

透水沥青路面表面抗飞散性能提升技术研究

刘少华¹, 潘宝峰¹, 许斌^{2,3*}, 赵军辉¹, 王凯⁴, 曹东伟^{2,3}

(1. 大连理工大学 交通运输学院, 辽宁 大连 116024; 2. 中路高科(北京)公路技术有限公司;
3. 交通运输部公路科学研究院; 4. 石家庄市交建高速公路建设管理有限公司)

摘要:为了研究透水沥青路面表面抗飞散性能提升技术,采用自制的环氧树脂作为黏结材料,制备一种环氧树脂砂浆,对透水沥青路面表面进行补强。通过室内试验研究分析环氧树脂砂浆对排水沥青混合料渗水性能、抗滑性能、抗飞散性能以及高温老化和冻融循环后的抗飞散性能,并进行实体工程应用以及效果评价。结果表明:环氧树脂砂浆用于透水沥青混合料试件表面后,可以在确保渗水性能以及抗滑性能的前提下,提高排水沥青路面抗飞散能力。在经历高温老化和冻融循环后,透水沥青路面表面抗飞散性能提升技术仍然可以提高排水沥青路面抗飞散性能。透水沥青路面实体工程采用 2 kg/m^2 (0.2 g/cm^2) 的环氧树脂砂浆用量,应用效果表明环氧树脂砂浆可以提高透水沥青路面抵抗飞散病害的能力。

关键词:道路工程; 透水沥青路面; 环氧砂浆; 抗飞散性能

透水沥青路面具有大孔隙、开级配的特性,在排水、抗滑以及降噪等诸多方面具备优势,该种路面具有抗滑性能高、抑制雨天行车水雾、提高行车安全性以及舒适性、降低噪声等技术特点,是世界公认的高安全性功能路面。与此同时这种粗集料相互嵌挤形成的骨架型结构也有其负面影响。在外部环境和交通荷载的影响下,透水沥青路面最主要的结构病害形式是飞散掉粒以及飞散掉粒引发的坑槽。针对透水沥青路面飞散病害,预防性养护技术是目前最有效的手段。荷兰研发了 PenTack 沥青功能恢复性材料和 Modimuls[®] ZV 预防性养护材料以及预防性材料专用的洒布车,并全面测试和评估预防性养护的应用效果;Zhang, Y 采用喷洒还原剂的手段对人工老化的透水沥青混合料和透水沥青路面进行预防性养护,延长了透水沥青路面的使用寿命,同时研究了表面处理技术有助于提高透水沥青路面抵抗飞散病害的能力;美国早期主要采用雾状封层对 OGFC 路面进行结构性养护,目前应用更多的是采用还原剂养护 OGFC 路面;中国的透水沥青路面应用较晚,许斌研发了 3 种不同类型的预防性养护材料,并依托沈海高速公路在南通到盐城段实施了预防性养护试验段;交通运输部公路科学研究院在江苏宁宿徐高速公路透水沥青路面罩面工程采用渗透性树

脂材料进行表面强化技术应用,取得了良好的应用效果。目前,针对飞散掉粒主要采用喷洒还原剂进行预防性养护,其原理主要是改善老化沥青的性质或者在透水沥青路面覆盖一层未老化的沥青膜,从而延缓透水沥青路面的飞散病害。

在透水沥青路面的一些特殊路段,如长大纵坡处、道路交叉口、曲线超高段等,飞散掉粒病害发生的时间更早,破坏程度也更严重。为了抑制透水沥青路面飞散掉粒病害的发生,该文研发一种用于透水沥青路面表面抗飞散性能提升的渗透性环氧砂浆,对透水沥青路面表面进行补强,提高透水沥青路面抵抗飞散病害的能力,以提高透水沥青路面的服务寿命。

1 试验材料

1.1 环氧砂浆原材料

(1) 环氧树脂

黏结材料采用试验室自制的 3 种环氧树脂,均为双组分常温固化型,其技术指标见表 1。

(2) 机制砂

骨料采用 0~3 mm 单粒径机制砂,技术指标见表 2,规格要求见表 3。

收稿日期:2020-07-12(修改稿)

基金项目:河北省交通运输厅科技项目(编号:XF2018-10);国家科技部国防合作项目(编号:2016YFE0108200)

作者简介:刘少华,男,博士研究生, E-mail:262125100@qq.com

* 通信作者:许斌,男,博士,副研究员, E-mail:xubin8191@126.com

表 1 环氧树脂技术指标

环氧树脂	抗拉强度 (23 ℃)/MPa	断裂伸长率 (23 ℃)/%	热固性 (300 ℃)
环氧树脂 A	22	71	不熔不流
环氧树脂 B	19	123	不熔不流
环氧树脂 C	16	183	不熔不流

表 2 机制砂技术指标

项目	单位	检测值
表观相对密度		2.725
坚固性(>0.3 mm 部分)	%	1.8
含泥量	%	0.4
亚甲蓝值	g/kg	0.5
砂当量	%	83
棱角性(流动时间)	s	36

表 3 机制砂规格要求

筛孔尺寸/mm	通过率/%	筛孔尺寸/mm	通过率/%
4.75	100	0.3	≤10
2.36	≥90	0.15	≤4
1.18	≥75	0.075	≤2
0.6	≤35		

(3) 色粉

环氧砂浆凝固后略显黄色,为了使环氧砂浆凝固后和路面颜色趋于一致,在环氧砂浆内加入黑色色粉,其技术指标见表 4。

表 4 色粉技术指标

项目	单位	检测值
颜色(与标准样比较)		近似
相对着色力(与标准样比较)		99
105 ℃挥发物	%	0.8
水溶物	%	0.41
水悬浮液 pH 值		4.3
筛余物(45 μm 筛孔)	%	0.25
吸油量	g/(100 g)	22

1.2 环氧树脂选择

环氧砂浆的固化时间直接影响着透水沥青路面表面抗飞散性能提升技术实施后的开放交通时间,采用试验室自制的 3 种环氧树脂配置环氧砂浆,采用人工

逐时观测的方法判定 3 种环氧砂浆的常温固化时间。通过试验记录得到环氧树脂 A、B、C 配置的环氧砂浆的固化时间分别为 4~5、8~9、13~14 h,综合环氧树脂强度以及环氧砂浆固化时间,选用环氧树脂 A 作为环氧砂浆的原材料。

1.3 环氧砂浆比例研究

透水沥青路面表面抗飞散性能提升技术主要抑制飞散掉粒病害,黏结强度大小决定着其发挥效果的好坏,采用 4 种不同环氧树脂与机制砂的质量比测试拉拔强度,结果如表 5 所示。

表 5 不同环氧树脂与机制砂质量比拉拔试验结果

环氧树脂:机制砂	拉拔强度/MPa
1:4	0.29
1:5	0.32
1:6	0.21
1:7	0.19

由表 5 可以看出:当环氧树脂:机制砂=1:5 时,拉拔强度最大,因此,环氧砂浆采用环氧树脂:机制砂=1:5 的质量比。

1.4 试验试件制备

环氧砂浆主要成分为环氧树脂、黑色色粉、单粒径机制砂,制备步骤如下:

- (1) 环氧树脂双组分按照 3:1 质量比均匀混合。
- (2) 将黑色色粉加入到环氧树脂中,色粉与环氧树脂的质量比为 1:100,搅拌均匀。
- (3) 将含有黑色色粉的环氧树脂与机制砂混合,色粉:环氧树脂:机制砂=0.01:1:5,搅拌均匀。
- (4) 将环氧砂浆按照设计用量均匀涂抹到透水沥青混合料试件表面,环氧砂浆表面覆盖一层脱模纸,并用橡胶锤击实。
- (5) 将涂抹好环氧砂浆的透水沥青混合料试件在常温下养生 24 h,留待进行下一步试验。效果见图 1。



图 1 环氧砂浆表面强化效果

2 试验方法

2.1 渗水性能试验

参照 JTG E60—2008《公路路基路面现场测试规程》中 T0971—2008 的试验方法,采用如下试验步骤进行渗水系数试验研究:

(1) 测试未涂抹环氧砂浆的车辙板试件的渗水系数,得到车辙板试件渗水系数。

(2) 将环氧砂浆以 0.1 g/cm^2 的用量涂抹到车辙板试件表面,养生结束后测试其渗水系数,完成 0.1 g/cm^2 用量的试验。

(3) 继续将环氧砂浆以 0.1 g/cm^2 的用量涂抹到步骤(2)中的车辙板试件表面,养生结束后测试其渗水系数,完成 0.2 g/cm^2 用量的试验。

(4) 重复试验步骤(3)完成 0.3 g/cm^2 以及 0.4 g/cm^2 环氧砂浆用量的渗水系数测试试验。

2.2 单面肯塔堡飞散试验

参照 JTG E20—2011《公路工程沥青及沥青混合料试验规程》中 T0733—2011 的沥青混合料肯塔堡飞散试验方法,并对试验进行相应改进,只对透水沥青混合料试件强化面的飞散损失进行分析,采用如下试验步骤进行试验研究。

(1) 制备好透水沥青混合料马歇尔试件。

(2) 将环氧砂浆以设计用量涂抹到透水沥青马歇尔试件表面,常温下养护 24 h。

(3) 将养护好的透水沥青马歇尔试件在规定的温度下恒温 20 h,称取试件质量 m_0 。

(4) 取出透水沥青马歇尔试件并迅速(1 min 内)采用聚合物高强度胶带将混合料试件未强化的面进行包裹,包裹尺寸应满足胶带距离试件表面不超过 2 cm,保证包裹面的混合料在试验结束后不会碎渣漏出,称取包裹试件质量 m_1 。

(5) 将包裹好试件置入洛杉矶磨耗仪中,开动仪器,按 $30 \sim 33 \text{ r/min}$ 的转速旋转 300 转。仪器停止后,取出剩余最大试件部分,称其质量 m_2 。

(6) 按照式(1)计算试件单面肯塔堡飞散损失率 RR 。

$$RR = \frac{m_1 - m_2}{m_0} \times 100\% \quad (1)$$

2.3 抗滑性能试验

参照 JTG E60—2008《公路路基路面现场测试规程》中 T0964—2008 的试验方法进行摩擦系数试验研

究。试验准备步骤和渗水系数试验类似,环氧砂浆采用逐一涂抹的方式进行。

2.4 抗冻融循环性能试验

参照 JTG E20—2011《公路工程沥青及沥青混合料试验规程》中 T0733—2011 的沥青混合料冻融劈裂试验中的冻融试验方法,结合国内外冻融试验研究方法,对试验进行相应改进,确定以低温 -20°C 和高温水浴 60°C 交替冻融循环用来模拟冬季、夏季的气候及温度循环。具体的试验方法如下:

(1) 成型符合要求的标准马歇尔试件,4 个试件为一组。

(2) 马歇尔试件饱水浸泡 0.5 h,然后真空饱水 15 min,恢复常压浸水 0.5 h,完成试件饱水。

(3) 将饱水后的试件在 -20°C 下冰冻 16 h,然后将试件放入 60°C 水浴箱融化 8 h,此为一次循环。

(4) 重复步骤(3)将试件反复冰冻及融化,直到达到试验所需循环次数为止。

(5) 将完成冻融循环试验后的马歇尔试件参照前文单面肯塔堡飞散试验方法进行试验,得到肯塔堡飞散损失值。

2.5 湿轮磨耗试验

湿轮磨耗仪可以较好地模拟车辆在加速过程中的橡胶轮胎刹车效果和扭力产生的横向剪切作用,车轮运动状态既有滚动又有滑动时的情形,考虑到高温对环氧砂浆的老化作用,采用湿轮磨耗仪进行高温老化后的排水沥青混合料的飞散试验模拟,车辙板试件面积 $S_0 = 900 \text{ cm}^2$,湿轮磨耗直径 $R = 19.7 \text{ cm}$,湿轮磨耗面积 $S_1 = 304.8 \text{ cm}^2$,面积比 $r = \frac{S_1}{S_0} = 0.3387$,故车辙板试件湿轮磨耗质量 $m_0 = m \times r$ 。试验步骤如下:

(1) 排水沥青混合料车辙板试样放入 120°C 烘箱中高温老化 24 h。

(2) 称取老化后放置到常温的车辙板试件质量 m ,并计算车辙板试件湿轮磨耗质量 m_0 。

(3) 将试件装入湿轮磨耗设备的试模中,启动循环水浴,保持所需的试验温度 60°C 恒温水浴养生 1.5 ~ 2 h。

(4) 开启设备,在一定转速进行湿轮磨耗试验,每完成 1 000 次称取车辙试件损失质量 m_n ,统计记录,根据实际情况所需次数完成试验。

(5) 按照式(2)计算试件飞散损失率 ΔS :

$$\Delta S = \frac{m_n}{m_0} \times 100\% \quad (2)$$

3 试验结果与分析

3.1 渗水性能

混合料表面抗飞散性能提升技术前后不同时期的渗水系数,结果如表 6 所示。

表 6 不同环氧砂浆用量下混合料渗水系数试验结果

环氧砂浆用量/(g·cm ⁻²)	渗水系数/(mL·min ⁻¹)
0	6 678
0.1	6 023
0.2	5 703
0.3	5 012
0.4	4 265

按照式(3)计算得到环氧砂浆对渗水系数的影响,结果如图 2 所示。

$$PDR = \frac{C_0 - C}{C_0} \times 100\% \tag{3}$$

式中:PDR 为渗水系数降低率(%);C 为涂抹环氧砂浆后沥青混合料试件的渗水系数(mL/min);C₀为未涂抹环氧砂浆沥青混合料试件的渗水系数(mL/min)。

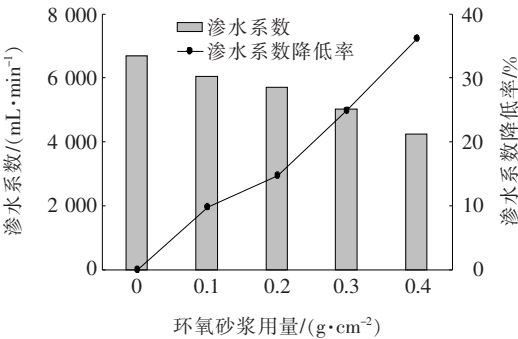


图 2 不同环氧砂浆用量对渗水系数的影响

由图 2 可以看出:采用环氧砂浆对透水沥青混合料试件表面抗飞散性能提升技术后,渗水系数均有所下降,随着环氧砂浆用量的增大,渗水系数下降率也越大。当材料用量为 0.2 g/cm² 以下时,渗水系数下降率在 15% 以下且下降速率相对较平缓;当材料用量超过 0.2 g/cm² 时,渗水系数下降率快速增长且超过 20%。这是因为当环氧砂浆用量过多时,细小的机制砂填充了透水沥青路面表面的空隙且有部分环氧树脂渗入到了混合料内部空隙,在混合料表面形成了一层较为致密的砂浆层阻止了水分快速进入混合料内部空

隙并排出混合料内部。因此在能够满足其他性能要求的同时应尽量减少环氧砂浆的用量。

3.2 抗飞散性能

混合料表面抗飞散性能提升技术前后单面肯塔堡飞散试验结果见表 7。

表 7 不同环氧砂浆用量下混合料飞散损失试验结果

环氧砂浆用量/(g·cm ⁻²)	飞散损失/%
0	6.1
0.1	5.6
0.2	4.8
0.3	5.1
0.4	5.4

按照式(4)计算得到环氧砂浆对抗飞散性的影响,分析结果见图 3 所示。

$$RDR = \frac{RR_0 - RR}{RR_0} \times 100\% \tag{4}$$

式中:RDR 为飞散损失降低率(%);RR 为涂抹环氧砂浆后沥青混合料试件的飞散损失(%);RR₀ 为未涂抹环氧砂浆沥青混合料试件的飞散损失(%)。

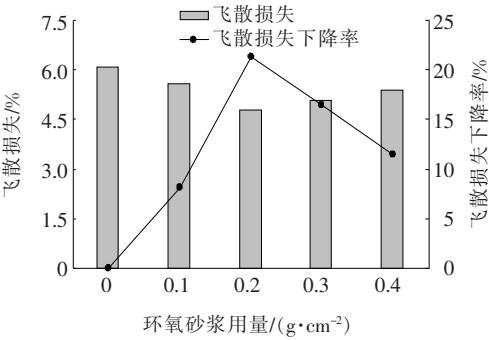


图 3 不同环氧砂浆用量对混合料抗飞散性的影响

由图 3 可以看出:采用环氧砂浆对透水沥青混合料试件表面抗飞散性能提升技术后,飞散损失均呈现一定程度的降低,随着材料用量的增加,飞散损失降低率先增大后减小,这是因为当环氧砂浆用量较少时,细小的机制砂填充了透水沥青路面表面的空隙且有部分环氧树脂渗入到了混合料内部空隙,机制砂较好地黏结在混合料表面,同时环氧树脂具有较强的黏结力,增加了沥青混合料的整体性从而提高了混合料的抗飞散性;当环氧砂浆用量过多时,过多的机制砂附着在混合料表面,在进行试验时,这部分多余的机制砂经过碰撞从混合料表面脱落从而增加了相应的质量损失,因此建议环氧砂浆的用量不宜过多。

3.3 抗滑性能

摆式摩擦系数仪测定不同环氧砂浆用量下混合料的摩擦系数,结果如表 8 所示。

表 8 不同环氧砂浆用量下混合料摩擦系数试验结果

环氧砂浆用量/(g·cm ⁻²)	摩擦系数/BPN
0	66
0.1	64
0.2	64
0.3	63
0.4	63

从表 8 可以看出:采用环氧砂浆对透水沥青混合料试件表面抗飞散性能提升技术后,摩擦系数较原试件呈现较小程度的降低。这是因为细小的机制砂填充了透水沥青路面表面的空隙降低了路面的构造深度,且环氧树脂固化后在混合料表面形成一层薄膜,在初期会降低路面的抗滑功能。

3.4 抗冻融循环性能

根据上文研究内容,选用 0.2 g/cm² 的环氧砂浆用量测试环氧砂浆冻融循环后的抗飞散性能,结果如图 4 所示。

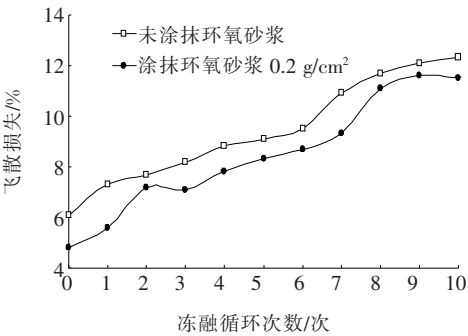


图 4 不同冻融循环次数对混合料抗飞散性的影响

从图 4 可以看出:随着冻融循环次数的增加,两种试件的飞散损失随之增加。涂抹环氧砂浆的试件飞散损失在未涂抹环氧砂浆试件之下,两者的差值有逐步缩小的趋势,说明环氧砂浆在经历多次水浸、冻融作用后性能在逐步降低,但其对排水沥青混合料试件的抗飞散能力仍具备增强作用,抗飞散能力优于未涂抹环氧砂浆的试件。

3.5 湿轮磨耗试验

与抗冻融循环性能试验一样,选取 0.2 g/cm² 的环氧砂浆用量测试环氧砂浆高温老化后的抗飞散能力,结果如图 5 所示。

从图 5 可以看出:两种试件的磨耗损失具有相似的规律,在前期磨耗较慢,飞散较平稳,此阶段主要是磨去混合料表面沥青膜;当油膜几乎损失殆尽时,试件开始加速飞散,集料开始脱落或者断裂;当集料表面磨耗处于较光滑状态时,进入相对稳定阶段,此时飞散趋于平缓。由于环氧砂浆在试件表面形成了保护层,故涂抹环氧砂浆后的试件前期飞散较小,且进入加速飞散的阶段相对更晚,尽管高温对环氧砂浆造成了一定程度的性能影响,但其整体飞散值小于未涂抹环氧砂浆试件。说明在经历高温老化后,环氧砂浆对排水沥青混合料抗飞散能力仍具有较好的增强作用。

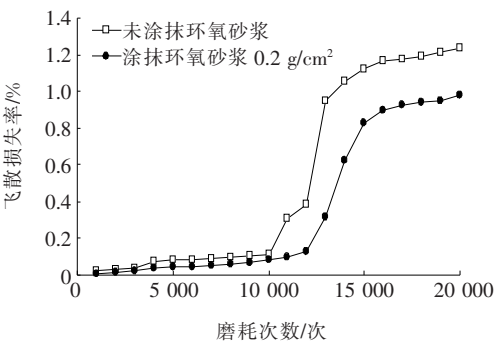


图 5 高温老化对混合料抗飞散性的影响

4 工程应用与效果评价

4.1 施工工艺研究

环氧砂浆的常规摊铺方式包括人工涂抹、小型手推式砂浆摊铺机摊铺以及大型环氧砂浆摊铺机摊铺,针对不同的摊铺方式分析优缺点,总结各种方式的适用条件以及应用范围。结果见表 9。

表 9 环氧砂浆摊铺方式汇总

摊铺方式	优点	缺点	适用范围
人工	操作简单,成本低	人为因素影响较大,涂抹不均匀,效率低	试验室及现场小面积应用
小型手推式摊铺机	简单方便,成本较低	摊铺均匀性不稳定,效率较低	现场中小面积应用
大型摊铺机	摊铺均匀,效率高	成本相对较高	现场大面积应用

4.2 试验段实施

为了评价环氧砂浆用于透水沥青路面表面抗飞散性能提升技术的应用效果,依托西阜高速公路(西柏坡

到阜平方向)透水沥青路面进行环氧砂浆表面抗飞散性能提升技术试验段实施,跟踪观测透水沥青路面表面抗飞散性能提升技术效果,对透水沥青路面表面抗飞散性能提升技术的性能做进一步评价。

(1) 确定材料用量

根据前文研究结果,确定环氧砂浆用于透水沥青路面表面抗飞散性能提升技术的用量为 2 kg/m^2 (0.2 g/cm^2)。

(2) 环氧砂浆表面强化施工

此次试验段较短,故采用人工拌和、人工涂抹以及小型压路机压实的施工方案。压实前需在表面覆盖一层防水油布。施工前需封闭交通保证施工人员安全,施工过程如图 6 所示。

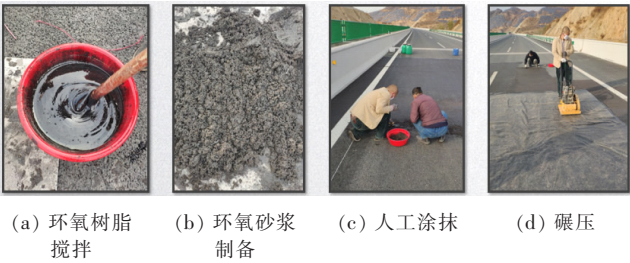


图 6 透水沥青路面表面抗飞散性能提升技术施工流程图

(3) 养生及开放交通

环氧砂浆表面强化施工结束后,应保证路面养生 12 h 及以上,再开放交通。

(4) 应用效果

透水沥青路面表面抗飞散性能提升技术后效果如图 7 所示。



图 7 透水沥青路面表面抗飞散性能提升技术效果图

(5) 性能检测

对透水沥青路面采用了表面抗飞散性能提升技术的路段定期跟踪观测。

4.3 路用效果及性能评价

采用现场检测以及钻取芯样室内试验分析两种方

法对透水沥青路面表面抗飞散性能提升技术的性能进行检测。

(1) 渗水性能

透水沥青路面表面抗飞散性能提升技术前后不同时期的渗水系数试验结果如表 10 所示。

表 10 渗水系数试验结果

路面类型	渗水系数/($\text{mL} \cdot \text{min}^{-1}$)			
	未做提升技术时	提升技术完成时	提升技术完成 3 个月后	提升技术完成 6 个月后
普通排水路面	6 832	6 832	6 261	5 896
表面强化排水路面	6 721	5 701	5 398	5 252

由表 10 可以看出:不管是普通透水沥青路面还是表面抗飞散性能提升技术后的透水沥青路面,渗水功能随着时间增长在衰减;在前 3 个月渗水功能衰减较快,在后 3 个月衰减相对减缓,这是由于在通车初期,外部车辆荷载的压实作用以及外部环境对透水沥青空隙的堵塞,造成空隙率较快下降;到后期外部车辆荷载作用对透水沥青路面不再产生实质压实效应,渗水功能衰减相对前期减缓;抗飞散性能提升技术后的透水沥青路面渗水系数有一定程度的损失,但是在路面投入运营以后,3 个月以及 6 个月的渗水系数衰减速率均小于普通透水沥青路面。

(2) 抗飞散性能

提取透水沥青路面表面抗飞散性能提升技术后芯样,采用前文提出的单面肯塔堡飞散试验测试芯样的抗飞散能力,结果如表 11 所示。

表 11 芯样单面肯塔堡飞散损失试验结果

检测时间	飞散损失/%
未做提升技术时	6.4
提升技术完成时	4.7
提升技术完成 3 个月后	5.5
提升技术完成 6 个月后	6.2

从表 11 可以看出:抗飞散性能提升技术后的透水沥青路面芯样单面肯塔堡飞散损失在不同时期均小于未做表面抗飞散性能提升技术的普通透水沥青路面芯样,说明透水沥青路面表面抗飞散性能提升技术可以增强透水沥青路面抵抗飞散病害的能力。

(3) 抗滑性能

透水沥青路面表面抗飞散性能提升技术前后不同时期的摩擦系数测试结果如表 12 所示。

表 12 摩擦系数试验结果

检测时间	摩擦系数/BPN
未做提升技术时	64
提升技术完成时	62
提升技术完成 3 个月 后	63
提升技术完成 6 个月 后	62

由表 12 可以看出:采用抗飞散性能提升技术后的透水沥青路面摩擦系数变化很小,说明透水沥青路面表面抗飞散性能提升技术对抗滑性能影响不大。

5 结论

- (1) 通过研究提出渗透性环氧树脂砂浆应用于透水沥青路面表面抗飞散性能提升技术,环氧树脂砂浆的质量比为环氧树脂:机制砂:色粉=1:5:0.01,其最佳用量为 0.2 g/cm²。
- (2) 环氧树脂砂浆用于透水沥青混合料表面后,增加了沥青混合料的整体性,提高了混合料的抗飞散性能,同时渗水能力和抗滑性能均满足相关技术要求。
- (3) 排水沥青混合料试件经过数次冻融循环和高温老化后,涂抹环氧树脂砂浆的排水沥青混合料试件抗飞散能力仍然高于未涂抹环氧树脂砂浆的排水沥青混合料试件,表明环氧树脂砂浆具有良好的抗高温老化、水浸以及冻融循环的能力。
- (4) 依托西阜高速公路(西柏坡到阜平方向)透水沥青路面表面抗飞散性能提升技术试验段,进行了实体工程应用以及效果评价。结果表明:环氧树脂砂浆可以提高透水沥青路面抵抗飞散病害能力。

参考文献:

[1] 曹东伟,刘清泉,唐国奇. 排水沥青路面[M]. 北京:人民

交通出版社,2009.

[2] 徐斌. 排水性沥青路面理论与实践[M]. 北京:人民交通出版社,2011.

[3] 丁楚志,周建国,薛东峰,等. 排水路面材料组成设计与应用[J]. 中外公路,2007(1).

[4] 李强,李永弟. 排水沥青路面典型病害成因分析及预防与养护对策[J]. 中国市政工程,2017(2).

[5] 许斌. 排水沥青路面预防性养护技术研究[D]. 大连理工大学博士学位论文,2016.

[6] 周建华,于明明,张利鹏. 国内外透水沥青路面养护技术研究综述[J]. 现代交通技术,2018(6).

[7] Zhang Y, Verwaal W, van de Ven M F C, et al. Using High-Resolution Industrial CT Scan to Detect the Distribution of Rejuvenation Products in Porous Asphalt Concrete[J]. Construction and Building Materials, 2015, 100:1-10.

[8] Zhang Y, van de Ven M F C, Molenaar A A A, et al. Assessment of Effectiveness of Rejuvenator on Artificially Aged Porous Asphalt Concrete [J]. Construction and Building Materials, 2016, 110:286-292.

[9] Zhang Y, van de Ven M, Molenaar A, et al. Preventive Maintenance of Porous Asphalt Concrete Using Surface Treatment Technology[J]. Materials & Design, 2016, 99:262-272.

[10] 汪继平,廉向东,范勇军,等. 南友高速公路排水沥青路面长期性能调查与评价[J]. 中外公路,2020(3).

[11] 段宝东,李俊,曹东伟,等. 融雪剂对排水沥青混合料路用性能的影响[J]. 中外公路,2020(3).

[12] 高桂海,熊梅,钱波. 不同外掺纤维增强排水沥青混合料性能研究[J]. 中外公路,2019(6).

[13] 张德欧,滕小四. 浅谈 OGFC 多孔沥青路面的养护维修技术[C]. 2013 年 6 月建筑科技与管理学术交流会议, 2013.

[14] 卢传忠,许斌,李明亮,等. 透水沥青路面预防性养护技术研究[J]. 公路交通科技(应用技术版),2016(4).

[15] 尘福涛. 排水沥青路面混合料耐久性技术研究[D]. 重庆交通大学硕士学位论文,2016.