

# 在低温下对小尺度丁苯橡胶进行纳米压痕的动态力学分析

## 引言

丁苯橡胶 (SBR) 是一种合成橡胶聚合物，旨在取代天然橡胶。SBR 因其弹性性能和耐磨特性而广泛应用于轮胎、粘合剂、电池、扬声器和建筑材料中。

本次研究，利用 KLA 高精度纳米压痕仪的 DMA 功能，在低温条件下对 SBR 橡胶的储存模量进行分析。

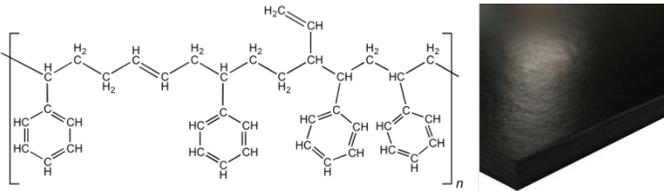


图 1. 丁苯橡胶 (SBR) 的化学公式。

## 实验方法

配备载荷分辨率小于 1nN 的 InForce 50 加载器和 50 $\mu$ m 直径的平压头的 KLA 纳米压痕，对安装在制冷样品台的 SBR 进行 DMA 测试，样品可冷却到 -60 $^{\circ}$ C 以下，整个变温过程由 PID 控制，加热和冷却同步工作，整个测试中，制冷样品台的外壳始终维持在室温。惰性气体充满样品腔室，以减轻其与大气的化学反应，并防止在样品表面结霜。

## KLA DMA 测试技术

ProbeDMA<sup>TM</sup> 是一种动态纳米压痕测量技术，用于测量不同频率下的材料的粘弹性。ProbeDMA 可在样品表面的特定区域定量的进行动态特性的测量。此外，相较于传统 DMA 机台，ProbeDMA 更可精确的测试聚合物涂层和薄膜。ProbeDMA 测试流程如图 3 所示。

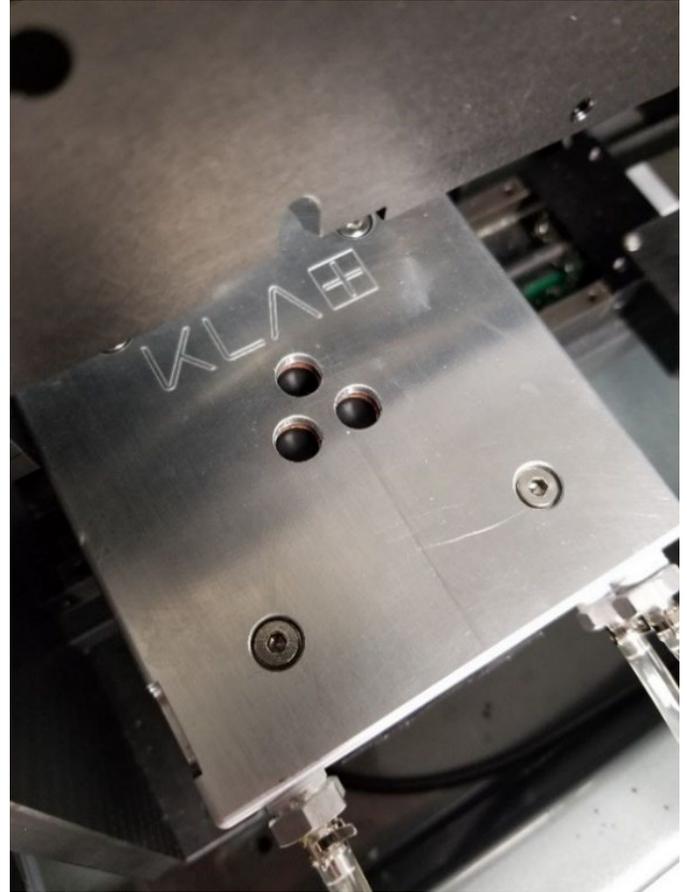


图 2. KLA 纳米压痕冷室。

ProbeDMA 在所有 KLA 纳米压痕上都可用，且可以与各种平压头配合使用。KLA 可在各个压痕型号上提供从 -60 $^{\circ}$ C 到 800 $^{\circ}$ C 的变温样品台。该控温范围可确保在各种材料上进行变温实验和蠕变实验。

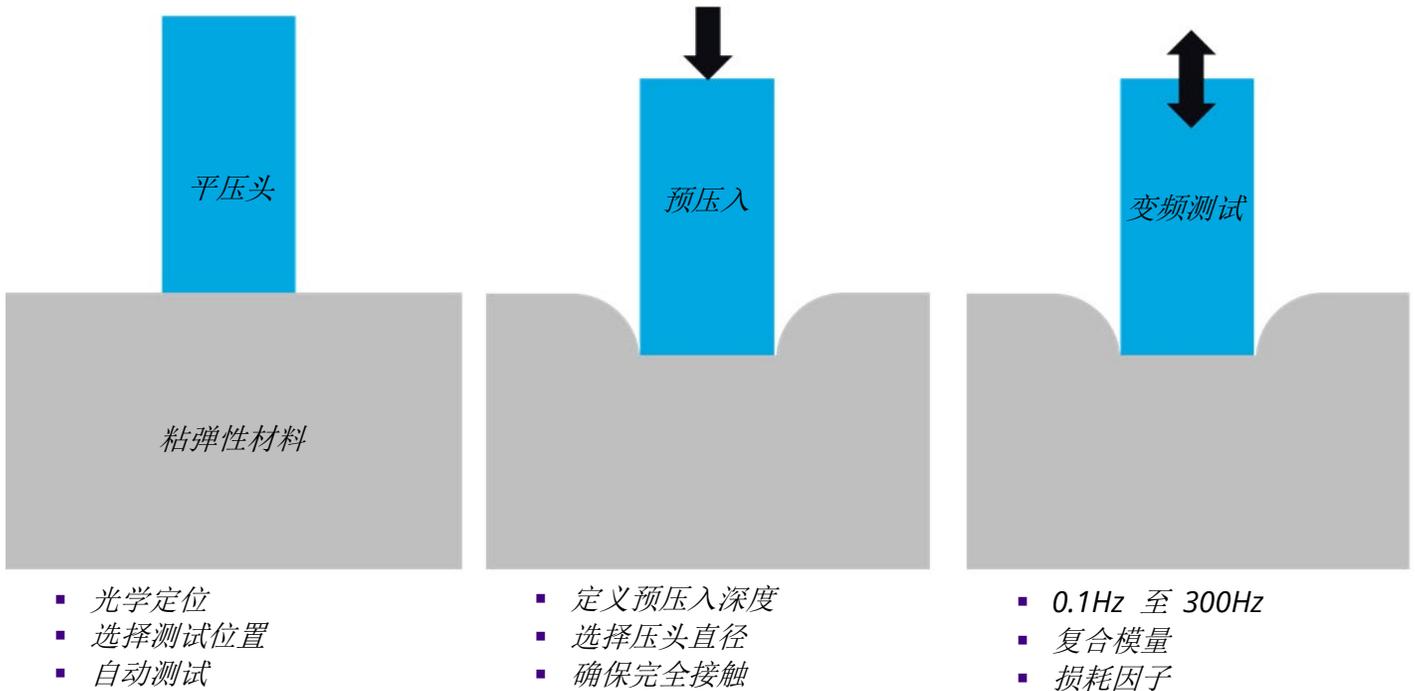


图 3. ProbeDMA 测试流程：直径已知的平压头在粘弹性材料表面上压入指定深度，然后压头在不同频率下振动，测得相应的动态力学响应

### 结果和总结

丁苯橡胶（SBR）的随温度变化和频率变化的储存模量的对数-对数结果如图 4 所示。三个测试温度分别为室温、-28.5°C 和 -66.0°C，在三个温度下分别从 1Hz 测到 200Hz。随着温度降低，储存模量显著增加，1Hz 21.0°C 时为 80MPa，而 1Hz -66°C 时为 1600MPa。变温条件下储存模量明显的变化，凸显了在 DMA 测试中变温附件的重要性。

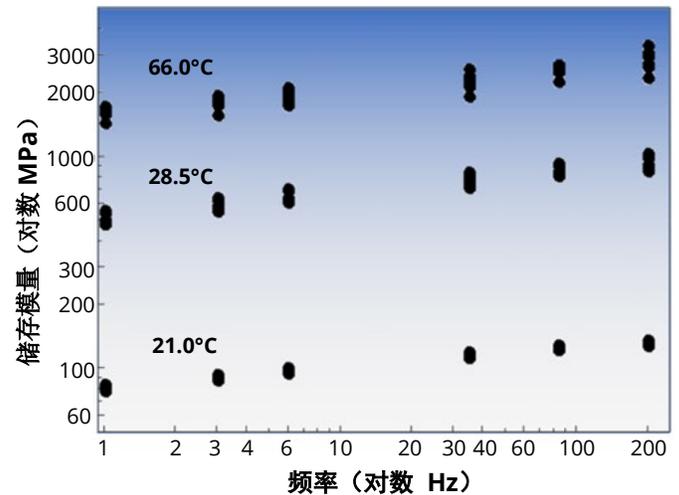


图 4. 丁苯橡胶的储存模量随温度和频率变化