DOI:10.14048/j.issn.1671-2579.2025.05.012
文章编号:1671-2579(2025)05-0113-09

摊铺式再生应力吸收层用高弹改性沥青性能研究

李靖[1],刘林林[1],朱启洋[1],李宁[2*],李龙[2]
(1.江苏现代路桥有限责任公司,江苏 南京 210018;2.河海大学 土木与交通学院,江苏 南京 210024)

摘要:为提升再生高弹改性沥青胶结料性能,实现RAP细料在应力吸收层设计中的高掺量、高质化利用,该文通过加入SBS改性剂、轻质组分油及渗透剂等成分,补充降解的SBS分子并降低分子间作用力,制备了高渗再生高弹改性沥青(ZGT-R),同时对比加入再生剂前后的普通再生高弹改性沥青,分析常规性能、弹性恢复、新旧沥青融合程度、流变性能及微观改性机理的差异。结果表明:相较于两种普通再生高弹改性沥青,ZGT-R的针入度、延度分别提升51.6%、22.4%,弹性恢复亦有所提高,体现出优秀的抗反射裂缝性能和再生效果;更高的黏度比也证明了ZGT-R在新旧沥青融合程度局限的突破;流变性能方面,老化沥青掺量为35%~55%时,ZGT-R具有更低的温度敏感性、应力敏感性,总体表现出更佳的抗变形能力;微观改性机理方面,ZGT-R中SBS呈现出致密的空间交联网络结构,证明了SBS的充分溶胀与扩散,为再生应力吸收层用高弹改性沥青设计提供了新思路。

关键词:再生应力吸收层;高弹改性沥青;RAP细料;新旧沥青融合程度;流变性能
中图分类号:U414 **文献标志码:**A

Performance of High-Elastic Modified Asphalt for Paving-Type Recycled Stress Absorption Layer

LI Jing[1], LIU Linlin[1], ZHU Qiyang[1], LI Ning[2*], LI Long[2]
(1. Jiangsu Xiandai Road&Bridge Co., Ltd., Nanjing, Jiangsu 210018, China; 2. College of Civil and Transportation Engineering, Hohai University, Nanjing, Jiangsu 210024, China)

Abstract: To enhance the performance of recycled high-elastic modified asphalt binder and achieve high-quality and high-content utilization of RAP fine materials in the design of stress absorbing layers, a highly permeable recycled high-elastic modified asphalt (ZGT-R) was prepared by adding SBS modifier, light component oil, and penetrant to replenish the degraded SBS molecules and reduce intermolecular forces. The conventional properties, elastic recovery, degree of fusion between new and aged asphalt, rheological properties, and micro-modification mechanism of ZGT-R and ordinary recycled high-elastic modified asphalt before and after the addition of the rejuvenator were analyzed. The results show that, compared with the two types of ordinary recycled high-elastic modified asphalt, the penetration and ductility of ZGT-R increase by 51.6% and 22.4%, respectively, and the elastic recovery also improves, demonstrating excellent anti-reflection cracking performance and regeneration effect. The higher viscosity ratio also proves that ZGT-R breaks through the limitation of the degree of fusion between new and aged asphalt. In terms of rheological properties, when the aged asphalt content is between 35% and 55%, ZGT-R exhibits lower temperature sensitivity and stress sensitivity and overall shows better anti-deformation ability. Regarding the micro-modification mechanism, the SBS in ZGT-R exhibits a dense spatial cross-linked network structure, proving the full swelling and diffusion of SBS and providing a new idea for the design of high-elastic modified asphalt for recycled stress absorbing layers.

Keywords: recycled stress absorption layer; high-elastic modified asphalt; RAP fine material; degree of fusion between new and aged asphalt; rheological property

收稿日期:2025-07-05 **修回日期:**2025-09-30
基金项目:国家自然科学基金资助项目(编号:52278451);江苏现代路桥有限责任公司科技项目(编号:2022JKY18)
作者简介:李靖,男,博士,工程师. E-mail:phdlijing@qq.com
***通信作者:**李宁,男,博士,副教授. E-mail:lining24@hhu.edu.cn

0 引言

截至2024年底，中国高速公路通车里程已达19.07万km[1]，其中半刚性基层沥青路面结构凭借其抗压强度高、板体性好的特点得到广泛应用[2-4]。然而，半刚性基层常用的水泥、石灰等材料因其温敏性及水敏性，在低温干燥的环境条件下存在一定自然收缩，易导致基层开裂，自下而上扩展形成反射裂缝[5-7]，并在荷载与冻融循环作用下诱发系列次生灾害，严重影响路面使用质量及交通安全。为防治反射裂缝，缓解路面早期破坏，国内外对增加面层厚度、优化基层组成设计、加铺土工合成材料及设置应力吸收层等方案开展了应用研究[8-11]，其中摊铺式应力吸收层可黏结面层与基层，通过材料的高弹性、柔韧性有效分散并吸收集中应力，成为高等级公路抵抗反射裂缝的优选措施[12]。

在延缓甚至阻止反射裂缝继续发生、发展的同时，沥青路面养护维修工程中铣刨回收的大量沥青路面材料（Reclaimed Asphalt Pavement，RAP）也亟待合理再生利用[13-15]。经破碎筛分处理后的RAP细料粒径小、沥青含量高，与摊铺式应力吸收层细料占比大、油石比高的设计特点相匹配[16]，但也存在RAP中老化沥青脆硬、再生融合程度有限、再生混合料施工和易性差、压实困难等问题，因此，如何将RAP细料应用于摊铺式再生应力吸收层，对沥青路面延寿与绿色养护具有重要现实意义。沥青胶结料是应力吸收层中RAP成功再生的关键。阳经培[17]针对性研发具有再生功能的高性能SBS改性乳化沥青，并优化矿料级配、沥青用量及粉胶比，设计的冷再生应力吸收层混合料具有良好功能性；祝谭雍等[18-19]先采用稳定型橡胶沥青验证了厂拌热再生技术对应力吸收层的适用性，后基于复合改性橡胶沥青进一步开展研究发现，为保障再生料具有充分的抗裂性能，旧料掺量不宜超过35%；彭冬青[20]自制聚合物胶粉复合改性沥青并用于AC-10再生应力吸收层设计，考虑扭剪疲劳性能及抗反射裂缝性能变化趋势，建议最大RAP掺量不宜超过40%；庄园等[21]以高弹改性沥青及精细分离RAP细料为原材料，制备AC-5再生应力吸收层混合料，受限于再生沥青性能，RAP最大理论掺量仅为20%。综上所述，目前对于再生应力吸收层的研究集中于混合料层面，而在沥青胶结料层面涉足较浅，未揭示新旧沥青间融合再生规律，且现有沥青路面再生技术规范主要针对普通再生沥青，缺乏对再生用高弹改性沥青的设计与改善。郝培文等[22]提出当RAP掺量大于30%时，热再生混合料设计中应考虑新旧沥青融合程度的影响；Xing等[23]综述了融合机理、评价方法及影响因素，指出再生剂对新旧沥青融合程度提升具有重要影响。而现有学者对沥青再生的研究主要基于再生剂调和组分、改善与老化沥青相容性两方面开展，尚未结合沥青高弹改性进行过应用[24-26]。

鉴于此，本文采用富饱和分油及富芳香分油调节老化沥青组分，提升SBS改性剂硬段与软段的溶胀；采用渗透剂减小分子间作用力，增强新旧沥青的融合程度，基于最优比例配方制备了高渗再生高弹改性沥青（ZGT-R），并对比分析其与普通高弹改性沥青＋老化沥青（GT-N）及普通高弹改性沥青＋老化沥青＋再生剂（ZGT-N）的常规性能、弹性恢复、新旧沥青融合程度、流变性能及微观改性机理间的差异，为摊铺式再生应力吸收层的高弹改性沥青设计提供理论依据。

1 材料与试验

1.1 原材料

1.1.1 基质沥青

选用韩国双龙70#沥青作为基质沥青，其基本性能参数如表1所示。

表1 基质沥青技术指标

Table 1 Technical specifications of base asphalt

指标		单位	规范值	测试结果
25 ℃针入度		0.1 mm	60～80	70.6
针入度指数			−1.5～1.0	0.38
软化点（环球法）		℃	≥46	47.9
10 ℃延度		cm	≥20	49.7
60 ℃旋转黏度		Pa·s	≥180	198
蜡含量		%	≤2.2	1.92
溶解度（三氯乙烯）		%	≥99	99.9
RTFOT	质量损失	%	≤±0.8	−0.3
	25 ℃针入度比	%	≥61	62.2
	10 ℃残留延度	cm	≥6	7.9

1.1.2 SBS改性剂

SBS改性剂来自中国石化岳阳分公司，其基本性能参数如表2所示。

1.1.3 轻质组分油

轻质组分油为富饱和分油和富芳香分油，起组分调节作用，并参与SBS改性剂软段与硬段的溶胀。

表2　SBS改性剂技术性能指标

Table 2　Technical specifications of SBS modifier

指标	单位	测试结果
密度	g/cm^3	0.94
熔融流动指数I_{MFI}	g/(10 min)	6
抗拉强度	MPa	160
延伸率	%	680

1.1.4　渗透剂

渗透剂可减小分子间作用力，增强新旧沥青的融合程度。其技术指标如表3所示。

表3　渗透剂技术指标

Table 3　Technical specifications of penetrant

检测项目	单位	检测结果
闪点	℃	194
密度	g/cm^3	0.93
凝固点	℃	≤60
外观		透明油状液体

1.1.5　稳定剂

选用硫磺作为稳定剂，掺量为沥青质量的0.4%，具体技术指标见表4。

表4　稳定剂技术指标

Table 4　Technical specifications of stabilizer

检测项目	单位	检测结果
有效成分	%	≥95
表观密度	g/cm^3	0.6～0.8
熔点	℃	≥90
细度	目	≤40
颜色		黑黄色

1.1.6　老化沥青

本文所用老化沥青由RAP细料抽提回收得到，RAP细料来源于AC-13上面层，至铣刨时已服役10年。对老化沥青的各项常规性能指标进行测试，结果如表5所示。

表5　老化沥青技术指标

Table 5　Technical specifications of aged asphalt

检测项目	单位	试验结果	规范标准	试验方法
针入度(25 ℃,5 s,100 g)	0.1 mm	22.0	≥10	T0604
软化点(环球法)	℃	63.0	—	T0606
延度(15 ℃,5 cm/min)	cm	12.0	—	T0605

1.1.7　普通高弹改性沥青

选用市售普通高弹改性沥青为对照组原料，其基本性能参数如表6所示。

表6　普通高弹改性沥青技术指标

Table 6　Technical specifications of conventional high-elastic modified asphalt

检测项目	单位	检测结果
动态剪切模量G^*	MPa	1.63
延度(5 cm/min,5 ℃)	cm	40
135 ℃旋转黏度	Pa·s	2.75
弹性恢复(25 ℃)	%	90.6
针入度(25 ℃,100 g,5 s)	0.1 mm	67
软化点(环球法)	℃	91.0
密度	g/cm^3	1.031

1.1.8　再生剂

采用市售常见再生剂，作为对照组原料，具体技术指标如表7所示。

表7　再生剂技术指标

Table 7　Technical specifications of rejuvenator

检测项目	单位	试验结果	技术要求
60 ℃运动黏度	mm^2/s	1 798	50～60 000
闪点	℃	235	≥220
饱和分含量	%	24	≤30
芳香分含量	%	56	实测
薄膜烘箱试验前后黏度比		1.4	≤3
薄膜烘箱试验前后质量变化	%	−1.63	≤3,≥−3
15 ℃密度	g/cm^3	0.99	实测

1.2　试验方法

1.2.1　高渗再生高弹改性沥青的制备

通过工程经验及级配可调性设计，确定AC-5沥青混合料中RAP细料最大掺量为50%，进而根据RAP细料油石比6.2%的基本性质和总油石比6.7%的要求，确定老化沥青与新沥青的比例为45∶55。选取SBS改性剂掺量、富芳香分油掺量、富饱和分油和渗透剂掺量4个因素，通过四因素三水平正交试验和极差分析法，研究各因素对再生高弹改性沥青的三大指标、弹性恢复、20 ℃动态剪切模量G^*及135 ℃布氏黏度的影响，确定各组分的最优比例为8%SBS改性剂＋8%富芳香分油＋8%富饱和分油＋2%渗透剂。

根据经验及相关研究，实验室高渗再生高弹改性沥青制备流程如下：① 将基质沥青及老化沥青预热至完全流动状态后混合；② 添加SBS改性剂至上述混合沥青中，升温至180 ℃，接入三轴高速剪切机，

转速设置为5 500 r/min，剪切1 h；③ 将剪切完毕的样本接入高速搅拌机，加入油类材料及渗透剂，转速设置为3 000 r/min，搅拌1.5 h，其间定温180 ℃；④ 添加稳定剂至改性沥青样本中，维持转速2 000 r/min和定温180 ℃持续2 h。

1.2.2 常规性能试验

按照《公路工程沥青及沥青混合料试验规程》(JTG E20—2011)相关试验方法，对不同类型沥青进行25 ℃针入度、5 ℃延度、软化点等基本指标试验，借助旋转黏度仪进行黏度评价。

1.2.3 弹性恢复试验

参考《公路工程沥青及沥青混合料试验规程》(JTG E20—2011)试验方法，评价再生改性沥青的弹性恢复性能。

1.2.4 新旧沥青融合程度评价

老化沥青与高弹改性沥青的分子量均较大，两者融合不佳会导致RAP表面沥青胶浆存在的微裂缝与融合的薄弱界面在车辆重复荷载作用下产生破坏，降低应力吸收层的寿命。因此，高弹改性沥青与老化沥青的融合效果也是材料优化的重要评价指标之一。本文采用铝管法对新旧沥青的融合程度进行评价，为获取足够量的样品且减少重力作用对融合的影响，试验采用的铝管直径为40 mm。具体方法为：将铝管下部均分为3份，老化沥青加至最高刻线同时记录其质量，放入烘箱130 ℃保温30 min；高弹改性沥青加入质量为老化沥青的1/3，浇注完成后将铝管放置于175 ℃烘箱保温30 min；取出后冷却至室温，放置冰箱冷冻12 h；最后按照划线切割沥青，并测试每段的135 ℃布氏黏度(图1)。该评价方法的指标为融合后铝管的最下层135 ℃黏度值。

1.2.5 流变性能试验

(1) 温度扫描

采用动态剪切流变仪DSR测试沥青的高温流变性能。试验时加载频率为10 rad/s，控制应变模式为12%，试验温度范围为42～82 ℃，试验温度间隔为6 ℃，采用车辙因子$G^*/\sin\delta$进一步评价沥青胶结料的高温性能，车辙因子越小表明沥青胶结料疲劳损伤累计越小，耐高温性能越优。

(2) MSCR试验

试验应力水平分别为0.1 kPa、3.2 kPa，采用加载1 s、卸载9 s的加卸载循环模式，累计10个循环周期。MSCR试验采用蠕变恢复率R、不可恢复蠕变柔量J_{nr}为评价指标，其中蠕变恢复率R直观表征沥青胶结料的弹性响应，R值越大表明沥青的弹性恢复能力越强；不可恢复蠕变柔量J_{nr}表示沥青胶结料在不同应力水平下抵抗永久变形的能力，值越小则能力越强。

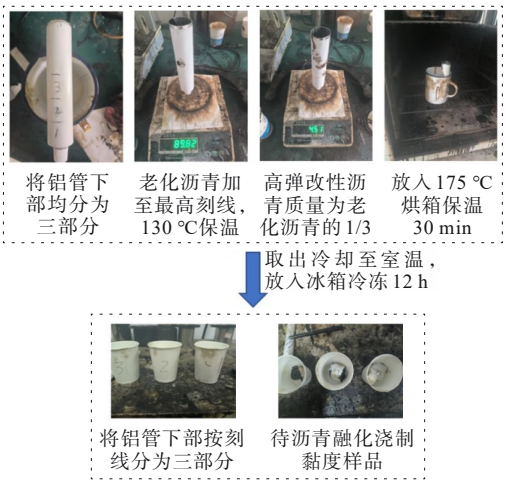


图1 新旧沥青融合程度评价方法

Figure 1 Evaluation method for blending degree between virgin and aged asphalt

(3) BBR试验

采用沥青弯曲梁流变仪BBR测试沥青在低温下的力学性能。温度设定为－12 ℃、－18 ℃、－24 ℃。BBR试件首先需将沥青胶结料浇筑在长度102 mm、宽度12.5 mm、厚度6.25 mm的小梁模具中，其次在(－5±0.5) ℃的环境下保温5～10 min，然后将试件低温保温1 h以上，试验开始时给小梁跨中处施加980 kN的恒定荷载，持续作用240 s，每隔60 s计取试样小梁的蠕变劲度S和蠕变速率m。

1.2.6 荧光显微镜试验

本文高弹改性沥青中均含有SBS改性剂成分，故以SBS改性剂为示踪剂，采用荧光显微镜观测对比不同再生沥青的融合改性效果。

2 结果与分析

通过对比普通高弹改性沥青＋老化沥青(GT-N)、普通高弹改性沥青＋老化沥青＋再生剂(ZGT-N)及高渗再生高弹改性沥青(ZGT-R)3种沥青关键性能指标，评价ZGT-R在再生应力吸收层中的作用效果。

2.1 常规性能

再生应力吸收层性能不佳，主要原因是掺入了老化沥青，降低了胶结料性能，进而导致混合料的抗裂性能不足。因此，本节对3种再生高弹改性沥青的三大指标及135 ℃布氏黏度进行对比研究，试验结果如表8所示。

表8　不同再生高弹改性沥青样品常规性能

Table 8　Conventional properties of different recycled high-elastic modified asphalt samples

沥青种类	针入度(25 ℃)/(0.1 mm)	软化点/℃	延度(5 ℃)/cm	黏度/(Pa·s)
GT-N	67.2	94.9	55.2	2.90
ZGT-N	62.4	90.2	51.3	2.78
ZGT-R	94.6	84.2	62.8	2.98

由表8可知：与GT-N相比，ZGT-N因加入了再生剂，可在一定程度上恢复老化沥青性能，但由于沥青服役过程中SBS在热氧作用下发生了降解，且老化沥青及再生剂的加入降低了GT-N中SBS改性剂的掺量，因此，ZGT-N的各项指标较GT-N均有一定的下降。ZGT-R在材料优化过程中，为保证应力吸收层抗反射裂缝的能力及其在老化沥青中的渗透性，主要考虑了通过SBS改性剂软段的溶胀增强其抗反射裂缝性能，并通过增加再生油分提高ZGT-R的再生及新旧沥青融合效果。因此，对比两种ZGT可知，ZGT-R在针入度、延度指标方面分别提升51.6%、22.4%。然而，富芳香烃油添加比例有限，其对SBS改性剂硬段的溶胀作用不足，导致ZGT-R在软化点指标方面略有下降，并对其存储稳定性造成一定影响。3种高弹改性沥青的135 ℃布氏黏度指标相差不明显。

2.2　弹性恢复

不同再生高弹改性沥青样品的弹性恢复如图2所示。

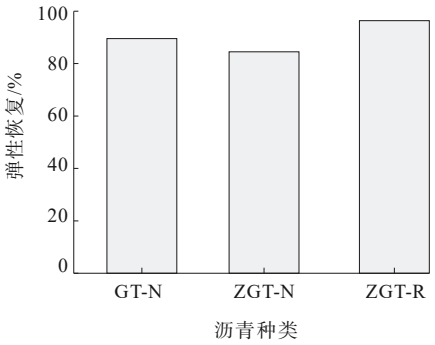


图2　不同再生高弹改性沥青样品的弹性恢复

Figure 2　Elastic recovery of different recycled high-elastic modified asphalt samples

由图2可知：与GT-N相比，ZGT-N弹性性能有所降低，这是由于ZGT-N中含有较大比例的再生沥青，与高弹改性沥青复配使用时SBS改性剂的含量有所降低。而ZGT-R弹性性能表现更优，这是因为两种轻质组分油比例恰当，在保证SBS改性剂软段溶胀效果的同时，恢复老化沥青的性能。

2.3　新旧沥青融合程度

对不包含老化沥青的GT-N、ZGT-N、ZGT-R共3种样品与老化沥青的融合程度进行评价。但由于新沥青黏度有所区别，因此需要先标定老化沥青与新沥青完全融合的黏度值，融合程度评价指标为每一层黏度与完全融合黏度比值，如式(1)所示。

$$N=\eta_n/\eta_b \tag{1}$$

式中：N为每一层黏度与完全融合黏度比值；η_n为铝管某层黏度；η_b为标定黏度。

计算得到的不同再生高弹改性沥青样品新旧沥青融合程度结果如图3所示。

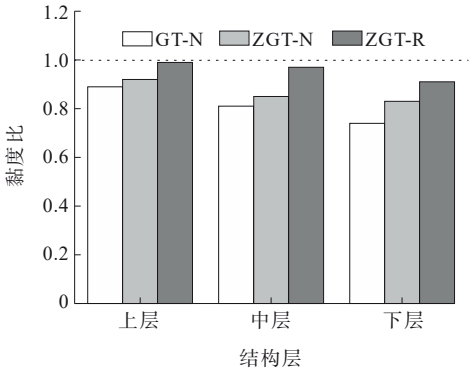


图3　不同再生高弹改性沥青样品新旧沥青融合程度

Figure 3　Blending degree between virgin and aged asphalt in different recycled high-elastic modified asphalt samples

由图3可知：完全融合样品黏度比的参考值为1.0，对于最上层样品来说，ZGT-R的渗透效果最优。按照试验评价方法，采用最下层样品黏度比反映新旧沥青的融合程度，由此可知，融合程度排序为不包含老化沥青的ZGT-R>ZGT-N>GT-N(新旧沥青融合评价中代号均指代不包含老化沥青的沥青样品)。这是由于ZGT-R中添加了促融成分与轻质组分油，促融成分可有效减小老化沥青分子间作用力，轻质组分油可快速渗透至老化沥青深层，两者协同作用可大幅提升ZGT-R与老化沥青的融合效果；而GT-N与老化沥青的分子量均较大，两种沥青内聚能及分子间作用力均较大，不利于新旧沥青的融合；由于再生剂的添加使得ZGT-N的融合效果有一定的提升作用，但普通再生剂的主要作用为恢复老化沥青的性能，其对融合的提升效果具有局限性。

2.4 流变性能

为探明高渗再生高弹改性沥青胶结料流变性能规律，本研究针对ZGT-R设置了老化沥青掺量分别为35%、45%、55%的试样组进行流变性能评价。

2.4.1 温度扫描

采用温度扫描模式对再生沥青胶结料开展动态剪切流变试验，车辙因子试验结果如图4所示。

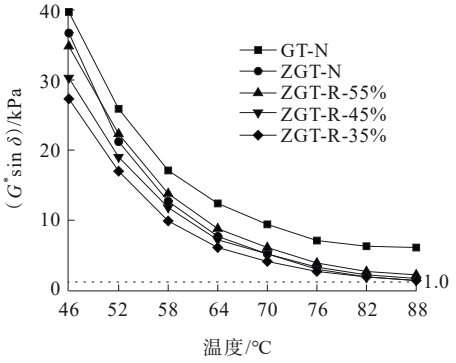


图4 不同老化沥青占比的再生沥青车辙因子

Figure 4 Rutting factor of recycled asphalt with different aged asphalt content

由图4可知：

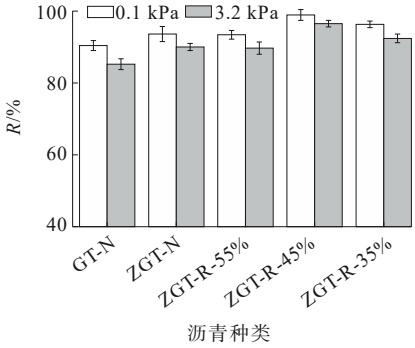
(1) 所有沥青的车辙因子均随温度上升急剧下降，车辙因子随温度升高呈指数衰减趋势。这一现象表明，高温环境下沥青的黏弹性成分流动性增强，导致抗车辙能力显著降低。温度每升高6 ℃，GT-N车辙因子平均衰减23.3%，ZGT-N车辙因子平均衰减35.8%。随着老化沥青掺量的提升，ZGT-R车辙因子平均衰减36.7%、34.6%、31.4%。由此可知，再生剂的加入使沥青的温度敏感性升高，随着老化沥青掺量的增加，再生沥青的温度敏感性有所降低。

(2) 在同一温度下，再生剂的加入削弱了再生沥青的高温性能，随着ZGT-N老化沥青掺量的增加，车辙因子逐渐升高。由此可知，老化沥青的加入提升了再生沥青的高温抗变形能力，而再生剂的加入分散了老化沥青中的沥青质，降低了再生沥青的高温抗变形能力。

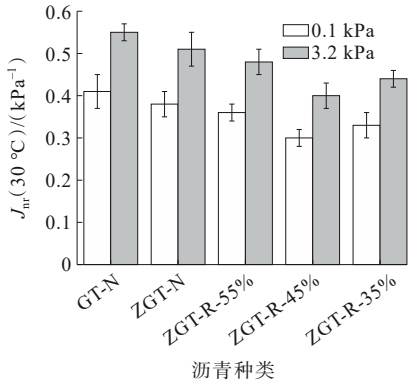
(3) ZGT-R材料优化时采用的老化沥青与新沥青的比例为45∶55，但由车辙因子试验结果可知，随着老化沥青掺量的变化，其高温性能均能满足车辙因子$G^*/\sin\delta \geqslant 1.0$ kPa的要求，因此在本研究掺量范围内ZGT-R均可保证再生沥青的高温性能。

2.4.2 MSCR试验

采用多应力蠕变恢复试验(MSCR)测试了再生高弹改性沥青在应力作用下的弹性恢复性能，以蠕变恢复率R、不可恢复蠕变柔量J_{nr}作为评价指标。计算结果见图5，图中误差棒为标准差(n=3)，试验结果表明：R误差控制在±2.1%内，J_{nr}误差控制在±0.04/kPa内。



(a) 蠕变恢复率R



(b) 不可恢复蠕变柔量J_{nr}

图5 不同老化沥青占比下的再生沥青MSCR试验结果

Figure 5 MSCR test results of recycled asphalt with different aged asphalt content

由图5可知：

(1) 随着再生剂的加入，再生沥青在30 ℃时的蠕变恢复率R与最低的不可恢复蠕变柔量J_{nr}均有明显的改善。其中，ZGT-R-45%在两种应力条件下均表现出最高的蠕变恢复率R与最低的不可恢复蠕变柔量J_{nr}，但随老化沥青掺量的增加，蠕变恢复率R与最低的不可恢复蠕变柔量J_{nr}没有明显的变化规律，这可能是老化沥青、改性剂及相容剂比例变化导致的。

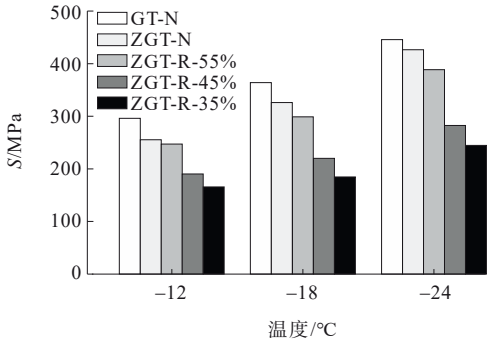
(2) 随着老化沥青掺量的变化，ZGT-R的弹性恢复及抗变形能力均优于GT-N及ZGT-N的。因此，在本研究老化沥青掺量范围内，ZGT-R均可以有效改善再生沥青的弹性恢复及抗变形能力。

(3) 从应力敏感性来看，当应力从0.1 kPa提升至3.2 kPa，GT-N、ZGT-N不可恢复蠕变柔量分别升

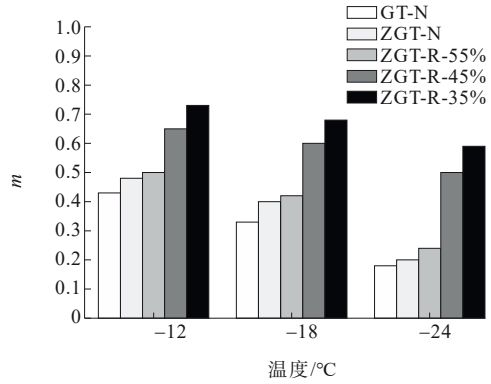
高了34.7%、34.0%，蠕变恢复率分别降低了5.9%、4.9%；随着老化沥青掺量的升高，ZGT-R不可恢复蠕变柔量分别升高了27.6%、28.6%及33.3%，蠕变恢复率分别降低了4.7%、2.5%及4.0%。由此可知，ZGT-R的应力敏感性较低，在不同交通荷载作用下均有较好的抗变形与弹性恢复能力。

2.4.3　BBR试验

沥青混合料的低温抗裂性能取决于所用胶结料的低温拉伸应变性能。因此，通过弯曲梁流变试验(BBR)对再生高弹改性沥青的低温性能进一步开展研究，试验结果如图6所示。



(a) 劲度模量S值



(b) 蠕变速率m值

图6　不同老化沥青占比下的再生沥青BBR试验结果

Figure 6　BBR test results of recycled asphalt with different aged asphalt content

由图6可知：

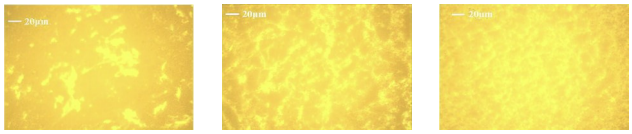
(1) 随着温度的降低，5种再生沥青的低温性能均有一定幅度的下降。在同一温度下，ZGT-N低温性能优于GT-N，这表明再生剂的加入可有效改善再生沥青的低温性能。

(2) 随着RAP掺量的增加，ZGT-R低温性能逐渐劣化。这一现象表明，老化沥青中氧化交联结构的累积，显著增强了材料的刚性骨架，但可能加剧低温脆性风险。m值随RAP掺量增加而降低，表明再生沥青在低温下应力松弛能力减弱，柔性成分减少，进一步验证了老化沥青对低温延展性的负面影响。但ZGT-R-45%较GT-N、ZGT-N的m值平均提高了86.2%、62.0%，且随着老化沥青掺量的变化均表现出比GT-N及ZGT-N更优的低温性能。因此，在本研究老化沥青掺量范围内ZGT-R均可以有效改善再生沥青的低温性能，说明在轻质组分油和渗透剂作用下，SBS改性剂充分溶胀入再生沥青中，兼容性良好。

(3) 随着温度的降低，GT-N的S与m值平均变化率为28.1%、33.7%；ZGT-N的平均变化率为27.8%、33.4%；ZGT-R老化沥青最高掺量S与m值平均变化率为22.3%、29.8%，随着掺量的降低，其随温度变化的敏感性逐渐降低。由此可知，ZGT-R对温度敏感性有较明显的改善作用。

2.5　微观改性机理

采用荧光显微镜观测不同再生沥青的融合改性效果，结果如图7所示。



(a) GT-N　　(b) ZGT-N　　(c) ZGT-R

图7　不同再生沥青的荧光显微镜图像

Figure 7　Fluorescence microscope images of different recycled asphalts

从图7可以看出：SBS成分在显微镜光源照射下呈现出斑点荧光。GT-N中由于未使用再生剂，普通高弹改性沥青中SBS成分未充分溶胀于老化沥青，分散不均匀，存在一定团聚现象。而在ZGT-N与ZGT-R中，SBS分布均匀，形成了空间交联网络结构；且与ZGT-N相比，ZGT-R更加致密，表明SBS溶胀得更好。这是由于渗透剂的加入减小了分子间作用力，在提高新旧沥青相容性的同时，也促进了SBS的扩散与交联。

3　结论

本文通过对比普通再生高弹改性沥青(GT-N)、再生剂复配普通再生高弹改性沥青(ZGT-N)及高渗再生高弹改性沥青(ZGT-R)的各项性能及微观机理，得出以下结论：

(1) ZGT-R通过优化SBS改性剂软段溶胀及再

生油分比例，使针入度和延度分别提升51.6%、22.4%，增强了抗反射裂缝能力及新旧沥青融合效果，但其软化点因硬段溶胀受限略有下降。此外，得益于轻质组分油对老化沥青性能的恢复作用，ZGT-R的弹性恢复性能优于GT-N和ZGT-N，展现出优异的抗裂性能与再生效果。

（2）新旧沥青融合程度排序表现为ZGT-R＞ZGT-N＞GT-N。这是由于GT-N与老化沥青的分子量均较大，两种沥青内聚能及分子间作用力均较大，普通再生剂对融合的提升效果具有局限性。ZGT-R中添加了渗透剂与轻质组分油，渗透剂可有效减小老化沥青分子间作用力，轻质组分油可快速渗透至老化沥青深层，两者协同作用可大幅提升ZGT-R与老化沥青的融合程度。

（3）在老化沥青掺量为45%时，ZGT-R车辙因子随温度升高的衰减率最低，高温敏感性优于GT-N和ZGT-N。ZGT-R的不可恢复蠕变柔量较GT-N降低27.6%～33.3%，蠕变恢复率提高4.0%～4.7%，具有更优的弹性恢复能力和低应力敏感性。随老化沥青掺量增加，ZGT-R的劲度模量和蠕变速率虽略有劣化，但其仍显著优于GT-N和ZGT-N。综合结果表明，ZGT-R通过调控老化沥青掺量及组分协同作用，在高温抗车辙、中温弹性恢复及低温抗裂性能方面均表现出显著优势，满足再生应力吸收层的流变性能需求。

（4）荧光显微镜观测下，ZGT-R中SBS溶胀良好，形成了均匀分布的空间交联网络结构，证明渗透剂的加入可减小分子间作用力，提高新旧沥青相容性的同时促进SBS的扩散与交联。

参考文献：

References：

[1] 交通运输部.2024年交通运输行业发展统计公报[N].中国交通报,2025-06-12(002).
Ministry of Transport of the People's Republic of China. 2024 Statistical bulletin on the development of the transport industry[N].China Transportation News,2025-06-12(002).

[2] 沙爱民,胡力群.半刚性基层材料的结构特征[J].中国公路学报,2008,21(4):1-5,42.
SHA Aimin, HU Liqun. Structural characteristics of semi-rigid base course material[J]. China Journal of Highway and Transport,2008,21(4):1-5,42.

[3] 蔡迎春,谢申健.移动荷载下道路病害的弯沉盆特性[J].中外公路,2024,44(3):270-281.
CAI Yingchun, XIE Shenjian. Deflection basin characteristics of distressed roads under moving load[J]. Journal of China & Foreign Highway,2024,44(3):270-281.

[4] 王漾博.玄武岩纤维橡胶沥青应力吸收层性能试验研究[D].扬州:扬州大学,2022.
WANG Yangbo. Experimental study on performance of basalt fiber rubber asphalt stress absorption layer[D]. Yangzhou:Yangzhou University,2022.

[5] 杨美坤,李万鹏,黄卫明,等.半刚性基层开裂的沥青路面承载力响应特性[J].辽宁工程技术大学学报(自然科学版),2024,43(3):310-321.
YANG Meikun, LI Wanpeng, HUANG Weiming, et al. Response characteristics of asphalt pavement bearing capacity with cracked semi-rigid base[J]. Journal of Liaoning Technical University (Natural Science),2024,43(3):310-321.

[6] 房娜仁,胡士清,李琪琪,等.基于半刚性基层强度控制的反射裂缝防治对策研究[J].公路,2022,67(9):51-60.
FANG Naren, HU Shiqing, LI Qiqi, et al. Research on countermeasures for reflection crack prevention based on strength control of semi-rigid base course[J]. Highway, 2022,67(9):51-60.

[7] 黄立葵,张攀,胡志强,等.半刚性基层沥青路面温缩反射裂缝疲劳扩展分析[J].公路工程,2020,45(5):79-83.
HUANG Likui,ZHANG Pan,HU Zhiqiang,et al.Research on thermal crack fatigue propagation of asphalt pavement with semi-rigid base[J].Highway Engineering,2020,45(5):79-83.

[8] 蒋亮.华北地区水稳基层沥青路面开裂病害分析与防治[J].公路交通科技(应用技术版),2013,9(2):53-54.
JIANG Liang. Analysis and prevention of cracking diseases in asphalt pavement with cement-stabilized base in North China[J].Journal of Highway and Transportation Research and Development: Applied Technology Edition, 2013,9(2):53-54.

[9] 张鹏.高等级公路半刚性基层材料的抗裂性能研究[D].大连:大连理工大学,2007.
ZHANG Peng. Research on separation and recycling technology of asphalt mixture[D]. Dalian: Dalian University of Technology,2007.

[10] 李文辉.应用土工织物防治复合式路面荷载型反射裂缝的试验研究[D].重庆:重庆交通大学,2013.
LI Wenhui. Experimental study on prevention of load-induced reflection cracks in composite pavement using geotextiles[D].Chongqing:Chongqing Jiaotong University, 2013.

[11] HABBOUCHE J, HAJJ E Y, PIRATHEEPAN M, et al. Impact of high polymer modification on reflective cracking performance life of asphalt concrete overlays[J]. International Journal of Pavement Research and Technology,2020,13(5):510-523.

[12] 余波,施晓强,王力.不同应力吸收层综合性能评价研究[J].公路交通科技,2015,32(8):34-38.
YU Bo,SHI Xiaoqiang,WANG Li.Research on evaluating comprehensive performance of different stress absorbing

layers[J].Journal of Highway and Transportation Research and Development,2015,32(8):34-38.

[13] 任瑞波,尹利洋,徐强,等.RAP掺量对温再生沥青混合料力学性能和路用性能的影响规律研究[J].中外公路,2024,44(1):66-75.
REN Ruibo,YIN Liyang,XU Qiang,et al.Influence of RAP content on mechanical properties and pavement performance of warm recycled asphalt mixture[J].Journal of China & Foreign Highway,2024,44(1):66-75.

[14] 李浩,熊鑫,李俊.不同RAP掺量SMA再生沥青混合料性能试验分析[J].中外公路,2022,42(2):242-246.
LI Hao, XIONG Xin, LI Jun. Experimental study on pavement performance for SMA recyling asphalt mixture with different RAP content[J].Journal of China & Foreign Highway,2022,42(2):242-246.

[15] 蒋鑫.掺蔗渣纤维橡胶沥青再生混合料路用性能研究[J].中外公路,2024,44(2):130-137.
JIANG Xin. Road performance of reclaimed asphalt mixture mixed with bagasse fibers and rubber-modified asphalt[J]. Journal of China & Foreign Highway, 2024, 44(2):130-137.

[16] 马耀宗,刘聪,陈杰,等.沥青混合料应力吸收层设计方法研究[J].公路,2021,66(4):34-39.
MA Yaozong, LIU Cong, CHEN Jie, et al. Research on design method of asphalt mixture stress absorbing layer[J]. Highway,2021,66(4):34-39.

[17] 阳经培.基于高性能SBS改性乳化沥青冷再生应力吸收层的研究[D].广州:华南理工大学,2018.
YANG Jingpei.Research on cold recycled stress-absorbing layer using high-performance SBS modified emulsified asphalt[D].Guangzhou:South China University of Technology, 2018.

[18] 祝谭雍,程其瑜,许兵,等.稳定型橡胶沥青再生应力吸收层技术性能研究[J].公路交通科技,2018,35(12):35-41.
ZHU Tanyong, CHENG Qiyu, XU Bing, et al. Study on performance of recycled stress absorbing layer with stable asphalt rubber[J]. Journal of Highway and Transportation Research and Development,2018,35(12):35-41.

[19] 祝谭雍,段卫党,许兵,等.基于厂拌热再生的复合改性橡胶沥青应力吸收层抗裂性能研究[J].公路交通科技,2022,39(12):8-16.
ZHU Tanyong, DUAN Weidang, XU Bing, et al. Study on crack resistance of stress absorbing layer of compound modified rubber asphalt based on plant-mixing hot recycling technology[J]. Journal of Highway and Transportation Research and Development, 2022, 39(12):8-16.

[20] 彭冬青.应力吸收层热再生混合料力学性能与路用性能试验研究[J].路基工程,2022(4):107-113.
PENG Dongqing. Experimental study on mechanical properties and road performance of hot recycled mixture in stress absorbing layer[J].Subgrade Engineering,2022(4):107-113.

[21] 庄园,马辉.基于精细分离RAP细料的应力吸收层再生混合料性能研究[J].现代交通与冶金材料,2024,4(4):41-48.
ZHUANG Yuan,MA Hui.Research on the performance of stress absorption layer regenerated mixtures based on fine separation of RAP fine materials[J]. Modern Transportation and Metallurgical Materials, 2024, 4(4):41-48.

[22] 郝培文,李洪祥,崔鹰翔,等.新旧沥青融合程度对热再生沥青混合料性能影响[J].硅酸盐通报,2021,40(11):3837-3846.
HAO Peiwen, LI Hongxiang, CUI Yingxiang, et al. Influence of blending degree between aged and virgin asphalt on performance of hot recycled asphalt mixture[J]. Bulletin of the Chinese Ceramic Society, 2021, 40(11):3837-3846.

[23] XING C W,LI M C,LIU L Y,et al.A comprehensive review on the blending condition between virgin and RAP asphalt binders in hot recycled asphalt mixtures: Mechanisms, evaluation methods, and influencing factors[J]. Journal of Cleaner Production,2023,398:136515.

[24] 况栋梁,余剑英,蔡正文,等.再生剂对不同老化程度沥青再生性能的影响[J].公路,2011,56(5):153-157.
KUANG Dongliang, YU Jianying, CAI Zhengwen, et al. Effect of rejuvenator on properties of aged bitumen of different aging degree[J].Highway,2011,56(5):153-157.

[25] 林金娜,孟洁平,余佳宝,等.渗透型再生剂对再生沥青性能影响的实验分析[J].厦门理工学院学报,2020,28(3):53-57.
LIN Jinna, MENG Jieping, YU Jiabao, et al. Experimental analysis on effect of diffusible rejuvenator on properties of recycled asphalt[J]. Journal of Xiamen University of Technology,2020,28(3):53-57.

[26] WANG F L, LONG J, SHEN B X, et al. A study of the regenerating effects of recycling agents on aged asphalts [J]. Petroleum Science and Technology,2014,32(10):1160-1167.