

一种模拟特定区域沥青短期老化的室内试验方法

冯新军,明廷军 编译

(长沙理工大学 交通运输工程学院,湖南 长沙 410114)

摘要:开发了一种与热带地区沥青混合料生产实践相一致的沥青试验室短期老化替代方法。该方法采用 ASTM D2872 试验人工模拟沥青的短期老化,并对老化时间和老化温度进行研究。采用响应面法(RSM)统计技术进行试验设计,分析现场和试验室样品的测试结果,选择合适的试验室方案。基于中心组合法进行试验设计,研究两个基本独立的影响因素:85~175 min 范围内的老化时间,148~178 °C 的老化温度。采用软化点、针入度、64 °C $G^*/\sin\delta$ 和 135 °C 旋转黏度作为 3 种沥青的测试指标。使用 RSM 分析响应以导出数学方程,根据测试结果确定最优的时间和温度。结果表明:马来西亚的日常温度、湿度和紫外线都很高,ASTM D2872 常规短期老化方法可能不足以模拟马来西亚天气条件下沥青的短期老化。基于统计学分析,时间和温度均显著影响短期老化沥青的物理和流变性质。总体而言,除了两种沥青的部分物理性质呈现 2FI(双因素交互作用)和线性模型外,3 种沥青的测试指标均显示为二次模型,由此推荐采用在 170 °C 下进行 135 min 的短期老化试验模拟马来西亚气候条件下施工现场的沥青老化。

关键词: 沥青; 施工老化; 黏度; 旋转薄膜烘箱; 中心组合法

1 前言

沥青和集料在拌和楼拌和过程中受高温影响会开始老化,在整个路面使用过程中,沥青经历两种完全不同的老化过程。混合、摊铺、碾压的过程经历了第一个老化过程,称为短期老化;接下来是在使用寿命期间发生的长期老化,沥青在实际路面温度下以更慢的速率继续硬化。在试验室中,设计加速老化技术,用来模拟两种老化条件下的沥青。目前通用的评价沥青短期老化的试验方法主要有薄膜加热试验(TFOT)和旋转薄膜加热(RTFOT)两种试验方法。

美国加州的 Hveem 于 1963 年提出采用旋转薄膜加热试验来代替薄膜加热试验,主要原因是基于旋转玻璃瓶中的沥青膜的厚度更接近混合料中沥青膜的厚度,到目前为止,RTFOT 是最好的 TFOT 改进方法,能有效地模拟沥青膜的老化过程。JTG F40—2004《公路沥青路面施工技术规范》将 TFOT 和 RTFOT 等效作为沥青短期老化的评价方法。但随后的研究发现 RTFOT 试验也不能完全有效地评价沥青的室内老化性能。

已有几项研究验证了在各种可能条件下旋转薄膜烘箱(RTFO)测试的适用性。例如,在目前的 Superpave 沥青规范中,Hveem 等通过分析经过 RTFO 测试方法老化后的沥青,来评价其抗车辙能力;Li 等进行了大量试验来评价回收的沥青和使用标准试验方法(RTFO 和压力老化)老化的沥青的流变性能,结果表明:回收的和试验室老化的沥青之间存在显著差异;Lee 等使用 RTFO 老化方法研究了 9 种沥青的短期老化效果,然后将试验结果与现场的老化沥青样品进行比较,发现它们之间没有明显的相关性。

多年来,已经运用了各种试验设计软件和数学模型来探究这些局限性并确定在特定条件下模拟老化机理的最佳方法。寻找测试材料最佳条件的常用方法是一次只分析一个时间因素,这种方法在某种程度上是可行的,但它会消耗大量的人力、物力和时间。该文应用响应面法(RSM)来确定模拟现场短期老化的时间和温度的相应组合。RSM 是一种用于设计试验、开发模型和评估试验因素的影响并优化其过程的统计方法,该方法已被有效地应用于一些沥青研究中,如表 1 所述。这些实例对 RSM 的科学支持促进了其在不同学科的应用,RSM 也可以为短期老化过程的开发提供帮助。

表 1 RSM 在沥青研究中的应用

序号	材料	使用的软件	设计因素	观测值数	参与人
1	混合料	Design Expert9.0.6.2	3	5	Nassar et al.
2	混合料	Design Expert	4	6	Hamzah et al.
3	沥青	Design Expert	3	2	Hamzah et al.
4	混合料	—	3	3	Haghshenas et al.
5	混合料	Minitab 15.1.30.0	4	1	Khodaii et al.
6	混合料	MINITAB Software(15)	3	3	Kavussi et al.
7	混合料	MINITAB Software(15)	3	3	Kavussi et al.
8	混合料	Design Expert	3	6	Hamzah et al.
9	混合料	Minitab;Rlease 15	2	3	Khodaii et al.
10	沥青	—	2	2	Valencia et al.

该文提出了一种替代方法,使 ASTM D2872 更准确地模拟选定区域条件的人工短期沥青的老化。在该研究中,独立设计 RTFOT 试验的老化时间和老化温度。RSM 技术用于分析试验室和现场数据的结果以及选择合适的试验室方案。根据中心组合方法设计了两个基本独立的影响因子试验方案,即老化时间和老化温度。采用软化点、针入度、 $64\text{ }^{\circ}\text{C}\text{ }G^*/\sin\delta$ 和 $135\text{ }^{\circ}\text{C}$ 旋转黏度作为评价指标。对所得结果进行方差分析(ANOVA)来确定沥青流变性的重要因素,使用 RSM 分析测试指标与老化时间和温度之间的数学关系,通过优化模型确定与现场结果相似的对应时间和温度。在这种方法中,首先定义用于选择合适时间和温度的目标值,然后根据目标值确定时间和温度的组合。RSM 不仅减少了试验所需的样本数量,而且对在任何选定条件下确定沥青的短期老化性能提供了帮助。

该文首先简要介绍沥青的老化现象;其次提出一

种 RSM 方法设计试验室短期老化方案,以模拟沥青混合料的生产实践;研究温度和时间的交互作用对沥青老化性能的影响。

2 材料和试验步骤

2.1 材料和方法

研究采用了 3 种不同针入度等级的沥青:来自沥青厂 A 的沥青 80/100、来自沥青厂 B 的沥青 80/100 和沥青 60/70。沥青厂 A 位于槟城 Penanti 采石场,沥青厂 B 位于霹雳州太平采石场。根据沥青设备的名称和沥青针入度等级(A80、B80 和 B60)排列沥青序号。采用沥青的针入度和软化点以及旋转黏度和车辙因子($G^*/\sin\delta$))作为评价沥青性能的指标。基于这些参数,确定试验室老化时间和温度。表 2 为根据 ASTM D2872 的原始沥青和 RTFO 老化沥青的流变性能。

表 2 沥青的基本性质和流变性能

沥青	未老化(原始状态)				RTFO 老化			
	针入度/ dmm	软化点/ ℃	$G^*/\sin\delta$ ($64\text{ }^{\circ}\text{C}$)/kPa	$135\text{ }^{\circ}\text{C}$ 的黏 度/($\text{Pa}\cdot\text{s}$)	针入度/ dmm	软化点/ ℃	$G^*/\sin\delta$ ($64\text{ }^{\circ}\text{C}$)/kPa	$135\text{ }^{\circ}\text{C}$ 的黏 度/($\text{Pa}\cdot\text{s}$)
A80	89	46	0.817	0.367	53	49.3	2.018	0.534
B80	86	47	0.964	0.374	46	51.3	2.276	0.559
B60	63	50	1.347	0.490	44	53.0	2.833	0.679

在生产沥青混合料的同时取沥青样品,以确保沥青样品和沥青混合料中采用的沥青是同一批次,将收集的所有沥青储存在密封容器中以使沥青氧化和早期老化最小化。首先从沥青罐中收集未老化的沥青,随后,在生产之后和运输到现场之前将沥青从筒仓中收

集到沥青厂。然后根据 ASTM D5404 标准试验方法通过旋转蒸发仪提取并回收沥青,测试回收沥青的针入度、软化点、黏度、 $G^*/\sin\delta$ 结果如表 3 所示。将 3 种未老化的沥青(A80、B80 和 B60)在试验室中进行不同时间和温度的短期老化试验。

表 3 回收沥青的物理和流变性能

沥青	针入度/ dmm	软化点/ ℃	$G^* / \sin \delta$ (64 ℃)/kPa	135 ℃黏 度/(Pa · s)
A80	36	52	2.78	0.744
B80	32	54	3.54	0.771
B60	28	55	4.56	0.876

2.2 试验设计

根据表 4 设计试验,将所有未老化的沥青在不同

温度和时间 RTFO 中老化。采用中心组合设计 (CCD) 技术评价老化变量对沥青性能的影响, CCD 技术可以减少所研究的沥青总数。如表 5 所示, 根据一些初步结果确定变量的最小和最大水平, 也是 RTFO 可以安全处理的最大时间和温度, 试验设计了时间和温度条件的 9 种组合。CCD 不用来估算试验误差, 因此, 准备 3 个中心点重复来估计观测值建模的试验误差程度, 这个试验设计的中心点对应的是 163 ℃ 和 130 min。11 种老化条件的试验如表 4 所示, 记录每个短期老化沥青的观测值。

表 4 试验设计

沥青	测试 编号	温度/ ℃	时间/ min	观测值			
				针入度/ dmm	软化点/ ℃	$G^* / \sin \delta$ (64 ℃)/kPa	135 ℃黏度/ (Pa · s)
A80	1	178	175	30	58.0	6.321	0.930
	2	148	130	55	49.0	1.905	0.540
	3	148	175	47	51.0	2.813	0.592
	4	163	130	39	51.0	2.759	0.615
	5	163	85	53	49.0	2.018	0.534
	6	148	85	64	49.0	1.750	0.485
	7	178	130	33	54.0	4.367	0.782
	8	163	130	41	51.0	2.757	0.624
	9	178	85	44	52.0	2.661	0.622
	10	163	130	42	52.0	2.500	0.622
	11	163	175	34	55.0	4.009	0.749
B80	1	178	175	28	58.3	6.532	1.050
	2	148	130	44	50.3	2.642	0.600
	3	148	175	40	50.8	3.378	0.653
	4	163	130	40	51.3	3.548	0.692
	5	163	85	46	51.3	2.276	0.559
	6	148	85	47	48.0	2.067	0.542
	7	178	130	33	55.5	4.731	0.858
	8	163	130	38	51.5	3.423	0.699
	9	178	85	41	51.3	3.350	0.682
	10	163	130	40	51.5	3.317	0.680
	11	163	175	32	53.5	4.476	0.792
B60	1	178	175	26	60.0	8.413	1.106
	2	148	130	41	52.8	3.129	0.703
	3	148	175	37	54.0	3.799	0.731
	4	163	130	36	53.5	4.022	0.758
	5	163	85	44	53.0	2.833	0.679
	6	148	85	45	50.5	2.652	0.645
	7	178	130	31	56.0	5.803	0.934
	8	163	130	34	53.0	3.936	0.781
	9	178	85	36	54.3	3.776	0.752
	10	163	130	33	53.5	4.034	0.764
	11	163	175	30	56.0	5.548	0.876

表 5 调查参数水平		
项目	时间/min	温度/℃
最小值	85	148
控制点	130	163
最大值	175	178

2.3 分析方法

采用 RSM 分析观测值并对每个观测值选取适当的数学模型。建模的试验区域由 RTFO 中龄期为 85~175 min(间隔 45 min)和 148~178 ℃(间隔 15 ℃)的沥青组成。预期的观测值可能不一定随所选变量线性变化,因此,CCD 能够在二次或两因子交互模型中对预测的观测值建模。使用方差分析(ANOVA)来检验观测值中的测试因素的显著性。从模型中丢弃不重要的因素,然后,使用 Design Expert 6.0.6 统计软件进行图表编辑。

使用模型的预测观测值来确定时间和温度对应的组合,将试验室测试数据使用期望函数的数值优化来确定时间和温度的最佳组合,对同时满足测试指标目标值的试验因子进行了一系列优化分析。在同步优化中,每个测试指标都分配了低值和高值,然后将目标值记录到反映每个测试指标期望值的期望函数中。对于任何给定的指标,理想的范围是从 0~1,1 表示理想条件,0 表示该值落在理想限度之外。图 1 为一个指标值的个体需求模型。在该研究中,为 3 种测试沥青及其 4 个观测值设计了 12 个单独的期望值图。在此图中,下限和上限值是每个观测值的最小值和最大值,其中值为 1 表示该值等于原始的沥青性能。

根据 Bezerra 等阐述的方法进行同步优化,所有的个体需求函数都被组合成一个整体期望值函数。如方程(1)表示总体期望值函数,目标搜索从随机起点开始并以最大斜率上升到最大值。

$$D=\sqrt[n]{d_1\times d_2\times \cdots d_n}$$

(1)

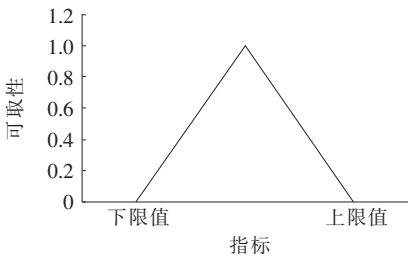


图 1 期望函数的典型形式

式中: n 为优化中包含的观测值的数量; D 为总体期望值函数(各个期望函数的几何平均值); d 为观测值 n 的个体期望函数。

使用 Design-Expert 6.0.6 软件绘制总体期望值函数的三维响应曲面,并确定达到最大期望的测试参数值,然后使用建议的最佳值进行试验验证预测的最佳值。新的试验给出了可以与优化过程的预测值进行比较的实际值,原则上,预测值应与观测值相似。

3 结果与讨论

3.1 老化对针入度和软化点的影响

通常,针入度和软化点可以评估老化对沥青性质的影响,表 4 结果表明:对于所有类型的沥青,随着老化时间和温度的增加,针入度降低,软化点增加;且随着时间的增加,沥青变得更硬。

为了量化老化时间和温度对针入度和软化点的影响,采用 F 检验、失拟检验和 R^2 对所有沥青回归模型(线性,双因子交互作用和二次方程)和拟合函数进行评价。表 6、7 为模型的具体数据,通过较高的 R^2 以及失拟检验的高 p 值分析,沥青 A80 的针入度和软化点建议使用二次模型。失拟检验选择了一种不显著的失拟检验模型(Prob> F 高于 0.05),该模型在 F 检验中也表现出可接受的低 p 值。类似地,分析出沥青 B80 和 B60 建议使用双因素交互作用(2FI)和线性模型。

表 6 基于针入度测试结果的建议模型总结

沥青	分析方法	平方和	DF	均方根	F 值	概率>F	模型类型
A80	回归分析	53.50	2	26.75	10.25	0.017 0	二次型
	残差	4.88	3	1.63			
	失拟检验	8.38	3	2.79	1.20	0.485 2	
	R^2	0.9755					

续表 6

沥青	分析方法	平方和	DF	均方根	F 值	概率>F	模型类型
B80	回归分析	9.00	1	9.00	6.20	0.041 6	2FI
	残差	3.11	3	1.04			
	失拟检验	7.50	5	1.50	1.12	0.532 6	
	R ²	0.958 7					
B60	回归分析	320.67	2	160.33	54.55	<0.000 1	线性
	残差	9.16	3	3.05			
	失拟检验	18.85	6	3.14	1.35	0.485 0	
	R 平方	0.914 6					

表 7 基于软化点的建议模型总结

沥青	分析方法	平方和	DF	均方根	F 值	概率>F	模型类型
A80	回归分析	2.14	2	1.07	6.47	0.041 0	二次型
	残差	0.15	3	0.051			
	失拟检验	0.70	3	0.23	3.70	0.220 2	
	R ²	0.978 9					
B80	回归分析	4.41	1	4.41	5.87	0.045 9	2FI
	残差	2.00	3	0.67			
	失拟检验	5.23	5	1.05	78.50	0.012 6	
	R ²	0.901 6					
B60	回归分析	52.97	2	26.49	31.66	0.000 2	线性
	残差	0.64	3	0.21			
	失拟检验	6.53	6	1.09	13.05	0.072 9	
	R ²	0.859 8					

然后根据表 6、7 中提出的模型进行方差分析(ANOVA),确定显著因素之间的交互作用。表 8 为方差分析结果。由表 8 中可以看出:温度、时间和温度的二阶数对测得的沥青 A80 的针入度有显著影响。低于 0.05 的“Prob>F”值表示统计学上的显著因素之间的交互作用。对于沥青 B80,温度、时间以及时间和温度的交互作用是预测针入度和软化点的重要因素;对于沥青 B60,时间和温度是预测针入度和软化点

的唯一重要因素。

式(2)、(3)表示所提出的针入度和软化点的数学方程式。根据针入度方程中回归系数的负值,一阶时间和温度降低针入度值,而软化点升高。图 2 为沥青 A80 的等高线图,由图 2 可以看出时间和温度对沥青物理性质的影响。B80 和 B60 沥青都用类似的图表示。

$$\begin{aligned} & [40.79-9.83T-8.33t+3.03T^2+2.53t^2+0.75T\cdot t \quad (\text{A80}) \\ \text{针入度(dmm)}= & \begin{cases} 39.00-4.83T-5.67t+1.50T\cdot t & (\text{B80}) \\ 35.73+5.00T-5.33t & (\text{B60}) \end{cases} \end{aligned} \tag{2}$$

$$\begin{aligned} & [51.31+2.50T+2.40t+0.27T^2+0.77t^2+0.92T\cdot t \quad (\text{A80}) \\ \text{软化点(}^\circ\text{C)}= & \begin{cases} 52.12+2.67T+2.00t+1.05T\cdot t & (\text{B80}) \\ 54.24+2.17T+2.03t & (\text{B60}) \end{cases} \end{aligned} \tag{3}$$

表 8 基于沥青物理性质的 ANOVA 结果

沥青类型	观测值	显著模型	平方和	F 值	概率>F
A80	针入度	温度	580.17	129.06	<0.000 1
		时间	416.67	92.69	<0.000 1
		温度+温度	37.34	8.31	0.023 6
	软化点	温度	37.50	220.84	<0.000 1
		时间	34.56	203.53	<0.000 1
		时间+时间	1.96	11.51	0.146 0
B80	针入度	温度+时间	3.42	20.16	0.004 2
		温度	140.17	96.51	<0.000 1
		时间	192.67	132.66	<0.000 1
	软化点	温度+时间	9.00	6.20	0.041 6
		温度	42.67	56.78	0.000 1
		时间	24.00	31.94	0.000 8
B60	针入度	温度+时间	4.41	5.87	0.045 9
		温度	150.00	51.03	<0.000 1
		时间	170.67	58.06	<0.000 1
	软化点	温度	28.17	33.67	0.000 4
		时间	24.81	29.65	0.000 6

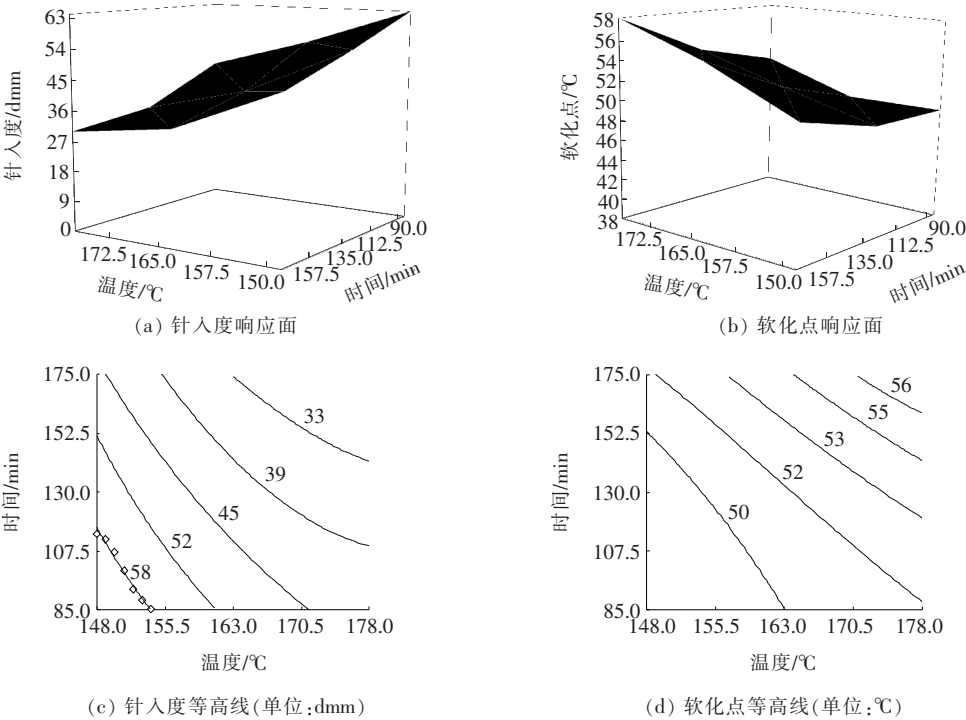


图 2 沥青 A80 的针入度和软化点的响应面和等高线图

3.2 $G^*/\sin\delta$ 和黏度分析

使用黏度和车辙因子 $G^*/\sin\delta$ 来评价沥青的流变性质。表 4 表明:当老化时间和温度升高时, $G^*/\sin\delta$ 和黏度均增加。表 9、10 为预测黏度和 $G^*/\sin\delta$ 的模型,二次模型是该拟合数据的最佳方程,该模型在 F 检验中具有低 p 值,在缺乏拟合检验中具有高 p 值和高 R^2 。模型的 ANOVA 检验结果如表 11 所示。由表 11 可以看出温度、时间、二阶温度以及时间和温度之间的交互作用对 3 种沥青的黏度都有显著影响。重

要因素由概率 $>F$ 值判断,小于 0.05 的概率通常认为是该参数对所检测的观测值具有显著影响的有力证据。这些因素对于预测 $G^*/\sin\delta$ 同样也是重要的。此外,二阶时间因子对预测 A80 和 B60 沥青的 $G^*/\sin\delta$ 也具有重要意义。式(4)、(5)给出了 $G^*/\sin\delta$ 和黏度的统计方程,图 3 为 A80 沥青的响应面和等高线图。从图 3 可以看出,随着老化时间和温度的升高, $G^*/\sin\delta$ 和黏度增加。

表 9 $G^*/\sin\delta$ 的模型概要

沥青类型	分析方法	平方和	DF	均方根	F 值	概率 $>F$	模型类型
A80	回归分析	0.880	2	0.440	18.95	0.004 6	二次型
	残差	0.050	3	0.017			
	失拟检验	0.072	3	0.024	1.09	0.512 3	
	R^2	0.987 1					
B80	回归分析	0.390	2	0.200	16.86	0.006 0	二次型
	残差	0.052	3	0.017			
	失拟检验	0.031	3	0.010	0.78	0.604 7	
	R^2	0.992 7					
B60	回归分析	0.830	2	0.42	72.36	0.000 2	二次型
	残差	5.715×10^{-3}	3	1.905×10^{-3}			
	失拟检验	0.023	3	7.706×10^{-3}	2.70	0.282 0	
	R^2	0.997 9					

表 10 黏度的模型概要

沥青类型	分析方法	平方和	DF	均方根	F 值	概率 $>F$	模型类型
A80	回归分析	2.570×10^{-3}	2	1.285×10^{-3}	13.90	0.009 1	二次型
	残差	4.368×10^{-4}	3	1.456×10^{-4}			
	失拟检验	4.176×10^{-4}	3	1.392×10^{-4}	6.23	0.141 4	
	R^2	0.994 4					
B80	回归分析	5.959×10^{-3}	2	2.979×10^{-3}	34.58	0.001 2	二次型
	残差	3.799×10^{-4}	3	1.266×10^{-4}			
	失拟检验	2.461×10^{-4}	3	8.203×10^{-5}	0.89	0.568 2	
	R^2	0.996 0					
B60	回归分析	4.416×10^{-3}	2	2.208×10^{-3}	14.86	0.007 9	二次型
	残差	5.331×10^{-4}	3	1.777×10^{-4}			
	失拟检验	4.581×10^{-4}	3	1.527×10^{-4}	1.07	0.515 6	
	R^2	0.991 5					

表 11 基于沥青流变性质的 ANOVA 结果

沥青类型	观测值	显著模型	平方和	F 值	>F 概率
A80 沥青	$G^*/\sin\delta$	温度	7.891×10^6	338.26	<0.000 1
		时间	7.513×10^6	322.04	<0.000 1
		二阶温度	4.384×10^5	18.79	0.007 5
		二阶时间	2.182×10^5	9.35	0.028 2
		温度+时间	1.686×10^6	72.27	0.000 4
	黏度	温度	0.086	820.51	<0.000 1
		时间	0.066	633.47	<0.000 1
		二阶温度	2.406×10^{-3}	23.04	0.00 3
		温度+时间	0.010	96.72	<0.000 1
	$G^*/\sin\delta$	温度	7.098×10^6	659.32	<0.000 1
时间		7.466×10^6	693.49	<0.000 1	
二阶温度		3.842×10^5	35.69	0.001 0	
温度+时间		8.752×10^5	81.29	0.000 1	
B80 沥青		温度	0.11	1 240.20	<0.000 1
	时间	0.084	994.76	<0.000 1	
	二阶温度	5.880×10^{-3}	69.23	0.000 2	
	温度+时间	0.017	194.41	<0.000 1	
B60 沥青	$G^*/\sin\delta$	温度	1.179×10^7	2 045.15	<0.000 1
		时间	1.204×10^7	2 087.68	<0.000 1
		二阶温度	5.575×10^5	96.67	0.000 2
		二阶时间	94 956.93	16.47	0.009 7
		温度+时间	3.045×10^6	528.04	<0.000 1
	黏度	温度	0.085	683.57	<.0001
		时间	0.068	545.61	<.0001
		二阶温度	4.415×10^{-3}	35.62	.0010
		温度+时间	0.018	144.86	<.0001

$$\{ 2.69+1.15T+1.12t+0.42T^2+0.29t^2+0.65T\cdot t \quad (\text{A80})$$

$$G/\sin\delta=\{3.39+1.09T+1.12t+0.36T^2+0.051t^2+0.47T\cdot t \quad (\text{B80}) \tag{4}$$

$$\{ 4.00+1.40T+1.42t+0.47T^2+0.19t^2+0.87T\cdot t \quad (\text{B60})$$

$$\{ 0.63+0.12T+0.11t+0.028T^28.053E^{-003}t^2+0.05T\cdot t \quad (\text{A80})$$

$$\text{黏度}(\text{Pa}\cdot\text{s})=\{0.69+0.13T+0.12t+0.048T^2-0.579E^{-003}t^2+0.064T\cdot t \quad (\text{B80}) \tag{5}$$

$$\{ 0.77+0.12T+0.11t+0.04T^2-6.053E^{-004}t^2+0.067T\cdot t \quad (\text{B60})$$

4 优化

对同时满足每个观测值要求的因子组合进行优化分析。为了同步优化,每个目标都分配了低值和高值。在 Design Expert 软件中,每个观测值的目标都包含 5

个选项:零,最大,最小,达标和在指定范围内。如第 2.3 节所述,最终将目标组合成一个总体期望函数,该函数反映了每个观测值的期望范围,期望范围均从 0 到 1,1 表示理想情况,零值表示观测值落在期望范围之外。表 12 为该研究中选择的观测值目标和权重;表 13 为所提出的时间和温度组合的解决方案,即在

RTFO 中 170 ℃下老化 135 min,这些解决方案对应于现场的实际短期老化条件。表 13 还给出了针入度值、软化点、 $G^*/\sin\delta$ 和黏度的预测值。图 4 为整体期望函数的三维期望响应面,每个等高线对应于响应面

的特定高度,从图 4 可以获得最大期望值,沥青在最优老化时间和温度下老化结果见表 14,由表 14 可以看出:表 13 中的预测值与表 14 中的观察值非常相似。

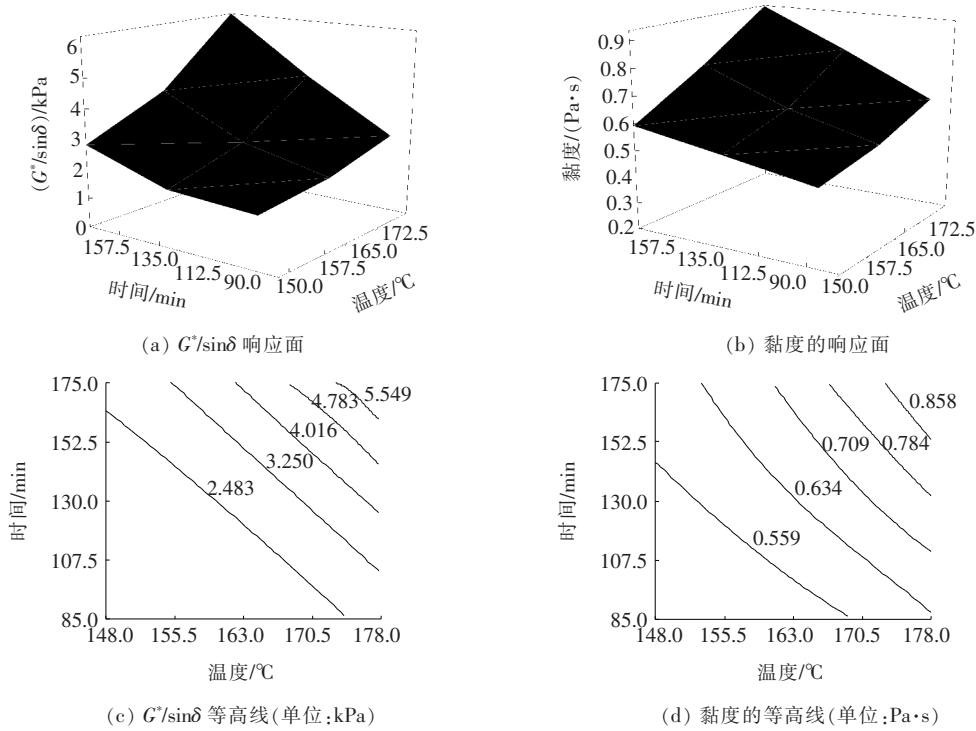


图 3 A80 的 $G^*/\sin\delta$ 和黏度的响应面和等高线图

表 12 数值优化的选定标准,目标和权重

观测值 标准	A80		B80		B60	
	目标	权重	目标	权重	目标	权重
温度	在范围内	不适用	在范围内	不适用	在范围内	不适用
时间	在范围内	不适用	在范围内	不适用	在范围内	不适用
针入度	达标	1	达标	1	达标	1
软化点	达标	1	达标	1	达标	1
$G^*/\sin\delta$	达标	1	达标	1	达标	1
黏度	达标	1	达标	1	达标	1

表 13 基于期望性建议时间和温度组合的解决方案

沥青	针入度值/ dmm	软化点/ ℃	$(G^*/\sin\delta)/$ kPa	黏度/ (Pa·s)
A80	37	53	3.463	0.704
B80	36	54	4.131	0.771
B60	33	55	4.940	0.849

注:老化温度 170 ℃;老化时间 135 min;可取性为 0.857。

期望函数会随着选择的目标不同而改变。由于流变和黏度的敏感度可能优于针入度和软化点,因此在改变 $G^*/\sin\delta$ 和黏度的权重情况下再次试验(表 15)。在这种情况下,针入度和软化点的权重分配值为 1,而黏度和 $G^*/\sin\delta$ 分配值为 2,新解决方案(172 ℃、129 min)见表 16。当指标的权重发生变化时,解决方案略有不同,这表明决策过程可能会影响到解决方案。

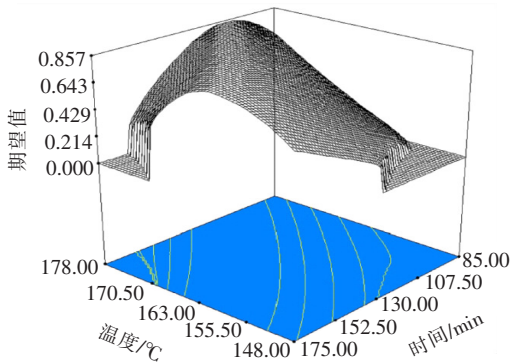


图 4 基于温度和时间的期望等高线图

表 14 验证建议的时间和温度组合

沥青	针入度值/	软化点/	$(G^*/\sin\delta)/$	黏度/
	dmm	℃	kPa	(Pa·s)
A80	38	53	3.725	0.722
B80	36	54	4.347	0.784
B60	34	55	4.419	0.852

注:老化温度 170 ℃;老化时间 135 min。

5 结论

(1) 应用 RSM 建立数学关系,以确定与现场实际

表 15 数值优化的新标准选择方案

观测值	A80		B80		B60	
标准	目标	权重	目标	权重	目标	权重
温度	在范围内	不适用	在范围内	不适用	在范围内	不适用
时间	在范围内	不适用	在范围内	不适用	在范围内	不适用
针入度	达标	1	达标	1	达标	1
软化点	达标	1	达标	1	达标	1
$G^*/\sin\delta$	达标	2	达标	2	达标	2
黏度	达标	2	达标	2	达标	2

表 16 新解决方案

沥青	针入度值/	软化点/	$(G^*/\sin\delta)/$	黏度/
	dmm	℃	kPa	(Pa·s)
A80	38	53	3.411	0.703
B80	36	54	4.114	0.771
B60	33	55	4.898	0.849

注:可取性为 0.800;老化温度为 172 ℃;老化时间为 129 min。

相对应的时间和温度组合。它还可以量化不同短期老化条件下沥青的物理和流变性质,是确定选定区域条件的试验室短期老化参数的快速工具,其结果优于 ASTM D2872 中规定的常规时间(85 min)和温度(163 ℃)。在马来西亚选定的热带条件下,建议的温度和时间为 170 ℃,持续时间为 135 min。这种方法也可用于其他国家或地区。

(2) 研究表明:时间和温度是影响短期老化沥青的物理和流变性质的重要因素。当老化时间和温度升

高时,沥青的软化点、 $G^*/\sin\delta$ 和黏度均增加,而针入度降低。

(3) 3 种沥青都显示出 Superpave 参数的二次模型,包括黏度和 $G^*/\sin\delta$,这为沥青的经典性质提供了不同的数学方程式。沥青性能也受老化后沥青中化学成分变化的影响,评价这些变化的一种方法是使用傅里叶变换红外(FTIR)测试。该文仅探讨沥青的物理和流变性质对优化解决方案的影响,考虑到沥青的化学成分,建议使用一些化学测试,如 FTIR 测试,以评价老化后发生的化学变化。

——编译自:Noor Halizah Abdullah, Meor Othman Hamzah, Babak Golchin, et al. An Alternative Protocol to Artificially Simulate Short-Term Ageing of Binders for Selected Regional Condition[J]. Construction and Building Materials, 2018(161):654—664.