

沥青材料与沥青路面性能

(专题情报资料)

交通部公路科学研究所

交通部科学技术情报研究所

一九八八年十月

沥青材料与沥青路面性能

(专题情报资料)

交通部公路科学研究所
交通部科学技术情报研究所

一九八八年十月

前 言

根据“七五”攻关课题《重交通道路沥青在高等级公路工程中的实用技术》研究大纲的要求，我们组织了交通部公路科学研究所、交通部科学技术情报研究所、石油大学重质油研究所、交通部重庆公路科学研究所、西安公路研究所、同济大学、东南大学、哈尔滨建筑工程学院等单位的专家搜集、翻译了一批国外文献，出版了这本《沥青材料与沥青路面性能》专题情报资料，奉献给我国从事沥青及沥青路面研究、生产、施工、管理的同行们。

近年来，广大沥青及道路工作者越来越认识到沥青质量与沥青路面的紧密关系，认识到提高沥青质量是修筑一条高质量沥青路面的重要的先决条件。沥青质量从根本上决定了路面的使用性能。本专题情报资料基于这一思想着重汇集了沥青材料的性能与沥青路面使用性能的内在联系，沥青及沥青混合料性能的评定方法与评价指标，尤其是沥青路面的三个主要性能即：

沥青路面的耐久性能（按疲劳设计的）；

沥青路面的抗裂性能（按低温收缩开裂设计的）；

沥青路面的高温稳定性（按车辙设计的）等的试验方法、预测模式、影响因素等。

所选编的译文大部分来自美国、加拿大、日本及壳牌石油公司的一些非公开刊行的重要研究报告以及发表在AAPT上的一些重要著作。尤其是有较多的关于有名的圣安妮试验路、宾州试验路的总结等，这些资料将会给我们以参考与启迪。文章中还介绍了一些互相矛盾或不同的见解。例如，针入度指数PI与针入度粘度指数PVN究竟哪一个更能反映沥青材料的感温性等等，可供我们研究借鉴。

现在，我国进入了一个修筑高速公路、一级公路，以及汽车专用公路等高等级公路的新阶段，也已开发了一些符合“重交通道路沥青技术要求”的沥青新品种。我们希望，这本专题情报资料的刊行将会推动对沥青材料及沥青路面性能的研究工作。为我国的道路事业作出贡献。

由于选题、翻译及出版过程甚为仓促，再加上编者水平不高，资料中定有许多错误或不当之处，望读者不吝指正。为压缩篇幅及节约经费，本集资料大部分为摘译，如有需全文或图表者逕可与我们联系（或译者本人）联系。

根据计划，两年后还将编辑本资料的第二辑。我们热忱希望有志于此工作的同志提供译著，共同办好专题情报资料的翻译出版工作。

交通部公路科学研究所

沈金安

目 录

前言

沥青的要求、特性与试验方法·····	(1)
沥青的组分·····	(8)
沥青化学成分与物理性质的关系及其技术规范·····	(15)
沥青性质与原油及炼制工艺的关系·····	(23)
分析原油预测沥青质量和产率·····	(25)
针入度—粘度指数及应用·····	(28)
沥青含量和等级对沥青混凝土结构性能的影响·····	(34)
如何确定粘弹性沥青混合料的模量·····	(38)
美国宾州试验路研究总报告·····	(47)
二十年后圣安妮试验路再调查·····	(58)
沥青混合料温度应力破坏的研究·····	(66)
沥青路面低温开裂预测·····	(71)
根据温度应力确定沥青路面的开裂·····	(80)
减少沥青路面低温收缩裂缝的设计方法·····	(89)
低温路面沥青结合料的选择·····	(107)
沥青路面温度应力开裂破坏·····	(114)
寒冷地区路面温度应力的疲劳破坏·····	(118)
减少横向裂缝的不利影响·····	(119)
沥青混凝土低温拉伸性能的实用评价方法·····	(124)
南非沥青混凝土路面的开裂问题·····	(128)
反射裂缝研究的新进展·····	(140)
沥青混凝土在三轴压力下的变形特性·····	(151)
沥青路面的车辙预估·····	(160)
柔性路面车辙深度的预估·····	(173)
重交通道路沥青——半氧化沥青 AC—100 的研制·····	(182)
主要国家道路石油沥青标准·····	(192)

沥青的要求、特性与试验方法

1985年海牙第三届欧洲沥青研讨会

第三届欧洲沥青研讨会中第一组的正式议题为“沥青的特性”，两个小标题是：
 一功能要求与特性；
 一合理的试验与试验方法。

1. 对沥青的要求

有五个国家的论文是关于此题目的。目前欧洲的主要国家对沥青特性提出的要求见表1。

欧洲主要国家道路沥青性质试验要求

表1

性质要求	奥地利	比利时	瑞士	西德	丹麦	西班牙	法国	英国	意大利	挪威	荷兰	瑞典	芬兰
对沥青原样的试验：													
针入度，25°C	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×
软化点(R&B)	×	×	×	×	×	×	×	×	×				
延度，5cm/miu	×		×	×		×	×		×				
粘度，60°/135°C	×	×	×		×							×	×
弗拉斯脆点	×		×	×		×			×			×	×
溶解度	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×
灰分含量			×	×									
蜡含量				×			×		×				
密度	×	×	×	×	×		×		×		×		
闪点				×	×	×	×			×	×	×	×
介电常数							×				×		
针入度指数							×						
重量变化(LOH)	×							×			×		
薄膜加热试验(旋转式)			×		×	×	×	×	×	×	×	×	×
在旋转烧瓶中加热含水量				×		×							
对各种加热老化试验后残留物的试验：													
重量变化	×		×	×	×	×		×	×	×		×	×
针入度，25°C	×		×	×		×	×	×	×		×		
软化点(R&B)				×					×				
延度				×	×	×							
粘度，60°C					×					×		×	×
弗拉斯脆点				×	×					×		×	×
针入度指数										×	×	×	×

瑞士一家道路公司的论文提出补充沥青标准的要求。其主导思想是，所提出的要求应有助于区分不同产地的沥青。论文主观上认为委内瑞拉沥青优于中东沥青。在德国也有一些专

家一度曾持此看法。但这种看法在客观上是站不住脚的。通过对德国南部和北部试验路段的多年观察和最近完成的研究结果可以证明这一点。作者还引用了六十年代末 Stinsky 提出的想法,并赞成采用四种新试验方法:在冰水中放置后在 25°C 下重复针入度试验、发泡试验、水中浸泡试验和低温延度试验。但论文强调试验特性与沥青混合料性能之间的关系是“难以认识”的。

联邦德国道路研究院提交的论文介绍了近年来为确保提供的路用沥青切实符合质量要求所做的工作。当时从多方面寻找原因,并将可能存在的原因列成表。除了空隙过大、结合料含量过低、沥青太硬、压实不足、在料仓中老化过度等原因外,还提出了沥青质量问题。在道路公司、沥青厂和政府有关部门的协商下,修筑了各种沥青的试验路,然而未能发现沥青混合料的差别,但还是决定对沥青进行一次非常广泛的研究。首先调查了是否符合沥青标准,并进行了 DIN 1995 中未要求的试验,如低温延度试验和粘度试验,从中获得更多的信息。最后把使用了试验沥青的路段记录下来,以便今后能够总结沥青与沥青混合料之间的关系。联邦道路研究院的试验得出了以下结论:尽管不能排除取样误差,所研究的试样在针入度、软化点和脆点方面基本符合 DIN 1995。根据 DIN 520 16/17 进行老化试验之后,这些数值低于 DIN 1995 中规定的软化点升高限值和针入度下降极限。低温延度值相对较小(B80 在 10°C 下, B65 在 13°C 下测得),因此尚不足以说明需要提出特殊要求。试验表明这些数值在该范围内对温度特别敏感。其它结果也不能说明与沥青混合料质量有关。

在另一篇论文中,西班牙介绍了他们的新沥青标准。西班牙的标准迄今为止只有很少的规定指标。因此他们现在对施工过程中沥青发生的变化规定极限值是可以理解的。试验室模拟采用了 ASTM 的薄膜加热试验。根据沥青稠度的不同,允许重量在 0.5~1.5% 之间变化。以前只按照针入度分类,现在又补充了软化点(在薄膜加热的重量变化试验前后);开始时这两种试验都是试用性的。延度试验停留在 25°C。-1~+1 之间的针入度指数极限也未改变。这种限制看来很有必要,因为目前试用的软化点极限值相差很大。0.2% 体积的沥青含水量限制仍未变;这是现在唯一保留的标准指标。关于将粘度纳入西班牙标准的问题正在进行讨论,但目前尚缺乏容易操作的粘度计。稀释沥青的数量急剧减少,主要是由于生态原因。

西班牙的第二篇论文论述了针入度试验的可重复性和可比性。

最后两篇论文是有关沥青要求的,由“北欧沥青委员会”的成员挪威和芬兰提出。该委员会由丹麦、芬兰、挪威和瑞典四国各派两人组成,从 1972 年开始工作。其目的是利用国际经验,特别是北欧的经验来评价沥青的主要特性,并从中推出合理的试验方法,最终形成标准。表 2 是北欧委员会对沥青的要求。

表中给出的要求是按照针入度连续分级的。分级范围上下限的选择相当于 3.5°C 左右的软化点间隔。但对软化点本身未作规定。

取代软化点是在 60°C 和 135°C 施工过程中的粘度要求,而且两项都是最小值,都是从壳牌沥青试验数据图中取出的。北欧委员会的规定即使对成员国也没有约束力,但所有成员国都遵循这些规定,只有少许变动。他们相信,不管是薄膜加热试验还是旋转薄膜加热试验都能很好地反映沥青在拌合装置中的变化(但芬兰的论文对此表示了怀疑,图 1),而且这两种试验方法都被允许用于测定重量变化和对残余物作进一步试验(如表 2 所示)。为了排除施工过程中性质变化太大的沥青,对加热试验后的 60°C 粘度规定上限极值是合理的。为了排除起泡严重和含石蜡的沥青,保留了延度试验。

对沥青原样的要求			35—50	50—70	70—100	100—145	145—210	210—300	300—430	
针入度, 25°C, dmm	ASTM D5	最小 最大								
粘度, 60°C, N·S/m ²	ASTM D2171	最小	300	200	120	80	50	30	20	
粘度, 135°C, mm ² /S	ASTM D2170	最小	400	310	260	215	180	150	130	
软化点(R&B)°C	ASTM D36				无极限值					
溶解度, %	ASTM D2042	最小	99.5	99.5	99.5	99.5	99.5	99.5	99.5	
闪点, PM, °C	ASTM D93	最小	220	220	200	200	200	180	180	
密度, 25°C	ASTM D70				无极限值					
对薄膜加热试验或旋转薄膜加热试验后的残余物的要求			ASTM D 1754或ASTM D 2872							
重量损失, %		最大	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.5	1.5	
弗拉斯脆点, °C	IP80	最大	-5	-8	-10	-12	-15	-18	-20	
粘度, 60°C, N·S/m ²	ASTM D2171	最大	2000	1300	800	500	350	200	150	
25°C的延度, cm	ASTM C113	最小	15	25	50	75	100			
10°C的延度, cm	ASTM C113	最小						50	75	

对六种稀释沥青（三种快凝的 R 和三种慢凝的 M）和四种道路油也制定了新的标准。最重要的指标是 60°C 的粘度。粘度的上限和下限极值总是相差两倍。标号数字取中值，即稀释沥青 1500 R 是快凝的，在 60°C 的粘度是 1000~2000mm²/s。对于蒸馏残余物来说，稀释沥青要求测针入度极限值，道路油要求测粘度极限值。

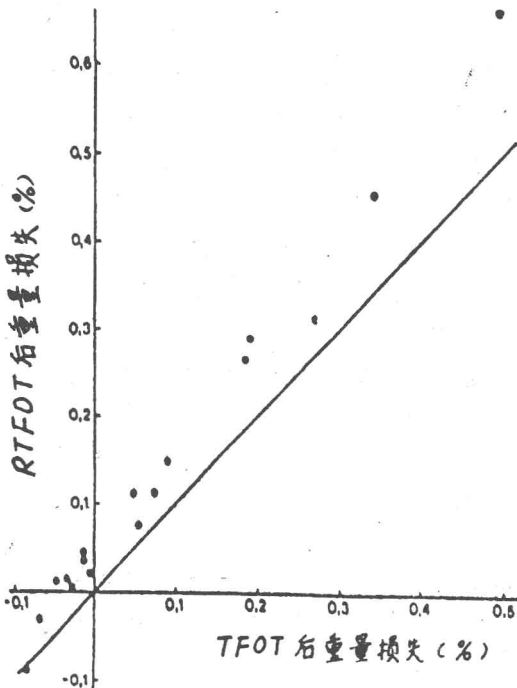


图1 薄膜加热试验和旋转薄膜加热试验后重量损失的比较

最后还有几点有趣的评论，主要出自芬兰的论文：在加热时形成一层薄膜的沥青，薄膜加热试验和旋转薄膜加热试验的结果可以有很大差别。如果薄膜加热试验的重量损失低于0.3%，则表明沥青质量“好”，并且在加工时不会释放过量蒸汽。要确定沥青的温度敏感性，不仅应在25°C下测针入度，还应在9°C或10°C下测定。因为60°C和135°C下的粘度是已知的，200mm²/s的EVT（等粘温度）容易确定。由于200mm²/s的EVT既能保证很好的裹复，又能保证沥青薄膜不致于过薄，因此认为它对拌合工艺是十分理想的。北欧沥青委员会目前正在从事粘结问题的研究，即在旋转烧瓶（rotierende kolben）中的一种水中浸泡试验。但已明确肯定，用此法不是测定沥青特性，而是确定沥青与矿料的相互作用。他们还计划制订聚合物改性沥青以及再生专用结合料的标准。

英国道路研究所（TRRL）认为他们已经找到了沥青的介电常数与道路粗糙度之间的关系。因此，针入度在35~70之间的沥青的这种特性参数已被列入标准。在 M4 高速公路上的大面积试验，2~3年后就可得出有关数据。但我们必须了解，英国用来作路面面层的热压式

沥青混凝土不同于德国的面层，这种沥青经过一段时间使用后，其粗糙度往往受到破坏。英国的又一个改革是引进了所谓的针入度 40 的 HD 沥青。HD 是“Heavy Duty”的缩写，即这种沥青主要用于重交通负荷的道路。针入度为 40 ± 10 ，软化点在 $58 \sim 68^\circ\text{C}$ 之间的这种沥青，其针入度指数可达 +2.5，但它并不是用聚合物改善的。而是通过非常强的吹气氧化使其达到如此高的针入度指数。

2. 沥青特性

比利时的一篇论文论述了粘度与针入度的关系，两者都是在 25°C 测得的（图 2）。早在 1933 年阿姆斯特丹的壳牌公司试验室就开始了这方面的研究。当时发现的这种关系后来被略加修改，于 1946 年发表了。这两种测定值之间的关系不仅在于学术价值。由于试验用的试样往往少到不够用来确定针入度，而在微型滑板式粘度计中测定只需 2 克试样就够了。比利时论文的作者指出，并非所有沥青在 25°C 下都呈牛顿液体的状态。相反，在这种较低的温度下粘度往往取决于所施加的剪应力和剪变率。如果运用下面的公式，对于 25°C 下粘度在 $10^6 \text{Pa}\cdot\text{s}$ 以上的沥青，在剪应力为 $5 \times 10^4 \text{Pa}$ 时，可以相当精确地根据粘度算出针入度：

$$\text{Pen}^{3.293} = \frac{1.611 \cdot 10^{11}}{\eta} \quad (1)$$

Carre 和 Laurent 在 1963 年也曾详细报导了针入度与粘度的关系。他们确定了不同针入度值的不同剪变率（因为针入度针贯入时是不一样的），并将这种想法带入他们的公式中。

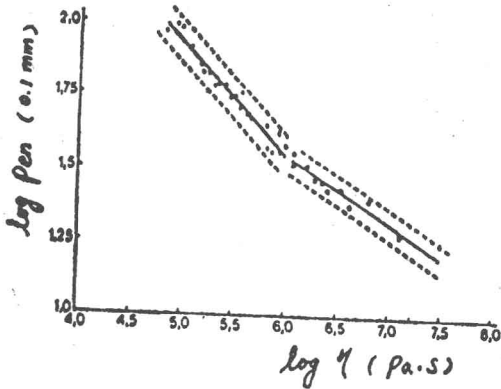


图2 从试验中确定的 $\eta < 10^6 \text{Pa}\cdot\text{s}$ 和 $\eta > 10^6 \text{Pa}\cdot\text{s}$ 范围内的粘度与 25°C 针入度的关系

法国的一篇论文论述了路用沥青的流变性能与其成分或胶体结构之间的关系。法国道桥试验中心长期以来一直在设法证明这种关系。他们使用简单的粘度测定法，但主要进行的是花费大的粘弹性测定。使用凝胶渗透色层分离法确定结构特征。但作者对此方法持慎重态度，主要是再现性尚不够成熟。流变性能与沥青特征参数之间的关系还有待研究。松弛时间频谱的宽度显然具有特殊意义。所摄取的沥青结构图与已知的想法没有根本区别。

英国的论文是唯一与 1981 年在法国戛纳举行的欧洲沥青研讨会直接联系的，尤其与该届研讨会上对沥青储量和质量所表示的担忧有直接联系。论文认为沥青储量今后是有保障的。按照现行标准提供的沥青，其性能是令人满意的。在沥青路面上发现的少数损坏，其原因或是配比不当，或是压实不够。不应孤立地看待沥青特性，而应与所使用的矿料联系起来。经常听到有人提出补充沥青标准和提出更加严格的要求。作者认为，只有证实了这种要求是有意义和实用的，方可予以接受，要拒绝不合理的要求，因为它只能导致沥青成本提高。

荷兰的一篇论文对沥青的探讨更具有批评性。该论文以过去的一项研究为依据。这项研究认为，如果在沥青混合料中只更换沥青，马歇尔参数便有明显区别。目前他们对半年内取

出的80个沥青试样(针入度为45/60和80/100)作了常规试验(如软化点和针入度)、老化试验和组分分析。但组分分析实际上只进行了凝胶渗透色谱分离法(GPC)测定。

荷兰的试验结果可以归纳如下:大多数沥青试样符合标准,但发现有9种试样的偏差超出了测量误差。如果把不同生产厂家的试样进行比较,GPC分析表明,同一种沥青在分子量分布上有明显区别。图3是沥青45/60的色谱。在另一次试验中该沥青被分解成四组分,并对它们作了GPC分析。如果画出这四种组分的总数曲线,则明显低于天然沥青的GPC曲线。如同在胶体结构中的情况,这几种沥青组分之间也存在着相互作用。因而可以断定分子量分布的区别,但不能由此推断沥青质量的不稳定性。为了掌握这种试验方法的敏感性,作了正庚烷沥青质GPC试验,这样11.6分钟后洗提出的成分分子量为9200,而12.3分钟后洗提出的为5000。GPC结果具有其科学价值,但不宜列入标准。芬兰按照ASTM薄膜加热试验(163°C,5h)作的老化试验表明,所研究的沥青试样之间没有区别。针入度平均降低了43%,而软化点升高了12%,针入度指数几乎未变。

南斯拉夫探讨了沥青的粘弹性特性,提出在试验中确定粘弹性既困难又耗资。如果具备了所需的常规指标,利用Van der poel诺模图比较容易,且相当精确。南斯拉夫作者建议使用Höppler稠度计来测定粘弹性特性。与昂贵的科学仪器相比,Höppler稠度计是能置得起的,而且操作也比较简单。

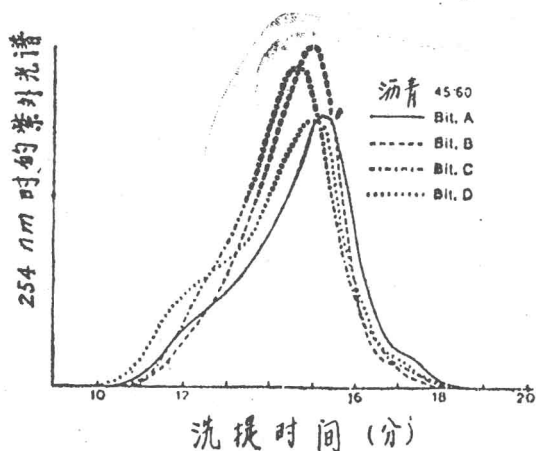


图3 四种硬度相同沥青的典型凝胶渗透色谱分离谱

3. 试验方法

本节对六篇不同论文作了阐述。前面已经提到了瑞士的建议。在0°C低温放置之后在25°C下重复针入度试验,从而降低针入度的想法并不是新想法。这种所谓的Holmes因素50多年前就已为人知晓。衡量针入度减少的主要参数是含蜡量,因为DIN1995已规定了含蜡量的上限,所以在德国不作这种附加试验。根据第二项建议,在100克沥青中加入0.5毫升水并加热,测量起泡高度。沥青中只要有少量天然表面活性物质的痕迹,

就能影响泡沫高度。作者所建议的确定沥青在矿料上的粘附性的试验与DIN1996的水中浸泡试验的不同点是,为了加快试验速度将温度升高到60°C。作者还建议在10°C下对B60/70和B80/100,在2°C下对B180/200作延度试验。上面介绍的所有方法都是一个施工公司的建议,并非瑞士的正式沥青标准中的内容。

德国的一篇文章也提出了新试验方法的建议。对DIN52016试验提出批评:试验中置于空气和酷热之下的沥青薄膜太厚(尽管沥青表面在不断变化),而且与玻璃烧瓶的接触是脱离实际的,即结合料与矿料之间的反应不易掌握。在所谓的模型罐中可以看到答案(图4)。在180°C下往装有3公斤沥青混合料的模型罐中每分钟吹入500毫升空气,持续1小时。冷却和提取之后研究沥青流变特性和沥青成分的变化。在这种老化试验中,如同在DIN52016中那样,氧化和蒸馏效果在起作用。用氮气置换空气可以排除氧化部分。所试验的沥青混合料由玄武岩8/11和1.0、1.5和2.0%的沥青组成,相当于计算出的24~48μ的薄膜厚度。在空气的影响下,软化点的升高在20°C~30°C之间。这种要求显然有些过于

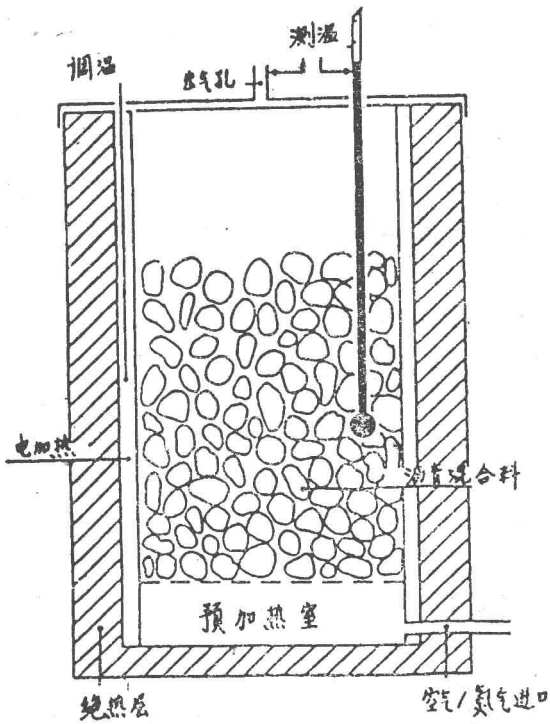


图4 “模型罐”的原理图

苛刻，因为实际上只有在料仓储存条件差时才会发生这种硬化。为研究矿料对沥青老化的催化或抑制作用所作的试验是很有意义的。在将此方法列入德国试验方法的正式目录之前，还应使试验条件达到最佳化。

意大利的一篇论文指出，针入度指数 (PI) 作为沥青的温度敏感性特征和作为确定沥青及其混合料劲度的常规指标的重要意义。探索了针入度指数的计算精度问题。求针入度指数的原始数值是针入度和软化点，或者是不同温度下（至少是两种温度下）的针入度值。他们首先确定了这两种试验方法的可重复性，为此测了250个针入度值和100多个软化点。

不同沥青品种的针入度试验的可重复性在5~7%之间，软化点在1.2~1.8°C之间。相反，针入度指数的分散率相当高，尤其是当针入度指数是根据针入度和软化点计算时。因此作者建议至少根据三种温度测定针

入度，从而确定针入度指数，并尽可能每次都进行多次测定，为线性回归分析提供足够的数

据。荷兰的一篇论文报导了沥青在各种试验中的氧化性。论文概述了沥青的老化，并专门介绍了沥青的氧化机理。沥青的硬化是个非常复杂的过程，它总是包括挥发性成分的氧化和挥发。老化过程中的氧化和挥发部分可以在不同试验中确定。撇开流变作用和挥发性成分的损失，作者研究了145°C和45°C下沥青在二氯苯溶液中的氧化机理。前一个温度反映了拌和与摊铺，后一个温度对沥青混合料的使用寿命十分重要。试验结果是：氧化基本上不是氧气与沥青成分之间的基团反应。主要组成了羧基、羰基、亚砷组。因而用于润滑剂中的抗老化剂，象碳酸、胺、亚磷酸盐和苯种联硫磷酸盐 (Dithiophosphate)，在沥青中几乎没有活性。这些抗氧化剂专作用于游离基反应。沥青含有天然抗老化剂。

沥青显然仅具有低浓度的反应性成分，这就解释了为什么在145°C和45°C下溶液中氧气的吸收随着时间的延长而很快下降。给沥青溶剂中加入KCN和NaN₃，在145°C下可以减少50~80%的氧气吸收。图5阐明了用氧气使沥青中最具有反应性的部位饱和之后氧化倾向降低的事实。经过各种方式的预处理之后，在45°C下溶液中氧气的吸收大大降低。荷兰作者用以下试验方法进行了比较研究：ASTM D6的加热损失试验 (LOH)、ASTM D 1754的薄膜加热试验 (TFOT)、ASTM D 2872的旋转薄膜加热试验 (RTFOT) 和 DIN 52016的旋转烧瓶试验 (Rot.k)。把这些试验中得到的老化效果 (一般使用针入度下降的百分比，见图6) 与在试验室制沥青试样和生产、运输以及在道路上摊铺沥青混合料时伴随的结合料变化联系起来。

南斯拉夫题为“延度是沥青质量的指示剂吗？”的论文，主要局限在对各种观点的批评性分析上，这些观点既有断然否定的，也有热情赞同的。本文只引用该论文的一张图 (图8)。在软化点之下45°C左右显然有一种等延度温度，延度值就在10厘米左右 (与针入度指数无

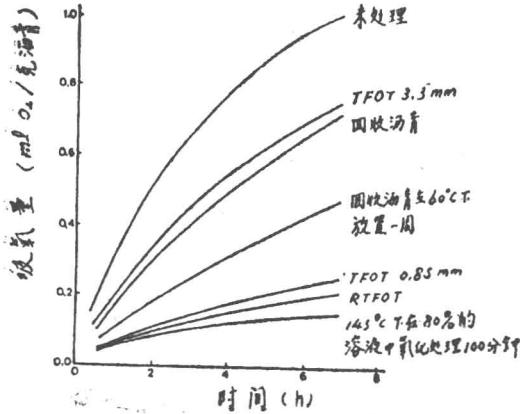


图5 经过不同预处理之后在45°C下沥青在10%的二氯苯溶液中的氧化

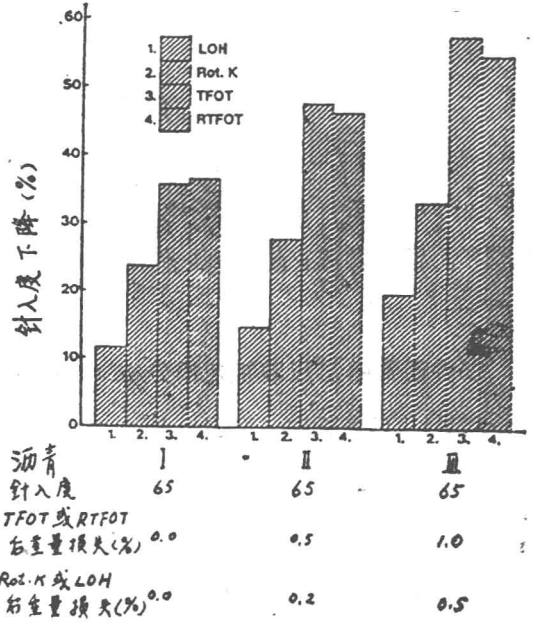


图6 各种老化试验的硬化效果

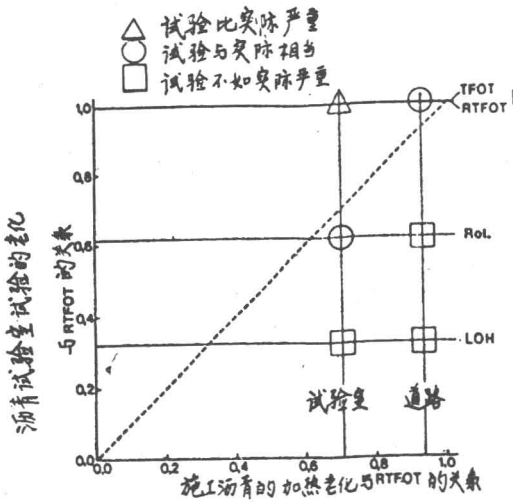


图7 沥青试验中的硬化与拌和沥青混合料时的硬化的比较

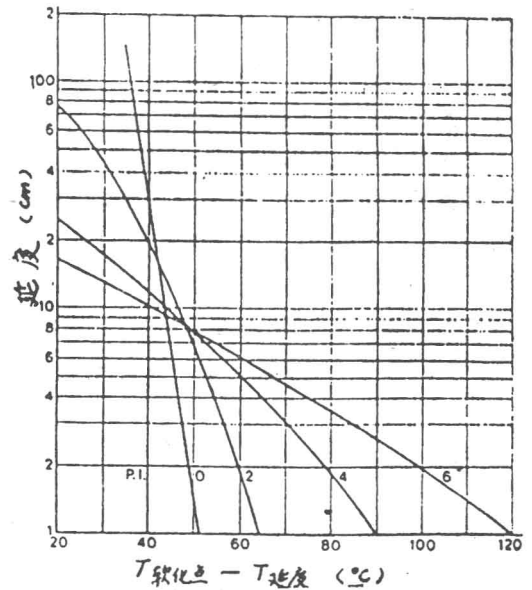


图8 延度与温度的关系

关)。Krenkler曾经规定了温度在软化点以下39°C时延度为20厘米，这正符合该图路用沥青（针入度指数约±0）的情况。但不管是在软化点之下45°C还是39°C，距实际临界温度还相差很远，而且在温度更低时也无法使用延度仪来测定。作为代替手段，作者建议测定达到规定的延度值所必须施加的力。但是要在在这方面提出具体建议，目前尚缺乏足够的测试结果。

交通部公路研究所 刘竹风译自联邦德国
《Bitumen》杂志1986年第4期 沈金安摘

沥青的组分

—M.M.Hattingh

本文的目的旨在按照沥青各组分和分子结构的化学构成确定沥青的性能；确定沥青化学构成和沥青质含量在经受老化作用中的变化；弄清化学构成及沥青质含量与沥青路用性能间的关系。

15种沥青的高压液相色谱分析 (HPLC) 组分

1. HPLC修正法。选用九种溶剂或溶液混合剂滤过二氧化硅凝胶柱进行沥青洗提，还原出九种组分，洗提中所用的溶剂及得到的相应碳氢化合物种类如下：

溶剂	组分
①正乙烷	饱和分
②正乙烷 (含15%苯)	芳香芳
③三氯甲烷 (无乙醇)	极性芳香芳 (共碱性)
④三氯甲烷 (含10%乙醚)	一元酚酶
⑤乙醚 (含3%乙醇)	碱性氮杂环
⑥甲醇	高官能分子
⑦三氯甲烷 (含3%乙醇)	多酚
⑧四氢呋喃 (含3%乙醇)	高氧多酚
⑨氮苯 (含3%乙醇)	高分子团高氧多酚

2. 沥青品种。选用 11 种针入度指标为 60 或 70 的普通沥青，4 种针入度指标为 150 或 200 的沥青。11 种沥青为南非国家标准局颁布的 LB499~LB509，另 4 种沥青为 A 型、B 型、C 型和 D 型。

3. 试验结果，表 1 和表 2 分别给出了上述两类沥青的标准试验结果。

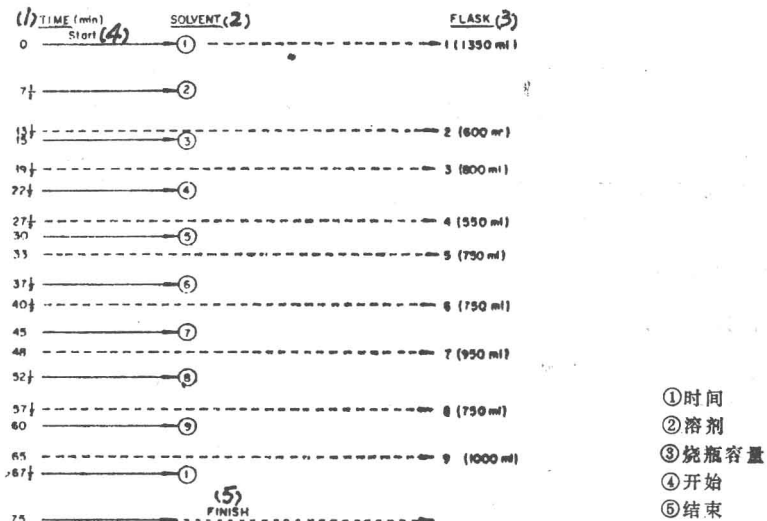


图1 HPLC沥青组分分析法溶剂和烧瓶更换时间表

针入度为60/70的沥青标准试验结果

表1

沥青试件 种类	针入度 15°C	比 重 25°C	针入度 克100, 25°C 5秒	软化点 (环与球 法)	延度 25°C (mm)	三氯乙 烯中不 溶解度 (m/m)	薄膜烘 箱加热 损失量 (%)	残余沥 青占 初始值 的百分 比	残余沥 青延度 25°C (mm)	庚烷二 甲苯当 量 (抽样 试验)	弗氏脆 点 (°C)	薄膜烘 箱试 验后 的弗 氏脆 点 (°C)
LB 499	23	1.0278	62	47.0	1400+	0	0	72.7	1400+	45.50	-10.5	-9.0
LB 500	24	1.0320	66	45.9	1400+	0.1156	0	69.8	1400+	45—50	-10.5	-7.0
LB 501	25	1.0029	63	50.2	1400+	0.2650	0	72.2	430	100+	-14.5	-10.0
LB 502	23	1.0050	54	51.5	1400+	0.2056	0	82.8	640	50—55	-14.0	-11.5
LB 503	20	1.0283	58	49.8	1400+	0.0560	0.097	77.7	1400+	50—55	-10.5	-7.5
LB 504	17	1.0225	50	50.5	1400+	0.0459	0	68.3	1400+	85—90	-6.0	-5.0
LB 505	24	1.0315	58	49.3	1400+	0	0.04	65.9	1290	75—80	-10.5	-7.0
LB 506	20	1.0200	66	47.0	1400+	0.0543	0.39	52.7	1400+	70—75	-7.5	-5.0
LB 507	17	1.0364	60	48.9	1400+	0.0265	0	70.6	1400+	50—55	-14.0	-6.0
LB 508	24	1.0118	69	50.2	1400+	0.0172	0	67.7	1400+	50—55	-13.5	-9.5
LB 509	23	1.0199	85	44.0	1400+	0.0143	0	62.1	1400+	50—55	-9.0	-7.5

针入度为150/200的沥青标准试验结果

表2

沥青试样 种类	针入度 100克 25°C 5秒	软化点 (环球法)	延度 25°C (mm)	在三氯乙 烯中的溶 解度	薄膜烘箱 试验加热 损失量	残余沥 青占 初始值 的百分 比	残余沥 青温 度 25°C	庚烷二甲 苯当 量 (抽样 试验)
沥青 A	204	40.9	1400+	99.90	0.10	60.8	1400+	35
沥青 B	167	40.0	1400+	99.90	0.13	62.3	1400+	30
沥青 C	154	41.2	1400+	99.95	0.37	54.2	1400+	35
沥青 D	195	39.9	1400+	99.95	0.38	57.4	1400+	35
SABS 规范	150- 200	36- 43	1000	99.0	1.4	45	1000	35

表3和表4分别列出的是针入度为60/70和150/200的沥青进行薄膜烘箱和扩展薄膜烘箱试验(32.5小时)后的HPCC复组分分析结果。针入度为60或70的普通沥青经扩展薄膜烘箱试验后,组分①(饱和分)含量减少12.9~8.8%;组分⑦、⑧、⑨(多酚、高氧多酚和高氧高分子多酚)的含量增加5.5~11.4%,针入度为150或200的沥青变化较大,组分①C、D两种沥青减少14.3%和15.2%,A、B两种沥青则只减少6.1%和5.4%;组分⑦、⑧、⑨C、D两种沥青增加13.7%和9.3%,A、B型沥青则只增加2.5%。

针入度为60/70的沥青5小时和 $32\frac{1}{2}$ 小时薄膜烘箱试验后的化学组分

表3

组 分	各组分含量百分比																						
	LB 499		LB 500		LB 501		LB 502		LB 503		LB 504		LB 505		LB 506		LB 507		LB 508		LB 509		
	①	②	①	②	①	②	①	②	①	②	①	②	①	②	①	②	①	②	①	②	①	②	
1	48.844.839.6	49.944.637.0	62.247.641.4	50.940.538.6	47.740.638.8	46.839.734.2	47.141.736.7	46.041.535.8	45.542.383.3	45.140.436.3	48.342.439.2												
2	11.0 9.7	6.4 10.9	9.3 6.1	8.1 7.2	4.9 7.0	6.9 8.4	8.0 8.4	8.0 8.4	8.0 8.4	8.0 8.4	8.0 8.4	8.0 8.4	8.0 8.4	8.0 8.4	8.0 8.4	8.0 8.4	8.0 8.4	8.0 8.4	8.0 8.4	8.0 8.4	8.0 8.4	8.0 8.4	8.0 8.4
3	31.933.329.6	28.229.624.3	29.531.226.1	28.428.426.9	31.128.027.0	32.830.031.0	31.432.527.6	33.831.732.3	30.933.129.7	33.833.531.0	30.128.725.0												
4	1.5 2.9	1.8 4.1	1.8 3.0	7.8 1.4	6.8 8.0	2.3 6.6	8.1 2.4	7.5 7.6	1.8 4.3	8.7 3.5	6.4 7.8	2.2 4.0	7.8 2.4	4.0 7.8	2.4 5.3	8.5 2.3	6.3 11.2						
5	0.7 0.7	0.8 0.9	0.8 0.7	2.2 0.8	2.8 4.2	0.9 1.8	1.8 1.0	2.0 2.1	0.8 1.0	2.8 1.0	1.5 2.2	0.8 1.0	2.8 0.8	1.2 2.3	0.6 1.6	2.5							
6	1.0 1.6	1.1 1.3	2.6 1.1	1.2 2.7	1.3 5.4	2.1 1.3	2.9 2.3	1.1 2.5	2.9 1.1	1.3 2.1	1.7 2.0	2.5 1.4	1.7 3.2	1.7 1.7	2.3 1.6	1.9 2.6							
7	0.8 0.9	3.2 0.8	1.1 4.9	0.8 1.1	5.3 0.7	1.2 4.7	0.9 4.2	4.3 0.8	1.9 4.3	1.1 1.9	4.4 0.8	1.4 4.0	0.6 0.8	4.4 1.0	2.5 3.8	0.6 2.0	3.9						
8	1.9 3.0	2.8 2.5	3.5 4.9	3.0 3.7	4.9 4.8	3.3 4.3	3.7 3.5	4.5 3.8	3.2 4.3	3.3 3.4	4.3 1.5	2.5 3.6	4.5 3.1	3.7 3.9	2.1 3.2	4.2 1.9	3.4						
9	2.5 3.1	5.5 4.0	5.5 8.9	2.8 4.2	4.7 4.6	5.0 6.8	2.9 7.4	5.2 2.9	5.5 7.3	3.2 6.0	6.7 2.3	4.5 4.7	2.3 4.0	7.3 2.0	4.5 4.6	2.9 7.5	5.9						

表注: ①沥青原试样②薄膜烘箱试验后残余沥青

针入度为160/200的沥青32 $\frac{1}{2}$ 小时薄膜烘箱试验后的化学组分

表4

组 分	各 组 分 含 量 百 分 比							
	沥青 A		沥青 B		沥青 C		沥青 D	
	沥青原试件	32 $\frac{1}{2}$ 小时薄膜烘箱试验	沥青原试件	32 $\frac{1}{2}$ 小时薄膜烘箱试验	沥青原试件	32 $\frac{1}{2}$ 小时薄膜烘箱试验	沥青原试件	32 $\frac{1}{2}$ 小时薄膜烘箱试验
①	48.1	42.0	53.5	48.1	49.9	35.6	55.7	40.5
②	7.3	5.8	7.7	6.2	8.4	4.3	6.3	6.6
③	26.6	26.4	24.9	30.1	29.2	23.7	22.5	23.1
④	5.8	9.7	1.9	4.3	3.6	9.6	4.6	8.1
⑤	1.9	2.5	1.6	1.1	1.6	2.5	1.8	2.1
⑥	2.2	3.4	1.8	1.5	1.6	4.7	1.7	2.9
⑦	2.5	4.0	2.3	3.8	2.2	6.3	2.0	4.7
⑧	3.0	4.2	2.6	1.6	2.2	6.2	2.4	5.3
⑨	2.4	2.2	3.7	3.2	1.5	7.1	8.0	6.7

沥青质与油脂

选用4种针入度为60或70的沥青和4种针入度为150或200的沥青进行正戊烷抽提试验，以确定沥青质的组成。通过细薄膜滤纸真空过滤，不溶性沥青质与可溶性油脂被分解开。

表5和表6分别列出了针入度为60/70与150/200的沥青用HPLC法进行的油脂分析结果。

四种针入度为60/70的沥青及其油脂、

沥青含量HPLC组分

表5

四种针入度为150/200的沥青、油脂次组

分和沥青HPLC组分含量

表6

组 分	油脂次组分含量 (%)				沥青组分含量 (%)			
	LB 501	LB 502	LB 504	LB 507	LB 501	LB 502	LB 504	LB 507
	1	48.0	46.1	41.2	41.0	52.2	50.9	46.8
2	4.9	4.1	4.9	5.2	8.1	7.0	8.4	11.8
3	13.3	15.6	17.5	14.6	29.5	28.4	32.8	30.9
4	1.2	1.4	1.9	1.6	1.8	1.4	2.4	2.2
5	0.5	0.7	0.8	0.7	0.8	0.8	1.0	8.8
6	0.9	1.3	1.2	1.2	1.1	1.3	1.1	1.4
7	0.6	1.1	0.8	1.2	0.8	0.7	0.8	0.6
8	5.1	6.5	6.8	11.5	3.0	4.8	3.8	4.5
9	1.4	1.5	1.1	1.4	2.8	4.6	2.4	2.3
合计	75.9	78.3	76.2	78.4	100.1	99.9	100.0	100.0
沥青质 %	24.1	22.0	24.5	21.6	—	—	—	—

组 分	油脂次组分含量 (%)				沥青组分含量 (%)			
	沥青 A	沥青 B	沥青 C	沥青 D	沥青 A	沥青 B	沥青 C	沥青 D
	1	5.21	48.7	51.5	52.9	48.1	53.5	49.9
2	7.1	5.4	5.5	6.2	7.3	7.7	8.4	6.3
3	17.3	14.4	13.1	12.4	26.6	24.9	29.2	22.5
4	2.8	2.8	1.3	2.0	5.8	1.9	3.6	4.6
5	1.8	1.5	0.6	0.9	1.6	1.6	1.6	1.8
6	1.5	1.7	1.1	1.2	2.2	1.8	1.6	1.7
7	0.6	2.2	0.6	0.4	2.5	2.3	2.2	2.2
8	2.9	6.3	3.0	2.7	3.0	2.6	2.2	2.4
9	1.9	1.7	2.0	1.7	2.4	3.7	1.5	3.0
合计	88.0	84.7	78.7	80.4	99.8	100.0	100.0	100.0
沥青质 %	13.7	15.3	20.7	17.9	—	—	—	—

表5和表6表明，在所进行的沥青试验中，沥青质主要存在于组分③（极性芳香分）中，在其他各类组分中也有少量存在，然而，沥青质在各组分中的排列因针入度指标不同而异，如表7所示。

针入度为60/70及150/200的沥青组分中沥青质含量对照表

表7

组 分	针 入 度 60/70				针 入 度 150/200			
	LBSO1	LBSO2	LBSO4	LBSO7	A	B	C	D
1	A	A	A	A	-	A	-	A
2	A	A	A	A	-	A	A	-
3	A	A	A	A	A	A	A	A
4	f	-	f	f	A	-	A	A
5	f	f	f	f	f	-	f	f
6	f	f	f	f	f	-	f	f
7	f	-	-	-	A	-	A	A
8	-	-	-	-	-	-	-	-
9	A	A	A	A	f	A	-	A

表注：A—含沥青质 f—部分含沥青质 - —不含沥青质

胶凝渗透色谱测定 (GPC)：胶凝渗透色谱法可根据分子大小促使高分子量的分解，重分子在轻分子之前被洗提。因此，根据保留时间 (retention time) 便可相对地确定分子的相应分子量大小，保留时间越短，分子量越大。

对针入度为 60 / 70 和 150 / 200 的沥青和经 HPLC 分馏后的沥青、沥青质与油脂次组分进行 GPC 分析，结果示于表 8 和表 9，沥青各组分的保留时间是：

组分①、②保留时间长，分子量构成小；

组分③保留时间介于最大和最小之间，分子量构成适中；

组分④、⑤、⑥保留时间介于中值与最大值之间；

组分⑦、⑧、⑨保留时间最短，分子量构成最大。

如表 5、表 6 所示，沥青质在组分③中含量最大，而在组分①、②和⑦、⑨中也有少量存在。因此，在各组分中，沥青质以高、中、低三种形式的分子量存在，起主导作用的是组分③，即极性芳香族类，油脂次组分相对保留时间较长表明，当沥青质从沥青溶液中分离出来后，高分子量成分也从中被分离。

针入度为60/70的沥青、沥青组分地沥青
组分GPC 保留时间

表8

试 样	保 留 时 间 (分)			
	针 入 度 60/70			
	LB 501	LB 502	LB 504	LB 507
全部沥青组分				
1	21.2	20.8	21.4	21.0
2	21.8	21.2	21.6	19.2
3	18.6	18.2	18.6	18.2
4	18.2	21.2	19.2	18.6
5	23.4	23.6	19.2	18.0
6	20.8	21.2	23.0	21.2
7	17.2	17.4	17.6	17.8
8	17.4	17.2	17.2	17.4
9	17.0	17.0	17.2	17.0
沥青总量	21.4	21.0	22.4	21.4
沥青质	17.8	18.0	17.8	18.0

沥青的路用性能

在道路工程中，采用针入度为 150 / 200 的沥青，尽管都符合规范标准，但 A 型和 B 型沥青在施工后即出现大量泛油，而 C 型和 D 型沥青则分别在九年和三年后仍处于良好的工作状态。C、D 两种沥青经扩展薄膜烘箱试验后，组分①大量减少，组分⑦、⑧、⑨大量增加，其路用性能要比 A、B 两种沥青为好。

试 样	保 留 时 间(分)							
	针 入 度 150/200 -							
	沥 青 A		沥 青 B		沥 青 C		沥 青 D	
	全 沥 青	油 脂 次 组 分	全 沥 青	油 脂 次 组 分	全 沥 青	油 脂 次 组 分	全 沥 青	油 脂 次 组 分
沥青组分与油脂次组分								
1	21.9	21.8			21.8	21.8	22.0	21.9
2	22.2	22.2			21.4	22.0	22.4	22.8
3	19.4	21.0			18.8	19.0	19.6	21.2
4	19.2	21.2			18.2	22.2	18.2	21.4
5	19.0	23.6	无 试 验	无 试 验	18.8	23.6	18.2	24.0
6	无 合 适 数 据	24.4			18.4	23.8	18.2	25.2
7	18.8	19.4			16.6	23.6	17.4	19.2
8	18.4	25.4			16.8	25.6	17.2	25.8
9	19.0	23.4			17.2	22.8	17.0	23.4
沥 青 总 量	21.4	—	21.7	—	21.6	—	21.4	—
沥 青 质	—	19.0	—	17.7	—	17.6	—	18.3

1.延性：道路选用沥青的延性经32小时老化试验后明显降低，对道路施工后即出现破坏的各种针入度下不同沥青的调查表明，这些沥青的延度，经扩展薄膜烘箱试验后也出现明显减小。这一试验结果证实，这类沥青的结硬期明显比所希望的短，且凝固不良。

2.沥青质含量：C、D两种沥青的沥青质含量要比A、B型沥青高，延度测定值和使用性能评价示于表10。

针入度为150/200的沥青及扩展薄膜烘箱试验(ETFOT)

后残余沥青沥青含量和延度与路用性能

表10

试 样	沥 青 A		沥 青 B		沥 青 C		沥 青 D	
	沥青原样	32 1/2 小时薄 膜烘箱试验	沥青原样	32 1/2 小时薄 膜烘箱试验	沥青原样	32 1/2 小时薄 膜烘箱试验	沥青原样	32 1/2 小时薄 膜烘箱试验
	延 度(mm)	+1400	+1400	+1400	+1400	+1400	65	+1400
路 用 性 能	差	—	差	—	好	—	好	—
沥 青 含 量 %	13.7	24.0	15.3	26.3	20.7	32.0	17.9	26.9
ETFOT后 沥 青 含 量 %	—	10.3	—	11.0	—	11.3	—	9.0

3.GPC测定：表9为不同沥青沥青质和各类组分及沥青本身的保留时间，图2和图3所示的是A、C、D三种沥青沥青质和相应的分子量与保留时间的关系。

随着保留时间的缩短，沥青平均分子量质量增加的次序依次为A、D、C。对沥青质也一样。

图3所示的是，C、D型沥青与A、B型沥青分子量与保留时间关系的对照，在同样的18分钟保留时间内，高分子结构含量这四种沥青间存在着明显差异，C、D这两种具有良好路用性能的沥青，在保留时间内有明显的峰值（如C型沥青），也有明显的阶梯现象（如