

Waters™



探索业内更精密的热机械分析仪

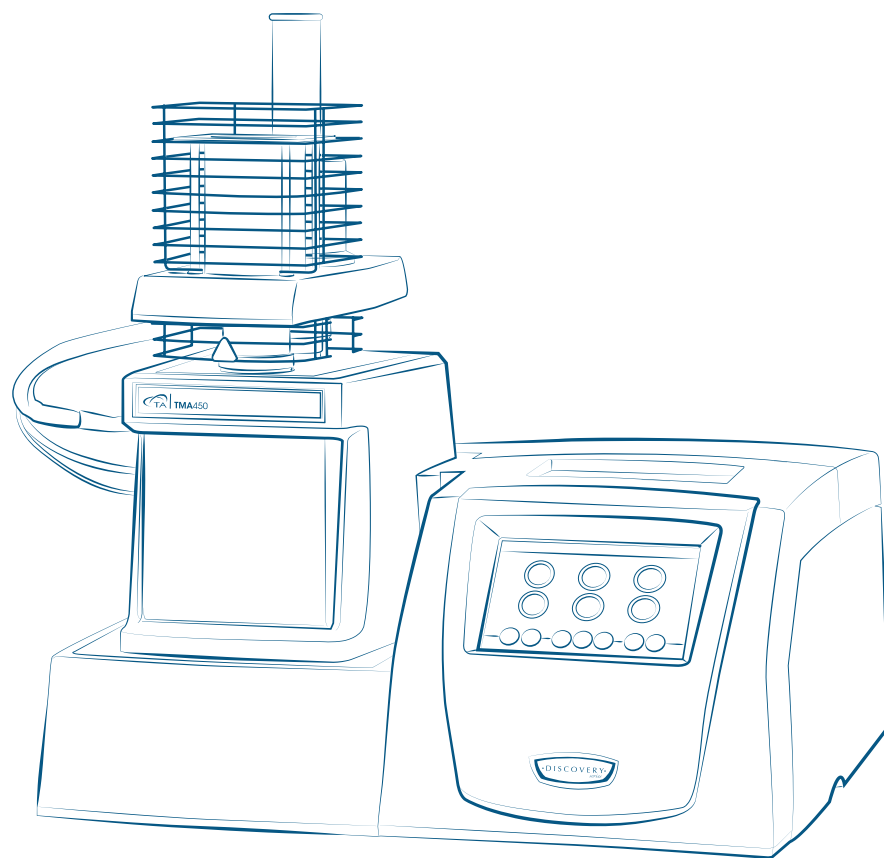
Discovery TMA

可提供

卓越出众的性能

无与伦比的灵敏度

强大的多功能性



DISCOVERY TMA | 热机械分析

TA仪器邀您体验性能绝佳的热机械分析仪Discovery TMA 450。融合尖端工程技术，在细节处精益求精，产品性能全面升级，打造全新用户体验。Discovery TMA 450具备先进的测试功能和丰富多样的样品夹具，为用户带来超乎想象的优异性能。

获取优质的TMA数据从未如此简单！

特点和优势：

- 非接触式无摩擦电机可提供0.001N至2N的力，能够测量从柔软的可压缩弹性体到刚性复合材料等各类样品，涵盖的范围广泛
- 宽量程、高分辨率测量传感器可容纳长度长达26mm的样品，测量范围为 ± 2.5 mm，分辨率低至15nm，可精确测量尺寸变化
- 调制TMA™ (MTMA™)、动态TMA、蠕变和应力松弛等高级测试模式扩展了仪器功能，并为用户提供了有关材料力学行为的更有价值的信息
- 便捷的机械制冷附件（MCA 70），可将温度控制到-70°C，无需使用液氮，避免花费相应的成本以及执行繁琐的操作
- 功能强大的TRIOS软件提供了卓越的用户体验和易用性，将仪器控制、数据分析和生成报告组合在一起，缩短了培训时间，并将生产率提高到新的水平
- 创新的“APP式”触摸屏，为仪器配备简单的One-Touch-Away™一键触摸功能，显著提升可用性，获取优质数据从未如此简单
- 每台仪器的加热炉均享有业内独一无二的五年质保，为产品保驾护航，恪守质量承诺，值得用户信赖



为了满足各种极具挑战性的应用需求，针对高性能材料的需求日益增加，因此了解材料在所处环境下产生的反应至关重要。Discovery TMA 450符合并超过行业测试标准*，可提供有关材料线性热膨胀系数（CTE）、收缩、软化、玻璃化转变温度等信息。可使用高级选项获取黏弹特性，如材料的刚度（模量）、阻尼特性（ $\tan \delta$ ）、蠕变和应力松弛。TMA 450特别适合对这些材料特性进行局部测量，尤其是在材料相容性至关重要的制造部件或组件中。

* ASTM E831、E1545、D696、D3386和ISO 11359: 第1-3部分

技术 | 仪器设计

TA仪器将设计和集成高品质加热炉、尺寸测量和气体环境控制组件的工程经验与功能强大的TRIOS软件完美融合，确保Discovery TMA 450的配置灵活性和强大的多功能性。

加热炉

TMA 450采用快速响应的小质量加热炉，提供从-150°C至1000°C范围内最精确的温度控制和0.01至200°C/min的稳定升温速率。该加热炉确保了精确尺寸变化测量所需的优异基线性能，以及调制TMA测试所需的动态温度控制。空气冷却功能将实验周转时间缩短为10分钟，显著提高实验室生产率。加热炉顶部的集成式Inconel® 718杜瓦槽可加入液氮将其冷却至-150°C，或者可将该仪器与选配的无液氮机械制冷附件（MCA 70）相连，以将加热炉冷却至-70°C。除了提供更宽的温度范围，制冷附件还提供执行升温/降温热循环实验的能力，以及进一步缩短实验周转时间。

样品台

样品台和探头由石英制成，经优化适用于-150°C至1000°C的工作范围。石英的高刚度、耐腐蚀性和极低的热膨胀性使其成为理想材料。样品台使用方便，易于探头或夹具的安装、样品加载和热电偶的放置。石英探头的设计适用于膨胀、穿刺、弯曲（三点弯曲）和拉伸变形模式。集成的双气路输入气体模块向样品区域提供吹扫气体环境（空气、氩气、氦气或氮气），最大流速为200mL/min。

高性能位移传感器

TMA 450的核心是位移传感器。该传感器可在较宽的位移和温度范围（-150至1000°C）内直接测量样品尺寸的变化，并具备出色的精度和准确度。

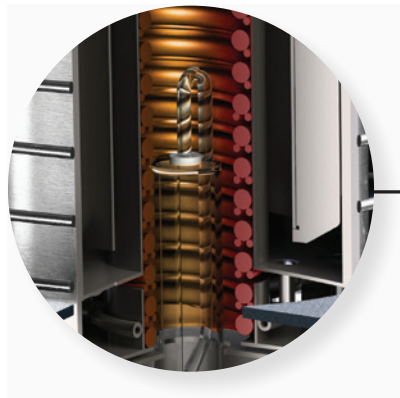
该测量系统可提供15nm的分辨率和±2.5mm的动态范围，可测量长达26mm的样品。位移传感器不受温度漂移的影响，确保了稳定的基线性能和可重复性。

无摩擦力电机

非接触式电机在0.001到1N的范围内为样品提供无摩擦可控力。通过增加砝码，力可以增至2N。

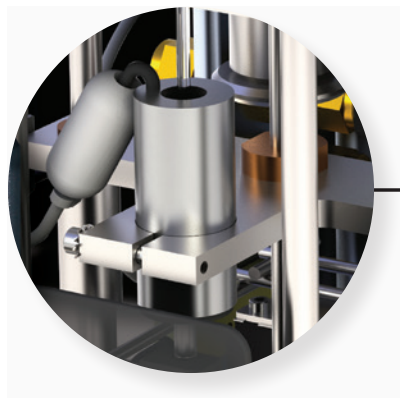
在精确的控制下，施力电机会在所有变形模式下所需的静态、斜坡或振荡动态力。从采用恒定力进行线性变温的标准测试方法到小振幅动态TMA，Discovery TMA 450均能以最高灵敏度和精确度获取广泛的材料特性。

Inconel®是Special Metals Corporation的注册商标

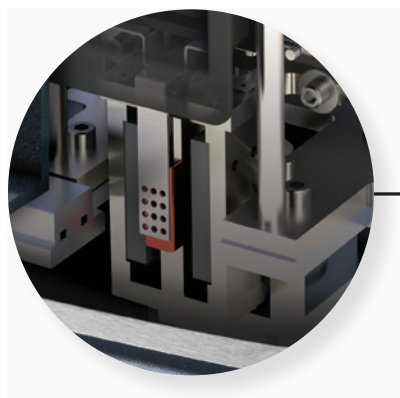


加热炉

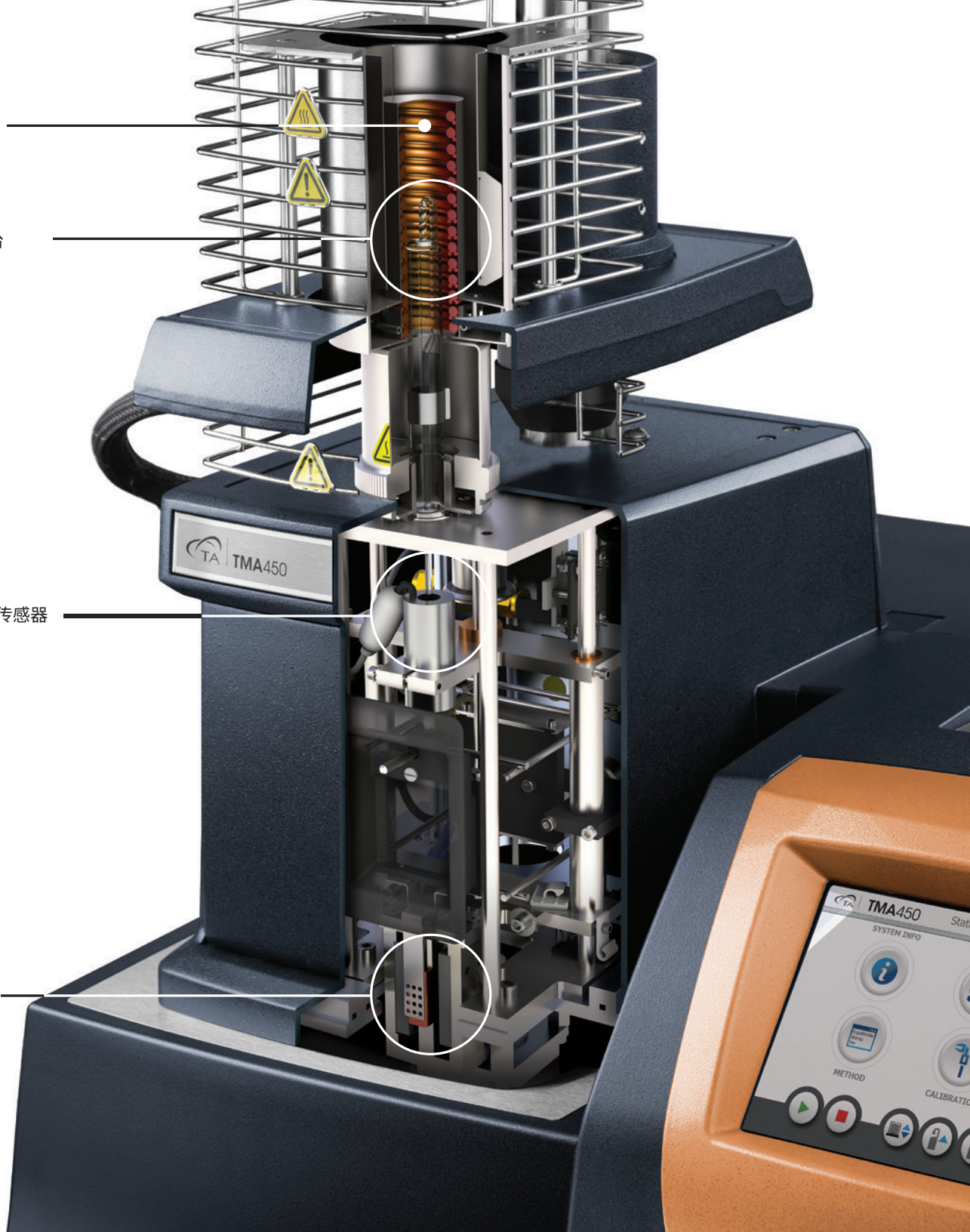
样品台



高性能位移传感器



无摩擦力电机



技术 | 测试夹具

膨胀

膨胀测量用于确定材料的热膨胀系数(CTE)、玻璃化转变温度(Tg)和压缩模量。平头标准膨胀探头置于样品上方（可施加小的静态力），在设定的温度程序下进行实验。通过探头运动记录样品的膨胀或收缩。此测试模式适用于绝大多数固体样品。宏膨胀探头的表面积更大，有助于分析柔软或不规则样品、粉末和薄膜，配合体膨胀夹具可测定样品的体积热膨胀系数。

穿刺

穿刺测量采用一个凸起的针状探头将驱动力集中在样品表面的一小块区域上，可提供玻璃化转变(Tg)、软化和熔融特性的精确测量。这对于涂层表征极为重要，无需将其从基底上剥离。该探头的操作方式与膨胀探头类似，但产生的应力更大。半球形探头是用于固体样品软化点测量的替代选择。

拉伸

采用薄膜/纤维夹具对薄膜和纤维的应力/应变性能进行拉伸研究。使用对准固定装置可以在夹具中实现牢固且可重复的样品定位。施加固定力用于生成应力/应变和模量信息。其他测量包括收缩力、Tg、软化温度、固化和交联密度。可通过执行高级拉伸测试（如动态TMA、调制TMA™）来确定黏弹性参数（如E', E''和tan δ）以及分离重叠的转变。

三点弯曲

在弯曲变形中，样品两端支撑在石英刀口支架上。通过楔形石英探头在样品中心垂直施加恒定的静态力。因为没有夹具的夹持效应，所以该测试是“纯”变形方式。它主要用于确定刚性材料（如复合材料）的弯曲性能和变形温度测量。TMA 450EM还支持动态测量，TA设计了专门的低摩擦金属支架来替代石英支架。

膨胀



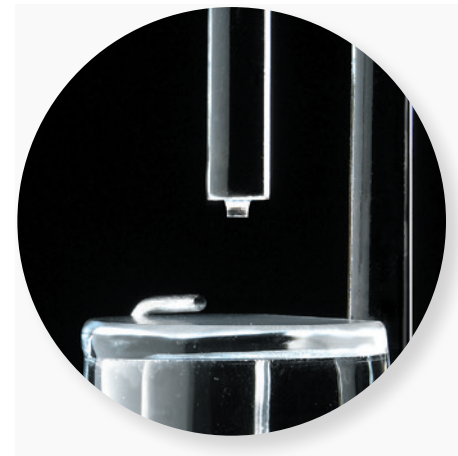
宏膨胀



体膨胀



穿刺



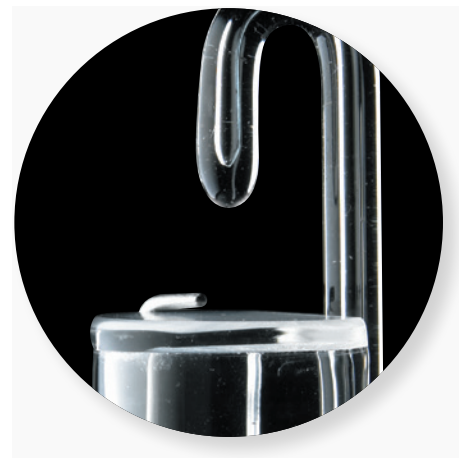
三点弯曲



拉伸



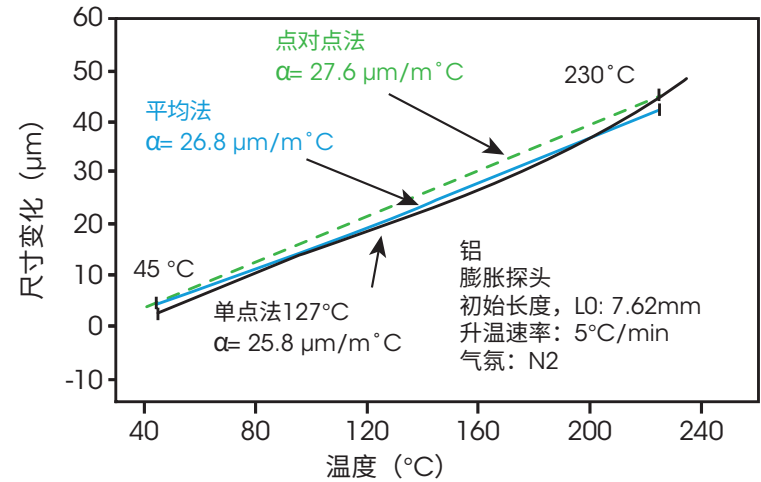
半球形



膨胀、宏膨胀与体膨胀

精确的热膨胀系数测量

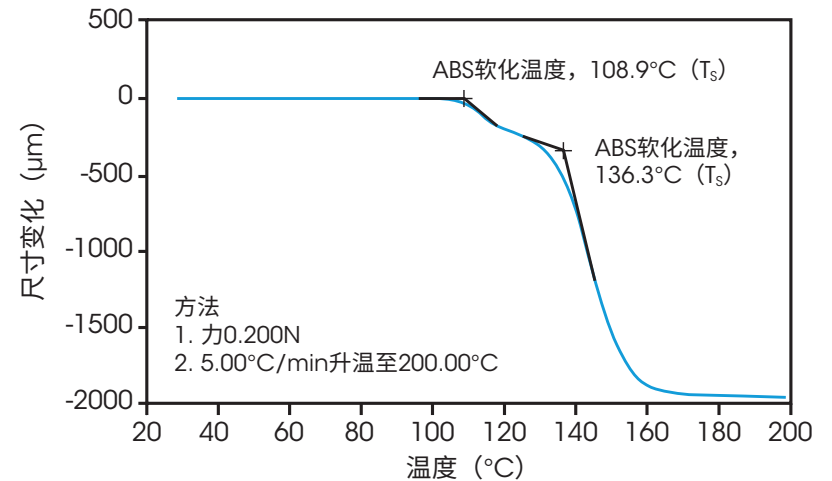
本示例说明了如何使用膨胀探头在200°C的温度范围内准确测量铝样品的CTE的变化。TRIOS软件允许使用多种方法来分析曲线斜率，以计算选定温度对应的CTE或某个温度范围内的CTE。



穿刺与半球形

软化温度 (T_s) 测定

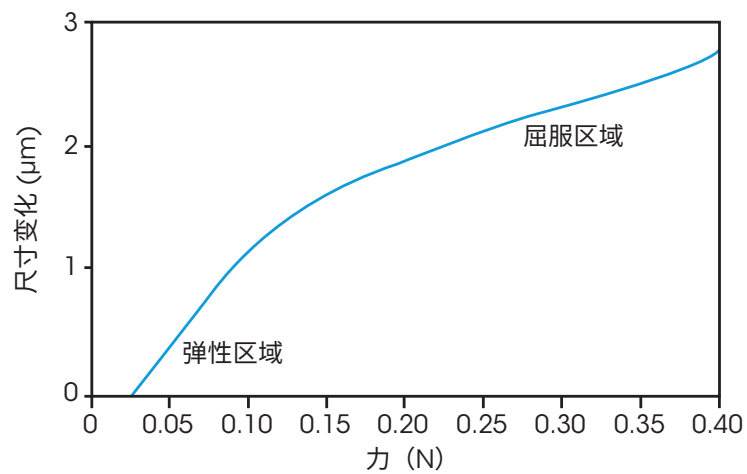
穿刺夹具用于测试聚碳酸酯/丙烯腈-丁二烯-苯乙烯 (PC/ABS) 这种无定形热塑性混合物，升温速率为5°C/min，恒定力为0.2N。依据ASTM E1545和ISO 11359中所列的条件，可通过穿刺确定软化温度/玻璃化转变温度。由尺寸变化的负偏移可以很轻松地检测软化点，该混合物每种组分的软化点均可观察到。



拉伸

纤维应力/应变测量

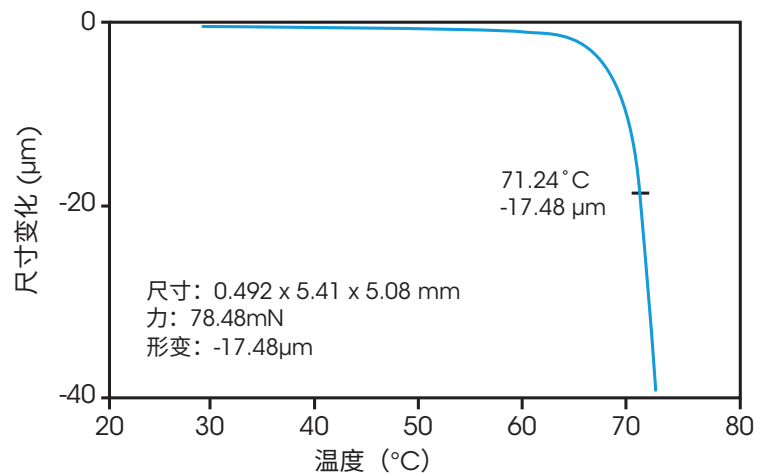
应力/应变测量广泛用于评估和比较材料。右图显示了在恒定温度下，25mm聚酰胺纤维在拉伸状态受到匀速增加的力作用时不同区域的应力/应变特性。纤维依次经历了瞬时形变、迟滞和线性应力/应变响应，最终屈服伸长。该测试还可以得到其他参数（如屈服应力，杨氏模量）。



三点弯曲

材料性能与选择

右图为采用ASTM国际测试方法E2092对聚氯乙烯 (PVC) 样品进行三点弯曲测试（弯曲探头）的示例，用于测定变形温度或“载荷下变形温度” (DTUL)。该测试指定了规定尺寸的样品在给定力的作用下产生特定变形的温度。长期以来，该测试一直用于预测材料性能。



TMA 450 RH | 专用湿度仪

全新TMA 450 RH专用湿度仪是一款独立仪器，可在较宽的温度和湿度范围内进行受控的相对湿度实验。测量CHE、CTE*、跟踪Tg变化以及执行动态实验，均在受控的相对湿度环境下进行。

特点和优势：

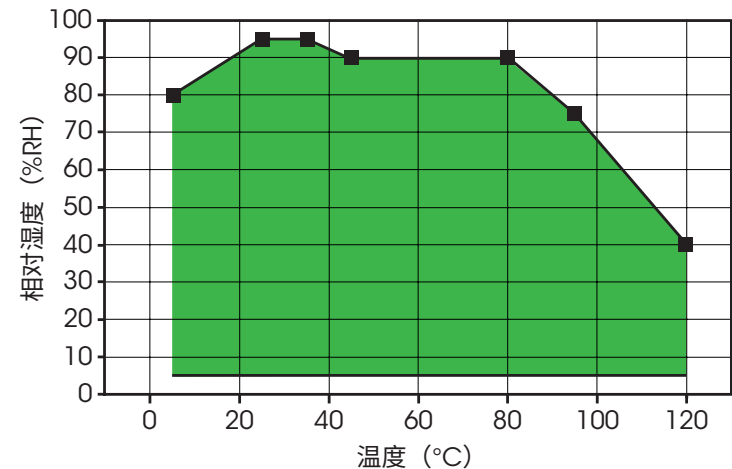
- 市面上相对湿度和温度范围最宽泛的仪器（见右图）
- 多种低膨胀石英夹具提供行业领先的基线平坦度，从而实现出色的尺寸变化测量
- 非接触式无摩擦电机可提供0.001N至2N的力，能够测量广泛的样品
- 提供动态、蠕变、应力松弛或等应变测量等高级测试模式
- 强大的TRIOS软件包集仪器控制、数据分析和报告功能于一身，确保卓越的用户体验
- 创新的“APP式”触摸屏为仪器配备简单的One-Touch-Away™ 一键触摸功能，显著提升可用性

TMA 450 RH包含以下组件：

- 1 完全工程与集成化的样品室，专为提供业内更精确的受控温湿度环境而设计
- 2 TMA RH附件，包括气体加湿器，控制加湿气体流入样品室
- 3 伴热蒸汽输送管路，将TMA RH附件连接至样品室。该输送管路的温度保持在蒸汽露点以上，以免蒸汽在输送过程中冷凝

* 温度范围为5至120°C

Discovery TMA RH规格	
温度范围	5至120 °C
温度精度	±0.1 °C
加热/冷却速率	0.1至1 °C/min
湿度范围	5至95% (参见图表)
湿度准确度	5至90% ±3% >90至95% ±5%
湿度变化速率	0.1至2%RH/min
最大样品尺寸	26mm
测量精度	±0.1%
灵敏度	15nm
力度范围	0.001至2N
频率范围	0.01至2Hz





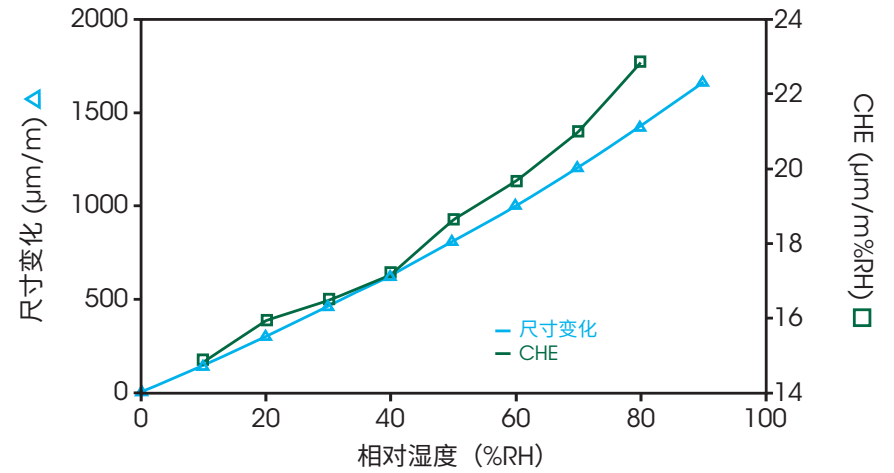
TMA 450 RH样品室专门配备了一个精确定位的温湿度传感器来优化样品温湿度环境控制。



TMA 450 RH | 湿度应用

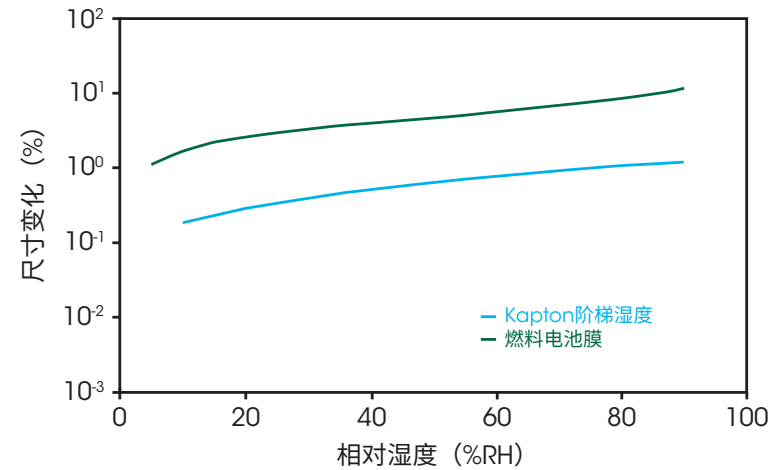
评估CHE

由于吸水而导致的材料膨胀或肿胀程度取决于材料的吸湿性系数（CHE）。右图对Kapton的这一特性进行了测量，Kapton是电子工业中使用的一种重要聚酰亚胺材料。该图显示了阶梯式湿度实验生成的等温吸附线，还显示了连续点之间计算得到的CHE。



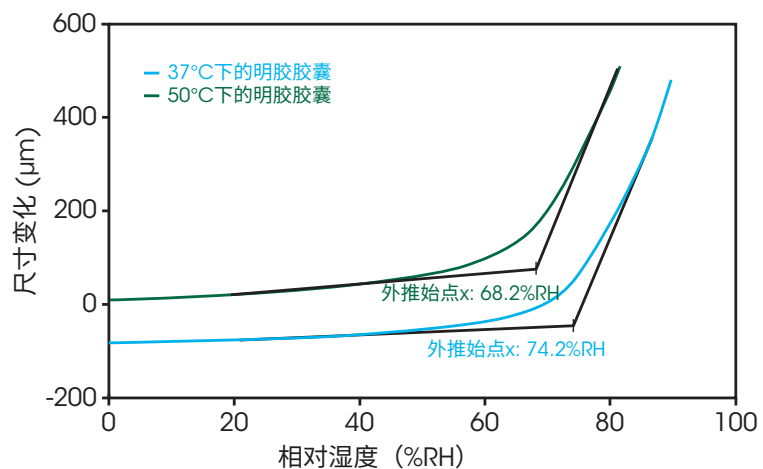
吸湿性能对比

全氟磺酸（PFSA）薄膜，也被称为质子交换膜，在新电池技术中被广泛使用。许多先进的聚合物必须测试对潮湿环境的反应。右图是商业薄膜的吸湿性能与上述Kapton数据的对比。PFSA薄膜对湿度的响应几乎比Kapton大一个数量级。



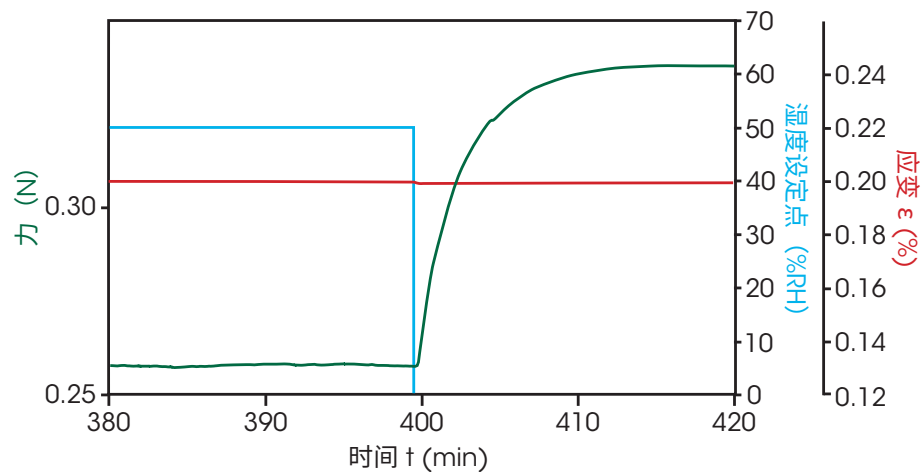
检测Tg

玻璃转化对水的吸收很敏感，因为水起到了增塑剂的作用。检测和跟踪Tg的变化对材料的功能和储存至关重要。右图显示了在37和50°C下，以2%/min的相对湿度斜坡捕获的用于药物胶囊的明胶Tg。在较高的温度下，由于较高的吸水率和由此产生的塑化，Tg被降到较低的RH水平。



干燥收缩性

许多材料在干燥时都会收缩，了解其中的收缩力非常重要。在右图中，聚合物薄膜被保持在0.2%的等应变条件下，在湿度从50%到0%的快速变化过程中，记录了保持这一应变所需的力。可以清楚地测量保持应变常数所需增加的力大小。







Discovery TMA 450采用创新型触摸屏，通过增强型One-Touch-Away™功能使操作的简易性达到了前所未有的水平。

触摸屏的特点和优势：

- 设计符合人体工学，提升易用性和生产率
- 强大的功能简化了仪器操作
- 弹性灵敏的触摸屏，增强用户体验

One-Touch-Away™界面包括：

- 启动/停止实验
- 查看当前实验方法
- 夹具和力校准
- 系统信息
- 实时信号和图谱
- 温度设置
- 探头位置和样品测量设置
- 测试与仪器状态

One
Touch
Away™

APP式触摸屏、功能强大的全新TRIOS软件以及快速可靠的校准程序无缝协作，极大地提高了实验室工作流程和生产率。

技术 | TRIOS软件

TA仪器最新软件包采用尖端技术对热分析和流变进行仪器控制、数据采集和数据分析。您可通过直观的用户界面进行简单高效的实验编程操作，并在处理实验与查看和分析数据之间轻松切换。



TRIOS功能：

- 通过一台PC和软件包控制多台仪器
- 叠加并比较各种技术（包括TMA、DMA、DSC、TGA、SDT和流变仪）的结果
- 无限制的许可证和终身免费软件升级
- 一键分析，可提高生产率
- 自动生成自定义报告，包括：实验细节、数据图表和分析结果
- 可轻松将数据导出为纯文本、PDF、CSV、XML、Excel®、Word®、PowerPoint®和图片格式
- 可选TRIOS Guardian功能，具有电子签名，用于审计追踪和保证数据完整性

简单易用

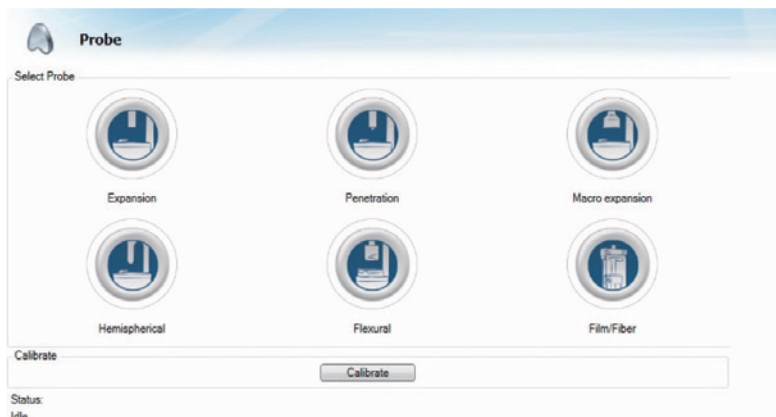
借助TRIOS软件，TMA 450的校准和操作变得简单方便。用户可以在不同的实验条件（例如，不同的升温速率或气体选择）下轻松生成多个校准数据集，并在各个数据集之间无缝切换以匹配样品测试所采用的实验条件。用户可以轻松获得实时信号和运行实验的进度，此外该软件还增加了实时修改运行方法的功能。TRIOS软件的灵活性业内无可比肩。

完整的数据记录

高级数据采集系统自动保存所有相关信号、有效校准和系统设置。这些全面的信息对方法开发、程序设置和数据验证非常重要。

快速简单的校准

借助TRIOS软件，可轻松校准样品夹具/探头和TMA 450。触摸屏和TRIOS软件都提供了清晰明了的指令，指导操作人员完成简单的校准步骤并在最后输出总结报告。该报告一目了然的提供校准状态，并与每个数据文件一起存储，以确保数据完整性。



功能全面的 控制和分析软件 覆盖整个工作流程

完整的数据分析功能

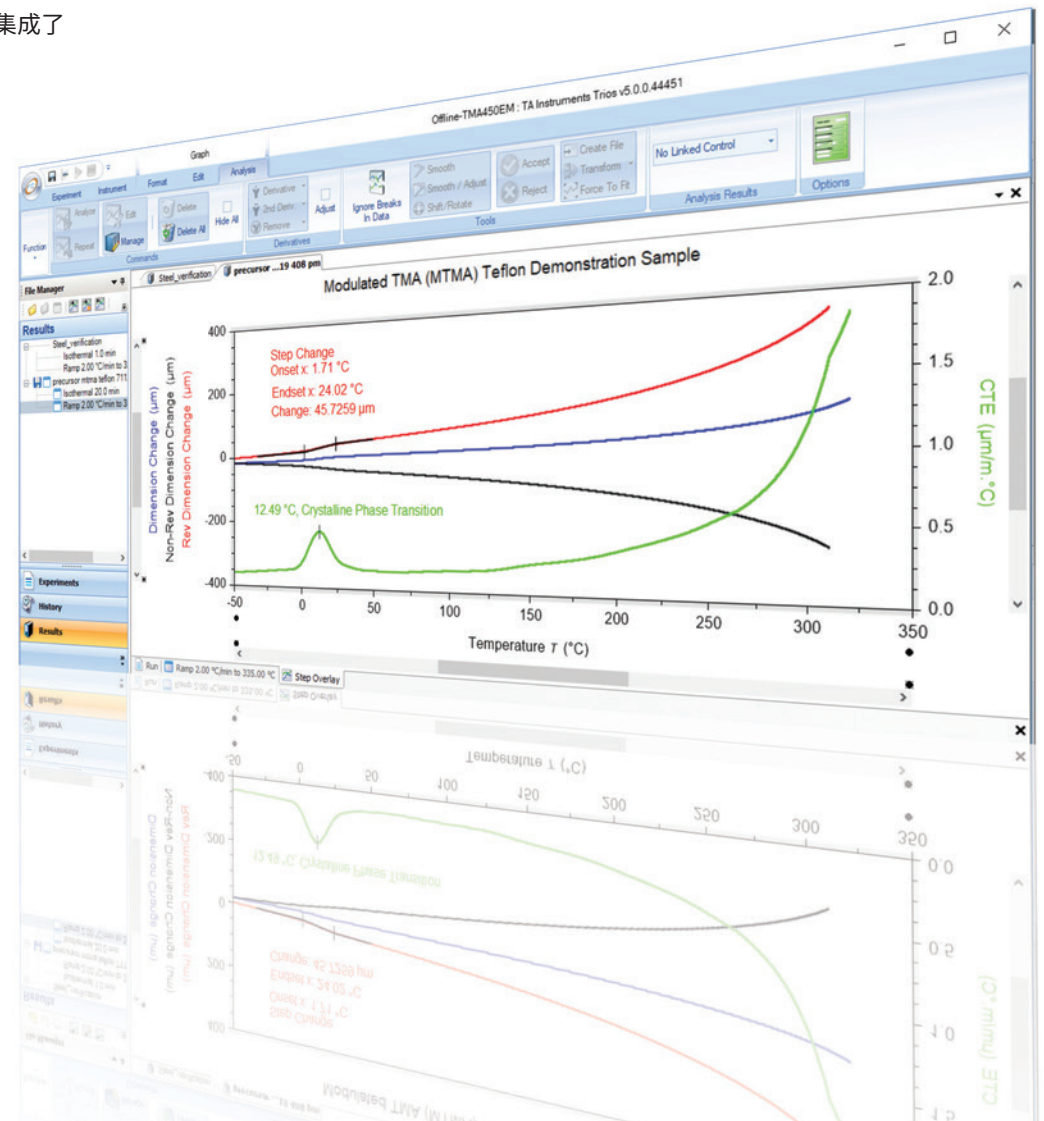
即使在实验过程中，也可以使用全套相关工具进行实时数据分析。TRIOS中无缝集成了一套强大且全面的功能，可针对材料特性得出有价值的结论。

标准SA分析：

- X1的 α (CTE)
- X1到X2的 α (CTE)
- X1到X2拟合的 α (CTE)
- 外推始点和外推终点分析
- 尺寸变化（绝对值和百分比）
- 阶跃转变
- 特定X或Y点处的曲线值
- 1阶和2阶导数
- 数学拟合：直线、多项式或指数
- 应力和应变曲线

TMA 450EM的高级分析功能：

- 采用动态TMA进行储能模量、损耗模量及 $\tan \delta$ 峰值分析
- 使用调制TMA™ (MTMA™) 对总尺寸变化信号进行傅里叶变换，得到可逆和不可逆尺寸变化信号，以便将膨胀与收缩或应力松弛进行分离



理论 | DISCOVERY TMA

热机械分析（TMA）测量材料在受控的力、气氛、时间和温度条件下的尺寸变化。在TMA的典型操作中，将具有平行且平整表面的样品放置于石英样品台上，将热电偶置于附近。施加恒定的力，将石英探头与试样保持接触。当样品加热或冷却时，通过检测石英探头的运动来测量尺寸的变化。

Discovery TMA 450符合并超过行业测试标准*，可提供有关材料线性热膨胀系数（CTE）、收缩、软化、玻璃化转变温度和热变形等信息。

高级测试扩展了Discovery TMA 450的功能，使科学家和工程师能够从其数据及仪器投资中获得最大的收益。

标准测试包括：

- 温度斜坡
- 力斜坡
- 恒应变
- 自定义编辑程序

高级测试（增强模式-EM）包括：

- 应力斜坡
- 应变斜坡
- 蠕变
- 应力松弛
- 调制TMA™（MTMA™）
- 动态温度斜坡（调制力）
- 手动（高级测试类型的组合）

*ASTM E831、E1545、D696、D3386和ISO 11359: 第1-3部分



功能强大的 的TMA

TMA对于理解必须共同发挥作用的材料之间的相容性至关重要。包括：

- 涂料及其基板
- 层压板的邻接层
- 树脂或弹性体及其增强材料或填料
- 密封剂或封装材料及其体系

TMA有助于确定材料在恶劣环境和极端温度下的适用性。包括：

- 制动衬片
- 汽车垫圈
- 蠕变
- 窗户密封件
- 焊点
- 粘合剂
- 防护涂料

TMA可测量的典型特性和行为包括：

- 线性热膨胀
- 热膨胀系数 (CTE)
- 相转变温度
- 玻璃化转变温度
- 收缩
- 软化点
- 体积膨胀
- 分层
- 残余固化反应
- 应力
- 分解温度

高级TMA测试可提供：

- 储能和损耗模量 (E' , E'')
- 阻尼特性 ($\tan \delta$)
- 松弛特性
- 蠕变和恢复
- 应力松弛
- 应力-应变曲线
- 收缩力
- 分离同时发生膨胀和收缩



DISCOVERY TMA | 标准TMA应用

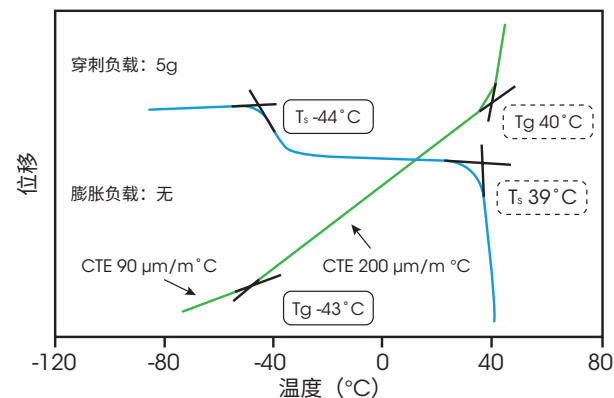
标准测试模式

TMA测量材料在受控的力、气氛、时间和温度条件下的尺寸变化。使用专门设计的探头，可以在压缩、弯曲或拉伸变形模式下施加力。TMA测量材料的固有特性（例如：膨胀系数、玻璃化转变、杨氏模量），以及加工/产品性能参数（例如：软化点）。

这些测量适用性广泛，使用Discovery TMA 450或TMA 450EM均可执行。TMA 450具有一套标准测试功能（温度斜坡、力斜坡和恒应变），而TMA 450EM还提供应力/应变、蠕变、应力松弛、动态TMA和调制TMA™等功能。

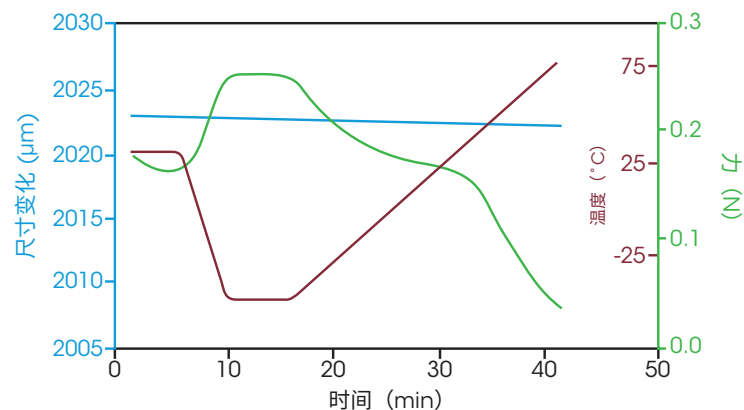
固有特性和产品属性测量

该图显示了在恒定力下线性升温，对合成橡胶分别采用膨胀和穿刺探头进行T_g和软化点的测量。膨胀图中的大幅CTE变化表明了转变温度。在穿刺测量中，通过探头针入样品中的明显偏移来检测相转变。



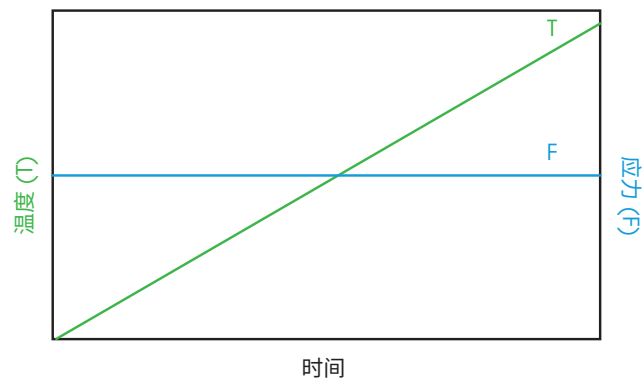
收缩力测试

该图所示为食品包装薄膜在拉伸模式下的典型收缩力（恒应变）实验。将薄膜在室温下拉伸至20%的应变并保持5分钟，然后冷却至-50°C并保持5分钟以上，再以5°C/min的速率升温至75°C。该图显示了维持薄膜在设定应变下所需力的变化（收缩力）。该测试模拟薄膜从冰箱到微波炉的使用过程。



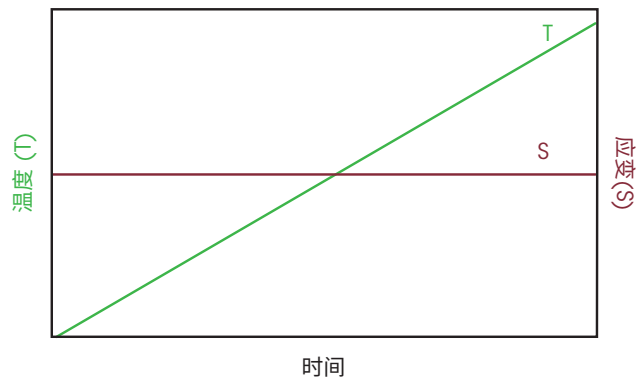
温度斜坡 | 监测位移或应变

力保持恒定，监测线性变温时位移的变化，提供固有特性测量。



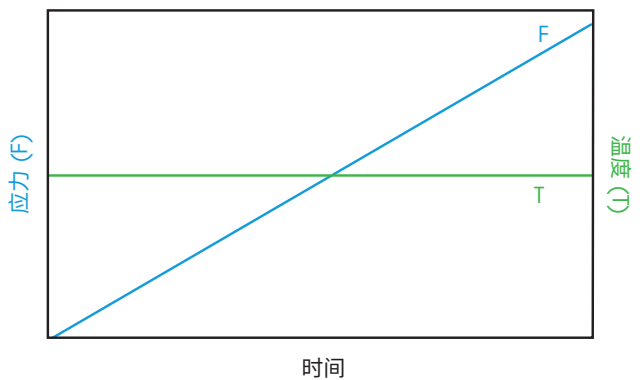
恒应变 | 监测力

应变保持恒定，监测线性变温时维持设定应变所需的力的变化。可用于评估薄膜/纤维等材料的收缩力。



力斜坡 | 监测位移或应变

在恒定温度下，监测力线性变化时所得应变的变化，生成力/位移关系图谱并进行模量评估。



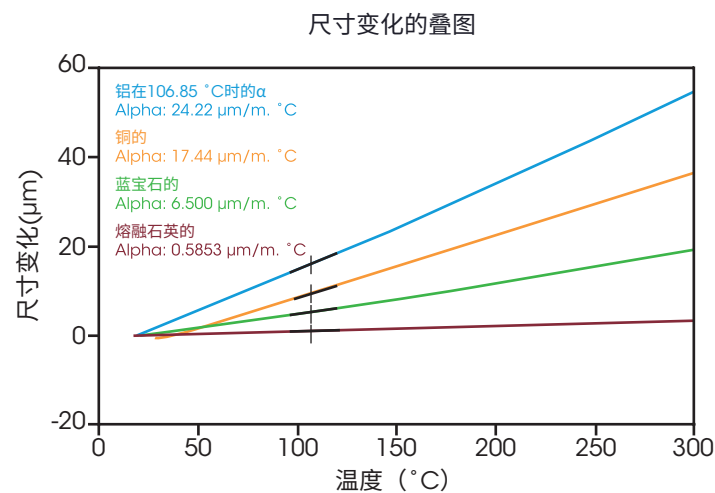
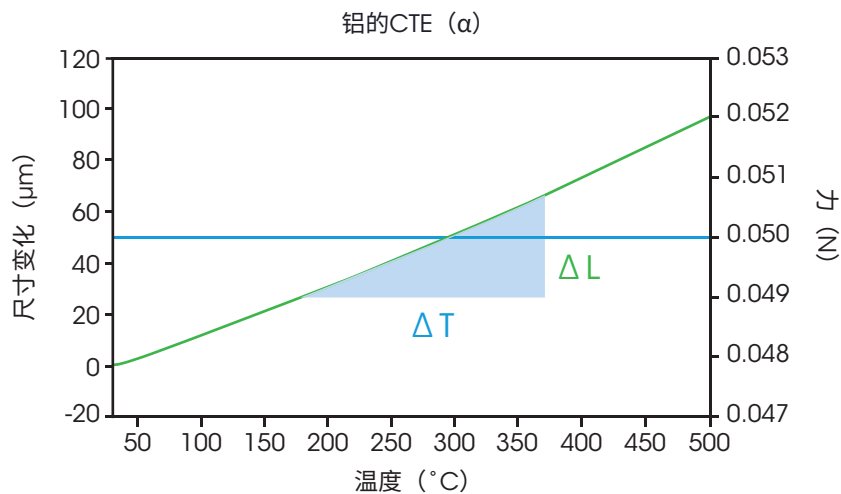
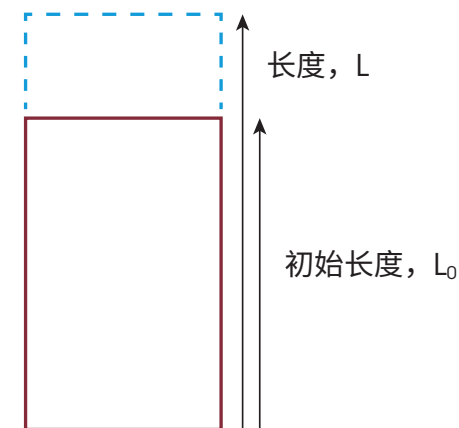
DISCOVERY TMA | 标准TMA应用

热膨胀系数

TMA测量的最常见特性是热膨胀系数（CTE），该测量依据国际标准ASTM E831、D969、D3380和ISO 11359第1-3部分。CTE描述了材料在不同温度下的膨胀或收缩。它是材料的重要特性，忽略温度对材料物理尺寸的影响可能会导致产品失效和分层。平均热膨胀系数（CTE）按如下公式计算：

$$\alpha = \frac{1}{L_0} \frac{\Delta L}{\Delta T}$$

其中 α 是平均热膨胀系数， ΔL 是样品在指定温度范围内的尺寸变化（mm）， L_0 是样品初始长度（mm）， ΔT 是测试的温度范围（ $^{\circ}\text{C}$ ）。材料的CTE与温度有关， α 是特定温度范围内的报告平均值。



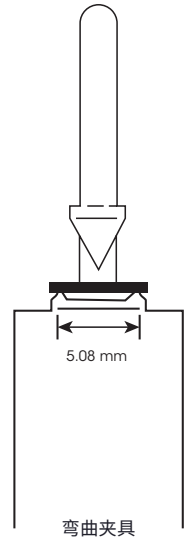
三点弯曲测试变形温度

热变形温度 (HDT) 和载荷下变形温度 (DTUL) 都是反映材料在承受三点弯曲载荷下变形达到预定值时的温度。施加到样品上的力和所需达到的变形量取决于样品的几何形状。

ASTM标准E2092和相关标准D648将DTUL定义为在特定应力 (455或1820kPa) 下发生精确应变 (0.25mm形变或0.20%应变, 由程序中的样品尺寸确定) 的温度。通过TMA, 可以使用以下公式确定实现设定应力所需的载荷 (力)。

$$F = \frac{2}{3} \frac{Sbd^2}{L}$$

其中F为力 (N), S为应力 (0.455MPa [66psi]或1.82MPa [264psi]), b为样品宽度 (mm), d为样品厚度 (mm), L为样品长度 (由弯曲夹具限定为5.08mm)。



由试样的形变随温度变化的曲线, 可观察到达到预定应变水平时的温度。使用下面方程计算形变量或尺寸变化量。

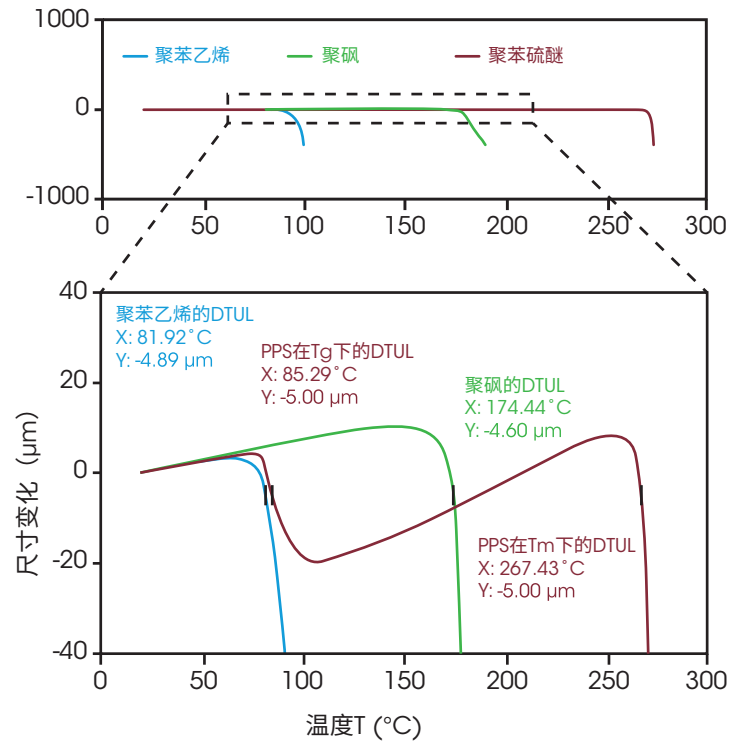
$$D = \frac{rL^2}{6d}$$

其中D是TMA在跨距中心位置的尺寸变化 (mm), r是样品应变 (0.0020或0.20%)

使用Discovery TMA 450可以轻松执行载荷下变形温度 (DTUL) 测试。使用三点弯曲夹具, 采用0.455 MPa (666psi) 载荷、0.2%应变和2°C/min升温速率的条件测试聚苯乙烯、聚砜和聚苯硫醚。这些材料的DTUL测试可区分它们在高温下承受载荷的能力, 并确定其失去刚性的温度。通过相容性树脂改性及纤维增强可以提高材料的变形温度。使用Discovery TMA 450可针对小样品快速执行DTUL测试。

在0.455Mpa应力、0.2%应变和2°C/min升温速率条件下, 计算得出的施加力和跨距中心位置的尺寸变化值。

样品	样品宽度 (b) x 厚度 (d) x 长度 (L) (mm)	计算得出的力 F (N)	跨距中心位置的尺寸变化, D (μm)
聚苯乙烯	2.33x1.76x5.08	0.431	4.89
聚砜	2.30x1.87x5.08	0.480	4.60
聚苯硫醚	2.36x1.72x5.08	0.417	5.00



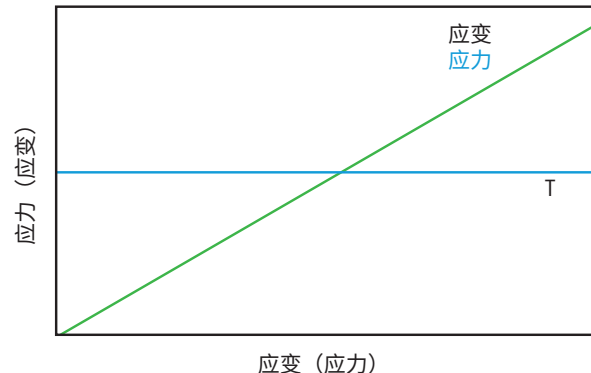
DISCOVERY TMA | 高级测试与应用

高级测试模式

高级测试功能包括：TA仪器业界领先的调制TMA™，能够更有效地分离材料中同时发生的膨胀和收缩；动态TMA，通过固定频率下的小振幅正弦变形测定黏弹特性；蠕变/应力松弛，可在瞬态条件下测量黏弹特性。这些高级选项使系统功能得到进一步的扩展和增强，为科学家和工程师提供更有价值的材料力学特性信息。

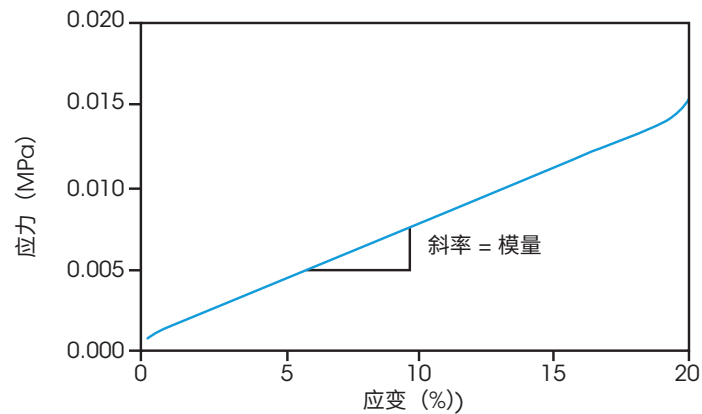
应力/应变测试

在恒定温度下应力或应变呈线性变化，测量相应的应变或应力的响应。使用客户输入的样品几何因子，测试数据可提供应力/变图谱和相关的模量信息。此外，计算的模量可以显示为应力、应变、温度或时间的函数。



薄膜拉伸测试

右图是聚合物薄膜采用拉伸夹具在恒定温度下的应变斜坡实验。该图显示在很大范围内应力和应变是线性相关的，在该区域上可直接确定拉伸模量。所得模量数据也可以绘制为应力、应变、时间或温度的函数。结果表明，TMA 450EM能够用作薄膜和纤维的小型拉伸试验机。



蠕变和应力松弛

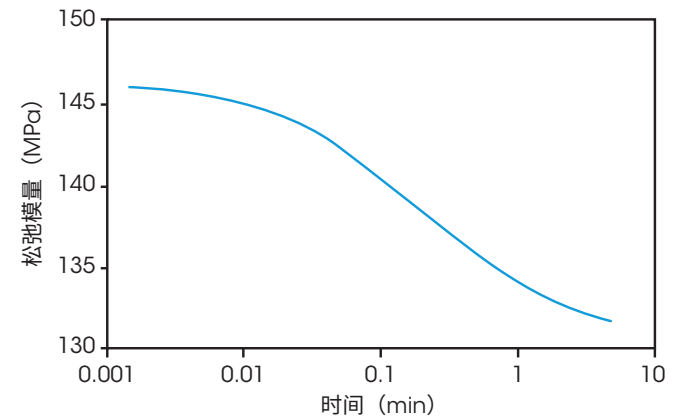
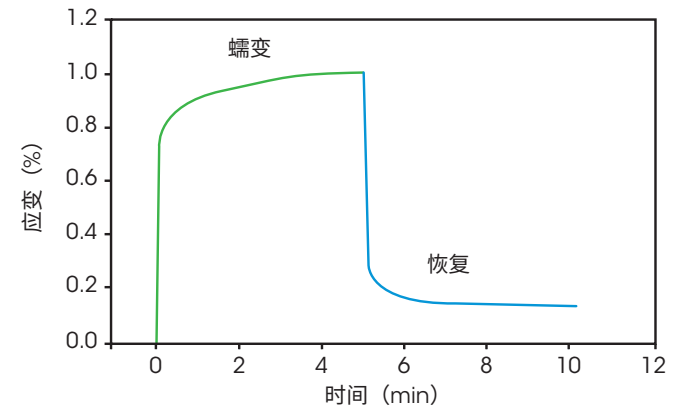
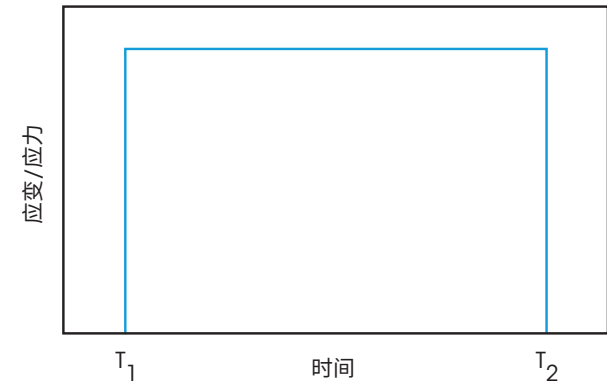
TMA还可以使用瞬态测试（蠕变或应力松弛）测量黏弹特性。在蠕变实验中，输入的应力保持恒定，监测应变随时间的变化。在应力松弛实验中，输入的应变保持恒定，监测应力衰减随时间的变化。数据也可以以柔量（蠕变测试）和应力松弛模量（应力松弛测试）为单位进行显示。

蠕变分析

当预期发生应力变化时，蠕变测试对于材料选型极具价值。该示例为聚乙烯薄膜在室温下采用拉伸夹具的蠕变研究。它显示了在设定应力下材料的瞬时变形、迟滞和线性应变响应，以及零应力下随时间的恢复情况。测试数据也可以绘制为柔量，及恢复柔量与时间的关系。

应力松弛分析

该图为上一示例中用于蠕变研究的同一聚烯烃薄膜的拉伸应力松弛测试。将已知的应变施加到薄膜上并保持不变，同时监测其应力变化。该图显示了应力松弛模量的典型衰减过程。此测试还可帮助工程师在预知形变时为最终用途设计材料。



DISCOVERY TMA | 高级测试与应用

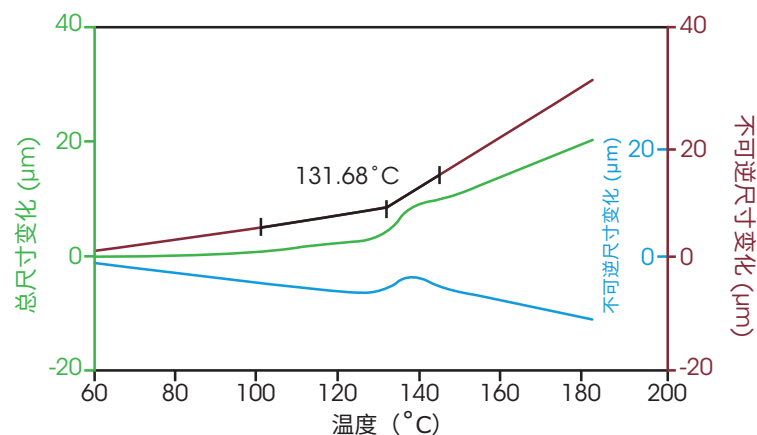
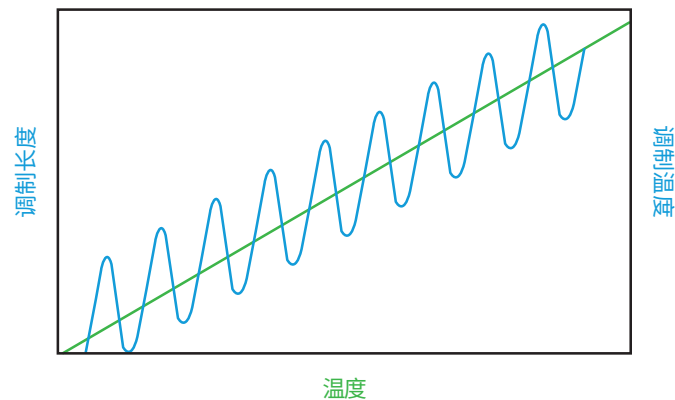
调制TMA™ (MTMA™)

TA仪器业界领先的调制TMA™能够有效分离材料中同时发生的膨胀和收缩。通过总尺寸变化的傅里叶变换，可以轻松解析与应力松弛发生在同一温度范围的玻璃化转变等现象。在调制TMA™中，样品受叠加在传统线性变温上的正弦振荡温度程序的共同影响。输出信号（原始数据傅里叶变换后）是总位移和热膨胀系数的变化。调制TMA™将总位移分为可逆和不可逆尺寸变化信号。可逆信号包含可归因于尺寸变化的现象，对于检测这些现象非常有帮助，如T_g。不可逆信号包含与时间相关的动力学过程（如应力松弛）相关的现象。该技术是TA仪器Discovery TMA 450EM所独有的。

分离重叠转变 – 调制TMA™

右图为采用MTMA™确定印刷电路板（PCB）的T_g的研究。绘制的信号是总尺寸变化，及其可逆和不可逆分量。总信号与标准TMA的信号相同，但不能明确地确定T_g。通过可逆信号可清晰地将T_g与PCB加工条件所引起的应力松弛现象分开。

调制TMA™ (MTMA™)



动态TMA测试

在动态TMA (DTMA) 中, 对样品施加正弦变化的力和线性温度程序 (图A), 可测得正弦应变和正弦波相位差 (δ) (图B)。根据该数据, 计算储能模量 (E')、损耗模量 (E'') 和 $\tan \delta$ (E''/E') 与温度、时间或应力的函数关系 (图C)。动态TMA能够帮助科学家或工程师掌握材料的黏弹特性。

动态TMA测试

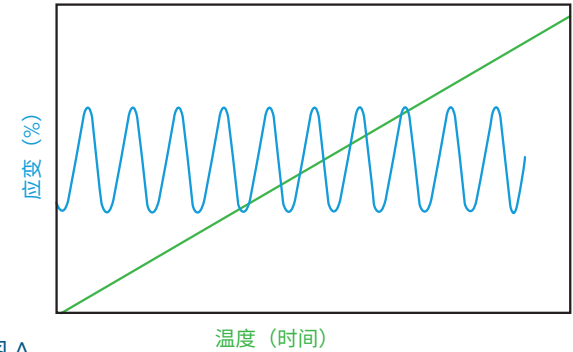


图 A

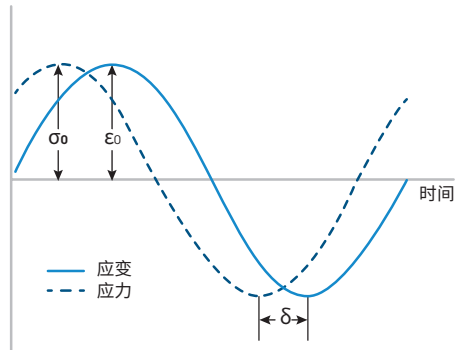


图 B

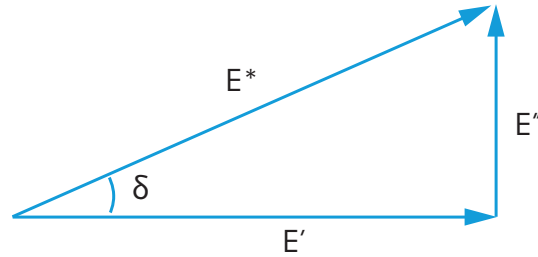
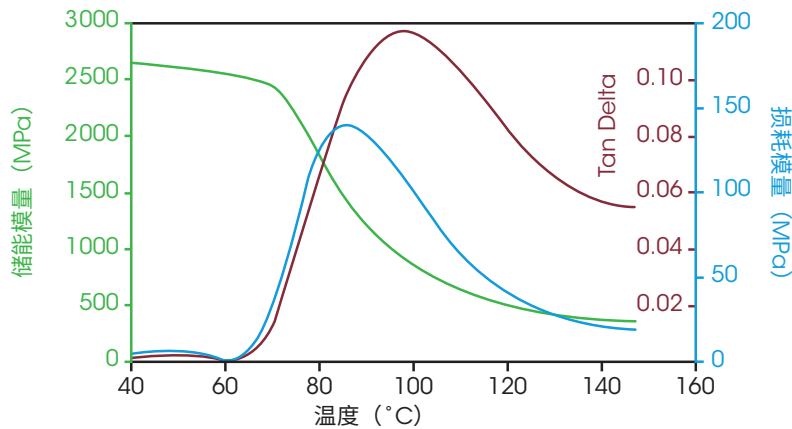


图 C

ϵ_0	应变振幅
σ_0	应力振幅
δ	相位角
$E^* = \sigma_0 / \epsilon_0$	复数模量 总抗变形能力
$E' = E^* \cos \delta$	储能模量 弹性、固体阻力
$E'' = E^* \sin \delta$	损耗模量 黏性阻力、阻尼
$\tan \delta = E'' / E'$	阻尼因子 阻尼与弹性阻力的比值



黏弹特性测试 - 动态TMA

该图为半结晶聚对苯二甲酸乙二醇酯 (PET) 薄膜采用拉伸夹具的动态测试结果, 在线性升温过程中施加固定的正弦变化力。得到的应变和相位角数据用于计算材料的黏弹特性 (如 E' , E'' 和 $\tan \delta$)。数据显示当薄膜温度加热到玻璃化转变温度时模量发生了显著的变化。

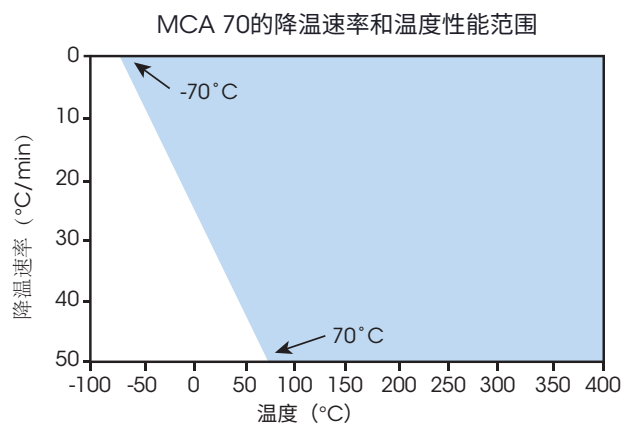
附件 | 机械制冷系统

利用便捷的机械制冷附件MCA 70，可在广泛的温度范围内实现无人值守的TMA和调制TMA™（MTMA™）操作。MCA 70是循环加热/冷却实验的理想选择，材料制造商越来越多地使用它测试材料在实际使用条件下的性能。

温度循环测试（TCT）可确定零件承受极低和极高温以及周期性暴露于这些极端环境的能力。周期性热机械负载引起的力学失效称为疲劳，温度循环本质上会加快疲劳失效的出现。MCA 70使研究材料对温度极端变化的响应达到前所未有的简单程度。

MCA 70的特点和优势：

- 双级制冷系统，可提供-70°C到400°C的温度范围
- 密封系统无需液氮冷却
- 支持循环、调制TMA™、控制降温和骤降实验
- 安全、方便、连续冷却操作，充分满足实验室需求



*在惰性氮气环境中获得

*性能可能略有不同，具体取决于实验室条件



技术参数	Discovery TMA 450EM	Discovery TMA 450
温度范围 (最大)	-150至1000 °C	-150至1000 °C
温度精确度	± 1 °C	± 1 °C
升温速率	0.01至200 °C/min	0.01至200 °C/min
加热炉冷却时间 (空气冷却)	从600 °C冷却至50 °C小于10分钟	从600 °C冷却至50 °C小于10分钟
最大样品尺寸-固体	26mm (长)x10 mm (直径)	26mm (长) x 10mm (直径)
最大样品尺寸-薄膜/纤维		
静态操作	26mm (长) x1.0mm (厚) x 4.7mm (宽)	26mm (长) x1.0 mm (厚) x4.7mm (宽)
动态操作	26mm (长) x0.35mm (厚) x 4.7mm (宽)	
测量精度	±0.1%	± 0.1%
灵敏度	15nm	15nm
位移分辨率	<0.5nm	<0.5nm
动态基线漂移	<1µm (-100至500 °C)	<1µm (-100至500 °C)
施力范围	0.001至2N	0.001至2 N
频率范围	0.01至2Hz	
双气路气体输送模块	•	•
气体环境 (静态或控制流量)	氩气、氦气、氮气和空气	氩气、氦气、氮气和空气

测试模式	TMA 450EM	TMA 450
标准 (温度斜坡、力斜坡、恒应变)	•	•
应力/应变	•	○
蠕变	•	○
应力松弛	•	○
动态TMA (DTMA)	•	○
调制TMA™ (MTMA™)	•	○

• 标准功能

○ 可选升级功能

可控速率	温度下限
50 °C/min	70 °C
20 °C/min	-15 °C
10 °C/min	-40 °C
5 °C/min	-55 °C
2 °C/min	-65 °C

MCA 70可控降温速率, 从400 °C (上限) 开始

*性能可能略有不同, 具体取决于实验室条件

独
一
无二
的
5
年
质
保

50余年来，TA仪器始终致力于热分析技术，同时也是
目前唯一一家为TMA加热炉提供5年质保的公司。



扫描二维码关注
TA仪器微信公众号

© 2025 TA Instruments. 版本号: 202501
TA仪器保留所有版权和解释权。若有修改, 恕不另行通知。

沃特世-TA仪器

上海市浦东新区东育路255弄5号前滩世贸中心一期B座23楼01单元

咨询热线: 800 (400) 820 2676转6号线

联络邮箱: TA_China@waters.com (主机附件询价及市场活动)

TACHina_Application@waters.com (应用技术支持)

TACHina_Service@waters.com (售后服务及配件询价)

TACHina_CG@waters.com (耗材询价)

TACHinaOrder_Logistics@waters.com (订单查询)

官方网址: www.tainstruments.com.cn