

# 基于外掺法的布敦岩沥青改性沥青微表处室内试验研究

丁露萍

(郴州市路通设计有限公司, 湖南 郴州 423000)

**摘要:** 针对微表处等薄层罩面用混合料黏结强度低、在阳光直射下易产生高温变形、耐久性差等问题,该文利用布敦岩沥青作为改性剂,其具有黏度大、抗高温变形能力强等特性,采用外掺法将其加入到微表处混合料中,计算不同布敦岩沥青掺量下的乳化沥青外掺量,通过拌和试验、黏聚力试验、湿轮磨耗试验、负荷轮黏砂试验、车辙变形试验探索布敦岩沥青掺量对混合料施工性能的影响,综合确定布敦岩沥青的最佳掺量,最后采用适合于微表处的抗车辙性能试验和低温抗裂性能试验验证布敦岩沥青改性沥青微表处的路用性能。试验结果表明:相同油石比条件下随着布敦岩沥青掺量的增加,混合料所需乳化沥青外掺量不断减小,外掺最佳用水量不断增加,最佳用水量情况下,混合料的可拌和时间不断减小,但变化幅度不大,黏聚力和耐磨性能随布敦岩沥青的增加先增大后减小,抗变形能力不断增强;添加布敦岩沥青后微表处的车辙深度大幅减小,但低温弯曲变形至少降低12.5%,对低温抗裂性能造成一定负面影响;综合确定外掺法的布敦岩沥青最佳掺量为4%,该研究可在节省乳化沥青成本的基础上提升微表处混合料路用性能。

**关键词:** 外掺法; 布敦岩沥青; 乳化沥青混合料; 微表处; 性能研究

## 1 引言

随着中国高速公路大规模建设完成,大部分运营成熟的高速公路已开始或即将开始进行大规模养护,中国公路行业也逐渐认识到公路养护对公路使用寿命的长短至关重要。预防性养护在养护主动性、延长道

路使用寿命、成本节约等方面具有很大优势,常见的微表处、稀浆封层、沥青同步碎石等均属于预防性养护手段。微表处施工后具有可快速开放交通、成本较低、污染小等特点,在预防性养护工程中得到广泛的应用。

2011年张雪韬采用自行设计的抗折试验、摆锤式冲击试验和动态抗开裂性试验研究SBR改性乳化沥青稀浆混合料微表处的使用性能,研究成果表明:掺加

- \*\*\*\*\*
- [9] 褚小立,袁洪福,陆婉珍.红外分析中光谱预处理及波长选择方法进展与应用[J].化学进展,2004(4).
  - [10] 张小超,吴静珠,徐云.近红外光谱分析技术及其在现代农业中的应用[M].北京:电子工业出版社,2012.
  - [11] Wenbo Zeng,Shaopeng Wu,Ling Pang,et al.Research on Ultra Violet (UV) Aging Depth of Asphalts[J].Construction and Building Materials,2018(160):620-627.
  - [12] 张葆琳.基于红外光谱的沥青结构表征研究[D].武汉理工大学硕士学位论文,2014.
  - [13] Zhang D, Zhang H, Shi C. Investigation of Aging Performance of SBS Modified Asphalt with Various Aging Methods[J]. Construction and Building Materials, 2017, 145:445-451.
  - [14] Yut I, Zofka A. Correlation between Rheology and Chem-

- ical Composition of Aged Polymer-Modified Asphalts[J]. Construction and Building Materials, 2014, 62:109-117.
- [15] Feng Zhang, Jianying Yu, Jun han. The Effects of Thermal Oxidative Ageing on Dynamine Viscosity, TG/DTG, DTA and FTIR of SBS- and SBS Sulfur- Modified Asphalts[J]. Construction and Building Materials, 2011, 25: 129-137.
- [16] 李萍, 念腾飞, 魏定邦, 等. FTIR 定量分析方法与老化沥青流变参数新探[J]. 华中科技大学学报(自然科学版), 2018(2).
- [17] 刘奔, 沈菊男, 石鹏程. 老化沥青纳米尺度微观特性及其官能团性能[J]. 公路交通科技, 2016(2).

SBR 改性剂的稀浆混合料低温延展性较好,抗折强度和抗冲击强度成倍提高,最突出的优点是裂缝最大宽度和裂缝数量显著减小,环境适用性更强;2013 年代考以“轮胎驱动式路面功能加速加载试验系统”为试验平台,模拟真实路面受力状态,探索不同岩沥青含量的微表处性能的变化规律,研究成果进一步推动了微表处的研究应用;2015 年王端宜通过向乳化沥青中掺加水溶性环氧树脂来增大乳化沥青的黏结力,从而提升冷拌混合料的耐久性,研究结果表明:环氧树脂微表处的抗剥落性衰变减慢,但对路面抗滑性能有不利影响;2016 年朱琛以齐泰高速公路为试点工程,铺筑了 3 km 的同步纤维乳化沥青混合料磨耗层试验段,提出了施工工艺、质量控制要点,这项技术工艺能够有效减少施工设备数量,缩短养护施工过程,通车较长时间后仍能保持较好状态;2017 年王宏臣通过室内试验和铺筑试验路研究橡胶粉改性乳化沥青微表处的抗噪性能,试验结果表明:橡胶粉对微表处降噪效果显著,同时耐磨耗性和低温抗裂性能要优于 SBS 改性微表处;2018 年文劲松发现微表处抗磨耗性和黏附性较低,且使用寿命一般只有 2~3 年,针对此问题其提出采用 RST-P 型高黏改性乳化沥青混合料,其可增加微表处抗磨耗性 1.3 倍,延长养护周期。

该文针对普通微表处矿料间黏附性差、高温变形大、耐久性差的问题,采用外掺法的方式将布敦岩沥青加入到微表处混合料中,计算不同布敦岩沥青掺量下的乳化沥青外掺量,通过一系列乳化沥青混合料试验探索布敦岩沥青对上述问题的改善作用,并分析其掺量对混合料性能的影响规律,最后进一步验证布敦岩沥青对微表处路用性能的影响,为研究高性能养护材料提供基础。

2 原材料及试样制备

2.1 原材料

胶凝材料为自制的以 A-70# 基质沥青为基础材料的阳离子慢裂快凝乳化沥青,固含量达到 60%,根

据 SH/T 0099.4-1992《乳化沥青蒸发残留物测定法》对其进行性能检测,结果如表 1 所示,各项指标均满足规范要求。布敦岩沥青原产于印尼,属于天然沥青,灰分含量大,外观呈棕黑色粉末。根据 JTG E20-2011《公路工程沥青及沥青混合料试验规程》对其进行检测,布敦岩沥青满足技术指标要求(表 2)。

表 1 乳化沥青性能指标检测结果

项目	单位	技术标准	测定值
蒸发残留物含量	%	≥60	61.4
筛上剩余量	%	≤0.1	0.03
电荷类型			阳离子
针入度	0.1 mm	40~100	54.5
软化点	℃	≥57	59
延度(5℃)	cm	≥20	26

表 2 布敦岩沥青主要技术指标

技术指标	单位	行业标准	检验结果
外观		棕色粉末	棕色粉末
灰分含量	%	<75	74.14
4.75 mm	%	100	100
粒度范围 2.36 mm	%	90~100	100
0.6 mm	%	10~60	100

2.2 级配选择

由于试验用于预防性养护罩面和填充车辙,所以最大公称粒径不应超过 9.5 mm,MS-3 型级配是规范中推荐且大多数研究者选用的微表处级配,另外从抗滑性能衰减率和抗剥落能力方面经实体工程确认 MS-3 型级配优势明显。研究过程中发现有时会出现微表处混合料的最大粒径超过摊铺厚度,从而造成行车噪音大的现象,基于此,决定在 4.75~9.5 mm 粒径间增加一个 7 mm 的控制性筛孔,同时保持原有 MS-3 型级配的特点,提出了基于 7 mm 筛孔通过率为 100%的低噪微表处矿料级配,研究采用级配中值作为设计级配,结果如表 3 所示。

表 3 矿料级配

级配	通过下列筛孔(mm)的质量百分率/%								
	9.5	7	4.75	2.36	1.18	0.6	0.3	0.15	0.075
上限	100	100	95.0	70.0	50.0	35.0	24.0	19.0	15.0
下限	100	100	75.0	54.0	34.0	22.0	12.0	8.0	5.0
中值	100	100	85.0	62.0	42.0	28.5	18.0	13.5	10.0

### 2.3 试样制备

采用外掺法制备布敦岩沥青改性乳化沥青混合料,基于前期研究成果确定混合料油石比为 5.6%,由于布敦岩沥青本身属于天然沥青,该文在固定油石比的情况下,向集料中加入 2%、4%、6% 的布敦岩沥青,并采用高效活化剂对布敦岩沥青颗粒进行活化,静置 30 min,活化率定为 90%,以此为前提计算不同布敦岩沥青掺量下的乳化沥青添加量,并通过拌和试验确定其最佳添加水量。基于前期研究成果确定混合料油石比为 5.6%,水泥为 30# 普通硅酸盐水泥,掺量为 2%,混合料制备过程如图 1 所示。

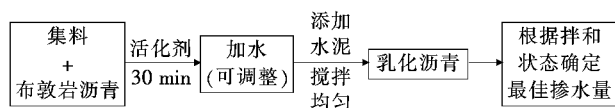


图 1 掺布敦岩沥青乳化沥青混合料制备流程图

## 3 试验方法

### 3.1 拌和试验

微表处混合料必须满足可拌和时间及成浆状态的要求。拌和试验:按设计级配取 500 g 适量集料,先后将不同掺量布敦岩沥青、活化剂、水、水泥、对应的乳化沥青与集料混合均匀,先用力拌和 3~8 s,然后顺时针以大约 1 r/s 的速度均匀拌和至手感有力,混合料变稠时所需要的时间即为可拌和时间。同时应根据成浆状态不断调整不同布敦岩沥青掺量下的用水量,若过于黏稠,施工难度大;过稀则可导致离析,影响摊铺的均匀性。

### 3.2 黏聚力试验

混合料的黏聚力大小可在一定程度上表征施工后开放交通的时间,所以规范对 30、60 min 时的黏聚力提出了严格要求,即 30 min 的黏聚力不能低于 1.2 N·m(初凝时间),60 min 黏聚力不能低于 2.0 N·m(开放交通时间)。黏聚力试验的原理为:在 200 kPa 的固定压强下对试件进行加压,读取扭矩扳手的读数即为混合料的黏聚力。

### 3.3 湿轮磨损试验

微表处混合料的湿轮磨损值与路用性能的好坏关联性较大,用 1 h(25 °C 恒温水浴保持 1 d)湿轮磨损值表征耐磨性能,用 6 d(25 °C 恒温水浴保持 6 d)湿轮磨损值表征抗水损坏能力。湿轮磨损值是指试件在磨损

前后的质量与磨损面积的比值。

### 3.4 抗车辙变形试验

微表处混合料在预防性养护手段中可起到填充车辙的作用,其抗车辙变形能力至关重要,抗车辙变形能力通过轮辙变形试验进行评价,采用轮辙变形率(PLD)指标进行表征,其测试原理是试件碾压前后的宽度差与碾压前宽度的比值,即为轮辙变形率(PLD),其值越小抗变形能力越强。

### 3.5 抗车辙性能试验

微表处的抗车辙性能试验是在热拌沥青混合料车辙试验的基础上进行改进,在一定程度上能最大可能地接近微表处路面实际使用状态,更加准确地模拟其抗车辙性能。

(1) 试件成型。微表处抗车辙性能试验所用试件是在 4 cm AC-13 热拌沥青混合料车辙板的基础上摊铺 1 cm 微表处混合料,以此结构尽可能模拟微表处罩面的实际使用状态。

(2) 试验条件。通常情况下乳化沥青蒸残后其高温性能会有一定程度的减弱,若仍在热拌沥青混合料车辙试验 60 °C 环境下进行车辙试验,微表处抗车辙性能必然相对较弱,所以为更准确地评价布敦岩沥青改性沥青微表处的抗车辙性能,将其试验温度设定为 45 °C。

(3) 评价指标。根据微表处应用范围及使用寿命,采用车辙试验荷载作用次数超过 6 000 次后的车辙深度来表征微表处抗车辙性能,即车辙深度越小,则抗车辙性能越好。

### 3.6 低温抗裂性能试验

目前国内外针对微表处混合料的低温抗裂性能尚未有明确的试验测试方法,该文提出如下的试验方法评价微表处混合料的低温抗裂性能:采用与抗车辙变形试验相同的混合料试件,先在负荷轮试验仪上承受 1 000 次轮碾荷载,接着在力学试验机上对其端部施加速率为 25.2 mm/min 的水平力  $F$ ,使试件进行弯曲试验,试验温度为 -5 °C(图 2),当试件出现横向贯穿裂缝时试验结束,采用试件的水平位移  $L$  评价微表处的低温抗裂性能, $L$  值越大,其低温抗裂性能越好。

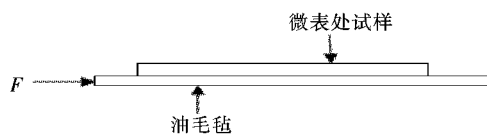


图 2 微表处抗裂性能试验示意图

## 4 布敦岩沥青对微表处混合料施工性能的影响

### 4.1 拌和试验

#### (1) 确定乳化沥青掺量

在固定油石比情况下,添加布敦岩沥青过程中可减少乳化沥青的添加量,起到节省沥青的作用,从而根据布敦岩沥青中沥青含量和活化率计算胶凝材料的用量,计算过程如下:

设  $m$  为乳化沥青混合料总质量,  $a$  为混合料中沥青与集料的比例,  $BRA$  掺量为  $b$ ,  $BRA$  中灰分含量为  $c$ 。则乳化沥青混合料的总用油量为:

$$M = m \frac{a}{1+a}$$

布敦岩沥青质量:

$$M_1 = mb$$

布敦岩沥青中有效油含量:

$$M_2 = M_1 (1-c) \times 90\%$$

乳化沥青中用油量:

$$M_3 = M - M_2$$

乳化沥青用量:

$$M_4 = \frac{M_3}{60\%} = \frac{\left[ m \frac{a}{1+a} - mb(1-c) \times 90\% \right]}{60\%}$$

则布敦岩沥青与乳化沥青的添加比例为:

$$\frac{M_1}{M_4} = \frac{b(1+a)}{1.67a - 0.9b(1+a)(1-c)}$$

#### (2) 确定外掺水量

根据乳化沥青掺量,通过拌和试验确定相同成浆状态不同布敦岩沥青掺量混合料的最佳外掺水量和可拌和时间,结果见表 4。

表 4 拌和试验结果

布敦岩沥青掺量/%	拌和试验乳化沥青用量/%	最佳外掺水量/%	可拌和时间/s
0	9.3	6.0	162
2	8.3	6.6	149
4	8.0	7.0	131
6	7.5	7.5	98

由表 4 可以看出:随着布敦岩沥青掺量的增加,在相同油石比条件下微表处乳化沥青用量不断减少,拌和试验中布敦岩沥青掺量在 6% 时乳化沥青用量可减

少将近 20%,这是由于经再生剂的处理,布敦岩沥青被活化,代替了部分沥青,很大程度上节约了乳化沥青用量。同时由于布敦岩沥青中含有大量灰分,活化后混合料中矿粉含量增加,导致破乳速度加快,拌和试验呈现出最佳外掺用水量增加和可拌和时间减少的现象,且随着布敦岩沥青掺量的增加可拌和时间的减速呈先小后大的趋势,6% 掺量下可拌和时间相对于 4% 时减少 33 s,可施工性减弱,所以建议布敦岩沥青掺量不应超过 4%。

### 4.2 黏聚力试验

根据表 4 确定的不同布敦岩沥青掺量下乳化沥青掺加比例和最佳外掺水量,通过黏聚力指标和试验后试件破坏状态确定其施工后开放交通的时间,结果如图 3 所示。

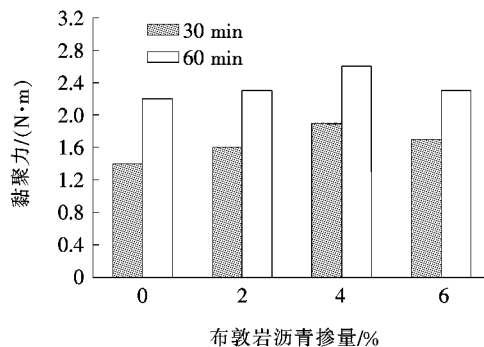


图 3 不同布敦岩沥青掺量下黏聚力试验结果

由图 3 可以看出:随着布敦岩沥青掺量从 0% 提高到 4%, 30 min 和 60 min 的黏聚力均不断增大,这就证明了布敦岩沥青中矿粉的存在增加了细集料的成分,使混合料的填充更为合理密实,而 6% 时其黏聚力反而减小,这可能是因为掺量 6% 时活化剂的活化效率降低,未被活化的布敦岩沥青颗粒较多,影响了混合料的黏聚力。

另外布敦岩沥青掺量为 0%~6% 时, 60 min 黏聚力试件状态为:初级成型,有一小裂纹;中度成型,少部分集料黏起;中度成型,试件被压头黏起;未成型,试件被轻微碾散。这一现象也说明了 6% 出现超掺量现象,同时矿粉成分可在一定程度上提高成型状态。

### 4.3 湿轮磨耗试验

微表处乳化沥青混合料的耐磨性能和抗水损坏性能至关重要,通常用 1 h 和 6 d 的湿轮磨耗值分别进行表征,其性能好坏是微表处路面耐久性的直观体现,图 4 为不同布敦岩沥青掺量下湿轮磨耗值变化趋势。

由图 4 可以看出:外掺法制备的布敦岩沥青改性沥青混合料的 1 h 湿轮磨耗值和 6 d 湿轮磨耗值随着

布敦岩沥青掺量的增加呈现出相同的变化趋势,湿轮磨耗值先增大后减小,在4%时出现转折,此现象说明在0%~4%掺量范围内,随着布敦岩沥青的增加,乳化沥青混合料的耐磨性能和抗水损坏能力均有一定程度的提高,1 h湿轮磨耗值最多可提高99.6 g/m<sup>2</sup>。这是由于混合料成型过程中布敦岩沥青被活化后产生的灰分与乳化沥青结合,增加了混合料中水泥沥青胶浆的含量,同时乳化沥青分子部分贯穿于布敦岩沥青的蜂窝状孔隙结构中,形成互联交织的整体,混合料间的黏聚力显著增强,耐磨耗能力和抗水损能力提高,同样由于活化效率降低问题,大于4%掺量的湿轮磨耗值骤减。

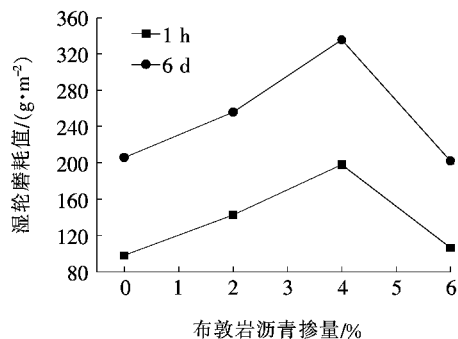


图4 不同布敦岩沥青掺量下湿轮磨耗值变化趋势

#### 4.4 抗车辙变形试验

微表处作为重要的养护工程罩面工艺,其抗车辙变形能力直接影响了道路的平整度和行车舒适性,为揭示布敦岩沥青掺量对抗车辙能力的影响程度,在其他条件相同的情况下测试了不同布敦岩沥青掺量下的轮辙变形率,结果如图5所示。

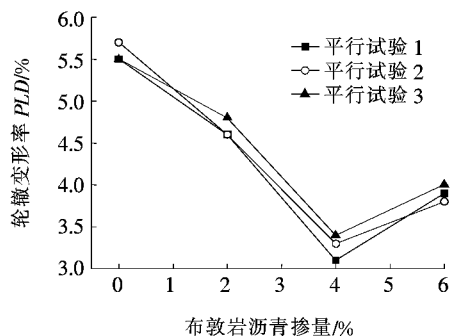


图5 不同布敦岩沥青掺量下抗车辙变形试验结果

由图5可以看出:随着布敦岩沥青掺量的增加,3组平行试验的轮辙宽度变形率PLD变化趋势大体一致,均为先减小后增大,掺量4%为转折点,相对于未掺加布敦岩沥青时PLD最多可降低2.4%,这就表明掺量为0%~4%时,随着布敦岩沥青的增加,微表处

的抗车辙能力不断增强。此现象的发生可从宏观和微观两个角度进行解释,宏观上:①布敦岩沥青活化后产生的灰分含量和乳化沥青结合形成更多的水泥乳化沥青胶浆,可增强乳化沥青混合料矿料间的黏聚力,整体抗载能力增强;②布敦岩沥青的灰分含量增加了混合料的细集料成分,提升了整个级配的密实状态,抗车辙变形能力强。微观上:布敦岩沥青的微观结构为蜂窝状孔隙结构,沥青成分可贯穿于这些微结构中,整体性增强,可抵抗较大的纵横向变形。

## 5 路用性能验证及机理分析

### 5.1 抗车辙性能试验

根据3.5节的试验方案进行微表处抗车辙性能试验,试验条件应严格控制,车辙深度统计结果如图6所示。

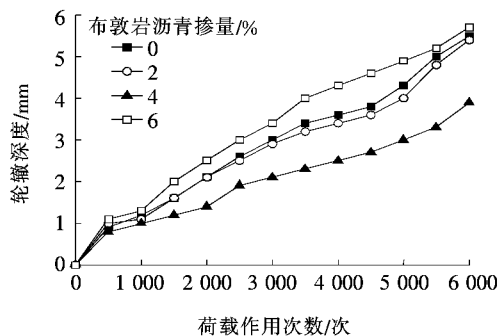


图6 不同布敦岩沥青掺量下车辙试验结果

由图6可看出:①无论是否掺加布敦岩沥青,随着荷载作用次数的增加微表处车辙深度不断增大,这与路面受力变形规律相符;②相同荷载次数作用下,车辙深度的大小排序(岩沥青掺量排序)为:4%<2%<0%<6%,这就说明一定掺量下布敦岩沥青的添加有助于微表处提升其抗车辙性能,但掺量为6%时车辙深度最大,这是因为其掺量过大,未能全部与基质乳化沥青结合。4%时的车辙深度最小,其抗车辙性能最佳,与前文确定的最佳掺量一致;③当荷载作用次数≤1000次时不同掺量试件的车辙深度曲线几乎重合,这一过程属于沥青混合料初始压密的过程,不能反映微表处的抗车辙性能,而6000次时车辙深度已达6 mm,与微表处最薄施工厚度相当,若再提升荷载作用次数,将不能模拟微表处的抗车辙性能,6000次荷载作用次数较为合理。

### 5.2 低温抗裂性能试验

图7为微表处低温抗裂性能试验结果。

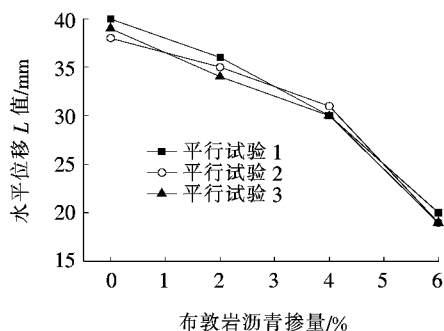


图 7 不同布敦岩沥青掺量下低温抗裂性能试验结果

由图 7 可得:随着布敦岩沥青颗粒的掺加,试件开裂时的弯曲变形逐渐减小,掺量为 2%、4% 和 6% 时的弯曲变形量相对于未掺加布敦岩沥青时分别降低 12.5%、25% 和 55%,这就表明在普通微表处混合料中掺加布敦岩沥青对其低温抗裂性能会造成较大的负面影响,掺加量仅为 2% 时变形量就可损失 12.5%,这种现象的产生与外掺改性剂布敦岩沥青的特性有关,其低温易脆延展性差,较低温度下抵抗变形能力弱,这也阻碍了布敦岩沥青作为改性剂的进一步应用。

### 5.3 机理分析

从施工性能和路用性能两方面分析可知:基于外掺法的布敦岩沥青改性沥青微表处除低温抗裂性能外其他各项性能均有增强,尤其是黏聚力和抗车辙变形能力表现突出,这与布敦岩沥青改性剂的组成成分和内部结构息息相关:① 布敦岩沥青中的灰分成分增加了微表处混合料中细集料的占比,加快了乳化沥青破乳时间和混合料强度形成时间,同时其与乳化沥青结合形成更多沥青胶浆成分,显著增强微表处的黏附性、耐磨性能;② 布敦岩沥青中的沥青成分属于硬质沥青,减少乳化沥青用量的同时可提高微表处混合料的抗车辙变形能力;③ 布敦岩沥青的内部结构在微观上表现出大量的蜂窝状孔洞孔隙,能吸附更多的沥青分子贯穿于布敦岩沥青的内部结构中,沥青及沥青胶浆的稳定性更好,微表处的矿料间黏附性、抗车辙变形能力和耐疲劳性能显著增强。

## 6 结论

(1) 在相同油石比条件下,基于外掺法的布敦岩沥青改性沥青微表处在可拌和时间稍有降低(满足规范)的情况下,黏聚力、耐磨耗性能、抗水损坏能力、抗车辙变形能力均有较大幅度的提高,同时缩短乳化沥青混合料的成型时间,可尽快开放交通。路用性能上

布敦岩沥青对微表处提升抗车辙能力效果显著,但对低温抗裂性能造成一定负面影响,是今后进一步研究的重点。

(2) 宏观上布敦岩沥青活化后产生的灰分含量和乳化沥青结合形成更多的水泥乳化沥青胶浆,可增强乳化沥青混合料矿料间的黏聚力,整体抗载能力增强,同时增加了混合料的细集料成分,提升了整个级配的密实状态,抗车辙变形能力强;微观上布敦岩沥青的微观结构为蜂窝状孔洞孔隙结构,沥青成分可贯穿于这些微结构中,整体性增强,可抵抗水的侵蚀和较大的纵横向变形。

(3) 在提升微表处性能的同时,布敦岩沥青的加入可在一定程度上节约乳化沥青的使用量,从成本节约和资源合理利用方面优势明显。根据各性能变化规律,建议布敦岩沥青掺量为 4%,后期需从实体工程出发对其性能和掺量进行验证。

### 参考文献:

- [1] Anping Wang. Micro-Surfacing Mixtures with Reclaimed Asphalt Pavement: Mix Design and Performance Evaluation[J]. Construction and Building Materials, 2018, 12(16): 303-313.
- [2] 何志敏,段春辉.微表处夜间施工技术研究及其在北京高速公路中的应用[J].中外公路,2018(3).
- [3] Zheng Chen. Effects of Loading Rate on Flexural-Tension Properties and Uniaxial Compressive Strength of Micro-Surfacing Mixture[J]. Journal of Wuhan University of Technology-Mater, 2010, 25(4): 656-658.
- [4] 郝秀红,王彦敏.岩改沥青性能分析及改性机理研究[J].中外公路,2017(3).
- [5] 张雪韬.改性乳化沥青对微表处稀浆混合料性能的影响[J].公路,2011(6).
- [6] 叶伟.自研高性能改性乳化沥青在超薄磨耗层层间黏结中的应用[J].中外公路,2017(2).
- [7] 代考.岩沥青微表处路用性能加速加载试验研究[J].公路交通科技,2014(3).
- [8] 王端宜.水溶性环氧树脂乳化沥青微表处的加速加载试验[J].科学技术与工程,2015(13).
- [9] 朱琛.同步纤维磨耗层技术研究与应用[J].长安大学学报,2016(5).
- [10] 王丹丹.城市道路降噪微表处夜间、低温施工关键技术研究[J].中外公路,2018(2).
- [11] 王宏臣.橡胶改性乳化沥青微表处混合料降噪特性与耐久性能[J].筑路机械与施工机械化,2017(4).
- [12] 文劲松.掺 RST-P 型高粘改性剂的微表处抗磨耗性能研究[D].重庆交通大学硕士学位论文,2018.