

doi: 10.3969/j.issn.1002-0268.2019.07.001

温拌阻燃沥青混凝土路面性能加速 加载试验模拟分析

周志刚¹, 周建雄¹, 罗根传^{1,2}, 俞文生^{1,3}, 徐 赞¹

(1. 长沙理工大学, 湖南 长沙 410004; 2. 广西交通投资集团有限公司, 广西 南宁 530000;

3. 江西省高速公路投资集团有限责任公司, 江西 南昌 330000)

摘要: 为了解温拌阻燃沥青混凝土路面实际使用效果, 通过小型加速加载设备分别对4种不同沥青路面结构进行加速加载试验研究。4种路面结构包括: 在水泥混凝土刚性基层上分别铺筑温拌阻燃沥青混凝土面层和热拌沥青混凝土面层, 在水泥稳定碎石半刚性基层上分别铺筑温拌阻燃沥青混凝土面层和热拌沥青混凝土面层。在不同的加载阶段测试了各种沥青路面的抗车辙性能、抗滑性能、降噪性能以及力学性能, 对比分析了半刚性基层与刚性基层上沥青路面的路面性能。研究结果表明, 随着加载次数的增加, 各种沥青路面的车辙深度会逐渐增加, 抗滑性能指标和吸声系数会有所衰减, 但仍具有良好的抗车辙性能、抗滑性能和降噪性能; 温拌剂和阻燃剂不会影响这几种沥青路面性能, 车辙深度和抗滑性能指标仍能满足技术规范要求, 温拌阻燃沥青混凝土路面具有较好的降噪性能; 抗压回弹模量和劈裂强度随着加载次数的增加呈现出先增大后降低的变化规律, 并且温拌阻燃沥青混凝土的抗压回弹模量和劈裂强度都低于热拌沥青混凝土的, 温拌剂和阻燃剂对沥青混凝土的力学性能有一定的影响。选择半刚性基层能够使路面更容易压实, 并且有更好的路用性能。

关键词: 道路工程; 抗车辙性能; 加速加载试验; 温拌阻燃沥青路面; 抗滑性能; 降噪性能; 力学性能

中图分类号: U416.217

文献标识码: A

文章编号: 1002-0268 (2019) 07-0001-09

Simulation Analysis on Accelerated Loading Test on Warm-mixed Flame Retardant Asphalt Concrete Pavement Performance

ZHOU Zhi-gang¹, ZHOU Jian-xiong¹, LUO Gen-chuan¹, YU Wen-sheng¹, XU Yun¹

(1. Changsha University of Science and Technology, Changsha Hunan 410004, China;

2. Guangxi Communications Investment Group Co., Ltd., Nanning Guangxi 530000, China;

3. Jiangxi Provincial Expressway Investment Group Co., Ltd., Nanchang Jiangxi 330000, China)

Abstract: In order to understand the practical effect of warm-mixed flame retardant asphalt concrete pavement, the accelerated loading test on 4 asphalt pavement structures is conducted by small accelerated loading equipment. These pavement structures include warm-mixed flame retardant asphalt concrete surface course and hot-mixed asphalt concrete surface course on cement concrete rigid base course separately, and warm-mixed flame retardant asphalt concrete surface course and hot-mixed asphalt concrete surface course on cement stabilized crushed stone semi-rigid base course separately. The anti-rutting performance, anti-skidding performance, de-noise performance and mechanical performance of different asphalt pavement are tested in different loading stages, and the asphalt pavement performance of semi-rigid base course and rigid base course are compared. The result shows that (1) with the increase of loading times, the rutting depths of all

收稿日期: 2018-07-13

基金项目: 广西交通科技计划项目 ([2013] 100-29); 江西交通科技计划项目 (2011C0063)

作者简介: 周志刚 (1966-), 男, 湖南长沙人, 教授. (zhou_zgcs@sina.com)

kinds of asphalt pavement gradually increase, the anti-skidding performance indexes and the sound absorption coefficients decrease, but they still have good anti-rutting performance, anti-skidding performance and de-noise performance; (2) warm mix agent and flame retardant cannot affect the pavement performance of these types of asphalt, the values of rutting depth and of anti-skidding performance index steel meet the demand of technical specifications, and warm-mixed flame retardant asphalt pavement has better de-noise performance; (3) compressive resilient modulus and splitting strength increase firstly and then decrease with the increase of loading times, the compressive resilient modulus and splitting strength of warm-mixed flame retardant asphalt concrete are smaller than those of hot-mixed asphalt concrete, and warm mix agent and flame retardant has certain influence on mechanical performance of the asphalt concrete. The choice of semi-rigid base course enables easier compaction of the pavement and better road performance.

Key words: road engineering; anti-rutting performance; accelerated loading test; warm-mixed flame retardant asphalt pavement; anti-skidding performance; de-noise performance; mechanical performance

0 引言

为了实现绿色公路,并保证公路隧道交通安全,近年我国开始应用温拌阻燃沥青路面技术。早在 20 世纪 80 年代,美国和欧洲国家等就相继开展了温拌阻燃沥青路面技术的研究^[1-2]; Banerjee 等^[3]对 4 种不同类型的温拌沥青长期老化后的流变性能进行了研究; Hajj 等^[4]研究了聚合物改性沥青混合料性能受温拌剂的影响。Cong 等^[5]测试了阻燃改性沥青混合料的马歇尔稳定度、流动值、间接拉伸强度等指标;文献 [6-8] 研究了阻燃剂对沥青和沥青混凝土的阻燃性能及其路用性能的影响;周志刚等^[9]研究了 Sasobit 温拌沥青混凝土碾压温度离析对施工质量的影响,提出了温度离析的评价指标及标准;李雪连等^[10]研究了温拌剂对 SBS 改性沥青性能的影响;文献 [11-12] 研究开发和应用了温拌阻燃沥青混凝土。

总之,目前普遍研究温拌、阻燃、温拌阻燃沥青及其混凝土的路用性能,而很少关注温拌阻燃沥青混凝土路面的长期性能。考虑隧道路面维修对交通干扰较大,需要重视隧道温拌阻燃沥青路面耐久性问题。故本研究依托某高速公路隧道沥青路面工程,利用加速加载模拟试验系统对比分析温拌阻燃沥青路面和热拌沥青路面的相关性能及其变化^[13-14]。

1 试验用材料

1.1 原材料

沥青采用广西某道路材料有限公司供应的 SBS 改性沥青,所用 Sasobit 温拌剂掺量为沥青质量的 3%,FRMAXTM阻燃剂掺量为沥青质量的 7%。它们的主要性能指标按照《公路工程沥青及沥青混合料试验规程》(JTG E20—2011)^[15]检测,结果参见文献 [16-18]。

1.2 沥青混凝土配合比设计

实体工程隧道路面原方案为上面层热拌沥青混凝土 AC-13、中面层热拌沥青混凝土 AC-20,集料分别为辉绿岩和石灰岩,现在 AC-13 中掺温拌剂和阻燃剂,在 AC-20 中掺温拌剂。上中面层的级配见图 1。

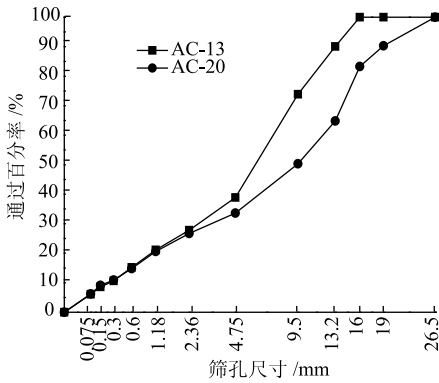


图1 集料合成级配
Fig.1 Synthetic gradation of aggregate

两种热拌沥青混凝土的最佳油石比及马歇尔试验指标见表 1。在此基础上按温拌剂、阻燃剂掺量和试验确定的温拌类沥青混凝土的最佳成型温度制备温拌沥青混凝土和温拌阻燃沥青混凝土。4 种沥青混凝土的常规路用性能指标试验结果如表 2 所示。

表 1 SBS 改性沥青混凝土马歇尔试验结果						
Tab.1 Marshall test result of SBS modified asphalt concrete						
沥青混凝土 类型	油石比/ %	空隙率 VV/%	沥青饱和 度 VFA/%	间隙率 VMA/%	稳定度 MS/kN	流值 FL/mm
热拌 AC-13	4.7	4.4	70.2	14.6	17.23	3.6
热拌 AC-20	4.2	3.5	72.0	12.5	16.13	2.6
设计要求	—	3~6	65~75	12~15	≥8.0	1.5~4

由表2可知,4种沥青混合料常规路用性能均满足《公路沥青路面施工技术规范》(JTG F40—2004)^[19]要求。

表2 SBS改性沥青混凝土路用性能指标试验结果

Tab.2 Test result pavement performance indicators of SBS modified asphalt concrete

沥青混凝土类型	浸水马歇尔 残留稳定 度/%	冻融劈裂 残留强度 比/%	动稳定度/ 次/mm	弯拉应变/ $\mu\epsilon$
温拌阻燃 AC-13	91.2	92.3	5 463	3 845
热拌 AC-13	93.4	94.6	5 524	3 989
温拌 AC-20	96.1	91.8	6 284	3 767
热拌 AC-20	94.2	93.1	5 723	3 923
规范要求	≥ 85	≥ 80	$\geq 2\ 800$	$\geq 2\ 500$

2 加速加载试验装置和试验方案

2.1 加速加载试验装置

本试验利用南非生产的小型加速加载试验系统MMLS3。其加载速率为0~26 km/h。MMLS3是缩小版的重交通模拟器,设备体积小、质量轻、运输方便,既可以在实验室也可以在道路现场进行加速加载试验。在室内时可对路面圆柱形试件(现场钻芯试样或室内成型试件)或在试槽内铺筑的模拟路面进行试验,此时可以控制试验过程中的温度、湿度以及接地压力,并在短时间内模拟不同环境、不同

路面类型下车辆荷载对路面结构的影响。但由于属于非足尺路面的模拟试验,轮胎尺寸也相对过小,荷载间歇时间也小于实际道路,故MMLS并不能完全模拟真实路面受到荷载作用而产生的受力变形。尽管如此,一些研究人员仍利用MMLS的优点,开展室内加速加载模拟试验^[20-23]。本研究试验即在试槽内铺筑模拟路面结构。

2.2 路面结构模型方案

依托工程的隧道路面结构形式为:4 cm厚上面层(AC-13温拌阻燃沥青混凝土);6 cm厚下面层(AC-20温拌沥青混凝土);28 cm厚基层(水泥混凝土);20 cm厚底基层(C20贫混凝土)。实际工程中将4 cm厚AC-13温拌阻燃沥青混凝土、6 cm厚AC-20温拌沥青混凝土延伸到隧道外数百米。隧道内原设计为同样结构组成的热拌沥青混凝土,隧道外其他路段也应用热拌沥青混凝土面层。因此,本课题将对对比研究温拌沥青混凝土、温拌阻燃沥青混凝土对隧道内外沥青路面性能的影响,故室内路面结构模型分为4种方案,如图2所示。每种方案路面结构顺车轮运行方向均为30 cm,垂直于车轮运行方向均为90 cm。因加载车轮接地面积宽约9 cm,根据力学计算,路面两侧边缘不会对车轮下路面结构受力变形造成影响。

上面层	AC-13 温拌阻燃沥青混凝土	AC-13 温拌阻燃沥青混凝土	AC-13 热拌沥青混凝土	AC-13 热拌沥青混凝土 4 cm
下面层	AC-20 温拌沥青混凝土	AC-20 温拌沥青混凝土	AC-20 热拌沥青混凝土	AC-20 热拌沥青混凝土 6 cm
基层	水泥板刚性基层	半刚性基层	半刚性基层	水泥板刚性基层 18 cm
	方案1	方案2	方案3	方案4

图2 室内试验路面结构模型方案

Fig.2 Schemes of pavement structure model for indoor test

2.3 试验测试方案

本试验主要测试研究隧道内外不同沥青路面结构的抗车辙性能、抗滑性能、降噪性能、抗压回弹模量、劈裂强度等随着循环加载次数的变化规律。测试周期分别为加载0, 5, 10, 15, 30, 55, 70万次,其中抗车辙性能和抗滑性能在全周期测试,降噪性能在加载0, 5, 15, 70万次后利用芯样测试,抗压回弹模量和劈裂强度在加载0, 15, 70万次后利用芯样测试。钻芯位置不与车辙和抗滑性能测试位置重叠,均在轮迹带上。钻芯取样时,在试件表面和洞边标记行车方向,以便回填时保证试件不发生方向变化。回填前先对下层表面吹热风加热,并洒适量的热沥青,保证上下粘结,并用粒径0.075~

0.15 cm的细沙填缝固定试件,尽量减小芯样侧壁与路面结构上洞壁间隙对结构受力变形的影响。同时,每天记录室内环境温度。数据表明,测试过程中室内环境温度基本稳定在25~30℃。

3 试验结果及其分析

3.1 抗车辙性能

采用自动车辙断面记录仪测量加载轮迹及其周围共24 cm宽的断面高程,通过计算加载期间车辙断面高程变化,得出最大车辙深度。4种沥青路面结构的车辙断面形态和车辙深度的变化情况分别如图3、图4所示。

图3和图4所示试验结果表明:

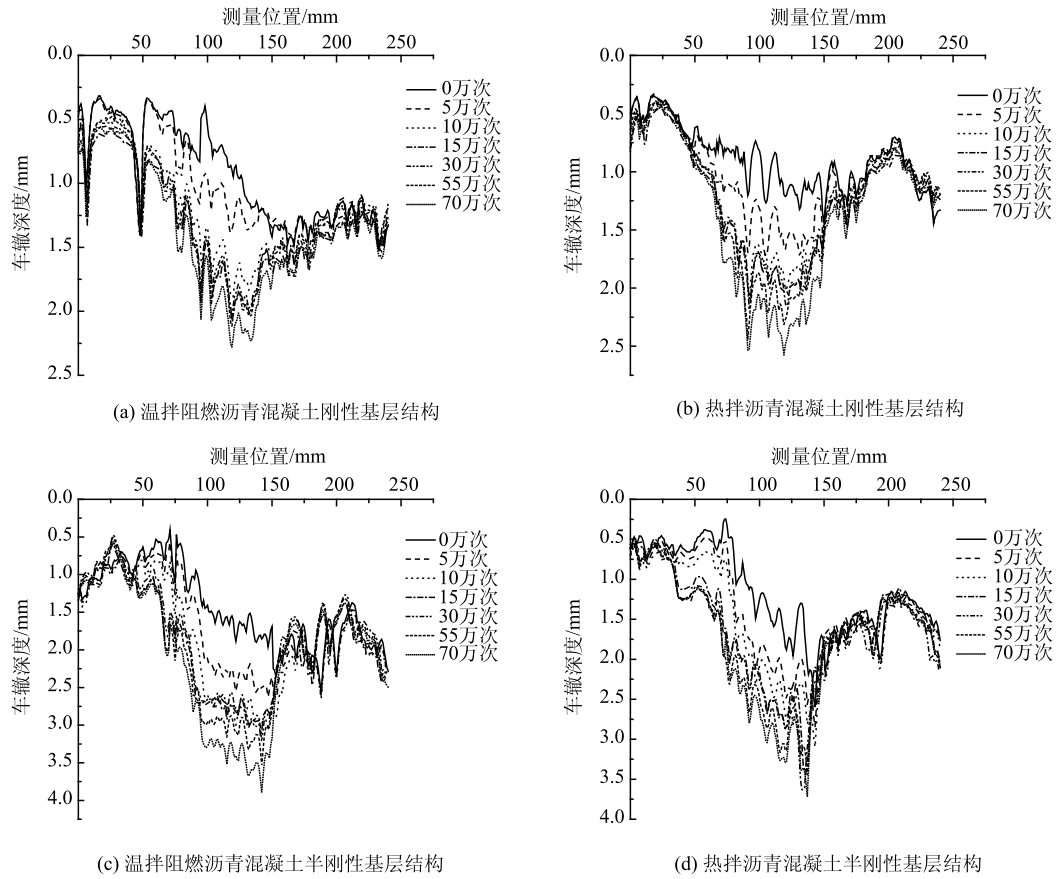


图3 车辙断面形态随加载次数的变化

Fig. 3 Rutting profile varying with loading times

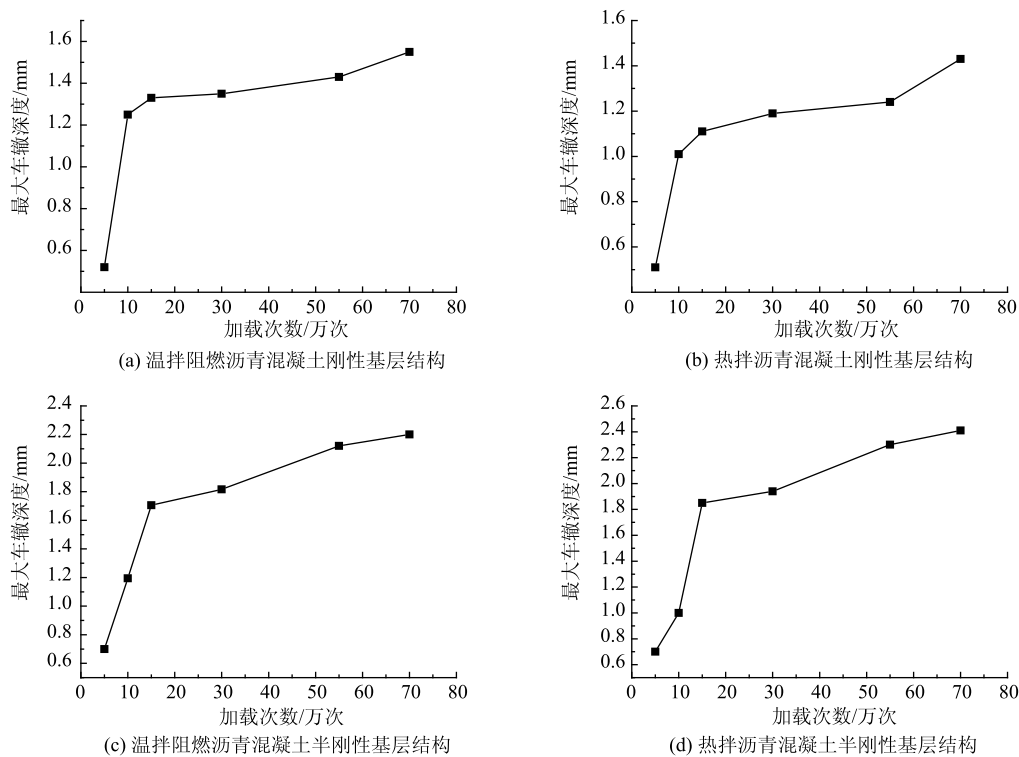


图4 车辙深度随加载次数的变化

Fig. 4 Rutting depth varying with loading times

(1) 温拌阻燃沥青混凝土路面有较好的抗车辙性能。4种路面结构车辙深度变化规律比较接近,但车辙深度低于10 mm,在试验温度下不会影响路面正常的行驶性能。

(2) 刚性基层上沥青面层剪切应力强于半刚性基层上沥青面层的剪切应力,更易产生剪切流动破坏。刚性基层结构在加载到10万次时已经接近拐点,而刚性基层结构在加载15万次时才到达拐点。由上述现象说明同样沥青面层结构情形下刚性基层沥青路面结构的抗车辙性能弱于半刚性基层路面结构。

(3) 在加载一定次数前车辙深度增加较快,其后车辙深度稳定发展。其中刚性基层结构在累计加载到20万次左右后,车辙深度基本上变化稳定,但累计加载55万次至70万次之间时,车辙深度增长速率再次增大,呈现出失稳车辙形态;而半刚性基层结构车辙深度基本处于稳定增长的状态,累计加载55万次至70万次时逐渐趋于一定值。这一现象应与沥青混凝土面层进一步压密有关,沥青混凝土进一步压密后整体抗行车荷载变形能力增强,表现为车辙深度发展趋势曲线中的稳定发展阶段。

3.2 抗滑性能

4种路面结构的摆值和构造深度变化分别如图5、图6所示。

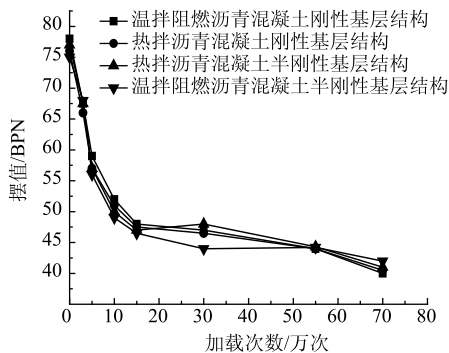


图5 路表摆值衰减规律

Fig. 5 Attenuation rule of pendulum value of pavement surface

图5、图6所示试验结果表明:

(1) 4种沥青路面结构的摆值和构造深度均随着加载次数的增加呈现出逐渐减少并趋近于稳定的规律,并且相差不大。其中温拌阻燃沥青混凝土路面也有较好的抗滑性能,表明外掺剂和基层的类型不会降低沥青路面的抗滑性能,主要是因为抗滑性能主要受集料和级配特性控制。《公路沥青路面施工技术规范》(JTG F40—2004)^[19]中要求摆值在路面竣工验收时要大于45,构造深度要大于0.55,因此,各结构

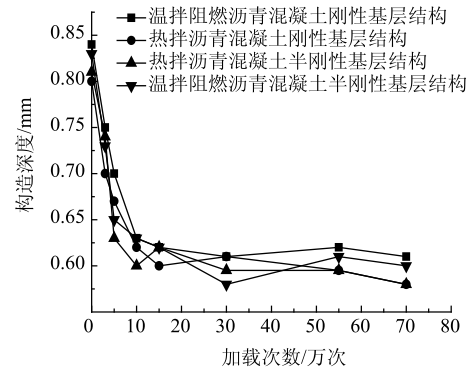


图6 路表构造深度衰减规律

Fig. 6 Attenuation rule of depth of pavement surface

类型路面的摆值和构造深度值符合规范要求。

(2) 在加载约10万次~20万次前后,4种沥青路面结构的摆值和构造深度下降幅度不同。在此之前路面抗滑性能降低较为明显,之后下降程度明显降低,并逐渐趋近于稳定。这是因为加载前期集料表面磨光速率较大,荷载的压密作用进一步降低了摆值和构造深度。

3.3 降噪性能

4种不同沥青路面结构的上面层材料的吸声系数随加载周期的变化如图7~图9所示。

图7~图9所示试验结果表明:

(1) 温拌阻燃沥青路面结构具有较好的降噪性能。由于在不同频段4种沥青路面结构的吸声系数与载重汽车和小汽车的行驶噪声峰值频率相匹配,因此4种沥青路面能有效地吸收汽车行驶时与路面相互作用产生的噪音。由于沥青路面材料的吸声系数与空隙率有关,而路面空隙率随着加载过程逐渐变小,故最后导致了吸声系数变小。并且外掺剂的加入对路面的降噪性能也没有影响。

(2) 根据图8和图9可以发现,与刚性基层路面对应结构相比,在加载到5万次和15万次时,半刚性基层上的上面层沥青混凝土的平均吸声系数和峰值吸声系数均略大些,在加载到70万次之后,结果又都趋近于一致。这说明在加载初期,半刚性基层上的上面层沥青混凝土的吸声系数下降速度要比刚性基层缓慢,这是因为半刚性基层上的沥青面层应力水平弱于刚性基层上的沥青面层应力水平,前者在加载初期被再次压密的速率有所迟缓,其空隙率降低速率相对较小。

3.4 抗压回弹模量

加载次数为0,15,70万次时分别钻芯取样,在20℃条件下进行单轴压缩试验,结果如图10所示。

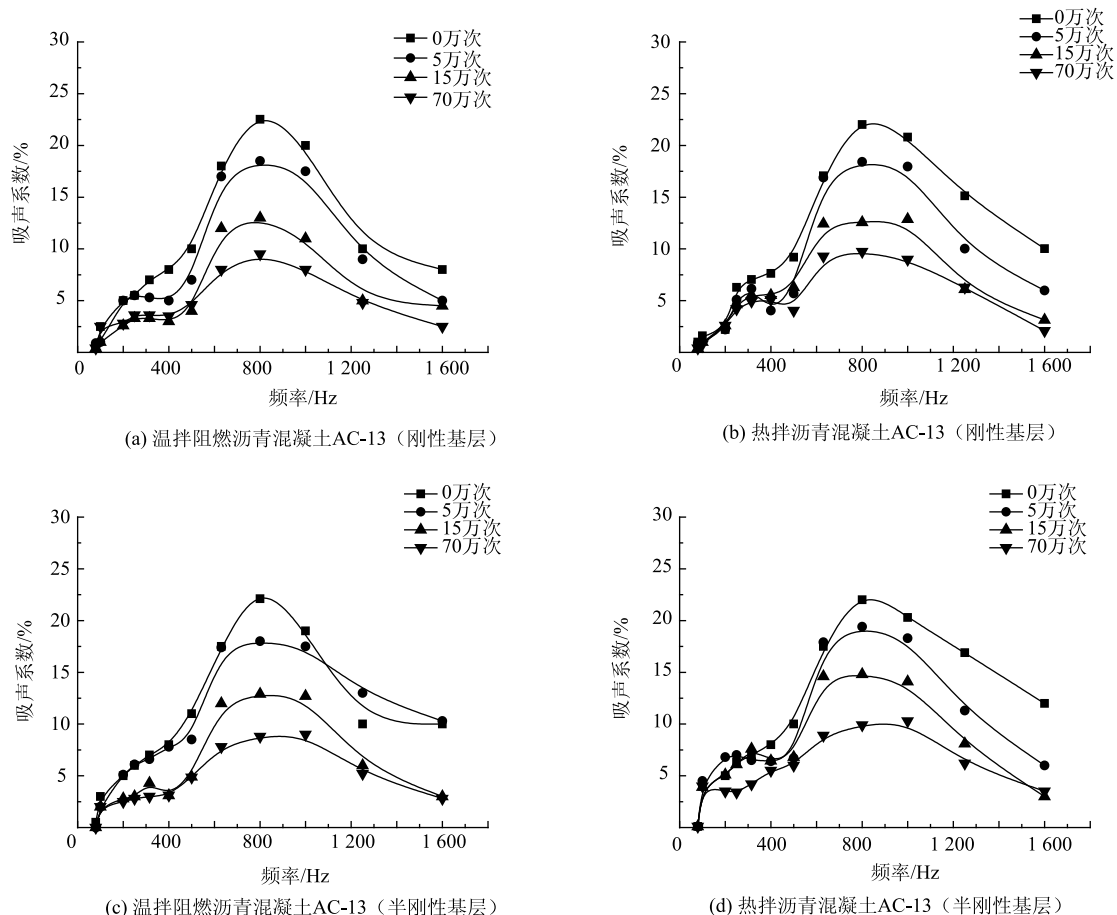


图7 上面层吸声系数随加载次数的变化

Fig. 7 Sound absorption coefficient of surface layer varying with loading times

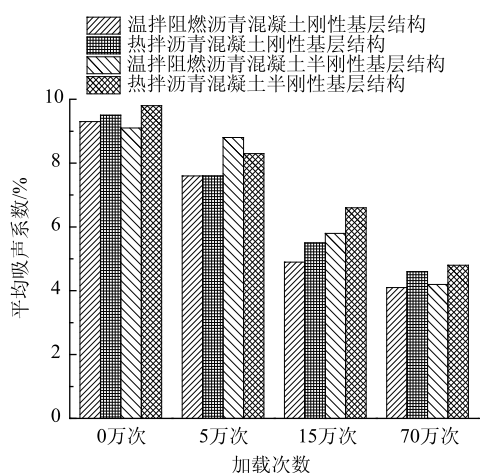


图8 上面层平均吸声系数随加载次数的变化

Fig. 8 Average sound absorption coefficient of surface layer varying with loading times

图10所示试验结果表明:

(1) 4种沥青路面结构的中面层和上面层的抗压回弹模量随着加载次数的增加先增大后减小。这一现象与沥青路面开放交通后路面进一步压密-逐渐

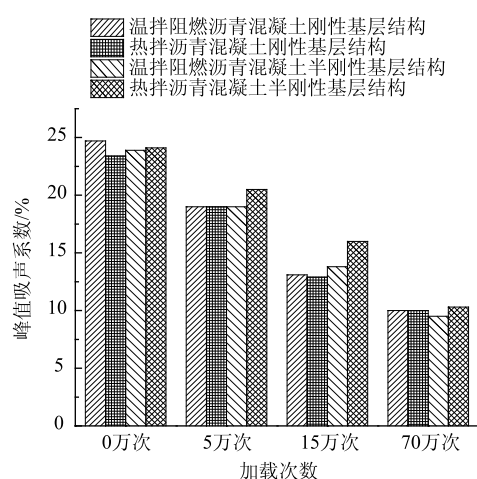


图9 上面层峰值吸声系数随加载次数的变化

Fig. 9 Peak sound absorption coefficient of surface layer varying with loading times

损伤-破坏的过程及其相应的路表面弯沉经历3个阶段的变化过程(弯沉减小-逐渐增大-急剧变化)是一致的。因此,在初始压密阶段回弹模量增大,后期随着材料损伤回弹模量不断下降,到末期临近

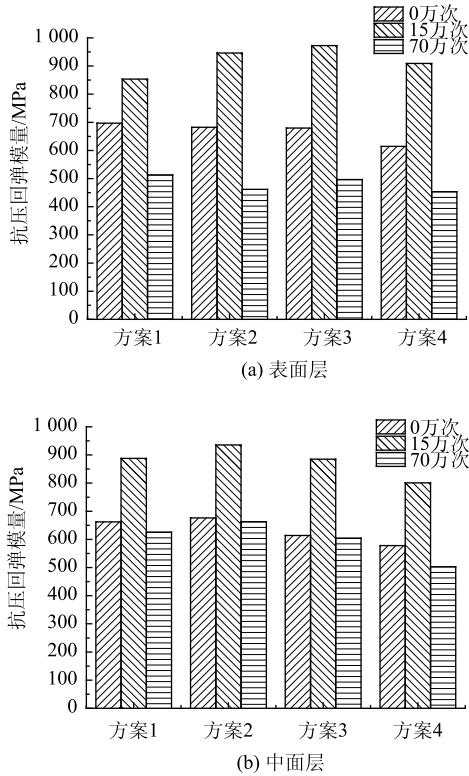


图10 沥青混凝土抗压回弹模量随加载次数的变化

Fig. 10 Compressive resilient modulus of asphalt concrete varying with loading times

破坏时抗压回弹模量急剧下降。

(2) 无论基层类型是刚性还是半刚性,在加载15万次后,同样基层类型路面的上面层温拌阻燃沥青混合料和中面层温拌沥青混合料的抗压回弹模量增长率基本都要小于对应面层的热拌沥青混合料;加载70万次后,上面层与中面层的抗压回弹模量都有不同程度的衰减,上面层的下降幅度要高于中面层,其原因是上面层直接受到荷载作用,更易损伤。同时上面层温拌阻燃沥青混合料和中面层温拌沥青混合料的抗压回弹模量减小率基本都小于对应面层的热拌沥青混合料,如刚性基层上面层温拌阻燃沥青混合料和热拌沥青混合料的抗压回弹模量与加载15万次的比值分别为0.60,0.50。但几种沥青混合料的抗压回弹模量差别不大,其差异性的主要原因可能与各种沥青混合料的成型温度不同有关,温拌阻燃沥青混合料的成型温度为130℃,温拌沥青混合料的成型温拌为145℃,热拌沥青混合料的成型温度为165℃。

(3) 试验结果还表明,同样基层上的上面层温拌阻燃沥青混合料的抗压回弹模量低于上面层热拌沥青混合料的抗压回弹模量,而中面层温拌沥青混

合料抗压回弹模量高于中面层热拌沥青混合料的抗压回弹模量。

(4) 另外,半刚性基层上的温拌阻燃沥青路面结构和热拌沥青路面结构上面层和中面层材料的抗压回弹模量均分别高于刚性基层上的对应结构层材料。这与刚性基层上沥青混凝土面层难以压实、缺陷较多有关。

3.5 劈裂强度

使用自动马歇尔试验仪在无水、15℃环境下进行劈裂强度试验,试验结果如图11所示。

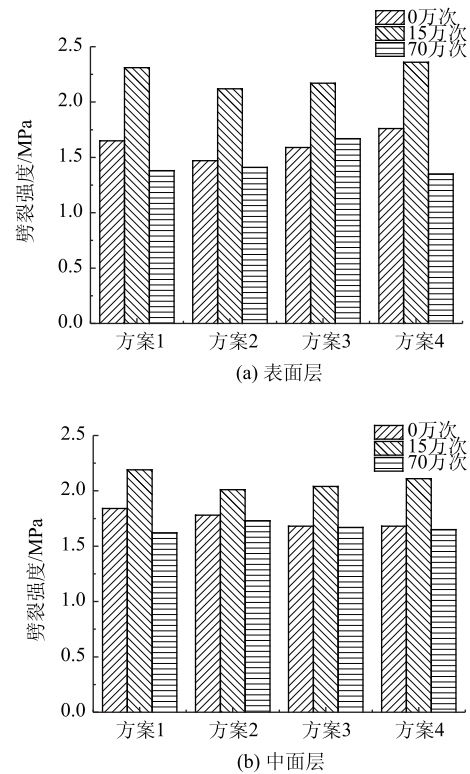


图11 沥青混凝土劈裂强度随加载次数的变化

Fig. 11 Splitting strength of asphalt concrete varying with loading times

图11所示试验结果表明:

(1) 由于路面再次压密而后损伤的缘故,4种沥青路面结构的中面层和上面层的劈裂强度随着加载次数的增加呈现出先增大后减小的趋势。

(2) 在加载了70万次后,上面层的劈裂强度下降幅度要高于中面层。其原因也是上面层直接受到荷载作用,更易损伤。

(3) 试验结果还表明,同样基层上的上面层温拌阻燃沥青混合料的劈裂强度低于上面层热拌沥青混合料的劈裂强度,而中面层温拌沥青混合料劈裂强度高于中面层热拌沥青混合料的劈裂强度。

(4) 在未加载和加载到15万次再次压密时,半

刚性基层上的温拌阻燃沥青路面结构和热拌沥青路面结构的上面层和中面层材料劈裂强度弱于刚性基层上对应路面结构层的劈裂强度。此规律与前节抗压回弹模量的规律不同,这应与沥青混合料模量取决于沥青粘结和集料嵌挤摩擦双重作用而劈裂强度主要取决于沥青粘结作用有关。经过 70 万次加载后,半刚性基层上的沥青混合料劈裂强度与刚性基层上的相同材料差不多,甚至略强。

4 结论

(1) 温拌剂和阻燃剂加入沥青路面后不会影响路面的抗车辙性能和抗滑性能,并且在加载 70 万次之后车辙深度、摆值和构造深度基本都能够满足规范要求,与热拌沥青混凝土路面性能并无差异。

(2) 4 种沥青路面均能有效地吸收汽车行驶时与路面相互作用产生的噪音。其中温拌阻燃沥青混凝土路面具有较好的降噪性能。

(3) 温拌剂与阻燃剂的加入对沥青混合料的抗压回弹模量和劈裂强度没有显著影响。在经过加速加载试验后,4 种沥青路面结构的上面层和中面层的抗压回弹模量与劈裂强度随着加载次数的增加同时呈现出先增大后减小的趋势。温拌阻燃沥青路面的抗压回弹模量的总体变化相比热拌沥青路面要小,但温拌阻燃沥青混凝土的抗压回弹模量和劈裂强度均低于热拌沥青混凝土,因此温拌剂和阻燃剂的加入影响了沥青混合料的力学性能,但对路面的使用性能没有影响。基层类型选择半刚性基层能够使面层更容易压实,使其有更好的路用性能。

参考文献:

References:

- [1] LU S Y, HAMERTON I. Recent Developments in the Chemistry of Halogen-free Flame Retardant Polymers [J]. Progress in Polymer Science, 2002, 27 (8): 1661 - 1712.
- [2] LAOUTID F, BONNAUD L, ALEXANDRE M, et al. New Prospects in Flame Retardant Polymer Materials From Fundamentals to Nanocomposites [J]. Materials Science and Engineering: Reports, 2009, 63 (3): 100 - 125.
- [3] BANERJEE A, DE FORTIER SMIT A, PROZZI J A. The Effect of Long-term Aging on the Rheology of Warm Mix Asphalt Binders [J]. Fuel, 2012, 97 (7): 603 - 611.
- [4] HAJJ E Y, SOULIMAN M I, CORTEZ E M. Influence of Warm Mix Additive on Mechanistic, Economical, and Environmental Attributes of a Polymer-modified Asphalt Mixture [J]. Advances in Civil Engineering Materials, 2014, 3 (1): 88 - 106.
- [5] CONG P, YU J, WU S, et al. Laboratory Investigation of the Properties of Asphalt and Its Mixtures Modified with Flame Retardant [J]. Construction and Building Materials, 2008, 22 (6): 1037 - 1042.
- [6] 魏建国, 谢成, 付其林. 阻燃剂对沥青与沥青混合料性能的影响 [J]. 中国公路学报, 2013, 26 (6): 30 - 37.
- WEI Jian-guo, XIE Cheng, FU Qi-lin. Influence of Flame Retardant on Technical Performances of Asphalt and Asphalt Mixture [J]. China Journal of Highway and Transport, 2013, 26 (6): 30 - 37.
- [7] 贺海, 王朝辉, 刘志胜, 等. 新型无机阻燃改性沥青的制备与路用性能研究 [J]. 公路交通科技, 2014, 31 (7): 45 - 52.
- HE Hai, WANG Chao-hui, LIU Zhi-sheng, et al. Study on Preparation Road Performance of New Inorganic Fire-retardant Modified Asphalt [J]. Journal of Highway and Transportation Research and Development, 2014, 31 (7): 45 - 52.
- [8] 黄志义, 武斌, 康诚, 等. 复合氢氧化物改性沥青阻燃和路用性能 [J]. 浙江大学学报: 工学版, 2016, 50 (1): 27 - 32.
- HUANG Zhi-yi, WU Bin, KANG Cheng, et al. Flame Retardant and Pavement Performance of Composite Hydroxide Modified Asphalt [J]. Journal of Zhejiang University: Engineering Science Edition, 2016, 50 (1): 27 - 32.
- [9] 周志刚, 熊奎元, 罗根传, 等. Sasobit 温拌沥青混凝土碾压温度离析研究 [J]. 公路交通科技, 2016, 33 (1): 14 - 21.
- ZHOU Zhi-gang, XIONG Kui-yuan, LUO Gen-chuan, et al. Research of Rolling Temperature Segregation of Sasobit Warm Mixed Asphalt Concrete [J]. Journal of Highway and Transportation Research and Development, 2016, 33 (1): 14 - 21.
- [10] 李雪连, 周志刚, 陈宇亮, 等. Sasobit 对 SBS 改性沥青性能的影响研究 [J]. 实验力学, 2015, 30 (3): 331 - 338.
- LI Xue-lian, ZHOU Zhi-gang, CHEN Yu-liang, et al. On the Effect of Sasobit on the Performance of SBS Modified Asphalt [J]. Journal of Experimental Mechanics, 2015, 30 (3): 331 - 338.
- [11] 朱祖煌. 温拌型阻燃沥青混合料的制备与性能研究 [D]. 武汉: 武汉理工大学, 2011.
- ZHU Zu-huang. Research on Preparation and Performance of Warm-mixed Flame Retardant Asphalt Mixture [D].

- Wuhan; Wuhan University of Technology, 2011.
- [12] 吴喜荣, 李素贤. 温拌阻燃降噪沥青混合料在隧道路面的应用技术 [J]. 水利与建筑工程学报, 2014, 12 (6): 172 - 175.
- WU Xi-rong, LI Su-xian. Technical Application of Warm-mix Flame-retardant Noise Reduction Asphalt Mixture in Tunnel Pavement [J]. Journal of Water Resources and Architectural Engineering, 2014, 12 (6): 172 - 175.
- [13] 罗根传, 周志刚, 劳家荣, 等. 长隧道阻燃温拌沥青路面技术研究 [R]. 长沙: 长沙理工大学, 2016.
- LUO Gen-chuan, ZHOU Zhi-gang, LAO Jia-rong, et al. Study on Long Tunnel Flame Retardant Warm Mix Asphalt Pavement Technology [R]. Changsha: Changsha University of Science and Technology, 2016.
- [14] 徐赞. 阻燃温拌沥青路面结构加速加载试验研究 [D]. 长沙: 长沙理工大学, 2016.
- XUN Yun. Accelerated Loading Test on Asphalt Pavement Modified by Warm Mix Agent and Flame Retardants [D]. Changsha: Changsha University of Science and Technology, 2016.
- [15] JTG E20—2011, 公路工程沥青及沥青混合料试验规程 [S].
- JTG E20—2011, Standard Test Methods of Bitumen and Bituminous Mixtures for Highway Engineering [S].
- [16] 王习进. 温拌剂与阻燃剂对 SBS 改性沥青路用性能的影响 [D]. 长沙: 长沙理工大学, 2014.
- WANG Xi-jin. Effect of Warm Mix Agent and Flame Retardant on SBS Modified Asphalt Performance [D]. Changsha: Changsha University of Science and Technology, 2014.
- [17] 杨志峰. 长隧道温拌 SBS 改性沥青路面技术研究 [D]. 长沙: 长沙理工大学, 2015.
- YANG Zhi-feng. Research on Warm Mix Technology for SBS Modified Asphalt Pavement in Long Tunnel [D]. Changsha: Changsha University of Science and Technology, 2015.
- [18] 熊奎元. 长隧道温拌、阻燃温拌沥青路面施工变异性分析与质量控制 [D]. 长沙: 长沙理工大学, 2015.
- XIONG Kui-yuan. The Long Tunnel Warm Mix and Flame-retardant Warm Mix Asphalt Pavement Construction Variability Analysis and Quality Control [D]. Changsha: Changsha University of Science and Technology, 2015.
- [19] JTG F40—2004, 公路沥青路面施工技术规范 [S].
- JTG F40—2004, Technical Specifications for Construction of Highway Asphalt Pavements [S].
- [20] 袁美俊. 基于加速加载试验的重载路面结构研究 [D]. 西安: 长安大学, 2009.
- YUAN Mei-jun. Study on Heavy Load Pavement Structure Based on Accelerated Loading Test [D]. Xi'an: Chang'an University, 2009.
- [21] 申爱琴, 郭寅川, 车飞, 等. 基于 MMLS 试验的混合料离析对沥青路面长期高温性能的影响 [J]. 中国公路学报, 2012, 25 (3): 80 - 86.
- SHEN Ai-qin, GUO Yin-chuan, CHE Fei, et al. Influence of Asphalt Mixture Segregation on Long-term High Temperature Performance of Asphalt Pavement Based on MMLS3 Test [J]. China Journal of Highway and Transport, 2012, 25 (3): 80 - 86.
- [22] 刘刚, 郝培文, 黄思杰, 等. 基于 MMLS3 的微表处混合料高温稳定性研究 [J]. 武汉理工大学学报, 2013, 35 (12): 67 - 71.
- LIU Gang, HAO Pei-wen, HUANG Si-jie, et al. High Temperature Stability of Micro-surfacing Coating Based on MMLS3 [J]. Journal of Wuhan University of Technology, 2013, 35 (12): 67 - 71.
- [23] 李淑明, 吴小虎, 苏志翔. 基于 MMLS3 的沥青路面结构模型的尺寸研究 [J]. 同济大学学报: 自然科学版, 2015, 43 (10): 1503 - 1509.
- LI Shu-ming, WU Xiao-hu, SU Zhi-xiang. Size of Pavement Structure Model with One-third Scaled Model Mobile Load Simulator [J]. Journal of Tongji University: Natural Science Edition, 2015, 43 (10): 1503 - 1509.