

粗集料种类对薄层罩面服役性能影响研究

景进辉¹, 范燕², 李华², 邓超³, 蔡军^{3,*}, 于华南³

(1. 湖北交投鄂西高速建设管理有限公司, 湖北 武汉 445002; 2. 中交第二公路勘察设计研究院有限公司, 湖北 武汉 430056; 3. 长沙理工大学公路养护技术国家工程研究中心, 湖南 长沙 410114)

摘要: 薄层罩面作为近年来主要的路面养护手段, 当前研究主要集中在材料组成优化设计与高性价比罩面种类应用等方面, 对市场不同常用原材料带来的服役性能差异研究仍较少。为此, 本文开展了面向玄武岩、石灰岩、钢渣、精细化分离 RAP 料的混合料服役性能对比研究。首先选取典型级配 SMA-10 与 AC-10C, 借助等体积替换方法 100% 替换二者 2.36~4.75 mm、4.75~9.5 mm、9.5~13.2 mm 粗集料部分, 接着对其服役性能进行对比研究。结果显示: 钢渣作为薄层罩面粗集料在高温稳定性、抗剪性能及抗滑性能方面均优势显著, 为最佳薄层罩面用粗集料; SMA-10 薄层罩面服役性能较 AC-10C 更优异, 预算允许条件下宜优先考虑; 精细化分离 RAP 料尽管可用于薄层罩面, 但服役性能最差且抗冻融能力接近规范下限, 在使用中仍需验证。

关键词: 薄层罩面; 粗集料种类; 服役性能; 路用性能; 抗滑性能

中图分类号: U414

文献标志码: A

Investigation into the Effect of Coarse Aggregate Type on the Service Performance of Thin Overlays

Jing Jinhui¹, Fan Yan², Li Hua², Deng Chao³, Cai Jun^{3,*}, Yu Huanan³

(1. Hubei Communications Investment E-Xi Expressway Construction Management Co., Ltd., Wuhan 445002, China; 2. CCCC Second Highway Survey and Design Institute Co., Ltd, Wuhan 430056, China; 3. National Engineering Laboratory of Highway Maintenance Technology, Changsha University of Science & Technology, Changsha 410114, China)

Abstract: Thin overlays have become a primary pavement maintenance measure in recent years. Research on thin overlays primarily focuses on optimizing material composition and applying cost-effective overlay types. The influence of commonly used raw materials on the service performance of thin overlays remains insufficiently understood. Therefore, this study compared the service performance of thin overlays prepared with coarse aggregates (basalt, limestone, steel slag, and finely separated reclaimed asphalt pavement (RAP)). Specifically, two typical gradations, stone matrix asphalt (SMA-10) and asphalt concrete (AC-10C), were first selected. Then, the 2.36–4.75 mm, 4.75–9.5 mm, and 9.5–13.2 mm fractions were completely replaced with the four target coarse aggregates on an equal-volume basis. Finally, the service performance of the resulting specimens was tested and evaluated. The results showed that steel slag exhibited significant advantages in high-temperature stability, shear resistance, and skid resistance. It was identified as the optimal coarse aggregate. The SMA-10 overlay demonstrated superior overall performance compared to the AC-10C, and should be preferred when the budget allows. Finely separated RAP can be used in thin overlays, but it exhibited the poorest overall performance, with its freeze-thaw resistance approaching the lower specification limit. This indicates a need for further field validation.

Key words: thin overlays; coarse aggregates; service performance; road performance; skid resistance

薄层罩面作为近年来快速发展的路面预防性养护技术，其在快速恢复路表抗滑性能、延缓路表裂缝、降低路面病害发展速度等方面具有显著优势，得到了道路养护部门的普遍认可^[1-3]。同时，与传统路面养护方式相比，其在摊铺厚度方面更加灵活，材料组成和应用方式可兼顾经济性和环保性，成为当前道路领域的研究热点^[4-6]。

梳理相关研究文献发现，当前薄层罩面研究主要集中在罩面材料组成优化设计与高性价比罩面种类应用等方面^[7-8]。在罩面材料组成优化设计方面，基于材料级配组成类型不同，可分为连续级配类 AC、间断级配类 SMA、开级配类 OGFC 与半开级配类 Nova Chip 等^[9]。从市场反馈来看，Nova Chip 型罩面整体服役性能均较优异，但工程造价偏高^[10]；OGFC 型罩面在抗滑性能外、快速排水、路面降噪等方面优势显著，但耐久性偏差^[11]；密实型级配 SMA 与 AC 罩面具备较好的抗水损性能，且价格适中^[12]。此外，屈甜等^[13]基于多点支撑骨架状态的混合料体积设计方法（V-S），提出了一种综合服役性显著提升的 SMA-5 薄层罩面。Cui 等^[14]基于 Taylor 体系标准网格法，提出了一种高温稳定性与抗滑性能均超过 Nova Chip-B 薄层罩面。

在高性价比罩面种类应用方面，除不同类别的高性能改性沥青作为胶结料被广泛研究外，钢渣、玻璃纤维与 RAP 料等固废料同样被广泛尝试应用于薄层罩面中^[15-16]。罗程等^[17]试验发现钢渣粗集料因较低压碎值与磨耗值，使其组成薄层罩面的层间抗剪切能力优异。蔡俊华^[18]试验发现当玻璃纤维掺量为 0.4% 时，薄层罩面水稳定性提升 8% 左右，而疲劳寿命提升超 25%。赵颖等^[19]通过旧沥青再生，使 RAP 料利用率超 30%。

综上可知，当前薄层罩面领域仍处于快速发展与积极拓新阶段，对新材料、新技术研究较多。但与此同时，市面上提出的新材料、原材料已经十分丰富，而绝大多数成果集中在单一目标材料的应用可行性和服役效果评价方面，仍缺乏将已有的多种应用材料纳入统一实验条件下进行横向对比，以方便施工应用方从业人员进行甄别选用^[20]。为此，本研究从原材料选用出发，结合当前市面上研究较多的四种粗集料：玄武岩、石灰岩、钢渣、精细化分离 RAP 料，研究不同粗集料原材料选用带来的薄层罩面混合料服役性能差异性。具体而言，本文首先选取 SMA-10 与 AC-10C 两类薄层罩面用典型级配，接着采用等体积替换方法分别全部替换二者 2.36~4.75mm、4.75~9.5 mm、9.5~13.2 mm 的粗集料部分，形成基于目标粗集料材料的薄层罩面材料；最后对二者的高温稳定性、低温抗裂性、水稳定性、层间抗剪性能等关键路用性能和抗滑性能分别进行对比研究，分析不同材料引发的服役性能差异性。本文研究结果可为薄层罩面的原材料选择提供依据。

1 原材料与试验方法

1.1 原材料

本文选用原材料包括 SBS 改性沥青胶结料、各类型粗集料（玄武岩、石灰岩、钢渣、精细化分离 RAP 料）、以及石灰岩细集料与矿粉。各原材料信息与性能指标测试结果分别介绍如下。

1.1.1 沥青

本文选用 SBS 掺量为 4.5% 的实验室自制 SBS 改性沥青作为沥青胶结料。依据《公路工程沥青及沥青混合料试验规程》（JTG 3410—2025）^[21]，其主要性能指标测试结果如表 1 所示。由表可知，所用 SBS 改性沥青各性能指标均符合规范要求，可用于本文研究。

表 1 SBS 改性沥青性能指标测试结果

Tab.1 Results of indicators for SBS-modified asphalt

性能指标	单位	测试结果	技术要求 ^[22]
针入度 (25 °C, 100 g, 5 s)	0.1 mm	53	40~60
延度 (5 cm/min, 5 °C)	cm	29	≥20
软化点	°C	78	≥60
弹性恢复 (25 °C)	%	99	≥75
薄膜加热试验 (163 °C, 5 h)	质量损失	%	0.5
	针入度比	%	77.4
	延度	cm	18
			≤±1.0
			≥65
			≥15

1.1.2 粗集料

如前所述, 为研究不同粗集料类型对薄层罩面材料服役性能影响, 本文选用了玄武岩、石灰岩、钢渣与精细化分离 RAP 料四种不同类型粗集料用于试验, 每种粗集料均包含 9.50~13.20mm、4.75~9.50 mm、2.36~4.75 mm 三档粒径, 在进行级配替换时, 参考相关文献成果^[23-24], 采用等体积替换法 100%替换薄层罩面混合料中的粗集料。

具体而言, 玄武岩与石灰岩粗集料为湖南易路兴道工程科技有限公司提供, 其性能指标分别如表 2 和表 3 所示。由表可知, 玄武岩密度更大, 且力学性能较石灰岩更好。但整体来看, 二者性能均满足道路原材料使用要求, 可用作本文研究的原材料。

钢渣粗集料为湖南湘潭钢铁集团有限公司生产的某批次转炉渣, 经轧制后且陈化 2 年以上筛分获得的粗集料, 其各档材料性能指标如表 4 所示。可以看出, 钢渣密度较玄武岩与石灰岩更大, 且力学性能也更为突出。另一方面, 相关研究表明钢渣存在安定性的潜在风险^[17], 因此在确定为合格原材料过程中仍需进一步核实。为此本文中首先借助 X 射线荧光光谱试验 (XRF 试验) 对钢渣材料的化学成分进行了分析, 其次对其游离氧化钙 (f-CaO) 含量和浸水膨胀性进行了测试, 二者结果如表 5 所示。由表可知, 选用的钢渣材料主要成分为 CaO、FeO 和 SiO₂, 乙二醇代用法结果表明 f-CaO 含量仅 0.9%, 且浸水膨胀率 1.2%。这表明选用的钢渣粗集料不仅基本性能优良, 且安定性较好, 可用作本文试验原材料。

精细化分离 RAP 料取自湖南常德熠联新材料有限公司, 其来源为湖南省高速某路段 AC-13 上面层沥青混合料 (沥青为 SBS 改性沥青, 油石比为 4.5%), 经南方路机 RAPR120 型精细化分离设备分离后形成相对稳定分离料。同样对精细化分离 RAP 料基本性能进行检测, 其结果如表 6 所示。可以看到, 与其他三种原材料相比, 精细化分离后 RAP 料具有以下显著特征: 第一, 吸水率较其他原材料显著提升; 第二, 力学性能普遍偏低, 压碎值、磨耗值等指标与石灰岩接近; 第三, 整体沥青含量较低, 集料与沥青得到了很好的剥离, 为此在本文中直接将精细化分离 RAP 料视作粗集料用作混合料设计。综上可知, 尽管精细化分离后 RAP 料符合规范要求, 但吸水率偏大、基本力学性能偏低、且粗集料表面残留少量沥青, 可能对后续性能有所影响。

表 2 玄武岩粗集料性能指标测试结果

Tab.2 Results of indicators for basalt coarse aggregate

试验项目	9.5~13.2mm		4.75~9.5mm		2.36~4.75mm	
	测试结果	规范要求	测试结果	规范要求	测试结果	规范要求
表观密度 g/cm ³	2.782	≥2.60	2.760	≥2.60	2.917	≥2.60
毛体积密度 g/cm ³	2.692	-	2.695	-	2.629	-

吸水率/%	0.474	≤2.0	0.605	≤2.0	0.723	≤2.0
针片状/%	7.6	≤12	8.9	≤18	-	-
压碎值/%	14.6	≤26	-	-	-	-
磨耗值/%	20.6	≤28	9.8	≤28	6.2	≤28
磨光值 PSV	49	≥42	-	-	-	-

表 3 石灰岩粗集料性能指标测试结果

Tab.3 Results of indicators for limestone coarse aggregate

试验项目	9.5~13.2mm		4.75~9.5mm		2.36~4.75mm	
	测试结果	规范要求	测试结果	规范要求	测试结果	规范要求
表观密度 g/cm ³	2.722	≥2.60	2.720	≥2.60	2.770	≥2.60
毛体积密度 g/cm ³	2.632	-	2.661	-	2.683	-
吸水率/%	0.558	≤2.0	0.712	≤2.0	0.873	≤2.0
针片状/%	11.7	≤12	14.1	≤18	-	-
压碎值/%	18.2	≤26	-	-	-	-
磨耗值/%	22.7	≤28	11.2	≤28	7.5	≤28
磨光值 PSV	43	≥42	-	-	-	-

表 4 钢渣粗集料性能指标测试结果

Tab.4 Results of indicators for steel slag coarse aggregate

试验项目	9.5~13.2mm		4.75~9.5mm		2.36~4.75mm	
	测试结果	规范要求	测试结果	规范要求	测试结果	规范要求
表观密度 g/cm ³	3.367	≥2.90	3.353	≥2.90	3.312	≥2.90
毛体积密度 g/cm ³	3.253	-	3.247	-	3.201	-
吸水率/%	1.115	≤2.0	1.212	≤2.0	1.431	≤2.0
针片状/%	6.8	≤12	6.5	≤18	-	-
压碎值/%	12.6	≤26	-	-	-	-
磨耗值/%	14.1	≤28	6.3	≤28	4.2	≤28
磨光值 PSV	56	≥42	-	-	-	-

表 5 钢渣集料化学组成及安定性

Tab.5 Chemical composition and stability of steel slag aggregate

试验项目	质量分数/%								f-CaO 含量	浸水膨胀率
	CaO	SiO ₂	Al ₂ O ₃	P ₂ O ₅	MgO	Fe ₂ O ₃	FeO	其他	/%	/%
测试结果	45.77	18.34	4.86	1.45	1.86	3.47	20.06	4.19	0.9	1.2

表 6 精细化分离 RAP 料性能指标测试结果

Tab.6 Results of indicators for separated RAP

试验项目	9.5~13.2mm		4.75~9.5mm		2.36~4.75mm	
	测试结果	规范要求	测试结果	规范要求	测试结果	规范要求
表观密度 g/cm ³	2.731	≥2.60	2.643	≥2.60	2.715	≥2.60
毛体积密度 g/cm ³	2.652	-	2.633	-	2.641	-
吸水率/%	1.046	≤2.0	1.451	≤2.0	1.683	≤2.0
针片状/%	5.7	≤12	6.3	≤18	-	-
压碎值/%	19.5	≤26	-	-	-	-
磨耗值/%	22.0	≤28	14.1	≤28	9.4	≤28
磨光值 PSV	44	≥42	-	-	-	-
沥青含量/%	0.72	-	0.95	-	1.16	-

1.1.3 细集料与矿粉

本文选用细集料与矿粉均为石灰岩。依据《公路工程集料试验规程》(JTG 3432-2024) [25], 二者各自基本性能指标测试结果如表 7 所示。由表可知, 所用石灰岩细集料与矿粉各自性能指标均符合规范要求, 可用于本文研究。

表 7 石灰岩细集料与矿粉性能指标测试结果

Tab.3 Results of indicators for limestone fine aggregate and mineral powder

种类	性能指标	测试结果					技术要求[22]
石灰岩细集料	粒径/mm	1.18~2.36	0.6~1.18	0.3~0.6	0.15~0.3	0.075~0.15	-
	毛体积密度 g/cm ³	2.665	2.662	2.653	2.651	2.643	-
	表观密度 g/cm ³	2.673	2.672	2.668	2.669	2.674	≥2.50
石灰岩矿粉	表观密度 g/cm ³	2.543					≥2.50
	含水量/%	0.3					≤1
	亲水系数	0.66					≤1

1.2 薄层罩面配合比设计

当前薄层罩面厚度集中在 0.6~2.5cm, 罩面类型包括但不限于微表处、超薄磨耗层、超黏磨耗层、极薄抗滑层, 级配种类涵盖 SMA、SAC、AC 以及 OGFC 甚至单粒径材料 (厚度较薄时) [8, 26-27]。限于研究内容与精力的有限性, 本文选仅选取了湖南地区常用厚度 2.5 cm 的薄层罩面作为研究对象, 级配种类为 SMA-10 与 AC-10C。SMA-10 与 AC-10C 油石比分别为 6.1%与 5.5%, 二者级配组成如图 1 所示。

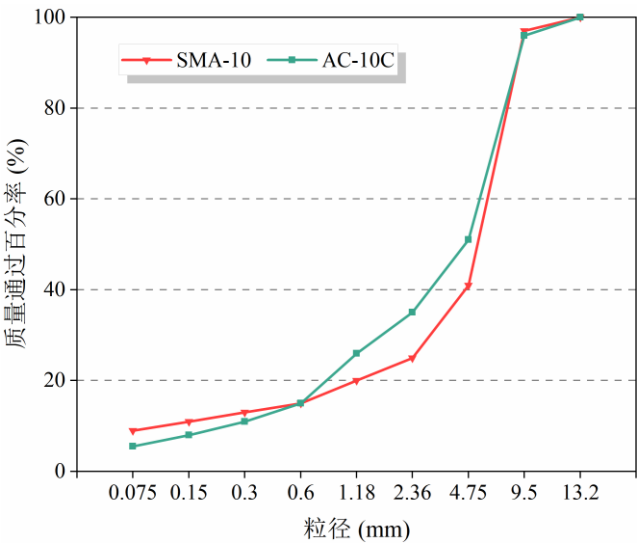


图 1 两种薄层罩面级配曲线

Fig.1 Gradation curves of two types of thin overlay mixtures

1.3 试验方案

薄层罩面作为路面结构性能完好、功能特性出现衰减时的高效恢复手段, 其服役性能主要包括路用性能与功能特性两类。其中路用性能主要是对路面车辆及气候变化的适应性, 在应用过程中应关注对温度变化的敏感性、对雨水 (雨雪) 的敏感性以及层间抗剪的稳固性[28-29]; 功能特性主要为抗滑性能, 应用过程主要关注其建成时的抗滑性能及其服役过程中的抗滑性能下降情况[30]。

基于上述薄层罩面服役性能内容, 本文薄层罩面服役性能研究同样依据路用性能与功能特性进行评价。路用性能为关注试件成型后的高温稳定性、低温抗裂性、水稳定性与层间抗剪性能。功能特性采用建成初期与不同加速磨耗次数下的抗滑性能试验结果进行评价, 测试方基于参考文献[31-32]采用的加速磨耗方法进

行试验，试验后的评价指标包括摆式摩擦系数（BPN）、平均构造深度（MTD）及其衰变率。上述提及的各试验内容、评价指标与试验方法及依据见表 8。据此形成的整体试验流程见图 2。

表 8 薄层罩面服役性能评价指标与对应试验方法

Tab.4 Evaluation indicators for service performance of thin overlays and corresponding test methods			
服役性能	试验方法、条件与平行试件数目	评价指标	试验依据
路 用 性 能	高温稳定性 车辙试验（60℃、0.7 Mpa，3 个平行试件） 三点弯曲试验	动稳定度、车辙深度	JTG 3410—2025/T 0719
	低温抗裂性 （-10℃、50 mm/min，4 个平行试件）	劈裂弯拉强度、极限弯拉应变	JTG 3410—2025/T 0715
	浸水马歇尔实验（8 个平行试件）	马歇尔稳定度、浸水残留稳定度	JTG 3410—2025/T 0709
	水稳定性 冻融循环试验（8 个平行试件）	劈裂抗拉强度、冻融劈裂抗拉强度比	JTG 3410—2025/T 0729
	层间抗剪性能 直剪试验（下面层分别为 AC-13 与 SMA-13、25℃、50 mm/min 加载速率、层间撒布 0.6 kg/m ² SBS 改性乳化沥青，3 个平行试件）	层间抗剪强度	参考文献[17]
	路面构造深度试验（2 个平行试件）	平均构造深度（MTD）及其衰变率	JTG E60—2008/T 0961
功 能 特 性	抗滑性能 摆式路面摩擦系数试验（2 个平行试件）	摆式摩擦系数（BPN）及其衰变率	JTG E60—2008/T 0964

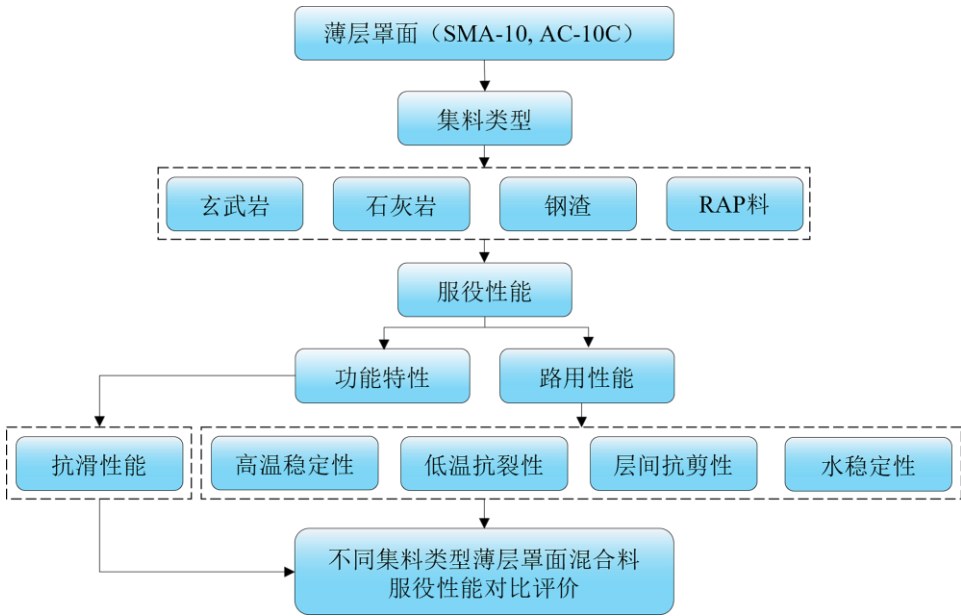


图 2 试验流程

Fig.2 Experimental Procedure

2 结果与分析

2.1 路用性能

2.1.1 高温稳定性

图 3 为玄武岩、石灰岩、钢渣及精细化分离 RAP 料四类粗集料成型试件的车辙试验结果。动稳定度结果显示（图 3a），无论是 SMA-10 还是 AC-10C 型混合料，钢渣粗集料混合料试件（后简称“钢渣试件”）均具有最好的动稳定度结果，次之为玄武岩粗集料混合料试件（后简称“玄武岩试件”），而石灰岩粗集料混合料试件（后简称“石灰岩试件”）与精细化分离 RAP 粗集料混合料试件（后简称“RAP 试件”）整体接近。这表明钢渣试件具有最高的高温稳定性，且较第二名玄武岩试件高出约 15%左右，具有较显著的抗车辙优势。这一结果是由于钢渣整体质地较坚硬，且棱角性较其他三类集料更分明导致的。玄武岩试件也具有较突出的动稳定度结果，较石灰岩试件和 RAP 试件同样高出约 10%，这同样是由于玄武岩试件整体耐磨性较后面二者更好导致的。RAP 料作为精细化分离后集料，其组成具有两个特点：一是 RAP 料的来源一般为多种岩性集料的混合物^[33]，二是 RAP 料表面实际上或多或少存有一定剂量的沥青油膜（参见表 6 中“沥青含量”列），这导致包含 RAP 料的混合料不仅油石比可能较其他材料稍高，还可能性能具有一定波动性：在 SMA-10 与 AC-10C 试件高温性能测试结果中，RAP 试件的 SMA-10 动稳定度结果较石灰岩试件更好，且高出约 5%，但 AC-10C 结果则略差与石灰岩试件。这表明精细化分离 RAP 料在尺寸上尽管具有接近性，但受粗集料料源以及表面沥青油膜的综合影响，其高温性能结果并不稳定，需在具体应用中进一步具体核实。石灰岩由于整体质地较脆、耐磨性偏差，整体动稳定度结果居于末尾。

车辙深度结果（图 3b）与动稳定度结果基本一致，不同级配类型（SMA-10、AC-10C）中，均为钢渣试件最小、玄武岩试件次之、石灰岩试件与 RAP 试件居于末尾。值得注意的是，玄武岩试件与石灰岩试件之间的车辙深度差距显著低于与 RAP 试件的结果。这表明，石灰岩试件在车辙试验的中后期变形可能较缓，造成动稳定度接近的情况下，车辙深度增速放慢。此外，SMA-10 较 AC-10C 试件整体具有更高的动稳定度与更小的车辙深度，这表明 SMA-10 级配拥有更好的高温稳定性。

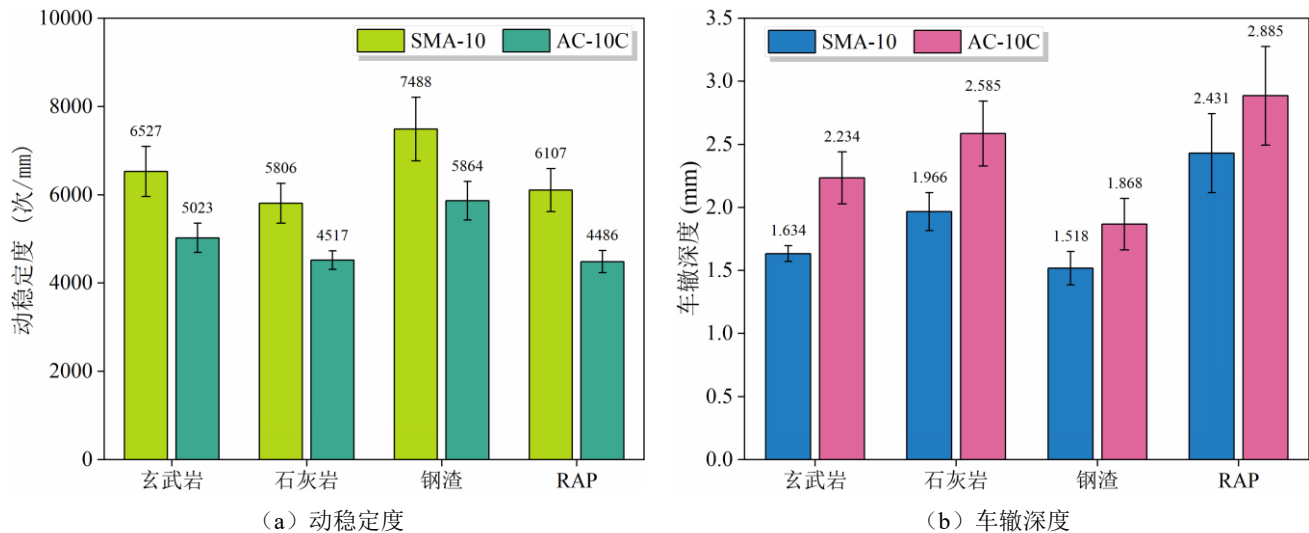


图 3 不同粗集料成型试件车辙试验结果

Fig.3 Rutting test results of specimens formed with different coarse aggregates

2.1.2 低温抗裂性

图 4 为四类粗集料成型试件在-10 ℃、50 mm/min 加载速率下的三点弯曲试验结果。由图可知，SMA-10 较 AC-10C 试件整体具有更小的劈裂弯拉强度与更大的极限弯拉应变，测试试件之间差异性也更明显。这表明 SMA-10 级配拥有更好的低温性能，而这是由于 SMA 细集料较多与沥青用量较大赋予的结果^[34]。

其次，不论是 SMA-10 还是 AC-10C 级配，四类粗集料成型试件的低温性能测试结果整体顺序基本是

一致的,即:劈裂强度结果方面,玄武岩试件与钢渣试件相互接近且显著高于另外两者,石灰岩试件居中,而 RAP 试件居于末尾且显著较小;极限弯拉应变结果方面,石灰岩试件整体最大、钢渣试件略低于石灰岩试件结果位居第二,而玄武岩试件与 RAP 试件低温性能结果在 SMA-10、AC-10C 两类混合料中略有不同,但整体差别不大,居于末尾。这一结果表明,在低温环境下,石灰岩试件可承载弯拉应力相对较小与可形变能力最大,具有最突出的低温性能;钢渣试件具有最大的承载应力与较突出的形变能力,低温性能表现次之;玄武岩试件可容许弯拉应力较大,但形变能力偏小,低温性能较差;RAP 试件可容许弯拉应力最小,且较其他材料低温应变能力对沥青用量更不敏感,可能由于低温条件下其表面残留旧沥青与新沥青黏结性能不足,导致两种级配下尽管油石比可能稍高,但低温性能仍然较差^[19]。

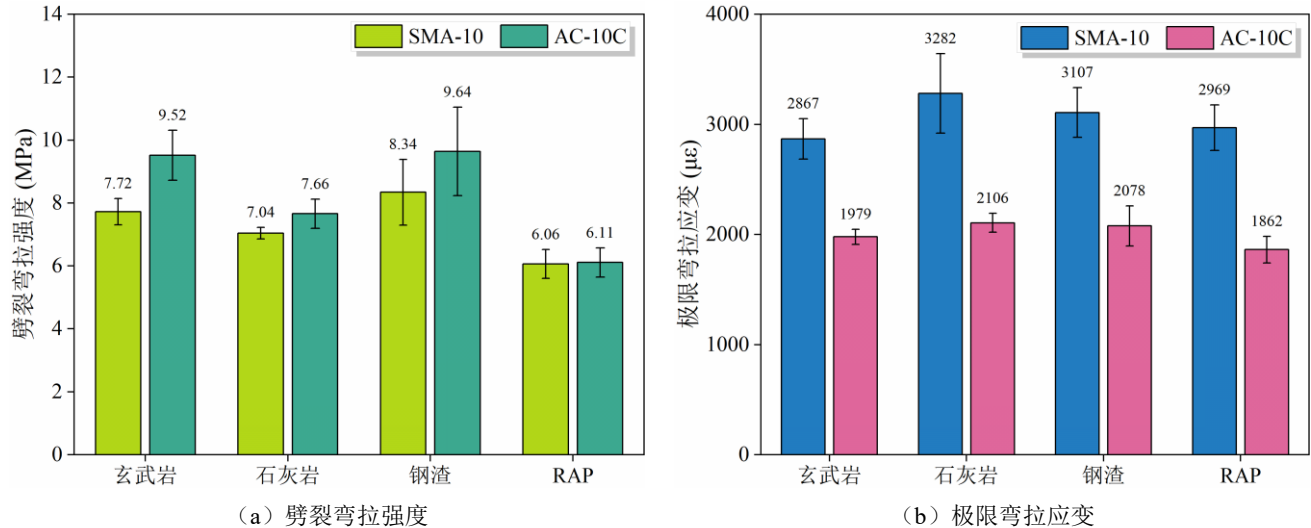


图 4 不同粗集料成型试件三点弯曲试验结果

Fig.4 Three-point bending test results of specimens formed with different coarse aggregates

2.1.3 水稳定性

四类粗集料成型试件的水稳定性采用浸水马歇尔试验与冻融循环试验进行评价,其结果如图 5 所示。

图 5 (a)、图 5 (b) 为四类粗集料成型试件的浸水马歇尔试验结果。首先,由图可知,四种试件的残留稳定度结果彼此差距不大,均在 92%~96%,这表明四种材料均有较好的抗水损害性能;在四种试件中,除了钢渣试件略优外,其他三种粗集料成型的混合料试件水稳定性均在 92.0%~93.5%,差别较小,这表明石灰岩、玄武岩与 RAP 料试件的水稳定性并没有因为原材料中粗集料不同,而出现显著差异。

其次,在 SMA-10 与 AC-10C 各自级配中,四类粗集料试件的水稳定性测试结果顺序略有不同:在 SMA-10 级配中,石灰岩试件以 93.4%的残留稳定度紧随钢渣试件之后,玄武岩试件以 92.5%的残留稳定度排在第三位;而在 AC-10C 级配中,石灰岩试件以 92.2%的残留稳定度排在第三位,玄武岩试件以 92.8%的残留稳定度第二。可以看出,尽管排序有所差异,但彼此间的水稳定性差异非常小,这说明两种级配对水损害抵抗能力差别不大, SMA-10 水稳定性略优。

第三,由浸水马歇尔试验结果还能看出 RAP 试件也具有较好的抗水损害能力,甚至与玄武岩、石灰岩试件差别不大,这是由于 RAP 料经过精细化分离后颗粒团聚情况与粗集料表面黏附沥青均具有较大改善,造成潜在的水损害薄弱点大幅减少,从而抗水损害能力得到提升。

图 5 (c)、图 5 (d) 为四类粗集料成型试件的冻融循环试验结果。由图可知,首先,两次冻融循环试验中, SMA-10 较 AC-10C 试件具有显著更高的抗冻融循环能力;其次,无论 SMA-10 还是 AC-10C 级配,

整体冻融劈裂抗拉强度比（TSR）顺序均为钢渣试件和石灰岩试件>玄武岩试件>RAP 试件。石灰岩试件整体抗冻融性能较玄武岩略优，尤其在沥青膜厚较小时，这一优势会更加明显。与石灰岩试件相比，钢渣试件因内部钢渣表面纹理丰富、开口孔隙多且呈碱性与沥青之间黏附性较好，因此在第一次冻融循环里呈现较高 TSR 值。然而，可能由于其较高的吸水率，第一次冻融时吸收部分游离水分子于试件中，导致第二次冻融循环时 TSR 出现较大下降而低于石灰岩试件，位于玄武岩试件和石灰岩试件之间^[35]。RAP 整体抗冻融循环能力较差，当沥青膜厚较小时，其抗冻融循环能力甚至下降至规范边缘^[36-37]。这可能由于本研究用精细化 RAP 料吸水率较高且表面残留一定沥青膜，导致冻融时 RAP 料易吸水形成冻胀压力，且拌和时旧沥青不一定能完全被激活并与新沥青充分融合，可能形成界面弱区，冻融后首先发生剥离破坏。因此精细分离 RAP 粗集料薄层罩面应用时，其抗冻融特性应被重点考虑。

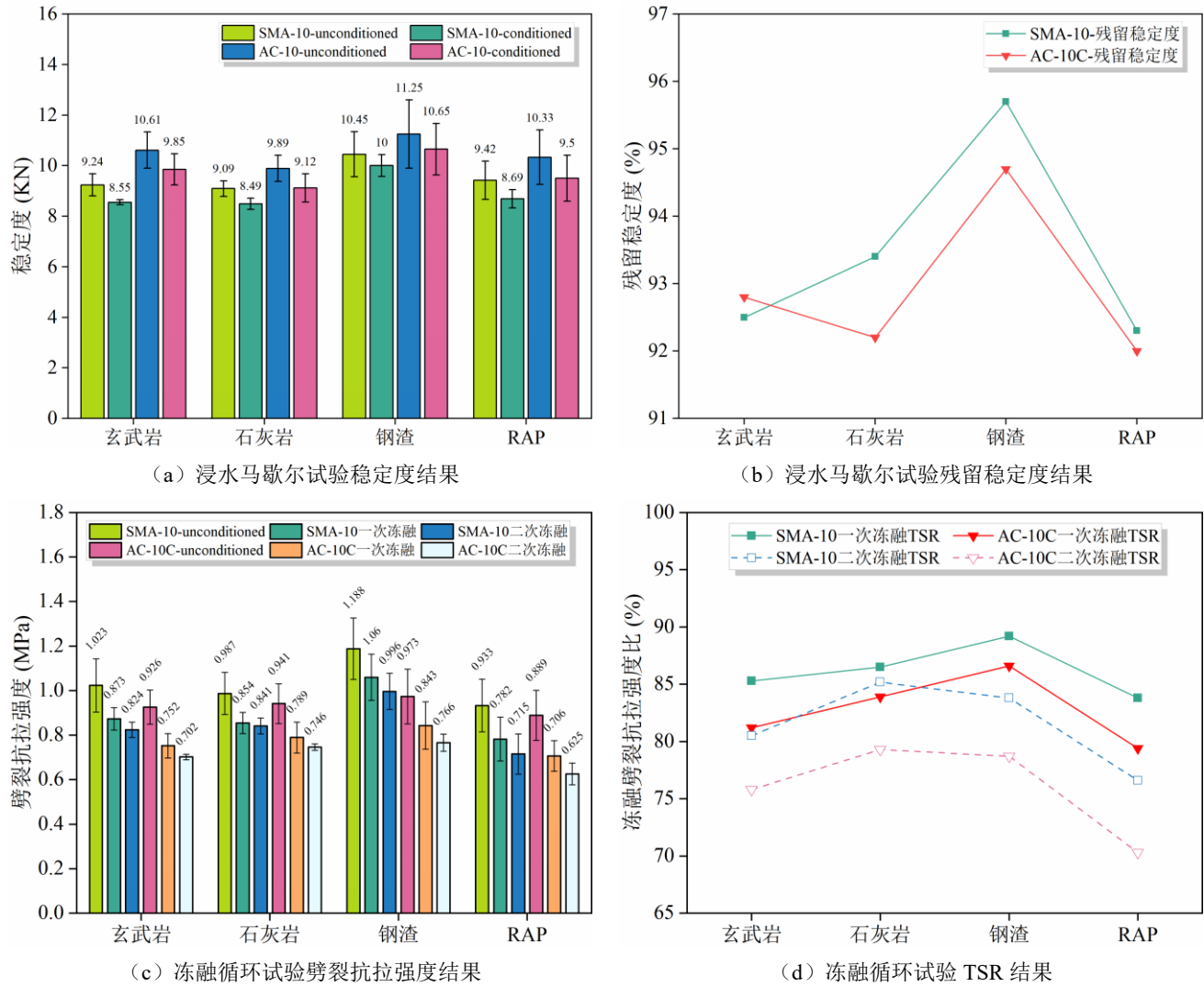


图 5 不同粗集料成型试件水稳定性试验结果

Fig.5 Water stability test results of specimens formed with different coarse aggregates

结合浸水马歇尔与冻融循环试验结果，可知冻融循环试验较浸水马歇尔试验对测试试件具有更显著的作用效果，但两者试验结果均表明：SMA-10 较 AC-10C 试件水稳定性能更优；钢渣试件具有较高的水稳定性能，但可能由于其较高的吸水率，导致其多次冻融时，水稳定性能下降较快；其次为石灰岩试件，再次为玄武岩试件，最后为 RAP 试件。其中前三者均较好的在规范下限之上，而 RAP 试件对冻融循环结果具有较高的敏感性，可能因为其精细化 RAP 料的吸水率较高和仍存在一定旧沥青膜造成混合料水稳定性

能较差，在应用过程中需进行反复验证。

2.1.4 层间抗剪性能

图 6 为四类粗集料成型试件与不同上面层（AC-13、SMA-13）表面的层间抗剪强度测试结果。图 6a）为 AC-13 作为上面层的层间抗剪强度测试结果。由图可知，两种级配类型（SMA-13、AC-10C）中，四类粗集料成型试件均有相对一致的结果，即：钢渣试件抗剪强度最大，玄武岩试件与 RAP 试件交替居于第二和第三位，石灰岩试件抗剪强度最低。这表明，钢渣粗集料由于具有较好的棱角性与耐磨耗特性，使其成型的混合料试件抗剪切特性最为突出；而尽管 RAP 料来源相对混杂，但经过精细化分离后，其抗剪切特性也能达到接近玄武岩效果；石灰岩试件由于粗集料整体强度较低、耐磨性也一般，导致其抗剪切特性居于末尾。

其次，由试验结果还能看出，当 SMA-10 作为罩面层，不同粗集料组成的混合料试件间抗剪强度结果差更明显。这表明，上下层接触面的粗糙程度会影响层间的抗剪切特性，而这一推论也可从图 6 中四种不同薄层罩面层+上面层的层间剪切强度试验结果得到验证：SMA-10+SMA-13 最大、SMA-10+AC-13 第二、AC-10C+SMA-13 第三、而 AC-10C+AC-13 最小。

图 6（b）为 SMA-13 作为上面层的层间抗剪强度试验结果。可以看出，整体而言四种粗集料组成的混合料试件具有与上面层为 AC-13 类似的试验结果，但两种不同薄层罩面种类间的抗剪强度结果差距更大。这是由于不同材料组成下的层间接触面的粗糙程度差异造成的。

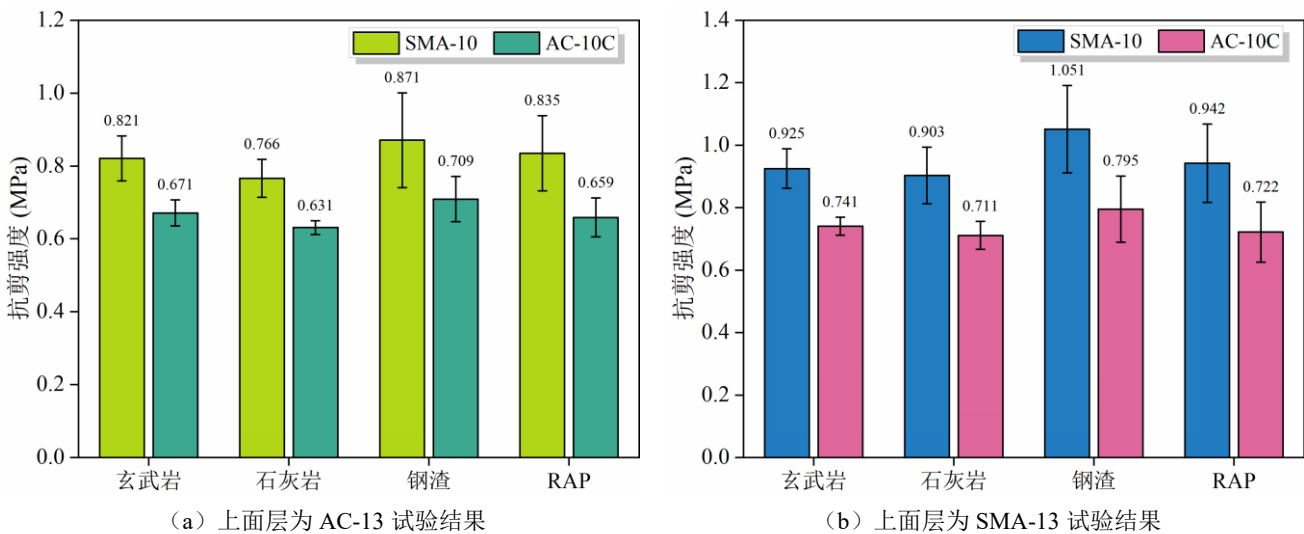


图 6 不同粗集料成型试件层间抗剪性能试验结果

Fig.6 Interlayer shear performance test results of specimens formed with different coarse aggregates

由上述分析可知，SMA-10 较 AC-10C 试件有更好的层间抗剪切性能。但值得注意的是，当 SMA-10 下承层表面过于光滑、SMA-10 压实程度不够或黏层油过量，导致抗剪强度主要受层间黏结性能决定时，AC-10C 可能出现更高的测试结果^[38]。整体而言，四种粗集料组成的混合料试件中，钢渣试件具有最好的层间抗剪切性能，玄武岩试件与 RAP 试件整体接近，居于第二和第三位，石灰岩试件最差，排在末尾。

2.2 功能特性

基于 1.3 节所述，本部分薄层罩面功能特性主要指不同磨耗次数下测试试件的抗滑性能。为分析四种粗集料成型试件的表面抗滑特性，分别采用了反映路表宏观纹理的 MTD 与微观纹理的 BPN 来评价不同磨耗次数下的测试试件，分析二者数值大小与在不同磨耗次数下的衰变率。

2.2.1 MTD 及其衰变特征

图 7 为四种粗集料成型的 AC-10C 与 SMA-10 混合料试件在不同磨耗次数下的 MTD 试验结果。整体而言，四种粗集料成型试件的 MTD 均随着磨耗次数的增加而不断衰减，在初始阶段下降幅度明显（快速衰变期），但当到达一定磨耗次数后下降幅度逐渐变缓（缓慢衰变期）^[39]。在横向对比看来，钢渣试件呈现出显著优异的抗滑耐久性，其 MTD 随磨耗次数增加下降幅度最小；其次为玄武岩试件，其 MTD 变化与钢渣试件间具有显著差距，但仍然高于石灰岩试件与 RAP 试件；居于末尾的为石灰岩试件与 RAP 试件，二者因材料组成差异交替居于第三与第四位，但对比来看，二者 MTD 差距并不是很大，这表明二者抗滑耐久性均较差。值得注意的是，SMA-10 试件在最初磨耗阶段，其试验结果均有一个明显的上升趋势，这是由于 SMA-10 试件油膜较厚，再被磨耗之后，其粗集料组成的表面纹理更加突出造成的^[40]。此外，SMA-10 较 AC-10C 试件 MTD 数值整体更高，这表明 SMA-10 级配抗滑性能更好。

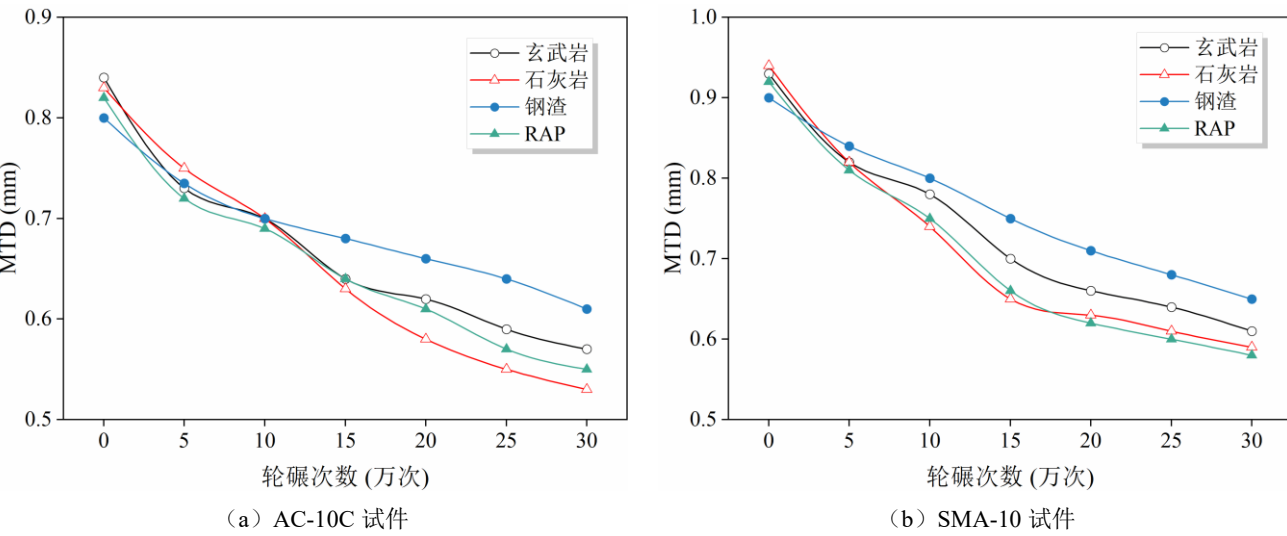


图 7 不同粗集料成型试件 MTD 试验结果

Fig.7 MTD test results of specimens formed with different coarse aggregates

为进一步定量描述四种粗集料成型试件的 MTD 变化情况，采用不同磨耗次数下测试试件的 MTD 之差占初始 MTD 的百分比（构造深度衰变率）^[41-42]进行评价，其结果如表 9 所示。

由表 9 可知，四种粗集料成型试件在同一级配下，其初始 MTD 差别并不明显，表明尽管粗集料种类与形貌不同，但其整体仍具有相近的宏观表面纹理。且随着磨耗次数的增加，四种试件出现不同程度的 MTD 衰变情况。其中钢渣试件较其他三种试件呈现出显著较低的 MTD 衰变率与衰变速率，说明钢渣在耐磨性方面较其他三种材料具有较大优势；玄武岩试件、石灰岩试件与 RAP 试件结果显示，石灰岩试件、RAP 试件的 MTD 衰变率与衰变速率相互接近，表明二者耐磨耗特性比较接近，而玄武岩试件相比较而言，其评价指标变化均略小，表明耐磨性较石灰岩试件与 RAP 试件稍具优势。

表 9 不同粗集料成型试件 MTD 衰变率计算结果

Tab.5 Calculation results of MTD decay rates for specimens formed with different coarse aggregates

混合料类别	初始 MTD/mm	最终 MTD（30 万次）/mm	MTD 衰变率/%	衰变速率/（0.01mm/万次）	
AC-10C	玄武岩试件	0.86	0.57	33.72	0.97
	石灰岩试件	0.83	0.53	36.14	1.00
	钢渣试件	0.80	0.61	23.75	0.63
	RAP 试件	0.85	0.55	35.29	1.00

SMA-10	玄武岩试件	0.93	0.61	34.41	1.07
	石灰岩试件	0.97	0.59	39.18	1.27
	钢渣试件	0.90	0.65	27.78	0.83
	RAP 试件	0.93	0.58	37.63	1.17

2.2.2 BPN 及其衰变特征

图 8 为四种粗集料成型的 AC-10C 与 SMA-10 混合料试件在不同磨耗次数下的 BPN 试验结果。与 MTD 变化过程类似，BPN 变化过程同样呈现初期下降较快，后期逐渐变缓的特征，这表明磨耗过程对宏观纹理与微观纹理均具有负面作用。其次，四种粗集料成型试件的 BPN 结果也基本与 MTD 结果一致，均为钢渣试件耐磨耗特性最优，玄武岩试件次之，而 RAP 试件与石灰岩试件最差。这表明微观纹理与宏观纹理的变化规律整体具有一致性。此外，在 SMA-10 试件测试过程中，BPN 在磨耗初期也呈现出短暂上升现象，这同样是由于 SMA 中较厚的沥青膜厚被磨去，露出集料表面纹理造成的微观纹理增强现象。此外，SMA-10 较 AC-10C 试件 BPN 数值整体更高，这表明 SMA-10 级配抗滑性能更好。

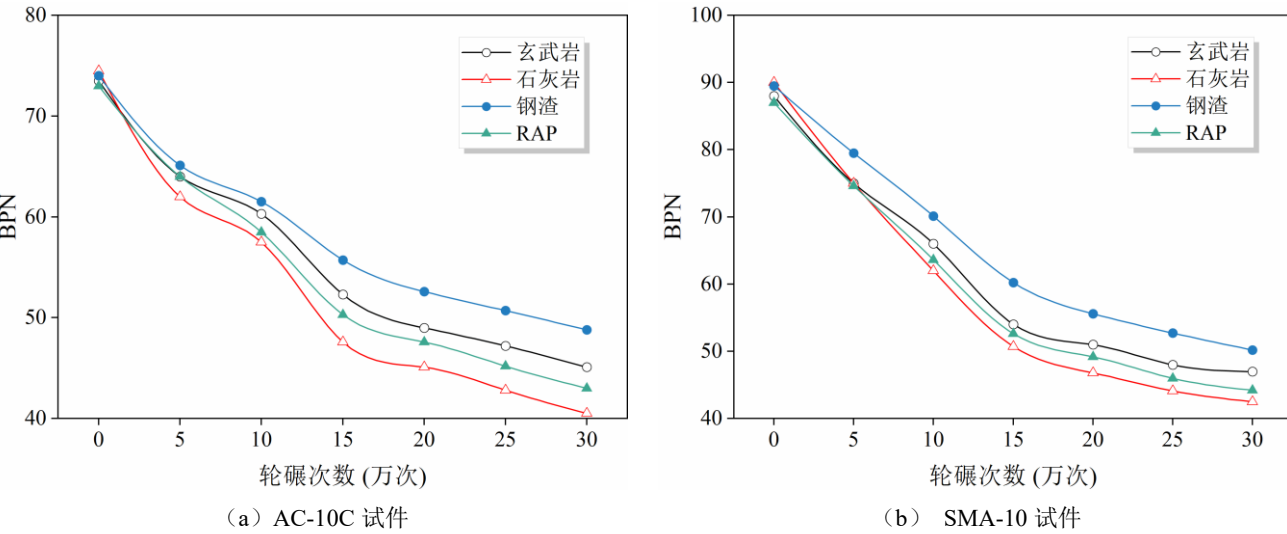


图 8 不同粗集料成型试件 BPN 试验结果

Fig.8 BPN test results of specimens formed with different coarse aggregates

同 MTD 分析过程类似，引入 BPN 衰变率与衰变速率两个指标来评价四种粗集料成型试件的 BPN 变化特征，结果如表 10 所示。由表可知，同一级配组成的四种粗集料成型试件的初始 BPN 值同样差别不大，表明其初始微观纹理处于相对接近的水平；但随着磨耗次数的增加，最终结果表明钢渣试件具有较明显的耐磨耗优势，玄武岩试件紧随其后居于第二位，RAP 试件第三位，而石灰岩试件耐磨耗性能最差。此外，BPN 衰变率与衰变速率结果表明，四种粗集料成型试件的 BPN 衰变较 MTD 衰变更大，这表明磨耗过程对宏观纹理与微观纹理的消耗程度并不完全等同，对微观纹理的影响更大。

表 10 不同粗集料成型试件 BPN 衰变率计算结果

Tab.6 Calculation results of BPN decay rates for specimens formed with different coarse aggregates

混合料类别		初始值/BPN	最终值（30 万次）/BPN	BPN 衰变率/%	衰变速率/（BPN/万次）
AC-10C	玄武岩试件	73.5	45.1	38.64	0.95
	石灰岩试件	74.3	40.2	45.90	1.14
	钢渣试件	74.0	48.8	34.05	0.84
	RAP 试件	73.8	43.7	40.79	1.00
SMA-10	玄武岩试件	88.8	47.7	46.28	1.37

石灰岩试件	90.4	42.5	52.99	1.60
钢渣试件	89.4	50.2	43.85	1.31
RAP 试件	87.1	44.2	49.25	1.43

4 结论

本文选用玄武岩、石灰岩、钢渣以及精细化分离 RAP 料各自作为薄层罩面粗集料,对比分析其在 SMA-10 与 AC-10C 两种配合比下的服役性能变化情况,得到如下结论:

1) 钢渣作为薄层罩面粗集料,在高温稳定性、层间抗剪性能及抗滑性能方面,均优于玄武岩、石灰岩及精细化分离 RAP 粗集料所组成测试试件,仅在低温抗裂性方面略低于石灰岩测试试件。然而,受较高吸水率影响,在多次冻融循环试验时,钢渣试件易吸水而发生冻胀,出现 TSR 值下降较快,使水稳定性能处于石灰岩和玄武岩试件之间。但综合看来,钢渣一般为薄层罩面粗集料最优选择。

2) SMA-10 薄层罩面测试试件整体服役性能,包括高温稳定性、低温抗裂性、水稳定性、层间抗剪性能等关键路用性能和抗滑性能功能特性,均显著优于 AC-10C 薄层罩面测试试件,因此在预算许可与噪声要求不高的应用场景下,宜优先选择 SMA-10 作为薄层罩面级配。

3) 精细化分离 RAP 料作为薄层罩面粗集料,受自身料源一般为多种岩性集料混合物影响,服役性能存在一定波动,但其整体服役性能几乎均处于四类材料最末尾,甚至抗冻融循环能力接近规范下限。这主要是由于 RAP 料原材料本身基本力学性能就较差导致的,同时由于 RAP 料吸水率偏高,且粗集料表面仍存在一定旧沥青薄膜残留,造成界面黏结性能不足、对水敏感性高,最终导致抗冻融循环表现较差。因此,精细化分离 RAP 料在后续应用过程中需重点验证其力学性能,尤其抗冻融能力。

参考文献:

[1] 《中国公路学报》编辑部. 中国路面工程学术研究综述·2024 [J]. 中国公路学报, 2024, 37(3): 1 - 81.
EDITORIAL DEPARTMENT OF CHINA JOURNAL OF HIGHWAY AND TRANSPORT. Review on China's Pavement Engineering Research: 2024 [J]. China Journal of Highway and Transportation, 2024, 37(3): 1-81.

[2] 曹东伟, 郭清, 毛利建, 等. 基于集料混掺设计的沥青超薄磨耗层抗滑特性 [J]. 公路交通科技, 2023, 40(S1): 107 - 17.
CAO D W, GUO Q, MAO L J, et al. Skid-resistance Characteristics of Asphalt Ultra-thin Friction Course Based on Aggregate Blending Design [J]. Journal of Highway and Transportation Research and Development, 2023, 40(S1): 107-17.

[3] DING L, WANG X, ZHANG K, et al. Durability evaluation of easy compaction and high-durability ultra-thin overlay [J]. Construction and Building Materials, 2021, 302: 124407.

[4] CHEN S, GONG F, GE D, et al. Use of reacted and activated rubber in ultra-thin hot mixture asphalt overlay for wet-freeze climates [J]. Journal of Cleaner Production, 2019, 232: 369-78.

[5] 周阳阳, 康爱红, 吴帮伟, 等. 玄武岩纤维几何参数对 SMA-5 薄层罩面性能的影响 [J]. 中国科技论文, 2023, 18(6): 623 - 9.
ZHOU Y Y, KANG A H, WU B W, et al. Influence of basalt fiber geometric parameters on performance of SMA-5 thin overlayer asphalt mixture [J]. CHINA SCIENCEPAPER, 2023, 18(6): 623-9.

[6] 罗运辉, 安昶. 沥青路面预防性养护应用效果对比研究 [J]. 公路, 2022, 67(6): 352 - 9.
LUO Y H, AN C. Comparisons and Research on the Application Effect of Preventive Maintenance of Asphalt Pavement [J]. HIGHWAY, 2022, 67(6): 352-9.

[7] 沙爱民. 道路工程技术发展方向与路径探究 [J]. 中国公路学报, 2026, 39(5): 94 - 110.
SHA A M. Exploration of the Development Trend and Path of Road Engineering Technology [J]. China Journal of Highway and Transport, 2026, 39 (5): 94-110.

[8] GUO M, ZHANG R, DU X, et al. A State-of-the-Art Review on the Functionality of Ultra-Thin Overlays Towards a Future Low Carbon Road Maintenance [J]. Engineering, 2024, 32(1): 82-98.

[9] 郭特红, 张文娜, 陈华鑫, 等. 罩面沥青混合料路用性能对比 [J]. 公路, 2015, 60(1): 7 - 12.
GUO T H, ZHANG W N, CHEN H X, et al. Comparison and Study of Pavement Performance of Asphalt Mixture [J]. HIGHWAY,

2015, 60(1): 7–12.

- [10] 徐鸥明, 曹志飞, 李明月, 等. 超薄罩面沥青混凝土应用与发展综述 [J]. 中国科技论文, 2020, 15(4): 425–31.
XU O M, CAO Z F, LI M Y, et al. Review of ultra-thin overlay asphalt concrete application and development [J]. CHINA SCIENCEPAPER, 2020, 15(4): 425–31.
- [11] 张海涛, 孙俊锋, 刘作强, 等. 基于力学性能和各向异性的排水性沥青磨耗层优化 [J]. 科学技术与工程, 2021, 21(14): 5997–6003.
ZHANG H T, SUN J F, LIU Z Q, et al. Optimization of wear layer of drainage asphalt base on mechanical properties and anisotropy [J]. Science Technology and Engineering, 2021, 21(14): 5997–6003.
- [12] 刘朝晖 沙庆林. 超薄层沥青混凝土 SAC-10 矿料级配比较试验研究 [J]. 中国公路学报, 2005, (1): 11–7.
LIU C H, SHA Q L. Comparison testing research on aggregate gradation of ultra-thin layer asphalt concrete SAC-10 [J]. China Journal of Highway and Transport, 2005, (1): 11–7.
- [13] 屈甜, 刘一濛, 谢清忠, 等. 基于抗滑性能的改进型多点支撑薄层罩面级配设计与性能研究 [J]. 中外公路, 2019, 39(6): 200–5.
QU T, LIU Y M, XIE Q Z, et al. Improved Gradation Design and Performance Study of Multi-point Support Thin Surface Layer Based on Anti-slip Properties [J]. China Foreign Highway, 2019, 39(6): 200–5.
- [14] CUI W, WU K, CAI X, et al. Optimizing Gradation Design for Ultra-Thin Wearing Course Asphalt [J]. Materials (Basel, Switzerland), 2020, 13(1): E189–E.
- [15] PAZZINI M, TARSI G, TATARANNI P, et al. Mechanical Characterization of Thin Asphalt Overlay Mixtures with 100% Recycled Aggregates [J]. Materials (1996-1944), 2023, 16(1).
- [16] 宗海, 朱文白, 汪昊, 等. 基于三维细观空隙的超薄罩面层间洒布量设计与性能评价 [J]. 科学技术与工程, 2023, 23(36): 15627–33.
ZONG H, ZHU W B, WANG H, et al. Design and performance evaluation of interlayer dosage of ultra-thin overlay based on three-dimensional and mesoscopic void [J]. Science Technology and Engineering, 2023, 23(36): 15627–33.
- [17] 罗程, 颜峰, 夏海廷, 等. 钢渣沥青混合料薄层罩面层间剪切性能研究 [J]. 硅酸盐通报, 2021, 40(12): 4197–208.
LUO C, YAN F, XIA H T, et al. Interlayer Shear Performance of Steel Slag Asphalt Mixture Thin Overlay [J]. BULLETIN OF THE CHINESE CERAMIC SOCIETY, 2021, 40(12): 4197–208.
- [18] 蔡俊华. 玻璃纤维超薄罩面沥青混合料路用性能 [J]. 长安大学学报(自然科学版), 2019, 39(5): 20–7.
CAI J H. Road performance of glass fiber ultra-thin overlay asphalt mixture [J]. Journal of Chang'an University (Natural Science Edition), 2019, 39(5): 20–7.
- [19] 赵颖, 冯驰, 都魁林. 基于黏结性恢复的再生超薄罩面研究与应用 [J]. 公路, 2024, 69(6): 79–84.
ZHAO Y, FENG C, DU K L. Research and Application of Recycled Ultra-thin Overlay Based on Bond Recovery [J]. HIGHWAY, 2024, 69(6): 79–84.
- [20] 张苏豫, 李俊辉, 张增平, 等. 道路超薄磨耗层材料研究进展 [J]. 化工新型材料, 2025, 53(6): 222–9.
ZHANG S Y, LI J H, ZHANG Z P, et al. Research progress on ultra-thin wearing course materials for roads [J]. NEW CHEMICAL MATERIALS, 2025, 53(6): 222–9.
- [21] 交通运输部公路科学研究院. 公路工程沥青及沥青混合料试验规程: JTG 3410–2005 [S]. 北京: 人民交通出版社, 2025.
RESEARCH INSTITUTE OF HIGHWAY MINISTRY OF TRANSPORT. Standard Test Methods of Asphalt and Asphalt Mixture for Highway Engineering: JTG 3410–2025 [S]. Beijing: China Communications Press, 2025.
- [22] 交通运输部公路科学研究院. 公路沥青路面施工技术规范: JTG F40–2004 [S]. 北京: 人民交通出版社, 2004.
RESEARCH INSTITUTE OF HIGHWAY MINISTRY OF TRANSPORT. Technical Specifications for Construction of Highway Asphalt Pavements: JTG F40–2004 [S]. Beijing: China Communications Press, 2004.
- [23] 柳力, 朱晓明, 刘朝晖, 等. 钢渣掺量对橡胶沥青混合料 ARAC-13 性能的影响 [J]. 材料导报, 2023, 37(10): 66–72.
LIU L, ZHU X M, LIU C H, et al. Effect of Steel Slag Content on Performance of Rubber Mixture ARAC-13 [J]. MATERIALS REPORTS, 2023, 37(10): 66–72.
- [24] 余苗, 吴国雄. 干法橡胶改性沥青混合料配合比设计研究 [J]. 建筑材料学报, 2014, 17(1): 100–105.
YU M, WU G X. Rubber Modified Asphalt Mixture Research on the Mix Design of Dry Process Crumb [J]. JOURNAL OF BUILDING MATERIALS, 2014, 17(1): 100–105.
- [25] 交通运输部公路科学研究院. 公路工程集料试验规程: JTG 3432–2024 [S]. 北京: 人民交通出版社, 2024.
RESEARCH INSTITUTE OF HIGHWAY MINISTRY OF TRANSPORT. Test Methods of Aggregates for Highway Engineering: JTG 3432–2024 [S]. Beijing: China Communications Press, 2024.
- [26] LIU Z, WANG X, LUO S, et al. Asphalt mixture design for porous ultra-thin overlay [J]. Construction and Building Materials, 2019, 217: 251–64.
- [27] LIU W, WANG J, WU S, et al. Analysis of the influence of interface features on shear strength between thin overlay and base

- layer via random forest regression [J]. Construction and Building Materials, 2025, 462: 139870.
- [28] 辛顺超, 杨静. 橡胶粉改性沥青混合料罩面养护应用技术研究 [J]. 公路工程, 2014, 39(6): 266 – 70+93.
XIN S C, YANG J. Application Technology Research on Overlay Maintenance of Rubber Modified Asphalt Mixture [J]. Highway Engineering, 2014, 39(6): 266–70+93.
- [29] 钱璞, 张阳, 杨勇, 等. 纤维对 SBS 改性乳化沥青薄层罩面路用性能的影响研究 [J]. 应用化工, 2020, 49(S2): 75 – 8+90.
QIAN P, ZHANG Y, YANG Y, et al. Effect of mineral fibers on road performance of SBS modified emulsified asphalt thin overlay [J]. Applied Chemical Industry, 2020, 49(S2): 75–8+90.
- [30] YAN C, LI Q, WANG J, et al. Evaluation for long-term skid resistance of ultra-thin asphalt overlay based on texture characteristics [J]. Construction and Building Materials, 2024, 438: 137151.
- [31] 张争奇, 梁庆武, 郑文章, 等. 混配型钢渣沥青混合料抗滑耐久性能研究 [J]. 应用化工, 2023, 52(12): 3265 – 9.
ZHANG Z Q, LIANG Q W, ZHENG W Z, et al. Study on the skid durability of mixed steel slag asphalt mixture [J]. Applied Chemical Industry, 2023, 52(12): 3265–9.
- [32] 张争奇, 谢菲, 张天天, 等. 钢渣沥青混合料超薄磨耗层路用性能及其时变性 [J]. 江苏大学学报(自然科学版), 2023, 44(4): 475 – 82.
ZHANG Z Q, XIE F, ZHANG T T, et al. Road performance and time variation of ultra-thin wear layer of steel slag asphalt mixture [J]. Journal of Jiangsu University (Natural Science Edition), 2023, 44(4): 475–82.
- [33] 徐金枝, 郝培文, 郭晓刚, 等. 厂拌热再生沥青混合料组成设计方法综述 [J]. 中国公路学报, 2021, 34(10): 72-88.
XU J Z, HAO P W, GUO X G, et al. Review of Mix Design Method of Hot In-plant Recycled Asphalt Mixture [J]. China Journal of Highway and Transport, 2021, 34(10): 72-88.
- [34] ZHONG T, ZHENG Y, CHEN Z, et al. Utilization of steel slag as coarse aggregate and filler in stone mastic asphalt (SMA) mixture: Engineering performance, environmental impact and economic benefits analysis [J]. Journal of Cleaner Production, 2024, 450: 141891.
- [35] ZHOU X W, ZHEN J W, HAO Y G, et al. Steel slag aggregate property improvement in cold mixed asphalt mixtures through surface modification treatment [J]. Journal of Cleaner Production, 2024, 477: 143889.
- [36] 交通运输部公路科学研究院. 公路沥青路面再生技术规范: JTG/T 5521–2019 [S]. 北京: 人民交通出版社, 2019.
RESEARCH INSTITUTE OF HIGHWAY MINISTRY OF TRANSPORT. Technical Specification for Recycled Asphalt Pavement on Highways: JTG/T 5521–2019 [S]. Beijing: China Communications Press, 2019.
- [37] 湖南省交通运输厅. 沥青路面热再生施工与验收技术规范: DB43/T2141–2021 [S], 2021.
Department of Transportation of Hunan Province. Technical specifications for hot recycling construction and acceptance of asphalt pavement: DB43/T2141–2021 [S], 2021.
- [38] 李梦林, 吴少鹏, 谢君, 等. 用于预养护的钢渣超薄磨耗层沥青混合料组成设计与性能研究 [J]. 武汉理工大学学报(交通科学与工程版), 2024, 48(5): 964-968.
LI M L, WU S P, XIE J, et al. Research on Composition Design and Performance of Ultra-thin Wear Layer of Asphalt Pavement [J]. Journal of Wuhan University of Technology (Transportation Science & Engineering), 2024, 48(5): 964-968.
- [39] 马健萍, 许新权, 范倩, 等. 基于加速加载试验的 SMA-13 沥青混合料抗滑性能研究 [J]. 公路, 2022, 67(7): 388 – 94.
MA J P, XU X Q, FAN Q, et al. Study on the Anti-slip Performance of SMA-13 Asphalt Mixture Based on Accelerated Loading Test [J]. HIGHWAY, 2022, 67(7): 388–94.
- [40] 任万艳, 王浩全, 王馨娅, 等. SMA-10 超薄磨耗层微观纹理早期衰变特性 [J]. 长安大学学报(自然科学版), 2026, 46(2): 28 – 42.
REN W Y, WANG H Q, WANG X Y, et al. Early decay characteristics of micro-texture of SMA-10 ultra-thin wearing course [J]. Journal of Chang'an University (Natural Science Edition), 2026, 46(2): 28-42.
- [41] 吴建涛, 刘金鹏, 韩雨廷, 等. 不同拌和速度下再生沥青混合料均匀性演变模拟研究[J]. 华东交通大学学报, 2025, 42(2): 76-86.
WU J T, LIU J P, HAN Y T, et al. Simulation Study on the Evolution of Uniformity of Reclaimed Asphalt Pavement with Different Mixing Speeds. Journal of East China Jiaotong University, 2025, 42(2): 76-86.
- [42] 杜恩从. 高韧冷拌树脂 EPSMA 混合料路用性能试验研究 [J]. 公路, 2026, 71(6): 387 – 93.
DU E C. Experimental Study on the Road Performance of High-Toughness Cold-Mixed EPSMA Resin Mixture [J]. HIGHWAY, 2026, 71(6): 387–93.

第一作者: 景进辉 (1988—), 男, 工程师, 研究方向为高速公路建设管理方面内容。

通信作者: 蔡军 (1989—), 男, 副教授, 博士, 硕士生导师, 研究方向为路面服役性能评价与提升。