DOI:10.16799/j.cnki.csdqyfh.260304

基于应力吸收层材料组成及路用性能验证的研究

陈岩松,马培建
(青岛理工大学 土木工程学院,山东 青岛 266525)

摘 要: 应力吸收层是路面结构中极具实用性的层间夹层结构,这类材料自身具备优异的变形适应能力与弹性恢复性能,能够有效吸收、消散旧基层接缝处传递至加铺面层的集中应力,从而延缓反射裂缝的萌生与扩展。通过设计应力吸收层材料并研究其路用性能,在已有的油石比前提下进行路用性能实验,对比验证原有SBS改性沥青在原有基础上进行复合改性后的路用性能。可以得出:在已知油石比的前提下,经复合改性处理后的混合料,路用性能得到显著提升。研究结果可为路面结构抗裂防治提供借鉴。

关键词: 应力吸收层;路用性能;复合改性;抗裂性能;沥青混合料
中图分类号: U416 **文献标志码:** A **文章编号:** 1009-7716(2026)09-0048-05

Research on Composition of Stress-absorbing Layer Materials and Verification of Pavement Performance

CHEN Yansong, MA Peijian
(School of Civil Engineering, Qingdao University of Technology, Qingdao 266525, China)

Abstract: The stress-absorbing layer is a highly practical interlayer structure in pavement structures. This type of material itself has the excellent deformation adaptability and elastic recovery performance, which can effectively absorb and dissipate the concentrated stress transmitted from the joints of the old base course to the overlay surface course, thereby delaying the initiation and propagation of reflective cracks. By designing the materials of the stress-absorbing layer and studying their pavement performance, the pavement performance tests are conducted under the existing asphalt-aggregate ratio to compare and verify the pavement performance of the original SBS modified asphalt after composite modification on the original basis. It can be concluded that on the premise of a known asphalt-aggregate ratio, the pavement performance of the mixture after composite modification has been significantly improved, which can provide a reference for the crack resistance and prevention of pavement structures.

Keywords: stress-absorbing layer; pavement performance; composite modification; crack resistance; asphalt mixture

0 引 言

在常见的路面反射裂缝的治理过程中,通常在基层和面层之间设置应力吸收层[1-3]。作为常见的反射裂缝的防治措施,应力吸收层是目前治理反射裂缝使用最多并且行之有效的措施,它可以将面层或基层传递过来的应力减小,从而抑制反射裂缝的开裂。姜利等[4]通过有限元分析表明,在“白改黑”路面中设置应力吸收层,综合考虑性价比等其他因素,取厚度为 3 cm 左右较为适宜。简亮等[5]以 SBS 改性沥青为基料制备不同掺量的高弹改性沥青,经 OT 试验对比发现,在常规、浸水及热老化条件下,其抗反射裂缝性能均优于 SBS 改性沥青。HOU F J 等[6]借助扩展有限元法,针对全厚式沥青路面和半刚性基层路面结构,开展了抗疲劳开裂性能的对比分析与深入探究,发现可通过降低应力吸收层模量增强抗裂性能。刘朝晖等[7]对沥青面层与刚性基层的荷载应力、温度应力以及两类应力之间的交互作用展开分析,发现沥青面层不仅直接承受车辆荷载与外界环境的作用,还能够优化刚性基层的应力场与温度场,对于整体路面使用性能提升与服役寿命延长起到关键作用。李智等[8]利用 CAVF 法设计 UFAC 级配,可获得良好的主骨架间隙率和矿料间隙率。Adepu R 等[9]通过研究 Sasobit 温拌剂和玄武岩纤维的协同作用,显著提升其断裂韧性、抗疲劳性与抗车辙能力,为沥青路面发展提供参考。王成业等[10]

收稿日期: 2026-03-23
作者简介: 陈岩松(2000—),男,硕士,从事道路工程研究工作。

通过研究发现，纤维橡胶沥青应力吸收层通过消散裂尖应变和促使裂缝多向发展，共同延缓反射裂缝扩展。欧震宇等[11]通过研究土工合成材料，发现玻纤格栅的防裂效果最好。张文杰等[12]研究发现设置夹层土工布、土工格栅、改性沥青黏层等对减小水平拉应力更有效，为防治沥青混凝土加铺层反射裂缝提供了新的途径。Xing 等[13]指出，防止反射裂缝的出现是研究者的重要任务，并提出采用 Sampave 这种新的结构层来有效分散来自水泥混凝土的应力。于宗鑫[14]对比研究了富油高黏改性沥青混凝土 AC-5 应力吸收层与传统橡胶沥青应力吸收层的路用及应用性能，发现 AC-5 在高低温稳定性、水稳定性、抗反射裂缝性上均显著更优。

基于上述分析，可对应力吸收层混合料进行路用性能分析。

1　应力吸收层混合料材料设计及最佳油石比确定

1.1　沥青制备过程及技术指标

本研究为了提升应力吸收层路用性能，主要考虑通过优化现有混合料级配，从集料角度提升其原有路用性能；其次可通过在原有 SBS 改性沥青的基础上再次改性，提升原有改性沥青特性，提高其路用性能。

根据以往的研究及课题组需求，研究复合改性前后的各项指标。本研究所用高弹改性沥青，通过添加沥青质量 8% 高弹改性剂，将 SBS 改性沥青与高弹改性剂在 180 ℃条件下投入高速搅拌机，随后经 3 000 r/min 剪切处理 30 min，再进行 5 h 搅拌处理，然后放入烘箱进行 12 h 处理，最终完成二次复合改性。其制备工艺流程见图 1。

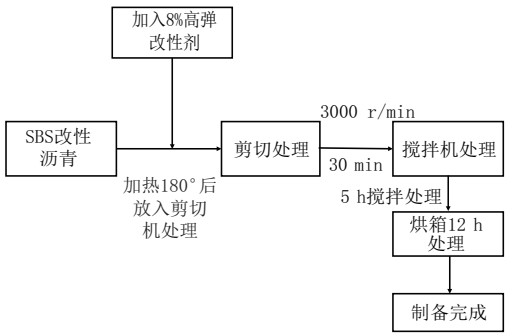


图 1　高弹改性沥青制备图

本次试验所选用的 SBS 改性沥青，其各项性能指标均完成测定，具体检测结果如表 1 所示。经上述工艺制备完成的高弹改性沥青，各项技术指标检测数据如表 2 所示。

表 1　SBS 改性沥青技术指标表

技术指标	试验结果	试验方法
软化点/℃	68	T0606
针入度/0.1 mm	56.3	T0604
延度（5 ℃）/cm	32.1	T0605
弹性恢复（25 ℃）/%	88.6	T0662

表 2　高弹改性沥青技术指标表

技术指标	试验结果	试验方法
软化点/℃	89	T0606
针入度/ 0.1 mm	100.3	T0604
延度（5 ℃）/cm	75.2	T0605
弹性恢复（25 ℃）/%	94.8	T0662

通过试验结果可知，高弹改性沥青各项技术指标得到提高，包括更高的弹性恢复能力及较大的延度。基于此，可通过对比验证其应力吸收层混合料的路用性能。

1.2　集料设计

改性沥青应力吸收层的集料组成主要采用以细集料为特征的混合料设计，主要采用 0~4.75 mm 集料与矿粉的组合体系。根据相关规范，集料采用玄武岩集料。由于应力吸收层油石比比普通混合料油石比大，故而在级配设计环节，矿粉的掺配比例远高于常规沥青混合料。

根据课题组要求，采用优质石灰岩矿粉作为填料，具体技术指标见表 3、表 4。

表 3　集料技术指标表

技术指标	集料	技术要求	试验方法
表观相对密度	2.732	≥2.50	T0328
坚固性/%	13	≥12	T0340
含泥量/%	0.9	≤3.0	T0333
砂当量	72	≥60	T0334

表 4　矿粉技术指标表

技术指标	矿粉	技术要求	试验方法
表观相对密度	2.715	≥2.50	T0352
含水量/%	0.39	≤1	T0103
外观	无团粒结块	无团粒结块	—
塑性指数/%	3.15	＜4	T0354
亲水指数	0.54	＜1	T0353

矿粉主要以石灰岩矿粉为原料，其主要特性是能增强沥青胶浆的黏附性和稳定性。根据表 3、表 4 的结果，集料及矿粉指标均达到技术要求，因此可满足设计应力吸收层混合料的要求。

1.3　混合料级配设计

由于应力吸收层所处应力状态复杂，集料的级配组成也是影响其路用性能的最重要的因素之一。

基于此，根据级配的相关要求，设计级配在限定的上下限之间，具体设计结果如表5、图2所示。

表5　混合料级配设计表

级配		筛孔尺寸/mm							
		9.5	4.75	2.36	1.18	0.6	0.3	0.15	0.075
筛孔通过率/%	设计级配	100	94.5	65.2	44.2	28.1	19	13	8.3
	级配上限	100	100	75	55	40	28	18	10
	级配中值	100	95	65	45	30	20	12.5	7.5
	级配下限	100	90	55	35	20	12	7	5

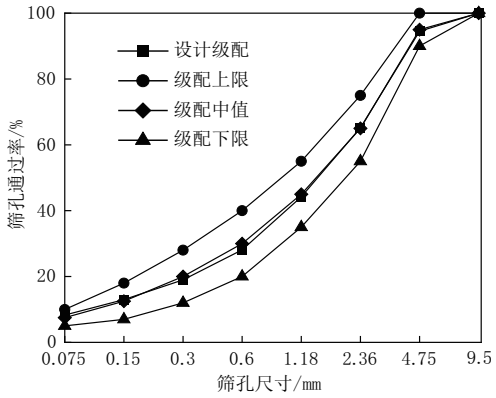


图2　应力吸收层混合料级配曲线

1.4　应力吸收层混合料最佳油石比确定

结合工程设计经验与室内试验实际条件，本研究初步拟定改性沥青混合料油石比为8.0%，并以此为中间值，按±0.5%的梯度设置多组油石比进行马歇尔试件制备。试件采用双面各击实50次的成型方式，通过测试各组马歇尔试件的路用性能指标，最终确定其最佳油石比。试验结果详见表6。

表6　不同油石比下混合料性能指标表

指标	油石比/%				
	7.0	7.5	8.0	8.5	9.0
试件毛体积密度/(g·cm^{-3})	2.478	2.481	2.487	2.482	2.479
矿料间隙率/%	21.8	22.0	22.1	22.3	23.1
试件空隙率/%	4.12	3.55	3.05	2.67	2.39
稳定度/kN	13.8	14.5	15.2	14.5	14.0
沥青饱和度/%	71.56	75.68	78.56	84.29	87.33
流值/mm	2.34	2.73	2.46	2.26	2.17

根据表6绘制各项指标与预测油石比的变化图，并根据图3确定其变化走势及最佳油石比计算方法进行计算，确定最佳油石比。

根据课题组经验及过往研究对各类指标进行选择，控制高弹改性沥青混合料的空隙率指标选择为3%。采用马歇尔击实仪成型的试件，其余指标选择范围如下：沥青饱和度为70%~85%，稳定度范围选择大于8 kN。

将图3中的各项曲线分别取值：选取毛体积密度峰值、稳定度峰值、目标空隙率中值及沥青饱和度中值所对应的油石比，求取平均值得到OAC_1。然后，依据空隙率2%~4%、沥青饱和度70%~85%、稳定度大于8 kN、流值2~4 mm的技术要求，确定有效沥青用量范围OAC_{min}至OAC_{max}，并取该区间中值为OAC_2

最佳油石比按$OAC=(OAC_1+OAC_2)/2$方法计算，最终得到最佳油石比为8.02%。

2　应力吸收层混合料路用性能验证

根据得到的细集料标准配合比及已知油石比，对比各种不同沥青混合料的性能指标并展开分析，通过不同试验验证复合改性后的应力吸收层混合料是否符合路用要求。本节通过验证对比两种改性沥青混合料不同路用性能指标，为提升应力吸收层混合抗裂性提供帮助。

2.1　应力吸收层混合料高温稳定性验证

根据规范，本试验通过车辙试验验证改性沥青混合料应力吸收层高温稳定性，设计油石比为8.02%。

混合料经拌和机充分拌和后，采用轮碾机碾压至设计压实度成型。碾压次数按照规定设置为300次，成型后冷却一天后进行实验。而后，根据规定将车辙实验仪设置为60℃，轮载设置为0.7 MPa，启动车辙实验仪并不断反复碾压试件，形成辙槽。

为保证试验结果准确，试验制作3组试件取平均值，进而减小误差，通过动稳定度来评价高温稳定性。具体试验结果见表7、图4。

通过图4、表6对比发现，同一级配条件下，复合改性后的改性沥青性能，其动稳定度大小远远大于传统改性沥青的动稳定度大小。实验结果表明，对原有SBS改性沥青实施复合改性处理后，可显著提高原有沥青混合料的整体路用性能，也能证明在油石比相同的条件下，高弹改性沥青混合料的高温稳定性能表现优异。

2.2　应力吸收层混合料水稳定性验证

水稳定性验证试验是评价沥青混合料在水分侵蚀下保持其原有性能能力的关键指标，也是应力吸收层等特种沥青混合料路用性能验证的核心环节。水损害主要表现为水分侵入沥青与集料界面，破坏黏附性，对于长期处于潮湿环境或需要承担防水功能的应力吸收层，其水稳定性的优劣直接决定工程成败。

本试验为验证复合改性后改性沥青混合料的抗水损害剥落能力，采用浸水马歇尔试验开展研究。

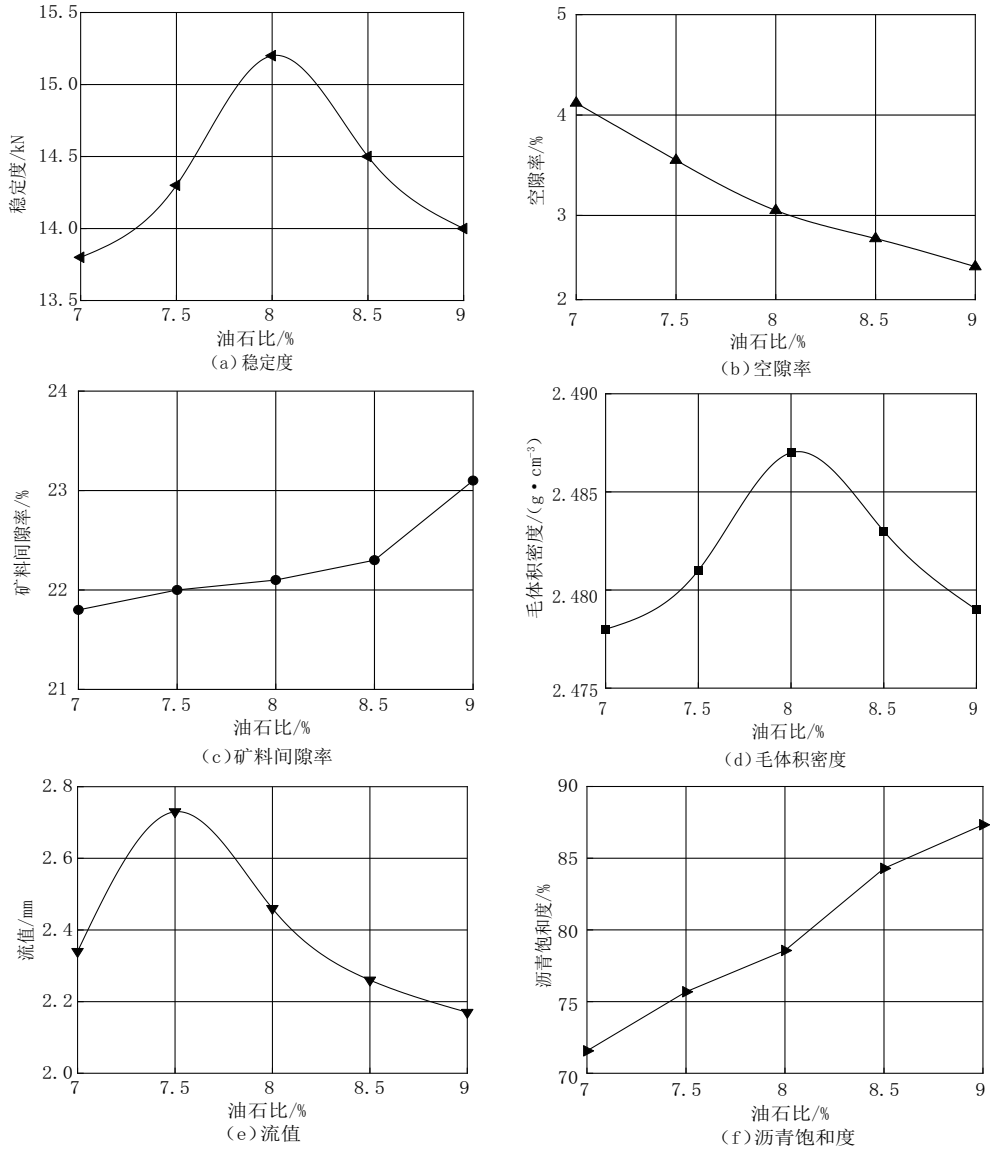


图3　改性沥青混合料马歇尔指标测定结果图

表7　沥青混合料高温稳定度结果表

混合料类型	试验温度/℃	车辙动稳定度/(次·mm⁻¹)				
		1组	2组	3组	均值	规范要求
SBS改性沥青	60	3 450	3 752	3 963	3 722	≥2 500
高弹改性沥青	60	6 156	6 435	6 656	6 416	≥2 500

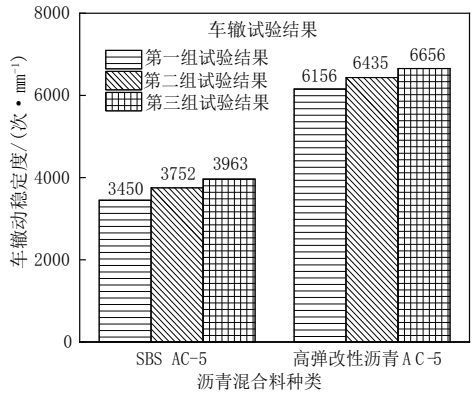


图4　高温稳定性动稳定度结果对比图

试验参数均满足相关标准,根据设计好的最佳油石比设计试验。将处理好的试件分两组处理:一组放入恒温水浴箱中,将温度调至60℃,在恒温水槽中保温40 min;另一组在设置同一温度条件下保温48 h。养护完成后分别进行测试。具体结果见表8。

表8　沥青混合料稳定度结果表

混合料类型	保温时间/min	稳定度/kN	浸水残留稳定度/%	规范要求/%
SBS改性沥青	40 min	13.26	95.3	≥80
	48 h	12.56		
高弹改性沥青	40 min	15.15	95.5	≥80
	48 h	14.48		

根据表8可知:在相同级配及油石比下,两种混合料的浸水残留稳定度均达到95%以上,并且符合规范要求的80%;高弹改性沥青混合料的稳定度指标优于SBS改性沥青混合料,证明经过复合改性后,

其水稳定性略有提升。

2.3　应力吸收层混合料低温稳定性验证

低温稳定性试验旨在验证沥青混合料在低温工况下的路用性能，主要将验证好油石比的沥青混合料制成小梁试件，通过万能试验机测定其最大弯曲应变。

低温弯曲小梁试件的具体制作步骤为：首先进行混合料拌合，将配置好的改性沥青加热至175 ℃（高弹改性沥青加热至185 ℃），矿料加热至175 ℃，再将筛选好的混合料投入沥青混合料搅拌机拌合90 s，然后加入改性沥青湿拌2.5 min，确保无花白料；将预制好的试件用切割机切好备用。将预制好的试件放入万能实验机，在-10 ℃环境下进行弯曲实验。具体结果见表9。

表9　沥青混合料低温稳定性结果表

沥青混合料类型	试验温度/℃	最大弯拉应变 με	规范要求 με
SBS改性沥青	-10	7 567.5	≥2 500
高弹改性沥青	-10	10 543.3	≥2 500

根据表9可知：相同级配条件下两种改性应力吸收层混合料在-10 ℃时最大弯拉应变均符合规范要求，可有效缓冲旧水泥板低温收缩产生的应力和应变；复合改性后，其最大弯拉应变明显提升，证明能够有效抵抗低温对改性沥青混合料的破坏，对提升抗裂性能起到了一定的作用。

3　结　论

本文通过研究复合改性沥青混合料配合比设计，在应力吸收层混合料最佳油石比恒定的条件下，进行了SBS改性沥青与复合改性沥青的路用性能对比试验，结论如下：

（1）采用改性剂对常规SBS改性沥青开展复合改性处理，得到的高弹改性沥青的软化点、针入度、延度等指标与原有SBS改性沥青相比有所提升。通过将4.75 mm及以下粒径的集料进行筛分，得到集料的配合比，可以结合现行规范及设计经验设计出合适的级配，并应用于应力吸收层混合料设计中。

（2）通过马歇尔指标测定，最佳油石比为8.02%，并利用最佳油石比进行路用性能验证。将应力吸收层混合料中SBS改性沥青进行复合改性处理后，混合料的高温稳定性、低温抗裂性、水稳定性等各项路用性能指标均实现不同程度提升，且所有检测指标均满足现行相关技术规范的要求。可为应力吸收层路用性能提升提供借鉴作用。

参考文献：

[1] Luan Y, Zhang W, Ma T, et al. Effect of existing pavement condition and overlaying strategy on the reflective cracking resistance of asphalt pavement[J]. Construction and Building Materials, 2023, 401: 132620.

[2] Saeid A ,Gholamali S .Experimental and statistical investigation on the performance of asphalt overlays reinforced with geocomposite in controlling the reflective cracks under different loadings and temperatures[J]. SN Applied Sciences, 2023, 5(8): 202.

[3] Sara S, Paolo L I, Giulio P, et al. Influence of Geocomposite Properties on the Crack Propagation and Interlayer Bonding of Asphalt Pavements [J]. Materials, 2021, 14(18): 5310.

[4] 姜利，苏禹，程维，等.基于应力吸收层的“白改黑”路面温度应力有限元分析[J].科学技术与工程，2019，19(3)：232-238.

[5] 简亮，杨金，萧彩梅，等.高弹改性沥青应力吸收层抗反射裂缝性能研究[J].武汉理工大学学报(交通科学与工程版)，2025，49(5)：1145-1150.

[6] Hou F, Li T, Li X, et al. Research on the anti-reflective cracking performance of a full-depth asphalt pavement[J]. Sustainability, 2021, 13(17): 9499.

[7] 刘朝晖，黄优，余时清，等.刚柔复合式路面结构与材料及发展趋势[J].中外公路，2024，44(2)：27-53.

[8] 李智，童竞.基于UFAC应力吸收层的抗反射裂缝性能评价[J].河南理工大学学报(自然科学版)，2025，44(1)：185-192.

[9] Ramesh Adepu, V. Venkat Ramayya, A. Mamatha, et al. Fracture studies on basalt fiber reinforced asphalt mixtures with reclaimed asphalt pavement derived aggregates and warm mix additives[J]. Construction and Building Materials, 2023, 386 (10): 131548.1-131548.15.

[10] 王成业，张欣，郭占山，等.玄武岩纤维沥青混合料及应力吸收层抗裂性能研究[J].塑料科技，2025，53(10)：91-96.

[11] 欧震宇，高冠群，陈畅朗，等.农村公路旧水泥混凝土路面加铺沥青混凝土层防裂试验研究[J].公路，2017，62(12)：245-248.

[12] 张文杰，王君.应力吸收层防治沥青混凝土加铺层反射裂缝机理分析及应用[J].公路，2009(8)：1-3.

[13] Xing L M, Chen F S, Li Z Z, et al. Performance and Application of Sampave Overlaying on Old Cement Concrete Pavement [C]//Advanced Materials Research.Bäch:Trans Tech Publications Ltd, 2011.

[14] 于宗鑫.改性沥青AC-5应力吸收层在公路养护中的应用[J].山西建筑，2026，52(3)：144-148.