

# 长安大学研究生学术论文集

## 2018 年卷

主 编 张 永 刘来君 贺炳彦

副主编 姬国斌 柳有权 胡锦涛 刘 扬

陕西新华出版传媒集团  
陕西科学技术出版社

## 学术论文编辑委员会

主 编: 张 永 刘来君 贺炳彦

副主编: 姬国斌 柳有权 胡锦涛 刘 扬

委 员: 李晓杰 张 雯 单金焕 黄庆庆 梁 婷

谢 飞 李玉凡 代帅威 张建勋 吴寒松

张柳叶 李梦瑶 郑字琛 蔺琛智 娜仁图雅

何小青 栗晓楠 张丽菁 徐硕硕 张博文

许庆正

## 目 录

粉胶比对 AC-16 沥青混合料性能的影响研究 .....	黄庆庆,王 铜,雷宁静(1)
复合工况下路用降温涂层耐久性能 .....	樊振通,陈 谦(6)
基于双控法的 SBS 改性沥青现场快速测试技术 .....	张栋梁,国 洋,李炜光(12)
基于断裂特性的 SAP 路面混凝土内养生机理研究 .....	杨景玉,凡俊涛(18)
基于透水性能的级配碎石设计研究 .....	许庆正,保 锐,周 博(24)
除冰路面微波敏感涂层材料与设备开发研究 .....	丁龙亭,李琪琪,董仕豪(30)
生物质重油再生沥青混合料性能研究 .....	吴寒松,尹 磊,吴 华(38)
利用包钢钢渣制备沥青混合料的室内研究 .....	张 强,徐国其,翟博超(43)
沥青路面-冰层冻结强度测试方法研究 .....	万 栋,王 振(49)
乳化沥青 RAP 表面处治混合料力学性能及配合比方法研究 .....	吴海斌,龚志成,邓海龙(56)
乳化沥青冷再生混合料马歇尔成型优化 .....	邓海龙,吴海斌,陈思燚(62)
不同充液率热管对沥青混合料降温效果及影响范围研究 .....	凡俊涛,杨景玉(67)
抗剥落剂对沥青老化性能影响研究 .....	王建文,解志腾,李得胜(73)
基于复合纳米光催化材料的隧道尾气降解研究 .....	解志腾,王建文,钱 谣(78)
基于早期强度的乳化沥青冷再生混合料配合比设计研究 .....	陈思燚,邓海龙,龚志成(83)
掺 TOR 小车轮胎胶粉改性沥青混合料路用性能研究 .....	李 阳,沈晨晨(89)
掺铁尾矿砂细集料的水泥混凝土性能分析 .....	汤鑫磊,唐 可(93)
施工现场机械设备智能化管理系统研究 .....	唐 可,徐 旺,汤鑫磊(99)
绿色公路评价体系研究 .....	何永泰,贺志豪,辛 幸(104)
乳化沥青冷再生混合料强度影响因素试验研究 .....	林宏伟,易 勇,陈 云(110)
沥青混凝土路面自愈合技术研究进展 .....	方 滢,孙胜飞,宿金菲(115)
压实黄土路基浸水条件下长期变形分析 .....	闫世豪,董文静,刘 洋(124)
山区高速公路长大下坡路段平纵指标安全评价方法 .....	张昆仑,任晓玮,秦际涵(131)
基于分形理论的沥青路面纹理仿真分析 .....	何海琦(137)
基于归一化谱熵的冻土区公路地温热影响研究 .....	祝文君,冯逸伟,亓 鑫(144)
山区高速公路连续上坡缓坡设计指标研究 .....	张燕飞,肖 珊(149)
基于主梁刚度损伤的桥梁横向分布计算 .....	李院军,邓淇元(156)

基于 ANSYS 的不平衡日照混凝土箱梁温度场分布研究 .....	肖凯龙 邓淇元(162)
装配式梁柱节点力学性能分析 .....	张博文 卢 灏(167)
中法公路涵洞水文设计对比研究 .....	徐 旺 汤鑫磊 唐 可(172)
地震荷载作用下地铁车站变形缝动力响应分析 .....	蔺文帅 秦祎文(177)
局部动水环境下黄土地铁隧道注浆效果数值分析 .....	乔青青 秦祎文(183)
富水黄土区地铁下穿既有建筑物注浆加固效果分析 .....	马恩临(188)
公路隧道扩建爆破动力响应数值模拟研究 .....	周冬辉(194)
大断面高含水率黄土隧道塌方分析及处治 .....	黄鹏志 赵铭坤(199)
宜万铁路岩溶隧道突水灾害特性及结构处治研究 .....	李承翰 张远航(205)
隧道进出口路面结冰积雪和能见度实时预警研究 .....	杜 可(210)
公路隧道大巴车火灾温度场研究 .....	王 蕾 田爱玄 姚 毅(216)
有限理性下的出行方式选择模型 .....	王丽丽 张辛煜(222)
共享汽车服务站点两次选址模型 .....	苑红腾 周亚男 龙怡昕(226)
基于社会心理环境和工效学的 HSE 管理绩效评价研究 .....	吕纪娜 翟博超 张 强(231)
高原驾驶员换道眼动特征 .....	柯 辉 朱才华(236)
基于有轨电车接驳的公共自行车租赁点规模设置研究 .....	张 鹏 林 永 张 勇(241)
郑州市花园路绿波交通设计与仿真 .....	张凯星 赵东亮 代 希(248)
Behavior of speed choice based on the prospect theory .....	Zhang Liancai Liu Shanshan(254)
山区公路危险品运输规划研究 .....	梁天宇(261)
城市轨道交通区间中断下列车运行调整 .....	孙 晴 陈恒瑞(267)
基于 PFC2D 的变质软岩湿化变形研究 .....	刘 辉 阴增亮(271)
堆载对黄土陡坡地区群桩基础力学特性的影响 .....	王旭东 费鹏波(276)
城镇化进程中土壤重金属及多环芳烃复合污染的时空分布特征研究 .....	殷坤垚(282)
MBT 垃圾的大型压缩试验及压缩特性研究 .....	徐天宇(289)
济源盆地三叠系谭庄组上段球-枕构造成因及其地质意义 .....	李梦瑶 蔡世春(293)
基于 MDP 用户计算任务的迁移卸载策略研究 .....	庞渊博 万 航(300)
甲醇对水溶液中芴及其氧化产物光降解的影响 .....	刘合锋 王贝贝 甘 珑(305)
汽车动力性能主观与客观评价相关性研究 .....	王一博(313)
纯电动汽车制动防抱死系统研究 .....	朱志敏 陆凌凯 翟荣龙(318)
基于 Fe-safe 某横向稳定杆的疲劳分析 .....	张 博(325)

电动小汽车纵向主动防撞系统的建模与仿真 .....	左 思 张甫城(331)
基于迟滞损失的多片式离合器 Simulink 建模与仿真分析 .....	阙海霞(338)
基于贝叶斯组合模型的区域物流需求预测 .....	张 香 杨 鹏 张 伟(345)
基于时间约束的节约算法配送路线优化研究 .....	梁一为(351)
路权分配模式下的物流配送无人车路径规划技术研究 .....	王丽婷(357)
基于空间句法的陕西省路网发展水平分析 .....	邓 雷(363)
“营改增”对公路运输业经营绩效的影响研究 .....	王长帅(369)
危险品运输车辆疲劳驾驶与驾驶环境之间的关系分析 .....	李贵强 付 鹏 刘金凤(374)
基于 dSPACE 的电动助力转向系统性能仿真研究 .....	宋晓妍 袁亚登 张锦思(381)
城市街道峡谷内交通排放污染研究综述 .....	智慧楠(389)
西安市公交车通勤者的颗粒物暴露和呼吸剂量评估 .....	曹慧慧(395)
基于动态速度权重的改进粒子群算法 .....	谢廷船 康 靖 李建良(401)
新型太阳能路灯的参数化设计和失效原因分析 .....	马小康 许自强 高康平(406)
种垃圾清扫机器人 .....	巩银兵 田 星 张伟峰(412)
EMD 和倒频谱在故障诊断中的应用 .....	陈金彪 杨江涛 王赫乾(416)
基于 STIRPAT 模型的陕西省交通运输业碳排放测算及因素分析 .....	耿新瑞 孙 璐(420)
交通运输与社会经济发展关系的数量分析 .....	孙 璐 耿新瑞(426)
市场经济条件下的综合运输服务和工作体系综述 .....	王云龙 高原君(431)
不确定需求下零售商最优定价与订购联合决策 .....	田爱玄 王 蕾 李继东(438)
商誉减值的价值相关性	
——基于我国 A 股市场的经验数据 .....	张 娇(444)
MOOC 在线视频学习行为特征分析 .....	王思懿(448)
交通运输类上市公司财务运营效率分析 .....	桂嘉伟(454)
免门票模式下榆林市旅游经济效益分析 .....	梁 婷 栗晓楠(458)
基于转速和电流反馈控制的 BLDC 调速系统设计 .....	王少帅 李 涌 蒋杨杨(463)
基于 FPGA 多链路信号发生器的研制 .....	汪 玲 郭雅丽(470)
公路隧道交通状态与机动车 $\text{NO}_x$ 、HC 排放关系研究 .....	赵 威(477)
基于非线性最小二乘法的锂电池模型参数辨识 .....	寇 霜 穆邱倩 柴静云(487)
基于全卷积 HED-CRF 的图像语义分割算法的研究 .....	郭雅丽 汪 玲(492)
基于仿人机器人在 RoboCup 足球赛中的策略研究 .....	喻阳俭 李 斌(498)

基于 KNN 的改进型自适应快速峰值聚类算法 .....	邓然然 张英杰 丁明航( 503)
粮仓温度、湿度监测控制系统设计 .....	蔺琛智( 509)
基于贝叶斯方法的建筑火灾事故后果的预测研究 .....	高甲艳 魏兴梅 翟 越( 513)
伊宁地块阿腾套山一带阿克沙克组碎屑锆石年代学及其地质意义 .....	周艳龙 李永军 王祚鹏( 520)
基质颗粒形状与大小对浮床式铝污泥人工湿地污水处理效果的影响探索 .....	同苗苗 刘秀华 马宏娟( 527)
当代大学生心理健康问题及优化路径 .....	李 丹( 534)
新时代高校学生资助工作的育人价值研究 .....	高 英( 538)
澳大利亚公民教育的发展与内容研究 .....	兰 玉( 542)
思想政治教育视域下大学生文化自信培育研究 .....	周 萌 常雪梅( 546)
红色文化视域下大学生社会主义核心价值观培育 .....	常 喜( 550)
戴维·佩珀生态社会主义对我国生态文明建设的意义 .....	张丹鸽( 554)
论“一带一路”战略与边疆民族地区经济社会发展 .....	陈 倩 赵景刚( 558)
十八大以来我国腐败治理的成效与经验 .....	毛 羽( 562)
新时代电视新闻舆论监督的优化策略探析 ——以西安《每日聚焦》栏目为例 .....	张 昭( 566)
老子生态自然思想的基本维度及当代价值 .....	李青青( 570)
关于我国统一社会救助标准的困境与实现路径研究 .....	张 娣( 574)
企业现金持有量的影响因素研究 .....	唐彩霞( 578)
“喊山”的隐喻与女性出路影射 .....	关志强( 585)
媒介融合如何影响新闻内容生产 .....	潘丽媛( 589)
稀疏角度 ADMM-CT 重建加速算法的研究 .....	任 璇( 593)

# 粉胶比对 AC-16 沥青混合料性能的影响研究

黄庆庆,王 铜,雷宁静

(长安大学 公路学院,陕西 西安 710064)

**摘要:**为研究粉胶比与沥青混合料路用性能之间的关系,采用马歇尔试验配合比设计法,基于 AC-16 沥青混合料设计,分别采用 0.6、0.8、1.0、1.2 和 1.4 共 5 种不同粉胶比,分析不同粉胶比对 AC-16 沥青混合料冻融强度、残留稳定性和高温稳定性的影响规律,并探讨了其影响机理。研究表明:(1)随着粉胶比的增大,抗冻融强度有所改善,在粉胶比为 0.8 左右时,达到最佳效果。(2)对于沥青胶浆的残留稳定性,随着粉胶比的增大,其稳定性越大,粉胶比不宜小于 1.0。(3)沥青胶浆的动稳定性也在粉胶比为 1.0 左右时达到峰值,效果最好。

**关键词:**沥青混合料;粉胶比;AC-16;马歇尔试验

**Abstract:**In order to study the relationship between filler-asphalt ratio and road performance of asphalt mixture, the Marshall test mix design method was adopted. Based on AC-16 asphalt mixture design, five kinds of 0.6, 0.8, 1.0, 1.2 and 1.4 Different ratios of powder to binder, the influence laws of different ratios of powder to cement on the freeze-thaw strength, residual stability and high temperature stability of AC-16 asphalt mixture were analyzed and the influence mechanism was discussed. The results show that: (1) As the filler-asphalt ratio increases, the freeze-thaw resistance has been improved. When the filler-asphalt ratio is about 0.8, the best effect is achieved. (2) As for the residual stability of asphalt mortar, with the increase of filler-asphalt ratio, the greater the stability, filler-asphalt ratio should not be less than 1.0. (3) The dynamic stability of asphalt mortar also reaches the peak when the filler-asphalt ratio is about 1.0, which is the best.

**Key words:**Bituminous mixture; Filler-asphalt ratio; AC-16; Marshall test

## 0 引言

沥青混合料具有典型的流变性质,会随着温度、湿度、荷载的变化表现出明显的黏弹性变化特性,其本质是由于沥青的存在。而沥青胶浆的组成结构决定了沥青混合料高低温性能和材料的黏弹性变化。矿粉作为沥青混合料中的一个重要部分,其作用一是填充矿料间隙,二是与沥青混合改变沥青结合料的性质以及黏稠度。其影响和决定了沥青混合料的黏附性、高温特性。所以矿粉以及沥青的比例影响着沥青混合料的高温性能、低

温性能、水稳定性和疲劳性能。目前很多研究虽然测得粉胶比对沥青胶浆的影响规律,但却并未具体针对某一种级配进行深入分析,所以本研究主要针对 AC-16 沥青混合料的高温性能以及水稳定性展开研究,在一定的级配条件下,提出合适的粉胶比范围。

## 1 原材料

### 1.1 沥青

所采用的沥青为 90 号沥青,根据沥青指标检测试验检测出沥青各项指标数据如表 1 所示。

表 1 沥青技术指标

检测项目	单位	测定值	规范要求
25℃针入度	0.1mm	49.5	40~60
软化点	℃	65.1	不小于 60
15℃密度	g/cm <sup>3</sup>	1.038	
5cm/min,5℃延度	cm	22.7	不小于 20
135℃黏度	Pa·s	1.332	不大于 3
25℃弹性恢复	℃	84.3	不小于 75
旋转薄膜加热试验 (163℃,85min)	针入度比	%	不小于 65
	质量损失	%	不大于±1
	5cm/min,5℃延度	cm	不小于 15

**作者简介:**黄庆庆(1994—),男,长安大学公路学院硕士研究生,道路与铁道工程专业。

王 铜(1995—),男,长安大学材料科学与工程学院硕士研究生,材料科学与工程专业。

雷宁静(1996—),女,长安大学材料科学与工程学院硕士研究生,材料工程专业。

## 1.2 矿粉

根据矿粉的纸边检测试验,得出矿粉指标数据如表 2 所示。

表 2 矿粉指标数据

表观相对密度( $\text{g}/\text{cm}^3$ )	2.748	
粒度范围(%)	$<0.6\text{mm}$	100.0
	$<0.15\text{mm}$	100.0
	$<0.075\text{mm}$	96.0
亲水系数	0.41	

## 2 级配设计及优化

结合原材料的各项指标检测,参考《公路沥青路面施工技术规范》(JTGF40-2017)和《公路沥青路面设计规范》(JTGD50-2017)查找 AC-16 沥青混凝土级配设计的范围要求,调试原材料的所用比例,通过控制粒径尺寸通

过率,使合成级配的通过率在规范要求上限和下限之间的范围,且围绕规范中值,令通过率与粒径尺寸在图表中形成类似“S”形的折线关系。采用 4.8% 为油石比中值,用初步设计的级配比例进行配料,制作马歇尔试件,检测体积指标,得出毛体积密度、吸水率、空隙率等数据。通过初打马歇尔试件的体积指标数据,再次调节初步设计的级配,确定最佳级配。

### 2.1 矿料级配初步设计

根据《公路沥青路面设计规范》(JTGD50-2017)附录 C 中的表 C.1 各沥青混合料矿料级配表查找 AC-16 沥青混凝土级配的各筛孔通过率范围要求,得到规范上限、规范下限和规范中值。调试各类原料的使用比例,绘制 AC-16 沥青混凝土初步设计级配表(表 3)、粒径尺寸与通过率折线关系图(图 1)。

表 3 AC-16 沥青混凝土初步设计级配表

集料类别	15~20mm	10~15mm	5~10mm	0~5mm	矿粉	合成级配	中值	上限	下限
19	100.0	100.0	100.0	100.0	100.00	100.00	100.0	100.0	100.0
16	93.1	100.0	100.0	100.0	100.00	99.03	95.0	100.0	90.0
13.2	14.0	100.0	100.0	100.0	100.00	87.96	84.0	92.0	76.0
9.5	0.9	0.2	97.7	100.0	100.00	71.49	70.0	80.0	60.0
4.75	0.0	0.0	0.4	100.0	100.00	43.12	48.00	62.0	34.0
2.36	0.0	0.0	0.0	75.7	100.0	33.77	34.00	48.0	20.0
1.18	0.0	0.0	0.0	62.3	100.0	28.67	24.50	36.0	13.0
0.6	0.0	0.0	0.0	23.4	100.0	13.89	17.50	26.0	9.0
0.3	0.0	0.0	0.0	17.5	100.0	11.65	12.50	18.0	7.0
0.15	0.0	0.0	0.0	12.2	99.5	9.61	9.50	14.0	5.0
0.075	0.0	0.0	0.0	6.7	92.3	7.16	6.00	8.0	4.0
集料用量	14.0	14.0	29.0	38.0	5.0	100.00			

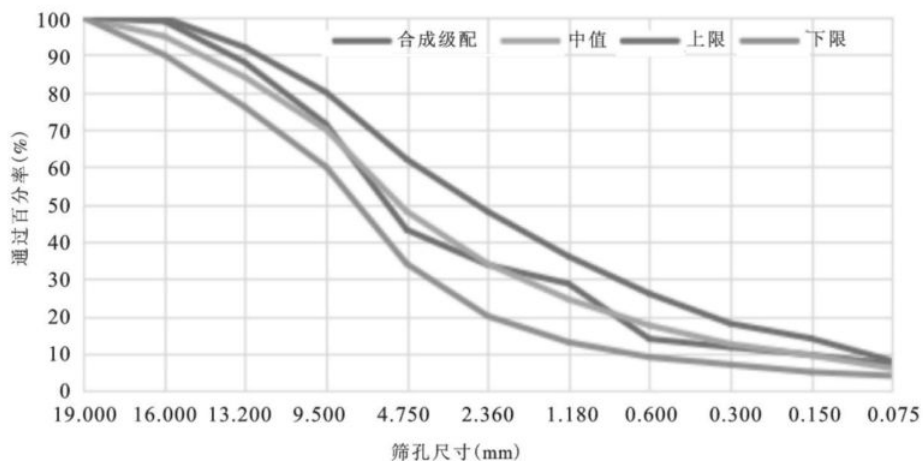


图 1 粒径尺寸与通过率折线关系图

## 3 粉胶比的确定

设计 5 种粉胶比类型,油石比均为 4.8%,粉胶比分别为 0.6、0.8、1.0、1.2、1.4,并分别制备 4

个试件并测体积指标(水中重法)、稳定度( $60^{\circ}\text{C}$ )、流值。根据初步设计的级配试打马歇尔试件,通过对检测的体积指标数据的计算处理,得到各项指标数据如表 4 所示。

表 4 初步级配马歇尔试件各项指标数据

试件编号	1	2	3	4	5	6	平均值
油石比(%)	4.80	4.80	4.80	4.80	4.80	4.80	4.80
沥青用量(%)	4.58	4.67	4.58	4.58	4.58	4.58	4.58
试件厚度(mm)	67.86	64.78	64.58	64.98	64.22	62.14	
	68.20	65.00	64.70	64.80	64.70	62.70	
	68.68	63.96	65.58	64.14	63.32	63.50	
	67.00	63.60	65.70	64.12	65.06	63.28	
平均值(mm)	67.94	64.34	65.14	64.51	64.33	62.91	
试件重(g)	1277.1	1227.4	1224.3	1216.2	1202.8	1197.3	
水中重(g)	745.70	717.20	712.60	707.20	702.50	702.30	
饱和面干重(g)	1279.0	1228.8	1227.10	1218.40	1208.9	1199.9	
毛体积密度	2.39	2.40	2.38	2.38	2.38	2.41	2.39
吸水率(%)	0.36	0.27	0.54	0.43	1.20	0.52	0.56
视密度	2.40	2.41	2.39	2.39	2.40	2.42	2.40
理论密度	2.54	2.54	2.54	2.54	2.54	2.54	2.54
矿料有效相对密度	2.74	2.74	2.74	2.74	2.74	2.74	2.74
矿料毛体积相对密度(%)	2.71	2.71	2.71	2.71	2.71	2.71	2.71
空隙率(%)	5.85	5.67	6.44	6.46	6.61	5.40	6.07
粒料空隙率(%)	15.73	15.65	16.26	16.28	16.41	15.33	15.94
饱和度(%)	62.83	63.76	60.39	60.31	59.71	64.78	61.96
有效沥青(%)	4.26	4.26	4.26	4.26	4.26	4.26	4.27

## 4 路用性能检测

### 4.1 冻融劈裂强度试验

冻融劈裂试验适用于在规定条件下对沥青混合料进行冻融循环,并测定试件在受到水损害前后劈裂破坏的强度比,其结果可以反映沥青混合料的水稳定性。试验所需温度为 25℃,加载速率

为 50mm/min。经过整理得出实验数据如表 5 所示:

表 5 粉胶比与 TSR 数值表

粉胶比	0.6	0.8	1	1.2	1.4
TSR	84.39	90.06	82.09	79.17	74.26

将表 5 数据分析,得到图 2。

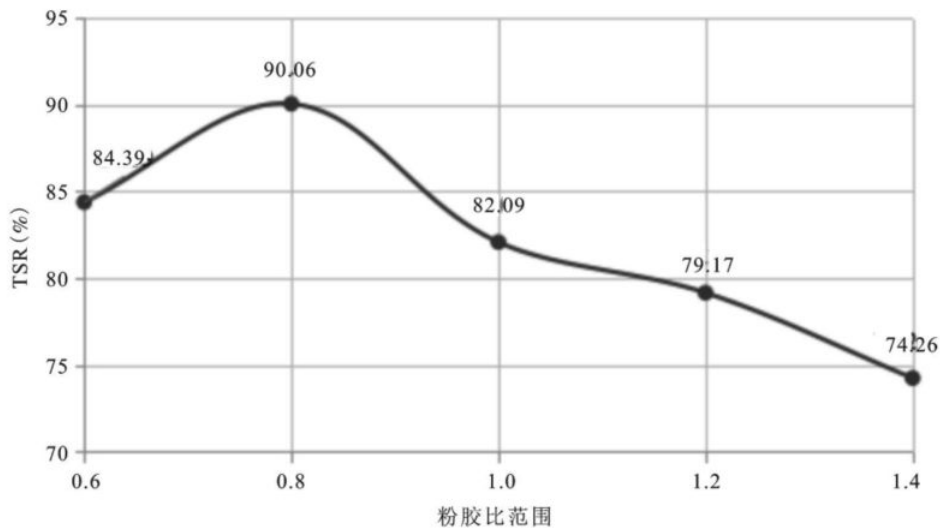


图 2 粉胶比与 TSR 关系图

由图 2 可知,不同粉胶比对 TSR 有影响。在一定范围内随着粉胶比的增加,TSR 值增长,粉胶比超过某一数值,TSR 下降,直至 TSR 低于 75%。说明粉胶比较小时,填料与沥青之间没有完全形成胶浆,由于自由沥青过多易产生滑移,而随着粉胶比的增大,自由沥青因被填料吸收而减少,结构沥青增多,集料之间的黏附性增大。同

时,当粉胶比过大时,整个沥青胶浆稠度过大,与粗集料的黏附性变差。由分析可得在粉胶比为 0.8 左右,使得 TSR 取得最大值或较大值,处在一个较为理想的水平。

### 4.2 残留稳定度试验

制作 8 个双面各击实 75 次的标准马歇尔试件,分为两组,一组在 60℃ 恒温水浴箱中浸泡约

30min,检测稳定度和流值,另一组在 60℃ 恒温水浴箱中浸泡 48h,检测稳定度和流值,进而计算残留稳定度。

残留稳定度试验数据结果分析如表 6 所示。

表 6 粉胶比与残留稳定度数值表

粉胶比	0.6	0.8	1	1.2	1.4
残留稳定度	80.79	84.23	87.95	94.34	91.1

将表 6 进行数据分析,得到图 3。

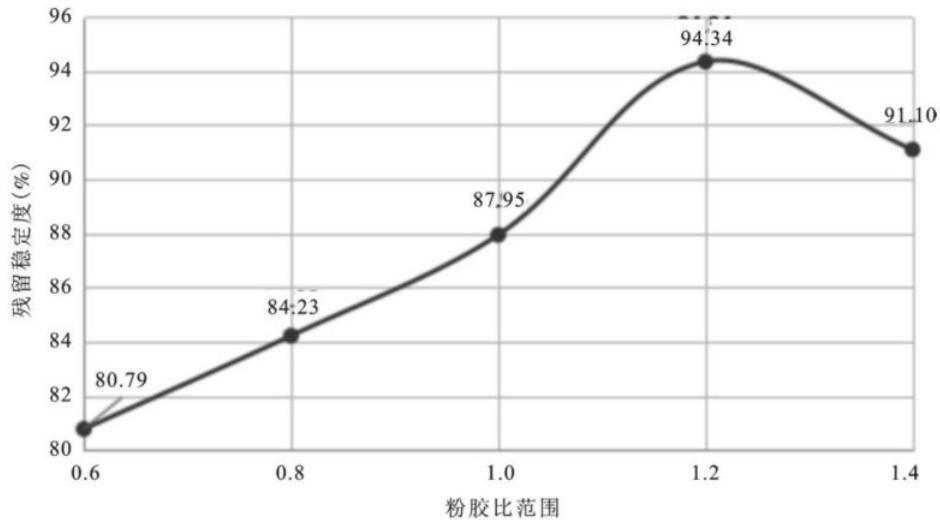


图 3 粉胶比与残留稳定度关系图

由图 3 可知,不同粉胶比对残留稳定度有影响;在一定范围内随着粉胶比的增加,残留稳定值显著增长,粉胶比超过 1.2 时,残留稳定度下降。说明粉胶比对残留稳定度有着较大的影响,在粉胶比较小时,沥青胶浆中自由沥青较多,黏附性较差,随着粉胶比的增大,自由沥青因被填料吸收而减少,结构沥青增多,集料之间的黏附性增大。同时,当粉胶比过大时,整个沥青胶浆稠度过大,与粗集料的黏附性变差且在粉胶比为 1.2 左右时,使得残留稳定度取得最大值或较大值。

#### 4.3 车辙试验

车辙试验适用于测定沥青混合料的高温抗车

辙能力,为沥青混合料配合比设计时高温稳定性的检验提供了方法。本次试验温度为 60℃,轮压为 0.7MPa,重交通轮压可增加至 1.4MPa,计算动稳定度的试件原则上为试验开始后 45~60min 之间。本试验试件规格为 300mm×300mm×50mm 的试件。车辙试验结果分析如表 7 所示。

表 7 粉胶比与动稳定度数值表

粉胶比	0.6	0.8	1	1.2	1.4
动稳定度	939.8	1573.8	2520	1661	1388.7

将表 7 进行数据分析,得到图 4。

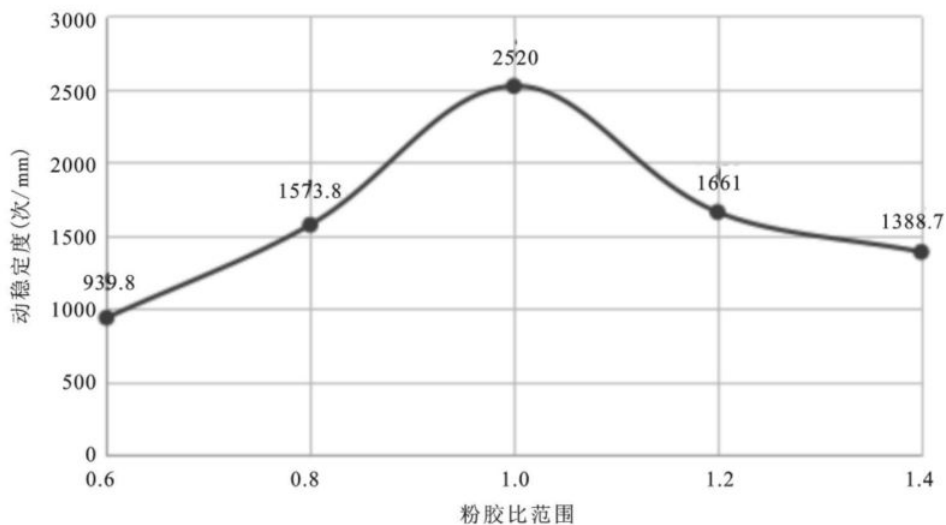


图 4 粉胶比与动稳定度关系图

由图 4 可知,粉胶比与动稳定度之间呈现出二次线性关系,随着粉胶比的增大,动稳定度呈现出先增大后减小的规律,说明加入矿粉对提高沥青混合料的高温稳定性有重要作用。矿粉有大的比表面积,通过与沥青的物理化学作用(吸附),增强了黏结力。增加了沥青的黏度和强度,从而改善胶浆的高温稳定性。图中在粉胶比为 1.0 左右时较为理想,使得动稳定度取得最大值或较大值。

## 5 结论

(1)随着粉胶比的增大,沥青胶浆的抗冻融强度有所改善,当增加到一定程度,到达某一最大值

后大幅下降,从这项指标来看,粉胶比宜维持在 0.8 左右。

(2)随着粉胶比的增大,沥青胶浆的残留稳定度明显增大,说明粉胶比对水稳定性有重要的影响,从残留稳定度这项指标考虑,粉胶比不宜低于 1.0。

(3)随着粉胶比的增大,动稳定度呈抛物线形出现峰值,当粉胶比大于 1 时出现下降趋势,说明粉胶比对 TSR 有着较大的影响,且在 1.0 时效果较好。

(4)根据粉胶比对沥青混合料性能的影响,可根据工程实际中根据级配类型选用 1.0 左右的粉胶比。

## 参考文献

- [1] 刘铎. 矿料级配及粉胶比对沥青混合料性能的影响[J]. 科技创新与应用, 2018(17): 111-112.
- [2] 乔云雁, 薛哲, 盛燕萍, 等. 橡胶沥青胶浆高温性能影响因素的灰关联熵分析[J]. 广西大学学报(自然科学版), 2017, 42(04): 1505-1511.
- [3] 熊锐, 刘子铭, 王小雯, 等. 碳纤维沥青胶浆流变特性及微观机理试验研究[J]. 公路, 2017, 62(08): 215-221.
- [4] 付其林, 刘朝晖, 魏建国, 等. 粉胶比对开级配大粒径沥青碎石路用性能的影响[J]. 中外公路, 2017, 37(01): 267-270.
- [5] 刘玉龙, 王旭, 李洪峰. 粉胶比对沥青混合料路用性能影响的试验研究[J]. 森林工程, 2014, 30(03): 111-115.
- [6] 雷宗建, 黄国威, 张争奇. 粉胶比对冷补沥青混合料性能的影响[J]. 公路, 2013, (07): 212-217.
- [7] 樊英华. 粉胶比对沥青混合料性能的影响研究[J]. 公路交通科技(应用技术版), 2011, 7(12): 148-150.
- [8] 黄晓军, 刘建, 田斌, 姚海飞. 粉胶比对沥青混合料安全性能影响的试验研究[J]. 中国安全生产科学技术, 2011, 7(07): 47-51.
- [9] 赵冬雨, 李海勇. 沥青填料胶泥混合料对沥青路面使用性能的影响[J]. 交通科技与经济, 2011, 13(04): 27-29.
- [10] 凌天清, 肖川, 夏玮, 等. 高温下橡胶沥青胶浆特性及矿料级配优化分析[J]. 土木建筑与环境工程, 2010, 32(05): 47-52.
- [11] 李祖仲. 应力吸收层沥青混合料组成设计及抗裂性能研究[D]. 长安大学, 2009.
- [12] 张争奇, 张卫平, 李平. 沥青混合料粉胶比[J]. 长安大学学报(自然科学版), 2004, (05): 7-10.

# 复合工况下路用降温涂层耐久性能

樊振通, 陈 谦

(长安大学 公路学院, 陕西 西安 710064)

**摘 要:**针对现有沥青路面路用降温涂层耐久性能评价体系尚不完善的问题,制备了多种新型路用降温涂层,确定了不同类型路用降温涂层的室外降温效果,并提出了复合工况条件下的路用降温涂层耐久性能评价指标。运用混合型多指标灰靶决策方法,全面评价了不同路用降温涂层方案综合耐久性能,优选了耐久性能较好的路用降温涂层方案,为路用降温涂层的推广和应用奠定坚实基础。

**关键词:**道路工程;降温涂层;耐久性能;复合工况;灰靶决策

**Abstract:** The durability evaluation system of road cooling coating has not been formed now. Aiming at this question, different road cooling coatings were prepared. The cooling effects of different coatings were determined through field test. The durability evaluation indexes of road cooling coating at different composite operating conditions were presented. The comprehensive durability of different road cooling coatings were evaluated by using multi-objective grey target decision-making method. The road cooling coatings with better comprehensive durability were selected. It lays a foundation for the popularization and application of road cooling coating.

**Key words:** road engineering; cooling coating; durability; composite operating condition; grey target decision-making

## 1 引言

在夏季高温条件下,沥青混凝土路面会内部积聚大量热能且难以释放<sup>[1]</sup>,从而导致路面产生高温车辙病害,并加剧城市热岛效应<sup>[2]</sup>。为解决这一问题,道路工作者们相继开展了一系列路用降温涂层的相关研究。唐伯明等研发了以  $\text{TiO}_2$  为主要材料的降低路面温度的热反射涂层,确定了其路用性能及降温效果影响因素<sup>[3]</sup>。郑木莲等以金红石型钛白粉制备了热反射涂层材料,并研究了不同颜色涂层对沥青混合料的降温效果<sup>[4]</sup>。Guntor 等研究了不同环境温度下涂层材料对沥青路表温度的影响,结果表明该涂层可降低沥青路面温度达  $4.4^\circ\text{C}$ <sup>[5]</sup>。Anting 等将废旧瓷砖用于沥青路面,利用其良好的反射率可降低路面温度达  $6.4^\circ\text{C}$ <sup>[6]</sup>。王朝辉等基于负荷轮碾压试验,揭示了路用降温涂层对沥青路面高温稳定性的影响规律<sup>[7-8]</sup>。综上所述,国内外对路用降温涂层技术的探索主要集中在涂层制备、降温功效研究等方面,而针对路用降温涂层使用品质及耐久性评价方面的研究较少涉及。但在实际应用过程中,国内外现有路用降温涂层普遍存在着耐久性不足的

明显缺点,尤其是当处于复杂环境中的沥青路面受到不同程度污染后,路用降温涂层的耐久性将急剧下降,因此,系统研究路用降温涂层基于复合工况条件的耐久性能指标及综合评价方法具有重要意义。

为保证不同类型路用降温涂层室外降温效果测试的准确性,全面考虑了路用降温涂层实际使用过程中诸如温度、行车荷载、湿度及污染等环境条件的复杂影响,制备多种新型路用降温涂层,同时运用混合型多指标灰靶决策方法,全面评价不同路用降温涂层方案综合耐久性能,科学合理地优选出耐久性能较好的路用降温涂层方案,为路用降温涂层在公路交通领域的推广应用奠定坚实基础。

## 2 路用降温涂层制备

基于电荷迁移原理及现有降温材料特点,优选 PC、SC 和 TC 等 3 种微粉作为降温功能材料。选用环氧树脂及聚酰胺树脂作为涂层成膜材料,以陶土、氧化铁和乙醇依次作为颜料、辅助降温材料及助剂。降温涂层的制备过程中使用优选的降温功能材料,并首先选择耐久性较

作者简介:樊振通(1995—),男,长安大学公路学院硕士研究生,交通运输工程专业。

陈 谦(1993—),男,长安大学公路学院博士研究生,道路与铁道工程专业。

好的降温涂层, 路用降温涂层制备步骤见图 1。功能材料、辅助材料及涂层材料最佳用量, 试验基于降温功效及路用性能试验, 已确定各降温方案见表 1。

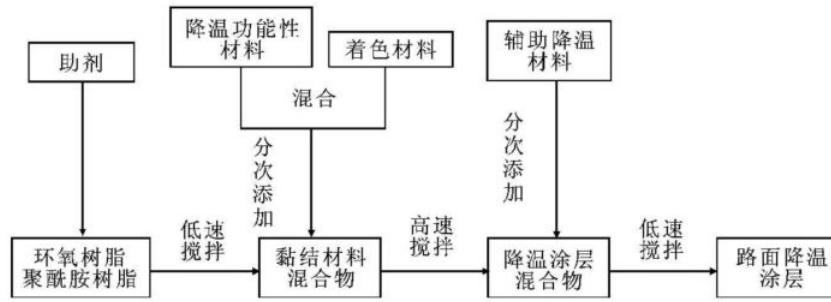


图 1 路用降温涂层制备步骤

表 1 路用降温涂层试验方案

方案	涂层类型	降温功能材料 (掺量/%)	辅助降温材料 (氧化铁)掺量/%	颜料(陶土)掺量/%
1	普通涂层	—	5	4
2	PC 路用降温涂层	PC(20)	5	4
3	SC 路用降温涂层	SC(20)	5	4
4	TC 路用降温涂层	TC(20)	5	4
5	PTC 路用降温涂层	PC(10)+ TC(10)	5	4
6	STC 路用降温涂层	SC(10)+ TC(10)	5	4

### 3 降温功效研究

根据《公路工程沥青及沥青混合料试验规程》(JTG E20—2011)进行沥青车辙板试件的制备, 选取 SBS(1-D)改性沥青、石灰岩集料、玄武岩集料为基础材料, 采用 AC-13 的矿料级配。为防止

热量散失, 同时确保降温性能测试结果准确性, 在车辙板表面、中部及下部埋置温度传感器, 用黏土对试件侧面及底面进行封闭性包裹。夏季 10:00 至 15:00 期间, 将路用降温涂层试件放置于室外进行阳光照射, 每隔 30min 记录一次试件预埋传感器的温度(见图 2), 确定其降温性能, 见图 3。

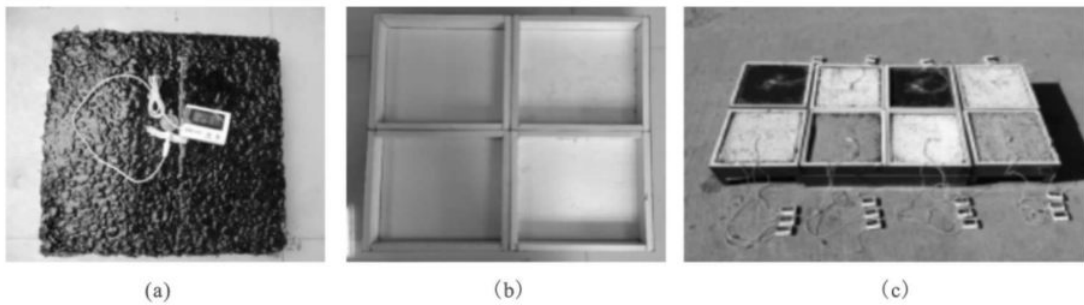


图 2 路用降温涂层降温效果测试

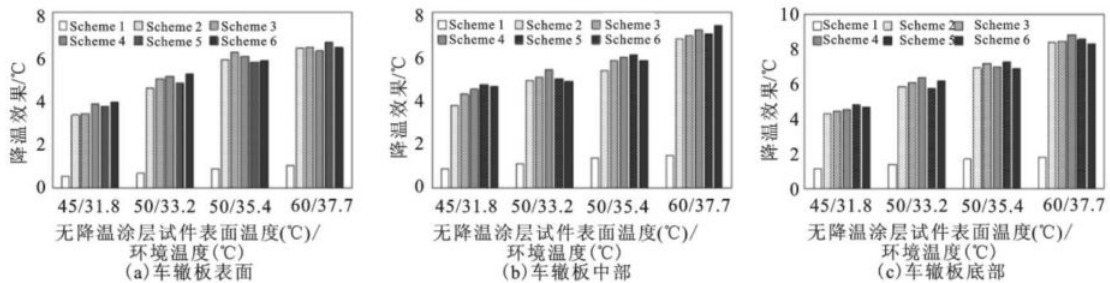


图 3 不同路用降温涂层降温效果

由图 3 可知, 在车辙板试件不同位置处, 方案 2~6 的降温效果显著, 且降温效果随试件温度的升高而逐渐增大, 当试件温度达到 60℃ 时, 降温

效果可达 8.8℃。表明不同类型的路用降温涂层在改善了沥青车辙板的高温稳定性方面效果显著; 在车辙板试件不同位置处不同类型路用降温

涂层的降温效果相差不大。基于上述结论,着重研究复合工况条件下路用降温涂层的耐久性能,以优选综合耐久性能较好的路用降温涂层。

### 4 综合耐久性能研究

#### 4.1 耐压性能

根据《路面标线涂料》(JT/T 280-2004),采用配重块模拟车辆纵向静荷载,系统研究路用降温涂层在高、低温及冻融循环等不同环境和纵向静荷载综合作用下耐压性能,见图 4。

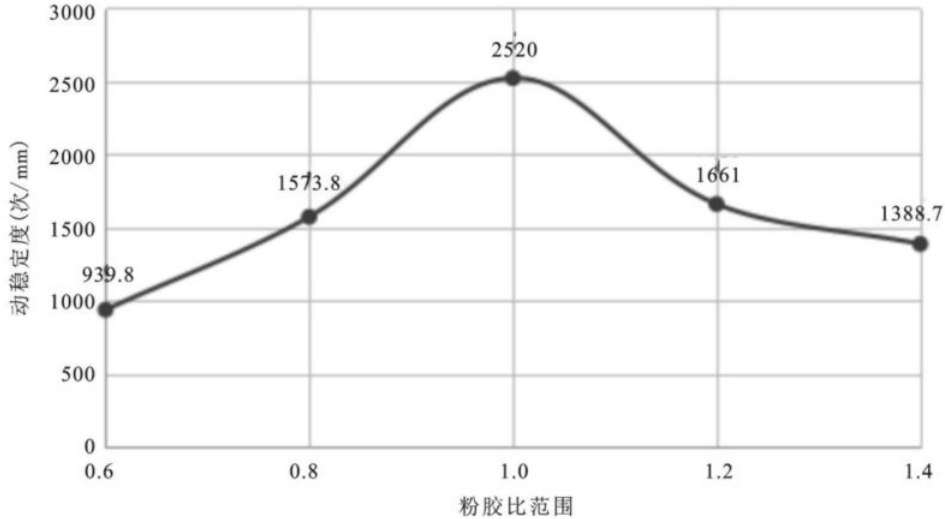


图 4 基于复合工况的不同方案耐压系数

由图 4 可知,不同环境条件下,方案 2~6 的耐压系数均比方案 1 更高,说明路用涂层材料在添加降温功能材料后,其耐压性能得到了提高。与普通涂层相比,路用降温涂层耐压系数提高了 0.63%~4.48%。高温和冻融耐压系数要略小于低温耐压系数,这是由于在持续高温条件下,路用降温涂层会有所软化,伴随着道路车辆纵向静荷载作用,路用降温涂层在纵向产生压缩变形;在常

温条件、纵向静荷载作用下,由于路用降温涂层质地较硬,压缩变形量微小。

#### 4.2 耐轮碾性能

根据《公路工程沥青及沥青混合料试验规程》(JTG E20-2011),采用标准轴载轮碾压试验,并利用保温箱模拟夏季和冬季气候温度条件,系统研究高、低温及冻融循环等不同环境下路用降温涂层的耐轮碾性能,见图 5。

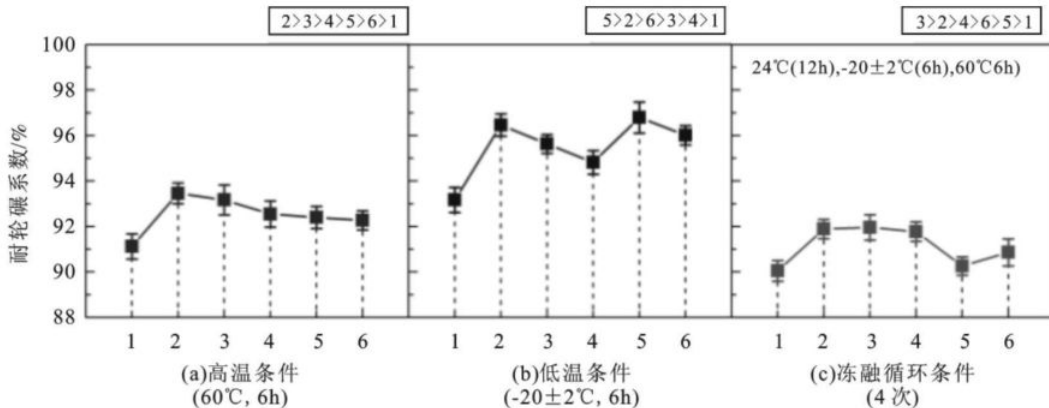


图 5 基于复合工况的不同方案耐轮碾系数

由图 5 可知,不同环境条件下,方案 2~6 均出现了一定程度纵向变形,但变形量较小且耐轮碾系数均比方案 1 更高,说明路用涂层材料在添加降温功能材料后,其耐轮碾性能得到了提高。与普通涂层相比,路用降温涂层的耐轮碾系数提高了 0.23%~3.87%。其中,低温条件下耐轮碾

性能最优,耐轮碾系数基本保持在 95% 以上;在持续高温条件下,耐轮碾系数出现略微下降;而在冻融循环条件下,耐轮碾系数相对较差,但也能够保持在 91% 以上,表明在不同环境条件下,不同类型路用降温涂层能够较好地抵御道路行车车轮碾压荷载的破坏作用。

4.3 耐磨耗性能

根据《环氧树脂地面涂层材料》(JC/T 1015-2006), 采用高温、温变等因素模拟涂层的磨耗使

用环境, 全面评价路用降温涂层的复合耐磨耗性能, 见图 6。

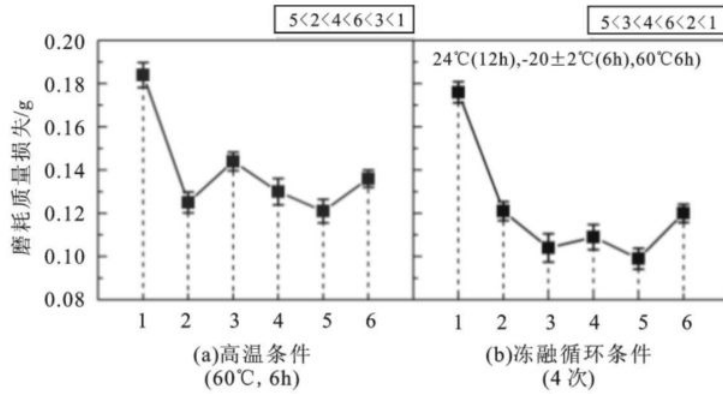


图 6 基于复合工况的不同方案磨耗质量损失

由图 6 可知, 不同环境条件下, 方案 2~6 的磨耗质量损失均比方案 1 更低, 说明路用涂层中添加的降温功能材料能有效提高其耐磨耗性能, 同时路用降温涂层的磨耗质量损失降低了 21.74%~43.75%。方案 2~6 的磨耗质量损失基本在 0.15g 上下浮动, 最大为 0.184g, 按照《公路工程沥青及沥青混合料试验规程》(JTJ E20-2011) 的规定, 方案 2~6 的磨耗质量损失均满足

限值 0.2g 的要求, 表明在不同环境条件下, 不同类型路用降温涂层能够减小汽车轮胎磨耗带来的不利影响, 保证自身良好使用性能。

4.4 耐腐蚀性能

根据《环氧树脂地面涂层材料》(JC/T 1015-2006), 综合模拟酸、碱、油等不同污染环境, 对环氧树脂地面降温涂层进行耐腐蚀性能评价, 见图 7。

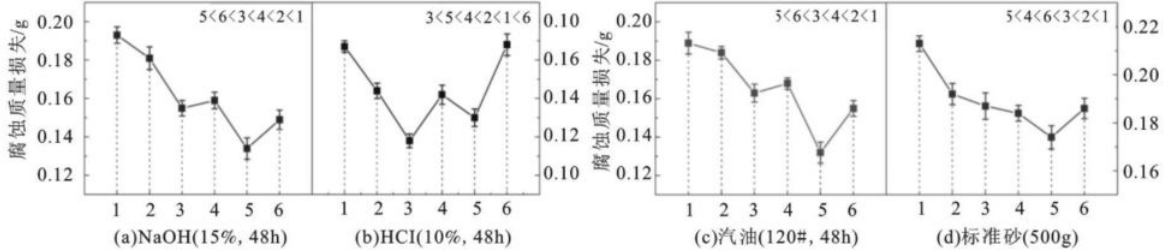


图 7 基于复合工况的不同方案腐蚀质量损失

图 7 可知, 不同环境条件下, 方案 2~6 的腐蚀质量损失均比方案 1 更低, 说明路用涂层材料在添加降温功能材料后, 其耐腐蚀性能得到了提高。与普通涂层相比, 路用降温涂层的腐蚀质量损失降低了 2.65%~30.57%。相比于高温和温变条件下的磨耗质量损失, 路用降温涂层在污染工况下的腐蚀质量损失相对较大, 主要是由于化学试剂的作用改变了降温涂层的表面构造, 而标

准砂的撒铺增大了降温涂层表面摩擦系数, 这均在一定程度上增大了轮胎与降温涂层表面的摩擦力, 从而增大了降温涂层的腐蚀质量损失。

4.5 耐冲击性能

根据《环氧树脂地面涂层材料》(JC/T 1015-2006), 采用冲击试验评价环氧树脂地面降温涂层在服役过程中受到瞬时荷载(如物体猛烈撞击、车辆冲击力等)时的抗变形能力, 见表 2。

表 2 基于复合工况的不同方案耐冲击状况

方案	1	2	3	4	5	6
表面状况	小范围轻微裂纹、无剥落	轻微裂纹、无明显剥落	无裂纹、剥落	轻微裂纹、无明显剥落	无裂纹、剥落	无裂纹、剥落

表 2 可知, 钢球冲击后, 方案 2、4 表面状况较

差, 出现了明显轻微裂纹, 而方案 3 表面状况良

好,说明 PC、TC 这两种功能材料对改善涂层耐冲击性能效果不理想,而路用涂层材料在添加 SC 功能材料后,其耐冲击性能得到了较明显提高。方案 5、6 表面状况均基本良好,不同冲击位置上均可以保持无裂纹、无剥落,即方案 5、6 耐冲击性能良好,这表明不同功能材料在经过复配后,相互间可能形成了一定结构体系,从而改善了路用降温涂层耐冲击性能。

表 3 灰靶决策模型数据

方案	性能指标(权重)						排序
	耐压系数 (0.3975)	耐轮碾系数 (0.5213)	磨损质量损失 (0.0336)	腐蚀质量损失 (0.0333)	耐冲击状况 (0.0143)	综合靶心距	
1	92.44,97.41	90.05,93.17	0.176,0.184	0.167,0.213	0.1,0.2,0.3	$2.501 \times 10^{-2}$	6
2	96.03,99.18	91.89,96.46	0.121,0.125	0.144,0.192	0.4,0.5,0.6	$1.106 \times 10^{-2}$	4
3	94.38,98.13	91.96,95.63	0.104,0.144	0.118,0.187	0.7,0.8,0.9	$5.276 \times 10^{-3}$	1
4	93.52,98.43	91.77,94.82	0.109,0.130	0.142,0.184	0.4,0.5,0.6	$1.557 \times 10^{-2}$	5
5	96.58,98.02	90.26,96.79	0.099,0.121	0.130,0.174	0.7,0.8,0.9	$5.699 \times 10^{-3}$	2
6	93.55,98.47	90.86,96.01	0.120,0.136	0.149,0.186	0.7,0.8,0.9	$1.055 \times 10^{-2}$	3

表 3 可知,方案 1 的综合靶心距最高,方案 3 的综合靶心距最低,其余依次为方案 5、6、2 和 4。方案 2~6 综合靶心距均比方案 1 更低,综合耐久性能更优良,这说明路用涂层材料在添加降温功能材料后,其耐久性能得到了明显改善。其中,方案 3 和 5 综合靶心距明显较其余方案小,其综合耐久性能较为优良。这一结果与试验过程中所得初步结论相吻合,因此可采用混合型多指标灰靶决策方法评价路用降温涂层综合耐久性能。

## 6 结语

(1)路用降温涂层的降温效果与沥青混凝土温度变化呈正相关,降温效果可达  $8.8^{\circ}\text{C}$ 。

(2)路用涂层材料在添加降温功能材料后,其耐久性能得到了明显改善,与普通路用涂层相比,

## 5 多指标灰靶决策模型应用

本文系统研究了 6 种涂层的 5 种耐久性能,参照文献中的混合型多指标灰靶决策方法<sup>[9]</sup>,构成 6 参数 5 指标灰靶决策的样本数据,以靶心距最小为优化目标,构建多指标灰靶决策模型,经过计算,得出不同指标权重及不同方案的综合靶心距,见表 3。

路用降温涂层耐压系数提高了  $0.63\% \sim 4.48\%$ ,耐轮碾系数提高了  $0.23\% \sim 3.87\%$ ,磨损质量损失降低了  $21.74\% \sim 43.75\%$ ,腐蚀质量损失降低了  $2.65\% \sim 30.57\%$ ,耐冲击性能得到一定改善。

(3)采用混合型多指标灰靶决策方法,得到不同路用降温涂层方案综合靶心距的排序为  $3 < 5 < 6 < 2 < 4 < 1$ ,与试验过程中结论相吻合,该方法可用于路用降温涂层综合耐久性能评价。SC 路用降温涂层方案的灰靶决策综合效用较优,表明其综合耐久性能较其他方案更为优良。

(4)目前,与路面降温涂层相关的规范及标准较少,针对路用降温涂层耐久性评价的研究更是鲜有涉及,缺乏完备的路用降温涂层耐久性评价体系,今后应从多因素、多环境、多工况等方面来对路用降温涂层耐久性进行更系统、科学的研究。

## 参考文献

- [1] Qin Y. A review on the development of cool pavements to mitigate urban heat island effect[J]. Renewable & Sustainable Energy Reviews, 2015, 52:445-459.
- [2] Guo T, Wang C, Yang X, et al. Development and performance of sand fog seal with cooling and air purification effects[J]. Construction & Building Materials, 2017, 141:608-618.
- [3] 唐伯明,袁颖,曹雪娟,等. 沥青路面热反射涂料老化规律及其机理探讨[J]. 重庆交通大学学报(自然科学版), 2015,3:47-51.
- [4] 郑木莲,何利涛,高璇. 基于降温功能的沥青路面热反射涂层性能分析[J]. 交通运输工程学报, 2013,13(5):10-16.
- [5] Guntor N A A, Din M F M, Ponraj M, et al. Thermal Performance of Developed Coating Material as Cool Pavement Material for Tropical Regions[J]. Journal of Materials in Civil Engineering, 2014, 26(4):755-760.
- [6] Anting N, Din M F M, Iwao K, et al. Experimental Evaluation of Thermal Performance of Cool Pavement Material Using Waste Tiles in Tropical Climate[J]. Energy & Buildings, 2017, 142:211-219.
- [7] 王朝辉,王玉飞,孙晓龙,等. 基于能量转换的路用降温涂层材料制备与性能[J]. 中国公路学报, 2015,28(8):

14-21.

- [8] 孙晓龙, 王朝辉, 张洪华, 等. 负重轮碾压的路用降温涂层高温稳定性能[J]. 长安大学学报(自然科学版), 2016, 36(4):18-25.
- [9] Hu M, Li L. A Novel Dominance Relation and Application in Interval Grey Number Decision Model[J]. Journal of Grey System, 2014, 26(1):91-98.