

高韧超薄磨耗层沥青混合料设计与性能研究^{*}

魏彩旺, 赵大能, 顾红林, 徐磊, 吴顺远, 闵杭

(云南省曲靖市交通建设投资集团有限公司, 云南 曲靖 655000)

摘要: 针对传统超薄沥青磨耗层存在的缺陷, 提出一种 GT-8 高韧超薄磨耗层沥青混合料, 对其配合比进行设计, 并通过高温车辙试验、低温小梁弯曲试验、浸水马歇尔试验、冻融劈裂试验、肯塔堡飞散试验、抗冲击韧性试验分析其路用性能。结果表明, GT-8 高韧超薄沥青混合料的最佳油石比为 7.9%, 该配比下沥青膜厚度超过 15 μm , 其高温抗车辙性能、水稳定性及抗松散性能满足规范要求; 与传统 AC-13、SMA-13 沥青混合料相比, GT-8 高韧超薄沥青混合料具有更好的抗低温开裂性能和抗冲击性能。

关键词: 公路; 高韧超薄磨耗层; 沥青混合料; 路用性能

中图分类号: U416.217

文献标志码: A

文章编号: 1671-2668(2024)02-0042-04

超薄沥青磨耗层以其造价低廉、节约能源、降低维护成本等优点已成为一种环境友好型路面^[1-2]。高速公路的快速发展对超薄沥青路面磨耗层的要求日益严苛, 超薄沥青磨耗层的路用性能提升成为研究热点。胡勇等设计 4 种不同空隙率的多孔超薄沥青磨耗层(PUAWL-8)^[3], 通过路用性能及渗水功能试验, 发现 PUAWL-8 的最佳空隙率为 20%~22%。罗检萍等的研究表明将高韧超薄沥青磨耗层应用于桥面铺装可显著提升桥面的平整性、抗滑性及层间黏结强度^[4]。虞将苗等根据工程应用结果, 认为将高韧超薄沥青磨耗层应用于桥面铺装, 桥面摩擦因数提升 15.5 BPN, 且降噪性能得到较大改善^[5]。沈钱超研究发现玄武岩纤维能提高 SMA-10 超薄沥青罩面的构造深度和摩擦摆值^[6]。张兵认为稳定型橡胶改性沥青超薄磨耗层的工程应用条件为原路面车辙深度不大于 15 mm、平整度指数不大于 2.3^[7]。张彩利等通过优化级配并以高黏高弹改性沥青为胶结料研制了骨架密实型超薄磨耗层高黏高弹沥青混合料^[8]。本文针对普通超薄沥青磨耗层存在的低温抗裂性能较差、抗松散能力不足等缺陷, 依托实际工程项目, 采用 GT TECH 高黏高弹改性沥青设计一种 GT-8 超薄磨耗层沥青混合料, 并对其高温稳定性、低温抗裂性、水稳定性、抗松散性能及抗冲击韧性进行试验研究, 为超薄磨耗层罩面技术的发展和應用提供参考。

1 原材料及配合比设计

1.1 沥青

薄层罩面是直接承受行车荷载和环境(紫外线辐射、水、热、冰等)影响的路表功能层, 质地优良的原材料是确保其路用性能和长寿命的重要因素, 沥青类型及基本物理性质直接影响超薄磨耗层的路用性能。

本文采用 GT TECH 高黏高弹改性沥青作为胶结材料设计超薄磨耗层沥青混合料, 其高强的黏结能力可保证路面结构具有足够的耐久性^[9]。GT TECH 高黏高弹改性沥青的基本技术指标见表 1。

表 1 GT TECH 高黏高弹改性沥青的基本技术指标

项目	试验结果	技术要求
针入度(25 $^{\circ}\text{C}$)/(0.1 mm)	39.8	30~50
软化点/ $^{\circ}\text{C}$	97.5	≥ 90
延度(5 $^{\circ}\text{C}$, 5 cm/min)/cm	37	≥ 20
软化点差/ $^{\circ}\text{C}$	1.3	≤ 2.5
弹性恢复率(25 $^{\circ}\text{C}$)/%	98.6	≥ 95
闪点/ $^{\circ}\text{C}$	320	≥ 230
60 $^{\circ}\text{C}$ 动力黏度/(Pa \cdot s)	$> 580\ 000$	$\geq 580\ 000$

1.2 集料

云南省曲靖市某道路工程, 路线经由曲靖市麒麟区、罗平县、师宗县, 沿线石料丰富。根据超薄磨

^{*} 基金项目: 湖南省交通运输厅科技项目(201904)

耗层对集料的要求(满足超薄磨耗层承载力和抗滑耐磨性能要求),粗集料选择表面洁净、干燥、有棱角的玄武岩碎石,细集料选择石灰岩机制砂。施工中采用 3 档集料,粒径分别为 5~8 mm(1[#])、3~5 mm(2[#])、0~3 mm(3[#]),其中 1[#]、2[#] 为粗集料,

3[#] 为细集料。集料筛分结果见表 2,粗细集料及矿粉的主要技术指标见表 3~5。

1.3 配合比设计

根据超薄磨耗层的功能需求和 CAVF 法设计理论,对 GT-8 高韧超薄沥青混合料进行配合比设

表 2 集料筛分结果

集料编号	粒径/mm	通过下列筛孔(mm)的质量百分率/%							
		9.500	4.750	2.360	1.180	0.600	0.300	0.150	0.075
1 [#]	5~8	100.0	12.2	0.6	0.6	0.6	0.6	0.6	0.6
2 [#]	3~5	100.0	57.6	1.8	0.8	0.8	0.8	0.8	0.6
3 [#]	0~3	100.0	100.0	80.8	49.9	30.3	20.7	14.6	5.8

表 3 粗集料性能与技术要求

项目	试验结果	技术要求
压碎值/%	18.7	≤28
洛杉矶磨耗值/%	16.5	≤30
表观相对密度	5~8 mm	≥2.5
	3~5 mm	≥2.5
吸水率/%	0.49	≤3
针片状颗粒的质量分数/%	7.2	≤15
粒径<0.075 mm 颗粒的质量分数(水洗法)/%	0.37	≤1

表 4 细集料性能与技术要求

项目	试验结果	技术要求
表观相对密度	2.721	≥2.5
砂当量/%	81.2	≥60
坚固性/%	2.42	≤12
含泥量/%	0.91	≤3

表 5 矿粉性能与技术要求

项目	试验结果	技术要求
表观相对密度	2.806	≥2.50
外观	无团粒结块	无团粒结块
亲水系数	0.5	<1

计,设计结果见表 6。

考虑到油石比对超薄沥青磨耗层路用性能的影响大,以 7.0%为初始油石比,按 0.3%的油石比差,按照表 6 所示合成级配制备 5 种不同油石比的超薄

磨耗层沥青混合料试件进行马歇尔击实试验,试验结果见表 7。

表 6 GT-8 高韧超薄沥青混合料的级配范围及合成级配

级配类型	通过下列筛孔(mm)的质量百分率/%							
	9.500	4.750	2.360	1.180	0.600	0.300	0.150	0.075
级配上限	100.0	80.0	35.0	25.0	20.0	15.0	12.0	8.0
级配下限	100.0	40.0	15.0	8.0	6.0	5.0	4.0	3.0
合成级配	100.0	50.1	21.0	13.0	9.3	7.5	6.3	4.6

表 7 不同油石比下超薄磨耗层沥青混合料马歇尔击实试验结果

油石比/%	空隙率/%	矿料间隙率/%	有效沥青饱和度/%	稳定度/kN	沥青膜厚度/μm	析漏损失率/%
7.0	6.2	20.5	69.76	9.08	13.33	0.17
7.3	5.7	20.3	71.92	9.33	13.76	0.19
7.6	4.7	20.4	76.96	9.38	14.43	0.22
7.9	4.5	20.6	78.16	9.86	15.12	0.29
8.2	3.9	20.9	81.34	9.57	15.76	0.35

由表 7 可知:随着油石比的增大,超薄磨耗层混合料的空隙率减小,沥青膜厚度增大。沥青膜厚度是影响混合料低温性能、水稳定性和抗剥落性能的关键指标,超薄磨耗层的功能要求混合料具有较好的抗裂和抗冲击韧性,要求其沥青膜厚度 $\geq 15\ \mu\text{m}$,结合析漏损失试验结果,确定设计级配的最佳沥青用量为 7.9%。

2 路用性能分析

2.1 高温抗车辙性能

根据 JTG E20—2011《公路工程沥青及沥青混合料试验规程》中车辙试验方法,按照上述沥青混合料配合比及最佳沥青用量成型 GT-8 高黏高弹沥青混合料试件进行 60℃ 高温车辙试验,根据试验结果按式(1)计算其动稳定度,结果见表 8。

$$D_s = \frac{(t_2 - t_1)N}{d_2 - d_1} c_1 c_2 \quad (1)$$

式中: D_s 为动稳定度(次/mm); t_1 为 45 min; t_2 为 60 min; N 为车辙试验机轮子每分钟行走次数, $N=42$ 次/min; d_1 、 d_2 分别为 t_1 、 t_2 对应的车辙深度(mm); c_1 、 c_2 为测试常数,取 1.0。

表 8 GT-8 高黏高韧沥青混合料的动稳定度

试验编号	车辙深度/mm	动稳定度/(次·mm ⁻¹)
1	1.528	7 453
2	1.507	8 269
3	1.619	6 814
平均动稳定度/(次·mm ⁻¹)		7 512
变异系数/%		12.3

从表 8 可以看出:3 组试验测定的动稳定度平均值为 7 512 次/mm,满足 JTG E20—2011 的要求($\geq 3\ 000$ 次/mm),且变异系数为 12.3%,满足规范中变异系数不大于 20%的要求。GT-8 高韧高黏沥青混合料具有良好的高温抗车辙性能。

2.2 低温抗裂性能

采用 MTS 万能试验机对 GT-8 高韧高黏沥青混合料进行低温小梁三点弯曲试验,测试其低温抗裂性能。采用轮碾法成型尺寸为 300 mm×300 mm×50 mm 的 GT-8 高韧高黏沥青混合料车辙板试件,然后切成尺寸为 250 mm×35 mm×30 mm 的标准小梁试件,将小梁试件放置于 -10℃ 温控箱内 4 h 后进行 MTS 加载,加载速率

为 50 mm/min,加载至试件断裂。根据试验结果,按式(2)计算试件的弯曲破坏应变。

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

式中: ϵ_B 为小梁试件破坏时的弯拉应变(10^{-6}); h 为小梁试件的高度(mm); d 为小梁试件破坏时的跨中挠度(mm); L 为小梁试件的跨径(mm)。

同时选取工程常用的 SBS 聚合物改性沥青 AC-13 沥青混合料、SMA-13 沥青混合料作为对照组,对比分析超薄磨耗层沥青混合料的低温抗裂性能。弯曲破坏应变测试结果见图 1。

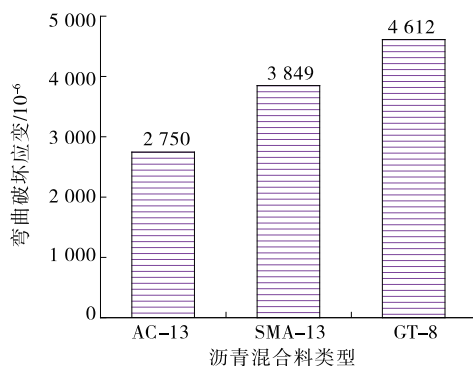


图 1 3 种沥青混合料的弯曲破坏应变测试结果

由图 1 可知:与 AC-13、SMA-13 沥青混合料相比,GT-8 高黏高弹沥青混合料的弯曲破坏应变分别提升 67.7%、19.8%,具有更好的低温抗裂性能。这是由于 AC-13 沥青混合料为密级配,在低温条件下容易发生脆性断裂,弯曲破坏应变较小;SMA-13 沥青混合料为间断级配,油石比比 AC-13 大,且其中掺杂的纤维能够更好地吸附沥青,其低温抗裂性能与 AC-13 相比有所提升;GT-8 沥青混合料选用高黏高弹改性沥青,且油石比大,为 7.9%,能更好地抵抗低温开裂。

2.3 抗水损害性能

根据 JTG E20—2011 对 GT-8 高黏高弹沥青混合料试件进行浸水马歇尔试验和冻融劈裂试验,测试其稳定度和劈裂强度,结果见表 9、表 10。

表 9 GT-8 高黏高弹沥青混合料浸水马歇尔试验结果

试验类型	试件编号	稳定度/kN	平均稳定度/kN
浸水前	1-1	9.53	9.69
	1-2	9.24	
	1-3	10.14	
	1-4	9.87	

续表 9

试验类型	试件编号	稳定度/kN	平均稳定度/kN
浸水后	2-1	8.74	8.75
	2-2	8.35	
	2-3	9.26	
	2-4	8.64	

表 10 GT-8 高黏高弹沥青混合料冻融劈裂试验结果

试验类型	试件编号	劈裂强度/MPa	平均劈裂强度/MPa
未冻融	1-1	1.04	1.05
	1-2	1.11	
	1-3	0.98	
	1-4	1.07	
冻融后	2-1	0.97	0.98
	2-2	1.02	
	2-3	0.92	
	2-4	1.01	

根据试验结果,按式(3)、式(4)计算,得 GT-8 高黏高弹沥青混合料的马歇尔残留稳定性和冻融劈裂强度比分别为 90.3%、93.3%,满足 JTG E20—2011 中分别不低于 85%、80% 的要求。GT-8 沥青混合料的抗水损害性能较好。

$$S_0 = \frac{S_2}{S_1} \times 100 \quad (3)$$

$$R_{TSR} = \frac{R_{T2}}{R_{T1}} \times 100 \quad (4)$$

式中: S_0 为浸水马歇尔残留稳定度(%); S_1 、 S_2 分别为沥青混合料浸水 30 min 和 48 h 时的稳定度(kN); R_{TSR} 为冻融劈裂强度比(%); R_{T1} 、 R_{T2} 分别为沥青混合料未冻融和冻融之后的劈裂抗拉强度(MPa)。

2.4 黏结性能

通过肯塔堡飞散试验,根据马歇尔试件的脱落情况评价沥青混合料中沥青用量是否满足要求,评定沥青与集料之间的黏结性能。根据 JTG E20—2011 对 GT-8 高黏高弹沥青混合料进行肯塔堡飞散试验,根据试验结果,按式(5)计算飞散损失率,结果见表 11。

$$\Delta S = \frac{m_1 - m_0}{m_0} \times 100 \quad (5)$$

式中: ΔS 为飞散损失率(%); m_0 、 m_1 分别为试验前后沥青混合料质量(g)。

表 11 GT-8 高黏高弹沥青混合料飞散试验结果

试件编号	试验前试件质量/g	试验后试件质量/g	飞散损失率/%
1	1 217.4	1 182.3	2.88
2	1 204.3	1 165.5	3.22
3	1 206.7	1 178.1	2.37
4	1 210.8	1 166.8	3.63
平均飞散损失率/%			3.025

由表 11 可知:GT-8 高韧高黏沥青混合料的飞散损失率为 3.025%,满足 JTG E20—2011 中飞散损失率不大于 8% 的要求。GT-8 高韧高黏沥青混合料中的高黏高弹沥青与集料之间具有良好的黏结性能,沥青胶浆与骨料之间不易发生脱落。

2.5 抗冲击性能

采用 MTS 万能试验机对 GT-8 高韧高黏沥青混合料进行冲击韧性试验,测试其冲击韧性,评价其抗冲击性能。将 250 mm×35 mm×30 mm 的沥青混合料标准小梁试件放置于 15 ℃温控箱内静置 4 h 后进行 MTS 加载,加载速率为 500 mm/min,加载至试件断裂。根据试验结果,按式(6)计算混合料的冲击韧性。同时与 AC-13、SMA-13 沥青混合料进行对比,结果见图 2。

$$A_k = \int_0^{x_p} P(x) dx \quad (6)$$

式中: A_k 为冲击韧性(N·mm); x_p 为沥青混合料破坏时的最大荷载; x 为混合料试件的变形(mm); $P(x)$ 为 x 对应的荷载(N)。

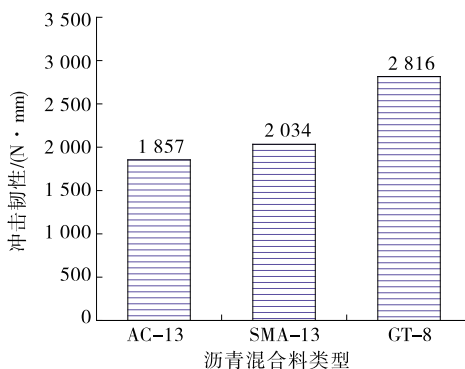


图 2 3 种沥青混合料的冲击韧性对比

由图 2 可知:与 AC-13、SMA-13 沥青混合料相比,GT-8 高黏高弹沥青混合料的冲击韧性分别提高 51.6%、38.4%,GT-8 沥青混合料具有更强的抗冲击韧性。GT-8 沥青混合料采用 GTTECH 高黏

(下转第 50 页)

青混凝土层结构的疲劳寿命平均为常规沥青混凝土层结构的 1.083 倍,常规沥青混凝土路面和硬质沥青混凝土路面的厚度-轴载关系分别为 $h = 4 \times 10^{-9} N_e^{1.0132}$ 、 $h = 2 \times 10^{-9} N_e^{1.0413}$ 。

本文仅对力学-经验法疲劳预估模型下硬质沥青混凝土等效厚度进行了研究,后续将开展基于 Miner 疲劳累积损伤定律的等效厚度研究。

参考文献:

- [1] 王知乐.硬质沥青与岩沥青改性沥青高模量混合料路用性能对比试验研究[J].工业建筑,2019,49(5):121-125.
- [2] 马峰,傅珍.硬质沥青和高模量沥青混凝土在法国的应用[J].中外公路,2008,28(6):221-223.
- [3] BARI J, WITCZAK M. Development of a new revised version of the Witczak E* predictive model for hot mix asphalt mixtures[J]. Journal of the Association of Asphalt Paving Technologists, 2006, 75: 381-423.
- [4] 刘宏富,郑健龙,钱国平,等.硬质沥青及其混合料疲劳性能对比试验研究[J].中外公路,2011,31(5):205-209.
- [5] 周庆华,沙爱民.高模量沥青混凝土路面疲劳研究[J].

土木工程与管理学报,2013,30(1):30-34.

- [6] LEIVA-VILLACORTA F, TAYLOR A, WILLIS R. High-modulus asphalt concrete (HAMC) mixtures for use as base course [R]. NCAT Report 17-04, 2017: 1-61.
- [7] 杨琳.基于低标号沥青与岩沥青掺配技术高模量沥青混合料耐久性试验研究[J].公路工程,2016,41(4):297-301.
- [8] 欧阳新峰.高模量沥青混合料在调坡路面中的应用研究[D].西安:长安大学,2014.
- [9] ARNOLD G, ROGERS D, HALL S, et al. High modulus asphalt to prevent rutting at intersections [C]//17th AAPA International Flexible Pavements Conference, 2017: 1-11.
- [10] HERNANDE M I G, SHAHRI A. Effect in the high modulus asphalt concrete with the temperature [C]//6th Eurasphalt & Eurobitume Congress, 2016: 235-247.
- [11] 中交路桥技术有限公司.公路沥青路面设计规范:JTG D50—2017[S].北京:人民交通出版社股份有限公司,2017.

收稿日期:2023-03-15

(上接第 45 页)

高弹改性沥青,且油石比较高,沥青膜厚度超过 $15 \mu\text{m}$,增加了沥青混合料的韧性,能较好地抵抗沥青路面磨耗层服役期车辆荷载的冲击。

3 结论

本文针对普通超薄沥青磨耗层存在的缺陷,设计一种 GT-8 高韧超薄磨耗层沥青混合料,并对其高温稳定性、低温抗裂性、水稳定性、抗松散性能及抗冲击特性展开试验研究,结论如下:

(1) GT-8 高韧超薄磨耗层沥青混合料的最佳油石比为 7.9%,此时沥青膜厚度超过 $15 \mu\text{m}$,其高温抗车辙性能、水稳定性及抗松散性能较好,满足规范要求。

(2) 与传统 AC-13、SMA-13 沥青混合料相比,GT-8 高韧超薄磨耗层沥青混合料具有更高的弯曲破坏应变与冲击韧性,其低温抗开裂性能与抗冲击性能更好。

参考文献:

- [1] 叶康,张毅,李杰.超薄罩面层间黏结性能评价指标与

检测方法分析[J].公路与汽运,2023(1):91-94.

- [2] CHEN D H, SCULLION T. Very thin overlays in Texas [J]. Construction and Building Materials, 2015, 95: 108-116.
- [3] 胡勇,鹿蓉,黄卫国,等.空隙率对多孔超薄沥青磨耗层性能和渗水功能的影响[J].公路交通科技,2022,39(5):9-15.
- [4] 罗检萍,黄红明.高韧超薄沥青磨耗层在旧砼桥面铺装中的应用[J].公路与汽运,2022(2):126-129.
- [5] 虞将苗,陈富达,彭馨彦,等.高韧超薄沥青磨耗层在港珠澳大桥珠海人工岛通道上的应用[J].清华大学学报(自然科学版),2020,60(1):48-56.
- [6] 沈钱超.玄武岩纤维沥青路面超薄磨耗层性能试验研究[D].扬州:扬州大学,2021.
- [7] 张兵.稳定型橡胶改性沥青超薄磨耗层的应用研究[D].西安:长安大学,2019.
- [8] 张彩利,李天豪,丁维哲,等.超薄磨耗层高黏高弹沥青混合料性能研究[J].科学技术与工程,2023,23(28):12241-12249.
- [9] 高磊,吴旷怀.基于正交试验的复合高黏高弹改性沥青制备及性能研究[J].公路,2021,66(12):323-329.

收稿日期:2023-04-17