

DOI: 10.11830/ISSN.1000-5013.201811075



# 排水路面沥青混合料的 连通空隙影响分析

李翔, 蔡旭, 肖天佑

(广州大学 土木工程学院, 广东 广州 510006)

**摘要:** 通过成型不同级配排水沥青混合料试件, 测算连通空隙率, 进而分析影响连通空隙率的主要因素。结果表明: 相同级配的混合料的连通空隙率受沥青粘度的影响, 普通 70# 沥青、橡胶沥青、高粘沥青混合料的空隙率都在 19% 左右, 但连通空隙率分别为 14%, 11%, 8%, 相差较大; 当具有相同沥青膜厚度及相同空隙率时, 公称粒径越大, 连通空隙率越大, 连通空隙率在 OGFC-5 到 OGFC-10 的涨幅最大, OGFC-10 到 OGFC-13 的涨幅不明显; 随着筛孔 2.36 mm 通过率的增大, 空隙率与连通空隙率均随之减小, 且空隙率与连通空隙率之间的差值会逐渐增大, 当空隙率为 15% 时, 连通空隙率已不满足排水性能的要求。

**关键词:** 道路工程; 排水路面; 空隙率; 连通空隙

中图分类号: U 414

文献标志码: A

文章编号: 1000-5013(2019)02-0186-06

## Analysis of Connected Void Effect on Drainage Pavement Asphalt Mixture

LI Xiang, CAI Xu, XIAO Tianyou

(College of Civil Engineering, Guangzhou University, Guangzhou 510006, China)

**Abstract:** The drainage asphalt mixture specimens were formed with different gradations, the measure connected void was measured, the main factors affecting connected void were analyzed. The results show that: the connected void ratio of mixture with the same gradation is affected by the viscosity of asphalt. The void ratios of ordinary 70# asphalt mixture, rubber asphalt mixture and high viscous asphalt mixture are all about 19%, but the connected void ratio is 14%, 11%, 8% respectively, which is different to 19% void ratio. For the same asphalt film thickness and void ratio, as the nominal particle size increases, the connected void ratio increases, the increment of connectivity void ratio between OGFC-5 and OGFC-10 is maximum, the increment between OGFC-10 and OGFC-13 is not obvious. As the pass rate of 2.36 mm sieve increases, both the void ratio and the connected void ratio decrease, and the difference between the void ratio and the connectivity void ratio increases gradually. For 15% void ratio, the connected void ratio cannot meet the requirement of drainage performance.

**Keywords:** road engineering; drainage pavement; air void; connected air void

排水沥青混合料是铺设在路面结构上面层的功能性路面材料, 因其一般采用开级配设计, 拥有较大的空隙率, 且在材料内部大量的空隙都是相互连通的, 所以, 此种沥青路面材料具有良好的排水性能, 排水效率远超过普通沥青路面表面径流的方式, 在雨天时可以迅速排除表面的积水, 几乎不会产生水膜,

收稿日期: 2018-11-26

通信作者: 蔡旭(1985-), 男, 副教授, 博士, 主要从事道路工程的研究. E-mail: cx\_caixu@163.com.

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51708144); 广东省广州市教育局科技项目(1201630223)

提高了道路行车的安全性<sup>[1-5]</sup>。目前,已有较多学者借用图像断层技术研究沥青混合料。Masad 等<sup>[6-8]</sup>对沥青混合料的空隙分布及微观特征进行研究,利用 CT 技术得到空隙在旋转压实试件中的分布特征,沿试件深度空隙率的变化,以及空隙数量、空隙等效直径的分布状态。Arambula 等<sup>[9]</sup>利用 CT 技术与数字图像技术研究空隙分布及空隙连通性,评价沥青混合料空隙分布与水稳定性之间的关系。肖鑫等<sup>[10-12]</sup>基于工业 CT 技术分析研究多孔沥青混合料的内部结构,提出影响渗水性能的重要因素有弯曲度、连通空隙率、过水面积等,并提出流速与空隙当量直径的相关程度  $R^2 = 0.9999$ ,当空隙当量直径小于 0.5 mm 时,流速小于  $0.0051 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ ,因此,当空隙当量直径小于 0.5 mm 时,不能成为有效连通空隙;刘威等<sup>[13]</sup>认为连通空隙对排水性能的影响比空隙率更显著。蒋玮等<sup>[14-16]</sup>通过 X-ray CT 技术获取多孔混合料断层图像并重建混合料试件的三维模型,研究分析空隙在试件内部的分布特性,认为在相同空隙率的情况下,粗型级配能够提高抗堵塞性能。徐皓等<sup>[17]</sup>对不同沥青混合料试件进行渗水试验,发现空隙率与渗水系数具有良好的相关关系,当试件有相同空隙率时,粒径越大,渗水系数越大。但遗憾的是,上述研究并没有提出连通空隙的影响因素以及连通空隙对排水性能的影响。大空隙沥青混合料连通空隙率受多种因素的影响,本文通过对不同排水沥青混合料的连通空隙影响因素进行分析,研究各影响因素对连通空隙的影响规律。

表 1 集料性能指标

Tab. 1 Aggregate performance index

材料名称	试验项目	质量要求	试验结果
粗集料	石料压碎值/%	≤26	18.25
	洛杉矶磨耗值/%	≤28	17.3
	针片状颗粒含量/%	<15	10.5
	吸水率/%	≤2.0	均符合
	毛体积相对密度/ $\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$	—	2.569
	表观相对密度/ $\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$	≥2.6	2.655
细集料	表观相对密度/ $\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$	≥2.5	2.643
	砂当量/%	≥60	65

## 1 试验部分

### 1.1 试验材料

为获取不同条件下的多孔沥青混合料的体积参数,成型马歇尔试件所用集料均为花岗岩,其技术指标如表 1 所示。

我国的排水沥青路面一般采用改性沥青。在不同油石比和相同有效沥青的条件下,采用普通 70# 沥青、自制外掺质量分数 15%

的 40 目橡胶粉的橡胶沥青和高粘改性沥青制作试件,开展连通空隙率的测定试验。3 种沥青的基本指标,如表 2 所示。

表 2 沥青技术性能指标

Tab. 2 Technical index of rubber asphalt

沥青	试验项目	试验结果	沥青	试验项目	试验结果	沥青	试验项目	试验结果
普通 沥青	软化点/ $^{\circ}\text{C}$	48	橡胶 沥青	软化点/ $^{\circ}\text{C}$	66	高粘 沥青	软化点/ $^{\circ}\text{C}$	81.8
	延度(15 $^{\circ}\text{C}$ )/cm	>100		延度(15 $^{\circ}\text{C}$ )/cm	94		延度(5 $^{\circ}\text{C}$ )/cm	38.6
	0.1 mm 针入度	66		0.1 mm 针入度	42		0.1 mm 针入度	43.1
	粘度(135 $^{\circ}\text{C}$ )/ $\text{Pa} \cdot \text{s}$	0.41		粘度(135 $^{\circ}\text{C}$ )/ $\text{Pa} \cdot \text{s}$	3.67		粘度(135 $^{\circ}\text{C}$ )/ $\text{Pa} \cdot \text{s}$	4.72

### 1.2 试验方案

设定 3 种不同最大公称粒径、6 个开级配抗滑表层(OGFC)级配,其通过筛孔(方孔筛)的质量分数,如表 3 所示。各级配的油石比和空隙率,如表 4 所示。表 3、4 中:将对筛孔 2.36 mm 通过率不同的 OGFC-13 级配编号为 1~4。

表 3 不同 OGFC 级配通过筛孔(方孔筛)的质量分数

Tab. 3 Mass fraction of different OGFC gradations passing through square hole sieve

级配类型	方孔筛孔径/mm									
	16	13.2	9.5	4.75	2.36	1.18	0.6	0.3	0.15	0.075
OGFC-5	—	—	100.0	90.0	21.1	20.0	15.5	11.9	9.1	7.0
OGFC-10	—	100	84.7	22.8	15.6	12.6	9.4	6.5	5.1	4.6
OGFC-13(1)	100	87	63.7	28.3	22.1	14.0	10.2	7.2	5.2	4.7
OGFC-13(2)	100	87	63.7	22.0	19.3	14.0	10.2	7.2	5.2	4.7
OGFC-13(3)	100	87	63.7	22.0	16.5	14.0	9.2	6.3	4.5	4.0
OGFC-13(4)	100	87	63.7	13.2	12.3	8.4	7.0	6.3	5.0	4.0

选取不同公称粒径的级配时,应保证混合料空隙率基本相同,采用经验公式计算各级配所需油石比,保证试件沥青膜厚度相同.通过双面击实50次成型马歇尔试件,采用体积法测算空隙率、水中质量法测算连通空隙率.由于普通70#沥青、橡胶沥青、高粘沥青密度不同,同一级配在相同沥青膜厚度条件下的油石比略有差异.普通70#沥青密度最小,因此,其混合料油石比最小.

表4 不同混合料类型的油石比和空隙率

Tab.4 Oil-stone ratio and void ratio of different mixture types

沥青种类	油石比/%			空隙率/%		
	普通70#沥青	橡胶沥青	高粘沥青	普通70#沥青	橡胶沥青	高粘沥青
OGFC-5	6.25	6.3	6.35	17.7	17.5	17.9
OGFC-10	—	5.7	—	—	17.8	—
OGFC-13(1)	—	5.9	—	—	14.6	—
OGFC-13(2)	—	5.8	—	—	17.2	—
OGFC-13(3)	—	5.7	—	—	19.5	—
OGFC-13(4)	—	5.6	—	—	22.9	—

### 1.3 连通空隙的测算

在排水沥青路面中,空隙分为连通空隙、半连通空隙和封闭空隙3种,如图1所示.图1中:连通空隙既能排水又可以吸噪;半连通空隙只能储水和吸噪;而封闭空隙不能吸噪也不能排水.

因此,连通空隙率越大,排水效果与吸噪效果就越好,而通常所说的空隙率是指三者之和.对连通空隙的影响因素进行研究,将试件放置水中浸泡约1h,使水填满连通空隙,并计算连通空隙率,计算式为

$$V' = \frac{V - V_c}{V} \times 100\%$$

上式中: $V'$ 为连通空隙率; $V$ 为试件体积; $V_c$ 为集料与封闭空隙的体积, $V_c = (A - C) / \rho_w$ , $A$ 为试件空中质量, $C$ 为试件水中质量, $\rho_w$ 为常温水的密度.

## 2 试验结果分析

### 2.1 沥青种类对连通空隙率的影响

根据3种不同沥青的基本指标可以看出,高粘沥青的性能最好,其次是橡胶沥青,普通70#沥青的性能较差.对比3种沥青135℃的粘度(表2)可知:高粘沥青的粘度最大,其次是橡胶沥青,最后是普通70#沥青;普通70#沥青在135℃时的粘度只有0.41 Pa·s,相比于其他两类改性沥青更为流淌,更接近于流体,自由流动的能力最高.通过成型相同的级配OGFC-5、不同沥青种类的试件,研究混合料空隙率( $V_v$ )与连通空隙率( $V'$ ),结果如图2所示.

由图2可知:在相同的级配条件下,不同沥青种类的空隙率大致相同,基本在17%左右,但是其连通空隙率相差较大,普通70#沥青的试件连通空隙率约为14%,橡胶沥青试件的连通空隙率为11%,而高粘沥青的连通空隙率只有8%左右.

高粘沥青混合料连通空隙率最小有以下3点原因.1)在高温状态下,粘度更大的高粘沥青与细集料混合成的胶结料容易形成团粒,不能均匀地附着在粗集料的表面,而这些团粒中间或是团粒与团粒之间往往会包裹一些空气且难以分散,阻碍了连通空隙的形成,这也是规范中改性沥青混

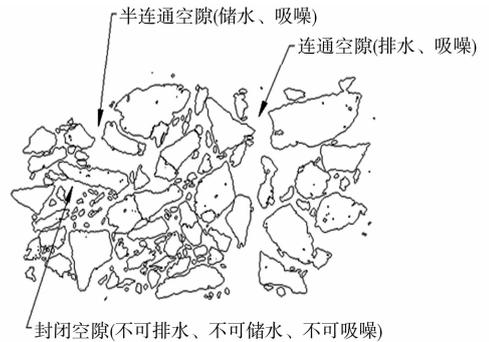


图1 排水路面内部空隙

Fig.1 Drainage pavement internal void

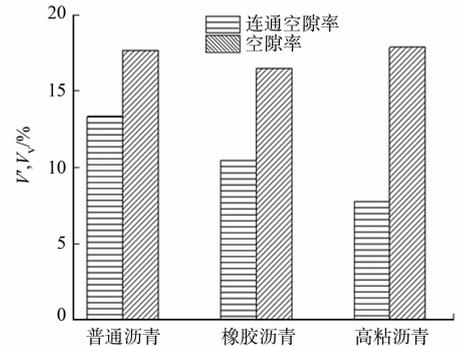


图2 不同沥青混合料空隙率与连通空隙率  
Fig.2 Voids and connected voids of different asphalt mixture

合料不采用真空法计算理论密度的原因. 2) 在击实试件时, 沥青混合料的温度将会下降, 而高粘沥青的粘温曲线相比橡胶沥青与普通沥青的粘温曲线更为陡峭, 也就是说, 当温度在 140 °C 以下时, 随着温度逐渐降低, 高粘沥青的粘度会迅速增加, 使细集料之间或是细集料与粗集料之间形成的封闭空隙稳定成型, 这部分细集料不能再通过击实的做功继续裹附粗集料. 3) 粘度大的沥青流动性较差, 在试件内部会堵塞一些骨架间隙, 使部分区域没有被胶浆填充, 反而被胶浆包裹形成封闭空隙.

与普通 70 # 沥青相比, 橡胶沥青不仅粘度高于普通沥青, 而且还存在没有发生完全溶胀反应的橡胶核, 相当于添加了细集料, 在一定程度上降低了其空隙率与连通空隙率.

橡胶沥青混合料与高粘沥青混合料的连通空隙率也有较大的差异, 但两者在 135 °C 时的粘度差异没有橡胶沥青与普通沥青的差异那么大, 可连通空隙的差异与橡胶沥青和普通沥青的连通空隙差异相同, 说明在相同级配的条件下, 温度下降和粘度的迅速上升是形成封闭空隙的主要因素.

## 2.2 公称粒径对连通空隙的影响

当试件的空隙率不变、排水路面的公称粒径发生改变时, 连通空隙率会随着发生改变. 研究相同空隙率的 OGFC-5, OGFC-10, OGFC-13(2) 橡胶沥青混合料的连通空隙率, 得出公称粒径越大, 连通空隙率越大. 部分马歇尔试件, 如图 3 所示. 不同粒径混合料的空隙率与连通空隙率, 如图 4 所示.



图 3 马歇尔试件

Fig. 3 Marshall specimens

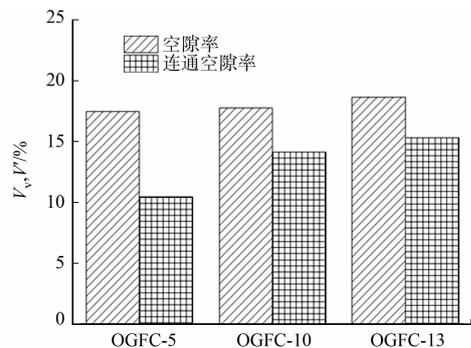


图 4 不同粒径混合料空隙率与连通空隙率

Fig. 4 Void ratio and connected void ratio of mixture with different particle size

由图 3 可知: 大粒径的试件表面明显有许多的凹凸空隙, 构造深度较深. 由图 4 可知: 在相同沥青膜厚度的条件下, 改变了公称粒径, 试件的空隙率均为 18% 左右, 但是连通空隙逐步递增, OGFC-10 到 OGFC-13 的涨幅较小, 仅为 2%, 而 OGFC-5 到 OGFC-10 的涨幅较大, 接近 5%.

不同公称粒径混合料连通空隙率存在差异主要有以下 2 个原因. 1) 大粒径集料在形成骨架结构时, 粗集料之间的空隙直径较大, 细集料与沥青形成团粒无法填补这么大的空隙. 而试件 OGFC-5 大部分是由 2.36~4.75 mm 的集料搭成的骨架, 骨架间隙宽度远小于试件 OGFC-10 与 OGFC-13, 很容易被胶浆填补形成封闭空隙. 2) 在击实过程中, 大粒径粗集料很少可以直接形成骨架空隙, 而在 OGFC-5 混合料中, 部分粗集料可以直接封闭空隙, 这是因为形成骨架的集料过细, 在 OGFC 厚沥青膜的特性下容易抱团、黏结在一起.

## 2.3 关键筛孔对连通空隙的影响

为保证排水路面拥有足够的空隙, 在材料的级配设计中, 关键筛孔通过率的把控至关重要. 针对排水路面普遍使用的粒径 OGFC-13 沥青混合料, 通过对改变关键筛孔 2.36 mm 的通过率研究其连通空隙率的变化. 采用橡胶沥青混合料成型 4 种不同空隙率的试件, 改变粗细集料之比, 其空隙率与连通空隙率的关系, 如图 5 所示.

由图 5 可知: 当空隙率大于 15% 时, 空隙率与连通空隙率之间有着良好的相关性, 其表达式为

$$V' = 1.06 \times V_v - 0.043R^2 = 0.986.$$

从上式可以看出, 在 OGFC-13 沥青混合料中, 随着空隙率的提高, 连通空隙率也随之提高, 基本保持在空隙率上升 1%, 连通空隙率上升 0.95%. 当筛孔 2.36 mm 的通过率提升时, 粗细集料的占比会发生改变. 细集料增多会增加细集料与沥青形成的胶结料, 此时, 胶结料不仅裹附在粗集料的表面, 还可用

于填充骨架间的空隙,因此,空隙率会随着关键筛孔通过率的增大而减小.总的空隙率减小会有一部分连通空隙被胶浆填充,当填充位置在连通空隙管道中部时,形成的封闭空隙较少,影响不大;当被填充位置连通空隙管道两端时,会形成较大的封闭空隙.

对于筛孔 2.36 mm 的通过率与空隙率、连通空隙率的关系,如图 6 所示.

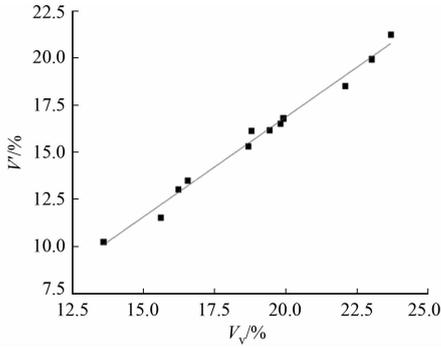


图 5 空隙率与连通空隙率的关系

Fig. 5 Relationship between void ratio and connected void ratio

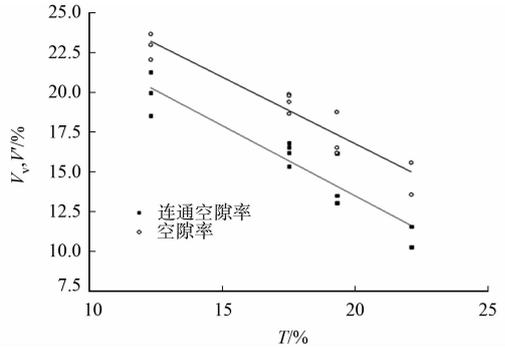


图 6 筛孔 2.36 mm 通过率与空隙率、连通空隙率的关系

Fig. 6 Relationship among pass rate of 2.36 mm sieve, void ratio and connected void ratio

由图 6 可知,筛孔 2.36 mm 通过率与空隙率、连通空隙率都具有良好的相关性,但此相关性只适用于空隙率大于 15% 的多空沥青混合料;当空隙率小于 15% 时,连通空隙率下降迅速,与关键筛孔通过率不再呈线性相关.

关键筛孔通过率与空隙率、连通空隙率的关系可表达为

$$V_v = 0.840 \times T + 0.0878R^2 = 0.892,$$

$$V_v' = -0.886 \times T + 0.103R^2 = 0.868.$$

上式中:  $T$  为筛孔 2.36 mm 的通过率.

对比两个式子可以发现,两条拟合直线的斜率不同,这说明当空隙率越来越小时,空隙率与连通空隙率的差值会越来越大.这是因为当胶结料增多,胶结料之间会形成一定的封闭空隙;且在填充骨架空隙的过程中,胶结料的增多会在粗集料形成较细的骨架空隙处形成封闭空隙.因此,筛孔 2.36 mm 通过率的提高使封闭空隙逐渐增大,同时,连通空隙率与空隙率的差值逐渐增大,此相关关系与蒋玮<sup>[16]</sup>的研究结论趋势一致,但能否推及其他沥青混合料类型还有待研究.

### 3 结论

1) 级配相同、沥青种类不同的混合料制备的试件连通空隙率有一定的差别.普通 70# 沥青、橡胶沥青、高粘沥青混合料的空隙率都在 19% 左右,但连通空隙率分别为 14%, 11%, 8%.随着沥青粘度的上升,混合料的连通空隙下降,对路面的排水效果产生了较大的影响.因此,排水沥青路面在满足力学性能的前提下,为确保有足够的连通空隙率,混合料应使用粘度较小的沥青.

2) 在具有相同沥青膜厚度和相同空隙率的前提下,随着公称粒径增大,混合料骨架间隙宽度有所增加,连通空隙率也随之增长,但是连通空隙率的涨幅越来越小,OGFC-5 到 OGFC-10 的涨幅最大,接近 5%;OGFC-10 到 OGFC-13 涨幅不明显,仅有 2%.

3) 空隙率与连通空隙率具有良好的相关关系,两者之间的差值为 3% 左右,随着筛孔 2.36 mm 通过率的增大,空隙率与连通空隙率都会减小,且之间的差值会逐渐增大,当空隙率为 15% 时,连通空隙率已不满足排水性能的要求.

### 参考文献:

- [1] POULIKAKOS L D, GILANI S M, DEROME D, *et al.* Time resolved analysis of water drainage in porous asphalt concrete using neutron radiography[J]. Applied Radiation and Isotopes, 2013, 77(7): 5-13. DOI: 10.1016/j.apradiso.2013.01.040.

- [2] ELVIK R,GREIBE P. Road safety effects of porous asphalt: A systematic review of evaluation studies[J]. Accident Analysis and Prevention,2005,37(3):515-522. DOI:10.1016/j.aap.2005.01.003.
- [3] BUENO M,LUONG J,TERÁN F,*et al.* Macrotexture influence on vibrational mechanisms of the tyre-road noise of an asphalt rubber pavement[J]. International Journal of Pavement Engineering,2014,15(7):606-613. DOI:10.1080/10298436.2013.790547.
- [4] 刘英,田波,牛开民,等.不同纹理水泥混凝土路面降噪与抗滑特性[J].公路交通科技,2012,29(1):28-33. DOI:10.3969/j.issn.1002-0268.2012.01.005.
- [5] FU Dongsun,REN Yuanyuan. Low-noise asphalt noise reduction principles and safety performance concrete pavement[J]. Advanced Materials Research,2014,1049/1050:276-280. DOI:10.4028/www.scientific.net/amr.1049-1050.276.
- [6] MASAD E,MUHUNTHAN B,SHASHIDHAR N,*et al.* Aggregate orientation and segregation in asphalt concrete [C]//1998 Annual Convention of the American-Society-of-Civil-Engineers (Geo-Congress 98). Boston: Amer Soc Civil Engineers,1998:69-80.
- [7] MASAD E,MUHUNTHAN B,SHASHIDHAR N,*et al.* Internal structure characterization of asphalt concrete using image analysis[J]. ASCE Journal of Computing in Civil Engineering,1999,13(2):88-99. DOI:10.1061/(ASCE)0887-3801(1999)13:2(88).
- [8] MASAD E,JANDHYALA V K,DASGUPTA N,*et al.* Characterization of air void distribution in asphalt mixes using X-ray computed tomography[J]. Journal of Materials in Civil Engineering,2002,14(2):122-129. DOI:10.1061/(ASCE)0899-1561(2002)14:2(122).
- [9] ARAMBULA E,MASAD E,MARTIN A E. Influence of air void distribution on the moisture susceptibility of asphalt mixes[J]. Journal of Materials in Civil Engineering,2007,19(8):655-664. DOI:10.1061/(ASCE)0899-1561(2007)19:8(655).
- [10] 肖鑫,张肖宁.基于工业CT的排水沥青混合料连通空隙特征研究[J].中国公路学报,2016,29(8):22-28.
- [11] 肖鑫,张肖宁.排水沥青混合料各向异性空隙结构对渗水特性的影响[J].华南理工大学学报(自然科学版),2018,46(1):91-96. DOI:10.3969/j.issn.1000-565X.2018.01.012.
- [12] 肖鑫.排水沥青混合料细观结构及排水特性研究[D].广州:华南理工大学,2014.
- [13] 刘威,易文,汤显平,等.多孔沥青混合料渗水性能试验研究[J].公路,2017(3):221-224.
- [14] 蒋玮,沙爱民,肖晶晶,等.多孔排水沥青混合料的细观空隙特征与影响规律[J].同济大学学报(自然科学版),2015,43(1):67-74. DOI:10.11908/j.issn.0253-374x.2015.01.010.
- [15] 蒋玮,沙爱民,肖晶晶,等.多孔沥青混合料的空隙堵塞试验研究[J].建筑材料学报,2013,16(2):271-275. DOI:10.3969/j.issn.1007-9629.2013.02.016.
- [16] 蒋玮.透水沥青路面材料和结构的组成设计与功能评价[D].西安:长安大学,2011.
- [17] 徐皓,倪福建,刘清泉,等.排水性沥青混合料渗透系数测试研究[J].公路交通科技,2005,22(3):47-50. DOI:10.3321/j.issn:1001-7372.2004.03.001.

(责任编辑:黄晓楠 英文审校:方德平)