

doi:10.11835/j.issn.1000-582X.2021.051

基于 180 s 劲度模量的低温开裂指数预测

崔世彤¹, 易军艳², 冯德成², 赵 含³, 孙志棋⁴

(1. 中铁二院工程集团有限责任公司, 成都 610031; 2. 哈尔滨工业大学 交通科学与工程学院, 哈尔滨 150090;
3. 吉林省交通规划设计院, 长春 130021;
4. 石家庄铁道大学 省部共建交通工程结构力学行为与系统安全国家重点实验室, 石家庄 050043)

摘要:提出了一种通过材料性能测试, 预测 5~10 年状况下沥青路面实际开裂的方法。依托开裂指数同沥青材料低温性能的关系, 利用 CAM 模型(一种数学模型)拟合得到了 5 类常用沥青的 180 s 劲度模量值, 预测并提出了 PAV(压力老化)状态下各类沥青的开裂指数。通过数据分析, 验证了该种模拟方式预测的准确性。借助长吉高速实地芯样开裂情况调研, 验证 CI 值(低温开裂指数)对沥青路面实际开裂水平的预测效果。结果表明, CAM 模型下得到的沥青梁 180 s 模量计算方法简单, 数据置信度高, 预测得到的 SBS 改性沥青开裂指数与路面实际开裂水平一致, 证明了利用沥青材料性能预测路面实际抗裂能力这一方法的可行性。依据规范提法, 给出了五类北方常用沥青的 CI 值参考区间。

关键词:道路工程; 低温开裂指数 CI; 180 s 劲度模量; BBR 试验; CAM 模型

中图分类号: U414

文献标志码: A

文章编号: 1000-582X(2022)11-095-08

Prediction of low-temperature cracking index based on 180 s stiffness modulus

CUI Shitong¹, YI Junyan², FENG Decheng², ZHAO Han³, SUN Zhiqi⁴

(1. China Railway Eryuan Engineering Group Co. Ltd., Chengdu 610031, P. R. China;
2. School of Transportation Science and Engineering, Harbin Institute of Technology, Harbin 150090, P. R. China;
3. Jilin Province Transportation Planning and Design Institute, Changchun 130021, P. R. China;
4. State Key Laboratory of the Structural Mechanics and Behavior of Traffic Engineering and System Security, Shijiazhuang Railway University, Shijiazhuang 050043, P. R. China)

Abstract: This paper proposes a method to predict the actual cracking of the asphalt pavement under the condition of 5 to 10 years through the material performance test. Based on the relationship between the cracking index and the low-temperature performance of asphalt materials, the 180 s stiffness modulus values of 5 types of commonly used asphalts are obtained by fitting the CAM model, and the cracking indexes of various asphalts under the PAV state are predicted and proposed. The accuracy of this simulation method is verified by actual data. The investigation on the cracking situation of the core samples of the Changji Expressway supports the prediction effect of the CI value on the actual cracking level of the asphalt

收稿日期: 2021-02-22 网络出版日期: 2021-04-08

基金项目: 国家自然科学基金面上项目(51878229)。

Supported by National Natural Science Foundation of China(51878229).

作者简介: 崔世彤(1996—), 男, 硕士研究生, 助理工程师, 主要从事道路设计与研究工作, (E-mail)1670794228@qq.com.

pavement. The results show that the 180 s modulus calculation method of the asphalt beam obtained under the CAM model is simple and the data reliability is high. The predicted SBS modified asphalt cracking index is consistent with the actual cracking level of the pavement, which also proves the feasibility of the use of material performance to predict the actual crack resistance of the asphalt pavement. According to the standard practice, the CI values of five types of asphalt commonly used in northern China are given.

Keywords: pavement engineering; low temperature cracking index CI; 180 s stiffness modulus; BBR test; CAM model

《公路沥青路面设计规范》(JTG D50—2017)中首次引入低温开裂指数(CI)指标进行沥青面层低温验算,并以此作为季冻区沥青材料低温能力评价依据^[1]。该指标的提出,标志着我国沥青路面低温设计方法由单指标体系过渡为多指标设计,也为季节性冻土地区低温抗裂研究提供了全新的思路^[2]。

但 CI 指标在工程指导中仍未得到广泛应用。主要受到两方面制约:一方面,规范提供的公式中,低温开裂指数由材料低温劲度模量、路面低温设计温度等参数决定。由于采样模式限制,研究人员无法直接通过试验得到 180 s 劲度模量数据,现条件下 CI 指标计算困难。另一方面,由于低温开裂指数仍属新的指标,尚无充分工程实践证明其低温预测的准确性,研究人员对其评价能力存在争议。因此,有必要开展针对该指标的深入研究。文中引入 CAM 模型,拟合得到沥青梁 180 s 低温劲度模量。依托多种常见沥青的 BBR 实测数据,对比分析广义 Voilg 模型、CAM 模型、幂函数等模型,认为 CAM 模型对劲度模量具有良好的拟合效果。依托长吉高速实际调研及取样,提取沥青进行 BBR 试验加载,拟合模量并计算对应 CI 值,通过与路面实际开裂水平对比,验证了低温开裂指数指标对路面实际开裂水平的预测能力,根据所提方法给出了 5 类常用沥青的开裂指数预测结果。

1 模量拟合及 CI 计算

1.1 低温开裂指数指标

低温开裂指数(CI)是指路面结构在竣工后所产生的横向裂缝条数。实际验收时以公路平面 100 m 作为一个调查单元,单元内整幅裂缝记为 1 条,半幅裂缝计为 0.5 条,不超过单车道宽度的裂缝不计入统计。规范要求,高速及一级公路的 CI 值应小于 3 条,二级公路小于 5 条,三四级公路小于 7 条^[3]。开裂指数作为表征沥青面层低温收缩开裂程度的重要指标,将沥青路面的实际路用表现同材料性能测试直接关联,加强了室内试验结果对工程中沥青品种选择的指导意义。

该指标以 Haas 模型为理论依据^[4-8],综合考虑了路基材料、路面材料与结构对低温性能的影响,指标计算公式为

$$CI = 1.95 \times 10^{-3} S_i l g_b - 0.075(T + 0.07h_a) l g_{s_i} + 0.15, \quad (1)$$

式中: T 为路面结构低温设计温度, $^{\circ}\text{C}$,一般指工程所在地区连续 10 年最低气温平均值; S_i 为面层沥青 BBR 加载下 180 s 时蠕变劲度,MPa,该值需要利用插值等方式获得; h_a 表示沥青结合料类材料层厚度,mm; b 为路基类型参数,其中,砂 $b=5$,粉质黏土 $b=3$,黏土 $b=2$ 。

1.2 模量拟合方式

开裂指数计算过程中的模量数据需要依托 BBR 试验获得。针对 BBR 试验,国内常用的 Cannon 热弯式弯曲梁流变仪仅能采集 6 个时刻的模量数据,即:8 s、15 s、30 s、60 s、120 s、240 s,无法直接获得公式中推荐的 180 s 劲度模量数据^[9]。路面规范及现有研究未涉及该指标的计算方式,工程实践中也未总结出有效的拟合方法。文中力求得出一种力学原理明确、计算方法简单、数据准确度高的 180 s 模量拟合方法。在沥青材料的流变曲线模拟中,普遍应用了力学模型及数学模型^[10-12]。其中,力学模型以粘弹原理为基础^[13],主要包括广义、狭义状态下的 Maxwell 模型和 Voilg 模型。上述模型都是线性粘弹性模型,在一定程度上能够表征出材料所经历的力学过程变化。相较于广义 Maxwell 模型,Voilg 模型对于蠕变类试验具有更好的模拟效

果^[14-16]。而数学模型主要有 CA 模型、CAM 模型、CAS 模型、DS 模型等,这几类模型拟合精度更高,常用于沥青模量主曲线计算^[17]。文中选用 Voilg 模型、CAM 模型展开拟合研究;为考虑工程计算简便性,同步分析了幂函数下 180 s 模量的拟合值。

借助广义 Voilg 模型在时域范围内蠕变柔量的计算公式,进行 $S-t$ 曲线的迭代拟合,迭代关系式以 Prony 级数形式表示,即

$$D(t) = \frac{1}{E_1} + \sum_{i=1}^n \frac{1}{E_i} (1 - e^{-\frac{t}{\eta_i}}) + \frac{t}{\eta_0} \quad (2)$$

由于数据采集点为 6 个,受该条件限制,模型中的 Voilg 单元仅能取 $n=1$,将拟合模型降阶为四参数流体 Burgers 模型^[18-19],简化得到

$$S(t) = S_0 - S_1 e^{-\frac{t}{A_1}} + A_0 t, \quad (3)$$

式中: $S(t)$ 为 t 时刻沥青小梁劲度模量值,MPa;其他参数为拟合参数。

CAM 模型对 BBR 试验、DSR 试验得到的模量数据具有较好的模拟效果,文中该模型的拟合公式为

$$E(t) = E_{\text{glassy}} [1 + (\zeta/\lambda)]^{-\kappa/\beta}, \quad (4)$$

式中: E_{glassy} 一般取 3 000 MPa; ζ 为加载时间,其余均为拟合参数。

幂函数拟合公式为

$$E(t) = A \times t^{A^2}. \quad (5)$$

式中:其他参数均为拟合参数。利用 Origin 软件迭代拟合,容差值为 10^{-9} ,迭代次数选择为 5 次。

2 拟合方式验证

2.1 拟合准确性验证

为验证 3 类拟合方程对 180 s 劲度模量的模拟效果,选取 5 类常见基质或改性沥青进行试验分析。对上述沥青进行短期 TFOT 老化、长期 PAV 老化等,将老化后的沥青分别开展 BBR 测试,如图 1 所示。按照 PG 分级温度要求,试验温度分别为 $-12\text{ }^\circ\text{C}$ 、 $-18\text{ }^\circ\text{C}$ 、 $-24\text{ }^\circ\text{C}$,平行件数量为 2,试验共得到 BBR 加载曲线 150 条,部分试件加载曲线如图 2 所示。



图 1 BBR 加载

Fig. 1 BBR loading

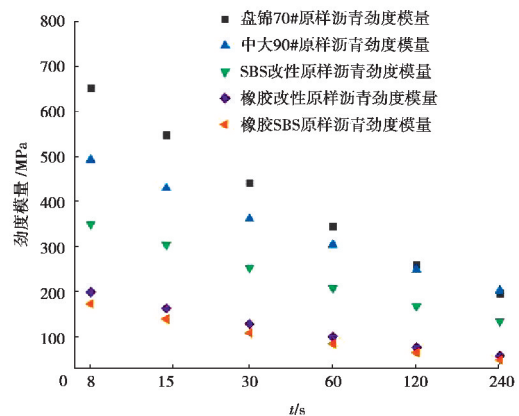


图 2 $-18\text{ }^\circ\text{C}$ 原样沥青加载曲线

Fig. 2 $-18\text{ }^\circ\text{C}$ Asphalt loading curve

利用 Origin 软件拟合得到各温度下劲度模量曲线,利用迭代法求解得到模量曲线的主要参数。迭代时容差值设置为 10^{-9} ,迭代次数为 5 次。以 $-18\text{ }^\circ\text{C}$ PAV 老化后的盘锦 70 # 沥青为例,拟合函数如表 1 所示。

表 1 盘锦 70#PAV 老化沥青拟合结果

Table 1 Fitting results of Panjin 70 #PAV aged asphalt

函数类型	拟合函数	R^2	残差平方和
幂函数	$S(t)=1\,532.591 \times t^{-0.254}$	0.990	1\,815.012
CAM 模型	$S(t)=3\,000 \times \left[1 + \left(\frac{t}{21.027} \right)^{0.237} \right] - \frac{0.488}{0.237}$	0.999	115.69
Burgers 模型	$S(t)=453.537 + 472.583 \times e^{-\frac{t}{43.289}} - 0.373 \times t$	0.993	969.21

由表 1 可知,CAM 模型的预测准确性最高,决定系数(R^2)接近 1,预测值与真值间差异极小;Burgers 模型同样取得了良好的拟合效果,能够满足工程应用的各类需求;幂函数残差平方和稍大。

其它各类沥青梁的拟合结果与上例类似。3 种方法中,CAM 模型兼具准确度高、计算简单明了等优势,能够同时满足实际工程中沥青质量筛选要求及科学研究需要。幂函数模型精度虽低于其他方法,但决定系数仍大于 0.99,同时兼具计算简单、易于操控等优势,也可以在精度要求不高时使用。建议运用 CAM 模型开展模量室内研究,运用幂函数进行路面工程指导应用。

2.2 开裂系数指标评价能力验证

以长吉高速为样本,于工程部分路段进行调研取芯,对比实际路面 CI 值与芯样试验计算得到的 CI 值间差异,以探求该指标对沥青路面实际开裂水平的预测能力。调研路段目前已通车,研究选取路面开裂间距为 8~15 m、15~25 m、25~35 m、35~50 m 的 4 处位置,取芯点为外侧行车道边 0.5 m 处,芯样样本为 SBS 改性沥青路面上面层,路面厚度为 5 cm,路基土为砂土。调研路段如图 3 和图 4 所示。



图 3 长吉高速沥青表面层贯穿裂缝

Fig. 3 Through cracks in the asphalt surface layer of Changji Expressway



图 4 沥青混合料芯样

Fig. 4 Asphalt mixture core sample

经过抽提蒸馏,将 4 个路段的沥青芯样进行 BBR 加载。利用 CAM 模型得到 180 s 模量,并换算成 CI 值,如表 2 所示。

表 2 实际道路芯样的 CI 预测结果

Table 2 CI prediction results of actual road core samples

路段开裂间距/m	实际 CI 值	预测 CI 值
8~15	6~10	5.67
15~25	4~6	4.57
25~35	3~4	3.803
35~50	2~3	2.92

由表 2 可知,拟合 CI 值符合路面实际开裂现状,能够验证该指标较好的低温评价能力。

3 北方常用沥青低温开裂系数预测

以文中参考的 5 类沥青为样本,通过 PAV 老化模拟沥青材料长期使用后的状态。给出了北方常用基质沥青、改性沥青的低温开裂系数预测结果,以期通过该结果指导季冻区沥青路面工程低温评价选择。

3.1 180 s 模量参考区间

针对 5 类北方常用沥青,计算了 PAV 老化后的 180 s 劲度模量,依据具体数值给出各类沥青的模量参考区间,如表 3 所示。

表 3 PAV 老化沥青 180 s 弯曲模量取值范围

Table 3 Range of 180 s flexural modulus of PAV aged asphalt

沥青种类	蠕变劲度模量/MPa		
	-12 °C	-18 °C	-24 °C
70# 沥青	100~120	290~310	500~530
90# 沥青	80~100	260~280	460~490
SBS 改性沥青	40~50	140~160	400~430
橡胶改性沥青	30~40	100~120	240~260
橡胶 SBS 复合改性沥青	20~30	70~90	150~170

3.2 开裂指数参考范围

依据部分工程实例,将路面表面层厚度定为 4 cm。应用表 4 数据和公式分析不同沥青和低温设计温度下,常用沥青低温开裂指数。不同路基类型沥青表面层低温开裂指数计算结果,如表 4~表 6 所示。

表 4 砂土路基表面低温开裂指数

Table 4 Low-temperature cracking index of sand roadbed surface

沥青种类	设计温度/°C					
	-22		-28		-34	
	下限	上限	下限	上限	下限	上限
70# 沥青	3.17	3.31	5.20	5.28	7.15	7.25
90# 沥青	3.00	3.17	5.07	5.16	7.01	7.11
SBS 改性沥青	2.51	2.66	4.40	4.53	6.78	6.90
橡胶改性沥青	2.32	2.51	4.07	4.24	6.05	6.16
橡胶 SBS 复合改性沥青	2.05	2.32	3.73	3.97	5.45	5.60

表 5 粉质黏土路基表面低温开裂指数

Table 5 Low-temperature cracking index of silty clay roadbed surface

沥青种类	设计温度/°C					
	-22		-28		-34	
	下限	上限	下限	上限	下限	上限
70 # 沥青	3.12	3.26	5.07	5.15	6.93	7.02
90 # 沥青	2.96	3.12	4.96	5.04	6.81	6.90
SBS 改性沥青	2.49	2.64	4.34	4.46	6.61	6.71
橡胶改性沥青	2.30	2.49	4.02	4.19	5.94	6.04
橡胶 SBS 复合改性沥青	2.04	2.30	3.70	3.93	5.38	5.53

表 6 黏土路基表面低温开裂指数

Table 6 Low-temperature cracking index of clay roadbed surface

沥青种类	设计温度/°C					
	-22		-28		-34	
	下限	上限	下限	上限	下限	上限
70 # 沥青	3.09	3.21	4.97	5.04	6.76	6.84
90 # 沥青	2.94	3.09	4.87	4.94	6.65	6.73
SBS 改性沥青	2.48	2.63	4.29	4.41	6.47	6.56
橡胶改性沥青	2.29	2.48	3.99	4.15	5.86	5.95
橡胶 SBS 复合改性沥青	2.04	2.29	3.68	3.90	5.33	5.47

参考吉林省沥青路面结构设计规范, 该省最冷月平均气温一般在 $-14\text{ }^{\circ}\text{C} \sim -18\text{ }^{\circ}\text{C}$, 沥青低温设计温度最低可达 $-30\text{ }^{\circ}\text{C}$ 。结合《公路沥青路面设计规范》(JTG D50—2017) 中关于 CI 值的要求, 认为基质沥青难以满足该地区高速公路、一级、二级公路设计要求, 对于高等级公路, 可以使用 SBS 改性沥青, 但如有条件推荐使用含橡胶粉的改性沥青。

4 结 论

基于沥青路面规范低温抗裂要求, 得到了一种拟合 180 s 劲度模量的方法。通过实际路面工程验证了 CI 值对沥青路面路用性能的评价能力, 给出了北方地区常用沥青的低温开裂指数参考区间。具体得出结论:

1) CAM 模型能够较好地反映 180 s 沥青梁劲度模量, 基本能够满足实际工程和实验室研究需要; 幂函数等简单函数拟合精度总体也能达到要求。

2) 低温开裂指数指标基本能够反映各类沥青低温性能差异, 试验室拟合出的 CI 数值与路面实际开裂状况较吻合, 验证了现有开裂指数指标评价体系的准确性。

3) 得出了 3 种温度、多种路基类型下, 基质沥青、改性沥青的 CI 值, 为路面工程沥青品种选用提供了取值参考。

参考文献:

- [1] 王亨庭,冯德成,栾海,等. 沥青路面低温开裂指数对技术状况评定及养护成本的影响分析[J]. 公路, 2019, 64(3): 280-283.
Wang H T, Feng D C, Luan H, et al. Analysis on the influence of asphalt pavement low temperature cracking index on evaluation of technical condition and maintenance cost[J]. Highway, 2019, 64(3): 280-283. (in Chinese)
- [2] 马宏岩,王东升,冯德成,等. 寒冷地区沥青路面老化材料的低温性能评价[J]. 功能材料, 2015, 46(24): 24074-24077, 24082.
Ma H Y, Wang D S, Feng D C, et al. Verification of low temperature performance of asphalt pavement aging material in cold regions[J]. Journal of Functional Materials, 2015, 46(24): 24074-24077, 24082. (in Chinese)
- [3] 李志栋,黄晓明. 应用 Superpave 沥青标准预测低温开裂[J]. 中外公路, 2004, 24(3): 100-103.
Li Z D, Huang X M. Application of superpave asphalt standard to predict low-temperature cracking[J]. Journal of China & Foreign Highway, 2004, 24(3): 100-103. (in Chinese)
- [4] 冯德成,郑天鸣,高畅. 沥青路面低温开裂预估模型及其适用性分析[J]. 公路交通科技, 2007, 24(3): 1-4.
Feng D C, Zheng T M, Gao C. Low temperature crack predicting model for asphalt pavement and its application[J]. Journal of Highway and Transportation Research and Development, 2007, 24(3): 1-4. (in Chinese)
- [5] R C G Hass,李福普. 沥青路面低温收缩开裂的设计方法[J].石油沥青,1994,8(2):41-49.
R C G Hass, Li F P. Design method for low-temperature shrinkage and cracking of asphalt pavement[J]. Petroleum Asphalt, 1994, 8(2): 41-49. (in Chinese)
- [6] R C G Hass. A method of design asphalt pavements to minimize low-temperature shrinkage cracking[R]. Washington D C: The Asphalt Institute Research Report RR-73-1, 1973.
- [7] Mihai O. Low temperature cracking of asphalt concrete pavements[R].Minnesota:University of Minnesota Department of Civil Engineering, 2004.
- [8] Kanabar A. Physical and chemical aging behavior of asphalt cements from two northern ontario pavement[D]. Kingston, Ontario, Canada: Queen's University Master's Thesis,2010.
- [9] 冯德成,崔世彤,易军艳,等. 基于 SCB 试验的沥青混合料低温性能评价指标研究[J]. 中国公路学报, 2020, 33(7): 50-57.
Feng D C, Cui S T, Yi J Y, et al. Evaluation index of low-temperature asphalt mixture performance based on semi-circular bending test[J]. China Journal of Highway and Transport, 2020, 33(7): 50-57. (in Chinese)
- [10] 薛忠军,张肖宁,詹小丽,等. 基于蠕变试验计算沥青的低温松弛弹性模量[J]. 华南理工大学学报(自然科学版), 2007, 35(2): 64-68.
Xue Z J, Zhang X N, Zhan X L, et al. Calculation of low-temperature relaxed modulus of elasticity for bitumen via creep test[J]. Journal of South China University of Technology (Natural Science Edition), 2007, 35(2): 64-68. (in Chinese)
- [11] 许苑,罗蓉,冯光乐. 基于 CAM 模型的改性沥青主曲线评价[J]. 武汉理工大学学报(交通科学与工程版), 2017, 41(3): 497-500.
Xu Y, Luo R, Feng G L. Evaluation of master curve of modified binders based on CAM model[J]. Journal of Wuhan University of Technology (Transportation Science & Engineering), 2017, 41(3): 497-500. (in Chinese)
- [12] Hesp S A M, Subramani S K. Another look at the bending beam rheometer for specification grading of asphalt cements [R]. Queen's University Research Report Kingston (Ontario, Canada): Queen's University, 2009.
- [13] 董雨明. 硬质沥青及其混合料流变特性与低温性能研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2013.
Dong Y M. Research on rheological properties and low temperature performance of hard asphalt and its mixture[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2013. (in Chinese)
- [14] 张肖宁,尹应梅,邹桂莲. 不同空隙率沥青混合料的粘弹性能[J]. 中国公路学报, 2010, 23(4): 1-7.
Zhang X N, Yin Y M, Zou G L. Viscoelastic performance of asphalt mixture with different void contents[J]. China

- Journal of Highway and Transport, 2010, 23(4): 1-7. (in Chinese)
- [15] 孙依人. 沥青混合料黏弹性表征及细观力学预测[D]. 大连: 大连理工大学, 2017.
Sun Y R. Viscoelastic characterization and mesomechanical prediction of asphalt mixture[D]. Dalian: Dalian University of Technology, 2017. (in Chinese)
- [16] Asgharzadeh S M, Tabatabaee N, Naderi K, et al. Evaluation of rheological master curve models for bituminous binders [J]. Materials and Structures, 2015, 48(1/2): 393-406.
- [17] Huang B S, Li G Q, Shu X. Investigation into three-layered HMA mixtures[J]. Composites Part B: Engineering, 2006, 37(7/8): 679-690.
- [18] Shu X, Huang B S. Dynamic modulus prediction of HMA mixtures based on the viscoelastic micromechanical model [J]. Journal of Materials in Civil Engineering, 2008, 20(8): 530-538.
- [19] 周骛, 谢发祥, 章登精, 等. 基于修正 Burgers 模型的浇筑式沥青混合料黏弹性参数确定方法[J]. 林业工程学报, 2017, 2(3): 143-149.
Zhou A, Xie F X, Zhang D J, et al. Viscoelastic parameters determination method of pouring type asphalt mixture based on modified Burgers model[J]. Journal of Forestry Engineering, 2017, 2(3): 143-149. (in Chinese)

(编辑 陈移峰)