

沥青路面工艺

(译文集)

张登良 许永明 朱 虹 译

王秉纲 张登良 校

人 民 交 通 出 版 社

沥 青 路 面 工 艺

(译 文 集)

张登良 许永明 朱 虹 译

王秉纲 张登良 校

人 民 交 通 出 版 社

沥青路面工艺 (译文集)
ASPHALT PAVING TECHNOLOGY
1978
Proceedings
Association of Asphalt Paving
Technologists
Technical Sessions

本书是从美国1978年出版《沥青路面工艺》文集中选择编译出

人民交通出版社出版

新华书店北京发行所发行

各地新华书店经售

北京市通县曙光印刷厂印

开本: 787×1092 $\frac{1}{32}$ 印张: 10.5 字数: 221千

1983年5月 第1版

1983年5月 第1版 第1次印刷

印数: 0001—3,100册 定价: 1.60元

内 容 提 要

本书是从美国1978年出版的《沥青路面工艺》(Asphalt Paving Technology)文集中选译的。在这些文章中发表了有关沥青路面的强度和稳定性,以及沥青与矿料之间相互作用性质等方面的理论分析、室内试验和现场调查测试的最新资料,这对于我国进一步研究沥青路面很有参考价值,可供从事路面研究、设计的技术人员及有关院校师生学习参考。

目 录

一、沥青结合料的低温流变学	
不同沥青的劲度——温度关系·····	1
二、地沥青的粘附与剥落机理在公路施工和 养护上的应用·····	20
三、沥青的性质及其与亚利桑那州路面耐用 性能的关系·····	51
四、沥青基层混合料疲劳和车辙试验的实际应用·····	76
五、劲度概念对俄克拉何马州路面横向开裂的应用·····	126
六、水泥—乳液稳定砂的永久变形性质·····	138
七、全厚式沥青混凝土路面中应变和弯沉的 现场量测·····	159
八、集料形状对沥青混合料性质的影响·····	201
九、沥青混凝土层间粘着性的研究·····	226
十、蠕变试验：一种设计沥青混合料和预计 路面车辙深度的重要工具·····	255
十一、在沥青路面混合料中填料的某些 物理—化学方面的影响及其作用·····	294
计量单位换算·····	330

一、沥青结合料的低温流变学

不同沥青的劲度——温度关系

H.E.SCHWEYER A.M.BURNS

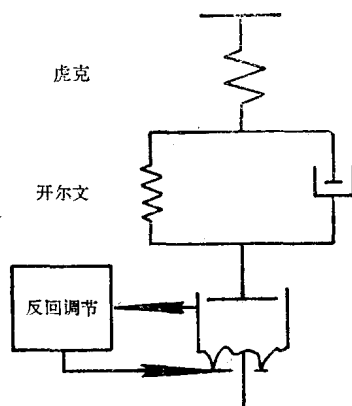
前 言

本论文的目的在于说明所选用的几种沥青在低温范围内劲度的差别，试验是利用常应力剪切管式流动仪进行的。另一个目的是论证所拟定的概括材料变形特性的方法，该法把变形特性作为时间、温度、剪切敏感性、粘度和剪切模量等因素的函数。

沥青结合料，就像一切非晶体物质那样，通常具有某些共性。其中之一是玻璃态化现象，它有点类似于晶体物质的熔点。玻璃态化温度不像晶体物质的熔点那样确定一个明显的状态转化，但是它确实给出了一个温度范围，在此温度范围内非晶体物质变得更像固体而不像流体。

许多研究者提出了有关沥青结合料玻璃态化温度方面的报告，斯维耶 (Schweyer) 提出了关于压力对玻璃态化现象的影响方面的报告(1)。业已发现，多数路用沥青的玻璃态化区在低的周围温度范围，对于本研究工作中所用的沥青在大气压下为 -10 至 5°C (14 至 41°F)，因此必须同时研究固体状态和流体状态的性质以获得精确的设计资料。

已提出和确认了图 1-1 的本斯——斯维耶 (B—S) 模型(2)、(3)、(4)，用来适应非晶体物质在其玻璃态化区



剪切变形

L —长度； τ —应力； Y —变形； $\frac{L\tau}{G_1} = Y_a$ —弹性；

$L \left(\frac{\tau}{G_2} \right) (1 - e^{-\frac{t}{\tau_0}}) = Y_b$ —滞弹性； t —时间； $\dot{Y}_c t = Y_c$ —蠕变；

$\frac{L\tau}{Y} = \frac{L\tau}{(Y_a + Y_b + Y_c)}$ —劲度； $\frac{\tau}{(K_s \dot{Y}_c)} = \eta_a$ —粘度； K_s —几何常数

图1-1 本斯—斯维耶模型

或接近该区的变形特性。从图 1-1 可见，现象逻辑模型包含有表示固体状态虎克弹性变形的弹簧，与表示内部调整贮存能量的弹簧和缓冲器（相互平行）串联，再串联一个表示流体状态的粘流变形的缓冲器。应注意到，下面那个缓冲器已被改进以适应非牛顿流动特性，而且通常沥青的流动遵循应力比零稍大时的奥斯特瓦尔德维列 (Ostwaldde weale) 的幂定律模型 (2)，或：

$$\tau_i = \eta_a \dot{\gamma}_i = (\eta_i \dot{\gamma}_i^{n-1}) \dot{\gamma}_i = \eta_i \dot{\gamma}_i^n \quad [1-1]$$

式中： $\eta_a = \tau_i / \dot{\gamma}_i$

τ_i ——应力值，帕斯卡（即牛顿/米²——译注）；

η_a ——视粘度，帕斯卡·秒；

$\dot{\gamma}$ ——剪切速率，秒⁻¹；

η_1 ——剪切速率为1秒⁻¹时的粘度，帕斯卡·秒；

C ——剪切敏感指数 ($d \log \tau / d \log \dot{\gamma}$)。

式[1-1]说明，如果剪切敏感指数 C 不等于1，则变形不与应力成正比。

如参考文献(2)、(3)和(4)中所论，劲度 S 被十分简单地定义为根据如图1-2所示的蠕变曲线在某一给定的时间和温度时的应力与总法向变形(应变)之比：

$$S = \frac{\text{应力}}{\text{弹性应变} + \text{滞弹性应变} + \text{粘滞性应变}}$$
$$= \frac{\tau_i}{(Y_a + Y_b + Y_c)/L} \quad [1-2]$$

式中： Y_a ——弹性变形，毫米；

Y_b ——滞弹性变形，毫米；

Y_c ——粘流动性变形，毫米；

L ——试样长度，毫米。

依据图1-1的B—S模型参数，劲度可写成如下形式并可证实一个非常好的近似公式(1-4)：

$$S = [1/G_1 + (1/G_2)(1 - e^{-t/t_k}) + (R/4L)(t/\eta_1 \dot{\gamma}_1^{C-1})]^{-1} \quad [1-3]$$

式中： G_1 ——剪切弹性模量，帕斯卡；

G_2 ——滞弹模量，帕斯卡；

t ——时间，秒；

t_k ——时间常数(3)，(等于开尔文缓冲器的粘度与开尔文弹簧模量 G_2 之比)；

R ——试样的半径，毫米，取决于试管的几何形状。应指出，该式的倒数有时用作柔度。从式[1-3]可见，当 $t = 0$

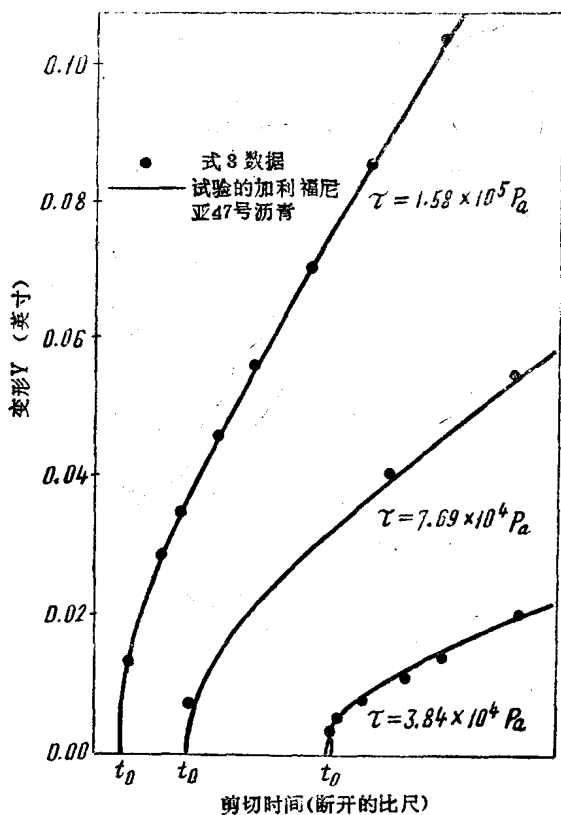


图1-2 适于不同应力时的剪切蠕变曲线模式(根据参考文献(4))

时等温劲度等于剪切模量值 G_1 ，且当时间延长，弹性和滞弹性变形比粘流变形小时，劲度与视粘度除以时间成正比。如参考文献(3)所述，存贮变形 Y_0 在经过一段时间以后确定劲度时起着次要的作用。

必须指出，劲度不仅是试验方法的函数，而且还与试验的几何学有关，如式中机器几何常数 $(R/4L)$ 所示。可是，

为要比较不同试验工艺所取得的数值，劲度的材料性质应被认为与系统几何学无关。特性劲度 S 已被推荐作为材料性质 (3)，而且为了考虑机器几何学因素 ($R/4L$)，是对系统劲度 S' 加以修正来求得 S 。在常应力时，修正的劲度 S 可近似为 (见图 1-3)。

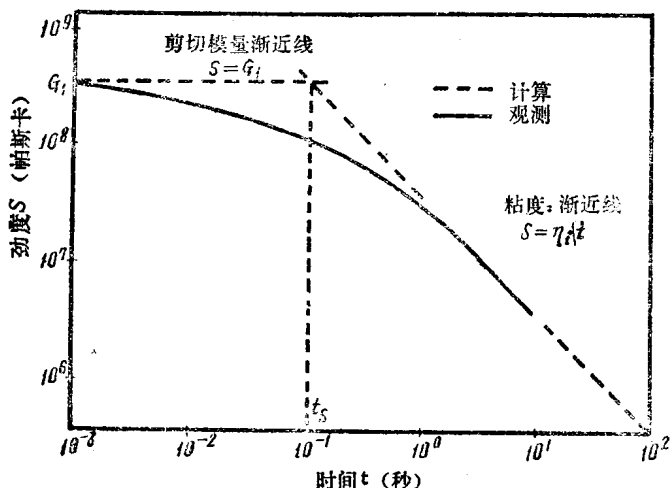


图1-3 典型的劲度曲线

$$\text{当 } t = 0 \text{ 时 } S = G_1, \text{ 帕斯卡} \quad [1-4]$$

$$t \gg 0 \text{ 时 } S = \eta_a / t, \text{ 帕斯卡} \quad [1-5]$$

式[1-4]和式[1-5]表明，作为时间函数的材料劲度可划分为两个渐近值，剪切模量 G_1 和粘度模量 η_a/t 。图 1-4 表示典型的劲度——时间关系曲线，在图中对两个应力时的曲线用几何方法进行了图解。粘性渐近线与弹性之比提供了时间常数值，因而具有特殊意义。因此，可根据这两个渐近线从劲度近似地量化相对滞弹性，用数字表示即为：

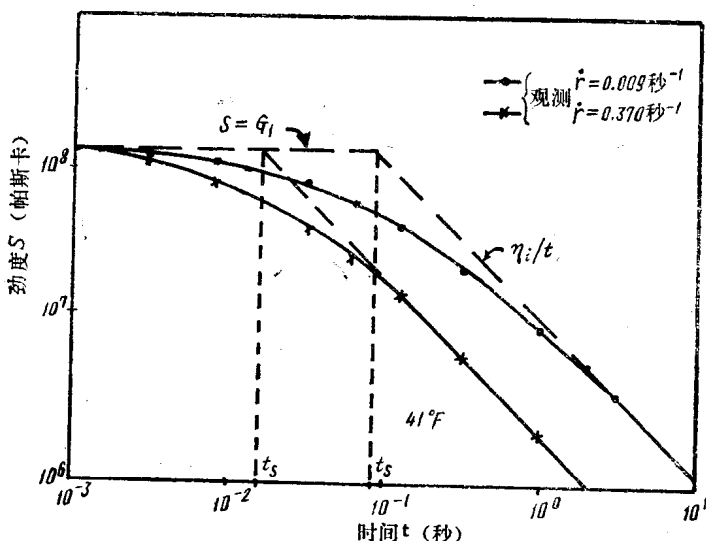


图1-4 劲度的剪切敏感性

$$t_s = \eta_a / G_1 \quad [1-6]$$

式中: t_s ——劲度极限时间, 秒, 1977年首次提出(3);

η_a ——视粘度, 帕斯卡——秒;

G_1 ——剪切模量, 帕斯卡。

显然, 该劲度极限时间值是一个很有用的表征沥青结合料滞弹特性的指标, 因为它是相对蠕变流动与弹性性质比较的量度标准。譬如, 若 t_s 很低, 如为 10^{-6} 秒时, 材料像流体那样迅速流动; 反之, 如 t_s 很大时, 材料可能成为仅发生弹性变形的固体。(可见, 对于图 1-1 中的开尔文组成部分在式[1-3]中的 t_k 与滞弹性的 t_s 具有相同的形式)。

劲度极限时间 t_s 是当所施加的应力(或剪切速率)一定时, 在劲度——时间关系曲线上的一个任意控制点。它是个假的蠕变时间, 在此时间, 等剪切粘度除以时间数值上等于

剪切模量。所以当剪切模量一定时，高的 t_s 值表示在 $G_1 \times t_s$ 等于粘度之前有相对长的时间处于弹性状态（见式〔1-6〕），反之，低的 t_s 表示短的弹性状态时间。

这就可能把 t_s 作为评定不同材料在承受相同应力时变形的某种相对弹性和蠕变应变的一个标准。可是这样的标准只评定总的弹性状态，其中包括图 1-1 中所示的纯虎克变形和粘滞性（开尔文）变形，图 1-2 中曲线的中间弯曲部分表示了这一情况。这个弯曲部分还包括一个粘性组成成分（图 1-1 中的开尔文缓冲器）的变形，这一组分与开尔文弹簧一起给出了图 1-3 和图 1-4 的 $\log$ 劲度—— $\log$ 时间关系图中的曲线。这些变形的组合影响粘度渐近线的位置，从而影响 t_s 。应注意的是，在式〔1-6〕中仅采用了剪切模量渐近线 G_1 ，可是还包括其它的弹性效应，因为正如刚才所提到的，滞弹性对粘度渐近线的绝对位置也有影响。

对于这样的粘弹性材料，即在所有的弹性效应发生后，在恒定的剪应力与变形和剪切速率（即蠕变流动速率）两者之间皆呈直线关系时，其劲度极限时间 t_s 是个常数。因而这样的材料显示牛顿流动，并且所有蠕变流动结果有一个粘度渐近线，如图 1-3 所示。可是如果是非直线关系，则如图 1-4 所示所施加的剪应力将影响劲度极限时间；并必须用确定劲度的蠕变速率规定为确定这一时间的剪切速率（或应力）。如表 1-1 所示，各种粘度的劲度资料是在剪切速率为 0.05秒^{-1} 和时间为 1 秒时由粘度渐近线外推至劲度渐近线所得。如表上所注，1 秒时间的劲度等于任一个所规定的剪切速率时粘度除以 1 秒，因此，1 秒时间的劲度（帕斯卡）具有与粘度（帕斯卡——秒）相同的数值。

进一步假定恒定的剪切模量和非牛顿蠕变流动（如假的塑性流体）还可以看到，较高的应力将产生相对较低的粘

表1-1 沥青结合料的性质

品 种 针入度 / V60* T_a : 50大气压	温 度 ℃	粘 度 和 劲 度 资 料				
		复合 流动, C	粘度 η , 10 ⁶ 帕·秒	劲 度		极限时间 $t_{s,0.05}$ 秒
				G , 10 ⁶ 帕	$S_{0.05,1}^{**}$, 10 ⁶ 帕	
3/科恩河 91/93.0帕秒 3°C/37°F	-5	1.03	3.27E3		3.03E3	
	0	1.04	3.65E2		3.24E2	
	5	1.00	4.07E1		4.07E1	
	15	1.00	5.18		5.18	
	25	1.02	8.75E-2		8.24E-2	
9/加拿大 77/103.4帕秒 -2.5°C/28°F	-5	0.76	1.25E 2	7.09E 2	2.56E 2	0.36
	0	0.74	7.96E 1	5.15E 2	1.73E 2	0.34
	5	0.66	5.16	2.83E 2	1.43E 1	0.05
	15	0.90	1.25	--	1.69	
	25	0.92	7.99E-2	--	1.00E-1	
12/氧化 68/396帕秒 -8.5°C/17°F	-5	0.52	1.11E 1	1.79E 2	4.68E 1	0.26
	0	--	--	--	--	--
	5	0.56	1.34	1.16E2	5.02	0.04
	15	--	--	--	--	--
	25	0.65	6.54E-2	--	1.87E-1	
17/高粘度 29/304帕秒 3°C/37°F	-5	0.73	1.67E 3	3.50E 2	3.86E 3	11.0
	0	0.76	5.65E 2	3.26E 2	1.16E 3	3.6
	5	0.64	7.29E 1	2.90E 2	2.17E 2	0.75
	15	0.61	4.90	2.41E 2	1.56E 1	0.06
	25	0.66	6.54-1	--	1.84	--
22/中央一大陆 93/208帕秒 -7°C/18°F	-5	0.54	1.00E 1	3.46E 2	3.96E 1	0.12
	0	0.55	3.77	2.18E 2	1.41E 1	0.06
	5	0.56	2.10	1.35E 2	7.10	0.05
	15	0.60	5.00E-1	3.57E 1	1.66	
	25	0.67	7.66E-2	--	2.07E-1	

续上表

品 种 针入度/V60* T_a : 50大气压	温 度 °C	粘 度 和 劲 度 资 料				
		复合 流动, C	粘度 η , 10 ⁶ 帕-秒	劲 度		极限时间 $t_{a,0.05}$ 秒
				G_1 10 ⁶ 帕	$S_{0.05,1}^{**}$ 10 ⁶ 帕	
27/壳牌石油公司 79/61.4帕秒 0°C/32°F	-5					
	0	0.84	3.27E 2	5.67E 2	5.28E 2	0.93
	5	0.90	3.89E 1	3.08E 2	5.25E 1	0.17
	15					
	25	1.1	6.32E-2		4.68E-2	
37/德克萨斯 74/140帕秒 5°C/41°F	-5					
	0	0.66	1.40E 2		5.88E 2	
	5					
	15	0.77	1.49		2.96	
	25	1.02	1.31E-1		1.29E-1	
39/丙 烷 99/99.3帕秒 -4.8°C/23°F	-5	0.82	7.87E 1	4.37E 2	1.35E 2	0.31
	0	0.70	3.03E 1	3.08E 2	7.45E 1	0.24
	5	0.77	4.06	2.07E 2	8.09	0.04
	15	--	--	--	--	--
	25	1.00	5.90E-2	--	5.90E-2	--
42/科威阿拉伯 84/218帕秒 -4°C/25°F	-5	0.75	7.27E 1	5.86E 2	1.54E 2	0.26
	0	0.67	1.35	4.38E 2	3.63E 1	0.08
	5	0.69	4.75	3.34E 2	1.20E 1	0.04
	15	--	--	2.12E 2	--	--
	25	0.93	1.20E-1	--	1.52E-1	--
45/高氧化 13/6.23E5帕秒 15°C/59°F	-5	0.24	4.55	3.57E 2	4.43E 1	0.12
	15	0.32	2.97		1.89E 1	
	25	0.39	1.74	--	1.08E 1	
	40	0.47	4.18E-1	--	2.05	
	60	0.39	9.74E-2	--	6.23E-1	

续上表

品 种 针入度/V60* T_g : 50大气压	温 度 ℃	粘 度 和 劲 度 资 料				
		复合 流动, C	粘度 η_1 10°帕-秒	劲 度		极限时间 $t_{0.05}$ 秒
				G_1 10°帕	$S_{0.05,1}^{**}$ 10°帕	
47/加利福尼亚 83/102帕秒 -2.5°C/28°F	-5	0.81	1.94E 2	6.77E 2	3.43E 2	0.51
	0	0.79	4.63E 1	5.25E 2	9.22E 1	0.18
	5	0.80	8.71	3.59E 2	1.59E 1	0.04
	15			--	--	--
	25	1.+	7.50E-2	--	7.50E-2	--
62/高粘度 35/981帕秒 -2°C/29°F	-5	0.70	6.00E 2	5.31E 2	1.47E 3	2.77
	0	0.60	8.77E 1	3.95E 2	2.88E 2	0.72
	5	0.63	3.27E 1	2.79E 2	9.88E 1	0.35
	15	0.65	4.79	1.51E 2	1.37E 1	0.09
	25	0.53	5.69E-1	--	2.37	--

* V_{60} 为60°C时的粘度, 1帕秒 = 10泊。 T_g 是估计的在50大气压下的玻璃变态温度。

** 1秒时的劲度(帕斯卡)与粘度(帕斯卡-秒)的数值近似。

度, 因而劲度极限时间较短(对于有膨胀性的材料则相反)。因此, 剪切敏感性较高的假塑性材料使它们更有较大的弹性性质, 这表现在它们在较低的应力(较低的剪切速率)时具有较大的劲度极限时间。也就是, 当应力较低时, 在材料的较高粘度时变形发生之前, 弹性性质持续较长的时间; 反之, 当应力较高时, 材料将轻易地流动以适应所施加的高的应力。如果不适应(或如果膨胀)即超过了弹性变形极限, 则该应力可引起脆裂。这些是在任何温度, 特别是在低的周围温度时沥青工艺师们所关心的性质。可以确信高的劲度极限时间能影响在弹性变形之后材料对于应力(按粘性变形)的适应性(根据图 1-1 的 B—S 模型和图 1-2 的蠕变曲线)。虽然从强度出发可能期望具有高的剪切模量, 但还

期望同时具有粘性变形（蠕变）以防脆裂。可是，由于鲁斯（Ruth）博士在佛罗里达大学的研究已指出可能存在综合的与疲劳有联系的“破坏变形”，故必须把粘性变形减到最小。

因此，沥青结合料的最佳性能必定显示粘性与弹性参数的平衡。这种平衡的实际评定就是本研究的目的。劲度极限时间 t_e 看来能够定量地表示这种平衡且可以用于低温规定的一种性质参数。

可作如下推测，即量测全部宏观状态的劲度极限时间（或其他类似的粘弹性参数）确实是反映了控制其性能的微观的或分子的状况。譬如，当温度降低时，分子粘度增加，而有些性质，如体积模量对粘弹性质（如剪切模量）影响较小。这是由于不发生自由体积变化的较低的分子流动性，它将影响玻璃态化及其有关现象。

这些概念应用到沥青混合料上，对于控制横向裂缝环境方面（包含循环的气温和（或）伴随的荷载应力）似乎是有其价值的。

试验结果

适于在常压流速计中所获得的实际变形反应资料的 B—S 模型的实例（5）、（6）示于图 1-2。在低温时，或是当粘度为 10^8 帕斯卡秒或更高时，不使用常压流速计的流动管。而是在试样管内安装一个 50 毫米（2 英寸）长、直径为 9.53 毫米（0.375 英寸）的圆柱形活塞，并将试样作为恒定长度的活塞式流动进行试验，其计算方法与管流相同。这种方法是根据宾汉（Bingham）和斯蒂芬斯（Stepheus）关于松香的试验报告（7）拟订的。

适用于图 1-2 中的试验蠕变曲线的一个修正的最小二乘法被用来确定公式〔3〕中的五个等温参数，而后利用公式

[1-2]和[1-3]反算不同时间的变形（如在图 1-2 的蠕变曲线上用圆点符号所表示的）。如参考文献（3）和（4）所述，试验资料的相关性很好。

图 1-4 表示剪切敏感性（非牛顿流动）对系统劲度的影响，其中标志线表示用原始数据和公式[1-3]计算的劲度。可以看到，劲度值可近似地根据分别在很短的和延长的时间时剪切模量和粘度模量的渐近值确定。当流动是如图 1-4 所示的非牛顿流动时，如所提出过的那样，需要在图 1-1 中底下的马克斯威尔缓冲器上安置一个柔性反回模型。另一些研究提出了复合式开尔文组成部分以考虑幂定律效应，但是，如果认为当应力变化时，图 1-1 的模型能够做为瞬时的模式，则这些似乎是多余的了。

表 1-1 中列出了 12 种所选用的沥青其温度在 $-5 \sim 25^{\circ}\text{C}$ ($23 \sim 77^{\circ}\text{F}$) 范围内的特性劲度参数。在表 1-1 中可以看到，剪切敏感性指数 C 值变化在 0.24（45 号氧化沥青）至 1.1（壳牌石油残渣）。（注：比 1.0 大的 C 值表明在试验所用的应力范围时材料是膨胀的）。尤其要注意的是，虽然有些试验所用沥青在小的温度范围内基本上是牛顿的，但没有一种试验表明沥青在一宽的温度范围内是牛顿的。此外，虽然在剪切敏感性与温度之间不能建立牢固的相关关系，但资料似乎表明了随着温度的降低非牛顿性质增加的一般趋势。这或许是在低温时弹性较大的影响。

为了提供一种记录资料的方法，建议将剪切速率为 0.05 秒^{-1} 时的粘度与公式[1-2]结合以求得劲度。图 1-5 表示不同温度和 $\dot{\gamma} = 0.05 \text{ 秒}^{-1}$ 时 17 号高粘度沥青的特性劲度曲线。图 1-5 中劲度曲线的形式表明，剪切模量、粘度和劲度极限温度的温度敏感性的研究定会为预测在一个温度范围时的劲度提供可能性。