玻璃纤维束增强聚氨酯泡沫的拉压力学性能

卢子兴 邹 波 李忠明

(北京航空航天大学 航空科学与工程学院，北京 100191) (四川大学 材料科学与工程学院，成都 610064)

芦 艾

(中国工程物理研究院 化工材料研究所，绵阳 621900)

摘 要：通过对普通聚氨酯泡沫塑料和纤维束增强聚氨酯泡沫塑料的准静态拉伸和压缩实验，研究了不同密度和纤维束质量填充比对材料力学性能的影响. 实验观察表明，拉伸试件沿垂直载荷方向断裂，呈脆性破坏特征；而压缩破坏试件表面存在着斜向裂开的小块体. 实验结果表明，纤维束增强泡沫塑料的应力-应变曲线具有与普通泡沫塑料相同的特征；纤维束能够有效提高材料的模量和强度；材料密度越大，纤维束和树脂基体的体积含量越高，增强效果越好.

关 键 词：玻璃纤维束；泡沫塑料；准静态；拉伸性能；压缩性能

中图分类号：TB 332；O 341

文献标识码：A **文 章 编 号**：1001-5965(2009)01-0036-04

Tensile and compressive mechanical properties of polyurethane foam plastics reinforced by glass fiber bundles

Lu Zixing Zou Bo

(School of Aeronautic Science and Engineering, Beijing University of Aeronautics and Astronautics, Beijing 100191, China)

Li Zhongming

(College of Materials Science and Engineering, Sichuan University, Chengdu 610064, China)

Lu Ai

(Institute of Chemical Materials, Academy of Engineering Physics of China, Mianyang 621900, China)

Abstract: The quasi-static tensile and compressive experiments were performed in order to investigate the mechanical properties of conventional polyurethane foam plastics and reinforced ones by glass fiber bundles. The influence of material density and mass content of glass fiber bundles on mechanical properties was analyzed. It is observed from tests that the tensile samples happen to fracture suddenly along perpendicular direction with loading, which appears to be a brittle break. And the compressive rupture samples exist obliquely chapped block on the surface of cylinder. The experimental results show that the stress-strain curves of reinforced foams plastics are same with those of conventional foams. The young's modulus and strength of the material can be improved by glass fiber bundles. If the density of the material is larger, and the volume fraction of the resin matrix as well as the glass fiber bundles is higher, the reinforced effect on the resin matrix by glass fiber bundles will be better.

Key words: glass fiber bundles; foam plastics; quasi-static; tensile properties; compressive properties

收稿日期：2008-01-25

基金项目：国家自然科学基金资助项目(10572013)；北京市教育委员会共建资助项目(XK100060522)

作者简介：卢子兴(1960－)，男，河北枣强人，教授，luzixing@buaa.edu.cn.

纤维增强泡沫塑料是一种新型的轻质复合材料,通过填充纤维能够使材料获得比普通泡沫塑料更好的物理、力学性能,从而在航空、航天、航海和民用等工程领域得到更好的应用.虽然纤维增强泡沫塑料的研究起始于上世纪 70 年代[1],但直到最近该研究才成为人们关注的热点.为此,国内的学者对纤维增强泡沫塑料的制备工艺、微观结构和力学性能的研究进行了较为系统的总结[2-3].近来,国外的工作主要有:文献[4]研究了短纤维增强环氧泡沫塑料的压缩、剪切性能和热稳定性能,分析了不同类型纤维、纤维含量和长度对材料性能的影响.此外,他们[5]还利用统计回归的方法拟合了压缩模量和强度与密度、纤维质量分数和纤维长度间的函数关系式.文献[6]研究了芳香尼龙纤维增强酚醛泡沫的压缩性能和剪切性能,并同未增强泡沫的性能进行了比较.此外,纤维与微珠或不同纤维混杂增强泡沫塑料的研究最近也引起人们的注意,例如,文献[7]研究了碳纤维含量和长度对酚醛微珠/环氧复合泡沫的拉伸、断裂和热性质的影响.而文献[8]研究了不同玻璃纤维填充比对玻璃微珠/环氧复合泡沫弹性行为的影响.文献[9]的研究表明,碳纤维和玻璃纤维混杂增强聚丙烯泡沫塑料的效果高于单一短纤维,并且表观密度对其力学性能有显著的影响.

目前,人们对单丝纤维增强泡沫塑料的微观形态和材料性能研究得较多,而对纤维束填充中、高密度泡沫塑料的增强效果,特别是拉伸性能的分析相对较少[10-12].本文制备了不同密度和纤维束质量填充比的短切玻璃纤维束增强硬质聚氨酯泡沫塑料,并通过对其宏观准静态拉伸和压缩实验结果的分析和破坏形貌的观察,探讨了不同密度和纤维束质量填充比对材料整体力学性能的影响,研究了纤维束对聚氨酯泡沫塑料的改性效果.

1　实验描述

实验所用普通聚氨酯泡沫塑料和纤维束增强聚氨酯泡沫塑料经注模成型工艺制得.材料密度在 0.3 和 0.5 g/cm^3 左右.为便于描述,分别将其称为中密度和高密度材料.玻璃纤维束的长度约为 3 mm 左右,质量填充比为 5% 和 10% 两种.宏观准静态拉伸采用哑铃形板状试件,厚度为 5 mm,尺寸如图 1 所示.宏观准静态压缩采用 ϕ20 mm×20 mm 的圆柱形试件.拉、压试件的特征尺寸远大于胞体的平均尺寸(约 20 倍)以保证实验结果具有统计意义,且拉、压试件的轴向与发泡方向一致.

实验在北航固体力学研究所 MTS880-50KN 材料试验机上进行.拉、压变形速率分别为 0.5 和 4 mm/min.在室温条件下,分别获得了材料的拉伸和压缩曲线,最后换算成工程应力-应变曲线.为了得到较为可靠的实验数据,取 3 至 4 个实验结果的平均值代表材料的力学性能.

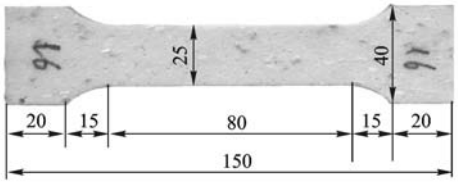

图 1　拉伸试件的尺寸(mm)和形状

2　实验结果和讨论

图 2 给出了普通泡沫塑料和增强泡沫塑料的拉伸应力-应变曲线的对比.可见,不同密度和纤维质量填充比下的硬质聚氨酯泡沫塑料都经历了两个阶段,即初始的线弹性变形和随后的非线性应变软化阶段,直至断裂.相对而言,在填充纤维束后,材料的拉伸断裂应变明显低于普通泡沫塑料,这与纤维降低材料的变形能力[10]以及纤维束和胞体壁弹性不匹配产生应力集中,从而更易发生断裂有关.特别是分布在垂直载荷方向平面内的纤维束,由于界面粘结强度不足往往更易发生脱粘,从而形成缺陷,引发的裂纹扩展导致最终的破坏.

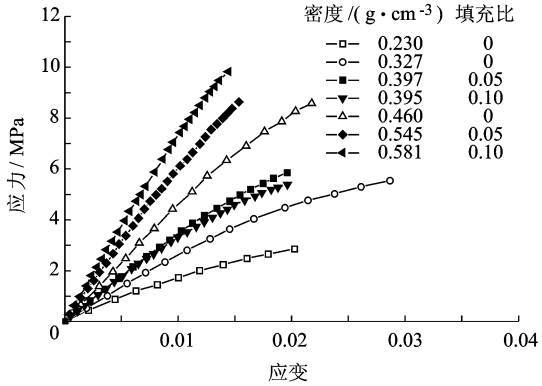

图 2　增强泡沫塑料的拉伸应力-应变曲线

图 3 给出了普通泡沫塑料和增强泡沫塑料的压缩应力-应变曲线的比较.与拉伸情况不同的是,增强聚氨酯泡沫塑料的压缩应力-应变曲线具有 3 个不同的区域,即弹性区、屈服区(平台区)和压实区,这与普通泡沫塑料的压缩变形特征是完全相同的.当压缩应变小于 5% 时,材料处于弹性区,纤维束和周围被增强的胞体壁发生弹性变形;随着载荷的进一步增加,出现应力平台区,此时胞

体壁，尤其是穿孔处将发生破坏，较薄的胞体壁还将发生屈曲[12]. 此外，还伴随有纤维束与树脂界面脱粘引发的裂纹扩展；随着胞体壁及其支撑纤维束的进一步被压坏，材料最终进入应力随变形增长较快的压实区.

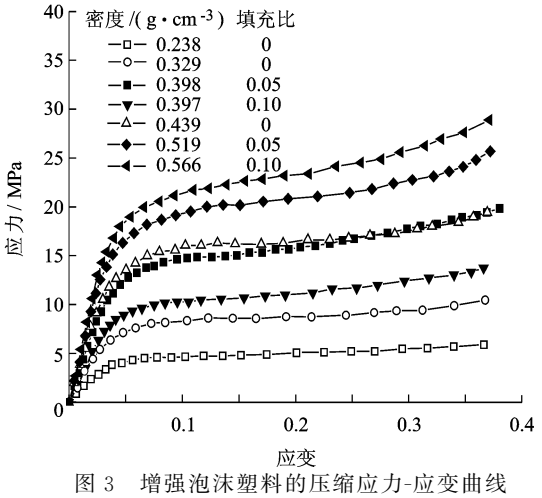

图3 增强泡沫塑料的压缩应力-应变曲线

纤维束质量填充比与弹性模量和强度的关系如图4和图5所示. 从图中可以看出，在相同的密度和纤维束质量填充比下，拉伸模量略大于压缩模量，压缩强度要高于拉伸强度. 而不论是拉伸还是压缩加载情况，对于不同密度的普通泡沫塑料，可以发现密度对力学性能有较大影响，密度越大，普通泡沫塑料的弹性模量和强度就越高. 对于增强泡沫塑料，可以发现在相同的纤维束质量填充比下，同样是密度越大，增强泡沫塑料的弹性模量和强度就越高. 其次，在相同密度下，通过在泡沫塑料中添加模量和强度较高的玻璃纤维束后，胞体壁得到了增强，在树脂基体未破坏前，纤维束能够承担更多的载荷，从而增强泡沫塑料的弹性模量和强度都高于普通泡沫塑料.

此外，对于中密度增强泡沫塑料，由于密度的减小，胞体壁变薄，壁上相对少的树脂包裹着纤维束，不利于载荷的传递，环绕在纤维束周围的树脂也将承受较大的应力，而且填加过多的纤维束还可能产生较多的缺陷，不利于与树脂的粘结，增强效果受到影响，故出现质量填充比为10%的增强泡沫塑料的力学性能反而不如质量填充比为5%的材料的情况. 所以，对密度低于0.3 g/cm³的增强泡沫塑料，其纤维束质量填充比在达到10%之前就已经超过了其临界填充比[13]. 而对于较高密度增强泡沫塑料，当质量填充比在10%以内时，不但树脂能够较好地粘结和包裹纤维束，有利于提高粘结效果，使纤维束起到有效增强泡沫的作用，而且胞体壁相对较厚，其承受载荷的能力也得到提高，相对应的纤维束也能够传递更多的载荷，因此，材料整体承载的能力较强. 随着质量填充比的增加，增强泡沫塑料的弹性模量和强度也就随之变大.

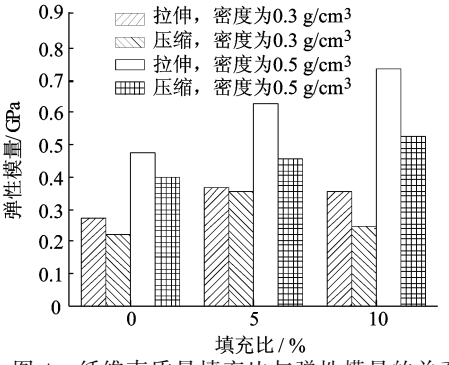

图4 纤维束质量填充比与弹性模量的关系

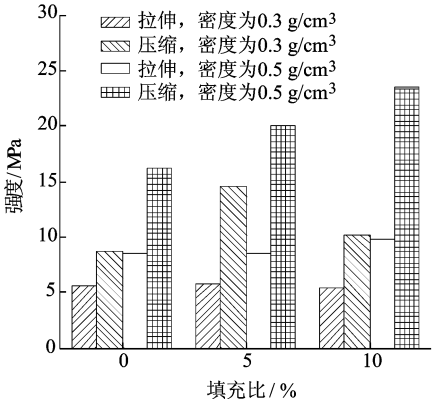

图5 纤维束质量填充比与强度的关系

3 宏观破坏形貌及失效分析

图6给出了增强泡沫塑料的宏观拉伸破坏形貌的照片. 可见，试件是沿垂直载荷方向在中部发生断裂的，呈现明显的脆性破坏特征，这与普通泡沫塑料的拉伸破坏形貌相近.

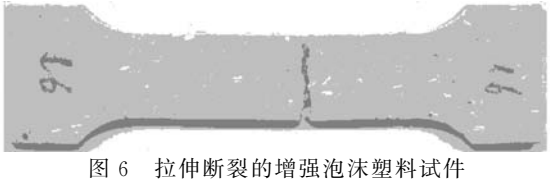

图6 拉伸断裂的增强泡沫塑料试件

图7和图8分别给出了普通泡沫塑料和增强泡沫塑料的压缩破坏形貌的照片. 可见，对于泡沫塑料的压缩，由于圆柱体试件的端部摩擦作用，上、下面的变形被约束，从而使试件中部膨胀，产生略呈鼓状的形貌. 由普通泡沫塑料的破坏形貌可见，在泡沫试件表面出现了剪切类型的45°斜裂纹(图7a)和“V”形汇聚剪切破坏裂纹，并伴有二次劈裂的发生(图7b). 但对增强泡沫塑料试件，在本文压缩变形范围内，除少数试件中间存在

纵向劈裂(图 8a)外,多数试件侧表面裂开,在倾斜裂开面上往往可以发现整根纤维束的存在,纤维束并未断裂,裂纹绕过纤维束后继续向前发展(图 8b 中白色亮线即为暴露在外的纤维束),此时试件仍有承受载荷的能力.

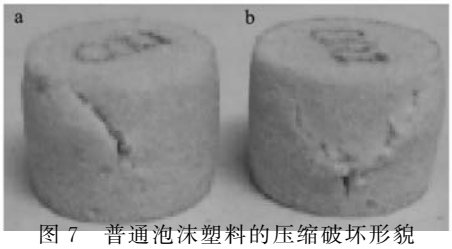

图 7　普通泡沫塑料的压缩破坏形貌

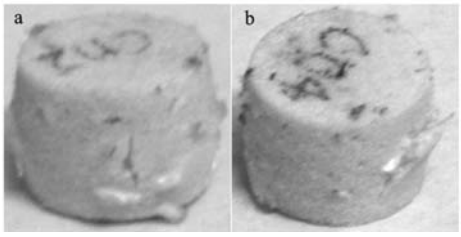

图 8　增强泡沫塑料的压缩破坏形貌

4　结　论

通过对普通聚氨酯泡沫塑料和纤维束增强聚氨酯泡沫塑料的宏观准静态拉伸和压缩实验可得如下结论:①增强泡沫塑料的拉伸和压缩应力-应变曲线及其破坏形式具有与普通泡沫塑料相同的特征;②纤维束能够有效提高泡沫塑料的弹性模量和强度,但存在最佳填充比;③密度是影响纤维束填充效果的重要因素,材料密度越大,增强效果越好.

参考文献(References)

[1] 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 Zixing, Wang Ren, Huang Zhuping, et al. A review of studies on the mechanical properties of foam plastics[J]. Adv Mech, 1996,26(3):306－323(in Chinese)

[2] 卢子兴,邹波.短纤维增强泡沫塑料力学行为的研究进展[J].复合材料学报,2005,22(5):1－8
Lu Zixing, Zou Bo. Advance of studies on the mechanical behavior of short fiber reinforced foams[J]. Acta Materiae Compositae Sinica, 2005, 22(5): 1－8 (in Chinese)

[3] 林桂,刘力,张建春,等.纤维增强聚合物发泡体的研究进展[J].中国塑料,2002,16(1):7－11
Lin Gui, Liu Li, Zhang Jianchun, et al. Research advancement of fiber reinforced foam polymers[J]. China Plastics, 2002, 16(1): 7－11 (in Chinese)

[4] Alonso M V, Auad M L, Nutt S. Short-fiber reinforced epoxy foams [J]. Composites A: Applied Science and Manufacturing, 2006, 37(11):1952－1960

[5] Alonso M V, Auad M L, Nutt S. Modeling the compressive properties of glass fiber reinforced epoxy foam using the analysis of variance approach[J]. Composites Science and Technology, 2006, 66(13):2126－2134

[6] Shen H, Nutt S. Mechanical characterization of short fiber reinforced phenolic foam [J]. Composites A:Applied Science and Manufacturing, 2003, 34(9):899－906

[7] Wouterson E M, Boey F Y, Hu X, et al. Effect of fiber reinforcement on the tensile, fracture and thermal properties of syntactic foam [J]. Polymer,2007, 48:3183－3191

[8] Karthikeyan C, Sankaran S. Elastic behaviour of plain and fibre-reinforced syntactic foams under compression[J]. Materials Letters,2004, 58: 995－999

[9] 杨继年,李子全,王静.短纤维混杂增强 PP 复合泡沫材料的力学性能[J].复合材料学报,2007, 24(4):1－7
Yang Jinian, Li Ziquan, Wang Jing. Mechanical performances of foamed polypropylene composites hybrid-reinforced by short fibers [J]. Acta Materiae Compositae Sinica, 2007, 24(4):1－7(in Chinese)

[10] 卢子兴,田常津,王仁.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
Lu Zixing, Tian Changjin, Wang Ren. Mechanical behavior of glass-fibre reinforced polyurethane foam plastics under compression [J]. Journal of Experimental Mechanics, 1995, 10(1): 45－50(in Chinese)

[11] 卢子兴,高镇同,田常津,等.两种增强泡沫塑料静动态力学性能的比较[J].北京航空航天大学学报,1996,22(3):358－362
Lu Zixing, Gao Zhentong, Tian Changjin, et al. Comprasison of static and dynamic mechanical properties between two reinforced foam plastics[J]. Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics, 1996, 22(3): 358－362(in Chinese)

[12] 卢子兴,王建华,谢若泽,等.增强聚氨酯泡沫塑料力学行为的研究[J].复合材料学报,1999,16(2):39－45
Lu Zixing, Wang Jianhua, Xie Ruoze, et al. Investigations into mechanical behavior of two reinforced foam plastics [J]. Acta Materiae Compositae Sinica,1999, 16(2): 39－45(in Chinese)

[13] 卢子兴,严寒冰,王建华.聚氨酯复合泡沫塑料的准静态压缩力学性能[J].中国塑料, 2004,18(2):31－34
Lu Zixing, Yan Hanbing, Wang Jianhua. Mechanical properties of polyurethane syntactic foams under quasi-static compression [J]. China Plastics, 2004,18(2):31－34(in Chinese)

(责任编辑:刘登敏)