

抗滑颗粒对含砂雾封层性能影响

田甜¹, 蒋应军^{*1}, 张文辉¹, 张毅², 陈浙江³

(1. 长安大学 特殊地区公路工程教育部重点实验室, 陕西 西安 710064;
2. 陕西省交通工程咨询有限公司, 陕西 西安 710003;
3. 金华市交通投资集团有限公司, 浙江 金华 321015)

摘要: 为确定含砂雾封层用抗滑颗粒最佳参数,通过加速磨耗试验研究了抗滑颗粒类型、粒径、级配及掺量对含砂雾封层抗滑性及耐久性的影响。结果表明:磨耗 1×10^5 次后,掺玄武砂、天然河砂、金刚砂的3种含砂雾封层试件的摆式摩擦系数(BPN)分别降低了32.8%、32.4%、29.1%,质量损失率分别为61.78%、64.01%、62.46%;与0.3~0.6 mm和1.18~2.36 mm粒径相比,0.6~1.18 mm金刚砂雾封层试件BPN最大,质量损失率最小;与0.6~1.18 mm单粒径相比,0.6~1.18 mm与0.3~0.6 mm混合比例1:1的金刚砂雾封层试件BPN最大,0.6~1.18 mm与0.3~0.6 mm混合比例为1:1.7:3.9:1的金刚砂雾封层试件质量损失率分别减小了4.83%、3.54%、0.39%;金刚砂掺量为0.6 kg/m²的试件磨耗BPN曲线位于最上方,质量损失率最小。建议选取0.6~1.18 mm与0.3~0.6 mm混合比例7:3金刚砂作为含砂雾封层的抗滑颗粒,掺量0.6 kg/m²。经验证,相比不掺加抗滑颗粒雾封胶结料试件及未雾封空白试件,含砂雾封层试件初始BPN分别提高了69.8%和35.2%,而质量损失率比雾封胶结料试件小9.67%。

关键词: 道路工程;含砂雾封层;加速磨耗试验;抗滑颗粒;抗滑性;耐久性

中图分类号: U414

文献标识码: A

doi: 10.7511/dllgxb202203007

0 引言

雾封层作为一种路面预防性养护手段,是采用专用设备将雾封层材料以雾状洒布到路面上形成一层薄薄的封层,填封微小裂缝和表面空隙,还原和保护被氧化的路面,起到防水和抑制松散的作用,同时改善和提升路面形象^[1]。近年来,国内外研究人员对此开展了大量研究。文献[2-6]提出雾封层能够改善路面防水、防渗性能,但一定程度上会降低路面的抗滑性能。Prapaitrakul等^[7]、蒋志军^[8]从流体角度分析雾封层技术在路面封闭微裂缝、防止渗水等方面的机理,提出雾封材料自身的渗透性会直接影响路面抗滑性能。刘先森等^[9]提出雾封层质量控制技术,分析了雾封层密水性和抗滑性的实际效果。韩瑞民等^[10]提出雾封层研究重点应从耐磨性、抗滑性和固结性着手。王朝辉等^[11]结合

SPSS探索性分析结果,建议路面使用雾封层技术后,路面的摆式摩擦系数(BPN)应不小于50。

因此,研究人员开始在雾封材料中掺加抗滑颗粒形成含砂雾封层(或称抗滑雾封层)以改善雾封层的抗滑性能。文献[12-14]认为环氧乳化沥青作为雾封胶结料的含砂雾封层耐磨耗性及抗滑性均优于传统的雾封胶结料,年寿命周期成本低于其他养护方式。Estakhri等^[15]、Prapaitrakul等^[16]研究表明,在雾封层撒布细砂可防止路面短期内抗滑性能迅速下降。文献[17-20]认为含砂雾封层技术可以有效提高路面抗滑性能。王雕鹏^[21]、路俊杰^[22]认为软质颗粒提供的摩擦力较小,抗滑性能较差,而硬质颗粒耐磨耗性能较好,适宜作为路面封层的抗滑颗粒。王利利等^[23]发现以石英砂细集料为抗滑颗粒的雾封层抗滑性有明显提高。陈小庭等^[24]开发了轮胎驱动式路面功能加速加载

收稿日期: 2021-06-27; 修回日期: 2022-03-07。

基金项目: 陕西省交通厅科技项目(16-17K, 20-02K); 河南省交通厅科技项目(2020J-2-2); 浙江省交通厅科技项目(2021067)。

作者简介: 田甜(1996-),女,博士生,E-mail: 2019021033@chd.edu.cn; 蒋应军*(1975-),男,教授,博士生导师,E-mail: jyj@chd.edu.cn。

试验系统,认为雾封层抗滑所用细集料的撒布量及粒径需要进行严格控制. Oduroh 等^[25]提出通过严格控制施工流程和规范撒布量,可避免雾封层施工后短时间内路面再次产生病害. 陈俊宇^[26]研究了水性环氧树脂掺量、砂的粒径与撒布量对含砂雾封层的耐磨耗性能与抗滑性能的影响规律,发现水性环氧树脂掺量主要影响雾封层的耐磨耗性能,撒布砂的粒径主要影响抗滑性能. 同时,现有雾封层材料耐久性差,在早期就会出现磨损现象. 郑敏楠^[27]针对此现象,研发了一种耐久型水性环氧树脂雾封层材料,并优化了配比. 高志明等^[28]、李凯^[29]提出耐久型含砂雾封层的配比设计结果为用砂量 20% 左右、母液固含量 50%~60%. 李炜光等^[30]、戴征等^[31]通过加重磨损试验测试沥青失重、车辙深度、磨损指数等指标,用于评价雾封层的耐久性.

上述研究表明在雾封胶结料中掺加细砂等抗滑颗粒可改善路面抗滑性能,但由于抗滑颗粒与雾封胶结料的黏结性不足、抗滑颗粒规格及标准缺失,含砂雾封层质量参差不齐,耐久性差,通车后会出现抗滑颗粒迅速磨掉、路面泛油、BPN 低于安全行车要求等问题. 鉴于此,本文采用课题组自主研发的环氧乳化沥青雾封胶结料,通过室内加速磨损试验,提出含砂雾封层抗滑性及耐久性的试验方法及评价指标,分析抗滑颗粒类型、粒径、级配及掺量对含砂雾封层抗滑性及耐久性的影响,给出含砂雾封层用抗滑颗粒建议参数并进行验证.

1 试验部分

1.1 原材料

(1) 环氧乳化沥青

采用课题组研发的环氧乳化沥青,主要成分为 BE-4 型乳化沥青、E-44 型水性环氧树脂及水性固化剂,各部分的技术性质见表 1~3. 其中, BE-4 型乳化沥青占比 80%,水性环氧树脂与水性固化剂的比例为 2:1.

(2) 抗滑颗粒

试验用抗滑颗粒为玄武砂、天然河砂及金刚砂,技术性质见表 4.

1.2 试验方案

试验采用单一变量控制法,研究抗滑颗粒的类型、粒径、级配及掺量对含砂雾封层抗滑性及耐久性的影响,提出含砂雾封层用抗滑颗粒建议指标,并与未喷洒雾封胶结料的空白试件及只喷洒

表 1 BE-4 型乳化沥青技术性质

Tab. 1 Technical properties of BE-4 emulsified asphalt

试验项目	测试值	技术要求	试验方法	
破乳速度	慢裂	慢裂	T0658—1993	
粒子电荷	+	阳离子(+)	T0653—1993	
筛上剩余量(1.18 mm 筛)/%	0.01	≧0.1	T0652—1993	
恩格拉黏度计 E_{25}	3.5	1~6	T0622—1993	
含量/%	50.8	≦50	T0651—1993	
蒸发 残留物	针入度 (100 g, 25 ℃, 5 s)/ 0.1 mm	89	50~300	T0604—2011
	延度(15 ℃)/cm	>100	≦40	T0605—2011
常温贮存	1 d	0.2	≧1	T0655—1993
稳定性/%	5 d	2.9	≧5	T0655—1993

表 2 E-44 型水性环氧树脂技术性质

Tab. 2 Technical properties of E-44 waterborne epoxy resin

固含量/%	密度/ (g·cm ⁻³)	破乳速度	可溶解性	水溶液 pH
≥90	0.97~1.03	慢裂	60 °C 水中可 完全溶解	9

表 3 水性固化剂技术性质

Tab. 3 Technical properties of waterborne curing agent

有效成分 含量/%	密度/ (g·cm ⁻³)	黏度/ (mPa·s)	活性 氢当量
50.0±1.0	1.05~1.12	5 000~20 000	287

表 4 抗滑颗粒技术性质

Tab. 4 Technical properties of anti-slip particles

抗滑 颗粒 类型	压碎值/%			表观密度/ (g·cm ⁻³)	含水 率/%
	0.3~ 0.6 mm	0.6~ 1.18 mm	1.18~ 2.36 mm		
玄武砂	12.16	17.99	27.94	2.70	0.3
天然河砂	5.68	11.09	14.53	2.50	0.4
金刚砂	8.91	14.62	20.10	3.59	0.6

雾封胶结料的试件进行性能对比. 其中,雾封胶结料选用环氧乳化沥青,用量为 0.6 kg/m².

1.3 试验方法

(1) 试件成型方法

按照试验规程成型 300 mm×300 mm×50 mm 的车辙板,室温冷却至少 12 h 后脱模;清理车辙板试件表面,测试其质量与 BPN,变异系数不应大于 5%;采用预拌工艺成型试件,分别量取各粒径的抗滑颗粒,将不同粒径颗粒混合搅拌

均匀后加入一定比例的环氧乳化沥青,充分搅拌后形成砂浆混合料;将一定质量的砂浆混合料均匀摊铺在合格的车辙板上,采用刮刀等辅助工具将砂浆混合料摊铺平整(图 1);将试件置于 30 ℃ 鼓风箱内至表干后备用。



图 1 含砂雾封层试件成型

Fig. 1 Sand fog seal specimen molding

(2) 性能评价方法

采用长安大学研发的加速磨耗试验仪(图 2),模拟含砂雾封层使用过程中受到的车辆磨耗作用。仪器的 4 只直径 45 mm 的聚氨酯轮胎在电机作用下绕轴心高速旋转,转动频率为 5 000 r/h,线速度为 84.78 km/h。试验通过加载圆盘调整底部轮胎荷载,竖向荷载设为 0.7 MPa。设备试件安装槽尺寸为 605 mm×605 mm,采用 4 组车辙板试件。

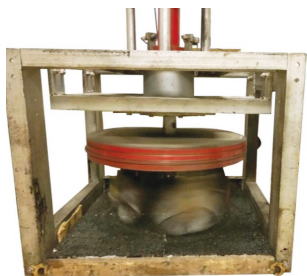


图 2 加速磨耗试验仪

Fig. 2 Accelerated wear tester

试验步骤主要包括:①测量表干后含砂雾封层试件的质量及 BPN;②将 4 块试件依次置于试件安装槽,用螺栓固定;③设定仪器转动频率,前期为 1×10^4 次,逐渐递增至 1×10^5 次,开始加速磨耗试验,待仪器停止转动后取出试件,测定试件质量及磨耗轨迹处的 BPN;④重复前述步骤,放置试件时应按初始顺序保证试件磨耗轨迹与实际磨耗吻合。

一块车辙板可切割为 4 个平行试件,摆式仪测试过程及磨耗轨迹简化模型分别见图 3、4。测定磨耗轨迹中间段处 BPN,根据不同磨耗次数下含砂雾封层试件的 BPN 变化情况评价不同含砂

雾封层试件的抗滑性^[32]。随磨耗次数增加,BPN 越大且减小越慢者,其抗滑性越好。



图 3 摆式仪测试过程

Fig. 3 Test process of pendulum apparatus

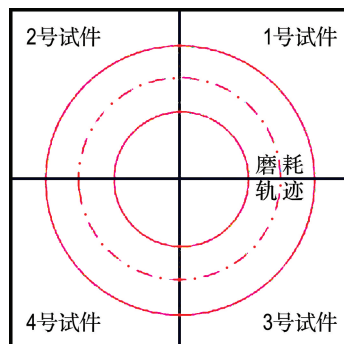


图 4 加速磨耗过程中试件磨耗轨迹

Fig. 4 The wear trajectory of specimens in accelerated wear process

用经过 1×10^5 次磨耗后试件的质量损失率评价不同含砂雾封层试件的耐久性。质量损失率计算见式(1),质量损失率越小,其耐久性越好。

$$M = \frac{m_0 - m_1}{m_b - m_a} \times \frac{A}{A_1} \quad (1)$$

式中: M 为试件质量损失率; m_0 、 m_1 分别为磨耗前后的试件质量; m_a 为成型含砂雾封层前的试件质量; m_b 为含砂雾封层固化后的试件质量; A 为试件面积,即 900 cm^2 ; A_1 为试件的磨耗面积,即 204.88 cm^2 。

2 抗滑颗粒对含砂雾封层性能影响

2.1 颗粒类型对含砂雾封层性能的影响

为研究抗滑颗粒的类型对含砂雾封层抗滑性及耐久性的影响,在雾封层试件表面分别撒布玄武砂、天然河砂及金刚砂,进行加速磨耗试验。

(1) 抗滑性

成型后的 3 种含砂雾封层试件在磨耗过程中 BPN(b_0)变化规律见图 5。其中抗滑颗粒粒径取

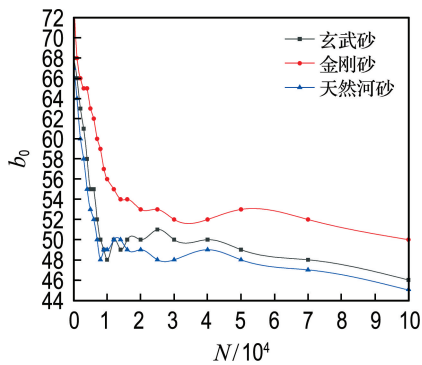


图5 不同类型抗滑颗粒成型试件 BPN 磨耗规律

Fig. 5 BPN wear law of different types of anti-slip particles forming specimens

0.6~1.18 mm, 掺量为 0.6 kg/m^2 。

由图5可知, 磨耗次数为 $0 \sim 1 \times 10^4$, 随磨耗次数 N 的增加, 试件 BPN 呈线性下降趋势, 这是因为雾封层存在部分包裹在沥青材料的细砂及未在表面黏结牢固的浮砂, 不能发挥其抗滑功效; 磨耗次数超过 1×10^4 , 试件表面浮砂及多余的雾密封胶结料被磨耗殆尽, 集料逐渐裸露出来, 抗滑性能增加, 表现出试件的质量与 BPN 均随磨耗次数变化而趋于平缓, 甚至出现小幅上升的情况。

3种抗滑颗粒中, 金刚砂为沥青路面提供的初始 BPN 最高, 且磨耗过程中 BPN 曲线始终位于其他两种曲线上方; 磨耗 1×10^5 次后, 掺玄武砂、天然河砂及金刚砂的3种试件 BPN 分别降低了 32.8%、32.4% 及 29.1%, 金刚砂试件降低比例最小。这是由于金刚砂多为立方体, 棱角分明, 表面粗糙且粒径分布均匀, 而玄武砂与天然河砂多为球状或椭球状, 表面较光滑, 所提供摩擦力有限。同时, 抗滑颗粒为金刚砂时, 试件 BPN 在磨耗至 3×10^4 次左右趋于稳定, BPN 极小值为 52; 玄武砂与天然河砂试件 BPN 均在磨耗到 1×10^4 次左右达到稳定, BPN 极小值均为 48, 表明金刚砂作为抗滑颗粒能保证较好的抗滑性。

(2) 耐久性

成型后的3种含砂雾封层试件磨耗前后质量 m_0 与 m_1 、成型前质量 m_a 、固化后质量 m_b 及 1×10^5 次磨耗作用后的质量损失率结果见表5。

由表5可知, 经过 1×10^5 次磨耗作用后, 3种抗滑颗粒成型的含砂雾封层试件质量损失率由小到大顺序为玄武砂、金刚砂、天然河砂, 金刚砂试件质量损失率为 62.46%, 较玄武砂雾封层仅高 0.68%。

表5 不同类型抗滑颗粒成型试件的质量损失率

Tab. 5 Mass loss rate of different types of anti-slip particles forming specimens

抗滑颗粒	磨耗前 试件质量 m_0/g	磨耗后 试件质量 m_1/g	成型前 试件质量 m_a/g	固化后 试件质量 m_b/g	质量 损失率 $M/\%$
玄武砂	11 634.6	11 619.2	11 528.8	11 638.3	61.78
天然河砂	11 709.4	11 693.4	11 604.1	11 713.9	64.01
金刚砂	11 654.2	11 639.0	11 551.0	11 657.9	62.46

综上, 建议选择金刚砂作为抗滑颗粒。

2.2 颗粒粒径对含砂雾封层性能的影响

为研究抗滑颗粒粒径对含砂雾封层抗滑性及耐久性的影响, 在雾封层试件表面分别掺加粒径为 0.3~0.6 mm、0.6~1.18 mm、1.18~2.36 mm 的金刚砂, 进行加速磨耗试验。

(1) 抗滑性

成型后3种含砂雾封层试件在磨耗过程中 BPN 变化规律见图6。其中, 金刚砂掺量暂定为 0.6 kg/m^2 。

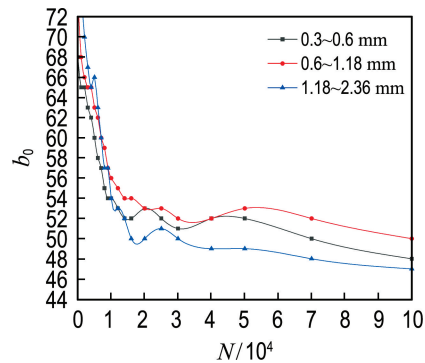


图6 不同粒径金刚砂成型试件的 BPN 磨耗规律

Fig. 6 BPN wear law of emery molding specimens with different particle sizes

由图6可知, 金刚砂粒径为 1.18~2.36 mm 时, 试件初始 BPN 最高, 但磨耗次数超过 1×10^4 后, 其 BPN 曲线基本位于其他两种曲线下方; 粒径为 0.3~0.6 mm 时, 试件初始 BPN 最低, 且磨耗过程中 BPN 较粒径为 0.6~1.18 mm 的低。同时, 粒径为 0.6~1.18 mm 时, 试件的 BPN 约在磨耗 3×10^4 次时下降至极小值 52; 粒径为 0.3~0.6 mm 及 1.18~2.36 mm 时, BPN 在磨耗 1.5×10^4 次左右下降至极小值 52 及 50。

(2) 耐久性

掺加不同粒径金刚砂成型的雾封层试件经 1×10^5 次磨耗, 质量损失率结果见表6。

表 6 不同粒径金刚砂成型试件的质量损失率

Tab. 6 Mass loss rate of emery molding specimens with different particle sizes

粒径	磨耗前 试件质量 m_0/g	磨耗后 试件质量 m_1/g	成型前 试件质量 m_a/g	固化后 试件质量 m_b/g	质量 损失率 $M/\%$
0.3~ 0.6 mm	11 683.2	11 667.0	11 580.3	11 687.9	66.14
0.6~ 1.18 mm	11 654.2	11 639.0	11 551.0	11 657.9	62.46
1.18~ 2.36 mm	11 753.0	11 735.8	11 651.3	11 758.3	70.61

由表 6 可知,0.6~1.18 mm 粒径金刚砂成型试件经 1×10^5 次磨耗后质量损失率最低,与 0.3~0.6 mm 及 1.18~2.36 mm 粒径成型试件相比,质量损失率分别降低了 3.68%、8.15%。这是由于粒径过大时,金刚砂与雾封胶结料间的有效黏结面积较小,黏结力较小导致抗滑颗粒易被磨掉;而粒径过小会使路表的雾封胶结料直接与轮胎作用,加速了雾封层材料的脱落,导致质量损失率较大。

综上,建议选择 0.6~1.18 mm 粒径金刚砂作为抗滑颗粒。

2.3 颗粒级配对含砂雾封层性能的影响

为研究金刚砂级配对含砂雾封层试件抗滑性及耐久性的影响,改变不同粒径金刚砂配比进行加速磨耗试验,3 种金刚砂级配见表 7。

表 7 金刚砂的级配

Tab. 7 Gradation of emery

级配类型	金刚砂粒径质量百分比/%	
	0.6~1.18 mm	0.3~0.6 mm
级配 1	50	50
级配 2	70	30
级配 3	90	10

(1) 抗滑性

分别掺加 3 种级配的金刚砂成型的含砂雾封层试件在磨耗过程中 BPN 变化规律见图 7。其中,金刚砂掺量暂定为 0.6 kg/m^2 。

由图 7 可知,掺加级配 2 金刚砂成型的雾封层试件,BPN 磨耗曲线位于最上方,抗滑性最好;磨耗 1×10^5 次后,用级配 1 与级配 3 成型的含砂雾封层试件,抗滑性相比 0.6~1.18 mm 单粒径提高不大。这是因为级配 1 中细砂含量较多,导致

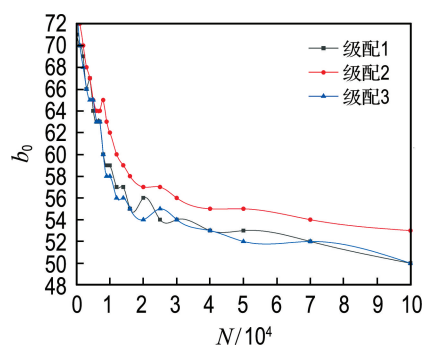


图 7 不同级配金刚砂成型试件的 BPN 磨耗规律

Fig. 7 BPN wear law of emery molding specimens with different gradation

初始 BPN 较小,而级配 3 中 90% 为 0.6~1.18 mm 金刚砂,相比单粒径金刚砂差别较小,BPN 磨耗曲线相近。

(2) 耐久性

在雾封层试件表面分别掺加 3 种级配的金刚砂,成型的含砂雾封层试件与 0.6~1.18 mm 单粒径含砂雾封层试件经 1×10^5 次磨耗后质量损失率见表 8。

表 8 不同级配金刚砂成型试件的质量损失率

Tab. 8 Mass loss rate of emery molding specimens with different gradation

类型	磨耗前 试件质量 m_0/g	磨耗后 试件质量 m_1/g	成型前 试件质量 m_a/g	固化后 试件质量 m_b/g	质量 损失率 $M/\%$
级配 1	11 678.0	11 663.7	11 570.7	11 679.7	57.63
级配 2	11 598.6	11 583.9	11 490.3	11 599.9	58.92
级配 3	11 663.5	11 648.0	11 555.5	11 665.2	62.07
0.6~ 1.18 mm	11 654.2	11 639.0	11 551.0	11 657.9	62.46

由表 8 可知,采用不同级配金刚砂成型的含砂雾封层试件均能不同程度减小磨耗后的质量损失率,与 0.6~1.18 mm 单粒径金刚砂试件相比,级配 1、级配 2 及级配 3 金刚砂雾封层的质量损失率分别减小了 4.83%、3.54% 及 0.39%,其中级配 1 质量损失率最小,表明该级配金刚砂与雾封胶结料的黏结面积较大,黏结力较强,不易被磨掉。

综合抗滑性与耐久性,建议选择级配 2 作为金刚砂所用级配。

2.4 颗粒掺量对含砂雾封层性能的影响

为研究金刚砂掺量对含砂雾封层试件抗滑性及耐久性的影响,选用金刚砂掺量 0.4、0.5、0.6、

0.7、0.8 kg/m² 分别成型含砂雾封层试件进行加速磨耗试验. 级配 2 金刚砂用量见表 9.

表 9 级配 2 金刚砂用量
Tab. 9 Gradation 2 emery quantity

金刚砂掺量/ (kg · m ⁻²)	0.3~0.6 mm 金刚砂用量/g	0.6~1.18 mm 金刚砂用量/g	金刚砂 总用量/g
0.4	10.8	25.2	36
0.5	13.5	31.5	45
0.6	16.2	37.8	54
0.7	18.9	44.1	63
0.8	21.6	50.4	72

(1) 抗滑性

不同掺量金刚砂成型的含砂雾封层试件在磨耗过程中 BPN 变化规律见图 8.

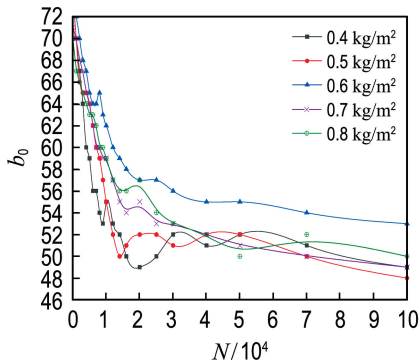


图 8 不同掺量金刚砂成型试件的 BPN 磨耗规律
Fig. 8 BPN wear law of emery molding specimens with different dosage

由图 8 可知, 掺量小于 0.6 kg/m² 时, 颗粒相互嵌挤作用较小, 磨耗过程中易被磨掉, 试件 BPN 迅速减小; 随掺量逐渐增大, 试件表面构造逐渐被填充, 试件不同磨耗次数下的 BPN 逐渐增大, 抗滑性逐渐增强, 金刚砂掺量为 0.6 kg/m² 时, 试件的 BPN 磨耗曲线位于最上方, 抗滑性最好; 掺量大于 0.6 kg/m² 时, 试件表面出现浮砂, 黏结力降低, 试件 BPN 减小.

(2) 耐久性

不同掺量金刚砂成型的含砂雾封层试件经 1×10⁵ 次磨耗后质量损失率见图 9.

由图 9 可知, 随金刚砂掺量的增加, 含砂雾封层试件的质量损失率先减小后迅速增大, 在掺量为 0.6 kg/m² 附近质量损失率最小. 这是因为金刚砂掺量较小时, 颗粒间难以形成骨架, 嵌挤作用较小, 且较少的金刚砂与雾封胶结料间的接触面

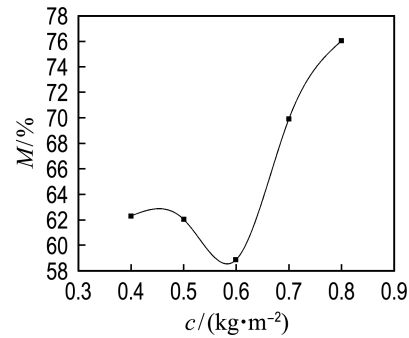


图 9 不同掺量金刚砂成型试件的质量损失率
Fig. 9 Mass loss rate of emery molding specimens with different dosage

积有限, 黏结力较小, 试件表面抗滑颗粒易在短期内被磨掉. 金刚砂掺量大于 0.6 kg/m² 时, 试件表面开始出现浮砂, 抗滑颗粒与雾封胶结料的黏结作用较小, 易被磨掉, 质量损失率开始增大, 对耐久性产生不利影响.

综上, 建议金刚砂掺量取 0.6 kg/m², 此时含砂雾封层的抗滑性及耐久性均较优.

2.5 抗滑颗粒优选及验证

综上所述, 建议选取金刚砂作为含砂雾封层的抗滑颗粒, 当环氧乳化沥青用量为 0.6 kg/m² 时, 各粒径金刚砂建议掺量为 0.3~0.6 mm 粒径掺量 0.18 kg/m², 0.6~1.18 mm 粒径掺量 0.42 kg/m².

按照金刚砂建议掺量成型含砂雾封层试件, 并与不掺加抗滑颗粒的雾封胶结料试件及未进行雾封的空白试件进行加速磨耗试验对比, 磨耗过程中 3 种试件的 BPN 磨耗曲线见图 10, 磨耗 1×10⁵ 次后的质量损失率见表 10.

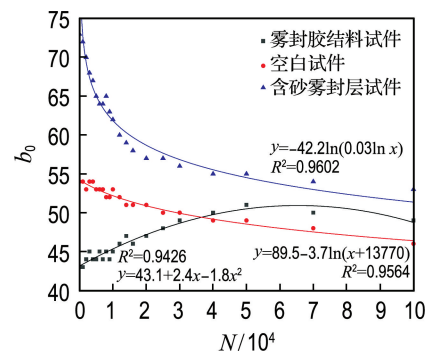


图 10 不同试件 BPN 磨耗规律
Fig. 10 BPN wear law of different specimens

由图 10 可知, 不掺加抗滑颗粒的雾封胶结料试件的 BPN 磨耗曲线呈二次抛物线, 初始 BPN 较低, 这是由于雾封胶结料填补了路表的空隙形

表10 不同试件的耐久性试验结果

Tab. 10 Durability test results of different specimens

试件类型	磨耗前 试件质量 m_0/g	磨耗后 试件质量 m_1/g	成型前 试件质量 m_a/g	固化后 试件质量 m_b/g	质量 损失率 $M/\%$
含砂雾封层试件	11 598.6	11 583.9	11 490.3	11 599.9	58.92
雾封胶结料试件	11 683.4	11 675.0	11 630.8	11 684.6	68.59
空白试件	11 575.9	11 570.3	11 576.2	11 576.2	—

成一层油膜,抗滑性能降低,随着磨耗次数增大,油膜逐渐被磨耗,露出表面粗糙的集料,试件 BPN 开始增大,在磨耗约 6.5×10^4 次时 BPN 达到峰值,此时路表雾封胶结料形成的油膜被完全磨去,抗滑性能恢复至原路面水平,试件 BPN 开始随磨耗作用下降。含砂雾封层能有效提高路面的抗滑性能,相比不掺加抗滑颗粒的雾封胶结料试件及未进行雾封的空白试件,含砂雾封层试件初始 BPN 分别提高了 69.8% 和 35.2%,抗滑性能有明显改善,且 BPN 磨耗曲线始终位于最上方,表明含砂雾封层在车辆磨耗过程中 BPN 始终大于原路面,抗滑性较好,有效延长了路面使用寿命。

由表 10 可知,经 1×10^5 次磨耗,含砂雾封层试件的质量损失率比雾封胶结料试件小 9.67%,具有更好的耐久性。

综上,含砂雾封层技术能有效提升路面的抗滑性及耐久性,延长路面使用寿命。

3 结 论

(1)提出了含砂雾封层抗滑性及耐久性的评价方法:通过四轮加速磨耗试验,根据磨耗过程中 BPN 变化规律评价抗滑性;采用磨耗 1×10^5 次后的质量损失率评价耐久性。

(2)研究了环氧乳化沥青作为雾封胶结料时,抗滑颗粒的类型、粒径、级配及掺量对雾封层抗滑性及耐久性的影响。结果表明:抗滑颗粒选用 0.3~0.6 mm 与 0.6~1.18 mm 两种粒径金刚砂,掺量分别为 0.18、0.42 kg/m² 时,磨耗 1×10^5 次后抗滑雾封层试件的 BPN 下降了 27.4%,具有较优的抗滑性,质量损失率为 58.92%,耐久性较优。

(3)经验证,相比雾封胶结料试件及空白试件,含砂雾封层试件初始 BPN 分别提高了 69.8% 和 35.2%,而质量损失率比雾封胶结料试件小

9.67%,抗滑性及耐久性良好。

参考文献:

- [1] 交通运输部. 2018 年交通运输行业发展统计公报 [N]. 中国交通报, 2018-04-12.
Ministry of Transportation. Statistical bulletin of transportation industry development 2018 [N]. China Transportation Daily, 2018-04-12. (in Chinese)
- [2] 杨 明, 苏卫国. 预防性养护雾封层措施试验路工程实践 [J]. 公路, 2006(11): 205-210.
YANG Ming, SU Weiguo. Practice of fog seal experiment road for highway preventive maintenance [J]. Highway, 2006 (11): 205-210. (in Chinese)
- [3] 王立新. 公路养护中喷砂雾封层技术的应用 [J]. 交通世界, 2017(27): 40-41.
WANG Lixin. Application of sandblasting fog sealing technology in highway maintenance [J]. TranspoWorld, 2017(27): 40-41. (in Chinese)
- [4] California Department of Transportation. Fog seal guidelines [R]. Sacramento: Caltrans Division of Maintenance, 2003.
- [5] 陈 超. 喷砂雾封层技术在高速公路预防性养护中的应用标准 [J]. 中国标准化, 2016(13): 152, 154.
CHEN Chao. Application standard of sandblasting fog sealing technology in preventive maintenance of expressway [J]. China Standardization, 2016(13): 152, 154. (in Chinese)
- [6] 张 春. 喷砂雾封层技术在高速公路预防性养护中的应用 [J]. 华东公路, 2017(3): 76-77.
ZHANG Chun. Application of sandblasting fog sealing technology in preventive maintenance of expressway [J]. East China Highway, 2017(3): 76-77. (in Chinese)
- [7] PRAPAITRAKUL N, FREEMAN T, GLOVER C. Fog seal treatment effectiveness analysis of pavement binders using the *t*-test statistical approach [J]. Petroleum Science and Technology, 2010, 28(18): 1895-1905.
- [8] 蒋志军. 雾封层技术在沥青路面预养护中应用研究 [D]. 重庆: 重庆交通大学, 2008.
JIANG Zhijun. Research on the application of the fog seal in asphalt pavement preventive maintenance [D]. Chongqing: Chongqing Jiaotong University, 2008. (in Chinese)
- [9] 刘先森, 李向阳. 沥青路面雾封层技术及其质量控制 [J]. 广东化工, 2008, 35(8): 55-58.
LIU Xianmiao, LI Xiangyang. Fog seals technology and quality control in asphalt pavement [J]. Guangdong Chemical Industry, 2008, 35(8): 55-58.

- (in Chinese)
- [10] 韩瑞民, 弥海晨. 雾封层性能研究 [J]. 石油沥青, 2012, **26**(4): 35-39.
HAN Ruimin, MI Haichen. Study on performance of fog seal [J]. **Petroleum Asphalt**, 2012, **26**(4): 35-39. (in Chinese)
- [11] 王朝辉, 张 廉, 韩晓霞. 中国道路预防性养护封层材料应用进展及评价 [J]. 筑路机械与施工机械化, 2018, **35**(3): 31-48.
WANG Chaohui, ZHANG Lian, HAN Xiaoxia. Application progress and evaluation of seal materials for preventive road maintenance in China [J]. **Road Machinery and Construction Mechanization**, 2018, **35**(3): 31-48. (in Chinese)
- [12] KWON H, LEE A S, LEE J H, *et al.* Characterization of liquid state sulfur polymer epoxy blend as asphalt pavement materials [J]. **Journal of Industrial and Engineering Chemistry**, 2017, **53**: 386-391.
- [13] WANG Fusong, LI Chao, XIAO Yue, *et al.* Using two-component epoxy resin for asphalt pavement applications-Part B: Stiffness and relaxation [C] // **Proceedings of the 2016 2nd Workshop on Advanced Research and Technology in Industry Applications**. Amsterdam: Atlantis Press, 2016: 1382-1386.
- [14] 曾德亮. 水性环氧树脂改性乳化沥青在雾封层养护中的应用 [J]. 公路, 2015, **60**(2): 212-215.
ZENG Deliang. Application of water-borne epoxy emulsified asphalt in maintenance of fog seal [J]. **Highway**, 2015, **60**(2): 212-215. (in Chinese)
- [15] ESTAKHRI C K, AGARWAL H. Effectiveness of fog seals and rejuvenators for bituminous pavement surfaces: TX-91/1156-1F [R]. Texas: Texas Transportation Institute, 1991.
- [16] PRAPAITRAKUL N, FREEMAN T, GLOVER C J. Analyze existing fog seal asphalts and additives: Literature review: FHWA/TX-06/0-5091-1 [R]. Washington: Federal Highway Administration, 2005.
- [17] 吉增晖, 俞春荣, 高志明. 含砂雾封层性能评价与工程应用研究 [J]. 公路, 2017, **62**(2): 205-210.
JI Zenghui, YU Chunrong, GAO Zhiming. Performance evaluation and engineering application of sand-fog seal [J]. **Highway**, 2017, **62**(2): 205-210. (in Chinese)
- [18] 薛瑞峰. 含砂雾封层在沥青路面预防性养护中的应用 [J]. 山西建筑, 2017, **43**(2): 148-149.
XUE Ruifeng. On application of fog seal with fog in precautions maintenance of asphalt roadbed [J]. **Shanxi Architecture**, 2017, **43**(2): 148-149. (in Chinese)
- [19] 陈 忠. 含砂雾封层技术在沥青路面预防性养护的应用 [J]. 筑路机械与施工机械化, 2016, **33**(2): 80-83.
CHEN Zhong. Application of fog seal with sand cover in asphalt pavement preventive maintenance [J]. **Road Machinery and Construction Mechanization**, 2016, **33**(2): 80-83. (in Chinese)
- [20] 平树江, 郭 勇, 郭 盛, 等. 沥青路面含砂雾封层预防性养护技术工程应用研究 [J]. 公路交通科技(应用技术版), 2017, **13**(8): 54-57.
PING Shujiang, GUO Yong, GUO Sheng, *et al.* Engineering application research of preventive maintenance technology for sand-mist seal of asphalt pavement [J]. **Highway Traffic Science and Technology (Applied Technology Edition)**, 2017, **13**(8): 54-57. (in Chinese)
- [21] 王雕鹏. 橡胶颗粒沥青路面施工工艺 [D]. 西安: 长安大学, 2013.
WANG Diaopeng. Rubber particles in asphalt surface construction technology [D]. Xi'an: Chang'an University, 2013. (in Chinese)
- [22] 路俊杰. 遮热式路面性能评价和施工工艺研究 [D]. 西安: 长安大学, 2011.
LU Junjie. Performance evaluation and construction technology on shading pavement [D]. Xi'an: Chang'an University, 2011. (in Chinese)
- [23] 王利利, 张金喜, 刘利花, 等. 路面雾封层预养护技术使用效果的评价 [J]. 市政技术, 2007, **25**(5): 375-378.
WANG Lili, ZHANG Jinxi, LIU Lihua, *et al.* Evaluation of the effects of fog seal for pavement preventive maintenance [J]. **Municipal Engineering Technology**, 2007, **25**(5): 375-378. (in Chinese)
- [24] 陈小庭, 区仕权, 王端宜, 等. 雾封层对路面抗滑性能影响的室内加速加载试验评价 [J]. 公路, 2011(5): 206-208.
CHEN Xiaoting, OU Shiquan, WANG Duanyi, *et al.* Indoor accelerated loading test evaluation of the impact of fog sealing on the skid resistance of pavement [J]. **Highway**, 2011(5): 206-208. (in Chinese)
- [25] ODUROH P K, TUFFOUR Y A. The application of the fog seal technology on a multiple chip seal in Ghana [J]. **Journal of the Association of Asphalt Paving Technologists**, 1996, **65**: 697-711.
- [26] 陈俊宇. 水泥路面应用水性环氧改性乳化沥青砂雾封层技术研究 [D]. 西安: 长安大学, 2015.
CHEN Junyu. Water-borne epoxy modified emulsified asphalt sand fog seal technology research application of cement pavement [D]. Xi'an: Chang'an University, 2015. (in Chinese)

- [27] 郑敏楠. 基于不停航要求的耐久型雾封层材料应用技术研究 [D]. 西安: 长安大学, 2016.
ZHENG Minnan. The research of fog seal materials based on the requirement of not stopping [D]. Xi'an: Chang'an University, 2016. (in Chinese)
- [28] 高志明, 吉增晖. 耐久型含砂雾封层技术在江苏省干线公路中的应用研究 [J]. 现代交通技术, 2017, 14(2): 84-87.
GAO Zhiming, JI Zenghui. Durable type sand fog seal technology application research in Jiangsu province arterial highway [J]. *Modern Transportation Technology*, 2017, 14(2): 84-87. (in Chinese)
- [29] 李 凯. 耐久性含砂雾封层在公路养护工程中的应用研究 [D]. 扬州: 扬州大学, 2019.
LI Kai. Application research of durable sand-containing fog seal in highway maintenance engineering [D]. Yangzhou: Yangzhou University, 2019. (in Chinese)
- [30] 李炜光, 何 璐, 冀 鹏, 等. 预防性养护雾封层技术耐久性评价研究 [J]. 公路, 2017, 62(11): 248-253.
LI Weiguang, HE Lu, JI Peng, *et al.* Research on durability evaluation of preventive maintenance fog seal technology [J]. *Highway*, 2017, 62(11): 248-253. (in Chinese)
- [31] 戴 征, 李炜光. 民航机场跑道预防性养护雾封层技术耐久性评价研究 [J]. 民航管理, 2018(5): 47-51.
DAI Zheng, LI Weiguang. Durability evaluation of fog seal technology for preventive maintenance of civil airport runway [J]. *Civil Aviation Management*, 2018(5): 47-51. (in Chinese)
- [32] 中华人民共和国交通运输部. 公路路基路面现场测试规程: JTG 3450—2019 [S]. 北京: 人民交通出版社, 2008.
Ministry of Transport of the People's Republic of China. Field Test Methods of Highway Subgrade and Pavement: JTG 3450-2019 [S]. Beijing: China Communications Press, 2008. (in Chinese)

Effect of anti-slip particles on properties of sand fog seal

TIAN Tian¹, JIANG Yingjun^{*1}, ZHANG Wenhui¹, ZHANG Yi², CHEN Zhejiang³

- (1. Key Laboratory for Special Area Highway Engineering of Ministry of Education, Chang'an University, Xi'an 710064, China;
2. Shaanxi Traffic Engineering Consulting Co., Ltd., Xi'an 710003, China;
3. Jinhua Transportation Investment Group Co., Ltd., Jinhua 321015, China)

Abstract: In order to determine the optimum parameters of the anti-slip particles for the sand fog seal, the influence of the type, particle size, gradation and dosage of anti-slip particles on the anti-slip property and durability of the sand fog seal is investigated through accelerated wear test. The results show that after 1×10^5 wear cycles, the British Pendulum Numbers (BPN) of the three types of sand fog seal specimens with basalt sand, natural river sand and emery are reduced by 32.8%, 32.4% and 29.1% respectively, and the mass loss rates are 61.78%, 64.01% and 62.46% respectively. Compared to 0.3-0.6 mm and 1.18-2.36 mm particle sizes, the fog seal specimen with 0.6-1.18 mm emery has the largest BPN and the smallest mass loss rate. Compared with the single particle size of 0.6-1.18 mm, the BPN of the fog seal specimen with 1:1 of 0.6-1.18 mm and 0.3-0.6 mm emery is the largest, and the mass loss rates of the fog seal specimens with 1:1, 7:3 and 9:1 of 0.6-1.18 mm and 0.3-0.6 mm emery are reduced by 4.83%, 3.54% and 0.39% respectively. When the dosage of emery is 0.6 kg/m^2 , the specimen abrasion BPN curve lies at the top and the mass loss rate is the smallest. It is recommended to select emery with 7:3 of 0.6-1.18 mm and 0.3-0.6 mm particle size as the anti-slip particles for sand fog seal and a dosage of 0.6 kg/m^2 . It is verified that compared to the fog seal specimen without anti-slip particles and the blank specimen without fog seal treatment, the initial BPN of the sand fog seal specimen increases by 69.8% and 35.2% respectively, and the mass loss rate is 9.67% less than that of the fog seal specimens.

Key words: road engineering; sand fog seal; accelerated wear test; anti-slip particles; anti-slip property; durability