

# 灌注式半柔性路面应用效果研究

程 凯, 牟长江, 刘 瑞, 董 帅, 贾恩达

中化学交通建设集团有限公司, 山东 济南  
Email: 601786908@qq.com

收稿日期: 2021年7月12日; 录用日期: 2021年8月12日; 发布日期: 2021年8月19日

## 摘 要

课题组通过对灌注式半柔性路面灌浆材料的实验研究, 开发出适合山东气候的专用灌浆料, 自主研发的制浆设备能够连续生产极大提高了施工效率, 对路面结构进行了优化, 更适合半柔性路面结构受力情况。课题组通过材料、设备与路面结构一体化设计研究成果, 依托邹魏路改扩建工程重载交通平交路口进行了试验路应用, 通过1年多的使用情况观测半柔性路面结构抗车辙性能显著, 路面抗滑与渗水等全部路用性能指标满足设计要求, 服役效果非常理想, 不仅节约了沥青等不可再生资源用量而且减少全寿命周期的养护费用, 有效降低了重复建设对环境的破坏作用, 半柔性路面是一种较理想的环保耐久型路面结构。

## 关键词

灌注式半柔性路面, 路用性能, 服役效果, 环保耐久

# Research on Application Effect of Pouring Semi-Flexible Pavement

Kai Cheng, Changjiang Mou, Rui Liu, Shuai Dong, Enda Jia

China National Chemical Communications Construction Group Co., Ltd., Jinan Shandong  
Email: 601786908@qq.com

Received: Jul. 12<sup>th</sup>, 2021; accepted: Aug. 12<sup>th</sup>, 2021; published: Aug. 19<sup>th</sup>, 2021

## Abstract

The research team developed a special grouting material suitable for Shandong's climate through experimental research on perfusion semi-flexible pavement grouting materials. The self-developed grouting equipment can produce continuous production, which greatly improves the construction efficiency, optimizes the pavement structure, and is more suitable for the stress of semi-flexible pavement structure. Based on the research results of the integrated design of materials, equipment and pavement structure, the research team carried out test road applications at the heavy-duty traffic

level crossing of the Zouwei Road Reconstruction and Extension Project. All road performance indicators such as skid resistance and water seepage meet the design requirements, and the service effect is very satisfactory. It not only saves the amount of non-renewable resources such as asphalt, but also reduces the maintenance cost of the whole life cycle, effectively reducing the destructive effect of repeated construction on the environment, and is semi-flexible. The pavement is an ideal environment-friendly and durable pavement structure.

## Keywords

Base Asphalt Mixture of Pouring Semi Flexible Pavement, Road Performance, Service Effect, Environmentally Friendly and 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

灌注式半柔性抗车辙路面结构是在柔性的大空隙基体沥青混合料(连通空隙率在 20%~30%之间)中灌注刚性较强的水泥基胶凝材料, 凝结硬化之后形成刚柔并济的复合路面, 不仅具有沥青混凝土路面的行车舒适性, 同时又具备水泥混凝土路面的强度稳定性, 特别适用于重载渠化交通对抗车辙性能要求较高的路段[1] [2]。半柔性路面还具有优良的耐火、耐有机溶剂侵蚀的性能, 兼具较好的视觉效果, 因此半柔性路面多用于国省干线重载路段、交叉路口、公交站台、BRT 专用车道、收费站、机场、港口码头、隧道路面铺装等车辙严重区域。

山东省邹平市邹魏路拓宽改建工程起点位于邹魏路与黄山五路交叉口, 终点位于魏桥镇与孙章路交叉口, 由于该路段重载车辆较多、行车速度较慢, 在十字路口等路段出现严重车辙等病害, 影响通行安全, 为实现该路段较好的养护修复效果, 中化学交通建设集团有限公司半柔性路面课题组通过对灌浆材料、灌浆设备与路面结构一体化研究, 提出了“城市道路新型抗车辙刚柔复合路面”, 通过半柔性试验路的成功实施形成了成熟的工程施工工法, 通过 1 年多的通车试运营, 路面结构表现良好, 半柔性路面结构应用于重载渠化交通表现出了非常出色的服役能力, 彻底根治了路面车辙病害, 大大降低了重复建设对环境的破坏作用, 是一种优良的环保耐久型路面结构。

## 2. 大孔隙沥青混合料配合比设计

### 2.1. 集料与填料

大孔隙基体沥青混合料连通孔隙率较大, 粗集料宜采用质地坚硬的单级配集料, 粗集料采用济南市章丘碎石场产 10~20 mm 玄武岩与 5~10 mm 玄武岩, 细集料选用 0~3 mm 玄武岩机制砂。填料矿粉选用普通石灰岩磨细矿粉。粗集料试验结果见表 1, 细集料试验结果见表 2, 矿粉试验结果见表 3。

Table 1. Physical and technical index of coarse aggregate

表 1. 粗集料物理技术指标

物理技术指标	单位	技术要求	检验结果		标准方法
			10~20 mm	5~10 mm	
表观密度	g/cm <sup>3</sup>	≥2.6	2.908	2.901	T0304-2000

## Continued

吸水率	%	≤2.0	0.55	0.62	T0304-2000
针片状含量	%	≤15	8.4	10.1	T0312-2001
压碎值	%	≤25	8.8	-	T0316-2002
洛杉矶磨耗值	%	≤30	9.4	-	T0317-2003
与沥青粘附性	级	≥4	4	-	T0616-2000

Table 2. Physical and technical index of fine aggregate

表 2. 细集料物理技术指标

物理技术指标	单位	技术要求	检验结果	标准方法
表观密度	g/cm <sup>3</sup>	≥2.6	2.722	T0328-2000
吸水率	%	≤2.0	0.87	T0328-2000
砂当量	%	≥60	65	T0334-2000
坚固性	%	≤30	2.1	T0340-2000

Table 3. Technical index of mineral powder

表 3. 矿粉技术指标

物理技术指标	单位	技术要求	检验结果	标准方法	
视密度	g/cm <sup>3</sup>	≥2.5	2.626	T0352-2000	
含水量	%	≤1.0	0	T0103-2000	
外观	-	无团粒结块	无团粒结块	-	
粒径范围	<0.6 mm	%	100	100	
	<0.15 mm	%	90~100	93.1	T0351-2000
	<0.075 mm	%	75~100	89.8	

## 2.2. 沥青

大孔隙基体沥青混合料级配粗集料占比很大细集料较少，相应沥青含量较低，要求沥青胶结料粘度较大能够提供足够的粘结力，沥青与矿粉、细集料组成胶浆用于填充粗集料骨架空隙，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[3]。试验路采用适用于山东气候区的 SBS I-D 改性沥青，参照《公路工程沥青及沥青混合料试验规程》(JTGE20-2000)中的有关方法进行检验，该沥青各项指标符合要求。结果见表 4。

Table 4. Technical index of SBS modified asphalt

表 4. SBS 改性沥青技术指标

检测项目	技术要求	试验结果	试验方法
针入度(25℃, 5 s, 100 g)/0.1mm	60~80	71	T0604
延度(5cm/min, 5℃, cm)	≥20	35	T0605
软化点(℃)	≥55	75	T0606
运动粘度(135℃, Pa·s)	≤3	1.831	T0625

## Continued

闪点(°C)	≥230	338	T0611
溶解度(%)	≥99	99.86	T0607
25°C弹性恢复	≥65	95	T0662
密度(25°C, g/cm <sup>3</sup> )	实测记录	1.020	T0603
质量损失(%)	≤±1.0	-0.21	T0610
旋转薄膜老化试验 (163°C, 85 min)	针入度比(25°C, %)	≥60	T0604
	延度(5°C, cm)	≥20	T0605

## 2.3. 矿料级配设计

大孔隙基体沥青混合料连通孔隙率在 25%左右才能满足灌注要求, 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均匀且连通孔隙率较大的混合料[4]。不同的级配比例能够形成不同孔隙结构的混合料, 根据中国工程建设标准化协会《道路灌注式半柔性路面技术规程》推荐的级配范围和课题研究结果, 课题组依据原材料的筛分结果调试了 3 组级配, 根据孔隙率试验结果确定最佳级配曲线。原材料比例组成见表 5, 混合料合成级配见表 6, 基体沥青混合料级配曲线如图 1 所示。

Table 5. Material composition of mixture (%)

表 5. 原材料比例组成(%)

级配类型	10~20 mm 玄武岩	5~10 mm 玄武岩	0~3 mm 机制砂	矿粉
粗级配	83	8	7	2
中级配	79	8	11	2
细级配	75	8	15	2

Table 6. Composite gradation of mixture

表 6. 混合料合成级配

筛孔/mm	粗级配	中级配	细级配	设计级配范围
26.5	100.0	100.0	100.0	100
19	94.1	95.2	95.5	90~100
16	75.2	76.4	77.3	60~90
13.2	49.7	52.1	54.2	30~60
9.5	21.1	25.6	28.4	20~30
4.75	9.2	13.1	16.5	7~24
2.36	8.1	10.3	13.5	5~20
1.18	6.6	9.3	10.5	5~15
0.6	5.7	7.5	8.8	4~15
0.3	5.0	6.1	7.2	3~12
0.15	4.1	4.5	5.4	3~8
0.075	2.5	3.0	3.4	1~6

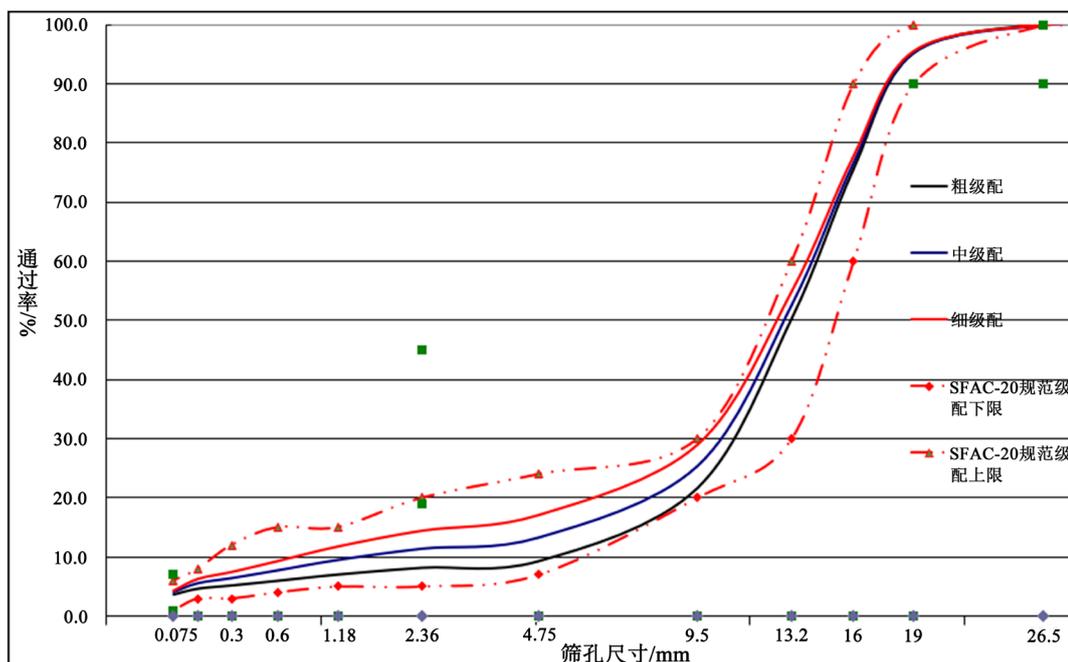


Figure 1. Grading curve

图 1. 级配曲线

合成的 3 条级配曲线呈明显的“S”状，9.5 mm 筛孔通过较常规沥青混合料明显偏少，粗集料占比很大，很好地形成了骨架结构，具有这种级配曲线的沥青混合料具有更好的嵌挤能力，保证基体沥青混合料具有足够的连通孔隙率。

#### 2.4. 最佳沥青用量设计

大孔隙基体沥青混合料不适用传统的马歇尔试验方法确定其沥青用量，课题组根据研究成果采用平衡沥青用量方法进行混合料设计，总体设计原则为：不仅考虑因沥青用量过大，导致自由沥青过多，从而在施工中沥青滴落阻塞孔隙影响灌浆料的灌入，还要考虑因沥青用量不足，结构沥青膜厚度不够而引起基体沥青混合料强度不足，由此采用谢伦堡沥青析漏试验(即流淌试验)和肯塔堡飞散试验相结合的方法，同时力学指标需要满足马歇尔稳定度要求，综合考虑来确定最佳沥青用量。

课题组按照单面击实 75 次分别成型马歇尔试件，参照《公路工程沥青与沥青混合料试验规程》(JTJG20-2011)分别进行谢伦堡沥青析漏试验和肯塔堡飞散试验，绘制谢伦堡析漏量与沥青用量关系曲线及肯塔堡质量损失与沥青用量的关系曲线，由曲线拐点处得到最大(小)沥青用量，在沥青用量范围内参考马歇尔稳定度综合确定符合要求的最佳沥青用量。最佳沥青用量试验结果见表 7。

Table 7. Optimum asphalt content

表 7. 最佳沥青含量

级配类型	析漏实验结果/%	飞散试验结果/%	稳定度/KN	孔隙率/%	最佳沥青含量/%
粗级配	0.34	22.1	2.88	29.3	3.3
中级配	0.35	18.3	4.25	25.1	3.5
细级配	0.34	16.5	5.31	20.2	3.7
规范设计	≤0.4	≤20	≥3	20%~30%	实测

从试验结果分析,粗集料数量占比越大,联通空隙率越大,最佳沥青含量越小,由此沥青胶浆提供的粘结性降低导致混合料整体稳定性变差。考虑基体沥青混合料良好的灌注效果与级配嵌挤情况,最终确定采用中级配骨架结构。

### 3. 水泥基灌浆料性能评价

课题组自主研发的水泥基灌浆材料,水胶比为 0.35 时流动度满足设计要求灌注率能够达到 95% 以上,灌浆料体系均匀且不发生沉淀等离析现象,经过多次重复实验验证小时强度指标与干缩指标都能满足设计要求,灌浆料各项性能指标均达到优良水平。灌浆料试验结果见表 8。

**Table 8.** Grouting test results

**表 8.** 灌浆料试验结果

试验项目	单位	技术要求	检测结果
流动度(涂-4 粘度计)	s	13~18	14.5
水胶比	-	0.30~0.35	0.35
抗折强度(3 h)	MPa	≥2.0	2.5
抗压强度(3 h)	MPa	≥10.0	13.2
抗折强度(28 d)	MPa	≥4.0	5.9
抗压强度(28 d)	MPa	≥20.0	25.3
干缩率(3 d)	%	≤2.0	0.3

## 4. 实施方案

### 4.1. 路面结构结合

半柔性路面试验段在邹魏路重载交通较大的红路灯平交路口处,路面结构为 18 cm 水泥稳定碎石 + 5 cm AC20 + 9 cm 半柔性路面结构,5 cm 中粒式沥青混合料 AC20 作为应力吸收层,能够延缓半柔性路面结构由于水稳结构层开裂导致的反射裂缝。

### 4.2. 施工工艺流程

灌注式半柔性路面是将满足一定性能要求的水泥胶浆灌入大空隙基体沥青混合料中而形成的路面,是一种刚柔并济的新型路面结构形式。由于高性能灌注式半柔性路面的设计要求和设计方法与一般沥青路面相比有所不同,其中涉及到水泥胶浆的灌注这一工序,因此半柔性路面的施工方法也与一般沥青路面的施工方法有所不同。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,基体沥青混合料封边,灌浆料的制备,灌浆料的灌注,灌注后半柔性路面的表面处理及养护[5][6]。

### 4.3. 基体沥青混合料摊铺碾压

大孔隙基体沥青混合料摊铺必须采用沥青混合料专用摊铺机,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。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,熨平板的震动频率开到量程的 50%~60%,夯锤的频率开至量程的 50% 左右。沥青混合料摊铺温度控制在 160℃~165℃,沥青路面的松铺系数应根据试铺段确定,一般为 1.05~1.10,摊铺过程中应随时检查摊铺层厚度及路拱、横坡,达不到要求时,立刻进行调整。

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。摊铺机推

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℃~135℃,严格禁止过高度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℃ 左右时要进行整平碾压,以消除轮迹。

#### 4.4. 基体沥青混合料封边

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。道路封边可以采用木条和泡沫胶的组合,以保证道路边部的封浆效果。

#### 4.5. 灌浆料制备

综合灌浆材料的性能特点及工程施工的方便性,浆体的制备一般是现场进行,灌浆材料和水通过课题组自主研发的专用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。制浆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装置,搅拌机中浆体制备完成以后放入专用的浆体储备桶中备用,浆体放完以后即可进行下一次的浆体搅拌。

#### 4.6. 灌浆料灌注

搅拌机中的浆体放入储备桶中以后,在 10 min 以内尽快进行灌注,避免随着时间增长,浆体变稠,流动度变小,影响浆体的渗透效果。浆体灌注时,待浆液漫出沥青混合料表面,保证浆体不继续下渗,全部灌满为止,以灌满之后的表面不出现气泡为判断标准。

#### 4.7. 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。

### 5. 试验路评价

试验路段 2020 年 7 月份施工完成,2021 年 7 月份通车试运营 1 年之后进行检测评定,取芯检测芯样灌注率 95% 以上灌注饱满,路面未发现车辙轮迹带,渗水指标为 0,路面不渗水,构造深度与摆氏摩擦指标满足《沥青路面施工技术规范》要求,试验路实施达到了非常理想的效果。混合料检测及现场检测结果见表 9。

**Table 9.** Test evaluation results  
**表 9.** 试验评定结果

试验项目	单位	技术要求	检测结果
灌浆饱满度	%	≥95	98
稳定度	kN	≥15	29
动稳定度	次/mm	≥20,000	35,000
残留稳定度	%	≥90	97
冻融劈裂强度比	%	≥80	98
低温弯曲试验,破坏应变 ε <sub>B</sub> (-10℃)	με	≥1800	2011
构造深度 TD	mm	≥0.5	0.65

## 6. 结论

1) 课题组通过室内模拟现场碾压工艺确定了基体沥青混合料击实试验方法, 单面击实 75 次成型马歇尔试件, 混合料各项体积与性能指标都达到良好的设计要求, 优化了规范指标要求。

2) 自主研发的水泥基灌浆料灌注效果良好, 施工完毕 3 小时强度即可满足通车条件。课题组研发的流动度测试方法涂-4 粘度计法, 能够更准确地测量混合料流动性。

3) 课题组自主研发的制浆设备应用效果良好, 能够连续制浆保证施工的连续性, 大大提高了施工进度。试验路施工工艺控制良好, 为进一步大规模应用半柔性路面结构创造了有利条件。

## 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: 1-102.
- [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: 67.
- [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: 82.
- [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.