

文章编号: 1000-4882 (2022) 04-0226-15

# 固体浮力材料研究现状与发展趋势

高 博<sup>1,2</sup>, 王景泽<sup>3</sup>, 崔维成<sup>\*3</sup>

(1. 集美大学 轮机工程学院 厦门 361021;

2. 山东交通学院 船舶与港口工程学院, 威海 264209;

3. 西湖大学 工学院 浙江省海岸带环境与资源研究重点实验室, 杭州 310024)

## 摘 要

高强度固体浮力材料的选择和应用是大深度潜水器研发中的一项关键技术。论文从理论、试验和制备工艺 3 个方面对固体浮力材料的文献进行综述和研究。重点介绍研究方法、研究现状和研究局限性。分析浮力材料在理论研究与试验、工艺制备等方面需要解决的一些问题。提出建立精确的固体浮力材料数值分析模型、理论预测破坏过程、评价吸水特性与建立相关的测量及使用标准等研究方向和建议, 可为固体浮力材料力学行为的深化研究, 在役的全海深潜水器浮力材料的安全评估提供一定的理论支持。

**关键词:** 浮力材料; 吸水性; 制造工艺

**中图分类号:** U674.941

**文献标志码:** A

## 0 引 言

浮力材料是将空心玻璃微珠、空心树脂微珠、空心金属微珠等填料均匀分散到高分子聚合物基体(树脂等)中经一定制备工艺得到的闭孔复合泡沫塑料。它具有高强度、低密度、低吸水率等优异特性, 是深海无人或载人潜水器的一种重要材料<sup>[1]</sup>。在“十三五”期间, 我国开展全海深载人或无人潜水器研制时, 遇到的一个重要问题就是浮力材料的选择<sup>[2]</sup>。上海海洋大学深渊科学技术研究中心曾对国内外厂商提供的全海深浮力材料样品的进行测试, 发现浮力材料都不能满足中国船级社载人潜水器设计规范<sup>[3]</sup>要求的强度级别。而且经初步分析认为, 当前玻璃微珠或环氧树脂型的固体浮力材料基本上已经优化到了强度极限, 生产厂家在短期内很难生产出满足规范强度要求的新产品<sup>[2]</sup>。这就要求在全海深无人或载人潜水器中超规范使用现有的浮力材料。超规范使用的一个安全措施就是缩短材料的使用周期, 如何科学合理地确定浮力材料的使用周期, 用什么样的检测方法和检测标准来确定潜水器中的浮力块是需要更换还是可以继续使用等问题, 需要对浮力材料的吸水率特性有深入的了解。为此, 作者团队开展了全海深载人潜水器浮力材料吸水率特性研究。本文所开展的研究是其中的一项内容, 主要目的就是在原有研究<sup>[2]</sup>的基础上, 对国内外固体浮力材料的研究现状作进一步的补充, 从理论、试验和制备工艺研究 3 个方面对固体浮力材料的研究进展进行综述。在理论研究方面, 介绍了固体浮力材料的弹性模量预测、力学特性分析、吸水率特性预报等理论研究方法、研究现状及研究的局限性和趋势; 在试验研究方面, 围绕浮力材料静水压、动态压缩和拉伸试验, 从宏观和细观力学出发研究材

料的宏观变形规律和细观失效机制; 在制备工艺方面, 介绍不同制备工艺的优缺点, 不同工艺对浮力材料性能的影响。通过研究对固体浮力材料未来研究的重点方向提出了建议。

## 1 理论研究

### 1.1 解析法

对于将空心微球填充到树脂基体的复合材料的早期研究以试验研究为主, 理论研究欠缺。20 世纪 90 年代起, 逐渐开始使用弹性力学法、微分法、Mori-Tanaka 法和自洽法等对浮力材料的力学、材料性能等进行理论研究, 并与试验进行对比。

卢子兴等<sup>[4-7]</sup>利用三相球模型, 根据空心球中空洞体积含量、球壳的体积模量和剪切模量, 预测空心球在承受静水压力下的等效体积模量, 提出了预测薄壁空心球占较大体积分数的复合材料有效弹性模量的微分方法<sup>[5-6]</sup>。针对浮力材料中孔隙的缺陷, 即材料制造过程中基体存在的气泡, 提出了平方律修正模型, 得到的复合材料弹性模量预测值与试验值非常接近。在三相球模型研究的基础上提出了四相球理论, 适用于空心球任意体积占比和不同壁厚的复合材料。该方法具有一般性, 弹性模量的预测值更接近试验结果<sup>[7]</sup>。基于自洽模型, 预测单向加载下高密度泡沫塑料的力学性能, 得到材料的有效剪切模量及屈服强度与材料孔隙比之间的关系, 并给出了材料屈服强度的理论值<sup>[8]</sup>。使用分析界面法, 通过应力集中系数和等效应力随空心微珠壁厚变化的趋势, 得出可能发生的破坏模式和预测材料的强度<sup>[9]</sup>, 预测结果与其它经验模型和试验结果相吻合, 证明了模型的可行性。三相球模型如图 1 所示, 四相球模型如图 2 所示。

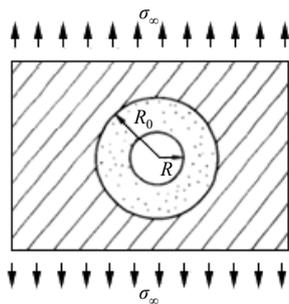


图 1 三相球模型 (自洽模型) <sup>[8]</sup>

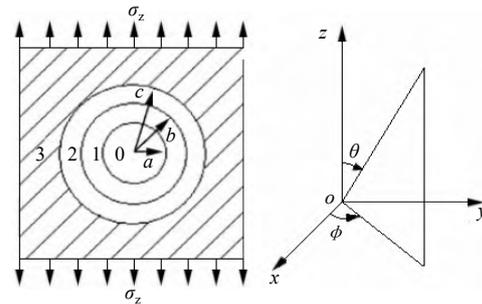


图 2 四相球模型<sup>[9]</sup>

Palumbo 等<sup>[10-11]</sup>预测了含空心球复合材料的有效杨氏模量, 分析了填充粒子形状对材料弹性模量的影响以及理论模型的适用性。对考虑颗粒与基体黏接因素后材料的弹性模量进行了预测。Goods 等<sup>[12]</sup>的研究发现弹性模量与密度近似满足指数为 1.7 的幂函数关系。严寒冰<sup>[13]</sup>基于多次夹杂的思想, 应用微分法和 Mori-Tanaka 方法求解复合泡沫塑料的有效模量。他首先将空心玻璃微珠当作第一次夹杂, 与原基体组成一种复合材料, 按照微珠与基体的比例, 利用微分法计算有效模量; 然后将此复合材料当作基体, 气孔当作第二次夹杂, 再次求解得到这种复合材料的有效模量。Bardella 等<sup>[14]</sup>利用 Herve 物理模型和相应的弹性解, 推导了复合材料弹性模量均质化值的显式公式。袁应龙等<sup>[15]</sup>运用 Mori-Tanaka 法和 Eshelby 等效夹杂原理, 对含涂层空心球复合泡沫材料的等效模量, 给出了理论预测公式, 分析涂层厚度和泊松比对材料弹性模量的影响。邹波等<sup>[16]</sup>将含涂层空心微珠填充复合材料, 运用五相球模型预测复合材料的杨氏模量、体积模量和剪切模量, 推导了理论公式, 并研究涂层厚薄和空心球体积比对弹性模量的影响。宋超<sup>[17]</sup>针对玻璃微珠含量低的复合材料, 使用微分法给出适用于微珠含量低于 63% 的复合材料弹性性能预报方法。

综上所述, 国内外研究者对浮力材料的理论研究主要集中在弹性模量的预报, 理论预测结果与试

验结果较为一致。但是对于浮力材料的动态失效、损伤演化和破坏过程、使用寿命等的理论预测有待进一步研究。

## 1.2 数值分析

随着计算机运算能力提升和有限元法的广泛运用,数值分析方法为浮力材料应力分布、宏观力学性能与细观结构、组织成分间的定量关系等研究提供了高效而直观的工具。在进行数值分析时,通常要对模型进行一些简化假定,如各向同性、微珠外径一致、微珠与基体黏接良好等,因此对于全海深极端工况下潜水器的数值模拟结果有待试验验证。

### 1.2.1 有限元模型

有限元模型通常建立代表复合材料的细观结构的体积单元(代表体元),包括二维平面和三维实体两种情况。二维平面单元的法向应变与实际情况差别较大,只能对某些力学行为进行定性分析<sup>[18-20]</sup>。

空心微珠复合泡沫固体浮力材料是通过在树脂基体中填充空心微珠而制成的复合材料。材料中的颗粒分布具有非均质性、无序性和随机性等特点,在制备过程中存在如气泡、破碎微珠等缺陷。三维实体有限元模型包括单微珠和多微珠模型。数值仿真模型对浮力材料的细观结构进行理想化处理<sup>[21-29]</sup>,假设微珠直径相同,增强体颗粒均匀分布在基体中,基体中不存在气泡且与增强体颗粒理想接触,材料为各向同性。

### 1.2.2 单微珠体积单元模型数值分析

针对空心玻璃微珠在树脂基体中的分布,可选用不同的单胞模型。常见的单胞模型有:简立方分布模型、面心立方分布模型、体心立方分布模型、密排六方分布模型和随机分布模型<sup>[17]</sup>。简立方分布模型虽然简单,但是不适合微珠体积分数较高的浮力材料;密排六方分布模型的模拟较为复杂,计算量大且不利于后期分析;随机分布模型更为复杂,不适合单微珠数值模拟。

在计算过程中,根据模型对称性和简化模拟,通常取 1/8 模型或 1/2 模型,如图 3 所示。

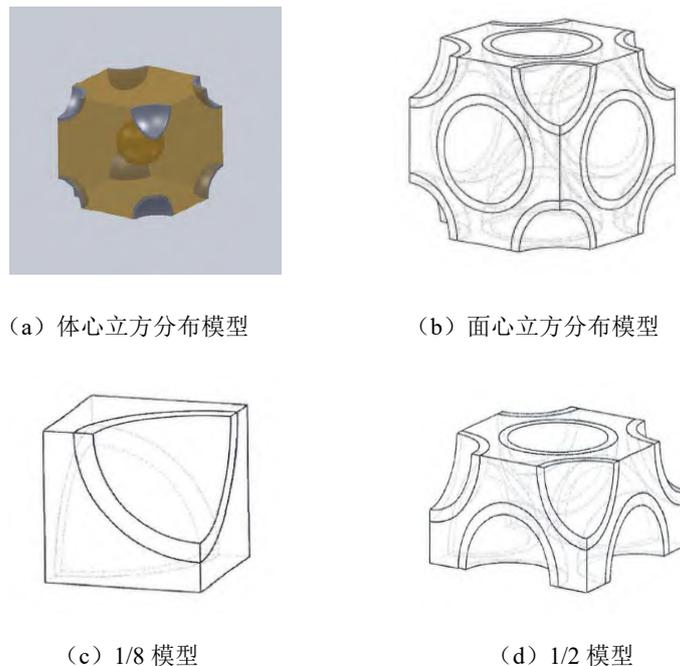


图 3 三维单胞模型<sup>[30]</sup>

张芮等<sup>[26]</sup>假设模型中的球形填充粒子均匀分布,将模型简化成圆柱形基体中含有一个球形粒子,转化成轴对称问题,计算时取 1/4 模型。在拉伸状态下,分析了多种增强颗粒与基体杨氏模量比情况

下基体内应力分布形式, 分析剪切屈服、裂纹及界面脱粘等损伤破坏形式的力学条件, 数值计算与试验结果具有较好的一致性。宋超<sup>[17]</sup>利用 ANSYS 程序分析了单轴压缩下玻璃微珠和环氧轻质复合材料单胞模型的力学性能, 分析不同微珠占比的复合材料强度, 计算结果与试验结果吻合较好。Nian 等<sup>[31]</sup>基于扩展有限元法并考虑内聚力, 利用 ABAQUS 软件建立轴对称模型, 分析浮力材料的裂纹和界面脱粘 (如图 4 所示), 结果表明界面性质对复合泡沫塑料的破坏起主要作用, 而材料孔隙会降低复合泡沫塑料的拉伸强度。此外, 拉伸强度随空心颗粒体积分数的增加而降低, 随颗粒壳厚度的增加而增加, 数值结果与试验数据吻合较好。倪士伟<sup>[30]</sup>利用 ANSYS 软件采用体心立方分布和面心立方分布两种模型对不同微珠体积分数的固体浮力材料进行了单向压缩模拟, 分析了应力分布情况, 得到固体浮力材料的压缩强度, 模拟值与试验值较为吻合。王耀声等<sup>[32-33]</sup>采用 ABAQUS 软件, 研究了添加碳纤维对固体浮力材料应力分布的影响。发现加入碳纤维可以提高基体弹性模量, 降低空心玻璃微珠球壳上的应力, 减少空心玻璃微珠的破坏倾向和裂纹源的产生, 有利于提高固体浮力材料的压缩强度。陈鹿等<sup>[34]</sup>利用 ANSYS 有限元软件对不同玻璃微珠体积分数和不同玻璃微珠壁厚组合的浮力材料进行了力学分析, 对不同体积分数和不同内外径比的全海深浮力材料的有效弹性模量进行研究, 获得了玻璃微珠厚度、体积分数与有效弹性模量及浮力材料密度之间的关系。

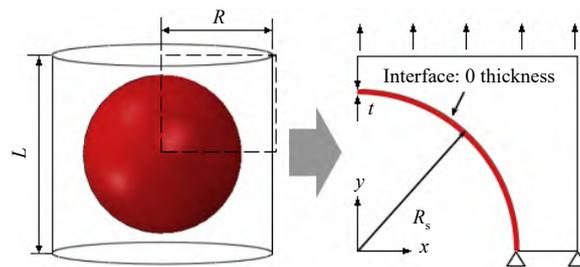


图 4 二维单胞模型<sup>[31]</sup>

单微珠数值分析模型简单, 分析速度快。但是无论是立方分布模型还是面心立方分布模型, 微珠的半径以及微珠之间的距离相对固定, 未考虑材料制备中存在的缺陷, 与真实材料差别较大, 因此分析结果与实际情况存在一定的差别, 分析结果是否适用于全海深极限工况下的浮力材料有待验证。

### 1.2.3 多微珠代表体积单元模型数值分析

为了更加接近浮力材料的真实结构, 得到更精确的浮力材料应力分布, 开展了多颗粒代表体积单元模型研究。与单微珠类似, 多微珠有限元模型同样分为二维和三维模型。多微珠模型边界通常包括周期性和填充式两种形式。构建代表体积单元模型有两类方法: 真实结构模型法和虚拟结构模型法<sup>[35]</sup>。真实结构模型法的建立过程为: 将样品分成很多层, 使用连续切片法取得每一层的平面结构图像输入计算机, 利用三维重构技术, 还原材料的三维真实结构<sup>[36]</sup>。真实结构模型法对试验设备和技术水平要求较高, 且成本高<sup>[37]</sup>, 在浮力材料的有限元分析中应用较少。

相对真实结构模型法, 虚拟结构模型法以材料结构特征为基础, 构建具有一定代表性的模型, 同时可利用周期性边界条件和模型的对称性, 大量减少计算工作量。对于增强颗粒随机分布的复合材料, 可采用随机系列吸收 (random sequential adsorption, RSA) 方法<sup>[38]</sup>实现。主要思想是在基体代表体积单元中逐个加入新的随机生成的球体, 依次判断其是否和已存在的球体相交, 直到判定新的球体与之前的球体不相交, 则接受当前的球体, 记录下位置, 作为已存在的球体之一<sup>[39]</sup>, 多次循环直到满足要求。但是 RSA 方法难以生成增强颗粒体积含量较高的模型。Sheng 和 Zhang 等<sup>[40-41]</sup>提出了下落堆积法, 可以生成颗粒体积分数高达 50% 以上的颗粒复合材料。Yu 等<sup>[42]</sup>提出了将增强颗粒简化为椭球的空间压缩

法。Bardella 等<sup>[43-47]</sup>通过建立包含 50 个随机分布微珠的浮力材料模型，使用有限元软件分析其材料性能，基于细观力学重新推导微分自洽模型，提出一种新的微珠破坏准则。在宏观上，模型的有效强度表现出各向同性，在体积分数 60% 时与试验结果吻合很好。根据破坏准则，假定每一个微珠破裂，以现象学方式解释基体的非线性行为，认为材料的力学损伤与微珠的破损数成正比，尤其是微珠含量比例超过 50% 时。模拟不同微珠体积分数和不同密度的浮力材料在高应变率压缩载荷条件下的压缩模量、应变能和有效强度等力学响应。通过建立包含 100 个和 300 个随机分布微珠的有限元模型，数值分析表面涂层对浮力材料强度的影响，数值分析的弹性模量和静水压力试验结果吻合较好。Segurado 等<sup>[48]</sup>通过建立 30 个微珠、体积分数为 50% 的模型，数值分析 3 种材料的弹性常数，指出了与 3 种典型解析法解得的弹性常数的不同之处。Kari 等<sup>[49]</sup>使用 ANSYS 软件，基于随机附和 RSA 原则建立三维单元体，分析不同体积分数的浮力材料性能，研究微珠大小对材料性能的影响，同时对经典的解析方法，数值结果与解析结果吻合较好。Nguyen 等<sup>[50]</sup>使用 ANSYS 软件评估添加纤维对复合泡沫的弹性模量和应力分布的影响。最大应力位于颗粒壁区域，随着壁厚的增加导致最大应力的位置向纤维方向移动，数值结果与试验数据吻合较好。梁希<sup>[51]</sup>利用 RSA 方法建立了不同空心颗粒体积填充比和壁厚的复合材料的代表体积单元模型，求出材料的有效弹性模量、泊松比、屈服极限和热膨胀系数等常数，分析了各参数与材料弹性常数之间的关系。李想<sup>[52]</sup>使用 ANSYS 软件对复合泡沫材料进行分析，发现材料的应力分布不均，内应力主要集中在空心玻璃微珠的球壳处。此外，通过数值仿真计算，推测当微珠填充比不相同，基体与空心玻璃微珠发生失效破坏的先后顺序。

多微珠代表体积单元数值分析结果与实际情况较吻合，但大部分分析未考虑浮力材料中的气泡以及制备过程造成的微珠破碎等因素，分析偏于理想化，与实际材料存在一定的差别。且分析过程选择的微珠数量相对较少，相对工程上的实际浮力块，仍属微观分析。

### 1.3 吸水性研究

研究者对于浮力材料的吸水性进行了大量研究，前期的研究主要集中在试验研究，对吸水机理的研究相对较少。

当压力或时间达到某个临界值前，吸水率随压力增加而增加。如果压力不变，随着时间的延长，吸水率也会增加，如图 5 所示。对于压力和时间的很大一个区域，吸水率的变化非常小。当压力或时间达到某个临界值时，吸水率才会显著增加<sup>[53]</sup>。Kochetkov 等<sup>[54]</sup>对固体浮力材料的吸水性进行持续 10 年的记录，发现材料吸水在未达到饱和状态时，吸水率一直在增加。通过对吸水率随时间变化趋势的数学分析，发现菲克（Fick）定律适用于描述固体浮力材料前期的吸水过程，但随着时间的推移，理论吸水率与实际吸水率之间的差别越来越大。王景泽<sup>[55]</sup>提出了一种基于自洽理论的固体浮力材料吸水模型，表明吸水行为可分为两个阶段。第一阶段，吸水率与断裂的玻璃微珠的体积分数成正比，第二阶段，由于玻璃微珠的碎裂扩展，呈指数关系。通过与试验数据进行比较，对吸水模型进行了验证。

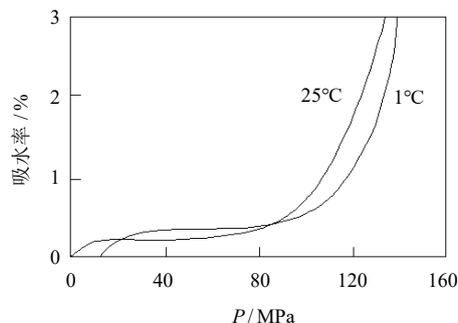


图 5 浮力材料吸水量与压力的关系<sup>[53]</sup>

浮力材料的吸水性研究取得了一定成果, 但需要分析影响浮力材料吸水率大小的多个重要参数及其影响, 再将诸因素集成, 理论分析浮力材料吸水机理有待进一步开展。

浮力材料的解析法主要从微观角度研究材料的弹性势能预测问题, 而基于有限元法的数值分析着重分析材料的强度问题, 得到的应力分布、失效行为等结果更直观, 因此, 近年来采用有限元数值分析法对浮力材料研究较多。解析法对于材料宏观力学性能分析存在不足, 有限元数值分析法对于材料破坏路径, 进水后水流扩张等是基于一定算法下进行模拟的, 目前的计算结果与实际情况存在一定的差别。另外, 理论研究的结果也需要大量的试验数据支撑。

## 2 试验研究

### 2.1 浮力材料力学性能试验

Lin<sup>[56]</sup>对不同外径、不同排列方式空心玻璃微珠的浮力材料进行压缩试验。结果表明, 微珠占比大时, 材料最先从微珠开始破坏; 当微珠间距较大时, 最先从基体开始破坏; 微珠含量一样时, 微珠半径小的强度较高。Gupta 等<sup>[57-58]</sup>对不同尺度比和添加玻璃纤维的多个复合泡沫材料试样进行压缩试验, 同时进行扫描电镜分析。结果表明, 小尺度比材料裂纹属于剪切裂纹, 为真实压缩的结果; 在大尺度比时, 大量微珠没有被压碎, 说明楔形断面内的失效为非压缩失效。通过对含有 4 种不同密度的微珠制造了体积分数分别 30%、40%、50%和 60%的 16 种材料做拉伸试验<sup>[59]</sup>。发现随着微珠体积分数的降低, 拉伸强度增加; 所有材料的拉伸强度较基体降低 60% ~ 80%; 含有低强度微珠的泡沫表现出较低的拉伸模量, 但高强度微珠的存在导致复合材料的拉伸模量增加。Karthikeyan 等<sup>[60-62]</sup>研究了加入玻璃纤维后对空心玻璃微珠-环氧树脂复合泡沫材料压缩性能的影响, 分析玻璃纤维加入量和加入后造成的孔隙增加对压缩强度的影响, 发现增加玻璃纤维可以在不使复合材料密度增加太多的情况下提高材料的压缩强度。d'Almeida<sup>[63]</sup>通过单轴压缩试验, 测定了在不同直径微珠和不同体积分数下, 浮力材料的密度、断裂应力和杨氏模量, 并分析了微珠壁厚与平均直径之比对材料性能的影响。Adrien 等<sup>[64]</sup>通过 X 射线扫描对环氧 (PP/PU) 基体的 3 种浮力材料的压缩进行试验研究, 并对的三维图像进行处理, 分析微球在初始和压缩状态下的形貌。当基体较“软”时, 它可视作流体, 在所有球体之间平等地分担载荷。破裂是由球体的直径决定的, 这就解释了为什么更大的球体首先明显断裂。当基体为刚性或脆性相对较大时, 微珠破碎与直径无关, 但与微珠的空间分布有较大关系, 微珠破裂会传递。卢子兴等<sup>[65-67]</sup>以聚氨酯复合泡沫塑料为对象, 通过静态和动态压缩试验, 研究了这类材料的宏观变形及失效的规律。通过扫描电镜分析, 获得材料的应力-应变关系及相应的力学性能参数和破坏机理, 分析和讨论了复合材料的能量吸收特性, 发现材料最佳吸能点的包络线是一条直线。王平<sup>[68]</sup>通过对添加短切玻璃纤维的浮力材料进行压缩试验, 分析了玻璃纤维对材料性能影响。结果表明, 玻璃纤维与树脂基体的界面结合强度、玻璃纤维的质量分数及分散状态等都是影响浮力材料性能的重要因素。李芝华等<sup>[69]</sup>通过红外光谱分析、扫描电镜、压缩性能测试和密度测试等手段研究了经 2 种界面活化方法 (偶联剂处理和碱刻蚀 + 偶联剂) 处理后浮力材料的结构、密度和压缩性能。试验结果表明, 2 种方法都能改善空心玻璃微珠与环氧树脂之间的相容性和界面结合力, 使材料的实际密度更接近理论密度, 同时能显著提升材料的压缩强度。

浮力材料在承受压缩时, 材料的破坏机制与微珠的体积分数有关, 当微珠体积分数较低时, 破坏面与轴线夹角约为 45°。复合材料的压缩破坏以树脂基体的剪切破坏为主, 当微珠体积分数较大时, 浮力材料的破坏变为基体的剪切破坏和微珠压碎的破坏。微珠体积分数越大, 微珠的破坏程度越高。拉伸断裂强度随微珠密度的增大而增大, 随微珠体积分数增大而减小, 拉伸断裂呈现脆性变形特性,

拉伸断裂应变随应变率的增大而有所减小。

## 2.2 浮力材料吸水性能试验

Hobaica 等<sup>[70]</sup>进行了浮力材料吸水率测试。测试结果表明,当微珠的体积比小于 67% 时,吸水率与体积比几乎没有关系;当体积比超过 67% 时,吸水率会显著增加。这是由于微珠/基体粘结界面完整性的损失以及气泡和污染物的增加所致。孙春宝等<sup>[71]</sup>对浮力材料在 0.5% 的盐水和去离子水两种介质中的吸水性进行试验,在试验中同时研究温度对吸水性的影响。试验结果表明,介质的环境温度对材料的吸水率有影响,材料在去离子的水中的吸水率比在盐水中的要大。潘鹏举<sup>[72]</sup>研究了不同温度下,复合材料在去离子水和盐水中的吸水性和吸水性对材料性能的影响。结果表明在室温下,材料饱和吸水率较小;随着温度的升高,材料饱和吸水率、初始的吸水速率和水扩散系数增大;由于水分子的塑化作用,吸水后材料的压缩模量减小。张遵乾等<sup>[73]</sup>通过在常温和 60 °C 温度下的复合材料吸水试验,研究了空心玻璃微珠填充环氧树脂制成的复合材料的吸湿规律,以及温度对吸湿的影响。发现在吸湿初始阶段符合典型菲克扩散现象,温度升高能提高吸湿速率和增大平衡吸湿量。林碧兰等<sup>[74]</sup>以采用经硅烷活化处理的空心玻璃微珠 (hollow glass microspheres, HGM) 和环氧树脂制备的浮力材料为对象,进行密度测试和单轴静态压缩试验,分析了 HGM 的类型和占比对浮力材料性能的影响,利用扫描电子显微镜 (scanning electron microscope, SEM) 和吸水率试验研究了浮力材料的断裂特性和吸水性。结果表明, HGM 较大的比压缩强度 (抗压强度除以密度) 有利于提高浮力材料的强度性能,浮力材料断裂表面 HGM 破裂处的基体出现拖尾特征, HGM 的破坏程度与体积分数增大呈正相关。刘伟<sup>[75]</sup>对添加不同固化剂的浮力材料进行压缩和静水压力试验,比较了使用不同固化剂后材料的单轴压缩强度、耐水压强度以及吸水率随保压时间的变化。结果表明,使用不同固化剂制备的浮力材料压缩性能的差异较大,单轴抗压强度和耐静水压力强度并不呈正比关系。孟凡明等<sup>[76]</sup>对以双酚 A 环氧树脂 E51 为基质原料,甲基四氢苯酐为固化剂, K25 空心玻璃微珠为轻质填充物制成的浮力材料,开展单轴压缩和 24 h 耐静水压力试验。结果表明,浮力材料的单轴压缩强度和耐静水压力强度随着空心玻璃微珠体积占比的增大而降低,当体积占比超过 18% 时,浮力材料的强度性能下降幅度增大。刘园园<sup>[77]</sup>对人工造孔的浮力材料进行 24 h 静水压力试验,探索造孔半径  $r$  和孔底到受压面距离  $d$  之比 ( $r/d$ ) 对复合泡沫材料密度、吸水率及耐静水压性能的影响规律。人工造孔可在一定程度上降低材料的密度,复合泡沫材料在相同的密度下能承受更高的静水压力。王鹏<sup>[78]</sup>采用环氧树脂与通过硅烷偶联剂处理和聚合物接枝两种方法处理过的空心玻璃微珠制备浮力材料,并通过傅立叶变换红外吸收光谱仪 (Fourier transform infrared spectrometer, FTIR) 和 SEM 等检测改性玻璃微珠表面修饰基团、形貌和元素含量等。对浮力材料的吸水率、压缩强度、拉伸强度和弯曲强度进行测试,探讨了不同改性空心玻璃微珠对固体浮力材料性能的影响。发现 KH591 硅烷偶联剂的改性效果最好,指出 20% 的 MDI 胶用量为聚合物接枝改性的最佳用量。梁小杰等<sup>[79]</sup>通过对采用环氧树脂、甲基四氢苯酐和 KH550 偶联剂处理后的空心玻璃微珠制备的浮力材料进行 110 MPa 静水压力试验,分析了静水压力下浮力材料的密度对其吸水性的影响,测试了静水压力测试前后浮力材料的力学性能。结果表明,随着浮力材料密度的降低,其吸水率升高;测试前后材料的压缩强度和弹性模量未发生明显变化。在进行极限破坏压力试验后,发现在 142 MPa 的静水压力下浮力材料完整无损,说明在一定安全系数下,该浮力材料能够满足全海深环境的应用需求。研究了 6 ~ 26 MPa 静水压力下不同浮力材料的力学性能和形变特点,以及涂层对浮力材料的影响<sup>[80-81]</sup>。全方位静水压力 (12.5 MPa) 作用后材料的压缩性能基本没有变化,剩余剪切强度超过 95%,拉伸强度和冲击强度都有所提高;吸水率随着静水压力作用时间的增加呈现先快速增大后趋于稳定;表面被涂料包覆的浮力材料体积先保持不变后急剧减少。刘艳等<sup>[82]</sup>使用环氧树脂 E-44、改性 593 胶为固化剂和空心

玻璃微珠制备固体浮力材料, 经过 24 h 的静水压力试验, 结果表明, 玻璃微珠填充量增大, 固体浮力材料的密度和压缩强度降低, 孔隙率增大。玻璃微珠表面改性处理, 可增大固体浮力材料的压缩强度, 添加缓释剂可有效减少材料中的气孔。陈晨阳等<sup>[83-84]</sup>通过 45 MPa 静水试验, 研究了偶联剂添加量、添加种类对固体浮力材料吸水性的影响。结果表明, 添加 6% (质量分数) 的偶联剂可以改善固体浮力材料的吸水性, 吸水率接近理想值。曹成昊等<sup>[85]</sup>选用耐温性能优良的酚醛树脂、甲基硅树脂和环氧树脂形成耐高温复合基体, 模拟材料在海水中的吸水率。复合基体和环氧基体的浮力材料在吸水率上处于同一水平。经不同温度热处理后的浮力材料在吸水后抗压强度略有下降。

在进行吸水率测量试验时, 通常存在压力差现象, 试验结果的准确性存在不足。全海深浮力材料的吸水率试验需要从解决实时精确测量问题入手, 设计实时测量吸水率试验的方案, 同时研发适合工程的吸水率实时测量装置。

### 3 工艺手段对浮力材料性能影响的研究

#### 3.1 浮力材料制备工艺

浮力材料是通过将空心玻璃微珠填充在树脂基体中而形成的复合材料<sup>[86]</sup>。浮力材料的成型工艺包括浇注法、真空浸渍法、液体传递模塑法和模压成型法等<sup>[87]</sup>。

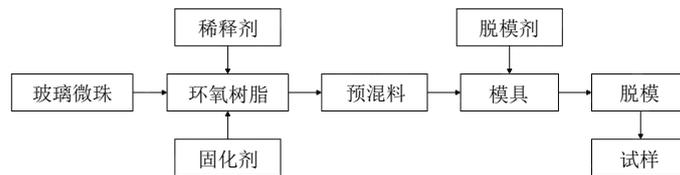


图 6 环氧树脂+空心玻璃微珠固体浮力材料制备流程<sup>[88]</sup>

##### (1) 浇注法

直接将空心玻璃微珠与树脂混合形成糊状的混合物, 然后, 除去混合物中的气泡, 浇注在模内、固化成型。在现代浇注工艺中, 应用比较成熟的浇注工艺方法主要是真空浇注法和自动压力凝胶法。真空浇注法施用的压力低, 对模具和设备的强度要求低, 投资小, 对产品尺寸的限制小, 适宜生产大型制品; 自动压力凝胶法具有低压成型, 产品内应力小等特点, 但成型周期较长, 制品尺寸的精确性较差<sup>[87]</sup>。

##### (2) 真空浸渍法

将空心玻璃微珠填入成型模具中, 然后模具抽真空, 同时吸入树脂, 使微球间的空隙完全充满树脂, 最后固化定型的一种工艺。该方法能减少成型产品内部包裹的气泡, 但树脂浪费大, 制造大型制品困难<sup>[87]</sup>。

##### (3) 液体传递模塑法

将基体树脂与空心玻璃微珠在减压条件下混合加热软化, 然后在正压下注入模具内, 固化成型。该方法工艺简单、空隙率低、重现性好和生产规模大。但树脂含量偏高、微珠填充量低和分布不均匀<sup>[87]</sup>, 适用于成型薄壁、深孔、形状复杂和尺寸精度要求较高的制品。

##### (4) 模压成型法

将基体树脂与空心玻璃微珠、固化剂及各种辅助剂混合倒入模具中, 加热软化, 在液压机的压力下充满模具, 同时发生化学反应而固化成型, 脱模后即得制品。该方法模具简单, 工艺过程简单易控、投资费用少, 但不能成型尺寸精度要求高的制品<sup>[87]</sup>。

目前全海深浮力材料主要采用空心玻璃微珠复合泡沫材料,这类材料中空心玻璃微珠的体积分数为 60%~70%<sup>[89]</sup>。常用的制备方法为:空心玻璃微珠经过偶联剂表面处理,与环氧树脂混合,搅拌至玻璃微珠被环氧树脂完全浸润,再真空搅拌至完全脱泡,然后注模、固化和冷却,最后进行脱模。

### 3.2 制备工艺对浮力材料性能的影响

浮力材料的性能主要由填料的性能、基体的性能、填料和基体的配比与结合性、混合过程中引入的气泡量等决定,浮力材料的研制大都围绕这些关键点展开。例如:研究环氧树脂和固化剂的比例可以在增强基体强度的同时更容易和空心玻璃微珠混合,对空心玻璃微珠表面进行偶联剂改性以增强微珠和基体的结合性,研制真空混合搅拌工艺等<sup>[90]</sup>。近来,随着聚脲高强度涂层的出现,各浮力材料研制单位均开展了浮力材料涂层研究,发现高强度涂层能够较有效地提高浮力材料的耐压强度,同时还能有效地降低浮力材料的吸水率。

在制备高性能固体浮力材料的过程中,通过对空心玻璃微珠表面改性、添加偶联剂、使用超声波处理、增加碳纳米管和添加短切玻璃纤维等形式来改善浮力材料的性能。

孙春宝等<sup>[91]</sup>通过对空心玻璃微珠表面的改性处理,提高了微珠添加量,最高可提高 20%。选用合适的固化剂,通过优化试验,获得了密度为 0.61~0.75 g/cm<sup>3</sup>,压缩强度为 40~68.96 MPa,吸水率较低的浮力材料。胡传群等<sup>[92]</sup>采用偶联剂对空心玻璃微珠进行表面改性处理,合成过程采用超声波技术,通过拉伸和抗冲击试验、断裂韧性测试和 SEM 分析发现,试样中改性空心玻璃微珠的添加质量分数为 3%时,材料的拉伸强度、冲击强度和断裂韧性较纯环氧树脂有较大的提升。陈先等<sup>[87]</sup>研究了经偶联剂处理的空心玻璃微珠固体浮力材料,给出不同体积分数、固化剂类型对浮力材料性能的影响。陈尔凡等<sup>[93]</sup>通过固化剂、增韧剂和表面活化处理空心玻璃微珠的方法制得深海浮力材料,得出当改性微珠特定质量分数为 35%时,可制备出综合性能较好的深海浮力材料的结论。裴雷振<sup>[88]</sup>通过超声波处理、添加偶联剂和增加碳纳米管进行表面增强工艺等制备浮力材料,并就这些工艺对材料性能的影响展开分析研究。结果表明,这些工艺增强了试样的压缩性能和有效降低了材料的密度。余为等<sup>[94]</sup>采用添加质量比分别为 0.2%、0.5%、1%和 3%,长度分别为 1 mm 和 2 mm 的碳纤维,制备了空心玻璃微珠/环氧树脂复合材料,发现当碳纤维的质量比为 0.5%、长度为 1 mm 时,浮力材料的弯曲强度和压缩强度分别提高 198%和 110%。

Cunha 等<sup>[95]</sup>通过双螺杆挤出机制备不同质量分数的空心玻璃微珠复合材料。结果表明,粉状聚乙烯在中央挤出区有助于微珠更好地分布在基体中,从而使轻质复合材料具有更好的力学性能。吴少惠等<sup>[96]</sup>提出了真空辅助模压成型自由固化方法并制备了不同体积分数的浮力材料,研究了不同体积分数对浮力材料性能的影响。结果表明,所获得的 HGMS/E-4221 固体浮力材料密度为 0.621~0.655 g/cm<sup>3</sup>,适用的深度可达到 8 000~10 000 m。单丹等<sup>[97]</sup>通过添加 WS606 可膨胀微球发泡剂制备了体积密度小于 0.40 g/cm<sup>3</sup> 的固体浮力材料,适用于水下 50~300 m 深度。

## 4 浮力材料未来发展趋势和研究建议

固体浮力材料在水下不同深度工作时,应具备高强度、低密度和低吸水率性能,材料的吸水、变形和破坏是其主要失效形式。主要应对措施包括:从设计和制备、细观力学出发更精确地研究材料破坏机理,合理的设计使用标准等;优化制备工艺,减少浮力材料中的气体含量,保证微珠与基体良好接触。

### 4.1 精确的数值分析模型

由于浮力材料中的空心玻璃微珠在制备过程中的分布具有非均质性、无序性和随机性,且制备过

程中存在气泡。因此, 数值分析应精确建立包含气泡、玻璃微珠、基体, 更接近真实材料的三维有限元模型, 尤其是对于微珠体积分数较大的浮力材料。此外, 还需要重点解决空心玻璃微珠与基体、气泡与基体之间过渡区域材料的属性如何确定的问题。按照空心玻璃微珠直径由小到大的生长方式, 设定微珠的目标直径、体积分数和数量等。赋予微珠在随机方向的随机速度, 微珠在生长过程中相互碰撞、相互挤压, 直至达到目标直径, 可生成不同体积分数的二维或三维浮力材料数值分析模型。

#### 4.2 浮力材料破坏过程的理论预测

浮力材料基体何时会出现裂纹, 裂纹扩展路径、扩展速度和扩展规模等与材料累积损伤之间的关系, 以及空心玻璃微珠与基体的接触破坏等, 都需要开展理论预测和数值模拟。

浮力材料进水后, 当水集中到气泡位置时随着压力增大将形成高压射流, 它对材料破坏的概率和吸水率的影响等需要开展更深入理论研究。

大型浮力块中添加陶瓷球可保证很高的压溃强度, 同时有效降低浮力材料的密度<sup>[95, 98]</sup>, 但是其安全性还需要更多的理论研究和试验证实。陶瓷球内爆对周围基体和陶瓷球的影响、陶瓷球与基体的接触破坏有待进行数值和试验研究。内含陶瓷球的新型高性能浮力材料的开发也需要进行研究。

#### 4.3 吸水特性评价和测量

目前国内外对于浮力材料吸水率的机理研究还较少, 需要分析导致浮力材料进水的各种可能原因, 如微珠的直径和壁厚等本身的参数、微珠的受损程度、浮力材料中气泡的含量及分布等。对浮力材料的吸水机理开展研究, 建立一个比较精确且可靠的浮力材料吸水率模型, 同时材料的累积损伤破坏对吸水率的影响是未来研究的重点。

传统的浮力材料吸水率测试存在工作量大且误差较大的缺点<sup>[99]</sup>, 迫切需要进行能够实时检测浮力块吸水状态和实时监测吸水率方法的研究和研制精确的检测设备。

#### 4.4 设计和使用标准的建议

根据规范<sup>[3]</sup>要求的 1.5 倍安全系数, 当深潜器下潜到最大深度为 11 034 m 时, 浮力材料的压溃强度应不低于 170.7 MPa。目前市场上还很难找到满足该强度要求且低密度和低吸水率的浮力材料。针对上述问题, 一方面要通过改进工艺手段, 提高微珠的强度, 制造出满足要求的微珠; 另一方面要从降低安全系数入手。安全系数降低属于超规范使用, 超规范使用后的安全措施是降低使用年限, 这是一个迫切需要解决的现实问题。降低安全系数后的可行性分析, 需要更多的试验数据支撑<sup>[2]</sup>。

## 5 结 语

国内外研究者对浮力材料力学性能、工艺制备等进行了大量的研究。但对固体浮力材料的损伤演化和破坏规律的研究较少。全海深固体浮力材料的吸水率预报和吸水率的精确测量是当前的关注焦点。由于工艺制备过程中存在气泡或微珠破裂, 内含气泡的影响也应当重视。此外, 在深入研究固体浮力材料吸水率机理的基础上, 建立一个科学、合理的设计和安使用标准, 对于这类材料的使用寿命或更换时间的确定有重要的工程意义。

## 参 考 文 献

- [1] 崔维成, 郭威, 王芳, 等. 潜水器技术与应用[M]. 上海: 上海科学技术出版社, 2018.
- [2] CUI W C, GUO J, PAN B B. A preliminary study on the buoyancy materials for the use in full ocean depth manned submersibles[J]. Journal of Ship Mechanics, 2018, 22(6): 736-757.
- [3] 中国船级社. 潜水系统与潜水器建造与入级规范[M]. 北京: 人民交通出版社, 2018.

- [4] 卢子兴. 泡沫塑料力学性能的理论 and 实验研究[D]. 北京: 北京大学, 1995.
- [5] 卢子兴, 高镇同. 应用微分方法确定复合泡沫塑料的杨氏模量[J]. 北京航空航天大学学报, 1996, 22(6): 692-695.
- [6] 卢子兴, 黄筑平, 王仁. 聚氨酯泡沫塑料压缩杨氏模量的理论预测[J]. 应用力学学报, 1996, 2(13): 8-12.
- [7] 卢子兴, 高镇同. 含空心球复合材料有效模量的确定[J]. 北京航空航天大学学报, 1997, 23(4): 461-466.
- [8] 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[J]. 中国科学(E), 1997, 27(4): 318-324.
- [9] 卢子兴, 邹波. 复合泡沫塑料模量和屈服强度的理论预测[J]. 复合材料学报, 2014, 31(4): 998-1005.
- [10] PALUMBO M, DONZELLA G, TEMPESTI E, et al. On the compressive elasticity of epoxy resins filled with hollow glass microspheres[J]. Journal of Applied Polymer Science, 1996, 60(1): 47-53.
- [11] PALUMBO M, TEMPESTI E. The effect of particle-matrix interfacial conditions on the compressive elasticity of epoxy resins filled with untreated hollow glass microspheres[J]. Polymers and Polymer Composites, 1997, 5(3): 217-221.
- [12] GOODS S H, NEUSCHWANGER C L, WHINNERY L L, et al. Mechanical properties of a particle-strengthened polyurethane foam[J]. Journal of Applied Polymer Science, 1999, 74: 2724-2736.
- [13] 严寒冰. 用微分法及 Mori-Tanaka 法求解复合泡沫塑料的有效模量[J]. 北京航空航天大学学报, 2000, 26(6): 688-690.
- [14] BARDELLA L, GENNA F. On the elastic behavior of syntactic foams[J]. International Journal of Solids and Structures, 2001, 38: 7235-7260.
- [15] 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[J]. 应用数学和力学, 2004, 25(5): 481-487.
- [16] 邹波, 卢子兴. 基于五相球模型确定含涂层空心微球复合材料的有效模量[J]. 复合材料学报, 2006, 23(5): 137-142.
- [17] 宋超. 玻璃微珠/环氧轻质复合材料的制备及力学性能预报[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工程大学, 2012.
- [18] CHEN C R, QIN S Y, LI S X, et al. Finite element analysis about effects of particle morphology on mechanical response of composites[J]. Materials Science and Engineering, 2000, 278(1): 96-105.
- [19] ZHANG P, FU G. Microstructure-based simulation of plastic deformation behavior of SiC particle reinforced Al matrix composites[J]. 中国航空学报(英文版), 2009, 22(6): 663-669.
- [20] 冀运东, 郑凯东, 曹东风, 等. 基于内聚力行为和扩展有限元的砂/树脂复合材料拉伸失效行为的数值计算[J]. 复合材料学报, 2019, 36(12): 2851-2859.
- [21] HAZANOV S, HUET C. Order relationships for boundary conditions effect in heterogeneous bodies smaller than the representative volume[J]. Journal of the Mechanics and Physics of Solids, 1994, 42(12): 1995-2011.
- [22] 金泉, 覃继宁, 张荻, 等. 颗粒和纤维混杂增强复合材料力学性能的三维有限元模拟[J]. 复合材料学报, 2006, 23(2): 14-20.
- [23] 李晓军, 柴东朗, 郝雨林. SiC<sub>p</sub> 增强镁基复合材料微区应力场的仿真模拟[J]. 金属学报, 2004, 40(9): 927-929.
- [24] 于敬宇, 李玉龙, 周宏霞, 等. 颗粒尺寸对颗粒增强型金属基复合材料动态特性的影响[J]. 复合材料学报, 2005, 22(5): 31-38.
- [25] 柴东朗, 曹利强, 李晓军, 等. 镁基复合材料微区力学状态的有限元分析[J]. 稀有金属材料与工程, 2005, 34(1): 60-63.
- [26] 张芮, 卢锡年. 球形颗粒填充复合材料微观应力场的有限元分析[J]. 复合材料学报, 1995, 12(4): 90-96.
- [27] 吴国民, 殷雅俊. 颗粒增强复合材料刚塑性细观损伤本构模型的验证[J]. 复合材料学报, 2005, 22(5): 16-24.
- [28] 邵军超, 刘越. 颗粒增强金属基复合材料力学行为有限元模拟研究现状[J]. 材料导报, 2007, 21(9): 111-115.
- [29] XIA Z, ZHOU C, YONG Q, et al. On selection of repeated unit cell model and application of unified periodic boundary conditions in micro-mechanical analysis of composites[J]. International Journal of Solids And Structures. 2006, 43: 266-278.
- [30] 倪士伟. 深海固体浮力材料损伤机理研究[D]. 扬州: 扬州大学, 2018.

- [31] NIAN G D, SHAN Y J, XU Q, et al. Failure analysis of syntactic foams: A computational model with cohesive law and XFEM[J]. *Composites Part B*, 2016, 89: 18-26.
- [32] 王耀声, 亚斌, 周秉文, 等. 碳纤维增强固体浮力材料性能研究[J]. *功能材料*, 2018, 8(48): 08205-08210.
- [33] WANG Y S, YA B, ZHOU B W, et al. Numerical simulation of the mechanical properties of a carbon-fiber reinforced hollow glass microsphere-epoxy syntactic foam[J]. *Journal of Applied Polymer Science*. 2019, 47083: 1-9.
- [34] 陈鹿, 王芳, 崔维成, 等. 全海深载人潜水器用浮力材料的有效弹性模量特性研究[J]. *船舶力学*, 2019, 12(23): 1486-1499.
- [35] 郑阳升, 杨伟苓, 郑顺奇, 等. 颗粒增强复合材料结构的有限元建模研究现状[J]. *兵器材料科学与工程*, 2018, 41(4): 97-101.
- [36] CHAWLA N, SIDHU R S, GANESH V V. Three-dimensional visualization and microstructure based modeling of deformation in particle-reinforced composites[J]. *Acta Materialia*, 2006, 54(6): 1541-1548.
- [37] SIDHU R S, CHAWLA N. Three-dimensional(3D) visualization and microstructure-based modeling of deformation in a sn-rich solder[J]. *Scripta Materialia*, 2006, 54(9): 1627-1631.
- [38] RINTOUL M D, TORQUATO S. Reconstruction of the structure of dispersions[J]. *Journal of Colloid and Interface Science*. 1997, 186: 467-476.
- [39] 邵军超, 刘越. 颗粒增强金属基复合材料力学行为有限元模拟研究现状[J]. *材料导报*, 2007, 21(9): 111-115.
- [40] SHENG P, ZHANG J, JI Z. An advanced 3D modeling method for concrete-like particle reinforced composites with high volume fraction of randomly distributed particles[J]. *Composites Science and Technology*, 2016, 134: 26-35.
- [41] ZHANG J, WANG Z, YANG H, et al. 3D meso-scale modeling of reinforcement concrete with high volume fraction of randomly distributed aggregates[J]. *Construction and Building Materials*, 2018, 164: 350-361.
- [42] YU Y, CUI J, HAN F. An effective computer generation method for the materials with random distribution of large numbers of heterogeneous grains[J]. *Composite Science and Technology*, 2008, 68(12): 2543-2550.
- [43] BARDELLA L, SFREDDO A, VENTURA C, et al. A critical evaluation of micromechanical models for syntactic foams[J]. *Mechanics of Materials*, 2012, 50: 53-69.
- [44] BARDELLA L, MALANCA F, PONZO P. et al. A micromechanical model for quasi-brittle compressive failure of glass-micro balloons/thermoset-matrix syntactic foams [J]. *Journal of the European Ceramic Society*, 2014, 34: 2605-2616.
- [45] PANTEGHINI A, BARDELLA, L. On the compressive strength of glass micro balloons-based syntactic foams[J]. *Mechanics of Materials*, 2015, 82: 63-77.
- [46] SHAMS A, PANTEGHINI A, BARDELLA L, et al. A micromechanical model to study failure of polymer-glass syntactic foams at high strain rates[J]. *Computational Materials Science*, 2017, 135: 189-204.
- [47] BARDELLA L, PERINIA G, PANTEGHINI A, et al. Failure of glass-micro balloons/thermoset-matrix syntactic foams subject to hydrostatic loading[J]. *European Journal of Mechanics -A/ Solids*, 2018, 70: 58-74.
- [48] SEGURADO J, LLORCA J. A numerical approximation to the elastic properties of sphere-reinforced composites[J]. *Journal of the Mechanics and Physics of Solids*, 2002, 50(10): 2107-2121.
- [49] KARI S, BERGER H, RODRIGUEZ-RAMOS R, et al. Computational evaluation of effective material properties of composites reinforced by randomly distributed spherical particles[J]. *Composite Structures*, 2005, 77(2): 223-231.
- [50] NGUYEN Q, GUPTA N. Analyzing the effect of fiber reinforcement on properties of syntactic foams[J]. *Materials Science and Engineering*, 2010, 527: 6422-6428.
- [51] 梁希. 空心颗粒复合材料力学性能数值仿真对策研究[D]. 秦皇岛: 燕山大学, 2013.

- [52] 李想. 环氧树脂\_空心玻璃微珠复合泡沫材料的制备研究[D]. 北京: 机械材料科学研究总院, 2016.
- [53] SHUTOV F A. Syntactic polymer foams[J]. *Advances in Polymer Science*, 1986, 73/74: 63-123.
- [54] KOCHETKOV V A, MAKSIMOV R D. Water absorption and swelling of glass/epoxy syntactic foams[J]. *Mechanics of Composite Materials Volume*, 1996, 32: 61-70.
- [55] Wang J Z, CUI W C. A water absorption model based on self consistent theory for solid buoyancy materials[J]. *Engineering Technology Open Access Journal*, 2020, 3(4): 123-133.
- [56] LIN W H. Manufacturing and mechanical properties of glass bubbles/epoxy particulate composite[J]. *Journal of Composite Materials*, 1998, 32(15): 1356-1390.
- [57] GUPTA N, KISHORE W E, et al. Studies on compressive failure features of in syntactic foam material[J]. *Journal of Materials Science*, 2001, 36: 4485-4491.
- [58] GUPTA N, WOLDESENBET E, KISHORE, et al. Compressive fracture feature of syntactic foams-microscopic examination[J]. *Journal of Materials Science*, 2002, 37(15): 3199-3209.
- [59] GUPTA N, NAGORNY R. Tensile properties of glass micro balloon-epoxy resin syntactic foams[J]. *Journal of Applied Polymer Science*, 2006, 102: 1254-1261.
- [60] KARTHIKEYAN C S, SANKARAN S. Comparison of compressive properties of fiber-free and fiber-bearing syntactic foams[J]. *Journal of Reinforced Plastics and Composites*, 2000, 19(9): 732-742.
- [61] KARTHIKEYAN C S, SANKARAN S, KISHORE. Influence of chopped strand fibers on the flexural behavior of a syntactic foam core system[J]. *Polymer International*, 2000, 49(2): 158-162.
- [62] KARTHIKEYAN C S, SANKARAN S, KUMAR M N J, et al. Processing and compressive strengths of syntactic foams with and without fibrous reinforcements[J]. *Journal of Applied Polymer Science*, 2001, 81(2): 405-411.
- [63] 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[J]. *Composites Science and Technology*, 1999, 59: 2087-2091.
- [64] ADRIEN J, MAIRE E, GIMENEZ N. Experimental study of the compression behaviour of syntactic foams by in situ X-ray tomography[J]. *Acta Materialia*, 2007, 55: 1667-1679.
- [65] 卢子兴, 严寒冰, 刘波, 等. 复合泡沫塑料力学性能的实验研究[C]// “力学 2000”学术大会论文集, 北京: 气象出版社, 2000: 584-586.
- [66] 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[J]. *固体力学学报*, 2002, 23(S): 97-102.
- [67] 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[J]. *复合材料学报*, 2002, 19(5): 114-117.
- [68] 王平. 环氧树脂基轻质浮力材料的制备与性能研究[D]. 青岛: 中国海洋大学, 2014.
- [69] 李芝华, 陈明, 李珍. 界面活化处理对固体浮力材料力学性能的影响[J]. *高分子材料科学与工程*, 2016, 32(11): 70-74.
- [70] HOBAICA E C, COOK S D. The characteristics of syntactic foams used for buoyancy[J]. *Journal of Cellular Plastics*, 1968, 4(4): 143-148.
- [71] 孙春宝, 邢奕, 王啟鋒. 空心玻璃微珠填充聚合物合成深海高强浮力材料[J]. *北京科技大学学报*, 2006, 28(6): 554-558.
- [72] 潘鹏举. 深海用聚合物基浮力材料制备及性能表征[D]. 杭州: 浙江大学, 2005.
- [73] 张遵乾, 李慧剑, 梁希, 等. 浸泡腐蚀对复合材料力学性能的影响[J]. *燕山大学学报*, 2011, 35(5): 440-444.
- [74] 林碧兰, 路新瀛, 陈勤. 空心微珠/环氧树脂高强浮力材料的性能及断裂分析[J]. *复合材料学报*, 2011, 3(28): 6-12.
- [75] 刘伟. 深潜用环氧基固体浮力材料性能研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工程大学, 2014.

- [76] 孟凡明, 王鹏, 李瑞, 等. 空心玻璃微珠填充固体浮力材料的制备及性能研究[J]. 中国材料进展, 2014, 9-10(33): 608-613.
- [77] 刘园园. 高性能固体浮力材料的制备及性能研究[D]. 青岛: 中国海洋大学, 2015.
- [78] 王鹏. 空心玻璃微珠表面改性对固体浮力材料性能影响研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工程大学, 2016.
- [79] 梁小杰, 梁忠旭, 周媛, 等. 全海深浮力材料性能分析[J]. 热固性树脂, 2016, 5(31): 38-41.
- [80] 梁小杰, 梁宁宁, 刘志, 等. 深海环境下浮力材料的力学性能研究[J]. 合成材料老化与应用, 2020, 4(49): 5-7.
- [81] 梁小杰, 梁宁宁, 王庆颖, 等. 浮力材料的静水压性能研究[J]. 化工新型材料, 2020, 7(48): 188-190.
- [82] 刘艳, 刘文智, 马春霞. 深水固体浮力材料的制备及性能研究[J]. 舰船科学技术, 2017, 3(39): 87-90.
- [83] 陈晨阳, 李仙会, 马颖琦, 等. 环氧树脂基固体浮力材料的吸水性及压缩性[J]. 理化检验-物理分册, 2018, 54(6): 390-394.
- [84] 陈晨阳. 固体浮力材料吸水性研究[D]. 上海: 上海材料研究所, 2018.
- [85] 曹成昊, 郭安然, 刘家臣, 等. 复合树脂/空心微珠耐高温浮力材料的制备及性能[J]. 材料导报, 2021, 35(2): 02185-02190.
- [86] KATZETAL H S. Handbook of filler and reinforcements for plastics[M]. New York: Vammpramrd Reinhold Company, 1978: 281-295.
- [87] 陈先, 周媛, 卢伟. 固体浮力材料[M]. 北京: 化学工业出版社, 2011.
- [88] 裴雷振. 深海用固体浮力材料的制备及其特性评价[D]. 大连: 大连理工大学, 2017.
- [89] 刘文栋, 戴金辉, 吴平伟, 等. 混合空心玻璃微珠制备固体浮力材料及性能研究[J]. 材料开发与应用, 2014, 29(3): 31-36.
- [90] DODIUK H, GOODMAN S H. Handbook of thermoset plastics[M]. Third edition. Elsevier Inc., 2014: 511-554.
- [91] 孙春宝, 汪群慧, 邢奕, 等. 深海高强安全浮力材料的研制及其表征[J]. 哈尔滨工业大学学报, 2006, 11(38): 2000-2002.
- [92] 胡传群, 曾黎明, 周建刚. 改性空心玻璃微珠/环氧树脂复合材料力学性能研究[J]. 热固性树脂, 2008, 23(6): 21-23.
- [93] 陈尔凡, 张莹, 马驰, 等. 深海浮力材料的研制[J]. 工程塑料应用, 2013, 2(41): 25-29.
- [94] 余为, 王亚东, 张任良, 等. 碳纤维增强空心玻璃微珠/环氧树脂复合材料的力学性能[J]. 材料研究学报, 2017, 31(4): 300-308.
- [95] CUNHA M P, GRISA A M, KLEIN J, et al. Preparation and characterization of hollow glass microspheres-reinforced poly (acrylonitrile-co-butadiene-co-styrene) composites[J]. Materials Research, 2018, 21(6): 1-7.
- [96] 吴少惠, 马荣锋, 吴平伟, 等. 空心玻璃微珠\_环氧树脂固体浮力材料模压成型工艺及性能[J]. 2020, 10(37): 2401-2407.
- [97] 单丹, 范道荣, 董正洪, 等. 填料种类对固体浮力材料性能的影响[J]. 冶金与材料, 2020, 40(6): 133-134+140.
- [98] 徐伟哲, 张庆勇. 全海深潜水器的技术现状和发展综述[J]. 中国造船, 2016, 57(2): 206-221.
- [99] ASTM C271/C271M-16 Standard test method for density of sandwich core materials[S]. ASTM International, West Conshohocken, PA, USA, 2016.

# Research Status and Development Trend of Solid Buoyancy Materials

GAO Bo<sup>1,2</sup>, WANG Jingze<sup>3</sup>, CUI Weicheng<sup>\*3</sup>

(1. School of Marine Engineering, Jimei University, Xiamen 361021, China;

2. School of Naval Architecture and Port Engineering, Shandong Jiao Tong University, Weihai 264209, China;

3. Key Laboratory of Coastal Environment and Resources Research of Zhejiang Province, School of Engineering, Westlake University, Hangzhou 310024, China)

## Abstract

The selection of high strength solid buoyancy materials is an important key technology in the research and development of large depth unmanned/manned submersibles. This paper reviews the literature on solid buoyancy materials from three aspects: theory, experiment and fabrication technology. In terms of theoretical research, the theoretical research methods, research status, limitations and trends of elastic modulus prediction, mechanical property analysis and water absorption property prediction of solid buoyancy materials are introduced. In the aspect of experimental research, focusing on the hydrostatic pressure, dynamic compression and tensile experiments of buoyancy materials, macro deformation law and micro failure mechanism of materials are studied from macro and micro mechanics. In the aspect of the fabrication process, advantages and disadvantages of different preparation processes are introduced, and effects of different process methods on properties of buoyancy materials are introduced. Based on the literature research, some problems to be solved in the theoretical and experimental research and fabrication process of buoyancy materials are analyzed, and key research directions of solid buoyancy materials in the future are put forward. It is expected that the research in this paper can provide a comprehensive understanding of the mechanical behavior of solid buoyancy materials and provide certain theoretical support for the safety assessment of buoyancy materials of in-service full ocean depth unmanned / manned submersibles.

**Key words:** buoyancy material; water absorption; fabrication

## 作者简介

高博 男, 1986年生, 博士研究生, 讲师。主要从事深海浮力材料性能的研究工作。

王景泽 男, 1985年生, 工学博士, 副研究员。主要从事复合材料结构分析研究工作。

崔维成 男, 1963年生, 工学博士, 教授。主要从事深海技术研究工作。

\*通讯作者: 崔维成