

# 灌入式复合路面基体沥青混合料检验方法研究

陈波<sup>1</sup>, 魏小皓<sup>2,3</sup>, 吴逸飞<sup>1</sup>, 钟科<sup>4</sup>, 罗桑<sup>5</sup>

(1. 重庆建工集团股份有限公司, 重庆市 400000; 2. 东南大学 交通学院; 3. 四川省公路规划勘察设计院有限公司;  
4. 交通运输部公路科学研究院; 5. 东南大学 智能运输系统研究中心)

**摘要:**灌入式复合路面是一种在级配沥青混合料中填充水泥砂浆而形成的路面结构, 兼具沥青路面与水泥路面的优点, 但其优良性能的发挥主要取决于基体沥青混合料的合理设计与否。为此, 该文提出三阶段检验法, 以 GOAC-13 和 GOAC-16 两种沥青混合料为例, 首先检验基体骨架的基本性能, 其次考虑水泥砂浆在满足第一步条件下的灌入效果, 最后通过检验复合材料的性能指标作为综合评判标准。结果表明, 通过三阶段检验法得到的灌入式复合沥青路面具有优良的路用性能, 可以满足行车需求; 而且适当减小灌入式沥青混合料的公称最大粒径, 有利于增强其抗剪切强度和高温稳定性能。

**关键词:**灌入式; 复合路面; 基体沥青混合料; 检验方法

灌入式复合路面是由水泥砂浆灌入至基体沥青混合料的孔隙中形成的, 基体沥青混合料的级配组成设计是影响灌入式路面性能的关键所在, 为水泥砂浆的灌入提供前提条件。基体沥青混合料的孔隙过小, 会影响水泥砂浆的灌入效果, 导致复合路面的强度性能无法满足技术要求; 孔隙过大, 粗集料之间难以形成骨架-嵌挤结构, 混合料容易出现松散问题, 致使水泥砂浆灌入之前基体路面无法承受施工机械荷载。由此可见, 基体沥青混合料的合理设计与否, 对灌入式复合路面的整体路用性能影响很大。

目前中国对于基体沥青混合料的检验方法研究相对较为缺乏。宋家楠采用 OGFC 级配沥青混合料的设计思路来确定基体沥青混合料的配比, 研究结果仅验证了第一阶段中基体骨架的性能指标; 王凤华采用主骨架体积填充法(CAVF)设计得到 3 组级配, 并以稳定度、空隙率和渗透系数等指标对其性能进行验证, 但渗透系数是以水作为介质, 其在基体沥青混合料中的流动情况与具有一定粒径大小的水泥砂浆相差甚远, 渗透系数作为评判其灌浆能力的说服力明显不足; 胡玲玲采用正交方法考察多种因素对基体沥青混合料的强度影响, 设计流程繁琐、试验量大, 不适用于工程项目的实际需求。

基于此, 该文提出三阶段检验法: 首先检验基体骨架的基本性能, 其次考虑水泥砂浆在满足第一步条件

下的灌入效果, 最后通过检验复合材料的性能指标作为综合评判标准。以 GOAC-13 (公称最大粒径为 13.2 mm 的灌入式复合沥青混合料) 和 GOAC-16 (公称最大粒径为 16 mm 的灌入式复合沥青混合料) 两种沥青混合料为例进行研究分析。

## 1 原材料

### 1.1 沥青

试验选用 SBS 改性沥青作为结合料, 参照 JTG E20-2011《公路工程沥青及沥青混合料试验规程》进行检验, 各项指标检测结果如表 1 所示。

### 1.2 矿料及级配

集料选用优质耐磨的玄武岩, 填料选用石灰岩矿粉, 其技术要求和检测结果分别如表 2、3 所示。各矿料的筛分结果如表 4 所示。

级配范围参考日本《半柔性路面施工手册》, 根据表 4 的筛分结果, 确定 GOAC-13 和 GOAC-16 两种沥青混合料的级配如表 5 所示。

### 1.3 最佳油石比

采用马歇尔试验对基体沥青混合料的最佳油石比进行研究, 以马歇尔稳定度、流值和空隙率等指标进行综合确定, 得到 GOAC-13 和 GOAC-16 两种沥青混合料的马歇尔试验结果, 如表 6 所示。

收稿日期: 2020-09-10 (修改稿)

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (编号: 51408125); 东南大学优秀青年教师教学科研资助计划项目 (编号: 2242015R30029)

作者简介: 陈波, 男, 高级工程师. E-mail: houhou79114@qq.com

表1 SBS改性沥青技术要求及检测结果

技术指标	单位	检测结果	技术要求	试验方法
针入度(25℃,100g,5s)	0.1 mm	56.0	40~60	T0604
延度(5℃,5cm/min)	cm	32.0	≥30	T0605
软化点(环球法)	℃	79.0	≥55	T0606
弹性恢复(25℃)	%	71.0	≥65	T0662
溶解度	%	99.8	≥99	T0607
闪点	℃	295.0	≥230	T0611
贮存稳定性	℃	1.5	≤2.5	T0661
RTFOT 质量变化率	%	0.1	-1.0~+1.0	T0610
薄膜加热 针入度比(25℃)	%	71.4	≥60	T0604
试验残留物 残留延度(5℃)	cm	24.3	≥20	T0605

表2 集料技术要求及检测结果

技术指标	单位	检测结果	技术要求	试验方法	
洛杉矶磨耗率(C级)	%	14.4	≤28	T0317-2005	
针片状含量	>9.5 mm	%	3.7	≤12	T0312-2005
	<9.5 mm	%	4.2	≤18	
压碎值	%	13.6	≤26	T0316-2005	
黏附性(70#)	级	5	≥5	T0616-2011	
坚固性	%	2	≤12	T0314-2005	
	10~15 mm		2.964	T0304-2005	
表观相对密度	5~10 mm		2.953	≥2.60	
	3~5 mm		2.947		
	0~3 mm		2.935	≥2.50	

表3 矿粉技术要求及检测结果

技术指标	单位	检测结果	技术要求	试验方法
表观相对密度		2.66	≥2.50	T0352-2005
亲水系数		0.68	≤1	T0353-2005
含水率	%	0.10	≤1	T0103-2005
塑性指数		2.80	≤4	T0354-2005

表4 矿料筛分结果

矿料类型	通过下列筛孔(mm)的质量百分率/%										
	19.0	16.0	13.2	9.5	4.75	2.36	1.18	0.6	0.3	0.15	0.075
1# (10~20 mm)	100	79.2	48.8	3.7	0.6	0.3	0	0	0	0	0
2# (10~15 mm)	100	72.0	10.6	0.2	0	0	0	0	0	0	
3# (5~10 mm)	100	100	91.7	1.6	0.1	0	0	0	0	0	0
4# (3~5 mm)	100	100	100	100	2.1	0.2	0	0	0	0	0.6
5# (0~3 mm)	100	100	100	100	85.4	57.8	35.1	19.1	11.1	2.7	13.1
矿粉	100	100	100	100	100	100	100	100	99.0	97.5	87.0

表 5 矿料级配设计

混合料类型	通过下列筛孔(mm)的质量百分率/%									沥青用量/%
	19.0	16.0	13.2	4.75	2.36	0.6	0.3	0.075		
GOAC-13	设计级配	100	100	96.7	18.9	10.2	5.7	4.3	2.4	—
	级配范围	—	100	95~100	10~35	5~22	4~15	3~12	1~6	3.0~4.2
GOAC-16	设计级配	100	82.5	57.0	16.5	12.4	7.6	6.0	3.8	—
	级配范围	100	—	35~70	7~30	5~20	4~15	3~12	1~6	2.7~3.9

表 6 马歇尔试验结果

混合料类型	油石比/%	稳定度/kN	流值/(0.1 mm)	空隙率/%
GOAC-13	3.4	4.15	32.2	22.47
GOAC-16	3.2	4.43	34.1	24.34
技术要求	—	>3.5	20~40	20~28

## 2 三阶段检验流程

### 2.1 基体骨架性能检验

基体沥青混合料的空隙率一般为 20% 以上, 作为大孔隙沥青混合料的一种, 其性能应首先满足大空隙沥青混合料的技术要求。采用飞散试验和析漏试验分别计算基体沥青混合料的飞散损失和析漏损失, 从而对基体沥青混合料的配合比设计进行验证, 结果如表 7 所示。

表 7 析漏试验与飞散试验结果

混合料类型	飞散损失/%	技术要求/%	析漏损失/%	技术要求/%
GOAC-13	14.7	≤20	0.240	≤0.3
GOAC-16	18.5	≤20	0.175	≤0.3

由表 7 可以看出: GOAC-13 和 GOAC-16 两种沥青混合料的飞散损失和析漏损失均满足规范要求, 说明上述确定的级配和最佳油石比是合理的。进一步观察可以发现: GOAC-16 沥青混合料的飞散损失大于 GOAC-13, 析漏损失的结果却正好相反, 这主要是由于 GOAC-13 沥青混合料的油石比相对较大, 增强了集料与沥青之间的黏附力, 同时也使得高温下流淌的沥青结合料相应增多。

### 2.2 水泥砂浆灌入效果检验

为评价水泥砂浆对基体沥青混合料的灌入效果, 引入灌浆饱和度的概念进行灌入量分析, 灌浆饱和度

$S_g$  按照式(1)计算:

$$S_g = \frac{(m_2 - m_1)}{\rho \times V \times VV} \times 100\% \quad (1)$$

式中:  $S_g$  为灌浆饱和度(%);  $m_1$  为灌浆前试件质量(g);  $m_2$  为灌浆后试件质量(g);  $\rho$  为水泥砂浆密度( $g/cm^3$ );  $V$  为试件体积( $cm^3$ );  $VV$  为基体沥青混合料的空隙率(%).

试验结果如表 8 所示。

表 8 灌浆饱和度和马歇尔试验结果

混合料类型	油石比/%	灌浆饱和度/%	稳定度/kN	流值/mm
GOAC-13	3.4	97.2	23.5	34.3
GOAC-16	3.2	96.9	22.9	27.6
技术要求	—	≥96	>9	20~40

由表 8 可知: GOAC-13 和 GOAC-16 沥青混合料的灌浆饱和度分别达到 97.2% 和 96.9%, 表明绝大部分水泥砂浆可以进入基体骨架的孔隙中, 形成灌入式复合结构。由制作的试件也可以看出, 经过水泥砂浆灌入后, GOAC-13 和 GOAC-16 沥青混合料马歇尔试件的孔隙基本被水泥砂浆填满, 达到了水泥砂浆灌入的预期目的。另外灌入式复合试件的稳定度为 23 kN 左右, 远超过 SBS 沥青改性 SMA 混合料的马歇尔稳定度, 说明灌入式复合试件的强度很高。

### 2.3 复合材料路用性能检验

采用 60 °C 车辙试验、低温小梁弯曲试验、冻融劈裂试验和直接剪切试验分别评价复合沥青混合料的高温性能、低温性能、水稳定性以及抗剪切性能, 结果如表 9 所示。

由表 9 可知: 水泥砂浆的加入改善了原沥青混合料在高温状态下易发生变形的性质, 大幅度提高了混合料的抗车辙能力, 而且适当减小集料的公称最大粒径, 有利于提高灌入式复合路面结构的密实度, 增强高温稳定性能。

表9 复合材料路用性能试验结果

混合料类型	动稳定度/ (次·mm <sup>-1</sup> )	极限弯拉 应变/ $\mu\epsilon$	劈裂强度 比/%	20℃最大 剪切力/kN	60℃最大 剪切力/kN
GOAC-13	13 600	2 541	85.3	20.2	19.3
GOAC-16	11 240	2 512	85.2	18.4	17.6

GOAC-13和GOAC-16两种沥青混合料的极限弯拉应变相差较小,且均小于SMA-13沥青混合料,但是符合规范要求,表明灌入式复合材料的低温性能有所下降,但仍能满足低温条件下的路用需求。

在冻融劈裂试验中,对照组试件需要真空保水后在-18℃条件下静置16h,这一冻融循环条件对水泥砂浆的强度造成一定幅度的影响,但60℃下恒温水浴48h又使得水泥砂浆的强度得到进一步增长,一定程度上减弱了结合料在高温和高湿条件下黏结效果的衰减,最终使得复合材料具有良好的水稳定性能。

直剪试验结果表明:灌入式复合材料在常温与高温下均具有优良的抗剪切性能,且随着温度的升高,最大剪应力下降很小,说明灌入式复合材料对温度的敏感性降低。同时,GOAC-13的抗剪切性能优于GOAC-16,原因与高温稳定性能一致。

### 3 三阶段检验要求

在进行三阶段检验之前,首先应确定原材料以及基层沥青混合料的级配和最佳油石比。在此基础上,根据三阶段设计流程对基层沥青混合料的各项技术指标依次进行检验,不符合要求的应当重新设计,其中每一阶段的设计要求如图1所示。

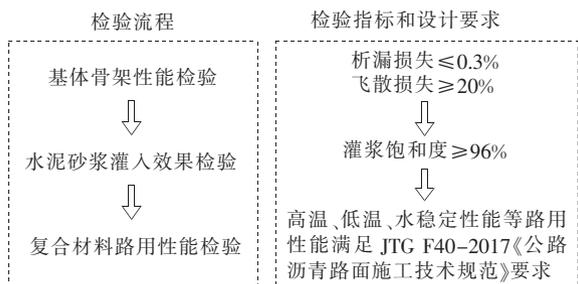


图1 三阶段检验方法设计要求

### 4 结论

采用三阶段检验方法对GOAC-13和GOAC-16两种灌入式复合沥青混合料进行研究分析,分别对基层沥青混合料的骨架性能、灌浆效果以及复合材料的路用性能进行验证,结论如下:

(1) 借鉴日本灌入式复合路面设计经验得到的两种基层沥青混合料,其析漏损失与飞散损失均满足规范要求,而且适当减小混合料的公称最大粒径,有利于提高其抗剪切强度和高温稳定性能。

(2) 引入灌浆饱和度的概念评价水泥砂浆的灌入效果,两种沥青混合料的灌浆饱和度均达到预期要求,灌浆后试件的马歇尔稳定度远大于SMA沥青混合料。

(3) 采用车辙试验、低温小梁弯曲试验、冻融劈裂试验和直接剪切试验对复合材料的路用性能进行验证,结果表明按照三阶段检验方法得到的灌入式复合材料,其高温性能、水稳定性能和抗剪切性能均优于SMA沥青混合料,低温性能略差,但满足规范要求。

(4) 通过基层骨架的性能指标、水泥砂浆灌入效果和复合材料路用性能三个方面依次检验得到的灌入式复合路面材料,其性能符合路面需求,证明了三阶段检验方法的科学性与合理性。

### 参考文献:

- [1] S Thyagarajan, B Muhunthan, N Sivaneswaran, et al. Efficient Simulation Techniques for Reliability Analysis of Flexible Pavements Using the Mechanistic Empirical Pavement Design Guide[J]. Journal of Transportation Engineering, 2011, 137(11):796-804.
- [2] 谢若奇, 吴旷怀, 蔡旭, 等. 专用砂浆半柔性路面材料及其工程应用研究[J]. 中外公路, 2017(3).
- [3] Lindy, J. K., Ashra. Open-Graded Highway Bases Make Permeameter Setup Important[J]. Journal of Transportation Engineering, 2008, 16(2):144-148.
- [4] 钟科, 陈波, 蒋恩贵, 等. 灌注式半柔性路面材料研究与应用综述[J]. 中外公路, 2017(2).
- [5] Chen Can, Williams RC, Marasinghe MG, et al. Assessment of Composite Pavement Performance by Survival Analysis[J]. Journal of Transportation and Engineering, September, 2015, 141(9):1-9.
- [6] Pei Jianzhong, Cai Jun, Zou Daoguang, et al. Design and Performance Validation of High-Performance Cement Paste as a Grouting Material for Semi-Flexible Pavement[J]. Construction and Building Materials, 2016, 126:206-217.