doi:10.3969/j.issn.1006-8023.2024.02.020

# 隧道复杂环境下沥青薄层罩面抗滑耐久性研究

吴寅[1],邱彬[1],闫朝杰[2],李强[2*]
(1.安徽省交通控股集团有限公司六安西高速公路管理中心,安徽 六安 237005;2.南京林业大学 土木工程学院,南京 210037)

**摘　要**:为研究沥青薄层罩面在高速公路隧道复杂环境下的抗滑耐久性,分别制备高韧热拌薄层罩面(罩面 A)、温拌沥青薄层罩面(罩面 B)、高和易性薄层罩面(罩面 C)与 AC-13 沥青混合料,在常规环境与模拟隧道复杂环境下进行轮碾磨耗试验。研究不同罩面类型、不同环境下磨耗次数对薄层罩面抗滑性能的影响。采用摆值初值变化、摆值衰减速率与指数预测模型评价不同罩面在常规环境与隧道环境下的对应抗滑衰变规律。试验结果表明,罩面 A 在隧道环境下摆值初值衰减最低,相较于罩面 B 减少 15.2%、较罩面 C 减少 28.4%、较 AC-13 沥青混合料减少 33%。且其摆值衰减速率仅为 0.292,较罩面 B 低 36%,较罩面 C 低 20.2%,较 AC-13 低 29.4%,在隧道环境下表现出优异的抗滑耐久性。此外,AC-13、罩面 B 与罩面 C 在隧道环境下的磨耗中会出现“临时纹理”与油蚀现象,造成抗滑性能衰减的短暂延缓。

**关键词**:薄层罩面;隧道环境模拟;轮碾磨耗试验;抗滑性能;摆值衰变规律
**中图分类号**:U416.217　　**文献标识码**:A　　**文章编号**:1006-8023(2024)02-0188-10

# Study on Skid Resistance and Durability of Asphalt Thin Layer Overlay Based on Complex Tunnel Environment

WU Yin[1], QIU Bin[1], YAN Chaojie[2], LI Qiang[2*]
(1. Anhui Province Transportation Holding Group Co., Ltd., Lu'an West Highway Management Center, Lu'an 237005, China; 2. College of Civil Engineering, Nanjing Forestry University, Nanjing 210037, China)

**Abstract**: In order to study the slip resistance and durability of asphalt thin layer overlay in the complex environment of tunnels, high-toughness hot-mixed thin layer overlay (overlay A), warm-mixed asphalt thin layer overlay (overlay B), high-tolerance thin layer overlay (overlay C) and AC-13 asphalt mixtures were prepared respectively, and wheel milling abrasion tests were carried out in both conventional and simulated tunnel environments. The effects of different types of overlay mixtures and the number of abrasion in different environments on the skid resistance of thin layer overlays were investigated. Pendulum value initial value change, pendulum value decay rate and exponential prediction model were used to evaluate the skid resistance decay law of different types of mixes in conventional and tunnel environments respectively. The test results showed that the initial value of the pendulum value of the overlay A in the tunnel environment was the lowest attenuation, compared with the overlay B reduced by 15.2%, compared with the overlay C reduced by 28.4%, compared with AC-13 asphalt mixtures reduced by 33%; and its pendulum value attenuation rate was only 0.292, compared with the overlay B was lower than 36%, compared with the overlay C was lower than 20.2%, compared with the AC-13 was lower than 29.4%, showing excellent skid resistance and durability in the tunnel environment. In addition, AC-13, overlay B, and overlay C were subject to `temporary texturing´ and oil erosion from abrasion in tunnel environments, resulting in a short-term delay in the degradation of skid resistance.

**Keywords**: Asphalt thin layer overlay; tunnel environment simulation; wheel mill abrasion test; anti-skid performance; BPN decay law

## 0　引言

路面抗滑性能在对道路行车安全的贡献中起重要作用[1-3],且由于公路隧道具有特殊的环境条件,在运营 2~4 a 后,隧道路面的抗滑性能已处于不可接受的状态,其事故率高达普通路段事故率的 1.34~8 倍[4]。综合国内外学者研究结果,目前已知的导致高速公路隧道内路面抗滑能力下降过快的原因主要有:内部环境相对潮湿封闭导致隧道路面出现“镜面”现象,尾气、油烟在潮湿条件下易覆盖在道路表面形成油腻性膜层,隧道内车速慢且制动多,加速路面的磨损,隧道路面施工难度大且施工质量难以保证等[5-10]。

基于行车安全性和驾驶舒适性考虑,对于抗滑性能衰减严重的公路隧道路段,后期多采取对路面加铺薄层沥青罩面、微表处、沥青再生和刻槽铣刨等手段进行抗滑性能提升改造[11-13]。其中,加铺薄

**收稿日期**:2023-10-07
**基金项目**:安徽省交通控股集团有限公司科技项目(JKKJ-2021-20);江苏省研究生科研与实践创新计划(SJCX22_0323)。
**第一作者简介**:吴寅,高级工程师。研究方向为高速公路养护。E-mail:282461647@qq.com
*通信作者:李强,博士,教授。研究方向为道路绿色养护与高效再生新技术、路面材料多尺度表征与仿真分析等。E-mail:liqiang2526@njfu.edu.cn
**引文格式**:吴寅,邱彬,闫朝杰,等. 隧道复杂环境下沥青薄层罩面抗滑耐久性研究[J]. 森林工程. 2024,40(2):188-197.
WU Y, QIU B, YAN C J, et al. Study on skid resistance and durability of asphalt thin layer overlay based on complex tunnel environment[J]. Forest Engineering, 2024, 40(2):188-197.

(C)1994-2024 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

层罩面的方案社会经济性较高,应用范围较为广泛,较多学者针对超薄罩面的抗滑耐久性展开研究。祝斯月等[14]对热拌超薄罩面 Superpave-5 的抗滑性能影响因素展开研究,结果表明空隙率与沥青饱和度显著影响其抗滑性能。Nie 等[15]采用车辙模拟试验法,对热拌环氧沥青混合料的抗滑性能进行长期跟踪评价,研究结果表明路面表面三维(3D)结构深度呈现先下降后上升的趋势,而微观纹理分布密度则呈现相反的趋势。徐欣等[16]提出基于“横向分布式车辙仪”的沥青混凝土抗滑性能测试试验方法,对路面摩擦系数的衰减进行了模拟研究,结果显示摩擦系数总体上呈下降趋势,期间有 2 次明显的上升。Zhu 等[17]采用加速加载磨耗仪对沥青罩面表面纹理的演变特征进行研究,结果表明,在纹理衰减速率上,呈现出初始迅速衰减,中途均匀衰减,最后稳定波动的规律。综上所述,目前国内外学者对于沥青路面或罩面的抗滑耐久性与衰变规律做出较为充分的研究,但在模拟试验过程中,往往忽略环境因素对长期磨耗可能造成的影响,尤其是隧道内部特有的工作环境。

现以模拟隧道特殊的工作环境条件为依据,选取目前常用的预防性养护薄层罩面,包括高韧热拌薄层罩面(A)、温拌沥青薄层罩面(B)、高和易性薄层罩面(C)与经典 AC-13 级配沥青混合料进行路用性能测试与隧道工作特殊环境下的长期磨耗试验,探究在隧道特殊环境下的不同沥青混合料的路表抗滑性能演变规律[18]。为在隧道内部特殊工作环境下实现高抗滑耐久性薄层罩面的选取与设计提供可靠的理论依据。

## 1　试验材料与级配设计

### 1.1　试验材料

1)沥青

本研究拟成型 4 种沥青混合料,其中 AC-13 级配沥青混合料选用苯乙烯-丁二烯共聚物(styrene-butadiene-styrene,SBS)改性沥青;高韧热拌薄层罩面(A)混合料所用沥青为高黏度特种改性沥青;温拌薄层罩面(B)所用沥青为 SBS 改性沥青;高和易性薄层罩面(C)所用沥青为高强度改性沥青。根据《公路工程沥青及沥青混合料试验规程》(JTG E20—2011),对该沥青的常规性能进行检测,具体技术指标见表 1,均满足规范要求。

**表 1　沥青技术指标**

Tab. 1 Asphalt technical indicators

| 试验指标 Test indicators | | SBS 改性沥青 SBS modified asphalt | | 高强沥青 High strength asphalt | | 高黏沥青 High viscosity asphalt | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | | 试验结果 Test results | 技术要求 Technical standard | 试验结果 Test results | 技术要求 Technical standard | 试验结果 Test results | 技术要求 Technical standard |
| 针入度(25 ℃)/ 0.1mm Penetration (25 ℃) | | 57.20 | 60~80 | 29.20 | 20~40 | 55.40 | 40~70 |
| 软化点/℃ Softening point | | 79.40 | ≥60 | 85.80 | ≥60 | 91.90 | ≥90 |
| 延度(5 ℃,5cm/min)/ cm Ductility (5 ℃,5cm/min) | | 38.20 | ≥30 | — | — | 47.70 | ≥40 |
| 运动黏度(135 ℃)/(Pa.s) Kinematic viscosity (135 ℃) | | 2.30 | ≤3 | 2.80 | ≤3 | 1.84 | ≤3 |
| 动力黏度(60 ℃)/(Pa.s) Dynamic viscosity (60 ℃) | | 6 523 | ≥800 | 18 200 | ≥4 000 | 369 500 | ≥200 000 |
| 弹性恢复率(25 ℃)(%) Elastic recovery rate (25 ℃) | | 82.10 | ≥75 | 78.10 | ≥65 | 98.10 | ≥95 |
| 溶解度(%) Solubility | | 99.84 | ≥99 | 99.91 | ≥99 | 99.85 | ≥99 |
| TFOT(或 RTFOT)后残留物 Residue after TFOT (or RTFOT) | 质量损失(%) Mass loss | 0.14 | -0.5~0.5 | -0.18 | -1~1 | 0.28 | -1~1 |
| | 针入度比 25 ℃(%) Needle penetration ratio 25 ℃ | 65.10 | ≥65 | 74.00 | ≥65 | 85.00 | ≥70 |
| | 延度 5 ℃/cm Ductility 5 ℃ | 24.20 | ≥20 | — | — | 26.90 | ≥25 |

(C)1994-2024 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

2)集料

本研究采用江苏溧水碎石厂产的玄武岩,其技术性能测试结果见表2,各项技术指标均满足《公路工程集料试验规程》(JTG E42—2005)中的集料技术要求。

### 1.2 混合料配合比设计

依据矿料级配设计上下限控制范围及空隙率控制要求确定4种混合料的矿料级配组成,4种沥青混合料矿料级配设计见表3。按照《公路工程沥青及沥青混合料试验规程》(JTG E20—2011)成型马歇尔试件,最终确定AC-13级配最佳油石比为5%;罩面A最佳油石比为6.5%;罩面B最佳油石比为6%;罩面C最佳油石比为6%。

**表2 粗、细集料技术指标**

Tab. 2 Coarse and fine aggregate technical indicators

| 集料 Aggregates | 试验指标 Test indicators | 试验结果 Test results | 技术要求 Technical standard |
|---|---|---|---|
| 粗集料 Coarse aggregate | 石料压碎值(%) | 10.90 | ≤26 |
| | 水洗法<0.075 mm颗粒含量(%) | 0.27 | ≤0.8 |
| | 坚固性(%) | 3.80 | ≤12 |
| | 磨光值/BPN | 54.00 | ≥42 |
| 细集料 Fine aggregate | 表观相对密度/(g·cm$^3$) | 2.859 | ≥2.5 |
| | 砂当量(%) | 82.10 | ≥60 |

**表3 4种沥青混合料矿料级配设计结果**

Tab. 3 Design results of mineral gradation of four asphalt mixtures

| 筛孔尺寸/mm Screen size | AC-13 | | | 罩面A Overlay A | | | 罩面B Overlay B | | | 罩面C Overlay C | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | 级配上限 Gradation limit | 目标级配 Target gradation | 级配下限 Lower limit of gradation | 级配上限 Gradation limit | 目标级配 Target gradation | 级配下限 Lower limit of gradation | 级配上限 Gradation limit | 目标级配 Target gradation | 级配下限 Lower limit of gradation | 级配上限 Gradation limit | 目标级配 Target gradation | 级配下限 Lower limit of gradation |
| 13.2 | 100 | 97.5 | 90 | 100 | 100 | 100 | 100 | 100 | 100 | 100 | 100 | 100 |
| 9.5 | 85 | 75.2 | 65 | 100 | 100 | 100 | 100 | 100 | 100 | 100 | 96.4 | 83 |
| 4.75 | 68 | 44.4 | 38 | 80 | 55.7 | 25 | 100 | 75.5 | 65 | 40 | 34.1 | 20 |
| 2.36 | 50 | 30.7 | 24 | 30 | 15.5 | 5 | 30 | 21 | 15 | 35 | 26.7 | 18 |
| 1.18 | 38 | 20.8 | 15 | 25 | 10 | 5 | 20 | 10.7 | 5 | 28 | 19.3 | 13 |
| 0.6 | 28 | 15.2 | 10 | — | — | — | — | — | — | 24 | 15.2 | 10 |
| 0.3 | 20 | 10.1 | 7 | — | — | — | — | — | — | 20 | 12.1 | 8 |
| 0.15 | 15 | 8.2 | 5 | — | — | — | — | — | — | 12 | 9.4 | 6 |
| 0.075 | 8 | 6.4 | 4 | 10 | 5.7 | 0 | 7 | 5.5 | 0 | 8 | 6.2 | 4 |

## 2 试验方案

### 2.1 基本路用性能试验

采用车辙试验评价沥青混合料的高温性能,按照《公路工程沥青及沥青混合料试验规程》(JTG E20—2011,简称“试验规程”)成型4种混合料的车辙板试件,按标准方法养护后进行高温车辙试验,以动稳定度作为评价指标。根据试验规程,采用浸水马歇尔试验和冻融劈裂试验测试4种沥青混合料的水稳定性,以残余稳定度与残余强度比评价各混合料的水稳定性。同时以低温下的弯曲破坏应变评价各沥青混合料的低温抗裂性。

### 2.2 抗滑耐久性试验

1)轮碾磨耗试验

采用车辙试验仪的轮碾磨耗模拟路面服役状态下的抗滑性能衰减过程,车辙试验仪的运行频率为42次/min,轮胎施加在车辙板上荷载为0.7 MPa。为追踪不同超薄罩面在路面服役状态下的抗滑性能动态衰减过程,采用摆式仪对每5 000次磨耗后的摆值进行测试,总磨耗次数为60 000次。考虑到车辙试验仪轮胎宽度为50 mm,而摆式仪摩擦块长度为76.2 mm,因此在磨耗试验中,每5 000次磨耗需要并行磨耗2道轮迹,使磨耗轮迹宽度不小于95 mm,磨耗示意图如图1所示。

2)隧道环境模拟方案

为探究隧道环境下不同罩面的抗滑性能长期衰减情况,并与常规环境下的抗滑性能衰减状况对比,需在常规轮碾磨耗试验中还原模拟隧道工作环境。相较于常规状态下的磨耗,基于隧道工作环境的试验组需在封闭、常温恒湿环境中进行轮碾磨耗,且试件表面需施加模拟的环境条件。

(C)1994-2024 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

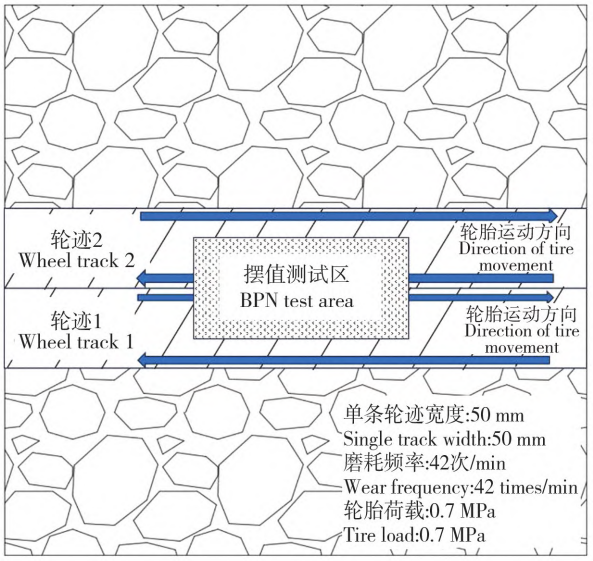



**图 1　轮碾磨耗参数及示意图**

Fig. 1 Wheel milling abrasion parameters and schematic diagrams

由于隧道内部空气流动性差,水、尾气易在路表堆积形成油腻性膜层,且缺少雨水冲刷,路表颗粒污染物得不到及时有效的清理。本研究主要通过在试件表面施加水、油污和颗粒污染物的耦合条件模拟还原路面在隧道内的服役状态。在马涛等[19]的研究中,将路表受水影响程度分为:干燥状态($h_w$ 为水膜或油膜厚度,mm)$h_w=0$ mm;潮湿状态 $0<h_w\leqslant 0.5$ mm;润滑状态 $0.5<h_w\leqslant 1$ mm;积水状态 $h_w>1$ mm。由于隧道内路表水膜主要由车辆从外界带入,并不受降雨直接影响,路表水膜厚度达不到润滑与积水状态。因此,本次环境模拟通过在试件表面喷洒水以达到潮湿状态,水膜厚度取 0.4 mm,计算公式如式(1)所示。隧道油污主要为汽车尾气在路面的黏附,另外有少量机油泄露。赵风财等[20]的研究表明,隧道内某一处出现的油污质量一般在 70~90 mg;同时经实地调查考证发现,隧道路面各处油斑的平均面积在 28.3 $cm^2$ 左右。综合考虑上述因素,可计算出隧道路表每处油膜厚度大概在 0.028~0.036 mm。依据该计算结果,最终将本次隧道环境模拟中的油膜厚度控制在 0.03 mm,通过在测试区域涂布机油实现,计算公式见式(1)

$$h_w=\frac{m}{\rho\times s}\times 10\text{。}\qquad(1)$$

式中:$m$ 为试件表面水喷洒量或油涂布量,g;$\rho$ 为水或机油的密度;$s$ 为水在试件表面的喷洒面积或机油涂布面积,$cm^2$。

因不同粒径颗粒污染物对路面抗滑性能影响不同[21],在还原路面在隧道工作环境的颗粒污染物堆积情况时,还需对颗粒污染物的粒径组成进行探究。为科学有效还原隧道路面颗粒污染物粒径组成情况,本研究实地对 3 段受不同污染程度的隧道路表规定面积内的颗粒污染物进行收集,现场路表图与收集到的颗粒污染物如图 2 所示。对采集到的颗粒污染物进行粒径分析,取不同粒径范围内的颗粒占比平均值作复配方案的粒径组成,粒径分析与复配方案见表 4。采用 3 段隧道路表面的单位面积内颗粒污染物总量的平均值作颗粒污染复配方案的单位面积撒布量,为 0.08 $g/cm^2$。

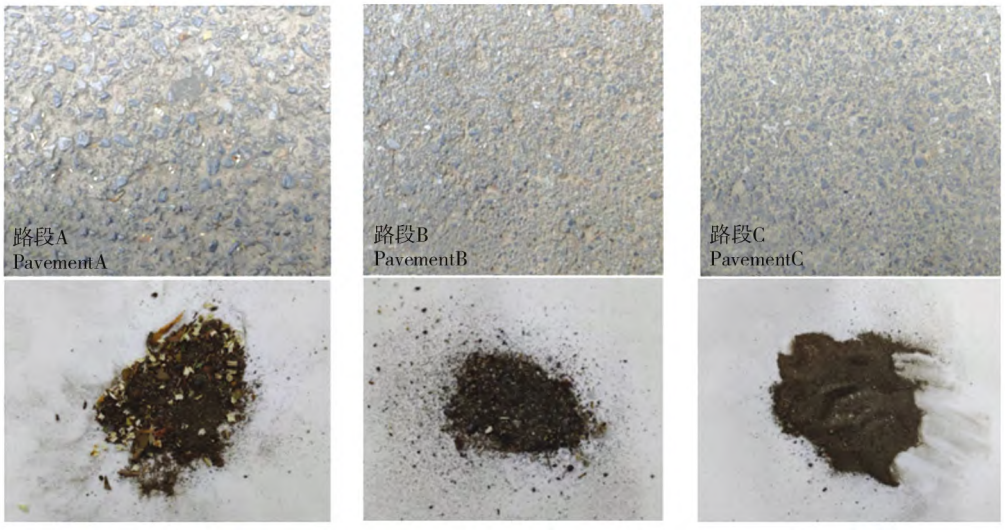



**图 2　选取路段与颗粒污染物收集示意图**

Tab. 2 Schematic diagram of selected road sections and collection of particulate pollutants

(C)1994-2024 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

表4 污染物粒径占比

Fig. 4 Pollutant particle size fraction

| 粒径区间/ mm Particle size range | 路段 A(%) Pavement A | 路段 B(%) Pavement B | 路段 C(%) Pavement C | 复配方案(%) Compounding program |
|---|---|---|---|---|
| 1.18~2.36 | 14.29 | 11.11 | 8.33 | 11.24 |
| 0.60~1.18 | 22.86 | 27.78 | 16.63 | 22.42 |
| 0.30~0.60 | 22.86 | 22.22 | 18.95 | 21.34 |
| 0.15~0.30 | 17.14 | 16.67 | 23.26 | 19.02 |
| <0.15 | 22.86 | 22.22 | 32.84 | 25.97 |

## 3 试验结果与分析

### 3.1 基本路用性能测试

依据试验规程,对不同沥青混合料的基本路用性能包括高温稳定性、低温抗裂性和水稳定性进行试验测试,其动稳定度、低温破坏应变、残留稳定度与冻融劈裂强度比结果见表5。

表5 沥青混合料基本路用性能试验结果

Tab. 5 Basic road performance test results of asphalt mixtures

| 类型 Type | 高温稳定性试验 High temperature stability test | 低温抗裂性试验 Low temperature cracking resistance test | 浸水马歇尔试验 Marshall test with water | | | 冻融劈裂试验 Freeze-thaw splitting test | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | 动稳定度/(次·$mm^{-1}$) Dynamic stability | 弯曲破坏应变/με Bending destructive strain | 浸水前稳定度/kN Stability before immersion | 浸水后稳定度/kN Stability after immersion in water | 残留稳定度(%) Residual stability | 冻融前劈裂强度/MPa Splitting strength before freeze-thaw | 冻融后劈裂强度/MPa Splitting strength after freeze-thaw | 冻融劈裂强度比(%) Freeze-thaw splitting strength ratio |
| AC-13 AC-13 | 5 112 | 2 752 | 12.4 | 10.8 | 87.1 | 0.67 | 0.55 | 82.1 |
| 罩面 A Overlay A | 7 250 | 3 098 | 14.8 | 13.4 | 90.5 | 0.76 | 0.66 | 86.8 |
| 罩面 B Overlay B | 5 914 | 2 689 | 13.7 | 11.8 | 86.1 | 0.58 | 0.47 | 81.0 |
| 罩面 C Overlay C | 7 988 | 2 890 | 16.5 | 15.5 | 94.0 | 0.72 | 0.64 | 88.8 |

由表5的试验结果来看,本研究采用的4种沥青混合料的高温稳定性、低温抗裂性与水稳定性均满足规范要求。其中罩面C的高温稳定性最好,达到8 000次/mm水平,这是由于罩面C不仅有粗集料形成稳定的骨架结构,又有充足的细集料填充空隙,有效提升混合料的密实程度,赋予混合料优异的高温稳定性。同时罩面A由于采用高黏沥青也表现出优异的高温稳定性。低温抗裂性方面,由于4种混合料均无纤维掺入,低温下抵抗开裂能力无太大差别,其中罩面B由于温拌剂的掺入,在一定程度上削弱其低温抗裂性。且罩面B混合料空隙率较大,易受水侵入内部,同时掺入温拌剂,沥青与集料间黏附性降低,导致其水稳定性在4种混合料中也表现较差[22]。

### 3.2 抗滑耐久性研究

本研究采用沥青混合料不同磨耗次数下的摆值与摆值衰减率指标评价不同沥青混合料在常规环境中与模拟隧道工作环境下的长期抗滑性能[23]。其中摆值每一试件在每一磨耗次数下取稳定的5次读数(互相差值不超过2),取其平均值作为最终摆值,常规环境与模拟隧道环境下的路表抗滑性能衰减状况如图3所示。

由图3可以看出,各类型路面在摆值的衰减上表现出类似的趋势,即抗滑性能最初快速下降,然后下降变缓并最终趋于稳定。依据此衰减趋势,可将整个抗滑性能衰减过程分为快速衰减期与缓慢衰减期2个阶段。在常规应用场景下,各类型路面抗滑性能衰减阶段划分以40 000次磨耗处为分界点,0~40 000次路面抗滑性能衰减较快,为快速衰减期,40 000~60 000次抗滑性能衰减明显变缓,为缓慢衰减期。在隧道应用场景下,罩面A的抗滑性能同样在0~40 000次为快速衰减期,在40 000~60 000次为缓慢衰减期。而罩面B、罩面C与AC-13路面的抗滑性能在30 000次磨耗处就出现明显变缓,此3种路面抗滑性能的快速衰减期在第0~30 000次,缓慢衰减期在30 000~60 000次,针对出现抗滑性能提前进入缓慢衰减期现象的解释可具体参考图4的分析。路面抗滑性能呈现出两阶段衰减规律主要与路面宏微观纹理的磨耗有关,在抗滑性能快速衰减期,路面较为突出的宏微观纹理在轮

(C)1994-2024 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

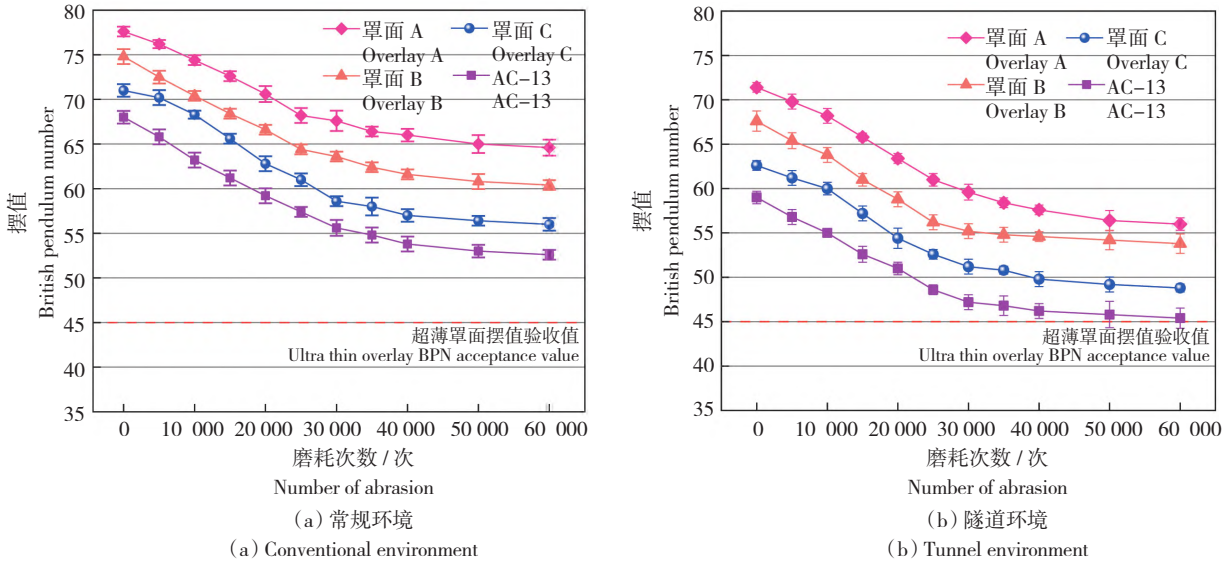



**图 3　沥青混合料在不同环境下摆值随磨耗次数变化曲线**

Fig. 3 Curves of BPN of asphalt mixtures with the number of abrasion in different environments

胎荷载作用下被快速磨耗，路表粗糙度降低，造成路面抗滑性能迅速下降。而当轮载磨耗次数继续增加，路表集料棱角逐渐被磨平，此时表面粗糙度变化已不明显，所以此阶段路面抗滑性能衰减缓慢并逐渐趋于稳定。

由图 3(a)可以看出，4 种沥青路面在常规环境中，高韧热拌薄层罩面 A 摆值初值为 77.6，全程衰减 13；温拌薄层罩面 B 摆值初值 74.8，全程衰减 14.4；高和易性薄层罩面 C 摆值初值为 71，全程衰减 15；AC－13 沥青路面摆值初值 68，全程衰减 15.4。由以上数据可以看出，在常规环境中，罩面 A 表现出优异的抗滑性能，其摆值初值处在较高水平而全程衰减处在较低水平。这是由于和其他沥青混合料相比，罩面 A 采用较多的粗集料，且为间断开级配，空隙率较大，使得表面具有优异的宏微观纹理。同时采用的高黏沥青，使得粗集料形成的骨架有着可靠的稳定性，可有效减小宏观纹理受轮碾磨耗的影响。

将图 3(a)和图 3(b)对比来看，与常规应用场景相比，在隧道应用场景下，罩面 A 在 0 次磨耗时的摆值降低 6.1，下降 7.86%；罩面 B 在 0 次磨耗时的摆值降低 7.2，下降 9.63%；罩面 C 在 0 次磨耗时的摆值降低 8.4，下降 11.83%；AC－13 路面在 0 次磨耗时的摆值降低 9.1，下降 13.38%。上述数据表明，各类型路面在未经磨耗时，罩面 A 的抗滑性能受隧道应用场景的影响最小。这是由于在测试摆值时，施加隧道环境测试条件和常规环境相比，增加油膜与颗粒污染物的影响。而罩面 A 空隙率较大，表面宏观构造较为丰富，其受颗粒污染物影响程度较低，主要受油膜影响，但罩面 C 与 AC－13 混合料为密级配，颗粒污染物施加后极易降低其抗滑性能。

图 4 为不同罩面材料在常规环境与隧道环境中各磨耗区间的摆值衰减占比，值得注意的是，罩面 A 在 30 000～60 000 次摆值衰减占全程的 23.8%，罩面 B 为 9.5%，罩面 C 为 17.3%，AC－13 沥青混合料为 14.1%。可见罩面 B、罩面 C、AC－13 混合料与罩面 A 相比在 30 000 磨耗处，摆值衰减均呈现出明显的提前变缓趋势。这是由于在磨耗过程中，经历长时间的磨耗压实，大粒径颗粒污染物易被碾轮压入密级配混合料表面沥青胶浆中，形成“临时纹理”，图 5 为在试验过程中记录到的“临时纹理”，此类临时纹理短暂地提升罩面 C 与 AC－13 沥青混合料的摆值，使其表现出提前变缓趋势。同时，由于混合料表面存在水膜和油膜，而罩面 B 在成型时温度较低且级配多为粗集料，在有隧道环境下的磨耗产生混合料颗粒油蚀剥落现象，如图 6 所示。随着颗粒的剥落，使得混合料表面宏观构造变得更为丰富，进而提升其抗滑性能，极大程度上延缓罩面 B 摆值的衰减。但“临时纹理”给路面抗滑性能带来极大的变异性，当大颗粒污染物被车辆带走，会加剧改变路表的抗滑性能；而油蚀更是破坏混合料的整体稳定性。此 2 种现象虽能短暂提升抗滑性能，延缓衰变，但整体仍是负面效果。

(C)1994-2024 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

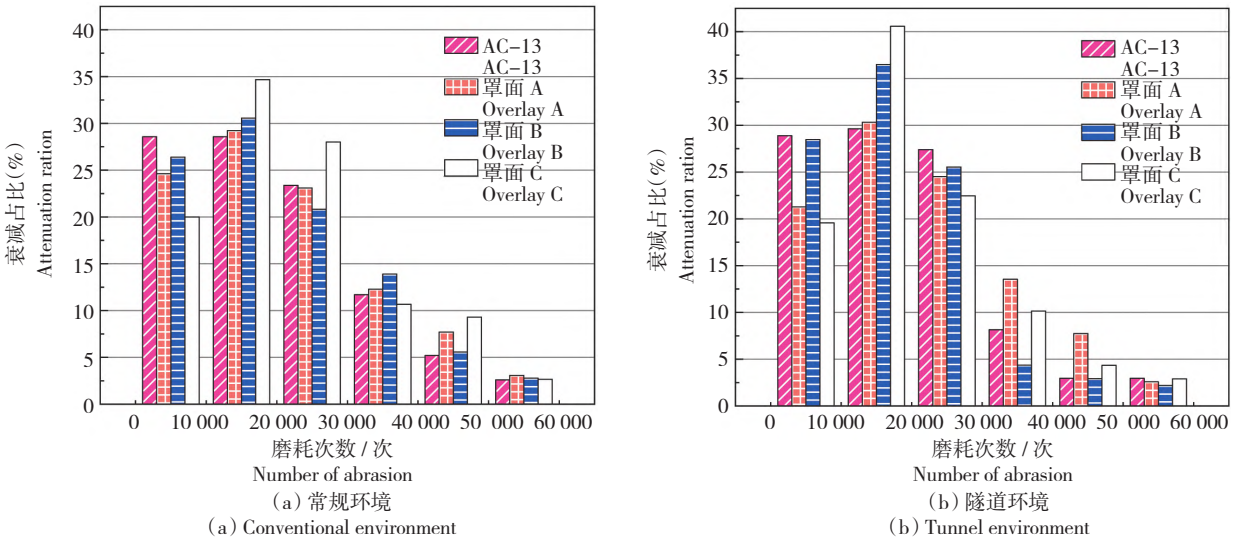



**图 4 沥青混合料在不同环境下各磨耗区间摆值衰减占比**

Fig. 4 Percentage of BPN decay for each abrasion interval of asphalt mixtures in different environments



**图 5 大粒径颗粒污染物形成的“临时纹理”**

Fig. 5 ‘Temporary texture’ formed by large particle size contaminants

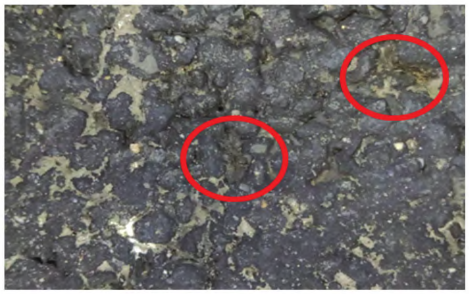


**图 6 混合料颗粒油蚀剥落**

Fig. 6 Oil spalling of asphalt mixture particles

将隧道环境下混合料摆值衰减幅值与常规环境下摆值衰减幅值对比来看,罩面 A 隧道环境下摆值衰减幅值为 15.5,高于常规环境下的 13。但罩面 B 隧道环境下摆值衰减幅值为 13.7,略小于常规环境下的 14.4,这是由于罩面 B 存在上述提到的颗粒油剥落现象,在一定程度上丰富表面宏观构造,总体降低摆值衰减幅值。罩面 C 与 AC-13 沥青混合料这类密级配混合料,由于存在上述提到的“临时纹理”,使得隧道环境下整体衰减幅值也都略小于常规环境下衰减幅值。

## 4 长期抗滑性能研究

从磨耗试验结果来看,无论有无施加隧道环境,沥青路面抗滑性能衰减都分为 2 个阶段,分别为快速衰减期与缓慢衰减期。为直观有效地评判曲线的变化规律,采用数学模型对数据点进行拟合。选用式(2)的指数模型进行拟合[24]。

$$y = Ae^{-Bx} + C \text{。} \qquad (2)$$

式中:$A$ 为摆值衰减幅值;$B$ 为摆值衰减速率;$C$ 为摆值终值;$y$ 为摆值;$A+C$ 代表摆值初值;$x$ 为磨耗次数,万次。指数模型拟合结果如图 7 和表 6 所示。

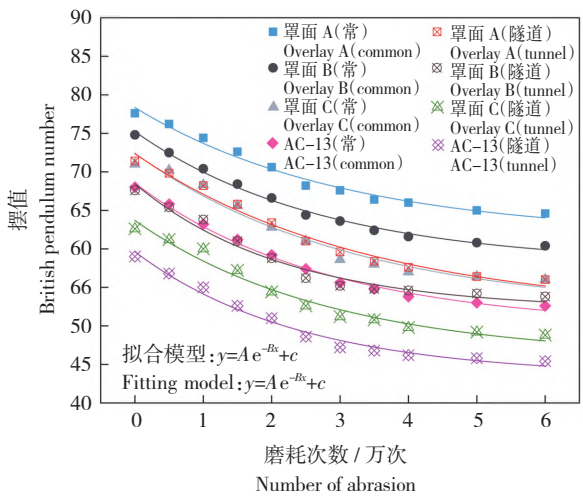



**图 7 摆值拟合曲线**

Fig. 7 BPN fitting curve

(C)1994-2024 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

表 6　摆值-指数公式拟合结果

Tab. 6 BPN-exponential formula fitting results

| 混合料类型 Type of mixture | *A* | *B* | *C* | *A*+*C* | 相关系数($R^2$) Correlation coefficient ($R^2$) |
|---|---|---|---|---|---|
| 罩面 A(常规) Overlay A (Conventional) | 16.664 | 0.328 | 61.690 | 78.354 | 0.985 |
| 罩面 B(常规) Overlay B (Conventional) | 17.288 | 0.363 | 57.940 | 75.228 | 0.994 |
| 罩面 C(常规) Overlay C (Conventional) | 20.520 | 0.316 | 51.906 | 72.426 | 0.971 |
| AC-13(常规) AC-13 (Conventional) | 18.681 | 0.360 | 49.853 | 68.534 | 0.994 |
| 罩面 A(隧道) Overlay A (Tunnel) | 20.763 | 0.292 | 51.589 | 72.352 | 0.984 |
| 罩面 B(隧道) Overlay B (Tunnel) | 16.390 | 0.457 | 52.062 | 68.452 | 0.974 |
| 罩面 C(隧道) Overlay C (Tunnel) | 17.800 | 0.351 | 45.880 | 63.680 | 0.974 |
| AC-13(隧道) AC-13 (Tunnel) | 16.190 | 0.414 | 43.441 | 59.631 | 0.984 |

结合图 7 和表 6 的拟合结果可知,采用所述的抗滑衰减模型对不同混合料在不同环境中的衰减曲线拟合较好,相关系数($R^2$)均在 0.97 以上,这表明所采用的指数模型可较好地反映混合料随磨耗次数增加的衰减规律。由表 6 可以看出,在常规环境中,罩面 A 的衰减幅值为 16.664,为 4 种混合料最低,较罩面 B 低 0.624,较罩面 C 低 3.856,较 AC-13 混合料低 2.017。同时,罩面 A 的摆值终值也远远高出其余 3 种混合料,较罩面 B 高出 6%,比罩面 C 高出 15.9%,比 AC-13 混合料高出 19.2%。且从 4 种混合料的摆值衰减率来看,罩面 A 仍处于较低水平。这些数据表明,罩面 A 和其他混合料相比,在常规环境中表现出优异的长期抗滑性能。这是由于:罩面 A 混合料采用较多粗集料且其空隙率为 13%左右,较高的空隙率为其提供丰富的宏微观构造,同时其采用的高黏沥青也可有效保证混合料整体稳定性,减少表面构造因轮载而产生的变形,从而延缓抗滑摆值衰减。

在引入隧道环境变量后,罩面 A 的摆值初值最高,为 72.352,较罩面 B 高出 5.4%,较罩面 C 高出 12%,较 AC-13 混合料高出 17.6%。在经受磨耗后,罩面 A 在隧道环境下的摆值衰减速率为 0.292,而罩面 B 为 0.457,罩面 C 为 0.351,AC-13 路面为 0.414。罩面 A 摆值衰减速率较罩面 B 低 36.1%,较罩面 C 低 20.2%,较 AC-13 混合料低 29.4%。这表明罩面 A 不仅有表现优异的抗滑初值,在隧道环境下的长期磨耗中,仍能以极低的摆值衰减速率表现出优异的抗滑耐久性。值得注意的是,不同于常规应用场景,在隧道应用场景下,罩面 A 的摆值衰减幅值在 4 种路面中反而变为最高。这可能是由前文提到的“临时纹理”或油蚀剥落现象导致。此类现象会在一定程度上提高路表粗糙度,并短暂增加罩面 B、罩面 C 与 AC-13 路面的抗滑性能,导致整体衰减幅值减少。但此类油蚀剥落与临时纹理现象会破坏沥青混合料的整体稳定性,并增加抗滑变异性,总体上仍是隧道应用场景下造成的负面影响。罩面 A 之所以能在隧道环境中也表现出优异的长期抗滑性能,可能是由于其较大的表面构造深度,使得颗粒污染物存在于空隙之中,而不像密级配混合料一样浮于表面。因而颗粒污染物无法起到加速磨耗作用,反而水膜与油膜在磨耗过程中起到润滑作用,在一定程度上降低了摆值衰减速率,使其在长期磨耗中抗滑性能表现优异。

## 5　结论

通过改进的室内轮碾磨耗试验和指数拟合模型研究不同类型罩面在隧道复杂环境下的抗滑性能及其衰减规律,并综合分析不同罩面的抗滑性

(C)1994-2024 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

能,主要结论如下。

1)4种罩面在常规环境与模拟隧道环境下的抗滑性能衰减均呈现两阶段式下降规律,分别为快速衰减期与缓慢衰减期。常规环境下各类型路面的抗滑性能在磨耗4万次后开始进入缓慢衰减期;隧道环境下高韧热拌薄层罩面A的抗滑性能仍是在4万次磨耗后进入缓慢衰减期,而温拌沥青薄层罩面B、高和易性薄层罩面C与AC-13路面的抗滑性能变为3万次磨耗后进入缓慢衰减期。

2)超薄罩面的空隙率对隧道环境下路表摆值初值变化起主要作用。引入隧道环境后,高韧热拌薄层罩面A表面摆值初值受隧道环境因素影响较小,摆值平均降低6.7;AC-13与高和易性罩面C等密级配的薄层罩面表面摆值初值受隧道环境影响较大,摆值分别降低了9.1与8.4。

3)AC-13与高和易性薄层罩面C在隧道环境下的磨耗过程中会出现"临时纹理",而温拌沥青薄层罩面B在隧道环境下的磨耗过程易受油膜侵蚀,造成颗粒剥落。此两类现象虽然会短暂提升抗滑性能,但会增加抗滑变异性并破坏混合料整体稳定性,仍为负面现象。

4)从指数模型拟合结果可得,罩面所用沥青与空隙率均会影响罩面在隧道环境下的长期抗滑性能。和常规环境相比,引入隧道环境后,采用高黏沥青与开级配的高韧热拌薄层罩面A摆值衰减速率略有降低,约降低0.036;而采用温拌沥青的罩面B和采用密级配的AC-13、高和易性罩面C的摆值衰减速率均较常规环境提高,平均提高0.061。

## 【参 考 文 献】


[1] CHEN X B, WANG J T, LIU H, et al. Influence of rainfall on skid resistance performance and driving safety conditions of asphalt pavements[J]. Journal of Southeast University (English Edition), 2019, 35(4): 482-490.

[2] 李淑庆,彭圃朗.基于道路安全保障度的山区公路交通事故机理研究[J].公路,2016,61(2):154-161.
LI S Q, PENG Y L. Research on traffic accident mechanisms for mountainous highways based on road safety guarantee level[J]. Highway, 2016, 61(2): 154-161.

[3] 赵华,李松,熊锐,等.化学组成对路用集料抗滑性能的影响[J].公路工程,2022,47(3):104-111.
ZHAO H, LI S, XIONG R, et al. Influence of chemical composition on the skid resistance of road aggregate[J]. Highway Engineering, 2022, 47(3): 104-111.

[4] WANG F, WANG J, ZHANG X F, et al. Analysis of the causes of traffic accidents and identification of accident-prone points in long downhill tunnel of mountain expressways based on data mining[J]. Sustainability, 2022, 14(14): 8460.

[5] 吴建涛,马鑫源,曹云刚,等.湿度-尾气共同作用对沥青混合料抗滑性能的影响[J].同济大学学报(自然科学版),2022,50(7):1017-1025.
WU J T, MA X Y, CAO Y G, et al. Effect of humidity-tail gas combined action on skid-resistance performance of asphalt mixture[J]. Journal of Tongji University (Natural Science), 2022, 50(7): 1017-1025.

[6] GUO Z Y, YANG Q, LIU B M. Mixture design of pavement surface course considering the performance of skid resistance and disaster proof in road tunnels[J]. Journal of Materials in Civil Engineering, 2009, 21(4): 186-190.

[7] 蔡正森,黄传武,许新权,等.公路隧道不同纹理路面服役状况调查[J].土木工程与管理学报,2020,37(3):103-108.
CAI Z S, HUANG C W, XU X Q, et al. Investigation on service status of different textured pavements in road tunnel[J]. Journal of Civil Engineering and Management, 2020, 37(3): 103-108.

[8] MARCOBAL J R, SALADO F, FLINTSCH G. Evaluation of various surface cleaning techniques inside tunnels on pavement skid resistance[J]. Materials, 2021, 14(19): 5660.

[9] 彭龙虎,李向东,李文斌,等.高速铁路隧道内接触网空气动力学影响因素研究[J].哈尔滨理工大学学报,2023,28(3):149-158.
PENG L H, LI X D, LI W B, et al. Study on aerodynamic factors of overhead catenary in high-speed railway tunnel[J]. Journal of Harbin University of Science and Technology, 2023, 28(3): 149-158.

[10] 张家松,冷志明.超声阵列法在公路隧道仰拱厚度检测中的应用[J].公路工程,2022,47(4):78-80,142.
ZHANG J S, LENG Z M. Application of the ultrasonic array method in the thickness detection of highway tunnel invert[J]. Highway Engineering, 2022, 47(4): 78-80, 142.

[11] ZHENG M L, TIAN Y J, WANG X P, et al. Research on grooved concrete pavement based on the durability of its anti-skid performance[J]. Applied Sciences, 2018, 8(6): 891.

[12] 张晓华,张蓉,周水文,等.铣刨工艺提高隧道内水泥混凝土路面抗滑性能应用探讨[J].中外公路,2016,36(2):62-65.
ZHANG X H, ZHANG R, ZHOU S W, et al. Discussion on the application of milling and planing technology to improve the anti-sliding performance of cement concrete


(C)1994-2024 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

pavement in tunnel[J]. Journal of China & Foreign Highway, 2016, 36(2): 62-65.

[13] 李燕. 隧道内水泥混凝土路面抗滑性能预防性养护研究[J]. 公路,2020,65(4):352-354.
LI Y. Study on preventive maintenance of anti-sliding performance of cement concrete pavement in tunnel[J]. Highway, 2020, 65(4): 352-354.

[14] 祝斯月,秦先涛,姜艺,等. 热拌超薄罩面 Superpave-5 抗滑性能影响因素分析[J]. 材料科学与工程学报,2018,36(4):605-609,559.
ZHU S Y, QIN X T, JIANG Y, et al. Influence factors on friction performance of hot-mixed ultra-thin overlay superpave-5[J]. Journal of Materials Science and Engineering, 2018, 36(4): 605-609, 559.

[15] NIE W, WANG D Y, YAN J J, et al. Optimal design of mix proportion of hot-mix epoxy asphalt mixture for steel bridge decks and its anti-slip performance[J]. Buildings, 2022, 12(4): 437.

[16] 徐欣,刘文浩,来井孝. 基于"横向分布式车辙仪"的沥青混凝土抗滑性能评价研究[J]. 石油沥青,2020,34(6):54-58.
XU X, LIU W H, LAI J X. Study on the evaluation of asphalt concrete anti-sliding performance base on lateral displacement rutting tester[J]. Petroleum Asphalt, 2020, 34(6): 54-58.

[17] ZHU S Y, JI X P, ZHANG Z M, et al. Evolution characteristics of the surface texture of the wearing course on asphalt pavement based on accelerated pavement polishing[J]. Construction and Building Materials, 2022, 333: 127266.

[18] 申爱琴,刘波,郭寅川,等. 隧道路面钢渣沥青混合料抗滑性能衰减试验研究[J]. 建筑材料学报,2019,22(2):284-291.
SHEN A Q, LIU B, GUO Y C, et al. Skid resistance attenuation of steel slag asphalt mixtures on tunnel pavement[J]. Journal of Building Materials, 2019, 22(2): 284-291.

[19] 马涛,汤钧尧,郑彬双,等. 雨天条件下车辆轮胎与沥青路面间附着特性[J]. 北京工业大学学报,2022,48(6):635-643.
MA T, TANG J Y, ZHENG B S, et al. Adhesion characteristics of vehicle tire and asphalt pavement under rainy conditions[J]. Journal of Beijing University of Technology, 2022, 48(6): 635-643.

[20] 赵风财,肖广兵,张涌. 基于高光谱成像的隧道油污监测系统设计[J]. 土木建筑工程信息技术,2021,13(1):46-50.
ZHAO F C, XIAO G B, ZHANG Y. Design of tunnel oil pollution monitoring system based on hyperspectral imaging[J]. Journal of Information Technology in Civil Engineering and Architecture, 2021, 13(1): 46-50.

[21] 胡力群,许松,徐峰,等. 颗粒污染物对 AC-13 沥青路面抗滑性能影响[J]. 大连理工大学学报,2021,61(2):197-205.
HU L Q, XU S, XU F, et al. Effect of particle pollutants on skid resistance of AC-13 asphalt pavement[J]. Journal of Dalian University of Technology, 2021, 61(2): 197-205.

[22] YANG F, CONG L, SHI J C, et al. Laboratory evaluation on pavement performance of polyurethane mixture for thin overlay[J]. Journal of Materials in Civil Engineering, 2021, 33(8):4021212.

[23] 武建民,覃仲,徐长春,等. 基于加速磨耗试验的钢渣-橡胶沥青混合料抗滑性能[J]. 科学技术与工程,2022,22(9):3735-3743.
WU J M, QIN Z, XU C C, et al. Steel slag-rubber asphalt mixture skid resistance based on accelerated wear test[J]. Science Technology and Engineering, 2022, 22(9): 3735-3743.

[24] 丛林,谭乐,吴敏,等. 基于集料特性的沥青混合料长期抗滑性能衰减模型[J]. 同济大学学报(自然科学版),2019,47(5):668-672.
CONG L, TAN L, WU M, et al. Long-term anti-sliding performance attenuation model of asphalt mixture based on aggregate characteristics[J]. Journal of Tongji University (Natural Science), 2019, 47(5): 668-672.

(C)1994-2024 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net