

# 灌注式半柔性路面结构施工质量控制研究

牟长江<sup>1</sup>, 程凯<sup>1</sup>, 刘瑞<sup>1</sup>, 孙勇<sup>2</sup>, 耿大海<sup>2</sup>

<sup>1</sup>中化学交通建设集团有限公司, 山东 济南

<sup>2</sup>邹平市交通运输局, 山东 滨州

收稿日期: 2021年11月2日; 录用日期: 2021年12月3日; 发布日期: 2021年12月10日

## 摘要

灌注式半柔性路面结构的应用彻底解决了渠化重载交通作用下路面容易出现车辙病害问题, 针对于此种特殊路面结构能够充分发挥结构设计作用保证路面结构运营效果, 课题组依次从半柔性路面结构设计优化与组成半柔性路面原材料技术要求, 混合料配合比设计方法与技术指标, 混合料铺筑于胶浆灌注关键环节质量控制要求, 混合料养生与半柔性路面运营阶段维修养护措施进行研究。灌注式半柔性路面结构通过结构优化设计与良好的施工质量控制相结合, 能够从根本上解决路面车辙问题, 并且能够降低路面全寿命周期建养成本, 是一种性价比较高的绿色耐久新型路面结构。

## 关键词

灌注式半柔性路面结构, 结构设计优化, 质量保证措施, 绿色耐久

# Research on Construction Quality Control of Pouring Semi-Flexible Pavement Structure

Changjiang Mou<sup>1</sup>, Kai Cheng<sup>1</sup>, Rui Liu<sup>1</sup>, Yong Sun<sup>2</sup>, Dahai Geng<sup>2</sup>

<sup>1</sup>China Chemical Transportation Construction Group Co., Ltd., Ji'nan Shandong

<sup>2</sup>Zouping City Transportation Bureau, Binzhou Shandong

Received: Nov. 2<sup>nd</sup>, 2021; accepted: Dec. 3<sup>rd</sup>, 2021; published: Dec. 10<sup>th</sup>, 2021

## Abstract

The application of perfusion semi-flexible pavement structure has completely solved the problem of road rutting that is prone to road surface under the action of channelized heavy-load traffic. Aiming at this special pavement structure that can give full play to the structure design function to ensure the operation effect of the pavement structure, the research team followed by semi-flexible

pavement structure design optimization and composition semi-flexible pavement raw material technical requirements, mixture mix design method and technical indicators, mixture paving in the key link of mortar pouring quality control requirements, mixture curing and semi-flexible pavement operation phase maintenance and maintenance measures research. The perfusion semi-flexible pavement structure combines structural optimization design with good construction quality control, which can fundamentally solve the problem of road rutting, and can reduce the cost of the life cycle of the road surface. It is a green and durable new type with high cost performance pavement structure.

## Keywords

Pouring Semi-Flexible Pavement Structure, Structural Design Optimization, Quality Assurance Measurement, Green Durable

Copyright © 2021 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

## 1. 引言

灌注式半柔性路面结构是在碾压成型后的大空隙基体沥青混合料中灌注具有高流动性的特种水泥基灌浆材料而形成的一种刚柔相济的复合路面结构[1] [2]。灌注式半柔性路面适用于各等级路面的长大纵坡路段、平交道口、服务区、收费站及城市道路的公交专用车道、公交港湾、平交道口等抗车辙性能要求较高的工程，灌注式半柔性路面具有较好的耐火、耐有机溶剂污染和较好的视觉效果。通过试验路跟踪观测发现，较多的半柔性路面结构出现了裂缝松散等早期病害，严重影响了路面行驶质量[3] [4] [5]。通过对运营效果较好的试验路段分析检测，期望总结出半柔性路面结构良好运营的保障措施，彻底根治路面早期病害，降低重复建设对环境的破坏作用，将此种优良的环保耐久型路面结构落地生根。

## 2. 结构设计优化

### 2.1. 破坏模式

#### 1) 横向裂缝

市政道路半柔性路面结构通车运营不足一年即出现横向裂缝等早期典型病害，市政道路典型路面结构为 36 cm 水泥稳定碎石 + 10 cm 沥青混合料，维修养护一般是直接将 10 cm 沥青混合料刨除铺筑 10 cm 半柔性路面材料。通过对裂缝位置取芯检测发现裂缝是由于下承层水泥稳定碎石反射裂缝导致，半柔性路面结构由于灌注大量水泥基胶浆刚度较大抗裂性能较差，下承层裂缝很容易反射到上层，经过雨水浸泡很容易造成水损害[6] [7] [8]。

#### 2) 松散病害

半柔性路面结构通车不久表面就出现片状松散坑槽等早期病害，严重影响通行车辆的安全与舒适性。通过对松散部位取芯分析发现，半柔性路面芯样内部存在较多孔隙水泥基胶浆未灌注饱满，由于基体沥青混合料孔隙率较大一旦胶浆不能完全填充预留的孔隙形成完整的胶结强度，大孔隙基体沥青混合料很容易随着车轮的冲击而松散，施工质量控制措施对于半柔性路面结构显得尤为重要[9] [10] [11] [12]。

## 2.2. 结构优化设计

综合考虑灌注式半柔性路面结构容易出现的反射裂缝与结构承载能力, 灌注式半柔性路面材料可适用于三层面层结构的上、中面层和双层面层结构的上、下面层。半柔性结构层最小厚度不小于 6 cm, 最大厚度不超过 15 cm。

原路面三层沥青混合料时保留下面层沥青混合料作为应力吸收层, 原路面为两层沥青混合料时, 应全部刨除之后设置胶粉复合改性沥青同步碎石封层, 处理好下承层再进行半柔性路面材料铺筑。通过在水泥稳定碎石之上设置不同形式的应力吸收层有效解决半柔性路面材料刚性较大容易出现反射裂缝的问题, 从路面结构设计上更好的适应半柔性路面结构形式[5] [13] [14]。

## 3. 原材料技术指标

### 3.1. 集料与填料

集料与填料是组成大孔隙基体沥青混合料骨架结构主要原材料, 粗集料宜采用质地坚硬的单级配集料, 粗集料的压碎值与磨光值对于基体沥青混合料的抗滑性能与孔隙结构尤为重要[14] [15], 粗集料推荐采用棱角性较好的玄武岩。填料矿粉与沥青胶结料形成胶浆粘合集料成为具有一定强度的沥青混合料, 矿粉推荐选用低钙石灰岩磨细矿粉, 能够增加沥青胶浆与集料的粘附性, 当沥青与集料粘附性不满足要求时可以通过添加抗剥落剂等措施解决。粗集料物理技术指标见表 1, 矿粉物理技术指标见表 2。

**Table 1.** Aggregate physical technical indicators

**表 1.** 集料物理技术指标

物理技术指标	单位	技术要求	标准方法
表观密度	g/cm <sup>3</sup>	≥2.8	T0304-2000
吸水率	%	≤3.0	T0304-2000
针片状含量	%	≤15	T0312-2001
压碎值	%	≤15	T0316-2002
洛杉矶磨耗值	%	≤20	T0317-2003
与沥青粘附性	级	≥5	T0616-2000

**Table 2.** Physical technical indicators of mineral powder

**表 2.** 矿粉物理技术指标

物理技术指标	单位	技术要求	标准方法
视密度	g/cm <sup>3</sup>	≥2.5	T0352-2000
含水量	%	≤1.0	T0103-2000
外观	-	无团粒结块	-
粒径范围	<0.6 mm	%	100
	<0.15 mm	%	90~100
	<0.075 mm	%	75~100

### 3.2. 胶结料

沥青胶结料对于大孔隙基体沥青混合料较普通密集配沥青混合料粘度要大，相应沥青含量较低，胶浆的粘结作用与粗集料的骨架嵌挤作用共同提供基体沥青混合料强度[16] [17]。用于半柔性路面材料的沥青推荐采用粘结性能较好的 SBS 改性沥青，沥青胶结料不同于常规 SBS 改性沥青，通过试验路比对确定其技术指标见表 3。

**Table 3.** Technical index of SBS modified asphalt  
**表 3.** SBS 改性沥青技术指标

检测项目	技术要求	试验方法
针入度(25℃, 5 s, 100 g)/0.1mm	60~80	T0604
延度(5 cm/min, 5℃, cm)	≥35	T0605
软化点(℃)	≥75	T0606
运动粘度(135℃, Pa·s)	≤3	T0625
闪点(℃)	≥230	T0611
溶解度(%)	≥99	T0607
25℃弹性恢复	≥85	T0662
密度(25℃, g/cm <sup>3</sup> )	实测记录	T0603
质量损失(%)	≤±1.0	T0610
旋转薄膜老化试验 (163℃, 85 min)	针入度比(25℃, %)	≥60
	延度(5℃, cm)	≥25

### 3.3. 灌浆料

特种水泥基灌浆材料是半柔性路面材料的核心，其流动性决定了沥青混合料灌注饱满度，胶浆强度决定了半柔性路面通车时效性与承载能力，胶浆的收缩性能决定了半柔性路面自身开裂情况，胶浆的各项性能对于半柔性路面运营效果都至关重要[18]。通过对灌浆料比对研究最终确定技术指标见表 4。

**Table 4.** Grouting technical indicators  
**表 4.** 灌浆料技术指标

试验项目	单位	技术要求
流动度(涂-4 粘度计)	s	13~18
水胶比	-	0.30~0.33
抗折强度(3 h)	MPa	≥2.0
抗压强度(3 h)	MPa	≥10.0
抗折强度(28 d)	MPa	≥4.0
抗压强度(28 d)	MPa	≥20.0
干缩率(3 d)	%	≤2.0

## 4. 配合比优化设计

### 4.1. 基体沥青混合料

通过试验路研究对比发现大孔隙基体沥青混合料连通孔隙率不小于 25% 才能满足理想的灌注要求, 连续级配原材料形成的空隙不均匀难以达到如此大的连通孔隙率要求, 单粒径不连续集料能够形成较为均匀且连通孔隙率较大的混合料[19]。通过级配设计研究大孔隙沥青混合料级配曲线呈明显的“S”状, 属于完全间断级配不仅有利于形成集料骨架嵌挤结构而且表面构造深度较大抗滑性能较好。按照体积设计方法应用马歇尔击实仪成型的混合料需要具备合适的孔隙率与一定的强度。通过成功试验路推荐的级配范围见表 5, 基体沥青混合料马歇尔技术指标见表 6 所示。

**Table 5.** Gradation range of macroporous asphalt mixture

**表 5.** 大孔隙沥青混合料级配范围

筛孔尺寸/mm	19	16	13.2	9.5	4.75	2.36	1.18	0.6	0.3	0.15	0.075
级配上限	100	90	60	30	24	20	15	15	12	8	6
级配下限	90	60	30	20	7	5	5	4	3	3	1

**Table 6.** Technical index of base asphalt mixture

**表 6.** 基体沥青混合料技术指标

试验项目	单位	技术要求
马歇尔试件尺寸	mm	Φ101.6 mm × 63.5 mm
马歇尔试件击实次数	-	单面击实 75 次
空隙率	%	25~30
马歇尔稳定度	kN	≥ 3
析漏损失	%	<0.4
肯塔堡飞散损失	%	<25

### 4.2. 半柔性路面材料

将粉体灌浆料按照设定的水胶比加水搅拌均匀灌注到提前密封好的基体沥青混合料中, 经过适当时间的养生待水泥胶浆水化形成一定强度, 水化产物通过与沥青混合料的再粘结组成一个整体受力结构即形成半柔性路面材料刚柔并济的属性。通过运营良好的试验路数据分析, 半柔性路面材料需要灌注饱满具备一定的强度要求, 低温抗裂性能满足当地气候要求, 作为表面层使用需具备良好的抗滑与磨耗性能[5]。成功试验路应用效果推荐半柔性路面材料技术指标见表 7。

**Table 7.** Technical indicators of semi-flexible pavement materials

**表 7.** 半柔性路面材料技术指标

试验项目	单位	技术要求
灌浆饱满度	%	≥95
稳定度	kN	≥15
动稳定度(70℃)	次/mm	≥20,000

Continued

残留稳定度	%	≥90
冻融劈裂强度比	%	≥85
低温弯曲试验, 破坏应变 $\epsilon_B$ ( $-10^\circ\text{C}$ )	$\mu\epsilon$	≥1800
构造深度 TD	mm	≥0.6

## 5. 施工质量控制措施

### 5.1. 施工关键工艺

灌注式半柔性路面施工较常规沥青混合料施工工艺复杂, 主要区别在于基体沥青混合料碾压工艺不同, 沥青混合料自然降温至室温之后需要对其封边处理, 灌浆料需要在摊铺现场使用专用设备进行加水搅拌使其成为流动性很强的胶凝材料, 搅拌均匀的浆料需要连续不断的灌注到基体沥青混合料中, 人工将浆料刮均匀且有一定构造深度, 洒水养生至规定强度方可开放交通。其施工主要包括以下步骤: 大空隙基体沥青混合料的摊铺、压实, 灌浆料的现场制备, 灌浆料的灌注与表面处理, 半柔性路面材料养护与开放交通[5] [6]。

### 5.2. 大孔隙沥青混合料施工

#### 1) 混合料的拌合

基体沥青混合料必须在沥青拌和厂采用间隙式拌和机拌制, 拌和机应有防止矿粉飞扬散失的密封性能及除尘设备, 并有检测拌和温度的装置和自动打印装置。在拌和过程中应逐盘打印沥青及各种矿料的用量、拌和温度, 并定期对拌和楼的计量和测温进行校核, 每天应用拌和总量检验矿料的配比和沥青含量的误差。沥青混合料拌和时间以混合料拌和均匀、所有矿料颗粒全部裹覆沥青胶结料为度。

#### 2) 混合料的摊铺

混合料必须采用机械摊铺机, 在摊铺前应检查确认下承层的质量, 质量不合格时, 不得进行铺筑作业, 摊铺机应调整到最佳状态, 使铺面均匀一致, 不得出现离析现象。运料车在卸料时, 运输车辆不得撞击摊铺机, 以保证摊铺出的路面的平整度。进行作业的摊铺机必须具有自动调节厚度及找平的装置, 必须具有振动熨平板或振动夯等初步压实装置。摊铺机的摊铺速度应调节至与供料、压实速度相平衡, 保证连续不断的均衡摊铺, 中间不停顿。项目摊铺时注意道路边部的密封情况, 建议采用防水土工布处理边部, 以保证封水效果。

#### 3) 混合料的压实

大空隙基体沥青混合料的碾压一般以双钢轮压路机为宜, 碾压次数比常规沥青混凝土少; 摊铺机摊铺后, 使用 12~13 t 钢轮压路机采用静压法碾压 1~3 遍, 压实温度控制在  $120^\circ\text{C}$ ~ $135^\circ\text{C}$ , 严格禁止过高温度的压实造成混合料超密影响灌注效果, 严禁压路机在路中停留(在作业面的两端预留出压路机停车位置), 严禁超出压实次数, 要求压实度控制在 98%~100%, 保证基体沥青混合料施工后平整度。当温度降到  $80^\circ\text{C}$  左右时要进行整平碾压, 以消除轮迹。

#### 4) 混合料的养生

碾压后的路面在冷却前, 任何机械不得在路面上停放, 任何矿料、杂物、油料等不应落在路面, 防止影响路面平整度和后期浆体灌入效果; 铺设的基体沥青混合料需冷却至  $50^\circ\text{C}$  以下方可进行灌注施工, 施工过程中路表温度大于  $50^\circ\text{C}$  不宜施工。当环境温度较高、交通压力大、混合料降温时间较长时, 可采用带细孔喷头的喷洒设备或者雾炮车, 进行适当洒水降温, 可间歇性喷洒, 每次喷洒少量, 待水蒸发完成之后再行喷洒, 严格控制水的喷洒量。



### 5.3. 灌浆料灌注施工

#### 1) 人员安排

灌浆施工要求连续作业, 施工前需要对作业人员进行安全和技术交底, 合理安排制浆人员、刮浆人员与辅助人员, 各组人员需要配合施工做到连续有序施工。

#### 2) 封边施工

灌浆前, 采用封边条和相应的封堵材料将大空隙基体沥青混合料四周进行围挡封堵, 防止浆体流出造成灌注不饱满, 污染旁边路面或路缘石。

#### 3) 制浆工艺

浆体的制备一般是现场进行, 灌浆材料和水通过专用的制浆设备进行现场浆体制备, 现场辅助设备有吊车、运输车及水车等, 保证施工的连续性和高效性。采用的半柔性路面专用搅拌机, 搅拌流程一般为先将精确计量的水加入搅拌锅内, 再加入精确计量的灌浆材料, 搅拌 1~2 min 即可灌注, 灌注施工要求能够连续灌注保证路面结构的完整性, 干粉加工产能不小于 10 吨/小时, 制浆设备应具备防止粉尘污染的抽吸和除尘装置, 做到全程无粉尘污染的环保型施工。

#### 4) 刮浆及表面处理

浆体灌满大空隙基体沥青混合料后, 采用硬毛刷和橡胶刮板等抹面设备进行表面处理, 将沥青混合料表面多余的浆体刮除干净, 使得路面产生露石构造, 保证路面安全抗滑和美观, 抹面完成后, 清除封边材料以及多余浮浆等, 保证路面清洁。

#### 5) 道路养生

灌浆材料需要一定的时间养生才能产生强度, 通常灌浆施工完成以后 3 h 即可开放交通, 具体时间根据现场天气和温度情况判定。养护期间, 如果温度较高、风速较快, 可根据实际情况进行雾炮车洒水养护, 以避免表面浆体水分过快散失, 产生表面开裂现象。若是下面层做灌入式复合沥青路面时, 应当满足开放交通要求的强度后, 方可进行上面层沥青混凝土的铺筑。

## 6. 结论

1) 通过对原路面养护结构设计优化, 原路面三层沥青混合料结构将半柔性路面材料作为表面层保留下面层沥青混合料结构层作为应力吸收层; 原路面结构为两层沥青混合料时将原路面沥青层全部铣掉, 增加胶粉复合改性沥青封层其上铺筑半柔性路面材料。对原路面结构优化之后可显著减少半柔性路面材料的反射裂缝, 增加路面结构使用寿命。

2) 通过对半柔性路面材料所用的原材料进行技术指标提升优化、基体沥青混合料配合比设计与评价体系优化、灌浆料超早强防开裂指标要求、针对半柔性路面材料路用性能的指标要求、沥青混合料与灌注施工的关键工艺保证措施研究, 经过科学设计与精细化施工可以解决路面松散坑槽等早期病害。

## 参考文献

- [1] 陈祥峰. 高性能流动性水泥灌浆材料配合比设计及半柔性路面路用性能研究[D]: [硕士学位论文]. 西安: 长安大学, 2010.
- [2] 魏璐. 半柔性抗车辙路面技术应用研究[D]: [硕士学位论文]. 苏州: 苏州科技大学, 2018.
- [3] 张荣鹏. 高性能灌注式半柔性路面材料的研究与应用[D]: [硕士学位论文]. 武汉: 武汉理工大学, 2009.
- [4] 黄芳, 吴国雄, 王燕, 等. 半柔性路面复合材料抗压回弹模量研究[J]. 重庆交通大学学报(自然科学版), 2008, 27(1): 65-68+133.
- [5] 王亨庭, 易军艳, 王东升, 等. 复合混凝土基体沥青混合料空隙率设计方法研究[J]. 合肥工业大学学报(自然科学版), 2020, 43(2): 245-249+284.

- 
- [6] 马培建, 蒋青春, 徐陆军, 等. 灌注式半柔性复合路面研究现状综述[J]. 路基工程, 2018(3): 11-15.
- [7] 董莹莹. 高性能半柔性路面设计参数及施工工艺研究[D]: [硕士学位论文]. 重庆: 重庆交通大学, 2008.
- [8] 程磊. 半柔性路面用混合料性能及其设计方法研究[D]: [硕士学位论文]. 西安: 长安大学, 2002.
- [9] 潘大林, 张肖宁. 半柔性路面基层沥青混合料的设计方法[J]. 中南公路工程, 2000, 25(1): 22-23.
- [10] 李生隆, 孙登科, 胡玲玲. 半柔性复合路面设计与施工方法的探讨[J]. 水利与建筑工程学报, 2007, 5(4): 70-73.
- [11] 胡玲玲, 刘祖国, 张大可, 等. 半柔性复合路面基层沥青混合料设计方法[J]. 重庆交通学院学报, 2006, 25(5): 49-53.
- [12] 吴国雄, 张洋, 王爱民, 等. 半柔性路面高温稳定性试验研究[J]. 重庆交通学院学报, 2007, 26(1): 52-55+121.
- [13] 徐涛, 张玉晶, 曹晓岩. 根据柔性路面结构的功能要求选择沥青混合料的组成[J]. 交通科技与经济, 1999(2): 10-12.
- [14] 覃峰, 唐银青, 韦红教, 等. 沥青混合料基灌注式半刚性路面材料设计与性能试验研究[J]. 公路, 2017, 62(2): 179-187.
- [15] 孙秀明, 邓成, 柯文汇, 等. 半柔性路面材料的性能研究与应用[J]. 江苏建筑, 2016(3): 92-94.
- [16] 赵国强, 邓成, 王文达, 等. 半柔性抗车辙路面材料的性能研究与应用[J]. 公路交通科技·应用技术版, 2015, 11(11): 124-127.
- [17] 杨宇亮, 张肖宁, 王树森, 等. 半柔性混合料的设计与性能研究[J]. 山东交通学院学报, 2003, 11(3): 32-35+41.
- [18] 顾晓燕, 李令喜, 成志强. 半柔性路面水泥基灌浆材料流动性能研究[J]. 公路, 2017, 62(7): 280-285.
- [19] 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, 37(2): 232-235.