

变形能力的目的。但是一些文献指出,GTM 设计方法过于注重超载、重载情况,没有太多地考虑路面结构的耐久性、抗老化能力、施工和易性和抗疲劳开裂能力等,也缺少这些性能的评价方法和指标,所以还需要进一步研究和完善。

不同型号 GTM 试验机在操作上可能会有所不同,但是基本原理应该是一样的,所以在使用过程中应按照仪器的说明书进行操作。

## T 0738—2011 沥青混合料单轴压缩动态模量试验

### 1 目的与适用范围

**1.1** 本方法适用于测定沥青混合料在线黏弹性范围内的单轴压缩动态模量。在无侧限条件下,按一定的温度和加载频率对试件施加偏移正弦波或半正矢波轴向压应力,量测试件可恢复的轴向应变。本方法适用在  $-10^{\circ}\text{C}$ 、 $5^{\circ}\text{C}$ 、 $20^{\circ}\text{C}$ 、 $35^{\circ}\text{C}$  及  $50^{\circ}\text{C}$  条件下采用  $0.1\text{Hz}$ 、 $0.5\text{Hz}$ 、 $1\text{Hz}$ 、 $5\text{Hz}$ 、 $10\text{Hz}$ 、 $25\text{Hz}$  的加载频率进行测试。

**1.2** 本方法适用于试验室制备的直径为  $100\text{mm} \pm 2\text{mm}$ 、高为  $150\text{mm} \pm 2.5\text{mm}$  的沥青混合料圆柱体试件。集料的最大公称粒径不得大于  $37.5\text{mm}$ 。

**1.3** 本方法所测得的动态模量可用于评价沥青混合料材料性能,以及作为沥青混合料设计、沥青路面设计和评价分析的参数。

### 2 仪器与材料技术要求

**2.1** 材料试验机:能施加偏移正弦波或半正矢波形式荷载的加载设备,施加荷载的频率在  $0.1 \sim 25\text{Hz}$  范围,且施加的最大应力水平应达到  $2800\text{kPa}$ 。加载分辨率能达到  $5\text{N}$ 。

**2.2** 环境箱:控温范围  $-10 \sim 60^{\circ}\text{C}$ ,控温准确度为  $\pm 0.5^{\circ}\text{C}$ ,且具有一定的容量,至少能存放 3 个试件。

**2.3** 数据测量及采集系统:采用微机控制,能测量并记录试件在每个加载循环中所承受的轴向荷载和产生的轴向变形。荷载传感器所需最小量程为  $0 \sim 25\text{kN}$ ,分辨率不大于  $5\text{N}$ ,误差不大于  $1\%$ ;位移传感器可采用 LVDT 或其他合适的设备,具有良好的动态响应特性,其量程应大于  $1\text{mm}$ ,分辨率不大于  $0.2\mu\text{m}$ ,误差不大于  $2.5\mu\text{m}$ 。

**2.4** 加载板:可采用硬质钢板或经处理过的高强度铝板,直径大于或等于试件的直径,分别置于试件的底部和顶部,用来将荷载从试验机传递给试件。

**2.5** 旋转压实仪:成型直径为  $150\text{mm}$ 、高度为  $170\text{mm}$  的圆柱体试件。

2.6 钻机:从旋转压实仪成型试件中钻取直径为100mm的芯样,要求将钻机及取芯试件固定,钻头与地面垂直。

2.7 切割机:用来将所取芯样切割至动态模量试验试件所需高度,推荐采用双面锯,在能确保芯样两个锯面平行的前提下采用单面锯亦可。

2.8 聚四氟乙烯薄膜:厚度 $0.3\text{mm} \pm 0.05\text{mm}$ 。

2.9 台秤或天平:感量不大于0.1g。

2.10 温度计:分度值 $0.5^{\circ}\text{C}$ 。

2.11 卡尺。

### 3 方法与步骤

#### 3.1 试件制备

3.1.1 预备试件制备。该试验用来确定正式试验时试件所需沥青混合料的用量。

1)按目标配合比拌制沥青混合料,在规定的拌和温度下拌和均匀后,用旋转压实仪成型 $\phi 150\text{mm} \times 170\text{mm}$ (高)的试件。

2)采用钻机从旋转压实仪成型的试件中钻取直径为100~104mm的芯样。在取芯时应充分固定钻机和取芯试件,钻头与地面垂直,同时保证取芯试件水平放置,调整合适的钻头旋转速度和下降速度,以确保钻取的芯样呈圆柱体,形状规则,周边面光滑且与两个端面垂直。

3)采用切割机切除所取芯样两端,保证试件高度为 $150\text{mm} \pm 2.5\text{mm}$ 。将试件固定,保证试件的轴向与锯片垂直,合理调整切割机锯片旋转速度和试件推进速度,以确保试件的两个切割端面平行,且表面平滑无沟纹。对端面平整度要求为沿任何直径方向沟纹高差控制在 $\pm 0.05\text{mm}$ 内。保证试件的两个端面与试件轴向垂直,当垂直偏差超过 $1^{\circ}$ 时应舍弃该试件。

4)芯样取出后,测量试件的直径。在试件的中部和距上下表面 $1/3$ 试件高度的3个位置测定其直径,每个位置量测两次,每测一次后,将试件旋转 $90^{\circ}$ 再测一次,然后计算6个直径测量值的平均值 $\bar{D}$ 和标准差。如果标准差大于 $2.5\text{mm}$ ,则舍弃该试件。对于直径符合要求的试件,平均值 $\bar{D}$ 将作为试件的直径用于后续计算,准确至 $0.1\text{mm}$ 。

5)测量芯样的空隙率,根据芯样空隙率与目标空隙率的偏差来调整并最终确定所需沥青混合料的用量,确保正式试件的空隙率与目标空隙率的偏差能控制在 $\pm 0.5\%$ 范围内。

**3.1.2 正式试件制备。**根据预备试件制备得到的混合料标准用量按上述步骤制备并量测试件,保证有效试件不少于4个。

### 3.2 试件储存

试件制备后两天内如不进行试验,需用聚乙烯薄膜将试件包裹好,在温度为5~27℃环境下保存,时间不宜超过两周。存放时试件不可堆叠。

### 3.3 试验步骤

**3.3.1** 将位移传感器安置于试件侧面中部,使其与试件端面垂直,沿圆周等间距安放3个(即每2个相距120°)。调节位移传感器,使其测量范围可以测量试件中部的压缩变形。

**3.3.2** 将试件放置在试验加载架的加载板中心位置,为减少试件表面与上下加载板间的摩阻力,减小端部效应,可在试件与上下加载板间各放一块聚四氟乙烯薄膜,应注意使试件中心与加载架的中心对齐。

**3.3.3** 将试件放入规定试验温度 $\pm 0.5^\circ\text{C}$ 的环境箱中,恒温4~5h直至试件内部达到试验温度。当试验温度为5℃以下时,试件恒温时间应不少于8h。同时也可以通过在环境箱中放置另一个同类试件,在该试件的中部埋设一个温度传感器,根据传感器测定的试件内部温度判断试件是否达到试验温度。

**3.3.4** 当试件内外的温度达到测试温度以后,就可以开始进行加载试验。将试件与上加载板轻微接触,调节位移传感器并清零,施加试验荷载,以5%的接触荷载对试件进行预压,持续10s,使试件与上下加载板接触良好。

**3.3.5** 对试件施加偏移正弦波或半正矢波轴向压应力试验荷载,在设定温度下从25~0.1Hz由高频至低频按表T 0738-1给出的重复加载次数进行试验。在试验之前,先对试件进行加载预处理,预处理的方法是对试件施加偏移正弦波或半正矢波轴向压应力试验荷载,频率为25Hz,200个循环。在任意两个试验频率下,推荐试验间隔时间为2min,间隔时间可适当延长,但不应超过30min。试验采集最后5个波形的荷载及变形曲线,记录并计算试验施加荷载、试件轴向可恢复变形、动态模量及相位角。

表 T 0738-1 各荷载频率下重复加载次数

频率(Hz)	重复次数(次)	频率(Hz)	重复次数(次)
25	200	1	20
10	200	0.5	15
5	100	0.1	15

3.3.6 对该试件进行下一个温度试验,温度选择应从  $-10 \sim 50^{\circ}\text{C}$  由低温到高温进行。当试件在各设定温度下各频率的试验累计塑性变形超过  $1\,500\mu\text{e}$  时,该试件应予以废弃。

#### 4 计算

量测各试验条件下最后 5 次加载循环中荷载的平均幅值  $p_i$  和可恢复轴向变形平均幅值  $\Delta_i$  及同一加载循环下变形峰值与荷载峰值的平均滞后时间  $t_i$ , 然后根据下列各式计算测试沥青混合料的动态模量及相位角。

$$\sigma_0 = \frac{P_i}{A} \quad (\text{T 0738-1})$$

式中:  $\sigma_0$ ——轴向应力幅值(MPa);

$P_i$ ——最后 5 次加载循环中轴向试验荷载平均幅值(N);

$A$ ——试件径向横截面面积(可取试件上下端面面积均值)( $\text{mm}^2$ )。

$$\varepsilon_0 = \frac{\Delta_i}{l_0} \quad (\text{T 0738-2})$$

式中:  $\varepsilon_0$ ——轴向应变幅值( $\text{mm}/\text{mm}$ );

$\Delta_i$ ——最后 5 次加载循环中可恢复轴向变形平均幅值(mm);

$l_0$ ——试件上位移传感器的量测间距(mm)。

$$|E^*| = \frac{\sigma_0}{\varepsilon_0} \quad (\text{T 0738-3})$$

式中:  $|E^*|$ ——沥青混合料动态模量(MPa);

$\sigma_0$ ——轴向应力幅值(MPa);

$\varepsilon_0$ ——轴向应变幅值( $\text{mm}/\text{mm}$ )。

$$\varphi = \frac{t_i}{t_p} \times 360 \quad (\text{T 0738-4})$$

式中:  $\varphi$ ——相位角( $^{\circ}$ );

$t_i$ ——最后 5 次加载循环中变形峰值与荷载峰值的平均滞后时间(s);

$t_p$ ——最后 5 次加载循环的平均加载周期(s)。

#### 5 报告

5.1 沥青混合料参数:沥青含量、矿料级配、密度、空隙率及试件尺寸。

5.2 试验参数:各试验温度和试验频率及在此条件下最后 5 次加载循环中应力平均幅值  $\sigma_0$ 、可恢复轴向应变平均幅值  $\varepsilon_0$  及变形峰值与荷载峰值的平均滞后时间  $t_i$ 。

5.3 当一组试件的测定值中某个测定值与平均值之差大于标准差的  $k$  倍时,该测定值应予舍弃。有效试件数目  $n$  为 3、4、5、6 时,  $k$  值分别为 1.15、1.46、1.67、1.82。

5.4 测试资料整理。根据上述确定的有效测试数据,按  $t$  分布法计算整理动态模量代表值  $|E^*|$ 。

$$|E^*| = \overline{|E^*|} - t \times \frac{S}{\sqrt{n}} \quad (\text{T 0738-5})$$

式中:  $|E^*|$  —— 动态模量代表值 (MPa);

$\overline{|E^*|}$  —— 一组试件实测动态模量平均值 (MPa);

$S$  —— 一组试件实测值的标准差 (MPa);

$n$  —— 一组试件的有效试件个数;

$t$  —— 随保证率变化的系数,对高速公路及一级公路的保证率为 95%,其他等级公路的保证率为 90%, $t/\sqrt{n}$  值见表 T 0738-2。

表 T 0738-2 有效试件数与  $t$  值的关系

有效试件数 $n$	临界值 $k$	$t/\sqrt{n}$	
		保证率 95%	保证率 90%
3	1.15	1.686	1.089
4	1.46	1.177	0.819
5	1.67	0.954	0.686
6	1.82	0.823	0.603
7	1.94	0.734	0.544
8	2.03	0.670	0.500
9	2.11	0.620	0.466
10	2.18	0.580	0.437

5.5 报告各试验温度和试验频率下沥青混合料动态模量及相位角。

### 条文说明

本方法主要参照美国 ASTM D 3497、AASHTO TP 62—03 及结合我国的试验情况编写。对该方法可以采用 MTS 810 系列伺服液压材料试验机、基本性能试验仪 (SPT) 和 UTM 系列伺服液压或气压材料试验机等进行测试。

关于加载波形及频率,美国 ASTM D 3497 中规定加载波形为正弦波或半正矢波,加载频率分别为 1Hz、4Hz、16Hz。AASHTO TP 62—03 中同样规定加载波形为正弦波或半正矢波,但加载频率分别为 0.1Hz、0.5Hz、1Hz、5Hz、10Hz、25Hz。本方法允许两种可以选择的加载波形即偏移正弦波(波形与正弦波相同,仅数值全在压力轴一侧)或半正矢波,加载频率分别为 0.1Hz、0.5Hz、1Hz、5Hz、10Hz、25Hz。

对单轴压缩动态模量测试的试验温度,ASTM D 3497 中规定试验温度为 5℃、25℃、40℃;AASHTO TP 62—03 中规定试验温度为 -10℃、4.4℃、21.1℃、37.8℃、54.4℃。本方法采用的试验温度为

-10℃、5℃、20℃、35℃、50℃,主要是考虑到我国通用的试验温度单位,而 AASHTO TP 62—03 中规定的试验温度不便于试验控制,故将试验温度进行了调整。

本试验需要4次以上的平行试验。对于完整性不好或尺寸不合格的试件应作废,在方法中给出了试件尺寸合格的判定标准。因此,必须成型足够的试件来确保有效试验试件的数目。

关于试件的制备,ASTM D 3497 中规定试验试件的尺寸为高度直径比 2:1,且试件的最小直径为 101.6mm(4in);本方法对试件尺寸的要求与 AASHTO TP 62—03 基本一致,直径为 100mm ± 2mm,高为 150mm ± 2.5mm。试件制备过程分三步:压实成型、取芯、切割。旋转压实成型的原始试件密度和经取芯切割后的试验试件密度一般较大的差距,试验时对试验试件的空隙率进行控制,故试验试件制备分预备试件制备和正式试件制备两个阶段,压实成型采用 170mm 高度控制,通过混合料的加减来得到所需空隙率试件。AASHTO TP 62—03 要求最终的试验试件空隙率与目标空隙率的偏差不能超过 ±0.5%。本方法考虑到空隙率对沥青混合料动态模量具有较大影响,为了保证最终试验试件的空隙率与马氏设计确定的目标空隙率相当,规定最终的试验试件空隙率与目标空隙率的偏差不能超过 ±0.3%,试验试件的 VMA 与目标值偏差不能超过 ±0.5%。

对试验荷载,ASTM D 3497 规定在试验温度和试验荷载下对试件施加 0 ~ 241kPa 的正弦荷载,加载时间最少 30s,但不超过 45s。本方法对加载时间的控制是通过指定各加载频率下荷载的重复次数来确定的。为了便于试验,本方法给出了各试验温度下试验荷载的大致水平(表 T 0738-3)以及各试验频率下作用荷载的重复次数,同时对试验温度要求从低温到高温进行测试,在每个试验温度下又规定由高频到低频进行,这些与 AASHTO TP 62—03 方法基本一致。

表 T 0738-3 各试验温度下试验荷载水平

试验温度(℃)	试验荷载范围(kPa)	试验温度(℃)	试验荷载范围(kPa)
50	35 ~ 70	5	700 ~ 1 400
35	140 ~ 250	-10	1 400 ~ 2 800
20	350 ~ 700		

在进行本方法测试过程中,考虑到试件在高温低频的试验条件下使应变达到 50 ~ 150μ $\epsilon$  所需的荷载比较小,同样在低温高频的试验条件下使应变达到 50 ~ 150μ $\epsilon$  所需的荷载又比较大,从而导致在这两种极端条件下试验所得的模量值失真,本方法建议试验时应避免高温低频和低温高频下分别采用小应变值和大应变值来进行试验。

ASTM D 3497 没有给出试件在试验中的废弃条件,仅提到如果在试验过程中试件的变形超过 2 500μ $\epsilon$  应将最大试验荷载减至 121kPa。本方法规定试件在各设定温度下各频率的试验累计塑性变形超过 1 500μ $\epsilon$  后应予废弃,这与 AASHTO TP 62—03 一致。

ASTM D 3497 计算沥青混合料动态模量时,荷载是取所有加载循环的均值,而应变是取最后 3 个加载循环的均值。本方法计算沥青混合料动态模量和相位角时,对应力幅值、应变幅值和滞后时间均是取最后 5 次加载循环中荷载的平均幅值、可恢复轴向变形平均幅值及同一加载循环下变形峰值与荷载峰值的平均滞后时间来计算,这与 AASHTO TP 62—03 一致。

对特殊沥青混合料,如聚合物改性沥青混合料、高黏度改性沥青混合料或者特殊级配沥青混合料,各试验温度下的试验荷载应作相应调整,确保试件的轴向响应应变能控制在 50 ~ 150μ $\epsilon$  之间。

试验报告中要求提供混合料类型、沥青含量、矿料级配、试件密度、空隙率、沥青品种集料来源、试件尺寸及制作日期和试验日期等相关信息。对试验结果应进行剔差处理,保证平行试验的有效性和一致性。