

# 基于减少路表径流污染的多孔沥青混合料设计

解晓光, 王 龙

(哈尔滨工业大学 交通科学与工程学院, 黑龙江 哈尔滨 150090)

**摘要:** 在明确路表径流污染主要评价指标的基础上确定了可减少路表径流量的沥青混合料的目标空隙率, 继而从多孔沥青混合料组成设计出发, 研究不同空隙结构沥青混合料控制径流污染的效能和力学性能, 从而提出多孔沥青混合料材料设计要点, 为设计生态环保型透水路面提供参考。

**关键词:** 多孔沥青混合料; 空隙结构; 径流污染; 去污效能; 力学性能

中图分类号: U416

文献标志码: A

## Porous Asphalt Design Based on Decreasing Runoff Pollutant

XIE Xiaoguang, WANG Long

(School of Transportation Science & Engineering, Harbin Institute of Technology, Harbin 150090, China)

**Abstract:** The evaluation index of runoff pollutant is first determined, and then the target air void of asphalt mix is ascertained to decrease the runoff quantity. From the prospect of porous asphalt composition design, a study is made of different structures of porous asphalts to assess the mechanical properties and surface run-off control. At last, the key issues for porous asphalt design are proposed, which provides a reference for the eco-friendly porous asphalt mix design and construction.

**Key words:** porous asphalts; void structure; runoff pollutant; pollutant-removal efficiency; mechanical property

多孔沥青混合料作为沥青路面面层材料, 具有良好的吸声降噪、提高雨天交通安全、减小地表径流量及蒸发降温、缓解城市热岛效应的特点, 作为透水路面的面层材料同时具有补给城市地下水的优点。此外, 研究表明<sup>[1]</sup> 透水性沥青路面结构可以有效地降低路面径流中污染物的浓度, 达到净化水体的作用。但目前国内外控制路面径流污染的有效技术措施主要是因地制宜地采用渗坑、人工湿地和沉淀池

等工程辅助方法, 并未从多孔沥青路面材料角度研究其控制径流污染的功效率和行为规律。因此, 本文主要从基于减少路表径流污染的角度研究多孔沥青混合料的组成设计, 明确多孔沥青混合料不同孔隙结构对其路用性能及径流污染控制效能的影响规律, 从而为多功能透水路面材料设计提供依据。

## 1 研究方法

### 1.1 径流污染的评价指标

已有研究成果表明<sup>[2-4]</sup>, 公路径流中的污染物有悬浮固体(SS)和有机污染物(COD)、重金属、P 和 N 营养物、氯化物、油和脂、农药和多环芳烃(PAHs)等, 其中 COD, SS 是公路路面径流最主要的污染物, 其主要来源于轮胎磨损颗粒、筑路材料磨损颗粒、运输物品的泄露、刹车连接装置产生的颗粒及其他与车辆运行有关的颗粒物、大气降尘及除冰剂等。因此本文确定路面径流污染的评价指标为 COD 去除率和 SS 去除率, 去除率越大表征去除水中有机污染物和悬浮固体的能力越强。

### 1.2 水样的制备

影响降雨径流污染物浓度的主要因素有降雨量、降雨强度、降雨历时等, 研究表明<sup>[3]</sup>, 初期降雨径流中污染物浓度较高, 随降雨历时增加, 径流污染物浓度降低并趋于稳定。本文为了区分不同孔隙结构沥青混合料的去污效能, 采用的是径流初期的污染物浓度, 根据已有研究成果确定了相应的路面径流污染物成分和数量<sup>[5-6]</sup>, 在实验室自行调配水样。

### 1.3 成型方法

碾压成型是形成沥青混合料强度的关键步骤之一。研究表明, 对于粗集料质量分数大于 60% 的混合料, 马歇尔压实标准偏低, 振动压实可明显提高压实标准<sup>[7]</sup>, 同时考虑到试件成型应反映现代机械装备与工艺水平, 因此本文采用振动成型方法, 由自行设

计的频率、振幅与激振力等振动碾压三要素可调的上置式振动压实设备实现<sup>[8]</sup>. 采用的最佳振动参数为:激振力 7 kN、频率 30 Hz、振幅 0.957 mm、振动时间 2.5 min. 试件尺寸为 152 mm×100 mm.

## 2 可减少路表径流量的目标空隙率

为了控制透水性沥青路面地表径流的产生,就要使透水性沥青路面获得最大的渗水和储存雨水的功能. 即

$$Q'_{\max} \geq 60Q_3t \quad (1)$$

式中: $Q'_{\max}$ 为透水性沥青路面获得最大渗水和储存雨水量, $m^3$ ;  $Q_3$ 为路面地表径流量, $m^3 \cdot s^{-1}$ ;  $t$ 为降雨历时,min.

对长度为  $L$ 、单向车道宽度为  $B$  的透水性沥青路面而言,有

$$Q_s = \int_0^{t_m} q' dt = 6 \times 10^{-5} K_s J F t \quad (2)$$

式中: $Q_s$ 为实际渗透量;  $t_m$ 为降雨持续最长时间; $q'$ 为单位时间透过试件截面流量, $cm^3 \cdot s^{-1}$ ;  $K_s$ 为试件实际渗透系数, $cm \cdot s^{-1}$ ;  $J$ 为透水性沥青路面的合成坡度;  $F$ 为透水性沥青路面面积, $m^2$ ,  $F=LB$ .

因此,为了控制透水性沥青路面地表径流的产生,要求满足下式:

$$Q_s \geq 60Q_3t \quad (3)$$

即

$$6 \times 10^{-5} K_s J F t \geq 60Q_3t \quad (4)$$

$$K_s = 0.20V - 2.76$$

式中, $V$ 为透水性沥青混合料控制地表径流产生的目标空隙率.

$$V \geq \frac{10^7 Q_3}{2JF} + 13.8 \quad 1 \leq J \leq 8 \quad (5)$$

式中: $Q_3 = q\psi F$ ,  $q$ 为设计暴雨强度, $m^3 \cdot s^{-1} \cdot km^{-2}$ ,  $q = 16.7i$ ;  $\psi$ 为径流系数,对于透水性沥青路面,  $\psi = 0.7$ ;  $i$ 为设计重现期和降雨历时内的平均降雨强度, $mm \cdot min^{-1}$ ,  $i = c_p c_t q_{5,10}$ <sup>[9]</sup>,在东北地区,按 5 年重现期降雨历时 30 min 计算,查得  $c_p = 1.0$ ,  $c_t = 0.55$ ,  $q_{5,10} = 2.0$ ,计算得  $i = 1.1$ . 当  $K_b = 0.20V - 2.76$  时,

$$V \geq \frac{Q_3}{2JF} + 13.8 = \frac{q\psi F}{2JF} + 13.8 = \frac{0.5 \times 16.7 \times 0.7 \times 1.1}{8} + 13.8 = \begin{cases} 14.6 & J=8 \\ 20.2 & J=1 \end{cases}$$

由此,根据东北地区降雨特点,计算得到可控制地表径流量的透水路面沥青混合料的目标空隙率不小于 15%.

## 3 基于减少径流污染的沥青混合料设计

沥青路面要达到透水功能、控制路表径流量,沥青混合料的空隙率应不小于 15%,而空隙率大于 30%时,沥青混合料很难满足行车条件下的力学指标要求. 因此,本文考虑满足控制路面径流量以及路用性能的要求,初步确定沥青混合料的空隙率范围为 15%~30%,并研究此空隙率范围内沥青混合料控制路面径流污染的效能和力学性能.

### 3.1 材料组成

试验采用的是石灰岩集料,主要技术指标见表 1,满足高等级公路表面层对集料的要求. 沥青为普通沥青西太 AH-90 和日本高粘度改性沥青 TPS. 沥青混合料级配设计采用的是体积设计法,主要考虑了 3 个影响因素<sup>[10]</sup>,即粗集料分布(骨架 4)、细集料分布(泰波指数  $n = 0.65$ )、不同的填充系数(0.1, 0.4, 0.7 和 0.9),所得沥青分别记为 4-0.65-0.1, 4-0.65-0.4, 4-0.65-0.7 和 4-0.65-0.9,以设计出目标空隙率分别为 15%, 20%, 25% 和 30% 的沥青混合料. 具体级配如表 2 所示.

表 1 集料技术指标

| Tab.1 Aggregate properties |        |          |        |
|----------------------------|--------|----------|--------|
| 集料                         | 压碎值/%  | 洛杉矶磨耗值/% | 磨光值    |
| 石灰岩                        | 22.6   | 21.7     | 46.3   |
| 高速公路表面层集料要求                | 不大于 26 | 不大于 28   | 不小于 40 |

表 2 不同空隙沥青混合料的级配

| Tab.2 Gradation of asphalt mixes with different voids |                     |            |            |            |
|---|---------------------|------------|------------|------------|
| 筛孔尺寸/mm   | 4 种级配各筛孔尺寸的通过质量分数/% |            |            |            |
|   | 4-0.65-0.1          | 4-0.65-0.4 | 4-0.65-0.7 | 4-0.65-0.9 |
| 19  | 100.0               | 100.0      | 100.0      | 100.0      |
| 16  | 86.5                | 87.9       | 89.2       | 90.5       |
| 13.2  | 65.8                | 69.3       | 72.6       | 75.9       |
| 9.5   | 23.5                | 31.2       | 38.8       | 46.4       |
| 4.75  | 10.0                | 19.0       | 28.0       | 37.0       |
| 2.36  | 6.2                 | 12.1       | 17.8       | 23.5       |
| 1.18  | 4.1                 | 7.7        | 11.3       | 14.9       |
| 0.6   | 2.7                 | 5.0        | 7.3        | 9.6        |
| 0.3   | 1.7                 | 3.2        | 4.6        | 6.0        |
| 0.15  | 1.1                 | 2.0        | 3.0        | 4.0        |
| 0.075   | 0.7                 | 1.3        | 1.9        | 2.5        |
| 空隙率/%   | 30                  | 25         | 20         | 15         |

### 3.2 去污效能

对不同空隙结构的普通沥青混合料成型试件,使室内调配的水样通过试件,可以得到经过不同空隙结构沥青混合料试件过滤的水样. 在此基础上分

别测定原水和过滤后水样的 COD 值和 SS 质量浓度,可得到 COD 和 SS 去除率,具体结果如图 1.

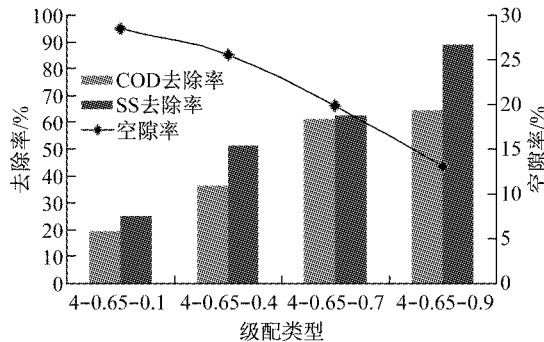


图 1 不同空隙结构沥青混合料去污效果

Fig.1 The removal rate of asphalt mix with different void structures

由图 1 可见,随着沥青混合料空隙率降低,COD 和 SS 去除率升高.空隙率由 28.5%下降至 25.6%时,COD 去除率提高 87.7%,SS 去除率可提高 106.0%;当空隙率由 25.6%下降至 19.9%时,COD 去除率可提高 67.5%,SS 去除率可提高 21.4%;当空隙率达到 20%左右再下降时,COD 去除率变化不大.由此可见,随着空隙率的减小,COD 和 SS 去除率逐渐增大.这主要是由于 COD 和 SS 的去除效果依靠混合料内部微观孔隙结构的吸附和截留作用,因此试件内部空隙结构分布是关键,空隙大,则固体悬浮物截留得少,而一些有机污染物附着在固体悬浮物上,相应的有机污染物去除就少.随着空隙率减小,内部孔隙结构截留固体悬浮物和有机污染物相应增多,表现为 COD 和 SS 去除率随之增大,只是不同阶段增长幅度不同.由此,兼顾透水性和 COD,SS 去除效果确定沥青混合料有效空隙率约为 20%.

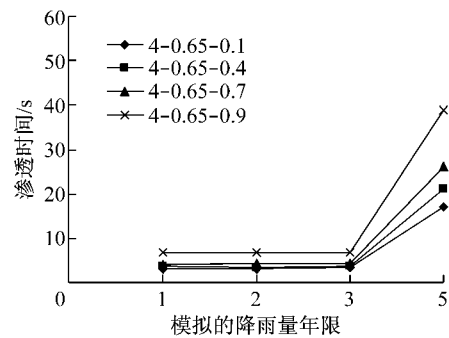
3.3 去污耐久性

为了了解不同空隙沥青混合料有效的去污耐久性,室内模拟年降雨量(根据调查资料可知哈尔滨地区年平均降雨量为 500 mm),对不同空隙结构、不同沥青类型的多孔沥青混合料进行不同年数降雨量渗透,分析透水后雨水成分的变化,明确其去除有机物 COD 的效能,从而了解不同类型沥青混合料的去污寿命.室内分别模拟了 1 年、2 年、3 年和 5 年的降雨量,由此测得的试验结果如表 3 和图 2 所示.其中渗透时间指试件通过 400 ml 水所用的时间.

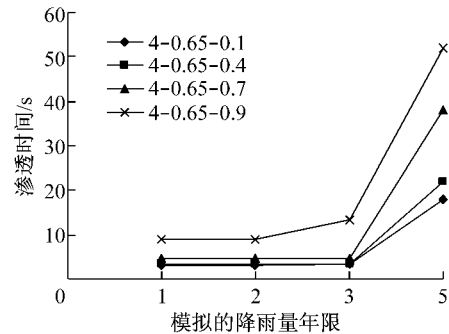
由图 2 可知,不同空隙结构普通沥青混合料和改性沥青混合料经过不同年限的降雨冲刷后其渗透性呈相似性变化.总体规律是:沥青类型对渗透性影响不大,关键是级配类型和降雨总量的影响.随着空

表 3 沥青混合料经过不同年限降雨量后的 COD 去除效果  
Tab.3 COD removal rate of asphalt mix after different rainfall years

| 类型      | 级配         | 空隙率/% | COD 去除率/% |      |      |      |
|---------|------------|-------|-----------|------|------|------|
|         |            |       | 1 年       | 2 年  | 3 年  | 5 年  |
| 普通沥青    | 4-0.65-0.1 | 31.7  | 35.7      | 45.5 | 15.2 | 8.2  |
|         | 4-0.65-0.4 | 24.9  | 33.3      | 42.4 | 42.4 | 14.9 |
|         | 4-0.65-0.7 | 20.5  | 38.5      | 39.4 | 33.3 | 17.0 |
|         | 4-0.65-0.9 | 16.3  | 35.9      | 39.4 | 57.6 | 17.0 |
| 高粘度改性沥青 | 4-0.65-0.1 | 31.2  | 28.2      | 30.3 | 12.1 | 2.1  |
|         | 4-0.65-0.4 | 24.0  | 30.8      | 33.3 | 45.5 | 8.5  |
|         | 4-0.65-0.7 | 19.9  | 46.2      | 33.3 | 24.2 | 10.6 |
|         | 4-0.65-0.9 | 16.4  | 45.4      | 46.9 | 46.9 | 6.4  |



a 普通沥青混合料



b 高粘度改性沥青混合料

图 2 沥青混合料不同降雨年限的渗水情况

Fig.2 Permeability of asphalt mixes after different rainfall years

隙率的降低,渗透性随之降低,表现为渗透时间的延长.无论是什么样的级配类型,其变化规律均是前 3 年降雨量后的渗透性没有明显变化,随着降雨量模拟到 5 年时,试件的透水性明显减弱,表现出渗透时间明显增长.

这种规律同样表现在 COD 去除率上(表 3).对 COD 去除效果而言,不同沥青类型有差别,但没有级配类型和降雨总量影响的显著.对 COD 的去除率,关键还是空隙的微观结构起主要作用.其总体规律是:2 年内不同级配类型普通沥青混合料的去除效果相当,COD 去除率为 40%~45%;改性沥青的去

除效果差别大些,为 30%~47%。当试件经过 3 年降雨量的渗透后,COD 去除率差别较大,大小差别可达 40%左右。但当降雨总量达到 5 年时,不论是何种沥青和级配类型的混合料,其 COD 去除率均不大于 17%,甚至有 50%的混合料其去除率低于 10%。从表 3 可以看出,试验数据比较离散,这主要与沥青混合料的空隙大小以及内部空隙微观结构有关,因为沥青混合料对 COD 的去除率主要是依靠内部空隙结构对污染物的截留作用而实现的。从表 3 中可见,空隙率相对小些的 4-0.65-0.7 和 4-0.65-0.9 在 2 年后 COD 去除率开始下降,是因为空隙率经过 2 年的过滤作用后进一步减小了。而空隙率相对较大的 4-0.65-0.4 和 4-0.65-0.1,由于本身空隙率较大,因此能够承受更多年的过滤作用,表现为 3 年后 COD 去除率开始下降。表 3 变异性还跟每个试件内部的微观空隙分布有关,但总体上能够看出来,不论是何种多孔沥青混合料,5 年时的 COD 去除效果明显降低,几乎不发挥作用了。

综上所述,当降雨量达到 5 年时,各种级配类型沥青混合料无论是渗透时间还是 COD 去除效果均有大幅度的降低,因此可初步得知,透水性沥青混合料渗透和去除有机污染物的有效寿命为 3 年。

#### 4 多孔沥青混合料的力学性能

多孔沥青混合料由于空隙增大,力学性能必然减小。为了保证多孔沥青混合料空隙结构去污效能的同时提高其力学性能,进行了 AH-90 和 TPS 多孔沥青混合料力学指标的对比研究。

##### 4.1 抗压强度和回弹模量

无侧限抗压强度在一定程度上能够反映材料的承载力,回弹模量能够反映材料的刚度,结果如图 3。

由图 3 可知,无论是普通沥青混合料还是高粘度改性沥青混合料,其抗压强度和回弹模量均随着空隙率的增大而降低,当空隙率大于 20%时,降幅明显。对普通沥青混合料而言,空隙率不大于 20%时抗压强度较大;大于 20%时抗压强度明显降低,不能满足道路承载的需要,因此普通道路沥青混合料应控制其空隙率不大于 20%。高粘度改性沥青可以明显提高沥青混合料的抗压强度,各空隙结构下抗压强度提高幅度均大于 30%,而且空隙率为 25%时抗压强度仍大于 1.5MPa,能满足基层承载的要求。但高粘度改性沥青对回弹模量的提高贡献不大。因此,从满足承载角度来看,无论采用高粘度改性沥青还是

普通沥青,沥青混合料的空隙率应控制在 20%以内。

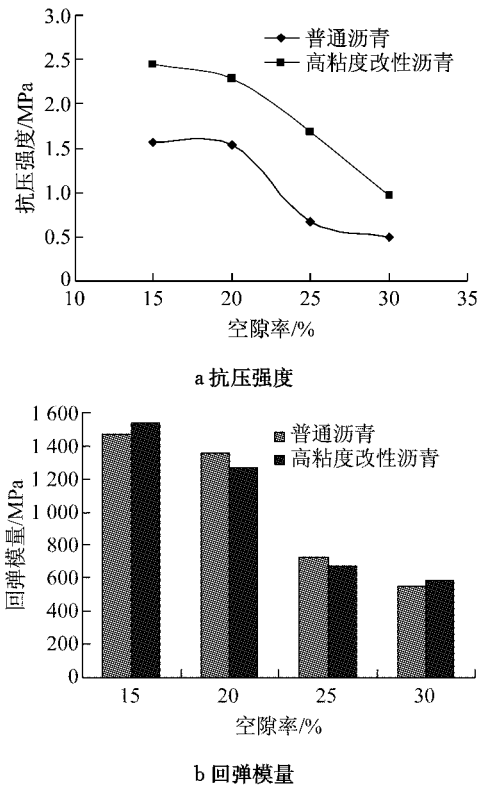


图 3 2 种沥青混合料的抗压强度与回弹模量对比

Fig.3 The contrast on compressive strength and elastic modulus between asphalt and high viscosity asphalt mixes

##### 4.2 高温稳定性

车辙试验的动稳定度指标能够反映材料在高温状态下抵抗永久变形的能力,结果如图 4。

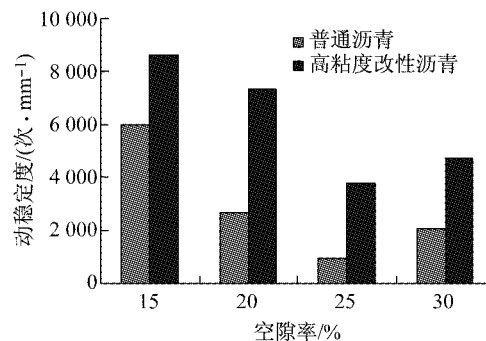


图 4 2 种沥青混合料的动稳定度对比

Fig.4 The comparison on dynamic stability between asphalt and high viscosity asphalt mix

从图 4 可以看出,无论是普通沥青还是高粘度改性沥青混合料,动稳定度总体变化规律均是随着空隙率的增大而降低,但普通沥青与高粘度改性沥青混合料降低幅度有所差别。普通沥青混合料 4 种

空隙结构的动稳定度值均大于  $800 \text{次} \cdot \text{mm}^{-1}$ , 说明骨架嵌挤发挥主要作用. 采用高粘度改性沥青, 动稳定度得到明显提高, 而且提高幅度很大, 有的甚至超过 200%, 由此可见, 高粘度改性沥青抗车辙能力得到较大幅度的提高. 从满足抗车辙指标来看, 4 种空隙结构的沥青混合料均能达到设计标准的要求.

### 4.3 水稳定性

对 4 种不同空隙结构的普通沥青混合料进行了 5 次冻融循环的抗压强度试验 ( $-20^\circ\text{C}$  冻 16 h,  $20^\circ\text{C}$  融 8 h 为 1 个冻融循环), 结果如图 5.

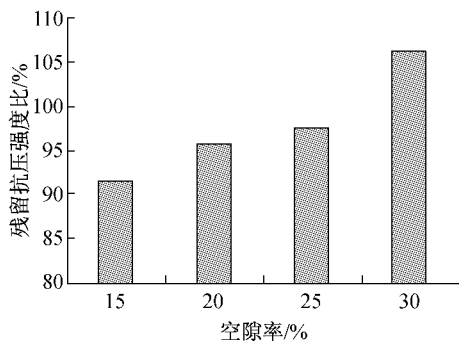


图 5 普通沥青混合料残留抗压强度比

Fig. 5 The residual compressive strength of asphalt mixes

由图 5 可见, 多孔沥青混合料随着空隙率的增加冻融前后的无侧限抗压强度减少, 而且这种减少程度随空隙增加的变化较均匀. 冻融后的抗压强度总体略低于冻融前, 但降低幅度不大, 表现为残留强度比较高, 均大于 90%. 主要是因为多孔沥青混合料具有较大且连通的空隙, 水分进入后可以及时流出, 空隙中保留的水分较少, 使材料受冻胀的影响较小, 表现为在冻融循环作用下抗压强度损失较小.

## 5 结语

(1) 根据东北地区降雨特点, 计算得到可控制地表径流量的透水路面沥青混合料的目标空隙率应该不小于 15%.

(2) 沥青混合料随着空隙率增大, COD 和 SS 去除率降低. 多孔沥青混合料对径流污染的去污效果主要是通过内部空隙结构的渗透、截留、吸附作用达到的. 空隙太大, 导致污染物随着水体流走, 达不到净化的作用. 因此适宜的空隙率为 20% 左右.

(3) 通过模拟年降雨量试验可知, 不同空隙结构沥青混合料的渗透时间随着年份的增加而延长, 超过 3 年时, 明显延长. 而 COD 去除率随着年份的增加而降低, 超过 3 年时, 降低幅度显著. 因此多孔沥

青混合料渗透和控制径流污染的有效寿命为 3 年.

(4) 从满足承载能力、高温抗变形能力、水稳定性等角度出发, 多孔沥青混合料空隙率应不大于 20%.

(5) 多孔沥青混合料主要是依靠混合料内部空隙结构达到控制径流污染的功效, 因此采用何种沥青 (普通沥青或高粘度改性沥青) 对其控制径流污染性能影响不大, 而对力学性能影响较大.

### 参考文献:

- [1] 陆新民, 周军, 沈建荣, 等. 功能性新型沥青混合料技术特性及其应用[J]. 石油沥青, 2006, 20(3): 52.  
LU Xinmin, ZHOU Jun, SHEN Jianrong. Characteristic and application of some novel functional asphalt mixes [J]. Petroleum Asphalt, 2006, 20(3): 52.
- [2] Kuang X H, Gnecco L. Particle separation and hydrologic control by cementitious permeable pavement [C]// Transportation Research Board. Washington D C; ASCE, 2007: 111-117.
- [3] Sansalone J, Zheng T. In situ partial exfiltration of rainfall runoff. I: quality and quantity attenuation [J]. Journal of Environmental Engineering, 2004, 130(9): 990.
- [4] Sansalone J, Kuang X H, Ranieri V. Permeable pavement as a hydraulic and filtration interface for urban drainage [J]. Journal of Irrigation and Drainage Engineering, 2008, 134(5): 666.
- [5] Park B, Tia M. An experimental study on the water-purification properties of the porous concrete [J]. Cement and Concrete Research, 2004, 34(2): 177.
- [6] Sabbir K, Masoud K, Michael K. Oil and grease measurement in highway runoff—sampling time and event mean concentrations [J]. Journal of Environmental Engineering, 2006, 132(3): 415.
- [7] 解晓光, 马松林, 王哲人. 沥青混合料马歇尔击实法与振动压实成型工艺的比较研究[J]. 中国公路学报, 2001, 14(1): 9.  
XIE Xiaoguang, MA Songlin, WANG Zheren. Study of compacting properties of asphalt mixture with marshall and vibratory compaction method [J]. China Journal of Highway and Transport, 2001, 14(1): 9.
- [8] 解晓光. 沥青碎石混合料成型方法的对比研究[J]. 哈尔滨工业大学学报, 2005, 5(增刊): 133.  
XIE Xiaoguang. Contrast test of asphalt macadam mixture specimen shaping methods [J]. Journal of Harbin Institute of Technology, 2005, 5(Supplement): 133.
- [9] 邓学钧. 路基路面工程 [M]. 2 版. 北京: 人民交通出版社, 2008.  
DENG Xuejun. Pavement [M]. 2nd ed. Beijing: China Communications Press, 2008.
- [10] 解晓光. 按材料-结构-工艺一体化原则设计沥青碎石基层的研究 [D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2004.  
XIE Xiaoguang. Asphalt macadam base design according to incorporate principle of material-structure-technology [D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2004.