

马上脱模。

对试验前试模的预热, AASHTO T 312 要求在压实温度下预热 30min 以上, 如果试模需要重复利用则第二次需再加热 5min 以上。ASTM D 6925 规定, 试模在压实温度  $\pm 5^{\circ}\text{C}$  预热 45min 以上, 如果试模需要重复利用, 则第二次需再加热 20min 以上。而 EN 12697-31 规定, 试验前在压实温度  $\pm 10^{\circ}\text{C}$  预热 2h 以上。同时美国各州差异也较大, 如华盛顿州要求预热 1h 以上。本方法参考以上的这些方法, 结合我国应用的情况调整为在压实温度  $\pm 5^{\circ}\text{C}$ , 恒温至少 45min。

关于旋转压实次数, 一般根据交通量、沥青混合料类型等参数按照混合料设计要求选择。本方法的规定与 AASHTO T 312、ASTM D 6925 和 EN 12697-31 是一致的。

对试件毛体积相对密度的重复性与再现性的允许误差, 与 AASHTO T 312 和 ASTM D 6925 的规定是相同的。

## T 0737—2011 沥青混合料旋转压实和剪切性能试验(GTM 方法)

### 1 目的与适用范围

1.1 本方法适用于 GTM 试验机成型试件, 同时能测定沥青混合料试件的密度、抗剪强度、剪应力、抗压模量、抗剪模量及旋转压实指数等, 也可以采用 GTM 方法进行沥青混合料的配合比设计或沥青路面施工质量检验与控制。

1.2 GTM 试验机可分为油压法和气压法两种。根据混合料最大粒径选择不同的试模尺寸, 一般直径为 101.6mm、152.4mm、203.2mm 三种, 分别对应最大公称粒径  $\leq 26.5\text{mm}$ 、37.5mm 和 63mm 的沥青混合料。成型时一组试件的数量不得少于 3 个。

### 2 仪器与材料技术要求

2.1 旋转压实剪切试验机(GTM): 由计算机自动控制, 具有对沥青混合料试件压实成型、参数测定等功能。仪器的主要部件如图 T 0737-1 所示。

2.2 金属标定块: 标定高度传感器用的恒高度金属块, 有 12.7mm、101.6mm、152.4mm、203.2mm 四种。

2.3 试模: 由高碳钢或工具钢制成, 根据沥青混合料最大粒径选择不同直径的试模。一般沥青混合料宜选择 101.6mm 和 152.4mm 两种直径的试模, 成型高度一般控制在高径比接近 1:1。

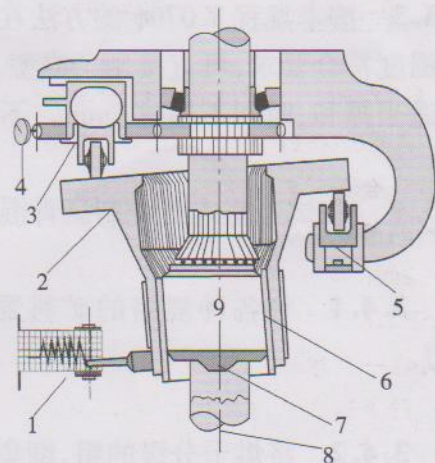


图 T 0737-1 GTM 旋转压实剪切试验机主要部件图

1-旋转角记录器; 2-卡盘; 3-上滚轴; 4-压力表; 5-下滚轴; 6-试模; 7-中心轴线; 8-试件(卡盘)轴线; 9-试件



2.4 试验室用沥青混合料拌和机:能保证拌和温度并充分拌和均匀,可控制拌和时间,容量不小于10L,搅拌叶自转速度70~80r/min,公转速度40~50 r/min。

2.5 烘箱:大、中型各1台,具有温度调节器。

2.6 天平或电子秤:用于称量矿料的,感量不大于0.5g;用于称量沥青的,感量不大于0.1g。

2.7 温度计:宜采用有金属杆的插入式数显温度计,金属杆长度不小于150mm。量程0~300℃,分度值1℃。

2.8 其他:试样托盘、沥青熔化炉、拌和铲、滤纸、秒表等。

### 3 准备工作

3.1 按照本试验规程T 0702的方法确定制作沥青混合料试件的拌和与压实温度。

3.2 常温沥青混合料的拌和及压实在常温下进行。

3.3 按本规程T 0701的方法在拌和厂或施工现场采取代表性的沥青混合料,如混合料温度符合要求,可直接用于成型。需要拌和时可倒入已加热的室内沥青混合料拌和机中适当拌和,时间不超过1min。不得在电炉或明火上加加热炒拌。

3.4 在试验室人工配制沥青混合料时,试件的制作按下列步骤进行:

3.4.1 将各种规格的矿料置105℃±5℃的烘箱中烘干至恒重(一般不少于4~6h)。

3.4.2 将烘干分级的粗、细集料,按每个试件设计级配要求称其质量,在一金属盘中混合均匀,矿粉单独放入小盆里,然后置烘箱中加热至沥青拌和温度以上约15℃备用。一般按单个试件备料(每个油石比平行试验一般不少于3个试件)。

3.4.3 将按本规程T 0601采取的沥青试样,用烘箱加热至规定的沥青混合料拌和温度备用,但不得超过175℃。当不得已采用燃气炉或电炉直接加热进行脱水时,必须使用石棉垫隔开。

3.4.4 用蘸有少许黄油的棉纱擦净试模、下压盘等置60℃左右烘箱中加热保温备用。常温沥青混合料用试模不加热。



### 3.5 调试和设定 GTM 设备参数:

3.5.1 打开试验机的电源开关、液压柱油泵(或气泵)开关、加热套开关、控制计算机开关,并与试验机连接。

3.5.2 根据路面荷载情况及沥青混合料所处的结构层位,确定混合料旋转压实过程中的垂直压力  $\rho_{des}$ 。

3.5.3 设置 GTM 试验机初始旋转角  $\theta_0$ 。对于油压法宜为  $0.8^\circ$ ,采用气压法为  $2^\circ$ 。也可以根据需要采用不同的初始旋转角。

3.5.4 标定高度传感器。根据试模直径的不同,选择对应的金属标定块,标定高度传感器。设计压强不变时,一般不需要标定高度传感器。

3.5.5 设定试验温度,并进行加热保温。标准试验温度为  $60^\circ\text{C}$ 。根据需要也可采用其他温度,但应在报告中注明。

3.5.6 选择试验的方式。GTM 可以通过设定平衡状态、转数、试件高度及试件密度中的一种方式来控制试验过程。平衡状态是指 GTM 每旋转 50 次沥青混合料试件密度变化小于  $0.008\text{g}/\text{cm}^3$ 。试验时宜选择平衡状态为试验方式。

## 4 试验步骤

4.1 按照本规程 T 0702 的要求拌制沥青混合料。将拌和好的沥青混合料,均匀称取一个试件所需的混合料用量  $m$ (实际试件的用量需要根据混合料的类型确定)。成型试件的高度应达到试验所需高度  $\pm 2.5\text{mm}$  的要求。

4.2 从烘箱中取出预热的试模、下压盘,在下压盘上垫一张圆形的吸油性小的纸片(与试模直径相近),将沥青混合料迅速倒入试模内,整平表面。

4.3 用盛试模的托盘将试模在试验机的底座上放置好,操作试验机使压头与沥青混合料接触,然后上紧试模外套,紧固螺栓。

4.4 按照 3.5 的步骤与方法,确认试验的垂直压力、试验温度、试验方式等,点击控制程序开始按钮,然后打开 GTM 旋转开关,试验机开始运转,进行试验。

4.5 试验过程中,计算机将显示不同旋转压实次数对应的沥青混合料试件的密度、高度、轮压、应变、温度等的变化曲线,试件达到平衡状态后 GTM 自动停机。



4.6 如果不进行动态模量试验,设备将试验曲线及试验结果直接打印出来,试验结束;如果需要,则进行动态模量试验。打开试验机旋转开关,点击相应控制程序按钮,GTM 试验机开始自动测定试件动态模量,测试完毕后 GTM 自动停机。打印试验结果。

#### 4.7 测定摩擦力

4.7.1 GTM 试验结束后,提升压头,卸下试模。

4.7.2 将试模固定在摩擦力测试装置上,将测力千斤顶置于试模底面,逐渐加力,观察测力计力值变化,记录达到峰值的力值即为试件与试模间的摩擦力  $F$ 。

4.8 根据需要脱模后的试件可按照本规程相关试验方法测定试件毛体积相对密度等参数。

### 5 计算

5.1 按式(T 0737-1)计算不同旋转压实次数下的试件密度(体积法),取 3 位小数。

$$\rho_x = \frac{m}{h_x \times \pi \times (d/2)^2} \times 10^3 \quad (\text{T 0737-1})$$

式中: $\rho_x$ ——不同旋转压实次数下的试件密度(体积法)( $\text{g}/\text{cm}^3$ );

$m$ ——沥青混合料试件质量( $\text{g}$ );

$h_x$ ——不同旋转压实次数下的试件高度( $\text{mm}$ );

$d$ ——试模的直径,为 101.6mm 或 152.4mm。

5.2 按式(T 0737-2)或式(T 0737-3)计算旋转压实指数(Gyratory Compactability Index,简称 GCI),取 3 位小数。

$$\text{GCI} = \frac{\rho_{x30}}{\rho_{x60}} \quad (\text{T 0737-2})$$

$$\text{GCI} = \frac{h_{x30}}{h_{x60}} \quad (\text{T 0737-3})$$

上述式中:GCI——旋转压实指数,旋转压实 30 次时的试件密度(或高度)与旋转压实 60 次时的试件密度(或高度)的比值,无量纲;

$\rho_{x30}$ ——旋转压实 30 次时的试件密度(体积法)( $\text{g}/\text{cm}^3$ );

$\rho_{x60}$ ——旋转压实 60 次时的试件密度(体积法)( $\text{g}/\text{cm}^3$ );

$h_{x30}$ ——旋转压实 30 次时的试件高度( $\text{mm}$ );

$h_{x60}$ ——旋转压实 60 次时的试件高度( $\text{mm}$ )。



5.3 按式(T 0737-4)计算旋转稳定指数 (Gyratory Stability Index, 简称 GSI), 取 2 位小数。

$$GSI = \frac{\theta_{\max}}{\theta_i} \quad (T\ 0737-4)$$

式中: GSI——旋转稳定指数, 最大角应变  $\theta_{\max}$  与最小角应变  $\theta_i$  的比值;

$\theta_{\max}$ ——旋转压实达到平衡状态时的最大角应变(即最大旋转角), 可由试验系统自动测定或根据图 T 0737-2 不同旋转次数下的旋转角曲线图中得到最大角应变值, 取 2 位小数(即旋转角曲线中最大宽度点处的对应角应变值; 图 T 0737-2 中, 曲线最大宽度处的宽度为 17.0, 则  $\theta_{\max} = 17.0/10 = 1.70^\circ$ );

$\theta_i$ ——旋转压实过程中最小角应变值(或最小旋转角), 可由试验系统自动测定或根据图 T 0737-2 不同旋转次数下的旋转角曲线图中得到最小角应变值, 取 2 位小数(即旋转角曲线中最小宽度点处的角应变值; 图 T 0737-2 中, 曲线最大宽度处的宽度为 10.2, 则  $\theta_i = 10.2/10 = 1.02^\circ$ )。

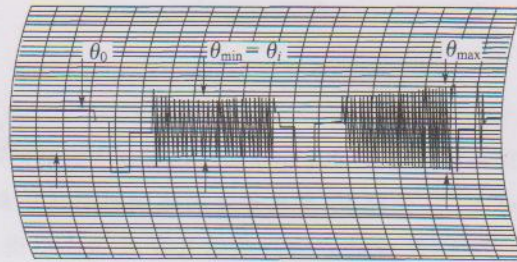


图 T 0737-2 GTM 试验过程中旋转角—旋转次数图

5.4 按式(T 0737-5)计算旋转剪切强度  $S_G$ , 取 2 位小数。

$$S_G = \frac{2 \times (P \times L - F \times a) + N \times b}{A \times h} \times \left( \frac{\theta_{\max}}{\theta_0} \right) \quad (T\ 0737-5)$$

式中:  $S_G$ ——旋转剪切强度(MPa);

$P$ ——上滚轴的作用荷载(N);

$L$ ——荷载  $P$  的力臂(mm);

$N$ ——压头垂直作用在试件上的荷载(N);

$A$ ——试件的端面面积( $\text{mm}^2$ );

$h$ ——试件高度(mm);

$a$ ——摩擦力  $F$  的力臂(即  $0.637R$ ,  $R$  试模的半径)(mm);

$b$ ——荷载  $N$  的力臂(即  $h \tan \theta_0$ )(mm);

$F$ ——试件与试模侧壁的摩擦力(N)。

5.5 按式(T 0737-6)计算沥青混合料抗剪强度因子(Gyratory Shear Factor, 简称 GSF), 取 1 位小数。



$$GSF = \frac{S_G}{\tau_{\max}} \quad (\text{T 0737-6})$$

式中: GSF——沥青混合料抗剪强度因子,无量纲;

$\tau_{\max}$ ——沥青混合料所处层位中最大剪切应力(MPa)。

## 6 报告

**6.1 GSI 与 GSF 的结果处理:**当一组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,并以其余测定值的平均值作为试验结果。当试件数目  $n$  为 3、4、5、6 时,  $k$  值分别为 1.15、1.46、1.67、1.82。

**6.2 试验结果应报告垂直设计强度、试验温度、试件密度、旋转压实指数 GCI、旋转稳定指数 GSI、最大角应变值  $\theta_{\max}$ 、最小角应变值  $\theta_i$ 、旋转剪切强度  $S_G$ 、抗剪强度因子 GSF 等。**

## 条文说明

GTM 是美国工程兵旋转压实剪切试验机(Gyratory Testing Machine)的简称,是由美国工程兵团(U. S. Army Corps of Engineers)在 20 世纪 50 年代开发的路面材料试验机,与此相应的是基于 GTM 旋转压实的沥青混合料设计方法,即 GTM 设计方法。最近几年我国已引进了 GTM 试验机,同时将 GTM 设计方法也引进了我国。目前国内有的省市已经开展了 GTM 方法的研究与应用,同时在国内也有厂商已经生产了 GTM 试验机。为了便于广大工程技术人员的操作和将试验方法规范化,本次主要参考 ASTM D 3387,并结合我国 GTM 的应用情况编写了该试验方法。

由于 ASTM D 3387 是 1996 年修订的,随着新技术的发展,其一些方法已经不再适用,本试验方法根据最新应用情况进行了以下修订。

原 ASTM D 3387 中将 GTM 试验机按照滚轴驱动方式划分为固定轴式和油压式两种。固定轴式由于只能成型,不能进行旋转角应变等测定,其应用越来越少。气压式 GTM 试验设备近来应用越来越多。因此,本试验方法根据我国进口 GTM 试验机情况,将 GTM 试验机划分为油压式和气压式两种。其试验方法本质是相同的,只是初始旋转角有差异。据相关文献报道,ASTM D 3387 也要将 GTM 划分为油压式和气压式两种。

关于初始旋转角,美国工程兵团认为压实期间的角度变化和路面永久变形有关,因此旋转压实机 GTM 角度非恒定。GTM 旋转角一般在  $1^\circ \sim 3^\circ$  之间,旋转角越大,旋转压实效果会越大,设计的沥青用量会相应越低。ASTM D 3387 指出:标准的试验参数,初始旋转角为  $1^\circ$ ,理论上说初始旋转角应该根据路面变形情况进行选择,但是应该说初始旋转角  $1^\circ$  有很大的适应范围,但是当路面工程师采用不同的旋转角时应该在报告中说明。在美国很多沥青混合料 GTM 标准一般也为  $1^\circ$ ,也都是根据 ASTM D 3387 确定的,主要针对油压式 GTM 试验机。据相关文献,ASTM D 3387 新修订版可能将 GTM 试验机的初始旋转角定为  $2^\circ$ 。目前我国 GTM 方法也没有统一初始旋转角,油压法为  $0.8^\circ$ ,也有  $1^\circ$  或  $1.4^\circ$  等,气压式为  $2^\circ$ 。本试验方法初步推荐对于油压法为  $0.8^\circ$ ,气压式为  $2^\circ$ ,也可以根据需要采用不同的初始旋转角。

关于试验方式即试验结束条件,ASTM D 3387 中规定为旋转压实次数达到 60 次即可,美国有的技



术要求对于 GTM 方法一般要求压实为 60 次,但是也有的按照 30~300 次等不同次数作为试验结束条件。目前已逐渐统一到采用压实到“平衡状态”作为结束条件,据说 ASTM D 3387 也将采用这一标准。所谓“平衡状态”即试件旋转压实过程中当每旋转压实一定次数后试件密度变化率(体积法)小于某一值时即认为达到此时混合料达到了平衡状态。国外一些文献和正在修订的 ASTM D 3387 则采用每旋转 50 次试件密度变化率小于  $0.008\text{g}/\text{cm}^3$  称为“平衡状态”。本方法也采用这一标准作为试验结束的条件。

关于垂直压力的问题,ASTM 对于垂直压力值,规定为可能预测的最大轮胎接地压力作用下按照条形荷载、各向同性均匀弹性体计算的最大垂直压力,一般为  $0.83\text{MPa}$ 。新修订的 ASTM D3387 也可能用预测的最大轮胎接地压力作为设计的垂直压力。对垂直压力选择,我国一些工程对于中、下面层采用  $0.8\text{MPa}$ ,表面层采用  $0.9\sim 1.1\text{MPa}$ ,而美国混合料设计规范中对于公路沥青混合料一般为  $0.69\sim 1.38\text{MPa}$ ,对于一些特别的机场道面甚至达到  $1.66\text{MPa}$ 。垂直压力越大,则说明沥青混合料所处层位的压应力越大,会使得设计的沥青用量减小,这样设计的混合料更加符合实际情况。本方法要求根据实际情况确定垂直压力。

关于计算的旋转剪切强度  $S_c$  修正的问题,在 ASTM D 3387 试验方法中,要求新设备在使用之前或旋转压实次数、垂直压力、试模尺寸等试验条件发生较大差异时均需要对设备参数重新标定,通过标定得到旋转剪切强度的修正系数  $S_{c_0}$ ;按式(T 0737-5)计算的旋转剪切强度  $S_c$  加上旋转剪切强度修正系数  $S_{c_0}$ ,便得到实际的沥青混合料旋转剪切强度  $S_c$ 。当试验条件没有发生变化时无需标定修正系数  $S_{c_0}$ 。

标定原理为莫尔圆原理。标定时采用无黏结性的干标准砂( $0.3\sim 0.6\text{mm}$  单一粒径)代替沥青混合料,试验过程中无需加热,按照沥青混合料试验时相同的步骤和试验条件测定标准砂的旋转剪切强度  $S_c$ ,但是需要选定至少三种垂直压力水平,先从较小的垂直压力水平开始,然后增加垂直压力水平,最后一级的垂直压力水平与试验时压力水平相同。标定过程如下:

(1) 确定沥青混合料的试验条件:如旋转次数 60 次;标准垂直压力  $0.8\text{MPa}$ ;初始旋转角  $\theta_0 = 1^\circ$ ;试模直径  $150\text{mm}$ 。

(2) 标定条件:标定时的试验条件与混合料试验时条件一致,如旋转次数 60 次;初始旋转角  $\theta_0 = 1^\circ$ ;试模直径  $150\text{mm}$ ;但试验垂直压力需选定三级,如  $0.4\text{MPa}$ 、 $0.6\text{MPa}$ 、 $0.8\text{MPa}$  三级。

(3) 标定材料: $0.3\sim 0.6\text{mm}$  标准砂。 $0.3\text{mm}$  通过率为  $0\%$ ;  $0.6\text{mm}$  通过率为  $100\%$ 。

(4) 分别采用三种水平的垂直压力进行试验,测定各种试验值,根据各测定值按式(T 0737-5)计算三级荷载对应的旋转剪切强度  $S_c$ ,如  $0.4\text{MPa}$ 、 $0.6\text{MPa}$ 、 $0.8\text{MPa}$  对应的  $S_c$  为  $0.31\text{MPa}$ 、 $0.42\text{MPa}$ 、 $0.51\text{MPa}$ 。

(5) 分别以三级荷载为 X 坐标,三级荷载对应的旋转剪切强度  $S_c$  为 Y 坐标作图,如图 T 0737-3 所示。作三点连线交于 Y 坐标,此值即为旋转剪切强度的修正系数  $S_{c_0} = -0.1\text{MPa}$ 。如某一种沥青混合料,根据测定的各试验参数按式(T 0737-5)计算得到的旋转剪切强度  $S_c$  平均值为  $0.56\text{MPa}$ ;则修正后的旋转剪切强度  $S_c$  为  $0.46\text{MPa}$ 。

目前较多的对比试验结果表明,GTM 设计方法较普通的马歇尔方法设计确定的最佳沥青用量要低得多,这对于一些重载、超载路段或炎热地区的沥青路面来说可以实现降低沥青用量,从而提高沥青混合料的抗车辙

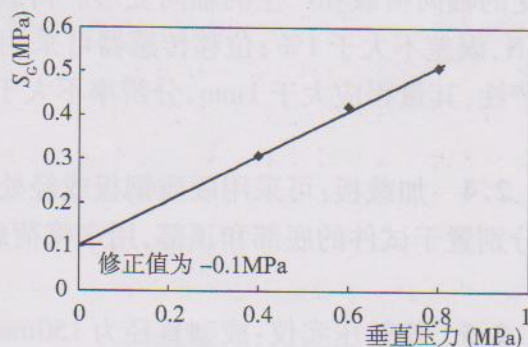


图 T 0737-3 旋转剪切强度  $S_c$  修正系数的确定



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。