

基于乳化沥青残留物胶浆路用性能的填料性质评价

朱辉¹, 曲恒辉¹, 樊亮², 朱树青³, 张圣涛⁴

(1. 齐鲁交通材料技术开发有限公司, 山东 济南 250014; 2. 山东省交通科学研究院, 山东 济南 250100;
3. 济南城建集团有限公司设计研究院, 山东 济南 250101; 4. 山东交通学院, 山东 济南 250300)

摘要: 为研究矿物填料各项理化指标对乳化沥青残留物胶浆路用性能的影响及与流变指标的关联度, 对粉胶比为 1.0 条件下 6 种乳化沥青残留物胶浆利用动态剪切流变仪、弯曲梁流变仪及压力老化仪, 通过多应力重复蠕变试验、弯曲梁流变试验及疲劳加载评价其高、低温性能和疲劳性能, 并对表征路用性能的流变指标与矿粉理化指标进行灰色关联分析。结果表明, 不同类型残留物胶浆的平均变形恢复率均表现出较高的应力敏感性, 不可恢复蠕变柔量的应力敏感性在不同类型残留物胶浆之间差别较大; 矿粉密度、亲水系数及表征较小粒径的指标 (P_{20} 、 D_{10}) 与残留物胶浆路用性能有着较高的关联度, 建议以上述指标作为乳化沥青混合料所用矿粉的质量控制指标。

关键词: 公路; 乳化沥青残留物胶浆; 填料; 理化指标; 流变指标; 灰色关联分析

中图分类号: U416.8

文献标志码: A

文章编号: 1671-2668(2019)06-0073-05

由于乳化沥青在常温和低温下的粘度较低, 由其作为胶结料与集料形成的乳化沥青混合料具有良好的施工和易性, 因而广泛应用于沥青路面表面处治、旧路面再生、透层及封层等沥青路面养护和新建工程。乳化沥青混合料中沥青要发挥其粘结性能, 需经过集料与乳液的粘附、乳化沥青破乳及混合料养护等过程, 形成密实的混合料结构使其具有满足工程需要的强度。乳化沥青混合料在行车荷载和环境温度双重作用下, 水分不断蒸发、乳化沥青不断破乳并逐渐恢复沥青原有的粘结性质。近代相关研究从胶浆理论出发, 认为沥青混合料是一种以沥青胶浆为初级分散系的多级空间网状结构的分散系, 沥青只有在矿物填料表面与其产生交互作用并和填料一起组成胶浆后, 才能对粗、细集料发挥粘结作用。目前更多的研究主要针对矿物填料与基质沥青胶浆的路用性能之间的作用机理分析, 而对填料与乳化沥青残留物胶浆路用性能之间的作用机理研究较少。该文对乳化沥青残留物胶浆在不同应力及温度条件下进行流变力学试验, 通过不同类型胶浆高、低温及疲劳性能的流变力学指标与填料的理化指标进行灰色关联分析, 基于乳化沥青胶浆的路用性能对矿物填料的性质进行评价。

1 试验方案

试验所用乳化沥青(见表 1)及 6 种石灰岩矿粉(编号为 1[#]~6[#])的性能指标都符合技术规范要

求。依照《公路工程沥青及沥青混合料试验规程》中乳化沥青残留物的获取方式获取乳化沥青残留物, 并根据《公路工程集料试验规程》对 6 种矿粉进行密度、亲水系数、亚甲蓝等常规理化指标试验, 使用 Winner 2008 型激光粒度分析仪分析其粒度组成。

表 1 乳化沥青的性能指标

试验项目	试验结果	技术要求
破乳速度	慢裂	慢裂或中裂
粒子电荷	阳离子	阳离子
筛上残留物(1.18 mm 筛)/%	0.02	≤0.1
粘度/s	21	10~25
蒸发残留物含量/%	63	≥50
针入度(100 g, 25 °C, 5 s)/(0.1 mm)	95	50~200
延度(15 °C)/cm	>100	≥40
溶解度(三氯乙烯)/%	99.0	≥97.5
常温贮存	5 d	≤5
稳定性/%	1 d	≤1
与粗集料的粘附性, 裹附面积	>2/3	≥2/3

参照普通道路石油沥青胶浆的制备方式分别制备粉胶比为 1.0 的 6 种乳化沥青残留物胶浆, 通过动态剪切流变试验(DSR)及弯曲梁流变实验(BBR)对胶浆的高、低温及疲劳性能进行科学合理的表征, 结合不同类型乳化沥青残留物胶浆的性能对矿物填料理化指标对乳化沥青路用性能的影响作出评价。

2 试验结果与分析

2.1 矿物填料理化指标

对6种矿粉进行常规理化指标检测,对矿粉的性状作出初步表征与评价(见表2)。

表2 6种石灰岩矿粉的理化指标

矿物填料编号	密度/ ($\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$)	亲水 系数	亚甲蓝值/ ($\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$)
1#	2.673	0.671	1.00
2#	2.657	0.685	2.25
3#	2.618	0.652	2.75
4#	2.711	0.752	2.50
5#	2.683	0.690	0.75
6#	2.717	0.692	1.50

由表2可知:6种石灰岩矿粉的密度满足《公路沥青路面施工技术规范》对高速公路、一级公路用矿质填料表观密度不小于 2.5 g/cm^3 、亲水系数小于1、外观无团粒结块等要求。6种填料的亲水系数均小于1,表明其对沥青有大于水的亲和力,其大小为 $4\# > 6\# > 5\# > 2\# > 1\# > 3\#$ 。根据亚甲蓝值对6种填料进行排序,结果为 $3\# > 4\# > 2\# > 6\# > 1\# > 5\#$ 。由于亚甲蓝值主要受填料矿物组成的影响,且膨胀性黏土矿物具有极大的比表面积,容易吸附亚

甲蓝染料,而非黏土矿物质颗粒的比表面积相对较小,并不吸收任何可见数量的染料,6种填料中2#、3#、4#的亚甲蓝值与1#、5#、6#指标差异显著,说明前3种矿粉中膨胀性黏土含量较大,亚甲蓝值指标可用来区分不同类型矿粉并作为膨胀性黏土矿物质含量的量度。

2.2 矿物填料粒度组成分析

通过Winner 2008型激光粒度分析仪对6种矿物填料进行粒度组成分析,结果见图1。虽然粒度曲线可较直观地展示填料的颗粒分布状态,但无法进行定量分析。因此,采用6种填料的细度模数、比表面积(S/V)、平均粒径、 P_{20} 、 D_{10} 、 D_{50} 及 D_{90} 对其粒度组成进行细致的表征,对不同类型矿粉的粒度分布作出定量评价(见表3)。

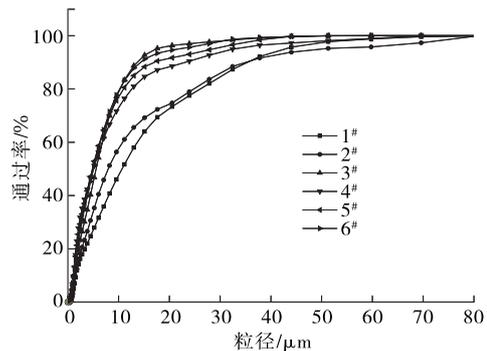


图1 矿粉的粒度曲线

表3 6种矿粉的粒度指标

矿物填料编号	细度模数	$S/V/[\times 10^3 (\text{cm}^2 \cdot \text{cm}^{-3})]$	平均粒径/ μm	$P_{20}/\%$	$D_{10}/\mu\text{m}$	$D_{50}/\mu\text{m}$	$D_{90}/\mu\text{m}$
1#	3.516	13.497	15.058	73.344	1.588	10.705	35.144
2#	3.310	14.407	14.547	74.720	1.589	8.020	37.940
3#	2.504	19.146	7.052	96.333	1.348	5.576	13.669
4#	2.568	21.404	8.982	88.552	1.196	5.020	23.166
5#	2.450	21.774	7.622	91.723	1.136	4.839	17.335
6#	2.414	21.603	6.989	94.606	1.173	5.061	14.458

由图1、表3可知:6种矿物填料在 0.075 mm 孔径处的通过率均接近100%,满足技术规范对填料粒度范围及狭义上对胶浆填料粒度范围($< 0.075 \text{ mm}$)的要求。分别按照平均粒径、 P_{20} 、细度模数和 S/V 对6种矿粉粗细程度进行排序,结果为 $3\# < 6\# < 5\# < 4\# < 2\# < 1\#$ 、 $6\# < 3\# < 5\# < 4\# < 2\# < 1\#$ 、 $6\# < 5\# < 3\# < 4\# < 2\# < 1\#$ 、 $5\# < 6\# < 4\# < 3\# < 2\# < 1\#$ 。在粒度组成评价方面,相比其他类型矿粉,3#和5#矿粉以细度模数和比表面积评价的一致性较差。综合矿粉粒度曲线及粒度分析指

标,填料在 $20 \mu\text{m}$ 孔径处的通过率 P_{20} 可表征填料整体的粒度分布概况, P_{20} 与平均粒径在评价填料粒度组成方面具有较高的一致性,且国内外相关研究也在讨论 P_{20} 指标的重要性;细度模数与比表面积指标在评价填料粒度组成方面具有一定的相关性,而 D_{10} 、 D_{50} 、 D_{90} 在评价填料粒度组成方面没有表现出一定的规律性,可用来粗略表征填料的粒度组成。

2.3 乳化沥青残留物胶浆路用性能分析

2.3.1 高温性能

为合理模拟路面在服役过程中的受力状态,对

6种乳化沥青残留物胶浆在60℃条件下进行多应力重复蠕变试验,分别在100和3200Pa2种应力条件下进行10个周期的加、卸载循环,以2种应力条件下的不可恢复蠕变柔量及平均变形恢复率对乳化沥青残留物胶浆的高温性能进行评价,结果见图2、图3。

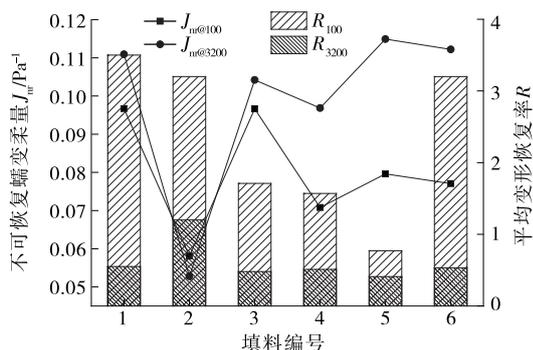


图2 不同类型乳化沥青残留物胶浆的流变指标

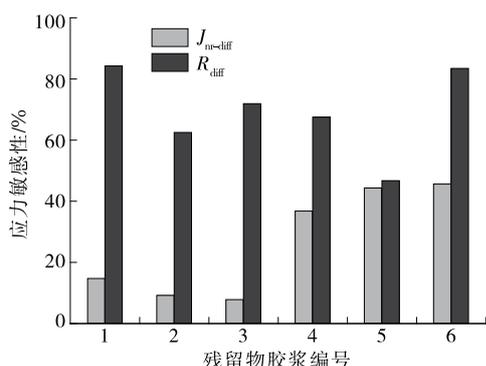


图3 不同类型乳化沥青残留物胶浆流变指标的应力敏感性

由图2、图3可知:6种乳化沥青残留物胶浆在2种应力条件下的不可恢复蠕变柔量表现出一定的规律,且4#、5#、6#残留物胶浆相比1#、2#、3#有着较大的应力敏感性,说明4#、5#、6#残留物胶浆在高温及重载条件下粘性成分比例增大,不可恢复变形所占比例较大。2种应力条件下的平均变形恢复率均有着较大的应力敏感性,在3200Pa应力作用下平均变形恢复率均较小,说明路面更易发生车辙病害。但相比基质沥青胶浆,乳化沥青残留物胶浆的 J_{nr} 指标和 R 指标没有表现出良好的相关性,这可能与乳化沥青残留物胶浆是三相体系有关,并且由于沥青与矿物填料的表面物理化学作用使残留物胶浆的微观或亚微观结构组成更复杂。

2.3.2 低温性能

对6种乳化沥青残留物胶浆在-12℃条件下进行弯曲梁流变试验,根据弯曲蠕变曲线(见图4)

积分面积(见表4),结合蠕变劲度模量 S 和蠕变速率 m 对材料的低温性能进行评价。

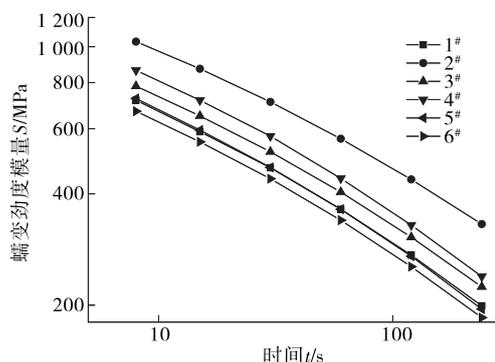


图4 不同类型乳化沥青残留物胶浆的弯曲蠕变曲线

表4 不同类型乳化沥青残留物胶浆的蠕变曲线积分面积

残留物胶浆编号	积分面积/ ($\times 10^4$)	残留物胶浆编号	积分面积/ ($\times 10^4$)
1#	7.24	4#	8.75
2#	11.36	5#	7.21
3#	8.06	6#	6.75

由图4、表4可知:依据弯曲蠕变曲线积分面积 $S_{积}$ 对6种乳化沥青残留物胶浆进行排序,结果为 $2\# > 4\# > 3\# > 1\# > 5\# > 6\#$ 。 $S_{积}$ 越大,说明其在荷载时间范围内的低温劲度模量越大,柔性较差,在低温条件下乳化沥青残留物胶浆释放内部因为温度下降造成应力的能力减弱,抵抗开裂的能力减弱。

2.3.3 疲劳性能

沥青胶浆的开裂或损伤是引起沥青混合料疲劳破坏的主要原因。采用动态剪切流变仪,对经过压力老化试验后的乳化沥青残留物 and 不同粉胶比条件下的胶浆在25℃、10rad/s频率下施加10%应变的交变正弦荷载进行时间扫描试验,采用复数模量降至50%初始模量所需加载循环次数对胶浆的疲劳性能进行评价,结果见表5。

表5 不同类型乳化沥青残留物胶浆的疲劳性能指标

残留物胶浆编号	降至50% G* 的 加载次数/次	残留物胶浆编号	降至50% G* 的 加载次数/次
1#	607	4#	639
2#	611	5#	620
3#	682	6#	661

由表5可知:依据复数模量降至50%初始模量所需加载循环次数对6种残留物胶浆进行排序,结果为 $3\# > 6\# > 4\# > 5\# > 2\# > 1\#$ 。所需加载循环

次数越多,材料疲劳破坏点出现的时间越迟,耐疲劳性能越好。

3 灰色关联分析

灰色关联分析法是一种多因素统计分析方法,目的是寻求系统各因素之间的重要关系。灰色关联度是灰色关联分析的基础,其基本思想是根据行为序列曲线几何形状的相似性确定序列之间联系的紧密性。以乳化沥青残留物胶浆的高、低温及疲劳性能指标作为参考数列 X_0 ,矿物填料的理化指标作为比较数列,对矿物填料各理化指标与乳化沥青残留

物胶浆路用性能的关联程度进行排序。矿物填料的细度模数、 S/V 、平均粒径、 P_{20} 、 D_{10} 、 D_{50} 、 D_{90} 、密度、亲水系数、亚甲基蓝值分别以 X_1 、 X_2 、 X_3 、 X_4 、 X_5 、 X_6 、 X_7 、 X_8 、 X_9 、 X_{10} 表示。

3.1 矿粉理化指标与残留物胶浆高温性能的关联性分析

以残留物胶浆的不可恢复蠕变柔量 $J_{nr@3200}$ 作为参考数列对其高温性能进行表征,6种矿物填料的理化指标作为比较数列进行高温性能关联性分析。表6为原始数据,对原始数据各数列进行均值化处理,所得新数列见表7。

表6 灰色关联分析原始数据(高温性能)

残留物胶浆编号	X_0/Pa^{-1}	X_1	$X_2/(cm^2 \cdot cm^{-3})$	$X_3/\mu m$	$X_4/\%$	$X_5/\mu m$	$X_6/\mu m$	$X_7/\mu m$	$X_8/(g \cdot cm^{-3})$	X_9	$X_{10}/(mg \cdot g^{-1})$
1#	0.110 84	3.516	13.497	15.058	73.344	1.588	10.705	35.144	2.673	0.671	1.00
2#	0.052 76	3.310	14.407	14.547	74.720	1.589	8.020	37.940	2.657	0.685	2.25
3#	0.104 13	2.504	19.146	7.052	96.333	1.348	5.576	13.669	2.618	0.652	2.75
4#	0.096 77	2.568	21.404	8.982	88.552	1.196	5.020	23.166	2.711	0.752	2.50
5#	0.114 81	2.450	21.774	7.622	91.723	1.136	4.839	17.335	2.683	0.690	0.75
6#	0.112 12	2.414	21.603	6.989	94.606	1.173	5.061	14.458	2.717	0.692	1.50

表7 关联分析生成数列(高温性能)

残留物胶浆类型	X_0	X_1	X_2	X_3	X_4	X_5	X_6	X_7	X_8	X_9	X_{10}
1#	1.124 5	1.258 6	0.724 1	1.499 6	0.847 5	1.186 6	1.637 6	1.488 0	0.998 7	0.972 0	0.558 1
2#	0.535 2	1.184 8	0.773 0	1.448 7	0.863 4	1.187 3	1.226 9	1.606 4	0.992 7	0.992 3	1.255 8
3#	1.056 4	0.896 3	1.027 2	0.702 3	1.113 1	1.007 2	0.853 0	0.578 7	0.978 1	0.944 5	1.534 9
4#	0.981 7	0.919 2	1.148 4	0.894 5	1.023 2	0.893 6	0.768 0	0.980 8	1.012 9	1.089 3	1.395 3
5#	1.164 7	0.877 0	1.168 2	0.759 0	1.059 8	0.848 8	0.740 3	0.734 0	1.002 4	0.999 5	0.418 6
6#	1.137 4	0.864 1	1.159 1	0.696 0	1.093 1	0.876 5	0.774 2	0.612 1	1.015 1	1.002 4	0.837 2

计算矿粉各项指标与乳化沥青残留物胶浆高温性能的关联度,得: $\beta_1 = 0.706$, $\beta_2 = 0.823$, $\beta_3 = 0.590$, $\beta_4 = 0.813$, $\beta_5 = 0.738$, $\beta_6 = 0.591$, $\beta_7 = 0.587$, $\beta_8 = 0.793$, $\beta_9 = 0.758$, $\beta_{10} = 0.511$ 。矿粉的各项理化指标与残留物胶浆高温性能的关联度由高到低依次为 $\beta_2 > \beta_4 > \beta_8 > \beta_9 > \beta_5 > \beta_1 > \beta_6 > \beta_3 > \beta_7 > \beta_{10}$, 其中矿粉的比表面积、 P_{20} 、密度、亲水系数和 D_{10} 表现出与残留物胶浆高温性能较高的关联度,而平均粒径、 D_{50} 、 D_{90} 及亚甲基蓝值与胶浆高温性能的关联度较小。这与密度和亲水系数试验操作简单且重复性好,而亚甲基蓝试验操作较复杂且受人为因素影响较大有关。因此,在选择矿物填料时,应对矿粉密度、亲水系数及粒度组成中表征较小粒径的指标(P_{20} 、 D_{10})进行重点测试分析。

3.2 矿粉理化指标与残留物胶浆低温性能的关联性分析

以残留物胶浆的蠕变曲线积分面积 $S_{\text{累}}$ 作为参考数列对其低温性能进行表征,6种矿物填料的各理化指标作为比较数列进行关联性分析。原始数据见表8。

对原始数据各数列进行均值化处理,并计算矿粉各项指标与乳化沥青残留物胶浆低温性能的关联度,得: $\beta_1 = 0.768$, $\beta_2 = 0.650$, $\beta_3 = 0.671$, $\beta_4 = 0.709$, $\beta_5 = 0.776$, $\beta_6 = 0.666$, $\beta_7 = 0.617$, $\beta_8 = 0.759$, $\beta_9 = 0.765$, $\beta_{10} = 0.609$ 。矿粉各理化指标与残留物胶浆低温性能的关联度由高到低依次为 $\beta_5 > \beta_1 > \beta_9 > \beta_8 > \beta_4 > \beta_3 > \beta_6 > \beta_2 > \beta_7 > \beta_{10}$ 。相比平均粒径、 D_{50} 、 D_{90} 、 S/V 和亚甲基蓝值,矿粉的亲水系数、密度、 P_{20} 、

表8 灰色关联分析原始数据(低温性能)

残留物胶浆编号	$X_0/$ ($\times 10^4$)	X_1	$X_2/$ ($\text{cm}^2 \cdot \text{cm}^{-3}$)	$X_3/$ μm	$X_4/$ %	$X_5/$ μm	$X_6/$ μm	$X_7/$ μm	$X_8/$ ($\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$)	X_9	$X_{10}/$ ($\text{mg} \cdot \text{g}^{-1}$)
1#	7.24	3.516	13.497	15.058	73.344	1.588	10.705	35.144	2.673	0.671	1.00
2#	11.36	3.310	14.407	14.547	74.720	1.589	8.020	37.940	2.657	0.685	2.25
3#	8.06	2.504	19.146	7.052	96.333	1.348	5.576	13.669	2.618	0.652	2.75
4#	8.75	2.568	21.404	8.982	88.552	1.196	5.020	23.166	2.711	0.752	2.50
5#	7.21	2.450	21.774	7.622	91.723	1.136	4.839	17.335	2.683	0.690	0.75
6#	6.75	2.414	21.603	6.989	94.606	1.173	5.061	14.458	2.717	0.692	1.50

D_{10} 和细度模数与残留物胶浆的低温性能具有较高的关联度。基于残留胶浆的低温性能,建议在选择矿粉时对亲水系数、密度、细度模数和表征较小粒径的指标(P_{20} 、 D_{10})进行重点分析。

3.3 矿粉理化指标与残留物胶浆疲劳性能的关联性分析

以残留物胶浆模量降至50%初始模量所需循

环加载次数作为参考数列 X_0 对其疲劳性能进行表征,6种矿物填料的各理化指标作为比较数列进行关联性分析。原始数据见表9。

对原始数据各数列进行均值化处理,并计算矿粉各项指标与乳化沥青残留物胶浆疲劳性能的关联度,得: $\beta_1=0.691, \beta_2=0.721, \beta_3=0.539, \beta_4=0.863, \beta_5=0.720, \beta_6=0.557, \beta_7=0.533, \beta_8=0.927, \beta_9=$

表9 灰色关联分析原始数据(疲劳性能)

残留物胶浆编号	$X_0/$ 次	X_1	$X_2/$ ($\text{cm}^2 \cdot \text{cm}^{-3}$)	$X_3/$ μm	$X_4/$ %	$X_5/$ μm	$X_6/$ μm	$X_7/$ μm	$X_8/$ ($\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$)	X_9	$X_{10}/$ ($\text{mg} \cdot \text{g}^{-1}$)
1#	607	3.516	13.497	15.058	73.344	1.588	10.705	35.144	2.673	0.671	1.00
2#	611	3.310	14.407	14.547	74.720	1.589	8.020	37.940	2.657	0.685	2.25
3#	682	2.504	19.146	7.052	96.333	1.348	5.576	13.669	2.618	0.652	2.75
4#	639	2.568	21.404	8.982	88.552	1.196	5.020	23.166	2.711	0.752	2.50
5#	620	2.450	21.774	7.622	91.723	1.136	4.839	17.335	2.683	0.690	0.75
6#	661	2.414	21.603	6.989	94.606	1.173	5.061	14.458	2.717	0.692	1.50

0.895, $\beta_{10}=0.497$ 。矿粉各理化指标与残留物胶浆疲劳性能的关联度由高到低依次为 $\beta_8 > \beta_9 > \beta_4 > \beta_2 > \beta_5 > \beta_1 > \beta_6 > \beta_3 > \beta_7 > \beta_{10}$ 。相比平均粒径、 D_{50} 、 D_{90} 、亚甲蓝值,矿粉的密度、亲水系数、 P_{20} 、 D_{10} 和 S/V 与乳化沥青残留物胶浆疲劳性能有着较高的关联度。基于残留物胶浆的疲劳性能,应注重对矿粉密度、亲水系数、 P_{20} 、 D_{10} 和 S/V 的分析研究。

4 结论

(1) 填料在20 μm 孔径的通过率 P_{20} 可表征填料整体的粒度分布概况, P_{20} 与平均粒径在评价填料粒度组成方面具有较高的一致性;细度模数与比表面积在评价填料粒度组成方面有一定的相关性。

(2) 不同类型残留物胶浆的平均变形恢复率均表现出较高的应力敏感性,而不可恢复蠕变柔量的应力敏感性在不同类型残留物胶浆之间差别较大。

(3) 综合矿物填料各理化指标与残留物胶浆

高、低温和疲劳性能之间的关联性,矿粉密度、亲水系数及表征较小粒径的指标(P_{20} 、 D_{10})与残留物胶浆的路用性能有着较高的关联度,在工程实践中对于乳化沥青混合料中矿粉的选取应注重上述指标的测试分析。

参考文献:

- [1] 施来顺,曹晓新,郭之宁,等.影响阳离子乳化沥青破乳时间因素的探讨[J].山东大学学报:工学版,2003,33(1).
- [2] 陈晖.乳化沥青与泡沫沥青冷再生技术的比较[J].建筑机械:上半月,2011(10).
- [3] 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.
- [4] Harris B M, Stuart K D. Analysis of mineral fillers and mastics used in stone matrix asphalt[J]. Proceedings-Association of Asphalt Paving Technologists, 1995, 64.

(下转第80页)

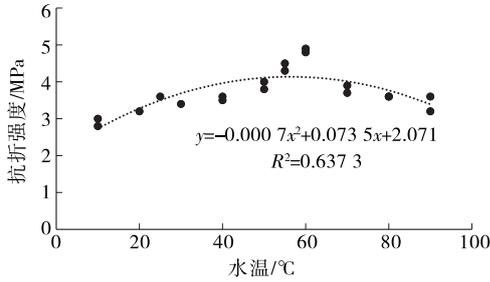


图3 拌和水温对砼7d抗折强度的影响

由于所使用的水泥类型存在较高的水化温度，可忽略较低的水温范围。从图2、图3可以看出：拌和水温度为45~50℃时，砼的力学强度最高，最佳水温为(50±5)℃；将水温增加到55℃以上，砼的7d抗压、抗折强度均呈现不增反降的现象，表明过高的水温在寒冷天气下对砼的性能增强并不会有很好的效果。

3.4 砼干缩性

砼在成型硬化时，由于水化、温度及干湿变化等会造成体积缩小，对砼的性能产生不利影响。试验采用高早强水泥，其虽具有较高的早期强度，但后期收缩更严重；且由于提高了水温，砼在成型硬化过程中的温度变化将更明显，影响也更深。依照JTG E30—2005《公路工程水泥及水泥混凝土试验规程》，采用砼干缩测试应变仪测量不同温度下砼不同龄期的干缩值，结果见表5。

表5 水泥砼的干缩值

温度/℃	不同龄期(d)时水泥砼的干缩值/(×10 ⁻⁶ m)					
	1	3	7	14	21	28
25	10	94	152	221	285	324
40	13	98	169	234	290	351
55	21	105	172	254	303	359
70	23	128	211	299	376	411
85	35	149	248	336	400	444

由表5可知：随着水温的升高，水泥砼的干缩值增大，抗干缩性能减弱。水温从25℃升至55℃时，其干缩值变化程度不大，呈现缓慢上升的趋势；而水

温从55℃升至70℃时，其干缩值急剧增大。从砼干缩性方面考虑，拌和水温应不超过55℃。

4 结论

(1) 对于高早强水泥，在相同配合比设计和试验条件下，随着拌和用水温度的升高，砼坍落度增大，会出现较高的泌水和离析；拌和水温度为(50±5)℃时，砼泌水现象最小。

(2) 高早强砼的拌和用水温度为(50±5)℃时，砼的抗压、抗折强度最高。

(3) 拌和水温不超过55℃时，砼的干缩现象处于可控范围。

参考文献：

[1] Grochoski C. Cold weather concreting with hydronic heaters[J]. Concrete International, 2000(22).

[2] 田伟, 孙赞. 机场水泥混凝土道面低温施工质量控制及试验研究[J]. 江西建材, 2018(13).

[3] 杨春华. 寒冷施工环境下混凝土质量保证措施[J]. 中国住宅设施, 2018(2).

[4] 李俊林. 不同低温温度区间混凝土冻融循环作用性能试验研究[D]. 北京: 清华大学, 2017.

[5] S H Kosmatka, B Kerkhoff, W C Panarese. Design and control of concrete mixtures(14th edition) [R]. Portland Cement Association (PCA), 2008.

[6] 王调平. 铁路桥梁混凝土冬季低温施工技术[J]. 建材与装饰, 2018(7).

[7] 谢剑, 崔宁, 姜晓峰. 混凝土超低温冻融循环损伤机理及控制措施[J]. 硅酸盐通报, 2018, 37(8).

[8] 余海游. 水温荷耦合作用下沥青混凝土水损机制研究[D]. 重庆: 重庆交通大学, 2014.

[9] 朱冬然. 大体积混凝土施工期温度控制研究[J]. 南方农机, 2019, 50(4).

[10] Burg R G. The influence of casting and curing temperature on the properties of fresh and hardened concrete [R]. Compressive Strength, 1996.

收稿日期: 2019-05-07

(上接第77页)

[5] 郝培文, 刘中林. 集料吸入沥青数量评价方法的研究[J]. 石油沥青, 2001, 15(2).

[6] Kandhal P S. Evaluation of baghouse fines in bituminous paving mixtures [A]. Association of Asphalt Paving Technologists Proceedings[C]. 1981.

[7] 穆瑞, 张家泰. 基于灰色关联分析的层次综合评价[J]. 系统工程理论与实践, 2008, 28(10).

[8] 张驰, 胡永林, 范人杰, 等. 级配乳化沥青冷再生混合料高温稳定性的影响[J]. 公路与汽运, 2018(4).

收稿日期: 2018-01-05