

DOI:10.19951/j.cnki.1672-9331.20220417001

文章编号:1672-9331(2023)06-0091-09

引用格式:关宏信,周直霖,覃婉菊,等.半开级配SBS改性沥青混合料BK-7组成设计[J].长沙理工大学学报(自然科学版),2023,20(6):91-99.

Citation: GUAN Hongxin, ZHOU Zhilin, QIN Wanju, et al. Composition design of semi-open grade SBS modified asphalt mixture BK-7 [J]. J Changsha Univ Sci Tech (Nat Sci), 2023, 20(6): 91-99.

半开级配SBS改性沥青混合料BK-7组成设计

关宏信¹,周直霖¹,覃婉菊^{1,2},李兵³,杨涛⁴

(1.长沙理工大学 交通运输工程学院,湖南 长沙 410114;2.广西壮族自治区公路发展中心,广西 南宁 530029;
3.佛山市路桥建设有限公司,广东 佛山 528042;4.湖南建工交通建设有限公司,湖南 长沙 410004)

摘要:【目的】论证公称最大粒径为7 mm的半开级配沥青混合料BK-7的路用性能。【方法】对BK-7混合料的矿料组成进行了设计,并在其纤维掺量为0.4%的情况下,通过谢伦堡析漏和肯塔堡飞散试验确定了SBS改性沥青的用量。同时,对9%、11%、13%三种空隙率的BK-7混合料进行了单轴贯入试验、低温弯曲试验以及浸水马歇尔稳定度试验,并将其与SMA-5、AC-5、OGFC-5沥青混合料的性能进行比较。此外,还对经过酸性溶液浸泡过的空隙率为11%的BK-7混合料进行了飞散和马歇尔试验。【结果】空隙率为9%的BK-7混合料路用性能最好,抗车辙性能最优,且低温抗裂性能和水稳定性与SMA-5、AC-5沥青混合料的相当;空隙率为11%的BK-7混合料在pH=4的酸雨溶液中浸泡两个周期(“浸泡7 d、自然干燥1 d”为一个周期)后,其马歇尔稳定度与肯塔堡飞散损失仍能满足相应的规范要求。【结论】掺纤维且采用SBS改性沥青的空隙率为9%的BK-7沥青混合料的路用性能具有比较优势,在温度较高的华南地区有一定的工程应用价值。

关键词:道路工程;SBS改性沥青;纤维;半开级配;路用性能

中图分类号:U416

文献标志码:A

0 引言

超薄磨耗层是一种由沥青混合料与改性乳化沥青黏层结合形成的沥青路面表面层,能够高效可靠地解决路面中轻度裂缝、松散、抗滑失效等病害^[1-3],从而提高路面路用性能,延长路面使用寿命。国内外学者对于磨耗层已开展了一定的研究。

JAMES等^[4]研究制定出了新型磨耗层沥青玛蹄脂碎石混合料SMA-5的设计标准。LIU等^[5]研究表明在SMA-5混合料中添加钢渣或橡胶屑,能够有效提升该混合料的耐久性能。虞将苗等^[1]、《中国公路学报》编辑部^[6]、YANG等^[7]、李运华等^[8]采用高黏沥青或乳化沥青和较多的4.75 mm粒径以上的集料,设计出空隙率介于开级配排水式沥

青磨耗层(OGFC)与SMA两种混合料之间的沥青混合料,相比于OGFC混合料,该混合料有着更好的高温性能,相比于SMA混合料,其在抗滑和透水性能方面占优。LI等^[9]、CUI等^[10]分别设计了多孔超薄耐磨层混合料PUC-10与超薄耐磨层混合料UTWC-10,通过调整这两种混合料的级配,即在4.75~9.5 mm筛孔之间增加了7.5 mm的中间筛孔,发现这两种混合料均具有良好的路用性能,其降噪性能和抗滑性能也具有比较优势。在胶结料的选择上,大部分半开级配混合料都选择使用了高黏沥青或者专用沥青,但高黏沥青对环境有一定的危害,专业沥青在推广方面存在困难。橡胶沥青能够提高沥青混合料的高温性能且污染较小,但改性沥青中的橡胶颗粒易导致应力集中现象,进而使橡胶沥青在低温情况下容易开裂^[11]。SBS作为目前使用最广泛和综合性能最好的沥青

收稿日期:2022-04-17;修回日期:2022-04-28;接受日期:2022-04-29

基金项目:国家自然科学基金资助项目(52078062);湖南省自然科学基金项目(2020JJ4604);湖南省交通运输地方标准制修订项目(B201806)

通信作者:关宏信(1974—)(ORCID:0000-0001-7264-7469),男,教授,主要从事路面结构与材料研究。

E-mail:ghx_cs@csust.edu.cn

改性剂,能够有效提高沥青路面的路用性能,特别是高、低温性能^[12-15]。此外,添加纤维同样能够提高沥青混合料的路用性能。成子桥等^[16]、王国方等^[17]、沈钱超^[18]、雷江等^[19]在混合料中添加玄武岩纤维,高颖等^[20]、蒋梦雅等^[21]在沥青混合料中添加玻璃纤维,研究表明,这两种纤维都能改善沥青混合料的路用性能。

本文尝试设计出一种公称最大粒径为7 mm的半开级配沥青混合料BK-7,并采用SBS改性沥青和纤维对其进行改性。通过对BK-7混合料开展室内试验并分析其路用性能,并与密级配和开级配沥青混合料的路用性能进行比较,从而为BK-7混合料的工程应用打下基础。

1 试验所用原材料

本研究主要对9%、11%、13%三种空隙率下的BK-7沥青混合料进行室内试验,并将其试验结果与连续级配混合料(AC-5)、间断级配混合料(SMA-5)以及开级配混合料(OGFC-5)的进行对比。上述所有混合料均采用SBS改性沥青,其技术指标见表1。粗集料为玄武岩,细集料与矿粉采用石灰岩。AC-5与OGFC-5混合料没有添加纤维,BK-7与SMA-5混合料添加了颗粒状木质素纤维,纤维掺量均为0.4%,该纤维的技术指标见表2。

表1 SBS改性沥青技术指标

Table 1 Technical indexes of SBS modified asphalt

| 技术指标 | 技术要求 | 检测结果 |
|-------------------------------|---------|------|
| 针入度(25 °C, 100 g, 5 s)/0.1 mm | 30 ~ 55 | 53 |
| 针入度指数 | ≥0 | 0.21 |
| 软化点(环球法)/°C | ≥75 | 86 |
| 延度(5 °C, 5 cm/min)/cm | ≥25 | 31 |
| 运动黏度(135 °C)/(Pa·s) | ≤3 | 2.2 |

表2 颗粒状木质素纤维技术指标

Table 2 Technical indexes of granular lignin fiber

| 技术指标 | 检测结果 |
|--------------------------|-------|
| 密度/(g·cm ⁻³) | 1.269 |
| 纤维长度/mm | 2~6 |
| 灰分质量分数/% | 22.1 |
| pH值 | 6.8 |
| 吸油率/倍 | 7.9 |
| 含水率/% | <5 |

2 半开级配SBS改性沥青BK-7混合料材料组成

2.1 矿料级配

参考文献[10,22],课题组通过试配级配,对最大粒径为9.5 mm的半开级配混合料BK-7增加了7 mm的新筛孔,分别用9%、11%、13%作为目标空隙率,采用改进的主骨料空隙填充法(course aggregate void filling, CAVF)^[23]计算得到这三种空隙率的BK-7混合料中集料的用量,其级配曲线如图1所示。

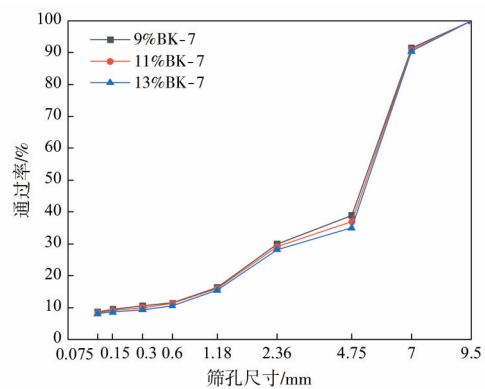


图1 BK-7混合料级配曲线

Fig. 1 BK-7 mixture gradation curve

2.2 BK-7混合料试件制备方法

在使用谢伦堡析漏和肯塔堡飞散试验确定BK-7沥青混合料最佳油石比之前,为保证混合料中的纤维完全分散,本文先开展析漏试验,对比不同质量的沥青混合料(分别为单个马歇尔试件、5个马歇尔试件、单个车辙板试件)在不同干拌时间(分别为0、10、20、30 s)下的析漏损失,试验结果如图2所示。

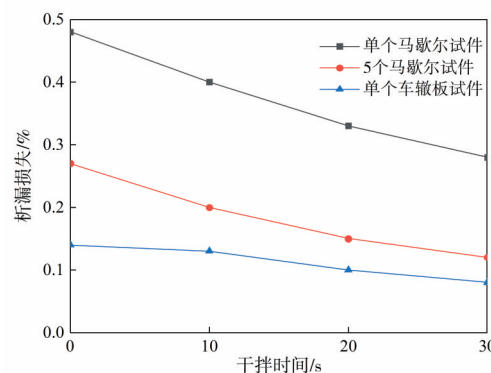


图2 185 °C干拌温度下拌合时间与析漏损失关系图

Fig. 2 The relationship between mixing time and leakage loss at 185 °C for dry mixing

由图2可以看出,集料质量越轻,干拌时间对析漏损失的影响越大,这是因为此时集料对纤维的剪切作用较小,纤维在短时间内未被充分分散,不能完全发挥其吸油的作用,导致析漏损失比较大。为此,本试验在沥青混合料中掺纤维采用的拌合工艺如下:①成型马歇尔试件时,一次拌合5个马歇尔试件所需的集料及纤维,选择室内干拌30 s;②成型车辙板试件时,室内干拌时间为20 s,其他试验步骤与《公路工程沥青及沥青混合料试验规程》(JTG E20—2011)中的相同。

2.3 空隙率测试方法

在测量半开级配沥青混合料密度前,本研究先对其吸水率进行分析,测得9%、11%、13%三种空隙率的BK-7沥青混合料的吸水率分别为1.9%、2.2%、2.5%。参照现行的《公路工程沥青及沥青混合料试验规程》(JTG E20—2011),当吸水率小于2%时,须采用表干法测定混合料的毛体积相对密度;当吸水率大于2%时,可采用蜡封法、真空密封法和体积法等方法测定混合料的毛体积相对密度。因此,本研究采用真空密封法测试沥青混合料的空隙率,因为真空密封法是将试件装入密封袋后,再将整体抽成真空,使得塑料薄膜与试件表面紧密接触,可以防止水分进入表面的孔洞之中。

2.4 最佳油石比的确定

本试验对9%、11%、13%三种空隙率的BK-7混合料均分别选择了5种油石比,并对其开展谢伦堡析漏和肯塔堡飞散试验,结果如图3~5所示。分析析漏损失和飞散损失分别随油石比的变化曲线,取位于两者突变点所组成区间的油石比作为最佳油石比。由此得到9%、11%、13%空隙率的BK-7混合料的最佳油石比分别为6.4%、6.2%和6.1%。

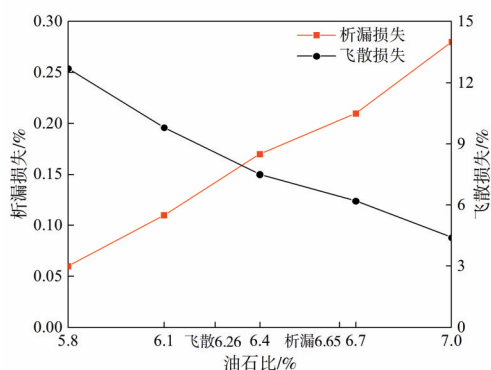


图3 9%空隙率BK-7析漏和飞散试验结果

Fig. 3 Leakage and raveling test results of BK-7 with 9% porosity

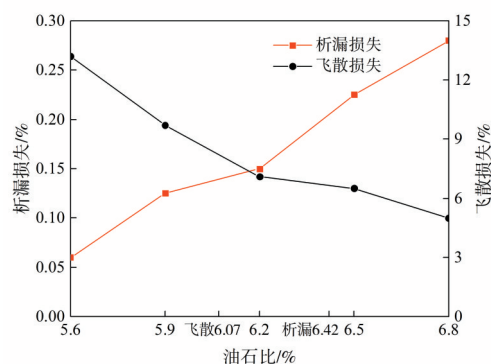


图4 11%空隙率BK-7析漏和飞散试验结果

Fig. 4 Leakage and raveling test results of BK-7 with 11% porosity

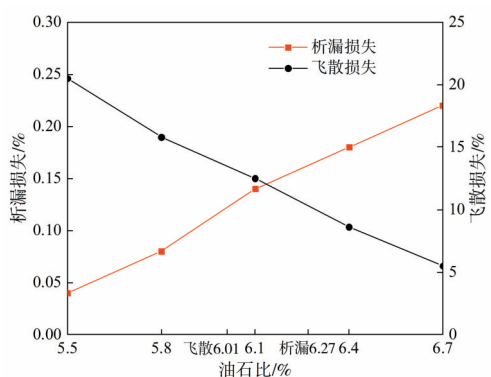


图5 13%空隙率BK-7析漏和飞散试验结果

Fig. 5 Leakage and raveling test results of BK-7 with 13% porosity

对于SMA-5、AC-5的级配组成,根据《公路沥青路面施工技术规范》(JTG F40—2004)级配中值并参考文献[24]确定,OGFC-5混合料的级配组成参考文献[25]确定,三种混合料的级配曲线如图6所示。SMA-5以4%为目标空隙率,以6.4%为预估油石比中值;AC-5以4%为目标空隙率,以6.3%为预估油石比中值;OGFC-5以20%为目标空隙率,以4.6%为预估油石比中值,三种混合料的油

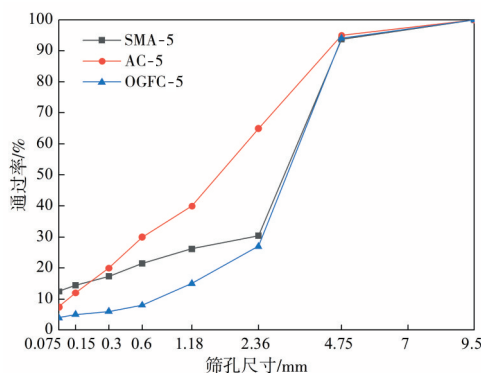


图6 不同沥青混合料级配曲线图

Fig. 6 Different asphalt mixture gradation curves

石比均以0.3%为间隔设置,通过析漏与飞散试验,得到SMA-5、AC-5、OGFC-5这三种混合料的最佳油石比分别为6.5%、6.2%和4.6%。

3 BK-7混合料的路用性能

本节对9%、11%、13%三种空隙率的半开级配SBS改性沥青混合料BK-7的抗车辙性能、低温性能以及水稳定性进行室内试验,并将其试验结果与SMA-5、AC-5与OGFC-5混合料的进行对比,最后再对空隙率为11%的BK-7进行酸雨腐蚀试验。

3.1 抗车辙性能

本研究采用单轴贯入试验分析沥青混合料的抗剪强度,以此表征混合料的抗车辙性能。试验仪器为MTS试验机,压头直径为28.5 mm,试验条件及步骤按照《公路工程沥青及沥青混合料试验规程》(JTG E20—2011)中的要求执行,试验结果如表3和图7所示。

由表3可知,空隙率为9%的BK-7混合料的贯入强度平均值比空隙率为11%和13%的BK-7混合料的分别高了6.7%和24.4%,贯入强度与混合料空隙率成负相关关系。这是因为对于半开级配混合料而言,其含有较多的4.75 mm以上粒径的集料,导致其内部存在很多薄弱点,而空隙率的增加使混合料内部出现更多半连通与连通的孔洞,致使混合料在压头的挤压下更容易产生变形,甚至被压坏,使得其贯入强度变低。这也是BK-7混合料的贯入强度大于OGFC-5混合料的原因。

表3 BK-7沥青混合料的贯入强度

Table 3 Penetration strength of BK-7 asphalt mixtures

| 空隙率/ % | 贯入强度/ MPa | 贯入强度 均值/MPa | 标准差 | 变异系数/ % |
|-----------|--------------|----------------|-------|------------|
| 9 | 2.63 | 2.55 | 0.068 | 2.7 |
| | 2.59 | | | |
| | 2.45 | | | |
| | 2.53 | | | |
| 11 | 2.29 | 2.39 | 0.086 | 3.6 |
| | 2.32 | | | |
| | 2.46 | | | |
| | 2.49 | | | |
| 13 | 2.06 | 2.05 | 0.034 | 1.8 |
| | 2.10 | | | |
| | 2.01 | | | |
| | 2.03 | | | |

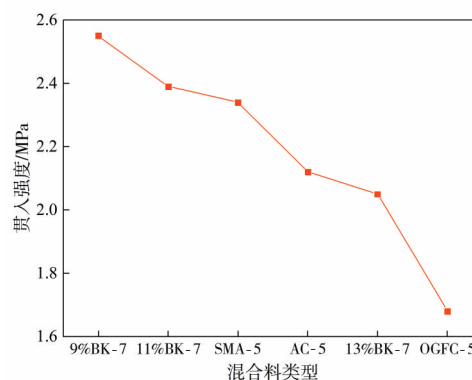


图7 沥青混合料贯入强度

Fig. 7 The penetration strength of the asphalt mixtures

此外,由图7可以看出,除了空隙率为13%的BK-7混合料,空隙率为9%和11%的BK-7混合料的贯入强度均超过了SMA-5与AC-5混合料的贯入强度。一方面,BK-7中添加了纤维,使得沥青与集料之间的黏附性能增加,从而增大了混合料的贯入强度;另一方面,由于配合比设计时优化了级配设计,在4.75 mm与9.5 mm筛孔之间增加了7 mm的筛孔,并且粒径为4.75~7 mm的集料质量占到了总集料的40%以上,优化的级配能够增加粗骨料之间的接触点,使混合料的整体结构框架更为合理,提高了混合料整体的嵌挤能力^[10],进而提高了BK-7混合料的抗车辙性能。

3.2 低温性能

本研究采用沥青混合料弯曲试验对前述6种沥青混合料进行低温性能对比分析,试验温度为-10℃,试验仪器选用MTS试验机,试验步骤按照《公路工程沥青及沥青混合料试验规程》(JTG E20—2011)中的要求执行,测得各混合料的最大弯拉应变如图8所示。

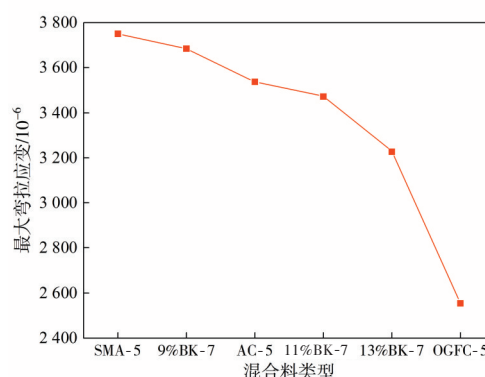


图8 沥青混合料低温弯曲破坏时的弯拉应变

Fig. 8 Flexural-tensile strain of the asphalt mixtures at low temperature flexural failure

由图8可以看出,①所有沥青混合料通过低温弯曲试验测得的最大弯拉应变均大于 $2\,500\times 10^{-6}$,满足规范要求;②就BK-7混合料而言,空隙率的增加使混合料内部骨料之间的接触点变少,接触面积减小,混合料的低温性能变差,空隙率为9%的BK-7混合料最大弯拉应变较空隙率为11%与13%的BK-7混合料分别提高了6.1%与14.2%;③虽然BK-7混合料的低温性能较OGFC-5混合料的更优,但较SMA-5与AC-5混合料的仍有一些差距,这也在一定程度上表明纤维对于沥青混合料低温性能的提升作用不明显。不过,笔者认为,我国广州地区冬季最冷时候的气温大约为4~11℃,空隙率为9%的BK-7混合料用作该地区的路面表面层仍有一定的工程应用价值。

3.3 水稳定性

本研究通过对前述6种沥青混合料开展浸水马歇尔稳定度试验,分析对比各混合料的水稳定性。试验步骤按照《公路工程沥青及沥青混合料试验规程》(JTG E20—2011)中的要求进行,试验结果如图9所示。

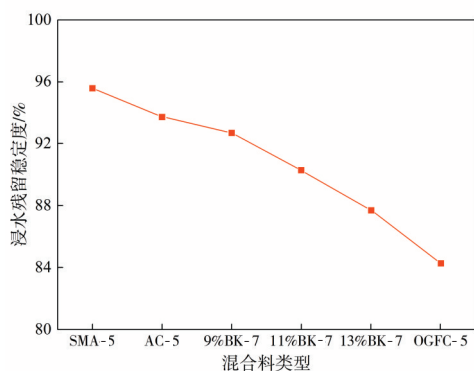


图9 沥青混合料浸水残留稳定度

Fig. 9 The residual stability of the asphalt mixtures

由图9可以看出,①半升级配BK-7混合料的浸水残留稳定度较密级配沥青混合料的小,比开级配沥青混合料的大;②空隙率为9%的BK-7混合料的浸水残留稳定度较空隙率为11%和13%的BK-7混合料的分别增加了2.7%和5.7%。这是因为随着空隙率的增加,混合料中的空隙增多,致使水更容易进入混合料内部,且存在于沥青与集料之间,水与混合料接触面积变大,从而使得沥青与集料的黏附性能下降。

3.4 酸雨腐蚀试验

陈虹颖等^[26]研究发现,南方部分城市在2、3月的酸雨最强,且酸雨频率最高,降雨pH值可达

4.43,属于强酸程度。许多研究^[27-30]表明酸雨会显著降低沥青混合料的路用性能。因此,本文通过配制酸性溶液(H_2SO_4 和 HNO_3 质量比为9:1)模拟酸雨,并以中性溶液作为对照组,对比试件浸泡于酸性溶液前后的马歇尔稳定度和飞散损失,分析沥青混合料的耐酸雨腐蚀性能。试验时,以“浸泡7 d、自然干燥1 d”为一个周期,通过干湿循环加速对材料的损伤^[31]。考虑到酸雨对混合料的腐蚀与其空隙率有一定关系,故本文对空隙率为11%的BK-7沥青混合料进行试验,该混合料在酸性和中性溶液中经过不同浸泡周期后的肯塔堡飞散损失与马歇尔稳定度试验结果如图10~11所示。

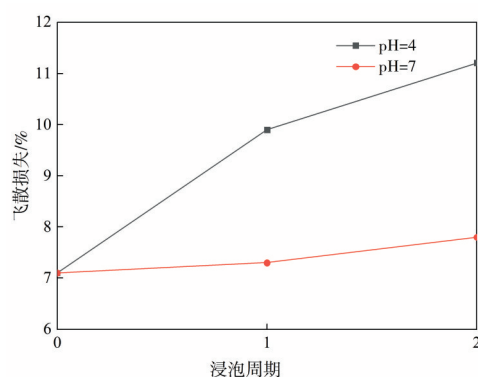


图10 不同浸泡周期下11%空隙率BK-7飞散损失

Fig. 10 Fly-apart loss BK-7 with 11% porosity under different immersion cycles

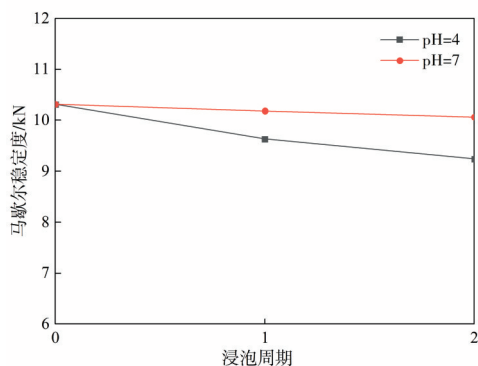


图11 不同浸泡周期下11%空隙率BK-7浸水马歇尔稳定度

Fig. 11 Immersion Marshall stability of BK-7 with 11% porosity under different immersion cycles

由图10和图11可以看出,①即使经过两个周期的酸雨浸泡,BK-7混合料的飞散损失和稳定度仍满足《排水沥青路面设计与施工技术规范》(JTG/T 3350-03—2020)的技术要求(飞散损失 $\leq 15\%$,稳定度 ≥ 5 kN);②经过两个浸泡循环周期后,BK-7混合料在pH=4溶液中的飞散损失远高于在pH=7溶液中的飞散损失。前者的飞散损失

是后者的1.44倍,同时前者的浸水马歇尔稳定度比后者的降低了8.2%。这是由于在酸雨的腐蚀下,沥青混合料骨料表面会被剥蚀,从而出现更多的空隙,使水分更加容易进入混合料内部,继而进一步损害了沥青与集料之间的黏结性能,使混合料的整体强度下降,马歇尔稳定度降低,也使得其在飞散试验过程中集料更容易剥落。朱俊材等^[32]指出,在沥青混合料中添加橡胶颗粒能有效减轻酸雨对混合料的腐蚀,这也是笔者后续研究的方向之一。

4 讨论

前文通过对比BK-7混合料与SMA-5、AC-5混合料的路用性能,发现空隙率为9%的BK-7混合料的抗车辙性能最优,其低温性能介于SMA-5和AC-5混合料的之间,其水稳定性最弱,但也仅比AC-5混合料的稍弱;与OGFC-5混合料相比,BK-7混合料的高低温性能和水稳定性具有绝对优势。综合来看,BK-7混合料的路用性能介于密级配沥青混合料和开级配沥青混合料的之间,并且更加靠近密级配沥青混合料。在对空隙率为11%的BK-7混合料进行模拟酸雨腐蚀试验后发现,该混合料的飞散损失和马歇尔稳定度仍然能够满足相应规范的技术要求,这在一定程度上说明其具有较优良的水稳定性和耐久性。

此外,虽然BK-7混合料的低温性能相较于密级配沥青混合料的有所不足,但若将其应用于冬季温度较高的华南地区,则可以避开其低温性能的缺陷。更重要的是,BK-7混合料的水稳定性远高于SMA-5和AC-5混合料,其在抗滑性能和降噪性能方面大大优于SMA-5和AC-5混合料^[33];虽然BK-7混合料在抗滑、降噪性能方面不如OGFC-5混合料,但是综合考虑BK-7混合料在力学耐久性方面相对于OGFC-5混合料的巨大优势后,BK-7混合料在气温相对较高且有降噪需求的地区,将具有更大的工程价值。

5 结论

1) 与传统级配曲线的关键筛孔相比,BK-7混合料增加了7 mm的筛孔,该级配增强了混合料的

骨架结构,提高了混合料的高温性能,这也是空隙率为9%的BK-7沥青混合料高温性能具有绝对优势的主要原因。

2) 采用“常规SBS改性沥青+纤维+增加7 mm筛孔”这一设计方案设计出的BK-7混合料具有优良的路用性能,且适用于对低温性能要求不高的南方地区。

本研究仅对BK-7混合料开展了室内试验分析,后续还需要经过工程实践进一步验证其力学性能和表面功能性。

[参考文献]

- [1] 虞将苗,杨倪坤,于华洋.道路高性能沥青超薄磨耗层技术研究与应用现状[J].中南大学学报(自然科学版),2021,52(7):2287-2298. DOI: 10.11817/j.issn.1672-7207.2021.07.016.
YU Jiangmiao, YANG Nikun, YU Huayang. Research and application status of high-performance asphalt ultra-thin wearing layer technology [J]. Journal of Central South University (Science and Technology), 2021, 52(7): 2287-2298. DOI: 10.11817/j.issn.1672-7207.2021.07.016.
- [2] CHAN S, LANE B, KAZMIEROWSKI T, et al. Pavement preservation: a solution for sustainability [J]. Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board, 2011, 2235(1): 36-42. DOI: 10.3141/2235-05.
- [3] HU M J, LI L H, PENG F X. Laboratory investigation of OGFC-5 porous asphalt ultra-thin wearing course [J]. Construction and Building Materials, 2019, 219: 101-110. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2019.04.205.
- [4] JAMES R, COOLEY L, BUCHANAN S. Development of mix design criteria for 4.75-mm superpave® mixes [J]. Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board, 2003, 1819(1): 125-133. DOI: 10.3141/1819b-16.
- [5] LIU J X, WEI S C, LING Y W, et al. Research review on the key technology of preventive maintenance: the durability of 4.75 mm NMAS stone mastic asphalt (SMA-5) ultra-thin overlay [J]. Journal of Physics: Conference Series, 2021, 2009(1): 012013. DOI: 10.1088/1742-6596/2009/1/012013.
- [6] 《中国公路学报》编辑部.中国路面工程学术研究综述·2020[J].中国公路学报,2020,33(10):1-66. DOI: 10.19721/j.cnki.1001-7372.2020.10.001.
Editorial Department of China Journal of Highway and Transport. Review on China's pavement engineering research·2020 [J]. China Journal of Highway and Transport, 2020, 33(10): 1-66. DOI: 10.19721/j.cnki.1001-7372.2020.10.001.

- [7] YANG R H, ZHANG C, ZHOU Q C, et al. Study on application of novachip ultra-thin layer[J]. E3S Web of Conferences, 2021, 236: 02032. DOI: 10.1051/e3sconf/202123602032.
- [8] 李运华, 李珍, 原华. 基于Novachip超薄磨耗层的高速公路沥青路面养护技术应用研究[J]. 公路工程, 2019, 44(5): 156-161. DOI: 10.19782/j.cnki.1674-0610.2019.05.030.
- LI Yunhua, LI Zhen, YUAN Hua. Research on maintenance technology of expressway asphalt pavement based on Novachip ultra-thin wear layer[J]. Highway Engineering, 2019, 44(5): 156-161. DOI: 10.19782/j.cnki.1674-0610.2019.05.030.
- [9] LI M L, LU H Z, LI J, et al. Performance study and application of porous ultra-thin wearing course for asphalt pavement maintenance [J]. IOP Conference Series: Materials Science and Engineering, 2021, 1075(1): 012014. DOI: 10.1088/1757-899x/1075/1/012014.
- [10] CUI W T, WU K H, CAI X, et al. Optimizing gradation design for ultra-thin wearing course asphalt [J]. Materials, 2020, 13(1): 189. DOI: 10.3390/ma13010189.
- [11] 姚文霞. 废胶粉与废塑料复合改性沥青混合料性能研究[J]. 交通科学与工程, 2021, 37(2): 8-13. DOI: 10.16544/j.cnki.cn43-1494/u.2021.02.002.
- YAO Wenxia. Performance study of waste tire rubber and waste plastic composite modified asphalt [J]. Journal of Transport Science and Engineering, 2021, 37(2): 8-13. DOI: 10.16544/j.cnki.cn43-1494/u.2021.02.002.
- [12] 徐茂震, 刘金景, 李文志, 等. SBS改性沥青性能影响因素研究[J]. 化工新型材料, 2015, 43(1): 169-172.
- XU Maozhen, LIU Jinjing, LI Wenzhi, et al. Study on the influencing factors of SBS modified asphalt performance [J]. New Chemical Materials, 2015, 43(1): 169-172.
- [13] WANG T, WEI X L, ZHANG D, et al. Evaluation for low temperature performance of SBS modified asphalt by dynamic shear rheometer method [J]. Buildings, 2021, 11(9): 408. DOI: 10.3390/buildings11090408.
- [14] 王枫成. 多因素影响下苯乙烯-丁二烯-苯乙烯嵌段共聚物改性沥青性能分析[J]. 化工新型材料, 2020, 48(3): 250-253. DOI: 10.19817/j.cnki.issn1006-3536.2020.03.056.
- WANG Fengcheng. Influence on multi-factor on property of SBS modified asphalt [J]. New Chemical Materials, 2020, 48(3): 250-253. DOI: 10.19817/j.cnki.issn1006-3536.2020.03.056.
- [15] 孙春阳, 曲恒辉, 张圣涛, 等. 不同改性剂改性基质沥青性能试验[J]. 长沙理工大学学报(自然科学版), 2019, 16(2): 28-35. DOI: 10.3969/j.issn.1672-9331.2019.02.006.
- SUN Chunyang, QU Henghui, ZHANG Shengtao, et al. Experimental study on properties of asphalt modified by different modifiers [J]. Journal of Changsha University of Science & Technology (Natural Science), 2019, 16(2): 28-35. DOI: 10.3969/j.issn.1672-9331.2019.02.006.
- [16] 成子桥, 盛峰, 侯利军, 等. 玄武岩纤维掺量对大空隙沥青混合料路用性能的影响[J]. 材料科学与工程学报, 2021, 39(5): 736-744. DOI: 10.14136/j.cnki.issn1673-2812.2021.05.005.
- CHENG Ziqiao, SHENG Feng, HOU Lijun, et al. Effect of basalt fiber content on the road performance of large-void asphalt mixture [J]. Journal of Materials Science and Engineering, 2021, 39(5): 736-744. DOI: 10.14136/j.cnki.issn1673-2812.2021.05.005.
- [17] 王国方, 李波, 肖鹏, 等. 玄武岩纤维再生沥青混合料抗裂性能分析[J]. 扬州大学学报(自然科学版), 2021, 24(3): 69-73. DOI: 10.19411/j.1007-824x.2021.03.012.
- WANG Guofang, LI Bo, XIAO Peng, et al. Analysis of anti-cracking performance of basalt fiber reclaimed asphalt mixture [J]. Journal of Yangzhou University (Natural Science Edition), 2021, 24(3): 69-73. DOI: 10.19411/j.1007-824x.2021.03.012.
- [18] 沈钱超. 玄武岩纤维沥青路面超薄磨耗层性能试验研究[D]. 扬州: 扬州大学, 2021. DOI: 10.27441/d.cnki.gyzdu.2021.000551.
- SHEN Qianchao. Experimental research on the performance of basalt fiber asphalt pavement ultra-thin wearing layer [D]. Yangzhou: Yangzhou University, 2021. DOI: 10.27441/d.cnki.gyzdu.2021.000551.
- [19] 雷江, 罗友鸿, 裴鑫雨. 玄武岩纤维提升温拌再生混合料路用性能研究[J]. 公路与汽运, 2021(6): 92-94. DOI: 10.3969/j.issn.1671-2668.2021.06.022.
- LEI Jiang, LUO Youhong, PEI Xinyu. Study on road performance of basalt fiber reinforced warm mix recycled mixture [J]. Highways & Automotive Applications, 2021(6): 92-94. DOI: 10.3969/j.issn.1671-2668.2021.06.022.
- [20] 高颖, 王伟赫, 朱玉凤, 等. 玻璃纤维改性相变沥青混合料路用性能[J]. 科学技术与工程, 2021, 21(27): 11790-11795. DOI: 10.3969/j.issn.1671-1815.2021.27.044.
- GAO Ying, WANG Weihe, ZHU Yufeng, et al. Road performance of glass fiber modified phase change asphalt mixture [J]. Science Technology and Engineering, 2021, 21(27): 11790-11795. DOI: 10.3969/j.issn.1671-1815.2021.27.044.

- [21] 蒋梦雅, 刘颀楠, 卢峰. 玻璃纤维对沥青混合料路用性能的影响[J]. 公路, 2021, 66(7): 63-69.
JIANG Mengya, LIU Qi'nan, LU Feng. Influence of glass fiber mixture on road performance[J]. Highway, 2021, 66(7): 63-69.
- [22] 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.
- [23] 薛国强. 超薄磨耗层SMA-5沥青混合料的设计及性能研究[J]. 公路交通科技, 2009, 26(10): 18-21. DOI: 10.3969/j.issn.1002-0268.2009.10.004.
XUE Guoqiang. Study on design method and road performances of ultra-thin wearing course SMA-5 asphalt mixture [J]. Journal of Highway and Transportation Research and Development, 2009, 26(10): 18-21. DOI: 10.3969/j.issn.1002-0268.2009.10.004.
- [24] 王笑风. 细粒式SMA-5级配组成设计研究[J]. 公路, 2011(5): 171-177.
WANG Xiaofeng. A study on gradation design of fine particle SMA[J]. Highway, 2011(5): 171-177.
- [25] 石福周, 吴佳云, 贾小军, 等. 水性环氧树脂乳化沥青对开级配抗滑磨耗层性能的影响[J]. 筑路机械与施工机械化, 2020, 37(1): 66-70, 76. DOI: 10.3969/j.issn.1000-033X.2020.01.014.
SHI Fuzhou, WU Jiayun, JIA Xiaojun, et al. Effect of waterborne epoxy emulsified asphalt on performance of open-graded skid-resistant wearing course [J]. Road Machinery & Construction Mechanization, 2020, 37(1): 66-70, 76. DOI: 10.3969/j.issn.1000-033X.2020.01.014.
- [26] 陈虹颖, 赵新锋, 何志东, 等. 2000—2016年珠海市酸雨变化特征及酸雨概念模型[J]. 环境科学学报, 2020, 40(6): 1998-2006. DOI: 10.13671/j.hjkxb.2020.0086.
CHEN Hongying, ZHAO Xinfeng, HE Zhidong, et al. Variation characteristics and concept model of acid rain in Zhuhai City during 2000—2016[J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 2020, 40(6): 1998-2006. DOI: 10.13671/j.hjkxb.2020.0086.
- [27] 张倩, 李艳丽, 贾晓军. 酸雨对沥青混合料侵蚀作用的试验模拟[J]. 西安建筑科技大学学报(自然科学版), 2005, 37(1): 86-89. DOI: 10.3969/j.issn.1006-7930.2005.01.018.
ZHANG Qian, LI Yanli, JIA Xiaojun. Simulation for erosion effect of acid rain on asphalt mixtures [J]. Journal of Xi'an University of Architecture & Technology (Natural Science Edition), 2005, 37(1): 86-89. DOI: 10.3969/j.issn.1006-7930.2005.01.018.
- [28] 冯新军, 唐雄, 熊旭. 酸雨对沥青混合料路用性能的影响研究[J]. 武汉理工大学学报, 2015, 37(6): 39-43. DOI: 10.3963/j.issn.1671-4431.2015.06.008.
FENG Xinjun, TANG Xiong, XIONG Xu. Study on influence of acid rain on pavement performances of asphalt mixtures [J]. Journal of Wuhan University of Technology, 2015, 37(6): 39-43. DOI: 10.3963/j.issn.1671-4431.2015.06.008.
- [29] 周兴林, 刘万康, 冉茂平, 等. 酸雨对石灰岩沥青混合料抗滑性的影响[J]. 公路, 2016, 61(8): 26-31.
ZHOU Xinglin, LIU Wankang, RAN Maoping, et al. Effect of acid rain on skid resistance of limestone asphalt mixture[J]. Highway, 2016, 61(8): 26-31.
- [30] 马万, 李志刚. 酸雨侵蚀老化对直投式干法橡胶沥青混合料的影响[J]. 公路, 2018, 63(10): 43-47.
MA Wan, LI Zhigang. Effect of acid rain erosion aging on direct-injection dry rubber asphalt mixture [J]. Highway, 2018, 63(10): 43-47.
- [31] 王晓鹏. 酸雨对沥青及沥青混合料的侵蚀破坏机理研究[D]. 长沙: 长沙理工大学, 2014.
WANG Xiaopeng. The research on the erosion damage mechanism of the acid rain on the asphalt and asphalt mixture [D]. Changsha: Changsha University of Science & Technology, 2014.
- [32] 朱俊材, 蒋康, 吴超凡, 等. 环氧沥青混合料耐酸雨侵蚀性能及作用机理研究[J]. 化工新型材料, 2021, 49(11): 176-182. DOI: 10.19817/j.cnki.issn1006-3536.2021.11.037.
ZHU Juncui, JIANG Kang, WU Chaofan, et al. Study on acid rain resistance and mechanism of epoxy asphalt mixture[J]. New Chemical Materials, 2021, 49(11): 176-182. DOI: 10.19817/j.cnki.issn1006-3536.2021.11.037.
- [33] 周兴林, 刘万康, 肖旺新, 等. 沥青混合料体积指标对沥青路面抗滑性能的影响[J]. 交通运输工程学报, 2017, 17(6): 1-9. DOI: 10.3969/j.issn.1671-1637.2017.06.001.
ZHOU Xinglin, LIU Wankang, XIAO Wangxin, et al. Influence of asphalt mixture volume indexes on asphalt pavement skid resistance performance [J]. Journal of Traffic and Transportation Engineering, 2017, 17(6): 1-9. DOI: 10.3969/j.issn.1671-1637.2017.06.001.

Composition design of semi-open grade SBS modified asphalt mixture BK-7

GUAN Hongxin¹, ZHOU Zhilin¹, QIN Wanju^{1,2}, LI Bing³, YANG Tao⁴

(1. School of Traffic and Transportation Engineering, Changsha University of Science & Technology, Changsha 410114, China; 2. Guangxi Zhuang Autonomous Region Highway Development Center, Nanning 530029, China; 3. Foshan Highway & Bridge Construction Co., Ltd., Foshan 528042, China; 4. HNCEG Communications Construction Co., Ltd., Changsha 410004, China)

Abstract: [Purposes] This work aims to demonstrate the semi-open graded asphalt mixture BK-7 with a nominal maximum particle size of 7 mm. [Methods] In this paper, the mineral composition formulation of BK-7 mixture was designed. The amount of SBS modified asphalt was determined by Schellenberg leakage test and Kantabough flying test when the fiber content was 0.4%. Uniaxial penetration test, low temperature bending test and Marshall stability test of BK-7 mixture with 9%, 11% and 13% porosity were carried out, and the corresponding properties of BK-7 mixture were compared with those of SMA-5, AC-5 and OGFC-5. At the same time, flying and Marshall tests were carried out on BK-7 mixture with 11% porosity soaked in acid solution. [Findings] Among the three kinds of BK-7 mixture, the BK-7 mixture with 9% porosity has the best road performance and the best rutting resistance, and its low temperature crack resistance and water stability are comparable to those of SMA-5 and AC-5 asphalt mixture. After soaking in acid rain solution with pH=4 for 2 cycles ("Soaking for 7 days, natural drying for 1 day" for 1 cycle), the Marshall stability of BK-7 mixture with 11% porosity and the flight loss of Fort Kenta could meet the corresponding specification requirements. [Conclusions] The road performance of BK-7 asphalt mixture with 9% porosity of SBS modified asphalt mixed with fiber has comparative advantages, and it has certain engineering application value in South China where exhibits a high-temperature climate throughout a year.

Key words: road engineering; SBS modified asphalt; fiber; semi-open gradation; road performance

Manuscript received: 2022-04-17; **revised:** 2022-04-28; **accepted:** 2022-04-29

Foundation item: Project (52078062) supported by the National Natural Science Foundation of China; Project (2020JJ4604) supported by Natural Science Foundation of Hunan Province; Project (B201806) supported by Hunan Provincial Transportation Local Standards Revision Project

Corresponding author: GUAN Hongxin (1974—) (ORCID: 0000-0001-7264-7469), male, professor, research interest: pavement structure and materials. E-mail: ghx_cs@csust.edu.cn

(责任编辑:刘平;校对:石月珍;英文编辑:田湘)