

铝酸酯改性矿粉的研制及其对 SBS 改性 AC-20C 水稳定性能的影响

李文,马盛盛,郑剑锋

济南市市政工程设计研究院(集团)有限责任公司,山东 济南 250003

摘要:为研究铝酸酯改性矿粉对 SBS 改性 AC-20C 水稳定性能的影响,以石灰岩矿粉为原料,铝酸酯为改性剂,采用化学方法制备铝酸酯改性石灰岩矿粉,以吸油值和活化度为评价指标,采用正交试验研究其最佳改性工艺,通过荧光显微镜对比普通矿粉和铝酸酯改性矿粉沥青胶浆的微观特征,对掺加铝酸酯矿粉的 SBS 改性 AC-20C 试件进行残留稳定性和冻融劈裂强度试验。结果表明:铝酸酯改性矿粉的最佳改性条件为改性温度 80 ℃,铝酸酯矿粉在 SBS 改性 AC-20C 中的质量分数为 1.0%,改性时间 50 min;掺加铝酸酯改性矿粉的 SBS 改性 AC-20C 的活化度是普通矿粉 AC-20C 的 27.9 倍,吸油值减小 58.7%;在水稳定性能方面,掺入铝酸酯改性矿粉的 SBS 改性 AC-20C 的残留稳定度比普通矿粉 AC-20C 增大 4.48%,冻融劈裂强度比增大 6.52%,铝酸酯改性矿粉可有效提高 SBS 改性 AC-20C 的水稳定性能。

关键词:沥青混合料;铝酸酯;石灰岩矿粉;改性条件;沥青胶浆;水稳定性能

中图分类号:U416.217

文献标志码:A

文章编号:1672-0032(2025)05-0071-06

引用格式:李文,马盛盛,郑剑锋. 铝酸酯改性矿粉的研制及其对 SBS 改性 AC-20C 水稳定性能的影响[J]. 山东交通学院学报,2025,33(5):71-76.

LI Wen, MA Shengsheng, ZHENG Jianfeng. Development of aluminate modified mineral powder and its effect on the water stability of SBS modified AC-20C[J]. Journal of Shandong Jiaotong University, 2025, 33(5):71-76.

0 引言

随着国内外物流运输业的快速发展,各级公路的交通量和交通荷载等级均日益增大,受复杂环境因素影响,包括温度效应、水分作用、日照与老化、重载与超载、渠化交通、慢速与静止荷载以及上述因素的耦合作用,沥青路面易在服役过程中出现车辙、裂缝、坑槽等多种病害^[1-3]。矿粉和沥青结合形成的结构沥青是影响沥青路面抗水损坏的重要因素之一,对矿粉表面性质进行优化改性,结构沥青增多,可提高沥青混合料的路用性能^[4-6]。最常见的沥青路面水损坏病害为路面坑洞、集料松散剥落等。长时间受外界气候条件和车辆荷载的作用影响,沥青与集料界面积聚大量水分。矿粉具有亲水性,极易与水分子结合,在沥青有机介质中不易分散,导致沥青胶浆的黏附性降低,沥青与集料剥离^[7-10]。降低矿粉的亲水性可有效提高沥青路面的抗水损坏性能。

实际工程中主要采用添加生石灰(主要成分为 CaO)或消石灰粉(主要成分为 CaOH)的方法改良矿粉,旨在提高矿粉表面的 pH 值,与沥青酸性中和,增强沥青胶浆的黏附性,这种方法的短期效果良好,但长期性能不理想^[11-12]。铝酸酯中的 RO—基团可与矿粉表面的吸附水或羟基反应,在矿粉表面包覆一层与沥青具有较好亲和性的官能团—OCOR,可使矿粉表面性能由无机性转变为有机性,能增强矿粉与沥青的相容性,改善沥青胶浆的黏附性能^[13-16],提高矿粉在沥青混合料中的分散性,产生一定的补强作用。

收稿日期:2024-09-11

第一作者简介:李文(1991—),男,济南人,工程师,工学硕士,主要研究方向为道路工程,E-mail:1165302474@qq.com。

铝酸酯改性矿粉与未改性矿粉沥青混合料在施工工艺流程中没有差异,但沥青混合料性能得到改善,具有较大的推广应用优势^[17-20]。

本文研究铝酸酯改性矿粉 AC-20C 的水稳定性,以石灰岩矿粉为填料,铝酸酯为改性剂,采用化学法制备新型石灰岩矿粉,选取吸油值和活化度两项参数作为评价指标,通过正交试验研究其最佳改性工艺,采用荧光显微镜对改性矿粉沥青进行表征,通过残留稳定度、冻融劈裂强度试验研究铝酸酯改性矿粉对 SBS 改性 AC-20C 抗水损坏性能影响,以期为改性矿粉的工程应用提供数据参考。

1 铝酸酯改性矿粉的制备

1.1 原材料

选用石灰岩矿粉为填料,粒度 $P_{0.075}=82.5\%$,表观密度为 2.672 g/cm^3 ,干燥、洁净、结构松散,无团粒及结块现象,吸油值为 27.1 g/(100 g) ,活化度为 3.58% 。

铝酸酯为白色片状,有特殊气味,易生产,性价比高,采用有机溶剂乙醇溶解。

1.2 矿粉改性方法及结果

设计正交试验研究铝酸酯化学方法改性矿粉的最佳改性工艺。

1) 正交试验

以活化度和吸油值作为评价铝酸酯改性矿粉的性能指标,研究最佳改性工艺。选用 A (改性温度)、 B (改性剂质量分数)、 C (改性时间)3 个正交试验因素,每个因素设 3 个水平, $i=1,2,3$ 。设改性温度 A_1 、 A_2 、 A_3 为 70、80、90℃,改性剂质量分数 B_1 、 B_2 、 B_3 为 0.5%、1.0%、1.5%,改性时间 C_1 、 C_2 、 C_3 分别为 30、50、70 min。

2) 铝酸酯改性矿粉正交试验方案与结果

将乙醇倒入锥形瓶内,将放有搅拌子的锥形瓶放入达到规定温度的集热式恒温加热磁力搅拌器中,加入一定量的铝酸酯,恒温搅拌改性规定时间后,倒入磁盘烘干备用。铝酸酯改性矿粉活化度、吸油值试验方案与结果分析如表 1~4 所示。

表 1 铝酸酯改性矿粉活化度试验方案					表 2 铝酸酯改性矿粉吸油值试验方案				
试验编号	$A/^\circ\text{C}$	$B/\%$	C/min	活化度/%	试验编号	$A/^\circ\text{C}$	$B/\%$	C/min	吸油值/ $[\text{g}\cdot(100\text{ g})^{-1}]$
1	70	0.5	30	99.42	1	70	0.5	30	12.3
2	70	1.0	70	99.96	2	70	1.0	70	11.7
3	70	1.5	50	99.71	3	70	1.5	50	11.5
4	80	0.5	70	99.92	4	80	0.5	70	11.9
5	80	1.0	50	99.99	5	80	1.0	50	11.2
6	80	1.5	30	99.97	6	80	1.5	30	11.7
7	90	0.5	50	99.87	7	90	0.5	50	12.0
8	90	1.0	30	99.96	8	90	1.0	30	11.8
9	90	1.5	70	99.65	9	90	1.5	70	11.9

表 3 铝酸酯改性矿粉活化度试验结果分析								单位:%
试验因素	K_1	K_2	K_3	求和	k_1	k_2	k_3	极差
A	299.09	299.87	299.47	898.43	99.70	99.96	99.82	0.26
B	299.21	299.91	299.32	898.44	99.74	99.97	99.77	0.24
C	299.35	299.57	299.53	898.45	99.78	99.86	99.84	0.07

注: $K_1\sim K_3$ 分别为因素 A 、 B 、 C 中 $i=1,2,3$ 的试验数据和, $k_1\sim k_3$ 分别为因素 A 、 B 、 C 中 $i=1,2,3$ 的试验数据算术平均值。

表 4 铝酸酯改性矿粉吸油值试验结果分析								单位:g/(100 g)
试验因素	K_1	K_2	K_3	求和	k_1	k_2	k_3	极差
A	35.50	34.80	35.70	106.00	11.83	11.60	11.90	0.30
B	36.20	34.70	35.10	106.00	12.07	11.57	11.70	0.50
C	35.80	34.70	35.50	106.00	11.93	11.57	11.83	0.10

极差揭示各因素对评价指标活化度、吸油值的影响程度,极差越大,各因素对评价指标的影响力越强。由表 1、3 可知:铝酸酯改性矿粉活化度作用效果由大到小依次为改性温度、改性剂质量分数、改性时间,最优组合为 A_2 、 B_2 、 C_2 ,在改性温度 80 ℃,改性时间 50 min,改性剂质量分数 1.0%时,铝酸酯改性矿粉活化度最优。由表 2、4 可知:铝酸酯改性矿粉吸油值作用效果由大到小依次为改性剂质量分数、改性温度、改性时间,最优组合为 B_2 、 A_2 、 C_2 ,在改性温度 80 ℃,改性时间 50 min,改性剂质量分数 1.0%时,铝酸酯改性矿粉吸油值最优。铝酸酯改性矿粉的吸油值低至 11.2 g/(100 g),活化度高达 99.99%,普通矿粉的吸油值为 27.1 g/(100 g),活化度为 3.58%,改性矿粉的吸油值比普通矿粉减小 58.7%,活化度是普通矿粉的 27.9 倍。

2 不同沥青胶浆荧光显微镜分析

对比分析普通矿粉和铝酸酯改性矿粉普通 70[#]沥青胶浆的荧光显微镜图片,放大 500 倍,如图 1 所示。

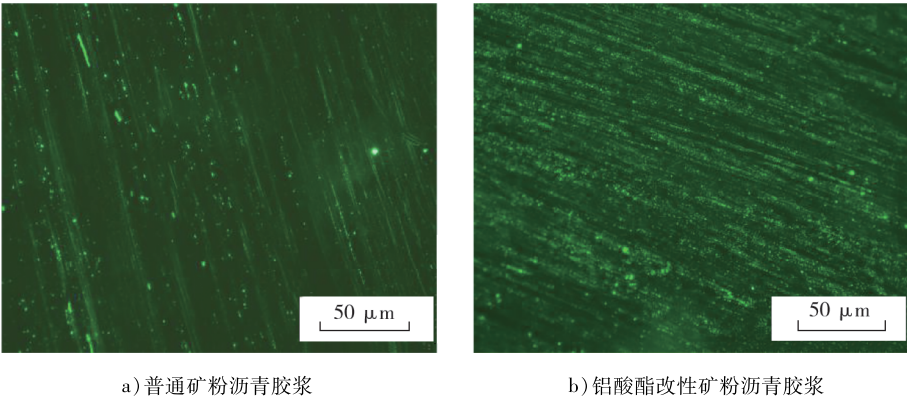


图 1 沥青胶浆的荧光显微镜图片

由图 1a)可知:普通矿粉未充分填充沥青,存在分散不均匀、部分结团现象,沥青胶浆中结构沥青相对较少,未与矿粉结合的自由沥青相对较多,沥青胶浆黏附性不强。由图 1b)可知:铝酸酯改性矿粉与沥青相容性较好,颗粒间沥青均匀分散且充分填充,宏观表现为铝酸酯改性矿粉与沥青结合形成的沥青胶浆结构沥青更多,二者形成的一级分散体系可更好地抵抗水对沥青路面的损坏^[21];铝酸酯改性矿粉沥青胶浆存在明显条纹,用玻璃棒搅拌铝酸酯改性矿粉沥青胶浆时可明显感受到手部力量需加大,分析认为铝酸酯 RO—基团与矿粉表面的吸附水或羟基反应形成官能团—OCOR,在沥青混合料中改性矿粉充分分散均匀,与沥青相容性更好,在沥青中形成加筋效果,大大增强沥青胶浆的黏附性,沥青混合料抗水损坏性能提高。

3 铝酸酯改性矿粉对 SBS 改性 AC-20C 路用性能的影响

3.1 矿料配合比

采用水洗法对石灰岩碎石集料进行筛分试验,按文献[22]要求检测改性 SBS 沥青、集料的各项技术

指标,检测数据如表 5~7 所示,各指标均满足要求。

控制重点筛孔边长(16、9.5、4.75、2.36、0.6、0.15 mm),选取最佳级配作为目标配合比。确定粒径为>10~20 mm 的石灰岩、粒径为 5~10 mm 的石灰岩、机制砂、铝酸酯改性矿粉的质量比为 47:21:28:4,沥青混合料合成级配如图 2 所示。

表 5 SBS 改性沥青性能指标试验结果

项目	软化点/℃	延度 ^① /cm	针入度 ^② /(0.1 mm)	闪点/℃	密度/(g·cm ⁻³)
检测结果	75	35	45.0	288	1.032
技术要求 ^[22]	≥60	≥20	40.0~60.0	≥230	

①5℃,5 cm/min。②25℃,100 g,5 s。

表 6 石灰岩集料水洗法筛分试验结果

筛孔边长/mm	26.5	19	16	13.2	9.5	4.75	2.36	1.18	0.6	0.3	0.15	0.075
>10~20 mm 石灰岩通过率/%	100	92.5	79.0	54.0	37.4	6.0	2.0	1.6	1.6	1.6	1.6	1.6
5~10 mm 石灰岩通过率/%	100	100	100	100	98.2	14.5	2.0	1.8	1.6	1.6	1.6	1.6
机制砂通过率/%	100	100	100	100	100	98.3	64.3	45.8	32.0	23.4	19.6	8.2
铝酸酯改性矿粉通过率/%	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	99.4	87.2

表 7 石灰岩集料密度

原材料	表观相对密度	毛体积相对密度/(g·cm ⁻³)
>10~20 mm 石灰岩	2.729	2.694
5~10 mm 石灰岩	2.718	2.684
机制砂	2.652	2.589
矿粉	2.672	2.672

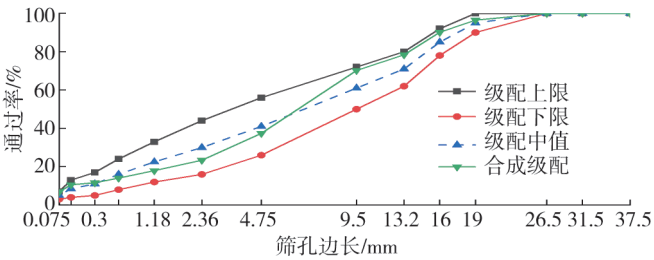


图 2 沥青混合料合成级配曲线

3.2 最佳沥青质量分数

根据目标配合比集料比例,采用铝酸酯改性矿粉制备沥青质量分数分别为 3.0%、3.5%、4.0%、4.5%、5.0%的 SBS 改性 AC-20C 混合料马歇尔试件(圆柱体,直径 101.6 mm,高 63.5 mm),测定各马歇尔试件的指标,试验结果如表 8 所示。

根据沥青在 SBS 改性 AC-20 混合料中的质量分数与各指标关系确定最佳沥青质量分数,如图 3 所示,确定最佳沥青质量分数为 4.4%。

表 8 掺加铝酸酯改性矿粉的 SBS 改性 AC-20C 最佳油石比试验结果

沥青质量分数/%	毛体积相对密度/(g·cm ⁻³)	空隙率/%	矿料间隙率/%	沥青饱和度/%	稳定度/kN	流值/mm
3.0	2.376	7.5	13.3	43.7	9.67	1.9
3.5	2.392	6.2	13.2	52.6	11.73	2.2
4.0	2.405	4.9	13.2	62.9	13.41	2.4
4.5	2.421	3.7	13.0	71.9	13.81	2.9
5.0	2.419	3.0	13.5	77.6	12.86	3.5
技术要求 ^[22]		3.0~6.0	≥13.0	65.0~75.0	≥8.00	2.0~4.0

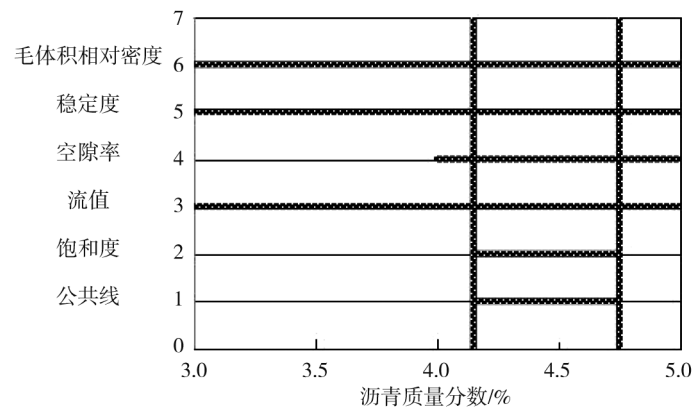


图 3 根据沥青质量分数与各指标关系确定最佳沥青质量分数

3.3 掺加铝酸酯改性矿粉的 SBS 改性 AC-20C 基本性能检测

为检测掺加铝酸酯改性矿粉的 SBS 改性 AC-20C 的基本性能,制备沥青质量分数为 4.4% 的马歇尔试件,检测基本性能,试验结果如表 9 所示。由表 9 可知,基本性能均满足技术标准要求。

表 9 掺加铝酸酯改性矿粉的 SBS 改性 AC-20C 基本性能检测结果

项目	毛体积相对 密度/(g·cm ⁻³)	理论最大 相对密度	空隙 率/%	矿料间隙 率/%	沥青 饱和度/%	稳定 度/kN	流值/ mm	残留稳定 度/%
检测结果	2.418	2.519	4.0	13.1	69.2	13.82	2.7	96.31
技术要求 ^[22]			3.0~6.0	≥13.0	65.0~75.0	≥8.00	2.0~4.0	≥80.00

3.4 掺加铝酸酯改性矿粉的 SBS 改性 AC-20C 水稳定性试验

采用浸水马歇尔试验残留稳定度、冻融劈裂强度比表征在车辆荷载及雨水的冲刷下路面集料的抗剥落和路面抗水损的水稳定性能。采用浸水马歇尔试验和冻融试验测试并分析在最佳沥青质量分数 4.4% 条件下掺加铝酸酯改性矿粉的 SBS 改性 AC-20C 的水稳定状况,结果见表 10。由表 10 可知:掺加铝酸酯改性矿粉的 SBS 改性 AC-20C 的浸水 48 h 稳定度比普通矿粉 AC-20C 增大 29.72%,残留稳定度增大 4.48%,冻融劈裂强度比增大 6.52%。铝酸酯改性矿粉可有效提高 SBS 改性 AC-20C 的物理力学性能以及抗剥落水稳性能。原因是铝酸酯改性矿粉的活化度提高,与沥青接触界面的吸附强度和结合强度增大,结构沥青膜的厚度增大,有效阻止水分侵入,SBS 改性 AC-20C 抗水损坏性能提高。铝酸酯改性矿粉吸油值大幅减小,分散性增大,在 SBS 改性 AC-20C 中的空隙均匀分布,连通孔隙数减少,进入沥青混合料的少量水不易流动,水的渗透能力大大降低,SBS 改性 AC-20C 的水稳定性能提高。

表 10 掺加铝酸酯改性矿粉的 SBS 改性 AC-20C 水稳定性试验结果

混合料类型	稳定度/kN	浸水 48 h 稳定度/kN	残留稳定度/%	冻融劈裂强度比/%
普通矿粉 AC-20C	11.13	10.26	92.18	85.9
铝酸酯改性矿粉 AC-20C	13.82	13.31	96.31	91.5

4 结论

- 1) 铝酸酯改性矿粉最佳改性工艺为:改性温度 80 ℃、改性时间 50 min、改性剂质量分数为 1.0%。
- 2) 铝酸酯改性剂改性效果明显,活化度是普通矿粉的 27.9 倍,吸油值减小 58.7%。
- 3) 掺加铝酸酯改性矿粉的 SBS 改性 AC-20C 的残留稳定度比普通矿粉 AC-20C 增大 4.48%,冻融

劈裂强度比增大 6.52%,表明铝酸酯改性矿粉可有效提高 SBS 改性 AC-20C 的抗水损坏性能和水稳定性。

参考文献:

- [1] 李孟,曲恒辉,赵庆民,等.石灰岩矿粉改性及其对沥青混合料高温性能的影响[J].山东交通学院学报,2020,29(2):43-47.
- [2] 朱慧芳,王亮.沥青路面智能压实及其关键影响因素研究[J].中外公路,2024,44(4):47-55.
- [3] 关宏信,李俊资,高煜,等.PAM-10/OGFC-10 沥青混合料渗水性能对比研究[J].长沙理工大学学报(自然科学版),2024,21(3):107-115.
- [4] 罗赞.填料对沥青混合料路用性能影响研究[J].工程技术研究,2018(5):130-131.
- [5] 扈惠敏,沙爱民.矿粉细度及用量对沥青混合料性能的影响[J].安徽建筑,2004(2):108-109.
- [6] MOUSA A, GEDAN-SMOLKA M. Modification of mineral powder by various organic materials; their potential as reinforcement for unsaturated polyester composites[J]. Russian Journal of Applied Chemistry, 2020, 93 (12):1968-1975.
- [7] 邵显智,谭忆秋,邵敏华.几种矿粉指标对沥青胶浆的影响分析[J].公路,2004(5):122-124.
- [8] 邵显智,谭忆秋,孙立军.几种矿粉指标与沥青胶浆的关联分析[J].公路交通科技,2005,22(2):10-13.
- [9] 李涛,扈惠敏.矿粉对沥青胶浆性能的影响[J].合肥工业大学学报(自然科学版),2013,36(8):983-987.
- [10] 李乃强,姚新宇,刘宇.矿粉对透水沥青混合料性能的影响研究[J].西部交通科技,2021(12):5-7.
- [11] 谭利,尘福涛,史立民.基于飞散特性的排水沥青混合料材料组成优化设计研究[J].湖南交通科技,2023,49(3):86-92.
- [12] 刘韬,易明,宋涛.生石灰对冷拌沥青混合料性能的影响研究[J].中外公路,2023,43(1):231-234.
- [13] 王晨,李芮地,南婷婷,等.氢氧化镁的铝酸酯偶联剂表面改性[J].青岛科技大学学报(自然科学版),2021,42(3):54-61.
- [14] 梁朝,李春全,孙志明,等.新型有机改性剂对重质碳酸钙的表面改性效果及机理[J].无机盐工业,2022,54(7):70-77.
- [15] 马梦绮,武志鹏,胡跃鑫,等.硬脂酸改性纳米碳酸钙表面研究[J].当代化工,2024,53(3):582-586.
- [16] 伍林伟,徐永华,温云祥,等.改性碳酸钙在环氧/聚酯粉末涂料中的应用研究[J].山东化工,2022,51(8):156-158.
- [17] 孟伟杰.矿粉对沥青胶浆性能影响及沥青-矿粉交互作用能力的评价[D].扬州:扬州大学,2022.
- [18] 胡盛,袁晓慧,高雪,等.两种偶联剂对威丰重质碳酸钙干法改性的影响[J].非金属矿,2020,43(2):73-76.
- [19] 史春薇,姚娟娟.超细无机粉体材料表面改性研究进展[J].石化技术与应用,2011,29(1):84-88.
- [20] 吕奉丽.用于沥青混合料的矿粉表面改性与应用研究[D].济南:山东交通学院,2022.
- [21] 张华,钱觉时,吴文军.粉胶比对浇注式沥青胶浆高低温性能的影响[J].重庆大学学报,2009,32(6):663-667.
- [22] 中华人民共和国交通部,交通部公路科学研究所.公路沥青路面施工技术规范:JTG F40—2004[S].北京:人民交通出版社,2004.

Development of aluminate modified mineral powder and its effect on the water stability of SBS modified AC-20C

LI Wen, MA Shengsheng, ZHENG Jianfeng

Jinan Municipal Engineering Design and Research Institute (Group) Co., Ltd., Jinan 250003, China

Abstract: To study the effect of aluminum ester modified mineral powder on the water stability performance of SBS modified AC-20C, limestone mineral powder is used as raw material, and aluminum ester served as the modifier. Aluminum ester modified limestone mineral powder is prepared using a chemical method, with oil

(下转第 101 页)

percentage points respectively compared to the YOLOv10n model, with significantly enhances detection accuracy; compared with lower parameter models (YOLOv5n, YOLOv8n, YOLOv10n), similar parameter models (YOLOv3-tiny, YOLOv6n, YOLOv7-tiny), and higher parameter model (RT-DETR-L), the RSG-YOLOv10n model achieves the highest detection accuracy with lower parameter count and floating-point operations; the RSG-YOLOv10n model performs road scene object detection on a generalization validation dataset composed of various adverse weather images including sandstorms, heavy snow, and dense fog, with $E_{\text{mAP}50}$ and $E_{\text{mAP}50-95}$ increasing by 0.9 percentage points and 1.3 percentage points respectively compared to the YOLOv10n model, demonstrating high robustness and generalization capability; the RSG-YOLOv10n model exhibits strong feature extraction and small object detection capabilities in visualization detection experiments for road scenes with dense occlusion, complex lighting, adverse weather, and coexisting near and distant objects.

Keywords: small object detection; background interference; feature loss; RSG-YOLOv10n; attention mechanism

(责任编辑:边文超)

(上接第 76 页)

absorption value and activation degree selected as evaluation indicators. An orthogonal experiment is conducted to explore the optimal modification process. The microstructural characteristics of ordinary mineral powder and aluminum ester modified mineral powder asphalt mastic are compared using fluorescence microscopy. Residual stability and freeze-thaw splitting strength tests are performed on the aluminum ester modified AC-20C specimens. The results show that the optimal modification conditions for aluminum ester modified mineral powder are a test temperature of 80 °C, a mass fraction of aluminum ester mineral powder of 1.0%, and a modification time of 50 minutes. The activation degree of SBS modified AC-20C with aluminum ester modified mineral powder is 27.9 times that of ordinary mineral powder AC-20C, while the oil absorption value decreases by 58.7%. In terms of water stability performance, the residual stability of SBS modified AC-20C with aluminum ester modified mineral powder increases by 4.48% compared to ordinary mineral powder AC-20C, and the freeze-thaw splitting strength increases by 6.52%. Aluminum ester modified mineral powder can effectively improve the water stability performance against stripping of SBS modified AC-20C.

Keywords: asphalt mixture; Aluminate; limestone mineral powder; modification condition; asphalt mastic; water stability performance

(责任编辑:王惠)