

DOI:10.16799/j.cnki.csdqyfh.2023.09.059

不同标号沥青胶浆流变性能研究

叶尔木拉提·木哈得尔
(中铁建新疆京新高速公路有限公司, 新疆 乌鲁木齐 830000)

摘要: 采用4种标号沥青和4个粉胶比制备16种沥青胶浆, 在不同频率和温度下进行动态剪切流变试验, 通过温度扫描试验获取不同温度下的复数剪切模量、相位角、车辙因子和复数模量主曲线。方差分析表明: 沥青胶浆复数剪切模量随着沥青标号的减小及粉胶比的增大而增大; 沥青胶浆相位角随着沥青标号增大而增大, 而与粉胶比相关性不大。在5℃低温下, 粉胶比对沥青胶浆的力学性能影响更显著; 在15℃中温下, 粉胶比及沥青种类对沥青胶浆的力学性能影响水平大致相同; 在60℃高温下, 沥青种类对沥青胶浆的力学性能影响更显著。沥青胶浆在不同温度下复数剪切模量 G^* 、相位角 δ 、车辙因子 $G^*/\sin\delta$ 的影响因素分析结果表明: 在中高温条件下, 沥青种类对胶浆流变性能影响最为显著。

关键词: 沥青胶浆; 流变特性; 温度扫描试验; 方差分析

中图分类号: U414 **文献标志码:** A **文章编号:** 1009-7716(2023)09-0251-05

0 引言

沥青混合料性质随温度及荷载作用变化而变化, 在不同温度条件下表现出弹性、黏性和黏弹性。现代胶浆理论认为, 沥青混合料是一种三级空间网状结构分散系, 一般认为沥青胶浆(由填料及沥青组成)的构成及性质对沥青混合料的力学性能与路用性能具有决定性的影响^[1]。Zhan等^[2]研究分析了沥青混合料动态模量与沥青胶浆黏弹性之间的关系表明两者的相关性较强, 可利用沥青胶浆的黏弹性较好地预测沥青混合料的动态模量。Arshadi^[3]研究发现, 沥青胶浆的黏弹性与混合料抗车辙性能关系紧密, 沥青胶浆中的黏性成分和弹性成分可以很好地提高混合料的抗车辙性能。相比弹性成分作用, 黏性成分对混合料的抗车辙性提高更明显。Cristian Durta^[4]采用不同的矿粉填料, 在不同温度条件下对基质沥青及其胶浆进行动态剪切试验, 通过沥青的流变性能得到了预估的沥青胶浆的特性参数, 并建立了沥青与沥青胶浆之间的联系。以上众多研究均表明, 沥青胶浆对沥青混合料性能具有较大的影响。因此, 对不同标号沥青与矿粉填料所组成的沥青胶浆流变性能进行了深入研究, 其结果对于合理选择沥青种类具有重要的参考价值。

1 沥青胶浆的制备

1.1 原材料

研究采用70#(SK)、50#(TPK)、30#(KL)、20#(KL)4种不同的沥青, 其技术指标测定结果如图1所示。矿粉采用石灰岩矿粉, 矿粉技术指标见表1。

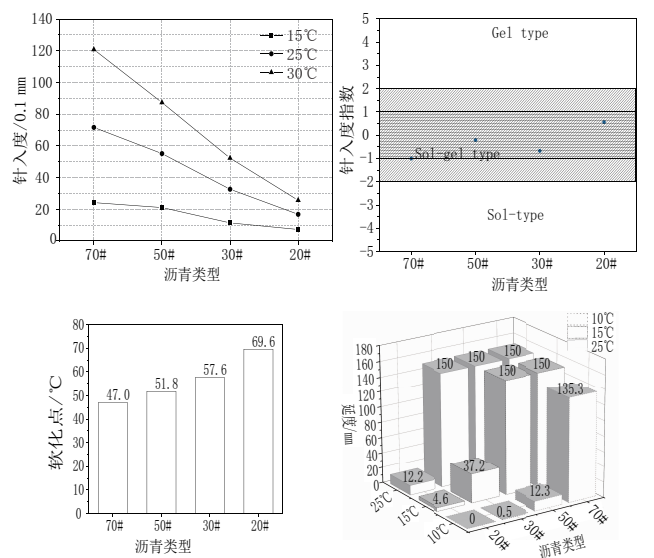


图1 沥青基本性能实验结果

表1 矿粉技术指标

指标	实测值	
表观相对密度	2.726	
亲水系数	0.6	
塑性指数	3	
颗粒范围 /%	<0.6 mm	100
	<0.15 mm	100
	<0.075 mm	98.5

收稿日期: 2022-11-17
作者简介: 叶尔木拉提·木哈得尔(1990—), 男, 硕士, 工程师, 从事道路工程相关工作。

1.2 沥青胶浆制备

采用 0.6、0.9、1.2、1.5 四个不同的粉胶比制备沥青胶浆。先将矿粉置于 105℃烘箱中加热 4 h 以去除水分,同时将 4 种沥青置于烘箱中,加热温度分别为其软化点温度 +100℃,将沥青烘至流动状态即可。之后将流淌状态的沥青置于相对应温度下的油浴锅中,开动叶片搅拌器,叶片速度为 500 r/min,边搅拌沥青边分批次加入称量好的沥青,搅拌一共持续 30 min,以保证矿粉与沥青的充分混合。搅拌完成后立即制备 DSR 样品,防止矿粉在沥青胶浆中沉淀,同时对制备的 DSR 样品在 1 d 内进行试验,防止样品性质发生变化。

2 沥青胶浆在不同频率下的流变性能

为了研究沥青胶浆在更广温度域及频率域中的性能,对上述 16 种沥青胶浆在 5 种温度(40℃、50℃、60℃、70℃、80℃)下进行了频率扫描试验。试验频率范围为 0.1~100 rad/s,应变选择 1.25%,获得了不同温度、不同沥青、不同粉胶比的沥青胶浆各类流变学指标随加载频率变化的数据。根据不同频率下沥青胶浆的复数剪切模量数据,采用更适用于沥青胶浆的 sigmoidal 模型,对不同温度下的沥青胶浆频率扫描曲线进行主曲线拟合,从而对沥青胶浆进行更广温度范围的性能进行评价。

对不同标号、不同粉胶比的沥青胶浆按上述试验条件进行频率扫描,得到 16 种沥青胶浆在 5 种温度下的复数剪切模量随频率变化数据,并绘制沥青模量主曲线,如图 2 所示。

根据以上沥青胶浆的复数剪切模量主曲线,利用 sigmoidal 模型,求出不同沥青胶浆 5℃和 15℃下

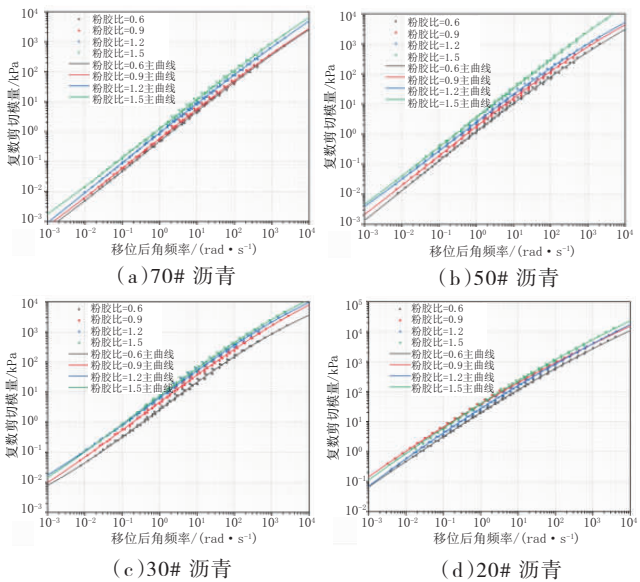


图 2 沥青胶浆复数模量主曲线

的不同频率时的复数剪切模量。选择 10 Hz 时沥青胶浆的复数剪切模量作为基准分析对象。图 3 为不同沥青胶浆在 5℃和 15℃时复数剪切模量。

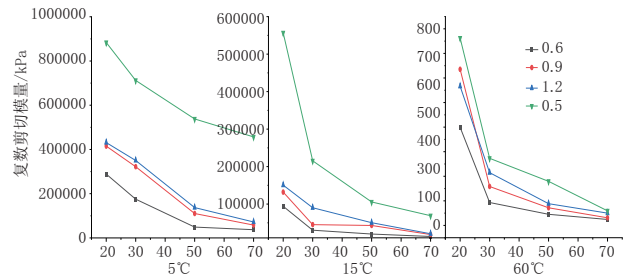


图 3 不同温度下的沥青胶浆复数模量

对以上不同温度下的沥青胶浆复数剪切模量进行方差分析,得到沥青标号[70#(SK)、50#(TPK)、20#(KL)]及粉胶比大小(0.6、0.9、1.2、1.5)两个因素对复数剪切模量的显著性影响水平($\alpha=5\%$ 水平下)。方差分析结果见表 2。

表 2 方差分析结果

差异源	60℃			15℃			5℃		
	F	P-value	F crit	F	P-value	F crit	F	P-value	F crit
行(粉胶比)	5.599	0.019	3.862	4.144	0.042	3.862	22.922	0.000 15	3.862
列(沥青类型)	65.480	1.96E-06	3.862	4.180	0.041	3.862	14.411	0.000 877	3.862

由上述方差分析结果可知,在 60℃高温条件下,粉胶比与沥青类型对沥青胶浆复数剪切模量均具有显著性的影响,且沥青类型对胶浆的复数剪切模量影响水平更显著。我国《公路沥青路面设计规范》(JTG D50—2017)对沥青混合料动态模量预估也充分考虑了 60℃、10 rad 下沥青结合料复数剪切模量的影响。这也说明沥青结合料的复数剪切模量对沥

青路面设计的重要性。

在 15℃中温条件下,粉胶比与沥青类型对沥青胶浆复数剪切模量同样具有显著性的影响。此时两种因素对复数剪切模量的影响水平大致相等。在 5℃低温条件下,上述两种因素对胶浆的复数剪切模量同样均具有显著性的影响,但在此条件下,粉胶比对复数剪切模量的影响更为显著。

3 沥青胶浆在不同温度下的流变性能

为了更具体地了解不同温度下,沥青胶浆性能受粉胶比和沥青种类的影响,利用 DSR 试验仪测试了上述 16 种不同标号、不同粉胶比的沥青胶浆在不同温度下的各项流变学指标。测试条件如下:采用应变控制方式,应变选用 1.25%,平行板直径为 25 mm,间隙为 1 mm,试验频率选为 10 rad/s,试验温度间隔固定在 6℃。得到不同粉胶比的沥青胶浆在不同温度下的复数剪切模量 G^* 、相位角 δ 、车辙因子 $G^*/\sin\delta$ 、储存模量 G' 和损耗模量 G'' 。以下分别对各流变学指标进行分析。

3.1 复数剪切模量 G^* 与相位角 δ

不同沥青胶浆的复数剪切模量 G^* 和相位角 δ 如图 4 所示。

在沥青种类及粉胶比不变的情况下,沥青胶浆的复数剪切模量均随着温度的增大而减小,对应到混合料中,预示着沥青混合料的抗车辙性能随着温度的升高而降低。同时,随着温度的升高,沥青胶浆的相位角也有逐渐增大的趋势,更进一步表明温度越高,沥青的弹性成分越低而黏性成分越高。

对不同沥青及不同粉胶比两种因素对沥青胶浆的复数剪切模量及相位角进行两因素方差分析。表 3 为试验温度 40℃ 条件下,4 种沥青 4 种粉胶比共 16

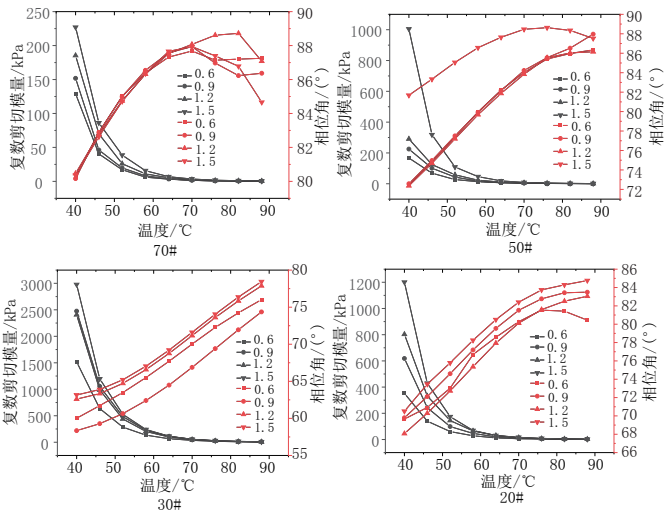


图 4 不同沥青胶浆的复数模量及相位角

种沥青胶浆的复数剪切模量 G^* 在显著性水平 $\alpha=5\%$ 条件下的方差分析结果。

由表 3 可知, $F(\text{沥青类型})=54.52>F_{\text{crit}}=3.26$, $F(\text{粉胶比})=10.09>F_{\text{crit}}=3.49$,表明沥青种类及粉胶比对沥青胶浆的复数剪切模量具有显著性影响。结合表 4 可知,沥青标号越低,粉胶比越大,组成的沥青胶浆的复数剪切模量 G^* 越大。

对 40~88℃ 下的沥青胶浆复数剪切模量 G^* 进行方差分析,可以得到不同温度下沥青胶浆的复数剪切模量 G^* 对沥青类型和粉胶比的方差分析结果 F 值(见表 4)。

表 3 40℃ 时沥青胶浆 G^* 方差分析结果

差异源	SS	df	MS	F	P-value	F crit
行(沥青类型)	11 623 240	4	2 905 810	54.523 66	1.35E-07	3.259 167
列(粉胶比)	1 613 109	3	53 7703.1	10.089 28	0.001 335	3.490 295
误差	639 533.7	12	53 294.474 09			
总计	13 875 883	19				

表 4 不同温度下沥青胶浆 G^* 方差分析结果

方差分析结果	试验温度 /℃									F crit
	40	46	52	58	64	70	76	82	88	
F(沥青类型)	54.52	64.98	67.54	70.17	77.35	94.54	78.16	51.11	58.97	3.26
F(粉胶比)	10.09	5.71	5.67	4.59	3.97	4.35	3.65	2.80	3.09	3.49

由表 4 可以发现,在不同温度下, $F(\text{沥青类型})$ 值始终大于 F_{crit} ,且随着温度的升高, $F(\text{沥青类型})$ 值有先增大后减小的趋势。同时, $F(\text{粉胶比})$ 值也有随着温度升高先增大后减小的趋势,且在 82℃ 及 88℃ 高温条件下, $F(\text{粉胶比})$ 值开始小于 F_{crit} 。以上规律表明,在所试验的温度范围内,粉胶比对沥青胶浆的 G^* 影响比沥青类型对沥青胶浆的 G^* 影响更显著。随着温度的升高,两种因素对胶浆 G^* 影响的显

著性先增大后减小,在 70℃ 时两者的显著性达到最大,即在此温度下,调整沥青种类及粉胶比大小对沥青胶浆的 G^* 影响最大。随着温度达到 82℃ 以上后,粉胶比对沥青胶浆 G^* 在统计学上没有显著性的影响,说明在高温条件下,改变粉胶比不会显著性地改变沥青胶浆的 G^* 。

对沥青胶浆的相位角 δ 进行相应的方差分析,分析结果见表 5。

表 5 不同温度下沥青胶浆相位角 δ 方差分析结果

方差分析结果	试验温度 /℃									F crit
	40	46	52	58	64	70	76	82	88	
F(沥青类型)	66.64	80.90	95.50	111.54	131.00	136.14	134.90	89.31	43.23	3.26
F(粉胶比)	2.60	2.31	2.24	2.18	2.39	2.26	2.45	1.47	0.47	3.49

由表 5 可知,沥青类型及粉胶比对沥青胶浆相位角的影响显著性指标 F 值均随着温度的升高而出现先增大后减小的趋势。从具体数值可以看出,F(沥青类型)值始终大于 F crit,而 F(粉胶比)值始终小于 F crit。以上规律表明,沥青类型对沥青胶浆的相位角具有显著性的影响,而粉胶比对沥青胶浆的相位角没有显著性影响,即在所选用的几种沥青及粉胶比的范围内,改变沥青种类可以显著性地调整沥青胶浆中的黏弹性比例,而改变粉胶比大小则对沥青胶浆的黏弹性比例无显著性的影响。同时,在较高温度(如 70℃)下,改变沥青类型对沥青胶浆黏弹性比例的影响显著性水平最大,而当温度再升高至 70℃ 以上后,这种影响的显著性水平又会逐渐减小。

3.2 车辙因子 $G^*/\sin\delta$

基于以上分析,得到了沥青胶浆的力学指标——复数剪切模量 G^* 及相位角 δ 在沥青种类及粉胶比两种因素下的显著性水平。为了深入了解这两种因素对沥青胶浆的路用性能的影响,本文选用了车辙因子 $G^*/\sin\delta$ 、储存模量 G' 、损耗模量 G'' 3 种流变学指标,分别分析上述两种因素对沥青胶浆的抗车辙性能、弹性和黏性的显著性水平,探究沥青种

类及粉胶比在不同温度下对沥青胶浆的影响水平。图 5 分别为不同粉胶比下 70#(SK)、50#(TPK)、30#(KL)、20#(KL)沥青胶浆在不同温度下的车辙因子 $G^*/\sin\delta$ 。

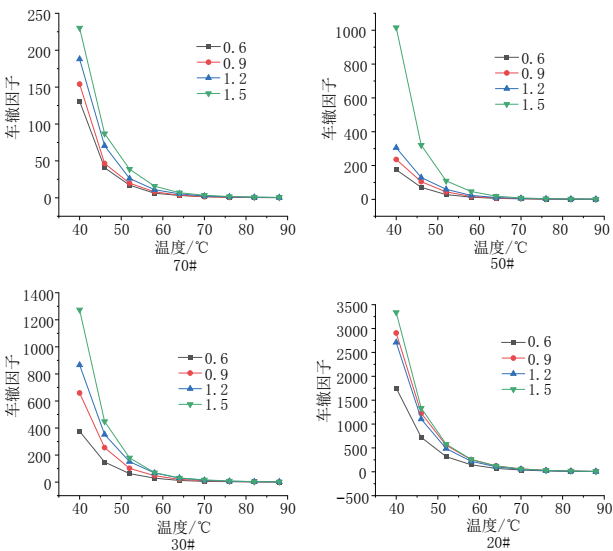


图 5 沥青胶浆车辙因子

对以上试验数据采用相同的方差分析方法,得到不同沥青胶浆不同温度下 $G^*/\sin\delta$ 、 G' 、 G'' 的 F(沥青类型)值与 F(粉胶比)值,分别列于表 6 中。

表 6 不同温度下沥青胶浆 $G^*/\sin\delta$ 方差分析结果

方差分析结果	试验温度 /℃									F crit
	40	46	52	58	64	70	76	82	88	
F(沥青类型)	59.07	64.41	65.72	67.33	73.59	89.31	75.06	50.65	58.71	3.26
F(粉胶比)	8.74	5.80	4.70	3.85	3.39	3.76	3.28	2.64	2.94	3.49

由表 6 可知,在试验温度范围内,F(沥青类型)值一直大于 3.26,且 F(沥青类型)值大 F(粉胶比)值一个量级。同时,F(粉胶比)值随着温度的升高而下降,当试验温度为 64℃ 时,F(粉胶比)值开始小于 3.49。以上规律表明,沥青类型对沥青胶浆车辙因子 $G^*/\sin\delta$ 具有显著性影响,同时其影响水平远高于粉胶比对沥青胶浆车辙因子 $G^*/\sin\delta$ 的影响水平。由于车辙因子常作为沥青类材料的抗车辙性能指标,因此在该试验温度条件下,相较于改变粉胶比的大小,改变沥青种类能显著性地提升沥青胶浆的抗车辙性能。当温度高于 64℃ 时,改变粉胶比对沥青胶浆的抗

车辙性能没有显著性影响,说明在高温条件下,若需要提升沥青胶浆的抗车辙性能,最有效的方法是改变沥青种类。

将上述 G^* 、 δ 、 $G^*/\sin\delta$ 这 3 种流变学指标在不同温度下的方差分析结果整理汇总,具体见表 7。表 7 中,* 表示具有显著性影响,** 表示显著性影响水平更高,无标志的代表此因素对指标无显著性影响。

由表 7 可知,在沥青胶浆中,沥青种类对胶浆流变学性能影响始终最为显著,而粉胶比仅在中温条件下对沥青胶浆的 G^* 及 G'' 具有显著性影响。

表 7 粉胶比及沥青类型对沥青胶浆流变指标影响水平

温度条件	影响因素	G^*	δ	$G^*/\sin\delta$
中温条件	粉胶比	*		
	沥青种类	**	**	**
高温条件	粉胶比			
	沥青种类	**	**	**

4 结 论

对 70#(SK)、50#(TPK)、30#(KL)、20#(KL) 4 种沥青分别按照 0.6、0.9、1.2、1.5 的粉胶比制备了 16 种沥青胶浆,并对其进行了温度扫描以及频率扫描试验,得出主要结论如下:

(1)沥青胶浆复数剪切模量随着沥青标号的减小及粉胶比的增大而升高;沥青胶浆的相位角随着沥青标号增大而增大,而与粉胶比相关性不大。

(2)沥青胶浆频率扫描试验及主曲线结果表明:在 5℃低温条件下,粉胶比对沥青胶浆的力学性能影响更显著;在 15℃中温条件下,粉胶比及沥青种类对沥青胶浆的力学性能影响水平大致相同;在 60℃高

温条件下,沥青种类对沥青胶浆的力学性能影响更显著。

(3)不同温度下沥青胶浆复数剪切模量 G^* 、相位角 δ 、车辙因子 $G^*/\sin\delta$ 的影响因素分析结果表明:在中高温条件下,沥青种类对胶浆流变学性能影响最为显著。

参考文献:

[1] 张争奇,王永财.沥青胶浆对沥青混合料高低温性能的影响[J].长安大学学报(自然科学版),2006(2):1-5.
[2] X L ZHAN Prediction of Dynamic Modulus of Asphalt Mixture Based on Viscoelastic Properties of Asphalt Mortar [J]. Advanced Materials Research, 2013, 2249.
[3] ARSHADI A. Importance of asphalt binder properties on rut resistance of asphalt mixture[D]. Madison: University of Wisconsin-Madison, 2013.
[4] CRISTIAN DRUTA. A micromechanical approach for predicting the complex shear modulus and accumulated shear strain of asphalt mixtures from binder and mastics [D]. Louisiana State University, USA, 2006.
[5] JTG D50—2017,公路沥青路面设计规范[S].

《城市道桥与防洪》杂志

是您合作的伙伴,为您提供平台,携手共同发展!

欢迎新老读者订阅期刊 欢迎新老客户刊登广告

投稿网站:<http://www.csdqyfh.com> 电话:021-55008850 联系邮箱:cdq@smedi.com