DOI:10.14048/j.issn.1671－2579.2019.03.055

不同拌和温度对沥青结合料的耐久性影响研究

高涛涛[1]，张金雷[2]
（1.重庆能源职业学院，重庆市 402260；2.林同棪国际工程咨询（中国）有限公司）

摘要：该文通过比较不同老化温度下沥青结合料的黏弹性参数，对温拌沥青降温过程对沥青结合料长期耐久性影响进行了研究。首先，通过旋转薄膜烘箱老化试验模拟70#基质沥青在3种不同温度下的短期老化过程，接着利用标准压力老化模拟其长期老化过程；其次，应用动态剪切流变仪的试验数据，拟合主曲线并计算交叉温度和Glover－Rowe参数；同时根据弯曲梁流变试验的结果，比较ΔT_c指标（蠕变劲度临界温度与蠕变速率临界温度之差）的差别。结果表明：当降温幅度达到40 ℃时，能够显著提升沥青结合料的长期耐久性。

关键词：沥青结合料；温拌沥青；动态剪切流变仪；弯曲梁流变试验；长期耐久性

1 引言

温拌沥青技术，即通过一定的技术措施，在保证良好路用性能的前提下，以低于传统热拌沥青的作业温度进行施工作业。温拌沥青技术的发明得益于人们对环境保护的重视，其创新点在通过较低的拌和及压实温度等施工作业温度，实现较少的温室气体排放量，由于世界各国对于温拌沥青的施工要求各不相同，导致其节能减排效果也不尽相同。通常来说，北美地区对温拌沥青的施工温度定义为降温幅度在28 ℃左右，而中国和欧洲部分国家采用的标准为20～40 ℃。

目前围绕温拌沥青和温拌沥青混合料技术的研究通常集中于混合料结构设计和新材料的研发，针对温拌沥青耐久性的影响研究相对较少。Gandhi等利用Sasobit制备温拌沥青混合料，在试验室条件下研究其长期耐久性，得出温拌沥青混合料能表现出更好的抗车辙性和更强抗压性的结论；Rashwan等研究120 ℃拌和温度下温拌沥青混合料的长期耐久性，指出相比于热拌沥青，温拌沥青混合料的路用性能会略微降低，但耐久性显著增强；Abbas等利用动态剪切流变仪和傅里叶转换红外光谱试验等手段，同时研究了沥青结合料的短期和长期耐久性，结果表明温拌沥青相比于传统热拌沥青表现出更好的长期耐久性能；秦永春利用沥青回收技术，分析不同施工温度温拌沥青的各项指标，认为温拌技术可大大缓解沥青混合料的短期老化程度。综上所述，之前的研究对沥青结合料和沥青混合料都有涉猎，而且部分研究成果证明温拌沥青确实能提高沥青的长期耐久性；但很少有研究关注不同施工温度对沥青结合料长期老化性能的影响。

该文选取两种基质沥青，基于两种沥青流变学试验和数学建模，研究不同温度对沥青结合料长期耐久性的影响。

2 试验材料及方法

该研究选取两种70#基质沥青，分别命名为70A和70B，其三大指标见表1。根据美国SHRP规范，对两种基质沥青分别进行旋转薄膜烘箱老化试验（短期老化）和压力老化试验（长期老化），旋转薄膜老化试验的试验温度为123、143和163 ℃，短期老化后的沥青试样编号为R－70A－123、R－70A－143、R－70A－163。在此基础上进行标准的20 h压力老化试验，相应的沥青样品被命名为P－70A－123，P－70A－143和P－70A－163，70B沥青的编号规则与此相同。该文中所使用的试验材料试验标准均满足中国现有JTG F40－2004《公路沥青路面施工技术规范》要求。

表1 基质沥青三大指标

沥青编号	25 ℃针入度/(0.1 mm)	软化点/℃	15 ℃延度/cm
70A	79.1	46.2	＞100
70B	77.2	47.4	＞100

收稿日期：2018－09－22

作者简介：高涛涛，女，硕士，讲师.E－mail:gaotaotao1986@126.com

对基质沥青和老化后的沥青样本分别进行动态剪切试验(DSR)和弯曲梁流变试验(BBR),以确定其高温和低温流变学性能,其中短期老化的沥青试样仅进行 DSR 试验。DSR 试验采用动态剪切流变仪完成,该试验通过上平板施加正弦模式的剪切振荡,测定该条件下材料的力学响应,以获得相应的动态剪切模量$|G^*|$和相位角δ。为保证沥青试样的动态响应发生在线性黏弹性范围内,首先采用应变扫描确定每组试样的线性黏弹性应变范畴。等温条件下频率扫描试验的试验温度设置为 0～80 ℃,间隔为 10 ℃,试验频率为0.1～10 Hz;其中,0～40 ℃的试验采用 8 mm 直径平板,而 30～80 ℃的试验利用 25 mm 直径平板进行。BBR 试验利用弯曲梁流变仪进行,该试验通过低温条件下的三点弯曲试验,测量沥青结合料在蠕变荷载作用下的劲度,并计算相应的劲度模量 S 和劲度模量变化率 m 值。试验加载时间 240 s,试验温度为－6、－12、－18、－24 ℃。上述两种试验的每种试验样本至少进行两组平行试验。

3 试验结果与分析

3.1 主曲线的构建和时－温等效原理

根据 DSR 试验在等温条件下频率扫描试验中测得的结果,可以在给定参考温度下拟合出一条主曲线,该曲线以图形的形式较为直观地反映黏弹性材料的力学响应,可以在一个较广的温度和频率域内评估材料的流变学特征。此外,在主曲线的基础上,还可以进一步计算材料的相关流变学参数:如 Glover－Rowe 参数和交叉温度等。因此,在沥青结合料性能分析领域,主曲线是一种广泛使用的方法。该文采用 Christensen－Anderson－Marasteanu (CAM)模型,建立沥青结合料的复变剪切模量$|G^*|$和相位角δ的主曲线。模型表达式如下:

$$G^*(f,T)=G_e+\frac{G_g-G_e}{[1+(f_c/a_Tf)^k]^{m_e/k}} \tag{1}$$

$$\delta=\frac{90m_e}{1+(f_c/f)^k} \tag{2}$$

式中:G_e 为$\omega\to0$时的平衡模量,由于该文研究对象为沥青结合料,故该值为 0;G_g 为$\omega\to\infty$时的瞬时模量;f 为试验频率;f_c 为位置参数;k、m_e 为控制主曲线形状的无量纲参数;a_T 为温度的位移因子,由式(3)WLF 方程决定。

由于该研究的试验数据在不同温度下获得,因此需利用时－温等效原理,结合热力学 Williams－Landel－Ferry(WLF)方程,来构建主曲线方程,WLF 模型的表达式为:

$$\log a_T(T)=-\frac{c_1(T-T_0)}{c_2+(T-T_0)} \tag{3}$$

式中:T_0 为参考温度,该文定义为 20 ℃;c_1、c_2 为 WLF 方程系数。当试验温度 T 等于主曲线的参考温度 T_0 时,ω 为试验所采用的实际角频率,$\omega=2\pi f$;当试验温度在非参考温度下进行时,ω 则为缩减频率,表达式为 $\omega=2\pi f\cdot10^{-\frac{c_1(T-T_0)}{c_2+(T-T_0)}}$。

根据上述 3 个公式,拟合所有沥青结合料的 DSR 试验数据,分别生成其复变剪切模量$|G^*|$和相位角δ的主曲线。图 1 为沥青结合料 P－70A－123 的试验测量结果与模型预测值之间主曲线的对比分析。

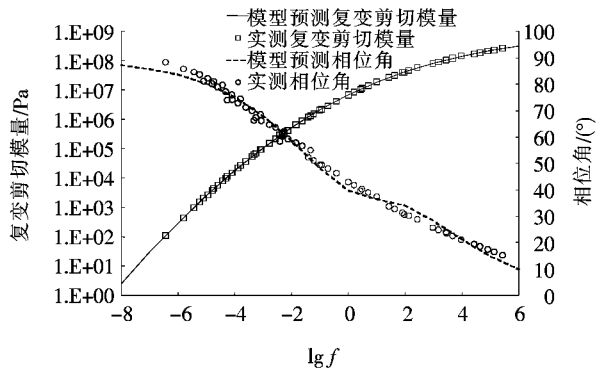
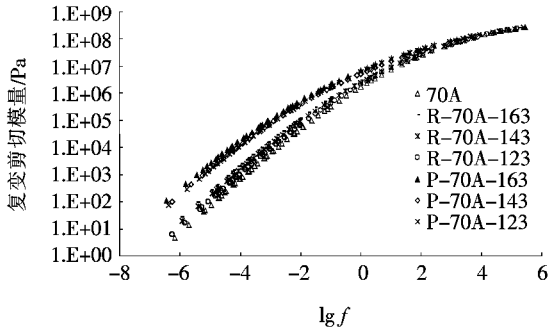


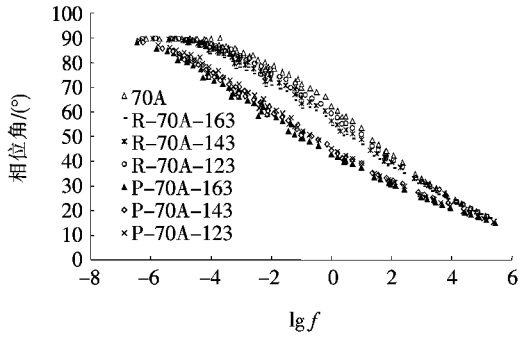
图 1 沥青结合料 P－70A－123 实测和模型预测主曲线对比

从图 1 可以看出:模型预测与试验结果的拟合程度相当高,表明 CAM 模型能较好地反映试验数据。以 70A 沥青为例,给出不同老化条件下各沥青结合料黏弹性主曲线图,其中复变模量主曲线的纵轴采用对数坐标轴表达,两个主曲线图的横轴均采用频率的对数表示,见图 2。

从图 2 可以看出:基质沥青表现出最低的复变模量和最高的相位角曲线;随着老化温度的升高和老化程度的加深,各沥青试样的复变模量和相位角曲线分别表现出逐渐升高和降低的趋势,这与实际生产经验相符,表明 CAM 模型与实测数据之间的拟合程度较好。整体而言,不同老化温度下,短期老化沥青间的差异远大于长期老化的条件。进一步观察可以发现,当短期老化温度为 123 ℃和 143 ℃时,其复变模量和相位角的主曲线相对接近基质沥青的曲线,而与传统热拌沥青的主曲线差异较为显著,这表明温拌沥青的降温过程能对沥青结合料的短期耐久性产生显著影响。针对长期老化的沥青结合料主曲线而言,不同老化温



(a) 复变剪切模量主曲线



(b) 相位角主曲线

图 2　沥青结合料 70A 不同老化条件下的主曲线

度下沥青结合料的流变学特征较为相似，各曲线间的差距并非很显著；仔细观察可以发现，123 ℃和 163 ℃两种老化温度下复变模量的主曲线有较为明显的差异，而相位角主曲线间的差距不甚显著。如前文所述，主曲线仅能提供简单的视觉对比，很难量化判断老化温度对沥青结合料耐久性能的影响是否显著，因此需要引入新的流变学参数来进一步讨论其影响。

3.2　Glover－Rowe 参数和交叉温度

针对沥青结合料的耐久性特征，除通过主曲线对材料整体的流变学特征进行简单视觉分析外，通常还可采取以下 3 个指标进行量化评价：Glover－Rowe 参数（下称 $G-R$ 参数）、R 值和交叉温度；该文选取 $G-R$ 参数和交叉温度这两个指标进行分析。$G-R$ 参数最初由 Glover 等在 2005 年提出，研究者利用 Maxwell 模型，提出一种基于 DSR 试验的流变学参数 $G'/(\eta'/G')$ 以替代 15 ℃的延度试验，其中 $\eta'=G''/\omega$，G' 为复变剪切模量 G^* 的储能模量，G'' 为复变剪切模量 G^* 的损耗模量。DSR 试验结果表明：该参数在 15 ℃时 0.000 5 rad/s 的测量值与 15 ℃延度试验断裂时的模量有较好的相关性。2011 年，Rowe 等又进一步改进了该参数，新提出的 $G-R$ 参数表达式为 $\frac{G^*\times(\cos\delta)^2}{\sin\delta}$。其中：$G^*$ 和 δ 分别 15 ℃和 0.000 5 rad/s 时的复变剪切模量和相位角。$G-R$ 参数的损伤区域有两个临界值，细微裂缝出现的临界值为 180 kPa，而材料破坏时的临界值则为 450 kPa；当 $G-R$ 值小于 180 kPa 时，沥青结合料被认为不会出现破坏。

利用时－温等效原理和主曲线方程，计算出所有沥青结合料的 $G-R$ 参数，并得出相对传统热拌沥青的耐久性增加比例，结果见表 2。同时，在 Black 图（横轴为 δ，纵轴为 G^*）下绘制各沥青结合料在 15 ℃和 0.000 5 rad/s 条件下测定的 G^* 和相位 δ。该图通过可视化的方式，可以非常直观地反映出沥青结合料的老化程度；即当材料处于相对较高的老化程度时，由于 G^* 的升高和 δ 的降低，在图中显示为向左上方移动。仍然以 70A 沥青为例，见图 3。

由图 3 可知：所有的沥青黏合剂都位于损伤区以下，因此它们都不易受到表面损伤的影响。进一步观察短期老化的沥青结合料发现，3 个散点近乎均匀分布，163 ℃的点与其他两点距离稍远；对长期老化的沥青结合料而言，163 ℃和 143 ℃两点距离较近，123 ℃的点远离以上两点处于右下方。可以定性得出结论：温拌沥青的降温作业过程能够明显增加沥青结合料的短期耐久性，而当降温幅度达到 40 ℃时才能较为显著

表 2　两种沥青结合料的 $G-R$ 参数及耐久性增加率比较

材料编号	$G-R$ 参数/Pa	耐久性变量/%	材料编号	$G-R$ 参数/Pa	耐久性变量/%
70A	432	—	70B	226	—
R－70A－123	506	72.3	R－70B－123	354	63.3
R－70A－143	938	48.6	R－70B－143	401	58.4
R－70A－163	1 826	—	R－70B－163	964	—
P－70A－123	9 376	50.2	P－70B－123	3 869	38.2
P－70A－143	16 572	12.0	P－70B－143	5 044	19.4
P－70A－163	18 836	—	P－70B－163	6 258	—

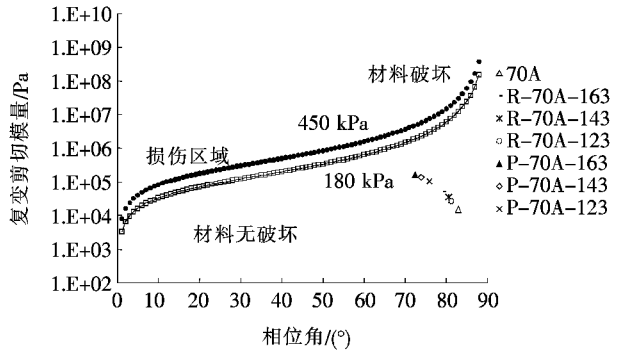


图 3 不同老化条件沥青结合料 70A 在 Blcak 图下的 $G-R$ 参数

地影响材料长期老化性能。表 2 为耐久性变化的定量分析结果，同时也佐证了图 3 的结论，即降温 20 ℃或 40 ℃均可对沥青结合料的短期耐久性产生显著影响，而只有降温幅度高至 40 ℃时才能显著提升沥青结合料的长期耐久性能。

交叉温度可用来评价沥青材料的脆性，一般作为 Superpave 沥青结合料 PG 分级(Performance Grading)系统的补充参数使用，可以较为直观地反映沥青材料的抗疲劳性能，在沥青结合料老化性能评估方面应用较广。交叉温度在数学上的表达为储能模量 G' 和损耗模量 G'' 相等时的温度值；换言之，即参考频率下相位角等于 45°时的温度。该文中的参考频率定义为 1.59 Hz，该频率与车辆以 90 km/h 速度行驶时对路面材料的剪切作用相当。根据时－温等效原理和主曲线方程，计算得出两种沥青结合料不同老化条件下的交叉温度，结果见表 3。

由表 3 可知：两种沥青黏合剂在同一老化水平中，

表 3 两种沥青结合料的交叉温度和差值比较

材料编号	交叉温度/℃	温差/℃	材料编号	交叉温度/℃	温差/℃
70A	7.5	—	70B	3.3	—
R－70A－123	9.6	3.6	R－70B－123	4.0	2.1
R－70A－143	11.7	1.5	R－70B－143	4.6	1.5
R－70A－163	13.2	—	R－70B－163	6.1	—
P－70A－123	21.1	3.1	P－70B－123	8.4	3.2
P－70A－143	22.3	1.9	P－70B－143	10.2	1.6
P－70A－163	24.2	—	P－70B－163	11.8	—

均表现出相似的趋势。对于短期和长期老化的沥青结合料而言，交叉温度的最大差值总是存在于 123 ℃；而 143 ℃和 163 ℃两组材料的温差均小于 2 ℃。即当降温仅有 20 ℃时，相比传统热拌沥青，温拌沥青的短期和长期耐久性改善并不明显；而当降温幅度达到 40 ℃时，其耐久性能则得到大幅提高。虽然该结果与 $G-R$ 参数的对短期老化性能的评价有一定冲突，但对于长期耐久性的评价结果则完全一致。

3.3 ΔT_c 指标

根据美国 ASTM D6648 规范要求，选取试验进行到 60 s 时的 S 和 m 值，分别计算出 $S=300$ MPa 和 $m=0.3$ 时的低温临界温度(T_c)。如上文所述，S 和 m 分别为沥青材料的低温变形能力和低温应力松弛能力，而两者的差值 $\Delta T_c=T_c(S)-T_c(m)$ 能反映沥青结合料的耐久性，其物理意义是沥青材料松弛模量的损失值，随着材料老化程度的加深，ΔT_c 值也相对更负。以 70A 沥青结合料为例，绘制不同温度条件下各沥青结合料的 S 和 m 实测值，结果见图 4。

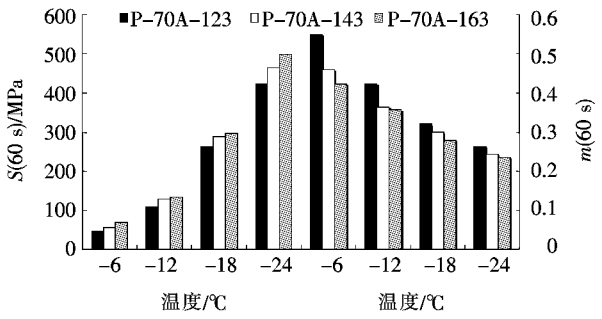


图 4 不同老化条件沥青结合料 70A 在不同温度下的试验结果

从图 4 可看出：随着试验温度的降低和老化温度的提高，劲度模量 S 呈现逐渐增加的趋势，而劲度模量变化率 m 则同步减小。此外，各组试验误差都在可接受范围内波动，表明试验结果可靠性较高。在此基础上计算各沥青结合料的 ΔT_c 值，结果见表 4。

从表 4 可以看出：随着老化温度的升高，两种沥青结合料的 ΔT_c 值均表现出更负的趋势，表明材料的耐

久性逐渐削弱。进一步观察发现，143 ℃和 163 ℃的 ΔT_c 值差距非常小，而老化温度为 123 ℃时的 ΔT_c 值与 163 ℃的差值较大。这与降温幅度达到 40 ℃时，材料的低温耐久性能得到显著提高结论相同。

表 4　两种沥青结合料的 ΔT_c 值

材料编号	$T_c(S)$/℃	$T_c(m)$/℃	ΔT_c/℃	材料编号	$T_c(S)$/℃	$T_c(m)$/℃	ΔT_c/℃
P－70A－123	－19.18	－20.50	1.32	P－70B－123	－16.76	－17.13	0.37
P－70A－143	－17.85	－18.00	0.15	P－70B－143	－15.01	－14.62	－0.39
P－70A－163	－17.08	－17.15	0.07	P－70B－163	－14.80	－14.12	－0.68

4　结论

该文针对两种 70# 基质沥青在不同老化温度下的沥青结合料试样，根据动态剪切流变仪和弯曲梁流变试验的结果，利用数学模型计算出 3 个流变学参数：$G-R$ 参数、交叉温度和 ΔT_c 指标，评估了老化温度对沥青结合料耐久性能的影响。得出以下结论：

（1）CAM 模型能够较好地拟合主曲线方程，利用时－温等效原理和主曲线计算得出的 Glover－Rowe 参数和交叉温度可以量化评价沥青结合料的耐久性。降温能够显著提升沥青结合料的短期老化性能，而只有当降温幅度达到 40 ℃时，才能明显改善沥青结合料的长期耐久性。

（2）采用 BBR 试验得到沥青的低温抗裂性能，计算得出 ΔT_c 指标用以评价材料的低温耐久性，发现应用该指标对沥青长期耐久性的评价结果与利用 DSR 试验得出的结论相同。

（3）应用 $G-R$ 参数、交叉温度和 ΔT_c 指标来评价沥青结合料耐久性是合理且准确的。这些指标不仅有明确的物理意义，且不同指标对于长期耐久性的评价结果具有良好的相关性；此外，上述指标能够反映沥青结合料在一个较广温度领域内的耐久性特征。

（4）如果在温拌沥青混合料的生产过程中以低于传统热拌沥青 40 ℃的温度进行作业，不仅能显著提高道路的整体寿命，而且对于减少温室气体排放也有显著影响。该研究仅针对沥青结合料进行，可进一步扩展到沥青混合料中。

参考文献：

[1] Chowdhury, A., and Button, J. W. A Review of Warm Mix Asphalt (No. SWUTC/08/473700－00080－1)[D]. Texas Transportation Institute, the Texas A & M University System, 2008.

[2] European Asphalt Pavement Association (EAPA). The Use of Warm Mix Asphalt. EAPA Position Paper 2010 [C]. www.eapa.org. Accessed Feb. 26th, 2017.

[3] 李宏志，郑健龙. 温拌沥青胶浆流变性能研究[J]. 长安大学学报：自然科学版，2013(6).

[4] 徐世法，颜彬，季节，等. 高节能低排放型温拌沥青混合料的技术现状与应用前景[J]. 公路，2005(7).

[5] Gandhi, T., Rogers, W., Amirkhanian, S. Laboratory Evaluation of Warm Mix Asphalt Ageing Characteristics[J]. International Journal of Pavement Engineering, 2010, 11 (2): 133－142.

[6] Abbas, A. R., Nazzal, M., Kaya, S., etc. Effect of Aging on Foamed Warm Mix Asphalt Produced by Water Injection[J]. Journal of Materials in Civil Engineering, 2016, 28(11).

[7] 秦永春，黄颂昌，苏玉昆，等. 温拌沥青混合料中沥青在施工阶段的老化程度[J]. 同济大学学报：自然科学版，2009(9).

[8] JTG F40－2004　公路沥青路面施工技术规范[J].

[9] AASHTO T315. Standard Method of Test for Determining the Rheological Properties of Asphalt Binder Using a Dynamic Shear Rheometer (DSR)[S].

[10] ASTM D6648－08. Standard Test Method for Determining the Flexural Creep Stiffness of Asphalt Binder Using the Bending Beam Rheometer (BBR)[S].

[11] 赵延庆，吴剑，文健. 沥青混合料动态模量及其主曲线的确定与分析[J]. 公路，2006(8).

[12] 张肖宁. 沥青与沥青混合料的粘弹力学原理及应用[M]. 北京：人民交通出版社，2006.

[13] Glover, C. J., Davison, R. R., Domke, C. H., etc. Development of a New Method for Assessing Asphalt Binder Durability with Field Validation[C]. FHWA/TX－05/1872－2, Federal Highway Administration and Texas Department of Transportation, College Station, TX, 2005.

[14] Rowe, G. M. Prepared Discussion Following the Anderson AAPT Paper Cited Previously. In AAPT, 2011, 80: 649－662.

[15] 丁海波，邱延峻，王文奇，等. 废机油底渣对沥青的不利影响及机理初探[J]. 建筑材料学报，2017(4).