

doi: 10.3969/j.issn.1002-0268.2023.09.003

沥青路面薄层环氧铺装材料抗滑性能衰变规律

谭祺琦¹, 朱洪洲^{*1,2}, 代思¹, 马涛³, 葛琦⁴

(1. 重庆交通大学 土木工程学院, 重庆 400074;

2. 重庆交通大学 交通土建工程材料国家地方联合工程研究中心, 重庆 400074;

3. 东南大学 交通学院, 江苏 南京 210096; 4. 淮安市城市开发建设有限公司, 江苏 淮安 223000)

摘要:为研究薄层环氧铺装材料路面抗滑性能的衰变规律,采用4种粒径在1~4 mm范围内的骨料颗粒并结合双组份环氧树脂材料组成了抗滑磨损层。经过10 h的小型加速加载试验后,分析了不同粒径耐磨颗粒、不同岩性抗滑骨料及不同施工工艺条件下薄层抗滑性能的衰变规律。利用数学模型对摩擦系数和构造深度值进行了拟合与回归分析,通过分析数学模型中参数 a 的绝对值得到了对环氧树脂薄层抗滑耐久性能影响程度最大的关键因素。最后提出了基于荷载作用次数和抗滑指标的稳态方程及抗滑衰变通用模型。结果表明:抗滑骨料粒径越大,薄层的抗滑性能越好;选择玄武岩或辉绿岩作为骨料的薄层,其抗滑能力的综合表现好于金刚砂和陶瓷颗粒;在单层砂浆涂抹工艺下制作成型的薄层试件其抗滑性能衰减幅度虽然不大,但由于抗滑骨料与黏结剂混合搅拌后导致薄层表面的抗滑性能下降,综合来看,在双层铺洒工艺下制作成型的薄层试件其抗滑性能最好;不同岩性的骨料对薄层抗滑耐久性能的影响程度最大,其次是不同施工工艺,而粒径大小的影响程度最小;该稳态方程能够缩短40%左右的测试时间,显著提高了试验效率。所提出的抗滑衰变通用模型能够为相关实际工程案例中抗滑耐久性能的预测提供参考。

关键词:道路工程;抗滑衰变通用模型;试验研究;小型加速加载;薄层环氧铺装材料;抗滑性能;稳态方程

中图分类号:U416.217

文献标识码:A

文章编号:1002-0268(2023)09-0018-09

Attenuation Rule of Skid Resistance of Thin Epoxy Paving Material for Asphalt Pavement

TAN Qi-qi¹, ZHU Hong-zhou^{*1,2}, DAI Si¹, MA Tao³, GE Qi⁴

(1. School of Civil Engineering, Chongqing Jiaotong University, Chongqing 400074, China;

2. National and Local Joint Engineering Research Center for Transport and Civil Engineering Materials, Chongqing Jiaotong University, Chongqing 400074, China;

3. School of Transportation, Southeast University, Nanjing Jiangsu 210096, China;

4. Huai'an Urban Development and Construction Co., Ltd., Huai'an Jiangsu 223000, China)

Abstract: In order to study the attenuation rule of skid resistance of thin epoxy pavement materials, the anti-skid wear layer is formed by 4 kinds of aggregate particles with sizes ranging from 1 mm to 4 mm combined with two-component epoxy resin material. After 10 h small-scale accelerated loading test, the attenuation rules of skid resistance of the thin layer with different sizes of wear-resistant particles, different lithology of anti-skid aggregates and different construction conditions are analyzed. By analyzing the absolute value of parameter a in the mathematical model, the key factors that have the greatest influence on the anti-skid durability of the epoxy resin thin layer are obtained. Finally, a steady-state equation based on number of loadings and the general model of skid resistance attenuation are proposed. The result shows that (1) The larger the particle size of the anti-skid aggregate, the better the skid resistance of the thin layer. (2) The comprehensive performance of the anti-skid ability of the thin layer with basalt or diabase as aggregate is

收稿日期:2021-05-31

基金项目:重庆市研究生科研创新项目(2020S0012)

作者简介:谭祺琦(1997-),男,重庆人,博士研究生。(1559043178@qq.com)

*通讯作者:朱洪洲(1976-),男,山东莱州人,博士,教授。(zhuhongzhouchina@cqjtu.edu.cn)

better than that with diamond sand and ceramic particles. (3) Although the skid resistance attenuation of the thin layer specimens made under the single-layer mortar coating technique is not significant, the skid resistance of the thin layer surface decreases due to the mixing of the anti-skid aggregate and binder. Overall, the thin layer specimens made under the double-layer coating technique have the best skid resistance. (4) The aggregates with different lithology have the greatest influence on the skid resistance durability of thin layer, and followed by different construction techniques, the influence of particle size is the smallest. (5) The steady-state equation can shorten the testing time by about 40%, significantly improving the testing efficiency. The proposed general model of skid resistance attenuation can provide reference for the skid resistance durability in practical engineering cases.

Key words: road engineering; general model of skid resistance attenuation; experimental study; small accelerated loading; thin epoxy pavement material; skid resistance; steady-state equation

0 引言

近年来,因沥青路面抗滑性能衰减而引起一系列交通事故的比例呈上升趋势。沥青路面在受到车辆荷载反复作用时,其表面构造深度和抗滑系数会逐渐降低,加之雨水浸润,致使汽车刹车时的制动距离增加,易造成汽车轮胎打滑、车辆追尾等交通安全事故^[1]。

针对此问题,国内外相关研究人员陆续开发了不同类型的抗滑磨耗层,这对路面抗滑性能有较好的改善效果。在20世纪末由法国开发的Novachip超薄磨耗层和由我国沙庆林院士开发的SAC-10型沥青混合料超薄层等不仅拥有良好的抗滑性能,还具有不错的排水和降噪能力^[2-3]。目前,采用环氧树脂搭配骨料组成抗滑薄层的方式已日趋成熟,而该环氧树脂类薄层结构就是以环氧树脂胶A、B组分作为黏结剂,单一粒径的骨料作为表层抗滑材料,通过环氧树脂黏结剂将抗滑骨料与旧路面表层黏结为一体的一种抗滑磨耗层。关于树脂类材料在道路工程领域的应用最早来源于Horn的研究报告,报告中明确提到环氧树脂类混凝土的综合性能要明显强于甲基丙稀酸树脂类混凝土^[4]。Wang等^[5]针对环氧树脂类抗滑磨耗层进行了相关室内试验,研究结果表明:该树脂类抗滑磨耗层的抗压强度约为40 MPa,弯曲强度约为13 MPa。Torbrueffe等^[6]和Beyene等^[7]的研究结果证明了骨料自身的物理力学性能是影响薄层抗滑耐久性能的重要因素。方星^[8]深入研究了铺装路桥表面的环氧树脂类抗滑薄层的疲劳特性,并预估了其疲劳寿命。王兆仑等^[9]研发了一种耐磨性能好、抗剪切能力强的高黏度抗滑封装磨耗层,当该磨耗层与沥青面层协同作用时能显著增强沥青路面的长效抗滑机制。李晶晶等^[10]研究了耐磨颗粒用量、环氧树脂类材料用量及施工工艺等因素对沥

青路面薄层环氧铺装材料抗滑衰变规律的影响,建立了关于抗滑指标 TD 和 BPN 的抗滑衰变模型,并通过实际工程案例对所建模型进行了验证。王火明等^[11]研发的超薄磨耗层材料Puas能显著增加抗滑指标值。韩亚芳等^[12-13]分析了抗滑薄层与旧路面间的黏结强度、抗滑指标等随通车时间增加的衰变状况。谢群等^[14]采用加速加载试验结合力学试验的方法,分析了抗滑指标值、集料磨耗质量损失率随磨耗时间增加的变化规律及不同集料类型与沥青层基面对其力学及路用性能的影响。谭乐等^[15]选用4种骨料研究了其磨耗值和磨光值的衰减规律。在现有关于抗滑薄层的研究中,虽在路面抗滑方面表现出较好的性能,但耐久性不足问题依然十分严重,易出现诸如脱皮、掉粒等不良现象,而目前对该问题的研究较少。为此,本研究基于加速加载试验研究了不同粒径耐磨颗粒、不同岩性抗滑骨料及不同施工工艺对环氧树脂类薄层抗滑耐久性能的影响,以期为基于耐久性进行抗滑薄层材料的选择及薄层结构的设计提供参考。

1 试验原材料与方案设计

1.1 试验原材料

1.1.1 抗滑骨料

抗滑骨料选择粒径在1~4 mm范围内的玄武岩、辉绿岩、陶瓷颗粒及金刚砂。辉绿岩由广东某公司提供,其余骨料由重庆某公司提供。首先对这4种抗滑骨料进行包括密度、吸水率、棱角性等在内的6项基本物理力学性能进行测试。按照相应试验规程进行技术指标测试,结果见表1。

从表1可以看到,4种抗滑骨料的棱角性流动时间均未超过30 s,但该试验所选用的抗滑骨料粒径大部分处于3~4 mm范围内,而相关试验规范要求中则是对粒径在0.075~4.75 mm范围内的粗细集料

表 1 四种骨料的性能指标
Tab. 1 Performance indicators of 4 aggregates

参数类别	技术要求	试验方案	试验结果 (均值)			
			玄武岩	辉绿岩	陶瓷颗粒	金刚砂
密度/(g·cm ⁻³)	≥2.5	T0304	2.64	2.83	2.53	3.28
吸水率/%	≤3	T0308	1.83	1.48	1.52	2.34
棱角性流动时间/s	≥30	T0345	20.2	27.6	28.7	21.5
压碎值/%	<20	T0350	4.3	5.5	2.1	9.3
磨耗值/%	≤28	T0317	11.1	10.9	17.9	16.3
磨光值/%	>42	T0321	53.6	51.5	49.3	54.1

进行整体流动试验,因此,该技术要求仅做参考,其余指标均处于规范要求的范围内。

1.1.2 环氧树脂黏结剂

该试验采用环氧树脂胶 A, B 组分来作为黏结材料, A 组分为环氧树脂, B 组分为环氧树脂固化剂。各组分的主要技术指标要求见表 2。

表 2 A 和 B 组分的主要技术要求

Tab. 2 Main technical requirements for components A and B

材料类型	技术指标	技术要求	试验方法
A 组分	环氧当量/(g·mol ⁻¹)	185~192	ASTM. D1052
	黏度 (20℃)/(mPa·s)	≤40	标准黏度计法
	含水量/%	≤0.5	ASTM. D1744
	密度 (25℃)/(g·cm ⁻³)	1.1~1.2	ASTM. D1475
	外观	深色	目视
B 组分	黏度 (20℃)/(mPa·s)	≤30	标准黏度计法
	含水量/%	≤0.5	ASTM. D1744
	密度 (25℃)/(g·cm ⁻³)	1.1~1.2	ASTM. D1475
	外观	半透明	目视

1.2 试验设备与方案

1.2.1 试验设备

试验选用重庆某小型加速加载设备。轮胎直径为 250 mm, 宽度为 80 mm, 接地压强约为 0.2 MPa。试验前设定其加载频率为 12 480 次/h, 共进行 10 h 的加速加载试验。

1.2.2 试验方案

(1) 不同粒径的骨料对薄层抗滑性能的影响

选择 1~2, 2~3, 3~4 mm 粒径的陶瓷颗粒作为抗滑骨料, 并采用单层铺洒工艺成型环氧树脂类抗滑薄层试件, 薄层试件的制作首先采用轮碾法成型 30 cm×30 cm×5 cm 的沥青混合料车辙板, 随后将环氧树脂胶 A, B 组分与 70~140 目的石英砂进行混合搅拌后用作胶黏剂, 均匀洒布在车辙板表面 1~2 mm

处, 最后将抗滑骨料均匀铺洒在胶黏剂表面直至完全铺满, 待胶黏剂固化后将未黏结牢固的抗滑骨料清理掉以形成环氧树脂类抗滑薄层试件。经大约 10 h 加速磨耗试验后, 利用摆式仪和手工铺砂法来测量薄层试件的摩擦系数 Fr 及构造深度 MTD , 并分析其衰变状况。

(2) 不同岩性的骨料对薄层抗滑性能的影响

以粒径在 3~4 mm 范围内的玄武岩、辉绿岩、陶瓷颗粒及金刚砂作为抗滑骨料, 同样采用单层铺洒工艺成型环氧树脂类薄层试件, 经 10 h 磨耗试验后, 分析 Fr 及 MTD 的衰变状况。

(3) 不同施工工艺对薄层抗滑性能的影响

采用粒径在 3~4 mm 范围内的金刚砂作为抗滑骨料, 并分别利用单层铺洒工艺、双层铺洒工艺及单层砂浆涂抹工艺来制作成型环氧树脂类抗滑薄层试件, 经 10 h 磨耗试验后, 分析 Fr 及 MTD 的衰变状况。

2 试验结果及分析

2.1 不同粒径耐磨颗粒薄层抗滑性能的衰变规律

经过 10 h 约 12.5 万次磨耗试验后, 得到 Fr 及 MTD 值随加载次数增加的衰变规律, 并采用 Shbeeb, Khasawneh 等^[16-17]提出的数学模型对试验所获取的 Fr 及 MTD 值数据进行曲线拟合与回归分析:

$$Fr = c - \frac{N}{a + bN}, \tag{1}$$

$$MTD = c - \frac{N}{a + bN}, \tag{2}$$

式中, Fr 为摩擦系数; MTD 为构造深度; N 为荷载作用次数; a, b, c 为回归系数。

从图 1 及表 3 中可以得到:

抗滑指标 Fr 及 MTD 值随加载次数的增加而逐渐减小, 且这 2 项指标均表现出初期阶段衰变幅度较大而后趋于平缓的现象。

摩擦系数与构造深度的初、终值大小顺序一致, 依次为 3~4 mm>2~3 mm>1~2 mm。可见, 不同粒径耐磨颗粒的薄层环氧铺装材料其抗滑性能差异显著, 在满足路面行车基本要求的合理粒径范围内, 耐磨颗粒粒径越大, Fr 及 MTD 的初、终值也越大, 且在表面相同条件下进行的加速磨光作用过程中, 耐磨颗粒粒径越大的抗滑薄层, 其抗滑性能表现越优良。

在加速加载作用条件下, 该环氧树脂类薄层试件的抗滑衰变曲线大致分为快速衰变、缓慢衰变及衰变稳定 3 个不同阶段。在加速加载初期, Fr 值的

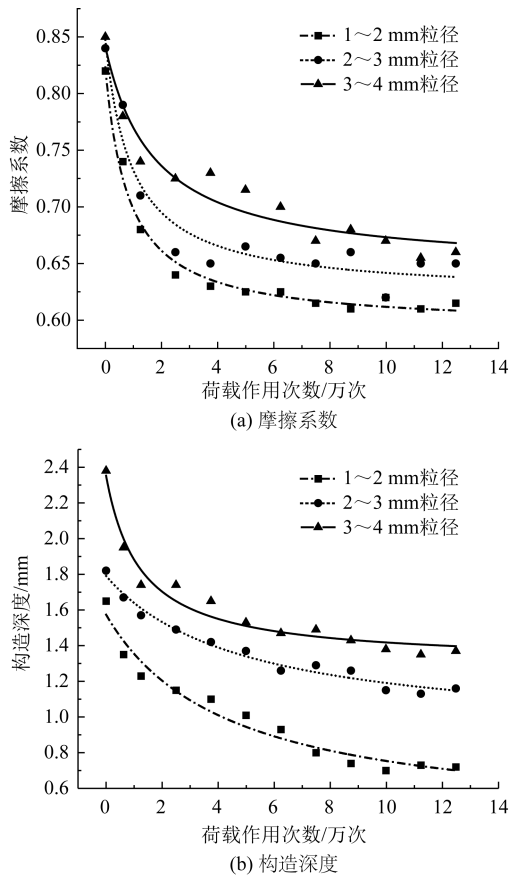


图1 耐磨颗粒粒径不同时的回归拟合曲线

Fig. 1 Regression fitting curves with different sized wear-resistant particles

表3 骨料粒径不同时 Fr 及 MTD 的回归参数Tab. 3 Regression parameters of Fr and MTD with different aggregate particle sizes

抗滑性能指标	粒径/mm	回归方程	调整 R^2
摩擦系数	1~2	$Fr = 0.823 - \frac{N}{6.627 + 4.711 \cdot N}$	0.965
	2~3	$Fr = 0.844 - \frac{N}{7.237 + 4.437 \cdot N}$	0.920
	3~4	$Fr = 0.847 - \frac{N}{8.881 + 5.053 \cdot N}$	0.936
构造深度	1~2	$MTD = 1.574 - \frac{N}{3.702 + 0.848 \cdot N}$	0.955
	2~3	$MTD = 1.790 - \frac{N}{5.512 + 1.116 \cdot N}$	0.973
	3~4	$MTD = 2.353 - \frac{N}{1.172 + 0.952 \cdot N}$	0.959

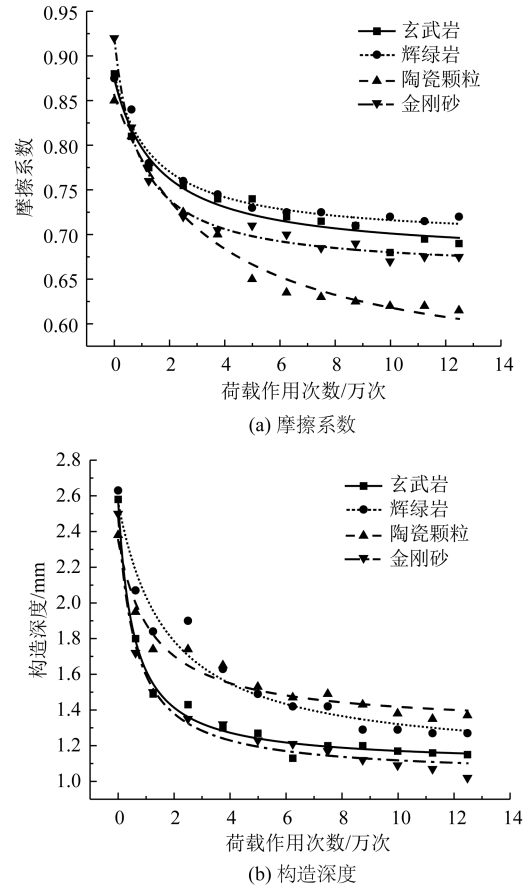
衰减幅度较大,这主要是因为薄层环氧铺装材料在磨耗试验中部分耐磨颗粒黏结不牢而出现的掉粒现象所导致,待这类骨料剥落完毕后即进入衰变缓慢阶段,在此阶段主要以抗滑骨料的表面磨光及磨损为主,磨光作用直接表现为 Fr 值的降低,而磨损作用则表现为 MTD 值的减小,当骨料的磨光磨损作用

达到一定程度时即进入衰变稳定状态。

采用该数学分析模型对薄层抗滑指标 Fr 及 MTD 值的拟合效果较好,且调整 R^2 均超过 0.920。

2.2 不同岩性骨料薄层抗滑性能的衰变规律

4种不同岩性骨料的环氧树脂类薄层,其 Fr 及 MTD 值随加载次数增加的变化规律及拟合曲线如图2所示。

图2 骨料岩性不同时 Fr 和 MTD 的衰减规律及回归拟合曲线Fig. 2 Attenuation rules and regression fitting curves of Fr and MTD with different aggregate lithology

从图2及表4中可以得到:

4种不同岩性骨料的薄层其抗滑性能衰变规律大体相似, Fr 及 MTD 值同样呈现加载初期衰减幅度较大然后趋于平缓的现象。

从 Fr 值的衰变过程中可以看出,采用陶瓷颗粒作为抗滑骨料的薄层环氧铺装材料其终值最小。而对于 MTD 值的表现则刚好相反。这说明采用陶瓷颗粒的抗滑薄层在加载过程中表面耐磨颗粒被车轮压碎破损的程度较低,依然能够保证薄层拥有较高的构造深度,但由于其表层被磨光的程度较高而导致 Fr 值偏低,这与表1中陶瓷颗粒的磨光值结果高度一致。

4种不同岩性骨料的环氧树脂类薄层其 Fr 及

表 4 骨料岩性不同时 Fr 及 MTD 的相关回归参数
Tab. 4 Regression parameters of Fr and MTD with different aggregate lithology

抗滑性能指标	岩性	回归方程	调整 R^2
摩擦系数	玄武岩	$Fr=0.875-\frac{N}{7.915+4.978N}$	0.960
	辉绿岩	$Fr=0.880-\frac{N}{7.600+5.356N}$	0.974
	陶瓷颗粒	$Fr=0.856-\frac{N}{11.767+2.933N}$	0.936
	金刚砂	$Fr=0.921-\frac{N}{3.350+3.814N}$	0.989
构造深度	玄武岩	$MTD=2.580-\frac{N}{0.370+0.673N}$	0.987
	辉绿岩	$MTD=2.567-\frac{N}{1.195+0.683N}$	0.950
	陶瓷颗粒	$MTD=2.353-\frac{N}{1.172+0.952N}$	0.959
	金刚砂	$MTD=2.490-\frac{N}{0.430+0.686N}$	0.985

MTD 值在第 5 h 后逐渐趋于稳定状态, Fr 值始终在 0.6 以上, MTD 值在 1 mm 以上。原因主要是所选用的 4 种骨料本身硬度大, 耐磨性能好。在磨耗试验中发现金刚砂出现的掉粒现象较其他 3 种骨料严重, 可见金刚砂与黏结剂的黏结性能较差。若以 Fr 值作为该薄层抗滑性能的评价指标, 则显然是用玄武岩作为耐磨颗粒的薄层其抗滑性能更好, 而陶瓷颗粒的抗滑性能较差。

采用该数学分析模型对薄层抗滑指标 Fr 及 MTD 值的拟合效果较好, 且调整 R^2 均超过 0.930。

2.3 不同施工工艺下薄层抗滑性能的衰变规律

分别采用不同的施工工艺制作成型环氧树脂类薄层车辙板, 其中在单层铺洒工艺下制作成型的薄层由 1 层环氧树脂黏结剂+1 层 3~4 mm 单一粒径的金刚砂抗滑骨料组成; 双层铺洒工艺下制作成型的薄层由 1 层环氧树脂黏结剂+1 层 3~4 mm 单一粒径的金刚砂抗滑骨料+1 层环氧树脂黏结剂+1 层 3~4 mm 单一粒径的金刚砂抗滑骨料组成; 单层砂浆涂抹工艺下制作成型的薄层由 1 层环氧树脂黏结剂+1 层 3~4 mm 单一粒径的金刚砂抗滑骨料与环氧树脂黏结剂的混合砂浆组成。

分别对制作成型的不同抗滑薄层试件进行加速加载试验, 抗滑指标 Fr 及 MTD 值随加载次数增加的变化规律及拟合曲线如图 3 所示。

从图 3 及表 5 中可以得到:

在 3 种施工工艺下制作成型的环氧树脂类薄层试件所呈现出的抗滑衰变规律大体相似, 同样表现为在加载初期阶段其 Fr 及 MTD 值的衰变幅度较大

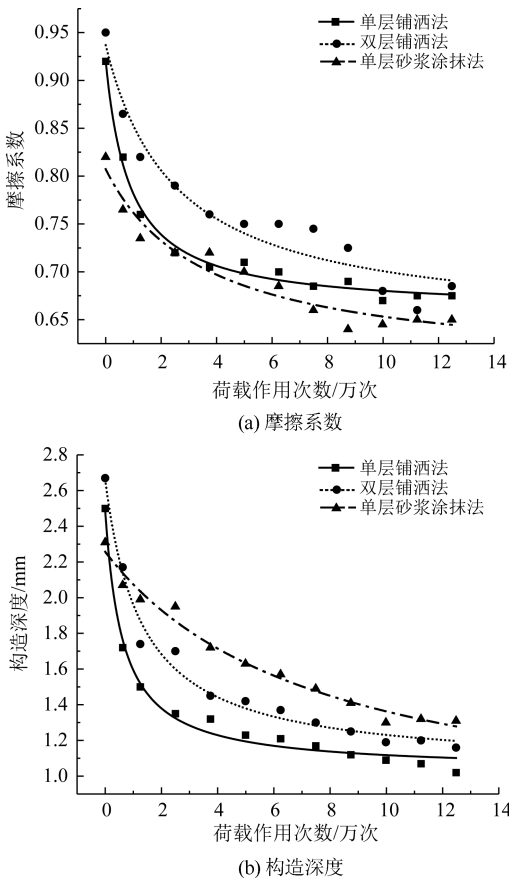


图 3 施工工艺不同时 Fr 和 MTD 的衰减规律及回归拟合曲线
Fig. 3 Attenuation rules and regression fitting curves of Fr and MTD with different construction techniques

表 5 施工工艺不同时 Fr 和 MTD 的回归参数
Tab. 5 Regression parameters of Fr and MTD when construction technique is different

抗滑性能指标	工艺方式	回归方程	调整 R^2
摩擦系数	单层铺洒	$Fr=0.921-\frac{N}{3.350+3.814N}$	0.989
	双层铺洒	$Fr=0.937-\frac{N}{8.502+3.384N}$	0.931
	单层砂浆涂抹	$Fr=0.807-\frac{N}{17.147+4.773N}$	0.935
构造深度	单层铺洒	$MTD=2.490-\frac{N}{0.430+0.686N}$	0.985
	双层铺洒	$MTD=2.663-\frac{N}{0.807+0.618N}$	0.981
	单层砂浆涂抹	$MTD=2.257-\frac{N}{4.481+0.634N}$	0.978

而后趋于平缓的现象。

从 Fr 及 MTD 值在抗滑性能衰减初期阶段的表现来看, 大小顺序均表现为双层铺洒工艺>单层铺洒工艺>单层砂浆涂抹工艺。可见, 采用双层铺洒工艺成型的环氧树脂类薄层在初期使用阶段的抗滑性能最佳。

利用单层砂浆涂抹法制作成型的环氧树脂类薄层其 MTD 值的初值较低而终值较高, Fr 的初、终值均较低, 说明抗滑指标的衰变幅度较小。这主要是由于采用单层砂浆涂抹工艺制作成型的环氧树脂类薄层中的骨料与黏结剂的黏结效果较好, 表面颗粒脱落现象较少, 但因抗滑骨料与黏结剂混合搅拌后, 导致 Fr 值下降。

采用该数学分析模型对薄层抗滑指标 Fr 及 MTD 值的拟合效果较好, 且调整 R^2 均超过 0.930。

2.4 不同因素对薄层抗滑耐久性能的影响

以不同粒径骨料的环氧树脂类薄层的抗滑指标 Fr 及 MTD 值为例, 利用 Khasawneh^[18-19] 所提出的对数模型进行拟合与回归分析如图 4 所示:

$$Fr = a \cdot \ln N + b, \quad (3)$$

$$MTD = a \cdot \ln N + b, \quad (4)$$

式中, N 为荷载作用次数; a , b 为回归系数。

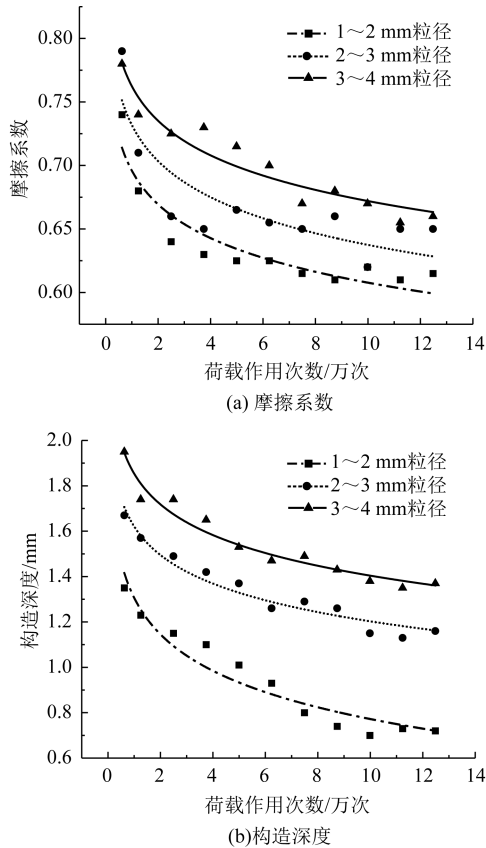


图 4 耐磨颗粒粒径不同时构造深度 Fr 和 MTD 的衰变情况及回归拟合曲线

Fig. 4 Attenuation rules and regression fitting curves of Fr and MTD with different wear-resistant particle sizes

由表 3、表 6 可知, 表 3 中的调整 R^2 明显更高, 因此, 相较于式 (3)~(4), 式 (1)~(2) 的分析模型对 Fr 及 MTD 值的拟合效果更好。将式 (3)~(4)

表 6 骨料粒径不同时 Fr 和 MTD 的回归参数

Tab. 6 Regression parameters of Fr and MTD with different wear-resistant particle sizes

抗滑性能指标	粒径/mm	回归方程	调整 R^2
摩擦系数	1~2	$Fr = 0.762 - 0.039 \ln N$	0.854
	2~3	$Fr = 0.732 - 0.041 \ln N$	0.837
	3~4	$Fr = 0.696 - 0.038 \ln N$	0.889
构造深度	1~2	$MTD = 1.306 - 0.232 \ln N$	0.910
	2~3	$MTD = 1.621 - 0.182 \ln N$	0.935
	3~4	$MTD = 1.854 - 0.195 \ln N$	0.928

对荷载作用次数 N 进行求导:

$$Fr' = \frac{dFr}{dN} = \frac{a}{N}, \quad (5)$$

$$MTD' = \frac{dMTD}{dN} = \frac{a}{N}. \quad (6)$$

由式 (5)~(6) 可知, 当荷载作用次数 N 相同时, $|a|$ 越大, 则所拟合的趋势线在固定荷载作用次数处切线的斜率越大, 即表明 Fr 及 MTD 的衰变幅度越大, 故 $|a|$ 可用来作为评价该环氧树脂类薄层抗滑耐久性能的直接参考指标。

为得到上述 3 种不同因素对该薄层抗滑耐久性的影响程度, 可用该方程中的回归系数 $|a|$ 的变化幅度来评判 3 种因素的影响程度见表 7。

表 7 各个因素中 $|a|_{Fr}$ 和 $|a|_{MTD}$ 的变化幅度

Tab. 7 Variation amplitudes of $|a|_{Fr}$ and $|a|_{MTD}$ in each factor

影响因素	$ a _{Fr}$	最大差值	$ a _{MTD}$	最大差值
粒径/mm	1~2	3.829	0.232	
	2~3	4.101	0.272	0.050
	3~4	3.926	0.195	
岩性	玄武岩	3.980	0.202	
	辉绿岩	3.839	0.297	
	陶瓷颗粒	7.508	0.185	0.112
	金刚砂	4.489	0.215	
施工工艺	单层铺洒	4.489	0.215	
	双层铺洒	6.112	1.887	0.315
	单层砂浆涂抹	4.225	0.285	

从表 7 可知, 不管是针对摩擦系数的回归参数 $|a|$ 还是针对构造深度的回归参数 $|a|$, 不同岩性骨料之间最大与最小 $|a|$ 的差值更大, 即表明骨料岩性对环氧树脂类薄层抗滑耐久性能的影响程度更大, 其次是施工工艺和粒径的影响。故在实际工程中, 应对此引起重视, 从而选择最佳的骨料类型。

2.5 稳态方程

为了确定稳态 Fr 及 MTD , 当式 (1) ~ (2) 中的荷载作用次数 N 趋于无穷大时, 对方程进行渐近展开, 并忽略高阶项, 因为它们对回归没有任何明显的改善, 结果如下:

$$Fr_{\text{Steady_State}} = c - \frac{1}{b}, \tag{7}$$

$$MTD_{\text{Steady_State}} = c - \frac{1}{b} \circ \tag{8}$$

高阶项 (所需的精度) 的 Δ 如下:

$$\Delta = \frac{a}{b^2 N} + O\left(\frac{1}{N}\right)^2 \circ \tag{9}$$

为求解达到稳态时的荷载作用次数, 忽略 $O(1/N)^2$:

$$N_{\text{Steady_State}} = \frac{a}{b^2 \Delta} \circ \tag{10}$$

由式 (10) 可知, 当 Δ 趋于 0 时, $N_{\text{Steady_State}}$ 如预期一样趋于无穷大。

为了显示测量过程中不同加载次数处的稳态 Fr , 以 1~2 mm 粒径的陶瓷颗粒作为耐磨骨料成型的薄层其 Fr 值的衰变情况为例, 从加载次数为 4.992 万次开始标记, 每 2 h 标记 1 次, 见图 5, 表 8 为 Fr 在不同荷载作用次数处的参数估计值, 表 9 为精度为 0.001 时在不同加载次数时的稳态 Fr 值。

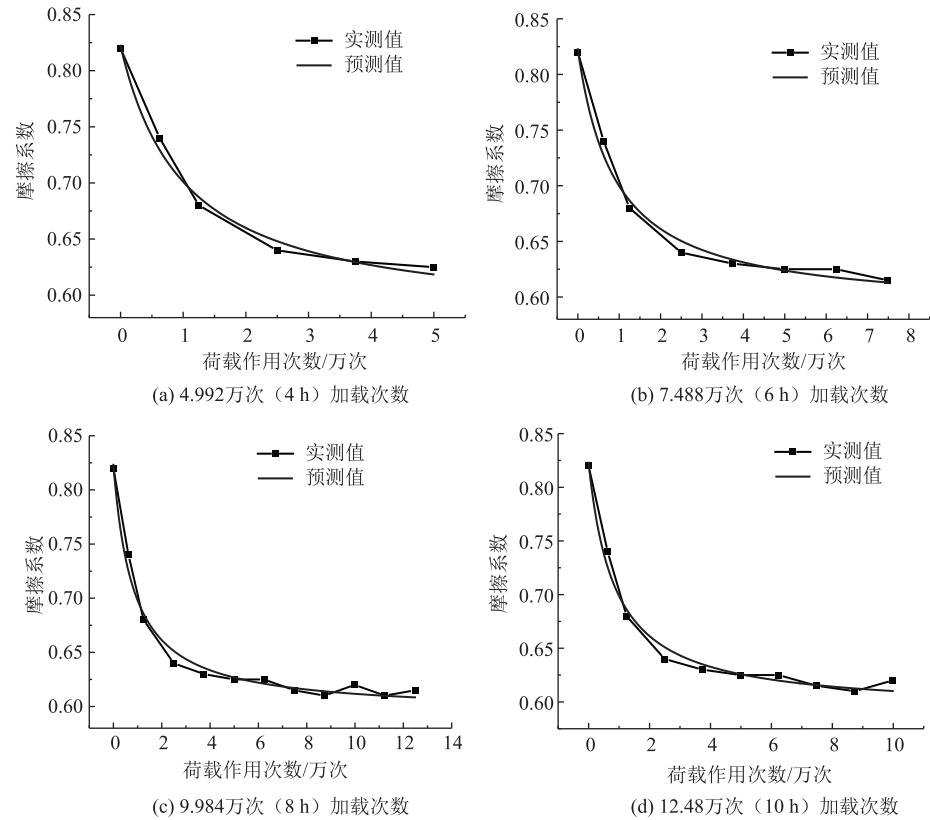


图 5 1~2 mm 粒径耐磨颗粒薄层的 Fr 在不同荷载作用次数下的实测值与预测值

Fig. 5 Measured values and predicted values of Fr of thin layer of wear-resistant particles with sizes of 1-2 mm at different loading times

表 8 1~2 mm 粒径耐磨颗粒薄层的 Fr 在不同荷载作用次数下的参数值

Tab. 8 Parameters of Fr of thin layer of wear-resistant particles with sizes of 1-2 mm at different loading times

加载次数/万次	c	a	b	调整 R^2
4.992	0.822	5.180	4.785	0.971
7.488	0.823	5.881	4.749	0.970
9.984	0.823	6.322	4.733	0.968
12.48	0.823	6.627	4.711	0.965

表 9 1~2 mm 粒径耐磨颗粒薄层在不同加载次数处下的稳态 Fr 值

Tab. 9 Steady-state Fr values of thin layer of wear-resistant particles with particle sizes of 1-2 mm at different loading times

稳态 Fr 值	加载次数/万次			
	4.992	7.488	9.984	12.48
$Fr_{\text{Steady_State}}$	0.613	0.612	0.612	0.612

由表 9 可知, 在加载次数为 7.488 万次时, Fr 值已趋于稳定状态, 此时的稳态 Fr 值为 0.612, 因

此建议试验可在此时停止, 从而可节省 40% 左右的试验时间。如果有更多的测试点, 可在试验期间增加数据测量的频率, 使加载次数进一步减少。

2.6 抗滑衰变通用模型

对上文基于式 (1)~(2) 所得到的相关回归参数取均值: $\bar{c}_{Fr} = 0.871$, $\bar{a}_{Fr} = 7.638$, $\bar{b}_{Fr} = 4.291$, $\bar{c}_{MTD} = 2.312$, $\bar{a}_{MTD} = 1.963$, $\bar{b}_{MTD} = 0.785$ 。得到在粒径、岩性、施工工艺这 3 种影响因素下薄层环氧铺装材料的总体抗滑衰变模型:

$$Fr = 0.871 - \frac{N}{8.238 + 4.325N}, \quad (11)$$

$$MTD = 2.312 - \frac{N}{1.963 + 0.785N}. \quad (12)$$

式中 N 为荷载作用次数。

将在以上 3 种不同因素影响下抗滑薄层的 Fr 及 MTD 值进行汇总, 采用该模型进行拟合, 并得到可靠度为 95% 时的置信区间如图 6 所示。

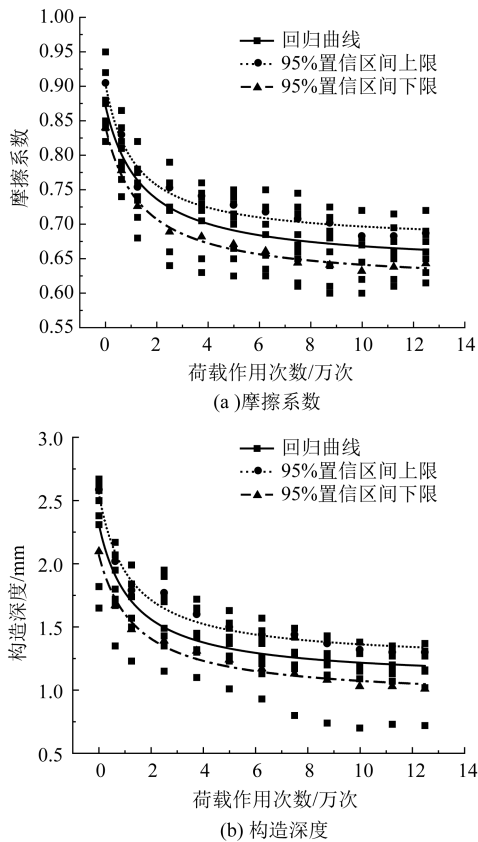


图 6 不同影响因素下 Fr 和 MTD 汇总值的回归拟合曲线及 95% 置信区间范围

Fig. 6 Regression fitting curves and 95% confidence interval ranges of Fr and MTD summary values with different influencing factors

图 6 中, Fr 的回归参数 c 为 0.872, a 为 7.222,

b 为 4.293; MTD 的回归参数 c 为 2.311, a 为 1.041, b 为 0.810。与式 (11)~(12) 中的回归参数 c , a , b 取均值得到 $\bar{c}_{Fr} = 0.872$, $\bar{a}_{Fr} = 7.730$, $\bar{b}_{Fr} = 4.309$; $\bar{c}_{MTD} = 2.312$, $\bar{a}_{MTD} = 1.502$, $\bar{b}_{MTD} = 0.798$ 。对式 (11), 式 (12) 进行修正后得到:

$$Fr = 0.872 - \frac{N}{7.730 + 4.309N}, \quad (13)$$

$$MTD = 2.312 - \frac{N}{1.502 + 0.798N}. \quad (14)$$

3 结论

(1) 在不同的影响因素作用下, 该环氧树脂类薄层的抗滑性能衰变规律大体相似, 即在初期阶段抗滑指标 Fr 及 MTD 值的衰减幅度较大, 然后随着加载次数的增加而趋于平缓。

(2) 不同粒径抗滑骨料的环氧树脂类薄层, 骨料粒径越大其抗滑性能越好。不同岩性抗滑骨料的环氧树脂类薄层其抗滑性能的差异性较大。采用陶瓷颗粒作为抗滑骨料的薄层其 MTD 值的衰变幅度虽不大, 但表面被磨光的程度较高。而采用金刚砂作为抗滑骨料的薄层其抗滑指标初值虽较大, 但其衰减幅度也较大。综合来看, 采用玄武岩或辉绿岩作为耐磨颗粒的薄层其抗滑性能的表现更加优异。

(3) 采用单层砂浆涂抹工艺制作成型的抗滑薄层试件其抗滑性能衰减幅度虽不大, 但由于抗滑骨料与黏结剂混合搅拌后导致颗粒表面的抗滑性能下降。此外, 相较于单层铺洒工艺, 采用双层铺洒工艺制作成型的环氧树脂类薄层其抗滑性能更加优异。

(4) 通过对比分析回归系数 $|a|$ 的变化幅度, 可以得到不同骨料岩性对该环氧树脂类薄层抗滑耐久性能的影响程度最大, 其次是不同施工工艺, 而粒径大小的影响程度最小。

(5) 对方程进行渐进展开后得到基于 Fr , MTD 和 N 的稳态方程, 利用该稳态方程来预测何时能达到稳定状态, 结果表明能够节省 40% 左右的测试时间, 显著提升了试验效率。

(6) 与对数模型相比, 式 (1)~(2) 对抗滑指标的拟合效果更好, 调整后的 R^2 均超过 0.920, 对 Fr 及 MTD 值进行总体回归后得到可靠度为 95% 时的置信区间上下限范围, 并提出了该环氧树脂类薄层的抗滑衰变通用模型。

参考文献:

References:

[1] 余苗, 童锦尧, 孔令云, 等. 轮胎-沥青路面摩擦测

- 试及抗滑模型研究综述 [J]. 公路交通科技, 2020, 37 (10): 12-24.
- YU Miao, TONG Shi-yao, KONG Ling-yun, et al. A Review of Tire-asphalt Pavement Friction Measurement and Skid Resistance Model Study [J]. Journal of Highway and Transportation Research and Development, 2020, 37 (10): 12-24.
- [2] WEGMAN D E, SABOURI M, INTERTEC B. Ultra-thin Bonded Wearing Course (UTBWC) Snow, Ice and Wind Effects: Transportation Research Synthesis [R]. Paul: Minnesota Department of Transportation, 2018.
- [3] YU J M, CHEN F D, DENG W, et al. Design and Performance of High-toughness Ultra-thin Friction Course in South China [J]. Construction and Building Materials, 2020, 246: 118508.
- [4] LI J, XIE J, LIU F, et al. A Critical Review and Assessment for FRP-concrete Bond Systems with Epoxy Resin Exposed to Chloride Environments [J]. Composite Structures, 2019, 229: 111372.
- [5] WANG C, XIAO X, LU Y, et al. Utilization and Properties of Modified Epoxy Resin for Colorful Anti-slip Pavements [J]. Construction and Building Materials, 2019, 227: 116801.
- [6] TORBRUEGGE S, WIES B. Characterization of Pavement Texture by Means of Height Difference Correlation and Relation to Wet Skid Resistance [J]. Journal of Traffic and Transportation Engineering (English Edition), 2015, 2 (2): 59-67.
- [7] BEYENE M A, MEININGER R C, GIBSON N H, et al. Forensic Investigation of the Cause(s) of Slippery Ultra-thin Bonded Wearing Course of an Asphalt Pavement: Influence of Aggregate Mineralogical Compositions [J]. International Journal of Pavement Engineering, 2016, 17 (9/10): 887-900.
- [8] 方星. 薄层环氧铺装材料性能研究 [D]. 武汉: 武汉理工大学, 2012.
- FANG Xing. Study on Properties of Thin Layer Epoxy Paving Materials [D]. Wuhan: Wuhan University of Technology, 2012.
- [9] 王兆仑, 刘朝晖, 高建华. 高粘度抗滑封装薄层沥青路面长效协同作用机理分析 [J]. 材料导报, 2019, 33 (增 2): 242-246.
- WANG Zhao-lun, LIU Zhao-hui, GAO Jian-hua. The Analysis of the Long-term Action Mechanism of High Viscosity Slip-resistant Encapsulated Thin Layer and Asphalt Pavement [J]. Materials Reports, 2019, 33 (S2): 242-246.
- [10] 李晶晶, 张擎, 陈忠达. 水泥路面环氧树脂磨耗层的抗滑衰变模型 [J]. 深圳大学学报 (理工版), 2017, 34 (6): 597-603.
- LI Jing-jing, ZHANG Qing, CHEN Zhong-da. Skid Resistance Decay Model of Epoxy Wear Layer on Cement Pavement [J]. Journal of Shenzhen University (Science & Engineering Edition), 2017, 34 (6): 597-603.
- [11] 王火明, 杨建国, 李汝凯, 等. 毫米级超薄彩色抗滑表层材料 Puas 性能研究 [J]. 公路交通技术, 2017, 33 (2): 5-10.
- WANG Huo-ming, YANG Jian-guo, LI Ru-kai, et al. Study on Performance of Millimeter Level Ultra-thin Colored Anti-skid Surface Material, Puas [J]. Technology of Highway and Transport, 2017, 33 (2): 5-10.
- [12] 韩亚芳, 吴迪, 孔海望, 等. 改性环氧树脂薄层在道路抗滑养护中的应用研究 [J]. 交通科技, 2019 (6): 39-42.
- HAN Ya-fang, WU Di, KONG Hai-wang, et al. Research on the Application of Modified Epoxy Resin Thin Layer in Road Anti-skid Curing [J]. Transportation Science & Technology, 2019 (6): 39-42.
- [13] 韩亚芳, 吴迪, 孔海望, 等. 潮湿路面用环氧树脂薄层铺装材料的研究 [J]. 新型建筑材料, 2020, 47 (1): 138-141, 154.
- HAN Ya-fang, WU Di, KONG Hai-wang, et al. Research on Epoxy Resin Thin Layer Pavement Material for Wet Pavement [J]. New Building Materials, 2020, 47 (1): 138-141, 154.
- [14] 谢群, 王全磊, 王火明, 等. 双组分环氧树脂抗滑薄层抗滑及力学性能研究 [J]. 重庆交通大学学报 (自然科学版), 2020, 39 (12): 74-79.
- XIE Qun, WANG Quan-lei, WANG Huo-ming, et al. Sliding Resistance and Mechanical Properties of Two-component Epoxy Resin Anti-skid Thin Layer [J]. Journal of Chongqing Jiaotong University (Natural Science Edition), 2020, 39 (12): 74-79.
- [15] 谭乐, 吴敏, 邓德毅, 等. 路用粗集料抗滑耐磨性能衰减规律试验研究 [J]. 公路交通科技, 2020, 37 (5): 20-24, 42.
- TAN Le, WU Min, DENG De-yi, et al. Experimental Study on Skid-resistance and Wear-resistance Performance Attenuation Rule of Coarse Aggregate [J]. Journal of Highway and Transportation Research and Development, 2020, 37 (5): 20-24, 42.
- [16] SHBEEB N I, KHASAWNEH M A, AL-OMANI A A. The Development of a Predictive Tool to Reduce Experimentation Time for the Polishing and Frictional Evaluation of Asphalt Pavement Surfaces [J]. Construction and Building Materials, 2018, 186: 740-750.
- [17] KHASAWNEH M A, SHBEEB N I, AL-OMARI A A. Analytical Tool to Shorten Polishing Time Based on Mean Texture Depth (MTD) of Flexible Pavements [J]. Road Materials and Pavement Design, 2020, 21 (3): 737-756.
- [18] KHASAWNEH M. Characterisation of Asphalt Pavement Surfaces Using Torque Measurements [J]. International Journal of Pavement Engineering, 2017, 18 (3): 189-201.
- [19] KHASAWNEH M A. The Development and Verification of a New Accelerated Polishing Machine [R]. Akron: University of Akron, 2008.