

复合改性橡胶沥青应力吸收层组成设计与抗裂性能

谭有为^{1,2}, 展冰洋², 林永康², 马玲玲²

¹佛山大学土木与交通学院, 广东 佛山

²佛交科天诺(广东)材料有限公司, 广东 佛山

收稿日期: 2025年2月14日; 录用日期: 2025年3月7日; 发布日期: 2025年3月19日

摘要

为有效抵抗沥青路面反射裂缝, 基于拉拔试验和斜剪试验, 探索了复合改性橡胶沥青应力吸收层对抗裂性能的影响, 并结合斜剪试验的荷载参数及位移参数, 建立了应力吸收层抗裂性能评价方法。结果表明: 双层复合改性橡胶沥青应力吸收层表现出较好的应力吸收和抵抗变形的能力; 温度较高时会削弱复合改性橡胶沥青应力吸收层的抗裂性能; 基于层间应力吸收系数和粘结系数的评价方法可以较好的评价应力吸收层抗裂性能。

关键词

反射裂缝, 复合改性橡胶沥青, 应力吸收层, 抗裂性能, 评价方法

Composition Design and Crack Resistance of Stress Absorbing Layer with Composite Modified Rubber Asphalt

Youwei Tan^{1,2}, Bingyang Zhan², Yongkang Lin², Lingling Ma²

¹School of Civil Engineering and Transportation, Foshan University, Foshan Guangdong

²Fojiao Tiansuo (Guangdong) Materials Co., Ltd., Foshan Guangdong

Received: Feb. 14th, 2025; accepted: Mar. 7th, 2025; published: Mar. 19th, 2025

Abstract

In order to effectively resist the reflective cracking of asphalt pavement, the influence of stress absorbing layer with composite modified rubber asphalt on crack resistance was explored based on

文章引用: 谭有为, 展冰洋, 林永康, 马玲玲. 复合改性橡胶沥青应力吸收层组成设计与抗裂性能[J]. 土木工程, 2025, 14(3): 359-369. DOI: 10.12677/hjce.2025.143042

pull-out test and oblique shear test. Combined with the load parameters and displacement parameters of oblique shear test, the crack resistance evaluation method of stress absorbing layer was established. The results show that the double-stress absorbing layer with composite modified rubber asphalt exhibits excellent stress absorption and deformation resistance. Higher temperature will weaken the crack resistance of the stress absorbing layer with composite modified rubber asphalt. The evaluation method based on interlayer stress absorption coefficient and bond coefficient can better evaluate the crack resistance of stress absorbing layer.

Keywords

Reflective Cracking, Composite Modified Rubber Asphalt, Stress Absorbing Layer, Crack Resistance, Evaluation Method

Copyright © 2025 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

反射裂缝已成为半刚性基层沥青路面和旧水泥混凝土路面加铺沥青层最常见的破坏形式之一。当反射裂缝拓展至沥青层时, 其会成为路表自由水的渗透路径。在动水压力作用下常使沥青路面过早出现开裂、剥落和老化等耐久性病害, 进而缩短道路的服役寿命[1]。现有方法主要通过路面结构中引入应力吸收层有效抑制反射裂缝, 降低沥青路面服役期耐久性劣化风险[2] [3]。应力吸收层具有应力吸收消散、抗反射裂缝和抗反射裂缝的能力, 但一般的应力吸收层效果欠佳难以较好地避免反射开裂[4]。因此, 需要使用高柔韧性、高弹性的沥青材料以减少反射裂缝[5]。目前, 作用效果较好的沥青材料是橡胶沥青。李佳勋等[6]-[8]将橡胶沥青应力吸收层技术引入道路工程的建设及养护, 阐述了其关键施工工艺与技术控制要点。

国内外学者在橡胶沥青应力吸收层方面进行了大量研究。耿立涛等[9]、祝谭雍等[10]等发现橡胶沥青应力吸收层混合料的综合指标明显优于 SBS 改性沥青应力吸收层混合料。张红波等[11]研究表明, 橡胶沥青应力吸收层混合料的设计空隙率为 2.0%~3.0%时, 应力吸收层整体性能最佳。Pan 等[12]提出, 温拌橡胶沥青混合料作为应力吸收层可以显著改善沥青面层底部和应力吸收层底部的受力条件, 起到较好的抵抗反射裂缝的作用。

目前, 霍延敏等通过数值模拟和室内试验的系统研究, 揭示了橡胶沥青应力吸收层在改善沥青路面力学的作用机理[13]。针对橡胶沥青应力吸收层的室内研究主要集中于单层应力吸收层和摊铺式橡胶沥青混合料, 尚少针对撒布式双层橡胶沥青应力吸收层开展研究[14] [15]。摊铺式应力吸收层和洒布式应力吸收层虽在材料上具有共性, 但二者骨架体态、沥青与集料黏附状态存在差异, 进而服役性能也存在差异。

综上, 在考虑撒布式应力吸收层特有性质基础上, 本文针对应力吸收层的服役特征, 采用拉拔试验及斜剪试验, 探索了双层复合改性橡胶沥青应力吸收层的抗拉能力及抗剪能力; 基于斜剪试验的位移参数及荷载参数, 建立了评价方法综合分析双层复合改性橡胶沥青应力吸收层的抗裂性能。

2. 原材料与成型方法

2.1. 原材料

复合改性橡胶沥青主要由高富 70#基质沥青、2.5% SBS 及 18%粒径为 40 目的橡胶粉组成, 其室内

制备工艺为：将基质沥青与 SBS 加热至 180℃，在 3000 r/min 的转速和 180℃下剪切 15 min；接着，加入橡胶粉以 4000 r/min 的速度剪切 30 min，溶胀发育 1 h。复合改性橡胶沥青的主要技术指标如表 1 所示。

Table 1. Main technical indicators of composite modified rubber asphalt

表 1. 复合改性橡胶沥青主要技术指标

技术指标		试验结果
RTFOT	针入度(25°C, 100 g, 5 s)/0.1 mm	66
	延度(5 cm/min, 5°C)/cm	57
	软化点/°C	92.2
	动力黏度(60°C)/Pa·s	>30,000
	运动黏度(135°C)/Pa·s	4.27
	质量变化/%	0.05
	针入度比(25°C)/%	75
	延度(5 cm/min, 5°C)/cm	35

选用广西新东运有限公司生产的 5~10 mm 石灰岩和 10~15 mm 石灰岩作为撒布应力吸收层集料，其主要技术指标如表 2 所示。

Table 2. Main technical indicators of aggregates

表 2. 集料主要技术指标

技术指标	5~10 mm 石灰岩	10~15 mm 石灰岩
洛杉矶磨耗损失/%	8.3	8.1
表观相对密度	2.934	2.943
毛体积相对密度	2.884	2.898
吸水率/%	0.6	0.5
针片状颗粒含量/%	3.9	2.5
水洗法<0.075 mm 颗粒含量/%	0.2	0.2

2.2. 应力吸收层设计与成型

由于传统的单层应力吸收层存在高温性能不足，变形能力不佳，在车辆反复作用下容易出现推移等病害，本文针对单层撒布应力吸收层的不足提出了双层复合改性橡胶沥青应力吸收层，对其材料进行组成优化设计，从而达到良好的路面使用性能。为优化复合改性橡胶沥青应力吸收层的材料组成设计，本文拟选用三种不同类型的应力吸收层开展试验。其中，包括复合改性橡胶沥青(AR)、单层复合改性橡胶沥青碎石(ARA-1)及双层复合改性橡胶沥青碎石(ARA-2)三种类型。

AR 应力吸收层的成型步骤如下：1) 借鉴中国 JTG E20-2011 规范[16]成型尺寸为 300 mm × 300 mm × 55 mm，级配为 SMA-13 的板块状试件；2) 试件成型后，立即按照 2.0 kg/m² 的洒布量将预加热至 180℃ 的热复合改性橡胶沥青撒布到板块状试件上；3) 试件连同模具放置于室温 48 h 后，放入 60℃ 烘箱中保温 5 小时；4) 将热拌好的 SMA-13 沥青混合料立即均匀铺筑到应力吸收层上，用轮碾压实仪碾压成型，

放置于室温 48 h 后进行脱模；5) 使用钻芯机和切割机制备 $\Phi 100 \text{ mm} \times 100 \text{ mm}$ 圆柱体试件及 $250 \text{ mm} \times 30 \text{ mm} \times 50 \text{ mm}$ 棱柱体试件，并确保应力吸收层材料处于圆柱体试件的中间位置。

其余两种应力吸收层类型成型方式与 AR 的区别在于步骤(2)。其中，ARA-1 的撒布方式为：试件成型后，立即按照 2.0 kg/m^2 的洒布量将预加热至 180°C 的热复合改性橡胶沥青撒布到板块状试件上，接着将预裹附复合改性橡胶沥青的 $10\sim 15 \text{ mm}$ 单一粒径碎石按照 80% 撒布面积均布撒布在复合改性橡胶沥青上，用铁块轻压碎石使其嵌入沥青膜；而 ARA-2 的撒布方式为：在 ARA-1 撒布基础上，再撒布一层热复合改性橡胶沥青和 $5\sim 10 \text{ mm}$ 单一粒径碎石，撒布方式与 ARA-1 相同。

3. 试验方法

3.1. 拉拔试验

应力吸收层对上、下层沥青混合料进行粘结，直接影响沥青路面的安全性和耐久性，故采用拉拔试验评估沥青路面层和应力吸收层之间的粘结强度(见图 1)。拉拔试验在 30 kN 的 ETM 万能试验机上进行。考虑沥青路面实际服役状态(受环境因素影响)，选择 15°C 和 25°C 为试验温度。为确保试件受热均匀，用聚氨酯将试件两端与连接盘粘结，保温 5 h 以上。试验加载速率为 2 mm/min ，拉拔失效判定标准设定为应力降低至最大应力的 90%。抗拉强度根据式(1)进行计算。

$$\sigma = \frac{F}{A} \quad (1)$$

式中： σ 为应力吸收层抗拉强度，MPa； F 为试件破坏时最大应力，N； A 为试件受力面积， mm^2 。



Figure 1. Pulling test

图 1. 拉拔试验

3.2. 斜剪试验

当车辆突然加速或制动时，沥青路面会受到复杂的应力和应变。若应力吸收层的抗剪强度小于剪应力，沥青路面易发生水平滑动产生结构损坏。由于现有研究使用的斜剪夹具易导致试件瞬间破坏，无法较好地评价应力吸收层材料的抗裂性能[17][18]。因此，本文通过自主设计一项新的斜剪装置进行试验(见图 2)。试验温度为 15°C 和 25°C ，试件保温 5 h 以上，剪切角为 45° 。试验采用 ETM 万能试验机进行加载，加载速率为 10 mm/min ，剪切失效判定标准设定为应力降低至最大应力的 90%。试件剪切强度根据式(2)进行计算。

$$\tau = \frac{F \sin \alpha}{A} \quad (2)$$

式中: τ 为应力吸收层剪切强度, MPa; F 为试件破坏时最大应力, N; α 为剪切角, °。 A 为试件受力面积, mm^2 。

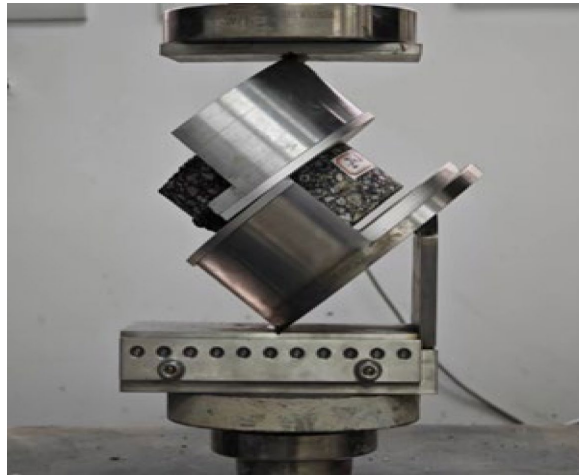


Figure 2. Oblique shear test
图 2. 斜剪试验

3.3. 小梁弯曲试验

采用 UTM-30 进行小梁弯曲试验评价复合改性橡胶沥青应力吸收层的抵抗弯拉变形的能力(见图 3)。试验温度为 5℃、15℃ 和 25℃, 试件保温 5 h 以上, 加载速率为 50 mm/min, 失效判定标准设定为试件破裂。试件抗弯拉强度及梁底最大弯拉应变分别根据式(3)、(4)进行计算。

$$R_B = \frac{3LP_B}{2bh^2} \quad (3)$$

$$\varepsilon_B = \frac{6hd}{L^2} \quad (4)$$

式中: R_B 为试件破坏时的抗弯拉强度, MPa; ε_B 为试件破坏时的最大弯拉应变, $\mu\epsilon$; b 为跨中断面试件的宽度, mm; h 为跨中断面试件的高度, mm; L 为试件的跨径, mm; d 为试件破坏时的跨中挠度, mm。



Figure 3. Bending test of small beam
图 3. 小梁弯曲试验

4. 结果分析

4.1. 应力吸收层抗拉强度分析

不同类型应力吸收层材料的拉拔试验结果如表 3 所示。

Table 3. Tensile strength of stress absorbing layer at different temperatures
表 3. 不同温度应力吸收层抗拉强度

温度	抗拉强度/MPa		
	AR	ARA-1	ARA-2
15℃	0.78	0.47	0.40
25℃	0.36	0.26	0.14

由表 3 可知,复合改性橡胶沥青碎石组的抗拉强度均小于基准组 AR,且抗拉强度随厚度的增加而减小。25℃时,ARA-1、ARA-2 复合改性橡胶沥青碎石组的抗拉强度分别比基准组 AR 降低了 27.8%和 61.1%。究其原因,碎石直接撒布在沥青上,其与沥青之间形成较小的黏聚力。然而,在一定区间内,应力吸收层厚度越大,碎石撒布量越多,其形成的内摩阻力越大,具有更好的抗变形能力。故本文设计的 ARA-2 应力吸收层在满足一定抗拉强度要求时,还具有较好的抗变形能力。

此外,随着温度的升高,不同类型应力吸收层材料的抗拉强度显著下降。ARA-1 和 ARA-2 的拉拔强度分别降低了 44.7%和 65.0%。结合拉拔破坏界面位于应力吸收层的现象,分析是因为应力吸收层的沥青会随着温度的升高而产生软化,降低了沥青的粘度和沥青层的粘结强度。以上现象也说明复合改性橡胶沥青应力吸收层的抗裂性能与温度、材料特性有一定关系。

4.2. 应力吸收层剪切特性分析

图 4 为不同类型应力吸收层材料的剪切试验测试结果。

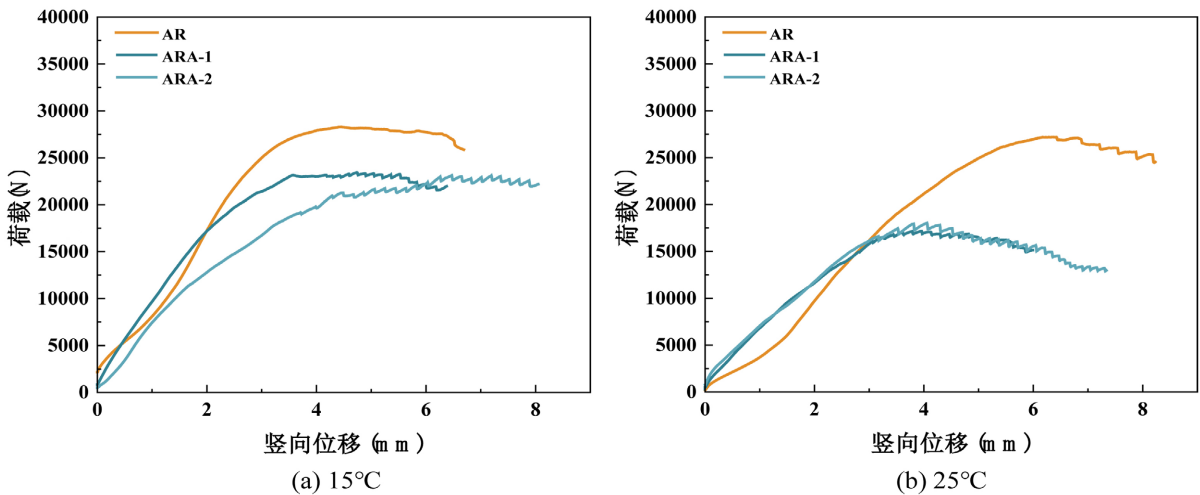


Figure 4. Vertical displacement load curve of stress absorbing layer at different temperatures

图 4. 不同温度下应力吸收层的竖向位移-荷载曲线

根据图 4 可以得到不同温度应力吸收层的抗剪强度(见表 4)。由表 4 可以看出,相比基准组,复合改性橡胶沥青碎石组的抗剪强度显著降低,ARA-1、ARA-2 组在 15℃时的抗剪强度分别比基准组降低了

17.3%和 18.4%；ARA-1、ARA-2 组在 25℃时的抗剪强度分别比基准组降低了 36.7%和 33.9%。其次，温度也会影响应力吸收层的抗剪强度。当温度从 15℃升高到 25℃时，ARA-1 的抗剪强度从 2.11 MPa 降低到 1.55 MPa，下降了 26.5%；ARA-2 的抗剪强度从 2.08 MPa 下降到 1.62 MPa，下降了 22.1%。

Table 4. Shear strength of stress absorbing layer at different temperatures

表 4. 不同温度应力吸收层抗剪强度

温度	抗剪强度/MPa		
	AR	ARA-1	ARA-2
15℃	2.55	2.11	2.08
25℃	2.45	1.55	1.62

此外，当应力吸收层材料在受到最大剪切应力时，由于材料特性其可以不断吸收和消耗破坏受力荷载，表现为试件受到荷载时具有较好的抵抗破坏的能力。详细的，以 25℃为例，AR 组破坏时位移为 1.79 mm，ARA-1 组破坏时位移为 2.71 mm，ARA-2 组破坏时位移为 4.17 mm。可见，各温度 ARA-1 和 ARA-2 的抗剪强度相近，但 ARA-2 组的应力吸收能力会优于 ARA-1。

4.3. 应力吸收层抗裂性能分析

为了更好地评价沥青混合料抗裂性能，本小节采用临界断裂能来代表沥青混合料在断裂过程中，抵抗裂缝产生和扩展所需的能量，具体计算如下所示。

$$G_c = \frac{K_{IC}^2}{E} \quad (5)$$

$$K_{IC} = \frac{6M_c a^{\frac{1}{2}}}{bh^2} f\left(\frac{a}{h}\right) \quad (6)$$

$$M_c = \frac{Ps}{4} \quad (7)$$

$$f\left(\frac{a}{h}\right) = 1.99 - 2.74\left(\frac{a}{h}\right) + 12.97\left(\frac{a}{h}\right)^2 - 23.17\left(\frac{a}{h}\right)^3 + 24.80\left(\frac{a}{h}\right)^4 \quad (8)$$

式中： G_c 为试件的临界断裂能， $\text{N}\cdot\text{m}^{-1}$ ； a 、 b 、 h 、 s 为切缝深度、梁宽、梁高、跨径； P 为施加的最大荷载，kN； E 为弹性模量，MPa； μ 为泊松比。

试件临界断裂能分别根据式(5)~(8)进行计算，结果如下图 5 所示。根据图 5，5℃时的临界断裂能大小为 $\text{AR} < \text{ARA-1} < \text{ARA2}$ 。由此可见沥青混合料的应力吸收层越厚，其断裂能释放越大，材料越不容易产生开裂。基于此，当沥青混合料的应力强度因子达到临界值时，材料开始发生断裂；当断裂能达到断裂能释放率时，材料彻底失稳。而本试验中，材料的断裂能释放率随着应力吸收层厚度的增加而增大。因此，材料的应力吸收层越厚，失稳破坏越困难。

4.4. 基于层间应力吸收系数和粘结系数的抗裂性能评价方法

在斜向剪切试验过程发现试件承受荷载时，会产生横向位移，试件可以通过横向位移吸收和消耗荷载。图 6 为不同类型应力吸收层受到荷载时的竖向位移与横向位移关系曲线图。可见，应力吸收层因其材料特性差异会产生不同的横向位移，具体表现为抗裂性能的差异。此外，该现象说明试件破坏时的竖向位移、横向位移和荷载等参数之间存在一定的关联，可以以此评价应力吸收层材料的抗裂性能。

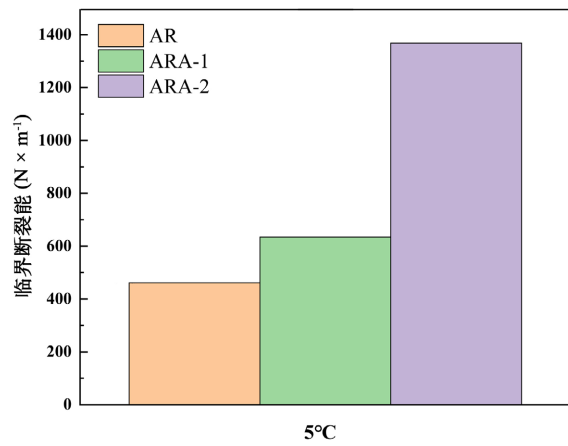


Figure 5. Results of critical fracture energy test
图 5. 临界断裂能试验结果

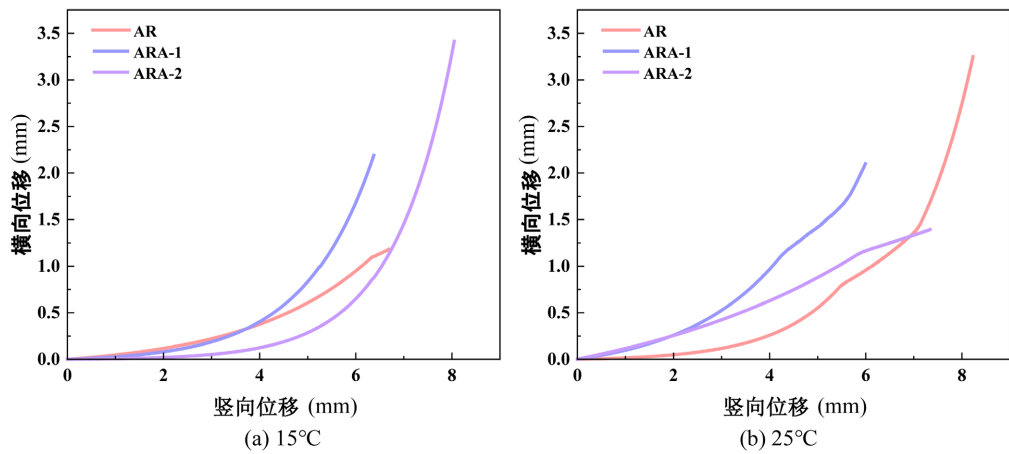


Figure 6. Vertical displacement lateral displacement curves of stress absorbing layer at different temperatures
图 6. 不同温度下应力吸收层的竖向位移-横向位移曲线

基于此，本文通过建立斜剪试验破坏过程的平衡关系，提出新的指标评价应力吸收层材料的抗裂性能。依据试件剪切破坏过程(见图 7)的能量守恒定理，满足以下关系式(9)~(13):

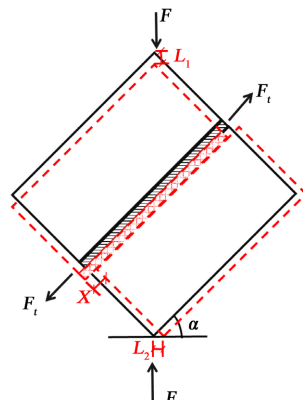


Figure 7. Schematic diagram of oblique shear failure
图 7. 斜剪破坏示意图

层间方向:

$$\int_0^{\Delta x} F_t d\Delta x + \int_0^{s_2} F' ds_2 = \int_0^{s_1} F' ds_1 \quad (9)$$

垂直于层间方向:

$$E = \int_0^{s_1} F' ds_1' \quad (10)$$

由于垂直于层间方向的应力吸收层变形较小, 产生的势能较小, 将其略去不计, 则:

$$\Delta x(t) \int_0^t F_t \Delta x dt + s_2(t) \int_0^t F' s_2 dt = s_1(t) \int_0^t F' s_1 dt \quad (11)$$

$$K_1 = \frac{\int_0^{\Delta x} F_t d\Delta x}{\int_0^{s_1} F' ds_1} \quad (12)$$

$$K_2 = \frac{\int_0^t \Delta x dt}{\int_0^t (s_1 + s_2) dt} \quad (13)$$

式中: F_t 为应力吸收层粘结力, N; F 为竖向荷载, N; F' 为层间方向荷载, N, 即 $F' = F \times \sin \alpha$; L_1 为竖向位移, mm; s_1 为竖向位移在层间方向分解位移, mm, 即 $s_1 = L_1 \times \sin \alpha$; L_2 为横向位移, mm; s_2 为横向位移在层间方向分解位移, mm, 即 $s_2 = L_2 \times \cos \alpha$; Δx 为应力吸收位移, mm, 即 $\Delta x = s_1 + s_2 - x$; α 为剪切角度, °; x 为所测层间位移, mm; t 为加载试件, s; K_1 为层间粘结系数; K_2 为层间应力吸收系数。

因此, 根据式(3)~(13), 结合斜剪试验的荷载、竖向位移、横向位移及所测层间位移等数据可以计算出层间粘结系数 K_1 和层间应力吸收系数 K_2 , 如下表 5 所示。

Table 5. Crack resistance performance indicators of stress absorption layer
表 5. 应力吸收层抗裂性能指标

温度	应力吸收层	层间粘结系数 K_1	层间应力吸收系数 K_2
15°C	AR	0.59	0.16
	ARA-1	0.60	0.42
	ARA-2	0.77	0.63
25°C	AR	0.50	0.38
	ARA-1	0.65	0.48
	ARA-2	1.49	0.68

结果表明, 相同温度下, 抗裂性能指标从高到低依次是 $ARA-2 > ARA-1 > AR$ 。理论上, 沥青路面应力吸收层抵抗路面产生裂缝的能力取决于沥青材料特性和应力吸收层结构, 高变形特性的沥青和形成嵌挤作用的双层应力吸收层结构具有较好的抗裂能力。即说明双层复合改性橡胶沥青碎石的抵抗变形和应力吸收能力更佳, 对于实际工程有着一定的普适性。

4.5. 应力吸收层弯拉变形分析

复合改性橡胶沥青应力吸收层的抗弯拉强度和最大弯拉应变的计算结果如图 8 所示。

根据图 8, 温度越低, 应力吸收层的抗弯拉强度越高, 最大弯拉应变越小。这是因为在低温环境下, 应力吸收层的韧性降低, 脆性增加。当受到弯拉荷载时, 其能抵抗的弯拉变形越小。此外, 从图 8(b)可

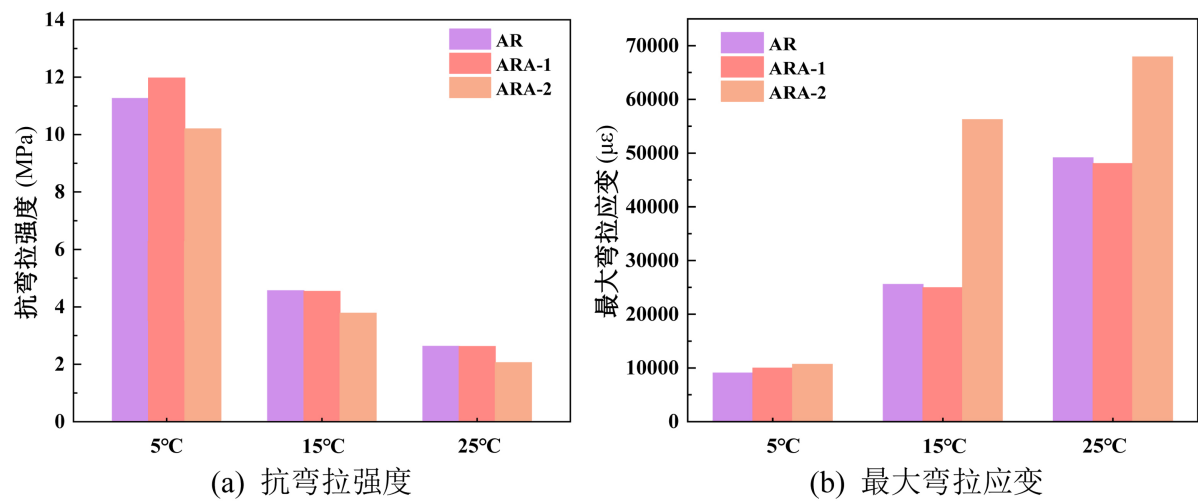


Figure 8. Bending test results
图 8. 弯曲试验结果

知, 低温时(5°C), 三种不同应力吸收层在承受荷载时的最大弯拉应变基本一致; 而温度较高时(15°C、25°C), AR 组和 ARA-1 组的最大弯拉应变也基本一致, 但 ARA-2 组的最大弯拉应变显著高于 AR 组和 ARA-1 组。以 25°C 为例, 与 AR 组和 ARA-1 组相比, ARA-2 组破坏时的最大弯拉应变分别增大了 38.2% 和 41.3%。该现象进一步说明双层复合改性橡胶沥青应力吸收层的抗裂性能较单层复合改性橡胶沥青应力吸收层更好。

5. 结论

- 1) 建立了应力吸收层抗裂性能试验体系, 包括试验方法、试验夹具等, 精确测试了抗拉强度、抗剪强度和最大弯拉应变等, 全面评价了复合改性橡胶沥青应力吸收层的抗裂性能。
- 2) 温度显著影响复合改性橡胶沥青应力吸收层的抗裂性能。双层复合改性橡胶沥青应力吸收层较单层复合改性橡胶沥青应力吸收层的抗裂性能更佳。
- 3) 提出了基于层间应力吸收系数和粘结系数的应力吸收层抗裂性能评价方法, 为双层复合改性橡胶沥青应力吸收层在实际工程的应用提供了理论支撑。

参考文献

- [1] 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[J]. 辽宁工程技术大学学报(自然科学版), 2024, 43(3): 310-321.
- [2] Sun, Y., Yan, T., Wu, C., Sun, X., Wang, J. and Yuan, X. (2018) Analysis of the Fatigue Crack Propagation Process of the Stress-Absorption Layer of Composite Pavement Based on Reliability. *Applied Sciences*, **8**, Article 2093. <https://doi.org/10.3390/app8112093>
- [3] 潘睿, 程培峰. 寒冷地区温拌橡胶沥青混合料应力吸收层性能研究[J]. 世界地震工程, 2014, 30(4): 180-188.
- [4] Kim, K.W., Doh, Y.S. and Lim, S. (1999) Mode I Reflection Cracking Resistance of Strengthened Asphalt Concretes. *Construction and Building Materials*, **13**, 243-251. [https://doi.org/10.1016/s0950-0618\(99\)00032-x](https://doi.org/10.1016/s0950-0618(99)00032-x)
- [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/OL]. 武汉理工大学学报(交通科学与工程版), 1-8. https://kns.cnki.net/kcms2/article/abstract?v=LY1OVaQjltwfGJP2E-HUwHZm-u0vpoPkRQqDBadgFxiWDI-Sg01JBuW9FkdGk90POJ7NJXKy6cHrA911VAeSqGt4B4iWBXn14nK0s_RegQQ1wJWGOj7paFfWQiOQFDVnfo_5jgdWmpNWejCzBnoxyMNWxNqJrCVZekq1p9oCyL0NdnBkiTv84Y0IkiOOZ12&uniplatform=NZKPT&language=CHS, 2025-02-20.

-
- [6] 李佳勋. 橡胶沥青应力吸收层施工技术研究[J]. 交通世界, 2024(30): 47-49.
 - [7] 曹彦东. 橡胶沥青应力吸收层在公路养护维修工程中的应用[J]. 工程建设与设计, 2023(20): 186-188.
 - [8] 黄超. 公路路面橡胶沥青碎石应力吸收层设计及施工问题探讨[J]. 交通世界, 2023(29): 68-70.
 - [9] 耿立涛, 任瑞波, 郭玉清, 等. 应力吸收层沥青混合料的试验研究[J]. 建筑材料学报, 2012, 15(4): 570-574.
 - [10] 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.
 - [11] 张红波, 彭文举, 刘俊斌, 等. 空隙率对摊铺式橡胶沥青应力吸收层性能影响[J]. 公路交通科技, 2022, 39(4): 22-31.
 - [12] Pan, R. and Li, Y. (2020) Effect of Warm Mix Rubber Modified Asphalt Mixture as Stress Absorbing Layer on Anti-Crack Performance in Cold Region. *Construction and Building Materials*, **251**, Article 118985.
<https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.118985>
 - [13] 霍延敏, 位可可. 橡胶沥青应力吸收层性能研究[J]. 合成材料老化与应用, 2024, 53(6): 62-65.
 - [14] 谭继宗, 彭文举, 刘俊斌, 等. 级配对摊铺式橡胶沥青应力吸收层性能的影响[J]. 公路交通科技, 2022, 39(2): 1-10.
 - [15] 常颖. LDPE 与橡胶粉复合改性沥青应力吸收层混合料技术性能研究[J]. 公路工程, 2017, 42(1): 295-300.
 - [16] 交通运输部公路科学研究院. JTG E20-2011 公路工程沥青及沥青混合料试验规程[S]. 北京: 中国标准出版社, 2011.
 - [17] 李萍, 念腾飞, 张雅莉, 等. 基于斜剪试验的水泥砼桥面沥青铺装层抗剪切性能研究[J]. 武汉理工大学学报, 2015, 37(11): 48-53.
 - [18] 杨三强, 李鹏飞, 刘璐, 等. 复合式应力吸收层的性能和动态响应研究[J]. 中外公路, 2023, 43(5): 27-32.