

文章编号:1671-8879(2014)03-0041-06

排水性沥青混合料热老化性能

李振霞¹, 陈渊召^{1, 2, 3}, 孙克成¹

(1. 华北水利水电大学 土木与交通学院, 河南 郑州 450011; 2. 郑州大学 水利与环境学院, 河南 郑州 450001;
3. 华北水利水电大学 生态高性能建筑材料河南省高校重点实验室培育基地, 河南 郑州 450011)

摘 要:为了研究排水性沥青混合料的热老化性能, 首先研究了沥青混合料的热老化机理, 然后通过对比分析确定了排水性沥青混合料的短期和长期热老化试验方法, 最后对 3 种不同空隙率的排水性沥青混合料, 分别研究了热老化对其高温稳定性、低温抗变形能力和抗水损害性能的影响规律。研究表明: 热老化使结合料变脆, 劲度模量变大, 沥青混合料的动稳定度变大; 相同热老化时间, 随空隙率的增大, 动稳定度增大, 空隙率高的排水性沥青混合料低温抗弯拉破坏和抗收缩应力的能力越低; 在同一空隙率下, 排水性沥青混合料的最大弯拉强度和最大弯拉应变在老化后均减小; 经过热老化处理后, 排水性沥青混合料的抗水损害性能有所提高; 在热老化时间相同条件下, 空隙率越大, 其抗水损害的能力就越差。

关键词:道路工程; 热老化性能; 排水性沥青混合料; 热老化机理

中图分类号:U416.1 **文献标志码:**A

Study on thermal aging properties of porous asphalt mixture

LI Zhen-xia¹, CHEN Yuan-zhao^{1, 2, 3}, SUN Ke-cheng¹

(1. School of Civil Engineering and Communication, North China University of Water Resources and Electric Power, Zhengzhou 450011, Henan, China; 2. School of Water Conservancy and Environment Engineering, Zhengzhou University, Zhengzhou 450001, Henan, China; 3. Cultivating Base for Key Laboratory of Eco-high-performance Building Materials in University of Henan Province, North China University of Water Resources and Electric Power, Zhengzhou 450011, Henan, China)

Abstract: In order to study the thermal aging properties of porous asphalt mixture, thermal aging mechanism of porous asphalt mixture was studied firstly. Then, short-term and long-term thermal aging test methods for porous asphalt mixture were determined through comparative analysis. Finally, systematic study on influence laws of thermal aging on three porous asphalt mixtures of different porosities was carried out respectively. The results show that because of thermal aging, asphalt becomes brittle, stiffness modulus of asphalt becomes big and the dynamic stability of porous asphalt mixture becomes big. Under the condition of the same thermal aging time, the dynamic stability increases with the increase of porosity and the abilities of low temperature anti-bending tensile failure and anti-shrinkage stress of porous asphalt mixture with higher porosity is worse. Under the condition of the same porosity, the maximum flexural tensile strength and

收稿日期:2013-05-11

基金项目:交通运输部西部交通建设科技项目(2005 318 812 13);华北水利水电大学高层次人才科研启动费资助项目(200929);
河南省教育厅科学技术研究重点项目(13A580707, 13B580109, 14A580002)

作者简介:李振霞(1977-),女,河南焦作人,副教授,工学博士,E-mail:zhenxiali2009@ncwu.edu.cn。

maximum flexure tensile strain of porous asphalt mixture all decrease after thermal aging. After thermal aging, the anti-water damage property of porous asphalt mixture will increase. Under the condition of the same thermal aging time, the anti-water damage property of porous asphalt mixture will be worse with the increase of porosity. 16 tabs, 7 figs, 14 refs.

Key words: road engineering; thermal aging property; porous asphalt mixture; thermal aging mechanism

0 引言

排水性沥青混合料(porous asphalt mixture)是指粗骨料常用单粒径集料,设计空隙率大多接近 20%,且不超过 20%,最佳沥青用量约为 4.5%,级配类型为间断级配的沥青混合料^[1-2]。排水性沥青混合料主要存在两方面缺点:一个是杂物易堵塞混合料空隙;另一个是沥青容易老化。由于杂物堵塞空隙将会使排水性沥青混合料的降噪排水功能受很大影响,这两方面功能将丧失其相对于传统密级配混合料的优势,其作用相当于普通沥青混合料。沥青的老化则会大大减少排水性沥青混合料的使用寿命,其使用寿命将会小于普通沥青混合料,分析其原因,则是因为其较大的空隙率大幅度的加速了沥青的老化。在行车荷载水平力作用下,排水性沥青混合料的集料会不断被带走,使排水性沥青路面的平整度达不到使用要求。与普通沥青混合料路面相比,由于其使用寿命较短,使用此沥青路面的经济价值不足,这样就限制了该排水、降噪沥青路面的大面积采用^[3-7]。采用 SBS 改性沥青设计的 PA 混合料国内外已有一些学者进行相关的研究,研究的内容主要集中在对 SBS 改性沥青 PA 混合料性能的分析上^[8-9]。新加坡、澳洲等国家和地区都在大量采用 PA 路面,提高路面的使用功能^[10-11]。王波等研究了大孔隙沥青混合料的受力特点,分析了大孔隙沥青混合料的高温稳定性^[12]。因此,有关排水沥青混合料的老化性能研究很少,有必要深入研究热老化对排水性沥青混合料高温、低温、抗水损害性能的影响。

1 热老化试验方法及研究

1.1 热老化机理分析

热老化主要是针对混合料中的沥青而言,轻质油分的挥发和沥青的氧化过程是沥青热老化的主要形式。在排水性沥青混合料施工过程中及排水性沥青路面使用过程中,由于部分油分的持续失去,结合料就会不断变硬、变脆,其结合能力就会连续减小。在沥青混合料的搅拌过程中,加热搅拌温度越高、结合料老化程度就越深。并且在此过程中,沥青

薄膜裹在热集料表面,高温状态的沥青膜与空气接触时,轻质油分将会马上挥发,沥青膜与空气中的氧气发生很严重的老化反应。试验表明,经加热拌和,沥青的针入度可能降低到原沥青针入度的 63%~85%。这表明由于加热搅拌过程中的热老化作用,沥青的针入度下降了 21%~53%,说明由于热老化作用,沥青的路用性能受到了较大影响^[13-14]。

1.2 热老化试验方法

1.2.1 SHRP 热老化试验方法对比

为分析排水性沥青混合料的热老化性能,应着重研究排水性沥青混合料拌和、储存和运输过程中挥发和氧化反应,以及摊铺碾压完成后的排水性沥青路面使用过程中的轻质油分挥发和氧化反应,而且试验方法简单易行。SHRP 提出了 3 种短期热老化方法^[11]:①烘箱加热法,是将拌好的沥青混合料放在烘箱中加热老化;②延时拌和法,该方法是采用延长拌和时间的手段使沥青混合料发生氧化反应;③微波加热法,该方法是 将沥青混合料通过微波加热氧化。

对 SHRP 提出的短期热老化方法评价如表 1 所示。通过对比分析这 3 种方法可知:烘箱加热法可较好地模拟现场条件、操作简单易行、花费少,所以本文采用烘箱加热法进行短期热老化评价。

表 1 沥青混合料短期老化方法评价
Tab. 1 Evaluation of short-term aging test methods

试验方法	烘箱加热法	延时拌和法	微波加热法
模拟现场效果	优	只模拟拌和	差
难易性	容易	容易	易于使用
花费	中等	中等	中等
借鉴经验	很少	没有	几乎没有
可靠度	难以评价	难以评价	难以评价
对沥青混合料变化的敏感性	难以评价	难以评价	难以评价

SHRP 提出的 3 种长期热老化方法分别是:加压氧化法、延时烘箱加热法和红外、紫外线处理法。对 SHRP 提出的短期热老化方法的有效性评估如下页表 2 所示。通过对比分析这 3 种方法可知:延时烘箱加热法和加压氧化法均可较好地模拟现场条件、操作简单易行、花费少,所以采用延时烘箱加热法进行长期热老化评价。

表 2 沥青混合料长期老化方法评价

试验方法	加压氧化处理	延时烘箱加热	红外、紫外线处理
模拟现场效果	较好	好	不稳定
难易性	复杂	容易	复杂
花费	较高	中等	较高
借鉴经验	基本没有	基本没有	基本没有
可靠度	差	差	难以评价
对沥青混合料变化的敏感性	较敏感	较敏感	难以评价

1.2.2 采取的试验方法

空隙率和老化试件分别是影响沥青混合料老化性能的关键因素,本文试验研究主要考虑这 2 个因素对排水性沥青混合料热老化性能的影响。采用的

表 3 高粘沥青老化前后性能对比

Tab.3 Performances comparison of high-viscosity asphalt before and after aging

性能指标	针入度(25℃,100 g,5 s)	软化点/℃	延度(5℃)/cm	劲度/MPa	质量变化/%	残留针入度/%
老化前	55.7	94.8	38.4	51.1		
老化后	41.3	82.0	28.5	60.5	-0.14	77.5

表 4 排水性沥青混合料级配组成及沥青用量

Tab.4 Asphalt contents and gradation compositions of porous asphalt mixtures

级配类型	不同筛孔(mm)的通过率/%						沥青用量/%
	16	13.2	9.5	4.75	2.36	0.075	
级配 1	100	90	48	11	10	5	5.0
级配 2	100	93	55	15	13	5	5.3
级配 3	100	95	60	18	16	5	5.5

2 热老化对排水性沥青混合料高温性能的影响

通过车辙试验分析排水性沥青混合料的高温性能,结果如表 5~表 7 和图 1、图 2 所示。

表 5 级配 1 车辙试验结果

Tab.5 Rutting test results of gradation 1

老化程度	45 min 车辙深度/mm	60 min 车辙深度/mm	动稳定度/(次·mm ⁻¹)	试件相对变形/%
未老化	2.264	2.408	4 550	4.82
老 化	1.407	1.470	10 393	2.94

表 6 级配 2 车辙试验结果

Tab.6 Rutting test results of gradation 2

老化程度	45 min 车辙深度/mm	60 min 车辙深度/mm	动稳定度/(次·mm ⁻¹)	试件相对变形/%
未老化	1.893	2.009	5 649	4.02
老 化	1.109	1.163	12 107	2.33

表 7 级配 3 车辙试验结果

Tab.7 Rutting test results of gradation 3

老化程度	45 min 车辙深度/mm	60 min 车辙深度/mm	动稳定度/(次·mm ⁻¹)	试件相对变形/%
未老化	1.711	1.796	7 709	3.59
老 化	0.679	0.722	14 825	1.44

热老化方法是:将试样均匀分散于试样盘中,试样层为 21~22 kg/m²,然后按以下方法进行试验。

将拌和好的试样放进 135℃±1℃烘箱中强制通风老化,每隔 1 h 将试样翻拌一次,4 h 后成型排水性沥青混合料试件;然后再将成型后的试件放进 85℃±1℃烘箱中强制通风老化 5 d。

1.3 研究内容

结合料采用高粘改性沥青,其老化前后性能对比如表 3 所示。分别按照 20%、18%、15%的空隙率设计 3 种排水性沥青混合料,级配组成如表 4 所示。本文主要研究内容为:①分别进行 3 种级配组成沥青混合料热老化,对高温、低温、抗水损害等性能的影响分析;②研究空隙率对热老化混合料耐久性的影响。

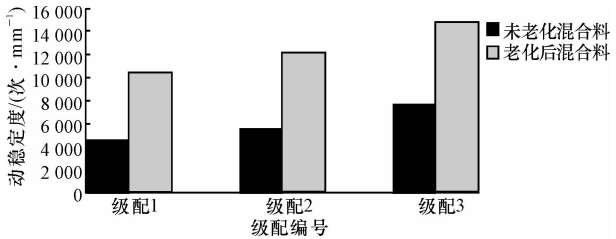


图 1 不同级配排水性沥青混合料老化前后的动稳定度
Fig.1 Dynamic stabilities for different gradations of porous asphalt mixtures before and after aging

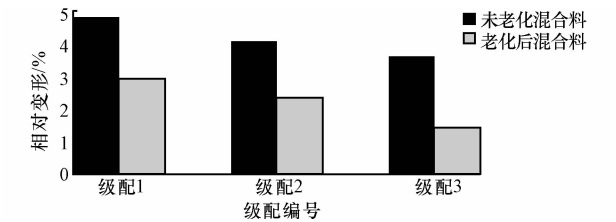


图 2 不同级配排水性沥青混合料老化前后的相对变形
Fig.2 Relative deformations for different gradations of porous asphalt mixtures before and after aging

分析表 5~表 7 和图 1、图 2 可知,在相同老化时间,不同空隙率时,排水性沥青混合料经 135℃老化 4 h 和 85℃老化 5 d 后,级配 1 的动稳定度增大

了 1.28 倍,相对变形减小了 1.88%;级配 2 的动稳定度增大了 1.14 倍,相对变形减小了 1.69%;级配 3 的动稳定度增大了 0.92 倍,相对变形减小了 2.15%。3 种级配排水性沥青混合料对比,孔隙率越大,老化前后的动稳定度均越小,而相对变形均越大。

热老化导致沥青混合料中的沥青变脆,沥青的劲度模量变大,从而使得沥青混合料的高温稳定性变好。在热老化时间一定的条件下,空隙率越大,结合料的老化会越深,沥青混合料的高温稳定性会越好。

3 热老化对排水性沥青混合料低温性能的影响

为研究不同空隙率条件下热老化对排水性沥青混合料低温性能的影响,采用低温弯曲试验进行分析,试验结果如表 8~表 10 和图 3~下页图 5 所示。

表 8 级配 1 低温弯曲试验结果

Tab. 8 Bending test results at low temperature of gradation 1

试件		极限荷载/N	抗弯拉强度/MPa	最大弯拉应变/10 ⁻⁶	弯曲劲度模量/MPa
未老化	试件 1	807	6.054	4 000	1 409.321
	试件 2	776	5.560	3 000	1 697.263
	试件 3	758	5.350	4 000	1 396.149
	试件 4	604	4.289	3 000	1 553.813
平 均			5.313	4 000	1 514.137
老 化	试件 1	591	4.389	3 000	1 350.775
	试件 2	604	4.911	3 000	1 581.600
	试件 3	758	5.280	4 000	1 366.566
	试件 4	623	5.155	4 000	1 435.423
平 均			4.934	3 000	1 433.591

表 9 级配 2 低温弯曲试验结果

Tab. 9 Bending test results at low temperature of gradation 2

试件		极限荷载/N	抗弯拉强度/MPa	最大弯拉应变/10 ⁻⁶	弯曲劲度模量/MPa
未老化	试件 1	875	7.028	4 000	1 934.448
	试件 2	851	6.244	5 000	1 149.951
	试件 3	1 183	8.785	5 000	1 802.557
	试件 4	965	7.455	4 000	1 735.304
平 均			7.378	5 000	1 655.565
老 化	试件 1	843	6.362	4 000	1 456.606
	试件 2	794	5.650	4 000	1 466.256
	试件 3	955	6.833	5 000	1 382.940
	试件 4	832	6.057	3 000	1 849.003
平 均			6.226	4 000	1 435.267

分析表 8~表 10 和图 3~图 5 可知,在老化时间相同的条件下,空隙率增大时其抗弯拉强度和最大弯拉应变减小。空隙率越高时其老化后抵抗破坏的能

力越低,这样其抗低温收缩的能力也就越低;在空隙率相同的条件下,其抗弯拉强度和最大弯拉应变在老化后都会变小;虽然热老化后其最大弯拉应力和最大弯拉应变都会变小,但其劲度模量变化不具有规律性,所以,不能用劲度模量作为评价抗低温性能的指标。也就是说仅用劲度模量来判断排水性沥青混合料的低温性能不科学。因此,应综合考虑抗弯拉强度和最大弯拉应变评价排水性沥青混合料的低温性能。

表 10 级配 3 低温弯曲试验结果

Tab. 10 Bending test results at low temperature of gradation 3

试件		极限荷载/N	抗弯拉强度/MPa	最大弯拉应变/10 ⁻⁶	弯曲劲度模量/MPa
未老化	试件 1	916	7.392	5 000	1 596.296
	试件 2	1 272	9.318	4 000	2 465.043
	试件 3	1 306	9.492	7 000	1 456.652
	试件 4	971	7.525	5 000	1 433.369
平 均			8.432	5 000	1 737.840
老 化	试件 1	955	7.670	4 000	1 847.398
	试件 2	850	6.237	5 000	1 276.222
	试件 3	1 164	8.644	4 000	2 280.351
	试件 4	927	7.161	4 000	1 666.971
平 均			7.428	4 000	1 767.735

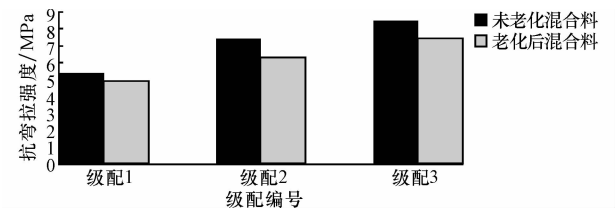


图 3 不同级配排水性沥青混合料老化前后的抗弯拉强度

Fig. 3 Flexural tensile strengths for different gradations of porous asphalt mixtures before and after aging

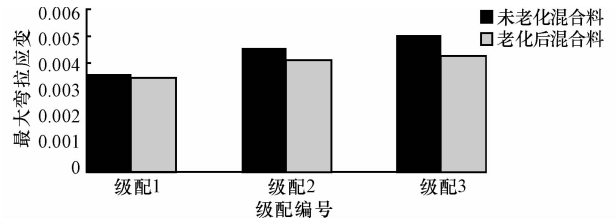


图 4 不同级配排水性沥青混合料老化前后最大弯拉应变

Fig. 4 Maximum flexure tensile strains for different gradations of porous asphalt mixtures before and after aging

4 热老化对排水性沥青混合料抗水损害性能的影响

为研究热老化前后混合料的抗水损害性能变化规律,测试冻融循环前后试件的劈裂强度变化。测试结果如下页表 11~表 16 所示,表中 TSR 为冻融劈裂试验强度比。

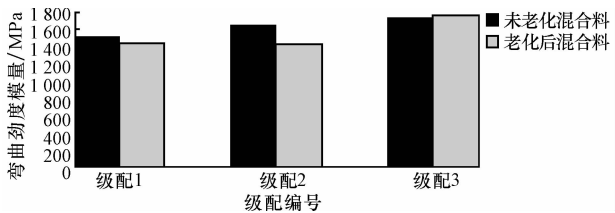


图 5 不同级配排水性沥青混合料老化前后弯曲劲度模量
Fig. 5 Bending stiffness moduli for different gradations of porous asphalt mixtures before and after aging

表 11 级配 1 未老化冻融劈裂试验结果
Tab. 11 Freeze-thaw split test results of gradation 1 under pre aging

试 件	荷载/N	劈裂抗拉强度/MPa	劈裂抗拉强度均值/MPa	TSR/%
冻 融	4 680	0.459 4	0.459 9	89.59
	4 420	0.436 9		
	4 820	0.476 8		
	4 720	0.466 6		
未冻融	4 820	0.472 4	0.513 4	
	5 020	0.493 5		
	5 620	0.551 6		
	5 410	0.536 1		

表 12 级配 1 老化后时冻融劈裂试验结果
Tab. 12 Freeze-thaw split test results of gradation 1 after aging

试 件	荷载/N	劈裂抗拉强度/MPa	劈裂抗拉强度均值/MPa	TSR/%
冻 融	3 910	0.389 0	0.393 1	80.67
	3 900	0.392 0		
	3 950	0.395 8		
	3 960	0.395 5		
未冻融	4 820	0.486 8	0.487 3	
	4 380	0.436 7		
	4 900	0.492 5		
	4 800	0.482 5		

表 13 级配 2 未老化冻融劈裂试验结果
Tab. 13 Freeze-thaw split test results of gradation 2 before aging

试 件	荷载/N	劈裂抗拉强度/MPa	劈裂抗拉强度均值/MPa	TSR/%
冻 融	5 020	0.493 1	0.515 4	88.44
	5 230	0.507 8		
	5 300	0.523 1		
	5 450	0.537 5		
未冻融	5 810	0.570 7	0.582 7	
	4 620	0.450 7		
	5 870	0.580 3		
	5 960	0.597 1		

表 14 级配 2 老化后冻融劈裂试验结果
Tab. 14 Freeze-thaw split test results of gradation 2 after aging

试 件	荷载/N	劈裂抗拉强度/MPa	劈裂抗拉强度均值/MPa	TSR/%
冻 融	4 880	0.487 8	0.479 6	86.55
	4 750	0.465 9		
	4 730	0.471 6		
	4 900	0.492 9		
未冻融	5 400	0.538 5	0.554 0	
	5 820	0.583 6		
	5 680	0.561 5		
	5 380	0.532 7		

表 15 级配 3 未老化冻融劈裂试验结果
Tab. 15 Freeze-thaw split test results of gradation 3 before aging

试 件	荷载/N	劈裂抗拉强度/MPa	劈裂抗拉强度均值/MPa	TSR/%
冻 融	6 119	0.601 1	0.615 2	94.82
	6 320	0.613 7		
	6 280	0.619 8		
	6 350	0.626 2		
未冻融	6 310	0.619 9	0.648 8	
	6 420	0.626 3		
	6 670	0.659 3		
	6 660	0.667 3		

表 16 级配 3 老化后冻融劈裂试验结果
Tab. 16 Freeze-thaw split test results of gradation 3 after aging

试 件	荷载/N	劈裂抗拉强度/MPa	劈裂抗拉强度均值/MPa	TSR/%
冻 融	5 820	0.582 6	0.549 4	90.01
	5 860	0.583 9		
	5 000	0.503 4		
	5 220	0.527 6		
未冻融	5 960	0.602 4	0.610 4	
	6 080	0.617 0		
	5 760	0.585 0		
	6 180	0.636 9		

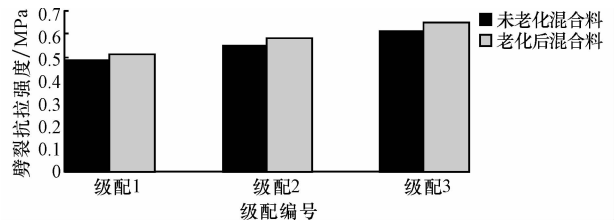


图 6 不同级配排水性沥青混合料老化前后未冻融劈裂抗拉强度
Fig. 6 Splitting tensile strengths before freeze-thaw for different gradations of porous asphalt mixtures before and after aging

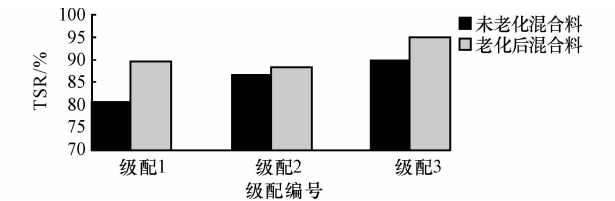


图 7 不同级配排水性沥青混合料老化前后的 TSR
Fig. 7 TSRs for different gradations of porous asphalt mixtures before and after aging

分析表 11~表 16 及图 6、图 7 可知,排水性沥青混合料的空隙率越小,其 TSR 会越大,表明随着空隙率变小,排水性沥青混合料的抗水损害的能力会越来越好。对任一空隙率,热老化后排水性沥青混合料的 TSR 值都比未热老化的排水性沥青混合料大,这表明经过热老化后其抗水损害性能有所提高。

5 结 语

(1)热老化导致排水性沥青混合料中的结合料氧化,使得沥青变脆、变硬,其劲度模量随之增大,这会引起其动稳定度变大,同时其相对变形量会随之变小。相同的热老化时间,随着空隙率的增大,沥青混合料老化加深,动稳定度增大程度越大。

(2)在热老化时间相同的条件下,空隙率增大时,排水性沥青混合料抗弯拉破坏的能力就会降低,其抗低温收缩应力的能力也会降低;在空隙率相同的条件下,老化后其抗弯拉强度和最大弯拉应变都会降低;在评价热老化排水性沥青混合料低温性能时要结合抗弯拉强度和最大弯拉应变考虑。

(3)对任一空隙率,未老化排水性沥青混合料 TSR 值均要比老化后的排水性沥青混合料大,说明经过热老化处理后,排水性沥青混合料的抗水损害性能有所降低。相同的热老化时间下,随着空隙率的增大,排水性沥青混合料的抗水损害性能越差。

参考文献:

References:

- [1] 李红平,吴德军.不同改性沥青 PA 路面(OGFC-13)路用性能的研究[J].公路,2009(6):151-154.
LI Hong-ping, WU De-jun. Research of pavement performance for different modified asphalt PA pavement (OGFC-13)[J]. Highway, 2009(6):151-154. (in Chinese)
- [2] 杨 春.高粘改性沥青 OGFC 的性能及应用研究[D].重庆:重庆交通大学,2008.
YANG Chun. Study on performance and application for high viscosity modified asphalt OGFC [D]. Chongqing:Chongqing Jiaotong University, 2008. (in Chinese)
- [3] James W. Greenroads: research into permeable pavers [J]. Stormwater, 2002, 3(2): 213-219.
- [4] Abdullah W S, Obaidat M T, Abu-Sa'da N M. Influence of aggregate type and gradation on voids of asphalt concrete pavements[J]. Journal of Materials in Civil Engineering, 1998, 10(2): 76-85.
- [5] Guin J A, Chang H S, Yen S C. Absorption of asphalt into porous aggregate[J]. American Chemical Society, Division of Petroleum Chemistry, PrePrints, 1990, 35(3): 370-375.
- [6] Schiuter W, Jefferies C. Modeling the outflow from a

- porous pavement [J]. Urban Water, 2004, 4(3): 245-253.
- [7] Maggiore C, Airey G, Marsac P. A dissipated energy comparison to evaluate fatigue resistance using 2-point bending[J]. Journal of Traffic and Transportation Engineering, English Edition, 2014, 1(1): 49-54.
- [8] Alvarez A M, Amy E, Estakhri C, et al. Determination of volumetric properties for permeable friction course mixtures[J]. Journal of Testing and Evaluation, 2009, 37(1): 1-10.
- [9] 关彦斌.大空隙沥青路面的透水机理及结构设计研究[D].北京:北京交通大学,2008.
GUAN Yan-bin. Study on infiltration mechanism and structure design of porous asphalt pavement[D]. Beijing: Beijing Jiaotong University, 2008. (in Chinese)
- [10] 倪富健,徐 皓,冷 真,等.沥青性质对排水性沥青混合料性能的影响[J].交通运输工程学报,2003, 3(4): 1-4.
NI Fu-jian, XU Hao, LENG Zhen, et al. Influence of asphalt properties on porous asphalt mixture performance [J]. Journal of Traffic and Transportation Engineering, 2003, 3(4): 1-4. (in Chinese)
- [11] 曹卫东,周海生,吕伟民.多孔弹性路面的降噪机理与性能研究[J].上海公路,2004(2): 17-19.
CAO Wei-dong, ZHOU Hai-sheng, LU Wei-min. Study on noise reduction properties and mechanism of porous elastic road surface[J]. Shanghai Highways, 2004(2): 17-19. (in Chinese)
- [12] 王 波,霍 亮,高建明.多孔混凝土铺装吸声性能试验研究[J].四川建筑科学研究,2004, 30(4): 85-89.
WANG Bo, HUO Liang, GAO Jian-ming. Sound absorption performance test researches of porous concrete pavement[J]. Building Science Research of Sichuan, 2004, 30(4): 85-89. (in Chinese)
- [13] 刘 刚.纤维改性排水性沥青混合料组成设计与性能研究[D].武汉:武汉理工大学,2006.
LIU Gang. Study on component design and properties of fibers modified porous asphalt mix[D]. Wuhan: Wuhan University of Technology, 2006. (in Chinese)
- [14] 徐 皓,倪富健,陈荣生,等.排水性沥青混合料耐久性[J].交通运输工程学报,2005, 5(2): 27-31.
XU Hao, NI Fu-jian, CHEN Rong-sheng, et al. Durability of porous asphalt mixture[J]. Journal of Traffic and Transportation Engineering, 2005, 5(2): 27-31. (in Chinese)