

聚氨酯/环氧树脂互穿网络硬泡静态压缩塑性变形模式

Plastic Deformation Modes of Rigid PU/ER Interpenetrating Polymer Networks Foams Under Static Loading

花兴艳¹, 赵培仲², 朱金华³, 王源升³

(1 中国人民解放军 91550 部队 94 分队, 辽宁 大连 116023;

2 海军航空工程学院 青岛分校, 山东 青岛 266041;

3 海军工程大学, 武汉 430033)

HUA Xing-yan¹, ZHAO Pei-zhong², ZHU Jin-hua³, WANG Yuan-sheng³

(1 Branch 94, The People's Liberation Army Unit 91550, Dalian 116023, Liaoning, China;

2 Qingdao Branch, Naval Academy of Aeronautical Engineering, Qingdao 266041,

Shandong, China; 3 Naval University of Engineering, Wuhan 430033, China)

摘要: 采用同步法合成聚氨酯/环氧树脂互穿网络硬泡, 通过 FTIR 和 SEM 研究其化学结构及微观结构形态, 为研究其压缩响应及变形模式, 对其进行静态压缩试验。结果表明: IPN 硬泡的压缩行为表现出各向异性。平行发泡方向的压缩应力-应变曲线表现出三个变形阶段, 其中平台阶段的显著特征是应变软化和局部变形。垂直发泡方向的压缩曲线则单调增加, 平台阶段没有产生应变软化, 整个压缩过程中试样变形均匀分布。IPN 硬泡的静态压缩存在明显的应变率效应, 环氧树脂含量对压缩性能影响显著。描述 IPN 硬泡压缩局部变形理论模型, 变形带厚度和变形带前沿传播速度的理论值与试验值吻合较好, 采用该模型分析研究 IPN 硬泡的压缩变形机理。

关键词: 聚氨酯/环氧树脂互穿聚合物网络; 硬泡; 压缩性能; 塑性变形

中图分类号: O631.2 文献标识码: A 文章编号: 1001-4381(2010)04-0026-07

Abstract: A series of rigid polyurethane/epoxy resin interpenetrating polymer networks (PU/ER IPN) foams were prepared by a simultaneous polymerization technique. The chemical structure and morphology of these foams were investigated by fourier transform infrared (FTIR) spectroscopy and scanning electron microscopy (SEM). The compression responses of the IPN foams are anisotropic. Compression in the rising direction yields a typical three-stage stress-strain response of foams, and the prominent features are strain-softening and deformation localization. Compression in the transversal direction gives rise to a monotonously increasing stress-strain curve without strain-softening and always produces uniformly distributed deformation. The results show that the compression behaviors of the IPN foams are sensitive to the strain rates and ER contents. A theoretical model, which could describe deformation localization of the foams, is referenced to calculate the deformation band parameters, and correlates well with experiments. The compression deformation mechanism of the IPN foams is analyzed by this model.

Key words: polyurethane/epoxy resin interpenetrating polymer network; rigid foam; compression property; plastic deformation

聚氨酯硬泡(Rigid Polyurethane Foam, RPUF)应用广泛, 具有较高的比强度, 常用于包装、减震吸能及工程材料等^[1]。上述使用条件均有可能受到各种载荷作用, 因此, 研究其力学性能及变形机理, 给出结构与性能关系非常重要^[2]。国内外已有学者^[1-4]对

RPUF 的本构关系做过大量研究, 如 Gibson^[5] 和 Brezny^[6] 等研究了其结构与力学性能关系, Bastawros^[7] 等首创采用 X 射线成像及表面应变成像技术对其塑性变形模式和机理进行了研究。由于 RPUF 非常脆弱且耐热性能较差, 其应用受到很大限

制,添加无机填料或与其他聚合物共混改性可提高其热稳定性。最近几年,将聚氨酯与其他反应性聚合物混合形成互穿聚合物网络(IPN)改性成为关注的对象^[5],IPN技术可将各组分自身优异性能有效地复合互补,从而得到综合性能优异的材料。聚氨酯基IPN弹性体研究已经开展了很多,并取得了满意效果^[6,7],但IPN改性在PUF领域研究很少^[8,9],有关IPN泡沫本构关系的研究报道也较少。本工作成功制备了聚氨酯/环氧树脂(PU/ER)IPN硬泡,并对其压缩响应及变形机理进行研究,探讨了压缩速率及ER含量对压缩行为的影响。

1 实验方法

1.1 原材料

聚醚多元醇:羟值 450mgKOH/g;多亚甲基多苯基多异氰酸酯(PAPI):NCO 质量分数 30.83%;环氧树脂 E-51;二丁基锡二月桂酸酯:分析纯;DMP-30:实验级;聚氨酯泡沫稳定剂 AK8818;自制蒸馏水。

1.2 PU/ER IPN 硬泡的制备

将除 PAPI 以外的原料混合均匀,再与 PAPI 迅速高速搅拌混合,至有气泡产生,体系逐渐发白时,迅速注入模具中自由发泡,反应完毕后,放入烘箱中 60 后固化 5h,脱模得到成品。调整 PU 与 ER 的质量比及发泡剂水的用量,分别制备 PU-ER 质量比为 100,0,90,10,80,20,70,30,50,50,0,100 的 PU/ER IPN 硬泡及 ER 固化试样,分别记为 PUF, PUE10, PUE20, PUE30, PUE50, ER。所有泡沫密度均为 $0.10\text{g}/\text{cm}^3$ 。

1.3 分析测试

扫描电镜分析:样品真空喷金,用 Quanta 200 型电子显微镜观察其微观形态。

静态压缩性能测试:用 CMT 5105 型电子万能试验机对 PUE30 进行单轴压缩实验,试件尺寸为 50mm 50mm 50mm,加载速率分别为 0.5, 2, 5, 50mm/min,相应的试件应变率为 1.67×10^{-4} , 6.68×10^{-4} , 1.67×10^{-3} , $1.67 \times 10^{-2}\text{s}^{-1}$;分别对 PUE10, PUE20, PUE30 进行应变率为 $1.11 \times 10^{-3}\text{s}^{-1}$ 的单轴压缩实验。所有试样侧面划上平均分布的水平线以便观察压缩变形,并用摄像机记录压缩过程。实验温度 17 。

2 结果与讨论

2.1 PU/ER IPN 硬泡的红外光谱分析

图 1 是 PUF, ER 及 PU/ER IPN 硬泡的红外光谱图。图 1 中 PU/ER IPN 硬泡体系在 3300cm^{-1} 附

近对应 ER 上的仲羟基 OH 和氨酯的 N-H 的振动吸收峰。很明显,随着 ER 含量增加,泡沫中的仲羟基浓度提高,吸收峰面积逐渐增大并向较高频率移动,靠近纯 ER 中的仲羟基吸收峰。 2278cm^{-1} 处的吸收峰是异氰酸酯的特征峰。PUF 中该峰比较明显,说明 PUF 中还有未反应的 NCO 基团,而 PUE10, PUE30, PUE50 中该峰几乎完全消失,说明 NCO 基团几乎完全反应了。本研究中 PUF 和 PU/ER IPN 硬泡体系, NCO/OH 摩尔比均大于 1,且采用叔胺作催化剂,所以多余的 PAPI 可三聚生成异氰脲酸酯环, 1411cm^{-1} 处的吸收峰对应三聚物的特征吸收峰。PUE10, PUE30, PUE50 中, PAPI/聚醚的质量比依次增加,分别为 120%, 140%, 170%, 但由图 1 发现, 1411cm^{-1} 处的吸收峰面积四者相差不大。结合 2278cm^{-1} 与 1411cm^{-1} 两处的吸收可以认为 PU/ER IPN 体系中 ER 上的仲羟基 OH 和 PAPI 中的 NCO 反应形成接枝了,这促进了 IPN 体系中两组分相容性。PUE30, PUE50, ER 在 914cm^{-1} 处的环氧吸收峰依次增大,但总体来说峰面积很小,表明 IPN 硬泡体系中仍有环氧基团未反应,这是因为高度交联的网络中环氧基团的固化反应受到限制。

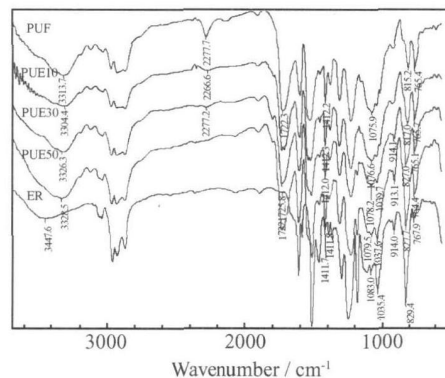


图 1 试样的红外光谱

Fig.1 FTIR spectra of samples

2.2 PU/ER IPN 硬泡的微观结构形态

图 2 是 PUF 及 PU/ER IPN 硬泡体系的 SEM 图。由图 2 可知,随着 ER 含量增加,PU/ER IPN 硬泡的泡孔结构区别不大,泡孔结构大小比较均匀,泡孔形状接近六边形,IPN 硬泡的泡壁表面均匀光滑,跟纯 PUF 的一样。这比文献[6]报道的当 ER 用量增加,聚氨酯硬泡泡孔结构变差的情况要好,而且没有出现像文献中 ER 含量达 50% (质量分数) 时试样发生收缩的现象。正是泡孔结构形状的均一才能保证 IPN 硬泡良好的力学性能。为仔细观察 PU/ER IPN 硬泡的泡壁表面,在放大 600 倍的 SEM 图中发现其泡壁仍

光滑均一, 这反映了聚氨酯和环氧树脂两组分形成

IPN 后具有较好的相容性。

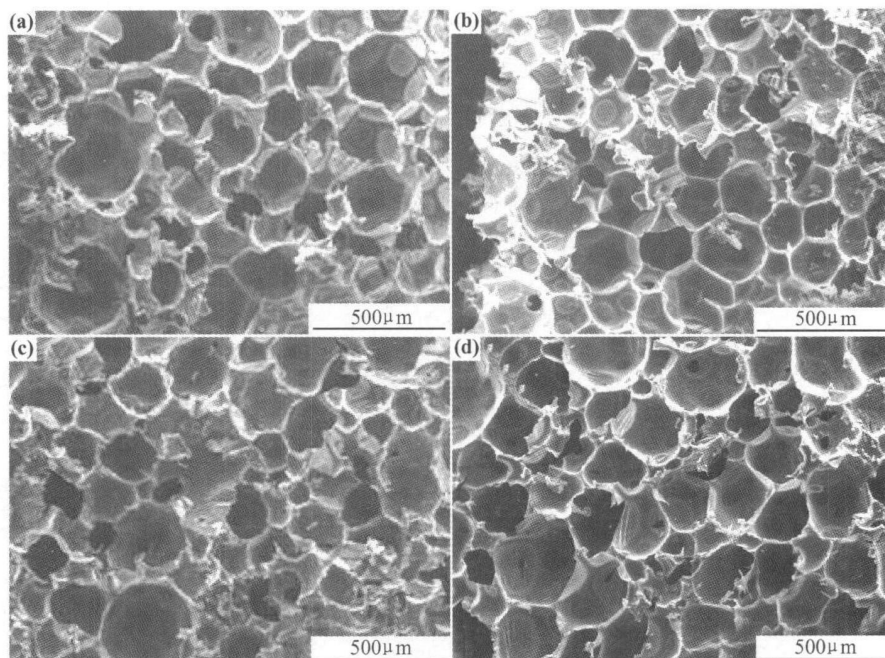


图 2 PUE 及 PU/ER IPN 硬泡的 SEM 图 (a) PUF; (b) PUE10; (c) PUE30; (d) PUE50

Fig. 2 SEM micrographs of the PU/ER IPN rigid foams with different ER contents

(a) PUF; (b) PUE10; (c) PUE30; (d) PUE50

图 3 是 PUE30 平行和垂直发泡方向上内部结构的 SEM 图。由图 3 可知, 泡孔形状在平行发泡方向上接近椭圆形, 在垂直发泡方向上则接近六边形; 泡沫

结构中泡孔既有开孔也有闭孔; 泡孔结构表现出明显的各向异性, 平行发泡方向的平均孔径大于垂直发泡方向的。

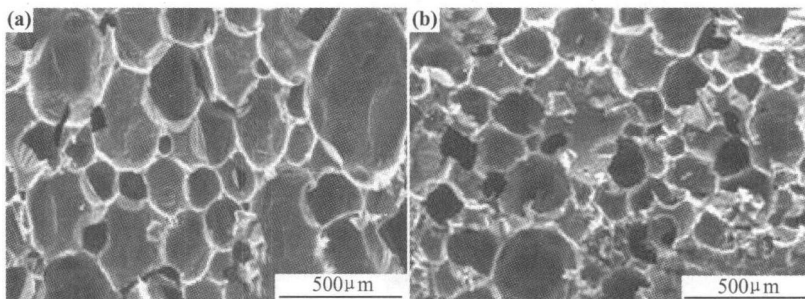


图 3 PUE30 的 SEM 图 (a) 平行发泡方向; (b) 垂直于发泡方向

Fig. 3 SEM micrographs of PUE30 in the rising direction (a) and transversal direction (b)

2.3 PU/ER IPN 硬泡的压缩性能

图 4 是不同 ER 含量 PU/ER IPN 硬泡的压缩应力-应变曲线。由图 4 可知, 所有试样的压缩响应表现出相似的规律, 沿发泡方向的压缩产生了三个特征阶段: 起始的弹性段, 平台阶段以及硬化密实段。平台段前端出现应力小幅下降, 即应变软化现象, 这跟文献[1-4]报道的 RPUF 的情况一样。根据弹性段斜率可得到泡沫的压缩模量, 弹性段结束时的最大应力为屈服应力。文中将屈服应

力值对应的应变称为屈服应变(ϵ_y), 应力平台结束时的应变称为致密化应变(ϵ_d), 各试样压缩性能参数如表 1 所示。

垂直发泡方向上的压缩曲线与平行方向上的基本相似, 不同之处在于平台段前端没有出现应变软化; 平台段变得更不明显, 应力随应变逐渐增加的趋势更显著。垂直发泡方向的致密化应变比平行发泡方向的低, 但屈服应变比平行方向上的稍大; 压缩模量和屈服应力均小于平行方向上的。两

个方向上力学行为的差别是由于泡孔微观结构的各向异性所致。

由图 4 可知, IPN 硬泡的压缩模量和压缩强度均随 ER 含量增加而显著提高; 平行发泡方向上的平台阶段均表现出应变软化现象, σ_y 几乎不变, 而 σ_d 随 ER 含量增加逐渐减小, 且 σ_y 比 σ_d 小得多, 如表 1 所示。结果证明, 通过 IPN 技术, 环氧树脂和聚氨酯获得了较好的相容性, 所制备的 IPN 硬泡泡孔结构均匀, 力学性能优异。

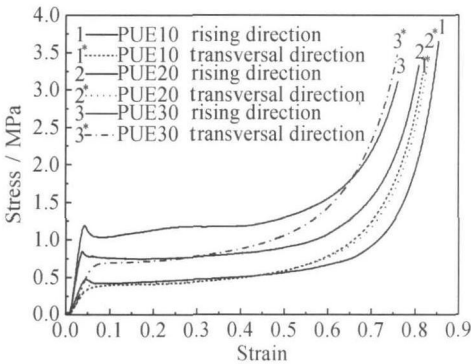


图 4 不同 ER 含量 PU/ER IPN 硬泡的应力-应变曲线
Fig. 4 Stress-strain curves for PU/ER IPN rigid foams with different ER contents

表 1 不同 ER 含量 PU/ER IPN 硬泡的压缩性能参数
Table 1 Compressive performance parameters of PU/ER IPN rigid foams with different ER contents

Mass fraction of ER/ %	Compressive modulus/ MPa	Yield stress/ MPa	Yield strain	Densification strain
10	15.58	0.47	0.046	0.709
20	35.59	0.84	0.038	0.662
30	46.04	1.19	0.042	0.640

2.4 PU/ER IPN 硬泡压缩变形模式和机理分析

泡沫的变形在工程应用中非常重要, 尤其是用作缓冲材料, 了解其变形机理很重要。图 5 是从压缩过程录像中截取的不同时间的几幅代表性照片。PU/ER IPN 硬泡沿发泡方向的压缩实验表明, 压缩过程中试样的变形非均匀分布。

PU/ER IPN 硬泡沿发泡方向压缩时, 每一阶段都有其独特的变形机理。加载初始阶段, 泡孔的变形是弹性的, 受泡棱的弹性压缩和弯曲, 泡壁的弯曲和拉伸以及泡孔内部气体的压缩所控制。此阶段试样变形小并且在试样内部均匀分布。随着载荷增加, 泡孔的变形逐渐加大, 包括泡壁和泡棱的翘曲和破裂、塑性铰链变形以及破裂泡孔的坍塌, 材料开始产生破坏。此

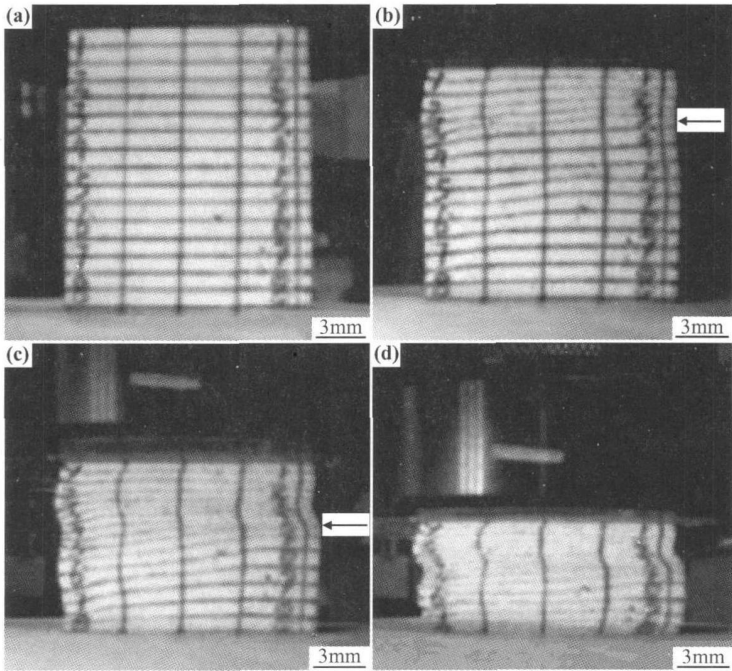


图 5 PUE30 平行发泡方向上的压缩变形过程照片(压缩速率 0.5mm/min) (a)0s; (b) 1200s; (c) 2400s; (d) 3600s
Fig. 5 Sequential photographs of PUE30 under compression in the rising direction (loading velocity 0.5mm/min)
(a) 0s; (b) 1200s; (c) 2400s; (d) 3600s

阶段的变形非均匀分布。随着泡孔不断翘曲和破坏, 泡孔彼此接触, 泡沫体趋向于密实体, 应力陡然上升。

此阶段的变形又变得均匀分布。实验证明, IPN 硬泡经过三个阶段的压缩变形后卸载, 形变不能完全恢复,

材料破坏。平台阶段的局部变形说明泡沫各处的承载能力不一样。形变不能完全恢复表明泡沫破坏过程中吸收能量, 适合于做缓冲材料。

平台阶段的局部变形是应变软化泡沫材料的特征。泡沫可看作是由许多的单泡层组成, 每层屈服强度稍有不同。平台的出现是由于最薄弱泡层的破坏引起的。由于泡壁的翘曲使得材料屈服后的强度降低, 且试样的总变形局限于该破坏层内, 直到空间被排除, 坍塌的泡壁被压紧到一起为止。破坏层的坍塌减弱了相邻泡层强度, 使得它们成为下一个最易坍塌的泡层。这样, 局部变形传播到相邻泡层, 引发下一轮的局部坍塌。这种重复循环使局部变形沿弹性区域传播, 最后导致整块材料的坍塌, 标志平台段的结束^[1]。

通过 PU/ER IPN 硬泡实验分析发现, 其静态压缩曲线分为三个阶段, 且平台阶段为局部变形。已有文献^[1]报道过静态条件下 RPUF 的变形模式, 并提出理论公式来确定弹性区域厚度和变形带厚度等参数, 本文将依据文献[1]给出的模型, 对 PU/ER IPN 硬泡的变形模式进行讨论。

泡沫在平台阶段具有三个变形区域: 弹性区域、正在坍塌区域以及已经坍塌区域。文献[1]用变形带的概念来描述泡沫材料的变形, 其类似于金属材料学里的 Luders 变形带。变形带指的是已经坍塌的区域, 带前沿是弹性区域和已经坍塌区域的边界线。材料的总变形是由于变形带的形成及传播所导致。事实上, 泡沫的坍塌通常从与加载压盘接触的最顶层开始, 因为该层由许多缺壁的孔所组成, 材料最薄弱。变形带前沿通常形成于试样的一端然后向另一端传播。

Tu 等^[1]提出, 如 γ 比 α 小得多可以忽略, 则弹性区域厚度 l_e 和变形带厚度 l_b 可表示成

$$l_e = \frac{\gamma}{\alpha} l_0 \quad (1)$$

$$l_b = \left(\frac{1-\gamma}{\alpha} \right) l_0 \quad (2)$$

式中: l_0 为试样原始厚度; γ 为总应变; α 为致密化应变。公式(1)和(2)可计算给定 γ 下的 l_e 和 l_b 。这些值具有重要实用意义, 泡沫弹性部分厚度通常象征材料的剩余吸能能力。

变形带前沿传播速度 v_b 通过对 l_e 求导得到

$$v_b = \frac{dl_e}{dt} = \frac{\gamma}{\alpha} \dot{\gamma} l_0 \quad (3)$$

式中: $\dot{\gamma}$ 为压缩加载速度; $\dot{\gamma}$ 为总应变率。该公式说明 v_b 比 $\dot{\gamma}$ 大。

事实上, 泡孔是任意排列, 而且尺寸、形状、方向和强度都不相同; 另外, 泡沫制备过程中也会引入一些缺陷, 如缺壁和大的空洞等。这些因素使泡沫压缩时可能会同时或先后产生两个或更多的变形带。另外, 如变形带从试样中部开始, 还会有两个带前沿分别向上和向下的弹性区域传播。这些情形下公式(3)仍适用, 只需将左边用相应变量的总和表示。

2.5 实验验证

图 6 是 PUE30 不同应变率下沿发泡方向的压缩曲线。由图 6 可知, 随着应变率增加, 屈服强度和压缩模量均增加, 其中屈服强度最大相差近 22%, 但屈服应变和致密化应变几乎不变, 且 γ 比 α 小得多。PUE30 的静态压缩曲线表现出明显的应变率效应。

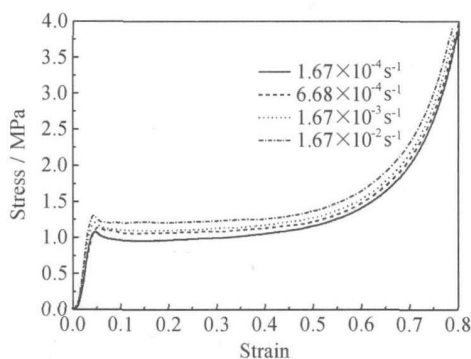


图 6 PUE30 在不同应变率下的应力-应变曲线

Fig. 6 Stress-strain curves for PUE30 under four different strain rates

图 5 中 PUE30 坍塌过程中变形带和弹性区域的界线非常清晰, 可测量这两个区域的厚度。每张照片中变形带前沿的位置如图中箭头所示。图 7 是不同应变率下 PUE30 弹性区域及变形带的无量纲厚度理论值与实验值的比较。图 8 是 PUE30 变形带传播速度与总应变率关系的理论值和实验值的比较。研究发现, 理论值和实验结果非常吻合, 说明 PU/ER IPN 硬泡的压缩变形符合公式(1)~(3)所描述的变形带理论。另外, 由公式(1), (2)可知, 当 γ 可忽略时, 弹性区域及变形带的无量纲厚度只跟 α 和 $\dot{\gamma}$ 有关。本工作所研究应变率范围内, PUE30 的 γ 比 α 小得多可忽略, 而且 α 几乎保持不变, 所以不同应变率下的弹性区域及变形带的无量纲厚度与 $\dot{\gamma}$ 的关系曲线非常接近, 如图 7 所示。说明该应变率范围内, 当 PUE30 试样原始厚度相同, 且压缩变形量相同时, 各应变率下弹性区域及变形带的厚度相同。

由 PUE10, PUE20, PUE30 压缩实验发现, 压缩过程均为塑性变形模式, 即平台阶段出现应变软化现象, 为局部变形, 并且可以测量变形带及弹性区域的厚度。图 9 是不同 ER 含量 PU/ER IPN 硬泡弹性

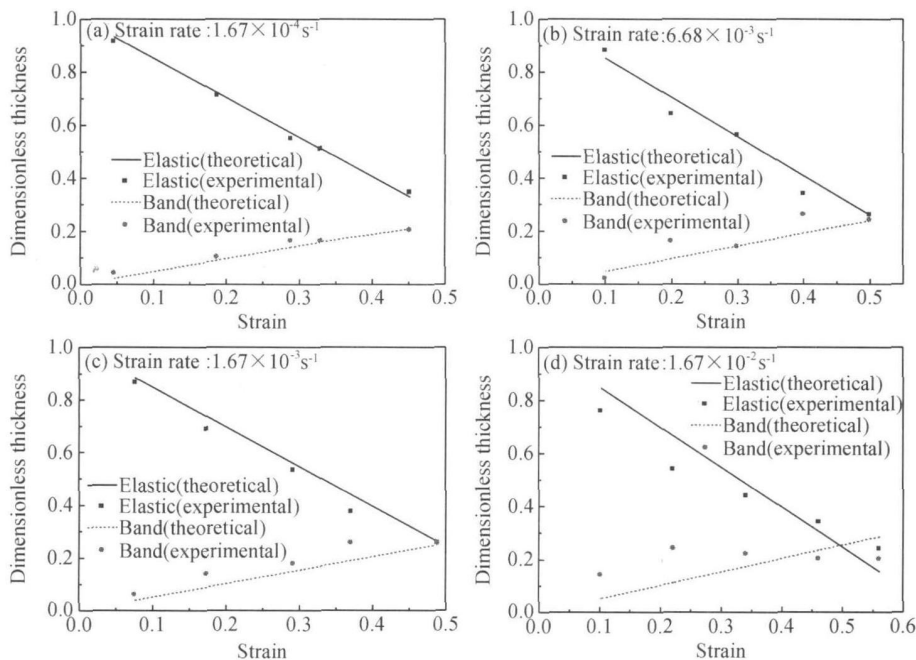


图 7 不同压缩速率下弹性区域和变形带厚度理论值和实验值的比较

(a) 0.5 mm/min; (b) 2 mm/min; (c) 5 mm/min; (d) 50 mm/min

Fig. 7 Comparison between the theoretical and measured thicknesses of the elastic region and the deformation band for four different loading rates (a) 0.5 mm/min; (b) 2 mm/min; (c) 5 mm/min; (d) 50 mm/min

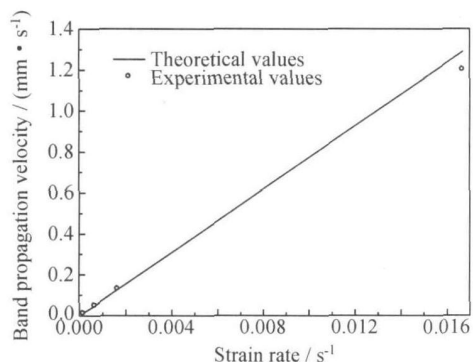


图 8 不同压缩速率下变形带传播速度理论值和实验值的比较

Fig. 8 Comparison between the theoretical and measured band propagation velocity at different strain rates

厚度随 ER 含量增加而降低, 而变形带厚度随 ER 含量增加而增加。这是由于 IPN 硬泡中 ER 含量增加, 使得泡沫材料的塑性变形增大的缘故。

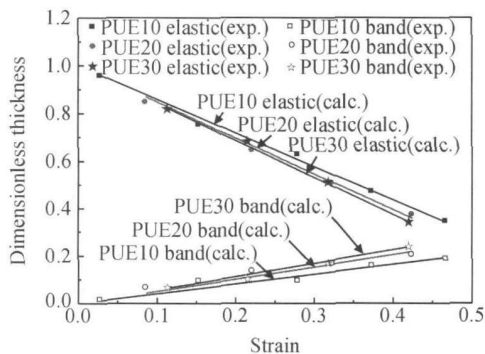


图 9 不同 ER 含量 IPN 硬泡弹性区域及变形带厚度理论值和实验值的比较(应变率 $1.11 \times 10^{-3} \text{ s}^{-1}$)

Fig. 9 Comparison between the theoretical and experimental thickness of the elastic region and the deformation band for PU/ER IPN rigid foams with different ER contents (strain rate: $1.11 \times 10^{-3} \text{ s}^{-1}$)

区域及变形带无量纲厚度理论值和实验值的比较。图 9 中各直线由理论计算得到, 散点则是实验测试值, 可以发现, 不论是弹性区域还是变形带厚度, 理论和实验值吻合都很好。结合图 7, 8 的分析, 说明 PU/ER IPN 硬泡的压缩变形机理可以用变形带理论合理解释。

由于 α 随 ER 含量而变化, 所以相同应变率下, 不同 ER 含量 IPN 硬泡弹性区域及变形带无量纲厚度与 α 的关系曲线有所区别。由图 9 可知, 相同 α 下, 弹性区域无量纲厚度随 ER 含量增加而降低; 变形带无量纲厚度则随 ER 含量增加而增加。说明试样原始厚度相同, 且压缩变形量相同情况下, IPN 硬泡弹性区域

3 结论

(1) PU/ER IPN 硬泡的压缩行为具各向异性, 平行发泡方向上的力学性能优于垂直方向上的; 平行发

泡方向压缩曲线的平台阶段产生应变软化现象,并且产生局部变形;垂直发泡方向上没有出现应变软化现象,而且为均匀变形。

(2) 随着 ER 含量增加 PU/ER IPN 硬泡的压缩性能显著提高,压缩行为表现出明显差异;在所研究应变率范围内, PUE30 的压缩表现出明显的应变率效应。

(3) 根据变形带理论得出 PU/ER IPN 硬泡压缩变形过程中弹性区域及变形带厚度随 ER 含量及应变率的变化规律,并得到实验验证。结果证明, PU/ER IPN 硬泡的压缩变形机理可以用变形带理论解释。

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: 9267- 9279.
- [2] 林玉亮, 卢芳云, 王晓燕, 等. 低密度聚氨酯泡沫压缩行为实验研究[J]. 高压物理学报, 2006, 20(1): 88- 92.
- [3] 卢子兴, 田常津, 谢若泽. 硬质聚氨酯泡沫塑料压缩力学性能[J]. 材料研究学报, 1994, 8(5): 452- 456.
- [4] FABRICE S M, LAURENT C, EMANUELLE C. Mechanical properties of high density polyurethane foams: I. effect of the density[J]. Composites Science and Technology, 2006, 66: 2700 - 2708.
- [5] GIBSON L J, ASHBY M F. The mechanics of three-dimension cellular materials [J]. Proceedings of Royal Society A, 1982,
- (上接第 25 页)
- [10] 张彪. 氟化物在玻璃中的作用[J]. 玻璃, 1987, (2): 21- 22.
- [11] 楼贤春, 程金树, 郑伟宏, 等. 锂铝硅系统微晶玻璃热处理制度优化研究[J]. 玻璃, 2005, 32(3): 7- 10.
- [12] SHARMA S K, SIMONS B. Raman study of crystalline polymorphs and glasses of spodumene composition quenched from various pressures[J]. Am Mineral, 1981, 66(1): 118- 126.
- [13] BAE S J, KANG U, DYMSHITS O S, et al. Raman spectroscopy study of phase transformations in titania-containing lithium aluminosilicate glasses doped with CoO[J]. J Non-Cryst Solids, 2005, 351(37): 2969- 2978.
- [14] GALEENER F L, BARRIO R A, MARTINEZ E, et al. Vibrational decoupling of rings in amorphous solids[J]. Phys Rev Lett, 1984, 53(25): 2429- 2432.
- [15] OKUNO M, ZOTOV N, SCHMUCKER M, et al. Structure of $\text{SiO}_2\text{-Al}_2\text{O}_3$ glasses Combined X-ray diffraction, IR and Raman studies[J]. J Non-Cryst Solids, 2005, 351(12): 1032- 1038.
- [16] 西北轻工业学院. 玻璃工艺学[M]. 北京: 中国轻工业出版社,

382: 43- 59.

- [6] BREZNY R, GREEN D J. The effect of cell size on the mechanical behaviour of cellular materials [J]. Acta Metallurgica Materials, 1990, 38: 2517- 2526.
- [7] BASTAWROS A F, SMITH H F, EVANS A G. Experimental analysis of deformation mechanisms in a closed-cell aluminium alloy foam [J]. Journal of the Mechanics and Physics of Solids, 2000, 48: 301- 322.
- [8] CASCAVAL C N, ROSU D, ROSU L, et al. Thermal degradation of semi-interpenetrating polymer networks based on polyurethane and epoxy maleate of bisphenol A [J]. Polymer Testing, 2003, 22: 45- 49.
- [9] 尚蕾, 黄奕刚, 王建华, 等. 聚氨酯/环氧树脂互穿网络聚合物的性能研究[J]. 化学研究与应用, 2005, 17(4): 552- 553.
- [10] 秦川丽, 蔡俊, 唐冬雁, 等. PU/VER IPN 材料阻尼性能的研究[J]. 材料工程, 2003, (7): 36- 40.
- [11] ZHANG Y, HOURSTON D J. Rigid interpenetrating polymer network foams prepared from a rosin-based polyurethane and an epoxy resin[J]. Journal of Applied Polymer Science, 1998, 69: 271- 281.
- [12] 杨雨润, 陈永林, 张志平, 等. 聚氨酯/环氧树脂互穿网络硬质泡沫塑料反应过程和微观结构[J]. 功能高分子学报, 2003, 16(2): 159- 165.

收稿日期: 2009-04-24; 修订日期: 2010-01-15

作者简介: 花兴艳(1979-), 女, 博士, 研究方向为高分子材料, 联系地址: 辽宁大连中国人民解放军 91550 部队 94 分队(116023), E-mail: zpzgraduate@163.com

1982.

- [17] 肖萍, 郑少波, 尤静林, 等. 钛氧化物结构及其拉曼光谱表征[J]. 光谱学与光谱分析, 2007, 27(5): 936- 939.
- [18] ROOS C, BECKER O, SIEBERS F. Microstructure and stresses in a keatite solid-solution glass ceramic[J]. J Mater Sci, 2007, 42(1): 50- 58.
- [19] NORDMANN A, CHENG Y B. Crystallization behaviour and microstructural evolution of a $\text{Li}_2\text{O-Al}_2\text{O}_3\text{-SiO}_2$ glass derived from spodumene mineral[J]. J Mater Sci, 1997, 32(1): 83- 89.

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(50802065)

收稿日期: 2009-04-29; 修订日期: 2009-10-27

作者简介: 郑伟宏(1981), 男, 讲师, 从事特种玻璃及微晶玻璃方面的研究, 联系地址: 武汉理工大学硅酸盐材料工程教育部重点实验室(430070), E-mail: zhengweihong@whut.edu.cn