

高模量沥青混合料抗剪强度研究

□ 张新 芦子朝 韦金城 胡家波 张晓萌

关键词：沥青混合料 高模量添加剂 抗剪强度 内摩擦角 粘聚力 动态模量

我国高速公路路面结构大部分采用沥青路面。沥青混合料是一种典型的粘弹性材料，温度敏感性高，在交通量增大、轴重增加以及渠化交通等环境影响下易出现严重的早期损坏。车辙直接影响行车的舒适性和安全性，降低路面的使用性能。随着科技的不断发展，添加剂型高模量沥青混合料以其优异的高温抗车辙性能广受关注。高模量添加剂的使用可以显著延长沥青路面使用年限，减少路面维修次数。

近年来，国内外对于沥青混合料抗剪性能进行了大量的研究，并取得了丰硕成果。沥青混合料抗剪性能的改善源自于内摩擦角和粘聚力的变化。笔者通过计算高模量沥青混合料的内摩擦角和粘聚力，对其抗剪强度进行研究。对4种添加剂型高模量沥青混合料进行单轴贯入、无侧限抗压强度和单轴压缩动态模量试验，通过内摩擦角和粘聚力分析高模量沥青混合料的抗剪性能，发现抗剪强度与内摩擦角之间的相关性，为相关研究提供参考。

一、试验方案设计

1. 原材料

沥青采用SBS改性沥青，其性能指标均满足《公路工程沥青及沥青混合料试验规程》JTG E20-2011的要求。集料选用优质石灰岩，石灰岩按粒径不同分为0~3mm、3~5mm、5~10mm、10~15mm、15~20mm共5档，试验所用矿粉是由石灰岩磨碎，集料依据JTG E42-2005《公路工程集料试验规程》，测试各项技术指标均符合技术要求。

2. 高模量添加剂

高模量添加剂为现役工程实际应用中的A、B、C、D等4种，如图1所示。高模量添加剂在沥青混合料

拌和时加入拌锅，根据高模量剂推荐掺量，4种高模量添加剂用量分别为1%、0.4%、0.7%和0.8%。

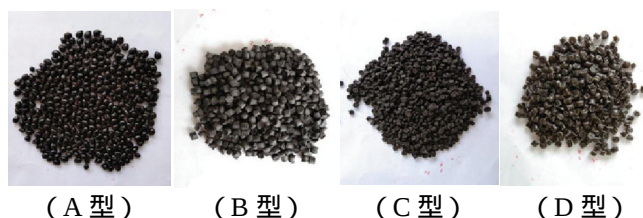


图1 高模量添加剂

3. 试件制备

试验采用SGC旋转压实仪进行试件成型，试件直径150mm，高度170mm，压实次数100次，并控制沥青混合料试件空隙率为设计目标空隙率。如图2、图3所示。使用钻芯机和岩石切割机将成型试件分别制成沥青混合料单轴压缩动态模量试验标准试件和沥青混合料剪切强度试验（单轴贯入法）标准试件。



图2 动态模量试件

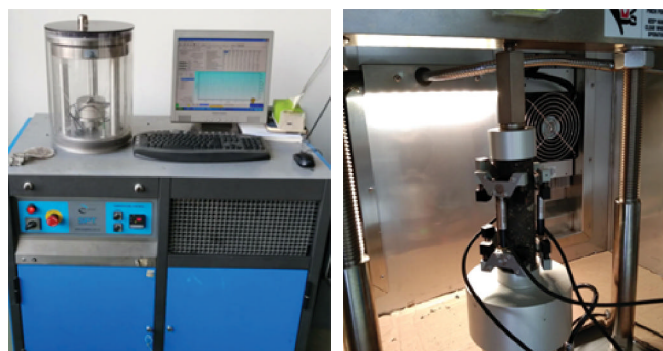
图3 单轴贯入和无侧限抗压试验试件

二、试验方法

1. 单轴压缩动态模量试验

将室内成型试件通过钻机钻、岩石切割机将试件制作为动态模量标准试件进行试验，每种高模量沥青混合料制备芯样4个。将试件在60℃条件下保温4h，使用沥青混合料简单性能试验机（SPT）进行试验，试

验环境温度为 60 。如图 4 所示。



(SPT) (试验试件)

图 4 单轴压缩动态模量试验

2. 单轴贯入试验

沥青混合料的单轴贯入试验和土工试验中的 CBR 试验相似,其原理就是通过一个远小于试件直径的钢制压头在试件上进行加载。将室内成型试件通过钻机、岩石切割机将试件制成单轴贯入标准试件,每种沥青混合料制备芯样 4 个。在试验前,试样需要在 60 下保温 4 h。试验过程中,在试件上以 1 mm/min 的恒定变形速率加载一个高 50 mm、直径 28.5 mm 的圆柱形钢制压头,试验环境温度控制在 60 。如图 5 所示。



图 5 单轴贯入试验

3. 无侧限抗压强度试验

为了求得沥青混合料的粘聚力和内摩擦角,需要对试件进行无侧限抗压强度试验。将室内成型试件通过钻机、岩石切割机制成无侧限抗压强度试验标准试件,在 60 条件下保温 4 h。如图 6 所示。

三、试验结果与分析

1. 单轴压缩动态模量试验数据分析

法国高模量沥青混凝土标准 NF P98 140/141 指



图 6 无侧限抗压试验

出,15 、10 Hz 复数模量 $\geq 14\ 000\ \text{MPa}$ 的沥青混凝土就是高模量沥青混凝土。5 种沥青混合料 15 、10 Hz 条件下的动态模量、相位角见表 1 所列。4 种高模量添加剂均使沥青混合料 15 、10 Hz 动态模量达到 14 000 MPa,因此,这 4 种高模量添加剂均能使沥青混合料达到高模量沥青混合料的模量要求。

表 1 沥青混合料动态模量

类型	动态模量(MPa)	相位角(°)
A 型 AC-20	18 585	11.83
B 型 AC-20	17 025	15.71
C 型 AC-20	17 486	14.35
D 型 AC-20	14 553	15.99
普通型 AC-20	13 782	20.84

注:添加 A 型高模量剂的沥青混合料记为 A 型 AC-20, B、C、D 型高模量沥青混合料同理;未添加高模量剂的沥青混合料记为普通型 AC-20。

由表 1 可知,与普通型沥青混合料相比,4 种高模量沥青混合料的动态模量明显提高,相位角有大幅度改善。相位角越小,材料的弹性越大,粘性越小。加入高模量添加剂后相位角降低,这说明添加剂的加入提高了沥青的弹性成分的比例,荷载卸载后变形更容易恢复,这也是 4 种添加剂型高模量沥青混合料高温稳定性优于普通型沥青混合料的原因。

2. 粘聚力和内摩擦角结果与分析

通过计算粘聚力和内摩擦角,运用单轴贯入试验

和无侧限抗压强度试验结果,得到沥青混合料的抗剪强度、粘聚力和内摩擦角的数值。见表2所列。

表2 沥青混合料动态模量

类型	抗剪强度 (MPa)	粘聚力 (KPa)	相位角 (°)
A型 AC-20	2.79	217.78	49.02
B型 AC-20	1.56	194.20	46.68
C型 AC-20	2.48	212.02	48.64
D型 AC-20	2.95	200.40	49.51
普通型 AC-20	1.83	240.29	46.34

将5种沥青混合料试件的抗剪强度、粘聚力和内摩擦角的结果平均值进行对比可见,与普通型沥青混合料抗剪强度相比,A、C、D型高模量添加剂均使沥青混合料的抗剪强度得到明显改善,抗剪强度分别提高了1.52、1.35、1.61倍。其原因在于高模量添加剂的加入,加强了混合料之间的相互作用力,使混合料之间更加紧密,致使混合料内摩擦角增加,从而提高了沥青混合料承受荷载的能力。

普通型沥青混合料粘聚力为240.29 KPa,4种高模量沥青混合料粘聚力均小于普通型沥青混合料粘聚力。这是因为高模量添加剂融于沥青,在沥青中起到加筋作用,沥青粘度增大,沥青分子间的作用力增强。但是粘聚力表征的是沥青与集料之间的粘附强度和沥青分子之间的粘结强度,融有高模量添加剂的沥青表面粗糙,与集料之间的粘附力降低,导致高模量沥青混合料粘聚力降低。

4种添加剂型高模量沥青混合料与普通型沥青混合料内摩擦角相比,摩擦角均变大。其中,D型高模量沥青混合料内摩擦角最大为49.51°,是普通型沥青混合料内摩擦角的1.1倍。内摩擦角代表了集料之间的内摩擦,包含集料表面粗糙纹理引起的滑动摩擦和集料之间的嵌挤摩擦,由于5种沥青混合料均使用同一种AC-20沥青混合料级配,5种混合料中集料之间的嵌挤摩擦没有差异,因此,高模量添加剂改善了集料之间的滑动摩擦,限制了集料间的相对滑动,增大了内摩擦角,从而改善混合料的高温稳定性和抗剪性能。

对内摩擦角与抗剪强度相关性分析发现,高模量沥青混合料抗剪强度与内摩擦角之间呈多项式相关关

系。在60条件下,抗剪强度越大,内摩擦角越大,这是因为在高温条件下,沥青胶浆变软,矿料间骨架撑起主导作用,内摩擦角对抗剪强度的贡献率更大。因此,设计良好的混合料级配更能改善沥青混合料的高温性能。

3. 内摩擦角与抗剪强度相关性分析

经过多个拟合公式比选,最终得到多项式关系的相关性最高。拟合关系如图7所示。由结果看出:高模量沥青混合料抗剪强度与内摩擦角之间呈多项式相关关系,拟合公式和相关系数分别为:
 $y = -1.493x^3 + 10.254x^2 - 20.512x + 59.04$, $R^2 = 0.9344$ 。

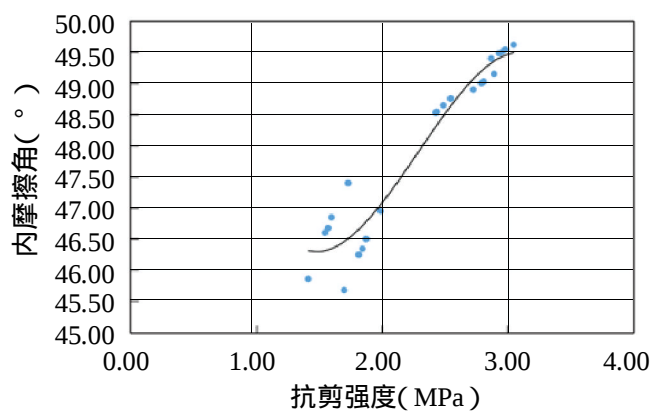


图7 抗剪强度与内摩擦角关系

在60条件下,抗剪强度越大,内摩擦角越大,这是因为在高温条件下,沥青胶浆变软,矿料间骨架撑起主导作用,内摩擦角对抗剪强度的贡献率更大。因此,设计良好的混合料级配更能改善沥青混合料的高温性能。

四、结论

(1)4种添加剂型高模量沥青混合料与普通沥青混合料相比,内摩擦角显著增大,动态模量显著提升,抗剪强度明显改善,沥青混合料的高温抗车辙性能得到明显改善。

(2)高模量添加剂能够增加沥青混合料的弹性成分,使相位角减小。但高模量添加剂的使用使得高模量沥青混合料的沥青胶浆与集料之间的黏附强度减弱,使得整体粘聚力变小。

(3)60条件下,高模量沥青混合料的抗剪强度随着内摩擦角的增大而增大,呈正相关性,表明增大沥青混合料的内摩擦角可提高高温抗车辙性能。

(作者单位:山东高速股份有限公司;山东建筑大学;山东省交通科学研究院)