文章编号：1001-4888(2020)02-225-09

# 基于同步辐射原位CT的聚氨酯泡沫微观变形机理研究*

柴海伟[1]，李海洋[2]，范端[1]，黄俊宇[1]

（1.顶峰多尺度科学研究所，四川成都 630031；2.教育部先进材料与技术重点实验室，西南交通大学，四川成都 630031）

**摘要：** 为揭示聚氨酯泡沫的微观结构性能关系，本文依靠自主研发的微型材料试验机，在美国APS光源2BM线站上搭建了原位CT系统，对闭孔硬质聚氨酯泡沫在准静态压缩加载下的变形损伤行为进行了三维实时表征，分辨率可达0.87μm。通过原位CT试验获取了硬质聚氨酯泡沫的应力应变关系，以及三个变形阶段（弹性、平台、压实）的三维结构演化过程。三维图像显示，在平台段会观察到局部压缩带从样品两端向中间传播的过程，且压缩带传播速度会超过压头速度。同时，利用数字体图像相关技术精确计算了聚氨酯泡沫的三维变形场，表明压缩变形主要集中在变形带内部。通过追踪胞元变形过程并利用表面曲率场来量化胞壁变形，发现胞元坍塌主要源于包壁屈曲形成的褶皱。

**关键词：** 硬质聚氨酯泡沫；闭孔泡沫；原位CT；数字体图像相关

**中图分类号：** O341 **文献标识码：** A DOI：10.7520/1001-4888-18-263

## 0 引言

硬质聚氨酯泡沫塑料作为常用的结构和包装材料，已被广泛应用于缓冲吸能[1-3]、隔音隔热[4,5]和工业夹层[4]等领域。泡沫材料的力学性能与其微结构（如胞元尺寸、形状等）密切相关[6-9]，目前工艺上已经可以通过改变孔隙度和胞元形貌来制备具有特定力学性能的泡沫材料。因此研究泡沫材料的结构性能关系进而反馈材料和结构设计具有重要意义。

泡沫材料（包括聚氨酯泡沫）在不同加载条件下的宏观力学性能已经受到广泛关注[2,6,10]，并发展出了很多有用的经验模型，如Gibson和Ashby提出的平方指数型应力－密度关系[6]。然而对于真实的三维泡沫，该模型中的指数并不总是2.0[7]，而是会随微观结构的变化而不同。此外，相对密度是该模型中描述微观结构的唯一参数，这对泡沫的复杂三维结构远远不够。由于缺乏可靠的高分辨三维表征手段，类似聚氨酯泡沫这种小孔（几到几百μm）薄壁（小于10μm）型泡沫材料微观结构性能关系的研究还很少见到报道。随着同步辐射光源的高速发展，人们开发出了原位CT技术来实时表征泡沫材料三维结构的演化过程[9,11-13]。国际上Patterson等人借助美国APS光源系统研究了软质泡沫塑料的原位压缩行为[9]，但对胞元微观变形过程的量化表征却很少涉及。国内胡小方课题组借助北京光源研究了泡沫铝的原位压缩行为[12]，并发展了数字体图像相关（DVC）技术[13,14]。但试验中无法同时获取试样的应力应变曲线；而且受限于光源品质，图像分辨率较低（10.9μm），对一般闭孔硬质聚氨酯泡沫的胞壁

* **收稿日期：** 2018-12-03；**修回日期：** 2019-01-17

**基金项目：** 国家自然科学基金（No.11802252）资助

**通讯作者：** 黄俊宇（1989－），男，博士，副研究员。主要研究领域：软物质的冲击响应和X射线诊断。

Email：jyhuang@pims.ac.cn

(1～8μm)很难分辨。因此,引起胞元局部坍塌的微观机理还有待研究。

本文基于自主研发的微型材料试验机,在美国第三代同步辐射 APS 光源 2BM 线站上搭建了原位 CT 系统。在对一种闭孔硬质聚氨酯泡沫以 $0.001s^{-1}$ 的应变率进行准静态压缩的同时,利用高分辨(分辨率 0.87μm)原位 CT 技术对样品的三维结构进行实时表征,借助一些数学工具讨论了其微观结构性能关系。

## 1 试验方法

### 1.1 原位 CT 系统

我们基于美国阿贡国家实验室下辖的 APS 光源和自主研发的微型材料试验机搭建了原位 CT 系统。试验材料为一种商用闭孔硬质聚氨酯泡沫,孔径为 300μm 左右,试验试样通过高精度激光切割机加工制作,尺寸为 2.5mm×2.5mm×2.4mm(加载方向为 2.4mm)。微型材料试验机和原位 CT 系统的示意图和实物图如图 1 所示。试验机呈立式安装在 CT 转台上,高精度步进电机位于试验机顶端,驱动丝杆上下运动并带动上夹头来施加载荷,位移精度可达 8nm,通过设计不同的夹具可以实现对试样的拉压加载。力传感器位于下夹头内,测量范围为±500N,精度可达 0.1N。位移信号与力信号均通过数据采集卡接入计算机并记录,以此为基础则可得到试样加载过程中的应力应变曲线。压头采用弹性模量极大的钨钢合金制作,确保加载样品时装置内部零件的变形最小。试验机上下两个部分通过一个镂空环形聚碳酸酯(polycarbonate, PC)塑料窗口连接。PC 窗口在跟样品同一高度处保持完整,确保在 CT 扫描中 X 射线由任意角度透射样品时,PC 塑料带来的衰减一致,避免了支撑物不均匀遮挡带来的 CT 重建畸变。而窗口上的镂空处则有助于快速而方便地安装和回收样品。

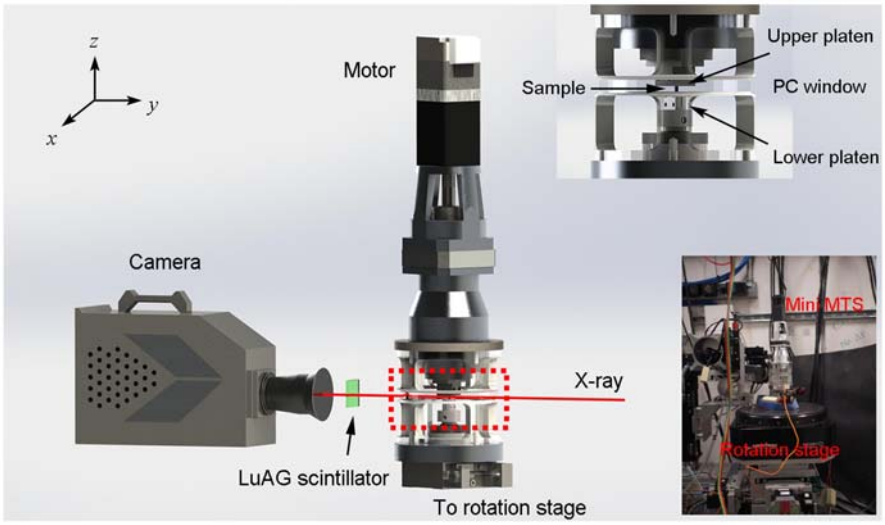



图 1 微型材料试验机和原位 CT 系统示意图:右上插图是加载部分包括样品和聚碳酸酯窗口的放大图,右下插图为 APS 光源 2BM 线站上搭建的原位 CT 系统实物图

Fig. 1 Schematic diagram of the mini-MTS device and in-situ CT system: The inset in the upper right corner is a magnification of the loading part including the sample and the polycarbonate (PC) window; the inset in the lower right corner is a picture of the in-situ CT system implemented in the 2BM, APS source

### 1.2 CT 试验过程

CT 扫描时,入射 X 射线光子能量为 24.9keV, X 射线穿透样品后通过 20μm 厚的 LuAG 闪烁体转变为可见光在 CCD 上成像。样品至闪烁体距离为 60mm,探测 CCD 阵列为 2560pixel×2160pixel,像素尺寸为 0.87μm,视野 2.2mm×1.9mm ($x\times z$)。一次扫描在 180°范围内均匀采集 1500 帧投影图,单帧曝光时间为 100ms。然后通过三维重建程序 TomoPy[15] 将投影图重建为三维图像。由于 $z$ 方向视野小于样品高度,单次扫描的视野无法覆盖样品全貌,因此,我们先扫描样品的下半部分,后保持相机固定,将样品台下移 1.6mm,待样品上半部分全部进入视野后,进行第二次扫描,两次扫描存在约 0.3mm 高

的重叠区间便于数据后处理时拼接两组体数据。由于升降台精度与像素尺寸的误差，直接通过样品台下降距离和像素尺寸预估的拼接位置并不准确。为此，我们通过规范化互相关(normalized cross-correlation，NCC)[16]形式的位移配准函数 $E_{NCC}$来精确定位拼接位置：

$$E_{NCC}=\frac{1}{2}\left\{1-\frac{\sum(I_l-\bar{I}_l)(I_u-\bar{I}_u)}{\sqrt{\sum(I_l-\bar{I}_l)^2(I_u-\bar{I}_u)^2}}\right\} \tag{1}$$

其中，$I_l$ 为下半部分三维图像最顶层的灰度数据；$I_u$ 为上半部分三维图像底部某层的灰度数据；$\bar{I}_l$ 和 $\bar{I}_u$ 分别为 $I_l$ 和 $I_u$ 的均值。$E_{NCC}$越小，两个灰度场的相似程度越高。遍历预估拼接位置上下 50 层切片图，$E_{NCC}$最小处则定做拼接位置。通过 TomoPy[15]重建获取灰度图后，再利用水平集方法[17]精确分割图像中两相，即聚氨酯实体与空腔，获取二值化体图像。

### 1.3　数字体图像相关技术

为了量化分析聚氨酯泡沫的变形过程，我们引入 DVC 技术以获取泡沫变形期间的应变场。将变形前体图像 $I_0$ 划分为大小适中的子集，并尝试找到它在变形后体图像 $I_1$ 中的位置。为确定这个位置，Criminisi 等[16]通过规范化误差平方和(normalized sum of squared differences，NSSD)作为配准函数搜寻变形后图像局部位移，其最小值处既是对应的变形后位置。在试验中，规范化有效地消除了两幅体图像明暗差异的影响，且 NSSD 的计算结果通常与规范化互相关函数(normalized cross-correlation，NCC)一致，而在有噪声且图像衬度低时 NCC 的精度就会下降，可见 NSSD 作为配准函数具有更高的抗噪声干扰能力。NSSD 形式的位移配准函数 $E_{NSSD}(\boldsymbol{u})$定义如下：

$$E_{NSSD}(\boldsymbol{u})=\frac{1}{2}\frac{\sum\{[I_0(\boldsymbol{x})-\bar{I}_0]-[I_1(\boldsymbol{x}+\boldsymbol{u})-\bar{I}_1]\}^2}{\sum[I_0(\boldsymbol{x})-\bar{I}_0]^2+\sum[I_1(\boldsymbol{x}+\boldsymbol{u})-\bar{I}_1]^2} \tag{2}$$

其中，$I_0(\boldsymbol{x})$，$I_1(\boldsymbol{x}+\boldsymbol{u})$分别为变形前后体图像的子集，$\boldsymbol{x}=(x_1,x_2,x_3)$为变形前体图像子集内各像素坐标，$\boldsymbol{u}$为位移矢量，$\bar{I}_0$，$\bar{I}_1$ 为 $I_0(\boldsymbol{x})$，$I_1(\boldsymbol{x}+\boldsymbol{u})$的图像均值。遍历变形后的体图像 $I_1$，令配准函数 $E_{NSSD}$最小的位移 $u$ 即为子集 $I_0(\boldsymbol{x})$中心处的位移。依次获取所有子集的位移，对整幅体图像插值，即获得了变形前后两幅体图像间的位移场，相应地由位移场计算出轴向应变场 $\varepsilon_{zz}$。

采用亚像素级的步长在全图范围内搜索可以获得精度更高的结果，但由于三维图像的数据量较大，直接对全图搜索的方式效率过低。因此我们采用分层运动估计[18,19]的方法加速搜索过程。首先以尺寸为 $m$ 的子集在指定范围 S 内搜索以获得位移 $\boldsymbol{u}^{(1)}$，但用于计算 $E_{NSSD}$时只采用子集内均匀分布的 $(m/2^2)^3$个像素点；将获取的位移 $\boldsymbol{u}^{(1)}$ 作为初始值代入下一层搜索，使用尺寸为$[m/2]$的子集计算 $E_{NSSD}$，在$[S/2]$的范围内搜寻获取位移 $\boldsymbol{u}^{(2)}$；当子集的尺寸达到预先设定的下限 $m_{min}$时不再减小($m_{min}$设定为图像中最小特征的尺寸)，当子集总像素数达到$(m/2^2)^3$ 以下时则采用子集中所有像素点计算，以此类推。迭代至 $E_{NSSD}$收敛至指定阈值为止，则完成了一个子集的位移搜索。至此配准函数 $E_{NSSD}$寻找最小值的计算过程得到了充分加速。

为检验数字体图像相关技术对聚氨酯泡沫是否适用，我们进行了模拟验证。以 CT 采集的初始体图像 $I_0$(图 2(a)左)为基础，对其赋予 $z$方向的非均匀位移场 $v$(图 2(b)左)，双三次插值模拟出变形后的体图像 $I'_0$(图 2(a)右)，位移场 $v$的峰值为实测数据中样品内最大位移距离。然后通过 DVC 技术计算样品的真实位移场(图 2(b)右)，以验证 DVC 技术在应对真实情况下非均匀变形时的可靠性。图 2 展示了三维结构和三维位移场数据在相同位置处的 $xz$平面切片，结果显示 DVC 测量的位移场与标准位移场吻合良好，说明 DVC 技术可用于聚氨酯泡沫骨架变形过程中位移场的测算。

## 2　试验结果与讨论

### 2.1　材料初始表征

图 3 是聚氨酯泡沫的三维图像和一些量化分析。三维图像(图 3(a))显示聚氨酯泡沫是闭孔蜂窝结构，闭孔率高达 97%。胞壁厚度均匀，约为 8μm。胞元棱角分明，为具有 13～15 个面的不规则多面体。Theodorou 等提出了回转张量(gyration tensor) $\boldsymbol{G}$以量化三维空间中不规则颗粒的形状[20]。

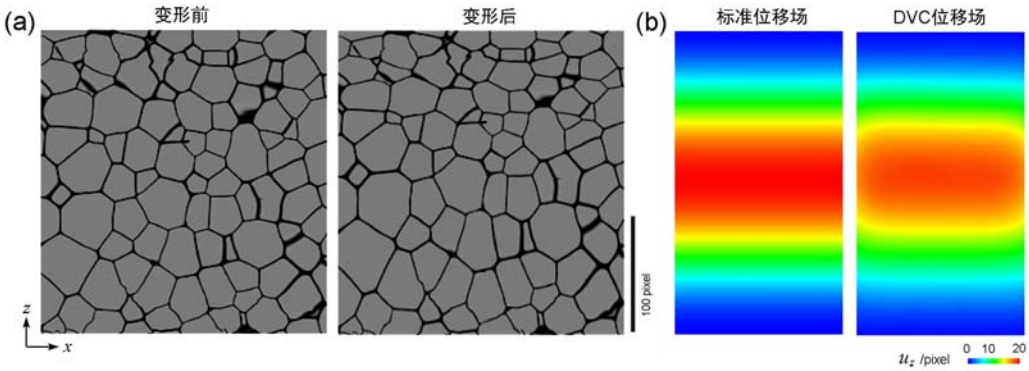



图 2 (a) 变形前和模拟变形后的泡沫切片图;(b) 模拟施加的标准位移场与 DVC 测量的位移场的对比

Fig. 2 (a) Slices of the foam before and after an imposed deformation field; (b) Comparison between the imposed displacement field and the calculated one via DVC

$$G_{\alpha\beta}=\frac{1}{V}\sum_{i=1}^{V}(r_{\alpha i}-r_{\alpha})(r_{\beta i}-r_{\beta}) \tag{3}$$

其中,$G_{\alpha\beta}$为回转张量 $\mathbf{G}$ 的分量($\alpha,\beta=x,y,z$);$V$ 为颗粒总像素体积;$r_{\alpha i}$为第 $i$ 个像素坐标;$r_{\alpha}$ 为颗粒质心坐标。

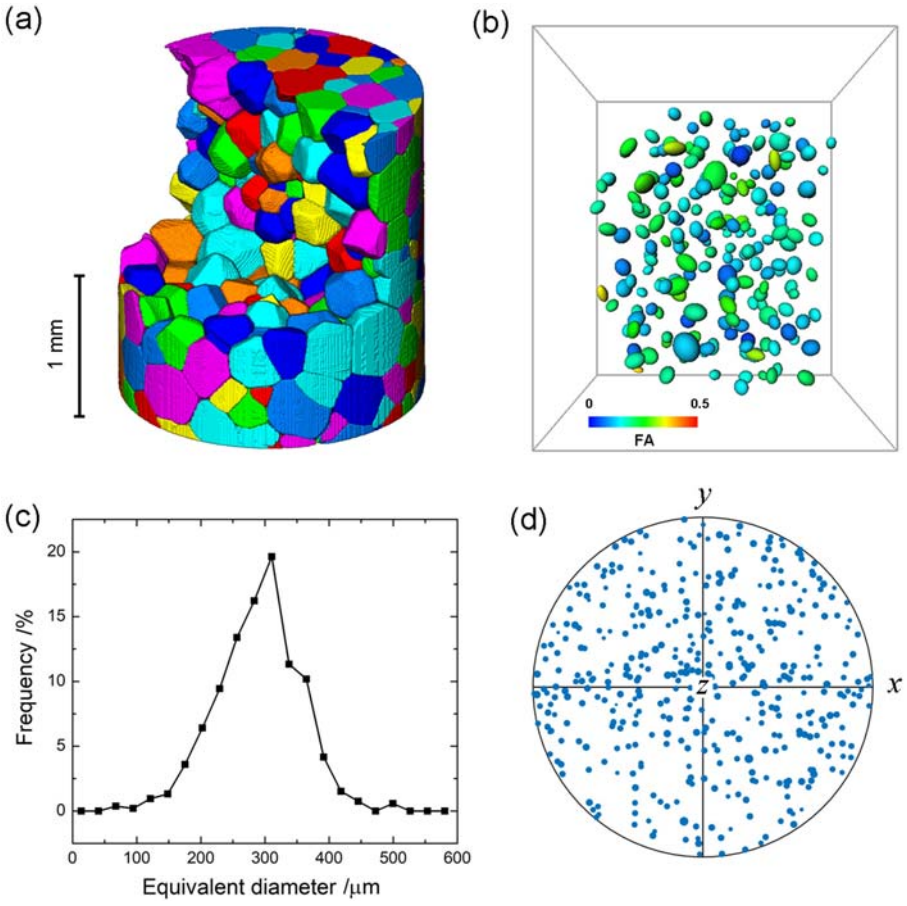



图 3 聚氨酯泡沫的初始表征:(a) 三维图像;(b) 由胞元回转张量分析生成的特征椭球分布图;(c) 胞元尺寸分布;(d) 胞元朝向分布

Fig. 3 Initial characterizations of the Polyurethane (PU) foam: (a) 3D volume rendering; (b) characteristic ellipsoids generated from the gyration tensor analysis of cells; (c) cell size distribution; (d) cell orientation distribution

同样,我们可以利用回转张量来量化泡沫的胞元形状。首先需要计算各个胞元对应的回转张量的三个特征值 $R_1,R_2,R_3$($R_1<R_2<R_3$),及相应的特征向量 $\boldsymbol{\omega}_1,\boldsymbol{\omega}_2,\boldsymbol{\omega}_3$。这三个特征向量即为胞元对应的

惯量主轴，可沿这三个特征方向来构建半长轴分别为 $\sqrt{5R_1}$，$\sqrt{5R_2}$，$\sqrt{5R_3}$的椭球，从而更清楚地显示胞元的形状特征和空间分布[21]。同时可以利用三个特征值来计算局部各向异性(Fractional Anisotropy，FA)，作为度量胞元形状不规则程度的指标，FA 取值在 0 到 1 之间，越大代表不规则程度越高。

$$\mathrm{FA}=\sqrt{\frac{1}{2}}\frac{(R_1-R_2)^2+(R_2-R_3)^2+(R_3-R_1)^2}{R_1^2+R_2^2+R_3^2} \tag{4}$$

通过上述方法，我们将视野内所有胞元(剔除被边界切割的不完整胞元)抽象为椭球并等比例缩小，同时根据 FA 值着色，如图 3(b)所示。图中显示样品整体均匀性较好，大小胞元在空间上呈现混乱分布，胞元朝向也比较随机；胞元形状比较均匀，极长或极扁的胞元较少，绝大部分胞元近球度较高。图 3(c)是胞元尺寸的概率分布，显示胞元尺寸主要集中在 200～400$\mu$m 之间。将胞元的惯量主轴 $\boldsymbol{\omega}_3$ 的分布绘制成极图形式(图 3(d))，图中显示胞元无明显一致朝向，呈各向同性。

### 2.2　原位 CT 数据分析

加载过程中，微型材料试验机的上压头以 2.4$\mu$m/s 的速度向下压缩样品而下压头保持不动。将微型材料试验机与转台实现联动，控制 CT 装置分别于 0、5%、10%、15%、20%、30%、40%、52%、60%、70%、80%工程应变处采集三维图像。由于 CT 扫描过程中加载会暂停，即压头保持不动，因此样品内应力会有少许松弛，对应着曲线上向下的小尖峰。我们令样品静置并弛豫一段时间，控制 CT 扫描发生在样品内应力基本稳定之后。图 4 是我们通过原位 CT 获取的聚氨酯泡沫受压变形过程中的应力应变曲线和泡沫切片图。图 4(b)的半透明层为样品在 $xz$ 平面上的切片图，彩色图层为通过 DVC 技术获取的轴向应变场 $\varepsilon_{zz}$。图像相关始终在相邻两张图像之间开展，获取的应变场是相对前一应变时刻的增量应变，得到的应变场也展示在前一时刻的切片图上。如应变 5%和应变 10%的图像之间作相关后，应变场展示在应变 5%的图像上。当工程应变达到 50%时，微观变形错综复杂，DVC 技术无法再准确地追踪泡沫结构的变形过程，因此文中只展示到 40%工程应变所对应的轴向应变场。

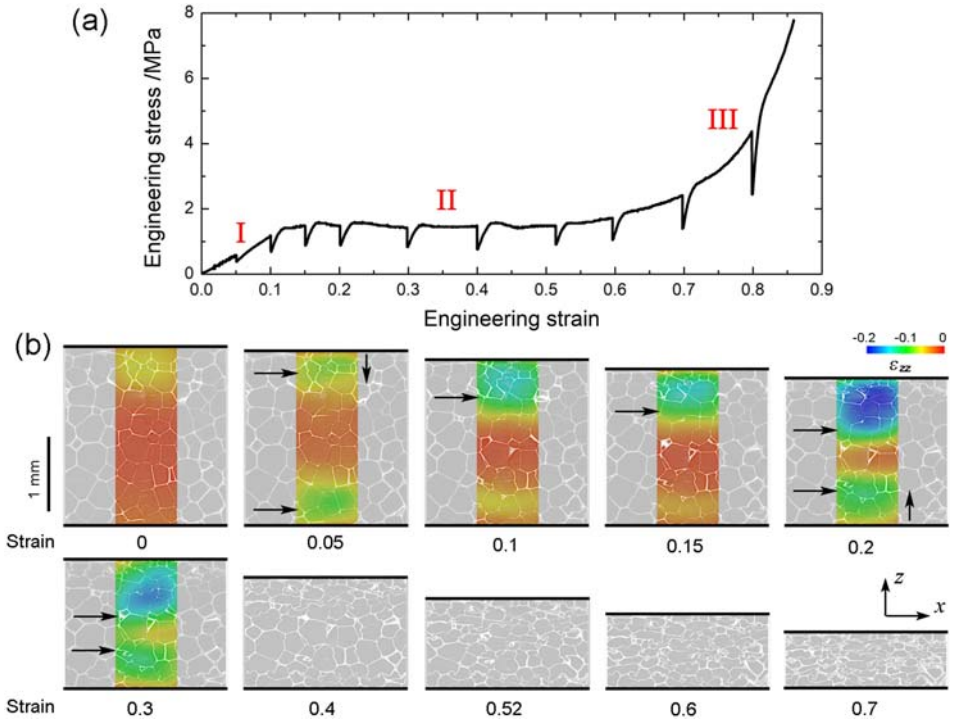



图 4　(a) 工程应力应变曲线，图中 I，II，III 分别表示聚氨酯泡沫变形的三个阶段，即弹性段、平台段和压实段；(b) 不同加载状态下的样品切片图及 DVC 输出的轴向应变场 $\varepsilon_{zz}$

Fig. 4　(a) Engineering strain stress curve, the I, II, III marked the three deformation stages of the PU foam, i. e. elastic, platform and densification stage; (b) slices of the foam along with the $\varepsilon_{zz}$ strain fields calculated from DVC at different instants

图 4(b)中显示视野内约分布有 8 层胞元，Andrews 等[22]指出当泡沫材料宏观尺寸达到胞元平均尺寸的 8 倍及以上时，边界效应对力学行为的影响可以忽略，因此视野内的胞元结构演化具有代表性。准静态压缩下，闭孔聚氨酯泡沫的变形过程主要分为三段：弹性段、平台段和压实段。在弹性段，材料主体为弹性变形，但三维图像表明材料内部仍然存在部分胞壁发生弯曲变形以使局部达到稳态，且塑性变形主要集中在样品上下两端；直至平台段初期，上下端部两层胞元完全坍塌。主要原因是样品切割过程中在样品两端制造了大量半胞，强度显著弱于样品内部的完整胞元。随后，图 4(b)上显示不可逆的胞元坍塌区呈带状逐渐由两端向中间扩展，而尚未被变形带前沿掠过的区域则变形很小；对应着轴向应变场在胞元坍塌区出现压缩变形集中，压缩带也是从端部向内部逐渐推进。当宏观应变达到 10%时，变形带在上下两端出现(如应变 5%的图像中水平箭头所示)。随着加载继续，上端变形带前沿(如应变 10%～30%的图像中水平箭头所示)以高于上压头的速度逐渐向样品中部推进(如应变 5%的图像中竖直箭头所示)；而下端变形带则暂时保持稳定，因为 10%和 15%图像中的应变场显示下端变形带逐渐消失即没有产生新的压缩变形。当宏观应变达到 30%时，下端再次出现较大变形并向上推进(如应变 20%的图像中竖直箭头所示)，直至两侧变形带于中部汇合。值得一提的是，应变场表明压缩带前沿已经扫过的区域会基本维持稳定而不再发生更大的塑性变形，直至变形带扫过整个样品；平台段样品变形主要发生在压缩带前沿即新坍塌的区域。在应力应变曲线上，平台段的工程应力稳定在 1.5MPa 左右。当工程应变达到 60%时，样品内胞元完全坍塌而进入压实段，宏观应力也迅速上升。

样品内压实带的传播过程可以通过相对密度演化展示得更加清楚。我们计算了不同应变下样品沿加载方向的相对密度分布，并对其沿应变方向进行插值，如图 5 所示。计算每个像素层内聚氨酯实体的体积占比，得到各个离散的应变水平下聚氨酯泡沫沿加载方向的相对密度分布 $\rho_r(z)$，其中 $z$ 为该层到下压头距离。在此基础上，对离散的密度分布数据插值，进而得到连续应变下的相对密度分布函数 $\rho_r(z,\varepsilon)$。彩图的上边界是压头位置。图 5 表明初始时样品密度分布比较均匀，在弹性段密度分布无明显变化。当达到 10%应变时，由于两侧胞元最先坍塌，样品两端密度显著升高，应力应变曲线也于此时进入平台段。随着应变继续增加，样品上端的高密度区以高于压头的速度(3.8μm/s)匀速向样品中心传播，而样品下端的高密度区则以低于上压头的速度(0.5μm/s)向样品中心传播。进入高密度区的样品随着加载的进行，密度持续增加，而尚未被高密度区波前掠过的样品密度基本保持稳定。在约 55%应变处，两个高密度区的传播前沿在样品内部汇合，样品完全坍塌，平台段结束，工程应力由此开始迅速上升。

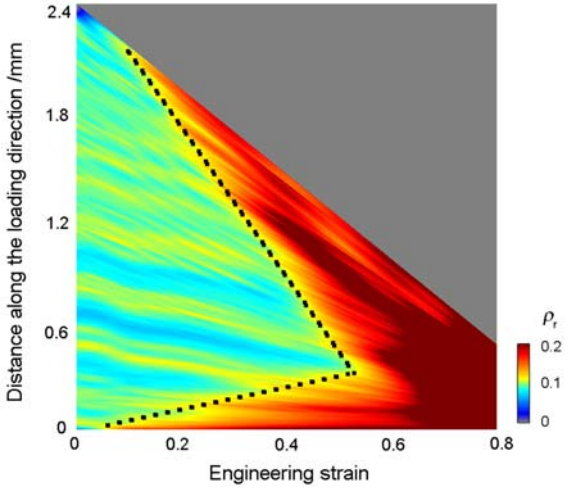



图 5 样品内相对密度 $\rho_r(z)$沿高度的分布随外部加载的演化过程

Fig. 5 Evolution of the relative density distribution $\rho_r(z)$ along the sample height with the external loading

同步辐射 CT 对泡沫微结构的高分辨率能力使我们能够看清胞元尺度的微小变形。为了分析准静态压缩下聚氨酯泡沫结构微观上的变形行为，我们追踪了样品内四个胞元的变形过程，如图 6 所示。其中图(a)、(b)、(c)中的胞元处在样品内相同高度处，其质心距离下压头约 1.5mm；但形状不同，高宽比分别为(b)1.22＞(a)1.02＞(c)0.65，这里高宽比定义为 $h/w$，其中 $h$、$w$ 分别为胞元上质点最大最小 $z$ 坐标之差和胞元在 $xy$ 平面内投影的最大长度；图(d)中胞元高宽比(1.06)与(a)中相似，但位置比(a)中胞元低了两层，其质心距离下压头约 0.9mm。为了清晰地显示胞元坍塌前胞壁的变形屈曲过程，我们利用胞壁上的曲率值来给

胞壁着色。在微分几何中，曲面上某点的两个主曲率 $\kappa_1$，$\kappa_2$ 可以用来衡量曲面在该点处的弯曲程度，通用的曲率指标有两个，即平均曲率$(\kappa_1+\kappa_2)/2$ 和高斯曲率 $\kappa_1\kappa_2$。Koenderink 提出了一种新的曲率指标 C 来描述曲面的弯曲程度[23]。

$$C=\sqrt{\frac{\kappa_1^2+\kappa_2^2}{2}} \tag{5}$$

对于泡沫骨架结构，角点（棱边交点）处的主曲率 $\kappa_1$、$\kappa_2$ 均较大，而在棱边处 $\kappa_1$ 较大、$\kappa_2$ 则接近 0；因此相比平均曲率和高斯曲率而言，曲率指标 C 有效降低了角点与棱边处曲率的差异而不至于出现间断，同时又能很好地区分棱边与平坦区域的曲率变化。胞元的曲率计算过程如下：首先将胞元的三维表面划分成三角形网格，自适应地选取网格上某个顶点的邻域[24]，利用邻域内的所有顶点拟合二次曲面，所得二次曲面在此处的主曲率 $\kappa_1$、$\kappa_2$ 即认为是该点处的主曲率。依次计算网格上所有顶点处的主曲率，根据式(5)则可得到整个胞元表面的曲率分布。

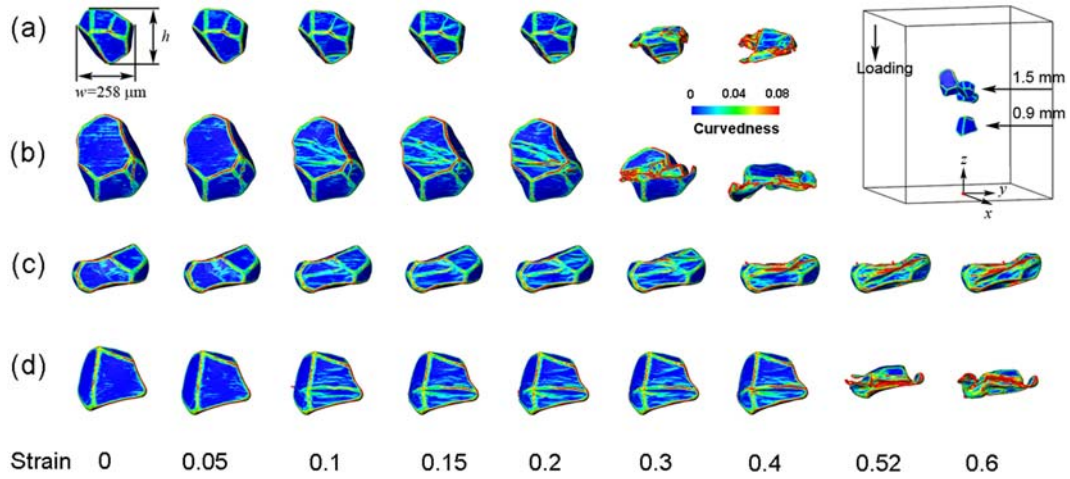



图 6　不同位置和形貌的胞元的变形过程对比：图(a)，(b)和(c)中的胞元处在同一个胞元层，其质心距离下压头约 1.5mm，但形状不同，高宽比($h/w$)分别为(b)＞(a)＞(c)，其中 $h$、$w$ 分别为胞元质点最大最小 $z$ 坐标之差和胞元在 $xy$ 平面内投影的最大长度（如图(a)所示）；图(d)中的胞元高宽比与(a)中相似，但位置比(a)中低了两层，其质心距离下压头约 0.9mm

Fig. 6　The deformation process of cells with different configurations and at different positions: The cells in figures (a), (b) and (c) are at the same cell layer, with a distance between their centroids and the lower platen of about 1.5mm, but have different aspect ratios ($w/h$), while $h$ is the difference between the maximum and minimum $z$ coordinates of cells and $w$ is the maximum length in the $xy$ projection of cells (as illustrated in (a)); the cell in figure (d) has a similar aspect ratio to that in figure (a), but its position is two layers lower, with a distance between its centroid and lower platen of about 0.9mm

图 6 显示在在弹性阶段，胞壁经受的是弹性压缩，表面曲率基本没有变化。而在 10%应变处四个胞元表面均出现了明显褶皱，且褶皱方向大致与加载方向垂直，表明胞壁屈曲变形已经开始；随后褶皱被不断强化，数量也逐渐增多，但由于局部应力释放以及周围胞元的支撑作用，胞元并不会立即发生坍塌，而是进入稳定变形阶段。当端部发展的变形带扫过胞元所在的区域时，所有胞元会受到已经坍塌的邻层干扰而强度下降，之前维持亚稳态的胞元会迅速坍塌并带动整个胞元层剧烈形变并一起坍塌。胞元坍塌时刻的定义如下：首先追踪胞元高度 $h$ 随应变的演化过程，然后利用其初始高度 $h_0$ 做归一化，并用波尔兹曼函数拟合曲线，计算曲线上斜率最大的位置也即胞元高度下降最快的时刻，定义为胞元坍塌时刻。从坍塌时间的先后顺序来看，依次是(b)胞元、(a)胞元和(c)胞元，可能的原因是(b)胞元高宽比较大，胞壁更容易发生屈曲变形。(c)胞元的高宽比最小，坍塌过程也最缓慢。图(d)中胞元的坍塌时刻要晚于图(a)中的，因为压实带更晚扫过(d)胞元所在的区域。胞元从开始坍塌到完全塌陷大约需要历经 20%的应变，完全塌陷后四个胞元的高宽比大致相同，而后所有胞元进入压实阶段。

## 3 结论

本文自主研发了一种微型材料试验机,结合同步辐射光源发展了高分辨(0.87μm)原位CT技术,对闭孔硬质聚氨酯泡沫在准静态压缩变形下的三维结构演化进行了量化表征,初步探讨了真实泡沫材料的微观结构性能关系,得出以下一些结论:

(1) 基于同步辐射光源的原位CT技术能清楚地揭示闭孔泡沫胞元尺度的变形损伤情况。

(2) 闭孔聚氨酯泡沫在平台段会呈现从两端向中间传播的压缩变形带,与运动压头同侧的变形带传播速度要显著高于压头运动速度,而另一侧的变形带速度则低于压头速度。当两侧变形带相遇之后,泡沫平台段结束,进入压实段。

(3) 闭孔聚氨酯泡沫的胞元坍塌过程起源于胞壁屈曲变形所形成的褶皱。在加载过程中,褶皱会被不断强化,数量也逐渐增多,胞元进入稳定变形阶段。当端部发展的变形带前沿扫过胞元所在的区域时,胞元迅速坍塌破裂。

(4) 胞元坍塌过程显著依赖于胞元形貌和所处位置,高宽比更大的胞元更容易坍塌,而靠近端部更早被压实带扫过的胞元也更早坍塌。

**参考文献:**


[1] Tu Z H, Shim V P W, Lim C T. Plastic deformation modes in rigid polyurethane foam under static loading[J]. International Journal of Solids and Structures, 2001, 38(50-51):9267－9279.

[2] 胡时胜, 刘剑飞, 王梧. 硬质聚氨酯泡沫塑料本构关系的研究[J]. 力学学报, 1998, 30(2):151－156 (HU Shisheng, LIU Jianfei, WANG Wu. Study of the constitutive relationship of rigid polyurethane foam[J]. Acta Mechanica Sinica, 1998, 30(2):151－156 (in Chinese))

[3] 范俊奇, 辛凯, 蔡灿柳, 等. 泡沫材料准静态力学性能实验研究[J]. 实验力学, 2011, 26(2):139－145 (FAN Junqi, XIN Kai, CAI Canliu, et al. Experimental study of quasi-static mechanical characteristic of polyurethane foam material[J]. Journal of Experimental Mechanics, 2011, 26(2):139－145 (in Chinese))

[4] Gama N V, Soares B, Freire C S R, et al. Bio-based polyurethane foams toward applications beyond thermal insulation [J]. Materials & Design, 2015, 76:77－85.

[5] 马丽红. 硬质聚氨酯泡沫塑料研究进展[J]. 石化技术, 2016, 23(6):24－25 (MA Lihong. Research progress on rigid polyurethane foam[J]. Petrochemical Industry Technology, 2016, 23(6):24－25 (in Chinese))

[6] Gibson L J, Ashby M F. Cellular solids: structure and properties[M]. Cambridge University Press, 1999.

[7] Mangipudi K, Epler E, Volkert C. Topology-dependent scaling laws for the stiffness and strength of nanoporous gold[J]. Acta Materialia, 2016, 119:115－122.

[8] 王仁, 田常津, 卢子兴. 玻璃纤维增强聚氨酯泡沫塑料的压缩力学性能研究[J]. 实验力学, 1995, 10(1):45－50 (WANG Ren, TIAN Changjin, LU Zixing. Mechanical behavior of glass-fiber reinforced polyurethane foam plastics under compression[J]. Journal of Experimental Mechanics, 1995, 10(1):45－50 (in Chinese))

[9] Patterson B M, Cordes N L, Henderson K, et al. In situ X-ray synchrotron tomographic imaging during the compression of hyperelastic polymeric materials[J]. Journal of Materials Science, 2016, 51:171－187.

[10] 韩守红, 吕振华, 刘永进. 硬质聚氨酯泡沫力学特性的静水压力加载实验方法研究[J]. 实验力学, 2010, 25(1):55－60 (HAN Shouhong, LV Zhenhua, LIU Yongjin. A study of experimental method for mechanical properties of rigid polyurethane foam under hydrostatic compressive loading[J]. Journal of Experimental Mechanics, 2010, 25(1):55－60 (in Chinese))

[11] Lachambre J, Maire E, Adrien J, et al. In situ observation of syntactic foams under hydrostatic pressure using X-ray tomography[J]. Acta Materialia, 2013, 61:4035－4043.

[12] 汪敏, 胡小方, 蒋锐, 等. 多孔泡沫铝压缩过程中微结构演化[J]. 实验力学, 2005, 20(3):363－369 (WANG Min, HU Xiaofang, JIANG Rui, et al. Microstructure evolution of porous foamed aluminum in compression[J]. Journal of Experimental Mechanics, 2005, 20(3):363－369 (in Chinese))

[13] 汪敏, 胡小方, 伍小平. 物体内部三维位移场分析的数字图像相关方法[J]. 物理学报, 2006, 55(10):5135－5139 (WANG Min, HU Xiaofang, WU Xiaoping. Digital image correlation method for the analysis of 3-D internal

displacement field in object[J]. Acta Physica Sinica, 2006, 55(10):5135－5139 (in Chinese))

[14] 牛永强，胡秋实，闫德莹，等. 基于数字图像体相关的物体内部三维位移场分析[J]. 实验力学，2011，26(3)：247－253 (NIU Yongqiang, HU Qiushi, YANG Deying, et al. Internal 3D displacement analysis using digital image volume correlation method[J]. Journal of Experimental Mechanics, 2011, 26(3):247－253 (in Chinese))

[15] Doga Gursoy, Carlo F D, Xiao X, et al. TomoPy: A framework for the analysis of synchrotron tomographic data [J]. Journal of Synchrotron Radiation, 2014, 21(5):1188－1193.

[16] Criminisi A, Blake A, Rother C, et al. Efficient dense stereo with occlusions for new view-synthesis by four-state dynamic programming[J]. International Journal of Computer Vision, 2007, 71(1):89－110.

[17] Tsai Y R, Stanley O. Total variation and level set methods in image science[J]. Acta Numerica, 2005, 14:509－573.

[18] Quam J K, Austin C D. Coverage of women's issues in eight social work journals[J]. Social Work, 1984, 29(4): 360－365.

[19] Anandan P. A computational framework and an algorithm for the measurement of visual motion[J]. International Journal of Computer Vision, 1989, 2(3):283－310.

[20] Theodorou D N, Suter U W. Shape of unperturbed linear polymers: polypropylene[J]. Macromolecules, 1985, 18 (6):1206－1214.

[21] Farooque T M, Camp C H, Tison C K, et al. Measuring stem cell dimensionality in tissue scaffolds[J]. Biomaterials, 2014, 35(9):2558－2567.

[22] Andrews E W, Gioux G, Onck P, et al. Size effects in ductile cellular solids. Part II: experimental results[J]. International Journal of Mechanical Sciences, 2001, 43(3):701－713.

[23] Koenderink J J. Surface shape and curvature scales[J]. Image & Vision Computing, 1993, 10(8):557－564.

[24] Sipiran I, Bustos B. Harris 3D: A robust extension of the Harris operator for interest point detection on 3D meshes[J]. Visual Computer, 2011, 27(11):963－976.

# Investigations on the micro deformation mechanisms of polyurethane foams with the in-situ, synchrotron-based tomography

CHAI Hai-wei[1], LI Hai-yang[2], FAN Duan[1], HUANG Jun-yu[1]

(1. The Peac Institute of Multiscale Sciences, Chengdu 610031, Sichuan, China; 2. Key Laboratory of Advanced Technologies of Materials, Ministry of Education, Southwest Jiaotong University, Chengdu 610031, Sichuan, China)

**Abstract**: In order to reveal the relationship between the microstructures and properties of polyurethane foam, an in-situ CT system is built on the 2BM line of APS light source in the US. The deformation and damage of a closed-cell rigid polyurethane foam under quasi-static compression loading is characterized in a three-dimensional (3D), real-time manner, with a resolution of 0.87$\mu$m. The stress-strain curve of the rigid polyurethane foam and the evolution of 3D structures in three deformation stages (elastic, platform and densification) are obtained via the in-situ CT test. 3D images show that the local compression bands are observed to propagate from the ends of sample to the center in the platform stage, and the band propagation velocity exceeds the platern velocity. The axial deformation fields of polyurethane foam are calculated accurately using the digital volume image correlation technique, showing that the compression deformation is mainly concentrated in the deformation bands. The deformation process of cells is tracked and the micro deformation of cell walls is quantified with the curvedness index. It is found that the collapse of cells is mainly originated from the folds formed by the buckling of cell walls.

**Keywords**: rigid polyurethane foam; closed-cell foam; in-situ CT; digital volume image correlation