

# 高性能刚柔复合钢渣路面材料性能研究

文 / 蔡 鹏 上海公路桥梁（集团）有限公司

**摘要：**高温变形、低温开裂等问题一直是沥青混合料路面难以解决的问题。通过引入5mm~10mm钢渣粗集料，基于大空隙级配结构，采用灌注浆料方式，研究“灌浆料+钢渣制沥青混合料”组合的刚柔复合路面材料的动稳定度、抗车辙、低温水损害、抗滑等性能，发现相比常规沥青混合料，该复合材料的各项性能指标明显改善，高温稳定性改善幅度尤为显著。该类材料的研究与开发不仅为解决沥青混合料路面长期面临的问题提供了一种选择，而且也作为钢渣这类固体废弃物提供了大规模消纳途径。

**关键词：**钢渣；刚柔复合；沥青混合料；灌浆料；高温稳定性；低温开裂

【DOI】10.12254/j.issn.2096-6539.2025.13.011

## 引言

作为矿石被冶炼成钢铁之后的最终残留物—钢渣，其并不是“废弃物”，而经一定的处理后可转化成一种再生资源。以道路工程为例，用其替代天然集料作为沥青混合料的粗骨料，其对应沥青混合料的高温力学性能、低温抗裂性能、抗水损害性能等均得到较大程度的改善<sup>[1-5]</sup>，尤其对高温稳定性改善效果显著。若借助钢渣改善沥青混凝土路面高温稳定性的特性，将其与沥青混合料以更加高效的组合方式结合应用，将有助于改善目前全世界普遍面临的高温条件下的沥青混合料路面、沥青路面路口容易出现的车辙、推移、拥包等病害。

因此，为了一方面资源化再利用钢渣，起到降碳减排作用，另一方面改善沥青混合料高温性能，提升沥青

路面路口强度和抗变形能力。课题组基于钢渣制备的沥青混合料，以灌注的方式，探索与研究了“灌浆料+钢渣制沥青混合料”的刚柔复合路面材料。课题组首先通过测定浆料的流动度、抗折强度、抗压强度，收缩性能等性能指标，综合确定灌浆料的最佳材料配比，并验证了灌注效果及混合料性能高温稳定性、低温抗裂性、疲劳特性、水稳性和耐油腐蚀性性能等评定，最终确定刚柔复合路面材料的路用性能。

## 一、原材料

### （一）灌浆料制备及性能试验

理想的灌浆料应具备合适的流动度和凝结时间，并保持较小的干缩率和泌水率。灌浆料固化的强度应符合应用要求。课题组进行了两组灌浆料性能试验，结果如表1所列。

表1 灌浆料性能试验结果

组别	流动度/s	泌水率/%	抗折强度/MPa	抗压强度/MPa	收缩率/%
第一组	12.81	2.4	6.5	24.8	0.179
第二组	12.33	1.9	6.78	25.9	0.160
均值	12.57	2.15	6.64	25.35	0.17

### （二）沥青结合料及性能试验

由于半柔性路面材料要求有空隙率较大的基体沥青混合料，因而为了避免沥青流动性过大造成的基体混合

料结构不稳定等因素，试验用沥青粘结料采用国产的70#基质沥青，以《公路工程沥青及沥青混合料试验规程》（JTGE20-2011）为标准进行检测，测试结果如表2所列。

表2 沥青粘结料的技术要求

指标	单位	技术要求	检测结果	试验方法
针入度(25℃)	0.1mm	60~80	72	T 0604
针入度指数PI	—	-1.5~1.0	-0.18	
延度(15℃)	cm	≥100	>100	T 0605
软化点	℃	≥46	49	T 0606
闪点	℃	≥260	288	T 0611
动力粘度(60℃)	Pa·s	≥180	211	T 0620
蜡含量	%	≤2.2	1.8	T 0615
密度	g/cm <sup>3</sup>	实测	1.031	T 0603
TFOT 残留物(165℃)				
质量损失	%	±0.8	-0.23	T 0610/T0609
针入度比	%	≥61	74	
延度(10℃)	cm	≥6	23.2	T 0605

### （三）集料及指标

试验中采用玄武岩为集料，细集料为石灰岩石屑，

集料的各项性能指标均应符合相关规范要求。试验采用的钢渣集料尺寸为5mm~10mm，按照《公路工程集料试

验规程》(JTG3432—2024)进行试验,其压碎值、抗磨性等技术指标均满足要求,如表3所示。

表3 5mm~10mm 钢渣技术指标

指标	单位	技术要求	检测结果	试验方法
磨光值(PSV)		≥ 42	57	T9321
压碎值	%	≤ 30	16.1	T 0350
磨蚀性数值(CAI)			0.3852	T T0363

注:在CAI分级标准中,钢渣的磨蚀性属于极低或无磨蚀性等级。

## 二、刚柔复合路面材料制备

### (一) 马歇尔试件

#### 1. 基体混合料试件制备

结合现有规范要求以及实际应用经验,分别制备空隙率为25%、26%、27%和28%的马歇尔试件。

#### 2. 马歇尔试件灌注

将拌制的灌注浆料缓慢均匀地灌注至马歇尔试件,灌注过程不断从顶部振实,在表面未凝结前,清除表面浮浆。马歇尔时间灌注初始状态如图1所示。



a 灌浆初始 b 干燥养护一段时间后

图1 半柔性马歇尔试件灌注状态

### (二) 车辙试验

#### 1. 试件制备

结合现有规范要求以及实际应用经验,制备6块空隙率为27%左右的车辙试验试件,并采取喷洒缓凝剂和直接刷除两种措施对制备的车辙试验试件进行灌注表面处理。

#### 2. 车辙试验试件灌浆

将拌制的灌注浆料缓慢均匀地灌注至马歇尔试件,灌注过程不断从顶部振实,在表面未凝结前,清除表面浮浆,如图2所示。



a 灌浆初始 b 干燥养护一段时间后

图2 车辙试验试件灌注状态

### (三) 试件养生

#### 1. 马歇尔灌浆试件

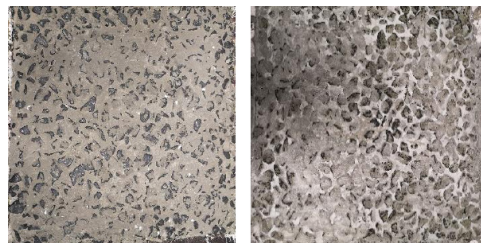
将灌注后的马歇尔试件室温下覆盖养生固化,其固化后的状态如图3所示。



图3 马歇尔灌浆试件固化后状态

#### 2. 车辙试验灌浆试件

将表面清理后的已灌注的车辙板试件在室温下覆盖养生固化。两种表面处理措施效果如图4所示。



a 喷洒缓凝剂 b 直接刷除

图4 车辙板灌浆试件固化后状态

## 三、刚柔复合路面材料性能测试

依据中国工程建设协会标准《道路灌注式半柔性路面技术规程》(T/CECSG:D51-01-2019),固化后的刚柔复合路面的技术要求表4所示。

表4 灌注式半柔性路面材料技术要求

技术指标	单位	技术要求	试验方法
灌注率	%	≥ 85	附录D
马歇尔稳定度	kN	≥ 15	T 0709
残留稳定度	%	≥ 90	T 0709
冻融劈裂残留强度比	%	≥ 80	T 0729
动稳定度(70℃, 1.1MPa)	次/mm	≥ 4000	T 0719

### (一) 马歇尔灌浆试件试验结果

#### 1. 马歇尔稳定度测试结果

试件在60℃水浴中浸水40min后,进行马歇尔稳定度测试。据试验结果,得知灌注浆料后试件的马歇尔稳

定均得到很大的提升,均满足规范要求值( $\geq 15\text{kN}$ )。空隙率为26%、27%和28%的试件的马歇尔稳定度均达到20kN以上,空隙率为25%的试件马歇尔稳定度稍低。说明较大的空隙率有利于灌浆料的灌入和强度的提升。

### 2. 马歇尔试件灌注率计算

将马歇尔稳定度测试后的试件切开后,观测内部的灌注状态,发现马歇尔试件内部均匀充满了固化后的浆料,灌注密实,如图5所示。

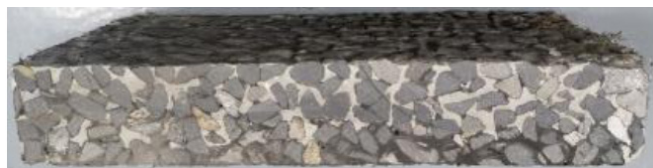


图5 马歇尔灌浆试件侧切图

按中国工程建设协会标准《道路灌注式半柔性路面技术规程》(T/CECSG:D51-01-2019)检测灌注试件的连通空隙率,计算浆料灌注率。计算结果图表4所列。

表4 浆料灌注连通空隙率和灌注率试验结果

组别	体积/cm <sup>3</sup>	空中重/g	水中重/g	连通空隙率/%	灌注前连通空隙率/%	灌注后连通空隙率/%	灌注率/%
试件一	505.44	1160	674.3	3.6	26.03	3.6	86.2
试件二	515.57	1222	720.5	2.4	25.62	2.4	90.6

据表4可知,马歇尔试件灌注效果良好,浆料填充了原基体材料的大部分连通空隙率,灌注效果满足规范要求。

### 3. 水稳定性测试结果

将灌注后的马歇尔试件在60℃水浴中浸水48h后,进行马歇尔稳定度测试,测试结果汇总如表5所示。

表5 残留马歇尔稳定度结果

组别	空隙率/%	马歇尔稳定度/kN	流值/mm
试件三	27	22.03	6.77
试件四	27	21.87	6.05
试件五	27	22.00	5.86
均值	27	21.96	6.05

残留马歇尔稳定度 $=21.82/22.58 \times 100\% = 96.6\%$ ,残留马歇尔稳定度计算结果满足规范要求( $\geq 90\%$ )。

### (二) 车辙灌浆试件试验结果

车辙仪试验温度条件调整为70℃,灌注并养生完毕的试件在70℃放置5h后,进行动稳定度测试。在车辙试验过程中,发现刚柔复合混合料试件的车辙深度发展缓慢,试件表面无明显的车辙现象。车辙试验测试的动稳定度结果汇总如表6所示。

表6 车辙试验(70℃)结果

序号	空隙率/%	动稳定度(次/mm)	备注
试件一	27	77960	
试件二	27	75008	
试件三	27	>100000	45min~60min内车辙深度无变化
试件四	27	>100000	

### 结语

基于钢渣开发了刚柔复合路面材料,确定灌浆料的最佳材料配比,并验证了灌注效果及混合料性能高温稳定性、低温抗裂性、疲劳特性、水稳性性能等评定,具体结论如下:

(1) 较大的空隙率有利于灌浆料的灌入和强度的提升

经灌注浆料后,马歇尔试件的稳定度值均得到较大幅度的提升,且满足规范要求值( $\geq 15\text{kN}$ )。空隙率为26%、27%和28%的试件的马歇尔稳定度均达到20kN以上,空隙率为25%的马歇尔试件稳定度稍低。从灌注率和残留马歇尔稳定度结果看,刚柔复合混合料试件均能够满足规范要求。

#### (2) 高温抵抗变形能力显著增强

在70℃车辙试验中,刚柔复合混合料车辙试验试件的动稳定度远超规范要求值,较常规沥青混合料,其高温抗车辙能力显著增强。

#### (3) 低温抗裂性能显著提高

刚柔复合混合料试件的破坏劲度模量较大,平均应变能密度达 $8.87\text{kJ/m}^3$ ,明显高于相同条件下常规AC类、SMA类沥青混合料的应变能密度( $3\text{kJ/m}^3 \sim 5\text{kJ/m}^3$ ),低温抗破坏性能良好。

#### (4) 抗滑性能满足要求

采用铺砂法,测试灌注后车辙试验试件的构造深度,考察试件的抗滑性能,各试件的表面构造都高于0.55mm,在0.6mm~1.0mm之间,深度满足规范要求值,抗滑性能较佳。

### 参考文献

[1] 吴立报,陈红缨,郑晓光,王林,褚善庆,赵玉静,李嵩.钢渣透水沥青路面材料应用研究[J].中国市政工程,2019,(05):4-7+98-99.

[2] 王林.滚筒渣性能分析及其在工业厂区道路中的应用[J].城市道路与防洪,2020(6):39-41.

[3] 陈亚杰,郑晓光.钢渣透水沥青混合料性能及应用研究[J].上海公路,2022,(01):100-104+110+145.

[4] 郑晓光,吴立报,水亮亮.高性能灌注式半柔性路面材料的路用性能[J].建筑材料学报,2023,26(06):638-643+652.

[5] 张斌林.钢渣基固废胶凝材料的组成设计及其在半刚性基层中的应用研究[D].兰州交通大学,2023.