

高密度辉绿岩对沥青混合料综合性能影响研究

杨 勇¹, 全 孝¹, 吴超凡², 陶新华¹, 龚娄京^{3*}, 朱 鑫¹, 姚佳良⁴

¹中铁交通投资集团有限公司, 广西 南宁

²湖南交通职业技术学院路桥工程学院, 湖南 长沙

³长沙理工大学交通运输工程学院, 湖南 长沙

⁴云南交通运输职业学院公路学院, 云南 昆明

收稿日期: 2025年11月11日; 录用日期: 2026年1月16日; 发布日期: 2026年1月29日

摘 要

针对高密度辉绿岩应用争议, 依托炉慈、桑龙高速公路, 开展了高表观密度 3.26 g/cm^3 辉绿岩集料与普通表观密度 2.95 g/cm^3 辉绿岩集料AC-13C沥青混合料路用性能、经济性以及作桥面铺装时对桥梁恒重的影响研究, 分析比较了两种密度辉绿岩岩性。研究表明: 两种密度辉绿岩水煮时间为3 min、6 min、10 min、15 min、30 min时, AH-70#和SBS改性沥青对集料的黏附性差别小, 属于同一个等级; 普通密度辉绿岩沥青混合料浸水残留稳定度比高密度辉绿岩提高了7.5%; 70°C 温度高密度辉绿岩沥青混合料动稳定度比普通密度辉绿岩高17.44%; 4 cm厚AC-13C上面层使用高密度辉绿岩碎石沥青混合料每平米增加成本1.75元、增大桥梁恒载8 kg。结合岩性分析, 工程中宜优先选择中等密度($2.7\sim 2.9\text{ g/cm}^3$)的辉绿岩。

关键词

辉绿岩, 粘附性, 水稳性, 动稳定度, 综合性能

Study on the Influence of High-Density Diabase Aggregate on the Comprehensive Performance of Asphalt Mixture

Yong Yang¹, Xiao Quan¹, Chaofan Wu², Xinhua Tao¹, Loujing Gong^{3*}, Xing Zhu¹, Jialiang Yao⁴

¹China Railway Transportation Investment Group Co., Ltd., Nanning Guangxi

²School of Highway and Bridge Engineering, Hunan Communication Engineering Polytechnic, Hunan Changsha

³School of Transportation, Changsha University of Science & Technology, Changsha Hunan

⁴School of Highway Engineering, Yunnan Vocational College of Transportation, Kunming Yunnan

*通讯作者。

文章引用: 杨勇, 全孝, 吴超凡, 陶新华, 龚娄京, 朱鑫, 姚佳良. 高密度辉绿岩对沥青混合料综合性能影响研究[J]. 交通技术, 2026, 15(1): 136-148. DOI: 10.12677/ojtt.2026.151013

Received: November 11, 2025; accepted: January 16, 2026; published: January 29, 2026

Abstract

Regarding the application disputes of high-density diabase, relying on the Lunci and Sanglong Expressways, a study was carried out. The study was conducted on the road performance, economic efficiency, and the impact on bridge dead load when used as bridge deck pavement of AC-13C asphalt mixtures with high apparent density (3.2 g/cm^3) diabase aggregate and normal apparent density (2.95 g/cm^3) diabase aggregate. The lithological properties of the two density types of diabase were also analyzed and compared. The research shows that when the boiling time of the two types of diabase aggregates is 3 min, 6 min, 10 min, 15 min, and 30 min, the adhesion of AH-70# and SBS-modified asphalt to the aggregates shows little difference and falls within the same grade. The immersion residual stability of the normal-density diabase asphalt mixture is 7.5% higher than that of the high-density diabase mixture. At 70°C , the dynamic stability of the high-density diabase asphalt mixture is 17.44% higher than that of the normal-density diabase mixture. Using a 4 cm thick AC-13C surface layer with high-density diabase aggregate increases the cost by 1.75 yuan per square meter and adds 8 kg to the bridge dead load. Combined with lithological analysis, diabase with medium density ($2.7\sim 2.9 \text{ g/cm}^3$) should be preferentially selected in engineering.

Keywords

Diabase, Adhesion, Water Stability, Dynamic Stability, Comprehensive Performance

Copyright © 2026 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

辉绿岩集料是一种沥青混合料优质集料,常用于高等级沥青路面上面层,工程中采用的辉绿岩集料密度普遍在 $2.8\sim 3.0 \text{ g/cm}^3$ 左右,沥青路面使用表观密度为 3.2 g/cm^3 以上的辉绿岩集料较少应用[1]-[5]。相关沥青路面施工技术规范和一些地方施工指南都只规定了路面使用碎石最低密度要求,没有最高密度的限制,如我国沥青路面施工技术规范[6]和湖南省、浙江省等有关高速公路施工指南对高速公路表面层粗集料表观密度要求仅规定了下限不低于 2.60 g/cm^3 ,没有规定上限。实际工程中关于集料密度对沥青混合料性能的影响存在争议,普遍认为密度越高越好,因为密度高,强度高,抗磨耗性能好。关于不同密度集料对沥青混合料综合性能的影响已有文献大都是定性分析[7]-[11],本文依托工程:炉慈、桑龙高速公路设计文件也仅规定了粗集料表观密度不低于 2.60 g/cm^3 ,但项目实施中,本文作者和项目相关技术人员发现:沥青路面采用高密度集料增加了工程成本、增大了桥面铺装时桥梁的恒载、增大了拌和与摊铺时设备的磨耗。目前对于高密度辉绿岩集料对沥青混合料综合性能的影响尚未见文献报道,已有文献关于高密度集料对沥青混合料性能影响也都是正面的,且定性分析居多。因此,本文作者结合炉慈、桑龙高速公路工程应用,对于上述诸多质疑,在定性分析的基础上,开展两种密度(普通密度与高密度)辉绿岩集料的沥青混合料路用综合性能比较研究,包括两种辉绿岩岩性差异分析、混合料路用性能试验研究、两种集料的成本差异比较、作为桥面铺装上面层使用的集料时桥梁恒载的差异计算等,为依托工程选择碎石原材料,提供工程控制试验与理论依据。本文通过依托工程进行试验、沥青膜厚度计算、桥梁恒载

计算、成本分析，在依托工程特定路面结构与沥青路面上面层特定级配前提下，获得的相关规律不仅服务依托工程，也可为同类工程提供原材料选择依据，同时可供相关规范建立标准时参考。

本文所述炉慈、桑龙高速公路的路面结构、桥梁铺装层结构见表 1。

Table 1. Pavement and bridge deck structures of the Luci and Sanglong expressways
表 1. 炉慈、桑龙高速公路路面、桥面结构

序号	沥青路面结构	桥面铺装层结构
1	4 cm AC-13	4 cm AC-13
2	6 cm AC-20C	6 cm AC-20C
3	8 cm AC-25C	1 cm SBS 改性沥青防水粘层
4	1 cm SBS 改性沥青同步碎石封层	SBS 改性沥青粘层
5	36 cm 5%水泥稳定级配碎石基层	
6	20 cm 4%水泥稳定级配碎石底基层	桥梁结构层
7	20 cm 级配碎石垫层	

2. 高密度辉绿岩与普通辉绿岩的岩性组成、矿物结晶特征差异及其影响分析

关于高密度辉绿岩与普通辉绿岩的岩性组成、矿物结晶特征、形成条件等方面差异及其影响分析，国内外已经进行了大量研究，依据文献[12]-[15]等，具体对比如下。

2.1. 岩性与矿物组成

普通辉绿岩主要矿物：基性斜长石(通常为拉长石或倍长石)和单斜辉石(如普通辉石或透辉石)，含少量橄榄石、磁铁矿、钛铁矿等。结构：典型辉绿结构(交织结构)，即自形半自形长石晶体包裹他形辉石颗粒，形成网状填充。高密度辉绿岩：辉石含量显著增加(可能超过 50%)，且常见高密度矿物(如钛铁矿、磁铁矿、铬铁矿)富集，甚至含少量硫化物(如黄铜矿、镍黄铁矿)，矿物组成更致密。某些高密度辉绿岩为斜长石类型，更富钙(如钙长石)，反映更高压力或更基性的岩浆源。高密度矿物孔隙率更低，表面光滑，可能降低沥青的机械嵌固作用。但辉石含量高(碱性矿物)有利于沥青粘附。

2.2. 晶粒特征

普通辉绿岩粒度：中细粒(0.52 mm)，结晶程度受冷却速率控制。辉绿结构：长石微晶呈板条状，辉石填充间隙，晶粒边界较清晰。高密度辉绿岩：粒度更细或更粗：可能因快速冷却(如浅成侵入)或高压慢速结晶(深成环境)导致：快速冷却时呈隐晶质或微晶(<0.5 mm)；高压环境下可能发育粗粒(>3 mm)辉石斑晶。高密度辉绿岩结构变异：可能出现嵌晶结构(辉石包裹长石)，或局部堆积结构(高密度矿物集中)。高密度辉绿岩如为粗大晶体导致集料破碎后界面平整，机械嵌锁作用弱，但碱性矿物(斜长石)暴露充分，与沥青酸性组分反应性强。且不易风化，长期粘附性稳定。

2.3. 形成条件

普通辉绿岩成因：基性岩浆浅成侵入(如岩墙、岩床)，冷却速率中等。

高密度辉绿岩：高压高温环境：可能形成于下地壳或地幔过渡带(高压导致矿物密度增加)，或与富铁镁岩浆强烈分异有关。高密度辉绿岩由于深成缓慢冷却形成粗晶结构，斜长石、辉石结晶完整，界面清晰，低孔隙率(<1%)，表面致密光滑。但形成碱性矿物(如钙长石)暴露充分，化学粘附性强。

基于上述分析，工程中选择辉绿岩集料时宜进行岩相筛选：优先选择中等密度(2.7~2.9 g/cm³)的辉绿岩，兼顾化学与机械粘附。同时，进行有关工程试验评估水损害敏感性。

3. 沥青路面上面层原材料选择与技术性质

文章依托工程沥青路面上面层为 AC-13C 沥青混合料，试验时依照有关标准[13]进行，本文表 2~5 的技术要求来自于《公路沥青路面施工技术规范》[6]，原材料选择与技术性质如下。

3.1. 沥青技术性质

本项目上面层要求使用 SBS 改性沥青(I -D)，技术性质如表 2。

Table 2. Technical properties of SBS modified asphalt
表 2. SBS 改性沥青技术性质

序号	试验项目	单位	试验结果	技术要求
1	25℃针入度	0.1 mm	49	30~55
2	针入度指数 PI	/	+0.06	≥0
3	5℃延度	cm	31	≥25
4	软化点	℃	85.5	≥75
5	135℃运动粘度	Pa.s	1.9	≤3
6	闪点	℃	296	≥230
7	溶解度(三氯乙烯)	%	99.42	≥99
8	弹性恢复	%	95	≥85
9	贮存稳定性离析	℃	0.4	≤2.5
10	25℃相对密度	/	1.040	实测
11	TFOT 试验后	质量变化	+0.026	-1.0~+1.0
12		针入度比	81.6	≥65
13		5℃延度	19	≥15

3.2. 集料技术性质

本文沥青混合料粗集料全部采用辉绿岩，细集料使用石门某水泥厂生产的灰岩机制砂。分析研究采用的高密度辉绿岩集料：表观密度为 3.2 6g/cm³，湖北襄阳生产，普通密度集料：表观密度为 2.95 g/cm³，广西田东生产。

3.2.1. 粗细集料材质试验结果

粗集料技术性质试验结果见表 3。细集料(机制砂)技术性质见表 4。

Table 3. Test results of technical properties of coarse aggregates
表 3. 粗集料技术性质试验结果

指标	单位	普通密度料	高密度集料	技术要求
压碎值	常温	10	9	≤22
	高温(190℃)	12	10	≤24
洛杉矶磨耗损失	%	9.8	10.3	≤24

续表

磨光值	/	43	44	≥42
软弱颗粒含量	%	0.4	0.5	≤1
杂岩含量	%	0.8	0.9	≤1
粗集料对 SBS 改性沥青的粘附性	级	5	5	5
表观相对密度	9.5 mm~13.2 mm	2.952	3.252	≥2.60
	4.75 mm~9.5 mm	2.953	3.258	
	2.36 mm~4.75 mm	2.909	3.257	
毛体积相对密度	9.5 mm~13.2 mm	2.909	3.224	-
	4.75 mm~9.5 mm	2.902	3.212	
	2.36 mm~4.75 mm	2.902	3.212	
吸水率	9.5 mm~13.2 mm	0.51	0.28	≤2.0
	4.75 mm~9.5 mm	0.60	0.44	
	2.36 mm~4.75 mm	0.59	0.44	
针片状颗粒含量	9.5 mm~13.2 mm	8.2	7.5	≤10
	4.75 mm~9.5 mm	11.2	9.1	≤15
坚固性	%	0.8	0.6	≤12

Table 4. Test results of technical properties of fine aggregates

表 4. 细集料技术性质试验结果

指标	单位	试验结果	技术要求
砂当量	%	67	≥65
亚甲蓝值	g/kg	1.0	≤2.5
棱角性(流动时间)	S	38	≥30
表观相对密度	/	2.722	≥2.6
毛体积相对密度	/	2.676	

3.2.2. 填料技术性质

填料技术性质见表 5，基于 AC-13C 为上面层混合料，为了确保粘附性能符合要求，在混合料配合比设计时使用了 2% 的水泥代替填料，由于水泥量比较小，不会影响混合料其它性能。选择的水泥为 32.5 级普通硅酸盐合格水泥。

Table 5. Test results of technical properties of fillers

表 5. 填料质量试验结果

项目	单位	试验结果	技术要求
表观相对密度	/	2.738	≥2.6
含水量	%	0.5	≤1
塑性指数	%	3.6	<4
亲水系数	/	0.6	<1
外观	/	无团粒结块	无团粒结块

4. AC-13C 型沥青混合料配合比设计与有效沥青膜厚度

4.1. 高密度辉绿岩 AC-13C 型沥青混合料合成级配设计

高密度辉绿岩筛分结果、矿料比例与合成级配如表 6，表中 1#、2#、3#、4#集料对应粒径为 9.5 mm~13.2 mm、4.75 mm~9.5 mm、2.36 mm~4.75 mm 和 0~2.26 mm，合成级配线见图 1。

Table 6. Proportion of high-density aggregates in the mixture and combined gradation
表 6. 高密度集料在混合料中的比例及合成级配

组成材料与比例(%)	通过下列方孔筛(mm)的质量百分率(%)									
-	16	13.2	9.5	4.75	2.36	1.18	0.6	0.3	0.15	0.075
1#料 44	100	82.4	20.1	0.7	0.7	0.7	0.7	0.7	0.7	0.3
1#料 24	100	100	99.7	19.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.3
1#料 2	100	100	100	95.5	1.0	0.4	0.4	0.4	0.4	0.4
1#料 26	100	100	100	100	88.2	58.9	37.3	19.1	11.1	7.5
水泥 2	100	100	100	100	100	100	100	100	100	99.2
矿粉 2	100	100	100	100	100	100	100	100	100	99.8
合成级配	100	92.3	64.8	36.9	27.4	19.8	14.1	9.4	7.3	6.1
级配范围	100	90~100	60~74	30~42	23~33	16~26	12~20	9~16	6~12	4~8

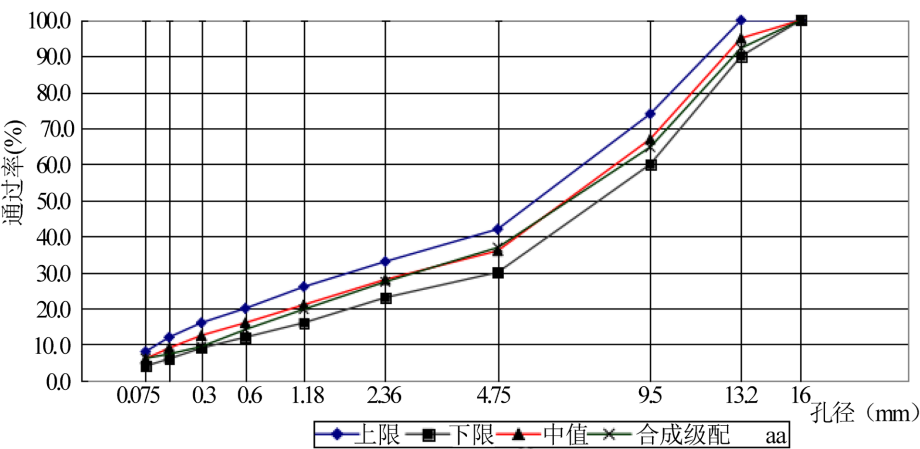


Figure 1. Gradation curve of diabase AC-13C mixture aggregate
图 1. 辉绿岩 AC-13C 混合料矿料合成级配曲线图

4.2. 普通密度辉绿岩 AC-13C 型沥青混合料合成级配设计

普通密度辉绿岩筛分结果、矿料比例与合成级配如表 7，普通密度辉绿岩集料合成级配与高密度集料合成级配要求相同(依托工程设计要求)，本文进行性能试验比较时也尽可能使两种集料实际合成级配相同，但两种密度集料由于加工设备和母岩差异，导致不同粒径筛分结果不同，实际合成级配不完全相同，但实际合成级配都在设计范围内，且接近中值。两种集料拌合楼热料仓实际合成级配与室内马歇尔试验矿料合成级配差异较小(水洗法筛分结果)，尤其关键筛孔两种密度集料合成结果差异很小。表中 1#、2#、3#、4#集料对应粒径为 9.5 mm~13.2 mm、4.75 mm~9.5 mm、2.36 mm~4.75 mm 和 0~2.26 mm (同高密度碎石沥青混合料)。

Table 7. Proportion and combined gradation of normal density aggregates in the mixture
表 7. 普通密度集料在混合料中的比例及合成级配

组成材料与比例(%)	通过下列方孔筛(mm)的质量百分率(%)									
-	16	13.2	9.5	4.75	2.36	1.18	0.6	0.3	0.15	0.075
1#料 38	100	90.2	1.2	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2	0.1
1#料 26	100	100	97.2	0.8	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2	0.1
1#料 4	100	100	100	98.0	0.9	0.4	0.4	0.4	0.4	0.4
1#料 28	100	100	100	100	88.2	58.9	37.3	19.1	11.1	7.5
水泥 2	100	100	100	100	100	100	100	100	100	99.2
矿粉 2	100	100	100	100	100	100	100	100	100	99.8
合成级配	100	96.3	61.7	36.2	28.9	20.6	14.6	9.5	7.3	6.2
级配范围	100	90~100	60~74	30~42	23~33	16~26	12~20	9~16	6~12	4~8

4.3. 混合料最佳油石比

Table 8. Marshall test results of high-density diabase crushed stone asphalt mixture
表 8. 高密度辉绿岩碎石沥青混合料马歇尔试验结果

油石比	3.3	3.8	4.3	4.8
理论最大相对密度	2.939	2.890	2.866	2.842
试件毛体积相对密度	2.735	2.745	2.750	2.770
试件空隙率(%)	6.9	5.0	4.2	2.5
矿料间隙率(%)	14.5	13.9	14.3	13.9
沥青饱和度(%)	52.4	63.9	71.0	82.0
稳定度(KN)	13.39	15.23	17.81	17.14
流值(mm)	2.5	3.1	3.9	4.2

Table 9. Marshall test results of normal-density diabase crushed stone asphalt mixture
表 9. 普通密度辉绿岩碎石沥青混合料马歇尔试验结果

油石比	4.0	4.3	4.6	4.9
理论最大相对密度	2.699	2.687	2.675	2.667
试件毛体积相对密度	2.582	2.580	2.582	2.583
试件空隙率(%)	4.3	4.0	3.5	2.9
矿料间隙率(%)	12.9	13.2	13.5	13.4
沥青饱和度(%)	66.6	69.9	74.0	77.3
稳定度(KN)	18.64	17.29	17.67	16.77
流值(mm)	2.9	3.5	3.8	4.2

按《公路工程沥青及沥青混合料试验规程》(JTGE20-2011) [13] [16]进行马歇尔试验, 分别测定两种密度辉绿岩集料的马歇尔试验指标, 本研究试验采用油石比结合了两种密度辉绿岩在实际工程中的应用情况, 两种碎石沥青混合料试验结果见表 8、表 9, 由表 8、表 9 可知两种辉绿岩集料 SBS 改性沥青混合料的沥青用量公共范围分别为高密度辉绿岩 0.54% (OAC min = 3.86%与 OAC max = 4.40%), 普通密度辉

绿岩 0.73% (OAC min = 4.00%与 OAC max = 4.73%)。说明高密度辉绿岩 SBS 改性沥青混合料性能对最佳沥青用量变化相对更敏感，在施工过程中应严格控制其沥青用量。按照试验规程与工程经验，确定高密度辉绿岩混合料最佳油石比为 4.3，普通密度辉绿岩混合料最佳油石比为 4.6，普通集料油石比比高密度集料油石比大 0.3，这个结果与表 3 高密度集料的吸水率平均值为 0.36，普通密度集料的吸水率平均值为 0.56 有直接关系，普通集料密度吸水率高，油石比大。

4.4. 最佳油石比时两种集料的沥青混合料粉胶比和有效沥青膜厚度

检验最佳沥青用量时的粉胶比和有效沥青膜厚度，按照沥青路面施工规范计算，集料的比表面积计算结果见表 10，粉胶比和沥青膜有效厚度计算结果见表 11。

本文高密度辉绿岩与普通密度辉绿岩混合料粉胶比接近，基本在合理的范围 1.0~1.6 内；普通密度辉绿岩混合料沥青膜比高密度沥青混合料沥青膜厚 0.32 μm，普通密度辉绿岩混合料沥青膜厚一些与其油石比大一些有关，本文试验时高密度辉绿岩混合料如果采用普通密度辉绿岩混合料同样油石比时，试验过程中可观察到泛油情况，因此，结合本文岩性分析、工程经验和规范要求，为了防止沥青路面泛油等，普通密度辉绿岩选择的最佳油石比高 0.3。沥青膜厚度存在最优区间(4~10 μm)，过薄或过厚都会同时影响水稳定性和高温稳定性，且两种性能对厚度的适配要求高度关联。

过薄：沥青无法完全包裹集料表面，集料颗粒易暴露在水中。水分会侵入集料与沥青界面，破坏粘结力，导致混合料剥离、松散，水稳定性大幅下降。同时，沥青粘结剂量不足，集料间粘结力薄弱，高温下混合料抗剪切能力差，易出现集料滑动、位移，导致车辙、拥包等变形病害。

过厚：多余沥青会形成“游离沥青”，遇水后易软化、流淌。同时可能增加混合料空隙率，水分更易滞留内部，反而降低水稳定性。沥青含量过高，混合料黏度过大但结构刚度不足，高温下易呈黏流状态，抗剪切变形能力下降，车辙风险显著增加。因此工程中必须通过性能试验进一步验证，两种辉绿岩集料相关性能影响见本文第 4 部分。

Table 10. Specific surface area of aggregates
表 10. 集料的比表面积

筛孔尺寸 (mm)	16	13.2	9.5	4.75	2.36	1.18	0.6	0.3	0.15	0.075	SA 总和 (m ² /kg)
FAi	0.0041	0	0	0.0041	0.0082	0.0164	0.0287	0.0614	0.1229	0.3277	
PiA	100	92.3	64.8	36.9	27.4	19.8	14.1	9.4	7.3	6.1	4.9849
PiA * FAi	0.41	0	0	0.1513	0.2247	0.3247	0.4047	0.5734	0.8972	1.9989	
PiB	100	96.3	61.7	36.2	28.9	20.6	14.6	9.5	7.3	6.2	5.0644
PiB * FAi	0.41	0	0	0.1484	0.2370	0.3378	0.4190	0.5833	0.8972	2.0317	

注：表中 FAi 为各粒径的表面积系数，查沥青路面施工规范获得；PiA 为高密度辉绿岩通过百分率(%)，PiB 为普通密度辉绿岩通过百分率(%)；SA 为集料的比表面积。

Table 11. Filler-bitumen ratio and effective bitumen film thickness
表 11. 粉胶比和沥青膜厚度

集料类型	FB	SA (m ² /kg)	DA (μm)
高密度辉绿岩	1.639	4.9849	6.469
普通密度辉绿岩	1.566	5.0644	6.791

注：表中 FB 为粉胶比，DA 为沥青膜有效厚度。

5. 沥青混合料性能试验研究

5.1. 矿料与沥青的黏附性试验

本文在岩性分析的基础上，为了进一步评价两种密度辉绿岩与沥青粘附性、水稳性能，按《公路工程沥青及沥青混合料试验规程》(JTGE20-2011)中规定的水煮法进行黏附性试验，试验设计延长矿料的水煮时间(3 min, 6 min, 10 min, 15 min, 30 min)，测定不同时间范围内矿料上裹覆沥青的质量损失量与矿料最初的裹覆量进行比较，计算同一时间内矿料颗粒表面的沥青损失作为密度不同的粗集料抗水剥离能力的评价标准。

5.1.1. 两种集料与普通基质沥青粘附性试验

采用水煮法判断矿料与 AH-70#沥青的黏附性，按规范要求水煮 3 min 时，高密度辉绿岩的质量损失率与低密度辉绿岩质量损失率接近，但粘附性等级当煮沸时间为 15 分钟时普通密度的辉绿岩低于高密度辉绿岩，达到 30 分钟时两者接近。试验结果见表 12，由表 12 可知，对于 AH-70#沥青的黏附性，两者差别不大，基本属于同一个等级，这种情况可能与两种集料同属于辉绿岩，岩性和加工性能平衡后，降低了粘附性差异，或者与粘附性采用水煮法不敏感有关。

Table 12. Adhesion test results of normal asphalt with diabase crushed stone of different densities

表 12. 不同密度辉绿岩碎石普通沥青粘附性试验结果

普通沥青	3 min	6 min	10 min	15 min	30 min
高密度碎石质量损失(g)	0.0	0.0	0.0	0.1	0.2
高密度碎石粘附性等级	5	5	5	5	2
普通密度碎石质量损失(g)	0.0	0.0	0.1	0.1	0.2
普通密度碎石粘附性等级	5	5	5	4	2

5.1.2. 两种集料与改性沥青粘附性试验

表 13 是两种不同密度的辉绿岩碎石与 SBS 改性沥青水煮黏附性试验结果，与表 12 中的 AH-70#沥青的试验结果相比较，采用改性沥青后，由于沥青黏度增大，沥青与矿料间的粘结力增强，矿料表面裹覆沥青质量的损失率接近 0，矿料与改性沥青的黏附性得到了较大的改善。按现行规范要求的 3 min 进行试验时，不同密度辉绿岩碎石的沥青质量损失率差别很小，随着水煮时间的增长，达到 30 分钟时才出现质量损失，且矿料的质量损失率二者相同。本文试验结果表明：岩性和加工性能平衡后，同类岩性(辉绿岩)的两种密度集料其粘附性基本相近。

Table 13. Adhesion test results of modified asphalt with diabase crushed stone of different densities

表 13. 不同密度辉绿岩碎石改性沥青粘附性试验结果

改性沥青	3 min	6 min	10 min	15 min	30 min
高密度碎石质量损失(g)	0.0	0.0	0.0	0.0	0.1
高密度碎石粘附性等级	5	5	5	5	5
普通密度碎石质量损失(g)	0.0	0.0	0.0	0.0	0.1
普通密度碎石粘附性等级	5	5	5	5	5

5.2. 浸水马歇尔试验

在本文粘附性试验的基础上，为了比较两种密度辉绿岩沥青混合料水稳定性能，本文对两种集料的

沥青混合料分别在最佳油石比时采用浸水马歇尔试验来评价沥青混合料的水稳定性能，按《公路工程沥青及沥青混合料试验规程》(JTGE20-2011)中规定的方法，对空隙率在 4%~6%进行控制成型的马歇尔试件进行测试，以评价两种不同密度集料的混合料水稳定性能。采用 SBS 改性沥青对两种不同辉绿岩分别进行浸水马歇尔试验，试验结果如表 14。

由表 14 可以得出：两种密度辉绿岩 SBS 改性沥青混合料浸水残留稳定度均符合技术要求，但普通密度辉绿岩沥青混合料浸水残留稳定度明显提高，比高密度辉绿岩提高了 7.5%，普通密度辉绿岩浸水残留稳定度高与其最佳油石比比高密度辉绿岩大有关，因为油石比大，油膜增厚利于改善混合料水稳性能。

Table 14. Immersion marshall test results
表 14. 浸水马歇尔试验结果

混合料类型	浸后马歇尔稳定度(kN)	标准马歇尔稳定度(kN)	残留稳定度(%)	技术要求(%)
高密度辉绿岩 AC-13C	15.77	17.45	90.4	≥85
普通密度辉绿岩 AC-13C	17.17	17.67	97.2	≥85

5.3. 动稳定度试验

本试验采用车辙试验仪，按《公路工程沥青及沥青混合料试验规程》(JTGE20-2011)中的试验要求进行高温稳定性试验，以评价两种不同集料的混合料高温稳定性能。本试验结合湖南省的气候、交通状态，两种集料分别在最佳油石比 4.3%、4.6%时成型车辙板。基于温度对车辙的影响[18]，本文车辙试验温度采用 60℃和 70℃，轮压采用 0.7 MPa 进行车辙试验，以动稳定度来评价其高温稳定性能，试验结果见表 15。

Table 15. Rutting test results of asphalt mixture with diabase crushed stone of different densities
表 15. 不同密度辉绿岩沥青混合料车辙试验结果

试件编号	1	2	3	平均值
60℃ 高密度碎石动稳定度(次/mm)	5887	6494	6058	6146
60℃ 普通密度碎石动稳定度(次/mm)	6057	6454	5812	6107
70℃ 高密度碎石动稳定度(次/mm)	2432	3084	2648	2721
70℃ 普通密度碎石动稳定度(次/mm)	2333	2032	2588	2317

由表 15 可知：两种密度的 SBS 改性沥青混合料动稳定度均满足规范要求，在 60℃温度条件下其平均值分别为 6146 和 6107，高密度碎石沥青混合料动稳定度比普通密度混合料动稳定度高 0.64%，在 70℃温度条件下其平均值分别为 2721 和 2317，高密度碎石沥青混合料动稳定度比普通密度混合料动稳定度高 17.44%，试验结果表明最佳油石比时高密度沥青混合料动稳定度都比普通密度沥青混合料动稳定度高，60℃温度条件下两种集料动稳定度差别小，但在 70℃温度条件下，高密度辉绿岩动稳定度增大较多，高密度碎石沥青混合料高温稳定性更好。出现这种情况可能与高密度碎石沥青混合料油石比小，沥青油膜薄，结构沥青多，高温稳定性更好有关。

6. AC-13 面层沥青混合料成本与桥面铺装时桥梁恒载分析

6.1. 面层沥青混合料成本分析

本文选择的两种密度集料成本差异计算[17] [18]如表 16，表中括号内为普通辉绿岩集料成本计算结

果。计算时依据 2024 年 9 月炉慈项目拟采购材料单价，两地运距与运输方式如下：广西田东到湖南慈利直线约 743.5 公里、驾车约 1078.1 公里，湖北襄阳到湖南慈利直线约 310.3 公里、驾车约 403.4 公里，两种集料运输方式都是以火车运输为主(长距离)，汽车运输为辅(短距离)。材料比例按照生产配合比比例计算成本，两种集料矿料比例按照生产配合比比例控制，计算压实度为 98%，最大干密度分别为 2.866 t/m³ 和 2.675 t/m³，AC-13 沥青混合料上面层厚度为 4 cm。

Table 16. Cost of high-density diabase crushed stone asphalt mixture
表 16. 不同密度辉绿岩碎石沥青混合料成本

材料名称及规格	比例(%)	理论数量(1 m ³ 含多少 t 沥青或矿料)	损耗系数 (%)	实际数量(1 m ³ 含多少 t 沥青或矿料)	单价 (元/t)	材料费(1 m ³ 混合料材料费)	材料费合计(元/m ³)	折合成平方(元/m ²)
SBS 改性沥青	4.30 (4.60)	0.1158 (0.1153)	1.00%	0.1170 (0.1164)	4628	541.25 (538.88)		
碎石 11~23 mm	35.00 (38.00)	0.9425 (0.8772)	2.00%	0.9614 (0.8947)	260	249.95 (232.63)		
碎石 6~11 mm	32.00 (30.00)	0.8617 (0.8020)	2.00%	0.8790 (0.8180)	260	228.53 (212.69)	1140.58 (1096.67)	45.62 (43.87)
碎石 4~6 mm	3.00 (2.00)	0.0808 (0.0752)	2.00%	0.0824 (0.0767)	260	21.42 (19.94)		
机制砂 0~4 mm	26.00 (26.00)	0.7002 (0.6516)	2.00%	0.7142 (0.6646)	120	85.7 (79.76)		
矿粉<0.075 mm	4.00 (4.00)	0.1077 (0.1002)	2.00%	0.1099 (0.1023)	125	13.73 (12.78)		

炉慈项目总里程：路面一标 46.78 km，路面二标 32.108 km，路面一标上面层总面积 976,608 m²，路面二标上面层总面积 1,047,876 m²，高通密度辉绿岩碎石 AC-13 沥青混合料每平方 45.62 元/m²，普通密度辉绿岩碎石 AC-13 沥青混合料每平方 43.87 元/m²，按此单价计算：路面一标如果采用高密度辉绿岩碎石增加成本 171 万元，路面二标如果采用高密度辉绿岩碎石增加成本 183 万元。炉慈项目合计增加成本 354 万元。

6.2. AC-13 面层混合料用于桥面铺装时桥梁恒载分析

桥面铺装层密度不同产生的恒载不同[19]，本文分析时两种辉绿岩 AC-13 沥青混合料最大理论密度分别为 2.866 g/cm³ 和 2.675 g/cm³，上面层厚度为 4 cm，则采用不同密度辉绿岩每平米混合料质量分别为 0.115 t 和 0.107 t，因此桥梁如果采用高密度辉绿岩集料比采用普通密度辉绿岩集料每平米增加 0.008 t，即每平米增加 8 kg 恒载。

7. 结论与建议

- (1) 高密度矿物孔隙率更低，表面光滑，可能降低沥青的机械嵌固作用，从而影响沥青混合料水稳定性和高温性能。基于不同密度辉绿岩岩性分析，工程中选择辉绿岩集料时宜进行岩相筛选：优先选择中等密度(2.7~2.9 g/cm³)的辉绿岩，兼顾化学与机械粘附。
- (2) 按照试验规程与工程经验，通过试验确定了高密度辉绿岩集料的吸水率平均值为 0.36，普通密度辉绿岩集料的吸水率平均值为 0.56，高密度辉绿岩混合料最佳油石比为 4.3，普通密度辉绿岩混合料最佳油石比为 4.6，普通集料密度吸水率高，油石比大。

(3) 通过水煮法进行两种密度集料黏附性试验,在水煮时间为 3 min、6 min、10 min、15 min、30 min 时,两种沥青:AH-70#和 SBS 改性沥青的黏附性差别小,粘附性属于同一个等级。

(4) 两种密度辉绿岩 SBS 改性沥青混合料浸水残留稳定度均符合技术要求,但普通密度辉绿岩沥青混合料浸水残留稳定度比高密度辉绿岩提高了 7.5%。

(5) 60℃动稳定度均符合技术要求,但高密度辉绿岩碎石沥青混合料动稳定度比普通密度辉绿岩碎石沥青混合料动稳定度高 0.64%,70℃高密度碎石沥青混合料动稳定度比普通密度混合料动稳定度高 17.44%。

(6) 高密度辉绿岩碎石 AC-13 沥青混合料每平方 45.62 元/m²,普通密度辉绿岩碎石 AC-13 沥青混合料每平方 43.87 元/m²,如果使用高密度辉绿岩:4cm 上面层每平方米增加成本 1.75 元,炉慈项目合计增加成本 354 万元。

(7) 桥梁沥青路面铺装层上层如果采用高密度辉绿岩集料比采用普通密度辉绿岩集料每平方米增加 8 kg 恒载。

综合考虑岩性、混合料路用性能、成本及规范要求等因素,沥青路面集料表观相对密度宜控制在 2.6~3.0。

有关高密度集料及不同密度集料混合对沥青混合料性能的影响还有望从细观、微观及其它沥青混合料宏观性能进一步开展研究,包括通过 SEM 观察其表面纹理和孔隙特征等,以获得全面认识和指导工程实践。

基金项目

湖南省科技厅重点研发项目《冷拌冷铺耐久性高性能沥青混凝土面层技术》,编号:2023SK2063;湖南省交通运输厅科技项目《绿色低碳冷拌冷铺沥青混合料面层技术研究》,编号:202249。

参考文献

- [1] 秦仁杰,喻鹏,刘朝晖,等.辉绿岩碎石沥青混合料路用性能试验研究[J].中外公路,2012,32(5):224-228.
- [2] 程浩,袁泉,周应时,等.沥青-炉渣界面黏附性与体系水稳性关系研究[J].公路工程,2024,49(4):108-113+128.
- [3] Han, S. and Baek, C. (2023) Evaluation of Properties of Asphalt Concrete Mixture Using Basalt Aggregate from Jeju Island. *Buildings*, **13**, Article 3119. <https://doi.org/10.3390/buildings13123119>
- [4] Zhang, Y., Gu, Q., Kang, A., Ding, X. and Ma, T. (2022) Characterization of Mesoscale Fracture Damage of Asphalt Mixtures with Basalt Fiber by Environmental Scanning Electron Microscopy. *Construction and Building Materials*, **344**, Article 128188. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2022.128188>
- [5] 轩杰,耿九光.酸性集料界面改性及对沥青混合料性能影响的研究[J].公路工程,2023,48(5):131-135.
- [6] 公路沥青路面施工技术规范:JTGF40-2004 [S].北京:人民交通出版社,2005.
- [7] 王宏军,谭忆秋,周纯秀.高密度沥青混合料抗车辙性能与级配优化[J].建筑材料学报,2007,10(3):323-328.
- [8] Airey, G.D. and Mohammed, M.H. (2008) Rheological Characteristics of Synthetic Road Binders. *Journal of Materials in Civil Engineering*, **20**, 235-243.
- [9] Zhang, J., et al. (2020) High-Density Asphalt Mixtures with Basalt Aggregates: Performance and Sustainability Analysis. *Construction and Building Materials*, **253**, 119-128.
- [10] 黄波,李超源,郝治,等.集料密度差异及成型温度对沥青混合料配合比的影响研究[J].中外公路,2022,42(3):180-185.
- [11] 张宏飞,徐义刚,等.峨眉山高密度辉绿岩的矿物化学特征及其对深部过程的指示[J].岩石学报,2018,34(5):23-25.
- [12] Kamenetsky, V.S., Kamenetsky, M.B., Maas, R., et al. (2012) Silicate-Sulfide Immiscibility in the Emeishan Mantle Plume. *Nature Communications*, **3**, Article No. 1176.
- [13] 公路工程沥青及沥青混合料试验规程:JTG E20-2011 [S].北京:人民交通出版社,2011.

-
- [14] Abdullah, R. (2016) Kajian Petrografi Agregat Terhadap Stabilitas Marshall Campuran Laston. *Matrik*, **16**, 1-16.
 - [15] Wang, X., Yu, R., Song, Q., Shui, Z., Liu, Z., Wu, S., *et al.* (2019) Optimized Design of Ultra-High Performance Concrete (UHPC) with a High Wet Packing Density. *Cement and Concrete Research*, **126**, Article 105921. <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2019.105921>
 - [16] 公路工程集料试验规程: JTG3430-2024 [S]. 北京: 人民交通出版社, 2024.
 - [17] 唐军. 温度对不同沥青混合料抗车辙性能的影响研究[J]. 湖南交通科技, 2023, 49(1): 52-54, 59.
 - [18] Pu, F.C. (2023) Pengaruh Penggantian Sebagian Agregat Halus dengan Limbah Plastik Terhadap Berat Jenis, Kuat Tekan dan Nilai Ekonomis Pada Bata Ringan. *Indonesian Journal of Civil Engineering and Environment*, **8**, 1-8.
 - [19] 黄卫, 等. 环氧沥青混凝土在大跨径钢桥面铺装中的应用[J]. 东南大学学报(自然科学版), 2002, 32(9): 783-787.