

# 复合泡沫塑料力学行为的研究综述\*

卢子兴

北京航空航天大学固体力学研究所, 北京 100083

**摘要** 复合泡沫塑料是一种重要的防护材料, 它在国防工业和民用工业各部门均有许多重要的应用, 对这类材料的力学行为进行研究具有重要的学术价值和应用前景. 本文对复合泡沫塑料力学行为的研究文献进行了综述. 首先, 对复合泡沫塑料力学行为研究的早期工作进行了简介. 然后, 重点介绍了复合泡沫塑料力学行为研究的最新进展, 其中也包括作者近期在该领域开展的一些工作; 对复合泡沫塑料进行了静、动态压缩实验和细观加载实验, 研究了材料的宏观变形规律和细观失效机制; 在理论研究方面, 探讨了复合泡沫塑料的能量吸收和缓冲特性, 从宏、细观力学分析出发研究了复合泡沫塑料有关力学性能的理论预测问题; 还利用计算机和通用软件对高密度复合泡沫塑料进行了有限元分析, 研究了高密度复合泡沫塑料的失效行为. 最后, 给出对该领域研究工作的一些展望.

**关键词** 复合泡沫塑料, 力学性能, 实验, 模型, 冲击

## 1 引言

复合泡沫塑料 (syntactic foam plastics) 是由空心微球填充到树脂基体中形成的复合材料, 这种材料具有合理的压缩强度和剪切强度, 是一种轻质结构材料. 它与普通“发泡”形成的泡沫塑料相比, 具有一些独特的优点, 如密度在较大的范围内易于控制, 机械性能较高, 且吸湿低、绝热好等. 最初这种材料主要用于深海潜水工具中<sup>[1]</sup>, 现已在航空、航天等领域得到了广泛的应用. 通常, 人们把仅由空心球填充的聚合物材料称为两相复合泡沫塑料, 而把发泡塑料制作过程中加入空心球所得到的材料称为三相复合泡沫塑料. 无论那一种复合泡沫塑料, 它们都属于三相复合材料, 其力学行为的研究远比普通泡沫塑料或颗粒增强复合材料要困难得多. 因此, 与普通泡沫塑料或颗粒增强复合材料力学性能的研究相比, 对复合泡沫塑料力学性能的研究报道还不多, 且没有引起人们的足够重视. 但是, 但近年来随着填充泡沫塑料工艺技术和军事工业对这种先进结构材料的需求增加, 特别是复合材料力学研究的迅猛发展使得这一新型泡沫塑料的力学研究又重新受到国内外学者们的高度重视. 尽管国内对泡沫塑料 (包括微发泡塑料) 力学行为的研究起步较晚<sup>[2,3]</sup>, 但近

年来人们已开始关注复合泡沫塑料的开发和研究工作<sup>[4]</sup>. 为了促进国内对复合泡沫塑料的开发和利用, 并唤起人们对这类新型泡沫塑料力学行为的研究兴趣, 本文将较为系统地总结国内外复合泡沫塑料力学性能研究的文献, 希望对国内从事该领域研究的工作人员有所裨益.

## 2 早期研究工作简介

国外对复合泡沫塑料力学行为的研究起始于 20 世纪 60 年代末, 早期的工作主要研究了这类材料的制备技术及其宏观力学性能. 文献 [1] 和文献 [5] 较为系统地介绍了该领域的工作, 它们可以作为 80 年代中期之前研究工作的一个总结. 为了使读者对复合泡沫塑料力学行为的研究全貌有一个基本了解, 这里先简要介绍 80 年代末之前的工作.

DeRuntz<sup>[6]</sup> 是最早系统地研究两相复合泡沫塑料力学行为的人. 他针对由空心球 - 树脂复合泡沫塑料制成的空心圆筒状试件和圆柱形试件进行了拉、压、扭单轴实验, 拉扭、压扭组合双轴应力实验, 以及多种静水压下的三轴应力实验. 另外, 基于所获取的广泛实验资料, DeRuntz 提出了复合泡沫塑料的拉、压失效方程, 并且针对应力历史对材料强度的

收稿日期: 2003-04-01, 修回日期: 2004-03-12

\* 中国工程物理研究院联合基金 (10276004)、国家自然科学基金 (10072007) 和国防重点实验室基金资助项目

影响进行了研究。在后续的工作中他又认为文献 [6] 给出的失效方程过于保守, 因为该失效方程只对应材料结构坍塌的初期, 此时材料还有很大的残余强度。于是, 他将塑性力学的方法引入到两相复合泡沫塑料的研究中, 从而得到了新的失效方程 [7]。

20 世纪 70 年代中期, Barber 等 [8] 首先开展了三相复合泡沫塑料力学行为的研究工作, 他们通过在氨基硬质泡沫塑料中加入空心玻璃微球, 在不增加密度的条件下, 明显改进了压缩和弯曲强度及模量, 也改进了冲击抗力和尺寸稳定性。由于玻璃微球的加入, 较低密度的复合泡沫塑料可达到较高密度的普通泡沫塑料的性能, 因此, 该结果为在结构应用中使用较轻的泡沫塑料提供了可能性。

20 世纪 80 年代初, Narkis 等 [9~15] 系统地研究了两相及三相复合泡沫塑料的制备方法和相应的力学性能, 得到了一些重要的结论。首先, Nariks 等 [9] 使用两种不同类型的微球 (酚醛和玻璃微球) 来填充泡沫塑料, 得到的材料显示了良好的压缩力学性能。在后续文章 [10] 中, 他们报道了环氧和聚酰亚胺基体与玻璃微球结合的三相复合泡沫塑料的力学性质。结果表明, 在较低基体含量下, 微球的独特压缩性质并不明显, 失效主要是由于较弱粘接结构的分裂造成的。此外, Narkis 等 [11] 进一步讨论了含涂层微球三相复合泡沫塑料的性能。实验表明, 含涂层微球三相复合泡沫塑料的力学失效机制也主要是低基体含量下泡沫塑料结构的分裂和高基体含量下微球与基体之间的断裂。但使用涂层微球的主要优点是得到的均匀涂层最终导致了基体在成型材料中的均匀分布。Narkis 等 [12] 还研究了热固性三相复合泡沫塑料的旋转成型问题, 给出了旋转成型松散排列复合泡沫塑料的压缩强度和模量。Nariks 等 [13] 还针对聚酰亚胺泡沫塑料, 研究了温度效应并提出了应力传递效率的概念, 通过应力传递效率参数修正了 Ishai 和 Cohen 方程以及 Lewis 和 Nielsen 方程。同时, Nariks 等 [14] 还研究了由热固性硅树脂制得的三相复合泡沫材料的力学性能。结果表明, 压缩强度和模量随密度的增加而增大。通过对压缩试件断裂面的观察, 他们发现了两种不同的表象, 即水平断裂面和 Y 形断裂面, 不同断裂面的形成主要依赖于材料的密度。为了进一步研究力学性质与密度的关系, 他们还对三相硅树脂复合泡沫塑料的拉伸和弯曲行为进行了研究。结果表明, 泡沫塑料的拉伸强度低于其弯曲强度, 而后者又远低于其压缩强度。为了便于比较, 他们还用相同工艺制备了含实心玻璃球的泡沫塑料。令人感到惊奇的是, 在相同的基体体积含量下含空心球复合泡沫塑料的压缩强度更高, 但含实心球泡沫塑料的弹性模量远高于含空心球的泡沫塑料。

后来, Nariks 等 [15] 又研究了密排结构含碳、玻璃微球三相复合泡沫塑料的力学性能。对于含两种混合微球的三相复合泡沫塑料来说, 压缩强度和弹性模量随着碳-玻璃球的比例的降低而略有增加。当碳微球含量从 15% 增加到 100%, 失效的压缩应变 (对应最初的可见裂纹) 从 16% 下降到 5%。这一结果的出现可以归结为三相复合泡沫塑料中断裂机制的转变。当碳微球填充水平较高时, 断裂面垂直于压缩方向; 而在玻璃微球含量高的情况下, 则得到 Y 形断裂面, 这说明了剪切起始机制的作用。

关于复合泡沫塑料弹性模量的估计, 前人虽然已给出了界限估计 [1], 但为了得到较为准确的预测结果, Nielsen [16] 提出了一种简便的计算方法。他认为如果空心球的表观模量可以按照内外径比值来估计, 则复合泡沫塑料的模量可由一些众所周知的方程来计算。通过考虑实际空心球的壁厚对表观模量的影响, 他给出了与复合泡沫塑料剪切模量实验值相一致的预测结果。这些实验资料是 Kinra 和 Ker [17] 针对有机玻璃 (PMMA)/玻璃微球复合泡沫塑料, 通过超声波传播技术测量得到的。

综上所述, 20 世纪 80 年代末期以前, 复合泡沫塑料力学行为的研究主要集中在实验研究方面, 这些研究一方面满足了当时应用的需求, 另一方面对材料制备工艺的改进也起到很好的促进作用。从前面介绍的工作来看, 人们不仅研究了这类新型泡沫塑料的宏观力学行为, 也对这类材料的微观失效机理的研究给予了足够的重视。但是复合泡沫塑料的力学性能是与其制备的工艺条件和水平密切相关的, 并且它所应用的环境也是复杂多变的, 故对这类新型材料的实验研究还远未终止。与实验研究相比, 这一时期理论方面的研究工作明显地欠缺, 人们只能利用复合材料力学中现有的一些研究结果来给出复合泡沫塑料模量的近似估计或提出一些经验性的公式。

### 3 复合泡沫塑料力学行为研究的最新进展

进入 20 世纪 90 年代以来, 复合泡沫塑料的理论研究和计算模拟工作倍受人们的关注。1993 年, Huang 和 Gibson [18] 利用弹性力学方法研究了含空心玻璃微球复合材料的弹性模量预测问题, 给出了实验和理论的分析结果。但他们得到的弹性模量预测与实验值偏差较大, 只适用于较小空心球体积比的情况。Hervé 等 [19] 推导了由基体内填充  $N$  层各向同性球形夹杂 (最内层是孔隙) 组成的无限大介质在远场受均匀应力或应变条件下的弹性应力场和应变场, 并将其用于表达广义自洽方法和计算广义复合材料球模型的 Hashin-Shtrikman 界限。最后, 他们给出

了模型预测值同实验结果的比较. 近年来, Palumbo 等<sup>[20,21]</sup> 也研究了空心玻璃微球填充环氧树脂的压缩弹性行为, 确定和解释了填充粒子形状对这类材料弹性模量的影响, 研究了现有模型对所用材料的适用性. 此外, 他们还认为如果假设脱胶粒子的作用和孔洞一样, 则 Sato-Furukawa 方程预测的模量是随填料含量的增加而降低的. 其中 Sato-Furukawa 方程的形式为

$$\frac{E_c}{E_m} = \left\{ 1 + \left[ \frac{y^2}{2(1-y)} \right] \right\} (1 - \psi\zeta) - \left[ \frac{y^2\psi\zeta}{(1-y)y^3} \right] \quad (1)$$

这里  $E_c, E_m$  分别为复合材料和基体材料的杨氏模量, 而若令  $\phi_F$  为空心球的填充体积比, 则  $\phi_F = y^3$ , 因子  $\psi = \frac{(y^3/3)(1+y-y^2)}{(1-y+y^2)}$ .  $\zeta$  是粘接参数. 参数

$\zeta$  为 0 代表理想粘接, 而取值为 1 代表完全脱胶.

Bardella 等<sup>[22]</sup> 也研究了复合泡沫塑料的弹性行为, 通过物理模型和 Hervé 等<sup>[19]</sup> 所用的弹性解得到了均匀化弹性模量的显式公式. Bardella 等还考虑了填料的尺寸级别和基体内存在孔隙的影响, 这些因素对复合泡沫塑料力学性质的表征是十分重要的. 此外, 理论解同实验和数值结果的比较证明, 所用的技术能比较准确地预测复合泡沫塑料的弹性模量.

有关复合泡沫塑料强度方面的研究主要有: Lin<sup>[23]</sup> 用实验和有限元方法分析了不同尺寸玻璃球、不同排列方式对空心玻璃球增强复合材料性能的影响 (实验中所用的玻璃球较大, 直径约几个毫米). 文中还用二维的最小表面理论 (minimal surface theory) 对材料强度进行了分析. 结果表明, 玻璃球的含量很高时, 材料的破坏起源于玻璃球的破坏; 但当空心球间距较大时, 破坏起源于基体. 在相同体积含量下, 含小尺寸玻璃球的复合材料的强度较高. 大尺寸、大含量的玻璃球会使材料的强度急剧下降.

而 Gupta<sup>[24]</sup> 为了降低环氧 / 玻璃微球复合泡沫塑料中的孔隙和增加材料的强度, 在制备复合泡沫塑料的过程中加入短切玻璃纤维并研究了加入纤维导致的影响, 发现增强泡沫系统的工艺改进可以降低材料中气孔的含量, 且复合泡沫塑料的强度随气孔的含量减少而增加. 最近, Gupta 等<sup>[25,26]</sup> 对各种尺寸比的复合泡沫塑料试件及其纤维增强的试件进行了压缩实验, 且对压缩后的各种试件进行了扫描电镜分析, 研究了压缩失效模式及失效机理等问题. 宏观实验的结果表明, 对于小尺寸比的压缩试件在压缩加载下裂纹的起始和后继的失效位于试件的边角处, 属于剪切裂纹. 而在试件的中心区产生一条水平裂纹, 归结为真实压缩的结果. 剪切裂纹趋向于与中心裂纹相交并导致了试件侧边楔形块的产生. 当压缩试件的尺寸比较高时, 剪切裂纹也起始于试件的

边角处, 随着继续压缩在试件对角处形成的裂纹趋于相交, 使试件产生剪切型失效. 扫描电镜分析的结果表明, 经较大压缩变形产生的楔形断面上只有少量碎块出现, 大量的玻璃微球 (尽管是脆性的) 并未压碎, 说明在该面内的失效模式并不是压缩失效. 无论高尺寸比试件还是低尺寸比试件, 在靠近边角区域的断面上均显现出带状结构, 这是剪切裂纹传播过程中经常改变传播平面破坏几层玻璃微球后产生的台阶. 这种特点对剪切型失效是独特的, 不可能在压缩区看到 (压缩区无裂纹传播, 材料被均匀压碎). 此外, 在高尺寸比试件下, 断口中心部分的微观特点与边角处差别相当大, 大量的碎块可以被看到, 不存在没有损伤的玻璃微球. 这与小尺寸比试件中心破坏面的情况类似, 失效之前, 试件经历了相当大的压缩, 导致玻璃微球的完全破碎.

此外, Karthikeyan 等<sup>[27]</sup> 也研究了玻璃微球填充高密度环氧复合泡沫塑料中加入少量短切玻璃纤维 (3.64%) 对材料压缩力学性能的影响. 实验结果表明, 玻璃纤维的加入降低了复合泡沫塑料的压缩强度, 但对材料的压缩模量没有明显影响. 压缩强度的降低主要归结为玻璃纤维的加入带入了相当数量的孔隙 (7.42%). 另外, 通过扫描电镜的分析, 发现玻璃纤维增强的复合泡沫塑料中存在纤维的聚集和纤维与基体的脱胶现象, 这说明材料的制备不是很理想. 如果通过某种手段设法降低引入的孔隙并保证纤维具有较好的分散性和粘接质量, 则玻璃纤维增强的复合泡沫塑料也可能比未增强的复合泡沫塑料的压缩性能更好. 对未增强复合泡沫塑料的扫描电镜分析表明, 压缩后还有相当数量的玻璃微球没有受到损伤. Karthikeyan 等<sup>[28]</sup> 在另一篇文章中, 进一步研究了含短切玻璃纤维 (6mm) 复合泡沫塑料制备工艺 (加纤维的次序) 和纤维含量对材料压缩强度的影响, 结果表明, 一般情况下增强材料的压缩强度随纤维体积比的增加而增加. 但玻璃纤维的加入明显地增加了气孔的含量, 而若颠倒纤维的填入次序 (后加), 则会明显地引入较大的气孔并产生纤维的聚集现象. 因此, 在制作材料时如果后加纤维则得到的增强材料尽管纤维体含量高, 但却不能有效地增强材料, 其强度不仅比低纤维含量的材料小, 而且有可能比未加纤维的复合泡沫塑料的强度还低. 文中进一步通过扫描电镜的分析确认了压缩实验的结果. 最后, 给出的结论是, 复合泡沫塑料可以在不使密度增加太多的情况下通过添加纤维来获得更好的压缩强度. 此外, Karthikeyan 等<sup>[29]</sup> 还研究了某一填充量下短切纤维 (6mm) 对复合泡沫塑料弯曲行为的影响. 通过对比纤维增强复合泡沫塑料与普通复合泡沫塑料三点弯曲试验的结

果,发现玻璃纤维增强复合泡沫系统比相同密度的普通复合泡沫塑料的强度高.而宏观观察和扫描电镜的分析则表明,增强复合泡沫塑料显示了较少的脆性,且存在纤维桥联,裂纹偏离和形成碎块的现象.

d'Almeida 和 Monteiro<sup>[30]</sup> 则研究了环氧基体中含有玻璃微球的复合材料力学性质随基体工艺参数的变化.他们提供的实验结果表明,复合材料显示的总体力学行为受到基体性质的强烈影响.实验结果揭示了不同基体复合材料间的明显差异,这些差异的趋势反映了基体 / 微球相互作用的变化.在他们的分析讨论中,引用了 Turcsanyi 等提出的联系粒子复合材料屈服应力与粒子填料分布、形貌和填料-基体粘接的模型,即

$$\sigma_{yc} = \frac{1 - V_f}{1 + AV_f} \sigma_{ym} \exp\{BV_f\} \quad (2)$$

这里  $\sigma_{yc}$  和  $\sigma_{ym}$  分别代表复合材料和基体的屈服强度,  $V_f$  为填料(粒子)的体积含量,  $A$  是联系填料排列分布的形状参数,对于球形粒子它的值接近 2.5,  $B$  是与填料基体界面性质有关的参数.对于  $B \leq 3$  的值填料基体界面间是弱粘接,没有增强效果.当  $B$  接近于零,没有增强效应,填料的表现似为孔洞,在填料基体界面上没有应力传递.通常,对于玻璃微球填充复合材料只有较小的增强作用被期待,并且在外加应力场下  $B$  参数获得的最大值接近于 3,它对应填料与基体之间好的粘接情况.根据  $B$  值的计算可以看到玻璃微球与基体之间的相互作用随所用的基体 / 硬化剂比值而发生变化.在空心玻璃微球增强的复合材料中,树脂基体可以起重要的力学作用.这些低密度复合材料在水下结构中使用,它们的力学行为非常依赖于树脂基体的性质.所以,基体性质出现任何的变化都可能明显地改变复合材料的行为.此外, d'Almeida<sup>[31]</sup> 还研究了玻璃微球直径对玻璃微球 / 环氧基复合材料力学行为的影响,他认为在单轴压缩情况下,微球-基体界面断裂或微球的开裂所产生的复杂应力状态可由单一的损伤参数来表示,该损伤参数由微球的壁厚与平均直径的比值所控制.所以,该比值是一个有用的工艺参数.文中给出的实验结果表明,微球体积比的增加导致了力学性能的降低,换句话说,微球在树脂基体中的作用就象孔隙一样.并且,对于固定的体积比,较小直径微球制作的复合材料具有较高的破坏应力和弹性模量.

最近, Goods 等<sup>[32]</sup> 研究了颗粒增强聚氨酯泡沫塑料的压缩力学性质,他们用铝粉填充聚氨酯泡沫塑料,在较高填充比下提高了泡沫塑料的模量和强度.对填充聚氨酯泡沫塑料进行的扫描电镜分析表明,铝粉(直径约  $2\mu\text{m}$  左右)均匀分布在泡沫塑料的支柱

和胞体壁内,所以泡沫结构单元(支柱或胞体壁)可以用实体聚氨酯基体与铝粉增强相构成的复合材料来模拟.因此,他们应用 Gibson 和 Ashby 的闭孔模型<sup>[32]</sup>,并联合使用 Halpin-Tsai 方程<sup>[32]</sup> 预测了填充铝泡沫塑料的模量和强度.

Rizzi 等<sup>[33]</sup> 则报告了作为芯层材料使用的复合泡沫塑料的力学行为.他们基于唯象方法提出了实验和数值的结果,在宏观水平上进行了比较.同时,他们还阐述了单轴,双轴和三点弯曲试验的主要特点,并用 Drucker-Prager 型的双模量本构模型来模拟具有扩散损伤的双轴应力状态.为了用计算机模拟三点弯曲试验,还提出了一种离散裂纹方法,得到了对于矩形 Dugdale 型粘接律最好的匹配.结果表明,环氧复合泡沫塑料在压缩下具有相当的延性,但在拉伸下极脆,显示了不同的弹性刚度(双模量材料).此外,双轴失效区具有鸡蛋形的典型形式.

关于复合泡沫塑料的动态力学性能国外的研究很少. Plastinin<sup>[34]</sup> 研究了应变率对含空心微球复合泡沫塑料的变形和破坏的影响,实验结果表明:含空心微球复合泡沫塑料的压缩强度和弹性模量随应变率的增加而增加,变形和失效机制也发生了相应的变化.材料的静态失效一般表现为大部分玻璃微球的压缩破坏,而动态失效则表现为基体的破坏,玻璃微球多数保持完好无损.最近, Kim 等<sup>[35]</sup> 使用新的制备方法获得了空心玻璃微球 / 环氧复合泡沫塑料,并按照防护参数研究了它的冲击行为和它的压缩行为,材料的密度为  $0.76\text{g/cm}^3$ . 实验研究使用了不同直径的试件,为便于对比还对纯基体试件进行了实验.实验结果表明,与纯基体试件尺寸相同的泡沫试件的压缩模量被降低了将近一倍,而冲击力和应力的实验值与预测结果比较一致.同时表明,玻璃微球的加入降低了冲击力和应力.另外,还发现在冲击加载和准静态加载下压缩失效存在着相似性,存在着明显的试件尺寸效应.在此之后, Kim 等<sup>[36]</sup> 为了进一步认识材料的断裂机理和防护行为,又研究了空心玻璃微球填充环氧复合泡沫塑料的断裂和冲击行为.实验结果表明,空心玻璃微球的加入尽管在小体积比情况下存在钉扎机制(由断面的扫描电镜观察),但不能提高复合材料的断裂韧性比.虽然随着空心玻璃微球含量的增加最大冲击力得到降低,但这是以牺牲其它性质如比断裂韧性和比弯曲强度为代价的.

值得一提的是, Eriksen<sup>[3,37]</sup> 通过低密度聚乙烯(PE)与 5% 重量比的聚合物空心微球相混合,并加热使低熔点的聚乙烯处于熔融状态,然后挤压成形得到了所谓的“微孔复合泡沫塑料”.他们对这种材料的拉伸性能进行了实验研究,得到的结论是,空心聚合物微球的填入导致了较小的弹性区和较低的断裂应变

值,与纯聚乙烯相比,弹性模量虽然较低,但比模量却得到了较大提高.另外,他们还在拉伸加载的条件下,对材料的微结构变化进行了观察,发现直到试件断裂没有看到微球与基体脱胶.最近, Lawrence<sup>[38,39]</sup>又对这类微孔复合泡沫塑料的微结构特性和黏弹性特性进行了研究,在没有对胞体形状做出假设的情况下估计了胞体体积比和胞体的数密度等材料结构参数.此外,他们通过对压延聚乙烯(PE)及其约含40%体积的聚合物空心微球的复合聚乙烯泡沫塑料在3种温度、3种载荷水平下进行的蠕变试验和室温下进行的5种变形水平的松弛实验研究了这类材料的黏弹性性质.

近些年来,国内也开展了与复合泡沫塑料力学行为相关的研究工作.例如,汤羽等<sup>[40]</sup>以等效均匀体模型为基础,结合解析法和有限元工具分析了空心微球填充复合材料的宏观初始屈服面,提出了宏观初始屈服函数.汤羽等<sup>[41]</sup>还基于多相固体本构等效理论及相间损伤细观模型,分析了空心微球填充复合材料的塑性行为.此外,沈乐天等<sup>[42]</sup>研究了含空心玻璃微球复合材料的动力学行为.而蔡小焯等<sup>[43]</sup>研究了含空心玻璃微球复合材料的静态力学性能,对断口形貌进行了分析,并对其结构形态与破坏过程作了微观

实时观察.

最后,需要说明的是,作者近年来在国内系统地开展了对三相复合泡沫塑料力学行为的研究工作<sup>[44~53]</sup>.首先,利用微分法研究了复合泡沫塑料的有效模量性质,在较高空心球体积含量范围内,比较准确地预测了复合泡沫塑料的杨氏模量<sup>[44]</sup>.之后,又提出用四相球模型<sup>[45]</sup>来确定含空心球复合材料的杨氏模量性质,给出比 Huang 等的理论<sup>[18]</sup>好的预测结果.在此基础上,进一步通过多次夹杂的步骤,利用微分法和 Mori-Tanaka 方法求解了复合泡沫塑料的有效模量<sup>[46]</sup>,还推导了单次夹杂求解多相颗粒增强复合材料有效模量的微分法公式和 Mori-Tanaka 方法的公式,并用其求解了复合泡沫塑料的有效模量<sup>[47]</sup>.最近,又基于 Mori-Tanaka 平均应力的概念和 Eshelby 等效夹杂的原理,研究了含涂层空心球复合泡沫塑料的弹性性质,从理论上导出了这类复合材料的有效模量预测公式,讨论了涂层厚度和泊松比变化对复合泡沫塑料有效模量性质的影响<sup>[48]</sup>.由于上述理论分析所给出的公式都比较复杂,这里仅给出文献<sup>[48]</sup>中理论预测与实验结果的对比结果(见图1和图2),可见,所获得的理论公式可以给出与(复

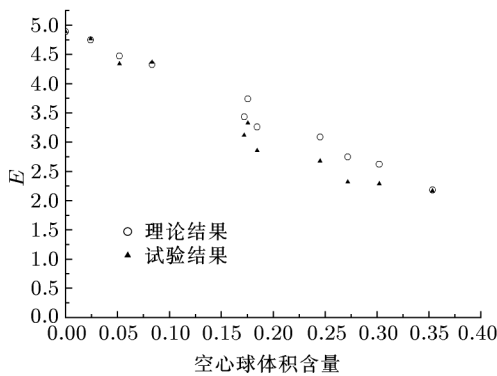


图1 复合泡沫塑料杨氏模量实验值与理论值的比较<sup>[48]</sup>

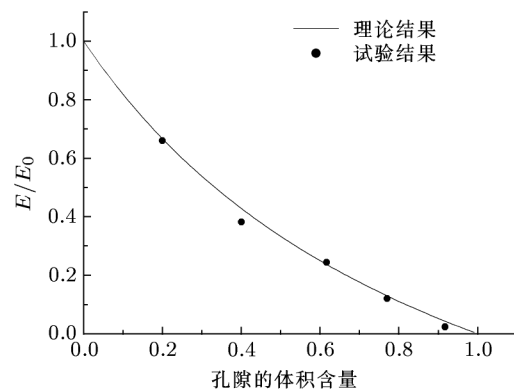
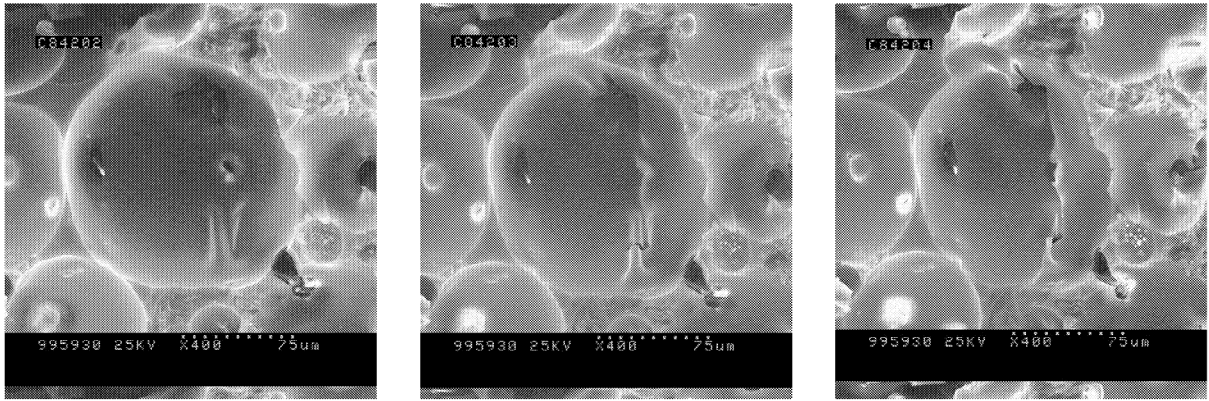


图2 泡沫塑料杨氏模量实验值与理论值的比较<sup>[48]</sup>

合)泡沫塑料实验结果较为一致的预测结果.此外,在理论研究的同时,还借助计算机和通用软件对高密度复合泡沫塑料进行了有限元分析,研究了高密度复合泡沫塑料的失效行为.通过不同加载条件下对复合泡沫塑料胞体模型的有限元分析和计算,获得了一些定性的结论,这些结论与实验的观察结果基本上是一致的<sup>[49]</sup>.此外,作者在实验研究方面的主要工作是:以聚氨酯复合泡沫塑料为对象,通过静、动态压缩实验,研究了这类材料的宏观变形及失效的规律,并获得了材料的应力-应变关系及相应的力学性能参数<sup>[50]</sup>.之后,对复合泡沫塑料进行了微观拉、压加

载实验,在位观察了复合泡沫塑料的变形和破坏情况(这里仅给出压缩观察的照片,见图3),从而对这类材料的变形和失效机制有了比较直观的认识<sup>[51]</sup>.同时,还对复合泡沫塑料的静、动态宏观变形试件进行了扫描电镜分析,进一步研究了材料的破坏机理<sup>[50~52]</sup>.另外,基于宏观动态压缩实验所获得的应力-应变曲线(见图4),进一步分析和讨论了复合泡沫塑料的能量吸收特性,发现材料最佳吸能点的包络线是同一直线<sup>[52]</sup>(见图5).同时,还利用材料的静、动态压缩应力-应变曲线计算了它们的缓冲系数,评价了复合泡沫塑料的缓冲特性<sup>[53]</sup>.

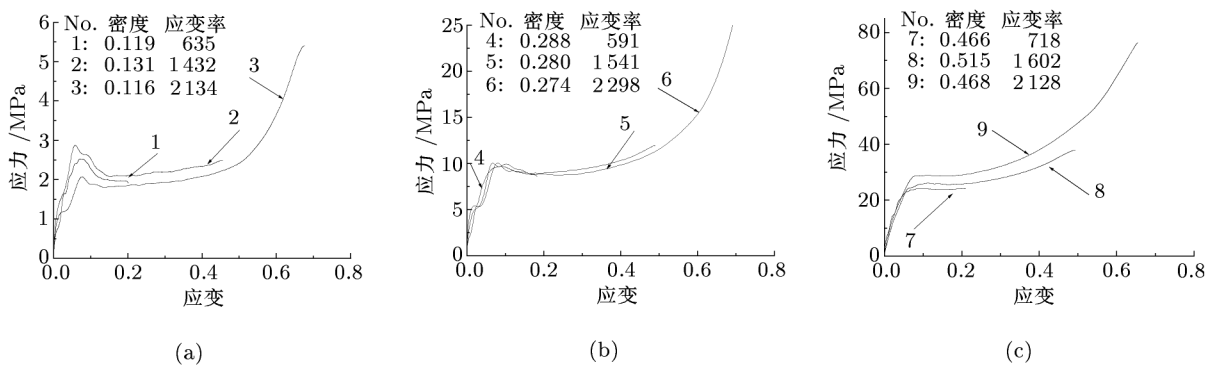


(a) 应力为 8.28 MPa

(b) 应力为 10.78 MPa

(c) 应力为 11.56 MPa

图 3 压缩实验中泡孔上皱褶和裂纹的产生 [50]



(a)

(b)

(c)

图 4 不同密度和应变率下复合泡沫塑料的应力 - 应变曲线 [52]

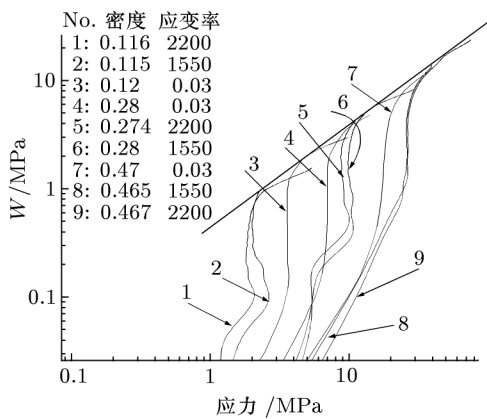


图 5 复合泡沫塑料能量吸收图 [52]

## 4 结束语

尽管国内外学者已对这类新型泡沫材料的力学行为进行了大量研究,但这类材料的强度和失效问题还远未解决,还缺少表征这类材料力学行为的本构关系,更缺少对这类材料动态失效和破坏规律的认识.此外,从微观角度认识复合泡沫塑料破坏和损伤演化

的机制的工作还有待于深化,宏、细观力学研究的统一仍是一项富有挑战性的工作.增强粒子对复合泡沫塑料的增强机理及与此相关的界面力学问题也是人们十分关注的一个焦点.同时,考虑到复合泡沫塑料也是高分子聚合物材料,聚合物的力学性能对这类材料力学性能的影响还少有研究.因此,研究聚合物黏弹性的影响以及复合泡沫塑料的温度效应等对材料的实际应用也具有十分重要的意义.此外,研究高应变率作用下复合泡沫塑料的能量吸收机制和应力波的传播特性及其断裂、疲劳和蠕变等力学行为对于工程应用来说也是至关重要的.

## 参考文献

- 1 Hilyard N C. Mechanics of Cellular Plastics. London: Applied Sci Publisher, 1982. 359~391
- 2 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
- 3 卢子兴.微孔泡沫塑料力学行为的研究综述.力学进展, 2002, 32(3): 365~378
- 4 李鹏,刘德安,杨学忠.微球复合泡沫材料的研究和应用.玻璃钢/复合材料, 2000, (4): 21~24
- 5 Shutov F A. Syntactic polymer foams. *Advances in Polymer Science*, 1986, 73/74: 63~123



- 6 DeRuntz J A, Hoffman O. The static strength of syntactic foams. *J Appl Mech*, 1969, 36: 551~557
- 7 DeRuntz J A. Some applications of plasticity theory to the statics of syntactic foam. *J Appl Mech*, 1971, 38: 23~29
- 8 Barber E, Nelson J, Beck W. Improving properties in rigid urethane foams using glass bubbles. *J Cell Plast*, 1977, 13: 383~387
- 9 Puterman M, Narkis M, Kenig S. Syntactic foams I. preparation, structure and properties. *J Cell Plast*, 1980, 16: 223~229.
- 10 Narkis M, Puterman M, Kenig S. Syntactic foams II. preparation and characterization of three-phase systems. *J Cell Plast*, 1980, 16: 326~330
- 11 Narkis M, Puterman M, Kenig S. Syntactic foams III. three-phase materials produced from resin coated microballoons. *J Cell Plast*, 1982, 18: 230~232
- 12 Narkis M, Puterman M, Boneh H, et al. Rotational molding of thermosetting three-phase syntactic foams. *Polym Eng Sci*, 1982, 22: 417~421
- 13 Narkis M, Kenig S, Puterman M. Three-phase syntactic foams. *Polym Comp*, 1984, 5(2): 159~165
- 14 Kenig S, Raiter I, Narkis M. Three-phase silicone based syntactic foams. *J Cell Plast*, 1984, 20: 423~429
- 15 Kenig S, Raiter I, Narkis M. Three-phase carbon microballoon syntactic foam composites. *Polymer Composites*, 1985, 6(2): 100~104
- 16 Nielsen L E. Elastic modulus of syntactic foams. *J Polym Sci: Polym Phys Edition*, 1983, 21: 1567~1568
- 17 Kinra V K, Ker E. Effective elastic moduli of a thin-walled glass microsphere/ pmma composite. *J Comp Mater*, 1982, 16: 117~138
- 18 Huang J S, Gibson L J. Elastic moduli of a composite of hollow spheres in a matrix. *J Mech Phys Solids*, 1993, 41(1): 55~75
- 19 Hervé É, Pellegrini O. The elastic constants of a material containing spherical coated holes. *Archives of Mechanics*, 1995, 47(2): 223~246
- 20 Palumbo M, Donzella G, Tempesti E, et al. On the compressive elasticity of epoxy resins filled with hollow glass microspheres. *J Appl Polym Sci*, 1996, 60(1): 47~53
- 21 Palumbo M, Tempesti E. The effect of particle-matrix interfacial conditions on the compressive elasticity of epoxy resins filled with untreated hollow glass microspheres. *Polymers & Polymer Composites*, 1997, 5(3): 217~221
- 22 Bardella Lorenzo, Genna Francesco. On the elastic behavior of syntactic foams. *Int J Solids and Struct*, 2001, 38: 7235~7260
- 23 Lin W H, Jen M R. Manufacturing and mechanical properties of glass bubbles/epoxy particulate composite. *J Comp Mat*, 1998, 32(15): 1356~1390.
- 24 Gupta N, Karthikeyan C S, Sankaran S, et al. Correlation of processing methodology to the physical and mechanical properties of syntactic foams with and without fibers. *Mater Characterization*, 1999, 43: 271~277
- 25 Gupta N, Kishore, Woldesenbet E, et al. Studies on compressive failure features of in syntactic foam material. *J Mater Sci*, 2001, 36: 4485~4491
- 26 Gupta N, Woldesenbet E, Kishore. Compressive fracture features of syntactic foams-microscopic examination. *J Mater Sci*, 2002, 37: 3199~3209
- 27 Karthikeyan C S, Kishore. Comparison of compressive properties of fiber-free and fiber-bearing syntactic foams. *J Rein Plast Comp*, 2000, 19(9): 732~742
- 28 Karthikeyan C S, Sankaran S, Kumar N J, et al. Processing and compressive strengths of syntactic foams with and without fibrous reinforcements. *J Appl Polym Sci*, 2001, 81: 405~411
- 29 Karthikeyan C S, Sankaran S, Kishore. Influence of chopped strand fibres on the flexural behaviour of a syntactic foam core system. *Polymer International*, 2000, 49: 158~162
- 30 d'Almeida J R M, Monteiro S N. The resin/ hardener ratio as a processing parameter for modifying the mechanical behaviour of epoxy-matrix/glass microsphere composites. *Comp Sci Tech*, 1998, 58: 1593~1598
- 31 d'Almeida J R M. An analysis of the effect of the diameters of glass microspheres on the mechanical behavior of glass-microsphere/epoxy-matrix composites. *Comp Sci Tech*, 1999, 59: 2087~2091
- 32 Goods S H, Neuschwanger C L, Whinnery L L, et al. Mechanical properties of a particle-strengthened polyurethane foam. *J Appl Polym Sci*, 1999, 74: 2724~2736
- 33 Rizzi Egidio, Papa Enrico, Corigliano Alberto. Mechanical behavior of a syntactic foam: experiments and modeling. *Int J Solids Struct*, 2000, 37: 5773~5794
- 34 Plastinin A V, Silvestrov V V. The effect of strain rate on deformation and fracture of spheroplastic. In: Chiem Chi-Yuen ed. Proceedings of 2nd Int Symp Impact Eng. Beijing: Chinese Journal of Mechanics Press, 1996. 170~175
- 35 Kim H S, Oh H H. Manufacturing and impact behavior of syntactic foam. *J Appl Polym Sci*, 2000, 76: 1324~1328
- 36 Kim H S, Khamis M A. Fracture and impact behaviours of hollow micro-sphere/epoxy resin composites. *Composites*, 2001, 32A: 1311~1317
- 37 Eriksen E. Syntactic Foam with Expandable Polymer Microballoons. In: Pyrz R, ed. Proceedings of the 3rd Nordic Meeting on Materials and Mechanics. Denmark: Aalborg University, 2000. 167~173
- 38 Lawrence E. Microstructural characterisation of a syntactic foam. *Polymers and Polymer Composites*, 2001, 9(7): 449~457
- 39 Lawrence E. Viscoelastic properties of polyethylene syntactic foam with polymer microballoons. *Polymers and Polymer Composites*, 2001, 9(4): 227~237
- 40 汤羽, 张培源, 严波. 空心微珠填充复合材料宏观初始屈服面分析及实验. 重庆交通学院学报, 1990, 9(1): 40~44
- 41 汤羽, 汤国栋. 含相间损伤颗粒填充复合材料的塑性分析. 复合材料学报, 1991, 8(4): 81~87
- 42 Shen Letian, Xu Suzhen, et al. Experimental study of dynamic response for Epoxy/SiO<sub>2</sub> microballoon composite material. In: R Wang, eds. Proc of IUTAM Symp Impact Dynamics. Beijing: Peking Univ Press, 1994. 407~416
- 43 蔡小焯, 梁小清, 尚嘉兰. SiO<sub>2</sub> 空心微珠复合材料力学性能的实验研究. 复合材料学报, 1994, 11(4): 69~75
- 44 卢子兴, 高镇同. 应用微分法确定复合泡沫塑料的杨氏模量. 北京航空航天大学学报, 1996, 22(6): 692~695
- 45 卢子兴, 高镇同. 含空心球复合材料有效模量的确定. 北京航空航天大学学报, 1997, 23(4): 461~466

- 46 严寒冰. 应用微分法及 Mori-Tanaka 方法求解含空心球复合泡沫塑料的有效模量. 北京航空航天大学学报, 2000, 26(6): 688~690
- 47 Lu Zixing, Yan Hanbing, Ryszard Pyrz. Theoretical prediction for effective young's modulus of syntactic foams. In: Pyrz R, ed. Proceedings of the 3rd Nordic Meeting on Materials and Mechanics. Denmark: Aalborg University, 2000. 213~225
- 48 袁应龙, 卢子兴. 含涂层空心球复合泡沫塑料的模量预测及讨论. 应用数学和力学, 2004, 25(5): 481~487
- 49 严寒冰, 卢子兴. 高密度复合泡沫塑料力学性能的静动态有限元分析. 见: 杨桂通等主编. 塑性力学与工程, 北京: 万国学术出版社, 2002. 160~165
- 50 卢子兴, 严寒冰, 刘波等. 复合泡沫塑料力学性能的实验研究. 见: 白以龙等主编. 力学 2000. 北京: 气象出版社, 2000. 584~586.
- 51 卢子兴, 严寒冰. 拉、压加载下高密度泡沫塑料的全程显微观察. 固体力学学报, 2002, 23(S): 97~102
- 52 卢子兴, 袁应龙. 高应变率加载下复合泡沫塑料的吸能特性及失效机理研究. 复合材料学报, 2002, 19(5): 114~117
- 53 袁应龙, 卢子兴. 复合泡沫塑料的缓冲特性研究. 北京航空航天大学学报, 2004, 30(2): 135~138

## A REVIEW OF STUDIES ON THE MECHANICAL BEHAVIOR OF SYNTACTIC FOAMED PLASTICS

LU Zixing

Institute of Solid Mechanics, Beijing University of Aeronautics and Astronautics, Beijing 100083, China

**Abstract** Syntactic foam as an important protecting material has been used to the military and civil industries. Therefore, the investigation into mechanical behavior of these new materials is important both theoretically and practically. In order to promote the exploitation and use of syntactic foam plastics in our country and the study on the mechanical behavior of this new kind of foam plastics, a review of studies on the mechanical properties of syntactic foamed plastics is given in this paper. First, the early studies on mechanical properties of syntactic foam plastics are introduced. Second, the recent developments of mechanical properties of syntactic foamed plastics, including some author's work in this field, are reviewed, that is some static and dynamic compression tests as well as microscopic loading tests for polyurethane syntactic foams. The deformation characteristics and failure mechanism of these materials are discussed. In theoretical aspects, the characteristics of energy absorption as well as the cushioning behavior of syntactic foams are also discussed and from the macroscopic and microscopic views of mechanics, the theoretical prediction of mechanical properties is important. Moreover, based on the method of finite element analysis and the general software, the failure behavior of high density syntactic foams is investigated. Finally, some future development trends are presented.

**Keywords** syntactic foamed plastics, mechanical behavior, experiment, model, impact

---

\* The project supported by the NSAF Union Foundation (10276004), the National Natural Science Foundation of China (10072007)