

## 1.1 背景及意义

随着我国经济的快速发展，公路上行驶的重型车辆也越来越多。大型车辆为了防止轮胎温度过高需要持续洒水及频繁刹车，使下坡路段沥青路面抗剪切变形性能和劲度模量逐渐下降，从而引发推移、拥包等病害；并且由于重载、慢速、高温等不利条件，沥青路面上坡路段经常会出现车辙。在城市道路交叉口、公交车站等位置，公交车需要频繁启动和制动，每一次启动和制动都会给路面材料带来损伤，日积月累、导致推移、拥包等病害。车辙、推移、拥包等病害是目前沥青路面常见的破坏形式并且难以解决。通过以前的研究成果可知，引起这些病害的原因往往是沥青混合料抗剪切变形性能不足。因此，有必要对沥青混合料在剪切荷载作用下的剪切变形演化及累积规律进行深入研究。

沥青混合料剪切变形的研究主要分为以下几个方面：① 沥青混合料剪切变形试验方法的研究；② 沥青混合料剪切变形性能的研究；③ 沥青混合料剪切变形本构关系的研究。目前已有的试验方法各有优缺点及适用范围，因此，需要确定一种更适合于分析沥青混合料剪切变形的试验方法。以前，人们对于材料性能的研究主要是通过室内宏观试验进行分析，研究其宏观变形规律。现在，由于计算机的快速发展，越来越多的研究者向微细观领域探索，从更深层次研究材料在外界环境作用下破坏的机理。沥青混合料是由集料、沥青砂浆和空隙组成的一种复合材料，

采用不同的试验方法进行测试，其反映出来的性能可能不同，单纯从宏观试验角度进行研究，很难找到引起路面破损的根本原因，所以，要想解决目前沥青路面出现的车辙、推移及拥包等病害，需要从宏观和微观两个方面寻找解决方法，研究其破坏的机理。

沥青混合物在高温下是一种黏弹性材料，其高温下的破坏均是在变形过程中进行，变形过程中沥青混合料的模量、微观组构等均随着时间的推移而变化，最终外在表现为车辙、推移等病害。本书研究内容有助于全面了解沥青混合物在剪切荷载作用下的变形机理，对完善沥青路面设计方法，提高沥青路面耐久性都具有积极意义。

## 1.2 国内外研究概况

### 1.2.1 沥青混合物剪切性能试验研究

大量学者认为，沥青混合物抗剪切性能不足，是产生永久变形和剪切推移等病害的主要原因。为了研究沥青混合物剪切变形问题，寻找一种简便而且能够准确评价沥青混合物剪切性能的试验方法至关重要。

沥青混合物的抗剪性能，国外研究得比较早。早在 20 世纪 30 年代德国便开始使用三轴试验研究土的固结问题，1934 年美国的斯坦通开始用三轴试验仪研究沥青性能<sup>[1]</sup>，1951 年 Norman W. Wcleod 提出了采用诺模图研究沥青混合物的抗剪强度<sup>[2]</sup>。

1987 年美国开展了长达五年的公路战略研究计划（Strategic Highway Research Program，简称 SHRP 计划），这一五年计划的成就之一是在沥青混合物性能研究中开发了一种用于评价沥青混合物剪切性能的试验设备——剪切试验仪（SST）<sup>[3, 4]</sup>，如图 1-1 所示。

2002 年，Gregory A. Sholar 等人研发了一种操作简单的直剪试验仪，用于检测层间抗剪强度<sup>[6]</sup>。它既可以方便地安装在各种试验机上，也可以安装在马歇尔稳定度仪上，如图 1-2 所示。

美国得克萨斯州交通局和联邦公路局发现很多质量评定合格的沥青混合物铺筑的路面仍然会出现车辙病害，因此委托研究人员进行相关研究，并于 2014 年由 AbuN. M. Faruk 等发明了一种称为简单冲击剪切试验（SPST）的试验方法，作为对传统的永久变形和车辙试验的补充<sup>[7]</sup>，如图

1-3 所示。



图 1-1 SST 示意图<sup>[5]</sup>

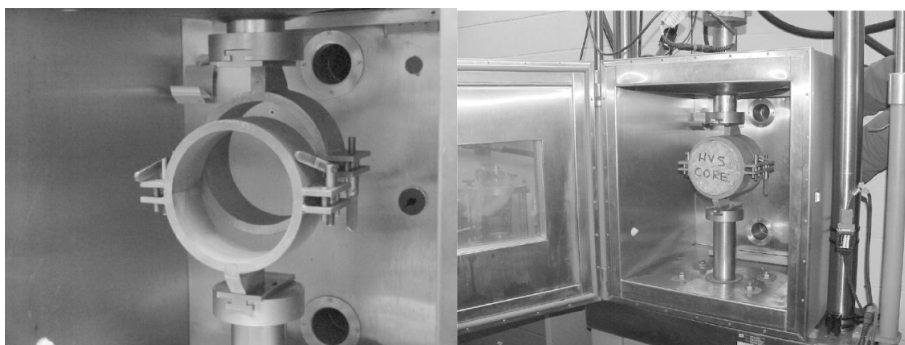


图 1-2 安装在 MTS 和马歇尔稳定度仪上的直剪试验仪

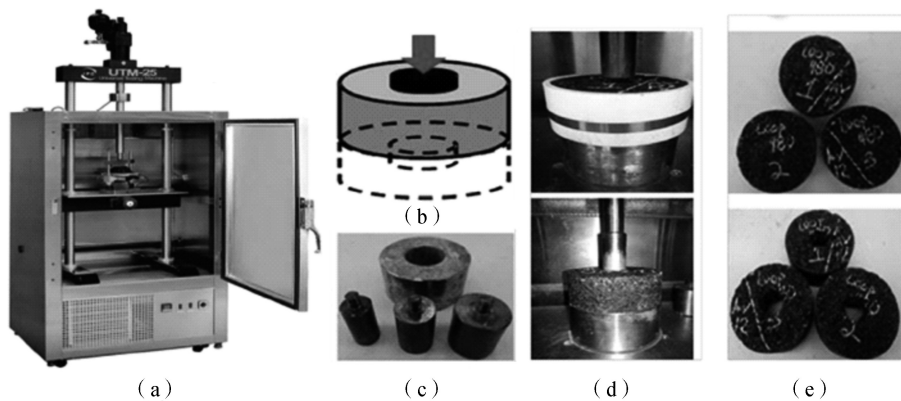


图 1-3 冲剪试验

2015 年, Mohammadreza Khajeh Hosseini 开发了一种称为复式剪切试验机的设备 (The Duplicate Shear Tester, DST), 能够进行恒高度频率扫描试验和恒高度重复剪切试验, 并且操作起来比较简单<sup>[8]</sup>, 如图 1-4 所示。

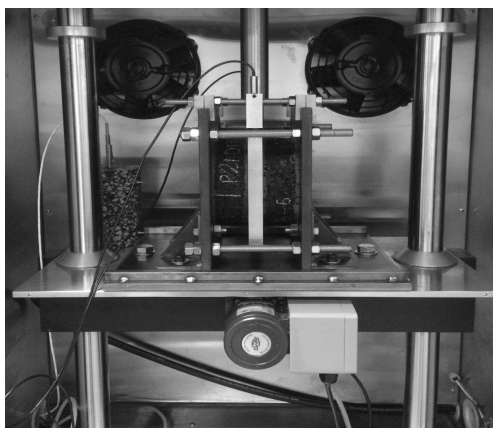


图 1-4 DST 试验

2016 年, Josef Zak 等开发了一种称为单轴剪切试验仪 (The Uniaxial Shear Tester, UST) 的沥青混合料剪切设备, 并采用重复剪切试验和频率扫描剪切试验进行了相关性分析<sup>[9]</sup>, 如图 1-5 所示。

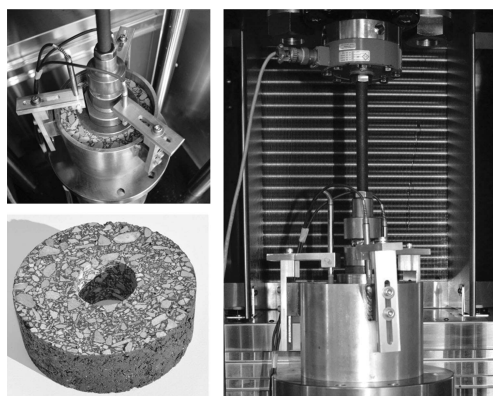


图 1-5 单轴剪切试验仪

国内关于沥青混合料抗剪性能研究得也比较多, 并开发出了一系列

试验方法，现就目前使用的主要试验方法和特点分析如下：

### 1. 直接剪切试验

直接剪切试验是根据土力学中莫尔-库仑强度理论的相关知识，在土样上方施加规定的垂直压力及水平推力，并使试样沿着上下盒之间的水平面发生剪切并最终破坏。直剪试验方法简单，用于测定颗粒摩擦性是可行性的，但是对于颗粒形状、表面纹理特性及级配比较敏感。沥青混合料的直剪试验是在土力学直剪试验的基础上进行改进而发展起来的。

2006年，长安大学郝培文教授<sup>[10]</sup>也开发了一种操作和数据采集都比较方便的直接剪切试验仪，如图 1-6 所示。该设备可利用 MTS 进行操作，可以采用控制应力和控制应变两种加载方式，并且可以调整试验温度、荷载大小以及加载速率等试验参数，试验过程中程序可以自动采集试验数据。直剪试验主要应用于层间抗剪强度试验，属于界面间的剪切性能试验。

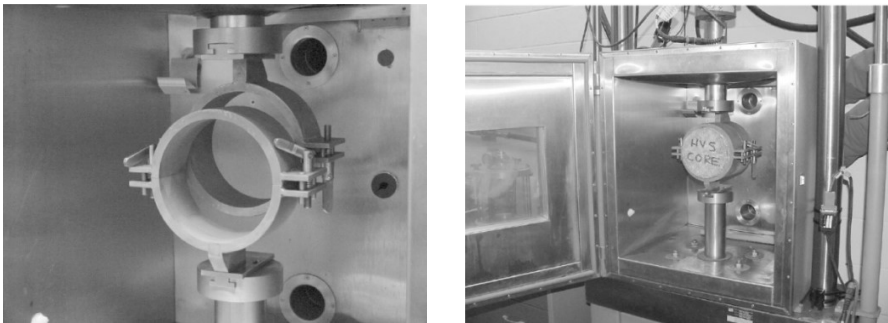


图 1-6 安装在 MTS 和马歇尔稳定度仪上的直剪试验仪

### 2. 斜剪试验

斜剪试验是根据《公路工程岩石试验规程》(JTG E41—2005)中关于石料剪切强度试验方法的相关内容开发出来的。为了确定路面各层间及桥面铺装层间的抗剪强度，2005年同济大学利用 MTS 试验机设计了一种基于斜剪的试验方法<sup>[11]</sup>，如图 1-7 所示。它是指试件在受到垂直荷载时会产生正应力和剪应力，此时试件将会受到剪切力。当正应力超过临界值时，试件就会产生剪切破坏。此方法用以确定沥青面层、基层和桥面层之间在车辆荷载作用下各结构层之间的抗剪强度。该试验操作起来简单，物理意义也比较明确，但是在试验过程中试件与试模接触受力的

部位会出现应力集中的现象。而且，剪切刃之间的间距也需要凭借试验经验来设置。

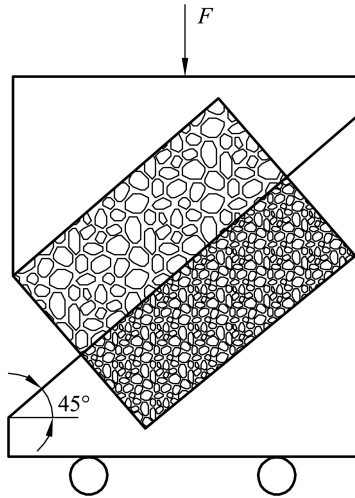


图 1-7 斜剪试验

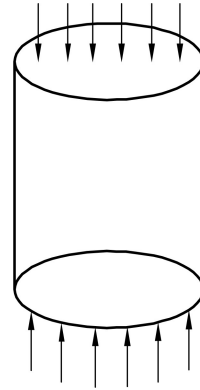


图 1-8 单轴压缩试验

### 3. 三轴试验

在 20 世纪 30 年代，Smith 等研究人员为了提高机场路面抗剪切性能，开发出了三轴试验。三轴试验与直剪试验、斜剪试验等其他试验方法相比，最大的特点是可以控制围压，因此用以评价温度、应力、孔隙水等的耦合很方便。从本质上讲，三轴试验可以看作有侧限的压缩试验，轴向偏应力是造成试件破坏的关键因素。依据莫尔-库仑强度理论，经过不同的压力试验，可以确定沥青混合料的摩擦角  $\phi$  和黏结力  $C$ ，从而确定沥青混合料的抗剪强度  $\tau$ 。该试验方法应力状态明确，能够很好地描述现场的应力状态，但操作方法太复杂，无法在施工现场进行沥青混合料性能评定，主要用于科学研究<sup>[12, 13]</sup>。由于三轴试验能够很好地模拟沥青路面的受力状况，而且可以控制围压，因此三轴试验国内外研究得比较多。

### 4. 单轴压缩试验

单轴压缩试验操作比较方便，试验方法简单，比较常用，如图 1-8。通过单轴压缩试验可以确定无侧限抗压强度，进而通过莫尔圆可确定沥青混合料抗剪强度。也可以通过控制应力水平进行单轴静载蠕变和重复

加载单轴蠕变试验，研究沥青混合料的永久变形。祁峰<sup>[14]</sup>采用旋转压实试件在不同荷载水平和不同温度条件下进行了单轴静载蠕变试验以及重复加载蠕变试验，通过试验分析了荷载、温度对沥青混合料蠕变性能的影响规律。

### 5. 单轴贯入试验

单轴贯入试验是由毕玉峰<sup>[15]</sup>等通过研究提出的，如图 1-9 所示。它的试验原理是在试件上使用小于圆柱体试件直径的钢压头进行加载，通过这个试验来模拟路面实际受力状态。单轴贯入试验方法采用圆柱形试件，尺寸为  $\phi 100 \text{ mm} \times 100 \text{ mm}$ ，利用三维有限元确定抗剪强度系数，进而确定抗剪强度。试验方法是通过单轴贯入试验，获得抗剪强度参数求得  $\tau_m$ 、 $\sigma_1$  和  $\sigma_3$ ，再辅以无侧限单轴压缩试验，依据莫尔圆求得  $C$  和  $\phi$  值。这种试验方法比较简便，但沥青混合料的集料粒径对试验结果影响比较大。

第 8 期

---



图 1-9 单轴贯入试验

### 6. 同轴剪切试验

同轴剪切试验方法<sup>[16]</sup>由郭忠印课题组于 2007 年研究并提出来，如图 1-10 所示。同轴剪切试验是一种侧面受限的剪切试验方法，受力特点与 SHRP 中剪切试验恒定高度单剪试验的受力特点有一定相似性。同轴剪切试验首先将试件加工成外径为  $\phi 150 \text{ mm}$ ，内径为  $\phi 55 \text{ mm}$ ，高为  $50 \text{ mm}$  的中空圆柱体，然后将试件用环氧树脂粘贴在钢筒与钢柱之间，轴向施加正弦荷载，荷载则通过钢柱作用于中空圆柱体试件内侧，受力过程中试件外侧约束，直到试件发生剪切破坏。通过三维有限元建立模型，计算同轴剪切试验在静荷载作用下的剪切强度系数，进而确定沥青混合料抗

剪强度。通过与三轴试验结果对比表明，用同轴剪切试验确定沥青混合料抗剪强度，其精度比较好，但是试验结果受集料粒径影响比较大。

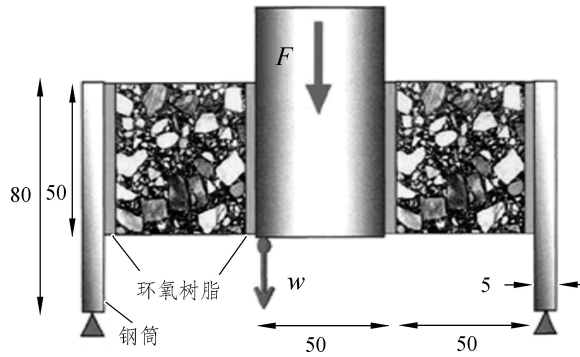
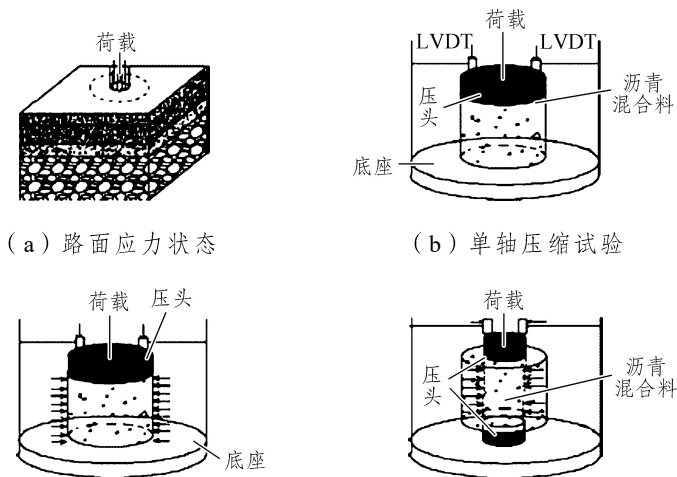


图 1-10 同轴剪切试验 (单位: mm)

### 7. 局部三轴试验

黄晓明课题组<sup>[17]</sup>为了分析高温变形规律，于 2007 年开发了局部三轴重复剪切试验方法，如图 1-11 所示。该方法利用有限元确定了试件、压头和底座尺寸参数。试验采用的试件尺寸为  $\phi 150 \text{ mm} \times 80 \text{ mm}$ ，压头及底座直径为 75 mm，试验方法比较简单，不需要围压。2015 年张建同<sup>[18]</sup>运用有限元方法进行三轴压缩试验，通过室内试验进行验证，并借助局部三轴试验研究了沥青混合料的剪胀行为。



(a) 路面应力状态

(b) 单轴压缩试验



(c) 常规三轴压缩试验

(d) 局部三轴压缩试验

图 1-11 局部三轴试验示意图

## 8. 圆环剪切试验

郑建龙课题组<sup>[19]</sup>于 2009 年开发出一种称为圆环剪切的试验方法，如图 1-12 所示。该试验方法可以产生锥形破坏面。通过建立有限元模型，分析得出：破坏时产生的锥形破坏面与最大剪应力面相同，试件破坏时形成的锥形破坏面方向与最大剪应力的方向基本一致。经过室内试验获得的沥青混合料抗剪强度值稳定性比较好。圆环剪切试验方法操作比较简单。

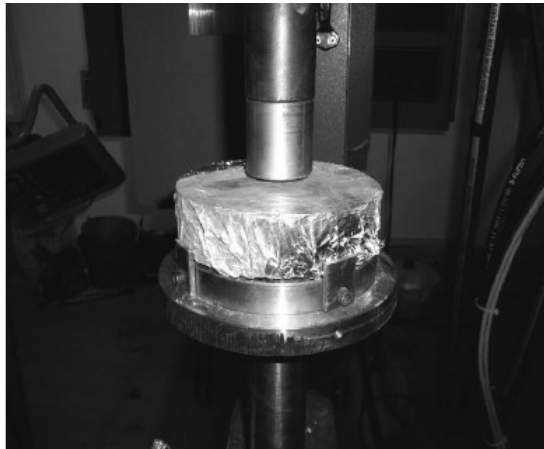


图 1-12 圆环剪切试验

## 9. 滑移剪切试验

为了研究沥青混合料高温性能和颗粒界面滑移剪切行为之间的关系，张争奇课题组<sup>[20]</sup>于 2013 年开发出滑移剪切试验方法，如图 1-13 所示。试验采用直径为 40 mm 的加载头，试验装置由三部分组成：上部结构是一个顶部封顶但预留一直径为 40 mm 孔径的圆孔，其下方为外侧留一企口的钢圆筒；下部结构为上方内侧壁留有企口，侧面留有观察口的钢圆筒，中间为留有直径为 70 mm 圆孔的承载板。文献<sup>[21]</sup>通过

室内试验研究得出可以采用滑移剪切代替马歇尔稳定度进行沥青混合料设计，并且设计出的沥青混合料油石比较马歇尔设计法要少，高温性能更好。