

## 橡胶颗粒沥青混合料修正的动稳定度研究

王国忠<sup>1</sup>, 张岩<sup>1</sup>, 冯晓波<sup>2</sup>, 李海军<sup>1</sup>

(1.内蒙古农业大学 能源与交通工程学院, 内蒙古 呼和浩特 010018; 2.内蒙古路桥集团有限责任公司 第六工程处)

**摘要:** 针对动稳定度评价指标存在的不足,通过标准车辙试验,找出动稳定度用于评价橡胶颗粒沥青混合料高温稳定性的不足之处;为了合理评价橡胶颗粒沥青混合料的高温稳定性,采用非标准车辙试验,改变试验温度与碾压时间,对混合料的温度敏感性进行分析,得出不同温度下,动稳定度中  $t_1$ 、 $t_2$  的取值是不同的;通过对不同高温与时间条件下车辙曲线的变形速率进行分析,得出橡胶颗粒沥青混合料的动稳定度在不同温度下  $t_1$ 、 $t_2$  的取值;位移—时间曲线中压密稳定阶段随温度的升高逐渐后移,且压密阶段时间越长,压密稳定阶段越靠后,沥青混合料的抗车辙性能越弱。

**关键词:** 沥青混合料; 高温稳定性; 车辙试验; 动稳定度; 温度; 变形速率

## 1 前言

沥青混合料的动稳定度是用于判断沥青混合料的抗车辙性能,评价沥青混合料的高温稳定性的指标之一。沥青混合料的抗车辙性能并不能完全表征沥青混合料的高温稳定性,因此动稳定度指标在评价高温稳

定性方面还存在缺陷,如未考虑车辙的累积变形量以及不同时间段的变形速率等。

目前,针对动稳定度指标的讨论与修正诸多,岳学军、黄晓明等分析了动稳定度评价高温稳定性的局限性,建议考虑车辙试验的相对变形评价;S L Weissman 进行车辙试验的研究,提出应考虑尺寸效应影响;杜顺成提出动稳定度未考虑车辙前期的累积变形

过适当的调配,改性低温煤沥青透层油可以达到与乳化石油沥青、液体石油沥青相当的渗透性能。

(3) 在层间结合性能方面,氯丁橡胶(CR)的加入,可有效改善层间结合性能,但掺量超过 0.25% 后,改善效果将不再增加。随着煤油比例的增加,层间结合性能显著下降。在氯丁橡胶(CR)掺量为 0.5%、煤油与沥青的比例为 2:10、洒布量为 1.1 kg/m<sup>2</sup> 时,可获得良好的层间结合性能。与液体石油沥青的对比表明:液体改性低温煤沥青透层油在层间结合性能方面具有较大优势。

## 参考文献:

- [1] 赵普,薛永兵,李秉正,等.煤沥青作为筑路材料的研究进展[J].煤化工,2012(02).
- [2] 曹东伟,张海燕,薛永兵,等.煤沥青与石油沥青混合调制道路沥青的研究[J].燃料化学学报,2012(6).
- [3] 马瑞辉,杭继虎,李志强,等.煤沥青的改性及其性能[J].

河北工业大学学报,2013(5).

- [4] 林起浪,李铁虎.对苯二甲醛—煤沥青 COPNA 树脂的合成及性能[J].高分子材料科学与工程,2007(2).
- [5] 罗道成,刘俊峰.对苯二甲醛对煤沥青流变性能的影响研究[J].湖南科技大学学报:自然科学版,2008(1).
- [6] ZIELIŃSKI J, CIESIŃSKA W, POLACZEK J. Modification of the Thermorheological Properties of Coal Tar Pitch by Adding of Selected Poly (Ethylene Terephthalate) Process Waste Product[J]. Polish Journal of Applied Chemistry. 2000, 44(2-3): 167-171.
- [7] 吴迪.低毒煤沥青的制备及其物化性能研究[D].大连理工大学硕士学位论文,2010.
- [8] 胡江洋,陈团结,折学森.路用改性煤沥青毒性消减试验效果分析[J].深圳大学学报:理工版,2016(4).
- [9] ZIELINSKI J, OSOWIECKA B, LISZYŃSKA B, et al. Benzo[a]pyrene in Coal Tar Pitch: Chemical Conversion in Situ by Alkylation[J]. Fuel, 1996, 75 (13): 1 543 - 1 548.

收稿日期:2018-10-23(修改稿)

基金项目:内蒙古自然科学基金资助项目(编号:20111423)

作者简介:王国忠,男,博士,教授.E-mail:guozhongwnm@126.com

量,将动稳定度公式修改为综合稳定指数作为高温稳定性的评价指标;朱伟等指出动稳定度未考虑交通量及路面结构的影响,通过对沥青路面永久变形量验算方法进行反算得到动稳定度的合理确定方法。然而,不同材料的沥青混合料的动稳定度至今并没有统一的修正理论。该文通过标准车辙试验,对橡胶颗粒沥青混合料的动稳定度进行研究,考虑橡胶颗粒受温度的影响大于集料受温度的影响,通过修改试验温度,采用非标准车辙试验,对橡胶颗粒沥青混合料的动稳定度进行修正,找出满足橡胶颗粒沥青混合料高温稳定性的合理评价方法。

2 试验准备

2.1 试验材料

集料采用内蒙古呼和浩特地区产石灰岩,矿粉采用的是石灰岩细粉。根据相关规定的技术指标,通过试验验证集料的性质均满足规范要求。

橡胶颗粒的大小全部采用 4 目,橡胶颗粒采用内掺的形式添加在沥青混合料中,即将一部分集料替换为橡胶颗粒。橡胶颗粒的掺量根据体积法计算取试件总体积的 2%,因此试验采用 2%的橡胶颗粒替代一部分等体积的集料,并且替代的集料粒径应与橡胶颗粒的大小相近,所以,橡胶颗粒替代 4.75~2.36 mm 粒径范围的集料。橡胶颗粒的技术指标检测结果见表 1。

表 1 橡胶颗粒技术指标

项目	表观密度/ (g·cm <sup>-3</sup> )	绍尔 A 型 硬度/度	扁平颗粒 含量/%	含水量/ %	杂质含 量/%
规范	实测值	≥55	≤20	<1	≤0.75
实测	1.15	64	8	0.3	0.4

沥青采用韩国 A-90# 沥青,该沥青具有较大的稠度、塑性和较好的温度稳定性。按照规范中规定的方法测定沥青的技术指标如表 2 所示。

表 2 A90# 沥青技术指标

项目	针入度(25℃, 5 s,100 g)/ (0.1 mm)	延度(15℃, 5 cm/min)/ cm	软化点 (T <sub>R&amp;B</sub> )/ ℃	闪点/ ℃
规范	80~100	≥100	≥46	≥230
实测	87.12	120.13	56.40	267.00

2.2 级配

沥青混合料采用密级配 AC-20 型,级配如表 3

所示。最佳油石比通过马歇尔试验确定为 4.3%,空隙率确定为 4%。由于橡胶颗粒采用内掺法掺加,为了更好地对比掺加橡胶颗粒后,橡胶颗粒沥青混合料与普通沥青混合料之间的区别,排除额外因素的影响,橡胶颗粒沥青混合料的沥青用量与空隙率依然按普通沥青混合料的大小计算,以橡胶颗粒沥青混合料高温评价方法研究为主,暂不考虑其最佳沥青用量。

表 3 AC-20 型沥青混合料级配

筛孔尺寸/ mm	通过率/ %	筛孔尺寸/ mm	通过率/ %
26.5	100	2.36	30.5
19	95.5	1.18	22.5
16	84.5	0.6	16.0
13.2	70.0	0.3	11.5
9.5	60.5	0.15	9.0
4.75	41.0	0.075	5.0

3 理论依据

标准车辙试验是将成型的车辙板在温度为 60℃ 的试验条件下进行轮碾碾压 60 min,通过计算动稳定度(DS)来判定沥青混合料的高温稳定性。计算式如下:

$$DS = \frac{(t_2 - t_1) \times N}{d_2 - d_1} \times c_1 \times c_2 \tag{1}$$

式中: $t_1$ 、 $t_2$  为碾压时间; $d_1$ 、 $d_2$  为  $t_1$ 、 $t_2$  时刻对应的碾压深度; $N$  为加载次数,一般取 42; $c_1$ 、 $c_2$  为试样修正系数,均取 1。

其中  $t_1$ 、 $t_2$  一般分别取 45 min 和 60 min,因为在此时间内试件受碾压后的变形较为稳定。而橡胶颗粒作为一种外掺骨料,其强度、刚度等受温度的影响要远大于集料,尤其不同温度范围内,橡胶颗粒具有较好的柔韧性和高弹性,且变形能力强,能起到抗车辙的作用。所以,45~60 min 是否依然符合橡胶颗粒沥青混合料计算动稳定度的要求,需要通过试验验证。

4 试验过程

4.1 标准车辙试验

根据标准车辙试验流程,对橡胶颗粒沥青混合料及普通沥青混合料进行车辙试验,试验结果见图 1。由于橡胶颗粒在持续的高温加热下容易发生老化,在

橡胶颗粒沥青混合料的试件制备过程中,橡胶颗粒不可以与集料放置在一起进行加热,只需将橡胶颗粒放置在室温环境下,待集料加热完成时,随加热好的集料一同倒入拌锅内进行拌和。由于橡胶颗粒的掺量相对较少,温度升高得较快,不会对拌和温度产生较大的影响。

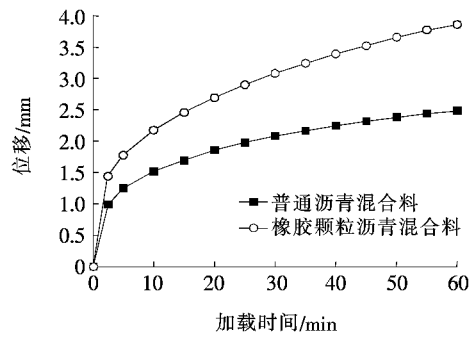


图 1 标准试验下位移-时间曲线

从图 1 可以看出:橡胶颗粒沥青混合料在 60 min 的总变形量要大于普通沥青混合料,说明此级配下的橡胶颗粒沥青混合料抗车辙性比普通沥青混合料差,原因在于橡胶颗粒并不是按最佳掺量掺加,在一定程度上减小了原混合料的刚度;又因为试验中的橡胶颗粒沥青混合料并未采用最佳沥青用量,而是沿用了普通沥青混合料的沥青用量,导致其碾压深度增加,但该试验仅以动稳定度评价指标的修正方法为主,这一点并不影响试验的分析及最终的研究结果。

为了判断45~60 min是否符合橡胶颗粒沥青混

合料计算动稳定度的要求,按照原有动稳定度公式中的 15 min 时间间隔,将时间  $t_1$ 、 $t_2$  也同样更改为间隔 15 min 的其他时间段代入,这样设置的目的在于不仅与原有的动稳定度时间段形成较好的对比,也能直观地判断 45~60 min 时间段的合理性。为了较为全面地分析比较两种材料的车辙曲线,暂将碾压时间延长至 90 min,位移-时间曲线如图 2 所示。

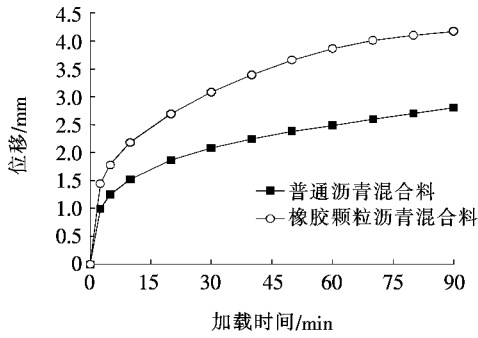


图 2 不同混合料加载 90 min 的位移-时间曲线

计算两种材料在不同时间的动稳定度值,结果见表 4。从表 4 可以看出:普通沥青混合料的动稳定度在 60 min 后相差不大,45~60 min 的动稳定度与 60 min 之后的动稳定度接近,所以,这段时间是处于曲线的压密稳定初期阶段。这与标准车辙试验中动稳定度计算取  $t_1$  为 45 min、 $t_2$  为 60 min 是一致的。而橡胶颗粒沥青混合料在 60 min 内的动稳定度并未稳定,显然碾压时间取 45~60 min 在理论上不符合要求,不能作为计算动稳定度所选取的时间段。需对此时间段进行修改,同时考虑在不同温度下  $t_1$ 、 $t_2$  的取值。

表 4 不同  $t_1$ 、 $t_2$  下两种沥青混合料的动稳定度

材料	不同加载时间(min)的动稳定度/(次·mm <sup>-1</sup> )					
	0~15	15~30	30~45	45~60	60~75	75~90
普通沥青混合料	372.78	1 607.14	2 614.11	3 841.40	4 012.70	4 117.60
橡胶颗粒沥青混合料	256.30	1 011.20	1 428.57	1 842.10	3 181.80	4 220.10

4.2 动稳定度在不同温度下的修正

4.2.1 试验温度

车辙试验的最高温度不大于 80 ℃,标准温度为 60 ℃,北方寒冷地区的最高气温基本在 35 ℃ 以下。所以试验以 60 ℃ 为标准温度,取试验最低温度为 40 ℃,最高温度为 70 ℃,间隔为 10 ℃ 进行不同温度下橡胶颗粒沥青混合料的车辙试验。为了得到完整的位移-时间曲线,将碾压时间统一延长到 120 min,试验结果如图 3 所示。

由图 3 可以看出:40~70 ℃ 的变形曲线均符合正

常的曲线发展规律,且随着温度的升高,位移逐渐增大,位移的增长幅度也随之增大。

4.2.2 温度敏感性

在不同的碾压时间段内,沥青混合料的车辙变形量也不同,由表 4 可看出:普通沥青混合料在每段时间内的动稳定度都比橡胶颗粒沥青混合料的动稳定度大,说明此级配下的橡胶颗粒沥青混合料的温度敏感性较高,所以压密稳定阶段的位置也会发生变化。由图 3 可看出:橡胶颗粒沥青混合料在进入压密稳定阶段之前,曲线的形变接近于对数增长,相对变形较大,

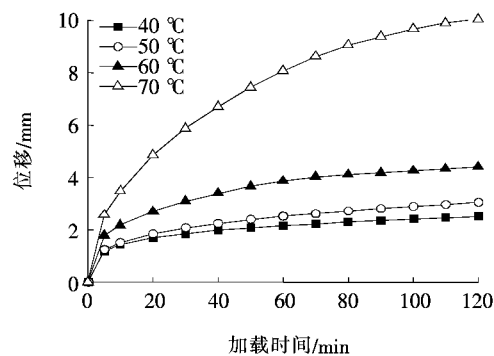


图3 沥青混合料在不同温度下的位移-时间曲线

随着温度的不断升高,相对变形也不断增大。由于不同温度下的车辙曲线直线发展期的范围难以确定,需要进行大量的重复性试验验证,而标准的动稳定度公式所选用的时间段范围也是通过大量的重复试验验证得到的。所以,参考标准的动稳定度计算公式,在不同温度下,从0时刻开始,选取每段时间间隔为15 min的时间段,计算各段的动稳定度,如图4所示。

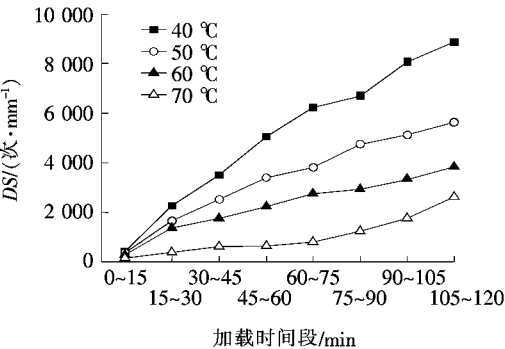


图4 橡胶颗粒沥青混合料在不同温度和碾压时间段下的动稳定度

由图4可以看出:温度越低,时间段越靠后,动稳定度越大,表现出混合料温度敏感性越小。由于不同温度下动稳定度变化的曲线不相同,压密稳定阶段的位置也不同,则对应的 $t_1$ 、 $t_2$ 的取值也就不同。

4.2.3 变形速率的比较分析

为了确定不同温度下 $t_1$ 、 $t_2$ 对应的时间段取值,需要对曲线进行深入分析。由于曲线的相对变形越小,动稳定度值越大,不能直接反映曲线的变形情况,而曲线的变形速率在公式上可近似看做动稳定度的倒数,计算更为简便,更能直观地反映曲线在某一段时间内的变化情况。所以下均采用变形速率进行分析。变形速率公式如下:

$$V = \frac{d_2 - d_1}{t_2 - t_1} \quad (2)$$

参照温度敏感性的分析方法,从0时刻起,每间隔15 min取一点,按照式(2)计算每两点间的平均变形速率。

由于0~15 min的变形速率过大,不存在处于压密稳定阶段的可能。所以15 min后的不同加载时间段的变形速率如图5所示。

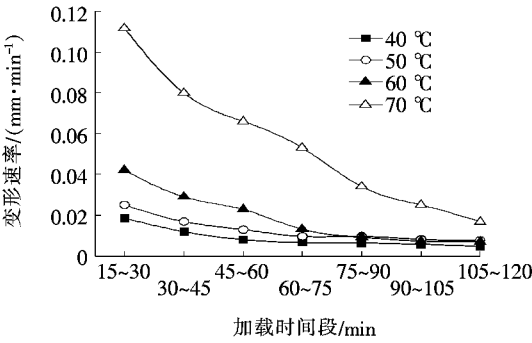


图5 橡胶颗粒沥青混合料在不同温度下的变形速率

由图5可以看出:在40 °C时,30 min之前的变形速率较大,45 min之后的变形速率虽然逐渐减小,但减小值很小,可认为曲线在此时的变形稳定,处于压密稳定阶段,曲线可以近似看作一条直线。而30~45 min的变形速率较之前和之后的时间段均有较大的减小,则30~45 min这段时间为曲线的直线发展期,可作为计算动稳定度所选取的时间段。同理,在50和60 °C的条件下,可分别选取45~60、60~75 min的曲线段作为计算动稳定度的时间段。当温度为70 °C时,曲线在105 min之前的变形速率过大,计算出的动稳定度值较小,不符合路面最小动稳定度要求,而在120 min内的图像也无法合理判别时间段。将试验碾压时间进一步延长,发现120 min之后的变形速率虽有减小,但减小值很小,可以认为105 min之后属于压密稳定阶段。则可取105~120 min的曲线段作为计算动稳定度的时间段。将所选不同温度下的时间段列于表5中。

表5 动稳定度计算的修正时间段

温度/°C	修正时间段/min	温度/°C	修正时间段/min
40	30~45	60	60~75
50	45~60	70	105~120

高温稳定性是沥青混合料在高温情况下的一种属性,不应由外部因素的影响而改变了其属性的特征。将修改后的动稳定度与45~60 min的时间段所计算的动稳定度进行比较,如表6所示。

表 6 不同温度下不同时间段橡胶颗粒沥青混合料的动稳定度

温度/ ℃	不同时间段(min)动稳定度/(次·mm <sup>-1</sup> )	
	45~60	修正时间段
40	4 846.15	3 500.00
50	3 197.96	3 197.96
60	1 842.10	3 181.81
70	635.72	2 620.00

由表 5 可以看出:未修正的动稳定度在不同温度下的数值相差较大,在 40 ℃时动稳定度较大,而在 70 ℃的情况下,动稳定度过小不满足规范要求。所以不能合理地表征混合料的高温稳定性特点。而经过修正的动稳定度,在不同温度下的数值较为接近,与未修正的动稳定度相比,能够合理地表征橡胶颗粒沥青混合料高温稳定性的本质属性,同时在理论上也符合动稳定度的计算要求。

由表 5 可以看出:时间段的选取随温度的升高而逐渐增加,修正的时间段在总的碾压时间内逐渐后移,说明温度是影响位移—时间曲线中压密阶段与压密稳定阶段的主要因素之一,温度越高,压密阶段时间越长,压密稳定阶段越靠后。而沥青混合料的抗车辙能力随着温度的升高逐渐下降。所以可以得出,压密稳定阶段越靠后,沥青混合料的抗车辙性能越弱。

## 5 结论

(1) 通过对普通沥青混合料与橡胶颗粒沥青混合料进行标准车辙试验,对比分析得出 45~60 min 的位移曲线不符合橡胶颗粒沥青混合料动稳定度计算的理论时间段。

(2) 通过对不同温度下的橡胶颗粒沥青混合料温度敏感性进行分析,得出不同温度下橡胶颗粒沥青混合料的压密稳定阶段所在曲线的位置不同,则对应  $t_1$  和  $t_2$  的取值不同。

(3) 改变车辙试验的温度与碾压时间,对橡胶颗粒沥青混合料的动稳定度进行修正,得出温度为 40、50、60、70 ℃时, $t_1$  和  $t_2$  的合理取值分别为 30~45、45~60、60~75、105~120 min。

(4) 位移—时间曲线中压密稳定阶段随温度的升高逐渐后移,且压密阶段时间越长,压密稳定阶段越靠后,沥青混合料的抗车辙性能越差。

## 参考文献:

- [1] 樊统江.沥青混合料动态蠕变模量与动稳定度的关系[J].建筑材料学报,2009(6).
- [2] 刘晏荣,等.沥青混合料高温稳定性评价指标研究[J].公路,2013(6).
- [3] ALLEN COOLEY Jr, PRITHVI S, KANDHAL M. Loaded Wheel Testers in the United States; State of the Practice[R]. Washington D. C., Transportation Research Board, 2000.
- [4] Fu Ming Liu. Study on High Temperature Stability Index of Asphalt Mixture[J]. Applied Mechanics and Materials, 2014(6): 336—339.
- [5] 刘红瑛,林立.沥青混合料高温车辙评价指标的研究[J].石油沥青,2003(4).
- [6] 岳学军,黄晓明.沥青混合料高温稳定性评价指标的试验研究[J].公路交通科技,2006(10).
- [7] Weissmans L. Selection of Laboratory Test Specimen Dimension for Permanent Deformation of Asphalt Pavements[J]. TRR, 1999(1).
- [8] 杜顺成.沥青混合料永久变形评价指标[J].中国公路学报,2006(5).
- [9] 朱纬.沥青混合料动稳定度指标的确定方法[J].中外公路,2017(5).
- [10] JTG E42—2005 公路工程集料试验规程[S].
- [11] 于敏.橡胶颗粒沥青混合料疲劳性能研究[D].内蒙古农业大学硕士学位论文,2013.
- [12] JTG E20—2011 公路工程沥青及沥青混合料试验规程[S].
- [13] 沈金安.沥青及沥青混合料的路用性能[M].北京:人民交通出版社,2001.
- [14] 邓学钧.路基路面工程[M].3版.北京:人民交通出版社,2013.
- [15] 王国忠.连续级配橡胶颗粒沥青混合料路用性能研究[J].内蒙古农业大学学报,2010(1).
- [16] Sacramento County Department of Environmental Review and Assessment. Report on the Status of Rubberized Asphalt Traffic Noise Reduction in Sacramento County [R], 1999.
- [17] 周纯秀,谭忆秋.废旧轮胎橡胶颗粒在沥青混合料中的应用[J].合成橡胶工业,2005(2).
- [18] 贺平.沥青混合料高温稳定性影响因素试验分析[J].长沙理工大学学报:自然科学版,2013(1).
- [19] 刘克非.极端气候下沥青路面的破坏机理与修复技术研究[D].中南大学博士学位论文,2012.
- [20] 刘凯.沥青路面温度场分布规律研究[D].长安大学硕士学位论文,2010.