

高温多雨气候条件耐久性沥青混合料设计及性能研究

陈文锋, 周加佳, 余 凯

(中电建路桥集团有限公司, 北京 100010)

摘要:为了提升高温多雨气候条件下沥青混合料的耐久性,通过掺入 0%、1%、2%、3%、4% 复合高模量剂改性基质沥青以及对级配曲线进行优化,设计了改进型 GAC-20 混合料,并对改进型 GAC-20 混合料的路用性能进行验证。此外,通过复合车辙试验和 CT 扫描试验对改进型 GAC-20 混合料的铺装结构性能进行评价。结果表明,复合高模量剂的掺入很好地提高了沥青的软化点、60℃黏度,降低了其针入度、135℃黏度以及延度,综合考虑沥青基本性能以及成本控制,确定复合高模量剂的掺量为 1%。改进型 GAC-20 混合料路用性能能够很好满足规范要求,且与 GAC-20 混合料相比,高温稳定性、水稳定性提升了 4.96 倍、1.06 倍。采用 4 cm SMA-13+6 cm 改进型 GAC-20+8 cm GAC-25 的铺装结构表现出很好的抗车辙性,且界面处空隙率降低 0.8%、内部空隙率降低 0.7%,有效提升了沥青混合料的压实效果。因此,采用改进型 GAC-20 混合料能够提升沥青路面的抗车辙性能和抗水损害性能,为高温多雨条件下耐久性沥青混合料的研究提供了理论依据。

关键词:道路工程;改进型 GAC-20 沥青混合料;复合高模量剂;CT 扫描;耐久性

中图分类号:U414 **文献标志码:**A **文章编号:**1671-1807(2023)03-0260-07

中国幅员辽阔、跨越多个温区。因此,针对不同的环境条件,需要开展沥青路面不同结构层沥青混凝土使用性能及适用性的研究,从而更好地减少沥青路面的损害,增加沥青路面的使用寿命^[1]。

广东省属于东亚季风气候,夏季温度高且持续时间长,年降雨量达到 1 500~2 000 mL,属于典型的高温多雨地区。因此,在气候条件和重载交通的作用下,沥青路面面临着严峻的考验^[2]。为了提升高温多雨条件下沥青混合料的耐久性能,研究人员在实践中探究出了 GAC 混合料,并逐渐得到推广和应用。吕瑞^[3]以实际工程为依托,对比分析了 GAC-16 混合料、AC-16 混合料的性能,结果表明,相比于 AC-16 混合料,GAC-16 混合料具有更好的高温稳定性。张永升等^[4]研究了 GAC 混合料适用于高温多雨地区的可行性,结果表明,GAC-16、GAC-20 的粗集料比均为 0.4~1.0,能够很好地提高沥青混合料的压实度,减少离析;GAC-16 具有较好的抗滑性和抗渗水性,更适合于沥青路面的面层,GAC-20 具有较好的低温抗裂性和水稳定性,适用于沥青路面的中面层。咸红伟^[5]通过控制关键筛孔通过率以及级配嵌挤试验研究了 GAC-20 混合料的设计方法,结果表明,GAC-20 混合料的高温稳定性和密水性具有明显的提升。Sun 等^[6]利用分型理

论建立了分型维数和 GAC-20 混合料的高温稳定性、水稳定性等路用性能评价指标的相关模型,结果表明,模型能够很好地预测 GAC-20 混合料的低温性能,能够很好提高效率,可为工程设计提供参考。官中良^[7]依托接惠高速公路建设项目,研究了 GAC-20 混合料对渗水性能的影响。综上所述,目前对 GAC 混合料在实际工程运用中的研究较多。但对 GAC-20 和 AC-20 混合料的性能比对研究较少,且基于 GAC-20 为中面层的沥青路面铺装结构性能的研究比较缺乏。此外,结合近年来出现的结构防水的理念,需要通过提高 GAC-20 混合料的压实效果,减少离析,提高整体结构的防水性能。

因此,本文通过掺加复合高模量改性剂以及级配优化,设计改进型 GAC-20 混合料,并对 GAC-20 混合料的路用性能、铺装结构性能进行试验,以更好地探究 GAC-20 混合料在高温多雨条件下的耐久性能。

1 材料与试验

1.1 原材料

本文采用的玄武岩、石灰岩来自英德大湾石场,矿粉来自佛山市三水区南山镇宏达市场加工厂,各项技术指标均符合规范要求。70# 基质沥青由厦门新立基股份有限公司提供。沥青各项技术

收稿日期:2022-08-23

作者简介:陈文锋(1978—),男,广东清远人,中电建路桥集团有限公司,中级工程师,研究方向为道路材料研发与应用。

指标见表 1。

表 1 沥青技术指标

检验项目		试验指标	技术要求	试验方法
针入度(25℃)/(0.1mm)		67	60~80	T0604
针入度指数 PI		-1.24	-1.5~+1.0	
软化点/℃		48.0	≥46	T0606
延度(10℃)/cm		31	≥15	T0605
蜡含量(蒸馏法)/%		1.7	≤2.2	T0615—2000
闪点/℃		292	≥260	T0611
溶解度/%		99.70	≥99.5	T0607
密度(15℃)/(g/cm ³)		1.034	—	T0603
薄膜加热 后残留物	质量损失/%	-0.126	≤±0.8	T0609
	残留针入度比/%	69	≥61	T0604
	残留延度(10℃)/mm	7	≥6	T0605

益道®复合高模量改性剂由中路交科集团提供,是一种直投式高分子改性剂,具备速溶性优、易密实、使用方便等优点,复合高模量剂如图 1 所示。

益道®复合高模量剂通过在特定分子量弹性体上接枝具有特定结构的聚烯烃侧链,赋予沥青混合料良好的抗剪切变形能力与弹性恢复能力。此外,益道®复合高模量剂的弹性主链与刚性侧链形成的双相聚集态结构使其具有优异的高温强度与低温韧性。复合高模量剂作用机理如图 2 所示,技术参数见表 2。



图 1 复合高模量剂

表 2 益道®复合高模量剂的技术指标

试验项目	技术要求	试验方法
外观	黑色均匀颗粒	目测
粒径/mm	≤4.75	过 4.75 mm 方孔筛
密度/(g/cm³)	1.0~1.1	GB/T 1033.3
灰分/%	≤5	GB/T 9345.1
熔点/℃	110~140	GB/T 19466.3
熔体质量流动速率/(g/10 min)	≥50	GB/T 3682.1

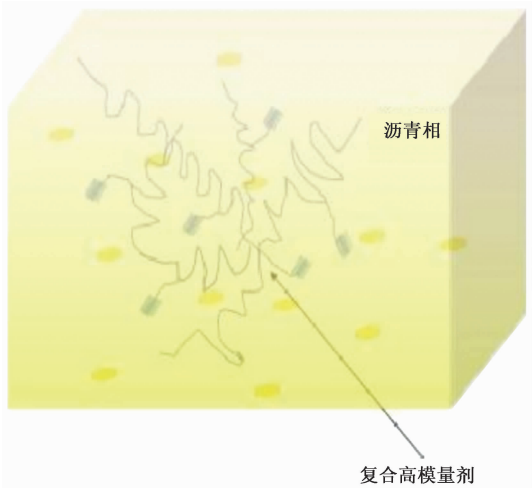


图 2 复合高模量剂作用机理

1.2 试验方法

1.2.1 改性沥青基本性能测试

掺入 0%、1%、2%、3%、4% 5 种不同掺量的复合高模量改性基质沥青(沥青的质量分数),并测试沥青的延度、软化点、针入度等基本性能。测试方法按照《公路工程沥青及沥青混合料实验规程》(JFG E20—2011)进行试验^[8]。测试样品如图 3 所示。

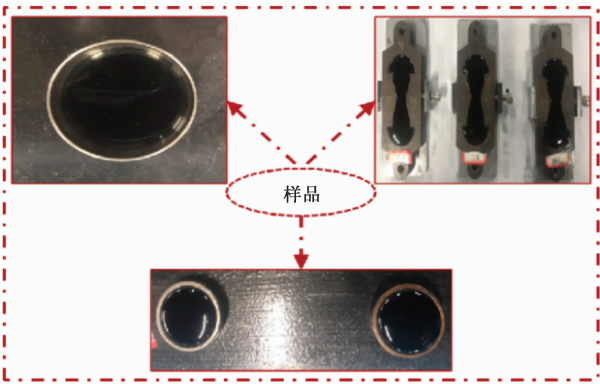


图 3 3 个指标测试样品

1.2.2 沥青黏度测试

采用布洛克菲尔德黏度计旋转法测定复合高模量改性沥青的黏度。当读数稳定后,每隔 60 s 读数一次,连续读数 3 次,以 3 次读数的平均值作为测定值。

1.2.3 级配优化

常规 GAC-20 混合料关键筛孔 4.75 mm 的通过率通常控制在(38±1)%。本文通过增加适量粗集料以及控制细集料的用量对 GAC-20 的级配进行了优化。其中,控制 4.75 mm 的通过率为(39±

1)% ,0.075 mm 的通过率为 $(5.5\pm0.5)\%$,使改进型 GAC-20 混合料级配曲线呈现更加平缓的 S 形曲线。

1.2.4 改进型 GAC-20 混合料性能试验

对改进型 GAC-20 混合料进行车辙试验、低温弯曲试验、冻融劈裂试验、浸水马歇尔试验,验证改进型 GAC-20 混合料的路用性能。测试方法按照《公路工程沥青及沥青混合料实验规程》(JFG E20—2011)进行试验^[8]。

1.2.5 改进型 GAC-20 铺装结构性能评价

结合实际工程,本文在结构设计中引入复合结构车辙试验和 CT 三维扫描技术试验方法,对采用常规 GAC-20 和改进型 GAC-20 中面层混合料的路面结构抗车辙性能和压实效果进行评价。

1.2.5.1 复合结构车辙试验

- 1)利用厚度为 20 cm 的车辙试模,按图 4 所示在室内成型复合结构试件。
- 2)进行室内复合试件的车辙试验,试验温度为

60℃,试验时间为 3 h。其中在第 1、2、3 h 时分别记录动稳定性和车辙变形量。



图 4 界面约束复合车辙板试件

1.2.5.2 CT 扫描试验

采用 CT 三维扫描技术与数字图像处理相结合的方法,对比分析两种铺装结构的压实效果。CT 三维扫描技术的基本工作原理是:利用 X 射线对试件以扫描的方式从多方向透射其断层,用探测器对透射后发生衰减的射线进行采集,进行二维或三维灰度图像重建^[9-10]。扫描原理如图 5^[11]所示,CT 技术性能参数见表 3。

表 3 CT 技术性能参数

参数	X 轴/mm	Y 轴/mm	Z 轴/mm	焦距范围/mm	3D-XY-Pixel Size、3D-Z-Pixel Size/mm
数值	200	420	630	45~800	0.113

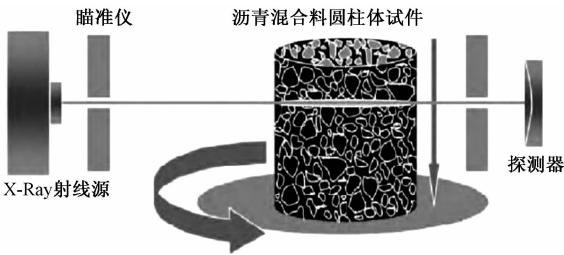


图 5 CT 扫描原理^[11]

2 结果与分析

2.1 沥青基本性能测试结果

随着复合高模量添加剂掺量的增加,改性沥青的针入度、软化点以及延度表现出不同的变化趋势。沥青基本性能试验结果如图 6 所示。

由图 6 可知,掺量为 1%、2%、3%、4%时,沥青的针入度分别为 6.0、5.5、4.6、3.3 mm,与原样沥青相比,分别降低了 0.7、1.2、2.1、3.4 mm;沥青的软化点分别为 57、64、70、79℃,与原样沥青相比,分别提高了 9、16、22、31℃;沥青的延度分别为 26、21、17、14 mm,与原样沥青相比,分别降低了 5、10、14、17 mm。

综上所述,随着复合高模量添加剂掺量的增加,沥青的软化点逐渐升高、针入度逐渐降低,复合

高模量剂很好地提升了沥青的高温性能。这可能的原因是,复合高模量添加剂的掺入使沥青的性质更接近于弹性体,提高了沥青的高温性能^[12]。此外,随着复合高模量添加剂的掺入的增加,沥青的延度逐渐降低。因此,需要降低复合高模量剂的掺量,以确保沥青延度能够满足规范要求。

2.2 沥青黏度测试结果

沥青混凝土的高温性能与压实效果和沥青胶结料的黏度相关。其中,60℃黏度比较贴近实际中路面沥青黏度,沥青黏度值越大,沥青路面在荷载作用下的抗车辙性能越好^[13];而 135℃的黏度对应的是在施工时的和易性,且降低 135℃黏度可以保证在桥面等温度散失速率较快的条件下仍具有良好的压实效果,提高防水性能^[8]。复合高模量改沥青的 60℃黏度、135℃的黏度测试结果如图 7 所示。

由图 7 可知,随着复合高模量添加剂掺量的增加,沥青的 60℃黏度逐渐增加。其中,掺入 1%、2%、3%、4%时,60℃黏度分别为 792、1 180、1 620、2 160 Pa·s,与原样沥青相比,分别提升了 538、926、1 366、1 906 Pa·s。此外,随着复合高模量添加剂掺量的增加,沥青的 135℃黏度逐渐降低。其中,掺入 1%、2%、3%、4%时,135℃黏度分别为

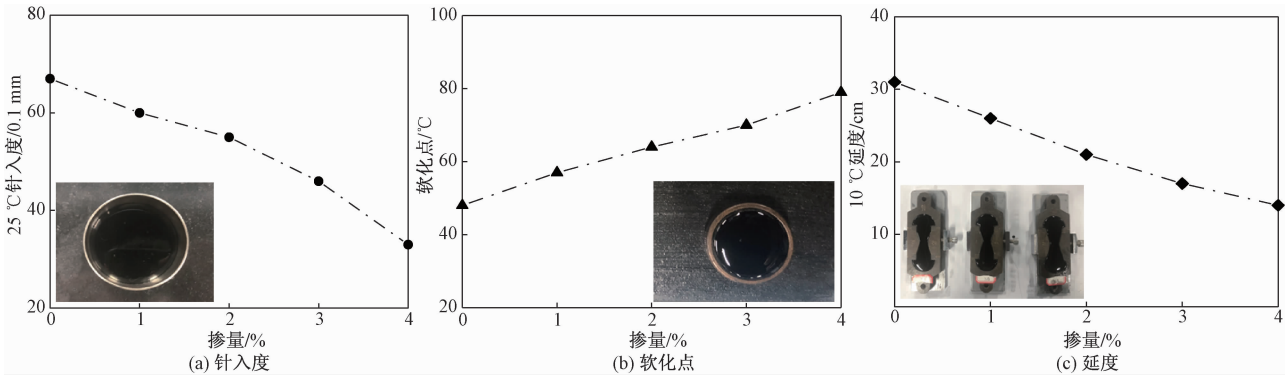


图 6 沥青基本性能试验结果

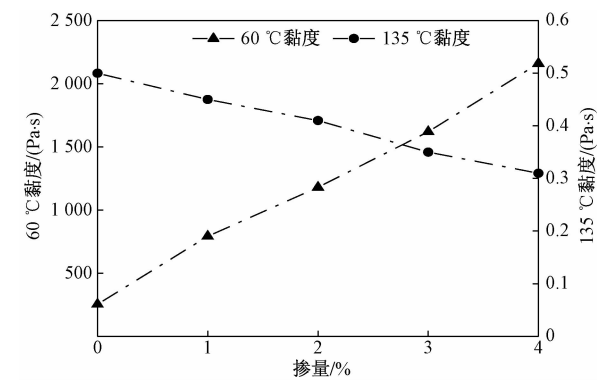


图 7 沥青黏度试验

0.45、0.41、0.35、0.31 Pa·s, 与原样沥青相比, 分别降低了 10%、18%、30%、38%。

综上所述, 复合高模量添加剂的掺入, 提高了沥青的 60 °C 黏度, 降低了沥青的 135 °C 黏度。因此, 复合高模量的掺入能够很好地提升沥青的高温性能, 改善改进型 GAC-20 混合料的施工和易性。

2.3 改进型 GAC-20 级配设计及最佳油石比

根据控制关键筛孔的通过率, 改进型 GAC-20 混合料的级配设计如表 4、图 8 所示。

通过对比不同复合高模量添加剂掺量下沥青的基本性能试验结果以及考虑复合高模量沥青混合料路面施工成本^[14]。本文选择以 1% 的复合高模量剂改性沥青, 并制备改进型 GAC-20 混合料。通过马歇尔体积设计方法, 确定改进型 GAC-20 混合料的体积参数以及最佳油石比。试验结果见表 5。

表 4 改进型 GAC-20 混合料配合比

筛孔尺寸/mm	26.5	19	16	13.2	9.5	4.75	2.36	1.18	0.6	0.3	0.15	0.075
通过百分率/%	100.0	98.0	91.0	82.3	72.4	35.0	25.0	18.2	14.1	10.6	8.6	7.1

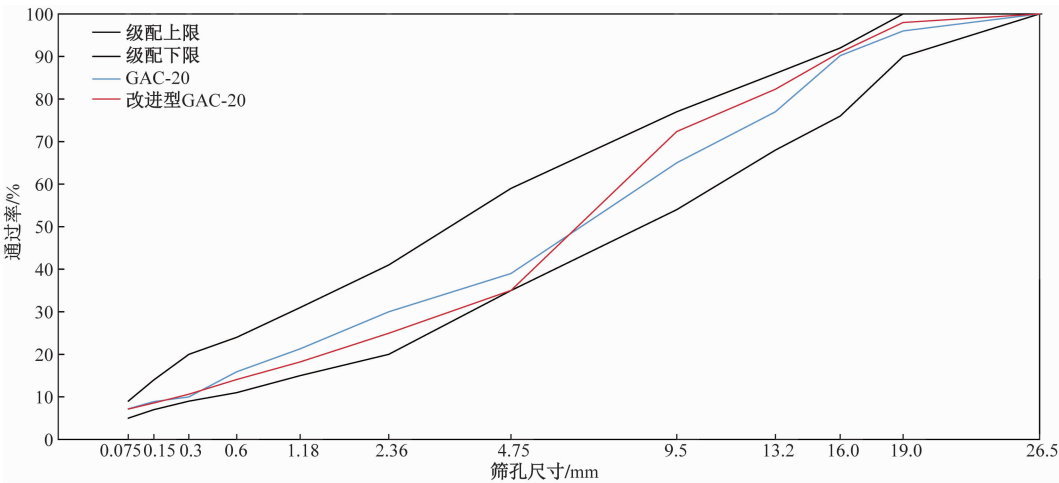


图 8 改进型 GAC-20 级配曲线

表 5 改进型 GAC-20 混合料马歇尔体积参数

项目	最佳油石比/%	毛体积相对密度/ (g/cm ³)	理论最大相对密度/ (g/cm ³)	空隙率/%	矿料间隙率/%	沥青饱和度/%
试验值	4.3	2.472	2.519	4.5	13.8	68.1
技术要求	—	—	—	4~6	13~15.5	65~75

2.4 改进型 GAC-20 混合料性能试验

通过高温性能、低温抗裂性以及水稳定性对改进型 GAC-20 混合料的路用性能进行验证。试验结果见表 6。

表 6 改进型 GAC-20 混合料路用性能试验结果

项目	动稳定度/ (次/mm)	残留稳定 度/%	残留强度 比/%	破坏 应变/ $\mu\epsilon$
试验值	8 433.0	90.5	87.5	2 982.9
技术要求	$\geq 2\ 800$	≥ 85	≥ 80	$\geq 2\ 500$

由表 6 可知,改进型 GAC-20 混合料的动稳定度为 8 433 次/mm,残留稳定度比为 90.5%,劈裂强度比为 87.5%,破坏应变为 2 982.9。综上可知,改进型 GAC-20 混合料的各项路用性能均满足施工技术规范对中面层沥青混合料的技术要求。

此外,为了评价改进型 GAC-20 混合料在高温多雨地区的耐久性。本文通过冻融劈裂试验、车辙试验,对比分析了改进型 GAC-20、GAC-20 和普通 AC-20 混合料的抗水损害性能以及高温稳定性。试验结果见表 7、表 8。

表 7 不同沥青混合料类型的冻融劈裂试验结果

沥青混合料类型	沥青种类	改性方法	残留强度比/%
改进型 GAC-20	基质沥青	复合高模量剂	87.5
GAC-20	基质沥青	无	82.3
	改性沥青	SBS	86.4
AC-20	基质沥青	无	82.6
	改性沥青	SBS	87.4

表 8 不同沥青混合料类型的车辙试验结果

沥青混合料类型	沥青种类	改性方法	动稳定度/ (次/mm)
改进型 GAC-20	基质沥青	复合高模量剂	8 433
GAC-20	基质沥青	无	1 700
	改性沥青	SBS	5 435
AC-20	基质沥青	无	1 300
	改性沥青	SBS	4 846

由表 7 可知,不同类型沥青混合料中,改进型 GAC-20 混合料的残留强度比均表现出一定的提升。其中,改进型 GAC-20 混合料残留强度比为 87.5%,与改性沥青 GAC-20、AC-20 相差不大,与基质沥青 GAC-20、AC-20 相比,分别提升了 6.3%、5.9%。因此,改进型的 GAC-20 混合料能够提升沥

青混合料的抗水损害性能。

由表 8 可知,改进型 GAC-20 混合料的动稳定度明显高于其他沥青混合料类型。其中,改进型 GAC-20 混合料的动稳定度为 8 433 次/mm,与基质沥青 GAC-20、AC-20 混合料相比,分别提升了 4.96 倍、6.48 倍,与改性沥青 GAC-20、AC-20 混合料相比,分别提升了 1.55 倍、1.74 倍。因此,改进型 GAC-20 混合料表现出较好的抗车辙性能。

2.5 改进型 GAC-20 铺装结构性能

2.5.1 复合车辙试验

为了进一步评价改进型 GAC-20 混合料在实际工程应用中的高温稳定性,对比分析两种不同铺装结构的复合车辙试验结果,试验结果如图 9 所示。

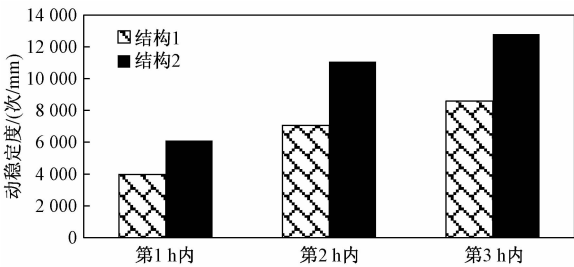


图 9 两种结构类型复合试件 1 h 内的动稳定度对比

由图 9 可知,两种结构的动稳定度随着试验时间的延长均逐渐增加,这主要由于碾压之后的每种铺装结构空隙率降低,结构更加密实。此外,结构 2 的动稳定度较结构 1 高,其中,GAC-20 混合料的第 1 h 稳定度达到 6 095 次/mm,第 2 h 为 11 069 次/mm,第 3 h 为 12 791 次/mm。因此,采用 4 cm SMA-13+6 cm 改进型 GAC-20+8 cm GAC-25 的铺装结构具有较好的抗车辙性。

2.5.2 CT 扫描试验

为了量化结构 2 空隙率的降低结果,通过对扫描结果的图像进行分析来准确定位沥青混合料的内部骨料、空隙及裂纹等各组成部分的分布状态。图 10 中黑色代表空隙,深灰色代表集料,浅灰色代表沥青胶浆^[12]。

由图 10 可知,结构 1 和结构 2 中面层与上面层黏结界面处的形貌具有明显的差异。其中,结构 2 界面处更加密实,孔隙明显少于结构 1。这说明采

用改进型 GAC-20 混合料的复合铺装结构具有更好的密水性能,从而使沥青路面拥有较好的抗水损害能力。

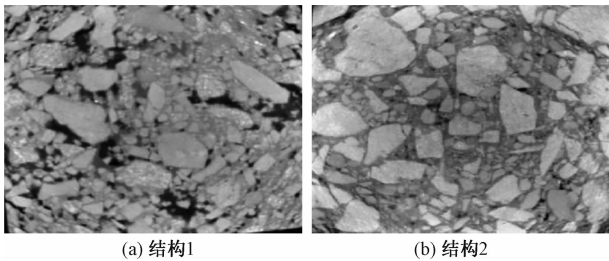


图 10 界面扫描结果

采用 Origin 软件进行灰度值分析计算出界面的空隙率,绘制灰度-概率密度分布曲线^[15-16],如图 11 所示。沥青混合料内部及界面处空隙率如图 12 所示。

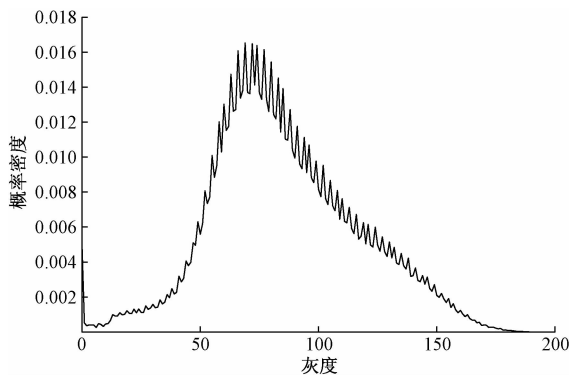


图 11 灰度-概率密度分布曲线

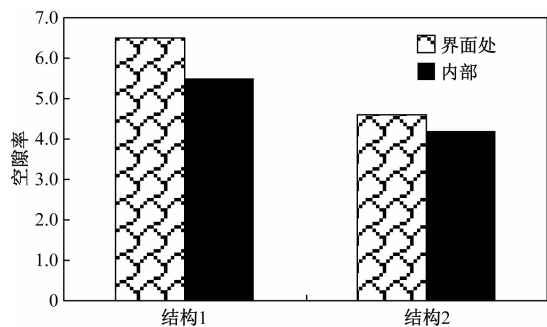


图 12 两种结构类型的空隙率

由图 12 可知,与结构 1 相比,结构 2 的界面处空隙率降低了约 0.8%,内部空隙率降低约 0.7%。因此,采用结构 2 能够有效地降低界面处的空隙率,从而提高铺装面层与原路面层黏结效果,使沥青路面达到更好的压实效果。

3 结论

通过改性沥青以及级配优化对沥青路面中面

层的 GAC-20 混合料进行改进,以提升沥青混合料在高温多雨地区的耐久性。主要结论如下:

1)复合高模量剂的掺入降低了沥青的针入度、135 ℃黏度,提高了沥青的软化点、60 ℃黏度,使沥青的高温性能和施工和易性得到了改善。

2)通过控制 4.75 mm 通过率 $[(39 \pm 1)\%]$, 0.075 mm 通过率 $[(5.5 \pm 0.5)\%]$,使改进型 GAC-20 混合料的级配曲线呈现更平缓的 S 形。

3)复合高模量剂的掺入很好地提升了改进型 GAC-20 混合料的路用性能。其中,高温稳定性提升了 4.96 倍。

4)改进型 GAC-20 混合料在 4 cm SMA-13+6 cm改进型 GAC-20+8 cm GAC-25 的铺装结构中表现出了很好的抗车辙性;此外,采用此铺装结构,界面处空隙率降低约 0.8%,内部空隙率降低约 0.7%,有效提高了铺装面层与原路面层黏结效果,实现了较好的压实效果。

参考文献

[1] 张永升. 广东武深高速公路沥青路面结构设计研究[D]. 北京:交通运输部公路科学研究院,2015.

[2] 王辉. 广东地区极端气候对沥青路面的影响及应对措施[D]. 广州:华南理工大学,2012.

[3] 吕瑞. 地域性级配 GAC-16C 沥青混凝土在江肇高速公路中的应用研究[J]. 公路交通技术,2013(5):50-54.

[4] 张永升,罗代松,刘中宇,等. 粤北地区环境条件下 SAC 与 GAC 沥青混凝土的路用性能[J]. 交通运输研究,2020,6(5):38-44.

[5] 戚红伟. GAC-20 混合料设计方法研究[J]. 科学技术与工程,2010,26(10):6576-6579.

[6] SUN Z H, WANG T B. The water stability prediction model of GAC-20 modified asphalt mixture[C]// Proceedings of 2015 International Conference on Applied Mechanics and Mechatronics Engineering (AMME 2015). Bangkok: Science and Engineering Research Center, 2015: 733-738.

[7] 官中良. GAC-20C 沥青混合料级配对渗水性能的影响[J]. 广东公路交通,2018,44(4):37-42.

[8] 中华人民共和国交通运输部发布. 中华人民共和国行业标准. 公路工程沥青及沥青混合料实验规程:JFG E20—2011[M]. 北京:人民交通出版社,2011.

[9] 李帅帅. 循环加载条件下沥青混合料空隙特征及渗透性试验研究[D]. 长沙:长沙理工大学,2015.

[10] 王聪. 基于 CT 技术的沥青混合料力学行为及三维重构研究[D]. 大连:大连海事大学,2012.

[11] 缪逸辰. 水-荷载耦合作用下沥青混合料细观尺度域损伤特性研究[D]. 哈尔滨:哈尔滨工业大学,2017.

[12] 张争奇,卢川,王素青,等. 高模量沥青性能及其界定标准研究[J]. 重庆交通大学学报(自然科学版),2021,40

(9):109-116,144.

[13] 申万青. 增塑剂 DOA 改性沥青及混合料高温性能研究[D]. 西安:长安大学,2017.

[14] 韦萍. 复合高模量沥青混合料路面预算定额测定与分析[J]. 公路,2022,67(8):323-325.

[15] 李正中,柴东然,耿磊,等. 密级配抗滑超薄磨耗层材料 UWM-10 设计与路用性能研究[J]. 中外公路,2019,39(1):243-248.

[16] ZHANG Y,VERWAAL W,VEN M,et al. Using high-resolution industrial CT scan to detect the distribution of rejuvenation products in porous asphalt concrete[J]. Construction and Building Materials,2015,100:1-10.

Design and Performance of Durable Asphalt Mixture in High Temperature and Rainy Climate

CHEN Wenfeng, ZHOU Jiajia, SHE Kai

(China Power Construction Road and Bridge Group Co.,Ltd.,Beijing 100010,China)

Abstract: In order to improve the durability of asphalt mixture under high temperature and rainy weather conditions,the improved GAC-20 mixture is designed by adding 0%, 1%, 2%, 3%, 4% composite high modulus agent to modify the matrix asphalt and optimizing the grading curve, and the road performance of the improved GAC-20 mixture is verified. In addition, the pavement structure performance of the improved GAC-20 mixture is evaluated by composite rutting test and CT scanning test. The results show that the addition of composite high modulus agent can improve the softening point and viscosity of asphalt at 60 ℃, and reduce its penetration, viscosity and ductility at 135 ℃. Considering the basic properties of asphalt and cost control, the content of composite high modulus agent is determined to be 1%. The road performance of the improved GAC-20 mixture can well meet the specification requirements, and compared with GAC-20 mixture, the high temperature stability and water stability are improved by 4.96 times and 1.06 times. The pavement structure with 4 cm SMA-13 + 6 cm improved GAC-20 + 8 cm GAC-25 shows good rutting resistance, and the void ratio at the interface is reduced by 0.8% and the internal void ratio is reduced by 0.7%, which effectively improves the compaction effect of asphalt mixture. Therefore, the improved GAC-20 mixture can be used to improve the rutting resistance and water damage resistance of asphalt pavement, which provides a theoretical basis for the study of durable asphalt mixture under high temperature and rainy conditions.

Keywords:road works;improved GAC-20 asphalt mixture;composite high modulus modifier;CT scan;durability