

固体浮力材料应力-吸水率耦合

高 博^{1,2}, 王 芳³, 姜 哲³, 王景泽⁵, 姜 磊⁴, 唐文燕², 崔维成⁵

(1. 集美大学轮机工程学院, 福建 厦门 361021; 2. 山东交通学院船舶与港口工程学院, 山东 威海 264209; 3. 上海海洋大学工程学院, 上海 201306; 4. 烟台铁中宝钢铁加工有限公司, 山东 烟台 264006; 5. 浙江省海岸带环境与资源研究重点实验室, 西湖大学, 杭州 310030)

摘 要: 固体浮力材料具有密度低和抗压强度高性性能, 是载人/无人深潜器一种重要材料。固体浮力材料在高压下空心玻璃微珠会逐步发生破坏, 导致吸水率增加, 从而降低潜水器的正浮力, 进而影响到载人/无人深潜器的安全性和使用性。浮力材料的吸水率与应力之间存在耦合关系, 对浮力材料吸水率的计算造成了困难。本研究以同心球壳单胞为研究对象, 通过添加子程序, 采用有限元数值分析吸水过程。研究了不同厚度点、不同时间时浮力材料的体应力、吸水率、吸水扩散系数的分布、变化和相互关系; 发现吸水率与体应力、扩散系数与体应力存在线性关系。将有限元分析结果与实验数据进行比较, 有限元计算结果与实验数据吻合较好, 验证了简化模型的有效性。文章可为全海深固体浮力材料设计和应用提供理论指导。

关键词: 浮力材料; 扩散系数; 吸水率; 体应力; 有限元分析

中图分类号: U674.941 文献标志码: A 文章编号: 0454-5648(2023)11-2824-10

网络出版时间: 2023-10-08



Hygro-Mechanical Coupling of Solid Buoyancy Materials

GAO Bo^{1,2}, WANG Fang³, JIANG Zhe³, WANG Jingze⁵, JIANG Lei⁴, TANG Wenyan², CUI Weicheng⁵

(1. School of Marine Engineering, Jimei University, Xiamen 361021, Fujian, China; 2. School of Naval Architecture and Port Engineering, Shandong Jiao Tong University, Weihai 264209, Shandong, China; 3. College of Engineering Science and Technology, Shanghai Ocean University, Shanghai 201306, China; 4. Yantaitiezhongbao Steel Processing Coltd, Yantai 264006, Shandong, China; 5. Key Laboratory of Coastal Environment and Resources of Zhejiang Province, School of Engineering, Westlake University, Hangzhou 310030, China)

Abstract: Solid buoyancy material is an important material for manned/unmanned deep submersibles due to its low density and high compressive strength. Hollow glass microspheres in solid buoyancy materials will gradually damage at a high pressure, leading to an increase in water absorption and thereby reducing the positive buoyancy of the submersible and affecting the safety and usability of manned/unmanned deep submersibles. There is a coupling relationship between water absorption rate and stress of buoyancy materials, which poses challenges in calculating the water absorption rate of buoyancy materials. This paper was to investigate concentric spherical shell cells and analyze the entire water absorption process via adding subroutines by a finite element method (FEM). The distribution, changes, and interrelationships of bulk stress, water absorption rate, and diffusion coefficient of buoyancy materials at different thickness points and durations were analyzed. It is indicated that water absorption rate is linearly related to bulk stress, and the expansion coefficient is related to bulk stress. The results calculated by the finite element analysis are in reasonable agreement with the experimental data. The paper can provide a theoretical guidance for the design and application of solid buoyancy materials at sea depths.

Keywords: buoyancy materials; diffusion coefficient; water absorption rate; bulk stress; finite element analysis

收稿日期: 2023-05-28。 修订日期: 2023-08-03。

基金项目: 国家自然科学基金(51879157); 上海市科委创新行动计划项目(20dz1206501)。

第一作者: 高 博(1986—), 男, 博士研究生。

通信作者: 崔维成(1963—), 男, 博士, 教授。

Received date: 2023-05-28. Revised date: 2023-08-03.

First author: GAO Bo (1986—), male, Doctoral candidate.

E-mail: gaobojmu@163.com

Correspondent author: CUI Weicheng (1963—), male, Ph.D., Professor.

E-mail: cuiweicheng@westlake.edu.cn

随着人口、陆地资源与环境之间的矛盾日益加剧, 深、远海洋将成为人类社会实现可持续发展的战略空间和资源宝库。载人/无人深潜器是人类认识和开发利用海洋必须依赖探测技术, 代表当前海洋科学与技术的最高水平。为了抵抗极端静水压力, 载人/无人深潜器的耐压壳一般设计为厚度较大的壳体结构。这就增加了载人/无人深潜器的重量, 使其上浮存在困难, 因此需要浮力材料提供浮力补偿^[1-2], 辅助其上浮和下潜。固体浮力材料是由空心玻璃微珠填充于环氧树脂复合而成^[3], 具有高压抗强度、低密度等优异的特性, 是载人/无人深潜器使用的一种重要材料^[4]。但是在极端静水压力作用下, 浮力材料中的空心玻璃珠由于存在初始缺陷而逐渐开始破坏, 导致环氧树脂不可避免发生水分的渗入、扩散, 固体浮力材料吸水后会逐渐损失浮力, 从而危及潜水器的上浮^[5-10]。因此, 研究固体浮力材料的吸水行为对提高载人/无人深潜器的安全性和使用性, 推动载人/无人深潜事业的发展具有重要意义^[11-12]。

根据现有的试验和研究表明^[13-17], 玻璃微珠/环氧树脂制成的固体浮力材料吸水率与压力之间的关系如下, 一般将吸水率随压力变化可分成 3 个阶段: 第 1 个阶段, 浮力材料未发生破坏, 吸水率未达到饱和, 随着压力增大和时间增长, 吸水率不断增加, 应力与吸水之间存在耦合行为; 第 2 个阶段, 浮力材料未发生破坏, 吸水率达到饱和后, 压力和时间的很大一个区域此时吸水率几乎是个常数, 并保持不变; 第 3 个阶段, 水压增大一定量时浮力材料中的玻璃微珠发生连锁破坏, 吸水率急剧增加。在第 1 阶段吸水过程中存在非线性吸水行为^[18-19], 如图 1, 非线性行为的发生主要是由于扩散系数的变化引起, 浮力材料中体应力是影响扩散系数的主

要因素。Wang 等^[20-22]建立了第 1、第 3 阶段吸水率模型, 其中第 1 阶段存在应力与吸水率的耦合关系。Wang 等虽然基于 Neuman、Marom 和 Gueribiz 等^[23-24]的研究成果, 成功预报了固体浮力材料吸水过程中的非线性阶段。但提出的应力-吸水率耦合模型计算过程过于复杂, 不便于在载人/无人深潜技术中的推广与应用。

以空心玻璃微珠和环氧树脂组成的固体浮力材料为研究对象, 基于同心球壳单胞模型, 提出了固体浮力材料应力-吸水率耦合的简化模型, 通过添加子程序, 考虑固体浮力材料厚度方向扩散系数的不均匀分布, 采用有限元方法计算了应力-吸水率耦合作用下厚度方向的吸水率, 获取了不同时间段固体浮力材料厚度方向的吸水率、扩散系数以及体应力的变化规律。相对于理论计算, 本文简化计算过程, 更有助于工程领域的推广和应用。为深海及水下固体浮力材料结构的设计和制备提供了理论指导。

1 应力-吸水耦合简化模型

Wang 等^[20]的工作证明三向应力状态下的扩散系数与初始扩散系数的关系与式(1)为:

$$D_{\sigma} = D_0 \exp\left(\frac{\alpha \Theta^m}{G}\right) \quad (1)$$

式中: D_0 是初始扩散系数; D_{σ} 是应力作用下的扩散系数; α 是常数, 取值范围是 6~10, 文献[25]分析了 α 取不同值对扩散系数的影响, 指出 α 取值对于扩散系数的影响不大, 因此本取中间值($\alpha=8$); Θ^m 是基体材料的体应力; G 是基体材料的剪切模量。可以看出, 计算基体应力是建立固体浮力材料第 1 阶段吸水过程中应力-吸水耦合关系的关键。

Wang 等^[22]认为固体浮力材料中基体应力包含微观以及介观 2 个尺度的应力, 通过建立同心球壳模型, 计算了基体应力的微观分布。然后, 根据力学平衡及变形协调条件, 计算了固体浮力材料在介观尺度的应力分布。但进一步研究发现, 介观尺度的应力对固体浮力材料扩散系数的影响非常微小, 可以忽略不计。这是因为固体浮力材料介观尺度的应力是由厚度方向变形的不匹配造成的, 介观尺度在厚度方向的应力合力为 0。因此, 固体浮力材料扩散系数的变化, 可以认为完全由微观尺度的应力引起。

将浮力材料单胞简化为同心球壳结构, 如图 2 所示, 该同心球壳由 1 个空心玻璃球壳和 1 个环氧

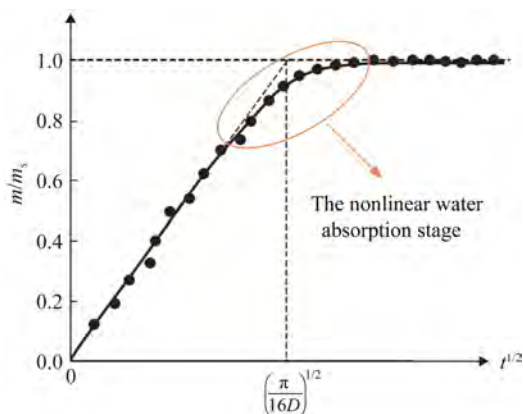


图 1 应力-吸水耦合引起的非线性阶段^[18]

Fig. 1 Nonlinear stage caused by hygro-mechanical coupling^[18]

树脂球壳组成。 r_g 为空心玻璃微珠内径。 r_i 为空心玻璃微珠外径。 r_m 为同心单胞模型基体的半径。不考虑水压作用的条件下, 空心玻璃微珠球壳内压及环氧树脂球壳的外压均为 0, 两球壳界面处存在径向应力。根据弹性力学理论, 球壳结构承受均布荷载时, 空心玻璃微珠球壳、环氧树脂球壳的径向及切向正应力的分布情况为:

$$\left\{ \begin{array}{l} \sigma_{r_g} = -\frac{1 - \frac{r_g^3}{r_i^3}}{1 - \frac{r_g^3}{r_i^3}} \sigma_{r_i} \\ \sigma_{T_g} = \frac{\frac{r_g^3}{2r^3} + 1}{1 - \frac{r_g^3}{r_i^3}} \sigma_{r_i} \end{array} \right. \quad (r_g \leq r \leq r_i) \quad (2)$$

$$\left\{ \begin{array}{l} \sigma_{r_m} = -\frac{\frac{r_m^3}{r^3} - 1}{\frac{r_m^3}{r_i^3} - 1} \sigma_{r_i} \\ \sigma_{T_m} = \frac{\frac{r_m^3}{2r^3} + 1}{\frac{r_m^3}{r_i^3} - 1} \sigma_{r_i} \end{array} \right. \quad (r_i \leq r \leq r_m) \quad (3)$$

式中: σ_{r_g} 、 σ_{r_m} 分别为微珠和基体的径向应力, σ_{T_g} 、 σ_{T_m} 分别为微珠和基体的径向应力切向应力。

根据弹性理论, 空心玻璃珠与环氧树脂界面处的应力应变应遵循应力平衡和位移协调条件。当 $r=r_i$ 时:

$$\left\{ \begin{array}{l} \sigma_{r_g} = \sigma_{r_m} = -\sigma_{r_i} \\ \varepsilon_{T_g} = \varepsilon_{T_m} \end{array} \right. \quad (4)$$

空心玻璃微珠以及环氧树脂都是各向同性材料, 树脂吸水后发生膨胀, 受到玻璃微珠的约束产生内应力^[26]。玻璃微珠的应变只由应力产生, 而树脂的应变由应力和吸水膨胀产生。因此界面处空心玻璃微珠以及环氧树脂的切向正应变为:

$$\left\{ \begin{array}{l} \varepsilon_{T_g} = \frac{1}{E_g} [(1 - \mu_g) \sigma_{T_g} - \mu_g \sigma_{r_g}] \\ \varepsilon_{T_m} = \frac{1}{E_m} [(1 - \mu_m) \sigma_{T_m} - \mu_m \sigma_{r_m}] + \beta_m w_m \end{array} \right. \quad (5)$$

式中: ε_{T_g} 、 ε_{T_m} 为微珠和基体的应变。

将式(5)、式(2)、式(3)代入式(4)界面应力与基体吸水率的关系, 如下:

$$\sigma_{r_i} = \frac{E_m E_g \beta w_m}{E_m \left[(1 - \mu_g) \left(-\frac{1 + \frac{r_g^3}{2r_i^3}}{1 - \frac{r_g^3}{r_i^3}} + \mu_g \right) \right] - E_g \left[(1 - \mu_m) \left(-\frac{\frac{r_m^3}{2r_i^3} + 1}{\frac{r_m^3}{r_i^3} - 1} + \mu_m \right) \right]} \quad (6)$$

树脂在微观尺度的体应力为:

$$\Theta^m = \sigma_{r_m} + 2\sigma_{T_m} = \frac{3r_i^3}{r_m^3 - r_i^3} \cdot \frac{E_m E_g \beta w_m}{E_m [(1 - \mu_g) G_p + \mu_g] - E_g [(1 - \mu_m) M_p + \mu_m]} \quad (7)$$

为简化计算令:

$$k = \frac{3r_i^3}{r_m^3 - r_i^3} \cdot \frac{E_m E_g \beta}{E_m [(1 - \mu_g) G_p + \mu_g] - E_g [(1 - \mu_m) M_p + \mu_m]} \quad (8)$$

式中: β 为吸涨系数; w_m 是基体的吸水率; E_m 、 E_g 分别为基体和玻璃的弹性模量; μ_m 和 μ_g 分别为基体和玻璃的泊松比; G_p 和 M_p 为:

$$\left\{ \begin{array}{l} G_p = -\frac{2 + V_h}{2(1 - V_h)} \\ M_p = \frac{1 + 2V_g}{2(1 - V_g)} \end{array} \right. \quad (9)$$

式中: V_h 表示空心玻璃微珠的空心度, $V_h = \frac{r_g^3}{r_i^3}$ 。

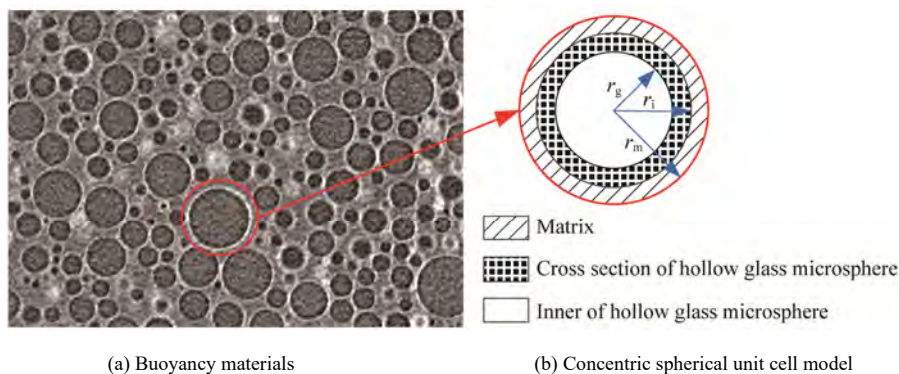
V_g 表示玻璃微珠(包含空心部分)占浮力材料的体积分数, $V_g = \frac{r_i^3}{r_m^3}$ 。

将式(3)代入式(1)得:

$$D_\sigma = D_0 \exp \left\{ \frac{\alpha}{G} \cdot \frac{3r_i^3}{r_m^3 - r_i^3} \cdot \frac{E_m E_g \beta w_m}{E_m [(1 - \mu_g) G_p + \mu_g] - E_g [(1 - \mu_m) M_p + \mu_m]} \right\} \quad (10)$$

将式(4)代入式(6)可得:

$$D_\sigma = D_0 \exp \left(\frac{\alpha}{G} k w_m \right) \quad (11)$$



(a) Buoyancy materials (b) Concentric spherical unit cell model

图 2 浮力材料同心球壳单胞模型

Fig. 2 Concentric spherical unit cell model for the buoyancy materials

2 实验

2.1 制备

参考 ASTM D5229^[27]标准对固体浮力材料进行吸水率测试, 计算其饱和吸水率和扩散系数。试验用的浮力材料中空玻璃微珠是 3M 公司生产的 K1, 环氧树脂为 E51。试样由中船重工 725 所制备, 试样按微珠体积分数不同分为 4 组, 体积分数分别为 30%, 40%, 50%, 60%, 对应组命名分别为 B1、B2、B3 和 B4, 每组 6 个, 共计 24 个。试样为薄壁型, 尺寸为 60 mm×60 mm×2 mm。环氧树脂、空心玻璃微珠以及浮力材料等的材料参数见表 1, 制备成的浮力材料的材料参数见表 2。其中表 1 数据由 3M 公司提供, 表 2 数据由中船重工 725 所提供。

表 1 树脂、玻璃及空心玻璃微珠的材料性能参数
Table 1 Material parameters of matrix, glass and K1

Material	E/GPa	μ	$\rho/(\text{g}\cdot\text{cm}^{-3})$	β	$w_m/\%$
Epoxy resin E51	2.10	0.30	1.100	0.52	2.50
Glass	60.00	0.23	2.180	0	0
Hollow glass microsphere (K1)			0.125	0	0

表 2 浮力材料试样的材料参数
Table 2 Material parameters of buoyancy materials

Sample No.	$V_g/\%$	$r_m/\mu\text{m}$	$\rho/(\text{g}\cdot\text{cm}^{-3})$	E/GPa	μ_b	β_b
B1	30	48.55	0.81	1.90	0.30	0.57
B2	40	44.11	0.71	1.80	0.29	0.53
B3	50	40.95	0.61	1.75	0.28	0.48
B4	60	38.53	0.52	1.70	0.28	0.41

2.2 方法

1) 试样选择与称重: 选择厚度均匀, 品相较好的试样进行试验。将试样至于 70 °C 烘箱中烘烤 7 h, 然后用精度为 0.1 mg 的天平称量试件质量。

如果试样质量的减少大于 0.1 mg 则继续烘烤, 如果小于 0.1 mg 则停止烘烤, 用天平称量其干燥质量, 记作 W_d 。

2) 吸水后称重与吸水率计算: 将试样放入载有一定配重的金属装置中确保浮力材料能够完全浸入水中。将金属装置连同试样浸入常温下(23±2) °C 的蒸馏水中浸泡。设定不同浸泡时间, 浸泡一定时间后将试样后取出, 用吸水纸拭干, 然称量吸水后试样的质量, 试验测试时间节点为浸泡后第 2、4、5、7、9、10、14、17、21、24、31、35、40 d。记作 W_w 。该时刻试样的吸水率按下式计算:

$$M_t = \frac{W_w - W_d}{W_d} \times 100\% \quad (12)$$

式中: M_t 为 t 时刻的复合材料层板的吸水率。

3) 吸水饱和和确定: 测试完试样的吸水质量后, 继续将该试样放入蒸馏水中。再次浸泡一定时间后, 下一个测量时间节点测量试样的吸水后质量。试样从取出到再次放入的整个过程不超过 15 min。以上过程重复多次。当连续 5 次以上测得的吸水率相差不超过 5%, 且吸水率不再递增时, 可以认为试样达到吸水饱和, 停止试验。

2.3 试验结果

记录不同时间段浮力材料试样的质量并计算吸水率。图 3 为浮力材料吸水率测试结果。由图 3 可见, 将每组 6 个试件的结果取平均值, 计算平均吸水率并记录测量时间。试验数据见附表 1, 试样的试验数据方差在 0.005 8~0.019 0 范围内。

浮力材料的初始扩散系数可以根据试验测得的浮力材料饱和吸湿率、不同时间吸水率求得, 按下式计算^[25]。

$$D = \pi \left(\frac{h}{4w_m} \right)^2 \left(\frac{w_1 - w_2}{\sqrt{t_2} - \sqrt{t_1}} \right)^2 \quad (13)$$

式中： w_m 表示浮力材料的饱和吸水率； h 为试样的厚度； w_1 、 w_2 分别为与 t_1 、 t_2 时刻对应的浮力材料的吸水率。根据式(13)求得的浮力材料的初始扩散系数见表 3。

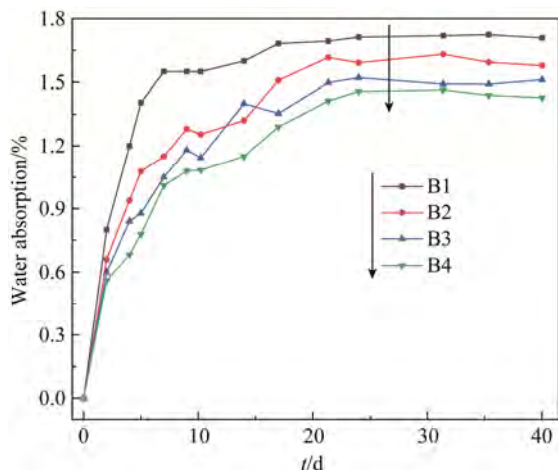


图 3 浮力材料吸水率测试结果

Fig. 3 Water absorption test results of buoyancy materials

表 3 试样的扩散系数及饱和吸水率

Table 3 Diffusion coefficient and saturated water absorption of the specimens

Sample No.	$w_m/\%$	$D_0 \times 10^7 / (\text{mm}^2 \cdot \text{s}^{-1})$
B1	1.70	12.32
B2	1.60	8.50
B3	1.51	7.42
B4	1.46	6.31

3 数值分析

提出的应力-吸水耦合简化模型存在 k 一个未知参数，需要先计算出 k 值。然后再建立固体浮力材料厚度方向的质量扩展模型，添加子程序，验证简化模型的有效性，并分析吸水率、应力分布以及扩散系数的变化规律。

进行有限元分析时做如下假定：1) 浮力材料是各向同性材料。2) 空心玻璃微珠真空度是一致的，即同一型号的浮力材料的内外径之比一样。3) 模型计算时选择平均粒径的空心玻璃微珠代表单元。

3.1 单胞有限元模型

使用 ABAQUS 有限元软件建立同心球壳单胞有限元模型分析。根据对称性，为减少运算量，选择 1/8 模型^[28]，如图 4 所示。

模型单元选择三维 10 节点实体单元 Solid187，材料参数参考表 1，采用自由网格划分。在模型的 3 个断面(A、B、C 面)上施加对称约束。

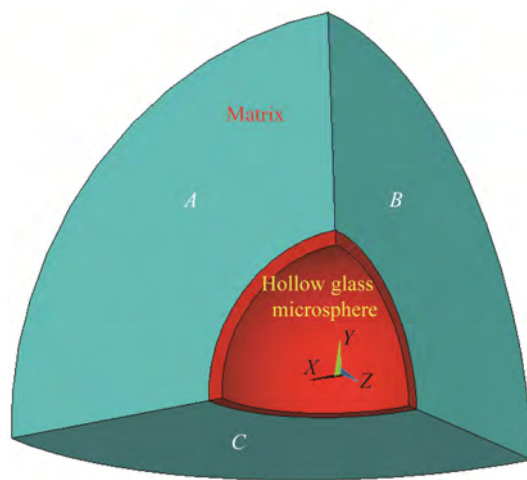


图 4 同心球壳 1/8 有限元模型

Fig. 4 1/8 finite element model of concentric spherical shell

3.2 应力-吸水耦合简化模型的子程序

质量扩散模块中没有考虑应力-吸水耦合的影响，因此需要添加子程序进行计算，具体过程为：

1) 根据初始的复合材料扩散系数及饱和吸水率计算一定时间内浮力材料层板厚度方向的吸水率分布。2) 根据吸水率分布计算厚度方向不同位置的单胞模型体应力。3) 依据单胞模型体应力，计算厚度方向扩散系数的变化情况。4) 将变化的扩散系数作为已知量返回，进行下一时间段吸水率分布的计算，如此往复直到固体浮力材料吸水饱和。计算流程如图 5。

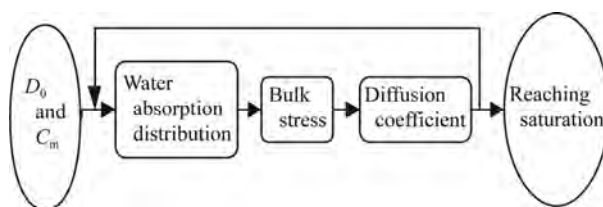


图 5 浮力材料应力-吸水率耦合计算流程

Fig. 5 Mixture diffusion coupled with stress calculation process for the buoyancy

3.3 比例常数 k

浮力材料吸水过程中引起的基体与吸水率之间存在一定比例关系，比例常数 k 由 2 种方式求出：

1) 通过在有限元中提取浮力材料的体应变进而求出；2) 通过式(8)直接求出。通过式(8)求解。4 种材料 k 值见表 4。

表 4 比例常数 k

Table 4 Proportional constant k

B1	B2	B3	B4
-0.825 5E3	-1.155 4E3	-1.530 7E3	-1.977 5E3

4 分析

4.1 对比

数值分析得到的吸水率与试验值对比如图 6 所示。可以看出, B1 和 B3 的最大误差小于 6.5%。B2、B4 与实验值的误差相对于 B1 和 B3 两种材料较大, 但最大误差小于 10%。从图 6 可知, 大约在 14 d 附近试验值与数值计算结果出现较大波动, 但整体变化趋势与实验一致, 证明了浮力材料材料应力-吸水耦合简化模型的可靠性。

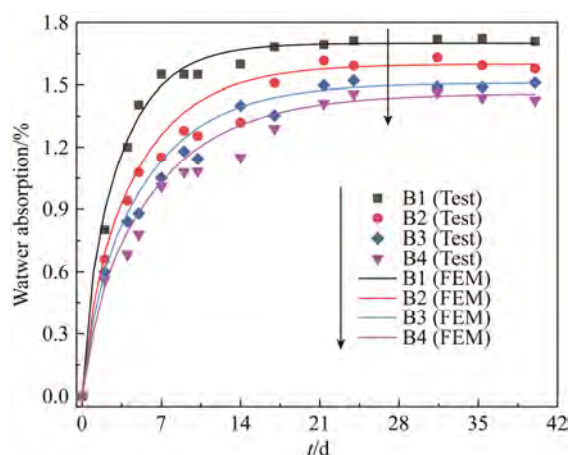


图 6 有限元计算得到的吸水率与试验值的对比

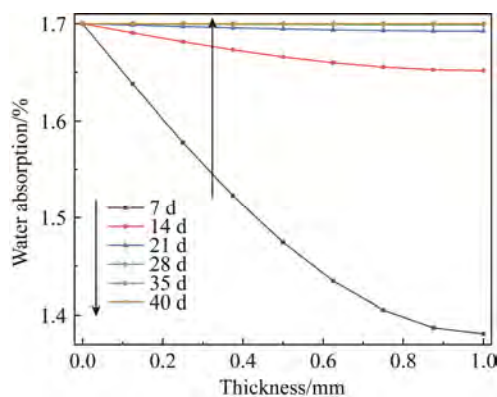
Fig. 6 Comparison between water absorption calculated by FEM and test value

4.2 吸水率分布

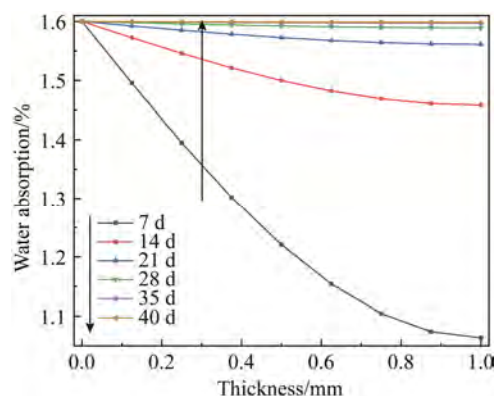
计算浮力材料第 7、14、21、28、35 d 和 40 d 时, 浮力材料厚度方向的吸水率分布如图 7 所示。考虑到薄板厚度方向吸水率的对称性, 这里只给出了半个厚度的吸水率分布情况。可以看出, 浮力材料表面的吸水率在超过 21 d 后变化很小, 此时吸水率接近饱和或已经饱和; 浮力材料中间位置的吸水率最低, 并随着时间增长逐渐增加, 直到达到饱和。对比 B1、B2、B3 和 B4 可以看出, 随着浮力材料中空玻璃微珠体积分数的增加, 浮力材料的饱和吸水率降低, 原因是空心玻璃微珠阻碍了水分子在浮力材料中的扩散。

4.3 浮力材料体应力变化

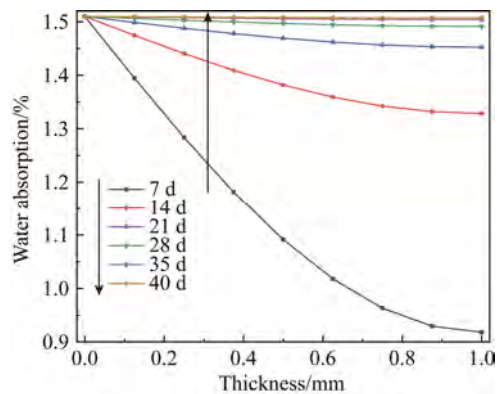
浮力材料厚度方向体应力分布具有对称性, 如图 8 所示。对比不同位置的微观体应力可以看出, 薄板中间应力最低; 随着微珠体积分数增加, 材料的体应力也随之变大, 原因是空心玻璃微珠体积分数的增加增大了树脂基体与空心玻璃微珠的相互作用。选取浮力材料薄板的表面(0 mm), 0.25 mm, 0.50 mm 及 1.00 mm 处作为参考点, 图 9 给出了体



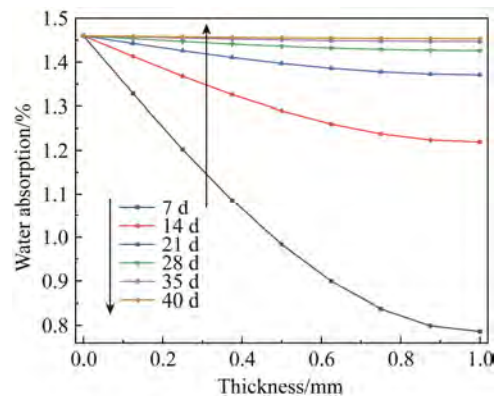
(a) B1



(b) B2



(c) B3



(d) B4

图 7 吸水率随时间变化

Fig. 7 Water absorption rate changes over time

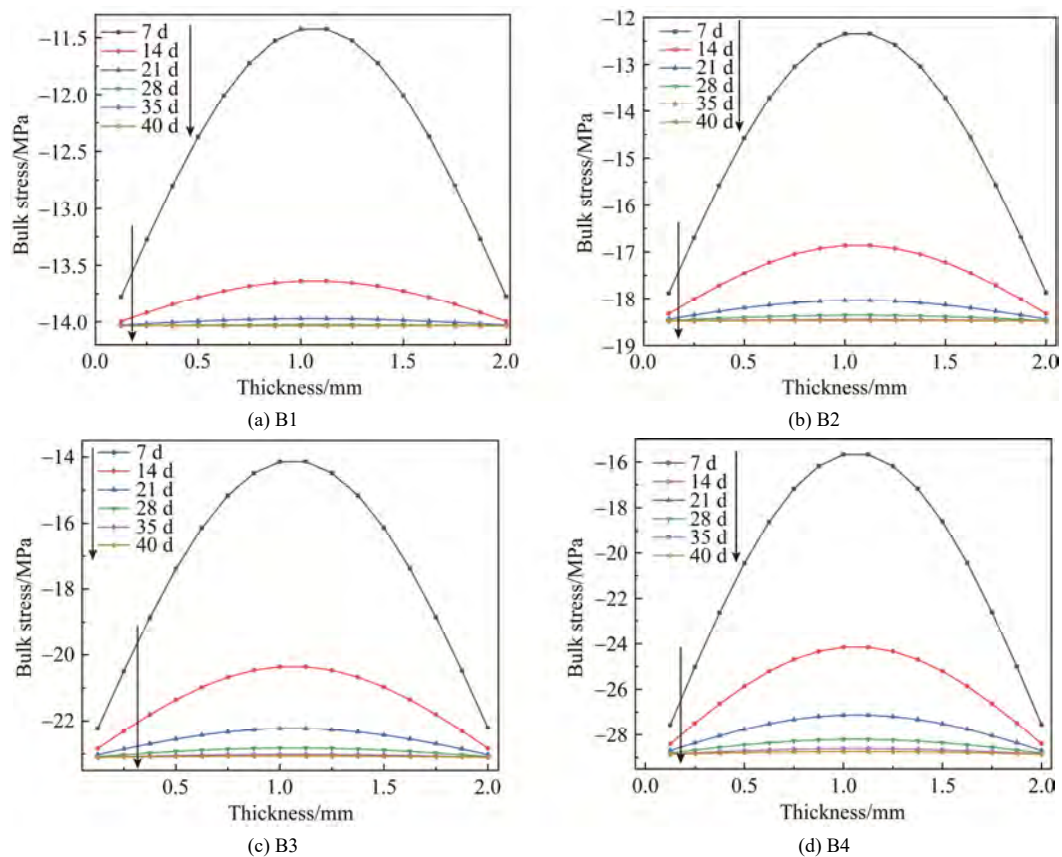


图8 体应力随厚度的变化

Fig. 8 Bulk stress at different positions in thickness direction

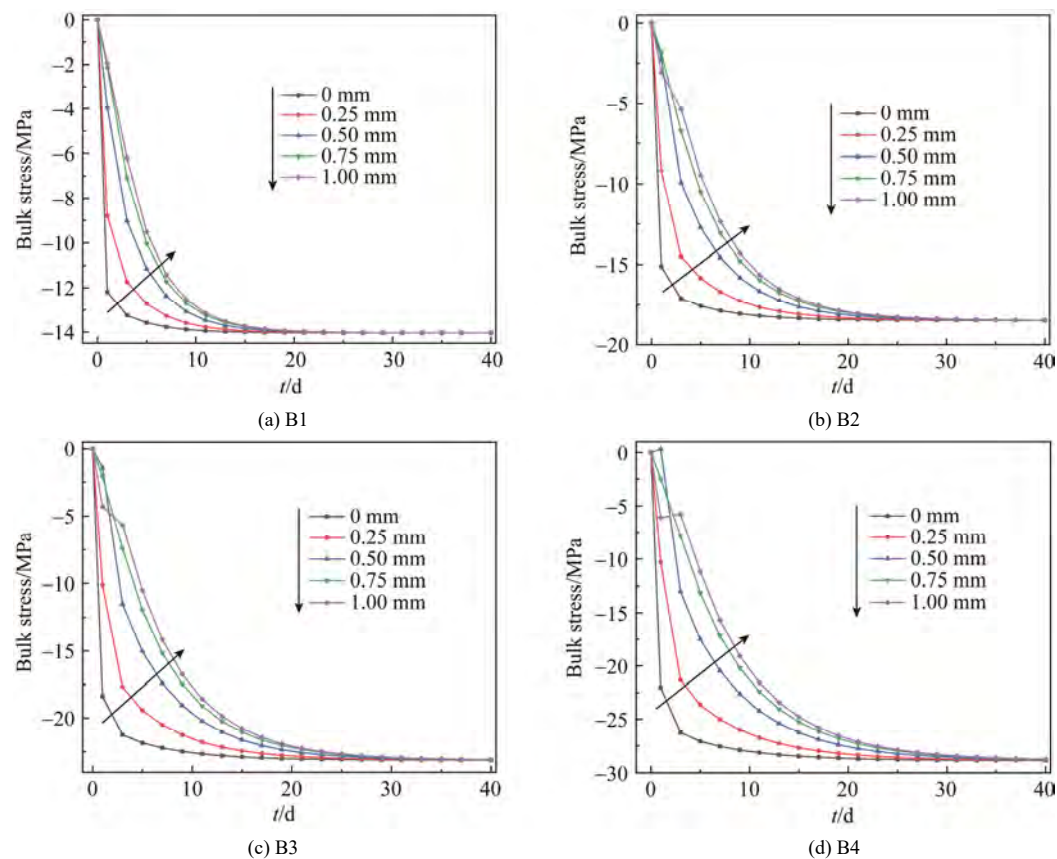
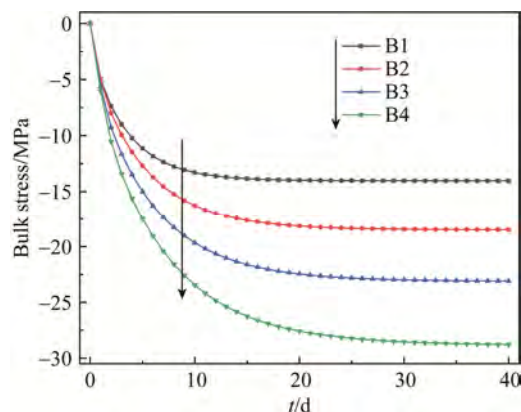


图9 不同厚度点体应力随时间变化

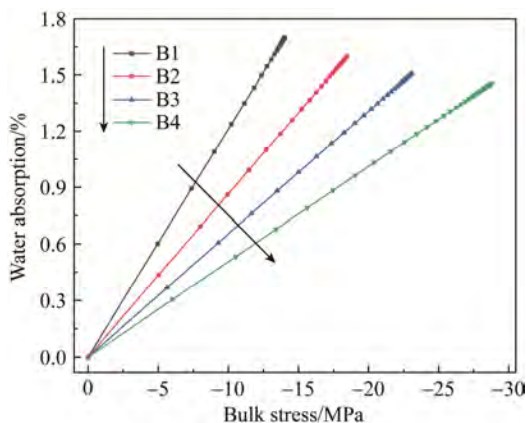
Fig. 9 Variation curves of bulk stress at different positions in thickness direction over time

应力随时间的变化情况。通过图 9 可以看出, 浮力材料吸水后体应力表现为压应力, 在吸水的前 10 d 会迅速增大, 在 10~30 d 内缓慢增大, 30 d 后基本上趋于平缓。

图 10 给出了浮力材料整个薄板的体应力与时间、吸水率之间的关系曲线。可以看出, 浮力材料整个薄板的体应力是压应力, 并且随着时间的推移逐渐增加; 浮力材料整个薄板的吸水率与体应力基本呈线性关系, 且随着体应力的增加不断增大。



(a) Bulk stress of buoyancy materials over time



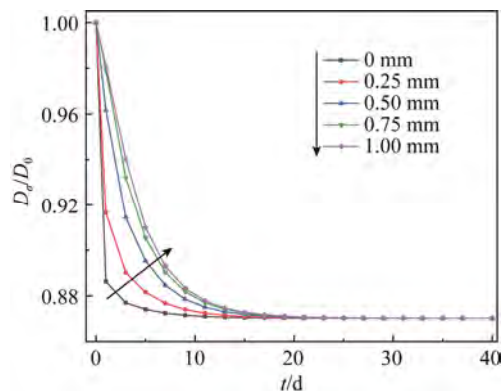
(b) Water absorption rate of buoyancy materials varies with bulk stress

图 10 浮力材料体应力与时间和吸水率关系图

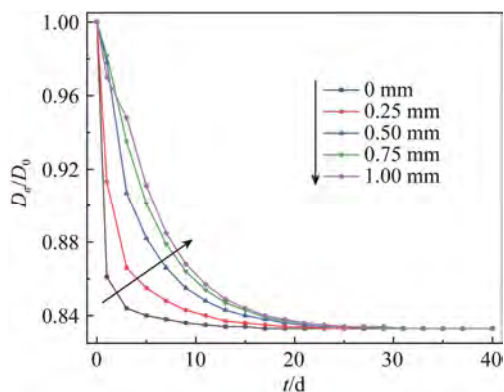
Fig. 10 Relationship between bulk stress and time, and between bulk stress and water absorption of buoyancy materials

4.4 扩散系数变化

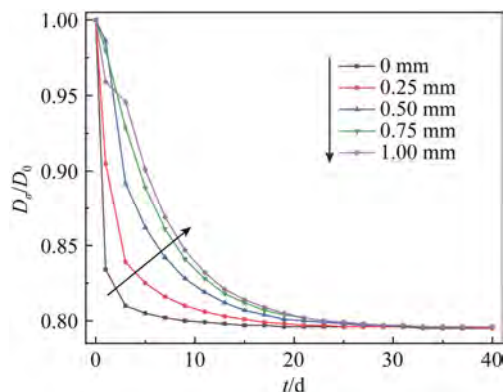
图 11 给出了参考点处的扩散系数随时间的变化曲线。4 种材料薄板不同厚度的扩散系数随着时间增加逐渐减小的, 与图 9 中体应力线型非常相似, 说明体应力对扩散系数的分布影响较大。同一时间在薄板中间厚度(1.00 mm)位置扩散系数最大。原因是薄板中间厚度的位置承受拉应力, 自由体积分数增大, 因此扩散系数也相应增大。



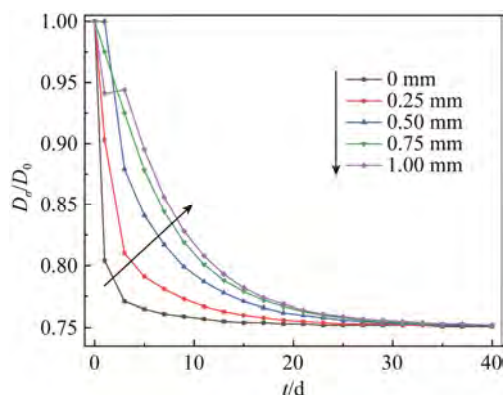
(a) B1



(b) B2



(c) B3



(d) B4

图 11 不同厚度点扩散系数随时间变化

Fig. 11 Relationship of diffusion coefficient of different thicknesses with time

图 12 给出了浮力材料整个薄板的扩散系数与时间以及体应力的关系曲线。可以看出, 浮力材料整个薄板的扩散系数与体应力基本呈线性关系, 且随着体应力的增加逐渐减小; 浮力材料整个薄板的扩散系数随着时间的增加逐渐减小, 原因是浮力材料吸水后产生压应力, 导致树脂基体的自由体积分数减小, 阻碍了水分子在树脂基体中的扩散。

图 13 给出了浮力材料扩散系数与吸水关系曲线。可以看出浮力材料整个薄板的扩散系数与吸水

率基本呈线性关系, 且扩散系数随着吸水率的增加而减小。

5 结论

基于浮力材料的应力-吸水耦合模型, 建立同心球壳单胞模型进行有限元分析, 并通过试验验证了数值分析的有效性。对浮力材料吸水后的吸水率、应力分布以及扩散系数的演化规律进行了分析, 结论如下:

1) 随着空心玻璃微珠体积分数的增加, 浮力材料的吸水速率在不断减小, 浮力材料表面的吸水率在短时间内达到饱和并不再发生变化, 薄板中间位置的吸水率最低, 并随着时间的推移逐渐增加, 直到达到饱和。

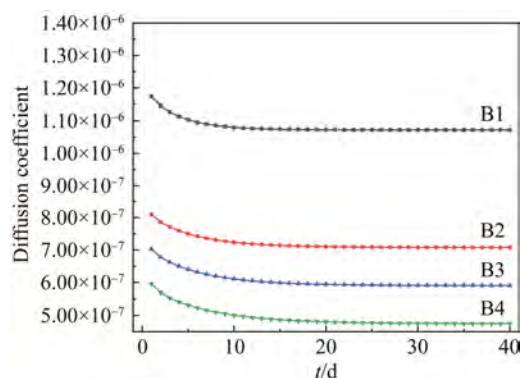
2) 随着空心玻璃微珠体积分数的增加, 体应力也随之增大。浮力材料厚度方向体应力分布具有对称性。

3) 浮力材料厚度方向的扩散系数随着时间增加逐渐减小的, 体应力对扩散系数的分布影响更大。扩散系数在薄板中间厚度位置最大。

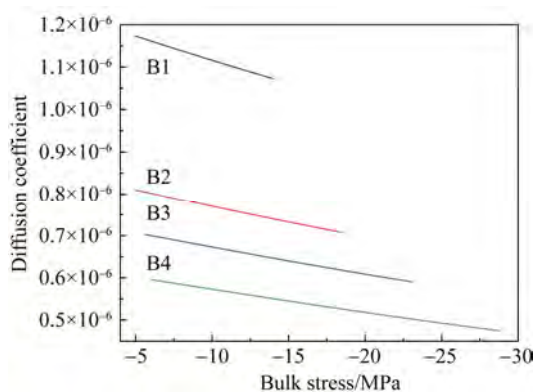
4) 随着空心玻璃微珠体积分数的增加, 扩散系数的减小速率也逐渐增大。浮力材料整个薄板扩散系数与体应力, 以及扩散系数与吸水率之间都是线性关系。

参考文献:

- [1] ALLMENDINGER E E. Submersible vehicle systems design[M]. Jersey City, NJ: Society of Naval Architects and Marine Engineers, 1990.
- [2] 潘彬彬, 崔维成, 叶聪, 等. 蛟龙号载人潜水器无动力潜浮运动分析系统开发[J]. 船舶力学, 2012, 16(增刊 1): 58–71.
PAN Binbin, CUI Weicheng, YE Cong, et al. J Ship Mech (in Chinese), 2012, 16(S1): 58–71.
- [3] 陈先, 周媛, 卢伟. 固体浮力材料[M]. 北京: 化学工业出版社, 2011.
- [4] 崔维成, 郭威, 王芳. 潜水器技术与应用[M]. 上海: 上海科学技术出版社, 2018.
- [5] 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.
CHEN Chenyang, LI Xianhui, MA Yingqi, et al. Phys Test Chem Anal Part A Phys Test (in Chinese), 2018, 54(6): 390–394.
- [6] ADAMSON M J. Thermal expansion and swelling of cured epoxy resin used in graphite/epoxy composite materials[J]. J Mater Sci, 1980, 15(7): 1736–1745.
- [7] XIAO G Z, SHANAHAN M E R. Swelling of DGEBA/DDA epoxy resin during hygrothermal ageing[J]. Polymer, 1998, 39(14): 3253–3260.
- [8] Lana B. Influence of hydrolysis on properties of organic-inorganic hybrid materials based on epoxy resin[J]. Hrvatska znanstvena bibliografija i MZOS-Svibor, 2009.



(a) Relationship of diffusion coefficient with time



(b) Relationship between diffusion coefficient and bulk stress

图 12 扩散系数与时间以及体应力的关系曲线
Fig. 12 Relation curves of diffusion coefficient with time and bulk stress

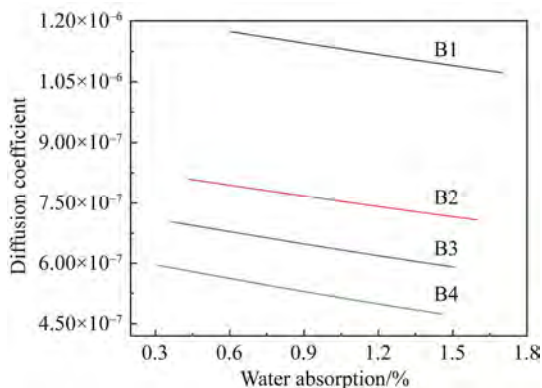


图 13 扩散系数与吸水率关系曲线

Fig. 13 Relationship between diffusion coefficient and water absorption

- [9] FROMONTEIL C, BARDELLE P, CANSELL F. Hydrolysis and oxidation of an epoxy resin in sub- and supercritical water[J]. *Ind Eng Chem Res*, 2000, 39(4): 922–925.
- [10] 陈晨阳, 李仙会, 马颖琦, 等. 环氧树脂及环氧树脂基固体浮力材料吸水性研究进展[J]. *理化检验(物理分册)*, 2018, 54(3): 157–161.
CHEN Chenyang, LI Xianhui, MA Yingqi, et al. *Phys Test Chem Anal Part A Phys Test (in Chinese)*, 2018, 54(3): 157–161.
- [11] 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.
- [12] 高博, 王景泽, 崔维成. 固体浮力材料研究现状与发展趋势[J]. *中国造船*, 2022, 63(4): 226–240.
GAO Bo, WANG Jingze, CUI Weicheng. *Shipbuild China (in Chinese)*, 2022, 63(4): 226–240.
- [13] SHUTOV F A. Syntactic polymer foams[M]//*Chromatography/Foams/Copolymers*. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 1986: 63–123.
- [14] KOCHETKOV V A, MAKSIMOV R D. Water absorption and swelling of glass/epoxy syntactic foams[J]. *Mech Compos Mater*, 1996, 32(1): 61–70.
- [15] LI L, YU Y F, WU Q L, et al. Effect of chemical structure on the water sorption of amine-cured epoxy resins[J]. *Corros Sci*, 2009, 51(12): 3000–3006.
- [16] 陈晨阳. 固体浮力材料吸水性研究[D]. 北京: 机械科学研究总院, 2018.
CHEN Chenyang. *Research on water absorbability of solid buoyant materials (in Chinese, dissertation)*. Beijing: China Academy of Machinery Science & Technology, 2018.
- [17] 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.
PAN Pengju. *Manufacture and characterization of polymer based buoyancy materials for deep underwater (in Chinese, dissertation)*. Hangzhou: Zhejiang University, 2005.
- [18] GUERIBIZ D, JACQUEMIN F, FRÉOUR S. A moisture diffusion coupled model for composite materials[J]. *Eur J Mech A/solids*, 2013, 42: 81–89.
- [19] MENG M, RIZVI M J, LE H R, et al. Multi-scale modelling of moisture diffusion coupled with stress distribution in CFRP laminated composites[J]. *Compos Struct*, 2016, 138: 295–304.
- [20] WANG J Z, DAI F H, MA L. A multi-scale moisture diffusion coupled with stress model for composite materials[J]. *Compos Struct*, 2017, 171: 345–359.
- [21] WANG J Z, CUI W C. A water absorption model based on self-consistent theory for solid buoyancy materials[J]. *Eng Technol Open Access J*, 2020, 3(4): 119–129.
- [22] WANG J Z, CUI W C. A cross-scale hygro-mechanical coupling model for hollow glass bead/resin composite materials[J]. *Int J Solids Struct*, 2023, 264: 112104.
- [23] NEUMANN S, MAROM G. Stress dependence of the coefficient of moisture diffusion in composite materials[J]. *Polym Compos*, 1985, 6(1): 9–12.
- [24] GUERIBIZ D, JACQUEMIN F, FRÉOUR S. A moisture diffusion coupled model for composite materials[J]. *Eur J Mech A/solids*, 2013, 42: 81–89.
- [25] 王景泽. 复合材料机械连接湿热效应及预紧力衰减规律研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2017.
WANG Jingze. *The research of hygrothermal effects and clamp force degradation for the composite bolted joints (in Chinese, dissertation)*. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2017.
- [26] 乔生儒. 复合材料细观力学性能[M]. 西安: 西北工业大学出版社, 1997.
- [27] ASTM D5229. Standard test methods for moisture absorption properties and equilibrium conditioning of polymer matrix composite materials. In *Annual Book of Standards*, 2010.
- [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.
SHAO Junchao, LIU Yue. *Mater Rev (in Chinese)*, 2007, 21(9): 111–115.