

DOI: 10.20035/j.issn.1671-2668.2024.05.009

引用格式: 秦恣. 胶粉/RET 高黏改性沥青及其混合料路用性能研究[J]. 公路与汽运, 2024, 40(5): 54-59.

Citation: QIN Min. Research on pavement performance of rubber powder /RET high viscosity modified asphalt and mixture[J]. Highways & Automotive Applications, 2024, 40(5): 54-59.

胶粉/RET 高黏改性沥青及其混合料路用性能研究*

秦恣

(湖南省公路学会, 湖南 长沙 410114)

摘要: 为提升排水式沥青路面的性能, 选用胶粉、反应性弹性体三元共聚物(RET)和高黏剂制备高黏复合改性沥青, 通过常规物理性能试验研究 3 种改性剂对沥青性能的影响, 采用离析试验探究其储存稳定性, 并通过车辙试验、低温小梁弯曲试验、浸水马歇尔试验和渗水试验研究高黏复合改性沥青混合料的路用性能。结果表明, 选用 15% 胶粉、1.5% RET 和 9% 高黏剂制备高黏改性沥青, 其综合性能最佳, 且储存稳定性符合规范要求; 胶粉、RET 和高黏剂的掺入能显著提升沥青混合料的路用性能, 与基质沥青混合料相比, 高黏复合改性沥青混合料的动稳定度提高 3.46 倍, 最大弯拉应变提升 23.3%, 残留稳定度上升 15.9%, 其渗水系数满足规范要求。

关键词: 公路; 高黏复合改性沥青; 胶粉; 反应性弹性体三元共聚物(RET); 高黏剂; 路用性能

中图分类号: U416.217

文献标志码: A

文章编号: 1671-2668(2024)05-0054-06

排水沥青路面作为一种多孔且开级配的路面结构, 因其出色的排水、防滑和降噪性能, 在中国高速公路和城市主要道路建设中得到广泛使用^[1-3]。但由于其内部多孔结构, 易受到光、氧和水等外界因素的影响, 导致沥青老化、集料松散和水损害等, 影响沥青路面的耐久性^[4-7]。通常采用高黏改性沥青铺筑排水性路面, 但高黏剂价格昂贵, 高黏改性沥青的生产成本高。因此, 研发成本低廉且满足排水沥青混合料性能要求的高黏改性剂显得尤为重要。

中国废旧轮胎产量逐年攀升, 若处理不当将造成环境“黑色污染”^[8-11]。目前将废橡胶粉应用于改性沥青中取得了显著成果, 其中包括橡胶粉复配高黏剂制备高黏沥青技术, 为高黏沥青制备开辟了新途径。周志刚等采用橡胶粉、SBS 和高黏剂制备高黏改性沥青, 研究结果表明其具有较强的抗车辙能力和良好的感温性能^[12]。马峰等在基质沥青中掺入废胶粉、SBS、增黏剂及抗老化剂制备沥青混合料, 其高温稳定性、低温韧性及抗疲劳性能均得到显著提升, 但抗水损害能力因抗老化剂的掺入而降低^[13]。董大伟等采用活化胶粉、SBS、Sasolbit 蜡和萘烯树脂制备高黏沥青, 不仅性能显著提升, 材料成本也大幅度降低^[14]。方嘉俊采用橡胶 SBS 复配改

性沥青研发高黏高性能沥青, 其性能满足规范关于排水沥青路面的要求^[15]。当前高黏改性沥青的制备多依赖橡胶粉与 SBS 改性剂复配高黏剂技术, 而 SBS 与沥青的相容性不佳且价格昂贵, 需寻求更经济、高效的材料, 以改进高黏沥青的制备工艺。

与 SBS 改性沥青相比, 反应性弹性体三元共聚物(Reactive Elastomeric Terpolymer, RET)改性沥青的制备工艺更简单, 不仅掺量较少, 而且成本更低^[16-19]。RET 能与沥青发生化学反应, 形成稳固的空间网状结构, 与胶粉进行复合改性时, 可加强三者的深度交联, 显著提高胶粉与沥青之间的相容性^[20-22]。本文采用胶粉、RET 和高黏剂制备高黏改性沥青, 设计不同掺配比例的改性剂, 研究其对沥青常规物理性能的影响, 确定其最佳掺量, 并分析胶粉/RET 高黏改性沥青混合料的路用性能。

1 原材料与改性沥青制备

1.1 原材料

选用埃索 A-70[#] 道路石油沥青, 其基本性能试验结果见表 1。采用反应型 RET 材料, 密度为 0.64 g/cm³, 熔点为 105 °C。胶粉由废旧轮胎磨细而成, 密度为 1.15 kg/m³, 橡胶烃含量为 56.1%。

* 基金项目: 湖南省交通运输厅科技项目(202404)

选用热塑性弹性体类高黏改性剂,颜色为淡黄色,密度为 1.09 g/cm^3 。

表 1 埃索 A-70# 道路石油沥青的性能指标

项目	规范要求	试验结果	试验方法
25 ℃ 针入度/(0.1 mm)	60~80	68.9	T0604-2011
软化点/℃	≥ 46	51.4	T0606-2011
延度(15 ℃)/cm	≥ 100	> 100	T0605-2011

1.2 复合改性沥青制备

(1) 胶粉/RET 改性沥青制备。将基质沥青加热至 150 ℃ 左右;将不同设计掺量的 RET 加入沥青中,并用玻璃棒不断搅拌,使其在沥青中均匀分散;以 300 r/min 的速率剪切 40 min;将温度升高到 180 ℃,分多次将不同掺量的胶粉加入沥青中,以 4 500 r/min 的速率剪切 40 min;将混合物在 150 ℃ 烘箱中保温 30 min,得到胶粉/RET 改性沥青。

(2) 高黏复合改性沥青制备。在胶粉和 RET 最佳掺量下,将不同掺量高黏剂加入改性沥青中,并用玻璃棒不断搅拌;在 180 ℃ 温度下以 4 500 r/min 的速率剪切 40 min;将混合物放入 150 ℃ 烘箱中保温 1 h,得到高黏复合改性沥青。

2 胶粉/RET 高黏改性沥青性能研究

选用胶粉、RET 和高黏剂制备高黏复合改性沥青,胶粉掺量为 10%、15%、20%,RET 掺量为 1.0%、1.5%、2.0%,高黏剂掺量为 6%、9%、12%(均为与基质沥青的质量分数)。进行改性沥青常规物理性能测试,分析不同掺量胶粉和 RET 对沥青性能的影响,确定各自最佳掺量;探讨不同掺量高黏剂复配后高黏复合改性沥青的物理性能,确定高黏剂的最佳掺量;通过离析试验评估高黏改性沥青的热储存稳定性。

2.1 改性剂掺量的确定

2.1.1 胶粉和 RET 掺量的确定

依据 JTG E20—2011《公路工程沥青及沥青混合料试验规程》进行胶粉/RET 改性沥青常规物理性能试验,测试其针入度、软化点、延度和 60 ℃ 动力黏度,结果见图 1。

由图 1(a)可知:胶粉/RET 改性沥青的针入度随改性剂掺量的增加逐渐降低,20% 胶粉掺量、2.0%RET 掺量时,其针入度最小,相较于 10% 胶粉复配 1.0%RET 掺量的改性沥青,针入度下降 24.1%。RET 掺量超过 1.5% 时,针入度降低幅度减小,且胶粉掺量越高,降低幅度越小。

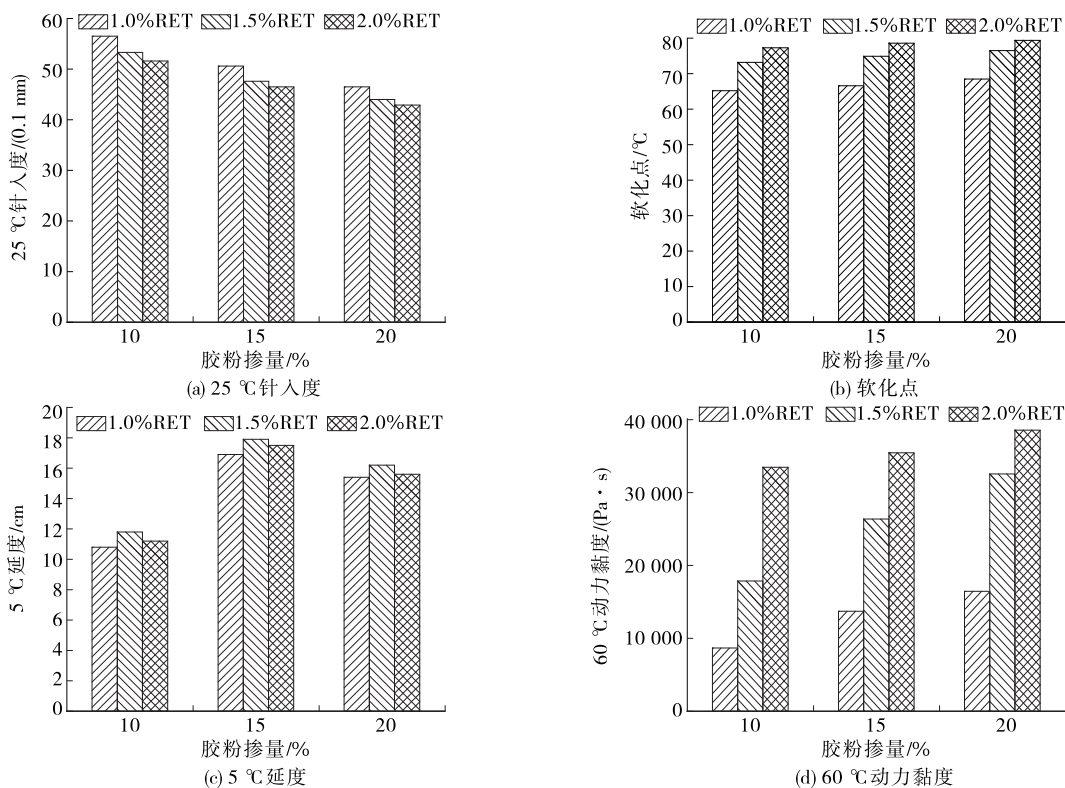


图 1 胶粉/RET 改性沥青的常规物理性能

由图 1(b)可知:胶粉/RET 改性沥青的软化点随着胶粉或 RET 掺量的增加而上升。这归因于胶粉、RET 与沥青三者之间黏结紧密,共同形成三维网状结构,沥青的稳定性显著增强,高温性能提高。在胶粉掺量一定的情况下,随着 RET 掺量的增加,改性沥青的软化点上升速度减缓。

由图 1(c)可知:随着胶粉或 RET 掺量的增加,胶粉/RET 改性沥青的延度先上升后下降。这是因为改性剂掺量较少时,能在沥青中分散均匀,通过相互之间的协同作用提高沥青的低温抗裂性能;改性剂掺入过多时,在沥青中分散不均、凝结成团,在外力作用下出现应力集中而容易断裂,导致延展性下降。RET 掺量一定的情况下,胶粉掺量为 15%时,改性沥青的延度显著优于 10%和 20%两种掺量时改性沥青,其中 15%胶粉掺量、1.5%RET 掺量对沥青延度的提升效果最佳,延度达 17.9 cm。

由图 1(d)可知:随着 RET 掺量的变化,不同胶粉掺量下胶粉/RET 改性沥青的 60℃动力黏度表现出不同的变化趋势。RET 掺量为 1.0%时,胶粉对改性沥青 60℃动力黏度的提升效果不明显;RET 掺量为 1.5%时,改性沥青的 60℃动力黏度随着胶粉掺量的增加而明显提升,胶粉掺量为 15%时改性沥青的 60℃动力黏度超过 20 000 Pa·s;RET 掺量为 2.0%时,60℃动力黏度的增长率随着胶粉掺量的增加而逐渐放缓,这是因为胶粉掺量过多,未能完全溶胀于沥青中,限制了沥青黏度的提升。总体来说,改性沥青的 60℃动力黏度随着胶粉掺量的增加逐渐上升,在 RET 掺量为 1.5%时对沥青黏度的提升作用最显著。

综合比较,胶粉掺量为 15%、RET 掺量为 1.5%对改性沥青性能的提升最有利。

2.1.2 高黏剂掺量的确定

将不同掺量高黏剂与 15%掺量胶粉、1.5%掺量 RET 的复合改性沥青进行复配,制备得到胶粉/RET 高黏改性沥青。通过常规物理性能试验评估其性能指标,确定高黏剂的最佳掺量。表 2 为胶粉/RET 高黏改性沥青常规物理性能测试结果。

由表 2 可知:将高黏剂添加到胶粉/RET 改性沥青中,能显著提高改性沥青的软化点和 60℃动力黏度,但针入度和延度有所下降。高黏剂掺量为 9%、12%时,改性沥青的 60℃动力黏度超过 50 000 Pa·s,且 170℃布氏旋转黏度小于 3.0 Pa·s,符合规范要

表 2 高黏改性沥青常规物理性能试验结果

高黏剂 掺量/ %	25℃ 针入度/ (0.1 mm)	软化 点/℃	延度/ cm	60℃动 力黏度/ (Pa·s)	170℃布氏 旋转黏度/ (Pa·s)
6	46.7	89.6	11.48	46 483	2.156
9	43.2	93.4	9.75	66 907	2.345
12	40.4	97.2	7.79	86 571	2.886

求。高黏剂的掺入能提高沥青的高温性能和黏度,但对低温性能产生不利影响,可能是因为掺量较大时,未能在沥青中充分溶解,造成内部出现团聚。为提升沥青性能并保证经济效益,高黏剂掺量取 9%。

2.2 高黏改性沥青的储存稳定性

由于改性剂与基质沥青之间存在密度差异,实际拌和、运输、摊铺过程中可能出现离析现象。为确保高黏改性沥青性能稳定,按 JTG E20—2011《公路工程沥青及沥青混合料试验规程》进行离析试验,分析其储存稳定性,试验结果见图 2。

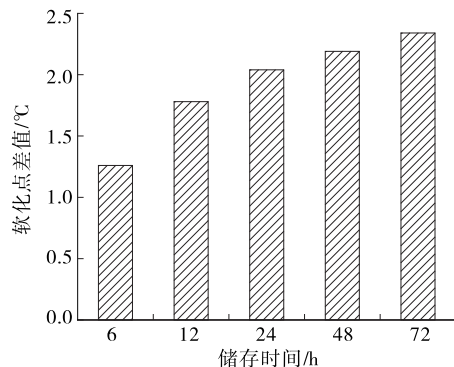


图 2 不同储存时间下高黏改性沥青的软化点差值

从图 2 可以看出:高黏改性沥青的软化点差值随着储存时间的延长逐渐增大,但始终小于 2.5℃,符合规范要求。前 12 h 改性沥青的软化点差值增长较快,表明离析较严重;后期软化点差值增长速率逐渐放缓,表明改性剂与沥青之间的相互作用趋于稳定。胶粉、RET 和高黏剂与基质沥青的相容性较好,形成的共混体系不易发生离析。

3 胶粉/RET 高黏沥青混合料性能研究

3.1 配合比设计

采用 OGFC-13 型级配,以 10~15 mm、5~10 mm、3~5 mm 玄武岩为粗集料,0~3 mm 玄武岩为细集料,矿粉由石灰岩磨细而成。经检验,矿料的基本性能均符合要求。矿料级配设计见表 3。

表 3 OGFC-13 矿料级配设计

级配类型	不同筛孔(mm)的通过率/%								
	13.200	9.500	4.750	2.360	1.180	0.600	0.300	0.150	0.075
级配上限	100.0	80.0	30.0	22.0	18.0	15.0	12.0	8.0	6.0
级配下限	90.0	60.0	12.0	10.0	6.0	4.0	3.0	3.0	2.0
设计级配	94.1	69.6	21.0	16.2	12.2	10.4	8.1	6.1	4.4

依据规范和工程经验,初步选取沥青混合料油石比为 3.4%~5.4%,以 0.5%的间隔调整,每组制作 5 个马歇尔试件进行试验,试验结果见表 4。根据表 4,确定以埃索 A-70[#] 基质沥青(AM)为结合料的 OGFC 沥青混合料的油石比为 4.7%。以同样方法确定胶粉改性沥青(RPAM)、RET 改性沥

青(RETAM)、胶粉/RET 改性沥青(RP/RETAM)和高黏复合改性沥青(HVAM)的油石比分别为 4.8%、5.3%、5.1%、5.5%。

3.2 高温稳定性

夏季炎热,沥青路面在太阳辐射和车辆荷载双重作用下易产生车辙、拥包和推移等病害,进而影响

表 4 OGFC-13 沥青混合料马歇尔试验结果

油石比/%	毛体积相对密度	空隙率/%	稳定度/kN	流值/(0.1 mm)	飞散损失/%	析漏损失/%
3.4	2.542	21.5	6.39	4.4	15.68	0.03
3.9	2.522	20.7	6.56	4.9	11.45	0.05
4.4	2.512	20.3	6.88	5.2	6.97	0.07
4.9	2.496	20.1	7.06	5.9	5.61	0.10
5.4	2.856	19.9	7.12	6.2	4.15	0.13

路面平整度,削弱路面的承载能力,危及行车安全。因此,有必要探究沥青混合料的高温性能。根据 JTG E20—2011《公路工程沥青及沥青混合料试验规程》,采用车辙试验评估沥青混合料的高温性能,试验条件为 60℃,车辙板试件尺寸为 300 mm×300 mm×50 mm。不同类型沥青混合料分别制作 3 个试样,取其试验结果的平均值,结果见图 3。

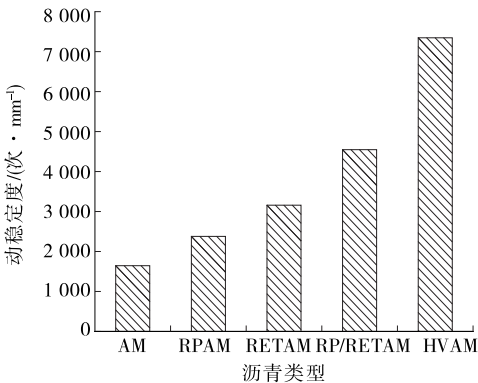


图 3 不同类型沥青混合料的动稳定度试验结果

由图 3 可知:高黏复合改性沥青混合料的动稳定度满足 JTG/T 3350-03—2020《排水沥青路面设计与施工技术规范》中动稳定度大于 5 000 次/mm

的要求。1) 胶粉、RET 和高黏剂的添加能提升沥青混合料的高温稳定性,其中高黏复合改性沥青混合料的动稳定度最高,相较于胶粉/RET 改性沥青混合料提高 61.6%,说明高黏剂的掺入能提高沥青混合料的高温性能。这是由于高黏剂的掺加能提升沥青的黏度,增强沥青与集料的黏附性,从而提高混合料的高温稳定性。2) 相较于基质沥青混合料,胶粉改性沥青混合料和 RET 改性沥青混合料的动稳定度分别提升 44.6%、91.9%,表明 RET 对沥青混合料高温性能的提升作用优于胶粉。这是因为 RET 与沥青发生化学反应,如磷酸酯化和环化反应,形成稳定的三相连续网络结构,沥青的整体稳定性显著增强,高温性能提高;胶粉主要通过物理吸附和溶胀作用改善沥青的性能,其效果有限。3) 相较于掺加单一改性剂的沥青混合料,胶粉/RET 改性沥青混合料在高温性能方面表现出显著优势,说明胶粉和 RET 的协同作用可共同增强沥青混合料的高温性能。

3.3 低温抗裂性能

在严冬气温骤降时,沥青混合料会因低温产生收缩,当收缩引发的温度应力超过其抗弯拉强度时,

路面面层会出现裂缝。在雨水的侵蚀下,裂缝扩展,进而形成块状裂缝、龟裂等病害,影响行车舒适性和安全性。因此,需评价改性沥青混合料的低温性能。采用低温小梁弯曲试验评估沥青混合料的低温性能,试验温度为 -10°C ,小梁试件尺寸为 $250\text{ mm}\times 30\text{ mm}\times 35\text{ mm}$,加载速率为 50 mm/min ,试验结果见图 4。

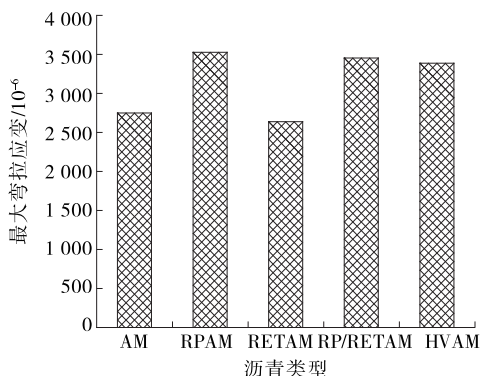


图 4 不同类型沥青混合料的最大弯拉应变试验结果

由图 4 可知:高黏复合改性沥青混合料的最大弯拉应变满足 JTG/T 3350-03—2020《排水沥青路面设计与施工技术规范》中大于 $2\ 800\times 10^{-6}$ (冬寒区)的要求。1)与基质沥青混合料相比,除 RET 改性沥青混合料外,胶粉改性沥青、胶粉/RET 改性沥青、高黏复合改性沥青混合料的最大弯拉应变分别提升 28.3%、25.6%、23.3%,表明胶粉的掺入可增强沥青混合料的低温抗裂性能,但 RET 和高黏剂的掺入会对其低温性能产生负面影响。2)RET 改性沥青混合料的最大弯拉应变低于胶粉改性沥青混合料,表明 RET 在改善沥青混合料低温性能方面的作用不及胶粉。可能是因为 RET 在低温下与沥青的反应有限,它虽能增加沥青的弹性,但在提升低温下柔韧性和抗裂性方面效果并不显著。相比之下,橡胶粉的掺入更能提升沥青的低温性能。

3.4 水稳定性

水稳定性是衡量沥青混合料抵抗水分侵蚀能力的关键指标。沥青混合料在水和车辆荷载共同作用下,集料容易从沥青表面剥落,进而引发路面破损、坑槽等病害。因此,探究沥青混合料的水稳定性对于确保道路耐久性很重要。对不同类型改性沥青混合料进行浸水马歇尔试验,试验结果见图 5。

由图 5 可知:高黏复合改性沥青混合料的残留稳定度满足 JTG/T 3350-03—2020《排水沥青路面设计与施工技术规范》中不小于 85% 的要求。相较

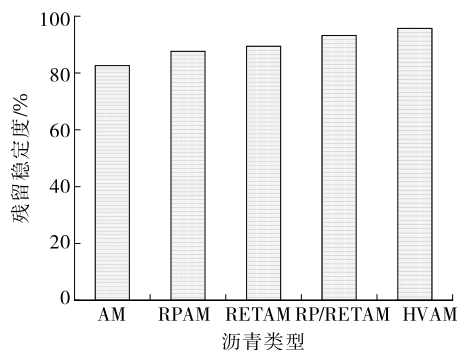


图 5 不同类型沥青混合料的残留稳定度试验结果

于基质沥青混合料,胶粉改性沥青、RET 改性沥青、胶粉/RET 改性沥青和高黏复合改性沥青混合料的稳定度分别提高 6.1%、8.2%、12.8%、15.9%,说明胶粉、RET 和高黏剂的掺入能显著改善沥青混合料的抗水损害能力。这是由于胶粉吸收基质沥青中的轻质组分,导致其溶胀,增强了胶粉与沥青之间的界面作用,进而改善了沥青混合料的水稳定性;RET 作为一种反应型三元共聚物弹性体,其独特的化学结构能显著增强沥青与集料之间的黏附力,有效抵抗水分的侵蚀,降低水损害;高黏剂能提高沥青黏度,提升与集料的黏结力,进而改善沥青混合料的水稳定性。

3.5 渗水性能

在评估排水沥青混合料性能时,渗水性能是关键指标,其强弱由渗水系数决定。采用渗水仪测量沥青混合料的渗水系数,评估其在排水路面中的渗水功能,试验结果见图 6。

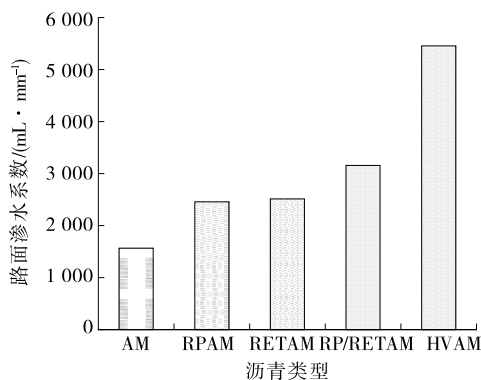


图 6 不同类型沥青混合料的渗水系数试验结果

由图 6 可知:高黏复合改性沥青混合料的渗水系数为 $5\ 454.5\text{ mL/min}\geq 5\ 000\text{ mL/min}$,其在排水性能方面表现良好,其他 4 种类型沥青混合料的渗水系数均未达到 $\geq 5\ 000\text{ mL/min}$ 的要求。这是因为高黏改性沥青混合料内部有许多空隙通道,能有

效增强路表的排水能力。此外,其空隙率较大,能显著降低轮胎与路面之间的摩擦噪声,减少交通噪声污染。

4 结论

(1) 胶粉、RET 和高黏剂对提高沥青的高低温性能具有积极影响,其最佳掺量分别为 15%、1.5% 和 9%。在最佳掺量下制得高黏复合改性沥青,经 48 h 储存时间后,其软化点差值小于 2.5 °C,符合规范要求。

(2) 在沥青混合料中掺入胶粉、RET 和高黏剂能显著增强其高温抗车辙性能、抗水损害性能和渗水性能,但 RET 和高黏剂的掺入会影响其低温性能。与基质沥青混合料相比,高黏复合改性沥青混合料的动稳定度提高 3.46 倍,最大弯拉应变提升 23.3%、残留稳定度上升 15.9%,渗水系数提高 2.48 倍。

本文仅在宏观上对胶粉/RET 高黏复合改性沥青及其混合料的路用性能进行研究,下一步可从微观层面研究胶粉、RET、高黏剂 3 种改性剂之间的相互作用机制。

参考文献:

- [1] 黄丰,刘沛荣,王灿升,等.高连通空隙特征的排水沥青混合料技术研究[J].公路交通科技,2023,40(1):41-47.
- [2] ABOUFOUL M, GARCIA A. Influence of air voids characteristics on the hydraulic conductivity of asphalt mixture[J]. Road Materials and Pavement Design, 2017,18(Sup2):39-49.
- [3] 易品.制备工艺对高黏直投改性沥青性能的影响[J].公路与汽运,2021(5):68-71.
- [4] 陶家清,于晓涛,柴冲冲,等.树脂类与弹性体类高黏改性沥青零剪切黏度研究[J].中外公路,2023,43(6):308-314.
- [5] 李佳庆.蜡基温拌剂对废橡胶粉改性沥青车辙与疲劳性能的影响[J].中外公路,2023,43(5):230-235.
- [6] 袁剑波,殷婵,冯新军,等.多聚磷酸/脱硫胶粉复合改性沥青的制备及性能研究[J/OL].中外公路:1-10[2024-08-20].<http://kns.cnki.net/kcms/detail/43.1363.U.20240614.1606.003.html>.
- [7] HU M J, SUN G Q, SUN D Q, et al. Accelerated weathering simulation on rheological properties and chemical structure of high viscosity modified asphalt: a temperature acceleration effect analysis[J]. Construction and Building Materials, 2021,268:121120.1-121120.15.
- [8] 王家庆,宋广伟,李强,等.橡胶混凝土界面改性方法及性能提升路径[J].化工进展,2023,42(增刊 1):328-343.
- [9] 杨晚生,易帅兵,戴天乐,等.废轮胎热解炭黑(TPCB)改性沥青抗紫外老化性能试验研究[J].中外公路,2024,44(2):103-109.
- [10] 季节,王颢翔,王琴,等.改性废旧橡胶粉对水泥胶砂性能的影响[J].建筑材料学报,2021,24(4):679-686.
- [11] 杨三强,孙爽,李倩,等.胶粉改性沥青混合料动荷载力学响应分析[J].中外公路,2023,43(2):227-233.
- [12] 周志刚,陈功鸿,张红波,等.橡胶粉/SBS 与高黏剂复合改性沥青的制备及性能研究[J].材料导报,2021,35(6):6093-6099.
- [13] 马峰,伍迪,傅珍,等.SBS/废胶粉复合改性沥青及混合料路用性能[J].应用化工,2022,51(4):937-941.
- [14] 董大伟,凌天清,江宽,等.废轮胎橡胶粉在高黏改性沥青中的应用性研究[J].重庆交通大学学报(自然科学版),2020,39(1):78-84+91.
- [15] 方嘉俊.排水路面高黏高性能橡胶 SBS 复配改性沥青材料和结构研究[D].成都:西华大学,2023.
- [16] 郝培文,常睿,刘红瑛,等.反应性弹性体三元共聚物改性沥青及其混合料性能与机制[J].复合材料学报,2018,35(7):1952-1962.
- [17] GAMA D A, YAN Y, RODRIGUES J K G, et al. Optimizing the use of reactive terpolymer, polyphosphoric acid and high-density polyethylene to achieve asphalt binders with superior performance[J]. Construction and Building Materials, 2018,169:522-529.
- [18] 高英力,谷小磊,廖美捷,等.SiO₂气凝胶/RET/PPA 复合改性沥青流变性能与改性机理分析[J/OL].吉林大学学报(工学版):1-11[2024-08-20].<https://doi.org/10.13229/j.cnki.jdxbgxb20221132>.
- [19] GECKIL T, SELOGLU M. Performance properties of asphalt modified with reactive terpolymer[J]. Construction and Building Materials, 2018,173:262-271.
- [20] 郑睢宁,何锐,路天宇,等.RET/胶粉复合改性沥青制备及其混合料性能评价[J].吉林大学学报(工学版),2023,53(5):1381-1389.
- [21] 王可.SBR 和 RET 复配改性沥青的流变性能分析研究[J].中外公路,2021,41(4):326-331.
- [22] 张泽丰.反应型 RET-SBS 复合改性沥青及其混合料动态性能研究[J].公路工程,2021,46(1):174-179.

收稿日期:2024-04-30