

基于熵权-TOPSIS理论的复合改性沥青配方优化

张瑞¹, 刘红璘², 聂宗权¹, 李文辉², 包留辉¹, 屈鑫², 乐宸²

(1. 云南宁永高速公路有限公司, 云南 丽江 674200; 2. 长安大学公路学院, 陕西 西安 710075)

摘要: 针对目前用于提高沥青及沥青混合料抗紫外老化能力外加剂较多的现状, 综合考虑复合改性沥青宏观性能指标、微观性能指标以及成本因素, 采用熵权-TOPSIS理论对于6种不同的抗老化剂方案进行优化。结果表明: 采用该理论确定的层状双金属氢氧化物复配受阻胺类光稳定剂、紫外线吸收剂以及层状双金属氢氧化物复配受阻胺类光稳定剂两种复合改性沥青方案具有较好的性价比, 可以满足沥青路面抗紫外特性需求。其为今后改性沥青配方设计与优化提供了新的技术途径。

关键词: 改性沥青; 抗紫外线; 优化; 熵权-TOPSIS理论

中图分类号: TU528.42

文献标志码: A

文章编号: 1009-7716(2023)09-0268-04

0 引言

目前国内外对于如何提高沥青及沥青混合料的抗紫外老化性能开展了较多探索, 提出很多有效的措施来改善沥青的抗紫外老化性能。常用的方法包括: 将具有屏蔽紫外光或者吸收功能的改性剂、外掺剂加入到沥青或沥青混合料中, 来提升沥青及混合料的抗老化效果。根据改性剂作用方式以及作用机理的不同, 可以分为紫外线吸收剂、受阻胺类光稳定剂、光屏蔽剂、抗氧化剂等。

紫外光吸收剂能够有效改善沥青抗紫外老化性能主要是通过吸收沥青中的紫外光能量, 并且以热量的形式释放出去, 从而阻止其老化进程。Feng^[1]等选择了3种不同的紫外线吸收剂来制备沥青, 以多种官能团指数来分析在紫外线吸收剂作用下的沥青化学结构变化, 并且通过黏度老化指数、流变老化指数等指标来评价改性剂的作用效果。研究发现, 紫外光吸收剂可以减少紫外线对沥青性能的影响, 并且不会影响沥青的化学结构。

受阻胺类光稳定剂在有机聚合物材料中运用十分广泛。其主要是捕捉受紫外光产生的自由基以及分解紫外老化产物来提高材料的稳定性^[2]。徐松等^[3]采用受阻胺类光稳定剂 Tinuvin770 对5种沥青进行改性, 研究改性剂对沥青不同老化方式后性能的影响。研究发现5种沥青的延度都明显提高。Tinuvin770能够减少紫外光对5种沥青的老化作

用, 但是对一些沥青的抗热氧老化性能具有负面影响。

光屏蔽剂主要是纳米氧化物、层状无机盐、炭黑等无机材料, 通过其物理性能对紫外线进行阻隔作用, 避免紫外光对聚合物造成紫外破坏。但是无机材料在沥青中会分散不均匀, 可以和其他改性材料进行复配。Xu等^[4]将LDHs与SBS改性沥青进行复配并进行紫外老化, 还采用FTIR分析沥青紫外老化前后化学结构的变化。结果表明紫外老化后LDHs/SBS改性沥青软化点和低温延度的变化显著降低, LDHs能有效提高SBS改性沥青的抗紫外老化性能。FTIR分析显示, LDHs/SBS改性沥青在紫外老化后碳基、亚砷基和丁二烯基的变化显著降低, 表明添加LDHs可以有效抑制SBS改性沥青的氧化和降解反应。

目前大多数抗紫外老化改性沥青都是单掺抗紫外老化剂, 通过复配不同抗紫外老化机理的改性剂来提高沥青抗老化性能研究较少。

解晖等^[5]基于熵权-TOPSIS理论建立了指路标志评价模型, 对选取的8个城市道路交叉口指路标志版面设计表达形式以及国标建议的两种形式进行评价排序。结果表明该评价模型能反映驾驶员对指路标志的认知规律, 验证了此模型的适用性和有效性。张彦飞^[6]运用熵权-TOPSIS法, 对半刚性、柔性、半柔性3种不同模量基层的沥青路面抗裂性能进行评价, 得到在季冻区特殊气候下, 半柔性基层沥青路面能够有效抵抗沥青路面的反射裂缝。张彩利^[7]针对现有沥青路面使用性能综合评价中存在主观影响因素过多、权重确定复杂的问题, 利用熵权系数法得到各评价指

收稿日期: 2022-10-24

作者简介: 张瑞(1991—), 男, 本科, 工程师, 从事市政工程技术工作。

标的客观权重,在此基础上利用 TOPSIS 法对各评价路段进行排序。结果表明,该方法将熵权系数法和 TOPSIS 法相结合,可为公路养护与维修部门进行路面使用性能评价提供合理依据。郭小宏等^[8]针对沥青路面材料再生工厂布局决策,引入逼近理想解排序法(TOPSIS)进行方案评价,结果表明该方法可消除由于专家主观因素对指标赋权产生的不利影响,提高方案评价的科学性和有效性。

综上所述,目前对于研究人员在路面结构、厂区分化以及道路交通标志评价等方面采用熵权系数法和 TOPSIS 法相结合的模型进行方案评定与优化取得了较多的研究成果,也证明了该模型的可靠性。但将其用于改性沥青配方优化设计方面的研究内容偏少。对此,现针对沥青路面抗老化措施,采用熵权系数法和 TOPSIS 法进行优化,以达到性价比最优的效果,从而为今后沥青材料领域配方设计提供新的解决思路。

1 熵权-TOPSIS 法基本原理

熵权法是一种根据各项指标观测值所提供的信息量的大小来确定指标权数的方法,是一种客观赋权方法。通过熵权法计算可得到各个指标的信息熵,信息熵越小,信息的效用值或指标的权重越大;信息熵越大,其权重就越小。因此,可以根据各项指标值的变异程度,利用信息熵计算出各指标的权重—熵权^[9]。TOPSIS 法是一种适用于多方案、多指标评价的系统评价方法。其基本思路是:对已有的指标数据进行标准化处理得到原始决策矩阵,与指标权重结合构建加权决策矩阵,整理出各指标的最优值及最劣值分别组成各方案正、负理想解,再计算出各评价方案与最优解、最劣解的远近程度。贴近度的取值范围为[0,1],贴近度越大表征结果越贴近最优方案。对试验目标与理想化目标的接近程度进行排序的一种方法^[10-12],被广泛用于决策评价。然而,TOPSIS 法采用的是主观权重法,基于熵权的 TOPSIS 法采用熵的权重模型计算各评价指标的权重,将熵权法与 TOPSIS 相结合可以排除人为因素的影响,在决策方案时对方案进行客观评价。

2 不同改性组合方案及评价方法

为研究不同材料相互组合或单掺复合改性沥青的抗紫外老化效果,通过对 6 种方案的复合改性沥青进行性能测试,对比分析不同方案的抗紫外老化效果。具体方案包括:受阻胺类光稳定剂(UV-4050)、

紫外线吸收剂(UV-327)、层状双金属氢氧化物(LDHs),如表 1 所列。

表 1 不同抗紫外老化剂复配方案一览表

方案名称	改性剂类型
L64	LDHs + UV-327 + UV-4050
L6	LDHs + UV-327
L4	LDHs + UV-4050
SL	LDHs
S6	UV-327
S4	UV-4050

对不同组合方案下的沥青结合料经紫外老化后试样进行低温弯曲梁流变仪试验。试验温度分别设定为 -12℃和 -18℃,荷载作用方式为恒载 980±5 mN,持续加载 240 s。测定 60 s 的蠕变速率值(以 m 表示)和劲度模量值(以 S 表示)。采用老化前后蠕变速率比(mAI)、老化前后劲度模量比(SAI)作为评价两种沥青紫外老化后低温性能的指标。SAI 和 mAI 的计算公式如下:

$$SAI = \frac{S_{aged}}{S_{unaged}} \tag{1}$$

$$mAI = \frac{m_{aged}}{m_{unaged}} \tag{2}$$

式中: S_{aged} 为老化后劲度模量,MPa; S_{unaged} 为未老化劲度模量,MPa; m_{aged} 为老化后蠕变速率值; m_{unaged} 为未老化后蠕变速率值。

对于紫外老化后的 6 种复合改性沥青高温稳定性,将不同沥青进行短期老化和紫外老化后对试样进行 MSCR 试验^[14]。选择蠕变恢复率 $R_{3.2}$ 和不可恢复蠕变柔量 $J_{nr,3.2}$ 作为评价 6 种复合改性沥青紫外老化后的高温稳定性的指标。

AFM 的 PF-QNM 模式独特的成像原理可以直接获得沥青力曲线,能够又快又方便地得到沥青表面的粘附力。沥青老化会导致沥青与集料之间的粘附力下降,通过 AFM 测试得到的粘附力数据可以求出不同组合方案下沥青表面的自由能,并分析不同区域的粘附力。

傅里叶变换红外光谱(FTIR)作为一种广泛使用的测试手法可以鉴定沥青的特征官能团。采用美国-赛默飞-Nicolet iS50,Thermo Fisher 傅里叶变换红外光谱仪对不同紫外老化时间下的六种沥青进行分析。由于甲基和亚甲基在 1 640 cm⁻¹和 1 375 cm⁻¹处的吸收峰在红外光谱中最为稳定,采用这两个吸收峰的面积作为红外光谱定量分析的参考带。为了定量分析 SBS 改性沥青中 C=C 双键的变化,采用了

二烯老化指数(PBI)指标来分析改性沥青官能团变化^[13]。

$$PBI = \frac{A_{966}}{A_{1460} + A_{1375}} \tag{3}$$

式中: A_{966} 为 966 cm⁻¹ 吸收峰面积; A_{1640} 为 1640 cm⁻¹ 处吸收峰面积; A_{1375} 为 1375 cm⁻¹ 处的吸收峰面积。

3 基于熵权-TOPSIS 理论的复合改性沥青配方优化

根据熵权-TOPSIS 理论对 6 种不同组合复合改性沥青方案进行评价。将复合改性沥青 mAI、SAI、R 和 Jnr 等流变宏观指标和粘附力、官能团指数等微观指标归为效益型指标,材料成本归为成本型指标。

抗紫外复合改性沥青材料包括:受阻胺类光稳定剂(UV-4050)单价为 125 元/千克;紫外线吸收剂(UV-327)单价为 115 元/千克;层状双金属氢氧化物(LDHs)单价为 14.5 元/千克。具体步骤如下:

3.1 构建优选模型矩阵

为了选择抗紫外老化复合改性沥青最优方案,首先要根据各指标原始数据建立一个决策矩阵 $A = \{a_{ij}\}$,其中 a_{ij} 为第 i 种方案的第 j 个指标数据。该模型中取 $i=1,2,\cdots,n$,表示 6 种不同组合方案的复合改性沥青,如表 2 所列; $j=1,2,\cdots,m$,表示 mAI、SAI、R 和 Jnr 等流变宏观指标和粘附力、官能团指数等微观指标以及不同组合方案的材料成本,所得的决策矩阵 A 如表 2 所列。

表 2 初始矩阵 A 一览表

组合方案	低温指标		高温指标		微观指标		成本 / (元·t ⁻¹)
	SAI	mAI	R _{3,2}	Jnr _{3,2}	粘附力 损失指数	官能团 指数	
L64	1.306	0.907	54.08	0.230 2	19.44	0.059 21	1 625
L6	1.371	0.881	50.16	0.292 7	20.51	0.054 90	1 125
L4	1.328	0.896	48.32	0.283 1	19.73	0.056 05	935
SL	1.469	0.859	48.32	0.348 2	22.62	0.050 01	435
S6	1.422	0.870	47.03	0.334 3	24.47	0.050 87	690
S4	1.452	0.862	49.08	0.339 2	23.56	0.051 67	500

3.2 数据模型矩阵归一化

采用 TOPSIS 法进行评价时,不同评价指标的影响程度和单位不同会对计算结果的影响也不同,因此对各指标进行数值标准化,使所有指标的变化方向一致,得到归一化的评价矩阵 $B = \{b_{ij}\}$ 。归一化处理如公式(4)和(5)所示。

$$b_{ij} = \frac{a_{ij} - \min_j(a_{ij})}{\max_j(a_{ij}) - \min_j(a_{ij})} \tag{4}$$

$$b_{ij} = \frac{\max_j(a_{ij}) - a_{ij}}{\max_j(a_{ij}) - \min_j(a_{ij})} \tag{5}$$

式中: a_{ij} 为第 i 种组合方案的第 j 个指标值; $\max_j(a_{ij})$ 为 a_{ij} 所在第 j 列的最大指标值; $\min_j(a_{ij})$ 为 a_{ij} 所在第 j 列的最小指标值。

表 3 归一化矩阵 B 一览表

组合方案	低温指标		高温		微观指标		成本 / (元·t ⁻¹)
	SAI	mAI	R _{3,2}	Jnr _{3,2}	粘附力 损失指数	官能团 指数	
L64	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	0.000
L6	0.601	0.458	0.444	0.470	0.787	0.532	0.420
L4	0.865	0.771	0.183	0.552	0.942	0.657	0.580
SL	0.000	0.000	0.183	0.000	0.368	0.000	1.000
S6	0.288	0.229	0.000	0.118	0.000	0.093	0.786
S4	0.104	0.063	0.291	0.076	0.181	0.180	0.945

3.3 计算加权后的决策矩阵

在生成加权决策矩阵时,主观权重将对最终评价结果产生影响。为了避免主观因素对评价结果正确性的影响,必须使用熵权法来计算每个指标的权重,从而得到加权决策矩阵,计算公式如下:

$$V_{ij} = w_{ij} b_{ij} \tag{6}$$

式中: w_{ij} 为归一化矩阵; b_{ij} 为指标权重。

根据公式(7)可以计算获得各指标的权重。

$$w_j = \frac{1 - E_j}{\sum_{j=1}^m (1 - E_j)} \tag{7}$$

式中: E_j 为指标的熵值,熵表示程序的无序程度,熵值根据公式(8~10)计算得到。

$$E_j = -k \sum_{i=1}^n [p_{ij} \ln(p_{ij})] \tag{8}$$

$$k = \frac{1}{\ln(n)} \tag{9}$$

$$p_{ij} = \frac{b_{ij}}{\sum_{i=1}^n b_{ij}} \tag{10}$$

式中: n 为方案数, $n=6$ 。

根据式(10)计算得到熵值 $E=0.786, 0.753, 0.771, 0.729, 0.820, 0.762, 0.873$ 。然后带入式(9)得到各组合方案的权重 $w=0.142, 0.164, 0.152, 0.180, 0.120, 0.158, 0.084$ 。根据公式(8)获得加权后的决策矩阵 V ,如表 4 所列。

3.4 确定最优方案和最劣方案

完成加权处理后,根据各指标的值来确定最优、最劣解。最优方案指各指标的最满意解,用 v^+ 表示;

表 4 加权处理后的决策矩阵一览表

组合方案	低温指标		高温指标		微观指标		成本 / (元·t ⁻¹)
	SAI	mAI	R _{3.2}	Jnr _{3.2}	粘附力 损失指数	官能团 指数	
L64	0.142	0.164	0.152	0.180	0.120	0.158	0.000
L6	0.085	0.075	0.068	0.085	0.094	0.084	0.035
L4	0.123	0.126	0.028	0.099	0.113	0.104	0.049
SL	0.000	0.000	0.028	0.000	0.044	0.000	0.084
S6	0.041	0.038	0.000	0.021	0.000	0.015	0.066
S4	0.015	0.010	0.044	0.014	0.022	0.029	0.080

最劣方案指各指标的最不满意解,用 v^- 表示。如公式 11 和 12 所示。

$$v^+ = \{(\max_{1 \leq j \leq n} v_{ij}) | j \in J, (\min_{1 \leq j \leq n} v_{ij}) | j \in J^-\} = \{v_1^+, \dots, v_j^+, \dots, v_m^+\} \tag{11}$$

$$v^- = \{(\min_{1 \leq j \leq n} v_{ij}) | j \in J, (\max_{1 \leq j \leq n} v_{ij}) | j \in J^-\} = \{v_1^-, \dots, v_j^-, \dots, v_m^-\} \tag{12}$$

式中: J 为正向指标; J^- 为负向指标。

根据上式计算得到抗紫外老化方案的最优方案和最劣方案解:

$$v^+ = (0.142, 0.164, 0.152, 0.180, 0.120, 0.158, 0.084); v^- = (0.000, 0.000, 0.000, 0.000, 0.000, 0.000, 0.000)。$$

3.5 计算与最优方案的相对贴近度

为了确定最优最劣解,让评价排序更加准确,需要计算最优解 v^+ 与最劣解 v^- 之间的距离,然后通过公式(13~15)计算获得不同方案的贴近度(见表 5)。

$$d_i^+ = \sqrt{\sum_{j=1}^m (v_{ij} - v_j^+)^2} \tag{13}$$

$$d_i^- = \sqrt{\sum_{j=1}^m (v_{ij} - v_j^-)^2} \tag{14}$$

$$C_i = \frac{d_i^-}{d_i^+ + d_i^-} \tag{15}$$

式中: d_i^+ 为不同方案评价指标与最优方案的距离; d_i^- 为不同方案评价指标与最劣方案的距离; C_i 为不同方案与最优方案的相近贴近度。

C_i 越大表示该方案越优,计算得到的 6 种方案的排序为:CL64>CL4>CL6 >CS4>CSL>CS6。通过熵权-TOPSIS 理论对不同复合方案的改性沥青进行排序,选择 L64 和 L4 两种复合改性沥青以及 SBS 改性沥青进行紫外老化对混合料性能的研究。

4 结 论

综合考虑复合改性沥青宏观性能指标、微观性能指标以及成本因素,通过熵权-TOPSIS 理论对不

表 5 不同方案与最优方案的相对贴近度一览表

组合方案	d_i^+	d_i^-	C_i
L64	0.084	0.377	0.817
L6	0.189	0.205	0.519
L4	0.167	0.260	0.608
SL	0.354	0.099	0.219
S6	0.331	0.090	0.214
S4	0.325	0.101	0.236

同复合方案的改性沥青进行优化排序,结果表明:单掺抗紫外老化剂效果不如复合添加外加剂改性沥青,采用层状双金属氢氧化物复配受阻胺类光稳定剂和紫外线吸收剂以及层状双金属氢氧化物复配受阻胺类光稳定剂复配改性沥青具有较好的性价比,从而验证了该模型的可靠性及实用性,可为道路工程领域改性沥青配方设计提供有效的科学指导。

参考文献:

[1] Feng Z G, Wang S J, Bian H J, et al. FTIR and rheology analysis of aging on different ultraviolet absorber modified bitumens [J]. Construction and Building Materials, 2016, 115:48-53.

[2] 卢祉巡,于海佳,董薇.受阻胺光稳定剂作用机制及其适用性研究综述[J].塑料科技,2019,47(4):98-102.

[3] 徐松,冯振刚,余剑英.受阻胺光稳定剂对不同沥青性能的影响研究[J].公路,2012(10):158-161.

[4] Xu S, Yu J, Xue L, et al. Effect of layered double hydroxides on ultraviolet aging resistance of SBS modified bitumen membrane [J]. Journal Wuhan University of Technology, Materials Science Edition, 2015, 30(3):494-499.

[5] 解恒,贾志绚.基于熵权-TOPSIS 的指路标志设计评价[J].太原科技大学学报,2022,43(3):242-246.

[6] 张彦飞,刘衬雨,田亚磊,乔建刚.基于熵权-TOPSIS 法的不同基层沥青路面抗裂效果研究[J].河北工业大学学报,2021,50(1):68-73.

[7] 张彩利,宋倜,王清洲,马士宾.基于熵权 TOPSIS 的地下道路复合式路面使用性能评价[J].河北工业大学学报,2014,43(2):97-101,106.

[8] 郭小宏,杨加琪,李琦.基于综合赋权-TOPSIS 模型的 RAP 再生工厂方案评价[J].工程管理学报,2021,35(6):37-42.

[9] 徐慧娟,杨以雄.基于熵权 TOPSIS 的服装企业节能环保评价模型[J].东华大学学报(自然科学版),2010,36(2):213-217

[10] Hwang C, Yoon K. Multiple attribute decision making. Methods and applications. A state-of-the-art survey[J]. european journal of operational research, 1981.

[11] 王永祥,戴金圣.基于 Shapley 值的特色小镇 PPP 项目收益分配研究——以吉安市遂川县红圩特色小镇项目为例[J].数学的实践与认识,2021,51(11):70-81.

[12] 肖淳,邵东国,杨丰顺.基于改进 TOPSIS 法的流域初始水权分配模型[J].武汉大学学报(工学版),2012,45(3):329-334.

[13] Yu H, Bai X, Qian G, et al. Impact of ultraviolet radiation on the aging properties of SBS-modified asphalt binders [J]. Polymers, 2019, 11(7):1111.

[14] Standard Method of Test for Multiple Stress Creep Recovery (MSCR) Test of Asphalt Binder Using a Dynamic Shear Rheometer (DSR), AASHTO T 350(S), 2019.