聚氨酯泡沫塑料剪切力学性能的研究[1)]

卢子兴 谢若泽 田常津
(北京航空航天大学 飞行器设计与应用力学系) (中国工程物理研究院 结构力学所)
刘小平 李怀祥
(中国工程物理研究院 化工材料研究所)

摘 要 对聚氨酯泡沫塑料进行了低速扭转实验,研究了这类材料的剪切力学行为,确定了材料的剪切弹性模量和剪切破坏强度等力学性能参数. 并且,对扭转试件断口进行了扫描电镜分析,研究了泡沫塑料剪切破坏的机制. 最后,利用作者得到的理论公式,对聚氨酯泡沫塑料的剪切力学性能进行了理论预测. 结果表明,理论预测值与实验结果相当一致.

关键词 泡沫塑料; 扭转实验; 力学性能实验; 扫描电镜
分类号 O 341; TB 33; TQ 328

泡沫塑料是人造多胞材料,相对密度低,比模量、比强度高是这种材料的一种重要力学属性. 它除了具有广泛的民用价值外,在国防工业各部门也有许多重要的应用[1].

国外自 50 年代末就开始了这一领域的研究,至今已有较大发展. 国内对泡沫塑料力学性能的研究起步较晚,但这方面的工作近年来得到了广泛的重视,目前已发表了不少泡沫塑料力学性能的研究论文[2]. 然而,现有结果主要是关于泡沫塑料拉、压力学性能的,较少涉及这种材料的剪切力学性能[3~6].

但是,随着高密度泡沫塑料在军用和民用结构上的广泛应用,聚氨酯泡沫塑料作为重要的填充材料,其抵抗剪切变形和破坏的能力日益受到工程界的关注. 因此,研究较高密度泡沫塑料在剪切变形下的破坏性质及其规律性是十分必要的. 本文首先对高度聚氨酯泡沫塑料进行了低速扭转实验,研究了这类材料的剪切力学行为,确定了材料的剪切弹性模量和剪切破坏强度等力学性能参数. 之后,对扭转试件断口进行了扫描电镜分析,研究了泡沫塑料剪切破坏的机制. 最后,利用作者得到的理论公式,对聚氨酯泡沫塑料的剪切力学性能进行了理论预测. 结果表明,理论预测值与实验结果是一致的.

1 实验描述

本实验选用 2 种泡沫塑料试件(实心试件和空心试件),其平均密度分别为: 0.29 g/cm^3 和 0.49 g/cm^3. 扭转试件为哑铃状圆柱试件,其轴向与材料的发泡方向一致. 空心圆柱试件的内径为 15 mm,外径与实心圆柱试件相同(25 mm). 低速扭转实验在 NJ-50B 扭转实验机上进行,扭转变形由实验机记录. 为获得较为准确的剪切模量测试值,在小变形范围内还采用 415 型镜式引伸仪测量了扭转角,测量时所取标距长度为 50 mm. 实验过程中,扭转加载分 2 种角速度,对应的剪切应变率大约为: 0.4×10^{-4} rad/s 和 1.6×10^{-3} rad/s. 针对 2 种密度的硬质聚氨酯泡沫塑料,本文根据扭转实验获得了实心和空心泡沫塑料试件的全程扭矩-扭转角关系曲线. 基于这些曲线,采用圆柱体扭转的弹性理论公式近似处理了实验结果,得到了 2 种密度硬质聚氨酯泡沫塑料的剪切应力-应变曲线和相关的力学性能参数.

2 实验结果

图 1 给出了 2 种密度聚氨酯泡沫塑料在扭转变形下的剪切应力-应变曲线. 由于泡沫塑料破坏时,变形并不大,断面形状为螺旋状曲面,与铸铁的扭转断口十分相似,故基本上属于脆性破坏. 因此,本文在进行应力分析时,仍假设泡沫塑料试件在扭转变形下横截面上的剪应力呈线性分布,这样扭转剪应力就可 按圆柱体的扭转公式来计算. 而扭转剪应变则根据实验测量的扭转

收稿日期: 1998-07-23 第一作者 男 38 岁 副教授 100083 北京
1) 国家自然科学基金(19672005),中国工程物理研究院科学技术基金(960318)和中科院力学研究所 LNM 开放实验室基金资助项目

角,由扭转变形分析经一定换算得到.图1给出的剪切应力-剪应变曲线代表了圆柱试件表层材料的应力-应变行为.可见,聚氨酯泡沫塑料在剪切变形下的应力-应变关系具有明显的非线性特征,曲线的形状类似于相同材料的拉伸应力-应变曲线,基本上分为2个变形区域:线性区和非线性区.根据线性区的剪应力和剪应变可确定材料的剪切模量值,而根据非线性区的最大应力值可定义材料的极限剪切强度.由(4至5个实心及空心泡沫塑料试件的)实验曲线得到的泡沫塑料剪切弹性模量、剪切破坏强度和剪切断裂应变值的平均值示于表1中.对比表1的结果可见:由空心泡沫塑料试件得到的剪切模量略大于实心泡沫塑料试件的相应结果,而由空心泡沫塑料试件得到的剪切破坏强度略小于实心泡沫塑料试件的相应结果.此外,2种试件的断裂应变值也略有差异,空心泡沫塑料试件得到的结果偏小.导致上述2种泡沫塑料试件力学性能差异的原因可能是加工过程对表面性能的影响.空心泡沫塑料试件因增加了加工表面,所以可能导致材料的表面硬化,从而增加了试件的刚度;同时,加工也会导致泡沫塑料试件表面的损伤,这样又降低了材料的强度.由图1不难得知,泡沫塑料的密度仍是影响这类材料剪切力学行为的重要参数.同时,得到的另一个结论是:空心泡沫塑料试件与实心泡沫塑料试件的剪切应力-应变曲线非常接近,说明硬质聚氨酯泡沫塑料的扭转破坏主要由圆柱体最外层材料的强度所控制.因此,空心泡沫塑料试件可以更好地发挥材料的效能.关于这一点,由表1给出的实验结果也不难看出.

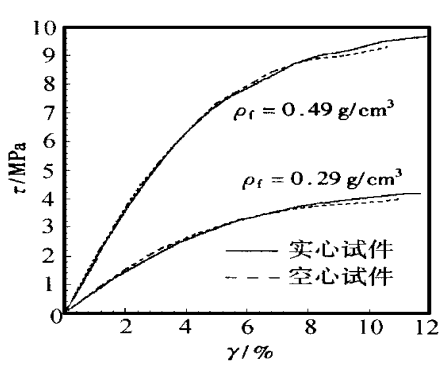


图1 泡沫塑料剪切应力-应变曲线

除了研究实心和空心试件对泡沫塑料剪切力学性能的影响外,本文还研究了扭转速率对材料剪切力学性能的影响.图2给出了2种密度的实心泡沫塑料试件在不同扭转速率下的剪切应力-应变曲线.其中实线对应较高扭转速率,而虚线对应较低扭转速率.可见,聚氨酯泡沫塑料在剪切变形下也存在明显的应变率效应,并且随泡沫塑料密度的提高,这种效应变得更为明显.这一结果同泡沫塑料在压缩和拉伸加载下的结论基本相同.因此,在建立聚氨酯泡沫塑料的本构关系时,应计及应变率效应的影响,并考虑应变率效应同泡沫塑料密度的相关性.

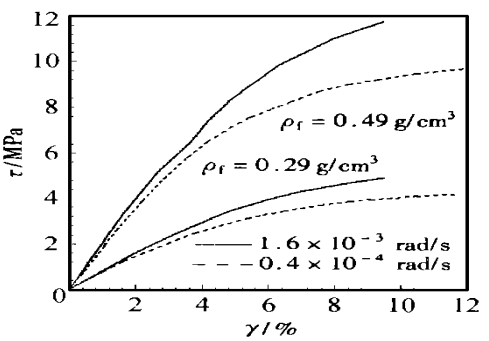


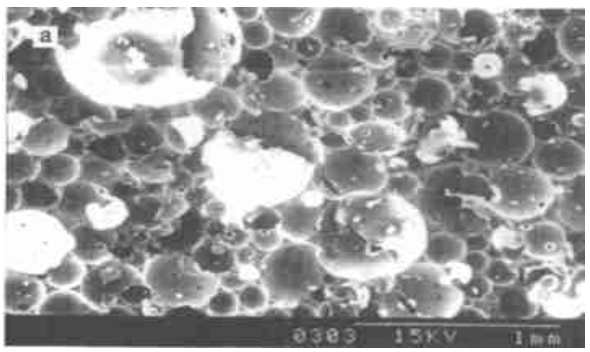
图2 不同变形速率对应力-应变曲线的影响

此外,通过实验得到的另一结论是:泡沫塑料的断裂应变几乎与材料的密度无关(见表1),但加载速率的提高却明显地使材料变脆.

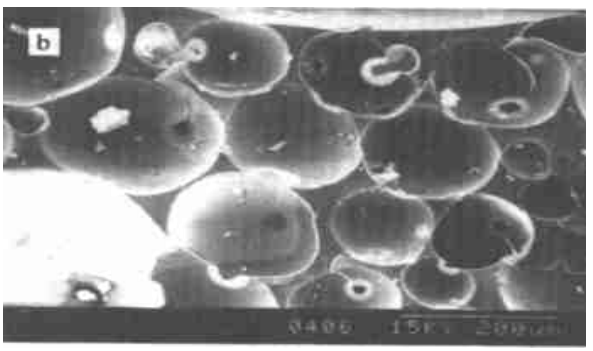
表1 泡沫塑料的扭转力学性能

材 料	剪切模量/MPa	剪切强度/MPa	断裂剪应变/%
W-0.3 实心	80.0	4.38	11.51
W-0.3 空心	86.0	4.26	10.76
W-0.5 实心	194.4	10.09	11.84
W-0.5 空心	211.5	10.08	11.50

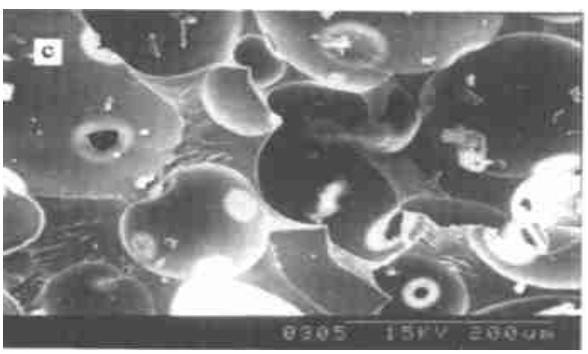
为了认识硬质聚氨酯泡沫塑料在准静态加载下变形和破坏的机制,作者对准静态扭转试件的断口进行了扫描电镜分析,照片示于图3中.图3a为密度0.3 g/cm³的泡沫塑料扭转破坏的断口形貌.因为泡沫塑料的断口是接近45°的螺旋面,所以其破坏主要是拉伸应力造成的.破坏面内存在裂纹说明压缩应力对破坏也产生影响.关于这一点,破坏面内的胞体形状发生明显畸变就是例证.另外,因为泡沫塑料的剪切强度明显低于材料的纯拉伸断裂强度,并且主方向的断裂应变明显大于纯拉伸时的断裂应变[7],所以断裂面内的压缩应力确实对泡沫塑料的变形和破坏有影响.图3b,图3c为局部放大的照片,可以更清楚地看到胞体畸变和胞体塌陷的情况.断裂面内的胞体畸变主要是压缩应力造成的,胞体壁上的裂纹经过穿孔处,说明泡沫塑料的穿孔处仍然是最薄弱处,并且穿孔处存在明显的应力集中.因此,泡沫塑料的扭转破坏或剪切破坏仍是从材料内最薄弱处(穿孔处)起始的,压缩应力产生的胞体壁的破坏为加速材料的整体破坏准备了条件.因而,泡沫



a 扭转破坏断口形貌($\rho_f = 0.3\,g/cm^3$)



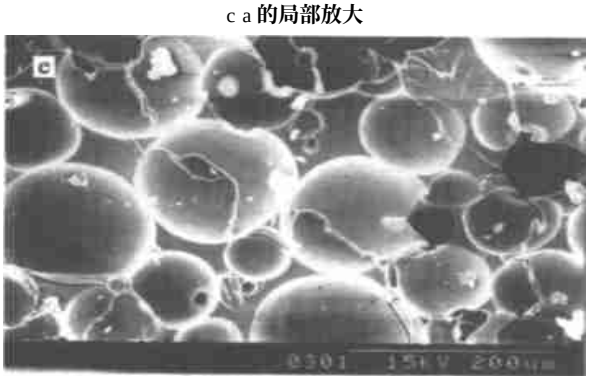
b a 的局部放大



c a 的局部放大



d 胞体壁的裂开形貌



e 扭转破坏断口形貌($\rho_f = 0.5\,g/cm^3$)



f 扭转破坏断口形貌($\rho_f = 0.5\,g/cm^3$)

图 3　扫描电镜照片

塑料在纯剪切应力状态下,比纯拉伸应力状态下更易于破坏. 图 3d 为胞体壁在压缩应力下裂开的照片,裂纹通过穿孔处并与相邻胞体裂纹相连. 根据图 3b,图 3c,图 3d 可知,泡沫塑料在纯剪切应力状态下破坏时,基体材料的破坏基本上属于脆性破坏,但也存在明显的塑性变形痕迹. 图 3e 和图 3f 是密度 0.5 g/cm^3 的泡沫塑料扭转破坏的断口照片,可见断面上也存在与低密度泡沫塑料破坏相同的断口特征,同时,断口也显示出基体材料的破坏存在明显的塑性变形痕迹. 对此这里不再赘述.

3　剪切力学性能的理论预测

3.1　剪切模量的预测

基于文献[6]的结果,泡沫塑料的剪切模量可用如下公式估算:

$$G_f = G_m\left(\frac{2A - B + \sqrt{B^2 - 4AC}}{2A}\right) \qquad (1)$$

其中

$$A = 48 + 200\left(1 - \frac{\rho_f}{\rho_m}\right) - 336\left(1 - \frac{\rho_f}{\rho_m}\right)^{\frac{5}{3}} + 225\left(1 - \frac{\rho_f}{\rho_m}\right)^{\frac{7}{3}} + 38\left(1 - \frac{\rho_f}{\rho_m}\right)^{\frac{10}{3}}$$

$$B = 105 + 150\left(1 - \frac{\rho_f}{\rho_m}\right) + 95\left(1 - \frac{\rho_f}{\rho_m}\right)^{\frac{10}{3}}$$

$$C = 175\left(1 - \frac{\rho_f}{\rho_m}\right)$$

式中　G_f 和 G_m 分别为泡沫塑料和基体材料剪切

弹性模量;ρ_f 和 ρ_m 分别为泡沫塑料和基体材料密度.假设基体材料是不可压缩的,则可由聚氨酯基体材料的杨氏模量获得其剪切模量为 811 MPa.另外,已知聚氨酯基体材料的密度为 1.2g/cm^3.利用聚氨酯泡沫塑料的实测密度值(0.29 g/cm^3 和 0.49 g/cm^3)和上述参数,可得 2 种密度泡沫塑料剪切模量的理论预测值为 85 MPa 和 181 MPa.将其同表 1 给出的实验值相比较,可见预测值与实验值比较接近.

3.2 剪切强度的预测

基于文献[6]提供的单轴加载下泡沫塑料的应力分析公式,通过进一步推导可获得泡沫塑料在纯剪切应力状态下的应力分布公式,据此得到的泡沫塑料剪切强度的预测公式为

$$\frac{\tau_f}{\tau_m} = \frac{G_f}{G_m}\left[1 + \frac{19}{6}\frac{G_f}{G_m}\frac{(\rho_m - \rho_f)}{\rho_f} + \frac{109}{36}\left(\frac{G_f}{G_m}\right)^2\left(\frac{\rho_m - \rho_f}{\rho_f}\right)^2\right]^{-\frac{1}{2}} \tag{2}$$

其中 $\frac{G_f}{G_m}$ 的值由式(1)决定;τ_f,τ_m 为泡沫塑料和基体材料的剪切强度.若假定基体材料的强度满足 Mises 屈服条件,则有 $\tau_m = \frac{\sigma_m}{3}$.根据文献[4]提供的资料,硬质聚氨酯泡沫塑料基体材料的屈服强度是 127 MPa.将 2 种泡沫塑料的密度和相关材料参数代入(1)式和(2)式可得泡沫塑料剪切强度预测值为 5.00 MPa 和 10.69 MPa.对比表 1 的实验值,可见本文给出的理论公式可较好地预测泡沫塑料的剪切破坏强度.

4 结 论

1) 泡沫塑料的密度仍是影响这类材料剪切力学行为的重要参数;硬质聚氨酯泡沫塑料的扭转破坏主要由圆柱体最外层材料的抗拉强度所控制,这种材料在扭转变形下基本上属于脆性破坏.

2) 聚氨酯泡沫塑料在剪切变形下也存在明显的应变率效应,并且,随泡沫塑料密度的提高,这种效应更为明显.

3) 基于本文提出的泡沫塑料剪切弹性模量和剪切强度的预测公式可获得与实验值相当一致的预测结果.

参 考 文 献

1 方禹声,朱吕民主编. 聚氨酯泡沫塑料. 北京:化学工业出版社,1984

2 卢子兴,赵明洁. 泡沫塑料力学性能研究进展. 力学与实践,1998,20(2):1～9

3 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

4 Gibson L J, Ashby M F. Cellular solids: structures and properties. Oxford: Pergamon Press, 1988

5 Hilyard N C. Mechanics of cellular plastics. London: Appl Sci Publishers, 1982

6 卢子兴,高镇同. 高密度泡沫塑料模量和屈服强度的理论预测. 中国科学(E),1997,27(4):318～324

7 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

Investigation into Shear Mechanical Properties of PUR Foamed Plastics

Lu Zixing

(Beijing University of Aeronautics and Astronautics, Dept. of Flight Vehicle Design and Applied Mechanics)

Xie Ruoze Tian Changjin (Southwest Institute of Structural Mechanics)

Liu Xiaoping Li Huaixiang (Southwest Institute of Chemical Materials)

Abstract The polyurethane rigid foamed plastics are important light structural materials. To investigate their shear mechanical properties is quite necessary for their applications. By the low speed torsional experiments of PUR foamed plastics, their shear mechanical behavior has been studied here. With these experiments, their shear properties such as the shear modulus and strength of PUR foamed plastics have been determined. Furthermore, the fracture surface SEM analyses of PUR foamed plastics have also been done to investigate the mechanism of shear failure in foamed plastics. Finally, the theoretical predictions for shear mechanical properties of PUR foamed plastics are given by means of author's theoretical formulae. The predicted results agree quite well with the experimental results. Particularly, some results obtained in this paper are firstly reported.

Key words foamed plastics; torsion tests; mechanical property tests; SEM