

文章编号:1007-9629(2023)10-1104-07

基于灰色模型的沥青混合料低温指标预测

朱运鼎¹, 银花^{1,2,*}

(1. 内蒙古大学 交通学院, 内蒙古 呼和浩特 010070; 2. 内蒙古大学 桥梁检测与维修
加固工程技术研究中心, 内蒙古 呼和浩特 010070)

摘要:为综合考虑沥青低温性能对沥青混合料低温性能的影响,并实现对混合料低温性能的预测,采用弯曲梁流变试验及常规低温试验测定了 5 种沥青及其混合料的低温评价指标,并与约束试件温度应力试验结果进行了灰色关联分析,建立了分数阶灰色预测模型.结果表明:沥青低温连续分级温度、玻璃态转变温度、脆点、不同温度下的蠕变速率和耗散能比对混合料低温性能影响较大;冻断温度和转折点温度 FGM(1, 4)模型的误差分别为 1.83% 和 3.71%,精度为优,预测结果合理.

关键词:沥青混合料;分数阶灰色预测模型;低温性能

中图分类号:U414

文献标志码:A

doi:10.3969/j.issn.1007-9629.2023.10.008

Prediction of Low Temperature Index of Asphalt Mixture Based on Grey Model

ZHU Yunding¹, YIN Hua^{1,2,*}

(1. Transportation College, Inner Mongolia University, Hohhot 010070, China; 2. Research Center for Bridge Testing, Maintenance and Reinforcement Engineering Technology, Inner Mongolia University, Hohhot 010070, China)

Abstract: In order to comprehensively consider the influence of low temperature performance of asphalt on the low temperature performance of asphalt mixture, and predict low temperature performance of asphalt mixture. The low temperature evaluation indexes of five kinds of asphalt and mixture were determined by bending beam rheological test and conventional low temperature test. Grey correlation analysis was introduced with the results of thermal stress restrained specimen test and a fractional grey prediction model was established. The results show that the low temperature continuous classification temperature, glass transition temperature, brittle point, creep rate and dissipation energy ratio at four temperatures have great influence on the low temperature performance of asphalt mixture. The errors of FGM (1, 4) model for freezing temperature and turning point temperature are 1.83% and 3.71% respectively, indicating excellent accuracy and reasonable prediction results.

Key words: asphalt mixture; fractional grey prediction model; low temperature performance

低温开裂是沥青路面常见的破坏问题.目前认为沥青路面的低温开裂有温度疲劳开裂和低温缩裂 2 种形式.当温度急剧下降导致约束状态下沥青混合料内部的温度应力超过其抗拉强度时,沥青混合料将产生低温缩裂^[1-3].

沥青混合料的低温性能主要受环境因素和组成材料性能的影响,其中影响最大的是沥青的低温性能^[4].罗学东^[5]研究发现沥青的蠕变速率 m /劲度模量 S 与混合料的断裂能密度、冻断温度具有较好的相关性;Vervaecke 等^[6]研究发现沥青

收稿日期:2022-11-25; 修订日期:2023-02-07

基金项目:内蒙古自然科学基金资助项目(2020MS01013); 内蒙古交通科技资助项目(222000-5206034); 国家自然科学基金资助项目(11562013)

第一作者:朱运鼎(1999—),男,山东济宁人,内蒙古大学硕士生. E-mail:936724979@qq.com

通讯作者:银花(1976—),女,内蒙古通辽人,内蒙古大学副教授,硕士生导师,博士. E-mail:baoyinhua76@126.com

的劲度临界温度与混合料断裂温度、转折点温度有较好的线性关系.Rys等^[7]测定了沥青的脆点、劲度临界温度、蠕变劲度模量等低温指标,协同约束试件温度应力试验(TSRST)结果建立了多元线性回归模型,模型拟合度较好,并表明混合料冻断温度和低温应力的主要影响因素是沥青的 m 值.

通过沥青玻璃态转变温度试验、脆点与低温延度试验测定了5种沥青的常规低温指标,在不同温度下通过弯曲梁流变试验测定了长期老化后沥青的低温流变指标,将沥青低温评价指标与混合料的

$$X^r(k) = \{x^r(1), x^r(2), \dots, x^r(n)\} = \sum_{i=1}^k \frac{\Gamma(r+k-i)}{\Gamma(k-i+1)\Gamma(r)} x^0(i), k=1, 2, \dots, n \quad (1)$$

式中: k 为 x^r 在序列中的位数; i 为从1到 k 之间的数值.

(2)建立白化微分方程并求解,得到时间响应函数 $x^r(k+1)$ 为:

$$x^r(k+1) = \left[x^0(1) - \frac{b}{a} \right] e^{-ak} + \frac{b}{a} \quad (2)$$

$$\hat{x}^0(k) = \begin{cases} x^0(1), k=1 \\ \sum_{i=0}^{k-1} (-1)^i \frac{\Gamma(r+1)}{\Gamma(i+1)\Gamma(r-i+1)} \hat{x}^r(k-i), k=2, 3, \dots, n \end{cases} \quad (4)$$

(5)利用平均相对误差百分比来评价模型的精度MAPE.

$$MAPE = \frac{1}{n} \sum_{k=1}^n \left| \frac{\hat{x}^0(k) - x^0(k)}{x^0(k)} \right| \times 100\% \quad (5)$$

1.2 FGM(1,N)模型

FGM(1,N)模型是由 N 个变量组成的分数阶灰色预测模型,其综合考虑了特征数列和相关因素数列的变化趋势,具有更高的预测准确度.FGM(1,N)模型的建立过程为:

(1)设 $X_0^0 = \{x_0^0(1), x_0^0(2), \dots, x_0^0(n)\}$ 为特征序列,相关因素序列通过灰色关联分析方法确定的关联度最大的影响因素建立.

(2)由式(1)得各序列 r 阶累加生成序列.

(3)建立白化微分方程并求解,得到时间响应函数 $x_0^r(k+1)$:

$$x_0^r(k+1) = \left[x_0^0(1) - \frac{1}{a} \sum_{i=1}^{N-1} b_i x_i^r(k+1) \right] e^{-ak} + \frac{1}{a} \sum_{i=1}^{N-1} b_i x_i^r(k+1) \quad (6)$$

式中: b_i 为第 i 个参数向量.

(4)FGM(1,N)模型的时间响应序列 $\hat{X}_0^r(k)$ 为:

TSRST结果进行灰色关联分析,并建立了混合料低温性能的分阶灰色预测模型.

1 相关模型

1.1 FGM(1,1)模型

FGM(1,1)模型采用分数阶累加算子,可以弱化原始数据序列的随机性,使得灰色预测模型解的扰动性减小,提高拟合的精度.FGM(1,1)模型的建立过程为:

(1)设 $X^0 = \{x^0(1), x^0(2), \dots, x^0(n)\}$ 为原始序列,则 X^0 的 r 阶累加生成序列 X^r 为:

式中: a, b 为参数向量.

(3)FGM(1,1)模型的时间响应序列 $\hat{x}^r(k)$ 为:

$$\hat{x}^r(k) = \left[x^0(1) - \frac{\hat{b}}{\hat{a}} \right] e^{-\hat{a}(k-1)} + \frac{\hat{b}}{\hat{a}}, k=2, 3, \dots, n \quad (3)$$

式中: \hat{a}, \hat{b} 为参数向量.

(4)还原值 $\hat{x}^0(k)$ 为:

$$\hat{X}_0^r(k) = \left[x_0^0(1) - \frac{1}{\hat{a}} \sum_{i=1}^{N-1} \hat{b}_i x_i^r(k) \right] e^{-\hat{a}(k-1)} + \frac{1}{\hat{a}} \sum_{i=1}^{N-1} \hat{b}_i x_i^r(k), k=2, 3, \dots, n \quad (7)$$

(5)通过式(4)对 \hat{X}_0^r 序列进行还原,可得 \hat{X}_0^0 序列.

(6)计算平均相对误差百分比.

2 试验

2.1 原材料

选用产自辽河石化的5种沥青:90#基质沥青(90#)、丁苯橡胶改性沥青(SBR)、SBS改性沥青(SBS)、橡胶沥青(rubber)和极寒沥青(cold).沥青的技术指标见表1.

集料采用安山岩,配合比采用马歇尔配合比方法设计,90#基质沥青混合料(BAM)、SBR改性沥青混合料(SBRAM)、SBS改性沥青混合料(SBSAM)、极寒沥青混合料(CAM)采用连续密级配,橡胶沥青混合料(RAM)由于其特殊性采用间断级配.沥青混合料配合比采用AC-13,其级配组成(质量分数)见表2.

表1 沥青的技术指标
Table 1 Technical indexes of asphalts

Asphalt type	Penetration(25 °C)/(0.1 mm)	Ductility/cm			Softening point/ °C	Density(25 °C)/(g·cm ⁻³)
		5 °C	10 °C	15 °C		
90#	87.6			>100.0	45.5	1.050
SBR	78.0	68.5		>100.0	62.8	1.022
SBS	94.7	53.0		>100.0	60.8	1.025
Rubber	65.2		31.2	34.5	71.0	1.036
Cold	125.0			>100.0	80.0	1.014

表2 沥青混合料的级配组成
Table 2 Gradation compositions of asphalt mixture

Specimen	Sieve size/mm											
	0.075	0.15	0.3	0.6	1.18	2.36	4.75	9.5	13.2	16	19	26.5
BA	8.6	11.5	14.1	17.7	23.8	32.6	38.6	71.5	92.8	100.0	100.0	100.0
SBRAM	8.6	11.5	14.1	17.7	23.8	32.6	38.6	71.5	92.8	100.0	100.0	100.0
SBSAM	8.6	11.5	14.1	17.7	23.8	32.6	38.6	71.5	92.8	100.0	100.0	100.0
RAM	7.1	9.3	10.9	13.1	16.8	22.3	28.6	64.4	91.0	100.0	100.0	100.0
CAM	8.6	11.5	14.1	17.7	23.8	32.6	38.6	71.5	92.8	100.0	100.0	100.0

2.2 试验方法

2.2.1 弯曲梁流变试验

采用弯曲梁流变仪(BBR)对沥青梁施加980 mN的固定荷载,240 s后荷载自动解除,弯曲梁流变仪自动计算蠕变劲度模量 S 和蠕变速率 m ^[8],并进一步计算得到其低温连续分级温度 T_{LC} .通过拟合Burgers模型得到沥青的黏弹性参数,计算得到其松弛时间 λ 、耗散能比 W_d/W_s 、 m/S 和低温综合柔量参数 J_c .设置试验温度 t 为-12、-18、-24、-30 °C.通过试验得到60 s时长期老化后5种沥青的蠕变劲度模量 S 和蠕变速率 m .

2.2.2 玻璃态转变温度试验

采用差示扫描量热法对沥青样品进行测试,温度为-80~60 °C.首先,以20 °C/min的加热速率将样品温度由室温加热至60 °C,并恒温3 min,以消除热历史对样品造成的影响;然后,以10 °C/min的速率降温至-80 °C,恒温2 min,获得完整的降温曲线;最后,再以20 °C/min的加热速率将样品温度重新加热至60 °C,获得完整的二次升温曲线,从而确定沥青的玻璃化转变温度 T_g ^[9].

2.2.3 脆点试验

采用上海昌吉地质仪器公司的SYD-0613A型自动沥青脆点试验仪测定沥青原样的脆点,每种沥青样品进行3组平行试验,结果取平均值.

2.2.4 低温延度试验

低温延度反映了沥青在低温下的变形能力,与

路面低温抗裂性能密切相关^[10].本文测试了5种沥青样品在5 °C时的延度值,每种沥青样品进行3组平行试验,结果取平均值.

2.2.5 TSRST试验

采用UTM-100伺服液压多功能材料试验系统对沥青混合料进行TSRST试验,起始温度为5 °C,降温速率为-10 °C/h,每种沥青混合料进行2组平行试验,结果取平均值.

3 结果与讨论

3.1 BBR试验分析

长期老化后沥青的低温流变指标见图1.由图1可见:经过长期老化后,90#基质沥青在全部低温流变指标中均表现出了最差的低温性能,这说明4种改性剂的加入改善了沥青的低温性能;长期老化后5种沥青的低温指标均随着温度的降低而降低;4种改性沥青的低温分级温度为-22.5~-19.8 °C,而4种改性沥青的低温PG等级均为PG-28(见图1(a)、(b)),这表明低温PG分级对沥青低温性能的评价较为保守.

3.2 沥青的常规低温指标

沥青的常规低温指标见表3.由表3可见:橡胶沥青和极寒沥青都表现出较好的低温性能;延度对SBR改性沥青和SBS改性沥青的低温性能评价与玻璃态转变温度和脆点矛盾;相比于4种改性沥青,90#基质沥青的低温性能表现较差.

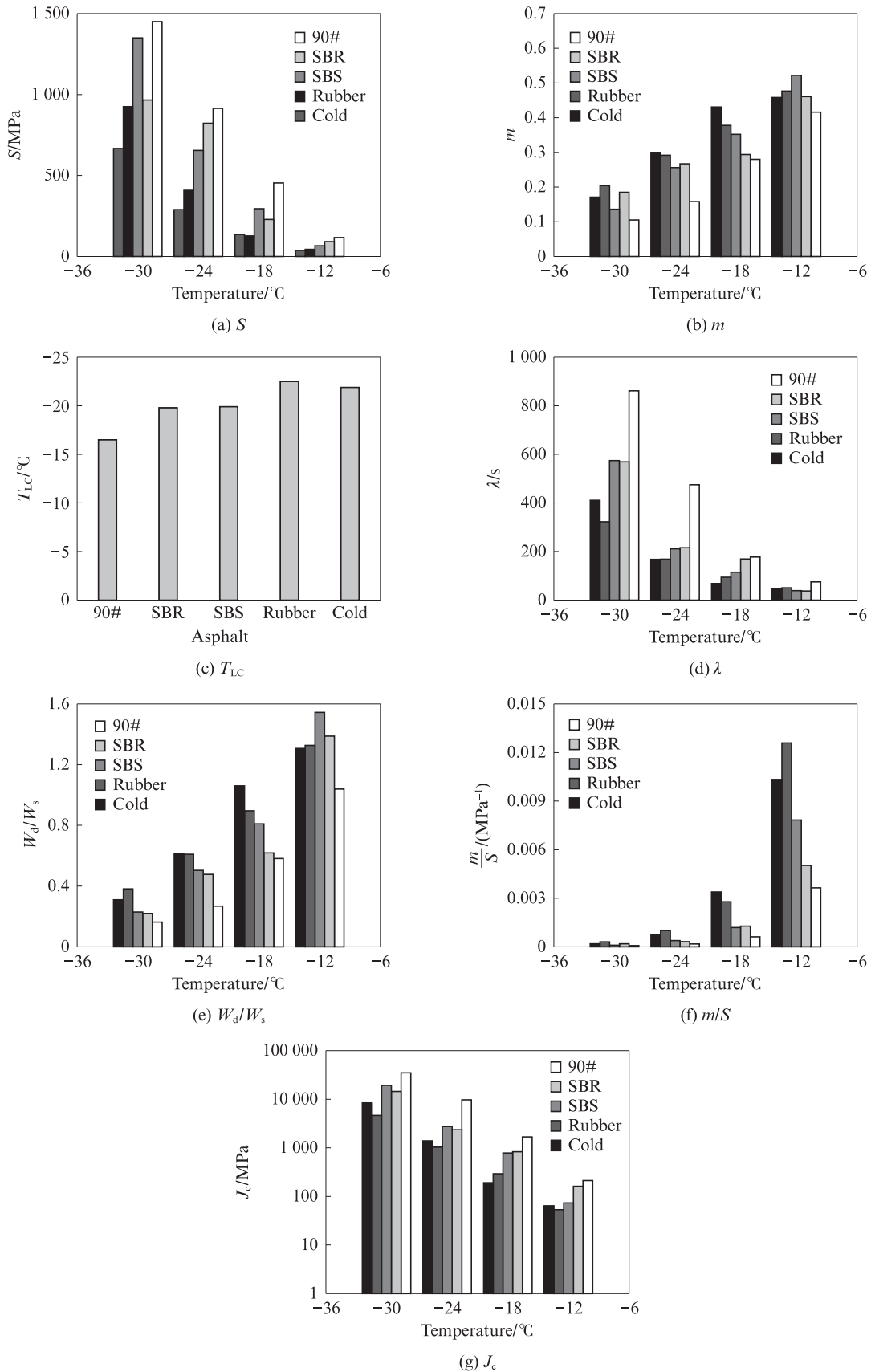


图1 长期老化后沥青的低温流变指标

Fig. 1 Low temperature rheological indexes of asphalts after long-term aging

3.3 TSRST试验分析

沥青混合料的 TSRST 结果见表4(表中 T_F 为冻

断温度; σ_F 为冻断强度; T_z 为转折点温度). 由表4可见: BAM 的 TSRST 结果优于部分改性沥青混合

表3 沥青的常规低温指标

Index	90#	SBR	SBS	Rubber	Cold
$T_g/^\circ\text{C}$	-19.01	-23.17	-21.41	-24.33	-30.28
Brittle point/ $^\circ\text{C}$	-15.64	-18.39	-17.42	-20.92	-20.98
Ductility/cm	27.40	53.60	66.80	29.50	39.80

料,这与90#基质沥青的低温性能不符,表明沥青与沥青混合料低温性能之间存在更复杂的关系;SBRA、RAM和CMA的冻断温度、冻断强度以及转折点温度表现一致;SBSMA低温性能在冻断温度和转折点温度上的表现强于BAM,但在冻断强度和切线斜率上的表现弱于BAM;5种沥青混合料的切线斜率与其它试验指标得到结果不同,表明切线斜率作为评价沥青混合料低温抗裂性的指标存在一定的局限性,无法准确评价沥青混合料的低温抗裂性。

3.4 分数阶灰色预测模型

3.4.1 灰色关联分析法

灰色关联分析法根据发展趋势的相似程度来衡量系统中各因素之间的关联程度,并通过计算目标数列与比较数列的关联度,确定影响目标变量的各个因素的主次关系^[11-13]。选择5种沥青混合料的冻断

表4 沥青混合料的TSRST结果

Specimen	$T_F/^\circ\text{C}$	σ_F/MPa	$T_Z/^\circ\text{C}$	Tangent slope/ ($\text{kN}\cdot^\circ\text{C}^{-1}$)
BAM	-40.36	2.537	-24.51	-0.083
SBRAM	-36.87	2.246	-23.89	-0.087
SBSAM	-43.19	2.453	-27.16	-0.070
RAM	-40.05	2.536	-26.30	-0.105
CAM	-41.29	2.921	-28.11	-0.103

温度、冻断强度和转折点温度作为目标数列,沥青各项低温指标作为比较数列,经过计算可得其灰色关联度,结果见表5。由表5可见:沥青低温评价指标与沥青混合料冻断温度、冻断强度及转折点温度的关联程度大致相同,仅在部分低温指标的关联度上有所差异;沥青的低温连续分级温度、玻璃态转变温度、脆点、蠕变速率和耗散能比与混合料的低温性能具有较好的关联性;与冻断温度和转折点温度关联度最好的是 -12°C 下的蠕变速率,这验证了Rys等^[7]的研究成果;与冻断强度关联度最好的是低温连续分级温度;沥青的 m/S 和低温综合柔量参数与混合料低温评价指标关联程度较差,表明经过长期老化后沥青的 m/S 和低温综合柔量参数难以反映沥青混合料的低温性能。

表5 沥青与沥青混合料低温评价指标的灰色关联度

Table 5 Grey correlation degree of low temperature evaluation index of asphalts and asphalt mixtures

Index	$t/^\circ\text{C}$	Correlation degree			Index	$t/^\circ\text{C}$	Correlation degree		
		T_F	σ_F	T_Z			T_F	σ_F	T_Z
S	-12	0.711	0.708	0.704	W_d/W_s	-18	0.849	0.864	0.867
S	-18	0.749	0.709	0.733	W_d/W_s	-24	0.839	0.847	0.858
S	-24	0.742	0.703	0.727	W_d/W_s	-30	0.801	0.841	0.819
S	-30	0.827	0.785	0.802	m/S	-12	0.742	0.768	0.759
m	-12	0.948	0.894	0.940	m/S	-18	0.652	0.671	0.664
m	-18	0.89	0.911	0.910	m/S	-24	0.66	0.687	0.675
m	-24	0.852	0.869	0.873	m/S	-30	0.718	0.716	0.737
m	-30	0.815	0.814	0.832	J_c	-12	0.632	0.624	0.626
T_{LC}		0.929	0.921	0.901	J_c	-18	0.678	0.653	0.676
λ	-12	0.842	0.833	0.829	J_c	-24	0.618	0.622	0.614
λ	-18	0.739	0.736	0.729	J_c	-30	0.708	0.681	0.693
λ	-24	0.753	0.754	0.742	T_g		0.877	0.902	0.897
λ	-30	0.793	0.754	0.782	Brittle point		0.893	0.914	0.916
W_d/W_s	-12	0.915	0.864	0.904	Ductility		0.757	0.717	0.748

3.4.2 FGM(1,1)模型

采用粒子群优化算法确定预测数据与原始数据平均相对误差最小时的阶数 r ,算法的学习因子均取2,惯性权重设为0.8,粒子群规模为50,迭代次数为

1 000, r 的搜索范围设为 $[0,1]$ 。该算法通过Matlab软件实现,计算得到冻断温度、冻断强度、转折点温度的最优阶数分别为0.615 000 0、0.331 000 0、0.649 000 0。

3.4.3 FGM(1,N)模型

通过灰色关联分析法分别选取3个与冻断温度、冻断强度、转折点温度关联度最大的影响因素,建立FGM(1,4)模型,模型的最优阶数通过Matlab软件运行粒子群优化算法,计算得到冻断温度、冻断强度、转折点温度的最优阶数分别为0.469 000 0、0.000 024 5、0.077 700 0。

3.4.4 模型的比较与检验

FGM(1,1)和FGM(1,4)模型预测的冻断温度、冻断强度、转折点温度与实测值的比较见表6~8。由表6~8可见,分数阶灰色预测模型的MAPE均小于10.00%,表明分数阶灰色预测模型对沥青混合料3种低温参数的预测结果有较强的说服力。

表6 FGM(1,1)和FGM(1,4)模型预测的冻断温度与实测值的比较
Table 6 Comparison between predicted T_f from FGM(1,1), FGM(1,4) model and actual value

Type	Actual value/°C	FGM(1,1)		FGM(1,4)	
		Predicted value/°C	Relative error/%	Predicted value/°C	Relative error/%
90#	-40.36	-40.36	0	-40.36	0
SBR	-36.97	-38.45	4.29	-34.61	6.12
SBS	-43.19	-40.19	6.94	-43.19	0
Rubber	-40.05	-41.13	2.71	-40.44	0.96
Cold	-41.29	-41.40	0.26	-41.39	0.25
MAPE			3.55		1.83

表7 FGM(1,1)和FGM(1,4)模型预测的冻断强度与实测值的比较
Table 7 Comparison between predicted σ_f from FGM(1,1), FGM(1,4) model and actual value

Type	Actual value/MPa	FGM(1,1)		FGM(1,4)	
		Predicted value/MPa	Relative error/%	Predicted value/MPa	Relative error/%
90#	2.537	2.537	0	2.537	0
SBR	2.246	2.246	0	2.249	0.15
SBS	2.453	2.381	2.93	2.714	10.62
Rubber	2.536	2.617	3.21	2.650	4.48
Cold	2.291	2.907	0.48	3.446	17.97
MAPE			1.65		8.31

表8 FGM(1,1)和FGM(1,4)模型预测的转折点温度与实测值的比较
Table 8 Comparison between predicted T_z from FGM(1,1), FGM(1,4) model and actual value

Type	Actual value/°C	FGM(1,1)		FGM(1,4)	
		Predicted value/°C	Relative error/%	Predicted value/°C	Relative error/%
90#	-24.51	-24.51	0	-24.51	0
SBR	-23.89	-24.32	1.79	-23.25	2.69
SBS	-27.16	-26.03	4.17	-25.09	7.64
Rubber	-26.3	-27.19	3.40	-26.45	0.57
Cold	-28.11	-27.92	0.69	-27.00	3.95
MAPE			2.51		3.71

对于冻断温度,FGM(1,4)模型的误差明显小于FGM(1,1)模型,仅为1.83%,具有较高的精度,故选

$$\hat{y}_0^i(k+1) = [-40.36 - 142.89y_1^i(k+1) - 1.23y_2^i(k+1) + 61.47y_3^i(k+1)]e^{-2.14k} + 142.89y_1^i(k+1) + 1.23y_2^i(k+1) - 61.47y_3^i(k+1) \quad (8)$$

式中: \hat{y}_0^i 为沥青混合料冻断温度的 r 阶累加生成元素; y_1^i 为长期老化后的沥青在-12℃下蠕变速率的 r 阶累加生成元素; y_2^i 为长期老化后沥青的低温连续分

用FGM(1,4)模型作为冻断温度的预测模型,模型计算式为:

级温度的 r 阶累加生成元素; y_3^i 为长期老化后的沥青在-12℃下耗散能比的 r 阶累加生成元素。

对于冻断强度,FGM(1,4)模型的误差较大,比

FGM(1,1)模型的误差高6.66%,FGM(1,4)模型数据出现了极大的波动性,预测数据难以具备说服力.另外,由于本文采用的沥青为5种不同的沥青,采取FGM(1,1)模型对更多种类的沥青进行预测不具备合理性,因此采用分数阶灰色预测模型对冻断强度的预测还需进一步研究.

对于转折点温度,FGM(1,4)模型的误差为

$$\hat{z}_0^r(k+1) = \left[-24.51 + 20.06y_1^r(k+1) - 0.51z_2^r(k+1) + 16.60z_3^r(k+1) \right] e^{-21714.28k} - 20.06z_1^r(k+1) + 0.51z_2^r(k+1) - 16.60(k+1) \quad (9)$$

式中: \hat{z}_0^r 为沥青混合料转折点温度的 r 阶累加生成元素; z_2^r 为沥青脆点的 r 阶累加生成元素; z_3^r 为长期老化后的沥青在 -18°C 下蠕变速率的 r 阶累加生成元素.

4 结论

(1)通过采用多种沥青低温评价指标对5种沥青的低温性能进行评价,发现90#基质沥青具有最差的低温性能,改性剂的加入改善了沥青的低温性能.

(2)沥青低温连续分级温度、玻璃态转变温度、脆点、长期老化后的蠕变速率和耗散能比与沥青混合料低温评价指标关联程度最好,其中脆点、低温连续分级温度和 -12°C 时的蠕变速率是对沥青混合料低温抗裂性影响最大的3个因素,沥青的 m/S 和低温综合柔量参数难以反映沥青混合料的低温性能.

(3)对于冻断温度和转折点温度,分别通过沥青低温评价指标建立了FGM(1,4)模型,模型精度为优,并且预测结果具备合理性.

参考文献:

- [1] KIM J, ROQUE R, BYRON T. Viscoelastic analysis of flexible pavements and its effects on top-down cracking[J]. Journal of Materials in Civil Engineering, 2009, 21(7):324-332.
- [2] ZENG U I. Low-temperature cracking of polymer-modified asphalt[J]. Materials and Structures, 1998, 31(205):58-63.
- [3] SARKAR A, HAMED I H, HAYATI P. Application of the surface free energy method on the mechanism of low-temperature cracking of asphalt mixtures[J]. Construction and Building Materials, 2021, 268:121194.
- [4] JEO A, JC B, HD B, et al. New innovations in pavement materials and engineering: A review on pavement engineering research 2021[J]. Journal of Transportation Engineering, 2021, 8(6):815-999.
- [5] 罗学东. 基于宏观方法的复合改性沥青混合料低温开裂特性研究[D]. 呼和浩特:内蒙古工业大学, 2021.
LUO Xuedong. Study on low temperature cracking characteristics of composite modified asphalt mixture based on macro meso method[D]. Hohhot: Inner Mongolia University of Technology,

2021. (in Chinese)

3.71%相比FGM(1,1)模型仅高了1.20%,考虑到FGM(1,1)模型的记忆性太强,只考虑了单因素的趋势,忽略了沥青对沥青混合料低温性能起到的作用,同时FGM(1,4)模型的后续预测效果稳定,因此,当FGM(1,4)模型的误差略大于FGM(1,1)模型的误差时,可以选用考虑多变量作用的FGM(1,4)模型作为转折点温度的预测模型,模型计算式为:

- [6] VERVAECKE F, VANELSTRAETE A. Resistance to low temperature cracking of high modulus bituminous binders and mixtures[J]. Road Materials and Pavement Design, 2008, 9 (Suppl 1):163-176.
- [7] RYS D, JACZEWSKI M, PSZCSOLA M, et al. Effect of bitumen characteristics obtained according to EN and superpave specifications on asphalt mixture performance in low-temperature laboratory tests[J]. Construction and Building Materials, 231: 117156.
- [8] 杨丽娟, 龙念泉, 王岚, 等. 基于Burgres模型的温拌胶粉沥青胶浆低温流变特性[J]. 建筑材料学报, 2022, 25(12):1313-1320.
YANG Lijuan, LONG Nianquan, WANG Lan, et al. Low temperature rheological properties of warm mix crumb asphalt mortar based on Burgres model[J]. Journal of Building Materials, 2022, 25(12):1313-1320. (in Chinese)
- [9] 刘佳音. 沥青玻璃化转变温度确定及沥青混合料准脆性行为分析[D]. 大连:大连理工大学, 2017.
LIU Jiayin. Determination of glass transition temperature of asphalt and analysis of quasi brittleness behavior of asphalt mixture [D]. Dalian:Dalian University of Technology, 2017. (in Chinese)
- [10] 申海霞, 段红彩. SBS对改性沥青低温延度的影响[J]. 石油沥青, 2009, 23(6):36-40.
SHEN Haixia, DUAN Hongcai. Effect of SBS on low temperature ductility of modified asphalt[J]. Petroleum Asphalt, 2009, 23(6):36-40. (in Chinese)
- [11] ZHENG C F, LI R M, HU M J, et al. Determination of low-temperature crack control parameter of binding asphalt materials based on gray correlation analysis[J]. Construction and Building Materials, 2019, 217:226-233.
- [12] 王志祥, 李建阁, 张争奇. 集料形态特征对集料-沥青黏附及水稳定性的影响[J]. 建筑材料学报, 2021, 24(5):1039-1047.
WANG Zhixiang, LI Jiange, ZHANG Zhengqi. Effect of aggregate morphology on aggregate asphalt adhesion and water stability [J]. Journal of Building Materials, 2021, 24(5): 1039-1047. (in Chinese)
- [13] 颜可珍, 王道理. 聚合物改性沥青低温性能指标研究[J]. 建筑材料学报, 2020, 23(2):479-484.
YAN Kezhen, WANG Daocheng. Study on low temperature performance index of polymer modified asphalt [J]. Journal of Building Materials, 2020, 23(2):479-484. (in Chinese)