

DOI: 10.19951/j.cnki.1672-9331.20220415001

文章编号: 1672-9331(2023)06-0080-11

引用格式: 孙志林, 高超, 马帅杰. 高抗滑性微表处混合料的制备及性能研究[J]. 长沙理工大学学报(自然科学版), 2023, 20(6): 80-90.

Citation: SUN Zhilin, GAO Chao, MA Shuaijie. Study on preparation and performance of micro-surfacing mixture with high skid resistance[J]. J Changsha Univ Sci Tech (Nat Sci), 2023, 20(6): 80-90.

高抗滑性微表处混合料的制备及性能研究

孙志林, 高超, 马帅杰

(长沙理工大学 交通运输工程学院, 湖南 长沙 410114)

摘要:【目的】获得抗滑性能优良的改性乳化沥青微表处混合料。【方法】通过正交试验设计探究集料级配、改性乳化沥青掺量、外加水用量等因素对微表处混合料性能的影响; 利用湿轮磨耗仪模拟道路交叉路口行车对路面的搓揉作用, 进一步分析集料级配对微表处混合料抗滑衰变规律的影响。【结果】改性乳化沥青掺量、外加水用量和级配均对混合料的性能有不同程度的影响; 微表处混合料的最优配比为: 改性乳化沥青掺量和外加水用量分别为 14% 和 10%, 矿料级配为级配 2。【结论】所制备的苯乙烯-丁二烯-苯乙烯嵌段共聚物(styrene butadiene styrene, SBS)改性乳化沥青混合料具有优良的抗滑性能, 可广泛应用于沥青路面的养护中。

关键词: 路面抗滑性能; 微表处; SBS 改性乳化沥青; 矿料级配; 抗滑衰变

中图分类号: U414

文献标志码: A

0 引言

路面抗滑性能是影响道路安全的重要因素之一。目前, 针对路面抗滑能力不足的养护方法有刻槽、同步碎石封层、稀浆封层以及微表处等^[1-2]。当前我国新建路面的突出问题是在经受短期行车荷载作用后, 路面的抗滑性能迅速衰减^[3]。而微表处作为稀浆封层的衍生技术, 能快速、有效地解决路面抗滑能力丧失的问题, 且其成型较快, 适用性较强。

1920 年德国科研工作者开发出了原始的稀浆封层。经过 50 a 的发展, 道路养护材料得到了极大的改进, 德国科研工作者在稀浆封层的基础上成功开发出了微表处。目前, 微表处在国际上已得到广泛的认可及应用^[4-6]。ERWIN 等^[7]对加拿大安大略省多伦多东北部约克地区铺设的微表处路面进行了道路安全研究, 结果表明, 微表处养护对道路行车安全具有积极作用, 使交通事故发生率降低了 54%。YIN 等^[8]认为用玄武岩集料制备

的微表处混合料的性能远比用花岗岩集料制备的好。WU 等^[9]推荐使用通过低温弯曲试验得到的沥青用量作为最佳沥青用量, 并指出在斜坡上使用纤维微表处可缩短制动距离。

我国对微表处的研究起步较晚。2000 年以来, 随着高性能聚合物改性剂制备工艺的成熟, 改性乳化沥青得到了长足发展。徐剑等^[10]对微表处进行了大量室内试验, 结果发现苯乙烯-丁二烯-苯乙烯嵌段共聚物(styrene butadiene styrene, SBS)能够有效增强微表处的耐磨能力、抗裂能力以及抗车辙能力。针对微表处路面抗滑耐久性不足的问题, 马晓杰^[11]、咸红伟等^[12]分别开发了耐磨型薄层罩面混合料。他们从原材料选取、配合比设计以及施工关键技术控制等方面对稀浆封层混合料进行了深入研究, 以确保施工后的路面具有良好的抗滑性能和耐磨性能。XIAO 等^[13]利用集料图像测量系统(aggregate imaging measurement system, AIMS)探究了微表处细集料的表观形貌和构造对微表处抗滑性能的影响, 并采用摆式仪和湿轮磨耗仪分别检测了微表处的抗滑性能和耐久

收稿日期: 2022-04-15; 修回日期: 2022-05-12; 接受日期: 2022-05-12

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(52078062)

通信作者: 孙志林(1979—)(ORCID: 0000-0003-2877-7017), 男, 副教授, 主要从事路面结构与材料方面的研究。

E-mail: sunzhilin1979@csust.edu.cn

投稿网址: <http://cslgxbzk.csust.edu.cn/cslgdxxbzk/home>

性能。结果表明,石料的棱角越突出,所制备的微表处的抗滑性能和耐久性能越好。郑木莲等^[14]采用复合改性剂对乳化沥青进行改性并制备微表处,以耐磨性、水稳定性及抗滑性为评价指标,采用四轮加速磨耗试验、湿轮磨耗试验以及冻融循环下的湿轮磨耗试验对掺加不同改性剂的微表处进行耐久性评价。结果表明,用复合改性剂改性的微表处具有更优的耐磨性能和抗滑性能。王国忠等^[15]通过对13段已进行MS-2微表处处置的路段开展问卷调查发现MS-2型微表处可有效改善路面抗滑性能,对于交通荷载等级较高的高速公路,其处置寿命为1.0~1.5 a。王成^[16]对使用丁苯橡胶(styrene butadiene rubber, SBR)、改性乳化沥青制备的4种不同的7 mm筛孔通过率的MS-3型微表处进行研究,发现随着7 mm筛孔通过率的减小,微表处的抗水损害性能、长期抗滑性能和长期耐磨性能均有所增强,但其他性能均出现了不同程度的下降。张春喜^[17]在对微表处、超薄磨耗层、橡胶沥青混合料、排水沥青混合料4种常用的沥青混合料进行配合比设计时,充分考虑抗滑性能的影响,提出了合适的抗滑性能评价指标及配合比设计方法。

综合分析国内外研究现状可知,微表处作为一种性能优良的路面预防性养护措施被国内外研究者高度认可。但值得注意的是,针对微表处的抗滑性能,绝大部分研究者仅对单向行车道进行了模拟评估,而对于事故多发的道路交叉路口,鲜有人进行专门研究。因此,本文拟对微表处混合

料性能的影响因素进行分析,探究微表处混合料抗滑和耐磨性能的发展规律,研究矿料级配对微表处混合料抗滑性能的影响,旨在探寻一种适用于道路交叉路口的抗滑性能优异的微表处混合料,为工程实际提供可参考的技术指标。

1 原材料及制备工艺

1.1 原材料

1.1.1 SBS改性乳化沥青

沥青采用成品SBS改性乳化沥青,其技术指标参考《公路沥青路面施工技术规范》(JTG F40—2004)、《公路沥青路面预防养护技术规范》(JT/T 5142-01—2021)等,采用《公路工程沥青及沥青混合料试验规程》(JTG E20—2011)中相应的试验方法对沥青进行检测,结果见表1。

1.1.2 矿料

矿料选用具有耐磨性强、抗压性强、压碎值低等特点的玄武岩。玄武岩来源于湖南冶湖玄武岩开发公司,其技术指标和试验方法所参照的规范或规程与1.1.1节中所列相同,试验所得玄武岩技术指标见表2。综合考虑改性乳化沥青混合料的路用性能,本文根据国内MS-2型微表处混合料的矿料级配范围和西班牙I型微表处混合料的矿料级配范围对矿料的级配进行设计,结果见表3~4,表中的级配1、3为连续级配,级配2、4为间断级配。

表1 SBS改性乳化沥青技术指标

Table 1 SBS modified emulsified asphalt technical indicators

技术指标		技术要求(B级微表处)	检测结果	试验方法
破乳速度		慢裂	慢裂	T0658
粒子电荷		阳离子(+)	阳离子(+)	T0653
筛上剩余量(1.18 mm)/%		≤0.1	0.03	T0652
蒸发残留物	固体的质量分数/%	≥60	60	T0651
	针入度(100 g, 25 °C, 5 s)/0.1 mm	40~100	63	T0604
	软化点/°C	≥57	67.9	T0606
	延度(5 °C)/cm	≥20	32.9	T0605
	溶解度(三氯乙烯)/%	97.5	99	T0607
矿料被裹覆的面积占比		≥2/3	100%	T0654
储存稳定性/%	1 d	≤1	0.2	T0655
	5 d	≤5	1.3	T0655

表2 玄武岩技术指标

Table 2 Basalt technical specifications

试验指标	技术要求	检测结果	试验方法
表观相对密度	≥ 2.6	2.945	T0304-2005
毛体积相对密度		2.634	T0304-2005
压碎值/%	≤ 26	13.62	T0316-2005
洛杉矶磨耗值/%	≤ 25	18.70	T0317-2005
吸水率/%	≤ 2	0.43	T0304-2005
软石质量分数/%	≤ 3	0.15	T0320-2000
针片状颗粒质量分数/%	≤ 15	6.052	T0312-2005

表3 国内MS-2型微表处混合料的矿料级配

Table 3 Mineral gradation at the domestic MS-2 micro-surface mixture %

项目	通过各尺寸筛孔的矿料的质量占比							
	9.5 mm	4.75 mm	2.36 mm	1.18 mm	0.6 mm	0.3 mm	0.15 mm	0.075 mm
级配上限	100.0	90.0	65.0	45.0	30.0	18.0	10.0	7.0
级配下限	100.0	100.0	90.0	70.0	50.0	30.0	21.0	12.0
级配1	100.0	97.5	77.5	57.5	40.0	24.0	15.5	10.0
级配2	100.0	90.0	67.0	55.0	37.5	22.0	13.0	8.0

表4 西班牙I型微表处混合料矿料级配

Table 4 Mineral material gradation at the Spanish I-type micro-surface mixture

项目	通过各尺寸筛孔的矿料的质量占比							
	9.3 mm	5 mm	2.5 mm	1.25 mm	0.63 mm	0.32 mm	0.16 mm	0.075 mm
	9.5 mm	4.75 mm	2.36 mm	1.18 mm	0.6 mm	0.3 mm	0.15 mm	0.075 mm
级配上限	100.0	85.0	65.0	45.0	30.0	18.0	10.0	7.0
级配下限	100.0	100.0	90.0	70.0	50.0	35.0	25.0	15.0
级配3	100.0	92.5	77.5	57.5	40.0	26.5	17.5	11.0
级配4	100.0	84.5	62.5	55.0	37.5	24.5	15.0	9.0

注:表中筛孔尺寸中的第一行为西班牙推荐筛孔尺寸,第二行为本试验筛孔尺寸。

1.2 制备工艺

微表处混合料的制备工艺与热拌沥青混合料的制备工艺截然不同。乳化沥青混合料属于环境友好型材料,在常温下即可制备,无需加热,不仅节约能源,而且对大气几乎没有污染^[18-20]。其制备工艺如下:

- 1) 将称量好的级配矿料倒入搅拌罐中,在600 r/min的拌合速度下搅拌1 min;
- 2) 将称量好的水加入搅拌罐中,继续在600 r/min的拌合速度下搅拌3 min;
- 3) 将称量好的改性乳化沥青倒入搅拌罐中,在1 200 r/min的拌合速度下搅拌5 min,取出后标

记并密封储存。

2 微表处混合料的配合比设计及影响因素分析

2.1 正交试验设计

为了分析级配、改性乳化沥青及水对微表处混合料的影响,本文采用3因素4水平的正交试验设计表对改性乳化沥青混合料的配比方案进行设计,如表5所示。同时采用直观分析法对正交试验测试结果进行分析处理,通过计算并对比各因素极差 R_i 的大小,判断各因素对试验结果的影响程度。施工技术规范推荐微表处混合料的沥青用量

一般为6%~8.5%,水的用量一般为6%~12%。

表5 L16(4⁵)正交方案设计表

Table 5 L16(4⁵) orthogonal design table %

方案	级配	改性乳化沥青掺量	外加水用量
1	级配1	10	6
2	级配1	12	8
3	级配1	14	10
4	级配1	16	12
5	级配2	10	8
6	级配2	12	6
7	级配2	14	12
8	级配2	16	10
9	级配3	10	10
10	级配3	12	12
11	级配3	14	6
12	级配3	16	8
13	级配4	10	12
14	级配4	12	10
15	级配4	14	8
16	级配4	16	6

考虑到本文所用乳化沥青中固体的质量分数为60%,因此将SBS改性乳化沥青掺量设计为10%、12%、14%和16%,外加水用量设计为6%、8%、10%和12%。试验因素与水平见表6。

表6 试验因素与水平表

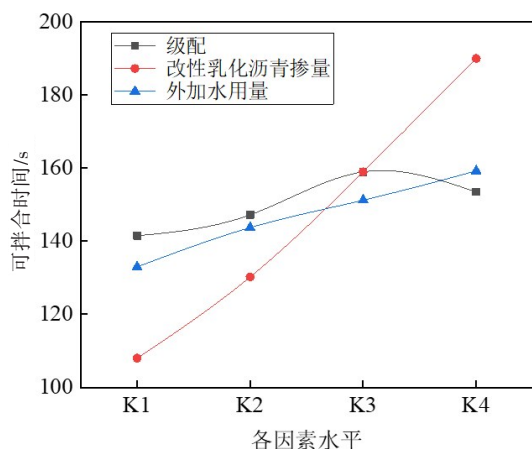
Table 6 Table of test factors and levels %

水平	集料级配	改性乳化沥青掺量	外加水用量
K1	级配1	10	6
K2	级配2	12	8
K3	级配3	14	10
K4	级配4	16	12

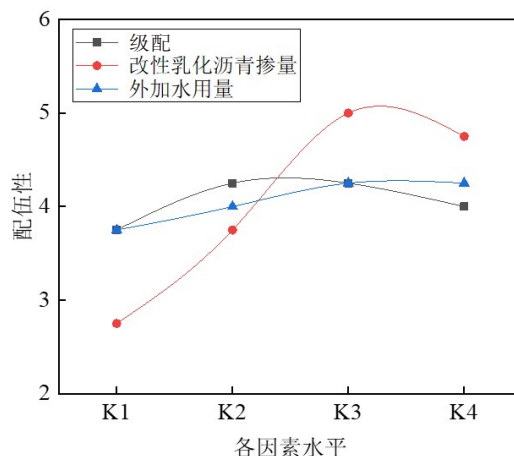
2.2 各因素对混合料可拌合时间及配伍性的影响

乳化沥青拌合试验主要是测定混合料的可拌合时间以及混合料的配伍性。

为了更好地描述混合料的配伍性,本文采用定量方法进行评定。将改性乳化沥青混合料的配伍性能分成1~5级,1级表示性能最差,5级表示性能最好。拌合试验测试结果如图1所示。



(a) 各因素对可拌合时间的影响



(b) 各因素对配伍性的影响

图1 各因素对拌合试验的影响

Fig. 1 Influence of various factors on mixing test

由图1可知,随着改性乳化沥青掺量的增加,混合料的可拌合时间呈快速增加趋势,这是由混合料中乳化沥青增多,破乳速度降低导致的。混合料的配伍性随着改性乳化沥青掺量的递增先趋于优良,在掺量为14%(K3)达到最优,之后有所降低,这是因为当混合料中的沥青偏少时,混合料的裹覆性较差,导致混合料整体韧性不足;当沥青偏多时,虽然混合料的裹覆性和韧性良好,但表面易出现泛油现象,进而导致路面摩擦系数降低,严

重危害行车安全。

随着外加水掺量的增加,混合料的可拌合时间呈持续增长趋势。适量的水有利于混合料的拌合和易性,但当外加水过量时,混合料易出现离析现象,不利于混合料的成型,且会使混合料的配伍性变差。综合分析混合料的可拌合时间(以150 s为宜)和配伍性(其值越大越好)可知,级配2对应的混合料具有较适宜的可拌合时间,配伍性也较好。改性乳化沥青的最佳掺量和外加水的最佳用

量在K3水平附近。

通过直观分析法对正交试验测试结果进行分析后,将影响混合料可拌合时间和配伍性的因素按影响程度从大到小排列,依次为:改性乳化沥青掺量、外加水用量、级配。在仅考虑可拌合时间和配伍性的情况下,混合料的最佳配比方案为:级配2、改性乳化沥青掺量14%、外加水用量10%。

2.3 各因素对混合料稠度的影响

摊铺和易性是乳化沥青混合料施工的重要控制指标,而影响混合料摊铺和易性的一个重要影响因素是外加水用量。实验室中通常利用稠度仪来检测乳化沥青微表处混合料的摊铺和易性,并确定合适的外加水用量。微表处混合料稠度试验的详细步骤可参照《公路工程沥青及沥青混合料试验规程》(JTG E20—2011)中的试验方法T0751。试验结果如图2所示。

由图2可知,随着改性乳化沥青掺量的增加,混合料的稠度值呈快速增加趋势,这是由于混合料中未破乳的乳化沥青增多,间接增大了混合料外加水用量,进而使混合料的流动性增大,稠度值也随之变大。随着外加水用量的增加,混合料的稠度值先缓慢增大,在超过K2水平后,稠度值呈快速上升趋势,这是因为适量的水有利于混合料的拌合和易性,当外加水过量时,混合料易出现离析现象,加剧了稠度的变化。根据工程经验及稠度指标要求,当稠度值为2.5 cm时,混合料的施工和易性较佳,据此可知,级配2、4对应的施工和易性比其余两个级配的略佳,乳化沥青的最佳掺量和外加水的最佳用量在K3水平附近。

通过直观分析法对正交试验测试结果进行分

析后,将影响混合料稠度的因素按影响程度从大到小排列,依次为:改性乳化沥青掺量、外加水用量、级配。在仅考虑稠度的情况下,混合料的最佳配比方案为:级配4、改性乳化沥青掺量14%、外加水用量10%。

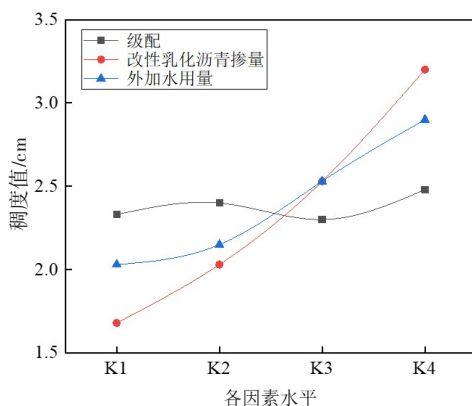


图2 各因素对稠度值的影响

Fig. 2 The influence of various factors on the consistency value

2.4 各因素对混合料抗车辙性能的影响

负荷轮碾压试验一方面可以通过检测混合料的单位黏附砂量来控制沥青用量的上限,使混合料的沥青用量能够保持在一个合理的范围内;另一方面可以通过碾压前后的轮迹宽度变化率来判断混合料的抗车辙性能。混合料黏附砂量及轮迹宽度变化率直观分析结果如图3所示。

由图3可知,随着改性乳化沥青掺量的增加,混合料的黏附砂量先缓慢增加,当掺量超过K3水平后,黏附砂量迅速增长,这是由于当改性乳化沥青掺量在K4水平附近时,混合料表面出现泛油现象,导致黏附砂量发生骤变;混合料轮迹宽度变化

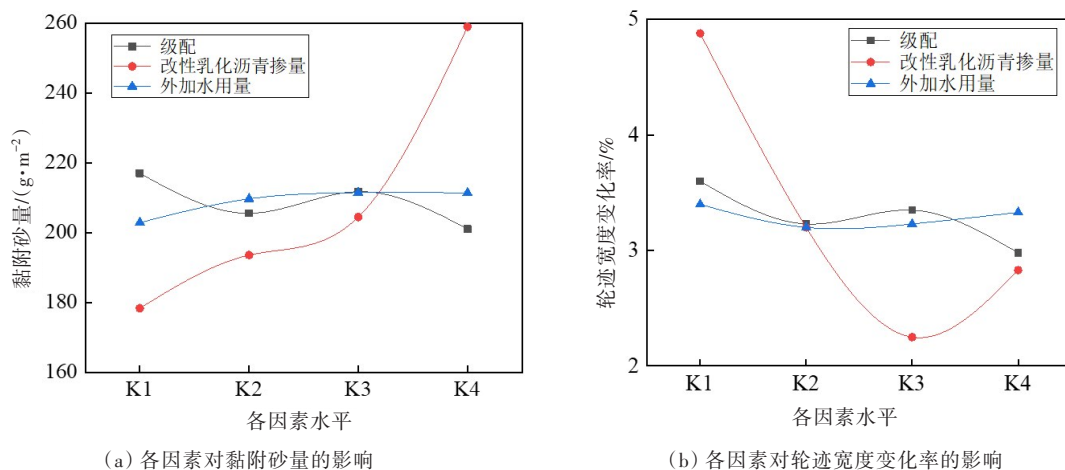


图3 各因素对负荷轮碾压试验结果的影响

Fig. 3 Influence of various factors on the results of the load wheel rolling test

率随着改性乳化沥青掺量的递增先降低后增加,在K3水平附近达到最优,这是因为当混合料中沥青偏少时,石料与沥青的裹覆性较差,致使混合料稳定性不足,当沥青偏多时,虽然混合料的裹覆性良好,但在荷载作用下矿料间滑移的风险增大。随着外加水用量的增加,混合料的黏附砂量呈缓慢增长趋势,但总体上变化不大;混合料的轮迹宽度变化率随着外加水用量的增加呈先减小后增大的趋势,适量的水有利于混合料的拌合和易性,且成型后的混合料具有更好的稳定性,但当外加水过量时,混合料易出现离析现象,这不利于混合料成型,且混合料的稳定性变差。另外,由于粗骨料的支撑作用能缓解混合料的车辙变形,因此,当使用微表处混合料作为车辙填充材料时,应尽量选择中值与下限之间的级配。综合分析混合料负荷黏附砂量(越小越好)和轮迹宽度变化率(越小越好),级配2对应的混合料在具有较低黏附砂量的同时,轮迹宽度变化率也较小,改性乳化沥青的最佳掺量和外加水的最佳用量在K3水平附近。

通过直观分析法对正交试验测试结果进行分析后,将影响混合料黏附砂量和轮迹宽度变化率的因素按影响程度从大到小排列,依次为:改性乳化沥青掺量、级配、外加水用量。在仅考虑黏附砂量的情况下,混合料的最佳配比方案为:级配4、改性乳化沥青掺量10%、外加水用量6%;在仅考虑轮迹宽度变化率的情况下,混合料的最佳配比方案为:级配4、改性乳化沥青掺量14%、外加水用量8%。

2.5 各因素对混合料抗水损害性能的影响

湿轮磨耗试验主要通过浸水60 min和6 d湿轮磨耗值来评价改性乳化沥青混合料的抗水损害性能以及确定改性乳化沥青掺量的下限。此外,通过湿轮磨耗试验和负荷轮黏砂试验能够共同确定乳化沥青的最佳用量。湿轮磨耗试验前后的试件对比如图4所示,试验结果如图5所示。

由图5可知,浸水60 min和6 d湿轮磨耗值的变化规律基本一致,即随着改性乳化沥青掺量的增加,湿轮磨耗值先快速下降,当改性乳化沥青掺

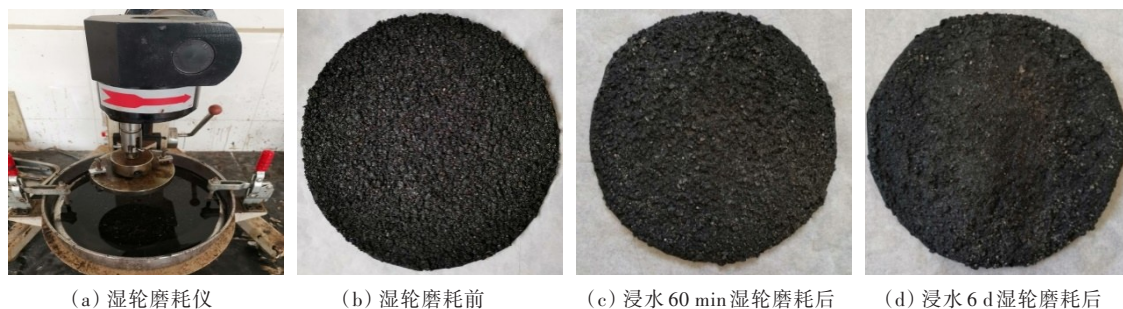


图4 湿轮磨耗仪及湿轮磨耗前后对比

Fig. 4 Wet wheel abrader and comparison of wet wheel specimens before and after wearing

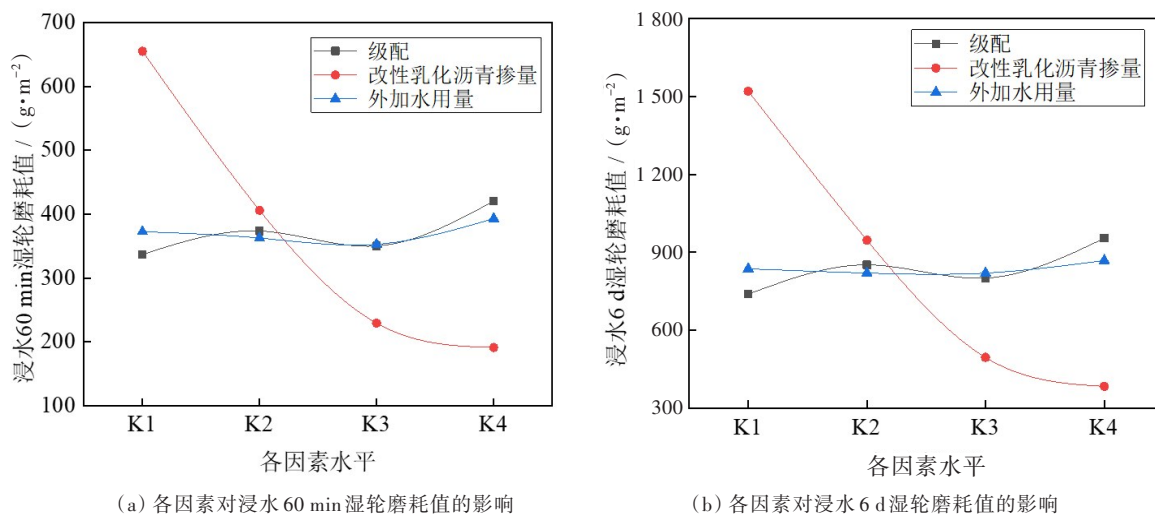


图5 各因素对湿轮磨耗值的影响

Fig. 5 Influence of various factors on the wet wheel wearing value

量超过K3水平后,湿轮磨耗值的下降速度明显变缓。这是由于当改性乳化沥青掺量小于K3水平时,混合料油石比较低导致沥青与矿料的裹覆性较差,进而使微表处混合料的抗水损害能力较差。随着外加水用量的增加,湿轮磨耗值呈先减小后增大的趋势,并在K3水平附近达到最低,但总体上变化不大。说明适量水的加入有利于混合料的拌合和易性,但当外加水过量时,混合料易出现离析现象,进而使混合料的稳定性变差,抗水损害能力降低。另外,粗级配混合料在进行磨耗试验时容易被转动的磨耗头刮出,导致试验结果变大,因此细、中级配混合料相比于粗级配混合料有更好的抗水损害能力,所以在降水量较大的地区使用微表处时,应尽量选取上限与中值之间的级配。观察各级配对应的湿轮磨耗值可知,级配1所对应的混合料浸水60 min和6 d的湿轮磨耗值最小。

通过直观分析法对正交试验测试结果进行分析,将影响混合料浸水60 min和6 d湿轮磨耗值的因素按影响程度从大到小排列,依次为:改性乳化沥青掺量、级配、外加水用量。在仅考虑混合料耐磨性能的情况下,最佳配比方案为:级配1、改性乳化沥青掺量16%、外加水用量10%。

2.6 各因素对混合料抗滑性能的影响

本文采用手动铺砂法对微表处混合料的初始构造深度进行测定,利用沐阳县高速公路仪器有限公司生产的BM-Ⅲ型摆式摩擦系数测定仪(简称摆式仪)对初始摩擦系数进行测定,结果如图6~7所示。

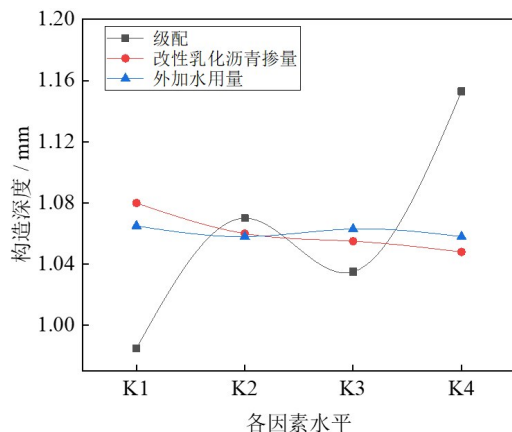


图6 各因素对构造深度的影响

Fig. 6 Influence of various factors on structural depth

由图6可知,随着改性乳化沥青掺量的增加,微表处混合料的构造深度呈持续下降趋势,这是

由于随着改性乳化沥青掺量的增加,混合料颗粒间的空隙被填充,混合料颗粒表面形成的沥青膜变厚,颗粒表面趋于平滑,构造深度降低。随着外加水用量的增加,微表处混合料的构造深度稳定在1.06 mm左右,这可能是由于过多的外加水使微表处混合料出现离析现象,部分乳化沥青浆体浮于表面导致混合料颗粒表面形成一层较厚的沥青膜,进而使构造深度降低。在级配方面,级配1、3对应的试件的构造深度明显比级配2、4的小,这是由于级配1、3为连续级配,其所使用的粗骨料比级配2、4的少,且在试件成型过程中,连续级配混合料内部较多的胶浆无处流动而被迫上浮,从而使构造深度有所减小。此外,与级配2相比,级配4所对应的微表处混合料拥有更好的抗滑性能,这是由于级配4的粗集料比级配2的更多,也拥有更深的构造深度。

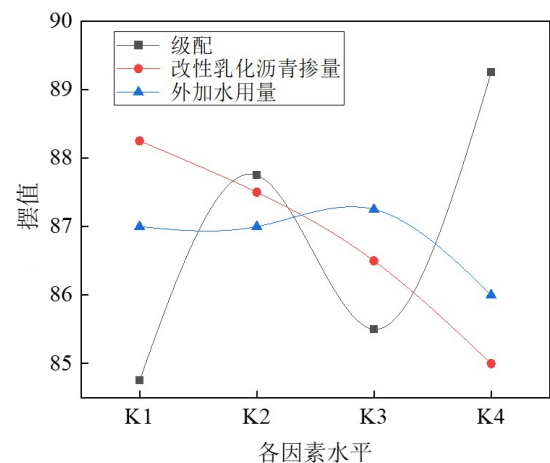


图7 各因素对摩擦系数的影响

Fig. 7 Influence of various factors on friction coefficient

由图7可知,随着改性乳化沥青掺量的增加,微表处混合料的摩擦系数(摆值是摩擦系数的表征值,为摩擦系数的100倍)呈持续下降趋势,这是由于随着改性乳化沥青掺量的增多,混合料颗粒间的空隙被填充,混合料颗粒表面形成的沥青膜变厚,进而微表处混合料颗粒表面趋于平滑,微表处混合料的摩擦系数降低。随着外加水用量的增加,微表处混合料的摩擦系数先略有增大然后迅速减小,这可能是由于过多的外加水使微表处混合料出现离析现象,部分乳化沥青浆体浮于表面导致混合料颗粒表面形成一层较厚的沥青膜,进而使混合料摩擦系数降低。在级配方面,级配1、3所对应的试件摩擦系数明显比级配2、4的小,这是

由于级配2、4使用了较多的粗集料,粗集料颗粒相互嵌挤形成骨架,进而使混合料颗粒的内摩擦角增大,改性乳化沥青又提高了集料之间的黏聚力。另外,沥青胶浆填充于集料空隙之间,导致试件表面沥青膜厚度较小,因此级配2、4表现出了更好的抗滑性能。

通过直观分析法对正交试验测试结果进行分析,将影响混合料构造深度和摩擦系数的因素按影响程度从大到小排列,依次为:级配、改性乳化沥青掺量、外加水用量。在仅考虑初始构造深度和摩擦系数的情况下,混合料的最佳配比方案为:级配4、改性乳化沥青掺量10%、外加水用量10%。

综合考虑改性乳化沥青混合料的性能,改性乳化沥青的最佳掺量和外加水的最佳用量分别为14%和10%,矿料优级配为级配2和级配4。

3 级配对微表处混合料抗滑衰变的影响

3.1 搓揉磨耗试验

路面抗滑性能是影响行车安全最重要的因素之一,而矿料级配又是影响微表处混合料抗滑性能的主要因素。因此,本文利用湿轮磨耗仪对前文所述的4种级配微表处混合料分别进行0、0.5、1、2、3、4、5、6、7 h的搓揉磨耗试验(摩擦轨迹见图8),模拟车胎对路面的搓揉作用,并分析各级配微表处混合料的抗滑衰变及质量损失规律,最终选出抗滑性能最优的级配方案。

在搓揉磨耗试验开始之前,先通过稠度试验确定乳化沥青混合料的最佳用水量为10%,通过负荷轮黏砂试验和湿轮磨耗试验分别控制乳化沥青的上下限,确定乳化沥青的最佳掺量为14%。

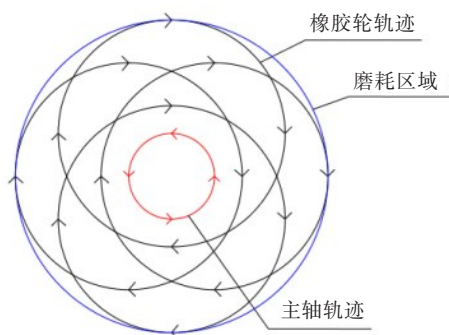


图8 摩擦轨迹图

Fig. 8 Friction trajectory diagram

试验步骤为:①将成型后的试件置于圆形托盘中,并固定在磨耗仪平台上,提升平台至最高位置,保证磨耗管始终处于被试件顶起的状态。②根据磨耗时间设计设置磨耗时间,每完成一次磨耗便取下试件,用毛刷清理表面被磨损掉的碎屑并称重,然后用摆式仪测试试件磨耗处的摆值,直至摆值相对稳定后停止试验。需要注意的是,每完成一个试件的测试需将橡胶管更换到新的磨耗面。

3.2 搓揉磨耗试验结果及分析

根据测得的试验数据,绘制摆值与磨耗时间的关系图,如图9所示。

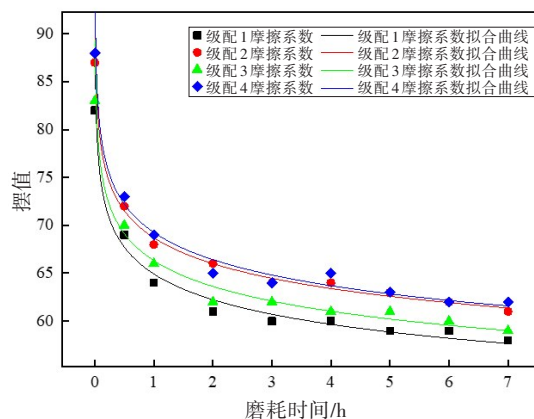


图9 不同矿料级配对微表处混合料抗滑衰变的影响

Fig. 9 The influence of different grades on the anti-slip decay of the micro-surface

由图9可知,当磨耗时间相同时,4种级配微表处混合料的摆值从大到小的排列顺序为:级配4、级配2、级配3、级配1。在0~1 h内,微表处混合料的摩擦系数随磨耗时间的增加呈快速下降趋势,且级配1、3的下降速度明显比级配2、4的大,这是因为对于连续级配1、3,粗集料嵌挤形成骨架结构,细集料和沥青胶浆填充其间,使整个结构更加密实且稳定,因此摩擦系数的衰减速度较小,且摩擦系数拥有一个较高的衰减终值,微表处混合料也表现出更好的抗滑性能^[21]。相比连续级配1、3,用间断级配2、4制备的微表处混合料的抗滑能力提高了3(摆值)左右。查阅相关文献可知,相比其他常规的微表处混合料,本文制备的微表处混合料的长期抗滑能力大约提高了5(摆值)^[22]。

为进一步探究微表处混合料抗滑衰变的原因,本文对不同磨耗时间下各级配微表处混合料的质量损失进行统计分析,结果如图10~11所示。

由图10~11可知,在搓揉磨耗试验中,4种级

配微表处混合料的质量损失速度和损失总量从大到小的排列顺序为:级配4、级配2、级配3、级配1,由此可以发现粗集料含量较大的微表处混合料的质量损失也较大。这是因为间断级配的粗集料与细集料在拌合过程中容易发生粗集料的离析^[23-25],导致试件表面粗集料较多,粗集料无法与细集料形成有效的骨架结构,在进行磨耗试验时容易被转动的磨耗头刮出,最终导致试验结果变大。粗集料的损失导致微表处混合料的耐磨性能降低,为了定量说明微表处混合料的耐磨性能,对各级配微表处混合料7 h内的磨耗总值进行计算对比,级配1~4的磨耗值分别为209.6、373.8、279.5、569.4 g/m²。参考浸水60 min微表处混合料的磨耗值评价指标(小于540 g/m²)可知,用级配4制备的微表处混合料的耐磨性能最差,不能满足要求。与之相比,级配2在磨耗超过4 h后,抗滑性能与级配4仅相差1(摆值)左右,而其耐磨性能远比级配4的好,因此,级配2为最佳选择。

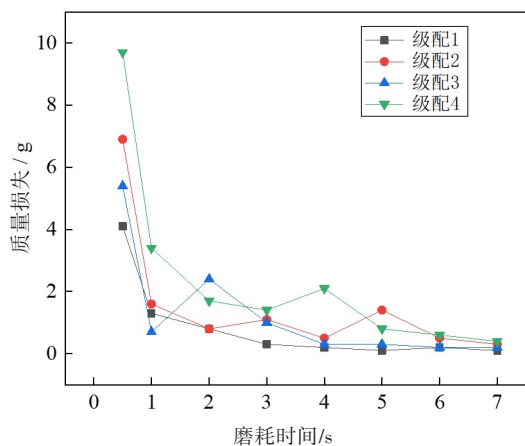


图10 磨耗时间对质量损失的影响

Fig. 10 Effect of wear time on quality loss

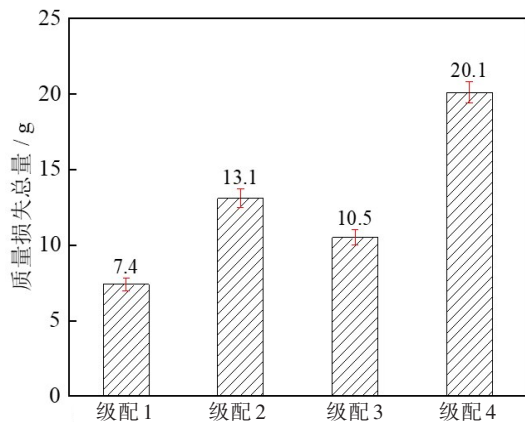


图11 磨耗7 h后质量损失总量对比

Fig. 11 Comparison of total mass loss after wear for 7 h

4 结论

1) 正交试验数据直观分析结果表明,级配、改性乳化沥青掺量、外加水用量对黏附砂量、轮迹宽度变化率和耐磨性能的影响程度按从大到小的顺序排列,依次为:改性乳化沥青掺量、级配、外加水用量;对混合料构造深度和摩擦系数的影响程度按从大到小的顺序排列,依次为:级配、改性乳化沥青掺量、外加水用量。

2) 改性乳化沥青的最佳掺量和外加水的最佳用量分别为14%和10%,矿料级配为级配2和级配4。

3) 通过对用4种级配制备的混合料的抗滑性能、质量损失总量、摆值及抗滑衰变等指标进行综合评价,最终选出最优级配为级配2。

4) 本次制备的SBS改性乳化沥青混合料具有优良的抗滑性能。

[参考文献]

- [1] 陈亚雷. 高速公路沥青路面预防性养护技术概览[J]. 中国公路, 2020(7): 72-73. DOI: 10.13468/j.cnki.chw.2020.07.020.
CHEN Yalei. Overview of preventive maintenance technology of expressway asphalt pavement [J]. China Highway, 2020 (7): 72-73. DOI: 10.13468/j.cnki.chw.2020.07.020.
- [2] 范新奇. 沥青路面抗滑性能修复技术应用实践[J]. 中国新技术新产品, 2019(17): 89-90. DOI: 10.13612/j.cnki.cntp.2019.17.050.
FAN Xinqi. Application practice of asphalt pavement anti-skid performance repair technology [J]. New Technology & New Products of China, 2019(17): 89-90. DOI: 10.13612/j.cnki.cntp.2019.17.050.
- [3] 董昭. 加速磨耗试验与沥青路面材料抗滑性能衰变规律研究[D]. 西安: 长安大学, 2011.
DONG Zhao. Study on accelerated polishing test and the regularity of skid resistance degradation of asphalt pavement material [D]. Xi'an: Chang'an University, 2011.
- [4] KIM Y, LEE H D. Performance evaluation of cold in-place recycling mixtures using emulsified asphalt based on dynamic modulus, flow number, flow time, and raveling loss [J]. KSCE Journal of Civil Engineering, 2012, 16 (4): 586-593. DOI: 10.1007/s12205-012-1376-0.
- [5] HEIN D K, ENG P. Maintenance guidelines for permeable interlocking concrete pavement systems [C]//

- Proceedings of EWRI Congress. Minneapolis: American Society of Civil Engineers, 2018.
- [6] GIUSTOZZI F, CRISPINO M, FLINTSCH G. Multi-attribute life cycle assessment of preventive maintenance treatments on road pavements for achieving environmental sustainability [J]. The International Journal of Life Cycle Assessment, 2012, 17(4): 409–419. DOI: 10.1007/s11367-011-0375-6.
- [7] ERWIN T, TIGHE S. Safety effect of preventive maintenance: a case study of microsurfacing [J]. Transportation Research: Record Journal of the Transportation Research Board, 2008, 2044: 79–85. DOI: 10.3141/2044-09.
- [8] YIN Y Y, HAN S, KONG H Y, et al. Optimization and performance evaluation of waterborne epoxy resin modified emulsified asphalt micro-surfacing based on tunnel driving environment [J]. Construction and Building Materials, 2022, 315: 125604. DOI: 10.1016/J.CONBUILDMAT.2021.125604.
- [9] WU Z Y, FU Q. Research on fiber micro-surfacing mixture design and pavement performance in interchange's connections [C]//Proceedings of the 5th International Conference on Civil Engineering and Transportation. France: Atlantis Press, 2015: 172–177. DOI: 10.2991/iccet-15.2015.33.
- [10] 徐剑, 秦永春, 黄颂昌. 微表处混合料路用性能研究 [J]. 公路交通科技, 2002, 19(4): 39–42. DOI: 10.3969/j.issn.1002-0268.2002.04.012.
- XU Jian, QIN Yongchun, HUANG Songchang. Research on the performance of micro-surfacing mixture [J]. Journal of Highway and Transportation Research Andk Development, 2002, 19(4): 39–42. DOI: 10.3969/j.issn.1002-0268.2002.04.012.
- [11] 马晓杰. 稀浆封层施工技术在公路养护中的应用 [J]. 中国公路, 2018(15): 104–105. DOI: 10.13468/j.cnki.chw.2018.15.037.
- MA Xiaojie. Application of slurry seal construction technology in highway maintenance [J]. China Highway, 2018(15): 104–105. DOI: 10.13468/j.cnki.chw.2018.15.037.
- [12] 咸红伟, 张肖宁. ECA-10超薄磨耗层在高速公路预防养护中的应用 [J]. 中外公路, 2011, 31(1): 209–212. DOI: 10.14048/j.issn.1671-2579.2011.01.047.
- XIAN Hongwei, ZHANG Xiaoning. Application of ECA-10 ultra-thin wear layer in expressway pre-maintenance [J]. Journal of China & Foreign Highway, 2011, 31(1): 209–212. DOI: 10.14048/j.issn.1671-2579.2011.01.047.
- [13] XIAO Y E, WANG F, CUI P D, et al. Evaluation of fine aggregate morphology by image method and its effect on skid-resistance of micro-surfacing [J]. Materials, 2018, 11(6): 920. DOI: 10.3390/ma11060920.
- [14] 郑木莲, 范贤鹏, 刘富强, 等. 复配型水性环氧乳化沥青微表处耐久性 [J]. 长安大学学报(自然科学版), 2020, 40(1): 68–76. DOI: 10.19721/j.cnki.1671-8879.2020.01.007.
- ZHENG Mulian, FAN Xianpeng, LIU Fuqiang, et al. Durability of compound waterborne epoxy emulsified asphalt microsurfacing [J]. Journal of Chang'an University (Natural Science Edition), 2020, 40(1): 68–76. DOI: 10.19721/j.cnki.1671-8879.2020.01.007.
- [15] 王国忠, 周维锋. MS-2型微表处抗滑处治应用效果 [J]. 中外公路, 2021, 41(5): 53–56. DOI: 10.14048/j.issn.1671-2579.2021.05.012.
- WANG Guozhong, ZHOU Weifeng. Discussion on application effect of anti-slip treatment on MS-2 microsurface [J]. Journal of China & Foreign Highway, 2021, 41(5): 53–56. DOI: 10.14048/j.issn.1671-2579.2021.05.012.
- [16] 王成. 基于长期性能的微表处配合比设计方法和性能研究 [D]. 重庆: 重庆交通大学, 2020.
- WANG Cheng. Research on design method and performance of micro-surfacing based on long-term performance [D]. Chongqing: Chongqing Jiaotong University, 2020.
- [17] 张春喜. 考虑抗滑性能的罩面沥青混合料配合比设计研究 [D]. 长沙: 长沙理工大学, 2017.
- ZHANG Chunxi. Study on mix design of overburden asphalt mixture considering skid resistance [D]. Changsha: Changsha University of Science & Technology, 2017.
- [18] 交通部公路科学研究院. 微表处和稀浆封层技术指南 [M]. 北京: 人民交通出版社, 2006: 10–17.
- Research Institute of Highway Science, Ministry of Communications. Technical guidelines for micro-surfacing and slurry seal [M]. Beijing: China Communications Press, 2006: 10–17.
- [19] 孙志林, 吴超, 褚元博. 一种彩色乳化沥青混合料及其制备方法: CN107226640A [P]. 2019-12-31.
- SUN Zhilin, WU Chao, CHU Yuanbo. Colorful emulsified asphalt mixture and preparation method: CN107226640A [P]. 2019-12-31.
- [20] 王潇潇, 沈增晖, 李九苏, 等. 一种乳化沥青混合料及制备方法: CN110723939A [P]. 2020-01-24.
- WANG Xiaoxiao, SHEN Zenghui, LI Jiuse, et al. Emulsified asphalt mixture and preparation method: CN110723939A [P]. 2020-01-24.
- [21] 孙洪利. 沥青路面抗滑性能衰减特性研究 [J]. 公路, 2011, 56(7): 73–78.
- SUN Hongli. Study on attenuation characteristics of anti-skid performance of asphalt pavement [J]. Highway, 2011, 56(7): 73–78.

- [22] SIMÕES D, ALMEIDA-COSTA A, BENTA A. Preventive maintenance of road pavement with microsurfacing: an economic and sustainable strategy [J]. *International Journal of Sustainable Transportation*, 2017, 11(9): 670–680. DOI: 10.1080/15568318.2017.1302023.
- [23] 周志刚, 罗靖, 曹长斌. 嵌入式抗滑表层施工工艺参数研究[J]. *交通科学与工程*, 2020, 36(1): 7–13. DOI: 10.16544/j.cnki.cn43-1494/u.2020.01.002.
- ZHOU Zhigang, LUO Jing, CAO Changbin. Study on construction process parameters of hot-rolled asphalt [J]. *Journal of Transport Science and Engineering*, 2020, 36(1): 7–13. DOI: 10.16544/j.cnki.cn43-1494/u.2020.01.002.
- [24] 韩炜贤. 湛徐高速公路多指标沥青路面抗滑性能评价分析[J]. *公路与汽运*, 2023(2): 73–77, 90. DOI: 10.20035/j.issn.1671-2668.2023.02.016.
- HAN Weixian. Evaluation and analysis of anti-skid performance of multi-index asphalt pavement of Zhanxu Expressway [J]. *Highways & Automotive Applications*, 2023(2): 73–77, 90. DOI: 10.20035/j.issn.1671-2668.2023.02.016.
- [25] 孔令坤, 李雪萍, 冯志强. 超黏精薄层罩面沥青混合料性能研究[J]. *长沙理工大学学报(自然科学版)*, 2021, 18(4): 9–15. DOI: 10.19951/j.cnki.csldgxbzkb.2021.04.002.
- KONG Lingshen, LI Xueping, FENG Zhiqiang. Study on performance of super viscous fine thin-layer overlay asphalt mixture [J]. *Journal of Changsha University of Science & Technology (Natural Science)*, 2021, 18(4): 9–15. DOI: 10.19951/j.cnki.csldgxbzkb.2021.04.002.

Study on preparation and performance of micro-surfacing mixture with high skid resistance

SUN Zhilin, GAO Chao, MA Shuaijie

(School of Traffic and Transportation Engineering, Changsha University of Science & Technology, Changsha 410114, China)

Abstract: [Purposes] This study aims to obtain modified emulsified asphalt micro-surfacing mixture with excellent skid resistance. [Methods] Through orthogonal experiment, the influence of aggregate gradation, modified emulsified asphalt, water and other factors on the performance of micro-surfacing mixture was explored. The influence of aggregate gradation on the skid resistance decay law of micro-surfacing mixture was further analyzed by simulating the rubbing effect of driving on pavement at road intersection with asphalt emulsion wet wheel abrasion tester. [Findings] Modified emulsified asphalt, water and gradation all had different effects on the performance of the mixture. When the content of modified emulsified asphalt and water was 14% and 10%, and the mineral aggregate gradation was 2, the micro-surfacing mixture was the optimal ratio. [Conclusions] The emulsified asphalt mixture modified by styrenic block copolymers (SBS) has excellent skid resistance and can be widely used in the maintenance of asphalt pavement.

Key words: skid resistance of pavement; micro-surfacing; SBS modified emulsified asphalt; mineral aggregate gradation; skid resistance decay

Manuscript received: 2022-04-15; **revised:** 2022-05-12; **accepted:** 2022-05-12

Foundation item: Project (52078062) supported by the National Natural Science Foundation of China

Corresponding author: SUN Zhilin (1979—) (ORCID: 0000-0003-2877-7017), male, associate professor, research interest: pavement structure and materials. E-mail: sunzhilin1979@csust.edu.cn

(责任编辑: 石月珍; 校对: 刘平; 英文编辑: 李岳林)