

沥青胶浆流变性能及与矿粉指标关联性研究

皇甫铤, 李豪, 王树杰

(苏交科集团股份有限公司, 江苏 南京 210017)

**摘要:** 沥青胶浆的流变品质对沥青混合料性能有重要影响,而矿粉是沥青胶浆的重要组成部分。文中通过试验研究,发现不同矿粉对沥青胶浆高温及疲劳性能的影响存在差异,并且高粘沥青胶浆的流变性能强于基质沥青胶浆,表现出改性沥青的优越性;基于灰色关联分析,研究了矿粉的不同物理化学指标与沥青胶浆高温及疲劳性能之间的关联性,得到矿粉对沥青胶浆性能影响的关键指标为密度、亲水系数、 $P_{20}$ 、 $D_{10}$ 、比表面积及细度模数。

**关键词:** 公路;沥青胶浆;流变性能;疲劳性能;矿粉;灰色关联分析

中图分类号:U416.217

文献标志码:A

文章编号:1671-2668(2017)01-0071-05

随着沥青及沥青混合料研究的逐渐成熟,对沥青及沥青混合料的评价研究已形成较为完善的体系,对矿粉-沥青二元体系的研究成为当下的热点。近代胶浆理论认为沥青混合料是多级空间网状体系,矿粉-沥青组成的沥青胶浆是最为重要的二元体系,相关研究表明沥青胶浆的性能品质对沥青混合料有重要影响。矿粉作为沥青胶浆的重要组成部分,必然对沥青胶浆性能产生影响。该文通过一系列试验研究沥青胶浆的高温及疲劳性能,并在此基础上研究矿粉的不同指标对沥青胶浆流变性能的影响,找寻对沥青胶浆流变性能影响最为关键的矿粉指标,作为工程实践中对矿粉进行筛选的重要参考依据。

1 试验原材料

选用 5 种不同产地的石灰岩矿粉,以 1<sup>#</sup>、2<sup>#</sup>、3<sup>#</sup>、4<sup>#</sup>、5<sup>#</sup> 区分;选用 70<sup>#</sup> 基质沥青和高粘沥青。Superpave 规定的较合理的粉胶比为 0.6~1.2,而有关研究表明沥青胶浆的合理粉胶比为 1.0 左右,这里取粉胶比为 1.0。分别对矿粉的物化指标和沥青的技术指标进行检测,结果见表 1~3。

2 沥青胶浆流变性能试验分析

由于沥青胶浆是粘弹性质材料,具有流变物质的特性,根据 SHRP 计划研究成果,通过动态剪切流变仪 DSR 和弯曲梁流变仪 BBR 试验研究沥青胶

表 1 矿粉的物化指标检测结果

检测项目	5 种矿粉的检测结果				
	1 <sup>#</sup>	2 <sup>#</sup>	3 <sup>#</sup>	4 <sup>#</sup>	5 <sup>#</sup>
密度/(g·cm <sup>-3</sup> )	2.657	2.673	2.618	2.711	2.717
比表面积/(cm <sup>2</sup> ·cm <sup>-3</sup> )	14 144.7	12 911.2	19 732.7	19 897.7	22 579.72
平均粒径/ $\mu\text{m}$	17.036	15.360	7.282	10.138	7.242
$P_{20}/\%$	71.182	70.991	95.308	86.592	92.841
$D_{10}/\mu\text{m}$	1.590	1.697	1.248	1.274	1.117
$D_{50}/\mu\text{m}$	8.382	10.900	5.518	5.342	4.614
$D_{90}/\mu\text{m}$	46.278	35.819	14.140	26.794	15.800
细度模数	3.263	3.463	2.496	2.545	2.431
亚甲蓝值/(g·kg <sup>-1</sup> )	2.25	1.00	2.75	2.50	1.50
亲水系数	0.685	0.671	0.652	0.752	0.692

注: $P_{20}$ 为粒径 20  $\mu\text{m}$  矿粉的累计通过率; $D_x$ 为矿粉累计粒度分布百分数达到  $x\%$  时对应的粒径。

表 2 70# 基质沥青常规指标检测结果

检测项目	技术指标	检测结果
针入度(25℃,5 s,100 g)/(0.1 mm)	60~80	66
软化点(R&B)/℃	≥46	47
60℃动力粘度/(Pa·s)	≥180	258
10℃延度/cm	≥20	31
15℃延度/cm	≥100	>100
蜡含量(蒸馏法)/%	≤2.2	1.7
闪点/℃	≥260	320
溶解度/%	≥99.5	99.92
密度(15℃)/(g·cm <sup>-3</sup> )	实测记录	1.035
质量变化/%	±0.8	-0.022
薄膜加热试验	残留针入度比/%	71
	残留延度(10℃)/cm	9

表 3 高粘沥青常规指标检测结果

检测项目	技术指标	检测结果
针入度(25℃,100 g,5 s)/(0.1 mm)	≥40	47
软化点(R&B)/℃	≥80	81
15℃延度(5 cm/min)/cm	≥80	95
5℃延度(5 cm/min)/cm	≥30	30
闪点/℃	≥260	290
60℃动力粘度/(Pa·s)	≥20 000	21 045
粘韧性/(N·m)	≥20	28
韧性/(N·m)	≥15	19
薄膜加热试验	质量损失/%	≤0.6
	针入度比/%	≥65

浆的高低温及疲劳等流变特性。试验用沥青胶浆样品为上述 5 种矿粉分别与基质沥青、高粘沥青在粉胶比为 1.0 的条件下配制而成,矿粉与 70# 基质沥青组成的沥青胶浆称为基质沥青胶浆,与高粘沥青组成的沥青胶浆称为高粘沥青胶浆,胶浆编号与矿粉编号对应。制备过程中采用人工手动匀速搅拌,拌和温度维持在 150℃,当矿粉-沥青混合物的表面不再出现气泡时停止搅拌。搅拌时间 15~20 min,确保沥青胶浆均匀。

### 2.1 高温性能

目前对于沥青胶浆高温性能的研究大多采用车辙因子作为评价指标,然而根据文献[7],车辙因子并不能充分反映实际路面荷载的作用方式,没有充分考虑沥青材料具有的延迟弹性性质,对于改性沥青来说更是如此。为了更好地评价沥青胶浆的高温性能,采用多应力重复蠕变试验 MSCR 进行研究。

该试验使用动态剪切流变仪和应力控制模式,在应力水平 100 Pa 下进行连续测试,每个应力水平进行 10 个作用周期,每个周期 10 s,包括 1 s 蠕变阶段和 9 s 卸载恢复阶段,试验总时间为 200 s,试验温度为 60℃,评价指标为不可恢复蠕变柔量  $J_{nr}$ 。 $J_{nr}$  越大,则高温抗变形能力越差;反之,越好。试验结果见表 4 和图 1。

表 4 不同沥青胶浆的不可恢复蠕变柔量  $J_{nr}$ 

沥青胶浆	不同沥青胶浆的 $J_{nr}$	
编号	基质沥青胶浆	高粘沥青胶浆
1#	0.050 00	0.001 43
2#	0.108 05	0.001 07
3#	0.095 12	0.002 33
4#	0.099 84	0.001 45
5#	0.113 75	0.000 64

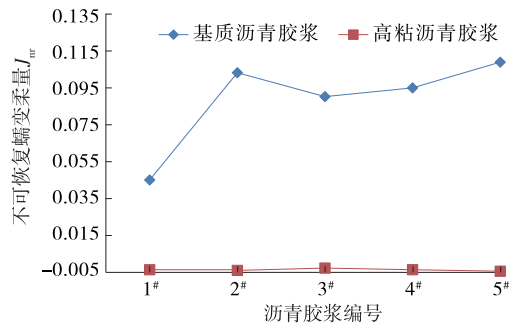


图 1 不同沥青胶浆的不可恢复蠕变柔量  $J_{ir}$

由图 1 可看出:不同基质沥青胶浆的不可恢复蠕变柔量  $J_{ir}$  有所差别,2<sup>#</sup>、3<sup>#</sup> 的较大,1<sup>#</sup> 的最小;高粘沥青胶浆的不可恢复蠕变柔量  $J_{ir}$  差别较小,3<sup>#</sup> 的  $J_{ir}$  稍大于其他胶浆。说明不同矿粉对沥青胶浆的高温性能有影响,这与矿粉的物化性质有一定关系。相比基质沥青胶浆,相同矿粉条件下高粘沥青胶浆的  $J_{ir}$  小得多,说明高粘沥青胶浆的高温抗变形能力强于基质沥青胶浆,这与基质沥青、高粘沥青本身的粘弹性质有着很大关系。

2.2 低温性能

通过弯曲梁流变仪进行沥青胶浆低温性能研究,试验温度 -12 ℃,评价指标为蠕变劲度模量  $S$ 。试验结果见表 5 和图 2。

表 5 不同沥青胶浆的蠕变劲度模量  $S$

沥青胶浆 编号	不同沥青胶浆的 $S/\text{MPa}$	
	基质沥青胶浆	高粘沥青胶浆
1 <sup>#</sup>	406	362
2 <sup>#</sup>	436	305
3 <sup>#</sup>	382	282
4 <sup>#</sup>	325	271
5 <sup>#</sup>	385	342

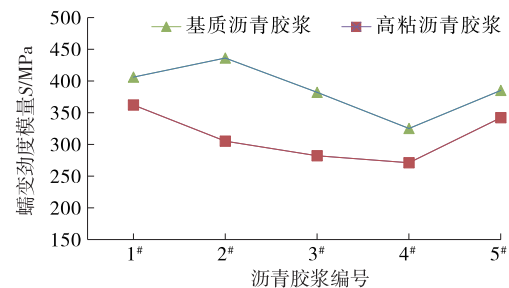


图 2 不同沥青胶浆的蠕变劲度模量  $S$

从图 2 可看出:不同沥青胶浆的劲度模量存在差异,基质沥青胶浆中最大差值接近 100 MPa,高粘

沥青胶浆为 70 MPa 左右。说明不同矿粉对沥青胶浆低温性能的影响存在一定差异,这与矿粉间的物化性质不同有着较大关系。基质沥青胶浆的劲度模量大于高粘沥青胶浆,表明后者的低温抗裂性能好于前者,表现出改性沥青在路用性能上的优越性。

2.3 疲劳性能

目前对于沥青胶浆疲劳性能的研究较少,主要问题是其评价指标疲劳因子  $G^* \sin \delta$  受到了大量质疑,还没有找到大家一致认可的评价方法或评价指标。对沥青胶浆使用较广泛的破坏定义之一是复合模量降低至初始复合模量的 50%,而沥青混合料疲劳破坏常用的定义是劲度降低到初始劲度的 50% 以下。基于上述定义,利用 DSR,在试验温度 25 ℃ 及 10 rad/s 频率下,对经过压力老化仪后的试样施加大小为 10% 应变的交变正弦荷载,对不同沥青胶浆进行时间扫描试验,将沥青胶浆在重复荷载作用下复合模量  $G^*$  衰减至初始复合模量 50% 时的荷载作用时间作为评价指标,对沥青胶浆的疲劳性能进行评价。根据上述沥青胶浆高低温性能试验结果,1<sup>#</sup>、3<sup>#</sup> 和 5<sup>#</sup> 沥青胶浆的性能差异较明显,结合现有试验条件和工作量等因素,只对这 3 种沥青胶浆进行疲劳试验。试验结果见表 6 和图 3。

表 6 不同沥青胶浆 50%  $|G^*|$  时的疲劳寿命  $t$

沥青胶浆 编号	不同沥青胶浆的 $t/s$	
	基质沥青胶浆	高粘沥青胶浆
1 <sup>#</sup>	82.56	514.97
3 <sup>#</sup>	40.21	2 154.30
5 <sup>#</sup>	229.00	4 120.90

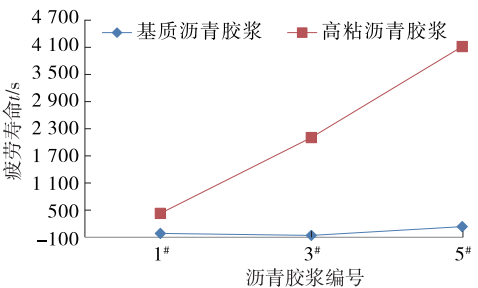


图 3 不同沥青胶浆 50%  $|G^*|$  时的疲劳寿命  $t$

由图 3 可看出:基质沥青胶浆的疲劳寿命大小为 5<sup>#</sup> 胶浆 > 1<sup>#</sup> 胶浆 > 3<sup>#</sup> 胶浆,高粘沥青胶浆的疲劳寿命大小为 5<sup>#</sup> 胶浆 > 3<sup>#</sup> 胶浆 > 1<sup>#</sup> 胶浆,不同矿粉对沥青胶浆疲劳寿命的影响存在差异。另外,高

粘沥青胶浆的疲劳寿命远大于基质沥青胶浆,表明其具有更好的抗疲劳性能。

### 3 矿粉指标与胶浆流变性能关联研究

综上所述,不同矿粉对沥青胶浆的高低温及疲劳性能的影响存在差异。根据文献[9]~[11],矿粉的物化性质对沥青胶浆的流变性能有较大影响。下面基于灰色关联分析法,结合上述矿粉的物化指标检测结果和胶浆的高低温及疲劳性能试验结果,对矿粉的物化指标与胶浆的流变性能进行关联研究,

分析对胶浆流变性能影响较大的矿粉指标。

对原始数据先作均值化处理,再作差值化处理,最后带入公式得出关联系数和关联度。由于灰色关联分析运用很广泛,在此不作介绍,计算公式也不列出。试验数据汇总见表7,矿粉指标与胶浆流变性能的关联度计算结果见表8。

从表8来看,不同矿粉指标对沥青胶浆高低温及疲劳性能的影响存在差别。根据关联度大小,将沥青胶浆的高低温及疲劳性能与矿粉指标的关联度较大的前六项指标进行汇总,结果见表9。

表7 矿粉指标与沥青胶浆高低温及疲劳性能关联分析原始数据

项目	不同矿粉的试验结果				
	1 <sup>#</sup>	2 <sup>#</sup>	3 <sup>#</sup>	4 <sup>#</sup>	5 <sup>#</sup>
$X_0[J_{nr,100}(\text{基质沥青胶浆,高温})]$	0.050 00	0.108 05	0.095 12	0.099 84	0.113 75
$X_0[J_{nr,100}(\text{高粘沥青胶浆,高温})]$	0.001 43	0.001 07	0.002 33	0.001 45	0.000 64
$X_0[J_{nr,100}(\text{基质沥青胶浆,低温})]$	406	436	382	325	385
$X_0[J_{nr,100}(\text{高粘沥青胶浆,低温})]$	362	305	282	71	342
$X_0[J_{nr,100}(\text{基质沥青胶浆,疲劳})]$	82.56	—	40.21	—	229
$X_0[J_{nr,100}(\text{高粘沥青胶浆,疲劳})]$	514.97	—	2 154.30	—	4 120.90
$X_1(\text{密度})/(\text{g} \cdot \text{cm}^{-3})$	2.657	2.673	2.618	2.711	2.717
$X_2(\text{比表面积})/(\text{cm}^2 \cdot \text{cm}^{-3})$	14 144.7	12 911.2	19 732.7	19 897.7	22 579.72
$X_3(\text{平均粒径})/\mu\text{m}$	17.036	15.360	7.282	0.138	7.242
$X_4(P_{20})/\%$	71.182	70.991	95.308	86.592	92.841
$X_5(D_{10})/\mu\text{m}$	1.590	1.697	1.248	1.274	1.117
$X_6(D_{50})/\mu\text{m}$	8.382	10.900	5.518	5.342	4.614
$X_7(D_{90})/\mu\text{m}$	46.278	35.819	14.140	26.794	15.800
$X_8(\text{细度模数})$	3.263	3.463	2.496	2.545	2.431
$X_9(\text{亚甲蓝值})/(\text{g} \cdot \text{kg}^{-1})$	2.25	1.00	2.75	2.50	1.50
$X_{10}(\text{亲水系数})$	0.685	0.671	0.652	0.752	0.692

表8 矿粉指标与沥青胶浆高低温及疲劳性能的关联度

关联度	基质沥青胶浆 高温性能	高粘沥青胶浆 高温性能	基质沥青胶浆 低温性能	高粘沥青胶浆 低温性能	基质沥青胶浆 疲劳性能	高粘沥青胶浆 疲劳性能
$\gamma_1$	0.810	0.726	0.837	0.769	0.579	0.661
$\gamma_2$	0.822	0.707	0.565	0.555	0.674	0.690
$\gamma_3$	0.614	0.607	0.571	0.557	0.508	0.514
$\gamma_4$	0.807	0.737	0.641	0.668	0.623	0.647
$\gamma_5$	0.738	0.667	0.758	0.776	0.525	0.635
$\gamma_6$	0.601	0.613	0.611	0.620	0.503	0.594
$\gamma_7$	0.616	0.623	0.514	0.482	0.523	0.470
$\gamma_8$	0.736	0.654	0.777	0.786	0.535	0.626
$\gamma_9$	0.594	0.735	0.525	0.516	0.510	0.545
$\gamma_{10}$	0.804	0.727	0.802	0.772	0.578	0.667

注: $\gamma_i$ 对应于表7中 $X_i$ 。

表 9 矿粉对沥青胶浆高温及疲劳性能影响较大的指标

沥青胶浆性能	对沥青胶浆性能影响较大的指标	
	基质沥青胶浆	高粘沥青胶浆
高温性能	比表面积;密度; $P_{20}$ ;亲水系数; $D_{10}$ ;细度模数	$P_{20}$ ;亚甲蓝值;亲水系数;密度;比表面积; $D_{10}$
低温性能	密度;亲水系数;细度模数; $D_{10}$ ; $P_{20}$ ; $D_{50}$	细度模数; $D_{10}$ ; 亲水系数;密度; $P_{20}$ ; $D_{50}$
疲劳性能	比表面积; $P_{20}$ ; 密度; 亲水系数; 细度模数; $D_{10}$	比表面积; 亲水系数; 密度; $P_{20}$ ; $D_{10}$ ; 细度模数

由表 9 可看出:对于基质沥青胶浆,密度、亲水系数、 $P_{20}$ 、 $D_{10}$  及细度模数的关联度较大,表明其对基质沥青胶浆高温及疲劳等流变性能的影响较大,可作为评价矿粉的重要参考指标。比表面积对基质沥青胶浆低温性能的关联度相对较小,但其对高温性能及疲劳性能的关联度都是最大的,综合来看,比表面积可作为评价矿粉的参考指标。对于高粘沥青胶浆,密度、亲水系数、 $P_{20}$  及  $D_{10}$  的关联度较大,可作为评价矿粉的重要参考指标。比表面积在低温性能、细度模数在高温性能中的关联度都较小,但对其他流变性能都有较大影响,综合来看,这两个指标可作为参考指标。

基于灰色关联分析,得出密度、亲水系数、 $P_{20}$ 、 $D_{10}$ 、比表面积及细度模数可作为判别矿粉好坏的重要参考指标。

## 4 结论

(1) 不同矿粉对沥青胶浆流变性能的影响存在

较大差异,这与矿粉的物化性质有很大关系。高粘沥青胶浆的高温及疲劳性能都好于基质沥青胶浆,表现出其性能上的优越性。

(2) 矿粉的密度、亲水系数、 $P_{20}$ 、 $D_{10}$ 、比表面积及细度模数与沥青胶浆流变性能的关联度较大,可作为判别矿粉好坏的重要参考指标。

## 参考文献:

- [1] 刘丽.沥青胶浆技术性能及评价方法研究[D].西安:长安大学,2004.
- [2] 张争奇,王永财.沥青胶浆对沥青混合料高温性能的影响[J].长安大学学报:自然科学版,2006,26(2).
- [3] 袁燕.改性沥青胶浆的疲劳性能评价[D].广州:华南理工大学,2005.
- [4] 李智慧.沥青胶浆高温性能的评价研究[D].哈尔滨:哈尔滨工业大学,2005.
- [5] 柳浩,李晓明,张肖宁.水泥与消石灰对沥青胶浆性能影响研究[J].北京工业大学学报,2009,35(11).
- [6] 张争奇,张卫平,李平.沥青混合料粉胶比[J].长安大学学报:自然科学版,2004,24(5).
- [7] 冯中良,王瑞强,曹荣吉,等.重复蠕变试验评价沥青高温性能的研究[J].中外公路,2007,27(1).
- [8] Anderson D A, Kennedy T W. Development of SHRP binder specification[J]. Journal of AAPT, 1993(15).
- [9] 邵显智,谭忆秋,孙立军.几种矿粉指标与沥青胶浆的关联分析[J].公路交通科技,2005,22(2).
- [10] 李涛,扈惠敏.矿粉对沥青胶浆性能的影响[J].合肥工业大学学报:自然科学版,2013,36(8).
- [11] 樊亮,魏建明,张玉贞,等.矿粉对沥青胶浆的性质影响及作用机理[J].建筑材料学报,2014,17(6).

收稿日期:2016-06-20

\*\*\*\*\*

(上接第 51 页)

来越复杂,车流量随着季节等因素变化较大,通行卡的调配变得越来越复杂。该文主要研究了高速公路通行卡调配问题的数学模型,利用表上作业法求出了高速公路通行卡调配问题的解,得出了通行卡调配最佳方案。

## 参考文献:

- [1] 段进红.浅谈江西省高速公路通行卡管理问题分析[J].科技创新导报,2015(30).
- [2] 范宏达.高速公路通行卡管理系统的研究与分析[D].昆明:云南大学,2015.

- [3] 王润芳,时庆涛.车辆拥堵状态下的最优路径规划建模研究[J].计算机仿真,2016,33(2).
- [4] 刘伟铭,李荣荣,王超,等.高速公路通行卡调拨问题的遗传算法[J].广西师范大学学报:自然科学版,2016,34(1).
- [5] 党建武.神经网络在铁路空车调度问题中的应用[J].兰州铁道学院学报,1999,18(1).
- [6] 张伯生.运筹学[M].北京:科学出版社,2008.
- [7] 薛毅,耿美英.运筹学与实验[M].北京:电子工业出版社,2008.

收稿日期:2016-09-20