

基于桥面铺装的多种沥青混合料性能研究

谢胜加^{1,2}, 蔡芸飞³, 陈向科³, 程志强^{1,2}, 贺俊奎⁴

[1.上海公路桥梁(集团)有限公司,上海市 200433; 2.上海绿色路面材料工程技术研究中心,上海市 200433;
3.上海沪申高速公路建设发展有限公司,上海市 200063; 4.同济大学道路与交通工程教育部重点实验室,上海市 201804]

摘 要: 桥面铺装是桥梁建造的重要组成部分,铺装材料的选择将直接影响桥梁的服役寿命。旨在研究适用于桥面铺装的高性能长寿命沥青混合料,分别采用 SBS 改性沥青、高黏改性沥青、高弹改性沥青、重载交通改性沥青以及浇筑式沥青五种沥青,基于 AC-10、AC-13、AC-20、GA-10、SMA-10 以及 SMA-13 六种级配,进行沥青混合料的路用性能试验。经试验表明:重载类沥青混合料的油石比低于高黏、高弹以及 SBS 改性沥青混合料;级配 SMA 类优于 AC 类,GA 浇筑式沥青混合料高、低温性能差异较大;车辙试验显示高黏类沥青混合料性能最优;低温弯曲试验显示高弹类沥青混合料性能最优;浸水马歇尔试验、冻融劈裂试验、单轴贯入试验、劈裂试验、动态模量试验均显示重载类沥青混合料性能最优。

关键词: 沥青;级配;桥面铺装;路用性能

中图分类号: U443.33

文献标志码: A

文章编号: 1009-7716(2023)11-0188-07

0 引言

桥面铺装是桥梁行车体系的重要组成部分,既可以保护桥面板免受车辆、雨水等环境因素的影响,又可以承受车辆荷载并分散桥面板的应力^[1,2]。然而由于材料特点及环境因素的耦合影响,作为铺装层材料的沥青混凝土一直是水泥混凝土桥面铺装体系的薄弱环节。随着交通量的持续增长和重型车辆荷载的增加,在高温和长时间车辆循环荷载作用下,铺装层沥青混合料很容易因抗永久变形能力不足引发车辙等病害,从而影响行车体感^[3,4]。

沥青的黏弹性受交通荷载、极限服役温度或温度变化影响较大,可能发生车辙、疲劳开裂或温缩裂缝等病害^[5]。因此,提高铺装材料的性能对延长使用寿命是至关重要的。

目前桥面铺装材料主要为 SBS/高黏/高弹/重载等改性沥青混合料。苯乙烯-丁二烯-苯乙烯三嵌段共聚物(SBS)是目前最有效且最常用的沥青改性剂,SBS 改性沥青表现为两相结构,即富沥青质相和富 SBS 相,SBS 和沥青都能保持各自的基本结构

和物理特性。SBS 吸收沥青中的轻质组分而溶胀,从而体积分数大于质量分数^[6-8]。当 SBS 含量较少时,改性沥青中富沥青质相为连续相、富 SBS 相为分散相^[9-11]。随着 SBS 含量的增加,改性沥青熔融黏度增大,可能会导致施工和易性变差、离析风险增加,材料热储存不稳定^[12-13]。提高 SBS 与沥青之间的相容性、降低熔融黏度、延长剪切发育的时间可以使改性剂均一分布,对于高含量 SBS 改性沥青达到预期的性能是至关重要的。高黏改性沥青因其高温抗车辙性能好、对集料附着力强而被广泛应用。将 7%的 SBS 改性剂与 4%的增粘树脂复合改性基质沥青,可以制备出具有良好路用性能的高黏沥青。在基质沥青中加入 6%的 SBS、4%的糠醛精油、0.2%的硫,所制备出的高黏度改性沥青则可以改善沥青的整体性能^[14-16]。高弹改性沥青 SMA-10,往往被认为具有更好的低温抗裂性和疲劳性能。李攀研究了一种适用于山区桥面铺装的高弹改性沥青混合料,增强了其沥青混合料的抗老化性和疲劳性能^[17,18]。浇注式沥青混凝土则是在高温状态下进行拌合,依靠自身的流动实现密实成型,仅需用简单的摊铺整平即可完成施工,并能达到规定的密实度和平整度。由于浇注式沥青独特的防水、抗老化性能和抗疲劳性能,目前也已被广泛应用于桥面铺装^[19]。

因此,本文基于 AC-10、AC-13、AC-20、GA-10、SMA-10 以及 SMA-13 六种级配,采用 SBS 改性沥

收稿日期:2023-02-22

基金项目:上海市交通委员会科研项目(JT2021-KY-016);中华人民共和国交通运输部科研项目(2021-ZD1-004)

作者简介:谢胜加(1990—),男,硕士,工程师,从事路桥建设管理工作。

青、高黏改性沥青、高弹改性沥青、重载交通改性沥青以及浇筑式沥青五种沥青,进行混合料路用性能研究,进一步探究适用于桥面铺装的沥青混合料。

1 材料与方法

1.1 试验材料

本研究所采用沥青主要为:SBS 改性沥青、高黏改性沥青、重载交通专用改性沥青、高弹改性沥青以及浇筑式改性沥青,其性能指标见表 1~表 5。

表 1 SBS 改性沥青性能指标

项目	检测结果	技术指标	试验方法
25℃针入度 /0.1 m	43	40~60	T0604
针入度指数 PI	0.8	≥0	T0604
5℃延度 /cm	22	≥20	T0605
软化点 /℃	88.0	≥80	T0606
135℃旋转黏度 /(Pa·s)	1.8	≤3	T0625
闪点 /℃	320	≥230	T0611
溶解度(三氯乙烯)/%	99.97	≥99	T0607
25℃弹性恢复 /%	95	≥90	T0662
离析(软化点差)/℃	2.0	≤2.5	T0661
质量变化 /%	+0.045	≤0.6	T0609
TFOT 后 25℃针入度比 /%	86	≥65	T0604
5℃延度 /cm	18	≥15	T0605

表 2 高黏改性沥青性能指标

项目	检测结果	技术指标	试验方法
60℃零剪切黏度 /(Pa·s)	55 000	≥40 000	DG/TJ08-2074 附录 A
60℃动力黏度 /(Pa·s)	235 000	≥50 000	T0620
25℃针入度 /0.1 m	50	≥40	T0604
15℃延度 /cm	98	≥80	T0605
5℃延度 /cm	38	≥30	T0605
软化点 /℃	95.0	≥85	T0606
闪点 /℃	316	≥260	T0611
溶解度 /%	99.97	≥99	T0607
25℃弹性恢复 /%	98	≥90	T0662
25℃黏韧性 /(N·m)	28.1	≥20	T0624
25℃韧性 /(N·m)	19.6	≥15	T0624
质量变化 /%	+0.050	≤0.6	T0609
TFOT 后 25℃针入度比 /%	90	≥70	T0604
5℃延度 /cm	18	≥15	T0605

矿粉是在沥青混合料中填充微小空隙的材料,主要有两个作用,一是填充沥青混合料空隙,二是和沥青共同形成胶浆,提高混合料自身的强度和稳定性。本研究采用石灰岩矿粉,其性能指标见表 6。

表 3 重载交通专用改性沥青性能指标

项目	检测结果	技术指标	试验方法
25℃针入度 /0.1 m	47	30~60	T0604
5℃延度 /cm	46	≥20	T0605
软化点 /℃	105.0	≥85	T0606
闪点 /℃	319	≥280	T0611
溶解度 /%	99.97	≥99	T0607
25℃弹性恢复 /%	98	≥90	T0662
离析(软化点差)/℃	1.5	≤2.5	T0661
60℃车辙因子 /kPa	26.2	≥10	T0628
质量变化 /%	+0.040	≤0.6	T0609
TFOT 后 25℃针入度比 /%	94	≥65	T0604
5℃延度 /cm	29	≥15	T0605
SHRP 分级	/	PG88-28 PG82-28	AASHTO M320

表 4 高弹改性沥青性能指标

项目	检测结果	技术指标	试验方法
25℃针入度 /0.1 m	65	60~90	T0604
针入度指数 /PI	2.6	≥-0.4	T0604
5℃延度 /cm	76	≥50	T0605
软化点 /℃	85.0	≥80	T0606
25℃黏韧性 /(N·m)	18.2	≥16	T0624
25℃韧性 /(N·m)	12.3	≥10	T0624
60℃动力黏度 /(Pa·s)	163 000	≥20 000	T0620
闪点 /℃	280	≥260	T0611
-20℃弯拉应变能 /(kJ·m ⁻³)	915	≥500	DB32/T 2678-2014
-20℃最大弯拉应变 / (10 ³ mm·mm ⁻¹)	201	≥80	
脆点 /℃	<-20	≤-12	T0613
溶解度 /%	99.97	≥99	T0607
25℃弹性恢复 /%	99	≥90	T0662
离析(软化点差)/℃	1.5	≤2.5	T0661
质量变化 /%	-0.031	≤0.6	T0609
TFOT 后 25℃针入度比 /%	94	≥65	T0604
5℃延度 /cm	64	≥30	T0605

纤维作为稳定剂加入到沥青混合料中可有效提高沥青混凝土的低温抗裂、高温抗车辙等路用性能。本研究所采用的纤维稳定剂为木质素纤维,其作用机理是纤维的加入增加了沥青的黏度,使沥青牢牢地裹附在集料的表面,纤维作为改性剂大大改善了沥青的抗老化能力,使得沥青混合料在外荷载与温度等环境因素作用下可以获得更长的使用寿命,研究采用木质素纤维用量为沥青混合料质量的 0.3%。木质素纤维性能指标见表 7。

表 5 浇筑式改性沥青性能指标

项目	检测结果	技术指标	试验方法
25℃针入度 /0.1 m	24	20~40	T0604
5℃延度 /cm	20	≥10	T0605
软化点 /℃	104.0	≥85	T0606
135℃旋转黏度 /(Pa·s)	1.8	≤3	T0625
闪点 /℃	290	≥260	T0611
溶解度 /%	99.97	≥99	T0607
TFOT 后			
质量变化 /%	+0.060	≤1.0	T0609
25℃针入度比 /%	83	≥70	T0604

表 6 矿粉性能指标

种类	试验项目	实测值	技术要求	试验方法
室内 试验 矿粉	表观密度 /(t·m ⁻³)	2.675	≥2.50	T0352
	含水量 /%	0.3	≤1.0	T0103
	粒度范围			
	<0.6 mm/%	100	100	
	<0.15 mm/%	97.5	90~100	T0351
重载 所用 矿粉	<0.075 mm/%	87	70~100	
	亲水系数	0.73	<1	T0353
	表观密度 /(t·m ⁻³)	2.735	≥2.50	T0352
	水量 /%	0.4	≤1.0	T0103
	粒度范围			
	<0.6 mm/%	100	100	
	<0.15 mm/%	97.0	90~100	T0351
	<0.075 mm/%	88.4	70~100	
	亲水系数	0.81	<1	T0353

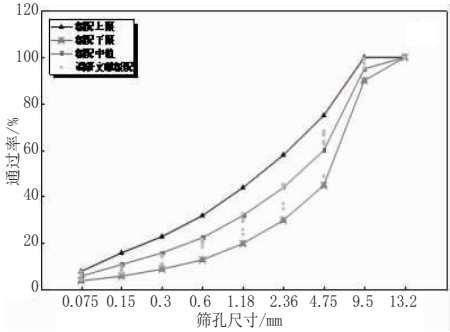
表 7 木质素纤维性能指标

技术指标	木质素纤维
外观颜色	灰色
纤维长度 /mm	<6
灰分含量 /%	18.7
PH 值	7.3
吸油率 /%	6.8
含水率 /%	4
密度 /(g·cm ⁻³)	0.87

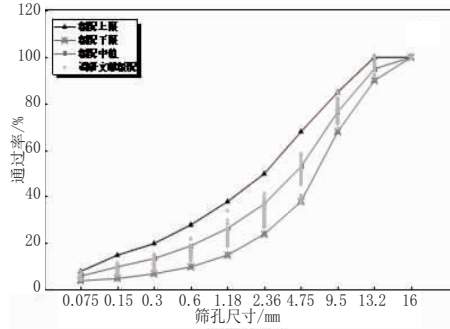
1.2 试验方法

本研究采用了六种级配,即 AC-10、AC-13、AC-20、SMA-10、SAM-13、GA-10,见图 1。其沥青混合料配合比设计依照《公路沥青路面施工技术规范》(JTG F40—2004)进行。采用 13 种沥青混合料进行性能研究,即:AC-10 高弹改性、AC-10 普通改性、AC-13 普通改性、AC-20 高黏改性、GA-10 浇筑沥青、SMA-10 高弹改性、SMA-10 高黏改性、SMA-10 普通改性、SMA-13 高弹改性、SMA-13 高

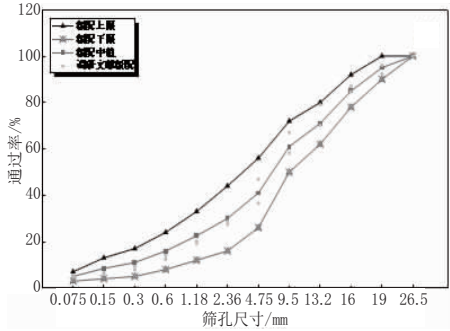
黏改性、SMA-13 普通改性、AC-20 重载改性、SMA-13 重载改性,其油石比见图 2。



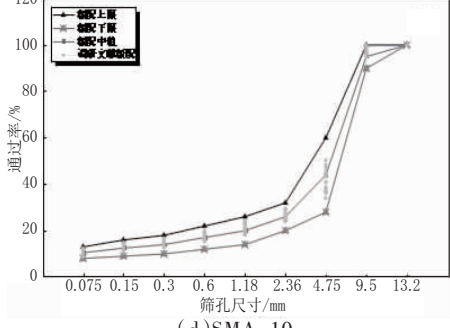
(a)AC-10



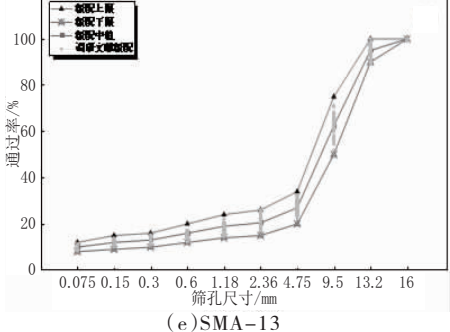
(b)AC-13



(c)AC-20



(d)SMA-10



(e)SMA-13

图 1 沥青混合料配合比

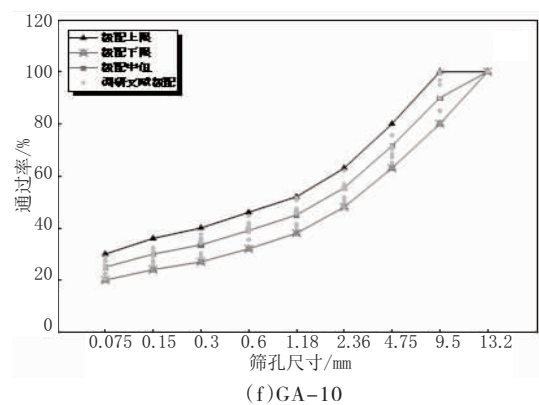


图 1 沥青混合料配合比

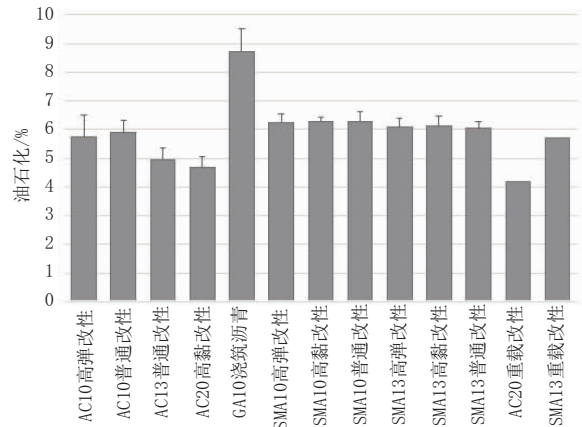


图 2 不同沥青混合料的油石比设定

本文对上述 13 种不同的沥青混合料分别进行车辙试验、低温小梁弯曲试验、浸水马歇尔试验、冻融劈裂试验、单轴贯入试验、动态模量试验、劈裂试验、疲劳试验,以综合研究其路用性能。

2 结果与讨论

2.1 体积参数

沥青混合料的体积参数反应了压实后沥青混合料各组成材料之间质量与体积的关系,与其路用性能有着紧密的关系,本文 13 种沥青混合料的体积参数见图 3、图 4。

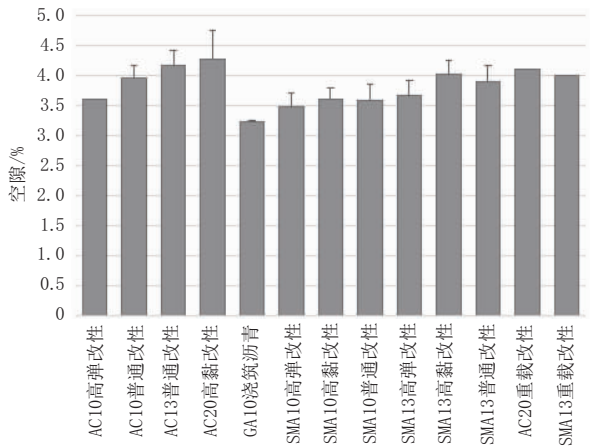


图 3 沥青混合料空隙率

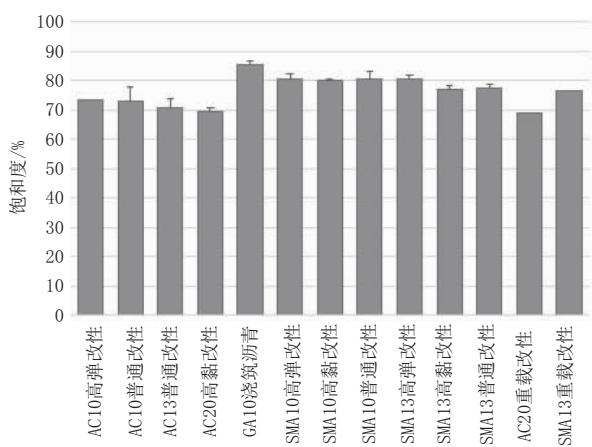


图 4 沥青混合料饱和度

结合图 2 不同沥青混合料的油石比变化以及图 2 ~ 图 4 可知,SMA 类沥青混合料油石比整体高于 AC 类沥青混合料,随着最大粒径提高,沥青混合料油石比有所减小。高黏和高弹改性沥青对于 SMA 类沥青混合料影响低于 AC 类沥青混合料。需要注意的是 GA 浇筑式沥青混合料油石比高于其他类混合料,这与其特殊的结构组成有关,需要在施工过程具有较好的流动性。AC-20 和 SMA-13 重载改性混合料的油石比小于对应级配高黏或高弹改性沥青混合料。

相比于 AC 类沥青混合料,SMA 类沥青混合料具有更为严格的空隙率要求(3%~4%),故整体空隙率要低于 AC 类沥青混合料。随着最大粒径的提高,沥青混合料的空隙率有所增加。由于具有较高的油石比以及细集料,GA 浇筑式沥青混合料具有最小的空隙率。相比于 AC-20 高黏改性沥青混合料,AC-20 重载改性沥青混合料具有更低的空隙率。

SMA 类沥青混合料的饱和度则要高于 AC 类沥青混合料,其中随着最大粒径增加,沥青混合料饱和度降低。GA 浇筑式沥青混合料具有最高的饱和度由于较高的油石比。

2.2 高温车辙试验

沥青混合料是温度敏感性材料,温度较低时表现为弹性性质,随着温度升高,逐渐表现为粘弹性,温度升高到一定程度后表现为弹塑性。目前高温稳定性分析常用试验为车辙试验,在车辆荷载的作用下路面发生较大变形,当荷载消失后有部分变形无法恢复,称之为残留变形,形成车辙病害。各种混合料车辙试验结果见图 5、图 6。

根据图 5、图 6 可知,细粒式 AC 类混合料的动稳定度要小于细粒式 SMA 类沥青混合料,说明 SMA 类混合料具有较好抵抗车辙能力。AC-20 和

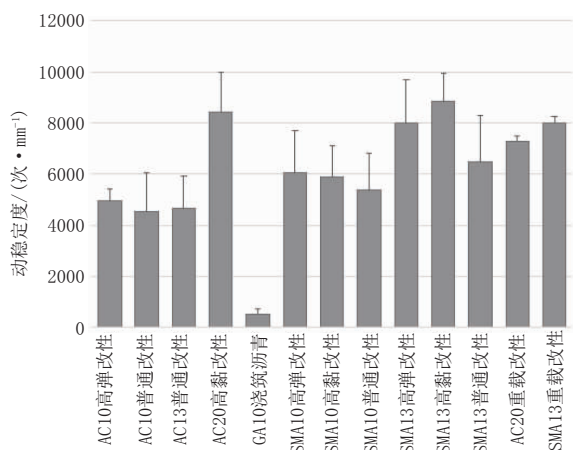


图5 沥青混合料动稳定度试验结果

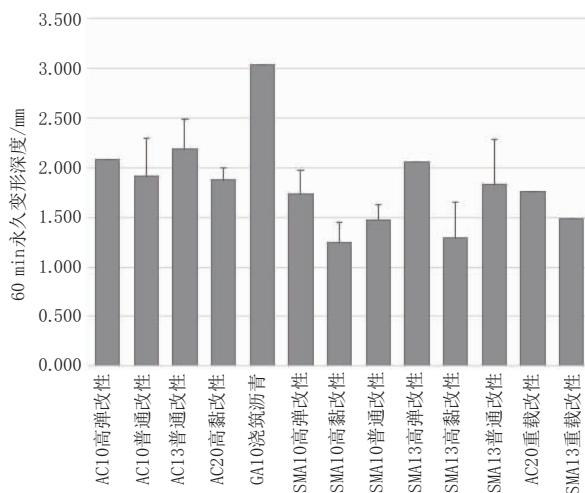


图6 60 min 永久变形深度(单位:mm)

SMA-13 高黏改性沥青具有较高的动稳定度。相比于高弹改性沥青,高黏改性沥青可以更好地提高沥青混合料抵抗车辙能力,从而提高高温性能。由于高弹改性沥青具有较高比例的弹性组分,AC-10、SMA-10 和 SMA-13 高弹改性沥青混合料的 60 min 永久变形高于其他普通改性和高黏改性沥青混合料。GA-10 浇筑式沥青具有最低的动稳定度以及最大的变形深度,但满足了对应规范要求(大于 500)。AC-20 和 SMA-13 重载改性沥青混合料动稳定度小于对应级配高黏改性沥青混合料,且具有较大的变形深度,说明其抵抗车辙能力稍弱于高黏改性沥青混合料。

2.3 低温弯曲试验

沥青混合料的低温弯曲试验是直接测量在低温环境下三点荷载下梁试件的弯曲抗拉强度和低温刚度模量。在试验过程中,梁的中部受到剪切力和弯矩的影响,可以有效地模拟汽车荷载作用下材料的应力状态。其试验结果见图 7。

根据图 7 可知,GA-10 浇筑式沥青混合料具有

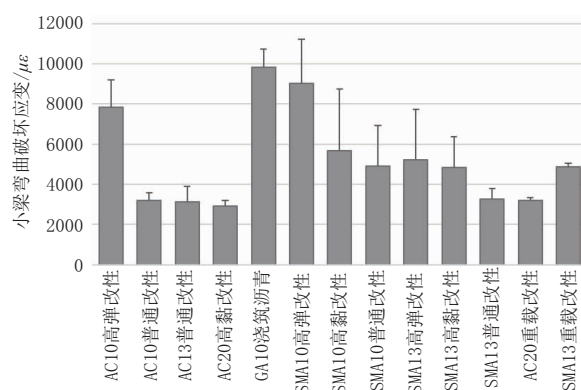


图7 低温小梁弯曲破坏应变试验结果

最大的弯拉应变。相比于普通改性沥青,高弹改性沥青与高黏改性沥青均可以增加混合料的最大弯拉应变,从而提高沥青混合料抵抗低温开裂的能力,高弹改性沥青对于弯拉应变提升效果更显著。需要注意的是,高弹改性沥青对于 SMA-13 级配提升效果一般。重载改性沥青混合料的最大弯拉应变要大于对应高黏改性沥青混合料,说明重载改性沥青在提高混合料抵抗低温开裂能力上要强于高黏改性沥青。

2.4 浸水马歇尔试验

水损害是沥青路面的主要病害之一,水由于车辆车轮动态荷载作用,进入路面空隙中,产生动水压力或者真空负压抽吸,如此反复循环,水分会逐渐渗入沥青与集料的界面上,使沥青黏附性降低并逐渐丧失粘结力,进而产生沥青混合料掉粒、松散,形成沥青路面的坑槽、推挤变形等损坏现象。浸水马歇尔试验以残留稳定度比表征水稳定性,其试验结果见图 8。

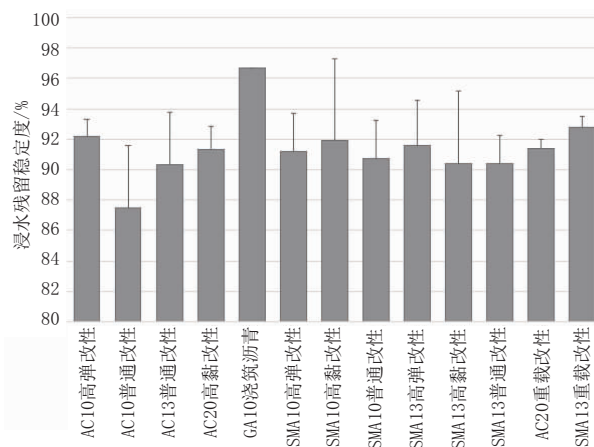


图8 沥青混合料浸水残留稳定度结果

根据图 8 可知,AC 类沥青混合料随着集料最大粒径增加浸水残留稳定度增加,GA-10 浇筑式沥青由于油石比高以及空隙率小的特点具有最高的浸水残留稳定度。AC-10 普通改性混合料的浸水残留稳

定度最低。高黏和高弹改性沥青可以提高沥青混合料的浸水残留稳定度,提高水稳定性。相比于高黏和高弹改性沥青,SMA-13 重载改性沥青混合料具有更高的浸水残留稳定度。

2.5 冻融劈裂试验

冻融劈裂试验能将实际道路表面受到的水危害集中并强化体现,在很短时间内能够模拟沥青路面长时间受到水损害,较为直观观测路面实际工作环境,其试验结果见图 9。

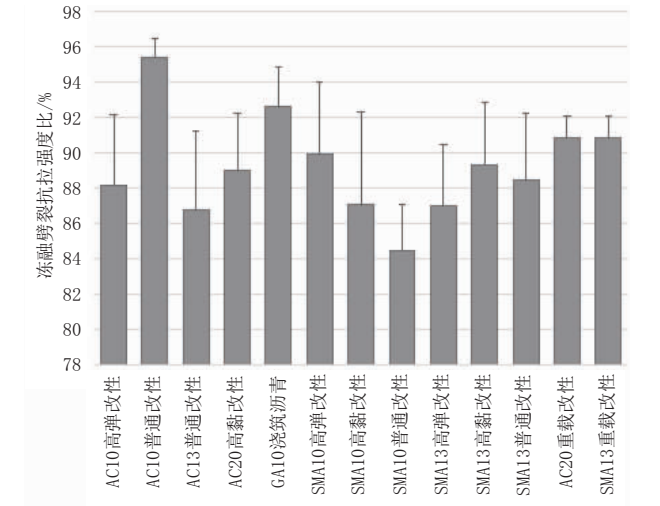


图 9 沥青混合料冻融抗拉强度比试验结果

根据图 9 可知,GA-10 浇筑式沥青冻融劈裂强度依然较高,试验结果和浸水马歇尔试验结果有较好的关联,进一步证明其良好的水稳定性。对 AC-10 和 SMA-13 混合料,浸水马歇尔强度与冻融劈裂强度相关性较差。对于 SMA10 混合料,高黏和高弹改性沥青均可以提高冻融抗拉强度比。就整体而言,SMA-13 和 AC-20 重载改性沥青混合料具有较好的水稳定性。

2.6 单轴贯入试验

单轴贯入试验评价沥青混合料的抗剪性能,贯入强度越大,混合料的高温抗剪性能越好。且其对沥青混合料产生的剪应力状态基本与实际沥青路面相似,甚至重合。试验结果见图 10。

根据图 10 可知,高黏和高弹改性沥青能够改善大部分沥青混合料的抗剪性能。GA-10 浇筑式沥青混合料具有最低的抗剪强度以及最差的高温抗剪性能。SMA-13 和 AC-20 重载改性沥青混合料明显优于其他混合料,说明重载改性沥青对混合料的抗剪性能有较好的提升效果。

2.7 劈裂抗拉强度试验

劈裂试验是将载荷通过压条作用在圆柱形试件

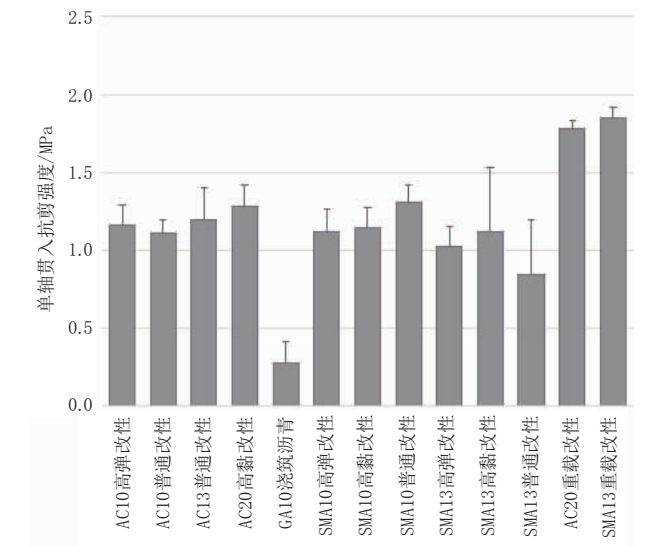


图 10 单轴贯入抗剪强度试验结果

上,将试件劈裂直至破坏,通过施加压力使试件产生拉伸应力来间接测量材料的抗拉强度,试验结果见图 11。

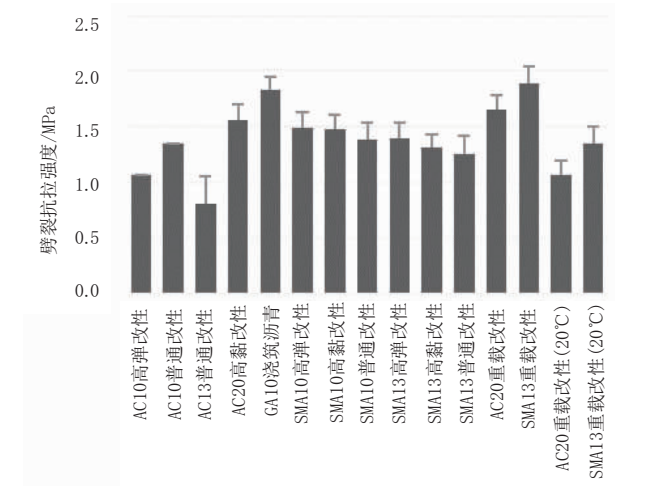


图 11 劈裂抗拉强度试验结果

根据图 11 可知,GA-10 浇筑式沥青混合料的抗劈裂性能较好。从级配角度上来看,SMA 类沥青混合料抗劈裂强度高于 AC 类沥青混合料,这是因为 SMA 类沥青混合料属于骨架密实类,集料的嵌挤起到了抵抗劈裂荷载的作用。对于 SMA 类沥青混合料,高黏改性沥青和高弹改性沥青比普通改性沥青具有更好的抵抗劈裂抗拉的能力。重载改性沥青对于沥青混合料的劈裂抗拉能力有显著提高,提升效果好于其他改性沥青。随着试验温度提升为 20℃,重载改性沥青混合料劈裂强度均有所减小,SMA-13 和 AC-20 重载改性沥青混合料的劈裂强度分别降低了 15.0%和 13.6%。

2.8 动态模量试验

理论上分析动态模量更符合实际铺装层结构的受力情况,其不仅反映应力与应变的力学性质,更主

要反映了不同荷载下材料的动态响应特性。因此,研究铺装层沥青混合料在动态荷载作用下的性质和变化规律,确定其相关参数具有重要的现实意义。试验前将试件放置于温控箱保温 5 h, 试验温度 20℃, 频率 10 Hz, 试验结果见图 12。

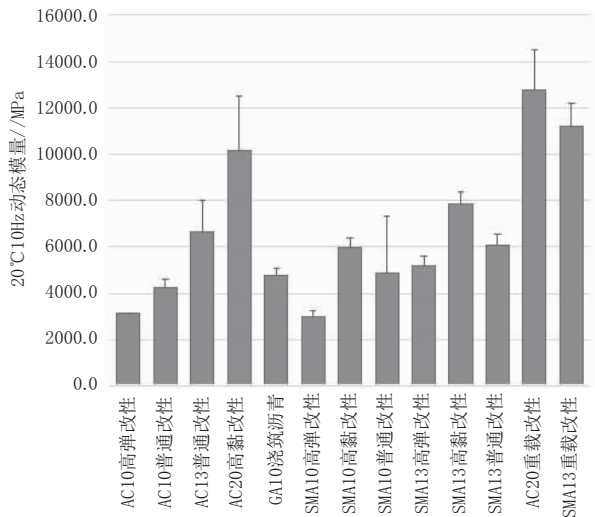


图 12 20℃ 10 Hz 沥青混合料动态模量试验结果

根据图 12 可知, AC 类沥青混合料随着最大粒径的增加, 动态模量逐渐增加。就级配而言, 同种改性沥青 AC 类与 SMA 类混合料动态模量相近, 没有相差太大。相比于普通改性, 高黏改性对于沥青混合料的动态模量有提升的效果, 但高弹改性会起到降低的效果。AC-20 和 SMA-13 重载改性沥青混合料具有最大的动态模量, 说明重载沥青表现出较好的改性效果。

3 结论

(1) GA 浇筑式沥青混合料的油石比远高于 SMA 类与 AC 类沥青混合料, 重载沥青混合料其油石比低于高黏、高弹以及 SBS 改性沥青混合料。SMA 类沥青混合料的孔隙率小于 AC 类, 但沥青饱和度大于 AC 类。

(2) 基于级配设计, 车辙试验、单轴贯入试验均表明, GA 类浇筑式沥青混合料性能最差, SMA 类优于 AC 类。劈裂试验与疲劳试验表明, SMA 类优于 AC 类。低温弯曲试验与浸水马歇尔试验表明, GA 类浇筑式沥青混合料性能最优。冻融劈裂试验与动态模量试验表明, SMA 类与 AC 类无明显差异性。故级配 SMA 类优于 AC 类, GA 浇筑式沥青混合料高低温性能差异较大。

(3) 基于沥青种类, 车辙试验表明, 高黏类沥青混合料性能最优, 其次为高弹类和重载类, SBS 改性

类最差。低温弯曲试验表明, 高弹类沥青混合料性能最优, 重载类优于高黏类, 最后为 SBS 改性类。浸水马歇尔试验、冻融劈裂试验、单轴贯入试验、劈裂试验、动态模量试验均表明, 重载类沥青混合料性能最优, 高弹类较差。

参考文献:

- [1] 刘璐霞, 王立东, 蒋婷婷. 钢桥面铺装结构层疲劳寿命预估模型和试验研究[J]. 合成材料老化与应用, 2022, 51(6): 65-67, 107.
- [2] 马凯杰. 基于胎-路耦合的桥面铺装离散元细观动力学行为分析[D]. 石家庄: 石家庄铁道大学, 2022.
- [3] 王飞. 基于 ABAQUS 的饱和沥青桥面铺装动力响应及水损害分析[D]. 石家庄: 石家庄铁道大学, 2022.
- [4] Liu Yang, Qian, Zhendong, Chen, Leilei, Hu Jing. Investigation on Temperature Effect of Bridge Bearing System during Steel Bridge Deck Pavement Paving [J]. International Journal of Geomechanics, 2022, 22(5).
- [5] 杨波, 曹卫东, 巩渭华, 等. 混凝土连续梁桥沥青铺装层病害调研与分析[J]. 中外公路, 2022, 42(6): 109-112.
- [6] 祁文洋, 李立寒, 张明杰, 等. SBS 改性沥青的阶段性老化特征与机理[J]. 同济大学学报(自然科学版), 2016, 44(1): 95-99.
- [7] 蔡斌, 余功新, 李彦伟, 等. 超高掺量胶粉改性沥青性能[J]. 重庆交通大学学报(自然科学版), 2021, 40(9): 117-123.
- [8] 宋亮, 王朝辉, 舒诚, 等. SBS/ 胶粉复合改性沥青研究进展与性能评价[J]. 中国公路学报, 2021, 34(10): 17-33.
- [9] 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.
- [10] 袁东东, 蒋玮, 肖晶晶, 等. SBS、橡胶和高黏改性沥青流变性能对比[J]. 长安大学学报(自然科学版), 2020, 40(1): 135-142.
- [11] 宋家乐, 何璐, 王欣, 等. SBS 改性沥青的 RTFOT 微观老化机理[J]. 公路交通科技, 2020, 37(2): 1-7.
- [12] 刘贞鹏. SBS/ 橡胶复合改性沥青混合料高温性能研究[D]. 重庆: 重庆交通大学, 2014.
- [13] 叶向前, 邹晓翎, 董琴. 苯乙烯-丁二烯-苯乙烯嵌段共聚物-改性胶粉复合改性沥青路用性能流变学分析[J]. 科学技术与工程, 2021, 21(2): 758-763.
- [14] 张耀. SBS/ 废胶粉复合改性高粘沥青及其混合料性能研究[D]. 西安: 长安大学, 2019.
- [15] Z. Zhou, G. Chen. Preparation, Performance, and modification mechanism of high viscosity modified asphalt [J]. Constr. Build. Mater, 2021(310): 125007.
- [16] F. Zhang, C. Hu. Preparation and properties of high viscosity modified asphalt[J]. Polym. Compos, 2017, 38(5): 936-946.
- [17] 刘攀, 郝增恒, 盛兴跃, 等. 钢桥面铺装高弹改性沥青混合料 SMA10 性能分析[J]. 公路交通技术, 2021, 37(6): 14-20.
- [18] 李攀. 高弹改性沥青及混合料在高海拔山区桥面铺装中的应用[D]. 南京: 东南大学, 2017.
- [19] 李洪涛, 钟建驰. 江阴大桥浇注式沥青混凝土桥面铺装[J]. 东南大学学报. 2001. 31(3A): 69-72.