

沥青临界开裂温度的研究

詹小丽¹, 张肖宁², 卢亮², 薛忠军¹

(1. 哈尔滨工业大学交通科学与工程学院 哈尔滨市 150090;

2 华南理工大学交通学院 广州市 510640)

摘 要: 沥青的临界开裂温度是 AASHTO Mpl a 规范提出的沥青低温评价指标, 是根据弯曲梁流变仪和直接拉伸仪的结果经过数据回归计算得到的。按照沥青临界开裂温度的计算过程进行了试验, 并对结果进行了分析; 对沥青的劲度模量主曲线的拟合模型进行了研究, 分析了降温速率和收缩系数对沥青临界开裂温度的影响, 结果表明计算临界开裂温度的方法需要进一步改善。

关键词: 低温性能; 临界开裂温度; 劲度模量; 降温速率; 收缩系数

沥青的临界开裂温度(T_{cr})是 AASHTO Mpl a 规范提出的评价沥青低温性能的指标。临界开裂温度是依据 Bouldin et al. (2000) 建立的一个力学模型计算的, 采用弯曲梁流变仪(BBR)试验的流变数据去预估温度应力, 直接拉伸(DT)试验的破坏数据去预估破坏应力, 在温度应力和破坏应力相等时的温度即为临界开裂温度^[1,2]。临界开裂温度的计算方法通过建立沥青的温度应力和破坏强度的数学模型的方式得到, 对沥青低温性能的预测更加直观。

虽然临界开裂温度使用起来简单、直观, 但在计算临界开裂温度的过程中, 存在很多需要进一步探究的问题: 其中比较显著的是在计算温度应力的过程中, 采用的是固定的降温速率和收缩系数, 假定降温速率为 $1\text{ }^{\circ}\text{C/h}$, 收缩系数为 $1.7 \times 10^{-4}/^{\circ}\text{C}$, 这些假

设条件对临界开裂温度的结果是否有影响, 国内未见公开发表文献讨论, 需要进一步的验证。本文针对这两点假设条件是否会对沥青的临界开裂温度结果产生影响, 选用了 6 种沥青进行了室内试验, 并对沥青临界开裂温度的计算过程和试验结果进行了分析。

1 材料与试验

本文选用 90 号、110 号和 140 号等 3 种标号不同的基质沥青, 按 4% 的改性剂掺量制备 SBS 改性沥青^[3]。采用经过旋转薄膜烘箱(RTFOT)和压力老化箱(PAV)老化后的沥青胶结料, 在 $-12\text{ }^{\circ}\text{C}$ 和 $-18\text{ }^{\circ}\text{C}$ 对以上 6 种沥青进行 BBR 和 DT 试验, 试验结果见表 1。

表 1 BBR 和 DT 试验结果

试验	温度/℃	项目	90 号	110 号	140 号	90 号+4%	110 号+4%	140 号+4%
BBR	-12	S/MPa	219	160	175.5	218	188	107
		m	0.38	0.403 5	0.366 5	0.363	0.373	0.424
	-18	S/MPa	382	365	393	364	393.5	285
		m	0.289	0.313 5	0.282 5	0.271	0.301	0.34
DT	-12	应力/MPa	3.29	3.11	2.75	2.87	3.29	3.16
		应变/%	1.03	1.44	1.14	0.8	1.43	5.28
	-18	应力/MPa	3.93	4.06	2.96	3.18	3.88	2.58
		应变/%	0.48	0.68	0.48	0.41	0.6	0.56
PG 低温分级/℃			-22	-22	-22	-22	-22	-28

2 沥青临界开裂温度的计算

在计算沥青临界开裂温度时,首先选择两个试验温度进行BBR 试验,使沥青 60 s 的劲度模量值分布在 300 MPa 左右;根据不同温度下的劲度模量曲线,通过时温转换原则可以得到参考温度下的劲度模量主曲线;根据蠕变柔量和松弛模量之间的关系^[4],可以得到松弛模量的主曲线,利用时温转换原则可以得到不同温度下的松弛模量曲线;根据不同温度下的松弛模量曲线,在假定的降温速率和收缩系数下,计算降温过程中产生的温度应力^[5],将计算的温度应力乘以路面常数得到沥青路面的温度应力,通过DT 试验的破坏结果可以得到沥青的破坏强度曲线。将温度应力曲线与破坏强度曲线进行比较,得出相交点,即认为相交点处应力或强度所对应的温度为临界开裂温度^[1]。临界开裂温度的计算图示如图1,通过计算得到沥青的临界开裂温度如图2。

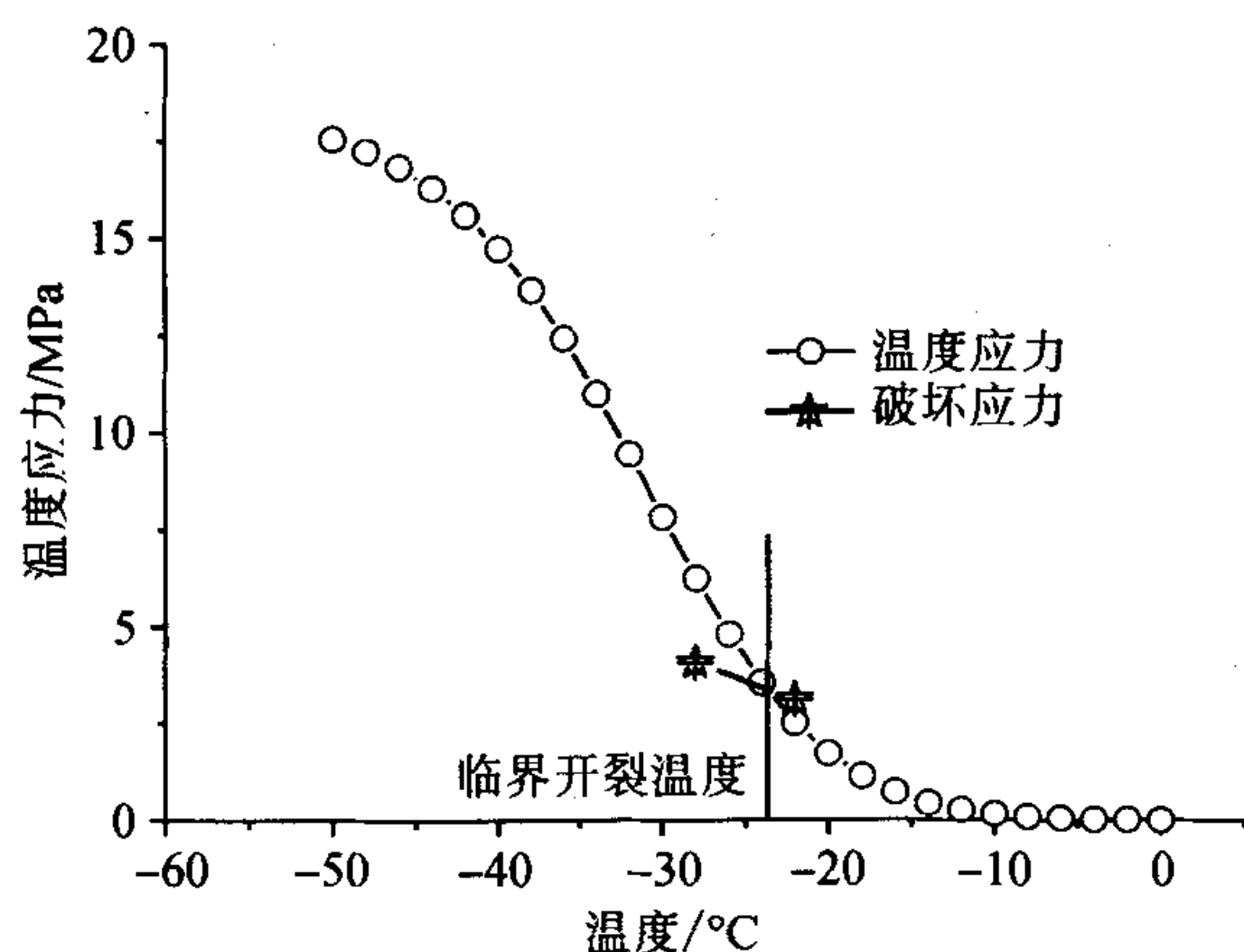


图1 沥青临界开裂温度的计算图示

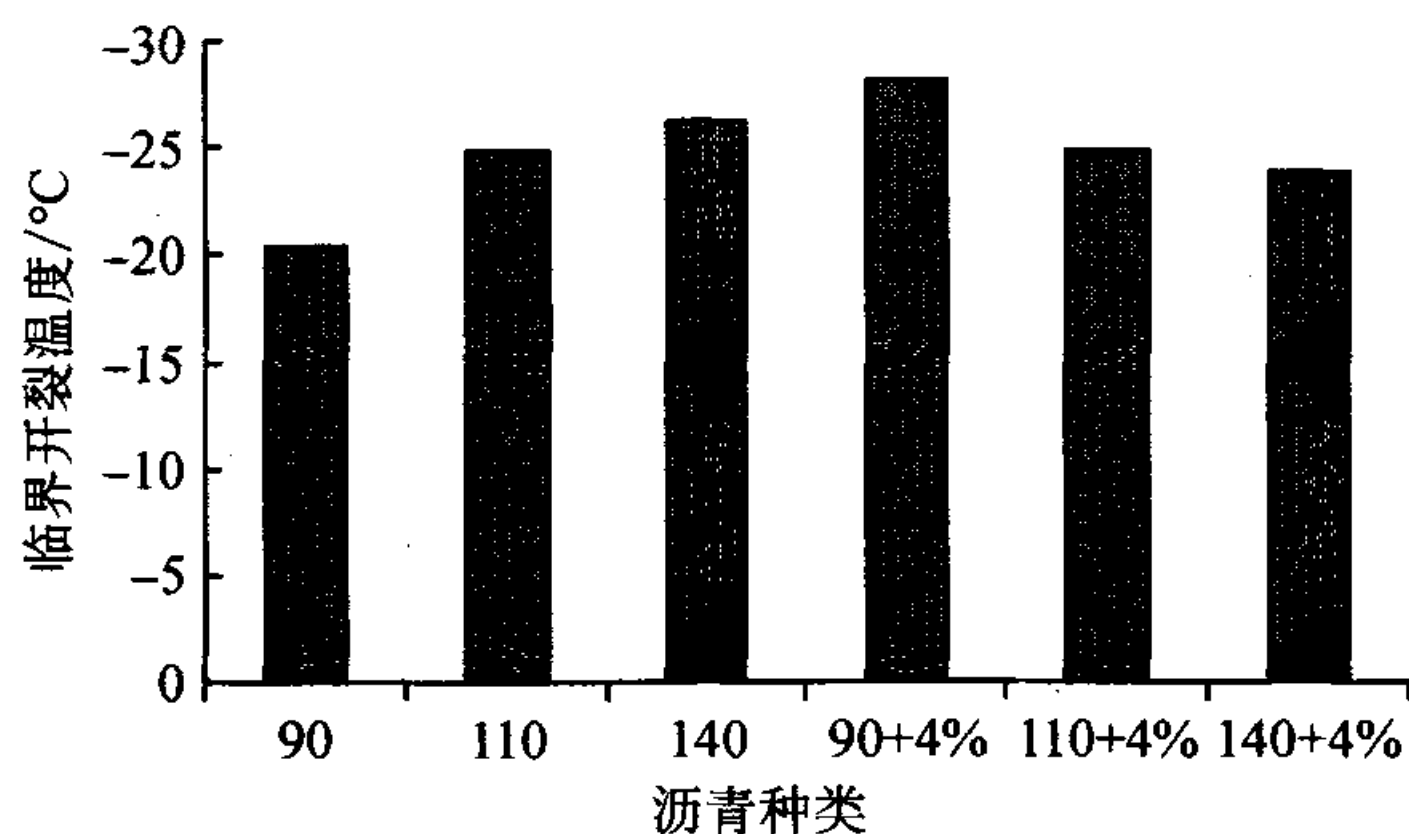


图2 临界开裂温度结果

3 沥青临界开裂温度计算过程的分析

3.1 沥青劲度模量主曲线拟合分析

对于沥青的劲度模量主曲线,为了下一步做数

学变换的需要,必须得出劲度模量主曲线的数学表达式。一般流变曲线的拟合主要有两种:采用粘弹性模型如Maxwell、Kelvin 模型来拟合,得到粘弹性模型中的各个参数,用来表征沥青的粘弹性能;也可以采用数学模型的方法来拟合。这两种方法各有优缺点:采用粘弹性模型来描述材料的粘弹性性质,相当于用有限个参数构造一条曲线来近似材料真实的流变曲线,试验得出的流变曲线真实地记录了试验材料的粘弹性性质,采用粘弹性模型来模拟,物理意义比较明确。采用数学模型来模拟,比较灵活,精度较高,常用的数学模型主要有CA 模型、CASB 模型、CAM 模型、CAS 模型和DS 模型。

在AASHTO Mpl a 规范中,采用的是Christensen-Anderson-Marasteanu(CAM)流变模型:

$$S(\epsilon) = S_{\text{glassy}} [1 + (\epsilon/\lambda)^{\beta}]^{-k/\beta} \quad (1)$$

式中: S_{glassy} 为 3 GPa, λ 、 β 、 k 为参数,通过Origin 软件进行拟合,得到拟合参数 $\lambda = 1.976\ 52$, $\beta = 0.216\ 63$, $k = 0.562\ 09$,拟合相关系数为 0.999。

在很短的荷载作用时间内,沥青的劲度模量主曲线达到一个极限值,这就是沥青的玻璃态模量。在CAM 模型中,沥青的玻璃态模量 S_{glassy} 为 3 GPa,这个值是Christensen 和 Anderson(1992)提出的^[6],后来,其他的研究者如Dickinson 和 Witt(1974)表明沥青的玻璃态模量不是定值,与沥青的来源有关。因此,在对沥青的劲度模量主曲线拟合时,沥青的玻璃态模量不应采用固定的值。在对沥青的劲度模量主曲线进行拟合时,由于试验得到的数据点比较少,时间范围比较短,因此CAM 模型只能拟合较短时间范围内沥青的性能,CAM 模型的数据是否可以外延还需要验证。

3.2 不同降温速率下的沥青临界开裂温度

在AASHTO MP1a 规范中,采用的是固定的降温速率,选择的降温速率为 1 °C/h,这是根据Lamont 试验路当地具体的气温变化得到的。对于沥青路面的降温速率,一般都认为应该尽量模拟当地具体气候变化情况,因为不同地域的气温变化都各有所不同,在冬天寒流到来时,气温的降温速率各地相差较大,在加拿大气温实际降温速率很少超过 2.7 °C/h,美国北部 10 年内大部分是 0.5~1.0 °C/h,而在我国由于寒流往往来得很急,降温速率超过 10 °C/h 的情况并不少见。因此,在选择降温速率时,应该根据各地具体温度情况进行综合考虑选择。

依据野外观测和测试数据表明,不同的降温速

率与沥青路面温度裂缝密度密切相关,温度应力试验表明:降温速率越大,沥青路面温度裂缝越密集,沥青路面临界开裂温度越高,这是由于在较大的降温速率下,在这时刻的前后温差较大,沥青混合料内部积聚的温度应力较大,致使路面材料的低温收缩变形超过了变形能力,沥青混合料的应力松弛性能未及发挥。因此,不同降温速率对沥青的温度应力影响很大。

为了进一步验证不同降温速率对沥青低温性能的影响,本文选用不同的降温速率,计算降温过程中产生的温度应力。从图3中显示,对于不同的降温速率,温度应力曲线曲率变化很大,降温速率越大,温度应力曲线曲率越陡,相应的温度应力越大。分析图形可以得到:降温速率提高1℃/h,沥青的临界开裂温度上升1~2℃。表2列出了6种沥青在不同降温速率下的临界开裂温度,在不同的降温速率下,同种沥青的临界开裂温度最大的相差了近9℃,最小的也相

差了3℃多。Superpave 性能规范对沥青胶结料的低温性能按6℃一个等级来划分,由表2中的最大温差可以看出不同的降温速率,临界开裂温度处于不同的PG 分级。因此不考虑地源气候差异,统一采用固定的降温速率计算沥青的临界开裂温度是不合适的。

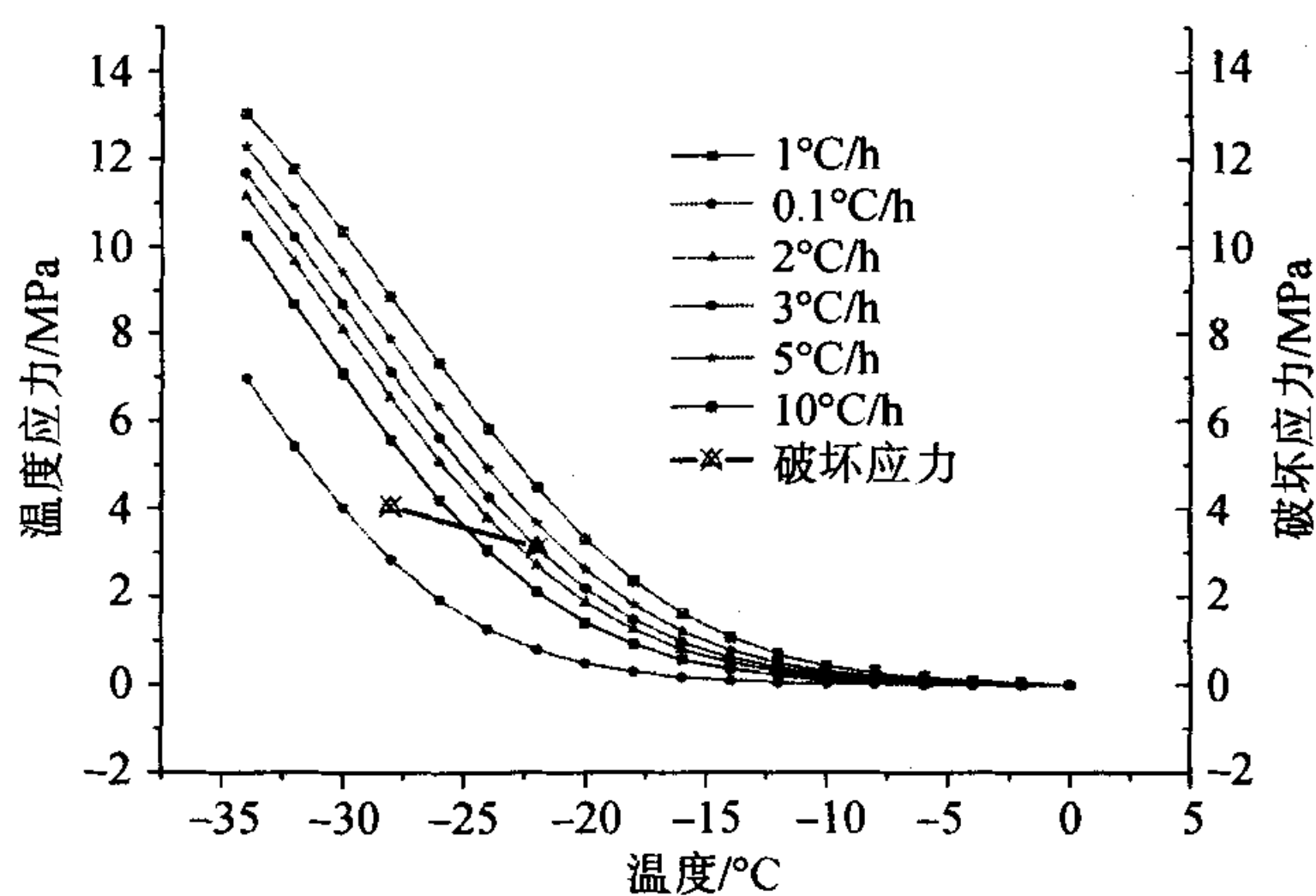


图3 110号沥青在不同降温速率下的临界开裂温度

表2 不同降温速率的临界开裂温度

C

降温速率	90号	110号	140号	90号+4%	110号+4%	140号+4%
1℃/h	-20.3	-24.8	-22.5	-27.4	-24.9	-23.8
0.1℃/h	-28.1	-30.6	-26.7	-33.9	-30.4	-27.1
2℃/h	-17.7	-23.1	-21.1	-25.3	-23.2	-22.8
3℃/h	-16.3	-22.1	-20.3	-24.1	-22.2	-22.3
5℃/h	-14.3	-20.4	-19.3	-22.6	-20.8	-21.4
10℃/h	-11.5	-18.4	-17.9	-20.6	-19.1	-20.5
最大温差/℃	-8.8	-6.4	-4.6	-6.8	-5.8	-3.3

3.3 不同收缩系数下的沥青临界开裂温度

在AASHTO MP1a 规范中,采用的是固定的收缩系数,Anderson 通过测定30种基质沥青和改性沥青的收缩系数,得到沥青的收缩系数为 $1.7 \times 10^{-4}/^{\circ}\text{C}$ 。然而沥青是典型的粘弹性材料,它的收缩性能非常复杂,从理论上讲,沥青材料存在有一玻璃化温度,据有关资料表明,沥青的玻璃化温度大约为 $-37 \sim -15^{\circ}\text{C}$ 之间,平均为 -27°C 。在玻璃化温度上下附近,沥青的收缩性能有明显的变化,其收缩系数相应地发生较大变化。因此在计算沥青临界开裂温度时,采用固定不变的收缩系数即假定温度和体积是线性变化的,这相当于表示沥青材料不存在玻璃化温度点,这与沥青的粘弹性质是不相符的^[7]。

另有研究表明^[8],不同降温速率的沥青收缩系数也是不同的,降温速率越快,收缩系数越小。即使降温速率相同,不同温度区间的收缩系数也不同,在 $-25 \sim 0^{\circ}\text{C}$ 的范围内,收缩系数基本上在同一个数量

级范围内变化;当低于 -25°C 时,随着温度的降低,收缩系数减小。总体而言, -45°C 时的收缩系数要比 $-25 \sim 0^{\circ}\text{C}$ 范围内的收缩系数约小40%。不同沥青品种的收缩系数略有差别,试验测定的沥青线胀系数约为 $(1.5 \sim 2.5) \times 10^{-4}/^{\circ}\text{C}$ 。在计算温度应力时,初始温度为 0°C ,中止温度为 -50°C ,温度范围比较大,因此采用固定的收缩系数不能很好地表现沥青的低温性能。

为了进一步验证沥青的收缩系数对沥青临界开裂温度的影响,本文选用5个不同的收缩系数计算沥青的临界开裂温度。通过试验结果可以看出,不同收缩系数对温度应力影响很大,收缩系数越大,沥青材料内部的温度应力越大,在 $-10 \sim -40^{\circ}\text{C}$ 区间其温度应力的变化相当明显,相应的其临界开裂温度值发生较为显著的变化,在5个不同收缩系数之间最大相差5℃,分析图形结果显示:收缩系数相差 $0.2 \times 10^{-4}\text{mm}/^{\circ}\text{C}$,临界开裂温度相差近1℃。因此,在计

算沥青的临界开裂温度时,应综合考虑收缩系数的影响,采用固定的收缩系数是不合理的。

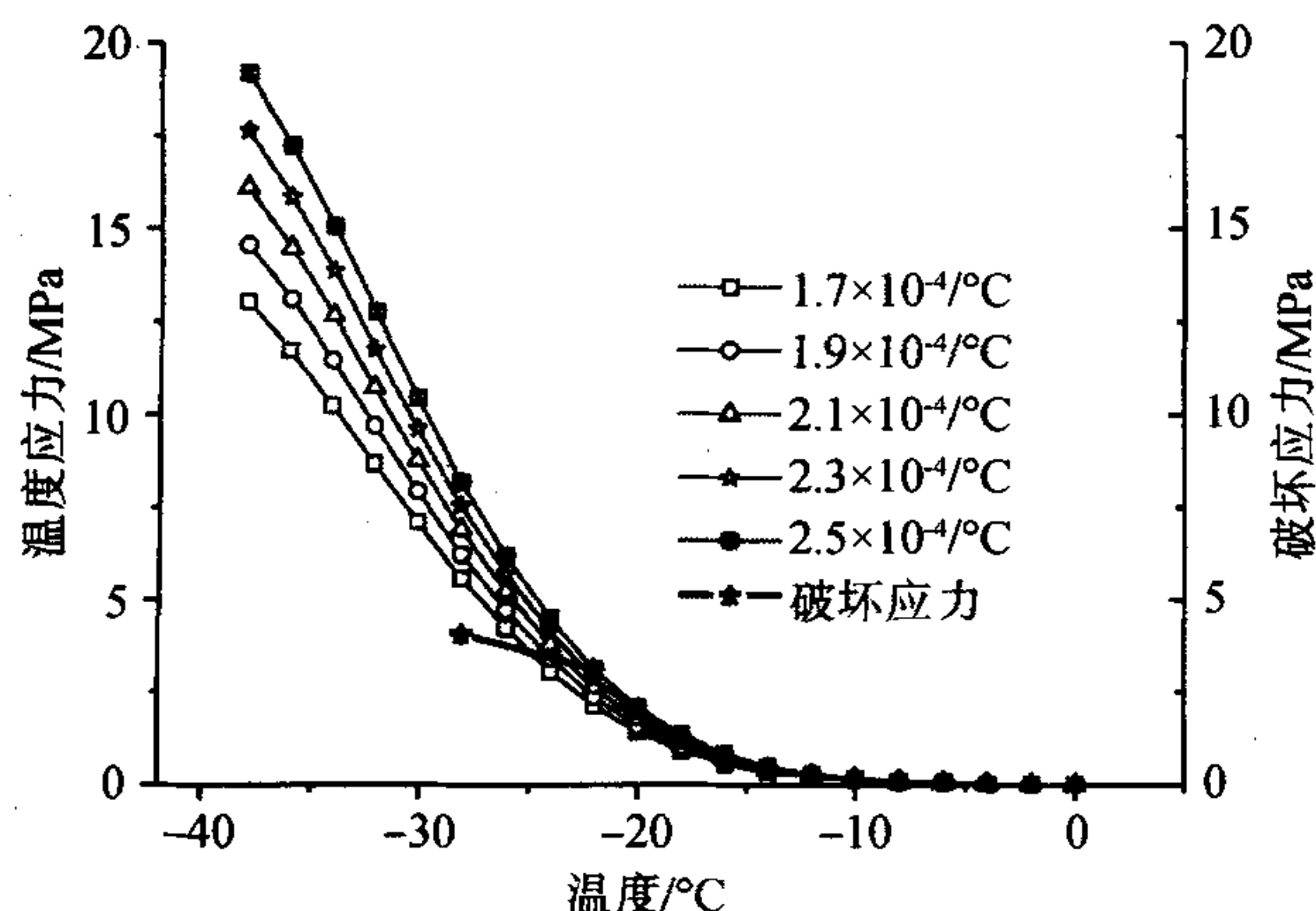


图4 110号沥青在不同收缩系数下的临界开裂温度

4 结论

通过改变降温速率和收缩系数,对国内常用的6种沥青的临界开裂温度进行了计算并对试验结果进行了分析,得到了如下结论。

(1)在对沥青的劲度模量主曲线拟合时,AASHTO Mpl a 规范采用的是CAM 数学模型,CAM 模型中假定沥青的玻璃态模量为常数,研究表明沥青的玻璃态模量与沥青的来源有关,因此玻璃态模量应该设为参数,并且CAM 模型是否可以拟合更长时间范围内的沥青性能还需要进一步验证。

(2)在计算温度应力的过程中,AASHTO Mpl a 规范采用的是固定的降温速率,试验结果表明沥青的降温速率对沥青的临界开裂温度结果有很大的影响。因此,应该根据我国各地的具体温度情况选择降温速率。

(3)在计算温度应力的过程中,AASHTO Mpl a 规范采用的是固定的收缩系数,试验结果表明沥青的收缩系数对沥青的临界开裂温度结果有很大的影响。因此,应该根据我国的不同沥青的低温性能确定收缩系数。

参考文献:

- [1] Standard practice for determination of low temperature performance grade (PG) of asphalt binders [S]. AASHTO Draft for Standard MP1A, Washington, D. C. 2001.
- [2] Bahia H U, Hanson D I, Anderson R M. Characterization of Modified Asphalt Binders in Superpave Mix Design [R]. NCHRP Report 459, Washington, D. C, National Academy Press, 2001.
- [3] 谭忆秋,曹丽萍,董泽蛟. SBS 改性沥青低温性能的影响因素分析[J]. 哈尔滨工业大学学报,2004,36 (12).
- [4] Park S W, Kim Y R. Interconversion between Relaxation Modulus and Creep Compliance for Viscoelastic Solids [J]. Journal of Materials in Civil Engineering. 1999.
- [5] Marasteanu M O. The Role of Bending Beam Rheometer Parameters in Thermal Stress Calculations [R]. Transportation Research Board. 2003.
- [6] Bahia H U, Zeng M L, Nam K. Consideration of Strain at Failure and Strength in Prediction of Pavement Thermal Cracking[Z].
- [7] 沈金安. 沥青及沥青混合料路用性能[M]. 北京:人民交通出版社,2001.
- [8] 张肖宁. 沥青与沥青混合料的粘弹力学[M]. 北京:人民交通出版社,2006.

A Study on Critical Cracking Temperature of Asphalt

ZHAN Xiao-li¹, ZHANG Xiao-ning², LU Liang², XUE Zhong-jun¹

(1. School of Traffic Science and Engineering, Harbin Institute of Technology, Harbin 150090, China;

2. College of Traffic and Communications, South China University of Technology, Guangzhou 510640, China)

Abstract: The critical cracking temperature of asphalt is the low temperature evaluation index of AASHTO Mpl a criterion, which is calculated based on the results of bending beam rheometer and the direct tension test. In this paper, the method calculating the critical cracking temperature is analyzed, which comprises the fitting model to stiffness modulus master curve of asphalt, and the effects of cooling rate and contraction coefficient on the result of the critical cracking temperature. The results show that the method of the critical cracking temperature is needed to be improved further.

Key words: low temperature performance; critical cracking temperature; stiffness modulus; cooling rate; contraction coefficient