



DOI:10.12404/j.issn.1671-1815.2406320

引用格式:刘秀,刘梓宇,刘天硕,等.中国寒区低掺纤维高黏高弹沥青混凝土桥面铺装路用性能[J].科学技术与工程,2025,25(19):8252-8258.

Liu Xiu, Liu Ziyu, Liu Tianshuo, et al. Road performance of low-fiber-content high-viscosity and high-elasticity asphalt concrete bridge deck paving in cold regions of China[J]. Science Technology and Engineering, 2025, 25(19): 8252-8258.

中国寒区低掺纤维高黏高弹沥青混凝土 桥面铺装路用性能

刘秀,刘梓宇*,刘天硕,白一凡
(东北林业大学土木与交通学院,哈尔滨 150040)

摘要 桥面铺装层采用的结构和材料对其路用性能影响较为显著,为提供更适宜寒区环境的铺装层设计,基于层位功能设计原理对铺装层的材料进行分层改性优化。首先,利用层位功能的划分对表面功能层与整体功能层进行材料拟定,并分别选取木质纤维素和聚酯纤维改性。其次,通过路用性能试验确定聚酯纤维的掺量。最后,确定层位材料的选择及合理改性方式。结果表明:表面功能层与整体功能层均选用同高黏高弹改性沥青并分别木质纤维素和聚酯纤维改性方式,可以避免层体材料温缩系数不同,使其铺装层与桥梁结构的温度变形协调,能有效提高沥青桥面铺装层的路用性能。此外,满足工程经济要求下,当聚酯纤维掺量为混合料总质量的1%时,其制备的沥青混合料高温性能提高7%、低温性能提高23%、水稳定性提高5%。

关键词 寒区;桥面铺装;聚酯纤维;沥青混合料;路用性能

中图法分类号 U414;

文献标志码 A

Road Performance of Low-fiber-content High-viscosity and High-Elasticity Asphalt Concrete Bridge Deck Paving in Cold Regions of China

LIU Xiu, LIU Zi-yu*, LIU Tian-shuo, BAI Yi-fan

(School of Civil and Transportation Engineering, Northeast Forestry University, Harbin 150040, China)

[Abstract] The structure and materials used in bridge deck pavement layers significantly impact their road performance. To design a pavement layer more suitable for cold regions, the layered modification of pavement materials was optimized based on the principle of layer function design. Firstly, materials for the surface functional layer and overall functional layer were selected using the layer function division, with lignocellulose and polyester fibers as modifiers, respectively. Secondly, the appropriate content of polyester fibers was determined through road performance tests. Finally, the choice of layered materials and appropriate modification methods were established. The results indicate that both the surface functional layer and the overall functional layer should use the same high-viscosity, high-elasticity modified asphalt, with lignocellulose and polyester fibers as modifiers, respectively. This approach avoids differences in thermal contraction coefficients of the layered materials, ensuring coordinated thermal deformation between the pavement layer and the bridge structure, thereby effectively improving the road performance of the asphalt bridge deck pavement. Furthermore, under engineering economic requirements, when the polyester fiber content is 1% of the total mixture mass, the prepared asphalt mixture's high-temperature performance increases by 7%, low-temperature performance by 23%, and water stability by 5%.

[Keywords] cold region; bridge deck pavement; polyester fiber; asphalt mixture; pavement performance

桥面铺装层直接与车辆等外荷载接触,其使用性能的好坏关系到桥梁整体的寿命和使用年限、行车安全及舒适性能,因此桥面铺装材料与结构逐渐成为桥梁建设中的关键问题^[1]。近年来随着交通量和轴载的不断增长,尤其是寒区极端气候条件下,部分铺装层投入使用后即出现较为严重的裂缝、层间失稳、坑

槽、车辙等早期病害^[2]。车桥的耦合作用下铺装层承受多次荷载反复作用,桥面的铺装层比一般沥青混凝土路面的受力状态更复杂^[3]。近年来,国内外学者针对铺装层的研究越来越多,侯贵等^[4]以北方寒冷地区的典型桥面铺装结构建立力学分析模型,计算分析了桥面铺装层层间剪应力分布特征。雷进

收稿日期:2024-08-22 修订日期:2025-01-02

基金项目:国家自然科学基金面上项目(51878229)

第一作者:刘秀(1980—),男,汉族,黑龙江哈尔滨人,博士,副教授。研究方向:路桥耦合作用铺面材料与结构。E-mail:liuxiu_201@163.com。

*通信作者:刘梓宇(2000—),男,汉族,黑龙江齐齐哈尔人,博士研究生。研究方向:交通运输工程。E-mail:lzy2022@nefu.edu.cn。

等^[5]提出一种厚度只有7 cm的具有排走层间滞留水与降低桥面温度的桥面铺装结构,包括了桥面、防水黏结层、排水联结层、沥青层。

中国东北寒区冬季漫长寒冷干燥,季节温差大,冬季最低气温可达-40℃以上,而夏季最高气温可达39℃,铺装层混凝土的重复冻融,桥面铺装层的使用环境十分恶劣,铺装层材料除要满足桥梁结构受力要求外,还应具有良好的路用性能、低温抗裂性能、层间剪切性能和抗疲劳性能^[6-7]。高黏沥青是具有较高黏度的改性沥青材料,在高温条件下仍然具有较好的黏度,通过降低沥青脆化点温度改善低温抗裂性能。马晓燕等^[8]采用动态剪切流变仪直接拉伸试验研究了高黏高弹沥青的黏聚性能。熊子佳等^[9]探究了高黏改性剂对沥青及沥青混合料性能的影响。

综上所述,现结合寒区的气候特点,基于铺装层层位功能理论对表面功能层与整体功能层进行结构设计,并通过高温、低温、水稳等性能试验,研究沥青类型和聚酯纤维掺入对沥青混合料的性能影响,从而确定寒区桥面铺装层的材料选择以及不同层位间的改性优化方式。

1 实验

1.1 实验材料

1.1.1 沥青

针对北方寒区气候特点,研究设计桥面铺装的沥青选用由辽宁盘锦70#基质沥青和12%的苯乙烯-丁二烯-苯乙烯嵌段共聚物(styrene-butadiene-styrene, SBS)沥青改性剂制备的高黏高弹性沥青,其技术指标见表1。

表1 沥青基本技术指标

Table 1 Basic technical indexes of asphalt

沥青种类	试验项目	实测	标准
70#基质 沥青	针入度/mm	63.5	60~80
	软化点/℃	52.1	≥46
	15℃延度/cm	97	40
	闪点/℃	287	≥260
	60℃黏度/(Pa·s)	232.5	≥180
	RTFOT后质量损失/%	0.2	±0.8
SBS改性 沥青	针入度/mm	70	60~80
	软化点/℃	81	≥60
	15℃延度/cm	42	40
	闪点/℃	285	≥230
	60℃黏度/(Pa·s)	880	≤3
	RTFOT后质量损失/%	0.01	±0.8
高黏高弹 性沥青	针入度/mm	55	30~60
	软化点/℃	88.6	≥85
	15℃延度/cm	41.7	30
	闪点/℃	293	≥230
	60℃黏度/(Pa·s)	21 600	≥10 000
	RTFOT后质量损失/%	0.01	±0.8

1.1.2 木质纤维素

路用木质纤维素是添加到沥青玛蹄脂碎石混合料(stone mastic asphalt, SMA)等高等级路面中发挥某种特定功效的功能性纤维填料,起到稳定剂和增强剂的作用,试验用木质纤维素的掺量为1%,技术指标如表2。

表2 木质纤维素的基本技术指标

Table 2 Basic technical specifications of lignocellulose

试验项目	指标	试验项目	指标
长度/mm	0.27	吸油率/%	5
灰分含量/%	18	含水率/%	4.2
pH	7		

1.1.3 聚酯纤维

聚酯纤维采用从石油中提炼出来的100%聚酯材料,其技术指标如表3所示。

表3 聚酯纤维的基本技术指标

Table 3 Basic technical specifications of polyester fiber

试验项目	指标	试验项目	指标
直径/μm	20	熔点/℃	249
长度/mm	6	抗拉强度/MPa	1 060
比重/(g·cm ⁻³)	1.38	弹性模量/MPa	9 510
燃点/℃	560		

1.1.4 集料和填料

粗集料选用玄武岩,其表面粗糙,有较多棱角,质地坚硬,针片状颗粒含量低;细集料采用优质的机制砂;填料矿粉要求干燥、洁净。按照《公路工程石料试验规程》(JTG E42—2005)的要求,测得技术指标如表4所示。

表4 集料及填料矿粉技术指标

Table 4 Technical specifications of aggregate and padding mineral powder

种类	试验项目	指标
粗集料	直径/μm	20
	长度/mm	6
	比重/(g·cm ⁻³)	1.38
	燃点/℃	560
	熔点/℃	249
	抗拉强度/MPa	1 060
细集料	弹性模量/MPa	9 510
	压碎值/%	13.2
	洛杉矶磨耗损失/%	16.7
	针片状含量/%	5.7
	表观相对密度	2.725
	吸水率/%	0.5
矿粉/%	坚固性/%	2.50
	砂当量	75
	表观相对密度	2.71

1.2 试验设计

桥面铺装层是直接承受各种车辆荷载和环境

因素作用的功能层,铺装层各层协同工作发挥铺装层的作用但各自分工又有所区别,将铺装层分为表面功能层、整体功能层、防水黏结层三个层位,选择不同选择优异的铺装层材料,是保证铺装层长期处于良好的使用状态的基础^[10]。基于北方寒区地域气候特点,钢桥面铺装层材料在满足结构受力的要求前提下,还应具有良好的路用性能,尤其是低温性能。因此,本研究选用制备的高黏高弹性沥青(GNT)代替常用的SBS改性沥青,并在表面及整体功能层分别加入木质纤维素和聚酯纤维,探究其改性后的路用性能变化。

1.2.1 表面功能层

表面功能层采用SMA-13沥青玛蹄脂碎石混合料,其级配设计如表5所示。为减少制备混合料时操作造成的误差,将制备5组试件进行平行试验。

表5 SMA-13 沥青混合料级配设计

筛孔尺寸/ mm	设计级配	规范要求	
	通过率/%	上限/%	下限/%
13.2	100	100	100
9.5	71.6	75	54
4.75	28.9	32	18
2.36	24.3	25	17
0.6	15.5	18	12
0.3	12.2	16	10
0.15	10.6	14	9
0.075	9.2	10	8

1.2.2 整体功能层

整体功能层采用AC-16沥青混合料,其级配设计如表6所示。试验分组进行,为控制工程经济型,混合料掺入的聚酯纤维掺量分别为0%、0.5%和1%。为减少制备混合料时操作造成的误差,将制备5组试件进行平行试验。

1.3 试验方法

1.3.1 冻融循环试验

冻融循环试验用于模拟寒区沥青路面受水损害,通过不同冻融循环次数后的混合料质量变化来评价其水稳定性能。为保证冻融循环过程中饱和度不变,提前将饱水试件置入密封袋中,再置入冻融循环机中^[11]。冻融循环过程如下:饱水后的试件

在-18℃空气中冰冻2h,随后在20℃水中融化2h,单次冻融循环时长为4h。测试参数如下:冻融循环温度为-18~20℃,升温降温速率均为4℃/min。

1.3.2 冻融劈裂试验

冻融劈裂试验用于评价再生沥青混合料的水稳定性,试验按照T 0729—2000标准进行^[12]。测试参数为测试温度(冷冻温度为-18℃、热融温度为60℃)、冻融持续时间(冷冻16h、热融24h)和加载速率(50mm/min)。

1.3.3 低温弯曲试验

沥青混合料的低温弯曲试验可用于测定再生沥青混合料在低温条件下的抗裂能力试验按照T 0715—2011标准进行。

试件选用尺寸为250mm×30mm×35mm的小梁,测试温度选取-10℃与-20℃,试验采用万能试验机模拟低温时路面承载,加载速率为50mm/min,得到低温条件下再生沥青混合料小梁试件破坏时的最大弯拉应变、最大荷载和抗弯拉强度^[13]。

1.3.4 高温车辙试验

高温车辙试验是一种在高温条件下用于测定再生沥青混合料抗车辙能力的试验。它通过模拟高温条件下再生沥青混合料受到的车轮冲击而产生的变形,来评估其在高温环境下的稳定性和抗变形能力^[14]。车辙试验按照T 0719—2011标准进行。

试验选用尺寸为300mm×300mm×50mm的车辙试件,将制成的试件置于60℃的恒温室中保持6h,保温结束后把试件移于轮辙试验机中进行车辙变形试验,通过记录仪自动记录的45min及60min时的车辙变形,计算再生沥青混合料试件的动稳定度。

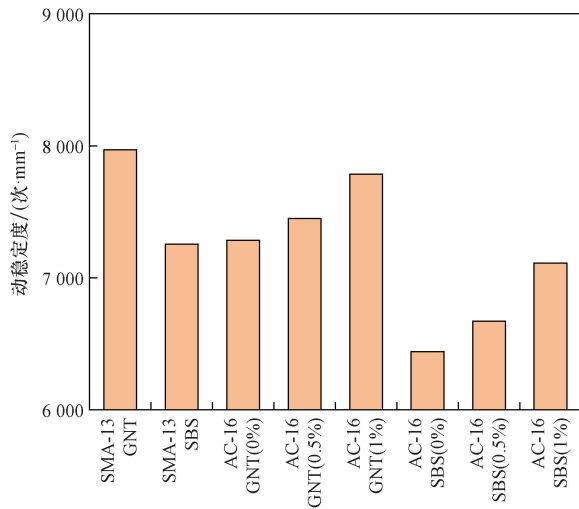
2 试验结果与讨论

2.1 高温性能

采用车辙试验,探究表面功能层与整体功能层设计的混合料高温稳定性能。通过试验测定高温条件下持续受到驱动轮碾压的混合料车辙变形,并计算其混合料的动稳定度,其数据如图1所示。

表6 AC-16 沥青混合料级配设计

级配类型	筛孔尺寸/mm										
	0.075	0.15	0.3	0.6	1.18	2.36	4.75	9.5	13.2	16	19
级配上限	8	14	18	26	36	48	62	90	92	100	100
级配下限	4	5	7	9	13	20	34	60	76	90	100
设计级配	5.7	8.4	12.6	17.4	24.9	34.7	48.3	66	83	93.8	100



GNT表示采用高黏高弹性沥青,括号内数据表示聚酯纤维的掺量
图1 动稳定度试验结果

Fig. 1 Dynamic stability test results

由图1可知,表面功能层选用高弹高黏性沥青制备 SMA-13 混合料的动稳定度大于 SBS 沥青混合料;整体功能层选用高弹高黏性沥青制备 AC-16 沥青混合料的动稳定度均大于 SBS 沥青混合料,原因是经改性的高黏沥青动力黏度远大于 SBS 沥青,较强的黏度抑制沥青材料在高温下黏度巨降的劣势,同时增加了变形能力,提高铺装层材料的高温稳定性及层间抗剪切性能。对于整体功能层的设计进行分析,随着聚酯纤维的加入,GNT 沥青与 SBS 沥青制备的沥青混合料的高温性能均有所提升,产生这一现象的原因是聚酯纤维的加入将会有效吸附混合料中游离的沥青,并起到桥接加筋作用,纤维纵横交错地布置在集料外部,形成了有效的骨架结构,使得沥青混合料的整体稳定性增加,提高了其高温性能,并且聚酯纤维熔点大于制备混合料的温度,不会发生碳化^[15]。

根据动稳定度指标,得出选用 GNT 沥青制备的沥青混合料的高温性能优于 SBS 沥青混合料;在整体功能层中掺入 1% 的聚酯纤维,所制备的沥青混合料高温性能最优。

2.2 低温性能

2.2.1 表面功能层的低温性能

试验采用小梁弯曲试验,研究了不同沥青类型设计的沥青混合料低温抗裂能力。通过试验,测定的沥青混合料数据如表7所示。

极限应变越大,其抗裂性能越好^[16]。由表7可知,GNT 沥青混合料在温度为 -10 ℃ 和 -20 ℃ 时的极限应变大于 SBS 沥青混合料,并且两种沥青混合料的极限应变值均大于规范要求的 3 000 με。在零下 20 ℃ 时,GNT 沥青混合料的极限应变为 3 675 με,

表7 表面功能层沥青混合料小梁弯曲试验结果

Table 7 Results of trabecular bending test of asphalt mixture with surface functional layer

材料类型	温度/℃	最大荷载/kN	跨中挠度/mm	抗弯强度/MPa	劲度模量/MPa	破坏应变/με
SMA-13	-10	1.31	0.97	11.49	2 245	5 120
GNT	-20	2.80	0.7	22.86	6 220	3 675
SMA-13	-10	1.16	0.82	9.45	2 195	4 305
SBS	-20	2.20	0.65	17.96	5 263	3 413

表明高黏高弹性沥青的低温性能优越,具有良好的变形能力。

2.2.2 整体功能层的低温性能

基于寒区气候特点,通过 -20 ℃ 的小梁弯曲试验来评价整体功能层沥青混合料的低温抗裂性能,数据如图2所示。

在低温条件下,再生沥青混合料的极限弯拉应变直接反映了其柔性变形能力,其值越大,抗开裂能力越强。根据规范要求,改性沥青的抗弯拉应变数值不得小于 3 000。由图2可知,GNT 沥青混合料与 SBS 沥青混合料的极限弯拉强度均大于 3 000,其中掺入 0.5% 聚酯纤维的 GNT 沥青混合料的极限弯拉应变最大,其值为 5 884,表明其低温条件下柔性表现良好,抗裂能力最强。极限弯拉强度可间接反映其受到温度影响的程度,破坏时的抗弯拉强度越大,再生沥青混合料所能承受温度变化区域越宽泛。图2中,GNT 沥青混合料的极限弯拉强度均大于 SBS 沥青混合料。随着聚酯纤维掺量的增加,GNT 以及 SBS 沥青混合料的极限抗弯拉强度均所提高,表明聚酯纤维的加入改善了两种沥青混合料的低温性能。对于掺入聚酯纤维对混合料低温性能的改善,其原因是纤维与沥青之间具有较好的黏结性,荷载作用时所产生的拉力由沥青纤维胶体共

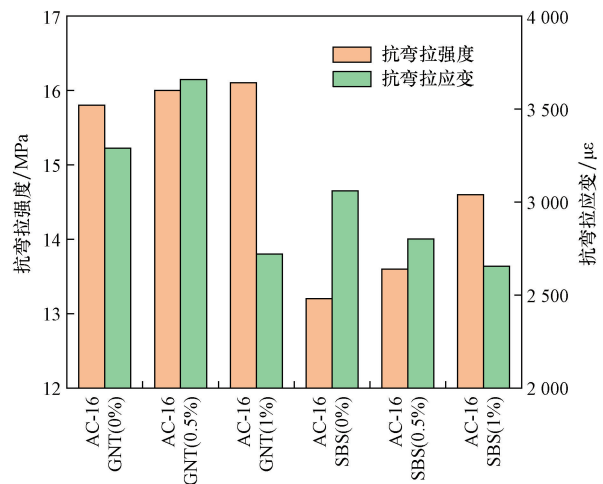


图2 沥青混合料的抗弯强度与应变

Fig. 2 Bending strength and strain of asphalt mixture

同承受,并且聚酯纤维在低温时具备良好的物理性能,不随温度变化出现变脆变硬现象,较好地起到混合料中加筋增韧效果^[17]。由图 2 可知,掺入 0.5% 聚酯纤维的 GNT 沥青混合料极限弯拉应变最大,但其抗弯拉强度却小于掺入 0.1% 聚酯纤维的 GNT 沥青混合料,对于混合料的低温性能评价,温度应力与荷载影响应进行综合考虑,所以将强度与应变做比得到的弯曲进度模量作为指标进行全面低温评价,结果如图 3 所示。

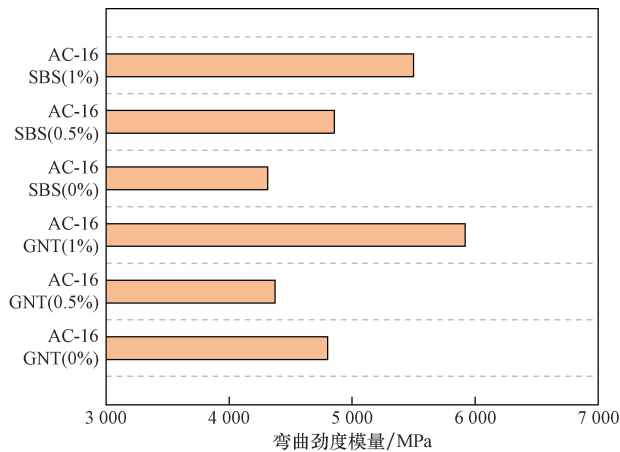


图 3 沥青混合料的弯曲劲度模量

Fig. 3 Bending stiffness modulus of asphalt mixture

由图 3 可知,掺入 1% 聚酯纤维的 GNT 沥青混合料弯曲劲度模量最大,其值为 5 919 MPa。表明整体功能层采用 GNT 沥青制备的 AC-16 沥青混合料掺入 1% 聚酯纤维,其受荷载和温度应力影响最小,抵抗低温开裂能力最强,低温性能较优。

2.3 水稳定性

2.3.1 表面功能层的水稳定性

由于表面功能层在桥面铺装中的位置直接与外界环境接触,在水稳定性性能研究中,结合寒区气候特点,模拟其多次冻融循环后的稳定性,结果见表 8 所示。

由表 8 可知,随着冻融循环次数的增加,SBS 与 GNT 沥青混合料的劈裂抗拉强度比(tensile strength ratio, TSR)均减小,这一结果表明沥青路面会受到

季冬区冻融影响,从而使其水稳定性降低。GNT 沥青混合料的 TSR 值与极限劈裂强度均大于 SBS 沥青混合料,表明经改性后的 GNT 沥青在水稳定性性能表现上由于 SBS 沥青。此外,经十次冻融循环的 SBS 与 GNT 沥青混合料 TSR 值分别为 86.3% 和 83.5%,远大于规范要求的 75%,仍满足使用要求。

2.3.2 整体功能层的水稳定性

通过冻融劈裂试验,研究了不同沥青类型以及纤维掺量对沥青混合料的水稳定性影响。通过试验,连续测定了未进行冻融和进行单次冻融循环的混合料劈裂抗拉强度。经过公式计算,得出 TSR,其数据如图 4 所示。

由图 4 可知,GNT 与 SBS 沥青混合料的 TSR 值随着聚酯纤维的加入而增大,空隙率随之减小。这主要是由于聚酯纤维对沥青具有较强的吸收和吸附作用,增加了耐热性好、黏性大的结构沥青膜的厚度,较厚的沥青膜使得沥青老化速率减慢,从而沥青可长时间地黏附在集料表面,有效地减弱了水的浸蚀破坏作用^[18-20],提高浸水后的残留稳定度。并且聚酯纤维可以填补混合料部分空袭,减少水分

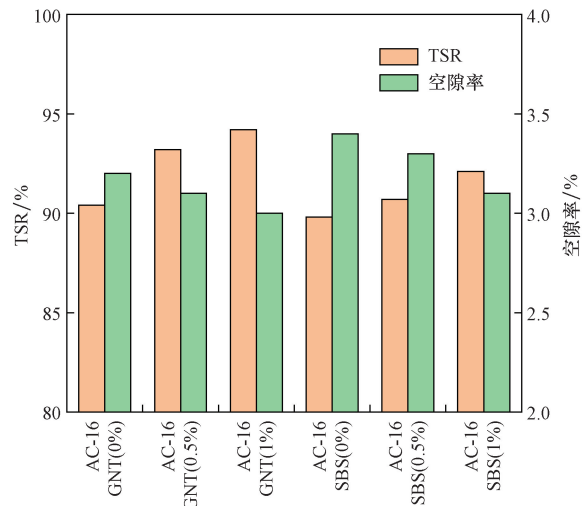


图 4 整体功能层沥青混合料的 TSR 值与空隙率

Fig. 4 TSR value and porosity of asphalt mixture of integral functional layer

表 8 表面功能层沥青混合料冻融循环劈裂试验结果

Table 8 The results of splitting test of asphalt mixture in surface functional layer under freeze-thaw cycle

沥青种类	冻融循环次数	对照组		冻融循环组		TSR/%
		毛体积相对密度	劈裂强度/MPa	毛体积相对密度	劈裂强度/MPa	
GNT	1 次	2.391	1.12	2.390	1.08	96.4
	5 次	2.402	1.03	2.411	0.93	90.3
	10 次	2.401	1.02	2.412	0.88	86.3
SBS	1 次	2.392	0.91	2.393	0.86	94.5
	5 次	2.401	1.02	2.412	0.92	90.2
	10 次	2.403	0.97	2.411	0.81	83.5

通过外空隙浸入与内部混合料相接触,减低受到冻胀和水分腐蚀作用。通过对 GNT 与 SBS 沥青混合料的空隙率分析,发现同掺量下的 GNT 沥青混合料空隙率要小于 SBS 沥青混合料,产生这一现象的原因是填充 SBS 沥青混合料内部空隙的过量纤维重新产生新的空隙,表明 GNT 沥青与纤维黏附结合性能更好,优于 SBS 沥青。

不同沥青类型和纤维掺量影响着沥青混合料的 TSR 值与空隙率,证明了其指标对混合料水稳定性性能的影响。根据劈裂强度比与空隙率指标,推荐选用 GNT 沥青制备沥青混合料,并掺入 1% 聚酯纤维,其空隙率最小,抗水损伤能力最强。

3 结论

低掺纤维的高黏高弹沥青混凝土桥面铺装寒区的实践工程研究,不仅能显著提高桥面的耐久性、抗裂性和温度适应性,改善交通安全性和舒适性,还能推动环境友好型材料的应用,减少施工和维护成本,具有重要的工程实践意义。推动寒区材料的创新研发和应用,进一步丰富了寒区工程建设的材料库,并为类似环境条件下的道路建设提供解决方案。

(1) 结合寒区气候特点选择不同选择优异的铺装层材料,是保证铺装层长期处于良好的使用状态的基础。表面功能层与整体功能层选用同种沥青并选择不同纤维改性方式,可以避免材料温缩系数不同,使其铺装层与桥梁结构的温度变形协调。

(2) 表面功能层与整体功能层均选用高黏高弹改性沥青做结合料,能有效提高沥青桥面铺装层的路用性能。铺装层选用高黏高弹性沥青制备的沥青混合料与 SBS 沥青混合料相比,表面铺装层的高温性能提高 10%、低温性能提高 19%、水稳定性提高 5%;整体功能层的高温性能提高 9.5%、低温性能提高 8%、水稳定性提高 4%。

(3) 整体功能层掺入聚酯纤维显著提升高黏高弹改性沥青混合料的路用性能,满足工程经济要求下,当聚酯纤维掺量为混合料总质量的 1% 时,其制备的沥青混合料高温性能提高 7%、低温性能提高 23%、水稳定性提高 5%。

参 考 文 献

[1] 黄卫. 大跨径桥梁钢桥面铺装设计[J]. 土木工程学报, 2007, 40(4): 65-77.
Huang Wei. Design of steel deck pavement for long-span bridges [J]. Journal of Civil Engineering, 2007, 40 (4): 65-77.

[2] 杨育生, 李振霞, 王选仓, 等. 桥面铺装同步碎石防水粘结层的路用性能[J]. 长安大学学报: 自然科学版, 2009, 29(6):

19-23, 58.

Yang Yusheng, Li Zhenxia, Wang Xuancang, et al. Road performance of synchronous crushed stone waterproof adhesive layer for bridge deck pavement [J]. Journal of Chang'an University: Natural Science Edition, 2009, 29(6): 19-23, 58.

- [3] 何亮, 饶志鹏, 凌天清, 等. 大跨径钢桥沥青铺装层裂缝行为研究进展[J]. 公路, 2018(7): 71-80.
He Liang, Rao Zhipeng, Ling Tianqing, et al. Research progress on crack behavior of asphalt pavement of long-span steel bridge [J]. Highway, 2018(7): 71-80.
- [4] 侯贵, 王选仓, 赵伦, 等. 寒冷地区桥面铺装层层间工作状态[J]. 长安大学学报(自然科学版), 2018, 38(4): 39-47.
Hou Gui, Wang Xuancang, Zhao Lun, et al. The inter-layer working state of bridge deck pavement in cold regions [J]. Journal of Chang'an University: Natural Science Edition, 2018, 38(4): 39-47.
- [5] 雷进, 吴建民, 虞将苗, 等. 桥面铺装排水联结层设计与性能评价[J]. 公路, 2018(12): 146-150.
Lei Jin, Wu Jianmin, Yu Jiangmiao, et al. Design and performance evaluation of drainage coupling layer for bridge deck pavement [J]. Highway, 2018(12): 146-150.
- [6] 魏柱, 周志刚, 邓长清, 等. 不同水泥混凝土桥面沥青铺装防水粘结层性能分析[J]. 公路, 2018(9): 87-93.
Guo Zhu, Zhou Zhigang, Deng Changqing, et al. Performance analysis of waterproof bonding layer of asphalt pavement on different cement concrete bridge decks [J]. Highway, 2018(9): 87-93.
- [7] 刘秀, 冯德成, 孙朝杰, 等. 寒区聚酯纤维沥青混凝土桥面铺装层的路用性能研究[J]. 中外公路, 2014, 34(5): 262-266.
Liu Xiu, Feng Decheng, Sun Chaojie, et al. Study on road performance of polyester fiber asphalt concrete bridge deck pavement in cold region [J]. China-Foreign Highway, 2014, 34(5): 262-266.
- [8] 马晓燕, 陈华鑫, 刑明亮, 等. 基于 DSR 直接拉伸试验的沥青高温粘聚性分析[J]. 材料科学与工程学报, 2018(2): 223-228.
Ma Xiaoyan, Chen Huaxin, Xing Mingliang, et al. Analysis of high temperature cohesion of asphalt based on DSR direct tensile test [J]. Journal of Materials Science and Engineering, 2018(2): 223-228.
- [9] 熊子佳, 程金梁, 邓成, 等. 高粘改性剂对沥青及 OGFC 混合料性能的影响[J]. 大连交通大学学报, 2017(5): 94-97.
Xiong Zijia, Cheng Jinliang, Deng Cheng, et al. The effect of high viscosity modifier on the performance of asphalt and OGFC mixture [J]. Journal of Dalian Jiaotong University, 2017(5): 94-97.
- [10] 李嘉, 丁峰, 曹君辉, 等. 高韧性混凝土组合桥面铺装层间应力简化计算方法[J]. 湖南大学学报(自然科学版), 2022, 49(11): 150-160.
Li Jia, Ding Feng, Cao Junhui, et al. Simplified calculation method for interlayer stress of high toughness concrete composite bridge deck pavement [J]. Journal of Hunan University (Natural Science Edition), 2022, 49(11): 150-160.
- [11] 李萍, 何腾, 念腾飞, 等. 冻融循环下沥青-集料的黏附性试验与评价方法[J]. 江苏大学学报(自然科学版), 2020, 41(1): 103-110.
Li Ping, He Teng, Nian Tengfei, et al. Adhesion test and evaluation method of asphalt-aggregate under freeze-thaw cycles [J]. Journal of Jiangsu University (Natural Science Edition), 2020,

- 41(1): 103-110.
- [12] 李龙龙, 李萍, 纪上青, 等. 添加抗剥落剂沥青混合料的冻融劈裂试验[J]. 公路, 2018, 63(5): 242-246.
Li Longlong, Li Ping, Ji Shangqing, et al. Freeze-thaw splitting test of asphalt mixture with anti-stripping agent [J]. Highway, 2018, 63(5): 242-246.
- [13] 陈飞, 张林艳, 封基良, 等. 沥青混合料低温抗裂性能试验方法研究进展[J]. 材料导报, 2021, 35(S2): 127-137.
Chen Fei, Zhang Linyan, Feng Jiliang, et al. Research progress on test methods for low temperature crack resistance of asphalt mixture [J]. Material Bulletin, 2021, 35(S2): 127-137.
- [14] 肖军, 尹强, 姜克锦, 等. 复掺纤维改善高黏弹改性透水沥青混合料性能试验研究[J]. 公路, 2022, 67(8): 380-385.
Xiao Jun, Yin Qiang, Jiang Kejin, et al. Experimental study on improving the performance of high viscoelastic modified permeable asphalt mixture with composite fiber [J]. Highway, 2022, 67(8): 380-385.
- [15] 章汪琛, 扈惠敏, 熊亮, 等. 不同纤维沥青胶浆抗剪切性能试验研究[J]. 科学技术与工程, 2020, 20(12): 4890-4895.
Zhang Wangchen, Hu Huimin, Xiong Liang, et al. Experimental study on shear resistance of asphalt mortar with different fibers [J]. Science Technology and Engineering, 2020, 20(12): 4890-4895.
- [16] 宋世杰, 李强, 曾宪辉, 等. 直投式高黏改性沥青混合料路用性能试验[J]. 科学技术与工程, 2024, 24(18): 7867-7873.
Song Shijie, Li Qiang, Zeng Xianhui, et al. Road performance test of high viscosity modified asphalt mixture [J]. Science and Technology and Engineering, 2024, 24(18): 7867-7873.
- [17] 张楠, 郑南翔, 高志敏, 等. 中空聚酯纤维沥青胶浆特性及增韧机理研究[J]. 硅酸盐通报, 2018, 37(2): 553-560, 566.
Zhang Nan, Zheng Nanxiang, Gao Zhimin, et al. Study on the properties and toughening mechanism of hollow polyester fiber asphalt mortar [J]. Silicate Bulletin, 2018, 37(2): 553-560, 566.
- [18] 李海军, 吕伟民. 木质素纤维在 SMA 混合料中作用机理分析与试验研究[J]. 石油沥青, 1998, 12(4): 1-8.
Li Haijun, Lü Weimin. Mechanism analysis and experimental study of lignin fiber in SMA mixture [J]. Petroleum Asphalt, 1998, 12(4): 1-8.
- [19] 宋云祥, 韦佑坡, 李玉梅, 等. 玄武岩纤维沥青胶浆的路用性能[J]. 公路交通科技, 2012, 29(8): 15-19.
Song Yunxiang, Wei Youpo, Li Yumei, et al. Road performance of basalt fiber asphalt mastic [J]. Highway Traffic Technology, 2012, 29(8): 15-19.
- [20] 赵豫生, 李红涛. 玄武岩短切纤维对沥青混凝土性能的影响[J]. 公路交通科技, 2012, 29(9): 38-42.
Zhao Yusheng, Li Hongtao. Effects of basalt chopped fibers on the properties of asphalt concrete [J]. Highway Transportation Technology, 2012, 29(9): 38-42.