

# 聚氨酯泡沫塑料的强度与断裂韧性<sup>1)</sup>

卢子兴<sup>\*†</sup> 朱汪鲲<sup>†</sup> 寇长河<sup>†</sup> 高镇同<sup>†</sup>

<sup>\*</sup>(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)

<sup>†</sup>(北京航空航天大学固体力学研究所, 北京 100083)

**摘要** 针对 3 种密度的聚氨酯泡沫塑料进行了拉伸实验, 通过无缺口试件确定了 3 种密度泡沫塑料的拉伸断裂强度, 而利用有缺口试件确定了这些材料的拉伸断裂韧性. 为了研究高密度泡沫塑料的拉伸断裂机制, 还对破坏后试件进行了扫描电镜分析. 此外, 还简要讨论了泡沫塑料拉伸断裂力学性能的理论预测问题.

**关键词** 泡沫塑料, 力学性能, 强度, 断裂韧性, 电镜分析

## 引 言

泡沫塑料经常作为结构材料使用, 在使用过程中不可避免地经受拉伸载荷作用. 因此, 研究泡沫塑料的拉伸断裂力学性质具有十分重要的意义. 自 70 年代以来, 前人对这一问题进行了诸多研究, 但多数工作只讨论了较低密度泡沫塑料的断裂力学性能<sup>[1]</sup>. 考虑到高密度泡沫塑料在工程中的应用日益广泛, 并且其断裂特征明显不同于低密度泡沫塑料, 故研究较高密度泡沫塑料的拉伸及断裂力学性能非常必要. 本文通过三种密度的聚氨酯泡沫塑料试件(无缺口和有缺口)进行了拉伸实验, 确定了它们的拉伸断裂强度和拉伸断裂韧性. 此外, 还对试件断口进行了扫描电镜分析, 并简要讨论了泡沫塑料断裂韧性的理论预测问题.

## 1 实验内容及原理

本实验选用的 3 种泡沫塑料的平均密度为:  $308 \text{ kg/m}^3$ ,  $480 \text{ kg/m}^3$  和  $586 \text{ kg/m}^3$ . 拉伸试件分无缺口与有缺口两种, 其形状和尺寸如图 1 所示, 其中拉伸试件轴向与材料的发泡方向一致. 单边开口试件的缺口由刀片在试件中部人工引入. 为了通过单边开口试件获得泡沫塑料的拉伸断裂韧性, 本实验针对每一种密度材料制做了 5 种裂纹长度的试件 (3mm, 4mm, 5mm, 6mm 和 7mm), 每种裂纹长度取两个试件进行实验. 所有拉伸实验在 MTS 材料试验机上进行, 无缺口拉伸试件的变形由电子引伸仪测量.

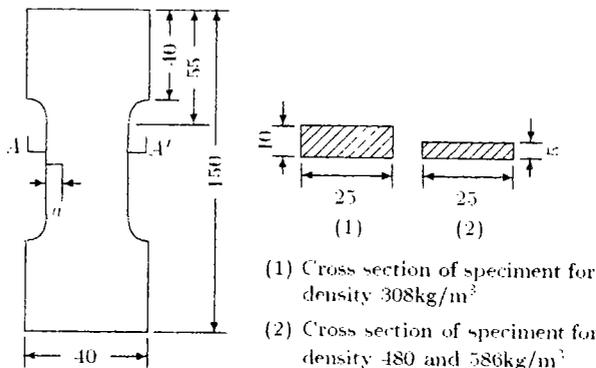


图 1 试件的形状和尺寸

Fig.1 The shape and size of specimen

泡沫塑料拉伸断裂韧性的测定依据如

1998-09-07 收到第一稿, 1999-03-16 收到修改稿.

1) 国家自然科学基金 (19672005) 和国防科技预研基金资助项目.

下原理, 即按照 Harris<sup>[2]</sup>所指出的, 对于单边开口试件, 在无弯条件下, 其断裂韧性可由下面公式得出

$$K_{Ic} = \sigma Y \cdot \sqrt{\pi a} \quad (1)$$

这里

$$Y = \frac{5}{[20 - 13(a/w) - 7(a/w)^2]^{1/2}} \quad (2)$$

其中  $a$  为初始裂纹长度,  $w$  为试件宽度,  $\sigma$  为名义拉伸断裂强度. 若将 (1) 式改写为

$$\sigma Y = K_{Ic} / \sqrt{\pi a} \quad (3)$$

则对  $\sigma Y$  和  $1/\sqrt{\pi a}$  的实验数据进行作图, 由线性拟合直线的斜率便可确定  $K_{Ic}$ .

## 2 实验结果及分析

### 2.1 拉伸断裂强度

通过无缺口试件的准静态拉伸实验可以得到 3 种密度泡沫塑料的拉伸应力 - 应变曲线, 由这

表 1 不同密度泡沫塑料拉伸力学性能的比较

Table 1 Comparison of tensile mechanical properties for different density foam plastics

Density (kg/m <sup>3</sup> )	Elastic modulus (MPa)	Tensile strength (MPa)	Failure strain (%)
308	277	5.5	3.1
480	563	12.0	3.3
586	667	13.5	2.8

些应力 - 应变曲线得到的材料拉伸力学性能列在表 1 中, 它们是 4 至 5 个试件的平均值. 比较 3 种密度泡沫塑料的力学性能可见, 泡沫塑料的弹性模量和拉伸断裂强度均随泡沫塑料密度的增加而增加, 而泡沫塑料的断裂应变随密度的变化似乎没有明显的规律性, 但它们的取值都很小, 均属于脆性破坏.

### 2.2 拉伸断裂韧性

通过有缺口试件的拉伸实验, 可以得到每个试件的名义拉伸断裂强度. 然后, 利用初始裂纹长度和试件宽度可得到  $\sigma Y$  和  $1/\sqrt{\pi a}$ , 依据上述原理得到的  $K_{Ic}$  列于表 2 中. 为说明实验结果的真实性, 图 2 给出了密度 480 kg/m<sup>3</sup> 泡沫塑料的拟合结果, 可见实验所得的  $\sigma Y$  和  $1/\sqrt{\pi a}$  之间确实保持良好的线性关系. 因此, 本文所得实验结果是可信性的. 此外, 由表 2 不难看出, 随着泡沫塑料密度的增大, 断裂韧性也随之增大.

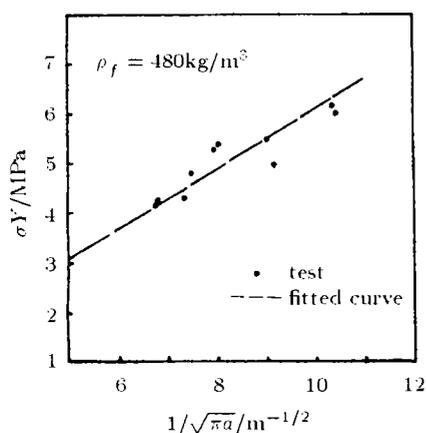


图 2  $\sigma Y$  与  $1/\sqrt{\pi a}$  之间的线性关系

Fig.2 Linear relation between  $\sigma Y$  and  $1/\sqrt{\pi a}$

表 2 不同密度泡沫塑料的断裂韧性实验值

Table 2 Experimental results of fracture toughness for different density foam plastics

$\rho/\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$	308	480	586
$K_{Ic}/10^5\text{N}\cdot\text{m}^{-3/2}$	3.11	6.05	6.58

### 2.3 断裂机理分析

根据宏观实验的观察, 不难确定: 较高密度聚氨酯泡沫塑料的抗拉伸能力一般较差, 室温下准静态拉伸的最大破坏应变约为 3% 左右, 材料的宏观破坏表现出明显的脆性特征, 断口基本上属于平直断口。为进一步揭示高密度聚氨酯泡沫塑料的拉伸断裂机制, 我们对拉伸试件断口进行了扫描电镜分析 (SEM)。图 3 为无缺口试件 (密度  $308 \text{ kg/m}^3$ ) 拉伸断口的形貌。从照片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, 因而从微观角度也说明了其破坏属于脆性的, 这与宏观观察结果一致。图 4 为相同密度材料有缺口试件的断口形貌。从照片上可以看出胞体壁产生了明显的畸变和破坏, 基体断裂表面处的光滑平坦也表现出其属于脆性破坏。另外, 胞体的破坏一般因应力集中产生于胞体壁的穿孔处。从照片中还可以看到, 基体材料表面尽管总体上是光滑的, 但也存在着部分区域凹凸不平的变形痕迹, 该痕迹可能是由于基体材料的塑性变形产生的。总之, 在缺口试件拉伸断裂过程中, 伴随着胞体壁的撕裂, 主裂纹将以不连续的方式得以扩展。虽然其总体上属于脆性断裂, 但在某些微小的局部也会产生塑性变形。

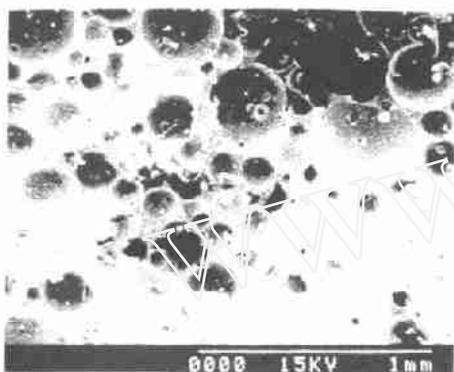


图 3 无缺口试件断口形貌

Fig.3 Fracture morphology of specimen without a notch



图 4 缺口试件断口形貌

Fig.4 Fracture morphology of specimen with a notch

### 3 理论预测值与实验值的比较

由文献 [3] 可知: 泡沫塑料拉伸断裂韧性  $K_{Ic}$  可由下式求得

$$K_{Ic} = \sigma_f \sqrt{\pi \cdot l} \quad (4)$$

其中  $\sigma_f$  为泡沫塑料的拉伸断裂强度,  $l$  为材料的平均胞体尺寸。若将硬质泡沫塑料的屈服强度作为它的拉伸断裂强度, 则拉伸断裂强度  $\sigma_f$  可由下述公式预测

$$(\sigma_f/\sigma_p) = [(2A - B + \sqrt{B^2 - 4AC})/2A] \{ [1 + 3(2A - B + \sqrt{B^2 - 4AC}) \times (1 - \rho_f/\rho_0)/(8A\rho_f/\rho_0)]^2 + 25[(1 - \rho_f/\rho_0)^2/48(\rho_f/\rho_0)^2] \times [(2A - B + \sqrt{B^2 - 4AC})/2A]^2 \}^{-\frac{1}{2}} \quad (5)$$

其中  $\sigma_p$  为修正的基体拉伸断裂强度, 而  $A, B, C$  为仅与相对密度  $\rho_f/\rho_0$  有关的参数 [4]。若基体

材料的理想拉伸断裂强度取为 127 MPa, 基体材料密度  $\rho_0$  取为  $1200 \text{ kg/m}^3$  [5], 则将泡沫塑料的密度  $\rho_f$  代入 (5) 式便可得泡沫塑料拉伸断裂强度的理论预测值 (见表 3). 而按已有实验资料 [6] 和文献 [7] 不难确定如下经验公式可用于估计本文所用泡沫塑料的胞体尺寸

$$l = 4.83\rho^{-0.52} \quad (6)$$

其中  $l$  的单位是 mm, 密度的单位为  $\text{kg/m}^3$ . 显然, 利用公式 (4)~(6) 便可对泡沫塑料的拉伸断裂韧性进行理论预测 (见表 3). 通过表 1 和表 3 的对比不难发现, 拉伸断裂强度的实验值和理论预测值基本一致. 这里需要指出, 对泡沫塑料拉伸断裂强度的预测使用了修正后的基体材料强度. 所以要对基体材料的拉伸强度进行修正, 主要考虑到实际泡沫塑料的基体在其发泡过程中会产生内部缺陷, 它们会明显降低基体材料的实际强度 [8]. 另外, 对比表 2 和表 3 不难发现, 表 3 给出的泡沫塑料拉伸断裂韧性较实验值小得多, 为得到较为满意的预测结果需要再对断裂韧性的预测公式进行修正, 该修正反映了泡沫塑料的塑性变形和胞体的畸变及尺寸等因素对断裂韧性的影响. 不难验证, 若取修正系数为 1.65 可以给出较好的预测结果. 有趣的是上述修正相当于直接使用基体材料的理想强度来计算泡沫塑料的断裂强度. 因此, 本文得到的

另外一条重要结论是: 基体材料内部的微缺陷对泡沫塑料的实际强度存在较大影响, 但对泡沫塑料的断裂韧性基本没有什么影响. 图 5 给出了经修正后的理论预测结果与实验值的比较, 可见符合得还是比较好的. 最后, 需要指出的是: 上述胞体尺寸和密度的关系是一个经验关系, 对于不同工艺制作的泡沫塑料需要采用不同关系式来计算.

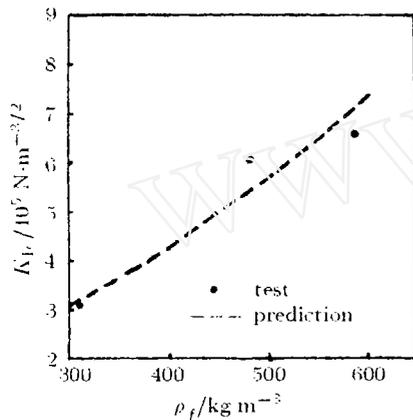


图 5 理论预测与实验值的比较  
Fig. 5 Comparison between theoretical prediction and experiment

表 3 泡沫塑料拉伸力学性能的理论预测值  
Table 3 Theoretical predictions for tensile mechanical properties of foam plastics

$\rho/\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$	308	480	586
$\sigma_f/\text{MPa}$	7.0	13.2	18.3
$K_{Ic}/10^5 \text{ N}\cdot\text{m}^{-3/2}$	1.94	3.27	4.30

#### 4 结 论

- 1) 聚氨酯泡沫塑料的弹性模量和拉伸断裂强度均随泡沫塑料密度的增加而增加.
- 2) 聚氨酯泡沫塑料的断裂韧性也随材料密度的增大而增大.
- 3) 扫描电镜分析表明: 泡沫塑料的胞体破坏一般起始于胞体壁的穿孔处; 在拉伸断裂过程中, 伴随着胞体壁的撕裂, 主裂纹将以不连续的方式得以扩展; 从细观角度来看, 泡沫塑料的破坏基本上也属于脆性断裂.
- 4) 泡沫塑料的断裂韧性与材料的胞体尺寸密切相关.
- 5) 基体材料内部的微缺陷 (或孔洞) 对泡沫塑料的实际强度有较大影响, 而对泡沫塑料的断裂韧性基本没有什么影响.

## 参 考 文 献

- 1 卢子兴, 王仁, 黄筑平等. 泡沫塑料力学性能研究综述. 力学进展, 1996, 26(3): 306~323 (Lu Zixing, Wang Ren, Huang Zhuping. A review of studies on the mechanical properties of foam plastics. *Advances in Mechanics*, 1996, 26(3): 306~323 (in Chinese))
- 2 McIntyre A, Anderton, GE. Fracture properties of a rigid polyurethane foam over a range of densities. *Polymer*, 1979, 20: 247~253
- 3 Lu Zixing, Gao Zhentong. The theoretical prediction of fracture strength and fracture toughness for high-density rigid foam plastics. APCSMS'96. Beijing: Int Acad Publishers, 1996. 132~137
- 4 卢子兴, 寇长河, 李怀祥. 泡沫塑料拉伸力学性能的研究. 北京航空航天大学学报, 1998, 24(6): 646~649 (Lu Zixing, Kou Changhe, Li Huaixiang. Investigation into tensile mechanical properties of PUR foam plastics. *Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics*, 1998, 24(6): 646~649 (in Chinese))
- 5 Gibson LJ, Ashby MF. Cellular solids: structures & properties, Oxford: Pergamon Press, 1988
- 6 卢子兴, 李怀祥, 田常津. 聚氨酯泡沫塑料胞体结构特性的确定. 高分子材料科学与工程, 1995, 11(2): 86~91 (Lu Zixing, Li Huaixiang, Tian Changjin. Determination of cell structural characteristics of polyurethane foam plastics. *Polymeric Mat Sci & Eng*, 1995, 11(2): 86~91 (in Chinese))
- 7 Dawson JR, Shortall JB. The microstructure of rigid polyurethane foams. *J Mat Sci*, 1982, 17: 220~224
- 8 Lu Zixing, Gao Zhentong. Theoretical prediction for Young's modulus and yield strength of high-density foamed plastics. *Science in China (Series E)*, 1998, 41(3): 271~279

## INVESTIGATION ON THE FRACTURE PROPERTIES OF POLYURETHANE RIGID FOAM PLASTICS <sup>1)</sup>

Lu Zixing\*<sup>†</sup>    Zhu Wangkun<sup>†</sup>    Kou Changhe<sup>†</sup>    Gao Zhentong<sup>†</sup>

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

<sup>†</sup> (Institute of Solid Mechanics, Beijing University of Aeronautics and Astronautics, Beijing 100083, China)

**Abstract** As one kind of structural material, it is indispensable to undergo tensile loading in use for high-density foam plastics. So, it is an important work to investigate its tensile fracture properties and to determine its tensile fracture strength as well as the fracture toughness for engineering applications. In this paper, the tensile experiments have been done for the polyurethane rigid foam plastics of three different densities. Their tensile fracture strength and fracture toughness were determined by specimens without and with a notch, respectively. In order to investigate the tensile fracture mechanism, the SEM analyses have been conducted for the broken specimens. In addition, the theoretical prediction for fracture toughness of polyurethane rigid foam plastics is also discussed in this paper. Finally, the following conclusions can be drawn:

1) The Young's modulus and tensile fracture strength of polyurethane rigid foam plastics increase with its density.

Received 7 September 1998, revised 16 March 1999.

1) The project supported by the National Natural Science Foundation of China (19672005).

2) The fracture toughness of polyurethane rigid foam plastics also increases with its density.

3) It is shown by SEM analyses that the cell failure of foam plastics generally originates from the edge of penetrating holes on the cell wall and its breaking basically belongs to one kind of brittle fracture.

4) The fracture toughness of polyurethane rigid foam plastics has a direct bearing on the cell size of it.

5) The micro-defects (or voids) exert a larger effect on the practical strength of foam plastics, but they hardly affect its fracture toughness.

**Key words** foam plastics, mechanical properties, strength, fracture toughness, SEM analyses

www.cnki.net