

文章编号: 1000-6893(2002)02-0151-04

# 聚氨酯泡沫塑料拉伸本构关系及其失效机理的研究

卢子兴<sup>1,2</sup>

(1. 北京航空航天大学 固体力学研究所, 北京 100083)

(2. 中国科学院力学研究所 非线性力学国家重点实验室, 北京 100080)

## INVESTIGATION INTO THE TENSILE CONSTITUTIVE RELATION AND FAILURE MECHANISM OF PUR FOAMED PLASTICS

LU Zi-xing<sup>1,2</sup>

(1. Institute of Solid Mechanics, Beijing University of Aeronautics and Astronautics, Beijing 100083, China)

(2. Laboratory for Nonlinear Mechanics of Continuous Media, Institute of Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100080, China)

**摘要:** 通过 3 种密度硬质聚氨酯泡沫塑料的拉伸实验, 研究了它们的应力-应变特性及其应变率效应。同时, 为确定泡沫塑料拉伸失效机理, 对材料进行了扫描电镜下的细观拉伸实验, 观察了试件表面胞体的变形与失效过程, 再结合宏观拉伸试件断口的扫描电镜分析, 进一步讨论了泡沫塑料在拉伸加载下的失效机理。基于泡沫塑料的拉伸应力-应变曲线, 用数值方法拟合了泡沫塑料的拉伸本构关系。

**关键词:** 泡沫塑料; 拉伸失效; 本构关系

**中图分类号:** V 254.2; V 214.3+2

**文献标识码:** A

**Abstract:** The stress-strain characteristics and strain rate effect of PUR foamed plastics are investigated by tensile experiments for three kinds of densities. In the meantime, in order to determine the tensile failure mechanism of foamed plastics, microscopic tensile tests were conducted in the observing room of a scanning electronic microscopy. The tensile failure mechanism of foamed plastics is discussed on the basis of observing the deformation and failure course of cells on the surface of a tensile specimen and the SEM analysis of fracture surface of tensile specimens. Finally, the tensile constitutive relation is fitted by the numerical method according to the tensile stress-strain curves of PUR foamed plastics, which agrees well with the experimental curves.

**Key words:** foamed plastics; tensile failure; constitutive relation

人们对泡沫塑料力学行为的研究主要集中在压缩性能方面, 拉伸性能的研究则主要考虑了低密度材料<sup>[1]</sup>。所以, 研究高密度泡沫塑料的拉伸变形及其失效的规律具有重要的意义。近年来, 笔者曾对高密度硬质聚氨酯泡沫塑料的拉伸力学性能进行了研究<sup>[2,3]</sup>。虽然泡沫塑料的宏观拉伸力学性能已被讨论, 但其拉伸失效的机理并不十分清楚, 本文将研究重点放在泡沫塑料拉伸失效机理的讨论上, 同时, 根据材料的宏观应力-应变曲线利用数值拟合的方法来确定高密度泡沫塑料的拉伸本构关系。

### 1 拉伸应力-应变特性及应变率效应

根据文献[2, 3]的介绍, 3 种密度硬质聚氨酯泡沫塑料在准静态加载(室温)下的拉伸应力-应

变曲线如图 1 所示, 可见: 泡沫塑料的拉伸力学行为不同于其压缩力学行为, 与相同密度泡沫塑料的压缩实验相比, 较高密度硬质聚氨酯泡沫塑料的抗拉伸能力一般较差, 最大拉伸应变为 3% 左右, 其宏观的破坏表现为明显的脆性特征, 断口基本上属于平直断口。但是, 较高密度泡沫塑料的

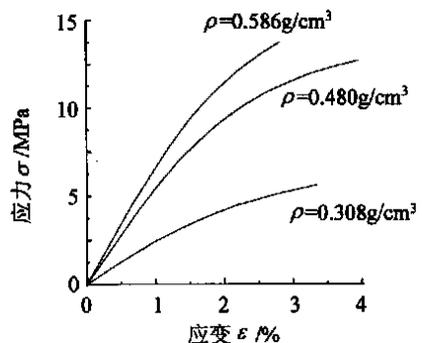


图 1 不同密度泡沫塑料的应力-应变曲线  
Fig 1 Stress-strain curves of foam plastics with different densities

收稿日期: 2001-03-26; 修订日期: 2001-04-26  
基金项目: 国家自然科学基金资助项目(10072007)  
文章网址: <http://www.hkxb.net.cn/hkxb/2002/02/0151/>

拉伸应力-应变曲线仍表现出明显的非线性特性,因此它的应力-应变曲线可分为2个区域,即线性区和非线性区。显然,泡沫塑料本构关系的非线性除了与基体材料的粘、塑性有关外,还应考虑胞体内气体的影响。正如文献[2]所述,根据线性区的应力和应变便可确定泡沫塑料的拉伸弹性模量,而根据非线性区的最大应力值可确定泡沫塑料的拉伸断裂强度。从图1实验曲线的比较不难看出,高密度泡沫塑料的弹性模量和拉伸断裂强度均随其密度的增加而增加,而泡沫塑料的断裂应变则随密度的变化没有明显的规律性。

以密度为  $0.480\text{g/cm}^3$  的泡沫塑料为例,图2

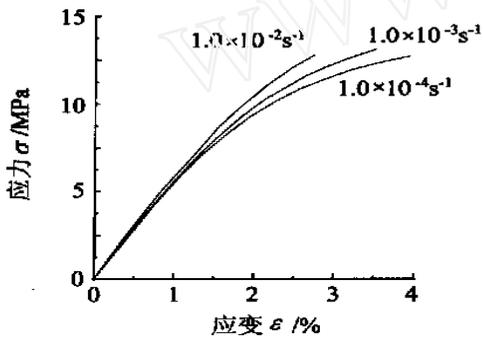


图2 不同应变率下泡沫塑料的应力-应变曲线

Fig 2 Stress-strain curves of foam plastics at different strain-rates

给出了室温下不同应变率的拉伸应力-应变曲线,可见:泡沫塑料在拉伸下的应变率效应并不十分明显,其拉伸弹性模量和拉伸断裂强度随应变率的变化并不大(具体的实验结果可以参考文献[2])。另外,泡沫塑料的拉伸断裂应变随应变率的提高有所降低,即随应变率或加载速率的增加,材料的脆性也增加了。

## 2 拉伸失效机理

根据宏观实验的观察可知:较高密度聚氨酯泡沫塑料在室温拉伸下呈脆性变形特征。为了揭示高密度泡沫塑料的拉伸断裂机制,文献[3]曾对拉伸试件断口进行了扫描电镜分析,得到的结论是:在拉伸断口上虽能发现塑性变形的痕迹,但并不明显,基体的断面大部分平滑整齐,因而从微观角度说明了其破坏的脆性特征,与宏观实验的观察结果是一致的。另外,还认为胞体的破坏一般起源于胞体壁的穿孔处,因为这里是应力集中源,也是胞体壁的最薄弱处。为了验证上述结论,又对高密度聚氨酯泡沫塑料进行了显微拉伸实验,在扫描电镜下对试件表面胞体的变形与失效过程进行了详细观察,得到的电镜照片示于图3中。可见,随着载荷的增加,泡沫塑料的胞体发

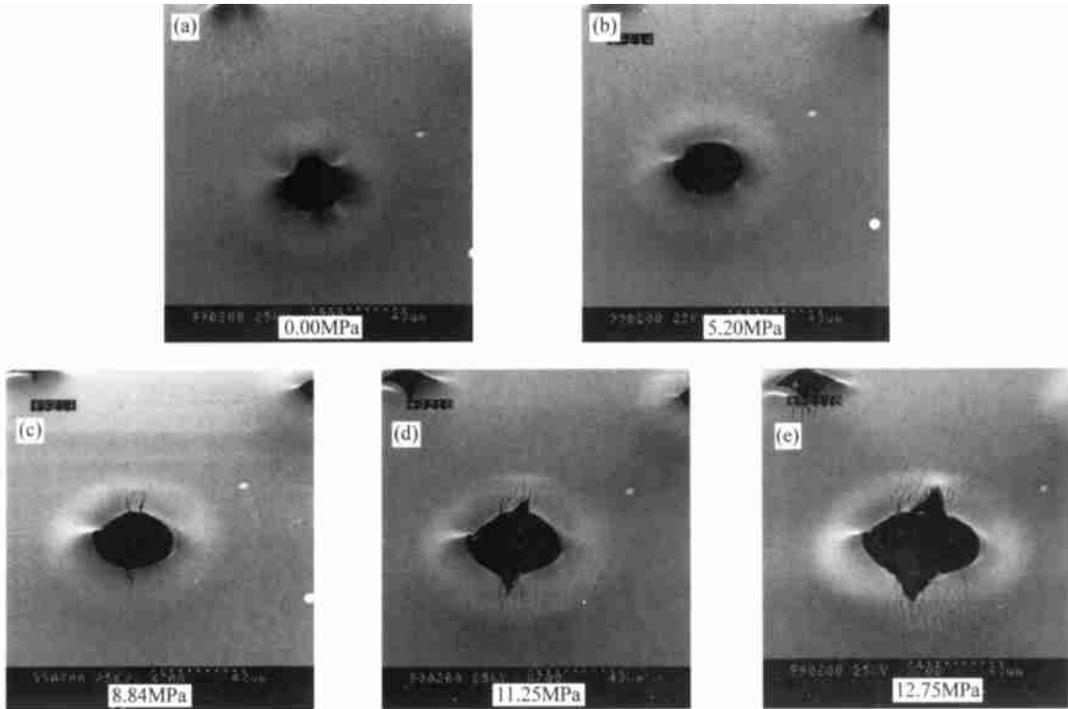


图3 拉伸实验中穿孔处尖角裂纹的产生及扩展(加载方向与裂纹扩展方向垂直)

Fig 3 The initiation and development of sharp crack at the edge of penetrating holes during tensile loading (loading direction is perpendicular to the direction of crack expanding)

生缓慢的变形, 并且沿加载方向被逐渐拉长, 胞体由圆形变成椭圆形。变形与破坏痕迹最明显的部位是胞体在发泡过程中产生的穿孔附近, 如图 3 所示。不难看出, 加载之初, 穿孔周围的胞壁被绷紧、变形, 然后, 随载荷增大在胞体穿孔壁上出现少量垂直于加载方向(见图 3(b))的细小裂纹。载荷的继续增加使这些裂纹中某一较大者首先扩展形成张开型尖角主裂纹, 而其它裂纹则基本不再张开。在尖角主裂纹扩展的同时, 尖角裂纹前方及其附近出现了更多的与拉伸方向垂直的细小裂纹, 尖角主裂纹汇合小裂纹群进一步前进, 向两边逐渐扩展延伸, 而细小裂纹的数量在裂尖附近大量萌生, 并迅速向两边蔓延, 有与附近其它穿孔处裂纹相连接的趋势。一般说来, 在较圆的穿孔处产生的尖角裂纹和细小裂纹比不太规则的穿孔处要晚一些, 少一些, 这是因为不太规则的穿孔周围存在的应力集中较大所致。另外, 根据电镜的观察还可看到, 未加载时, 材料中就有一些不规则的孔洞, 电镜下呈黑色, 它们是加工时切取较小的球冠而导致的结果, 形状的不规则性恰是加工应力产生的永久变形所致。这些孔洞的数量、大小在加载过程中有所增加, 材料显得更为疏松, 说明表面加工对材料的强度也有明显的影响。需说明的是: 在显微拉伸实验过程中, 试件的断裂都扩展得极为迅速, 在电镜下很难捕捉到导致试件断裂的裂纹扩展的全过程。由于导致断裂的裂纹扩展是在一瞬间完成的, 所以显微拉伸实验也说明了聚氨酯泡沫塑料在拉伸状态下的脆性变形特征。

综合上述宏、细观拉伸实验和拉伸断口的扫描电镜分析, 可知: 导致高密度硬质聚氨酯泡沫塑料失效的原因可能有: 穿孔边缘的张开型尖角裂纹的扩展及其附近细小裂纹群的蔓延, 最终导致相邻穿孔的彼此连通, 成为试件断裂的主要裂纹源; 材料表面加工形成的缺陷, 即不规则的孔隙在拉伸过程中不断增多, 并有相互连通的趋势, 所以它们也可能是一种导致试件破坏的裂纹源;

综合考虑拉伸断口的分析结果<sup>[3]</sup>, 类似于在泡沫塑料内部胞体壁上也会出现穿孔边缘的张开型尖角裂纹的扩展及其附近细小裂纹群的蔓延, 导致相邻穿孔的彼此连通, 从而对形成主裂纹有贡献。

### 3 拉伸本构关系的拟合

关于泡沫塑料的本构关系, 文献[4]进行了综述介绍。虽然国外对此问题进行了广泛研究, 并给

出了许多种不同应力-应变关系的具体形式, 但这一问题并没有得到实质性解决, 目前, 人们只能依赖于一些经验的或者半经验的本构关系形式。比如, Sherwood 和 Frost 在建立泡沫塑料本构关系时将环境温度和密度及应变率等因素考虑进去, 提出了如下更为全面的经验型本构关系

$$\sigma = H(T)G(\rho)M(\epsilon, \dot{\epsilon})f(\epsilon) \quad (1)$$

他们认为上式中环境温度  $T$  与密度  $\rho$  对应力的影响是单一的, 与应变  $\epsilon$  应变率  $\dot{\epsilon}$  基本上无关; 而  $M(\epsilon, \dot{\epsilon})$  则主要反映了应变率对应力的影响, 形状函数  $f(\epsilon)$  定义为在某一参考密度、参考温度、准静态加载下应力、应变的曲线函数, 它能很好地模拟材料变形的全过程。基于上述思想, 胡时胜等人拟合了他们的实验曲线, 给出了包含应变率效应的压缩本构关系<sup>[5]</sup>。类似地, 在已有硬质聚氨酯泡沫塑料拉伸实验数据的基础上, 可以拟合出包含应变率效应的拉伸本构关系。

首先, 在式(1)中若不考虑温度效应, 则有如下本构关系形式

$$\sigma = G(\rho)M(\epsilon, \dot{\epsilon})f(\epsilon) \quad (2)$$

关于应变率对应力的影响函数可由下式来拟合, 即

$$M(\epsilon, \dot{\epsilon}) = (\dot{\epsilon}/\dot{\epsilon}_0)^{n(\epsilon)} \quad (3)$$

其中:  $\dot{\epsilon}_0$  为准静态加载的应变率。在此取  $\dot{\epsilon}_0 = 1.0 \times 10^{-4}$ , 同时, 假设  $n(\epsilon)$  为线性函数, 即

$$n(\epsilon) = a\epsilon + b \quad (4)$$

而  $a, b$  为待定系数。关于密度对应力的影响函数在此简单定义为线性形式, 即

$$G(\rho) = c(\rho - \rho_0) + 1 \quad (5)$$

其中:  $\rho_0$  为参考密度, 本文取为  $0.480 \text{g/cm}^3$ 。利用  $\rho = \rho_0$  且  $\dot{\epsilon} = \dot{\epsilon}_0$  时的拉伸应力-应变曲线便可确定形状函数  $f(\epsilon)$  的形式, 即由式(2)可得  $\sigma = f(\epsilon)$ 。不妨假设形状函数  $f(\epsilon)$  用级数形式来近似, 即

$$f(\epsilon) = \sum_{i=1}^n A_i \epsilon^i \quad (6)$$

显然, 上述表达式中的参数越多, 则拟合效果会越好, 但相应地也增加了计算的复杂性。因此, 在保证精度的前提下需尽可能取较小的  $n$  值。根据图 4 的结果可见, 当  $n$  取为 6 时, 已达到很好的精度, 其中拟合的参数为:  $A_1 = 5.75755$ ;  $A_2 = 0.319490$ ;  $A_3 = -0.744776$ ;  $A_4 = 0.283260$ ;  $A_5 = -0.062482$ ;  $A_6 = 0.0061075$ 。

当取  $\dot{\epsilon} = \dot{\epsilon}_0$ , 但  $\rho \neq \rho_0$  时, 由式(2)得  $\sigma = G(\rho)f(\epsilon)$ 。在已知  $f(\epsilon)$  表达式的情况下便可拟合参数

c, 本文拟合的参数 c 为 1.803371。

当  $\rho = \rho_0$ , 但  $\dot{\epsilon} \neq \dot{\epsilon}_0$  时, 由式(2)可得  $\sigma = M(\dot{\epsilon}/\dot{\epsilon}_0)^c f(\epsilon)$ , 考虑式(3)和式(4)可得

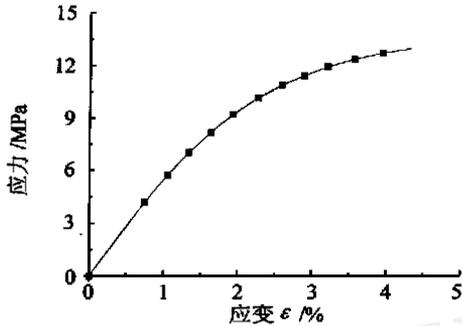


图4 n=6时拟合实验结果的形状函数  $\sigma = f(\epsilon)$

Fig. 4 The shape function  $\sigma = f(\epsilon)$  fitted by experimental data when  $n = 6$

$$\sigma = (\dot{\epsilon}/\dot{\epsilon}_0)^{ac+b} f(\epsilon) \quad (7)$$

由此可拟合参数 a 和 b, 最后经计算得到

$$a = -0.309461 \times 10^{-2} \text{ 和 } b = 0.436678$$

综上所述, 拟合不同密度, 不同应变率作用下的硬质聚氨酯泡沫塑料的拉伸本构关系为

$$\sigma = [c(\rho - \rho_0) + 1] (\dot{\epsilon}/\dot{\epsilon}_0)^{ac+b} A_i \epsilon^i \quad (8)$$

以上参数的拟合采用了最小二乘和回归分析的方法。为了检验上述本构关系的正确性, 本文通过实验数据进行了验证。图5(a)给出了密度为

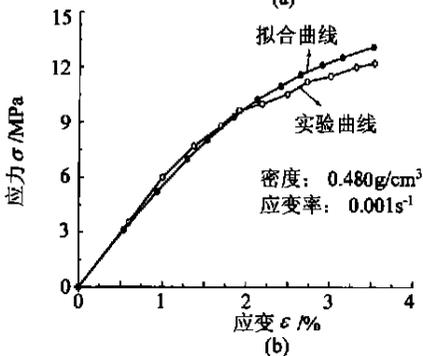
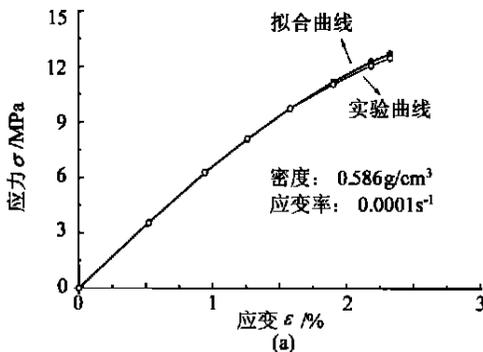


图5 实验曲线与数值拟合本构关系的比较

Fig. 5 The comparison of numerically fitting the constitutive relation with experimental curves

0.586g/cm<sup>3</sup>的泡沫塑料在应变率为  $\dot{\epsilon} = 1.0 \times 10^{-4}$  下的实验应力-应变曲线与数值拟合本构关系的比较, 而图5(b)则给出了密度为0.480g/cm<sup>3</sup>的泡沫塑料在应变率为  $\dot{\epsilon} = 1.0 \times 10^{-3}$  下的实验应力-应变曲线与数值拟合本构关系的比较。可见, 数值拟合拉伸本构关系与实验曲线有较好的一致性, 因此, 上述拟合泡沫塑料本构关系的方法对泡沫塑料的拉、压加载情况都是适用的。

致谢: 感谢中物院化工材料研究所王建华部长和刘小平工程师对本工作的大力支持。同时, 也感谢我的学生严寒冰、朱汪鲲和刘波对本文部分工作的积极参与。

### 参考文献

- [1] Gibson L J, Ashby M F. Cellular solids: Structures and Properties[Z]. Oxford: Pergamon Press, 1988
- [2] 卢子兴, 寇长河, 李怀祥. 泡沫塑料拉伸力学性能的研究[J]. 北京航空航天大学学报, 1998, 24(6): 646- 649. (Lu Z X, Kou C H, Li H X. Investigation into Tensile mechanical properties of PUR foam plastics [J]. Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics, 1998; 24(6): 646- 649.)
- [3] 卢子兴, 朱汪鲲, 寇长河, 等. 聚氨酯泡沫塑料的强度与断裂韧性[J]. 力学学报, 2000, 32(5): 625- 632. (Lu Z X, Zhu W K, Kou C H, et al. Investigation on the fracture properties of polyurethane rigid foam plastics [J]. Acta Mechanica Sinica, 2000; 32(5): 625- 632.)
- [4] 卢子兴, 王仁, 黄筑平, 等. 泡沫塑料力学性能研究综述[J]. 力学进展, 1996; 26(3): 306- 323. (Lu Z X, Wang R, Huang Z P, et al. A Review of studies on the mechanical properties of foam plastics [J]. Advances in Mechanics, 1996; 26(3): 306- 323.)
- [5] 胡时胜, 刘剑飞, 王悟. 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- 155. (HU S S, Liu J F, Wang W. Study of the constitutive relationship of rigid polyurethane foam [J]. Acta Mechanica Sinica, 1998; 30(2): 151- 155.)

作者简介:



卢子兴(1960-) 男, 博士, 河北枣强人, 北京航空航天大学固体力学研究所教授, 主要研究领域为多胞材料力学, 复合材料力学等。

(责任编辑: 李铁柏)