

SBS 剂量对改性沥青性质的影响

原健安¹, 纪 东², 祝志刚²

(1. 长安大学 理学院, 陕西 西安 710064; 2. 深圳清华路安特新材料研发中心, 广东 深圳 518053)

摘 要:应用 BBR 和 DSR 流变仪,测定了同一种 SBS 以不同剂量对相同的沥青进行改性后样品的流变性质。通过对流变性质与 SBS 剂量之间关系的分析研究,发现改性沥青的高、低温性质随着 SBS 剂量的增大而改善,而这些均与改性沥青的亚微观结构有关。结果表明,改性沥青宏观性质的不同在很大程度上是由其亚微观结构所决定。

关键词:道路工程;改性沥青;性质;SBS;流变;亚微观结构

中图分类号:U414.75 **文献标识码:**A

Effect of different dosage SBS on properties of modified asphalt

YUAN Jian-an¹, JI Dong², ZHU Zhi-gong²

(1. School of Science, Chang'an University, Xi'an 710064, China;

2. Shenzhen Tsinghuy Novophalt New Materials (R & D) Center, Shenzhen 518053, China)

Abstract: This paper measured the rheological date of modified asphalt by BBR and DSR rheologic instrument. The same asphalt was modified by the same SBS with different dosage. The relationship of rheological date and SBS dosage with modified asphalt was studied. It was pointed that the properties of modified asphalt at high and low temperature are improved by the content of modifier increasing. The results indicate that the properties of modified asphalt are affected by its sub-microstructure to a great extent. 2 tabs, 8 refs.

Key words: road engineering; modified asphalt; property; SBS; rheology; sub-microstructure

0 引 言

SBS 改性沥青由于其良好的使用性能而日益受到重视,并已在国内外道路工程中得到广泛应用。改性沥青的性质不仅与沥青性质有关,与 SBS 性质有关,同时还与 SBS 的剂量有关^[1~3]。本文采用不同的 SBS 剂量对同一种沥青进行了改性研究。通过测定高、低温的流变指标,分析了不同剂量改性沥青在不同温度下的性质,发现改性沥青的高、低温性质随着 SBS 剂量的增大而改善,并对剂量影响 SBS 改性沥青的机理进行了讨论。

1 实 验

实验选用适应范围广、改性效果比较理想的壳牌(Shell)90# 沥青, SBS 采用了韩国产的 LG101 型。选择了工程上常用的 3 个剂量,分别为 4%、5%、6%。改性沥青采用剪切法,条件一致。

流变数据中高温区采用大扭力、宽温度范围的 Rheometric Scientific RDA III 流变仪进行测定。平行板分为两种: $T > 40\text{ }^{\circ}\text{C}$ 时采用 25 mm 板, $T < 40\text{ }^{\circ}\text{C}$ 时采用 8 mm 板。低温流变数据采用了 CAN-NON TE-BBR 测定。

2 结果与讨论

2.1 中高温区间改性沥青性能比较及分析

2.1.1 改性沥青的中高温性质

为了更准确地对沥青及改性沥青进行评价,研究中采用 DSR 对沥青及改性沥青中高温区的流变特性进行评价。通过 G^* (复合剪切模量)和 δ (相位角)来反映在路面使用温度下粘结料的性能。对于沥青路面在较高的使用温度下,希望粘结料有足够的弹性,以利于形变恢复,故此 G^* 和 G' (弹性分量)

越大, G'' (粘性分量)和 δ 越小越好。反之,在中低温时,为避免疲劳开裂,希望沥青有足够的粘性,以利于外加能量因流变而消散,但同时又有足够的刚度,故此时希望 G^* 适当大一些,同时 G' 越小, G'' 、 δ 越大越好。

基质沥青及改性沥青 DSR 数据见表 1(因本文内容仅为比较,因而未列出 RTFOT 及 PAV 后的数据),沥青及改性沥青在高温下的路用性能主要考虑 $G^*/\sin\delta$, $G^*/\sin\delta$ 越大越好。抗车辙因子越大,则能反映出 G^* 较大和 δ 较小的综合影响。从所得到

表 1 沥青及改性沥青 DSR 数据

| 温度/℃ | Shell 90# 沥青 | | | | | Shell+4%SBS(LG101)改性沥青 | | | | |
|------|------------------------|-----------------------------|----------------------------|----------------------------|---------------------|------------------------|-----------------------------|----------------------------|----------------------------|---------------------|
| | G^*/Pa | $G^*/\sin\delta/\text{kPa}$ | $G^*\sin\delta/\text{kPa}$ | $G^*\cos\delta/\text{kPa}$ | δ/rad | G^*/Pa | $G^*/\sin\delta/\text{kPa}$ | $G^*\sin\delta/\text{kPa}$ | $G^*\cos\delta/\text{kPa}$ | δ/rad |
| 4 | 1.368×10^7 | 1.647×10^4 | 1.136×10^4 | 7.615×10^6 | 0.980 6 | 2.14×10^7 | 3.31×10^4 | 1.38×10^4 | 1.63×10^7 | 0.7030 |
| 10 | 6.716×10^6 | 7.681×10^3 | 5.872×10^3 | 3.259×10^6 | 1.064 2 | 8.28×10^6 | 1.09×10^4 | 6269.3 | 5.41×10^6 | 0.8590 |
| 16 | 2.861×10^6 | 3 134.3 | 2611.7 | 1.168×10^6 | 1.1502 | 2.95×10^6 | 3506.6 | 2485.1 | 1.59×10^6 | 1.0007 |
| 22 | 1.076×10^6 | 1 141.1 | 1014.4 | 3.586×10^5 | 1.231 | 1.02×10^6 | 1141.2 | 915.77 | 4.54×10^5 | 1.1102 |
| 28 | 3.732×10^5 | 386.80 | 360.08 | 9.809×10^4 | 1.3048 | 3.62×10^5 | 391.44 | 334.62 | 1.38×10^5 | 1.1799 |
| 34 | 1.277×10^5 | 130.37 | 125.12 | 2.563×10^4 | 1.3687 | 1.26×10^5 | 134.57 | 118.16 | 4.40×10^4 | 1.2141 |
| 40 | 4.600×10^4 | 46.565 | 45.451 | 7110.5 | 1.4156 | 4.96×10^4 | 52.675 | 46.769 | 1.66×10^4 | 1.2294 |
| 46 | 1.48×10^4 | 14.904 | 14.755 | 1480.0 | 1.4708 | 2.23×10^4 | 23.407 | 21.302 | 6.70×10^3 | 1.2262 |
| 52 | 5.79×10^3 | 5.799 4 | 5.7722 | 396.00 | 1.5022 | 1.07×10^4 | 11.119 | 10.332 | 2.85×10^3 | 1.3015 |
| 58 | 2.46×10^3 | 2.458 3 | 2.4531 | 112.00 | 1.525 | 5.31×10^3 | 5.4703 | 5.1538 | 1.28×10^3 | 1.3279 |
| 64 | 1 132.4 | 1.132 9 | 1.1320 | 33.099 | 1.5416 | 2727.4 | 2.8053 | 2.6517 | 638.26 | 1.3346 |
| 70 | 559.84 | 0.559 9 | 0.5598 | 9.9996 | 1.5529 | 1500.5 | 1.5503 | 1.4523 | 377.49 | 1.3166 |
| 76 | 294.49 | 0.294 5 | 0.2945 | 3.5710 | 1.5587 | 875.05 | 0.9153 | 0.8366 | 256.60 | 1.2732 |
| 82 | 162.96 | 0.163 0 | 0.1629 | 1.6282 | 1.5608 | 558.85 | 0.5994 | 0.5210 | 202.07 | 1.2008 |
| 温度/℃ | Shell+5%SBS(LG101)改性沥青 | | | | | Shell+6%SBS(LG101)改性沥青 | | | | |
| | G^*/Pa | $G^*/\sin\delta/\text{kPa}$ | $G^*\sin\delta/\text{kPa}$ | $G^*\cos\delta/\text{kPa}$ | δ/rad | G^*/Pa | $G^*/\sin\delta/\text{kPa}$ | $G^*\sin\delta/\text{kPa}$ | $G^*\cos\delta/\text{kPa}$ | δ/rad |
| 4 | 2.15×10^7 | 3.64×10^4 | 1.27×10^4 | 1.73×10^7 | 0.6300 | 1.32×10^7 | 2.17×10^4 | 7.98×10^3 | 1.05×10^7 | 0.6520 |
| 10 | 9.17×10^6 | 1.33×10^4 | 6307.0 | 6.66×10^6 | 0.7580 | 5.76×10^6 | 8.38×10^3 | 3959.6 | 4.18×10^6 | 0.7580 |
| 16 | 3.64×10^6 | 4710.8 | 2814.1 | 2.31×10^6 | 0.8834 | 0.42×10^6 | 3202.2 | 1823.5 | 1.59×10^6 | 0.8551 |
| 22 | 1.36×10^6 | 1618.3 | 1142.6 | 7.37×10^5 | 0.9977 | 9.87×10^5 | 1227.9 | 794.07 | 5.87×10^5 | 0.9343 |
| 28 | 5.22×10^5 | 591.43 | 461.19 | 2.45×10^5 | 1.0823 | 4.14×10^5 | 492.27 | 347.45 | 2.24×10^5 | 0.9975 |
| 34 | 1.92×10^5 | 211.56 | 174.27 | 8.06×10^4 | 1.1376 | 1.72×10^5 | 197.02 | 149.61 | 8.42×10^4 | 1.0581 |
| 40 | 7.64×10^4 | 83.989 | 69.563 | 3.17×10^4 | 1.1435 | 7.33×10^4 | 82.022 | 65.468 | 3.29×10^4 | 1.1049 |
| 46 | 3.02×10^4 | 32.700 | 27.803 | 1.17×10^4 | 1.1734 | 3.82×10^4 | 42.619 | 34.196 | 1.70×10^4 | 1.1101 |
| 52 | 1.52×10^4 | 16.447 | 14.098 | 5.75×10^3 | 1.1832 | 1.93×10^4 | 21.200 | 17.524 | 8030.6 | 1.1411 |
| 58 | 7.93×10^3 | 8.4994 | 7.3921 | 2.86×10^3 | 1.2015 | 1.00×10^4 | 11.043 | 9.1068 | 4200.0 | 1.1388 |
| 64 | 4219.1 | 4.4949 | 3.9602 | 1455.2 | 1.2187 | 5449.4 | 6.1035 | 4.8654 | 2454.3 | 1.1036 |
| 70 | 2150.3 | 2.3726 | 1.9488 | 908.73 | 1.1345 | 3196 | 3.7195 | 2.7463 | 1634.8 | 1.0338 |
| 76 | 1340.8 | 1.5240 | 1.1797 | 637.30 | 1.0755 | 2050.9 | 2.5202 | 1.6691 | 1191.9 | 0.9507 |
| 82 | 894.85 | 1.0621 | 0.7540 | 481.98 | 1.002 | 1433.9 | 1.8815 | 1.0928 | 928.38 | 0.8666 |

数据中可以看出,改性后高温下 G^* 、 $G^*/\sin\delta$ 均增大,并且在同温度下,是随着剂量的增大而增大。这表明经过改性后,粘结料的抗高温性能均得到提高,并且 SBS 剂量越大,抗高温性能越好。特别是当 SBS 剂量为 6% 时, G^* 的增长尤为显著,这表明当 SBS 剂量增加至一定程度时,改性沥青性质有一明显的变化,同时也反映出当剂量变化时,改性沥青的亚微观结构有所改变,当剂量增加至一定量时,亚微观结构发生质的改变,从而引起宏观性质产生明显的改变。

2.1.2 改性沥青的感温性

沥青经过改性后,对温度的敏感性均有所变化,反映动剪流变性能的 G^* 、 G' 、 G'' 、 $G^*\sin\delta$ 与温度的关系符合经验公式 $\ln G = a - b\ln T$ (其中 G 代表 G^* 、 G' 、 G'' 、 $G^*/\sin\delta$)。改性沥青与基质沥青相比感温性均明显降低,特别是 SBS 含量为 6% 的改性沥青尤为明显。甚至于较低温度下 G^* 小于基质沥青。而描述抗疲劳性能的 $G'' = G^*\sin\delta$ (疲劳因子) 在相同温度下也比基质沥青低。特别是 6% 的 SBS 在相同温度下降幅度最大。

2.1.3 SBS 剂量变化对改性沥青影响的机理分析

SBS 在沥青中分散的程度,被分散的 SBS 相互间的距离、相互联系等,对改性沥青的性质起着重要作用。同时沥青性质及结构的变化也起着重要的作用。一般认为这一过程为 1 个物理共混过程,也不排除沥青的活性基团与 SBS 有发生化学反应的可能性,但这不会是主要作用之一,更多的是物理作用。

文献[1]认为 SBS 在沥青中只能选择性地吸收某些组分。文献[2]认为 SBS 在沥青中只能发生溶胀,形成一定的团粒结构。这意味着改性沥青性能的改善程度不仅与 SBS 吸收沥青组分的多少、分散程度的大小以及分散相的数量有关,而且与 SBS 相占有的体积比有关。从所选用的壳牌 90# 沥青的组成结构来看,该沥青中胶质、沥青质含量较少,芳香烃含量较高。这意味着能够进入 SBS 网络的沥青组成数量较多,因此在该沥青中的 SBS 溶胀程度较大。被分散的 SBS 之间容易建立有效的联系。从所得数据来看,由于 SBS 吸收了沥青组分,而自身在高温下的变形移动能力相对较强,同时也降低了沥青中轻组分,以及 SBS 的存在对沥青相的流动产生了阻力,因此随着剂量的增大,这种作用得到加强,其高温性能随着剂量的增加而增大。而在相对较低的常温区及稍低的温度区域,随着剂量的增加,

模量有下降的趋势,特别是在更低的温度下,模量甚至低于基质沥青的模量。这表明剂量增大后,其变形能力在低温下有所改变。原因是当剂量增大后,单位体积内微粒数量增大且相体积增大。改性沥青均一性增加,更多地表现出 SBS 的性质,SBS 相互间的联系增加,结果 SBS 微粒之间的界面模糊,力的传递更多是由 SBS 来传递;改性沥青中的薄弱环节减少,其结果是该性质更像 SBS。因此出现了低温下的模量小于基质沥青的情况,这说明在该沥青中虽然 4%、5% 的剂量就已经具有很明显的改性效果,而且可以满足改性沥青规范中的不同要求,但这样的改性并没有使微观结构产生明显或实质的变化,因此是不完善的。只有将剂量提高至 6%,这时分散的 SBS 有可能连为一体。由此可见,进行沥青改性,除要求基质沥青有合理的组成结构以及与 SBS 有良好的配位性外,同时还应有 1 个合理的剂量。当 SBS 剂量大于该剂量时,SBS 相的体积较大,占据空间大,饱吸油分的 SBS 微粒可能突破两相界面而互相连接,从而形成连续的网络。此时微观上成为 2 个连续相结构。力的传递由原来的交替传递变为直接传递,SBS 由原来的吸收应力的功能转化为补强功能,起到直接承载力的作用,大大提高了改性沥青的性能。如按文献[3]的结论,在相容性较好的体系中将形成 9 倍体积比,SBS 将形成连续相,从而大大提高改性的效果。这样就减少了薄弱环节(SBS 冲破了沥青层的阻隔而联为一体,从而使薄弱的界面环节消失或消除)大大增强一体性。这无疑将提高改性沥青的性能。

SBS 改性沥青中,SBS 与 SBS 之间沥青相的界面统统是 1 个薄弱环节。沥青相在 SBS 剂量不大时,仍为连续相,因此在这种非均态的体系中,沥青相是最为薄弱的环节。当剂量增大时,这种薄弱环节的沥青层逐渐减薄而 SBS 逐渐呈连续相,因此其性质产生很大变化。应力的集中与消散主体逐渐比较多地由 SBS 来承担。由于 SBS 分子较大,分子间力也相对较大,在高温下,相对沥青而言其流动性差,而其变形性相对高温下的沥青要小得多,因此提高了高温性能。它的存在不仅有效地阻碍了沥青的流动变形,使沥青仍保持弹性,而且其自身的分子结构又使之保持变形与弹性。而在低温下,沥青的流动性变得越来越差,相反 SBS 的变形能力虽然随温度下降也变差,但仍比沥青的变形性大得多,因此 SBS 在低温下成了消散应力的主要载体。SBS 的变形,消散了大部分应力,结果使低温性质有很大改

善。当剂量增大至一定程度时,将会使 G^* 小于沥青的 G^* ,从而表现出明显的变化。由于改性沥青高温和低温的不同表现,因此感温性明显下降^[4,5]。

2.2 改性沥青的低温性能及分析

在更低的温度范围内,沥青的性能评价是通过低温弯曲梁流变仪来进行的。因为在低温下,沥青路面的损坏主要是由于温度收缩开裂引起的。随着温度的降低,沥青的劲度逐渐增加,从而使沥青产生一定收缩应变而具有较大的应力。这种应力可以通过沥青的粘性流动得到释放,因此沥青的抗低温开裂能力与沥青在低温下的劲度和应力释放速度有关。在一定温度下,低的劲度和高的释放速度对抗低温开裂是有利的。低温弯曲梁流变仪是通过 s 和 m 来反映劲度和应力释放速度的,其中 s 为弯曲蠕变劲度模量, m 为蠕变应变速度。

从表 2 的数据来看,改性沥青与基质沥青相比, m 随温度变化率较小, s 值同样也是如此,这表明感温性下降。同时, m 值均小于对应的沥青, s 值也小于沥青,并且随着剂量的增大,这一趋势更加明显。这表明随着剂量增大,SBS 在沥青中均一性得到加强, s 值的下降,降低了沥青的脆硬性,但 m 下降,则表明改性沥青通过粘性流动快速释放应力的能力降低。

SBS 改性沥青在低温条件下之所以呈现出表 2 中所列与基质沥青不同的性质,主要原因是,当 SBS 分散于沥青后,虽然通过吸收沥青中的轻质油分体积增大,但在剂量较低时,被分散的 SBS 相仍不足以形成连续型的网络,还是一种非均匀分散体系。在低温下的沥青是不能流动的脆硬性固体,即形变能力下降模量较高。当经过 SBS 改性后,呈连续相的沥青由于相当数量的轻质油分被 SBS 吸收而转移至 SBS 相,因此在沥青相中,由于分子之间起增塑剂作用的轻油分减少,变得更加难以产生相对移

动,致使其形变能力更小,模量更高。被分散的 SBS 相,由于高分子的特点所决定,其聚集状态仍为高弹态范围。虽然形变能力随温度降低也下降,但仍具有相当的变形能力。但是由于大分子相互之间缠绕及其他物理交联作用的限制,大分子之间难以发生相对运动,而分子内个别链段可以发生运动,且键角也可以发生旋转,这时表现出仍具有发生弹性形变的能力,因此在受到外力作用时,通过链段的相对运动、键角的旋转而产生形变。故在低温下改性沥青中被分散的 SBS 相成为应力集中和消散的中心。

由于低温下 SBS 相对变形能力比沥青的变形能力大,在受到外力作用时 SBS 相产生形变是消散应力的主要形式。因此 SBS 的存在使得改性沥青的 s 值小于基质沥青的 s 值。由于前述原因,改性沥青通过分子间产生相对滑动错位而产生蠕变,消散应力的能力下降,故而 m 值小于基质沥青的 m 值。同时由于 SBS 的性质随温度的变化而变化较小,因此改性沥青的感温性也比基质沥青小。随着 SBS 剂量的增大,其占有的空间比例越来越大,SBS 相逐渐向连续相转化(如本文中 6% 剂量),此时 SBS 改性沥青微观上呈 2 个连续相结构,应力的集中与消散主要由 SBS 承担,因此 6% 剂量的 SBS 改性沥青表现出与小剂量不同的另一种性质是,当温度越低,这种差异越明显,从而更多地表现出高分子的特点。可见通过改变剂量引起改性沥青中微观结构产生明显的变化,其性质也将产生明显改变^[6~8]。

3 结 语

(1) SBS 改性沥青能明显提高其高温稳定性、抗疲劳性能,同时改善温度敏感性,并且剂量越高越明显。

(2) SBS 改性沥青能够改善沥青的性质,主要是微观结构发生了改变。通过 SBS 的加入,粘结料的微观结构发生明显改变,从而影响宏观性质,特别是当剂量达到某一比例,其结构将产生根本性改变,从而使其性质发生突变。

(3) 用 SBS 改性沥青,可以明显降低低温蠕变劲度 s 值,减小了因温度降低而产生的内应力。但本研究中, m 值也将降低,即减小了通过快速蠕变消散应力的能力。因此改性沥青的低温性质,应采用其他措施来提高快速蠕变能力,如增加少量抗老化、混溶性好的低分子量物质。

(下转 48 页)

表 2 沥青及改性沥青 BBR 数据

| 温度/℃ | 基质沥青 | 4% SBS 改性沥青 | 5% SBS 改性沥青 | 6% SBS 改性沥青 |
|----------------------|------|----------------|----------------|----------------|
| 60s 的 s 值 | -12 | 123 | 65.2 | 70.6 |
| | -15 | 214 | 118 | 120 |
| | -18 | 354 | 181 | 202 |
| | -21 | 509 | 302 | 311 |
| 60s 的 m 值 | -12 | 0.48 | 0.478 | 0.455 |
| | -15 | 0.45 | 0.414 | 0.412 |
| | -18 | 0.40 | 0.378 | 0.337 |
| | -21 | 0.337 | 0.322 | 0.283 |

- 研究现状与发展[J]. 同济大学学报, 1999, (2): 184—188.
- YUAN Wan-cheng, CUI Fei, ZHANG Qi-wei. Current research and development of structural health monitoring and condition assessment for bridges[J]. Journal of Tongji University, 1999, (2): 184—188.
- [2] 李本海, 张序君. 分类问题的模糊决策分析[J]. 模糊系统与数学, 1992, 6(1): 81—86.
- LI Ben-hai, ZHANG Xu-jun. Fuzzy decision making analysis on the classification problems[J]. Fuzzy System and Mathmation, 1992, 6(1): 81—86.
- [3] 李 艳, 樊晓平. 基于模糊控制的城市交叉路口群信号控制及仿真[J]. 交通运输工程学报, 2003, 3(2): 117—119.
- LI Yan, FAN Xiao-ping. Fuzzy logic control and simulation of urban traffic intersections group[J]. Journal of Traffic and Transportation Engineering, 2003, 3(2): 117—119.
- [4] 陆 宁, 史玉芳, 秦晓丽. 西部地区公路运输能力模糊聚类分析[J]. 长安大学学报(自然科学版), 2004, 24(6): 60—63.
- LU Ning, SHI Yu-fang, QIN Xiao-li. Fuzzy clustering analysis of transport ability in Chinese western area [J]. Journal of Chang'an University (Natural Science Edition), 2004, 24(6): 60—63.
- [5] 刘沐宇, 袁卫国. 基于模糊神经网络的大跨度钢管混凝土拱桥安全性评价方法研究[J]. 中国公路学报, 2004, 17(4): 55—58.
- LIU Mu-yu, YUAN Wei-guo. Research on safety assessment of long-span concrete-filled steel tube arch bridge based on fuzzy-neural network[J]. China Journal of Highway and Transport, 2004, 17(4): 55—58.
- [6] 王道勇. 模糊综合评判的失效与消除[J]. 系统工程理论与方法应用, 1998, 7(2): 66—69.
- WANG Dao-yong. Lost efficacy and its removal in fuzzy synthetical judgement[J]. Systems Engineering-Theory Methodology Application, 1998, 7(2): 66—69.

~~~~~

(上接 22 页)

#### 参考文献:

#### References:

- [1] Adedej A, Grunfelder T, Bates F S. Asphalt modified by SBS Copolymer: structure and properties[J]. Polymer Engineering and Science, 1996, 36(12): 1707—1922.
- [2] Nahas. Modified asphalts for high performance hot mix pavement blenders[Z]. AAPT, 1990.
- [3] 熊 萍, 郝培文, 肖光睿. SBS 聚合物改性沥青的离析[J]. 中外公路, 2002, 22(3): 77—80.
- XIONG Ping, HAO Pei-wen, XIAO Guang-rui. The separation phenomena of SBS modified asphalt[J]. Journal of China and Foreign Highway. 2002, 22(3): 77—80.
- [4] 沈金安. 改性沥青与 SMA 路面[M]. 北京: 人民交通出版社, 1999.
- SHEN Jin-an. The modified asphalt and SMA[M]. Peoper's Communication Press, 1999.
- [5] 田小草, 郑健龙, 张超森. 老化对沥青结合料粘弹性的影响[J]. 交通运输工程学报, 2004, 4(1): 3—6.
- TIAN Xiao-ge, ZHENG Jian-long, ZHANG Qi-sen. Effect of aging on viscoelastic performance of asphalt binder[J]. Journal of Traffic and Transportation Engineering, 2004, 4(1): 3—6.
- [6] 王抒音, 周纯秀. 提高沥青-酸性集料抗水损害的试验研究[J]. 中国公路学报, 2003, 16(1): 6—9.
- WANG Shu-yin, ZHOU Chun-xiu. Investigation of improving asphalt-acidity aggregate in mixture to resist water damage [J]. China Journal of Highway and Transport, 2003, 16(1): 1—9.
- [7] 原健安, 祝志刚. 用系列粘度数据分析 SBS 改性沥青的结构特点[J]. 长安大学学报(自然科学版), 2004, 24(2): 7—13.
- YUAN Jian-an, ZHU Zhi-gang. Microstructure of SBS modified asphalt based on viscosity data[J]. Journal of Chang'an University (Natural Science Edition), 2004, 24(2): 7—13.
- [8] 吉永海. SBS 改性沥青的相容性和稳定性机理[J]. 石油学报, 2002, 6(3): 23—28.
- JI Yong-hai. Mechanism of compatibility and stability of SBS modified asphalt[J]. ACTA, PETROLEL SIN-ICA, 2002, 6(3): 23—28.