

道路沥青的低温延度指标^{*}

李福普

(交通部公路科学研究所 北京 100088)

提要 论述了以 10°C 延度作为道路沥青低温抗裂性能指标,代替原有的 15°C 延度,这样的修正更符合沥青路面的使用性能。

关键词 道路沥青 路面裂缝 延度

The Low Temperature Ductility Norm of Road Asphalts

Li Fupu

(Research Institute of Highway, Beijing)

Abstract Taking 10°C ductility as the low temperature crack-resistance performance norm of road asphalts to replace the previous 15°C ductility is expounded in this paper; Such revision tallies even more with the bituminous pavement application performance.

Key words Road asphalt Pavement crack Ductility

1 国内外概况

60年代以来,不少国家针对沥青路面温度开裂问题,研究了影响温度开裂的各种因素,一致认为沥青结合料性质是影响低温开裂的最主要因素。并提出了一些表征沥青低温抗裂性能的指标,如沥青劲度、低温延度、弗拉斯脆点、针入度指数 PI 、针入度粘度指数 PVN 等。

国外许多学者都把注意力集中在沥青的极限劲度上,美国联邦公路局(FHWA)的综述中指出,路面开裂时原状沥青的极限劲度相当于荷载时间 2h 条件下劲度 200M Pa,或者 30min 时劲度 100M Pa。

美国 SHRP 计划研究成果提出的沥青标准中,规定的沥青低温性能指标是采用小梁弯曲蠕变试验测定弯曲劲度模量 S ,劲度曲线斜率 m 值,以及低温直接拉伸试验的极限拉伸应变。很显然,这些指标虽然先进,但由于仪器设备及试验方法等原因,目前尚不可能在我国推广应用。另一方面,沥青的延度试验作为评价沥青低温性能的指标,由于其方法简便,比较直观等优点,一直为众多国家所采用。尤其在我国的延度指标显得特别重要。尽管国内外一些

* 国家“八五”科技攻关项目 85-403-02-01

收稿日期 1996-12-11

学者对延度的看法有所争议，但都有其不同的背景，并不妨碍在我国使用。各国修建的许多试验路，都表明了延度值与路面的低温开裂有不同程度的关系，并由此提出了不同要求的延度标准。美国宾州试验路证明延度是表征沥青路面性能很好的指标，10年后，15.6℃的延度大于10cm，路面性能良好，当延度下降至3~5cm时，开始产生裂缝，由此得出结论是4℃延度与路用性能一致，延度大，路面状况越好。

近年的研究表明，延度的试验温度有降低的趋势。第十八届国际道路会议肯定了0℃延度在沥青路面抗裂方面的重要性。壳牌公司提出不同标号沥青在较低温度（例如90号沥青为10℃）时的延度应大于20cm。匈牙利的BTA沥青标准控制体系的延度试验温度为4℃。美国沥青标准从来没有延度，FHWA在1988年曾向美国运输部正式提出建议，明确指出蜡的存在影响低温开裂，并提出用规定4℃低温延度（1cm/min）的方法对含蜡量进行限制。

我国的《重交通道路石油沥青技术要求》中规定了15℃延度的指标值，在控制沥青路用性能中起到了很好的作用。在此基础上，“八五”攻关“道路沥青及沥青混合料路用性能的研究”专题对更低的试验温度作了大量的试验研究。

2 试验用沥青概况

经调查研究，本课题搜集了7种我国使用最为普遍的代表性沥青样品如表1，除辽河沥青为140号外，其余为80~100号，其中欢喜岭及克拉玛依稠油沥青符合“重交通道路沥青技术要求”的指标，其余沥青含蜡量达不到要求。

代表性沥青样品的主要性质

表 1

沥青品种	克拉玛依	KLM	欢喜岭	HXL	辽河	LHE	兰炼	LAL	茂名	MMN	单家寺	SJS	胜利	SLI
25℃针入度	89		92		138		82		81		97		96	
软化点 (℃)	49.5		48.5		46.0		50.0		50.0		50.5		49.0	
15℃延度 (cm)	> 150		> 150		> 150		38		> 100		58		22	
溶解度 (%)	99.10		99.21		99.53		99.85		99.91		99.08		99.78	
密度 (g/cm³)	0.9815		1.0120		1.0050		0.9965		1.0130		0.9978		1.0010	
闪点 (℃)	300		244		280		334		350		320		295	
含蜡量 (%)	1.28		1.55		3.85		3.38		4.08		4.19		5.55	
FRAASS脆点 (℃)	- 15		- 19		- 19.8		- 16.8		- 13		- 14.8		- 16.7	
粘度	60℃	309.9	210.1		65.0		175.3		129.1		62.4		59.3	
(Pa·s)	135℃	0.645	0.555		0.377		0.753		0.486		0.412		0.550	
质量损失 (%)		- 0.05	- 0.85		- 0.20		+ 0.05		+ 0.15		- 0.06		+ 0.10	
TFO T后	针入度比 (%)	75.2	59.2		60.9		73.2		66.7		60.8		64.6	
	软化点 (℃)	51.5	53.5		48.5		53.5		52.0		53.0		52.0	
	25℃延度 (cm)	> 100	> 100		> 100		> 100		> 100		79		48	
	15℃延度 (cm)	> 100	18.2		43.6		10.3		29.8		12.8		6.8	
PI值 (logpen)		+ 0.19	- 0.27		- 1.43		- 0.52		- 0.30		- 1.07		- 1.69	

3 低温延度试验结果

试验温度采用0℃、3℃、5℃、7℃、10℃、15℃，试验3个拉伸速度：1cm/min、3cm/min、5cm/min，结果列于表2。每一个速率下不同温度的延度变化过程如图1所示。

不同速度、不同温度下的延度值 (cm)

表 2

试验温度及速度		沥青品种						
		KLM	HXL	LHE	MMN	SJS	LAL	SLI
5cm/min	0℃		1.5	1.5		0.5		0.5
	3℃	6.0	5.0	3.5	3.3	2.7	2.5	0.7
	5℃	11.5	7.5	6.6	4.2	4.0	3.5	3.0
	7℃	21.5	19.8	11.8	4.8	4.5	4.0	4.0
	10℃	82.7	69.7	51.4	16.3	10.0	9.3	2.5
	15℃	> 150	> 150	111	> 150	55.3	52.2	22.0
3cm/min	0℃		5.5	3.5		1.5		1.0
	3℃	9.9	7.8	5.0	3.6	3.5	3.2	3.0
	5℃	16.7	10.5	7.5	4.7	4.5	4.0	3.5
	7℃	35.8	21.3	16.8	6.0	6.5	5.0	5.0
	10℃	> 150	71.5	53.5	22.0	20.0	10.0	11.0
	15℃	> 150	> 150	> 150	> 150	72.0	56.0	21.8
1cm/min	0℃		7.7	5.0		3.5		3.0
	3℃	20.5	10.5	10.0	4.3	4.5	3.7	3.8
	5℃	56.5	22.8	18.7	6.5	6.5	4.0	4.5
	7℃	133	51.5	44.0	8.3	14.8	6.8	7.0
	10℃	> 150	98.7*	96.7	104	20.9*	12.0	8.9*
	15℃							

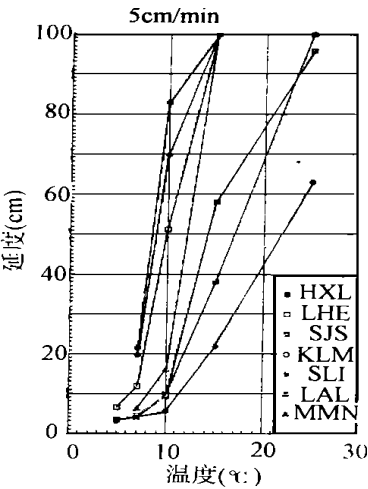


图 1 延度与温度的关系

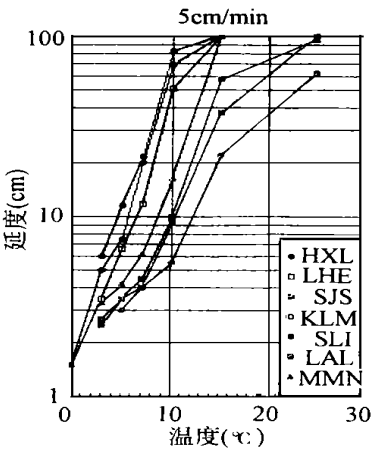


图 2 延度与温度的关系

图中，每种沥青在各个速度、不同温度下的延度值都可以拟合成下列指数函数关系，拟合的相关系数均大于 0.9 表 2 中带“*”的为回归计算值。

$$D = ab^T \tag{1}$$

式 (1) 也可以用对数形式表示，令 $A = \log a$ ， $B = \log b$ ，则

$$\log D = A + BT \tag{2}$$

因而在对数坐标上，0~ 15℃ 范围内延度值大体上成为直线关系。如图 2 所示，对表中的延度按大小进行排序，可以看出，每种沥青在各个温度、各个速度下所处的排序基本上没有变化，在温度较高时延度值大的低温时延度值也大。对于不同的拉伸速度具有同一规律，延度大小的顺序为 KLM> HXL> LHE> MMN> SJS> LAL> SLI

由此可见，为了对沥青进行对比评价，不妨采用低于 15℃ 的任一温度。但是进一步作分析即可看出，采用 15℃ 延度有其不可弥补的缺陷。首先，对质量较好的沥青，包括几乎所有的进口沥青，15℃ 延度都可大于 100cm，看不出质量上的差别。其次，有一些沥青，尽管 15℃ 延度并不小，但一旦降低温度，延度将迅速降低，变得不好。例如，在上述 7 种沥青中，速率 5cm/min 时，MMN 沥青 15℃ 延度大于 150cm，而其 10℃ 延度却只有 16.3cm。所以，如果仅按 15℃ 延度作为评价沥青是否符合标准性能的话，MMN 就能达到重交通道路沥青的要求，但如果以 10℃ 以下的延度值作为依据就有所不同。这说明当速率为 5cm/min 时，仅仅根据 15℃ 延度评定质量是不合理的。同样，当速率为 1cm/min 时，10℃ 延度也有相同情况，MMN 沥青 10℃ 延度为 104cm，7℃ 延度却只有 8.3cm，远小于 KLM HXL LHE。

究竟以哪个温度作为评定沥青低温性能延度试验的标准温度，我们认为应考虑以下几个条件：

- 1) 不同性能的沥青在此温度下的延度应能拉开档次。
- 2) 考虑到含蜡量对低温延度的影响，基准温度尽量低一些。
- 3) 测试值不能太小，否则误差太大（例如壳牌公司建议为不小于 20cm）同时尽量避免出现 > 100cm 或 > 150cm 的不确定情况。实际上延度大于 100cm 时，已失去测定的意义。这正是不少国家不将延度指标列入沥青标准的原因。
- 4) 要照顾试验操作的方便，测试方法要简单，尤其要便于保温。因此，在可能情况下，应尽量选用较高的温度。低温试验的时间不宜太长，防止试验过程中温度变化。
- 5) 由上说明，沥青的延度往往随温度的降低有一个明显的转折点，采用转折点温度以下的温度作为评价温度是比较合理的。

从图 1 或图 2 的延度与温度的关系曲线可以发现转折点的存在，即各种沥青都有一个延度迅速增加或降低的温度，当速率为 5cm/min 时，低于 7℃ 时，各种沥青的延度差别甚小，大于 7℃ 到 15℃ 之间延度迅速拉开，10℃ 为最适宜的温度，由此可以认为，速率为 5cm/min 时，以 10℃ 作为最适宜的测定温度。同样速率为 3cm/min 时宜采用 5℃ 或 7℃，速率为 1cm/min 时宜采用 5℃。

也有专家提出采用 5℃、5mm/min 作为标准测定条件。从试验结果看出，不同质量的沥青的 5℃ 延度差别甚小，拉不开档次。而且温度太低保温困难，增加试验的难度。尤其是试验时水流停止循环，仪器制冷恒温不能保持很长时间，且此时沥青基本上是脆断，试模成型的影响也比较大，断裂的位置不一定在中间，因此不如 10℃ 合理。

延度试验的拉伸速率，国际上除前苏联的标准采用 1cm/min 外，各国都采用 5cm/min。

根据延度试验测定结果及界限值的制定原则，“八五”攻关专题建议对重交通道路沥青的延度试验温度在一般情况下采用 10℃，拉伸速率为 5cm/min 是合理的、可行的。考虑到不同气候条件对低温抗裂性能的不同要求，建议的延度要求如表 3。

不同气候条件所要求的延度界值				表 3	
低温抗裂性能要求等级		A	B	C	D
年极端最低气温 (℃)		< - 37. 0	- 21. 5~ - 37. 0	- 9. 0~ - 21. 5	> - 9. 0
延度 (5cm/min)					
原样沥青	不小于, cm	30	20	15	10
薄膜加热后	不小于, cm	8	6	5	4

在表 2 中，符合重交通道路沥青技术要求的几种稠油沥青，如欢喜岭、克拉玛依、辽河沥青，其 10℃延度普遍大于 30cm，而单家寺、胜利沥青则达不到 15cm，尤其是兰炼沥青，其 25℃延度能大于 100cm，但从 15℃以下，延度急剧下降，10℃延度也达不到 15cm，茂名沥青更是这样，在 15℃及 25℃时，延度都能大于 100cm，但到 10℃延度一下子下降到 30cm 以下，这就说明采用 10℃延度指标较之于普通的 15℃延度更能反映沥青结合料的低温抗裂性能。因此，用 10℃延度再配合当量脆点 $T_{1.2}$ 两个指标来表征沥青结合料低温抗裂性能，比目前我国的沥青标准采用一个 15℃延度要合理得多。

薄膜加热试验后的 10℃延度测定值如表 4

薄膜加热试验后 10℃延度试验的测定值 (cm)							表 4
沥青品种	欢喜岭	辽河	单家寺	克拉玛依	胜利	兰炼	茂名
公路所	6.9	7.4	2.8	16.2	2.8	4.1	4.9
山西所	8.0	8.8	4.3	22.0	4.0	4.9	6.4

4 与 SHRP试验结果的关系

为了验证“八五”攻关提出的 10℃延度建议指标的可行性，将其与按 SHRP方法进行的小梁弯曲试验 (BBR) 的弯曲蠕变劲度 S ，以及直接拉伸试验 (DTT) 的破坏应变相比较，可得出表 5 的结果，表中还列入了 5℃延度的比较结果。

10℃延度与 BBR DTT试验结果比较				表 5
自变量 X	因变量 Y	回归方程式	相关系数	
10℃延度	BBR - 18℃蠕变劲度	$Y = 309.09 - 1.511X$	0.9968	
	- 24℃蠕变劲度	$Y = 583.25 - 1.823X$	0.923	
5℃延度	BBR - 18℃蠕变劲度	$Y = 330.9 - 13.96X$	0.9487	
	- 24℃蠕变劲度	$Y = 590.94 - 14.13X$	0.7304	
10℃延度	DTT - 12℃破坏应变	$Y = 0.16 + 0.06X$	0.9999	
	- 18℃破坏应变	$Y = - 0.84 + 0.02X$	0.844	
5℃延度	DTT - 12℃破坏应变	$Y = - 1.17 + 0.56X$	0.999	
	- 18℃破坏应变	$Y = - 0.7 + 0.13X$	0.993	

在表 5 中，几种只能符合 -12℃时蠕变劲度模量要求的沥青 (LAL, MMN, SJS, SLI)，其 10℃延度均很小，它们之间没有明显的相关关系，符合 - 18℃蠕变劲度模量的沥青 (KLM, HXL, LHE, LAL)，其延度较大，相关关系较好。其中 10℃延度与 - 18℃小梁弯曲试验劲度模量的相关系数达 0.996 8，与 - 12℃直接拉伸试验破坏应变的相关关系达 0.999 9

由此可见，“八五”攻关建议提出用 10℃延度作为低温指标是可行的，与 SHRP研究成果的两个低温指标弯曲蠕变劲度模量及直接拉伸破坏应变之间均有较好的相关关系。同时对 10℃延度来说，只有延度值相对较大时才有意义，太小便失去价值。这是因为延度太小时，试验误差已超过沥青性质自身的差异。从图 3 可见，如果符合 -18℃的设计温度，10℃延度值不宜小于 15~ 20cm 是合适的。表 4 建议中提出的 4 个等级，分别要求 10℃延度不小于 10, 15, 20, 30cm，我们认为是可行的。

5 与低温粘度的关系

沥青低温粘度反映沥青在低温条件下的变形性能，低温粘度越大，说明低温下有较大的柔性，抗开裂性能好。滑板式粘度计采用 3片 20× 30× 6.5cm的金属片夹注两层 2mm的沥青层，对中间金属片加荷，测定沥青的剪切变形，采用等剪切功 $f \cdot V$ 为 100J/ (s° m³) 时的粘度作为沥青的粘度，求得沥青 10℃温度的表观粘度如表 6所示。除个别点可能是不同单位样品处理的原因外，相关关系是很好的。

10℃ 延度与沥青粘度的比较							表 6
沥青品种	KLM	HXL	LHE	LAL	MMN	JS	SLI
表观粘度， 10℃ (10 ⁶ Pa° s)	15.7	23.9	40.6	45.0	85.1	82.2	96.7
延度， 10℃ (cm)	82.7	69.7	51.4	9.3	16.3	10.0	5.5

6 与沥青含蜡量的关系

在表 1中列出了各种沥青的含蜡量，将其与表 4各单位的 10℃延度试验结果进行回归分析，可以发现，沥青的 10℃延度与含蜡量之间有相当好的相关关系，在表 7中，相关系数均在 0.8以上。当样品数为 7, 自由度为 5时，95%保证率的相关系数界限值为 0.754 说明二者显著相关。

10℃延度与含蜡量的相关系数						表 7
试验单位	公路所	重庆所	北京市政	哈建工	西公院	平均值
10℃延度与含蜡量的相关系数	0.861	0.810	0.796	0.908	0.839	0.843

7 结论

采用“八五”攻关提出的 10℃延度指标，对许多高速公路使用的沥青样品进行了检验，证明专题组提出的 10℃延度 (速率 5cm/min) 作为评定道路沥青结合料低温抗裂性能指标，方法简便，能较好的反映沥青的实际使用性能，且与美国 SHRP最新研究成果有较好的相关性，与其他重要指标也有很好的相关关系，说明是可行的，可以在工程实际中推广应用。