

不同级配排水沥青混合料路用性能与透水性能研究

Research on the Road Performance and Water Permeability of Different Porous Asphalt Mixture Asphalt Mixtures

贾丽晓, 刘永梅

(石家庄市政设计研究院有限责任公司, 石家庄 050000)

摘要: 为合理确定排水沥青混合料的目标空隙率, 对比了不同级配排水沥青混合料在不同设计空隙率条件下的高、低温路用性能与透水性能, 研究了不同级配排水沥青混合料的微细观空隙直径期望值变化趋势, 建立了排水沥青混合料微细观空隙直径期望值与宏观性能的相关性。结果表明: 随着空隙率增大, 排水沥青混合料高温抗车辙性能先减后增, 低温抗裂性能持续降低; 增大空隙率和增加公称最大粒径均能明显增强排水沥青混合料的透水性能, 兼顾排水沥青混合料路用性能与排水性能的均衡, 推荐排水沥青混合料的目标空隙率为 20%~21%; 微细观空隙直径期望值与排水沥青混合料的透水系数、贯入剪切强度及低温抗弯拉强度之间的拟合关系良好, 从微细观空隙结构角度验证了推荐目标空隙率的合理性。研究成果为排水沥青混合料配合比设计选择目标空隙率提供参考。

关键词: 排水沥青路面; 排水沥青混合料; 空隙率; 透水系数; 路用性能; 微细观空隙结构

中图分类号: U414.2 **文献标志码:** A **文章编号:** 1005-8249 (2025) 02-0144-07

DOI: 10.19860/j.cnki.issn1005-8249.2025.02.024

JIA Lixiao, LIU Yongmei

(Shijiazhuang Municipal Engineering Design & Research Institute Co., Ltd., Shijiazhuang 050000, China)

Abstract: To accurately determine the target voidage of asphalt mixtures, this study compared the road performance and water permeability of asphalt mixtures of various grades under different design voidage conditions at both high and low temperatures, the anticipated trends in micro-void diameters for asphalt mixtures of different grades were investigated. Subsequently, a correlation was established between the expected values of micro-void diameters and the macroscopic properties of asphalt mixtures. The results indicate that as voidage increases, rutting resistance at high temperatures initially decreases before increasing, while cracking resistance at low temperatures continuously diminishes. Increasing the voidage ratio and nominal maximum particle size significantly enhances the permeable performance of drained asphalt mixtures. Considering the balance between road performance and drainage efficiency, the recommended target voidage for drained asphalt mixtures is 20% to 21%. A strong fitting relationship exists between the expected diameter of micro-voids and the permeability coefficient, penetration shear strength, and low-temperature flexural tensile strength of drained asphalt mixtures, thereby validating the rationality of the recommended target voidage from a microscopic void structure perspective. the research results can provide reference for the selection of target voidage in the design of the mix ratio of drainage asphalt mixture.

Key words: porous asphalt pavement; porous asphalt mixture; void ratio; permeability coefficient; road performance; microscopic void structure

作者简介: 贾丽晓 (1982—), 女, 本科, 高级工程师, 研究方向: 道路交通。

通信作者: 刘永梅 (1983—), 女, 本科, 高级工程师, 研究方向: 道路桥梁。

收稿日期: 2024-12-24

0 引言

排水沥青路面有“顶级功能型路面”的称号，近年来在我国高速公路中的应用也逐渐增多。然而，较大的空隙率也使得服役期间排水沥青路面内部沥青的老化速率加大，集料之间以单一粒径碎石嵌挤所形成的骨架-空隙结构导致集料颗粒间的接触面积比较小，频繁的行车荷载动水冲刷作用下，相较于密级配沥青路面，排水沥青路面更容易发生分散等水损害^[1]。国内部分排水沥青路面在使用3年左右便出现了剥落、掉粒等早发性病害，反映了排水沥青路面的服务功能、路用性能对排水沥青混合料性能极为敏感的特点^[2]。

为了提高排水沥青路面的路用性能与耐久性，徐健等^[3]基于逐级填充理论，在规范规定级配范围内进一步优化主结构粒径范围内的集料含量，通过单轴压缩蠕变试验验证了骨架强度对排水沥青混合料高温性能的影响，结果表明集料的骨架嵌挤强度越高，混合料的高温性能越好。肖鑫等^[4]把粗骨料空隙填充法（CAVF）设计方法引入到排水沥青混合料的组成设计当中，基于室内路用性能试验证明了采用CAVF设计方法设计骨架嵌挤结构沥青混合料的优越性。徐亮等^[5]、刘江等^[6]研究了高黏改性沥青性能对排水沥青混合料路用性能和耐久性能的影响规律，结果表明，采用废旧轮胎胶粉橡胶沥青及其复合改性沥青制备的排水沥青混合料具有优异的路用性能与疲劳特性。于立泽等^[7]、汪继平等^[8]研究了空隙率对排水沥青路面降噪特性、排水功能及疲劳性能的影响，结果表明，增大空隙率后排水沥青路面的排水效率提高，但疲劳性能降低。黎晓等^[9]、高颖等^[10]、高桂海等^[11]研究了不同纤维对排水沥青

混合料路用性能的增强效果。

排水沥青混合料配合比设计以满足空隙率为基本标准，同时保证混合料的抗飞散性能、高温稳定性和耐久性能，要满足排水沥青混合料排水功能及力学性能的平衡^[12]。已有研究大多针对国内目前普遍采用的PA-13排水沥青混合料，缺少不同级配排水沥青路面路用性能与透水性能的对比分析，有关排水沥青路面路用性能与目标空隙率之间的关系尚不清晰，以致配合比设计阶段，确定目标空隙率缺少试验数据支撑，并且鲜见排水沥青混合料微细观空隙结构方面研究。鉴于此，采用PA-10、PA-13、PA-16、PA-20四种排水性沥青混合料，每种排水性沥青混合料变化18%~25%四组目标空隙率，研究不同级配排水沥青混合料的高温抗车辙性能、低温抗裂性能、微细观空隙结构及微细观空隙直径期望值变化趋势，建立排水沥青混合料微细观空隙直径期望值与宏观性能的相关性，从微细观角度验证推荐目标空隙率的合理性。

1 试验材料与方案

1.1 原材料

高黏度改性沥青采用国产某高黏度添加剂制备高黏改性沥青，高黏度改性沥青主要技术指标见表1；粗集料采用辉绿岩碎石，细集料采用石灰岩机制砂，粗、细集料主要技术指标见表2，符合JTG/T 3350-03—2020《排水沥青路面设计与施工技术规范》规范要求；纤维稳定剂采用短切玄武岩纤维作为增塑稳定剂，其主要技术指标见表3，符合JTT 533—2020《沥青路面用纤维》技术要求。

表1 高黏度改性沥青主要性能测试结果
Table 1 Main performance test results of high viscosity modified asphalt

针入度 / (0.1 mm)	软化点 /℃	5℃延度 /cm	溶解度 /%	170℃布氏黏度 / (Pa·s)	60℃动力黏度 / (Pa·s)	25℃弹性 恢复率/%	RTFOT后性能		
							质量变化/%	残留针入度比/%	5℃残留延度/cm
44.8	89.5	37.8	>99.5	1.35	87 690	98.3	-0.16	78.4	28.9

表2 粗、细集料主要技术性能
Table 2 Main technical properties of coarse and fine aggregates

粗集料									机制砂			
软石含量 /%	压碎值 /%	坚固性 /%	高温压 碎值/%	洛杉矶磨 耗值/%	黏附性	针片状 含量/%	0.05 mm以下 粉尘含量/%	表观相 对密度	表观相 对密度	含泥量 /%	砂当量 /%	棱角性（流动 时间）/s
<0.1	7.9	2.4	11.8	3.9	5级	4.8	<0.1	2.863	2.743	<0.1	68	46

道桥技术

表 3 短切玄武岩纤维技术指标						
Table 3 Technical indexes of chopped basalt fiber						
耐热性 (210 ℃, 2 h)	断裂强度 /MPa	断裂伸长 率/%	平均长度 /mm	吸油率 /倍	密度 / (g/cm ³)	含水率 /%
无明显变化	>3 000	4.2	9	0.87	2.775	<0.1

1.2 配合比设计

对于 PA-10、PA-13 排水沥青混合料, 以 2.36 mm 筛孔通过百分率的级配中值, 以及中值 ±3% 作为三种初选级配, 获得 18%、20%、22%、24% 目标空隙率; 对于 PA-16、PA-20 排水沥青混合

表 4 排水沥青混合料级配组成													
Table 4 Gradation composition of drainage asphalt mixture													
混合料 类型	筛孔通过率/%												
	26.5 mm	19 mm	16 mm	13.2 mm	9.5 mm	4.75 mm	2.36 mm	1.18 mm	0.6 mm	0.3 mm	0.15 mm	0.075 mm	
PA-10				100	91.5	26.1	12.0	11.4	9.8	5.4	5.0	4.4	
PA-13			100	96.5	55.9	23.4	17.9	13.1	10.8	8.1	6.6	4.5	
PA-16		100	95.6	71.6	50.0	20.5	15.0	13.3	10.3	7.9	6.3	4.2	
PA-20	100	97.5	87.9	76.3	62.7	21.2	15.9	13.2	10.3	9.3	6.7	3.8	

表 5 排水沥青混合料配合比设计结果						
Table 5 Design results of the mixture ratio of drainage asphalt						
混合料 类型	油石比 /%	空隙率 /%	析漏损失 率/%	分散损失 率/%	马歇尔 稳定度/kN	
PA-10	4.99	21.38	0.21	6.99	6.87	
PA-13	4.98	21.48	0.20	8.24	6.54	
PA-16	4.69	21.28	0.17	9.13	6.96	
PA-20	4.61	21.8	0.19	9.47	7.34	
技术要求		18~25	≤0.8	≤15	≥5	

1.3 试验方法

(1) 路用性能试验: 高温车辙试验、低温弯曲试验和冻融劈裂强度试验的试件尺寸、试验加载速率、试验温度数据处理等分别参照 JTG E20—2011 《公路工程沥青及沥青混合料试验规程》, 单轴贯入剪切强度试验方法参照 JTG D50—2017 《公路沥青路面设计规范》附录 F。

(2) 透水系数试验: 测试标准马歇尔试件的透水系数, 试验方法参照 JTG/T 3350-03—2020 附录 C, 每组 3 次平行试验, 取测定透水系数平均值为检测结果。

(3) 微细观空隙结构: 参照文献 [15] 微细观空隙结构测试方法, 采用德国 YXLON 公司 225kV 工业 CT 获取排水沥青混合料的 CT 图像。

2 试验结果与分析

2.1 高温稳定性

车辙试验与单轴贯入剪切强度试验结果如图 1

料, 通过调整和控制 4.75 mm 筛孔通过百分率获得预期的目标空隙率, 不同空隙率的排水沥青混合料矿料级配见表 4。在确定目标级配基础上, 根据 14 μm 沥青膜厚度和集料表面积预估最佳沥青用量, 然后以预估最佳沥青用量为中值, 间隔 ±0.5% 油石比变化 5 组沥青用量, 验证不同油石比条件下的体积指标、分散质量损失和析漏损失率, 在 OAC1 ~ OAC2 范围内开展路用性能试验, 选择高的沥青用量为最佳沥青用量, 配合比设计结果见表 5。

所示。由图 1 试验结果可知:

(1) PA-10、PA-13、PA-16、PA-20 四种级配排水沥青混合料的车辙试验动稳定度达到了 6 400 ~ 7 400 次/mm 以上, 同时贯入剪切强度达到了 1.0 ~

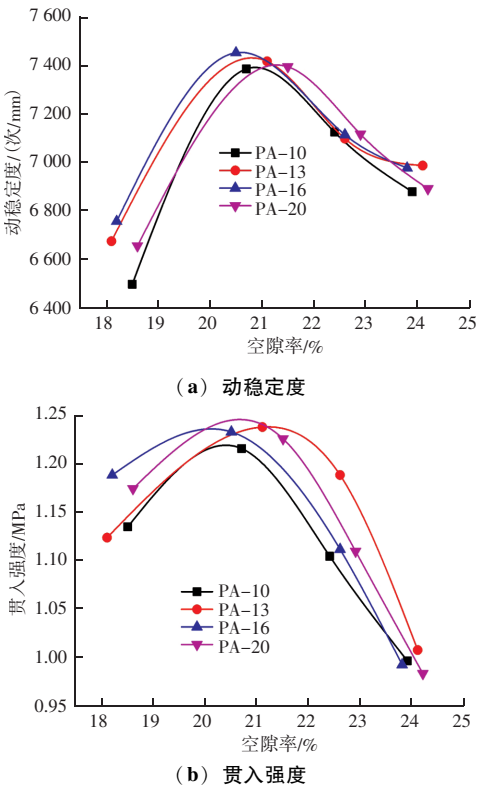


图 1 车辙试验与单轴贯入剪切强度试验结果
Fig. 1 Results of rutting test and single axial penetration shear strength test

1. 25 MPa, 验证了排水沥青混合料具有优异的高温稳定性。

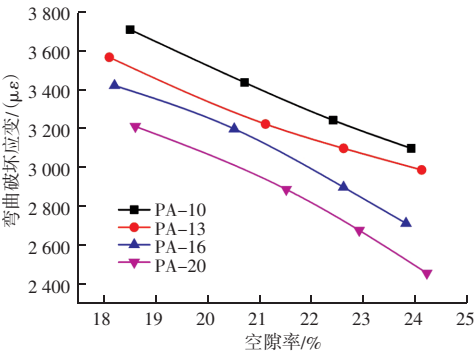
(2) 公称粒径相同, 4 种排水沥青混合料的动稳定度和贯入强度均随着空隙率增大呈先增大后减小趋势, 因此从高温性能考虑, 最佳的空隙率为 20%~21%。分析其原因, 随着粗集料数量增多, 粗集料之间点状、面状骨架嵌挤数量增多, 嵌挤作用增强, 抗剪切强度和动稳定度随之增大; 随着粗集料数量进一步增多, 同时骨架嵌挤所形成的“骨架空隙”增大, 粗集料之间相互推挤、干涉作用增强, 骨架嵌挤结构向松散结构演变, 抗剪切强度降低; 增大粗集料数量使得空隙率增大, 同时在排水沥青混合料中能够提供黏结作用的沥青玛蹄脂数量减少, 导致黏聚力降低。综上可知, 空隙率指标可在一定程度上反映粗集料的骨架嵌挤效应, 选择合适的目标空隙率有利于提高排水沥青路面的高温稳定性。

(3) 排水沥青混合料的车辙动稳定度和贯入剪切强度并未出现随着公称粒径增大而增大的变化趋势。总体上, PA-10、PA-13、PA-16、PA-20 四种排水沥青混合料的动稳定度和贯入剪切强度均较为接近。分析其原因, 增大公称粒径虽能提高粗集料之间的骨架嵌挤作用, 但增大公称粒径同样会导致混合料出现离析、均匀性下降的风险增大, 因此工程实践中不能仅从公称粒径的大小来判断排水沥青混合料的高温性能优劣, 关键是确保排水沥青路面能形成均匀而压实稳定的结构层。

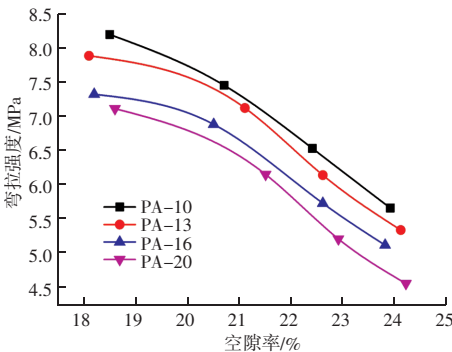
2.2 低温抗裂性能

低温弯曲试验与低温半圆弯拉试验结果如图 2 所示。由图 2 试验结果可知:

(1) PA-10、PA-13、PA-16、PA-20 四种排



(a) 弯曲破坏应变



(b) 半圆弯拉强度

图 2 低温抗裂性能试验结果

Fig. 2 Test results of low temperature cracking resistance

水沥青混合料的低温破坏弯曲应变和半圆弯拉强度均随公称粒径的减小而增大, 这主要是减小公称粒径后排水沥青混合料的油石比增大, 能够提供黏聚力的沥青胶结料数量增多的缘故。从低温性能考虑, 我国严寒区和冬寒区宜选用 PA-10 或 PA-13 型排水沥青混合料, 而冬冷区和冬温区宜选用 PA-16 或 PA-20 型排水沥青混合料。

(2) 空隙率由 18% 增大至 24%, PA-10、PA-10、PA-13、PA-16、PA-20 排水沥青混合料的弯曲破坏应变分别降低了 16.5%、16.3%、20.7%、23.5%, 半圆弯拉强度分别降低了 30.9%、32.2%、30.1%、35.9%。分析其原因, 空隙率增大是排水沥青混合料粗集料增多及细集料减少和沥青玛蹄脂数量减少等综合原因所致, 其中沥青玛蹄脂数量减小, 导致集料表面裹附的沥青砂浆膜厚度减少, 沥青砂浆提供的黏结力降低, 因此为了确保排水沥青路面有足够的低温抗开裂性能, 应严格控制目标空隙率。

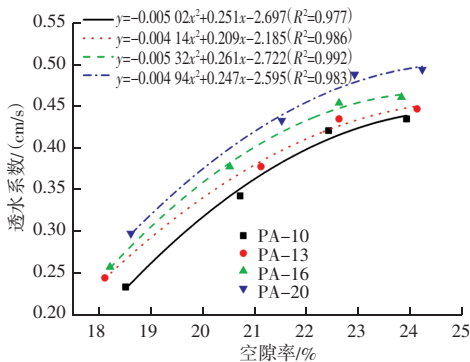
2.3 排水沥青混合料透水性能

试验研究固定试件厚度为 63.5 mm (标准马歇尔试件高度), 测试不同级配排水沥青混合料的透水系数, 结果如图 3 所示。由图 3 试验结果可知:

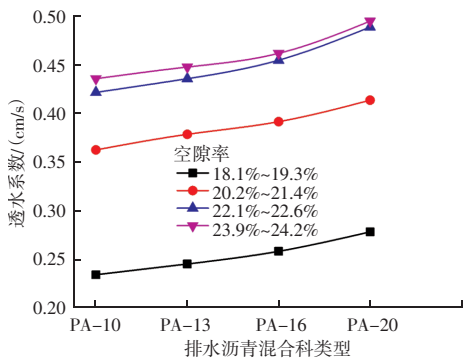
(1) 公称最大粒径相同, 排水沥青混合料的透水系数随空隙率增大而增大, 空隙率与透水系数呈良好的二次函数关系。

(2) 在 18%~22% 空隙率范围内增大空隙率能明显增大排水沥青混合料的透水系数, 空隙率每增大 2%, 排水沥青混合料的透水系数增加 27%~30%, 对比发现, 公称最大粒径越小, 增大空隙率后透水系数的增幅越大。空隙率由 18% 增大至 24%,

道桥技术



(a) 不同空隙率透水系数



(b) 不同公称最大粒径透水系数

图3 透水系数试验结果

Fig. 3 Test results of permeability coefficient

PA-10、PA-13、PA-16、PA-20 排水沥青混合料的透水系数分别增大了 85.9%、82.4%、78.7%、65.8%。当空隙率由 22% 增大至 24%，PA-10、PA-13、PA-16、PA-20 四种排水沥青混合料的透水系数仅增大了 1.5%~3.3%。因此兼顾排水沥青混合料的路用性能和排水功能，建议排水沥青混合料的目标空隙率为 20%~22%。

(3) 在 18.1%~19.3%、20.2%~21.4%、22.1%~22.6%、23.9%~24.2% 空隙率条件下，PA-13 排水沥青混合料的透水系数分别比 PA-10 排水沥青混合料增大了 4.7%、4.4%、3.3%、2.8%，PA-16 排水沥青混合料的透水系数分别比 PA-13 排水沥青混合料增大了 5.3%、3.4%、4.4%、3.1%，PA-20 排水沥青混合料的透水系数分别比 PA-16 排水沥青混合料增大了 7.8%、7.2%、7.5%、5.6%，表明公称最大粒径越大，排水沥青混合料的透水系数越大。其原因可能是，公称最大粒径影响排水沥青混合料内部空隙的连通性，公称最大粒径越大，排水沥青混合料中连通空隙在

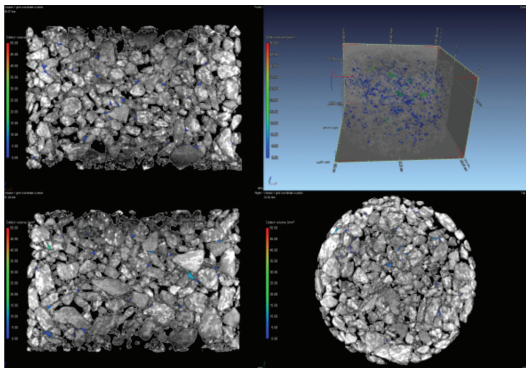
总空隙中的占比增大，因此综合透水效率提高。

综上可知，从排水功能考虑，增大空隙率和公称最大粒径均能明显增强排水沥青混合料的排水功能，但是，空隙率对排水沥青混合料透水性的影响比公称最大粒径更显著；从路用性能考虑，高温稳定性最优的空隙率范围为 20%~21%，而增大空隙率降低了排水沥青混合料的低温抗裂性能。要兼顾排水沥青路面排水功能与路用性能，关键在于选择适宜的目标空隙率。建议 PA-10 和 PA-13 排水沥青混合料采用 21% 空隙率作为目标空隙率，即采用较小公称最大粒径时采用适宜空隙率的上限；同理，PA-16 和 PA-20 排水沥青混合料，可采用 20% 空隙率作为目标空隙率。

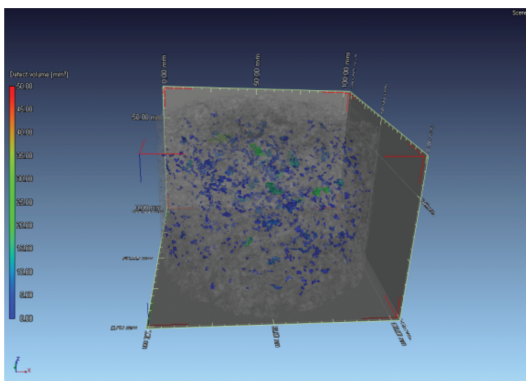
2.4 微细观空隙结构

2.4.1 空隙连通性

排水沥青混合料的微细观空隙结构如图 4 所示。测试不同级配排水沥青混合料的总空隙率和连通空隙率，建立二者之间的拟合关系，如图 5 所示。



(a) 获取 CT 图像并三维重构



(b) 微细观空隙结构

图4 三维空隙结构

Fig. 4 Three-dimensional void structure

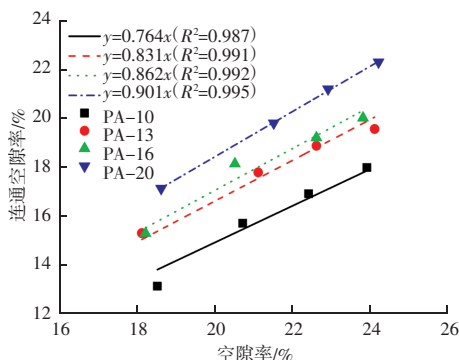


图5 不同级配排水沥青混合料总空隙率与连通空隙率之间的拟合关系

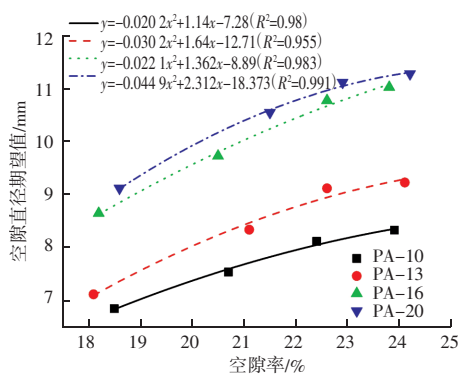
Fig. 5 Fitting relationship between total voidage and connected voidage of different grade drainage asphalt mixtures

在总空隙率为 18%~24% 条件下, PA-10、PA-13、PA-16、PA-20 排水沥青混合料的连通空隙率分别为 13.1%~18.1%、15.1%~19.6%、15.3%~20.1%、17.1%~22.3%; 拟合结果表明, 排水沥青混合料内部连通空隙率随总空隙率增大而线性关系增大。排水沥青混合料的透水性主要取决于其内部空隙的连通性, 相同空隙率条件下, 随着公称最大粒径的增大, 排水沥青混合料的连通空隙率增大, 且总空隙率与连通空隙率之间的线性拟合斜率增大, 可见增大空隙率和增大公称最大粒径均能明显增大排水沥青混合料的连通空隙率。

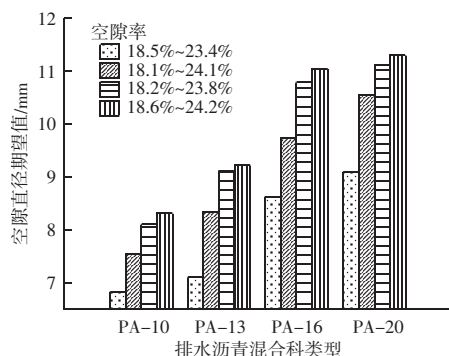
2.4.2 微细观空隙结构

参考已有研究成果^[13-14], 计算不同级配排水沥青混合料的微细观空隙直径期望值, 结果如图6所示。

PA-10 排水沥青混合料的空隙率为 18.5%、20.7%、22.4%、23.9% 时分别对应的空隙直径期望值为 6.85、7.12、8.65、9.12 mm; PA-13 排水沥青混合料的空隙率为 18.1%、21.1%、22.6%、24.1% 时分别对应的空隙直径期望值为 7.12、8.34、



(a) 不同空隙率



(b) 不同级配

图6 不同级配排水沥青混合料空隙直径期望值

Fig. 6 Expected void diameters of different grade asphalt mixtures

9.12、9.23 mm; PA-16 排水沥青混合料的空隙率为 18.2%、20.5%、22.6%、23.8% 时分别对应的空隙直径期望值为 8.65、9.73、10.78、11.03 mm; PA-20 排水沥青混合料的空隙率为 18.6%、21.5%、22.9%、24.2% 时分别对应的空隙直径期望值为 9.12、10.55、11.12、11.28 mm。分析结果表明, 相同级配条件下, 随着空隙率增大, 排水沥青混合料的微细观空隙直径期望值呈二次函数关系增大(见图6(a)), 空隙率由 18% 增大至 24%, PA-10、PA-13、PA-16、PA-20 排水沥青混合料的空隙率分别增大 33.1%、39.9%、36.9%、35.4%。对比不同空隙率条件下排水沥青混合料微细观空隙直径期望值变化趋势, 当空隙率增大至 22.5% 以后, 微细观空隙直径期望值趋于平稳, 因此, 推荐排水沥青混合料目标空隙率为 20%~21%。

在 18.1%~24.2% 空隙率条件下, PA-10、PA-13、PA-16、PA-20 排水沥青混合料的微细观空隙直径期望值的平均值分别为 7.71、8.45、10.05、10.52 mm, 总空隙率相同, 公称最大粒径越大, 排水沥青混合料的微细观空隙直径期望值越大(见图6(b)), 同样验证了增大公称最大粒径后排水沥青混合料透水性增强的结论。

2.5 微细观空隙直径与宏观性能相关性

综上所述, 增大空隙率后排水沥青混合料的透水系数增大、路用性能降低, 同时微细观空隙直径期望值增大。图7建立了排水沥青混合料微细观空隙直径期望值与透水系数之间的拟合关系, 结果表明, 排水沥青混合料的透水系数随着微细观空隙直径期望值增大呈二次函数关系增大, 拟合优度 R^2 大于

道桥技术

0.95。图8建立了微细观空隙直径期望值与排水沥青混合料贯入强度及低温抗弯拉强度之间的拟合关系,随着微细观空隙直径期望值增大,排水沥青混合料的贯入剪切强度呈先增后减二次函数关系,抗弯拉强度随微细观空隙直径期望值增大而线性关系减小,

拟合优度 R^2 大于 0.95。

综上可知,增大排水沥青混合料空隙导致微细观空隙直径增大,是不同级配排水沥青混合料透水性增强及高、低温性能衰减的原因之一。

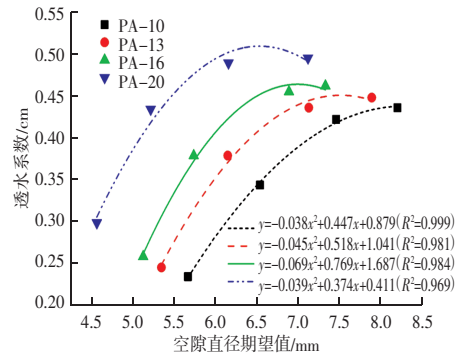
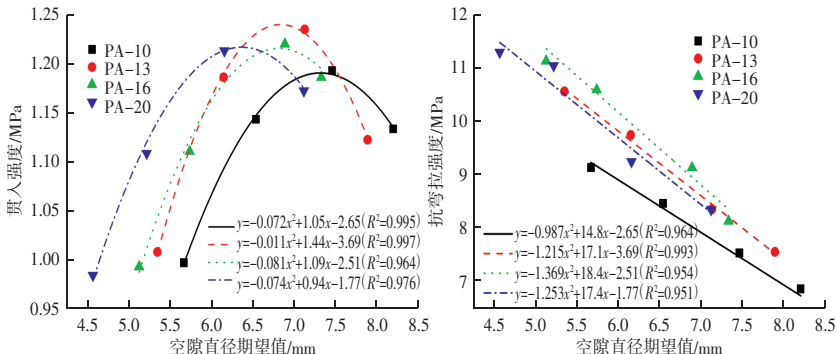


图7 空隙直径期望值与透水系数拟合关系
Fig.7 Fitting relationship between expected void diameter and permeability coefficient



(a) 贯入强度 (b) 抗弯拉强度
图8 空隙直径期望值与路用性能拟合关系
Fig.8 Fitting relationship between expected void diameter and pavement performance

3 结论

通过试验研究公称最大粒径和目标空隙率对不同级配排水沥青混合料透水性能、高低温路用性能及微细观空隙结构的影响规律,并建立了微细观空隙直径期望值与排水沥青混合料透水性能及路用性能的拟合关系,得到以下主要结论:

(1) 排水沥青混合料具有优异的高温稳定性,随着空隙率增大,排水沥青混合料的高温抗车辙性能先增后减,而低温性能和抗松散性能降低。

(2) 增大排水沥青混合料的空隙率和公称最大粒径均能明显增强排水沥青混合料的排水功能,兼顾排水沥青混合料路用性能与排水性能的均衡,建议排水沥青混合料适宜的目标空隙率为20%~21%。

(3) 随着排水沥青混合料的空隙率和公称最大粒径越大,排水沥青混合料的微细观空隙直径期望值越大,随着微细观空隙直径期望值增大,排水沥青混合料的贯入剪切强度呈先增后减二次函数关系,抗弯拉强度则线性关系减小。

参 考 文 献

[1] 刘少华,潘宝峰,许斌,等. 透水沥青路面表面抗飞散性能提升技术研究 [J]. 中外公路, 2021, 41 (5): 57-63.
[2] 蒋文文,陈兴睿,张莉,等. 高速公路排水沥青路面可持续服务性能的多尺度分析 [J]. 公路交通科技, 2024, 41 (1): 35-43.

[3] 徐健,陈先华,施向东. 基于主结构形成准则的细粒式排水沥青混合料级配优化 [J]. 科学技术与工程, 2023, 23 (12): 5260-5266.
[4] 肖鑫,张肖宁. 基于CAVF法的排水沥青混合料组成设计 [J]. 公路交通科技, 2016, 33 (10): 7-12.
[5] 徐亮,王永斌,税欢. 橡胶沥青增强排水沥青路面性能研究 [J]. 路基工程, 2021 (3): 105-109.
[6] 刘江,张宇宁,李学友,等. 不同类型高黏沥青及排水沥青混合料的性能发展规律 [J]. 公路交通科技, 2023, 40 (增刊1): 40-48.
[7] 于立泽,刘作强,张海涛,等. 功能性沥青混合料排水特性的评价研究 [J]. 重庆理工大学学报 (自然科学), 2021, 35 (8): 106-113.
[8] 汪继平,廉向东,范勇军,等. 南友高速公路排水沥青路面长期性能调查与评价 [J]. 中外公路, 2020, 40 (3): 80-84.
[9] 黎晓,梁乃兴,白洪涛,等. 排水沥青混合料疲劳损伤耗散能变化比 [J]. 长安大学学报 (自然科学版), 2017, 37 (4): 98-104.
[10] 高颖,朱玉凤,和燕超,等. 玻璃纤维改性排水沥青混合料路用性能分析 [J]. 沈阳建筑大学学报 (自然科学版), 2020, 36 (4): 690-696.
[11] 高桂海,熊梅,钱波. 不同外掺纤维增强排水沥青混合料性能研究 [J]. 中外公路, 2019, 39 (6): 182-187.
[12] 侯新月. 基于空隙特征的排水沥青混合料级配设计方法研究 [D]. 桂林: 桂林电子科技大学, 2019.
[13] 王宏,李刚,王崇涛. 寒区低温环境下泡沫沥青冷再生混合料性能研究 [J]. 冰川冻土, 2024, 46 (5): 1-14.
[14] 黄宁,李爱国. 不同空隙率排水性沥青混合料宏观性能与微细观空隙结构研究 [J]. 公路工程, 2020, 45 (3): 189-196.