲基氯化铵(1831);沥青为SK-70#沥青(针入度74(0.1 mm),10℃延度、15℃延度均大于100 cm,软化点48.1℃)。

(2)疏水剂为南京天诗新材料科技有限公司生产的粉状物质,主要成分为聚四氟乙烯(PTFE),结构式如图1所示。该疏水剂分子结构稳定,具有超强的疏水性能,并且具有优良的耐化学性、抗老化性和耐紫外线性,适用温度范围很广,尤其能够在低温环境下发挥作用。PTFE使用

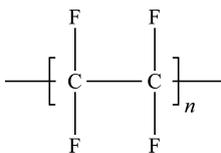


图1 聚四氟乙烯结构式

Fig. 1 Structural formula of polytetrafluoroethylene

较多,在化学工艺、汽车及航空领域、防水涂料等方面应用极其广泛^[15-16]。但是该物质不易溶于其他材料,将其与沥青等物质混合时需要做进一步处理。

(3)界面剂为盖州市恒达化工有限责任公司生产的硅烷偶联剂KH-560,其分子式为 $\text{C}_9\text{H}_{20}\text{O}_5\text{Si}$ 。该物质为无色无味透明液体,可以在有机基质与无机增强剂间提供混合连接。当触至材料表面时,分子中含有的两种基团会分别向极性相近的材料表面扩散^[17-18]。当硅烷偶联剂与乳化沥青及疏水剂接触时,两端分别与沥青分子、疏水剂分子结合,其偶联作用机理如图2所示。

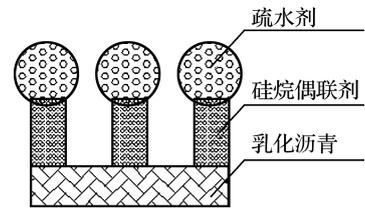


图2 硅烷偶联剂作用机理示意图

Fig. 2 Schematic diagram of the action mechanism of silane coupling agent

1.2 试验内容及方法

1.2.1 疏水乳化沥青制备 将疏水剂、界面剂和少量水按照一定比例拌制成乳液(疏水剂用量分别为0%、2%、4%,界面剂用量为0.4%),然后加入已制备好的乳化沥青,在缓慢加入乳液同时,利用高速搅拌装置使其充分混合均匀。展开相关试验对制备好的疏水乳化沥青测试常规性能,测试结果见表1,测试结果均满足《公路工程沥青及沥青混合料试验规程》(JTG E20—2011)要求。

1.2.2 混合料设计 矿料级配选用ES-2(中)型级配,初步确定用水量为矿料用量的6%,按照《微表处和稀浆封层技术指南》(交公便字[2005]329号)要求,进行拌合试验和黏聚力试验测试,然后根据负载车轮黏砂试验和湿轮磨耗试验结果确定油石比范围,最终选用9.5%作为最佳油石比进行混合料设计。混合料设计完成后,将其摊铺于试件表面,约1 cm厚。

1.2.3 水滴滑落时间测试 对水滴滑落时间进行测试,将车辙板试件倾斜一定角度,对普通试件和含HAPSL(疏水剂用量分别为0%、2%、4%)的4组各3个试件分别在该角度下,用胶头滴管

表 1 疏水乳化沥青常规性能测试

Tab. 1 Routine performance test of hydrophobic emulsified asphalt

测试项目	测试结果	是否满足要求	测试方法
蒸发残留物含量	$P=65.81\%$	$>60\%$, 满足要求	T0651—1993
蒸发残留物性质 (针入度, 软化点, 延度)	针入度 57(0.1 mm), 软化点 50.8 °C, 15 °C 延度 67.4 cm	针入度为 45~150(0.1 mm), 满足要求 15 °C 延度 ≥ 40 cm, 满足要求	T0604—2011、T0606—2011 T0605—2011
1 d 储存稳定性试验	$S_s=2.45\%$	$<5\%$, 满足要求	T0655—1993
5 d 储存稳定性试验	$S_s=2.91\%$	$<5\%$, 满足要求	T0655—1993
筛上剩余量试验	$P=0.027\%$	$\leq 0.1\%$, 满足要求	T0652—1993

滴上水滴后, 观测水滴滑落时间. 如果水滴滑落较快, 说明该种路面的疏水性能较强, 反之较弱. 该过程的操作示意图如图 3 所示.

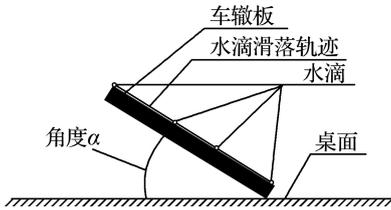


图 3 水滴滑落时间测试示意图

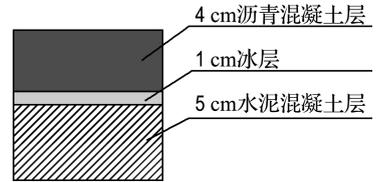
Fig. 3 Schematic diagram of water drop slip time test

1.2.4 层间剪切试验 进行层间剪切试验, 以评价疏水防冻封层降低冰层与路面间黏附力的效果. 利用层间剪切力来表征 HAPSL 的防冰抑冰能力. 本试验所用层间剪切仪为长安大学道路与机场铺面研究中心自主研发的 HS-SS I 型直剪仪^[19].

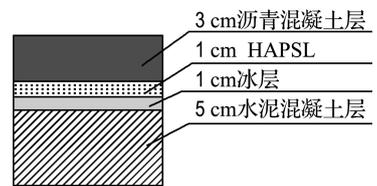
试验所用试件: 普通试件和含 HAPSL(疏水剂用量分别为 0%、2%、4%) 的 4 组各 3 个试件, 其直径为 10 cm、高度约为 10 cm(实验组: 3 cm 沥青混凝土层+1 cm HAPSL+1 cm 冰层+5 cm 水泥混凝土层, 对照组: 4 cm 沥青混凝土层+1 cm 冰层+5 cm 水泥混凝土层), 试件如图 4 所示.

1.2.5 直接拉拔试验 进行直接拉拔试验, 利用极限拉拔强度进行表征, 以评价 HAPSL 降低冰层与路面间黏附力的效果. 试验所用试件与层间剪切试验相同, 即普通试件和含 HAPSL(疏水剂用量分别为 0%、2%、4%) 的 4 组各 3 个试件.

1.2.6 钢球捶击防覆冰试验 利用 425 g 钢球在 1 m 高度处自由下落进行试验, 如图 5 所示, 1 为高度调节转轮, 2 为钢球下落位置, 3 为底座, 4 为试件. 利用重力势能转化的动能对冰层进行



(a) 普通试件



(b) 含 HAPSL 试件

图 4 试件示意图

Fig. 4 Schematic diagram of test piece

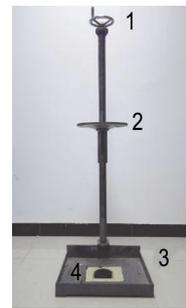


图 5 钢球捶击防覆冰试验

Fig. 5 Steel ball slamming anti-icing test

捶击, 基于数字图像处理技术提取图像特征^[20-21], 测算捶击后冰层的破损面积, 用冰层破损面积进行表征, 用以评价 HAPSL 降低冰层与路面间黏附力的效果. 试验所用试件为马歇尔试件, 成型方法见《公路工程沥青及沥青混合料试验规程》(JTG E20—2011), 包括普通试件和含 HAPSL(疏水剂用量分别为 0%、2%、4%) 的 4 组各 3 个试件.

冰层破损面积的测算步骤如下：

(1)对图像进行灰度化：将拍摄所得的彩色 RGB 图像采用加权平均法转换成灰度图像。

(2)采用最大方差阈值的方式选定合适的阈值，将灰度图像经过阈值分割、二值化处理得到只有 0 和 1 两个灰度级（即图像只有黑、白两色）的二值图像。

(3)Matlab 读取二值图像，得到关于图像的矩阵和灰度级为 1、0 的像素点个数，然后分别计算其与总像素点的占比。

(4)将白色像素点占像素总点数的比例与试

件的总面积相乘，得到冰层破损面积。

1.2.7 其他路用性能试验 用疏水乳化沥青制作的沥青混合料铺筑于路面，势必造成原路面的高温稳定性、低温抗裂性、水稳定性及抗滑性能等路用性能下降，因此有必要对其路用性能进行验证，看是否满足规范要求。按照《公路工程沥青及沥青混合料试验规程》(JTG E20—2011)要求，对该种路面的稳定性进行验证，同时测试其抗滑性能，试件类型同样为普通试件和含 HAPSL(疏水剂用量分别为 0%、2%、4%)的 4 组各 3 个试件。测试内容见表 2。

表 2 路用性能测试内容

Tab.2 Road performance test content

序号	指标	试验类型	试件尺寸	试件数量	试验方法
1	60℃动稳定度/(次·mm ⁻¹)	高温稳定性	300 mm×300 mm×50 mm	3	T0719—2011
2	破坏最大应变/10 ⁻⁶	低温抗裂性	250 mm×30 mm×30 mm	3	T0715—2011
3	冻融劈裂强度比/%	水稳定性	d=101.5 mm,h=63.5 mm	4	T0729—2000
4	摆值	抗滑性能	300 mm×300 mm×50 mm	3	T0964—2008
5	构造深度/mm	抗滑性能	300 mm×300 mm×50 mm	3	T0961—1995

2 试验结果与讨论

2.1 水滴滑落时间测试结果

表 3 为 4 组试件在不同倾斜角度下的水滴滑落时间测试结果。因为 3 组试验的试验结果差异不大，与平均值的差值均在 5% 范围内，故在此选择 3 组平行组试验结果的平均值。

表 3 水滴滑落时间测试结果

Tab.3 Test result of water drop slip time

α	水滴滑落时间/s			
	普通试件	含 HAPSL 试件		
		疏水剂 0%	疏水剂 2%	疏水剂 4%
10°	27.21	26.38	18.32	14.57
15°	19.89	19.73	13.64	10.31
20°	17.54	16.21	12.52	8.95

由表 3 可知，含 HAPSL 的试件，其水滴滑落时间较短，且随着疏水乳化沥青中疏水剂用量的增加疏水性逐渐增强，但增强比例逐渐下降。在涂层制备好之后，连接于乳化沥青分子上的聚四氟乙烯分子会成膜，作为高分子材料，其薄膜是由纵横交错的纤维丝互相连接而成，纤维丝之间形成微孔，微孔的孔径为 0.3 μm，水滴的最小直径约

为 900 μm^[22]，是微孔的 3 000 倍，所以聚四氟乙烯薄膜会阻止液态水通过，具备较强的疏水性能。试验结果表明，用疏水乳化沥青制备的 HAPSL 具有较好的疏水性能，利于路面积水的排出。

2.2 层间剪切试验结果

图 6 为普通试件和含 HAPSL 功能层的 4 组试件层间剪切试验结果。因为 3 组试验结果差异不大，与平均值的差值均在 5% 范围内，因此选择 3 组平行组试验结果的平均值进行分析。

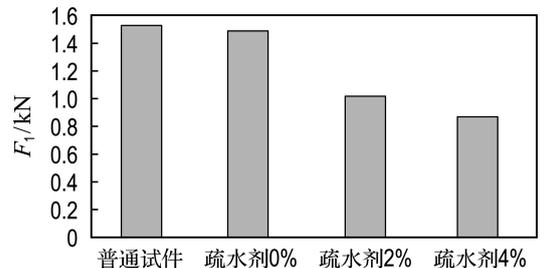


图 6 层间剪切试验结果

Fig.6 Interlaminar shear test results

由图 6 可知，普通试件的层间剪切力平均值为 1.53 kN；而对于含 HAPSL 的试件，疏水剂为 0% 时层间剪切力为 1.49 kN，疏水剂为 2% 时层

间剪切力为 1.02 kN, 疏水剂为 4% 时层间剪切力为 0.87 kN. 聚四氟乙烯分子成膜之后, 其表面水滴的润湿程度较普通路面下降, 水分子与路面间的接触面积减小, 因此在道路结冰后, 冰层与路面的黏附面积较小, 并且在道路结冰后, 冰层与路面的黏附面积较小, 并且冰层较薄, 因此层间剪切力较小. 试验结果表明, HAPSL 具有较好的降低冰层与路面间黏附力的作用, 路面上的冰层较薄, 并且与路面的黏附力较小, 经过车轮碾压作用后, 冰层易于破碎, 便于后期清除.

2.3 直接拉拔试验结果

图 7 为普通试件和含 HAPSL 功能层的 4 组试件直接拉拔试验结果. 因为 3 组试验结果差异不大, 与平均值的差值均在 5% 范围内, 因此选择 3 组平行组试验结果的平均值进行分析.

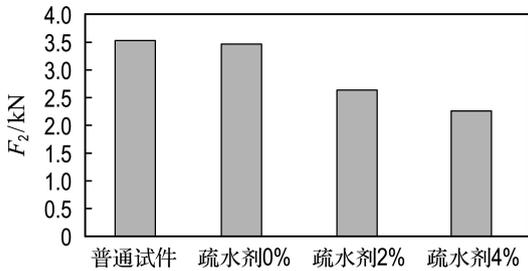


图 7 直接拉拔试验结果

Fig. 7 Direct pull-out test results

由图 7 可知, 普通试件的抗拉强度平均值为 3.52 kN; 而对于含 HAPSL 的试件, 疏水剂为 0% 时抗拉强度为 3.47 kN, 疏水剂为 2% 时抗拉强度为 2.64 kN, 疏水剂为 4% 时抗拉强度为 2.27 kN. 在 HAPSL 表面的聚四氟乙烯薄膜对液态水的抵制和阻止作用, 使得水滴与路面之间的接触面积较小, 在道路结冰后, 冰层底部会出现凹凸不平的结构, 因此冰层与路面之间的黏附力较小, 直接拉拔试验的最大拉应力减小. 该试验结果也表明 HAPSL 具有较好的降低冰层与路面间黏附力的作用, 路面上的冰层较薄, 与路面的黏附力小, 易于清除.

2.4 钢球捶击防覆冰试验结果

图 8 为试验过程中普通试件和含 HAPSL 功能层 4 组试件 1 次钢球捶击冰层破损情况. 图 9 为普通试件和含 HAPSL 功能层 4 组试件冰层破损面积 S 的测算结果. 3 组试验结果差异不大, 与平均值的差值均在 5% 范围内, 因此选择 3 组平

行组试验结果的平均值进行分析.

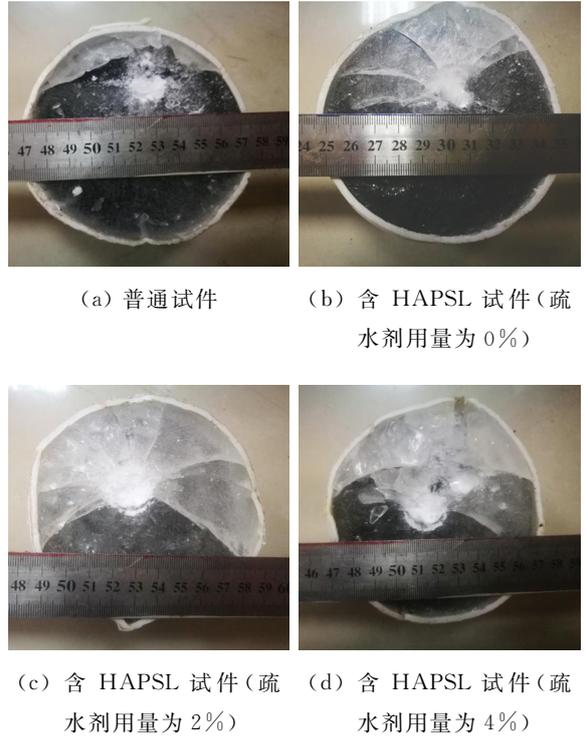


图 8 冰层破损效果图

Fig. 8 Ice layer damage effect map

由图 8 可以看出, 在钢球作用后, 普通试件只有些许冰层破损, 而含 HAPSL 的试件冰层破损较为严重, 并且在周围裂纹较多, 可以直观表明含有防冻封层的试件冰层与路面间黏附力较小, 同样能够说明疏水防冻封层具有较好的降低冰层与路面间黏附力的作用.

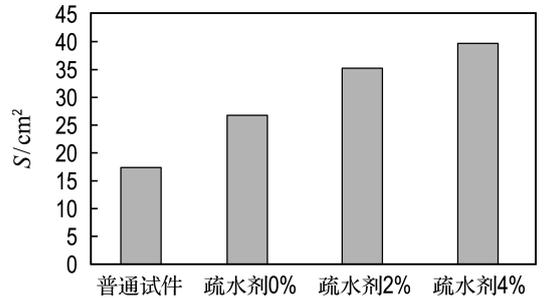


图 9 冰层破损面积测算结果

Fig. 9 Ice layer damage area measurement results

由图 9 可知, 普通试件的冰层破损面积为 $17.417 cm^2$; 而对于含 HAPSL 的试件, 疏水剂为 0% 时冰层破损面积为 $26.793 cm^2$, 疏水剂为 2% 时冰层破损面积为 $35.164 cm^2$, 疏水剂为 4% 时

冰层破损面积为 39.675 cm²。在 HAPSL 表面的聚四氟乙烯薄膜对液态水具有抵制和阻止作用,使得水滴与路面之间的接触面积较小,在道路结冰后,冰层底部会出现凹凸不平的结构,在钢球捶击、车轮碾压等外力作用下,冰层易于破碎,因此冰层破损面积较大。该试验结果也表明疏水防冻封层具有较好的降低冰层与路面间黏附力的作用。

2.5 其他路用性能试验结果

表 4 为普通试件和含 HAPSL 功能层 4 组试件高温、低温和水稳定性的测试结果,图 10、11 分别为普通试件和含 HAPSL 功能层 4 组试件摆值与构造深度的测试结果。其中图表中数据为 3 个平行组的平均值,因为 3 个平行组的试验结果差异不大,与平均值的差值均在 5% 范围内,因此选择 3 组平行组的平均值进行分析。

表 4 高温、低温和水稳定性试验结果

Tab. 4 High temperature, low temperature and water stability test results

试件及规范	60℃动稳定度/(次·mm ⁻¹)	破坏最大应变/10 ⁻⁶	冻融劈裂强度比/%
普通试件	8 423	3 411	88.4
疏水剂 0%	8 099	3 270	84.3
疏水剂 2%	6 975	2 958	82.1
疏水剂 4%	6 632	2 794	81.7
规范值	5 500	2 500	80.0

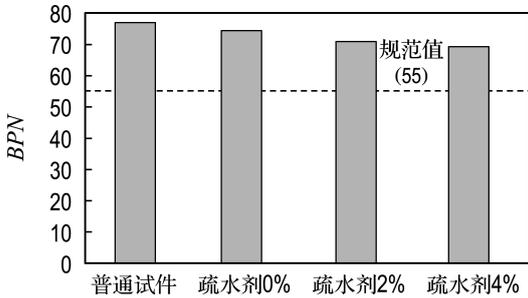


图 10 摆值测试结果

Fig. 10 BPN value test results

由表 4 可知,对于铺筑有疏水防冻封层的试件,其高温、低温及水稳定性均较普通试件有所下降,因为含 HAPSL 的试件因其表面具有 1 cm 厚的封层,封层采用疏水乳化沥青制备,因此相对于普通沥青混合料而言高温、低温及水稳定性会略低,但是仍然符合《公路工程沥青及沥青混合料试

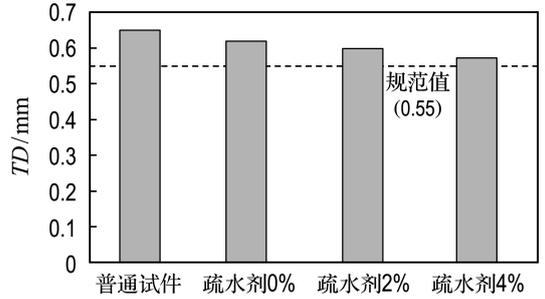


图 11 构造深度测试结果

Fig. 11 Texture deep test results

验规程》(JTG E20—2011)要求,能够满足道路使用过程中必要的稳定性需求。

由图 10、11 可知,对于铺筑有 HAPSL 的试件,不论其摆值还是构造深度均较普通试件而言有所下降,因为加铺 HAPSL 后,其表面的聚四氟乙烯分子形成薄膜,涂覆于道路表面,造成路面的部分微观纹理损失,抗滑性能略微下降,但是仍然符合《公路沥青路面设计规范》(JTG D50—2017)要求,满足道路使用过程中必需的抗滑性能。

3 结 论

(1)HAPSL 具有较强的疏水性能,相较于普通试件,含防冻封层的试件水滴滑落时间在试件位于不同倾斜角度下均有所减少,且减少比例随疏水剂用量增加而增加,说明疏水防冻封层的疏水性能较强,路面上的积水不易停留而发生结冰现象。

(2)HAPSL 具有较强的降低路面与冰层间黏附力的作用,相对于普通试件,含防冻封层的试件层间剪切力与拉拔强度大幅减小,同时钢球捶击防覆冰试验后冰层破损面积大幅增加,说明疏水防冻封层降低路面与冰层间黏附力的效果比较明显,路面上的结冰易碎,易于清扫。

(3)经过疏水性能、路面和冰层间黏附力性能测试,发现当疏水剂用量从 0% 增加到 2% 时,性能提升显著;而当疏水剂用量从 2% 增加到 4% 时,性能提升程度下降。考虑到疏水剂聚四氟乙烯的成本较高,选用疏水剂用量 2% 为最佳,因此 HAPSL 的最佳配比为界面剂、疏水剂、乳化剂、水、沥青的质量比为 1 : 5 : 5 : 100 : 150。

(4)HAPSL 具有优良的疏水性能,并且能有效降低路面和冰层间黏附力,同时对路面的稳定

性和抗滑性能有微小的不利影响,但是其性能仍然满足规范要求.

参考文献:

- [1] CHEN Huaxin, WU Yongchang, XIA Huiyun, *et al.* Review of ice-pavement adhesion study and development of hydrophobic surface in pavement deicing [J]. **Journal of Traffic and Transportation Engineering (English Edition)**, 2018, **5**(3): 224-238.
- [2] LI Hui, ZHANG Qiangqiang, XIAO Huigang. Analytic investigations of CNFP-based self-deicing road system on the deicing performance [J]. **Cold Regions Science and Technology**, 2014, **103**: 123-132.
- [3] MOHAMMED A G, OZGUR G, SEVKAT E. Electrical resistance heating for deicing and snow melting applications: Experimental study [J]. **Cold Regions Science and Technology**, 2019, **160**: 128-138.
- [4] GAO Jie, GUO Haoyan, WANG Xiaofeng, *et al.* Microwave deicing for asphalt mixture containing steel wool fibers [J]. **Journal of Cleaner Production**, 2019, **206**: 1110-1122.
- [5] XU Huining, WANG Dawei, TAN Yiqiu, *et al.* Investigation of design alternatives for hydronic snow melting pavement systems in China [J]. **Journal of Cleaner Production**, 2018, **170**: 1413-1422.
- [6] LIU Hongwei, MAGHOUL P, BAHARI A, *et al.* Feasibility study of snow melting system for bridge decks using geothermal energy piles integrated with heat pump in Canada [J]. **Renewable Energy**, 2019, **136**: 1266-1280.
- [7] SUN Yihan, WU Shaopeng, LIU Quantao, *et al.* Snow and ice melting properties of self-healing asphalt mixtures with induction heating and microwave heating [J]. **Applied Thermal Engineering**, 2018, **129**: 871-883.
- [8] CHEN Jun, MA Xie, WANG Hao, *et al.* Experimental study on anti-icing and deicing performance of polyurethane concrete as road surface layer [J]. **Construction and Building Materials**, 2018, **161**: 598-605.
- [9] 李耘禄. 抑冰抗滑磨耗层的材料设计与路用性能分析 [D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2017.
- [10] 李月光, 许荣华, 伊书国. ZnO 超疏水表面材料用于路面抗凝冰技术性能研究 [J]. 武汉理工大学学报 (交通科学与工程版), 2018, **42**(2): 221-225.
- LI Yueguang, XU Ronghua, YI Shuguo. Study on performance of superhydrophobic surface material for anti-condensation technology of pavement [J]. **Journal of Wuhan University of Technology (Transportation Science & Engineering)**, 2018, **42**(2): 221-225. (in Chinese)
- [11] GAO Yingli, QU Liangchen, HE Bei, *et al.* Study on effectiveness of anti-icing and deicing performance of super-hydrophobic asphalt concrete [J]. **Construction and Building Materials**, 2018, **191**: 270-280.
- [12] ZAKERZADEH M, ABTAHI S M, ALLAFCHIAN A, *et al.* Examining the effect of different super hydrophobic nanomaterials on asphalt pavements [J]. **Construction and Building Materials**, 2018, **180**: 285-290.
- [13] PENG Chao, ZHANG Hao, YOU Zhanping, *et al.* Preparation and anti-icing properties of a superhydrophobic silicone coating on asphalt mixture [J]. **Construction and Building Materials**, 2018, **189**: 227-235.
- [14] 杨晓飞. 寒冷地区沥青路面疏水防冰抗滑技术研究 [D]. 西安: 长安大学, 2017.
- YANG Xiaofei. Research on hydrophobic anti-ice and anti-skid technology of asphalt pavement in cold region [D]. Xi'an: Chang'an University, 2017. (in Chinese)
- [15] VENNER W V, PUTS G J, CROUSE P L. Influence of initiators on the sintering discolouration of PTFE [J]. **Journal of Fluorine Chemistry**, 2019, **217**: 63-71.
- [16] EBNESAJJAD S. Polytetrafluoroethylene: properties and structure [M] // **Expanded PTFE Applications Handbook: Technology, Manufacturing and Applications**. Amsterdam: Elsevier, 2017: 9-24.
- [17] WEI Qiang, WANG Weihong. Properties of phenol formaldehyde resin modified with silane coupling agent (KH550) [J]. **International Journal of Adhesion and Adhesives**, 2018, **84**: 166-172.

- [18] CHEN Lei, WANG Yajie, Zia-ud-Din, *et al.* Enhancing the performance of starch-based wood adhesive by silane coupling agent (KH570) [J]. **International Journal of Biological Macromolecules**, 2017, **104**(Part A): 137-144.
- [19] 杨忠, 赵宝俊, 刘梦梅, 等. 水性环氧树脂乳化沥青黏层材料的层间性能 [J]. **筑路机械与施工机械化**, 2018, **35**(9): 51-55.
- YANG Zhong, ZHAO Baojun, LIU Mengmei, *et al.* Research on interlayer properties of waterborne epoxy resin emulsified asphalt for tack coat [J]. **Road Construction Machinery and Construction Mechanization**, 2018, **35**(9): 51-55. (in Chinese)
- [20] 王一珺. 图像特征提取算法研究及应用 [D]. 南京: 南京农业大学, 2015.
- WANG Yijun. Research and application of image feature extraction algorithm [D]. Nanjing: Nanjing Agricultural University, 2015. (in Chinese)
- [21] YOON D C, MOL A, BENN D K, *et al.* Digital radiographic image processing and analysis [J]. **Dental Clinics of North America**, 2018, **62**(3): 341-359.
- [22] 宁跃龙. 聚四氟乙烯膜材料的服用性能及应用研究 [D]. 石家庄: 河北科技大学, 2019.
- NING Yuelong. Study on wearability and application of PTFE membrane materials [D]. Shijiazhuang: Hebei University of Science and Technology, 2019. (in Chinese)

Research on preparation and evaluation method of hydrophobic antifreeze pavement sealing layer

WU Song¹, HAN Sen^{*1}, WANG Kang², ZHANG Chen¹,
YAO Yangyi¹, HUANG Ke¹, LI Yang¹

(1. Highway School, Chang'an University, Xi'an 710064, China;

2. College of Science, Chang'an University, Xi'an 710064, China)

Abstract: Aiming at the traffic accident caused by snow and ice in winter roads in China, a hydrophobic antifreeze pavement sealing layer (HAPSL) is prepared. For comparing its hydrophobic effect and characterizing the hydrophobic performance, the water drop slip time experiment is employed. For showing effect of the adhesion between the ice and pavement, and the ice suppression performance, the interlaminar shear test, direct pull-out test and steel ball slamming anti-icing test are employed. For verifying the stability and anti-slip performance, the rutting test, low temperature bending creep test, freeze-thaw split test, sand patching method and pendulum type friction coefficient measuring instrument (BPT) test are employed. The results declare that the HAPSL has strong hydrophobic and anti-icing performance, and can delay the road freezing and reduce the adhesion between ice and pavement. The HAPSL has certain adverse effects on stability and slip resistance, but all meet the requirements of the specification to ensure the common use of the road. The HAPSL can be applied to hydrophobic pavements and might provide reference for research of hydrophobic pavement and self-melting snow pavements.

Key words: road engineering; hydrophobic agent; emulsified asphalt; antifreeze pavement; road performance