

钱振东, 谢宇欣, 南航, 等. 基于熵权-TOPSIS 模型下瓯江北口大桥聚氨酯铺装体系碎石优化[J]. 长安大学学报(自然科学版), 2023, 43(4): 1-11.

QIAN Zhen-dong, XIE Yu-xin, NAN Hang, et al. Gravel scheme optimization of polyurethane paving system under entropy right-TOPSIS model in Oujiang Beikou Bridge[J]. Journal of Chang'an University (Natural Science Edition), 2023, 43(4): 1-11.

DOI: 10.19721/j.cnki.1671-8879.2023.04.001

## 基于熵权-TOPSIS 模型下瓯江北口大桥 聚氨酯铺装体系碎石优化

钱振东<sup>1</sup>, 谢宇欣<sup>1</sup>, 南航<sup>2</sup>, 王晗<sup>3</sup>, 薛永超<sup>1</sup>, 闵一桐<sup>1</sup>, 汤文杰<sup>1</sup>

(1. 东南大学智能运输系统中心, 江苏南京 211189; 2. 瓯江口大桥有限公司, 浙江温州 325000;

3. 宁波路宝科技实业有限公司, 浙江宁波 315800)

**摘要:** 为保证瓯江北口大桥下层桥钢桥面铺装具备良好的服役性能, 依托瓯江北口大桥下层桥钢桥面铺装项目, 以碎石撒布量和碎石粒径为变量设计正交试验, 对多种碎石方案下的组合试件进行层间拉拔试验、高温车辙试验与低温弯曲试验, 研究性能指标分别与碎石撒布量、碎石粒径间的变化趋势, 并以试验指标为基础建立模型数据集; 综合熵权法与 TOPSIS 优化法, 建立以层间黏结性能、高温稳定性与低温抗裂性为评价指标的熵权-TOPSIS 碎石优化模型; 将数据集导入优化模型进行计算。研究表明: 碎石撒布量与碎石粒径对聚氨酯铺装体系 3 种性能的影响趋势存在差异性; 当碎石撒布量为  $6.5 \text{ kg/m}^2$  且碎石粒径处于  $(2, 3] \text{ mm}$  时, 聚氨酯铺装体系兼具较好的黏结性能、高温稳定性与低温抗裂性; 并将该方案应用于实际工程中, 证明按提出方案施工成型的铺装层服役效果优良, 印证了该碎石方案的优异性与熵权-TOPSIS 碎石优化模型良好的现实适用性, 可为聚氨酯铺装体系的发展提供理论依据, 同时也可与其他铺装体系的碎石优化提供解决方案。

**关键词:** 道路工程; 聚氨酯铺装体系; 熵权法; TOPSIS 优化法; 碎石粒径; 碎石撒布量

**中图分类号:** U411

**文献标志码:** A

**文章编号:** 1671-8879(2023)04-0001-11

## Gravel scheme optimization of polyurethane paving system under entropy right-TOPSIS model in Oujiang Beikou Bridge

QIAN Zhen-dong<sup>1</sup>, XIE Yu-xin<sup>1</sup>, NAN Hang<sup>2</sup>, WANG Han<sup>3</sup>, XUE Yong-chao<sup>1</sup>,  
MIN Yi-tong<sup>1</sup>, TANG Wen-jie<sup>1</sup>

(1. Intelligent Transportation System Research Center, Southeast University, Nanjing 211189, Jiangsu, China;

2. Oujiangkou Bridge Co. Ltd., Wenzhou 325000, Zhejiang, China; 3. Ningbo Lubao Technology

Industrial Co. Ltd., Ningbo 315800, Zhejiang, China)

**Abstract:** In order to ensure that the steel deck paving of the lower bridge of the Oujiang Beikou Bridge has good service performance, relied on the paving project of the Oujiang Beikou Bridge and the orthogonal test were designed with gravel sprinkler and gravel particle size as variables. The pulling test, high-temperature rutting test and low-temperature bending were applied to test

收稿日期: 2022-12-23

基金项目: 国家自然科学基金项目(51878167)

作者简介: 钱振东(1969-), 女, 江苏南通人, 教授, 博士研究生导师, E-mail: Qianzd@seu.edu.cn。

the combination specimen with multiple gravel scheme. The variation trends between the performance indexes, the amount of crushed stone spreading and the particle size of crushed stone were studied, and the model data set was established. Comprehensive entropy power method and TOPSIS optimization method, the entropy right-TOPSIS gravel optimization model was established which contained inter-layer bonding performance, high temperature stability and low temperature resistance as the indexes. The data list was imported to the model for calculation. The results show that there are different trends in the influence of crushed stone particle size and spreading amount on the three properties. When the gravel sprinkle is  $6.5 \text{ kg/m}^2$  and the gravel particle size is 2 to 3 mm, the polyurethane paving system has good adhesion performance, high-temperature stability and low-temperature crack resistance. Apply the scheme to actual engineering projects, it is proved that the paving layer formed according to this crushed stone scheme has excellent service effect, which also proves that the superiority of the gravel scheme and the actual applicability of the strong-TOPSIS gravel optimization model. It provides a theoretical basis for the application and development of polyurethane paving system and it also provides a solution for crush optimization of other paving system. 13 tabs, 8 figs, 27 refs.

**Key words:** road engineering; polyurethane paving system; entropy right method; TOPSIS optimization method; gravel particle; gravel sprinkle

## 0 引言

聚氨酯混合料采用聚氨酯结合料代替沥青作为胶结料与集料进行黏附,其作为铺装材料时具备承载能力强、施工和易性高<sup>[1-3]</sup>、常温拌合<sup>[4-6]</sup>、绿色环保<sup>[6-7]</sup>等特点,现有诸多大跨径桥梁铺装工程均采用聚氨酯类铺装材料,如杭州湾大桥、明州大桥等。随着聚氨酯混合料的不断发展,形成了一种新颖的聚氨酯铺装体系:保护层采用改性聚氨酯混合料以连接钢桥面板与磨耗层,碎石撒布层的玄武岩碎石配合黏层的环氧树脂将钢桥面板与磨耗层进行紧密咬合,起到增强黏结与缓冲荷载的作用。

碎石撒布层作为铺装结构层之间的过渡层,常用于大跨径钢桥面铺装体系中,其所用碎石的撒布量及粒径不仅影响铺装层间的黏结性能,同时对铺装体系整体的高温稳定性与低温抗裂性也有显著影响。蔡燕霞等研究表明,碎石粒径会显著影响铺装层间的黏结性能<sup>[8-9]</sup>,但未针对碎石撒布量做出研究。周伟等研究发现,碎石的撒布量与粒径对混合料的高温性能具有重要影响<sup>[10]</sup>。钱振东等对碎石层的黏结与低温柔韧性进行研究,分析了碎石层对铺装层低温性能的影响<sup>[11]</sup>。瓯江北口大桥下层桥钢桥面铺装采用聚氨酯铺装体系,大桥为世界首座三塔四跨双层钢桁梁悬索桥,桥面系受力复杂,通车后重载车辆占比大,桥面铺装将同时面临严苛的结构影响与车辆荷载,这对聚氨酯铺装体系的黏结性能等提出了更高的要求,确定

铺装体系最优碎石方案对保证聚氨酯铺装体系的服役能力至关重要。

目前研究成果及实际工程运用了多种方法确定碎石方案,但仍然存在以下问题:①仅针对碎石撒布量或粒径的单一因素进行研究;②碎石方案仅以铺装层某单项性能指标为依据进行确定,缺少针对碎石撒布量与粒径对铺装层综合性能的研究。本文引入熵权法与 TOPSIS 优化法对聚氨酯铺装体系的碎石方案进行多目标决策优化,熵权法与 TOPSIS 优化法是数学领域中解决多目标决策问题的有效方法<sup>[12-18]</sup>,其核心理念兼顾数据的客观性与关联性,已被广泛应用至交通运输、土木工程等多个领域中<sup>[16-20]</sup>,体现出较好的优化效果与现实适用性。

本文依托瓯江北口大桥下层桥钢桥面铺装项目,采用层间拉拔试验、高温车辙试验与低温弯曲试验,就碎石撒布量及碎石粒径对聚氨酯铺装体系性能影响展开研究;根据试验数据,综合熵权法和 TOPSIS 优化法的特点<sup>[12-18]</sup>,建立适用于本文的熵权-TOPSIS 碎石优化模型,确定出聚氨酯铺装体系碎石撒布层最优碎石方案,为瓯江北口大桥下层桥铺装层具体施工及聚氨酯铺装体系的技术发展提供理论支撑。

## 1 工程概况与铺装简介

瓯江北口大桥为世界首座三塔四跨双层钢桁梁悬索桥,主桥全长 2 090 m,其下层桥聚氨酯铺装体

系具体结构如图 1 所示。聚氨酯铺装体系组成包括防水黏结层、保护层、黏层、碎石撒布层与磨耗层。聚氨酯铺装体系防水黏结层与保护层均采用反应型材料,其中防水黏结层使用改性聚氨酯黏结剂,保护层采用改性聚氨酯混合料,黏结剂涂布后可与改性

聚氨酯混合料产生固化反应并形成大量疏水基团,以有效提高铺装体系防水性能;保护层与磨耗层间通过碎石撒布层与环氧树脂黏层形成的嵌挤界面黏合,以提高聚氨酯铺装体系的整体性与抗冲击性能。

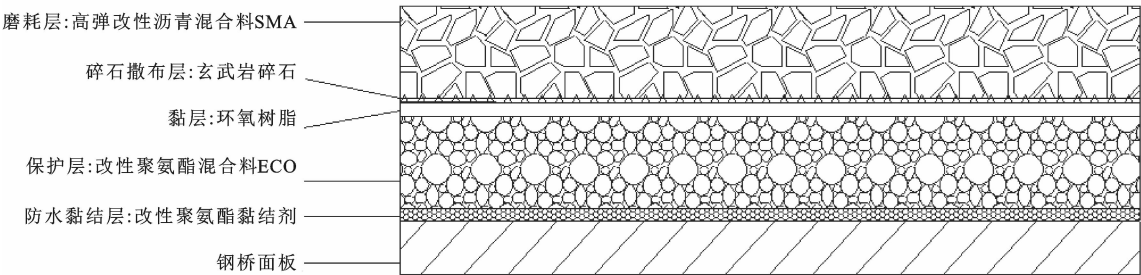


图 1 聚氨酯铺装体系示意  
Fig. 1 Schematic of polyurethane paving system

2 试验设计

聚氨酯混合料中采用聚氨酯代替沥青作为胶结料,其设计理念和本质概念上与沥青混合料类似,且层间黏结性能、高温稳定性与低温抗裂性已逐步成为钢桥面铺装的重要性能检测指标<sup>[8-11]</sup>,故本文采用此 3 项指标作为聚氨酯铺装体系性能评价指标。为确定聚氨酯铺装体系最优碎石方案,以碎石撒布量与碎石粒径为变量设计正交试验,对多种碎石方案下的组合试件进行层间拉拔试验、高温车辙试验与低温弯曲试验。参考聚合物铺装结构形式<sup>[21]</sup>、碎石层研究成果与实际工程经验<sup>[8-11]</sup>,同时综合考虑聚氨酯铺装体系中集料间的配伍性<sup>[22]</sup>,确定玄武岩碎石撒布量宜为 4~8 kg/m<sup>2</sup>,碎石粒径宜处于 1~5 mm 内。故本文正交试验方案中将碎石粒径设计为 [1,2]、(2,3)、(3,4)、(4,5) mm,碎石撒布量设计为 4.5、5.5、6.5、7.5 kg/m<sup>2</sup>,共计 16 个试验方案,为减小试验误差对结果的影响,每组试验进行 4 次,试验结果取平均值。

2.1 原材料技术指标

2.1.1 改性聚氨酯黏结剂

改性聚氨酯黏结剂组成成分主要有热固性胶连聚酯、催化剂(有机钴盐)与氧化剂(过氧化甲乙酮溶液)。下层桥所用改性聚氨酯黏结剂各项技术指标经检验均满足技术要求,检验结果如表 1 所示。

2.1.2 改性聚氨酯混合料

(1)改性聚氨酯结合料

改性聚氨酯结合料由聚氨酯预聚物(二苯基甲烷-4,4'-异氰酸酯,四苯基甲烷四异氰酸酯)制备获

得,工程中主要对材料的吸水率、拉伸强度、断裂伸长率等指标进行控制,下层桥所用改性聚氨酯结合料主要技术指标经检验均满足技术要求,检验结果如表 2 所示。

表 1 改性聚氨酯黏结剂技术指标

Tab. 1 Technical indexes of modified polyurethane adhesive

试验项目	技术要求	检测结果
表干时间(不覆盖混凝土,25℃)/min	>360	605
表干时间(覆盖混凝土,25℃)/min	≤60	32
不透水性(0.3 MPa,24 h)	不透水	不透水
吸水率/%	≤0.30	0.12

表 2 改性聚氨酯结合料技术指标

Tab. 2 Technical indexes of modified polyurethane binder

试验项目	技术要求	检测结果
吸水率/%	≤0.30	0.11
拉伸强度/MPa	≥10.0	28.0
断裂伸长率/%	≥25.0	28.5

(2)集料与配合比

改性聚氨酯混合料采用粒径为 0.075~9.5 mm 的机制砂与天然砾石作为集料,集料整体圆润、干燥、无杂质,集料性能如表 3 所示,其级配组成如表 4 所示。

改性聚氨酯混合料由集料、改性聚氨酯结合料、硅烷偶联剂制备而成,具体材料配比如表 5 所示,其中硅烷偶联剂的作用是通过自身水解在聚氨酯结合料和无机集料间形成硅氧键从而将结合料与集料紧密连接,以提升改性聚氨酯混合料的均一性与稳定性。

2.1.3 黏层与碎石撒布层

(1)黏层

聚氨酯铺装体系黏层材料采用日本进口二阶环氧树脂,主剂为双酚 A 型环氧树脂,固化剂为 HX-

表 3 改性聚氨酯混合料集料性能  
Tab. 3 Agreagate properties of modified polyurethane mixture polyurethane

集料种类	试验项目	技术要求	检测结果
粗集料	压碎值	≤20.0	16.7
	磨光值	≥42	48
	洛杉矶磨耗损失/%	≤26.0	17.6
	表观相对密度/(g·cm <sup>-3</sup> )	≥2.40	2.79
	吸水率/%	≤2.00	1.35
	坚固性/%	≤12	9
	针片状颗粒含量/%	≤5.0	3.8
	泥土杂物含量(冲洗法)/%	≤3.0	1.9
	表观相对密度/(g·cm <sup>-3</sup> )	≥2.40	2.62
细集料	吸水率/%	≤2.0	1.7
	含水率/%	≤0.3	0.1
	坚固性(粒径在 0.3 mm 以上)/%	≤12	9

注:含量指该物质的质量分数,下文同。

表 4 改性聚氨酯混合料集料级配  
Tab. 4 Agreagate gradations composition of modified polyurethane mixture polyurethane

指标	不同筛孔尺寸(mm)下的通过率/%							
	13.2	9.5	4.75	2.36	0.6	0.3	0.15	0.075
级配范围	100.0	95.0~100	60.0~88.0	41.0~72.0	15.0~50.0	6.0~22.0	3.0~10.0	0.0~6.0
设计级配	100.0	95.7	87.6	41.5	21.3	8.9	5.6	1.1

表 5 改性聚氨酯混合料配比组成  
Tab. 5 Combinations of modified polyurethane mixture polyurethane

材料	改性聚氨酯结合料	集料	硅烷偶联剂
质量分数/%	13.7	86.1	0.2

3088 型,二者按 1:1 混合后在常温下可良好固化,固化过程包括快速固化期(固化至指干)与强度增长期(完全固化);根据实际工程经验与现有研究成果<sup>[23]</sup>,环氧树脂黏层用量一般为(1.0±0.2) kg/m<sup>2</sup>,但在实际试验段施工过程中,当环氧树脂用量达到 1.1 kg/m<sup>2</sup> 后,层间碎石将浸润于环氧树脂中,此时层间碎石无法起到增加层间黏结的效果,为兼顾工程性能与经济成本,确定环氧树脂施工用量为 1.0 kg/m<sup>2</sup>。本项目所用环氧树脂各项技术指标经检验均满足技术要求,检验结果如表 6 所示。

(2)碎石撒布层

碎石撒布层所用石料由坚硬、耐磨的玄武岩轧制而成,玄武岩碎石的技术指标经检验均满足技术要求,检验结果如表 7 所示。

2.1.4 磨耗层

(1)高弹改性沥青

聚氨酯铺装体系中磨耗层混合料为 SMA-10,

表 6 环氧树脂技术指标  
Tab. 6 Technical indexs of epoxy resin

试验项目	技术要求	检测结果
环氧当量		187
主剂黏度/(Pa·s)		3 473
固化剂黏度/(Pa·s)		681
拉伸强度(23℃)/MPa	≥2.00	3.70
断裂伸长率(23℃)/%	≥100	133
不透水性(0.3 MPa,24 h)	不透水	不透水
吸水率/%	≤0.3	0.1
黏结强度(与磨耗层,25℃)/MPa	≥1.0	1.7

表 7 玄武岩碎石技术指标  
Tab. 7 Technical indexs of basalt gravel

试验项目	技术要求	检测结果
泥含量/%	≤3.0	1.9
坚固性/%	≤12	8
含水率/%	≤0.3	0.2
针片状颗粒含量/%	≤8.0	5.6

结合料采用高弹改性沥青(SBS),沥青的技术指标如表 8 所示。

表 8 高弹改性沥青技术指标  
Tab. 8 Technical indexs of high-elastic modified asphalt

试验项目	技术要求	检测结果
针入度(25℃,100 g,5 s)/0.1 mm	60~80	68
延度(5℃,5 cm·min <sup>-1</sup> )/cm	≥40	45
软化点/℃	≥85.0	89.0
黏度/(Pa·s)	≤3.00	2.51
弹性恢复率(25℃)/%	≥90	96
闪点/℃	≥240	319

(2)集料与配合比

混合料 SMA-10 中粗集料为坚硬、耐磨的玄武岩碎石,细集料为石灰岩碎石,矿粉为石灰岩矿粉;混合料生产时需掺入木质素纤维以提高混合料稳定性,油石比掺量(质量分数,下同)为 6.4%,木质素纤维掺量为 0.3%混合料 SMA-10 配合比如表 9 所示。

表 9 高弹改性沥青混合料 SMA-10 配合比  
Tab. 9 Combinations of highly elastic modified asphalt mixture SMA-10

指标	不同筛孔尺寸(mm)下的通过率							
	13.2	9.5	4.75	2.36	0.6	0.3	0.15	0.075
级配范围	100.0	90.0~100.0	28.0~60.0	20.0~32.0	14.0~26.0	6.0~22.0	3.0~10.0	0.0~6.0
设计级配	100.0	95.7	87.6	41.5	21.3	8.9	5.6	1.1

2.2 层间拉拔试验

通过拉拔试验对聚氨酯铺装体系的层间黏结性能进行评价,试验主要步骤为:

(1)对预制钢板进行打磨处理,要求打磨后钢板

满足实际工程要求(Sa2.5 级,粗糙度为 60~100  $\mu\text{m}$ ),在预制钢板上依次成型聚氨酯铺装体系各结构层并将制得的组合试件在 $(25\pm 2)^\circ\text{C}$ 的条件下进行养生,养生时间为 24 h,组合试件车辙板尺寸为 300 mm(长) $\times$ 300 mm(宽) $\times$ 85 mm(高),其中保护层与磨损层厚 35 mm,钢板厚 15 mm。

(2)在养生结束后的组合试件上进行钻芯取样,芯样直径为 50 mm,钻芯深度控制在 35 mm,每个组合试件上取 9 个芯样。

(3)将芯样区域进行清理,清理完成后将拉拔头用 AB 胶黏结至芯样上,待胶完全固化后打开拉拔仪进行试验,试验温度为 $(25\pm 2)^\circ\text{C}$ ,拉拔仪的加载速率为 5 mm/min。本试验采用南京路达测控技术有限公司生产的 LGZ-2 型结构层材料强度测试仪(标准规格),试验过程与结果如图 2 所示,由图 2 可知各芯件断裂面基本位于磨损层中。

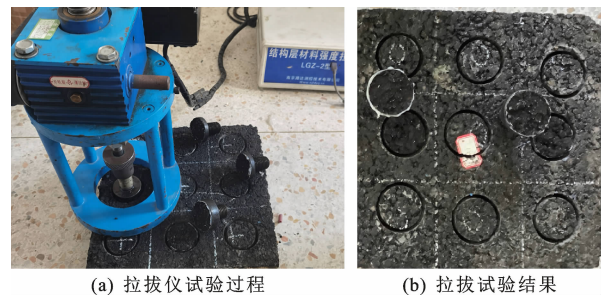


图 2 组合试件拉拔试验  
Fig. 2 Pull out test of combination specimen

2.3 高温车辙试验

通过高温车辙试验评价聚氨酯铺装体系的高温稳定性,试验主要步骤为:

(1)参照拉拔试验中所述步骤制备组合试件并将试件进行养生。

(2)将养生完成后的组合试件(含钢板)置于 70  $^\circ\text{C}$ 下保温 6 h 后进行高温车辙试验,车辙试验仪的轮碾荷载、加载频率分别为 0.7 MPa,42 次/min。高温车辙试验如图 3 所示。

2.4 低温弯曲试验

通过低温弯曲试验评价聚氨酯铺装体系的低温抗裂性,试验主要步骤为:

(1)参照拉拔试验中所述步骤制备组合试件并将试件进行养生。

(2)将养生后的组合试件进行切割,去除钢板后将车辙板试件切割成尺寸为 250 mm(长) $\times$ 35 mm(宽) $\times$ 30 mm(高)的棱柱体小梁试件,其中保护层与磨损层厚度均为 15 mm。



图 3 高温车辙试验  
Fig. 3 High-temperature rutting test

(3)将棱柱体小梁试件在-10  $^\circ\text{C}$ 环境箱中保温至少 4 h 后进行低温弯曲试验,低温弯曲试验中试件断裂前后状态如图 4 所示。

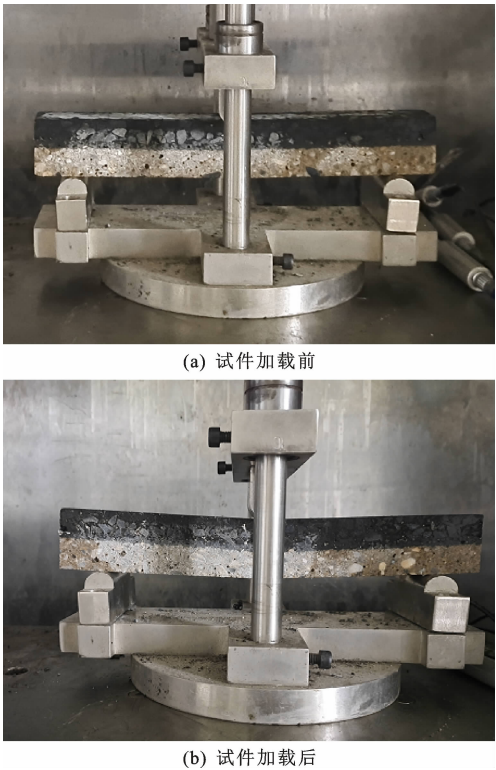


图 4 小梁低温弯曲试验  
Fig. 4 Trabecular low temperature bending test

3 试验结果分析

3.1 拉拔试验结果分析

通过拉拔试验测得的黏结强度是评价聚氨酯铺装体系黏结性能的关键力学指标,其试验结果如图 5 所示。

由图 5 可知:在碎石粒径保持一定的情况下,组合试件的黏结强度随撒布量的增大而提升,且当碎



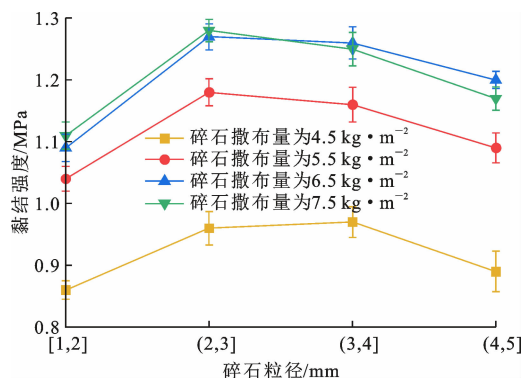


图5 层间黏结强度结果

Fig. 5 Results of bond strength between layers

石撒布量从 4.5 增大至 5.5 kg/m<sup>2</sup> 时提升幅度最快;当碎石撒布量增大至 6.5 kg/m<sup>2</sup> 时,组合试件黏结强度已处于较高水平,继续增大碎石撒布量,组合试件黏结强度变化不明显;这是因为当碎石撒布量为 4.5 kg/m<sup>2</sup> 时,碎石撒布层未能完全形成碎石界面,此时增大撒布量可促进形成完整碎石界面,当碎石撒布量为 6.5 kg/m<sup>2</sup> 时,碎石界面已基本形成。

在碎石撒布量保持一定的情况下,当保护层所用玄武岩碎石粒径为 (2,3] 与 (3,4] mm 时,组合试件的层间黏结强度较高;这是由于集料间具有配伍性,当碎石粒径为 [1,2] 与 (4,5] mm 时,碎石撒布层与黏层无法形成优良的嵌挤界面从而无法有效增大层间接触面积,导致聚氨酯铺装体系的黏结性能降低;根据试验结果,当碎石撒布量为 4.5 kg/m<sup>2</sup> 时,组合试件在全粒径范围内的黏结强度均不足 1 MPa,无法满足技术要求(黏结强度不小于 1 MPa)。

### 3.2 高温车辙试验结果分析

通过高温车辙试验测得的动稳定度可评价聚氨酯铺装体系在荷载作用下抵抗永久变形的能力,其试验结果如图 6 所示。

由图 6 可知:聚氨酯铺装体系具有出色的高温稳定性;在碎石粒径保持一定的情况下,组合试件的动稳定度随着碎石撒布量的增大而提高;其中,当碎石撒布量从 4.5 增大至 5.5 kg/m<sup>2</sup> 时,组合试件动稳定度的提升幅度最大;这是因为增大碎石撒布量可促使完整碎石界面形成,增强环氧树脂黏层与碎石的包络效果从而提升聚氨酯铺装体系的高温稳定性。

在碎石撒布量保持一定的情况下,组合试件的动稳定度随着碎石粒径的增大而提高,且在碎石粒径由 [1,2] 增大至 (2,3] mm 时提升幅度最大。这是因为小粒径碎石难以嵌入磨耗层与保护层,当碎

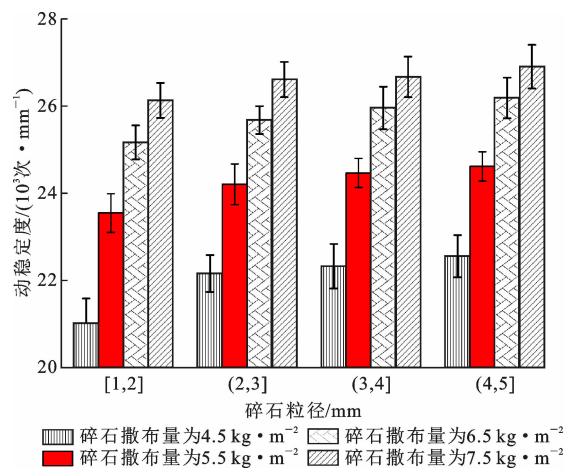


图6 高温动稳定度结果

Fig. 6 Results of high temperature dynamic stability

石粒径达到 (2,3] mm 时,碎石开始嵌入磨耗层与保护层,此时,环氧树脂黏层与碎石产生包络,将磨耗层与保护层黏结为整体从而提高了聚氨酯铺装体系的高温稳定性;继续增大碎石粒径,玄武岩碎石受限于材料强度,其嵌入深度有限,此时对聚氨酯铺装体系高温稳定性的提升效果减缓。

### 3.3 低温弯曲试验结果分析

通过低温弯曲试验测得的弯曲应变可良好地体现聚氨酯铺装体系在低温条件下抵御开裂的能力,试验结果如图 7 所示。

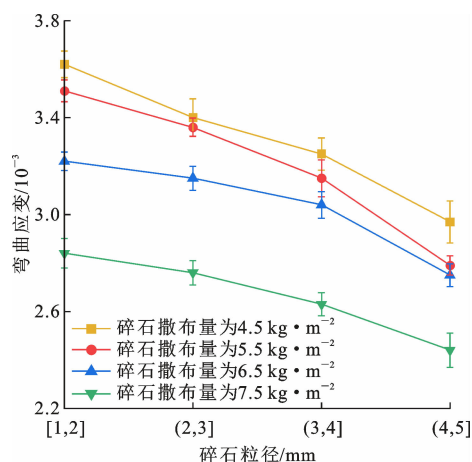


图7 低温弯曲应变结果

Fig. 7 Results of low temperature bending strain

由图 7 可知,在碎石粒径尺寸保持一定的情况下,增大碎石撒布量会导致组合试件低温弯曲应变的下降,且当碎石撒布量达到 7.5 kg/m<sup>2</sup> 时下降幅度最大。这是因为碎石撒布量过大会促使完整碎石界面形成,增强铺装整体性的同时导致其低温抗裂性下降。

在碎石撒布量保持一定的情况下,组合试件的

低温弯曲应变均随着碎石粒径的增加而不断减小。这是因为碎石粒径增大导致碎石界面嵌入效果提升,铺装层整体性增强,而改性聚氨酯混合料的刚度较大,此时聚氨酯铺装体系在低温下易产生脆性开裂。

4 熵权-TOPSIS 碎石优化模型

根据试验结果可知,碎石撒布层中玄武岩碎石的撒布量与粒径能显著影响聚氨酯铺装体系的层间黏结性、高温稳定性与低温抗裂性,且影响趋势存在差异性;为保证瓯江北口大桥下层桥钢桥面铺装层具备优良的服役性能,需综合考虑各性能指标间的平衡,确定出聚氨酯铺装体系最优碎石方案。因此,本文基于熵权法与 TOPSIS 优化法,建立起熵权-TOPSIS 碎石优化模型。

4.1 模型基本理论

熵权法是应用较广的客观赋权法<sup>[12-15]</sup>,其核心思想在于对指标体系进行赋权,通过计算各个指标的信息熵,根据指标的相对变化程度对系统整体的影响来决定指标的权重,熵越大说明系统越混乱,权重越小;熵越小说明系统有序,携带信息越多,权重越大。

TOPSIS 优化法是通过逼近理想解的方式来评估各个样本的优劣等级<sup>[16-18]</sup>,其可以在量纲一化后的原始数据矩阵中找到优先方案中的最优方案和最劣方案,分别计算评价对象与最优、最劣方案之间的距离,以此作为依据评价样本的优劣性。

熵权-TOPSIS 优化模型同时结合了熵权法和 TOPSIS 法各自的特点,先利用熵权法对各项指标进行客观赋值定权,再利用具有层次性的 TOPSIS 法对各方案的结果进行评价,既避免了传统主观赋权的缺陷,又可以充分利用原始数据,对数据集进行多层次评价,兼具局部和整体的优点<sup>[24-27]</sup>。

4.2 模型建立与计算

4.2.1 决策矩阵构建

设数据集中有  $n$  个待评价样本,每个样本有  $m$  个性能指标试验值,则  $x_{ij}$  ( $i=1,2,\cdots,n;j=1,2,\cdots,m$ ) 为第  $i$  个样本的第  $j$  个性能指标试验值,可建立决策矩阵  $\mathbf{X}$

$$\mathbf{X}=\begin{bmatrix} x_{11} & \cdots & x_{1m} \\ \vdots & & \vdots \\ x_{n1} & \cdots & x_{nm} \end{bmatrix} \quad (1)$$

参考本文正交试验结果,当碎石撒布量为 4.5 kg/m<sup>2</sup> 时,组合试件黏结强度无法满足工程设计要

求,故熵权-TOPSIS 碎石优化模型数据集共存在 12 个样本(4 种碎石粒径,3 种碎石撒布量),构建的决策矩阵  $\mathbf{X}$  如表 10 所示。

表 10 熵权-TOPSIS 碎石优化模型决策矩阵

Tab. 10 Decision matrix of entropy weight-TOPSIS

crush optimization model

方案编号	碎石撒布量/(kg·m <sup>-2</sup> )	碎石粒径/mm	黏结强度/MPa	高温动稳定度/(次·mm <sup>-1</sup> )	低温弯曲应变/10 <sup>-6</sup>
1	5.5	[1,2]	1.04	23 549	3 510
2	5.5	(2,3)	1.18	24 209	3 360
3	5.5	(3,4)	1.16	24 467	3 150
4	5.5	(4,5)	1.09	24 619	2 790
5	6.5	[1,2]	1.09	25 169	3 220
6	6.5	(2,3)	1.27	25 680	3 150
7	6.5	(3,4)	1.26	25 956	3 040
8	6.5	(4,5)	1.20	26 186	2 750
9	7.5	[1,2]	1.11	26 129	2 840
10	7.5	(2,3)	1.28	26 609	2 760
11	7.5	(3,4)	1.25	26 670	2 630
12	7.5	(4,5)	1.17	26 904	2 440

4.2.2 决策矩阵数据处理

由于各性能指标参数之间存在量级差异,为减少此差异对优化方案结果的影响,需对决策矩阵  $\mathbf{X}$  中的数据进行量纲一化处理;试验性能指标均为正向型指标(数值越大表示性能越优),采用式(2)对决策矩阵  $\mathbf{X}$  中的各样本数据进行处理

$$x'_{ij} = \frac{x_j - \min x_j}{\max x_j - \min x_j} \quad (2)$$

式中: $x'_{ij}$  为  $x_{ij}$  量纲一化后的值; $x_j$  为第  $j$  个性能指标试验值。

数据量纲一化处理完成后,为更好体现每个样本各项性能指标试验值的优劣性,进一步通过式(3)计算各指标的比重  $r_{ij}$ ,建立起数据集的比重矩阵  $\mathbf{R}$

$$r_{ij} = \frac{x'_{ij}}{\sum_{i=1}^n x'_{ij}} \quad r_{ij} \in [0,1] \quad (3)$$

$$\mathbf{R}=\begin{bmatrix} r_{11} & \cdots & r_{1m} \\ \vdots & & \vdots \\ r_{n1} & \cdots & r_{nm} \end{bmatrix} \quad (4)$$

4.2.3 熵权法确定性能指标权重

各性能指标的熵值可以体现其在系统中的混乱程度,数据集中各指标熵值大小按式(5)计算

$$E_j = -k \sum_{i=1}^n r_{ij} \ln r_{ij} \quad (5)$$

式中:定义  $r_{ij}=0$  时,  $\lim_{r_{ij} \rightarrow 0} (r_{ij} \ln r_{ij})=0$ ;  $E_j$  为各性能指标的熵值,且  $E_j \in [0,1]$ ;系数  $k=1/(\ln n)$ 。

计算得到熵权-TOPSIS 碎石优化模型中各性能指标的熵值为 0.918、0.925、0.799;根据熵权理论,各性能指标的权重由其标志值的差异程度确定,因此,每个性能指标相应的权重按式(6)进行计算

$$w_j = \frac{1 - E_j}{\sum_{j=1}^m (1 - E_j)} \quad (6)$$

式中: $w_j$  为各性能指标所占权重,  $w_j \in [0,1]$ , 且  $\sum_{j=1}^m w_j = 1$ 。

经计算,得到熵权-TOPSIS 碎石优化模型中各性能指标权重为 0.345、0.316、0.339。

#### 4.2.4 TOPSIS 法确定理想解

基于各指标的权重系数,建立熵权-TOPSIS 碎石优化模型数据集的加权规范化决策矩阵  $Z$ ,构建方法见式(7)、式(8),将比重矩阵  $R$  及加权规范化矩阵  $Z$  进行合并,二者计算结果如表 11 所示。式(7)、式(8)可表示为

$$z_{ij} = w_j \left( \frac{x_{ij}}{\sqrt{\sum_{i=1}^n x_{ij}^2}} \right) \quad (7)$$

$$Z = \begin{bmatrix} z_{11} & \cdots & z_{1m} \\ \vdots & & \vdots \\ z_{n1} & \cdots & z_{nm} \end{bmatrix} \quad (8)$$

式中: $z_{ij}$  为加权规范化后各性能指标数值(加权值)。

表 11 熵权-TOPSIS 碎石优化模型比重矩阵与加权规范化矩阵

Tab. 11 Ratio and weighted normalization matrix of entropy weight-TOPSIS crush optimization model

方案编号	黏结强度比重	高温动稳定度比重	低温弯曲应变比重	黏结强度加权值	高温动稳定度加权值	低温弯曲应变加权值
1	0.000	0.000	0.168	0.088	0.084	0.115
2	0.086	0.028	0.145	0.100	0.086	0.110
3	0.074	0.039	0.112	0.098	0.087	0.103
4	0.031	0.045	0.055	0.092	0.088	0.091
5	0.031	0.069	0.123	0.092	0.090	0.106
6	0.142	0.090	0.112	0.107	0.092	0.103
7	0.136	0.102	0.094	0.106	0.093	0.100
8	0.099	0.112	0.049	0.101	0.094	0.090
9	0.043	0.110	0.063	0.094	0.093	0.093
10	0.148	0.130	0.050	0.108	0.095	0.090
11	0.130	0.132	0.030	0.105	0.095	0.086
12	0.080	0.142	0.000	0.099	0.096	0.080

根据加权规范化决策矩阵,按式(9)筛选出本模型的正理想解与负理想解,正理想解用  $z^+$  表示,负理想解用  $z^-$  表示

$$\begin{cases} z^+ = \max(z_1, z_2, \dots, z_m) \\ z^- = \min(z_1, z_2, \dots, z_m) \end{cases} \quad (9)$$

经计算,熵权-TOPSIS 碎石优化模型数据集的正理想解  $z^+ = \{0.108, 0.096, 0.115\}$ ,负理想解  $z^- = \{0.088, 0.084, 0.080\}$ 。

#### 4.2.5 计算相对接近度

利用欧氏距离的概念表征各方案分别与正理想解、负理想解之间的接近程度,计算方法如式(10);计算出正向欧氏距离  $d^+$ 、负向欧氏距离  $d^-$  后,根据式(11)计算方案的构造相对接近度  $C$ ,接近度越高,说明方案越优。熵权-TOPSIS 碎石优化模型各样本方案的相对接近度计算如表 12 所示。式(10)、式(11)可表示为

$$\begin{cases} d^+ = \sqrt{\sum_{j=1}^m (z_{ij} - z^+)^2} \\ d^- = \sqrt{\sum_{j=1}^m (z_{ij} - z^-)^2} \end{cases} \quad (10)$$

$$C = \frac{d^-}{d^+ + d^-} \quad (11)$$

表 12 熵权-TOPSIS 碎石优化模型各样本相对接近度

Tab. 12 Relative proximities of each sample in entropy weight-TOPSIS crush optimization model

方案编号	$d^+$	$d^-$	$C$
1	0.024	0.035	0.599
2	0.014	0.032	0.704
3	0.018	0.026	0.590
4	0.030	0.013	0.302
5	0.020	0.027	0.575
6	0.013	0.031	0.713
7	0.016	0.028	0.642
8	0.026	0.019	0.427
9	0.026	0.017	0.395
10	0.025	0.025	0.507
11	0.029	0.022	0.430
12	0.036	0.017	0.315

根据计算结果与熵权-TOPSIS 碎石优化模型理论可知,方案 6 的相对接近度值最大,说明当保护层碎石撒布量为  $6.5 \text{ kg/m}^2$  且碎石粒径处于  $(2,3] \text{ mm}$  时,组合试件的综合服役性能较优(黏结强度  $1.27 \text{ MPa}$ ,高温动稳定度  $25\ 680 \text{ 次/mm}$ ,低温弯曲应变  $3\ 150 \times 10^{-6}$ ),建议瓯江北口大桥下层桥聚氨酯铺装体系碎石撒布层施工按照方案 6 执行。

#### 4.3 工程实例验证

将碎石方案 6 实际应用于瓯江北口大桥下层桥钢桥面铺装施工中,为保证施工和易性与施工后铺



装层质量,提出以下施工质量控制要点:

(1)利用区域划分法进行施工以严格控制碎石的撒布量,保证碎石界面摊铺均匀。

(2)采用自动化碎石撒布机进行碎石撒布作业,施工过程中设专人持单位量纸检测碎石撒布量是否符合要求,机械撒布不均匀的区域应及时人工补撒,并进行整平处理。

(3)整幅铺装施工完成后,应严禁车辆与人员随意出入,防止对已作业面造成污染。

碎石方案 6 的实际施工过程如图 8 所示。在现场施工过程中,进行施工现场取样并同步制备相应试件进行层间拉拔、高温车辙与低温弯曲试验,取样区域为 K276+896~K276+996 左幅第 2 车道(取样点 1)与 K275+342~K277+095 右幅第 1 车道(取样点 2),同步取样试验结果如表 13 所示。



图 8 玄武岩碎石撒布  
Fig.8 Basalt rubble spread

表 13 聚氨酯铺装体系同步取样试验结果  
Tab.13 Simultaneous sampling test results of polyurethane pavement system

取样点	黏结强度/ MPa	高温动稳定度/ (次·mm <sup>-1</sup> )	低温弯曲应变/ 10 <sup>-6</sup>
1	1.24	25 198	3 067
2	1.26	25 334	3 112

根据工程实例并合同步取样试验结果可知,碎石方案 6 具备优良的施工和易性,并且按此方案成型后的铺装层服役性能优异,同时体现了碎石方案 6 的优异性与本文所建立熵权-TOPSIS 碎石优化模型良好的实际适用性,本文对聚氨酯铺装体系的发展具有重要指导意义。

5 结 语

(1)保持碎石粒径一定,当碎石撒布量从 4.5 提升至 6.5 kg/m<sup>2</sup> 时,聚氨酯铺装体系层间黏结性能

提升较为明显;保持碎石撒布量一定,当碎石粒径为(2,3]与(3,4] mm 时,聚氨酯铺装体系具备较优层间黏结性能。

(2)聚氨酯铺装体系的高温稳定性与碎石撒布量、碎石粒径均呈正比关系;对于碎石撒布量与碎石粒径 2 个影响因素,保持两者中一个因素条件不变,仅增大碎石撒布量或者碎石粒径均会引起聚氨酯铺装体系高温稳定性的提升,但增幅不断减小。

(3)聚氨酯铺装体系的低温抗裂性与碎石撒布量、碎石粒径均呈反比关系;保持碎石粒径一定,当碎石撒布量提升至 7.5 kg/m<sup>2</sup> 时,聚氨酯铺装体系低温抗裂性下降幅度较大;保持碎石撒布量一定时,当碎石粒径由(3,4]增大至(4,5] mm 时,聚氨酯铺装体系低温抗裂性下降幅度最大。

(4)本文综合熵权法与 TOPSIS 优化法的特点,建立熵权-TOPSIS 碎石优化模型,经计算,当碎石撒布量为 6.5 kg/m<sup>2</sup> 且碎石粒径处于(2,3] mm 时,聚氨酯铺装体系兼具优良的层间黏结性能、高温稳定性与低温抗裂性;将模型计算出的最优碎石方案成功应用于瓯江北口大桥下层桥钢桥面铺装施工中,验证了碎石方案 6 的优异性与优化模型良好的实际适用性,可为未来聚氨酯铺装体系的发展奠定理论基础,同时也可为其他铺装体系的碎石优化提供解决方案。

(5)本文仅从宏观的试验结果上研究不同碎石方案对聚氨酯铺装体系的层间黏结性能、高温稳定性与低温抗裂性的影响,而未研究碎石方案对铺装体系性能影响的作用机理,后续应在现有研究基础上开展相关研究。

参考文献:  
References:

[ 1 ] 张 倩,吕荣培,马 昭,等. 聚氨酯玛蹄脂混合料的设计及性能[J]. 长江科学院院报,2022,39(2)147-152,158.  
ZHANG Qian, LYU Rong-pei, MA Zhao, et al. Design and performance of stone matrix polyurethane [J]. Journal of Yangtze River Scientific Research Institute,2022,39(2)147-152,158.  
[ 2 ] 王火明,李汝凯,王 秀,等. 多孔隙聚氨酯碎石混合料强度及路用性能[J]. 中国公路学报,2014,27(10): 27-35.  
WANG Huo-ming, LI Ru-kai, WANG Xiu, et al. Strength and road performance for porous polyurethane mixture[J]. China Journal of Highway and

- Transport, 2014, 27(10): 27-35.
- [3] 雷建华, 徐 斌, 何旭辉. 改性聚氨酯混凝土受压性能及本构关系研究[J]. 铁道科学与工程学报, 2023, 20(1): 278-288.
- LEI Jian-hua, XU Bin, HE Xu-hui. Research on compressive properties and constitutive relation of modified polyurethane concrete[J]. Journal of Railway Science and Engineering, 2023, 20(1): 278-288.
- [4] YANG X L, WANG G C, RONG H L, et al. Review of fume-generation mechanism, test methods, and fume suppressants of asphalt materials[J]. Journal of Cleaner Production, 2022, 347: 131240.
- [5] RHOMBERG L R, MAYFIELD D B, PRUEITT R L, et al. A bounding quantitative cancer risk assessment for occupational exposures to asphalt emissions during road paving operations[J]. Critical Reviews in Toxicology, 2018, 48(9): 713-737.
- [6] 薄 雾, 任海生, 耿 巍, 等. 基于生命周期分析法的钢桥面铺装层环境影响研究(英文)[J]. 东南大学学报(英文版), 2020, 36(3): 334-340.
- BO Wu, REN Hai-sheng, GENG wei, et al. Estigation of the environmental impacts of steel deck pavement based on life cycle assessment[J]. Journal of Southeast University (English Edition), 2020, 36(3): 334-340.
- [7] 应国强, 邱庆生, 祝春华, 等. 聚氨酯路面施工工艺研究[J]. 公路, 2022, 67(6): 65-69.
- YING Guo-qiang, QIU Qing-sheng, ZHU Chun-hua, et al. Study on construction technology of polyurethane pavement[J]. Highway, 2022, 67(6): 65-69.
- [8] 蔡燕霞, 申爱琴, 杨 光. 橡胶沥青衬垫式碎石封层黏结性能[J]. 建筑材料学报, 2013, 16(4): 678-682.
- CAI Yan-xia, SHEN Ai-qin, YANG Guang. Bonding properties of rubber asphalt underbody chip seal[J]. Journal of Building Materials, 2013, 16(4): 678-682.
- [9] 江胜文. 不同碎石粒径范围的防水黏结层层间性能敏感性分析[J]. 中外公路, 2017, 37(4): 290-293.
- JIANG Sheng-wen. Sensitivity analysis of interlayer performance of waterproof bonding layers with different gravel particle size ranges[J]. Journal of China & Foreign Highway, 2017, 37(4): 290-293.
- [10] 周 伟, 李 娣, 万建军. 浇注式沥青铺装材料高温性能研究[J]. 公路, 2020, 65(8): 91-94.
- ZHOU Wei, LI Di, WAN Jian-jun. Study on high temperature performance of pouring asphalt pavement material[J]. Highway, 2020, 65(8): 91-94.
- [11] 钱振东, 薛永超, 孙 健. 橡胶环氧沥青碎石防水黏结层抗剪性能研究[J]. 湖南大学学报(自然科学版), 2016, 43(7): 82-87.
- QIAN Zhen-dong, XUE Yong-chao, SUN Jian. Shear performance of waterproof cohesive layer of rubber epoxy asphalt stone[J]. Journal of Hunan University (Natural Sciences), 2016, 43(7): 82-87.
- [12] 马 静, 戴维佳. 基于 AHP-信息熵决策的城市轨道建设期交通组织方案评价[J]. 长安大学学报(自然科学版), 2020, 40(4): 101-108.
- MA Jing, DAI Wei-jia. Evaluating on traffic management during traffic construction of urban rail based on AHP-information entropy[J]. Journal of Chang'an University (Natural Science Edition), 2020, 40(4): 101-108.
- [13] 李占山, 杨云凯, 张家晨. 基于熵权法的过滤式特征选择算法[J]. 东北大学学报(自然科学版), 2022, 43(7): 921-929.
- LI Zhan-shan, YANG Yun-kai, ZHANG Jia-chen. Filtering feature selection algorithm based on entropy weight method[J]. Journal of Northeastern University (Natural Science), 2022, 43(7): 921-929.
- [14] 吴 波, 陈辉浩, 黄 惟. 基于模糊-熵权理论的铁路瓦斯隧道施工安全风险评估[J]. 安全与环境学报, 2021, 21(6): 2386-2393.
- WU Bo, CHEN Hui-hao, HUANG Wei. Safety risk assessment for the railway gas tunnel construction based on the fuzzy-entropy method[J]. Journal of Safety and Environment, 2021, 21(6): 2386-2393.
- [15] HE Z X. Battery electric bus selection based on entropy weight method and road operation test: Using Nanjing bus company as an example[J]. Mathematical Problems in Engineering, 2022, 2022: 1-21.
- [16] 王智远, 李国栋, 王勇华. 基于 AHP-TOPSIS 的桥梁设计方案优选决策模型[J]. 吉林大学学报(工学版), 2017, 47(2): 478-482.
- WANG Zhi-yuan, LI Guo-dong, WANG Yong-hua. Optimization decision model for bridge design based on AHP-TOPSIS[J]. Journal of Jilin University (Engineering and Technology Edition), 2017, 47(2): 478-482.
- [17] HAN Q, LI W M, XU Q L, et al. Novel measures for linguistic hesitant Pythagorean fuzzy sets and improved TOPSIS method with application to contributions of system-of-systems[J]. Expert Systems With Applications, 2022, 199: 117088.
- [18] 吴 波, 路 明, 吴昱芳, 等. 基于改进 TOPSIS 法研究隧道施工时空效应[J]. 铁道工程学报, 2020, 37(5): 42-46, 64.
- WU Bo, LU Ming, WU Yu-fang, et al. Research on

- the time and space effect of tunnel construction based on improved TOPSIS method[J]. Journal of Railway Engineering Society, 2020, 37(5): 42-46, 64.
- [19] 艾长发, 黄恒伟, RAHMAN A, 等. 基于熵权的 TOPSIS 钢桥面防水黏结材料组合体系优选分析[J]. 中国公路学报, 2020, 33(3): 53-63.  
AI Chang-fa, HUANG Heng-wei, RAHMAN A, et al. Optimum selection analysis of waterproof bonding materials for steel bridge deck based using entropy weight-TOPSIS[J]. China Journal of Highway and Transport, 2020, 33(3): 53-63.
- [20] 蒋浩鹏, 孙建诚, 杨文伟, 等. 基于 AHP 与改进 TOPSIS 权值算法的高速公路施工方案风险评价[J]. 武汉大学学报(工学版), 2020, 53(8): 698-703.  
JIANG Hao-peng, SUN Jian-cheng, YANG Wen-wei, et al. Risk evaluation of highway construction plan based on AHP and improved TOPSIS weight algorithm[J]. Engineering Journal of Wuhan University, 2020, 53(8): 698-703.
- [21] PASETTO M, GIACOMELLO G. Experimental analysis of waterproofing polymeric pavements for concrete bridge decks[J]. International Journal on Pavement Engineering & Asphalt Technology, 2014, 15(1): 51-67.
- [22] 王海朋, 张 蓉, 张晓华, 等. 同步碎石集料粒径与沥青混合料配伍性研究[J]. 中外公路, 2019, 39(1): 218-221.  
WANG Hai-peng, ZHANG Rong, ZHANG Xiao-hua, et al. Study on compatibility of synchronous macadam aggregate particle size with asphalt mixture[J]. Journal of China & Foreign Highway, 2019, 39(1): 218-221.
- [23] 关永胜, 韩 超, 李明俊, 等. 水泥混凝土桥面改性环氧树脂防水黏结层性能[J]. 建筑材料学报, 2013, 16(5): 894-897, 902.  
GUAN Yong-sheng, HAN Chao, LI Ming-jun, et al. Performance of modified epoxy resin waterproof adhesive layer on cement concrete bridge surface[J]. Journal of Building Materials, 2013, 16(5): 894-897, 902.
- [24] 张 静, 张智慧, 李小冬, 等. 基于熵权的 TOPSIS 法的港口军事运输能力评估[J]. 清华大学学报(自然科学版), 2018, 58(5): 494-499.  
ZHANG Jing, ZHANG Zhi-hui, LI Xiao-dong, et al. Evaluation of port military transport capacity based on TOPSIS method with entropy weight[J]. Journal of Tsinghua University (Science and Technology), 2018, 58(5): 494-499.
- [25] 李 勤, 李文龙, 崔 凯. 基于改进 TOPSIS 法的民用建筑再生利用方案决策[J]. 武汉大学学报(工学版), 2022, 55(2): 160-167.  
LI Qin, LI Wen-long, CUI Kai. Decision-making of civil building regeneration scheme based on improved TOPSIS method[J]. Engineering Journal of Wuhan University, 2022, 55(2): 160-167.
- [26] 冯学茂, 覃 仲, 武建民, 等. 高亮度铺装层对隧道中间段行车安全的影响[J]. 长安大学学报(自然科学版), 2023, 43(1): 92-100.  
FENG Xue-mao, QIN Zhong, WU Jian-min, et al. Influence of high brightness pavement layer on driving safety in middle section of tunnel[J]. Journal of Chang'an University (Natural Science Edition), 2023, 43(1): 92-100.
- [27] 王前栋, 马全党, 江福才. 基于熵权-TOPSIS 模型的内河通航水域界定方法研究[J]. 中国航海, 2022, 45(2): 76-81.  
WANG Qian-dong, MA Quan-dang, JIANG Fu-cai. Defining navigable waterway of inland waters with entropy weight TOPSIS model[J]. Navigation of China, 2022, 45(2): 76-81.