

基质沥青老化行为与老化机理^{*}

陈华鑫, 陈拴发, 王秉纲

(长安大学特殊地区公路工程教育部重点实验室, 陕西西安, 710064)

摘要: 在环境作用下沥青易产生静态硬化和氧化硬化, 使沥青的流变特性发生改变, 而严重影响沥青路面的耐久性, 如何合理评价和选择沥青对确保路面使用品质至关重要。通过三种不同基质沥青的组分分析和不同老化状态下沥青的常规试验 (针入度、软化点和延度试验)、SHRP试验 (DSR (Dynamic Shear Rheometer) 和 BBR (Bending Beam Rheometer) 试验) 结果比较, 结合 FTIR (Fourier transform infrared) 试验结果, 分析了不同老化状态下基质沥青的老化特性和机理。结果表明, 常规试验可用来描述基质沥青老化前后性能变化, 但它只能提供特定温度荷载频率下的试验信息, 而 SHRP试验可反映沥青老化对沥青流变行为的影响, 建议采用 SHRP流变学指标特别是 BBR 试验结果评价沥青的老化特性。

关键词: 老化行为; 常规试验; SHRP试验; FTIR红外光谱试验; 温度谱; 流变特性

中图分类号: U414

Aging Behavior and Mechanism of Base Asphalts

CHEN Hua-xin, CHEN Shuan-fa, WANG Bing-gang

(Key Laboratory for Special Area Highway Engineering of Ministry of Education, Chang'an University, Xi'an 710064, Shanxi, China)

Abstract: Asphalt is easy to be static hardening and oxidative hardening under the environmental effects to induce its change of rheological characteristics which influences the durability of asphalt pavement seriously. Therefore, it is critical to evaluate and select the asphalt reasonably to ensure the quality of asphalt pavement. Based on the results of components of three base asphalts and their conventional tests (penetration, soften point and ductility) and SHRP tests (DSR and BBR test), the aging behavior and mechanism of base asphalts were analyzed based on the FTIR test. The results show that conventional tests can describe the variations of base asphalts before and after asphalt aging, but they only provide the test message of specific temperature and load frequency. On the contrary, SHRP tests can reflect the influence of aging to the whole rheological behavior of base asphalt. Therefore, SHRP rheological indexes, especially BBR test results, are suggested as the evaluation indexes of the asphalt aging characteristic.

Key words: aging behavior; conventional tests; SHRP tests; FTIR Test; dynamic mechanical temperature spectra; rheological characteristics

沥青路面长期处于大气环境之中, 沥青的耐久性对路面的使用寿命至关重要。早在二十世纪初沥青的硬化变脆现象就引起了人们广泛关注, 但直到二十世纪三十年代以后人们才逐渐意识到沥青的硬化主要由氧化硬化和静态硬化引起^[1-3]。这两类老化并不孤立存在: 在施工过程中因拌和铺筑温度较

高, 沥青中的轻组分等易挥发成份产生损失, 同时还会产生高温氧化; 在营运阶段因路面服务温度较低, 沥青硬化则以氧化作用为主^[4,5]。为了合理选择沥青或采取相应的抗老化措施, 在室内常采用旋转薄膜烘箱 RTFO (模拟短期老化) 和 PAV 老化箱 (模拟长期老化) 模拟沥青老化行为, 并通过相应

指标对其老化前后性能进行评价^[5-9]。而 RTFO 与 PAV 老化试验方法已作为美国 SHRP 分级标准的主要试验方法，且与沥青的实际老化行为有很好的相关性，被世界各国普遍采用^[2,5,9]。但沥青老化后采用什么指标更能反映沥青的老化本质，尚需进一步研究。为此，本文在沥青组分试验基础上通过基质沥青老化前后组分试验、常规试验和 SHRP 试验结果比较，分析了沥青老化性能合理的评价方法。

1 试验方案

对镇海、兰炼和盘锦三种基质沥青老化前后的组分进行分析，并测试其常规试验指标、美国

SHRP 性能分级指标，以讨论基质沥青的老化行为特点，在 FTIR 光谱试验基础上分析沥青老化机理。

2 试验结果分析

2.1 常规试验结果分析

沥青组分试验结果如表 1 所示，沥青老化后其芳香分含量减少，胶质、沥青质增加，或胶质与沥青质的总量增加，而饱和分也稍有增加或保持相对稳定。可以预见轻组分减少而大组分增加后，沥青将变硬、变脆、延展性下降。

表 1 老化后沥青组分试验结果

Table 1 Asphalt Component Results after Aging

沥青品种		沥青质含量 / %	饱和分含量 / %	芳香分含量 / %	胶质含量 / %	沥青质 + 胶质 饱和分 + 芳香分
镇海 - 50	原样	9.6	12.5	42.1	28.2	0.692
	短期	13.3	13.3	36.3	33.2	0.938
	长期	24.2	13	27.4	33.5	1.428
兰炼 - 90	原样	5.4	22.7	31.3	30.9	0.672
	短期	9.4	23.3	31.5	26.0	0.646
	长期	11.3	25.5	23.7	29.8	0.835
盘锦 - 110	原样	5.5	19.4	33.8	32.5	0.714
	短期	7.8	22.2	32.2	31.1	0.715
	长期	9.8	23.3	24.3	33.9	0.918

而常规试验正好验证了沥青变硬变脆的变化，如表 2 所示，基质沥青 RTFO 老化后三大指标针入度都下降、软化点都升高、延度都减小。组分试验表明镇海 - 50、兰炼 - 90、盘锦 - 110 三种沥青中（沥青质 + 胶质）：（饱和分 + 芳香分）比值分别

为 0.692、0.672、0.714，而老化后这一比值都不同程度地增加（兰炼短期老化除外），表明沥青老化后大分子组分（沥青质与胶质）含量增加，而从增加幅度看，镇海沥青最大，兰炼沥青最小。

表 2 RTFO 老化后常规试验指标

Table 2 Conventional Test Results after RTFO Aging

沥青	性能指标	原样	RTFO	老化指数：RTFO / 原样
镇海 - 50	针入度 (25)	58	37	0.638
	软化点 /	49.5	53.0	1.071
	延度 (5 , 1mm/min) /cm	6.8	1.1	0.162
兰炼 - 90	针入度 (25)	82	57	0.695
	软化点 /	48.7	52	1.068
	延度 (5 , 1mm/min) /cm	11.2	6.4	0.571
盘锦 - 110	针入度 (25)	113	75	0.664
	软化点 ()	41.4	45.9	1.109
	延度 (5 , 1mm/min) (cm)	> 150	106	0.707 (老化前的以 150 计算)

众所周知，常规试验的三大指标与沥青的组成

密切相关，一般小分子组分含量越多，沥青越

“软”，其针入度越大、软化点越低，延伸度越大。本研究结果似乎与这一规律不相符，根据组分试验结果，原样沥青中盘锦沥青（沥青质+胶质）：（饱和分+芳香分）为 0.714 大于镇海沥青的 0.692，该值越大，说明沥青质与胶质越多，按前述规律，盘锦沥青针入度应该比镇海沥青小，软化点应该比镇海沥青高，延度也应比镇海沥青的小，但常规试验结果与这一结果正好相反。同样，RTFO 短期老化后盘锦沥青的（沥青质+胶质）：（饱和分+芳香分）比值 0.715 大于兰炼沥青的 0.646，表明老化后盘锦沥青中大分子组分高于兰炼沥青，但老化后盘锦沥青针入度大于兰炼沥青、软化点低于兰炼沥青、延度大于兰炼沥青，说明实际上老化后盘锦沥青还是比兰炼沥青“软”，这与组分试验结果是相悖的。

实际上这一结论并不矛盾，因为常规试验不能准确反映沥青组分的变化规律，其原因有二：一方面沥青的四组分之间并没有明确的界限，各组分之间是连续过渡的，不能简单地用（沥青质+胶质）：（饱和分+芳香分）的比值对不同沥青组分平均分子量大小进行比较，因为沥青油源不同，其组分也有很大差异，比如同样是饱和分、芳香分镇海沥青的比盘锦沥青的分子量大，因而在原样沥青中尽管镇海沥青的饱和分和芳香分百分比比盘锦沥青小，但镇海沥青针入度小于盘锦沥青、软化点也大于盘锦沥青；另外，尽管常规试验可以定性地反映沥青的“软硬程度”，但只能反映特定温度、特定荷载作用条件下的情况，而对于其它条件下沥青的性能差异很难体现出来，所以常规试验用来表征沥青老化前后的性能变化精度明显不足。同样组分试验结果也不能准确反映不同沥青老化性能之间的相互差异，因而也不宜作为老化评价标准。

2.2 动态力学试验

2.2.1 DSR 试验

图 1~图 6 分别表示不同老化状态下 DSR 试验结果 G^* 和 δ 随温度变化的温度谱图，在试验温度范围内沥青老化后均表现为复数模量 G^* 增加，且 PAV 老化后沥青的 G^* 大于 RTFO 老化的，相位角 δ 则表现为老化后有规律地减小，表明沥青的弹性增强，沥青变硬。但在不同温度下，各沥青复数模量和相位角值差异很大，这与各沥青分子对温度的

敏感性有关^[10]。

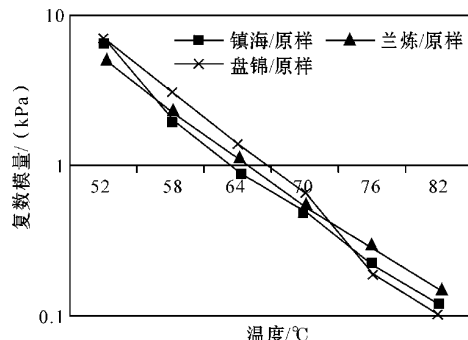


图 1 原样沥青复数模量 G^* - 温度 T 图

Fig 1 G^* -T Relationship of Original Asphalts

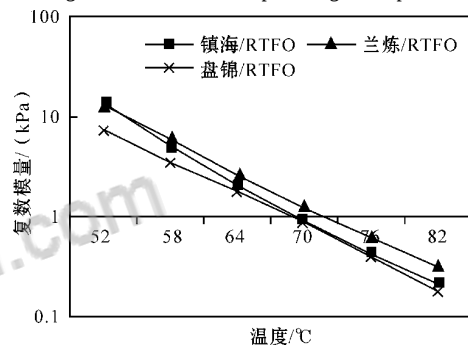


图 2 RTFO 老化沥青复数模量 G^* - 温度 T 图

Fig 2 G^* -T Relationship after RTFO Aging

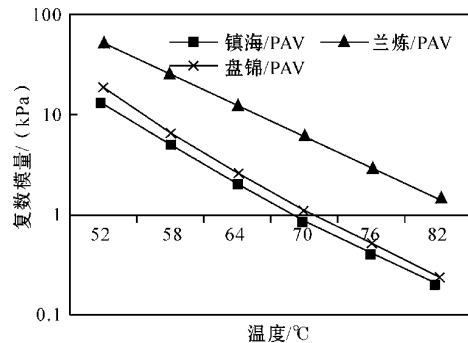


图 3 PAV 老化沥青复数模量 G^* - 温度 T 图

Fig 3 G^* -T Relationship after PAV Aging

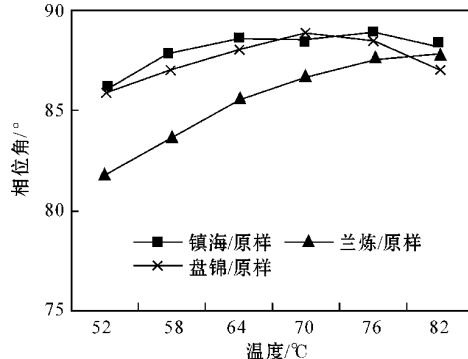


图 4 原样沥青相位角 δ - 温度 T 图

Fig 4 δ -T Relationship of Original Asphalts

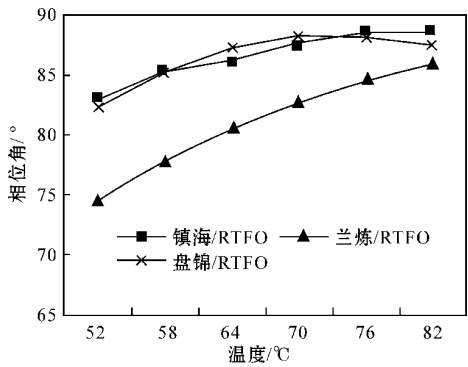


图 5 RTFO 老化沥青相位角 δ -温度 T 图

Fig 5 δ -T Relationship after RTFO Aging

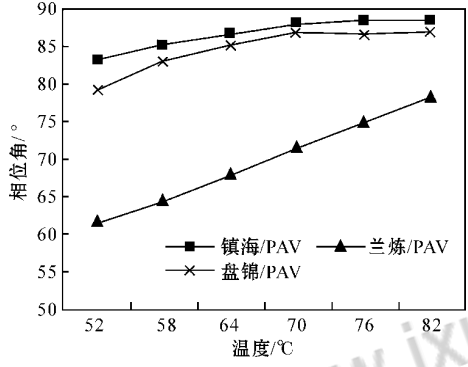


图 6 PAV 老化沥青相位角 δ -温度 T 图

Fig 6 δ -T Relationship after PAV Aging

如图 1 所示，老化前沥青 70 以下复数模量 G^* 总体看来是盘锦沥青 > 兰炼沥青 > 镇海沥青，70 以上则为兰炼沥青 > 镇海沥青 > 盘锦沥青。如图 2 所示，RTFO 老化后复数模量 G^* 则为兰炼沥青 > 镇海沥青 > 盘锦沥青；图 3 则表明，PAV 老化后复数模量为兰炼沥青 > 盘锦沥青 > 镇海沥青。依据组分分析结果，原样沥青（沥青质 + 胶质）：（饱和分 + 芳香分）比值为盘锦沥青 > 镇海沥青 > 兰炼沥青；RTFO 老化和 PAV 老化后其值为镇海沥青 > 盘锦沥青 > 兰炼沥青。通常沥青组分平均分子量越大，其复数模量越大，但从本 DSR 试验结果看，这一规律并不明显。组分分析结果表明原样沥青中镇海沥青大分子组分（沥青质与胶质）

含量比兰炼沥青多，70 以下复数模量镇海沥青小于兰炼沥青，与前述分子量越大复数模量越高不相符。对同一沥青而言，老化后，大分子会增多，复数模量则增大，这一规律与组分分析结果一致，即同一沥青老化后，大分子增多导致复数模量增大。因此，（沥青质 + 胶质）：（饱和分 + 芳香分）比值只能用于评价同一沥青不同老化状态下性能预测，而不能用于不同沥青之间的性能比较，因为不同沥青的各组分性能差异很大。

随着温度升高，基质沥青的粘性成分不断增大弹性不断减小，相位角则表现为 δ 或 $\tan\delta$ 增大。而沥青老化后由于小分子组分的损失，沥青中的粘性成分下降，表现为相位角 δ 减小。而对于原样沥青，兰炼沥青 δ 最小，盘锦沥青与镇海沥青的 δ 接近；短期老化和 PAV 老化后， δ 值仍然是兰炼沥青最低，镇海沥青与盘锦沥青的接近，整体看镇海沥青的 δ 略大于盘锦沥青的。而老化后（沥青质 + 胶质）：（饱和分 + 芳香分）比值为兰炼沥青 < 盘锦沥青 < 镇海沥青，表明兰炼沥青小组分含量最少，理论上应该是兰炼沥青的相位角 δ 最大，但测试结果恰好相反，这一点正好进一步证明了用组分分析来预测不同沥青老化后性能的不确定性。而对同一种沥青而言，老化后（沥青质 + 胶质）：（饱和分 + 芳香分）比值一般都增加，表明其中轻组分减少，大分子增多，而其相位角也是整体表征为逐渐减小，这与轻组分减少、粘性下降、弹性增强的规律是一致的。

从 DSR 试验结果可以看出，复数模量和相位角可以反映同一沥青老化前后对温度变化的响应效果，而不能准确反映不同沥青的老化性能差异性；组分试验结果可用于预测同一沥青老化前后的性能，但不能用于不同沥青之间的性能比较。

2.2.2 BBR 试验

表 3 不同老化状态下 BBR 试验结果

Table 3 BBR Test Results after Aging

温度 沥青	镇海				兰炼				盘锦			
	- 12		- 18		- 12		- 18		- 12		- 18	
	S	m	S	m	S	m	S	m	S	m	S	m
原样	173.0	0.374	351.0	0.298	74.5	0.447	169.0	0.352	101.0	0.503	282.0	0.375
RTFO	189.0	0.343	368.0	0.273	81.9	0.402	186.0	0.334	107.4	0.493	300.0	0.346
PAV	228.0	0.297	466.0	0.234	98.9	0.369	225.0	0.311	151.0	0.396	354.0	0.312

三种沥青低温下 (- 12 、 - 18) BBR 试验结果如表 3 所示, 结果表明沥青老化后劲度模量 S 增加, 劲度蠕变斜率 m 值减小, 沥青老化后的松弛性能变差。三种沥青老化后低温表现不同, 无论是原样沥青还是老化沥青, 劲度模量都是镇海沥青 > 盘锦沥青 > 兰炼沥青, 劲度蠕变斜率为盘锦沥青 > 兰炼沥青 > 镇海沥青。

如前所述, 沥青老化后, 小分子减少, 分子间的极性增强, 温度降低后, 沥青分子的热运动能力都下降, 松弛性能也进一步降低, 表现为温度越低 m 值越小, 劲度模量越大。老化后大分子的蠕变变形能力更差, 因而老化后沥青分子的运动能力下降, 表现为 m 值降低; 大分子间的作用取向性增强, 分子间作用力增大, 表现为沥青劲度增大。原样沥青中盘锦与镇海沥青大分子含量比兰炼沥青高, 所以劲度模量兰炼沥青最小; 老化后, 从组分结果看, 镇海沥青大分子含量最高, 其次是盘锦沥青, 兰炼的最小, 而劲度模量也是镇海沥青最大, 其次是盘锦沥青, 最小是兰炼沥青, 与组分结果一致。由此可见, BBR 试验结果可以充分反映不同老化状态下沥青的老化本质, 是评价沥青老化的最佳评价方法。

3 机理分析

基质沥青老化后, 通常表现为两种变化趋势: 一是饱和分、芳香分等轻组分挥发引起质量损失; 二是以氧化为主, 主要是由氧与羰基、亚砷等化学官能团结合实现的。羰基官能团是由酮以及羧酸、羧酸酐组成, 活性极强。沥青老化时, 酮和羧酸是沥青中主要的最弱组分 (或最活跃的组分), 此外芳香族中的苯甲基和许多脂肪烃侧链, 它们容易与氧结合, 使氧大量存留在酮、亚砷或其他含氧官能团中, 增加沥青的极性, 促使沥青分子间缔合, 使沥青的劲度大幅度增加, 增加幅度与极性官能团数量的多少、极性官能团之间的相互作用大小以及其他非极性官能团对极性官能团的分散能力等因素有关^[3]。

通常高标号沥青氧化后极易使非官能团转化为酯类官能团, 使沥青形成两性组分或多元分子, 这样沥青分子在两个或以上的不同位置呈现极性缔合, 使分子间的作用增强, 一些多元酸或多元碱在

氧化中形成三维结构化的亚微结构, 这种变化可通过离子交换色谱 (SEC) 试验分析验证^[1,3]。温度升高后可以加速沥青的氧化, 因为温度升高, 氧与极性分子反应速度增长; 另外温度升高使部分原来已经缔合的分子裂解, 进一步促进这些组分与氧结合, 氧化速度加大, 氧化组分增多。相反低标号沥青分子间作用力较大, 减少了沥青分子与氧结合的机会, 使缔合形成微结构的几率大大降低^[6~9]。所以高标号老化后, 劲度模量和 m 值变化幅度要大于低标号沥青, 使沥青性能裂化越明显。

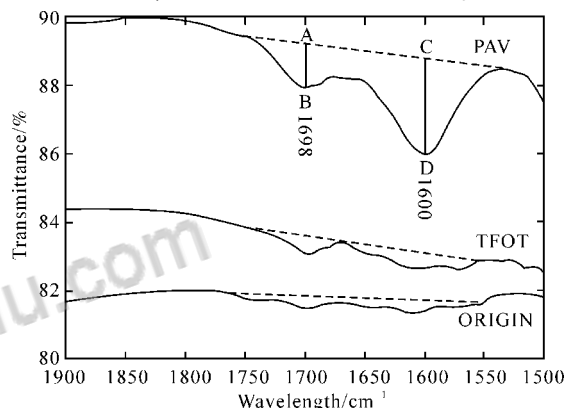


图 7 老化前后 FTIR 试验结果比较^[11]

Fig 7 FTIR Test Results Comparison after Aging^[11]

基质沥青的这种氧化可以通过红外光谱试验分析得到^[11]。红外光谱的波长范围为 0.8 ~ 1000 μm , 相应的频率为 12500 ~ 100 (cm^{-1}), 其中 cm^{-1} 为波数 ν 的单位, $\nu = 10,000/\lambda$ (μm), λ 为波长。由于高聚物其原子基团的振动与分子其余部分振动之间的机械耦合及电子耦合均很少, 因而从小分子或简单的高分子所获得的理论或经验的特征频率数据均可应用于高聚物的光谱解析。资料表明, 二氧化碳的 $\text{O}=\text{C}=\text{O}$ 的波数带为 2400cm^{-1} ; C-H 单键为 $2800 \sim 3000\text{cm}^{-1}$, 非芳香族的 C=C 双键为 $900 \sim 1000\text{cm}^{-1}$, 羰基的 C=O 双键为 $1650 \sim 1800\text{cm}^{-1}$, 酸或酸酐为 $1650 \sim 1700\text{cm}^{-1}$, 酯为 $1740 \sim 1750\text{cm}^{-1}$, 醛为 $1720 \sim 1750\text{cm}^{-1}$, 酮为 $1720 \sim 1750\text{cm}^{-1}$, 芳香环的波数则集中在 1600cm^{-1} 左右。用 Perkin Elmer 1700FTIR 红外光谱仪测得基质沥青老化前后的 FTIR 试验结果表明, 由芳香族的组分含量的转变可以反映沥青老化的强弱, 用 $1698/1600\text{cm}^{-1}$ 之比来表征, 对原样沥青和 RTFO 老化沥青 1698 和 1600cm^{-1} 处没有明显峰值, 而 PAV 老化后生成的羰基、酮、酯类等含

氧组分多,显示 PAV 老化后 1698cm^{-1} 组分最多,即老化最彻底,验证了上述沥青老化是由酮、羧基等含氧官能团形成引起的结论。

之所以上述三种沥青,老化后性能差异很大,主要是老化后质量损失多少,氧化后形成的酮、羧基等含氧官能团的含量不同,组分分析结果只能大体上反映老化前后各组分变化的情况,而不能区分各组分老化前后官能团的变化。而常规试验因试验精度不足,且常温(中等温度)下新官能团分子的热运动的差异性难以准确反映,因而常规试验不能充分反映沥青老化本质;DSR 试验主要在高温域(试验温度 52 以上)进行,大分子官能团在高温下活性增强,因而沥青官能团的微观变化不能在该温度域体现;相反,BBR 试验是在低温下进行的,低温性能对轻组分损失与氧化官能团的形成尤其敏感,所以采用 BBR 试验后能够充分反映老化时沥青组分的这种变化,因此 BBR 试验是沥青老化后最佳的性能评价方法。

4 结论

以上研究表明:

(1) 常规试验可以表征沥青老化后变硬的特性。组分分析显示,胶质和沥青质含量比例的增加是导致大分子增多、沥青变脆的原因,但难以区分不同沥青老化后性能变化的差异性。

(2) 建立在经验基础上的常规试验如针入度、软化点、延度,可用来描述同一基质沥青老化后流变特性变化。但其缺陷在于只能提供特定温度荷载频率下的试验信息,且精度不足,难以精确反映沥青老化性能与其组分变化间的明确关系。

(3) 采用 DSR 动态流变试验,可以全方位反映同一沥青老化前后的流变变化行为。对同一沥青老化越深,复数模量增加越大,沥青越硬;相位角则变小,沥青的弹性增加。但对不同沥青,因老化引起组分变化对高温域 DSR 试验结果不太敏感,因而 DSR 试验还是难以准确区分不同沥青老化程度的差异性。

(4) BBR 试验结果表明,沥青老化后劲度增加, m 值减小,老化越充分其劲度增加越明显, m 值下降幅度越大;不同沥青老化程度不同,也可以由 BBR 试验结果体现出来,而且 BBR 试验结果与老化前后沥青组分变化相关性很好,因为老化引起

的组分变化对 BBR 低温试验结果最敏感,因而 BBR 试验是最佳的沥青老化后性能评价方法,但残留延度比因精度不足难以反映这一点。

(5) 基质沥青老化的机理在于轻组分的挥发损失和酮、羧基等含氧基团的形成,使沥青大分子增多,而这些组分的增加最易在低温性能中体现出来,因而低温 BBR 试验可以精确反映这种变化,而文中采用的其他方法却不能。

总之,常规试验、DSR 试验可以反映同一沥青老化前后的性能变化,但难以反映不同沥青老化前后组分变化的本质;而 BBR 试验则可以反映沥青老化前后沥青的老化行为特点和老化本质,因此推荐 BBR 试验作为沥青老化最佳的试验评价方法。

参考文献

- [1] Page G C, Murphy K H, Ruth B E. Asphalt binder hardening—cause and effects[J]. Proceeding of the Association of Asphalt Paving Technologists, 1985, 54: 140 - 167.
- [2] Raymond E Robertson. Chemical properties of asphalts and relationship to pavement performance [R]. SHRP-A/UWP-91-510, Strategic Highway Research Program National Research Council Washington, DC 1991.
- [3] D A Sosnovske, Y Abwahab, C A Bell. Role of asphalt and aggregate in the aging of bituminous mixtures [C]. Transportation Research Record 1386, 1992: 10 - 21.
- [4] State of California Business, Transportation and Housing Agency, Method for determining asphalt durability using the California tilt-oven durability test [R]. California Test 374, 2000.
- [5] C A Bell, Y Abwahab, M E Cristi, D Sosnovske. Selection of laboratory aging procedures for asphalt - aggregate mixtures [R]. SHRP-A-383, Strategic Highway Research Program National Research Council Washington, DC 1994.
- [6] 魏建明, 孙彦, 庞伟伟, 等. 两种道路沥青抗老化性的表征 [J]. 石油化工高等学校学报, 2006, 19(2): 38 - 40.
- [7] 张争奇, 梁晓莉, 李平. 沥青老化性能评价方法 [J]. 交通运输工程学报, 2005, 5(1), 1 - 5.
- [8] 汪东杰, 葛折圣, 黄晓明, 等. 沥青抗老化指

标探讨 [J]. 公路交通科技, 2003, 20(3): 15 - 18

[9] 欧阳春发, 李永胜, 贾润萍, 等. 基质沥青及聚合物改性沥青的老化研究进展 [J]. 合成材料老化与应用, 2007, 36(2): 28 - 34

[10] 陈华鑫, 王秉纲. SBS改性沥青的动态力学

性能 [J]. 华南理工大学学报 (自然科学版), 2007, 35(7): 37 - 40

[11] 王仕峰, 张玉军, 王迪珍, 等. SBS改性沥青的老化行为 [J]. 合成橡胶工业, 2003, 26(5): 301 - 304

(上接第 8 页)

2.2.3 XRD 分析

图 8 为纯淀粉和接枝淀粉的 XRD 谱图。从图 8 中可以看出, 原淀粉在 2θ 为 15° 、 17° 、 18° 、 20° 处有尖锐的结晶衍射峰, 而接枝淀粉在这四个角度的结晶峰仍然存在, 说明淀粉接枝后没有破坏其晶型, 接枝反应发生在淀粉的无定型区。

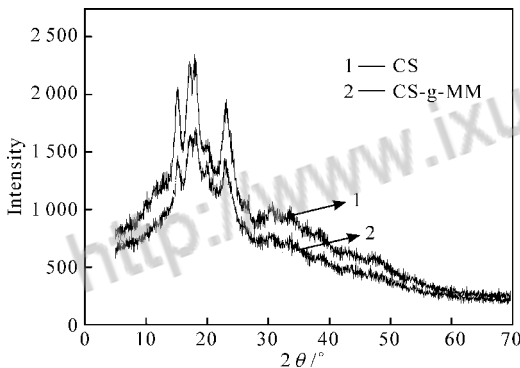


图 8 接枝产物的 XRD 图

Fig 8 XRD spectra of Starch-g-MMA, PMMA

3 结论

(1) 以 APS 为引发剂, 采用固相法合成了 CS-g-MMA 接枝共聚物. 研究表明在体系含水质量分数 40% 左右、APS 用量为 CS 质量的 8%、MMA 用量为 CS 质量的 15%、反应温度为 80°C 和反应时间为 30 min 左右时, 可得到 G 和 GE 均较高的产物。

(2) 红外分析结果表明甲基丙烯酸甲酯成功接枝在玉米淀粉分子上。

(3) TGA 测试表明, 玉米淀粉接枝 MMA 后, 起始分解温度降低, 但残余明显增加, 说明 MMA 的接枝有效改善 CS 的耐热性能。

(4) XRD 测试表明, 接枝玉米淀粉分子的结晶结构没有被破坏, 接枝发生在淀粉的无定型区。

参考文献

- 1 C Liu, Y Shao, D M Jia Chemically modified starch reinforced natural rubber composites [J]. Polymer, 2008, 49: 2176 - 2181
- 2 郑敦胜, 郭锡坤, 舒旭. 聚羟基乙酸接枝淀粉共聚物的合成和性能 [J]. 高分子材料科学与工程, 2007, 23(1): 68 - 71
- 3 武海良, 吴长春, 王耀, 等. 微波场中 APS 引发丙烯酸丁酯与淀粉的接枝 [J]. 纺织学报, 2003, 24(5): 400 - 403
- 4 郑梯和, 范力仁, 董晓娜, 等. 超声波辅助纤维素与丙烯酸的固相接枝研究 [J]. 合肥工业大学学报 (自然科学版), 2007, 30(10): 1323 - 1326
- 5 Fanta G, Burr R C, Doane W M, et al Graft polymerization of styrene onto starch by simultaneous-cobalt - 60 irradiation [J]. Journal of Applied Polymer Science, 1977, 21: 425 - 433

论文降重、修改、代写请加微信（还有海量Kindle电子书哦）



免费论文查重，传递门 >> <http://free.paperyy.com>

阅读此文的还阅读了：

- [1. 沥青绝氧热老化行为与机理研究](#)
- [2. 矿粉对沥青老化性能的影响](#)
- [3. 胜利100B沥青老化过程中官能团分析与相对分子 ...](#)
- [4. 沥青老化机理分析](#)
- [5. 自然因素作用下沥青老化化学机理分析](#)
- [6. 基质沥青老化行为与老化机理](#)
- [7. 沥青耐久性对其初始粘流性质的依赖关系](#)
- [8. 沥青老化对集料粘附性能影响规律及评价方法研究](#)
- [9. 沥青及其混合料老化性能的实验研究](#)
- [10. 沥青老化机理综述](#)