

# 东北季冻区透水性沥青混合料路用性能验证

于保阳<sup>1,2</sup>, 高超<sup>1</sup>, 张荣华<sup>1</sup>, 郭凯<sup>1</sup>

(1. 沈阳建筑大学交通工程学院, 辽宁 沈阳 110168; 2. 大连海事大学交通运输工程学院, 辽宁 大连 116026)

**摘要** 目的 为将透水性沥青混凝土路面应用于东北季冻区, 对大油石比下的透水沥青混合料进行高温、低温、水稳定性能和渗水系数的研究. 方法 采用一种新的计算方法确定最佳沥青用量, 以动抗压强度评价开级配混合料的高温性能, 改进了冻融劈裂的试验条件, 同时进行了小梁低温弯曲试验. 结果 大油石比 5.8% 时动抗压强度较最佳油石比 5.3% 下降了 6%, 抗水稳定性呈现逐步上升趋势, 大油石比 5.8% 最大弯拉应变较最佳油石比 5.3% 提高了 80%. 结论 大油石比下的透水沥青混合料的高温性能稍有下降, 但低温性能和水稳定性能明显提高, 更适合应用于东北季冻区.

**关键词** 季冻区; 透水沥青混合料; 大油石比; 路用性能

中图分类号 TU528.42; U416.2

文献标志码 A

## Road Performance of Permeable Asphalt Mixture in the Northeast Seasonal Frozen Area

YU Baoyang<sup>1,2</sup>, GAO Chao<sup>1</sup>, ZHANG Ronghua<sup>1</sup>, GUO Kai<sup>1</sup>

(1. School of Transportation Engineering, Shenyang Jianzhu University, Shenyang, China, 110168; 2. College of Transportation Engineering, Dalian Maritime University, Dalian, China, 116026)

**Abstract:** In order to apply the permeable asphalt concrete pavement in the northeast seasonal frozen area, the performance of permeable asphalt mixture under the "large oil/rock ratio" was studied. A new calculation formula was used to determine the optimum asphalt dosage. Dynamic compressive strength was proposed to evaluate the high temperature performance of the open graded mixture. The test conditions of freeze-thaw splitting were improved, and the bending test of trabeculae beam was carried out under low temperature. The results show that the dynamic compressive strength of the 5.6% oil/rock ratio is lower than that of the 5.3% oil/rock ratio. The water-resistant stability shows a gradual upward trend. The maximum bending strain of the 5.8% oil/rock ratio is 80% higher than that of the 5.3% oil/rock ratio. The high temperature performance of the permeable asphalt mixture under the large oil/rock ratio is slightly decreased, but the low temperature performance and water stability can be significantly improved, which is suitable in the northeast seasonal frozen area.

**Key words:** seasonal freezing area; permeable asphalt mixture; large oil/rock ratio; road performance

收稿日期: 2018-11-28

基金项目: 国家自然科学基金项目(51608334)

作者简介: 于保阳(1980—), 男, 副教授, 博士研究生, 主要从事路面结构设计及道路检测方面研究.

透水路面具有良好的排水、净水性能,可防止城市内涝、净化水质,有良好的抗滑性能,可提高行车安全系数。透水路面通过减弱车辆轮胎和道路表面的空气泵作用可减弱噪声污染<sup>[1-5]</sup>。东北季冻区的夏天温度为 30 ℃ 左右,极端天气下温度接近 40 ℃;冬天温度平均为 - 16.2 ℃,极端天气下温度达 - 37 ℃,冰冻期长。这种大温差、温度低的气候特点导致透水性沥青试验路在东北季冻区的铺筑和运营过程中都会面临施工技术难、低温开裂和耐久性差等问题<sup>[6]</sup>。我国南方地区目前已有很多透水性沥青试验路的铺筑,在东北季冻区鲜有透水性沥青路面的铺筑。笔者通过研究高黏改性沥青的性能指标,进行配合比设计,从而验证透水性沥青混合料的路用性能。

1 透水沥青混合料配合比设计

1.1 沥青原材料及技术指标

(1)高黏改性剂。选用国产 OLB - 1 型高黏改性剂,外观为浅黄色半透明半球状颗粒,由纳米级高分散硫化苯乙烯丁二烯聚合物、增黏剂和增塑剂等多种聚合物复合而成。通过对基质沥青的增黏、加筋、填充、提高弹性恢复和降低温度敏感性等多重作用而改善沥青的综合性能。

(2)基质沥青。《公路沥青路面施工技术规范》(JTG F40—2017)规定,对冬季寒冷地区或交通量小的地区宜选用稠度小、低温延度大的沥青,对温度日温差、年温差大的地区应该选用针入度指数大的沥青。北方季冻区属于夏热、冬寒和湿润区,且温差大、低温持续时

间长,所以基质沥青选用高标号的辽河 90#基质沥青,基质沥青技术性能指标如表 1 所示。

表 1 辽河 90#基质沥青技术性能指标

Table 1 Technical performance index of Liaohe 90# base asphalt

技术指标来源	25 ℃ 针入度/0.1 mm	软化点/℃	10 ℃ 延度/cm	60 ℃ 动力黏度/(Pa·s)
试验结果	85.5	48.3	>15	276.5
国标限值	80~100	≥43	≥15	≥160

混合料中的结合料采用由高黏改性剂和基质沥青以 13:87 的质量比例高速剪切配制而成的高黏改性沥青,其中软化点值为 102.1 ℃,60 ℃ 黏度值为 46 210 Pa·s,根据低温弯折梁试验(BBR)、5 ℃ 延度及 PG 分级确定。笔者选用的高黏改性沥青低温抗开裂性能很好,PG 分级满足北方季冻区的气候条件,且低温等级温度为 - 25.91 ℃,均大于北方季冻区的哈尔滨、长春、沈阳城市的日均最低温度,所以选用的高黏改性沥青适用于北方季冻区。北方季冻区气候条件及 PG 分级如表 2 所示。高黏改性沥青的具体指标如表 3 所示。

表 2 北方季冻区气候条件

Table 2 Climatic conditions in northern seasonal freezing zone

城市	最热 7 d 平均温度/℃	日均最低温度/℃	年平均降水量/mm	PG 高/低温分级
哈尔滨	30.4	-24	536.6	58/28
长春	30.8	-20	587.0	58/28
沈阳	31.1	-17	716.7	58/28

表 3 高黏改性沥青技术性能指标

Table 3 Technical performance Index of high viscosity modified asphalt

技术指标来源	软化点/℃	25 ℃ 针入度/mm	5 ℃ 延度/cm	60 ℃ 黏度/(Pa·s)	135℃ 黏度/(Pa·s)	BBR		
						蠕变劲度值/MPa	蠕变劲度变化率	低温 PG 分级
试验结果	102.1	53.4	34.7	46 210	2.4	126	0.36	PG - 28
国标限值	> 80	> 40	≥ 30	> 20 000	< 3.0	—	—	—

### 1.2 矿料级配的选择

根据北方季冻区典型城市的年平均降水量,拟取沥青混合料目标空隙率为20%。吴金航等<sup>[7-9]</sup>为准确选取合适的级配,通过正交试验和后退法变量筛选技术对影响空隙率的因素进行分析,并且建立了目标空隙率与关键筛孔通过率两者的回归方程:

$$y = 28.724 + 0.040P_{13.2} - 0.677P_{2.36} - 0.878P_{0.075}, (R^2 = 0.879); \quad (1)$$

$$y = 32.470 - 0.677P_{2.36} - 0.878P_{0.075}, (R^2 = 0.876); \quad (2)$$

$$y = 27.644 - 0.677P_{2.36}, (R^2 = 0.874). \quad (3)$$

式中: $y$ 为混合料空隙率,%; $P_{13.2}$ 为13.2 mm筛孔通过率,%; $P_{2.36}$ 为2.36 mm筛孔通过率,%; $P_{0.075}$ 为0.075 mm筛孔通过率%。

后退法变量筛选技术得到的方程中, $P_{2.36}$ 最后退出回归方程式,根据“自变量退出方程越早表明该变量对因变量 $y$ 的影响最小”的规则可知2.36 mm筛孔通过率对空隙率影响最大。为了快速且准确地确定目标空隙率为20%的级配曲线,采取以2.36 mm筛孔通过率为设计控制点,利用式(3)在空隙率为 $(20 \pm 1)\%$ 范围内求出2.36 mm筛孔通过率的区间,令 $y_1 = 19\%$ ,解方程组得 $P_{2.36} = 12.8\%$ ;令 $y_2 = 21\%$ ,解方程组得 $P_{2.36} = 9.8\%$ 。计算得混合料空隙率为20%时,2.36 mm筛孔通过率9.8%~12.8%适宜,根据《透水性沥青路面技术规程》(CJJ/T190—2012)和《公路沥青路面施工技术规范》(JTG F40—2017)中要求和集料筛孔通过率的具体情况确定级配<sup>[10-12]</sup>。

### 1.3 最佳沥青用量的确定

国内不同规范对飞散、析漏损失限值的规定相差很大,故针对东北季冻区气候特点,选取飞散损失指标 $\leq 15\%$ ,析漏损失指标 $\leq 0.3\%$ 。确定最佳沥青用量时对试验数据和图形处理的方法不尽相同,所得结果偏差很大,笔者采用蒋玮等<sup>[13-14]</sup>提出的新方法进行计算。

$$OAC = OAC_{\min} + 0.75 (OAC_{\max} - OAC_{\min}). \quad (4)$$

式中: $OAC$ 为最佳沥青用量,%; $OAC_{\min}$ 为据飞散损失确定的最小沥青用量,%; $OAC_{\max}$ 为据析漏损失确定的最大沥青用量,%。

级配曲线如图1所示。

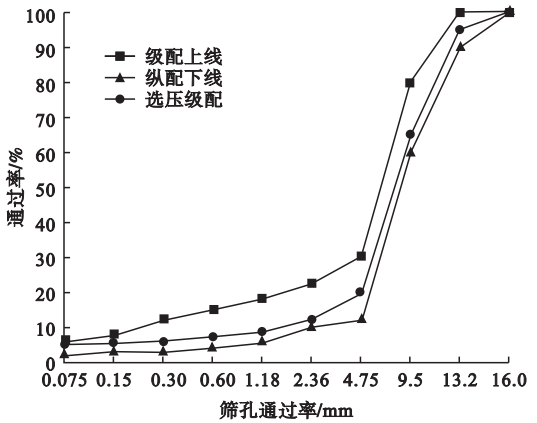


图1 级配曲线图

Fig. 1 grading diagram

对油石比为4.4%、5.0%、5.3%和5.6%的透水沥青混合料进行试件的制作,并进行马歇尔稳定性和流值的测试。结果表明油石比大于4.4%时马歇尔稳定度均大于3.5 kN,满足《透水性沥青路面技术规程》(CJJ/T190—2012)的要求。马歇尔稳定性和流值试验结果如表4所示。

表4 马歇尔稳定性和流值试验结果

Table 4 Marshall stability and flow test data			
油石比/%	空隙率/%	马歇尔稳定度/kN	流值/mm
4.4	22.35	3.32	1.86
5.0	20.91	3.85	2.44
5.3	20.23	4.00	2.97
5.6	19.54	3.67	3.08

对油石比4.4%、4.7%、5.0%、5.3%和5.6%进行飞散试验和析漏试验,具体试验过程结果如图2所示,飞散、析漏损失变化趋势如图3所示。从图3(a)可知,油石比在4.6%~5.6%内飞散损失均满足《透水性沥青路面技术规程》(CJJ/T190—2012)要求,随着油石比增大,混合料的飞散损失先迅速减小后

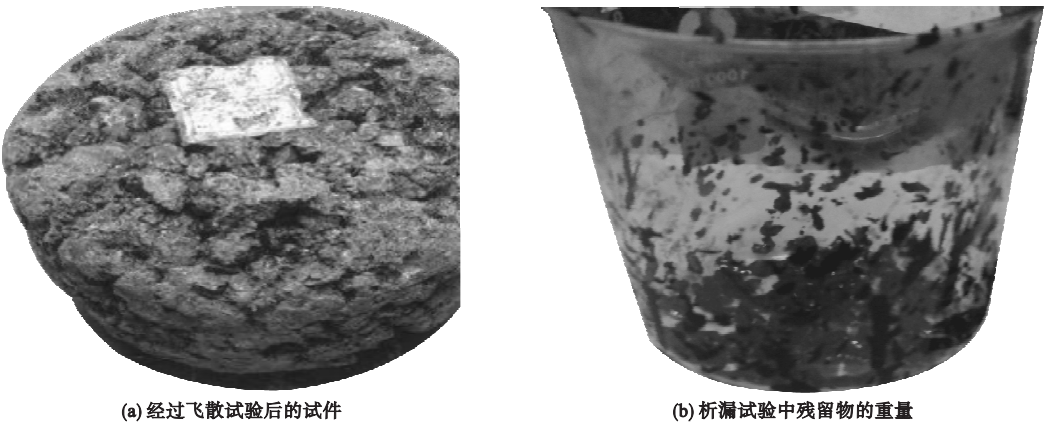


图2 飞散、析漏试验示意图

Fig. 2 Schematic diagram of fly-out and leak-out test

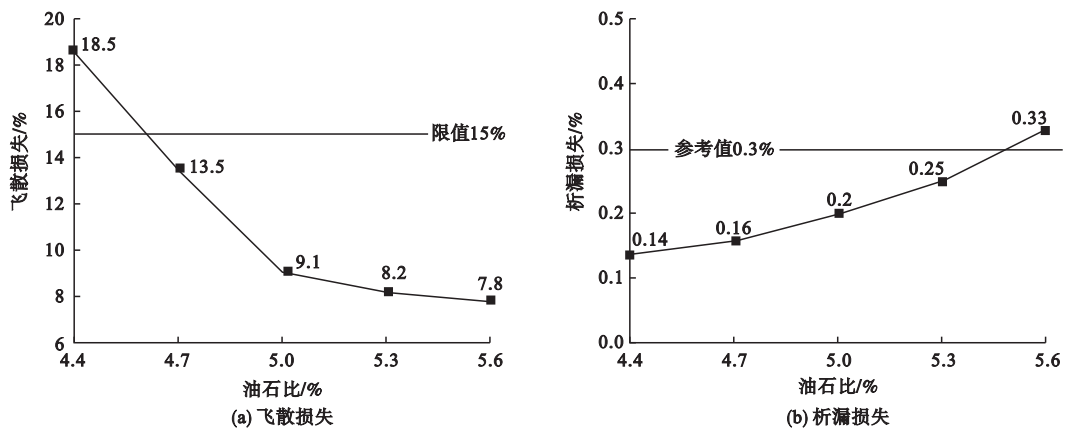


图3 飞散、析漏损失变化趋势

Fig. 3 Change trend of dispersion and leakage loss

趋于平缓,可知当沥青膜逐渐变大后混合料的飞散损失值越小,即抗飞散能力越来越好,当膜厚达到一定厚度时继续增加沥青膜的厚度对提高抗飞散能力的影响不大.当油石比小于4.6%时,混合料的飞散损失值不满足《透水性沥青路面技术规程》(CJJ/T190—2012)要求.从图3(b)可知,油石比在4.4%~5.5%内析漏损失均满足《透水性沥青路面技术规程》(CJJ/T190—2012)小于限值0.3%的要求,当油石比为5.6%时析漏损失达到了0.33%,超过了《透水性沥青路面技术规程》(CJJ/T190—2012)要求.图3(b)中没有明显拐点,不能用作图法得出最佳沥青用量.笔者采用式(4)计算得出最佳沥青用量为5.3%.

透水沥青混合料用在温差大且冬季温度长时间处于0℃以下的东北季冻区,对低温性能、适应大温差性能有更高的要求.郭勇<sup>[15]</sup>在参加纤维的情况下以析漏损失限值为0.8%进行试验路的铺筑,路用性能良好.故在最佳沥青用量5.3%的基础上对大油石比5.6%、5.8%进行试件的制作,并未出现沥青流淌、试件存在大油斑的情况.

## 2 透水沥青混合料路用性能分析

### 2.1 高温性能

透水沥青混合料的高温稳定性主要由粗集料颗粒间的骨架嵌挤作用提供,高温抗变形能力好.结合料为高黏改性沥青,温度偏高

时黏结力仍然很大,所以对混合料的高温稳定性影响较大。

《公路工程沥青及沥青混合料试验规程》(JTJ E20—2011)规定,取45 min和60 min时车辙的变形值计算动稳定度值,这种方法对密级配混合料适用性好。透水沥青混合料试件成型的初期粗集料间就为点-点接触,嵌挤能力非常好,相同条件下开级配混合料较密级配变形小很多,在试验过程中发现开级配混合料在60 min内的车辙深度的变化呈现两极分化的趋势,即前20 min车辙深度的变化明显,后15 min车辙深度几乎无变化,此时粗集料充分嵌挤形成骨架抵抗变形,所以评价透水沥青混合料仅选取后期15 min内变形并不合适,所以对于开级配混合料选用整个60 min试验过程的变形值计算更合理。

动抗压强度即产生单位面积累积的永久变形量所需要施加的动压力的大小,此方法计算时兼顾行车时的速度、累积变形量和最大永久变形量等多种影响因素<sup>[16]</sup>。

$$\rho_{DCS} = \rho_{DP} / S_0,$$

(5)

$$\rho_{DP} = t_{60} NPC_1 C_2 / d_{60}.$$

(6)

式中: $\rho_{DCS}$ 为动抗压强度,MPa/s; $\rho_{DP}$ 为动压力,每产生1 mm车辙深所需的荷载量,N/mm; $S_0$ 为累积永久变形量,mm·s; $N$ 为试验轮往返碾压速度,次/min; $P$ 为试验轮碾压时施加荷载,N; $C_1$ 为试验机类型修正系数,曲柄连杆驱动试件的变速行走方式为1.0; $C_2$ 为试件系数。

对油石比为4.4%、5.0%和5.3%以及大油石比5.6%和5.8%的混合料进行车辙板的制作,试验得出数据后进行动稳定性和动抗压强度的计算,并对车辙深度进行分析。试验结果如图4所示。从图4(a)可知,当油石比从4.4%增加到最佳沥青用量5.3%时混合料的动稳定度呈线性上升的趋势,说明油石比过小时,沥青膜厚度太小几乎不起黏结作用,对高温性能的贡献非常小;油石比从

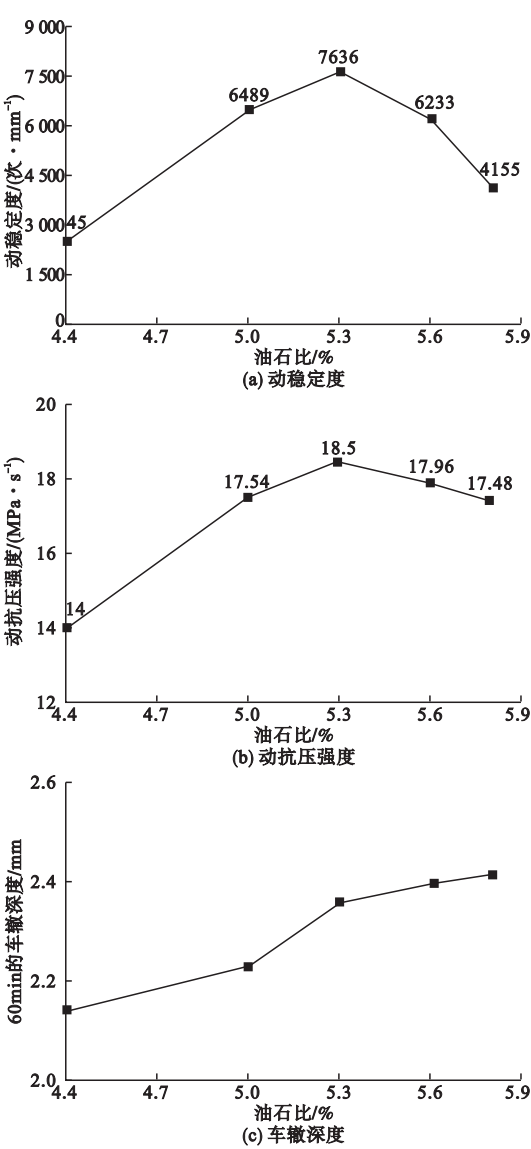


图4 混合料高温性能变化趋势

Fig. 4 High-temperature performance of mixture

5.3%增加到5.8%时混合料的动稳定度呈抛物线下降的趋势,说明随着油石比的增加结构沥青膜的厚度不再变化,对高温性能的贡献不再增加,此时自由沥青逐渐增加,但自由沥青对高温性能有不利的影响,当油石比增加了0.5%后动稳定度迅速下降;当油石比为5.8%时,动稳定度为4 155次/mm,满足《透水性沥青路面技术规程》(CJJ/T190—2012)要求。从图4(b)可知,当油石比从4.4%增加到5.3%时混合料的动抗压强度呈线性上升的趋势;油石比从5.3%增加到



5.8%时混合料的动抗压强度呈缓慢下降的趋势,说明随着油石比的增加结构沥青膜的厚度不再变化,对高温性能的贡献不再增加,此时自由沥青逐渐增加,但自由沥青对高温性能有不利的影响,这一点与动稳定度的分析有明显不同.从图4(c)可知,对60 min的车辙深度进行分析,发现油石比从5.3%增加到5.8%时混合料的车辙深度下降0.055 mm,变化非常小,间接说明油石比从5.3%增加到5.8%时混合料的高温性能降低的不明显,这一点和动抗压强度的分析结果一致,故在评价开级配沥青混合料的高温性能时,动抗压强度比动稳定度有更好的适用性.

2.2 水稳定性

沥青混合料的水稳定性采用冻融劈裂试验进行评价,针对东北季冻区的气候特点和透水沥青混合料大空隙的特点,改进试验条件.大孔隙结构使混合料与水接触的时间长,接触面积大.北方季冻区城市哈尔滨、长春和沈阳的年均降水量分别为536.5 mm、587.0 mm、716.7 mm,雨水量较大,属于湿润区,对透水沥青混合料的抗水损害要求更高.故改进的试验条件为:第1组试件按标准方法真空饱水15 min,然后试件浸入常温水中24 h(《透水性沥青路面技术规程》(CJJ/T190—2012)要求放入水中0.5 h),保证水能够充分进入混合料结构内部空隙,处于完全饱水状态<sup>[17-20]</sup>,在 $(-18 \pm 2)^{\circ}\text{C}$ 条件下冷冻16 h后取出放入60℃水浴中保温24 h.第2组试件常温放置.最后将两组试件放入25℃水中恒温2 h.

对油石比为4.4%、5.0%和5.3%以及大油石比5.6%和5.8%的透水沥青混合料进行改进的冻融劈裂试验,研究不同油石比下混合料的水稳定性.试验结果如图5所示.从图5可知,随着油石比的增大冻融劈裂强度比不断增大,当油石比达到最佳沥青用量5.3%时冻融劈裂强度比已达到90.86%,大于《透水性沥青路面技术规程》(CJJ/T190—2012)要求值,说明沥青用量少时,沥青膜太薄,经历一次冻融循环的水损害之后,沥青自身性能和沥青与集料的黏附性能就迅速衰

减,不能保证路面性能,油石比为最佳沥青用量时沥青膜厚度达到合理值,抗水损害能力明显增强,经历一次冻融循环后性能衰减较小,满足《透水性沥青路面技术规程》(CJJ/T190—2012)要求;随着油石比的继续增大冻融劈裂强度比缓慢上升,油石比从5.3%增至5.8%后冻融劈裂强度比仅增加了0.42%,表明当沥青膜厚度超过合适值后对抗水损害能力的提高作用很小.

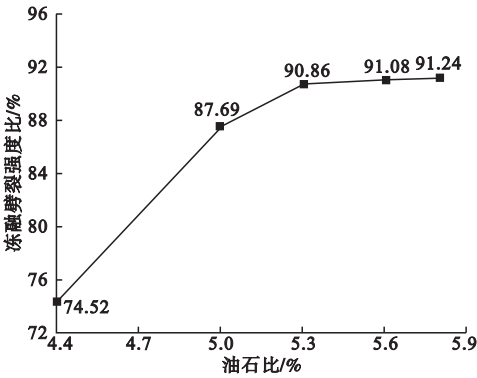


图 5 冻融劈裂强度比随油石比变化趋势

Fig. 5 Change of freeze-thaw splitting strength ratio with oil/rock ratio

2.3 低温性能

东北季冻区日温差最大可达到30℃,年温差最大可达到70℃,大温差下沥青的温缩很大,导致路面低温开裂现象明显,制约了透水性沥青混凝土在东北季冻区的应用.对不同油石比透水性沥青性混合料进行小梁低温弯曲试验.试验结果如图6所示.从图6可知,随着油石比的增大混合料抗弯拉强度和最大弯拉应变均不断增加,低温性能变好,当油石比从4.4%增加到最佳沥青用量5.3%时最大弯拉应变呈线性增长,增长幅度为56.1%;当油石比从5.3%增加到5.8%时最大弯拉应变先快速增加随后增幅减小,增长幅度平均为80.7%,远大于小油石比的增加幅度,说明当沥青用量在5.3%到5.8%时,沥青对改善低温性能占据最重要的位置,即增加沥青用量可以明显改善透水沥青混合料的低温性能.东北季冻区应用透水沥青混合料时沥青用量不应局限于规范中以析漏试验选取最大沥青用量的要求.

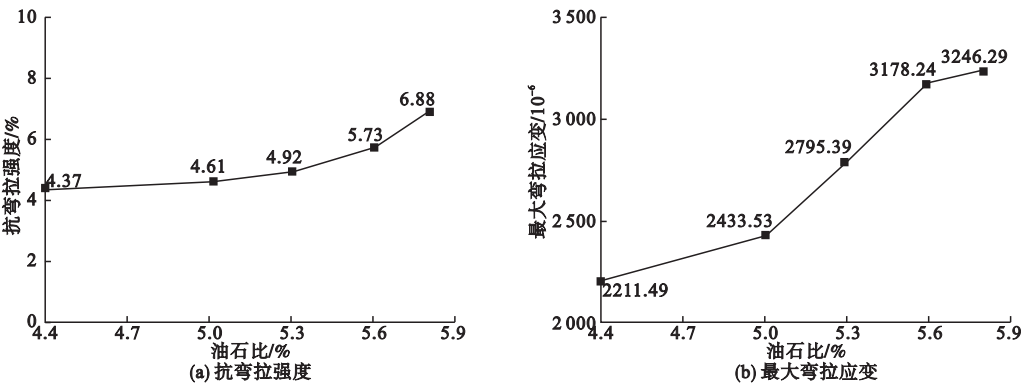


图6 小梁低温性能变化趋势图

Fig. 6 Low-temperature performance of trabecular

图7给出了相同级配不同油石比下混合料的空隙率大小值. 油石比为4.4%时空隙率为21.99%, 油石比为5.8%时空隙率为17.65%, 计算得出两组油石比下空隙率差为4.34%, 空隙部分在混合料处于低温时不提供任何帮助, 横截面积一定时, 空隙越大混合料低温性能将会越差; 且空隙部分还会存水、冻胀, 导致沥青和混合料出现损伤裂缝, 并逐渐扩展, 同时集料与沥青间的黏附性降低, 沥青膜最后将会脱落, 这一系列连锁反应严重降低集料、高黏改性沥青和集料与沥青间的黏附性在低温时发挥的作用.

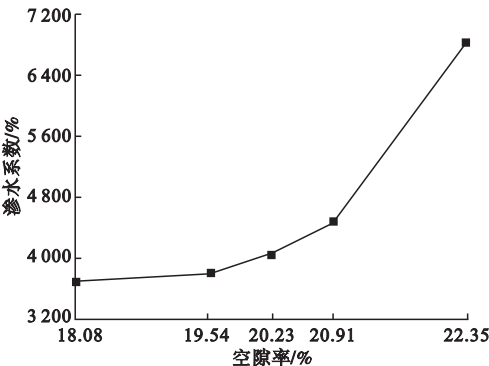


图8 渗水系数与空隙率关系

Fig. 8 Relationship between permeability coefficient and porosity

3 结 论

(1)通过对空隙率进行预估,快速准确得出目标空隙率的级配,避免了对多组备选级配进行大量试验后确定最佳级配的复杂操作;采用新的计算方法确定最佳沥青用量,同时采用大油石比制作试件未出现沥青流淌、大油斑的情况,在路用性能的试验过程中发现大油石比下的试件高温性能同样满足要求.

(2)确定混合料最佳沥青用量为5.3%,基于大油石比5.6%、5.8%的混合料进行路用性能试验.采用动抗压强度评价开级配沥青混合料高温性能效果更好;油石比5.8%时动抗压强度较油石比5.3%下降了6%,说明混合料高温性能有所损失;随着油石比的增加混合料的抗水稳定性呈现平稳上升趋势,抗水损害能力变强;随着油石比的增加混合料的低温性能大幅度增加,油石比5.8%时最大弯拉应变较油石比5.3%提高了

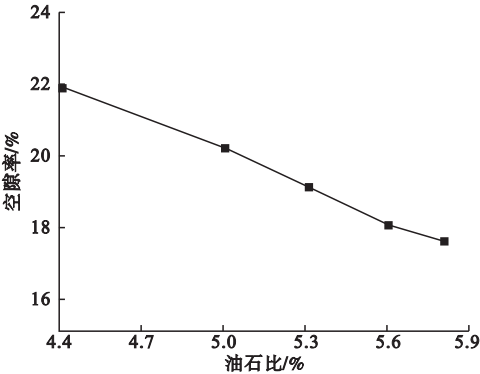


图7 混合料空隙率随油石比变化趋势图

Fig. 7 Change of void fraction of mixture with Oil / Stone ratio

2.4 渗水系数的测定

对油石比为4.4%、5.0%、5.3%、5.6%和5.8%的混合料进行车辙板的制作,养生成型后进行渗水系数的测定,结果表明渗水系数良好,均满足《透水性沥青路面技术规范》(CJJ/T190—2012)要求.渗水系数与空隙率关系如图8所示.

80%,混合料的低温抗开裂、抗冻胀性能变强,透水性沥青混合料在东北季冻区应用时可以保持良好的路用性能。

## 参考文献

- [1] 同卫刚.生态型透水沥青路面结构设计与性能研究[D].西安:长安大学,2015.  
(TONG Weigang. Structure design and study on the performance of eco-type asphalt pavement[D]. Xi'an:Chang'an University,2015.)
- [2] 沙爱民,蒋玮.环保型多孔路面材料设计理念与架构[J].中国公路学报,2018,31(9):1-6.  
(SHA Aimin,JIANG Wei. Design concept and structure of environmentally friendly porous pavement material[J]. China journal of highway and transport,2018,31(9):1-6.)
- [3] CHU L,FWA T F,TAN K H. Evaluation of wearing course mix designs on sound absorption improvement of porous asphalt pavement[J]. Construction and building materials,2017,141:402-409.
- [4] 邱欣,张敏江,薛亮,等.香港地区透水沥青路面路用性能研究[J].沈阳建筑大学学报(自然科学版),2005,21(3):204-207.  
(QIU Xin,ZHANG Minjiang,XUE Liang, et al. Study on road performance of pervious asphalt pavement in Hong Kong[J]. Journal of Shenyang architectural and civil engineering institute,2005,21(3):204-207.)
- [5] ASFOUR S,BEMARDIN F,TOUSSAINT E, et al. Hydrothermal modeling of porous pavement for its surface de-freezing[J]. Applied thermal engineering,2016,107:493-500.
- [6] 李冠杰.浅析透水铺装材料在严寒地区海绵城市建设中的应用与发展[J].建材与装饰,2018(37):55.  
(LI Guanjie. Application and development of permeable paving materials in sponge city construction in severe cold area[J]. Building materials and decoration,2018(37):55.)
- [7] 吴金航.排水沥青混合料关键性能研究[D].重庆:重庆交通大学,2012.  
(WU Jinhang. Key performance research of porous asphalt mixture [D]. Chongqing: Chongqing Jiaotong University,2012.)
- [8] SHIRINI B,IMANINA R. Performance evaluation of rubberized and SBS modified porous asphalt mixtures[J]. Construction and building materials,2016,107(4):165-171.
- [9] HSU T W,ChEN S C,HUNG K N. Performance evaluation of asphalt rubber in porous asphalt-concrete mixtures[J]. Journal of materials in civil engineering,2011,23(3):342-349.
- [10] HASSAN A,ABOUFOUL M,WU Y, et al. Effects of air voids content on thermal properties of asphalt mixtures[J]. Journal of engineering & applied sciences,2016,115:327-335.
- [11] ALTAN C. Effects of crumb rubber size and concentration on performance of porous asphalt mixtures[J]. International journal of polymer science,2013(1265):1-10.
- [12] PUTMAN B J,LYONS K R. Laboratory evaluation of long-term draindown of porous asphalt mixtures[J]. Journal of materials in civil engineering,2015,27(10):04015009.
- [13] 李永波.国产TPS在排水沥青路面中的应用研究[D].西安:长安大学,2013.  
(LI Yongbo. Study on the application of domestic TPS in drainage asphalt pavement[D]. Xi'an:Chang'an University,2013.)
- [14] 蒋玮.透水性沥青路面混合料配合比设计方法与路用性能研究[D].西安:长安大学,2008.  
(JIANG Wei. Mix design and road performance Research on porous asphalt concrete[D]. Xi'an:Chang'an University,2008.)
- [15] 郭勇.高速公路排水性沥青混合料应用研究[D].南京:东南大学,2006.  
(GUO Yong. Application study on expressway porous asphalt mixture[D]. Nanjing:Southeast University,2006.)
- [16] 陈忠达,袁万杰,薛航,等.沥青混合料高温性能评价指标[J].长安大学学报(自然科学版),2006,26(5):1-4.  
(CHEN Zhongda,YUAN Wanjie,XUE Hang, et al. Evaluation index of high temperature performance of asphalt mixture [J]. Journal of Chang'an university (natural science edition), 2006,26(5):1-4.)
- [17] 杨劲.高粘度改性剂对排水沥青混合料水稳定性影响[D].重庆:重庆交通大学,2015.  
(YANG Jin. Research on the water stability of porous asphalt mixture with high viscosity asphalt[D]. Chongqing:Chongqing Jiaotong University,2015.)
- [18] Al-RUBAEI A. LONG-TERM Hydraulic performance of porous asphalt pavements in northern sweden[J]. Journal of irrigation & drainage engineering,2013,139(6):499-505.
- [19] XU B,CHEN J,ZHOU C, et al. Study on marshall design parameters of porous asphalt mixture using limestone as coarse aggregate[J]. Construction & building materials,2016,124:846-854.
- [20] LIN J D,YEH M C,SUNG P H, et al. Preliminary study on x-ray computed tomography to evaluate voids in porous asphalt concrete[J]. Applied mechanics and materials,2012,174-177:345-353.  
(责任编辑:徐玉梅 英文审校:唐玉兰)