

## 云母粉改性沥青及沥青混合料的路用性能

冯超, 包惠明, 包欢, 湛玮, 闫实

(桂林理工大学 土木与建筑工程学院, 广西 桂林 541004)

**摘要:** 这是一篇陶瓷及复合材料领域的论文。为了探究云母粉改性沥青及沥青混合料的路用性能, 制备掺量为0%、3%、5%、7%、9%、11%的改性沥青。通过旋转黏度实验、针入度实验和傅里叶红外光谱实验对云母粉改性沥青性能进行分析; 制备AC-20云母粉改性沥青混合料, 探究其路用性能, 并运用灰色关联分析, 确定了云母粉掺量对沥青混合料路用性能的影响规律。实验结果表明, 加入云母粉可以降低沥青的温度敏感性, 云母粉加入到沥青中仅发生物理共混现象。随着云母粉掺量的不断增加, 云母粉对沥青路用性能的改善作用先增加后降低; 当云母粉掺量为7%时, 云母粉改性沥青混合料的路用性能达到较佳。灰色关联分析表明, 云母粉掺量对各项路用性能指标的影响程度大小依次为高温稳定性>水稳定性>低温抗裂性。

**关键词:** 陶瓷及复合材料; 道路工程; 路用性能; 云母粉改性沥青; 黏温性; 灰色关联

doi:10.3969/j.issn.1000-6532.2024.06.010

中图分类号: TD989; TU414 文献标志码: A 文章编号: 1000-6532(2024)06-0059-08

**引用格式:** 冯超, 包惠明, 包欢, 等. 云母粉改性沥青及沥青混合料的路用性能[J]. 矿产综合利用, 2024, 45(6): 59-66.

FENG Chao, BAO Huiming, BAO Huan, et al. Road performance of mica powder modified asphalt mixture[J]. Multipurpose Utilization of Mineral Resources, 2024, 45(6): 59-66.

沥青路面是我国高速公路和一级公路的主要路面形式<sup>[1]</sup>, 在重载交通和特殊气候耦合作用下易出现车辙、坑槽、水损害等现象<sup>[2-3]</sup>。为增强沥青路面的路用性能, 延长使用寿命, 最常用的手段就是添加改性剂。有机高分子聚合物SBS改性沥青材料<sup>[4]</sup>, 虽然能改善沥青混合料的性能, 但由于国内有机高分子聚合物的技术还不成熟, 限制我国改性沥青的应用和发展; 国内常用的无机矿物质改性剂主要以硅藻土、高岭土、硫磺、赤泥等为主<sup>[5-9]</sup>, 以提高沥青混合料某些方面的性能。云母粉是由硅氧四面体和铝氧八面体结构组成的层状硅酸盐矿物, 具有良好的弹性、绝缘性、耐高温、耐酸碱、耐腐蚀和比表面积大等理化性质, 被广泛地应用于电器、电焊条、橡胶、塑料、油漆、涂料、陶瓷、新型建材等领域<sup>[10-11]</sup>。云母粉的化学组成、结构、构造与高岭土相近, 在有机溶

剂中分散悬浮性好, 不易形成沉淀, 有粘性, 具有云母类矿物和粘土类矿物的多种特点, 根据这些性质可以将其加入到沥青中, 探究云母粉对沥青性能的影响。本着节约资源、提高资源利用率的思想, 为了减少云母粉产品的相对集中, 开拓新的领域十分有意义。因此, 本文通过在基质沥青中加入不同掺量的云母粉, 研究云母粉改性沥青的性能及沥青混合料的高温稳定性、水稳定性和低温抗裂性, 并利用灰色关联理论分析云母粉掺量对路用性能的影响。

### 1 实验材料

#### 1.1 沥青

实验沥青采用“东海牌”70#A级道路石油沥青。参照《公路沥青路面施工技术规范》(JTG F40—2017)测得其基本性能指标见表1。

收稿日期: 2022-11-20

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51768016)

作者简介: 冯超(1996-), 男, 硕士研究生, 研究方向为道路工程材料。

通信作者: 包惠明(1963-), 男, 教授, 博士, 主要从事边坡工程、道路工程的研究。

表 1 沥青性能指标

Table 1 Performance indicators of asphalt

测试项目	质量指标	检测结果	实验方法
针入度 (25 ℃) /0.1 mm	60~80	65.6	T 0604-2011
针入度指数PI	-1.5+1.0	-1.08	T 0604-2011
软化点/℃	≥46	48.4	T 0606-2011
60 ℃动力黏度/(Pa·s)	≥180	208	T 0620-2011
延度 (15 ℃) /cm	≥100	>100	T 0605-2011
闪点/℃	≥260	>300	T 0611-2011
溶解度/%	≥99.5	99.76	T 0607-2011
密度 (15 ℃) /(g/cm <sup>3</sup> )	实测	1.033	T 0603-2011

## 1.2 云母粉

实验采用河南某公司生产的云母粉，规格0.015 mm，其所含矿物成分见表2。

表 2 云母粉的主要矿物成分/%

Table 2 Main mineral composition of mica powder

SiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	K <sub>2</sub> O	CaO	MgO	其他
48.00	35.00	6.40	4.50	0.12	0.15	5.83

## 1.3 集料

实验采用广西某采石场的石灰岩作为矿质集料，石灰岩表面多为灰色，无灰尘附着，棱角性、压碎值较高，纹理较好，片状较低，质地坚硬。根据 JTGF40—2017《公路沥青路面施工技术规范》与 JTGE42—2005《公路工程集料实验规程》的要求采用振筛机对集料进行筛分实验，并对不同档次集料进行测试实验，其结果均满足规范要求。

## 1.4 改性沥青的制备

第一步，烘箱温度设定 140 ℃，将云母粉烘干脱水后密封保存；将称好重量后的 6 组沥青放

置 140 ℃ 烘箱中加热至完全软化，加入设定质量分数的云母粉。为使云母粉充分分散均匀，使用高速剪切机设定 8 000 r/min 的转速搅拌 40 min，由此制备了 6 组不同掺量的云母粉改性沥青试样。

## 2 云母粉改性沥青黏温特性及改性机理

### 2.1 黏温指数

在 60、90、110、135、160 ℃ 温度下云母粉改性沥青的黏度进行黏温曲线回归分析，采用 SAAL 推荐的经验公式回归黏温关系，公式为：

$$y = n - mx \quad (1)$$

$$m = VTS = \frac{\lg \lg (\eta_1 \times 10^3) - \lg \lg (\eta_2 \times 10^3)}{\lg (T_{K1} + 273.13) - \lg (T_{K2} + 273.13)} \quad (2)$$

其中， $y = \lg \lg (\eta \times 10^3)$ ， $x = \lg (T_k + 273.13)$ ；T：摄氏温度，℃。

由表3可知，沥青黏度与温度具有极大的相关性，均在 0.98 以上，且随着云母粉掺量的增加，黏温指数 VTS 的绝对值在不断减小，表明沥青的温度敏感性随着云母粉掺量的增加而降低。掺量为 11% 时沥青的温度敏感性最小，这表明沥青温度敏感性改善很大程度是由于是沥青组分的改变引起。云母粉与沥青混合后形成一种多相分散体系，随着云母粉掺量的增加，云母粉颗粒比表面积不断增大，云母粉吸附沥青中的油分增多，导致沥青中原有的成分占比发生变化，在沥青中建立新的胶体平衡体系，在同一温度下沥青的黏聚力增加，故掺量为 11% 时的云母粉改性沥青感温性较基质沥青有明显改善。

表 3 云母粉改性沥青黏温回归方程

Table 3 Viscosity temperature regression equation of mica powder modified asphalt

云母粉掺量/%	黏度/(Pa·s)					回归关系	相关系数 R <sup>2</sup>
	60 ℃	90 ℃	110 ℃	135 ℃	160 ℃		
0	132	9.50	1.88	0.48	0.18	$y=8.6581-3.1504x$	0.9982
3	139	9.84	2.10	0.52	0.34	$y=7.8117-2.8178x$	0.9829
5	148	10.55	2.82	0.58	0.35	$y=7.7763-2.8016x$	0.9888
7	153	11.00	2.97	0.65	0.41	$y=7.5417-2.7088x$	0.9867
9	159	11.63	3.18	0.78	0.49	$y=7.1822-2.5665x$	0.9904
11	162	12.56	3.48	1.14	0.60	$y=6.8505-2.4352x$	0.9890

### 2.2 针入度指数

沥青路面的工作状态大多数情况下非固态，而是处于一种类似粘弹性状态。因此，根据 JTGF

E20—2011《公路工程沥青及沥青混合料实验规程》（以下简称规范）的方法，测量沥青在 15、25、30 ℃ 温度条件下的针入度，且采用传统的公

式拟合计算针入度指数, 其公式如下:

$$\lg P = K + AT \quad (3)$$

$$PI = (20 - 500A)/(1 + 50A) \quad (4)$$

由表4可知, 云母粉改性沥青的针入度指数较基质沥青均有所提高, 随着云母粉掺量的增加, 针入度指数大致呈上升趋势, 表明云母粉的加入使得沥青的温度敏感性降低, 沥青的相关性能稳定性提高。

表4 针入度实验结果

Table 4 Summary of needle penetration test results

云母粉掺量/%	针入度值/(0.1 mm)			针入度指数PI
	15 °C	25 °C	30 °C	
0	23.3	65.6	111.7	-0.811 6
3	23.2	64.9	109.4	-0.755 0
5	22.9	61.1	101.0	-0.461 0
7	24.3	57.6	95.1	0.135 1
9	25.9	58.7	101.3	0.186 8
11	25.4	60.3	92.7	0.434 8

### 2.3 塑性温度范围

软化点可近似地认为是沥青由可塑状态变成液态时的温度, 脆点是沥青由可塑状态变成脆性状态时的温度<sup>[12]</sup>。因此, 采用当量软化点  $T_{800}$  与当量脆点  $T_{1.2}$  表征沥青的高低温性能, 两者的差值表示沥青的塑性温度范围。其公式如下:

$$T_{800} = (2.9031 - K)/A \quad (5)$$

$$T_{1.2} = (0.0792 - K)/A \quad (6)$$

由表5可知, 随着云母粉掺量的增加, 当量软化点  $T_{800}$  整体处于上升趋势, 沥青的高温性能得到改善, 当量脆点  $T_{1.2}$  整体处于下降趋势, 加入云母粉对沥青的低温性能没有影响, 而是沥青的低温性能得到一定的改善。沥青的塑性温度范围也得到一定的提高。

表5 塑性温度范围

Table 5 Plasticity temperature range

云母粉掺量/%	$T_{800}/^{\circ}\text{C}$	$T_{1.2}/^{\circ}\text{C}$	$\Delta T/^{\circ}\text{C}$
0	48.93	-13.41	62.34
3	49.24	-13.65	62.89
5	51.00	-14.83	65.83
7	53.83	-18.21	72.04
9	53.52	-19.07	72.59
11	54.95	-20.36	75.31

### 2.4 红外光谱分析

实验采用傅立叶红外光谱仪观测云母粉作为改

性剂加入沥青后官能团的变化, 以基质沥青和掺量为11%的云母粉改性沥青为例, 实验结果见图1。

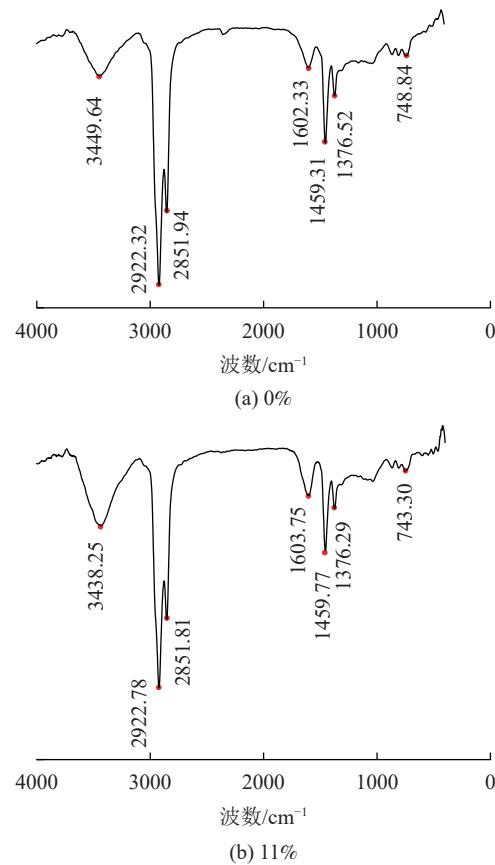


图1 不同云母粉掺量的FTIR分析

Fig.1 FTIR analysis of different mica powder dosages

由图1(a)可知, 基质沥青的峰值主要有以下几种:  $3449.84\text{ cm}^{-1}$  处的峰为C-H键的伸缩振动峰,  $2800\text{~}3000\text{ cm}^{-1}$  处出现强吸收峰为C-H键的对称伸缩振动峰, 是由于环烷烃和不饱和烃类物质发生伸缩振动形成的;  $1619.39\text{ cm}^{-1}$  为C=O双键的对称伸缩振动峰;  $1600\text{~}1450\text{ cm}^{-1}$  处的峰为苯环中C=C双键的对称伸缩振动峰;  $1376.12\text{ cm}^{-1}$  处的峰为C-H的弯曲振动峰; 由图1(b)可知, 掺量11%的云母粉改性沥青与基质沥青的FTIR图出现的吸收峰带基本相同, 吸收峰的位置基本一致, 未出现新的官能团。因此, 云母粉加入到沥青中仅仅表现为物理共混过程。

## 3 配合比设计及路用性能

### 3.1 混合料配合比设计

实验采用AC-20型沥青混合料级配, 各档矿料占比见表6。对于云母粉改性沥青混合料, 以AC-20型级配范围为基础, 通过马歇尔实验确定

不同掺量的云母粉沥青混合料的较佳沥青用量，马歇尔实验结果见表 7。

表 6 AC-20 型沥青混合料级配  
Table 6 Mix gradation of AC-20 asphalt

级配类型	通过下列不同孔径筛孔 (mm) 的质量百分率/%											
	26.5	19	16.0	13.2	9.5	4.75	2.36	1.18	0.6	0.3	0.15	0.075
级配上限	100.0	100	92.0	80.0	72.0	56.00	44.00	33.00	24.0	17.0	13.00	7.000
级配下限	100.0	90	78.0	62.0	50.0	26.00	16.00	12.00	8.0	5.0	4.00	3.000
合成级配	100.0	95	79.3	72.9	60.2	40.50	30.00	22.50	16.3	12.0	8.70	5.500

表 7 马歇尔实验数据  
Table 7 Summary of Marshall's test data

云母粉掺量/%	较佳沥青用量/%	毛体积相对密度/(g/cm <sup>3</sup> )	空隙率/%	矿料间隙率/%	有效沥青饱和度/%	稳定度/kN	流值/mm
0	4.10	2.461	4.00	13.28	69.87	9.01	3.10
3	4.12	2.463	4.04	13.42	69.89	12.10	2.68
5	4.15	2.464	4.02	13.37	69.93	12.98	2.95
7	4.16	2.470	3.98	13.34	70.16	14.48	2.73
9	4.20	2.465	4.08	13.52	69.82	13.87	2.82
11	4.11	2.462	4.10	13.48	69.58	12.31	2.67
技术标准			3~6	11~15	65~75	≥8	2~4

### 3.2 高温稳定性

根据规范的方法，采用车辙实验对不同掺量的云母粉改性沥青混合料进行室内实验，以动稳定性作为评价指标。用轮碾法制备一组 (4 个) 300 mm×300 mm×50 mm (长×宽×高) 的车辙板试件。将制备好的试件放置 24 h 自然冷却，随即放入 60 °C 恒温干燥箱中保温 8 h。在实验温度为 60 °C，轮压为 0.7 MPa 条件下进行车辙实验，实验结果见图 2。其中， $\omega$ ：云母粉掺量；DS：动稳定性。

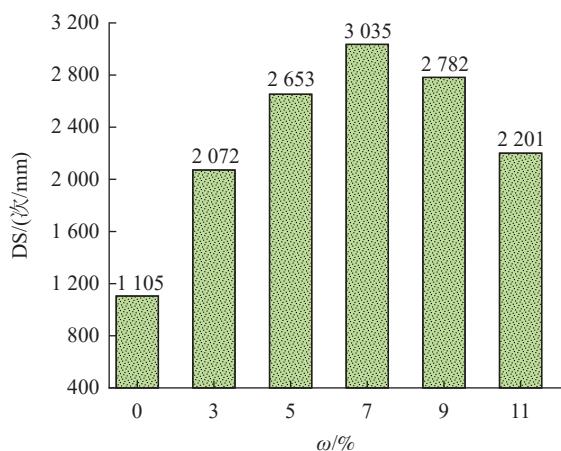


图 2 车辙实验结果  
Fig.2 Results of rutting test

由图 2 可知，与基质沥青混合料的动稳定性相比，云母粉可以明显提高沥青混合料的动稳定

度。随着云母粉掺量的增加，其稳定性也随之增加，当达到云母粉掺量达到 7% 时，此时动稳定性达到峰值时，较基质沥青混合料提高了 174.7%。然后沥青混合料的动稳定性随着云母粉掺量的增加而减小。其他掺量为 3%、5%、9%、11% 的沥青混合料较基质沥青混合料分别提高了 87.5%、140.1%、151.8%、99.2%。所以将云母粉作为改性剂可以使沥青混合料的高温稳定性有显著提升。云母粉掺量为 0~7% 时，动稳定性呈快速上升趋势。其原因是：云母粉比表面积较大且热稳定性良好，与沥青充分结合形成沥青胶浆，增强了混合料骨架的稳定性，提高了混合料的高温稳定性。云母粉掺量为 7%~11% 时，沥青混合料的动稳定性呈下降趋势，这是由于云母粉掺量过多时，易于团聚在一起，在沥青中分散不均匀，影响沥青的改性效果，导致混合料的稳定性改善效果有限<sup>[13]</sup>。

### 3.3 水稳定性

#### 3.3.1 冻融劈裂实验

根据规范的方法，制备两组共 10 个 101.6 mm×63.5 mm (直径×高度) 大小的马歇尔试件。采用马歇尔击实仪，在试样正反两面各击实 50 次，脱模后，记录下此时试件高度后随机分成冻融组和未冻融组。为模拟冻融条件，冻融组需放置真空

中 15 min, 随后常压浸水 0.5 h, 取出装入密封袋中, 加入 10 mL 水, 置于-18 °C 的冰箱中 16 h, 取出后置于 60 °C 的恒温水浴箱 24 h。未冻融组室温保存即可, 最后将两组试件置于 25 °C 的恒温水浴箱中 2 h, 之后采用马歇尔实验仪以 50 mm/min 加载速率对两组试件进行劈裂实验<sup>[14]</sup>。实验结果见图 3。其中, TSR: 冻融劈裂抗拉强度比;  $R_{T1}$ : 冻融后的劈裂抗拉强度;  $R_{T2}$ : 未冻融的劈裂抗拉强度。

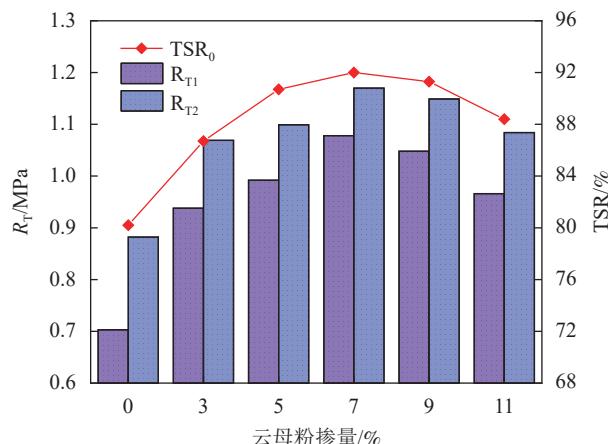


图 3 冻融劈裂实验结果

Fig.3 Results of freeze-thaw splitting test

由图 3 可知, 随着云母粉的掺量的增加, 混合料的 TSR 先上升后降低, 分别提高了 6.5%、10.5%、11.8%、11.1%、8.2% 其变化趋势与动稳定性变化相似。适量的云母粉可以使沥青混合料的 TSR 有着显著提高, 观察上图数据可知, 较佳云母粉掺量为 7% 时, 其沥青混合料的 TSR 达到峰值, 相比未添加改性剂的基质沥青混合料, 其 TSR 提高了 11.8%。因此, 在沥青混合料中添加云母粉使水稳定性有一定程度的提升。这是由于当云母粉加入基质沥青后, 沥青膜的厚度和沥青的黏度增大, 沥青与矿质颗粒之间的粘附性增强, 沥青混合料抵抗流动变形和水损害侵蚀剥落的能力增强, 提高了沥青混合料的水稳定性。

### 3.3.2 浸水马歇尔实验

根据规范, 采用马歇尔击实仪制备正反两面各击实 75 次的马歇尔试件, 随机分成两组, 分别置于 60 °C 恒温水浴箱 0.5、48 h, 稳定度结果见图 4。其中,  $MS_0$ : 浸水残留稳定度;  $MS_1$ : 48 h 马歇尔稳定度;  $MS_2$ : 0.5 h 马歇尔稳定度。

由图 4 可知, 随着不同掺量的云母粉加入沥

青混合料中, 其  $MS_0$  先增大后减小, 但  $MS_0$  都有显著提高。当云母粉掺量达到 7% 时, 沥青混合料的  $MS_0$  达到最大, 较基质沥青混合料提高了 12.6%, 其他掺量为 3%、5%、9%、11% 的沥青混合料相较基质沥青混合料分别提高了 8.4%、10.8%、10.4%、8.9%, 加入云母粉后提高了沥青混合料的水稳定性。和冻融劈裂实验结果相比, 浸水马歇尔实验结果更好。可能是由于冻融劈裂实验过程中, 试件真空饱水占据了与外界连通的孔隙, 增加了与混合料的接触面积, 在低温冷冻时, 孔隙水结冰体积变大产生冻胀压力, 导致沥青混合料  $TSR_0$  比  $MS_0$  低。

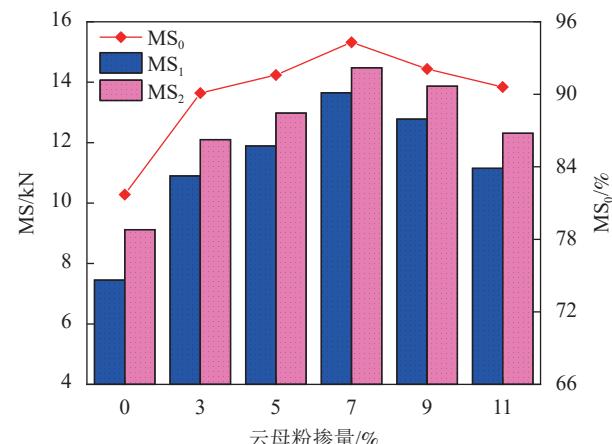


图 4 浸水马歇尔实验结果

Fig.4 Results of water immersion Marshall test

### 3.4 低温抗裂性

根据规范, 制备 250 mm×30 mm×35 mm 的棱柱体小梁, 使用 MTS 万能材料实验机进行小梁弯曲实验。在实验过程中, 控制实验温度为-10 °C 左右, 将加载速率设定成 50 mm/min, 结果见图 5。其中,  $\epsilon_B$ : 最大弯拉应变。

由图 5 可知, 与基质沥青混合料的  $\epsilon_B$  相比, 沥青混合料的  $\epsilon_B$  在云母粉掺量为 0~7% 时呈上升趋势。当云母粉掺量为 7% 较大, 较基质沥青混合料提高了 5.79%, 这是由于云母粉的加入使沥青的温度敏感性降低, 沥青的低温性能提高, 当云母粉掺量为 7%~11% 时, 沥青混合料的  $\epsilon_B$  逐渐减小, 这是由于云母粉掺量过多时, 在高温高速剪切作用下达不到完全分散, 以颗粒的形式存在, 在低温弯拉作用下, 这些颗粒周边容易产生应力集中现象, 降低了云母粉改性剂的作用效果。

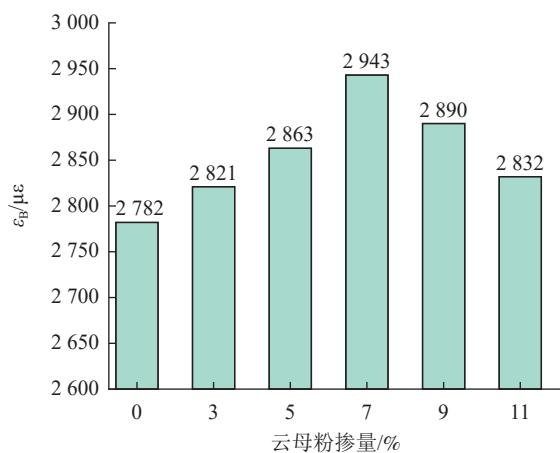


图 5 低温小梁弯曲实验结果

Fig.5 Results of low-temperature trabecular bending test

## 4 灰色关联分析

### 4.1 灰色关联分析理论

本文采用灰色关联<sup>[15-18]</sup>分析在加入云母粉后，该沥青混合料路用性能的改变。具体为：以云母粉掺量作为参考序列，动稳定性、最大弯拉应变、残留稳定性、劈裂抗拉强度比作为比较序列。

假定参考序列为：

$$i, j = 1, 2, 3, 4, \dots, n \quad (7)$$

假定比较序列为：

$$i, j = 1, 2, 3, 4, \dots, n \quad (8)$$

其中  $i, j = 1, 2, 3, 4, \dots, n$

对参考序列和比较序列进行均值化处理得到新的参考序列和比较序列如下：

参考数列：

$$y_i = \{y_i(1), y_i(2), y_i(3), \dots, y_i(n)\} = \left\{ \frac{Y_i(1)}{\bar{Y}_i}, \frac{Y_i(2)}{\bar{Y}_i}, \frac{Y_i(3)}{\bar{Y}_i}, \dots, \frac{Y_i(n)}{\bar{Y}_i} \right\} \quad (9)$$

比较数列：

$$x_j = \{x_j(1), x_j(2), x_j(3), \dots, x_j(n)\} = \left\{ \frac{X_j(1)}{\bar{X}_j}, \frac{X_j(2)}{\bar{X}_j}, \frac{X_j(3)}{\bar{X}_j}, \dots, \frac{X_j(n)}{\bar{X}_j} \right\} \quad (10)$$

其中  $\bar{X}_j$ ， $\bar{Y}_i$  表示原参考数列和比较数列的平均值。

原始数据序列经过无量纲化处理后参考序列和比较序列关联系数为：

$$\xi_i(k) = \frac{\min \min |y_i(k) - x_j(k)| + \lambda \max \max |y_i(k) - x_j(k)|}{|y_i(k) - x_j(k)| + \lambda \max \max |y_i(k) - x_j(k)|} \quad (11)$$

其中  $k = 1, 2, 3, 4, \dots, n$ ， $\lambda$  是介于 (0, 1) 间的分辨系数，本文取值 0.5。

灰色关联度的表达式为：

$$r_i = \frac{1}{n} \sum_{k=1}^n \xi_i(k) \quad (12)$$

### 4.2 路用性能灰色关联

运用灰色关联分析不同掺量云母粉改性沥青混合料的路用性能指标，其结果见表 8。

由表 8 可知，云母粉掺量与动稳定性次数的关联度最大，达到 0.707 0，表明云母粉对沥青混合料高温稳定性的影响最大，采用  $MS_0$  和 TSR 关联度的平均值表示云母粉掺量与水稳定性的关联度。因此，云母粉掺量对沥青混合料的高温稳定性影响最大，其次是水稳定性，最后是低温抗裂性。

表 8 灰色关联度  
Table 8 Grey correlation degree

参数	云母粉掺量/%						r
	0.000 0	3.000 0	5.000 0	7.000 0	9.000 0	11.000 0	
DS/ (次/mm)	0.623 4	0.691 6	0.772 5	1.000 0	0.730 2	0.424 3	0.707 0
$\varepsilon_B/\mu\epsilon$	0.412 0	0.626 7	0.951 6	0.917 4	0.591 6	0.436 0	0.655 9
$MS_0/\%$	0.432 4	0.619 8	0.918 9	0.938 1	0.596 7	0.440 0	0.657 6
TSR/%	0.431 3	0.630 1	0.914 9	0.934 6	0.601 5	0.439 3	0.659 2

## 5 结 论

(1) 云母粉的加入降低沥青的温度敏感性，改善沥青的高低温性能，且两者混溶过程仅仅表现为物理共混过程。

(2) 在沥青混合料中加入不同掺量的云母

粉，其高温稳定性和水稳定性能得到明显提高。确定较佳云母粉掺量为 7% 时，此时沥青混合料的动稳定性、浸水残留稳定度和冻融劈裂强度比较佳，较基质沥青混合料分别提高了 174.7%、12.6% 和 11.8%。但此时沥青混合料的低温抗裂性没有明显提高，弯拉应变较基质沥青混合料提高了 5.79%。

(3) 云母粉和路用性能指标灰色关联分析表明云母粉掺量对高温稳定性的影响最大, 其次为水稳定性和低温抗裂性。

(4) 云母粉作为改性剂加入, 沥青混合料的路用性能改善效果比较明显, 为云母粉作为一种新的无机矿物质改性剂应用于沥青路面指明方向。

## 参考文献:

- [1] 于华洋, 马涛, 王大为, 等. 中国路面工程学术研究综述·2020[J]. *中国公路学报*, 2020, 33(10):1-66.  
YU H Y, MA T, WANG D W, et al. Review of academic research on pavement engineering in China-2020[J]. *Chinese Journal of Highway*, 2020, 33(10):1-66.
- [2] 王修山, 周恒宇, 张小元, 等. 陶瓷纤维沥青混合料路用性能及改性机理分析[J]. 重庆交通大学学报(自然科学版), 2022, 41(3):100-106.  
WANG X S, ZHOU H Y, ZHANG X Y, et al. Analysis of road performance and modification mechanism of ceramic fibre asphalt mixtures[J]. *Journal of Chongqing Jiaotong University (Natural Science Edition)*, 2022, 41(3):100-106.
- [3] 朱春凤, 程永春, 梁春雨, 等. 硅藻土-玄武岩纤维复合改性沥青混合料路用性能试验[J]. 吉林大学学报(工学版), 2020, 50(1):165-173.  
ZHU C F, CHENG Y C, LIANG C Y, et al. Road performance test of diatomite-basalt fibre composite modified asphalt mixture[J]. *Journal of Jilin University (Engineering Edition)*, 2020, 50(1):165-173.
- [4] XIU Hua Yang. Study on Performance of SBS Modified Asphalt[J]. *Advanced Materials Research*, 2013, 25-26.
- [5] 付翔, 李香兰, 郭慧, 等. 硅藻土对水泥铜尾矿粉胶凝材料性能的影响[J]. *矿产综合利用*, 2022(3):27-31.  
FU X, LI X L, GUO H, et al. Effect of diatomite on properties of cement-copper tailing powder cementitious materials[J]. *Multipurpose Utilization of Mineral Resources*, 2022(3):27-31.
- [6] 胡超, 包惠明, 迟恩涛, 等. 高岭土尾矿沥青混合料抗腐性能实验与机理研究[J]. *矿产综合利用*, 2020(5):161-168.  
HU C, BAO H M, CHI E T, et al. Experimental and mechanistic study on corrosion resistance of kaolin tailings asphalt mixtures[J]. *Multipurpose Utilization of Mineral Resources*, 2020(5):161-168.
- [7] 包惠明, 张亦敏, 吕总威, 等. 高岭土改性沥青混合料路用性能研究[J]. *新型建筑材料*, 2018, 45(12):25-28.  
BAO H M, ZHANG Y M, LYU Z W, et al. Research on road performance of kaolin modified asphalt mixtures[J]. *New Construction Materials*, 2018, 45(12):25-28.
- [8] 付善春, 王冬冬, 沈红艳. 赤泥矿粉沥青混合料的抗水损坏研究[J]. *矿产综合利用*, 2022(5):25-30.  
FU S C, WANG D D, SHEN H Y. Study on water damage resistance of red mud mineral powder asphalt mixture[J]. *Multipurpose Utilization of Mineral Resources*, 2022(5):25-30.
- [9] 孙权. 硫磺改性沥青混合料的基本性能及其水稳定性能的改善研究[D]. 武汉: 武汉工程大学, 2017.  
SUN Q. Research on the basic properties of sulphur-modified asphalt mixtures and their water stability performance improvement [D]. Wuhan: Wuhan University of Engineering, 2017.
- [10] 顾宁, 杨静, 王兴熙, 等. 干湿循环条件下改性云母粉对砂浆抗硫酸盐侵蚀性能的影响[J/OL]. *混凝土与水泥制品* 2021, 09-02: 1-7.  
GU N, YANG J, WANG X X, et al. Effect of modified mica powder on the sulphate erosion resistance of mortar at dry and wet cycling conditions[J/OL]. *Concrete and Cement Products* 2021, 09-02: 1-7.
- [11] 冯刚. 改性云母的制备及在聚丙烯中的应用[D]. 保定: 河北大学, 2017.  
FENG G. Preparation of modified mica and its application in polypropylene[D]. Baoding: Hebei University, 2017.
- [12] 朱月凤, 姜鹏. 添加国产 TOR 的橡胶沥青黏温特性及路用性能研究[J]. *材料导报*, 2016, 30(12):134-139.  
ZHU Y F, JIANG P. Research on viscosity-temperature characteristics and road performance of rubber asphalt with domestic TOR[J]. *Materials Herald*, 2016, 30(12):134-139.
- [13] Zhang Henglong, Zhang Dongmei, Zhu Chongzheng. Properties of Bitumen Containing Various Amounts of Organic Montmorillonite[J]. *Journal of Materials in Civil Engineering*, 2015, 27(11):1-7.
- [14] 刘志强. PU 改性沥青混合料路用性能研究[J]. *合成材料老化与应用*, 2021, 50(1):35-38.  
LIU Z Q. Research on road performance of PU-modified asphalt mixtures[J]. *Synthetic Materials Aging and Application*, 2021, 50(1):35-38.
- [15] 刘思峰, 郭天榜, 党耀国. 灰色系统理论及其应用[M]. 第2版. 北京: 科学出版社, 1999.  
LIU S F, GUO T B, DANG Y G. Grey system theory and its applications [M]. 2nd edition. Beijing: Science Press, 1999.
- [16] 徐明非, 郭平, 李俊. 蒙脱土/SBS 复合改性沥青混合料路用性能研究[J]. *公路交通科技*, 2019, 36(1):1-7+15.  
XU M F, GUO P, LI J. Research on road performance of montmorillonite/SBS composite modified asphalt mixture[J]. *Highway Traffic Science and Technology*, 2019, 36(1):1-7+15.
- [17] 方明伟, 王丹, 殷玲, 等. 基于灰色关联法的外掺纤维沥青混合料路用性能研究[J]. *公路*, 2019, 64(5):23-29.  
FANG M W, WANG D, YIN L, et al. Research on road performance of externally mixed fibre asphalt mixtures based

on grey correlation method[J]. Highway, 2019, 64(5):23-29.  
 [18] 杜二鹏, 马松林, 景海民. 基于灰色系统理论的沥青路面使用性能预测[J]. 同济大学学报, 2010, 08(11):4-11.

DU E P, MA S L, JING H M. Prediction of asphalt pavement service performance based on grey system theory[J]. Journal of Tongji University, 2010, 08(11):4-11.

## Road Performance of Mica Powder Modified Asphalt Mixture

FENG Chao, BAO Huiming, BAO Huan, ZHAN Wei, YAN Shi

(College of Civil and Construction Engineering, Guilin University of Technology, Guilin 541004, Guangxi, China)

**Abstract:** This is an article in the field of ceramics and composites. In order to investigate the basic road performance of mica powder modified asphalt mixture, modified asphalt with 0%, 3%, 5%, 7%, 9%, and 11% content was prepared. Through rotational viscosity test, penetration test and Fourier infrared spectroscopy test, the performance of mica powder modified asphalt was analyzed. AC-20 mica powder modified asphalt mixture was prepared to explore its road performance and the influence law of mica powder dimension content on asphalt mixture road performance was determined by grey correlation analysis. The test results show that the addition of mica powder can reduce the temperature sensitivity of the asphalt, and the addition of mica powder to the asphalt only causes physical blending. As the content of mica powder increases, the improvement effect of mica powder on asphalt pavement performance first increases and then decreases. When the content of mica powder is 7%, the road performance of mica powder modified asphalt mixture reaches the best. The grey correlation analysis shows that the influence degrees of mica powder dosage on road performance indicators are high temperature stability > moisture stability > low temperature crack resistance.

**Keywords:** Ceramics and composites; Road engineering; Road performance; Mica powder modified asphalt; Viscosity temperature property; Grey correlation

(上接第 58 页)

## Titanium-containing Blast Furnace Slag Produced Titanium-silicon-aluminum Alloy by Aluminothermic Reduction

DING Mantang

(College of Vanadium and Titanium, Panzhihua University, Panzhihua 617000, Sichuan, China)

**Abstract:** This is an article in the field of metallurgical engineering. At the protection of argon gas, titanium-containing blast furnace slag produced titanium-silicon-aluminum alloy by aluminothermic reduction. The test result shows at 1 500 °C, at the protection of argon gas, when aluminum powder accounts for 30%~40% of blast furnace slag, lime accounts for 5%~15% and fluorite  $\geq 5\%$ , the alloys obtained by reduction are mainly titanium-silicon phase, aluminum-silicon phase, titanium phases. In the alloy, the content of titanium, silicon, aluminum were 35%~40%, 26%~33%, 23%~32%, respectively. The recoveries of titanium, silicon, aluminum were 73%~88%, 84%~95%, 67%~77%, respectively.

**Keywords:** Metallurgical engineering; Titanium-bearing blast furnace slag; Aluminothermic reduction; Extraction titanium; Titanium-silicon-aluminum alloy