

基于压实性和抗剪性能的 AC-16 沥青混合料 级配优化研究

关宏信¹, 杨宇轩¹, 曾勇^{1,2}, 李兵³

(1. 长沙理工大学 交通运输学院, 湖南 长沙 410114; 2. 广西交通设计集团有限公司, 广西 南宁 530012;
3. 佛山市路桥建设有限公司, 广东 佛山 528042)

摘要:【目的】探究传统路面组合结构层间界面薄弱的问题。【方法】设计了区别于 AC-16 沥青混合料级配范围的沥青混合料 TS-16。针对 TS-16、AC-16 沥青混合料和传统沥青路面双层结构, 开展了压实性能、路用性能试验以及不同加载速率和温度下的直剪试验。【结果】4 种沥青混合料易压实性能的排序为 TS-16A>TS-16B>TS-16C>AC-16, 其中 TS-16A 沥青混合料的高温性能、低温抗裂性能、水稳定性和抗疲劳性能均最佳。【结论】单层沥青混合料直剪强度远高于双层结构, 而且越易压实的沥青混合料, 其抗剪性能越好。

关键词: 层间薄弱界面; 沥青混合料; 压实性能; AC-16; 抗剪强度

中图分类号: U414

文献标志码: A

Research on grading optimization of AC-16 asphalt mixture based on compactness and shear strength

GUAN Hong-xin¹, YANG Yu-xuan¹, ZENG Yong^{1,2}, LI Bing³

(1. School of Traffic and Transportation Engineering, Changsha University of Science & Technology, Changsha 410114, China; 2. Guangxi Transportation Design Group Co., Ltd., Nanning 530012, China;
3. Foshan Highway & Bridge Construction Co., Ltd., Foshan 528042, China)

Abstract: [Purposes] The paper aims to explore the problem of the weak interface between the layers of traditional pavement composite structure. [Methods] The TS-16 asphalt mixture different from the AC-16 asphalt mixture gradation range was designed. Aiming at the TS-16, AC-16 asphalt mixture and traditional double-layer structure of asphalt pavement, the compaction performance test, road performance test and direct shear test under different loading rates and temperatures were carried out. [Findings] The compacting performance of the four asphalt mixtures is in the order of TS-16A>TS-16B>TS-16C>AC-16, and the TS-16A asphalt mixture has the best high-temperature performance, low-temperature crack resistance, water stability and fatigue resistance. [Conclusions] The direct shear strength of single-layer asphalt mixture is much higher than that of double-layer structure, and the

收稿日期: 2021-09-07

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资助项目(2020JJ4604); 湖南省交通运输厅地方标准制修订项目(B201806)

通信作者: 关宏信(1974-), 男, 教授, 主要从事路面结构、材料力学性能分析与测试等方面的研究。

E-mail: guanhxin@sina.com

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

more easily compacted the asphalt mixture, the better its shear strength.

Key words: weak interface between the layers; asphalt mixture; compacting performance; AC-16; shear strength

在我国现行规范中,尽管都强调做好结构层层间结合的处理,但是都会增加施工成本,不利于提高施工效率和保证施工质量。另一方面,近些年来,高速公路沥青面层厚度逐步增大,不少地方的沥青面层厚度已达 20 cm 以上,其中不乏一些单层厚度在 10~12 cm 的沥青混凝土或沥青稳定碎石结构层^[1]。

采用传统 AC-16 沥青混合料作为大厚度沥青层级配,其压实性能难以满足要求^[2-3],疲劳性能也差^[4-5]。若路面整体压实不足,空隙率过大,沥青混合料耐磨和抗剪强度等方面的性能都会随之明显下降,此时路面极易产生早期病害^[6-7],因而有必要对 AC-16 沥青混合料的级配进行改进。矿料级配影响沥青混合料的压实特性,因此不同沥青混合料的压实特性不尽相同^[8-9]。谭忆秋等^[10]通过颗粒干涉对细观结构的影响进行研究,并结合数字图像处理技术发现 AC 沥青混合料空间分布的均匀性最好。李汉光等^[11]通过对不同类型的混合料进行室内马歇尔击实试验,得到不同类型混合料室内密实所需的能量,发现同种沥青混合料达到密实所需的能量基本相同,AC 密级配沥青混合料的压实性能较好,而 Superpave 骨架型沥青混合料难以被压实。CT 技术可以真实反映沥青混合料的内部骨架结构和压实情况^[12]。代璐等^[13]通过 MATLAB 进行旋转压实成型试件的 CT 图像处理以及接触点计算,对不同最大公称粒径、不同类型沥青混合料的压实特性进行研究,发现沥青混合料公称粒径越大所需要的压实功也越大,并且 AC-13 沥青混合料比 SMA-13 及 OGFC-13 沥青混合料更易被压实。GAO 等^[14]研究发现不同级配的 HMA 混合料需要不同的能量才能获得相同的设计密度。传统的细密级配 HMA 通常比间断级配或粗型密级配混合料更容易被压实。对于同种沥青混合料,当最大公称粒径相同时,级配越细越易被压实^[15-16],但级配越粗其高温稳定性越好^[17-18]。廖陈林^[19]通过研究厚层沥青路面的压实特性发现,大厚度沥青层的最大剪应力比正常沥青混凝土路面的最大剪应力要小,而且大厚

度沥青层能在一定程度上提高沥青混凝土路面的抗疲劳开裂和抗车辙性能。

在一些特殊路段,比如长陡坡,水平力过大容易导致沥青路面上、中面层之间发生层间破坏^[20],而采用大厚度沥青混合料是解决这类问题的方法之一。本研究以 AC-16 沥青混合料级配为基础,基于其压实性能、路用性能和抗剪性能,通过调整个别筛孔通过率优选出了一种综合性能最佳的大厚度沥青混合料级配。

1 变级配 AC-16 沥青混合料压实性能

本研究以最大公称粒径为 16 mm 的大厚度沥青混合料代替 AC-13 上面层+AC-20 中面层。为此,通过调整 AC-16 沥青混合料级配试配出 3 种 TS-16 沥青混合料级配,并将其压实性能与 AC-16 沥青混合料进行对比分析。各种沥青混合料均采用 SBS(I-D 型号)改性沥青,其各项性能均满足聚合物改性沥青 SBS 类 I-D 型号的要求,粗集料均采用玄武岩,细集料和矿粉采用石灰岩,不同类型混合料的级配如图 1 所示。其中,除 0.075 和 9.5 mm 的筛孔通过率外,TS-16A、TS-16B 和 TS-16C 沥青混合料其余的筛孔通过率均在相应规范规定的 AC-16 沥青混合料级配的范围之内(后文用 TS-16A、TS-16B、TS-16C、AC-16 表示相应类型的沥青混合料)。

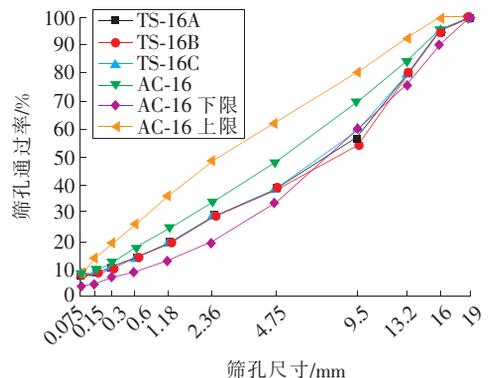


图 1 不同类型沥青混合料的级配曲线

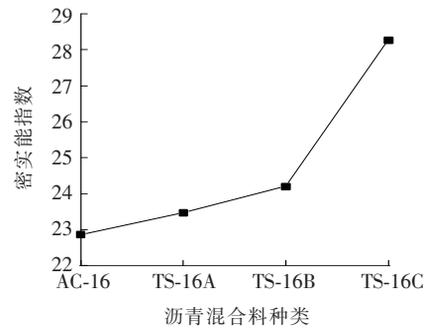
Fig. 1 Gradation curves of different types of asphalt mixtures

密实曲线能够反映沥青混合料在被压实的过程中密度比随压实次数的变化情况,也可以较好地反映沥青混合料在施工阶段及在交通荷载作用下整体密实度的变化情况。密实能指数反映的是在施工作业中沥青混合料从开始摊铺到达到指定密实度的过程中压路机所需要做的功。密实能指数越小,则施工中所需要的压实能越少,施工和易性越好。本研究主要用密实能指数和贝雷法参数 C 、 F_c 、 F_f 来综合评定沥青混合料的压实特性。其中, C 用于评价级配中粗集料的含量及其空隙特征, F_c 反映的是细集料中粗细部分的嵌挤、填充情况, F_f 反映了合成集料中最细一级的嵌挤情况。

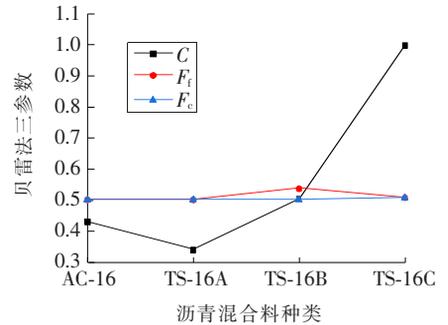
利用旋转压实仪成型 10 cm 高的 TS-16A、TS-16B、TS-16C 和 AC-16 圆柱体试件,采用表干法测定每个试件的空隙率,通过沥青混合料的密实曲线计算 TS-16A、TS-16B、TS-16C 和 AC-16 的密实能指数,并通过贝雷法的计算公式算得各个沥青混合料的 C 、 F_c 、 F_f 值,结果如图 2 所示。

分析图 2 可知:TS-16 较 AC-16 更易被压实;TS-16B 和 TS-16C 被压实的难易程度相近;TS-16A 最易被压实,与 AC-16 相比,TS-16A 的压实功节约了近 14.4%;与 TS-16B 相比,TS-16A 各粒径的筛孔通过率与 TS-16B 均相同,只有 9.5 mm 筛孔的通过率提高了 2.9%,表明该筛孔的通过率对 TS-16 的压实特性有一定程度的影响。

已有研究表明,将密级配混合料参数 C 的值控制在 0.4~0.8 较合理^[21]。 C 太小容易造成沥青混合料在施工过程中发生离析,太大则不利于沥青混合料形成骨架式嵌挤结构,且压实困难。参数 F_c 和 F_f 的值应控制在 0.25~0.50,否则级配曲线易产生驼峰,沥青混合料难以形成多级嵌挤,影响沥青混合料的高温稳定性。从图 2 可知,所设计的 TS-16 级配基本满足上述要求。此外,TS-16 级配的 9.5 mm 筛孔通过率突破了 AC-16 的级配下限,0.075 mm 筛孔通过率突破了 AC-16 的级配上限,这就使改进的 TS-16 级配的沥青混



(a) 密实能指数



(b) 贝雷法三参数

图 2 密实能指数及贝雷法三参数

Fig. 2 Compaction energy index and three parameters of the Bailey method

合料更加均匀而不易产生离析,粗集料颗粒之间相互干涉,从而形成稳定的骨架结构,最终提高了沥青混合料抵抗永久变形的能力。

2 变级配 AC-16 沥青混合料大厚度试件与双层试件抗剪切性能对比

传统沥青路面的面层主要由上面层、中面层和下面层组成,传统桥面为双层沥青混合料结构。前文通过试验证实了 TS-16 比 AC-16 更易被压实,这意味着针对 TS-16 可以采用更大的压实厚度。为分析将双层桥面铺装换成大厚度 TS-16 单层铺装的可能性,需通过与双层沥青面层(混合料级配见表 1)的对比,探讨将 TS-16 用作厚层沥青层的优势。

表 1 双层结构沥青混合料级配组成

Table 1 Gradation composition of two-layer structure asphalt mixture %

级配类型	通过下列筛孔(mm)的质量百分率											最佳油石比
	0.075	0.15	0.3	0.6	1.18	2.36	4.75	9.5	13.2	16	19	
AC-13	12.0	14.0	15.0	18.0	22.0	24.0	32.0	65.0	85.0	100.0	100.0	5.3
AC-20	10.0	11.5	12.5	15.0	18.0	19.5	26.0	55.0	75.0	95.0	100.0	4.5

2.1 抗剪强度参数

利用直剪试验,对比分析 10 cm 厚单层 TS-16 试件、4 cmAC-13+6 cmAC-20 组合试件的抗剪切性能。

采用轮碾法成型直剪试件,即将 30 cm×30 cm×10 cm 单层板及 30 cm×30 cm×4 cm+30 cm×30 cm×6 cm 组合板通过次数不等的碾压过程轮碾成型。对于 10 cm 厚单层 TS-16 试件,在一个方向上碾压 4 个往返(8 次),碾压完成后,将车辙板旋转 90°再碾压 18 个往返(36 次);对于 4 cmAC-13+6 cmAC-20 组合板,先按常规车

辙成型 6 cmAC-20 下面层,待其冷却至室温后,在底模上安装 4 cm 钢模,然后在下面层的上表面模拟工程实际撒布黏结层,最后按照常规试件轮碾成型 4 cmAC-13 上面层。将成型的车辙试件切割成 6 cm×6 cm×10 cm 的棱柱体试件用于直剪试验。直剪试验使用的设备为能加载竖向力的直剪仪和能施加水平力的万能试验机 MTS。

通过直剪试验分别测定不同温度(20、40 和 60 °C)及加载速率(10、30 和 50 mm/min)下,双层组合试件的层间和单层 TS-16 试件的抗剪强度参数(黏聚力和内摩擦角),结果如图 3~4 所示。

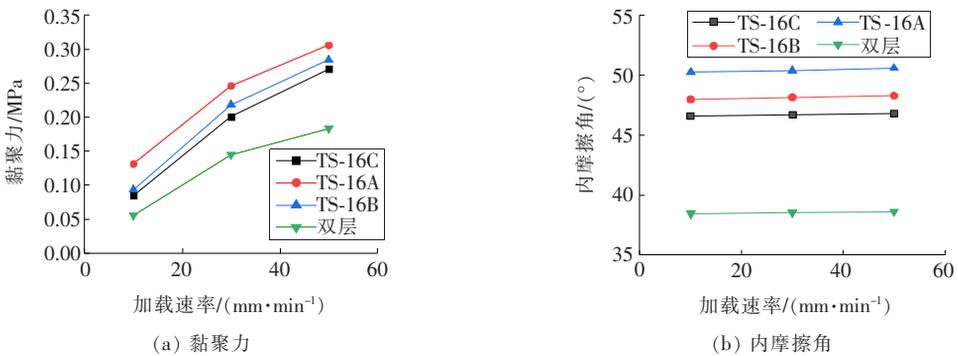


图 3 不同加载速率下沥青混合料的抗剪强度参数

Fig. 3 Shear strength parameters of asphalt mixtures under different loading rates

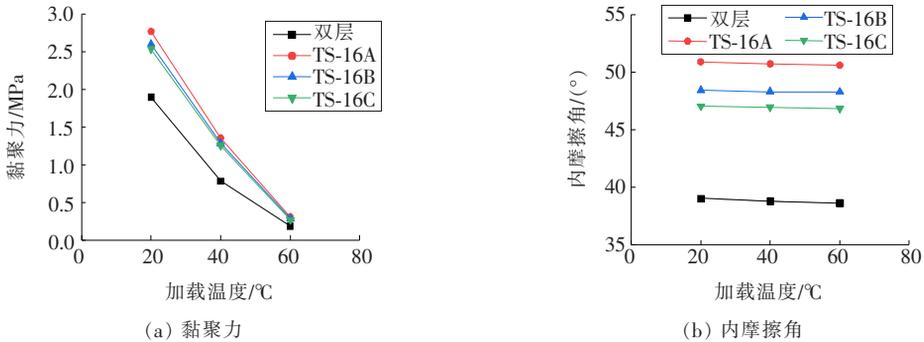


图 4 不同温度下沥青混合料的抗剪强度参数

Fig. 4 Shear strength parameters of asphalt mixtures at different temperatures

分析图 3~4 可知:10 cm 厚 TS-16 试件的内摩擦角和黏聚力远大于 10 cm 厚双层板试件,说明前者的抗剪性能总体上优于后者,这主要是因为双层组合试件界面的结合较薄弱,缺少集料的相互嵌锁;TS-16A 试件的内摩擦角和黏聚力普遍大于 TS-16B 和 TS-16C 试件,这是因为 TS-16A 最易被压实,因而用其成型的试件最密实,力学性能也最优;温度和加载速率只影响黏聚力,这是由沥青混合料的黏弹特性所致,按照黏弹性材料的

时-温等效原理,加载速率越快相当于环境温度越低,图中黏聚力的变化趋势也证实了这一点。

从试件成型的过程来看,尽管对双层组合试件的层间进行了黏结处理,但是在下面层冷却至室温后再轮碾成型上面层的,因而在碾压上面层时并不会对下面层起到压实作用,黏结层也未能使上下面层形成有效嵌挤,故试件的破坏形态类似于滑移破坏,破坏形态如图 5(a)所示;单层 TS-16 试件的集料分布均匀,粗集料能更好地发挥嵌

挤功能,因此剪切破坏的破坏面呈不规则形态,如图5(b)所示。

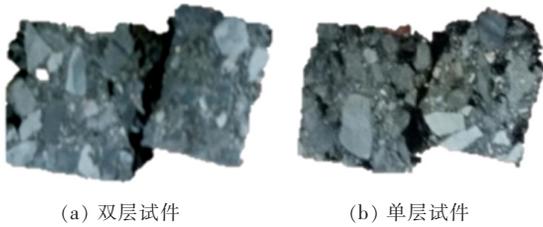


图5 直剪试验试件的破坏形态

Fig. 5 Failure shape of specimens after direct shear tests

由此可见,若采用10 cm厚TS-16代替4 cm AC-13+6 cm AC-20 双层结构的沥青混合料,能够解决层间界面抗剪性能薄弱的问题。此外,3种TS-16级配中TS-16A的抗剪性能最佳。

2.2 车辙深度

沥青路面车辙病害的力学机理为剪切流动。通过对比TS-16试件和双层结构试件汉堡车辙试验的车辙深度,分析两种试件抗车辙性能。试件成型方式与2.1节所述相同。试验结果如图6所示。

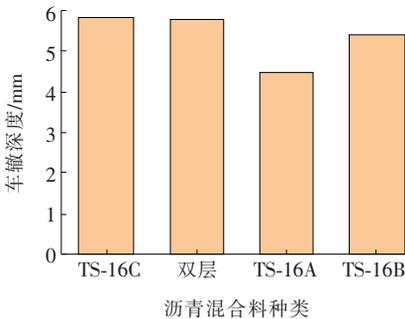


图6 汉堡车辙试验结果

Fig. 6 Results of Hamburg rutting test

由图6可知:在4种试验材料中,10 cm厚的TS-16A单层板试件的车辙深度最小,且高温性能最优;10 cm TS-16C单层板试件的车辙深度与双层结构4 cm AC-13+6 cm AC-20组合板试件的车辙深度相差无几;TS-16B试件的高温性能略优于TS-16C试件。这一方面是因为AC-16的抗车辙性能介于AC-13和AC-20之间;另一方面,与2.1节的试验结果相比,TS-16沥青混合料3种级配车辙深度的变化规律与其黏聚力的变化规律一致,TS-16A抗车辙性能表现最佳,与其被压实得最密实有关。

综上所述,沥青混合料的抗剪性能和抗车辙

性能与沥青混合料的压实难易程度有一定关系,即沥青混合料越容易被压实,其抗剪性能和抗车辙性能越好。若采用10 cm厚最易被压实的TS-16A代替4 cm AC-13+6 cm AC-20 沥青混合料,不仅可以解决双层组合结构的界面薄弱问题,还可以改善沥青路面的抗车辙性能。

3 变级配AC-16沥青混合料的其他路用性能

3.1 水稳定性能

根据《公路工程沥青及沥青混合料试验规程》(JTGE20-2011),采用浸水马歇尔试验和冻融劈裂试验分析TS-16的水稳性能,试验结果如图7所示。

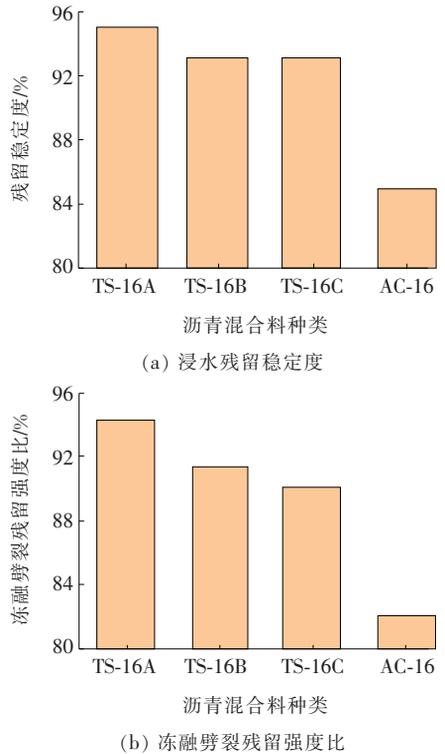


图7 浸水马歇尔试验和冻融劈裂试验结果

Fig. 7 Results of immersion Marshall test and freeze-thaw splitting test

分析图7可以发现:4种沥青混合料的试验结果均符合《公路沥青路面设计规范》(JTGD50-2017)中的规定,即浸水残留稳定度 $\geq 85\%$ 、冻融劈裂残留强度比 $\geq 80\%$ 。4种沥青混合料的水稳定性的排序为TS-16A>TS-16B>TS-16C>AC-16。这是因为TS-16级配中粗集料的含量比

AC-16 高,更容易形成嵌挤结构,且粗集料形成的骨架结构能产生更大的摩擦阻力,削弱了冻融循环的作用,因而沥青混合料的水稳定性更优。TS-16A 的水稳定性最好,这是因为 TS-16A 最容易被压实,沥青混合料因而更加密实,在浸水过程中水难以侵入并破坏试件内部结构。此外,油石比也会影响沥青混合料的水稳定性。由于沥青是憎水性材料,当沥青含量较高时,沥青对石料的裹覆更加充分,水与集料接触较少,从而减小了水损害。因此,TS-16B 的水稳定性优于 TS-16C。

3.2 低温抗裂性能

依据《公路工程沥青及沥青混合料试验规程》(JTJ E20-2011)中规定的标准条件成型不同沥青混合料车辙板试件,并将其切割成 $250\text{ mm} \times 30\text{ mm} \times 35\text{ mm}$ 的棱柱体小梁,再用棱柱体小梁进行低温弯曲试验,试验温度为 $-10\text{ }^{\circ}\text{C}$,加载速率为 50 mm/min ,试验结果如图 8 所示。

分析图 8 可知:上述沥青混合料的低温抗裂性能均符合规范要求,即破坏应变不小于 $2\ 600 \times 10^{-6}$,但 TS-16 的低温破坏弯拉应变略大于 AC-16,同时 TS-16 的抗弯拉强度明显高于 AC-16。这是因为在最大公称粒径相同时,若沥青混合料越容易被压实,混合料内部结构就越密实,而密实的结构对强度增长的贡献要高于其对抵抗变形能力的贡献。虽然 TS-16A 的破坏弯拉应变不是最大的,但其抗弯拉强度具有明显优势,导致其弯曲劲度模量最大,这在一定程度上也体现了其在抵抗变形上的优势。

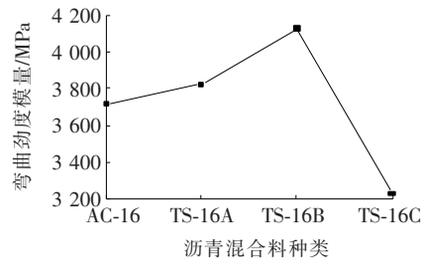
3.3 抗疲劳性能

本研究采用常应力控制疲劳模式开展疲劳试验。先成型 $30\text{ cm} \times 30\text{ cm} \times 10\text{ cm}$ TS-16 单层板,并将其切割成 $30\text{ cm} \times 5\text{ cm} \times 10\text{ cm}$ 的小梁试件,再用小梁试件进行四点弯曲试验,最终得到试件在应力比为 0.3、0.4、0.5、0.6、0.7 和加载频率为 10 Hz 下的疲劳寿命。

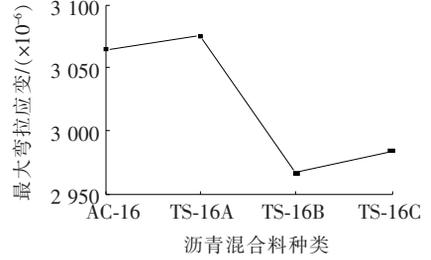
沥青混合料的疲劳方程为:

$$\lg N_f = k - n \lg S_i \quad (1)$$

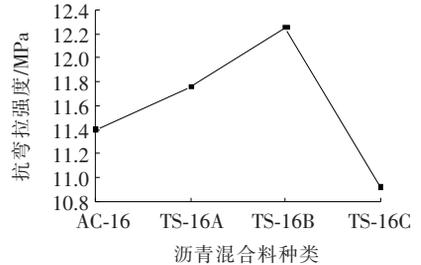
式中: k 表征材料的疲劳耐久性, k 越大,材料越耐疲劳; n 体现了材料疲劳寿命对应力比的敏感程度, n 越大,疲劳寿命对应力比越敏感,即材料的疲劳耐久性受应力比的影响越明显。



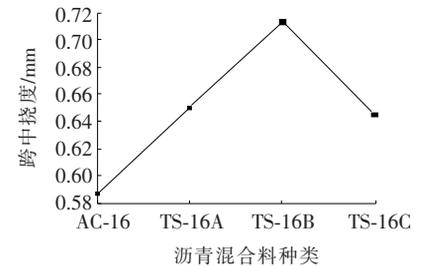
(a) 弯曲劲度模量



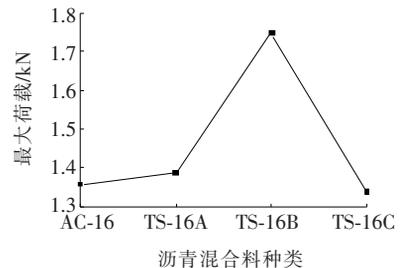
(b) 最大弯拉应变



(c) 抗弯拉强度



(d) 跨中挠度



(e) 最大荷载

图 8 不同沥青混合料的低温抗裂性能

Fig. 8 Low-temperature crack resistance of different asphalt mixtures

图 9 所示为疲劳寿命 N_f 和应力比 S_i 的双对数坐标曲线。

分析图 9 可知:在相同应力水平下,TS-16A

的疲劳寿命最长,TS-16B次之,TS-16C最短。TS-16A、TS-16B、TS-16C的 k 值分别为2.755 6、2.271 4、2.041 8, n 值分别为3.086 4、3.653 7、3.889 4,表明在这3种混合料中,TS-16A的抗疲劳性能最佳。这是因为在试件的疲劳过程中,疲劳损伤不断累积,而TS-16A被压实得最紧密,在相同的荷载条件下其损伤程度也就最低。

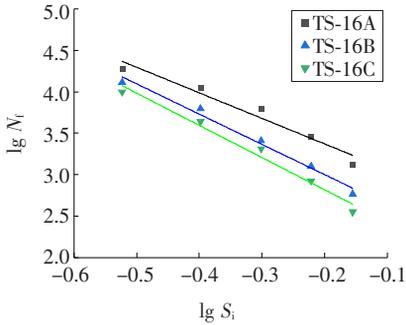


图9 不同应力比下TS-16的疲劳寿命

Fig. 9 Fatigue life of TS-16 under different stress ratios

4 结论

1) 在调低9.5 mm筛孔的通过率,调高0.075 mm筛孔的通过率,从而突破AC-16级配范围后,试验所用的3种TS-16都比AC-16更易被压实。其中,TS-16A最易被压实,其次是TS-16B,再次是TS-16C。

2) 对TS-16A、TS-16B、TS-16C厚层沥青层和传统4 cm AC-13+6 cm AC-20双层铺装结构开展的直剪试验结果表明:单层厚层沥青混合料能够解决双层沥青混合料层间界面薄弱的问题,且单层TS-16A的抗剪性能最佳。

3) TS-16的高温性能、水稳定性能、低温抗裂性能均能满足我国相应规范的要求;TS-16A的综合性能(含抗疲劳性能)最佳,这主要归因于其易被压实的特性。

本文对TS-16A的设计级配进行了宏观试验研究,今后可从微观角度研究其压实特性。

〔参考文献〕

[1] 金岗. 大厚度沥青层在路面结构设计中的应用探讨[J]. 公路交通科技, 2010, 6(8): 86-88.

JIN Gang. Discussion on the application of large-thickness asphalt layer in pavement structure design [J]. Journal of Highway and Transportation Research and Development, 2010, 6(8): 86-88.

- [2] 鞠平. AC-16 沥青混合料的 Superpave 设计级配分析 [J]. 内蒙古公路与运输, 2008(2): 1-6.
- JU Ping. Superpave design gradation analysis of AC-16 asphalt mixture [J]. Highways & Transportation in Inner Mongolia, 2008(2): 1-6.
- [3] 沙庆林. 高速公路沥青路面早期损坏与对策 [J]. 长沙理工大学学报(自然科学版), 2006(3): 1-6.
- SHA Qing-lin. The premature damage of bituminous pavement on expressway and the countermeasures [J]. Journal of Changsha University of Science & Technology (Natural Science), 2006(3): 1-6.
- [4] 陈豫, 谭云鹏, 蒋应军, 等. 双层沥青路面压实特性的影响因素 [J]. 筑路机械与施工机械化, 2019, 36(10): 58-62.
- CHEN Yu, TAN Yun-peng, JIANG Ying-jun, et al. Influencing factors of compaction characteristics of double-layer asphalt pavement [J]. Road Machinery & Construction Mechanization, 2019, 36(10): 58-62.
- [5] 蒋应军, 李启龙, 上官宇浩. 路面结构与材料对双层一次摊铺路面疲劳性能的影响 [J]. 硅酸盐通报, 2020, 39(12): 4 043-4 053, 4 067.
- JIANG Ying-jun, LI Qi-long, SHANGGUAN Yu-hao. Effects of pavement structure and material on fatigue performance of double-deck one-time paving pavement [J]. Bulletin of the Chinese Ceramics Society, 2020, 39(12): 4 043-4 053, 4 067.
- [6] 彭勇, 孙立军. 空隙率对沥青混合料性能影响 [J]. 武汉理工大学学报(交通科学与工程版), 2009, 33(5): 826-829.
- PENG Yong, SUN Li-jun. Effects of air void content on asphalt mixture performance [J]. Journal of Wuhan University of Technology (Transportation Science & Engineering), 2009, 33(5): 826-829.
- [7] 杨大田, 夏文军. 动态剪切蠕变试验评价沥青路面层间稳定性 [J]. 筑路机械与施工机械化, 2011, 28(2): 46-48, 52.
- YANG Da-tian, XIA Wen-jun. Evaluation of interlayer stability of asphalt pavement by dynamic shearing [J]. Road Machinery & Construction Mechanization, 2011, 28(2): 46-48, 52.
- [8] LYU Q, HUANG W D, ZHENG M, et al. Influence of gradation on asphalt mix rutting resistance meas-

- ured by Hamburg Wheel Tracking test[J]. Construction and Building Materials, 2020, 238: 117674.
- [9] 余永飞,王栋,张征,等. 双层一次摊铺工艺沥青路面结构层厚度分析[J]. 交通科学与工程, 2019, 35(3): 18-22.
YU Yong-fei, WANG Dong, ZHANG Zheng, et al. Analysis on asphalt pavement thickness of the double-layer paving process[J]. Journal of Transport Science and Engineering, 2019, 35(3): 18-22.
- [10] 谭忆秋,邢超,任俊达,等. 基于颗粒堆积理论的沥青混合料细观结构特性研究[J]. 中国公路学报, 2017, 30(7): 1-8.
TAN Yi-qiu, XING Chao, REN Jun-da, et al. Research on microstructure characteristics of asphalt mixture based on particle packing theory[J]. China Journal of Highway and Transport, 2017, 30(7): 1-8.
- [11] 李汉光,高英,余文斌. 沥青混合料压实特性及沥青路面碾压遍数确定[J]. 东南大学学报(自然科学版), 2011, 41(1): 186-189.
LI Han-guang, GAO Ying, YU Wen-bin. Compaction characteristics of hot mixed asphalt and number of roller passes[J]. Journal of Southeast University (Natural Science Edition), 2011, 41(1): 186-189.
- [12] 李盛,张豪,房硕,等. CT 扫描在路面加铺层结构中的应用研究[J]. 长沙理工大学学报(自然科学版), 2020, 17(3): 1-6.
LI Sheng, ZHANG Hao, FANG Shuo, et al. Application of CT scanning in pavement overlay structure[J]. Journal of Changsha University of Science & Technology (Natural Science), 2020, 17(3): 1-6.
- [13] 代璐,崔欣. 级配对沥青混合料压实特性影响的细观分析[J]. 筑路机械与施工机械化, 2018, 35(3): 49-53.
DAI Lu, CUI Xin. Mesoscopic analysis on influence of grading on compaction characteristics of asphalt mixture[J]. Road Machinery & Construction Mechanization, 2018, 35(3): 49-53.
- [14] GAO Y, HUANG X M, YU W B. The compaction characteristics of hot mixed asphalt mixtures [J]. Journal of Wuhan University of Technology (Materials Science Edition), 2014, 29: 956-959.
- [15] KOMBA J, MAINA J, HORAK E, et al. Relationship between aggregate packing characteristics and compactability of hot-mix asphalt mixes[C]//Proceedings of ASCE International Airfield and Highway Pavements Conference 2019. Chicago: ASCE, 2019.
- [16] 张争奇,边秀奇,杜群乐,等. 沥青混合料压实特性影响因素研究[J]. 武汉理工大学学报, 2012, 34(6): 36-41.
ZHANG Zheng-qi, BIAN Xiu-qi, DU Qun-le, et al. Study on factors effecting on compaction property of asphalt mixture[J]. Journal of Wuhan University of Technology, 2012, 34(6): 36-41.
- [17] 张黎红,董则军,郭绍成. 矿料级配对温拌橡胶沥青混合料压实特性的影响[J]. 重庆交通大学学报(自然科学版), 2017, 36(8): 44-48.
ZHANG Li-hong, DONG Ze-jun, GUO Shao-cheng. Influence of aggregate gradation on compaction characteristics of warm mix rubber asphalt mixture [J]. Journal of Chongqing Jiaotong University (Natural Science), 2017, 36(8): 44-48.
- [18] 匡强,周再恒,徐程. 重载交通下 SMA 高温稳定性影响因素研究[J]. 公路与汽运, 2020(5): 75-79.
KUANG Qiang, ZHOU Zai-heng, XU Cheng. Study on the influencing factors of high temperature stability of SMA under heavy load traffic [J]. Highways & Automotive Applications, 2020(5): 75-79.
- [19] 廖陈林. 厚层沥青路面压实特性研究[D]. 西安:长安大学, 2008.
LIAO Chen-lin. Study on compaction characteristics for the thick asphalt pavement[D]. Xi'an: Chang'an University, 2008.
- [20] 林群,李婷玉,陈宇亮. 层间接触状态对刚柔组合路面结构性能影响研究[J]. 公路工程, 2020, 45(6): 181-184, 206.
LIN Qun, LI Ting-yu, CHEN Yu-liang. Study on the influence of interlayer contact state on the structural performance of rigid flexibility combined pavement[J]. Highway Engineering, 2020, 45(6): 181-184, 206.
- [21] 吕文江,陈爱文,郝培文,等. 贝雷法参数 CA 比对沥青混合料性能的影响[J]. 长安大学学报(自然科学版), 2005(4): 5-8.
LYU Wen-jiang, CHEN Ai-wen, HAO Pei-wen, et al. Effect of CA ratio on asphalt mixture property based on Bailey method [J]. Journal of Chang'an University (Natural Science Edition), 2005(4): 5-8.

(编辑 石月珍)