

增强聚氨酯泡沫塑料力学行为的研究

卢子兴 王建华* 谢若泽** 田常津** 李怀祥*

(中科院力学所非线性连续介质力学开放研究实验室, 北京航空航天大学固体力学研究所, 北京 100083)

(* 中国工程物理研究院化工材料研究所, 成都 610003) (** 中国工程物理研究院结构力学所, 成都 610003)

摘 要 给出两种增强泡沫塑料静、动态压缩实验的一些新结果, 研究了它们变形及破坏的规律性。通过对加载后泡沫塑料试件进行的扫描电镜分析得到了这两种增强泡沫塑料变形和失效的机制, 并讨论了增强机理。

关键词 增强泡沫塑料, 力学性能, SEM 分析

中图分类号 TB 332; O 344

增强泡沫塑料是一种应用广泛的新型复合材料, 由于它具有绝热效果好、比强度和比模量高等优点, 近年来受到工程界的普遍重视^[1]。增强泡沫塑料主要指纤维增强情况, 空心粒子增强泡沫塑料通常称为复合泡沫塑料^[2], 不属于本文中研究范围。纤维增强泡沫塑料包括单丝纤维增强和纤维束增强两种。本文作者以这两种增强聚氨酯泡沫塑料为对象, 研究了它们的力学行为, 得到一些新的结论。

1 实验描述

实验所用单丝玻璃纤维增强硬质聚氨酯泡沫塑料(用 L-0 3、L-0 5 代表, 其中数字为材料密度)和玻璃纤维束增强硬质聚氨酯泡沫塑料(用 G-0 3、G-0 5 代表, 其中的数字也为材料密度), 分为两种密度, 它们的纤维含量基本相同。实验前对制得的两种增强泡沫塑料进行了扫描电镜分析, 得到的结论是: 两种密度增强泡沫塑料的胞体结构基本上都是球形的, 并且, 增强填料(单丝玻璃纤维或玻璃纤维束)分布在基体材料中, 无纤维或纤维束穿过泡孔^[1,3]。实验所需泡沫塑料试件均由块体材料取料加工, 试件轴向与发泡方向一致, 并且试件形状和尺寸与普通泡沫塑料相同^[4]。准静态压缩实验在 Instron 万能材料试验机上进行, 变形由引伸计测量, 标距为 13 mm; 而落锤冲击实验在落锤冲击实验装置上进行, 测取的主要信号为落锤冲击时的减速度, 由安装在落锤中部的加速度计及存储示波器完成, 冲击速度通过高速动态分析系统进行监测。实验后, 将试件沿轴向和横截面方向制成 SEM 样品, 放入 X-650 型扫描电镜中观察。

2 实验结果及讨论

2.1 增强泡沫塑料的准静态压缩实验

收修改稿、初稿日期: 1998-05-25, 1998-04-01

国家自然科学基金(19672005); 中国工程物理研究院科学技术基金资助项目(960318)

2.1.1 应力-应变行为

图 1 给出了准静态压缩下两种增强泡沫塑料应力-应变曲线的比较, 可见密度较低时两种增强泡沫塑料的应力-应变曲线非常接近, 说明两种纤维对低密度泡沫塑料强度的增强效果差异不大, 但对材料弹性模量的增强效果有较大差异^[3]。一般情况下, 单丝玻璃纤维增强泡沫塑料的弹性模量和强度均高于玻璃纤维束增强泡沫塑料的相应值。对于密度较高的材料来说, 情况也基本相同, 只是单丝玻璃纤维增强泡沫塑料具有更佳增强效果^[3]。导致上述结果的原因, 除了粘接质量的差异外, 很重要的一点是材料密度的提高。因此, 对增强泡沫塑料来说, 当纤维含量一定时, 较高密度的泡沫塑料一般具有较好的增强效果。

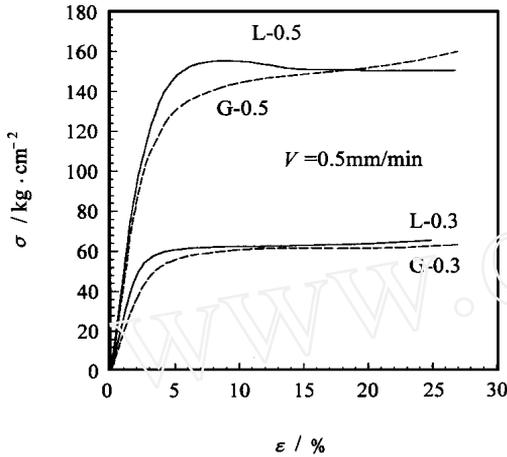


图 1 准静态加载的应力-应变曲线

Fig 1 The stress-strain curves of quasi-static loading

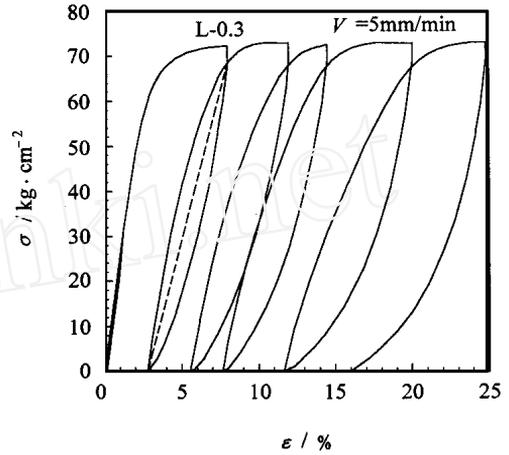


图 2 循环加载下的应力-应变曲线

Fig 2 The stress-strain curve of cyclic loading

2.1.2 循环加载下的应力-应变特性

以密度 0.3 g/cm^3 的单丝增强泡沫塑料应力-应变曲线为例 (见图 2), 可见其变形规律与普通泡沫塑料的情况类似^[4], 主要结论归纳为以下几点: (1) 在弹性范围内卸载时, 卸载曲线与加载曲线不重合, 且卸除载荷后变形不能完全恢复 (见图中第一次循环)。这说明纤维 (束) 增强聚氨酯泡沫塑料在变形的初始阶段也存在明显的粘性效应, 并且应变很小时就使材料产生了不可恢复的变形。(2) 若把滞后回线的两个尖点相连可得图中的虚线, 其斜率若作为该压缩循环下材料的平均弹性模量, 则它随循环次数的增加 (材料的应变也增加) 而减少 (见表 1 和表 2), 说明增强泡沫塑料的损伤及胞体结构的破坏随循环次数的增加而变得越来越严重。此外, 平均弹性模量在最初的一些循环中降低较快, 说明材料的损伤在材料屈服后存在一个快速发展期, 这时除材料中的胞体破坏外, 还存在增强材料与基体材料的脱胶破坏。(3) 如果把每一载荷循环形成的滞后回线作为能量损耗的度量, 则其面积代表了每一循环所消耗的粘性阻尼功。由图 2 及表 1 和表 2 可知: 随着循环次数的增加, 材料消耗的粘性阻尼功也增加, 即使在变形曲线的平台区情况也一样。因此, 增强聚氨酯泡沫塑料的粘性效应与材料所处的应变状态有关。(4) 比较不同循环的卸载曲线, 不难看出每次卸载的变形恢复量也随应变的增加而增加, 故用它也可反映增强泡沫塑料的粘性变形特征。增强泡沫塑料的恢复应变一般比普通泡沫塑料要小, 而单丝增强泡沫塑料的恢复应变小。总之, 通过循环压缩实验不难确定: 硬质增强聚氨酯泡沫塑料不仅是粘弹性材料, 也是粘塑性材料, 在建立其本构关系时应考虑材料的这一特点。

表 1 单丝增强泡沫塑料在循环压缩下的力学性能

Table 1 The mechanical properties of single glass fiber reinforced foam plastics under cyclic compression

性能	平均弹性模量 /kg · cm ⁻²		耗能密度 /kg · cm ⁻²		恢复应变 /%	
	L-0.3	L-0.5	L-0.3	L-0.5	L-0.3	L-0.5
材料						
循环次数	1	2573 5116	—	1.11	1.08	3.38
	2	1307 4402	0.85	1.69	5.23	4.05
	3	1053 3911	1.17	2.24	6.46	4.60
	4	990 3495	1.19	2.73	6.89	5.10
	5	809 —	1.54	—	8.40	—

表 2 纤维束增强泡沫塑料在循环压缩下的力学性能

Table 2 The mechanical properties of glass fiber bundles reinforced foam plastics under cyclic compression

性能	平均弹性模量 /kg · cm ⁻²		耗能密度 /kg · cm ⁻²		恢复应变 /%	
	G-0.3	G-0.5	G-0.3	G-0.5	G-0.3	G-0.5
材料						
循环次数	1	2195 3795	0.17	1.04	2.20	3.67
	2	1138 2344	1.05	3.54	5.47	6.83
	3	852 2122	1.38	3.99	7.07	7.63
	4	786 2006	1.40	4.13	7.65	8.18
	5	— —	— —	— —	— —	— —

2.1.3 变形速度突变对应力-应变曲线的影响

以纤维束增强泡沫塑料受压缩的情况为例, 当变形速度突变时, 其应力-应变曲线的形状 (见图 3) 将发生明显的变化, 在速度突变点强度会突然增加, 出现一个应力峰值后再下降到某一应力水平继续变形。因为速度突变导致的应力增加略小于两种不同变形速度下在相同应变值时产生的应力差, 所以速度突变后的应力-应变曲线一般介于两种加载速度所得应力-应变

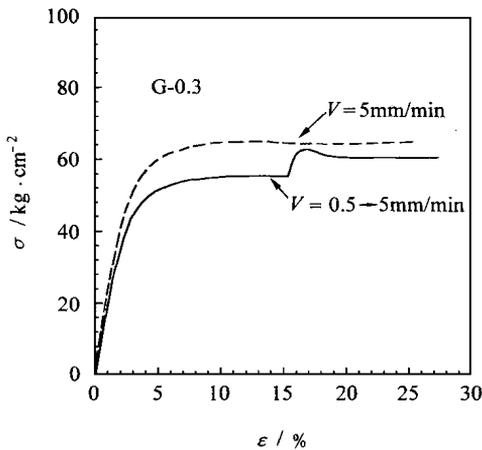


图 3 变形速度突变对应力-应变曲线的影响
Fig. 3 The effect of sudden change of deformation speed on the stress-strain curve

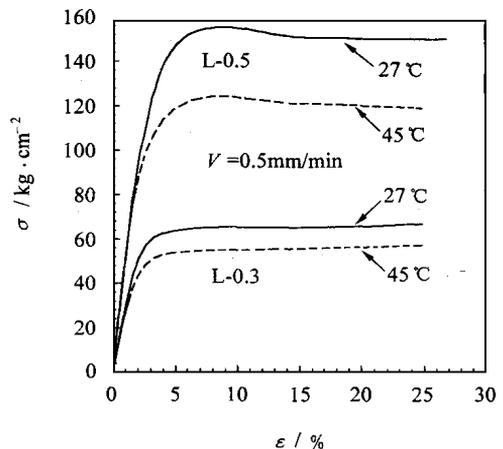


图 4 温度对应力-应变曲线的影响
Fig. 4 The effect of temperature on the stress-strain curves

曲线之间。这一结果与普通泡沫塑料相类似^[4],反映了增强泡沫塑料也具有应变率和应变率历史效应。同时表明,这一效应与增强材料基本无关,属于基体材料的固有性质。

2.1.4 温度效应

图 4 给出了单丝增强泡沫塑料在不同温度下的压缩应力-应变曲线,可见:温度对增强泡沫塑料力学性能的影响比较明显,随着温度的升高,材料的弹性模量和应力强度一般都要下降,这与应变率的效应正好相反。此外,得到的一条重要结论是:密度较高的增强聚氨酯泡沫塑料的温度效应一般也较高,例如,在较高温度下压缩,密度较低的材料强度下降约 9%,而密度较高的材料强度下降约 13%。这说明增强泡沫塑料的温度效应主要由基体材料的性质所控制,与玻璃纤维增强材料基本无关。

2.2 增强泡沫塑料的冲击实验

图 5 给出了两种增强泡沫塑料在动态冲击载荷作用下的应力-应变曲线,可见:动态加载使两种增强泡沫塑料力学性能之间的差异增大,尤其是低密度情况更为明显。在动态加载下,普通泡沫塑料的弹性模量可能会因局部损伤而小于准静态加载的材料弹性模量^[5],然而,对增强泡沫塑料来讲,不仅动态弹性模量大于相应的准静态值,而且动态强度也有不同程度的提高,这说明泡沫塑料增强后对冲击载荷的抵抗能力确实增强了,尤其是试件表面的强度。由图 5 所示应力-应变曲线的对比还可知,单丝玻璃纤维增强泡沫塑料在各种密度下均显示了较好的抗冲击力学性能,不仅抗冲击强度和模量较高,而且材料的吸能效果也较好。

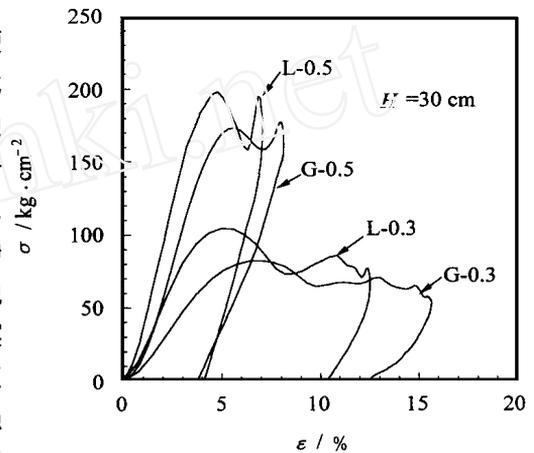


图 5 冲击加载的应力-应变曲线

Fig. 5 The stress-strain curves of impact loading

2.3 增强泡沫塑料的破坏和增强机理分析

本文中对两种增强泡沫塑料的静动态压缩试件进行了 SEM 分析,研究了增强泡沫塑料破坏及其增强的机理,得到的主要结论有:

(1) 对增强泡沫塑料来说,类似于普通泡沫塑料,较大的胞体损伤和破坏较为严重,并且胞体尺寸的不均匀性导致了胞体变形和损伤的不均匀性^[6]。

(2) 对单丝增强泡沫塑料来说,玻璃纤维的存在改变了胞体壁的失效模式。这种增强泡沫塑料的失效模式是较薄胞体壁的屈曲和纤维与基体的脱胶破坏^[1,6]。此外,单丝玻璃纤维的存在增强了胞体壁,在胞体壁上只能看到裂纹或皱纹,而看不到大的裂口存在(见图 6(a)、6(b))。破坏机制的改变可以这样解释:当纤维和基体粘接很好时,胞体壁被增强,失效模式由胞体壁的弯折改变为较薄部位胞体壁的屈曲或基体的局部脱胶破坏。然而,当纤维和基体之间发生脱胶时,玻璃纤维的存在被认为是一种缺陷,界面处的应力集中和拉伸应力状态导致了围绕纤维基体材料的脆性破坏。由此可见:强度和模量较高的纤维在胞体壁内的分布,使壁的强度和刚度提高了,因此,材料最初是不易变形和破坏的。但是,当载荷增加到某一数值,玻璃纤维和基体脱胶,产生一些裂纹和碎块,这些裂纹扩展到骨架材料,便形成胞体的塌陷及胞体的破坏,最终导致载荷的下降和试件表面裂纹的出现。对于密度较低的泡沫塑料加入单丝纤维后也提高了初始变形阶段的压缩模量和应力强度,但应力强度的提高不太明显。这是因为低密度

泡沫塑料中玻璃纤维与基体的粘接较差, 壁内纤维起不到应有的增强作用。并且由于胞体壁相对较薄, 其破坏不会明显影响泡沫塑料的整体力学行为^[1]。

(3) 玻璃纤维束增强泡沫塑料的胞体壁上看不到明显的纤维分布, 说明纤维束主要分布在骨架材料中, 在变形的后期可以有效地增强材料。其变形和破坏的特点除了具有(1)给出的结论外, 由于实验中低密度材料经历的变形较小, 其损伤破坏主要集中在胞体壁穿孔处附近, 损伤及破坏的细节可从放大的照片上得到(见图 6(c)、6(d))。可见玻璃纤维束增强泡沫塑料除了具有普通泡沫塑料破坏的特点外, 也具有单丝玻璃纤维增强泡沫塑料的一些特点, 其胞体壁上存在因泡沫塑料压缩而产生的薄壁皱曲现象(见图 6(d))。对高密度玻璃纤维束增强泡沫

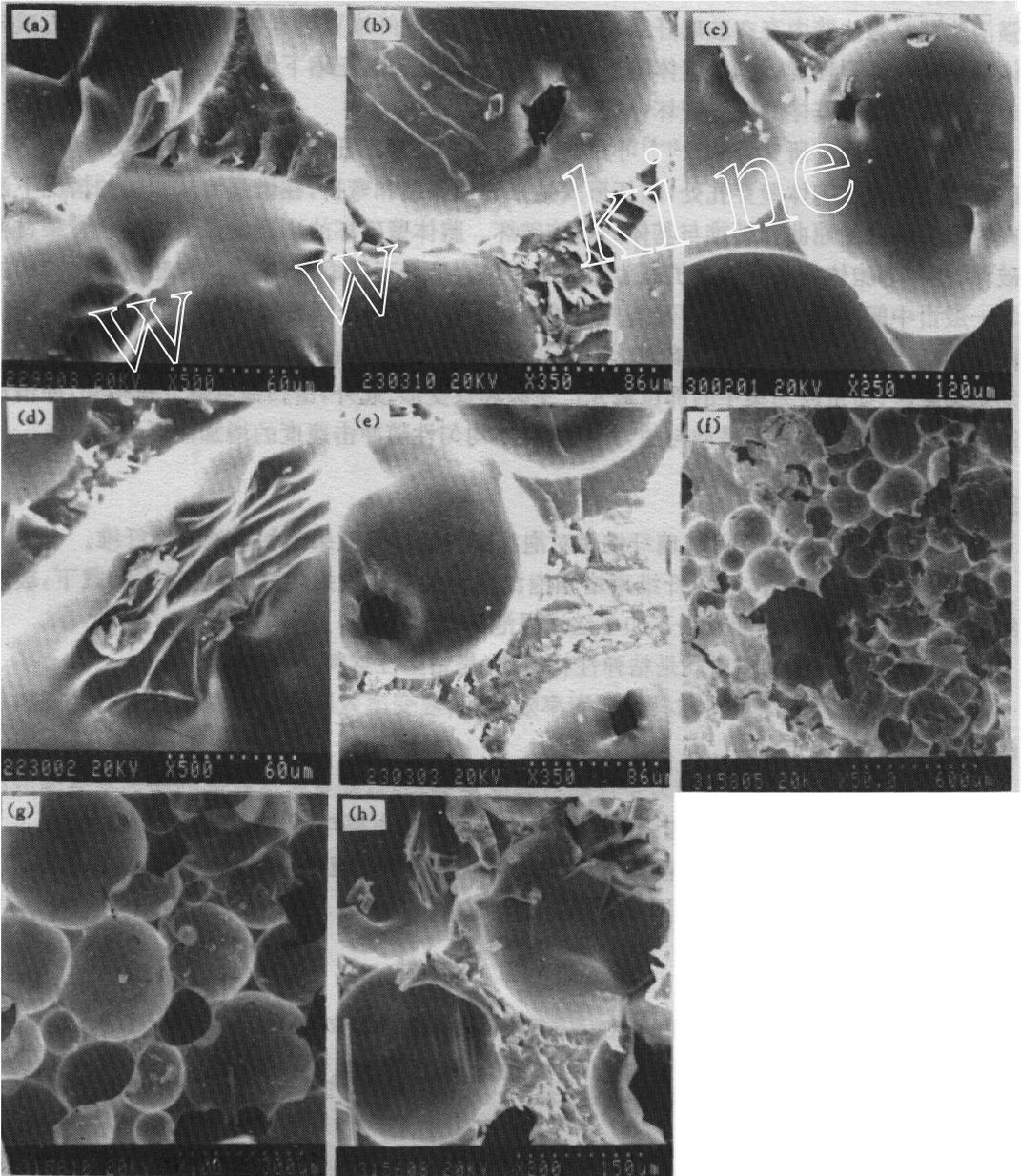


图 6 增强泡沫塑料的扫描电镜照片 Fig. 6 The SEM pictures of reinforced foam plastics

塑料来说,也有类似的情况出现。此时,由于材料经历的变形较大,胞体壁变形和破坏较为严重,但由于骨架材料中玻璃纤维束的存在使胞体壁的破坏受到了某种限制,因此,胞体穿孔处的撕裂破坏不如普通泡沫塑料那样严重,只有弯折的痕迹和小的裂口出现(见图 6(e))。

(4) 在动态加载下,泡沫塑料的变形和破坏机制明显不同于准静态加载^[5]。以单丝增强泡沫塑料为例,图 6(f)、6(g)、6(h)给出了动态冲击下材料破坏的 SEM 照片,可见材料破坏的特点是基体材料的脆裂(沿轴向开裂)和胞体结构的塌陷(见图 6(f))。这是由于动态冲击产生较大的横向惯性力作用,导致沿轴向的脆性开裂;同时较大的轴向压力也使胞体变形、弯折,与轴向开裂相耦合形成胞体塌陷,最终构成宏观破坏。尽管泡沫塑料的骨架材料已有明显的破坏,并且胞体结构也产生了畸变,但在材料内部胞体壁却相当完整(见图 6(g))。此外,由于单丝增强泡沫塑料胞体壁内存在玻璃纤维,在动态加载下这些纤维更有效地增强泡沫塑料,减轻基体沿横向的开裂程度;同时,胞体壁上沿轴向的纤维在动态压缩下也可能因屈曲或界面质量较差而导致纤维与基体的脱胶破坏(见图 6(h))。

(5) 综合已有研究结果^[1,3-6]可知,泡沫塑料在准静态压缩时一般发生比较均匀的变形,破坏首先出现在胞体壁穿孔处,破坏形式是张开型撕裂和弯折,在增强泡沫塑料的情况下还存在较薄胞体壁的屈曲和纤维与基体的脱胶破坏。胞体壁破坏的不断发展最终导致骨架材料的破坏,使相邻胞体相互连通并扩展为宏观的裂口。准静态压缩下,增强泡沫塑料胞体结构的破坏一般由中间向两边发展。而动态冲击的情况下,增强泡沫塑料胞体结构的破坏是由冲击端向远端渐进发展的,在胞体具有较大畸变以及开裂时,胞体结构的壁仍然大部分完好,说明在动态加载时,质量较为集中的部位最先产生破坏及变形。此外,由扫描电镜分析得知,冲击加载时,泡沫塑料的变形并不是均匀的,并且这种不均匀性随冲击速度的增加而更为明显。

3 结 论

- (1) 在静、动态加载下,玻璃纤维束对泡沫塑料的增强效果不如单丝玻璃纤维。
- (2) 在静态加载下,玻璃纤维束增强泡沫塑料的吸能效果较好,但在动态加载下,玻璃纤维束增强泡沫塑料的吸能效果不如单丝增强泡沫塑料。
- (3) 两种增强泡沫塑料既是粘弹性材料,也是粘塑性材料。
- (4) 两种增强泡沫塑料均具有应变率效应,其应变率效应主要由基体材料的性能和材料的孔隙度或密度决定。
- (5) 两种增强泡沫塑料的力学性能对温度是敏感的,并且密度较高的增强聚氨酯泡沫塑料的温度敏感性也较高,说明增强泡沫塑料的温度效应主要与基体材料的性质有关。
- (6) 两种增强泡沫塑料在静态加载下具有不同于普通泡沫塑料的变形及破坏机制,而动态变形及破坏的机制又明显不同于静态。

参 考 文 献

- 1 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 实验力学,1995,10(1): 45~ 50
- 2 Hilyard N C. Mechanics of Cellular Plastics London: Applied Sci Publisher, 1982
- 3 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 北京航空航天大学学报,1996,22(3): 358~ 362
- 4 卢子兴,田常津,谢若泽 硬质聚氨酯泡沫塑料压缩力学性能 材料研究学报,1994,8(5): 452~ 456
- 5 卢子兴,田常津,韩铭宝,等 氨酯泡沫塑料冲击力学性能的实验研究 高分子材料科学与工程,1995,11(6): 76~ 81
- 6 卢子兴,李怀祥,田常津,等 不同载荷作用下泡沫塑料的变形和失效机理分析 塑料,1996,25(2): 38~ 41

INVESTIGATIONS INTO MECHANICAL BEHAVIOR OF TWO REINFORCED FOAM PLASTICS

Lu Zixing Wang Jianhua^{*} Xie Ruoze^{**} Tian Changjin^{**} Li Huaixiang^{*}

(Laboratory for Nonlinear Mechanics of Continuous Media, Institute of Mechanics, Chinese Academy of Sciences;

Research Center of Solid Mechanics, Beijing University of Aeronautics and Astronautics, Beijing 100083)

(^{*} Institute of Chemical Materials, Chinese Academy of Engineering Physics, Chengdu 610003)

(^{**} Institute of Structural Mechanics, Chinese Academy of Engineering Physics, Chengdu 610003)

Abstract Some new results of the static and dynamic compressive tests about two reinforced foam plastics are given in this paper. Their deformation and failure characteristics were investigated by these experiments. By means of SEM analyses for two reinforced foam plastics specimens after loading, the deformation and failure mechanisms of them are determined. Furthermore, the reinforced mechanisms of them are also discussed from the viewpoint of microscopy.

Key words reinforced foam plastics, mechanical properties, SEM analyses

(上接第 38 页)

21 日下午和 22 日上午一般讲演的内容, 日方 FRP 方面 8 篇, MMC (金属基复合材料) 2 篇, CMC 2 篇。中方 FRP 7 篇, MMC 5 篇, CMC 3 篇, 其他复合材料 3 篇。由于邱申二位担当翻译, 语言上无障碍, 在极其友好的气氛中进行提问和解答。

会议期间及会后, 有与会者自愿参加的各种参观观光项目: 参观陕西历史博物馆、秦始皇兵马俑, 还有敦煌观光。参会人员有机会品味中国料理, 有机会一起进行各种交流, 接触古都西安的历史, 得以渡过有意义的时光。此外, 再次令人感到中国高速公路建设得很好, 高层建筑建设繁忙, 人们意气风发; 另一方面, 一进入小巷能见到以往的生活情景, 感到了日本今昔共存的情况。复合材料研究发表讲演的内容似乎也反映出类似的情况: 给人的印象是, 国家重点实验室中的先进研究工作与日本不久前搞过的一些研究工作都在同时进行。对中国研究者搞研究工作的认真态度和活泼生气谨表敬意。

会议期间, 日中双方组织委员碰头, 商谈下次日中复合材料交流会的开会地点和时间, 大致商定: 下次交流会于 1999 年 11 月 1~6 日在上海附近的杭州召开。原浙江大学高分子基复合材料研究室的益小苏可能成为中方联系窗口。期望日中复合材料交流会日益发展。