

深水静压环境中夹芯结构 PUEPM 芯材蠕变特性实验研究

Experimental Study on Creep Characteristics of Sandwich PUEPM Core Under Static Pressure of Deep Water Environment

杨 坤,梅志远,李华东

(海军工程大学 船舶与动力学院,武汉 430033)

YANG Kun, MEI Zhi-yuan, LI Hua-dong

(College of Naval Architecture and Power, Naval University of Engineering, Wuhan 430033, China)

摘要: 通过弹性力学分析,将深水静压环境中夹芯结构芯材力学状态与加套筒静压实验中芯材的力学状态进行对比,提出研究深水静压环境中夹芯结构黏弹性芯材蠕变特性的套筒实验方法;针对三种不同配方的聚氨酯改性环氧基微珠增强吸声体(Polyurethane Modified Epoxy Resin Sound Absorption Materials, PUEPM)芯材开展准静态套筒压缩实验和加套筒蠕变实验,得到了芯材的蠕变性能。结果表明:玻璃微珠含量较低,短切纤维含量较高的分层 PUEPM 芯材具备较好的蠕变性能;玻璃微珠含量越大,芯材变形回弹性能越好;B 型 PUEPM 芯材具备较好的综合力学性能。

关键词: 夹芯结构;PUEPM 芯材;深水静压;蠕变实验;套筒;实验方法

中图分类号: TB303 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-4381(2012)01-0051-04

Abstract: According to the elasticity theory, comparing the core material mechanical states in the sleeve under static pressure and the core mechanical states in the sandwich structure under deep water static pressure environment, the bushing test method adapted to study the creep characteristics of viscoelastic core materials was presented. The quasi-static compression and bushing compression creep tests for three different microspheres-reinforced polyurethane-modified epoxy resin sound absorption materials (PUEPM) were carried out, the creep behavior of the core materials was obtained. The results show that the delaminated PUEPM core with low content glass microsphere and high content chopped fiber has preferable creep performance. The PUEPM core with higher content glass microsphere has higher resilience performance. The PUEPM core of type B has better comprehensive mechanical properties.

Key words: sandwich structure; PUEPM core material; deep water pressure; creep test; bushing; test method

复合材料夹芯板结构由上下表层层合板与低密度、低模量,厚度较大的芯材构成,该结构形式不仅具有较好的准静态静力承载特性,而且可根据不同的工程应用要求,选择不同的芯材,使其具有优良的动力学及声学功能性能,以实现结构承载与功能集成设计,近年来得到船舶工程领域的高度关注^[1,2]。对夹芯结构的研究成果众多,主要集中在夹芯结构静力学弯曲问题^[3,4]、也有文献涉及夹芯结构的动力学特性^[5],但涉及深水静压环境中夹芯结构力学问题的文献较少,李华东^[6]针对夹芯结构在深水压力下的复合材料夹芯板

结构的应力、变形开展了相关研究。上述文献研究均认为芯材为弹性材料,并未考虑芯材的黏弹性行为。在实际工程结构设计过程中,为了使夹芯结构具备较好的振动或声学特性,芯材通常采用黏弹性材料,其黏弹性特性使得夹芯结构在载荷作用下产生蠕变现象^[7],导致结构随着时间延长继续变形,甚至产生破坏,因此,对深水静压环境中夹芯结构芯材的蠕变特性必须加以研究。关于不同材料蠕变特性开展单轴和三轴蠕变实验的研究成果较多^[8,9],但材料单轴和三轴蠕变实验研究并不适用于深水静压环境下夹芯结构芯

材的蠕变特性,因此本工作针对夹芯结构芯材在深水静压环境中的位移和应力特点,提出一种环向套筒约束芯材蠕变实验方法。根据构成夹芯结构的三种不同配方的聚氨酯改性环氧基微珠增强吸声体(Polyurethane Modified Epoxy Resin Sound Absorption Materials, PUEPM)芯材进行了套筒蠕变实验,依据蠕变实验结果优选了 PUEPM 芯材。本工作的研究成果可为深水静压环境下夹芯结构芯材蠕变实验和芯材优选设计提供参考。

1 深水静压环境中夹芯结构芯材受力状态的弹性力学分析

本工作中的夹芯结构具有以下特点:横截面厚度尺寸远小于跨度,整个结构由黏弹性芯材和上下表层框架构成,表层框架为正交各向异性层合板。根据矩形夹芯结构的对称性,可以取夹芯结构横截面的 1/4 模型来研究夹芯结构在深水环境中芯材的力学状态。如图 1 所示,文献[4]将深水静压环境中夹芯结构的变形模式分为 I 边界区域、II 过渡区域与 III 中心区域。同时,根据弹性基础板的变形规律可知:中心区域表层最大 z 向位移为 p/k (p 为均布载荷, k 为弹性系数),在过渡区域内表层板的最大 z 向位移为 $1.043p/k$ 。在结构弹性变形较小的情况下,可以认为夹芯结构表层在过渡区和中心区域的 z 向位移是相同的。因为芯材本身压缩变形较表层要大得多,忽略表层本身的压缩变形,本工作认为芯材在中心区域和过渡区域的 z 向位移是接近的。同时,忽略边界的影响,根据“无限大弹性层受重力及均布压力”问题的求解^[8],在中心区域,芯材 x, y 方向的应变满足: $\epsilon_x = \epsilon_y = 0$ 。

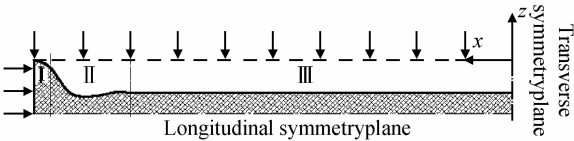


图 1 夹芯板横截面变形

Fig. 1 Deformation of sandwich cross-section

同时,由该结构受力状态可知其芯材处于体积压缩状态,其 x, y 方向应力主要由泊松效应引起,其应力特点为^[10]:

$$\sigma_x = \sigma_y = \frac{\nu}{1 - \nu} \cdot \sigma_z \quad (1)$$

式中: $\sigma_x, \sigma_y, \sigma_z$ 分别为 x, y, z 方向的正应力; ν 为泊松比。

2 套筒蠕变实验方法的提出

2.1 套筒实验原理介绍

图 2(a)所示为套筒边界约束芯材受均布载荷作用示意图,套筒内径为 a ,芯材试件高度为 h ,表面受均布载荷为 q 。将套筒边界视为绝对刚性,该问题的边界条件为 $u_\rho|_{\rho=a} = 0, W|_{z=0} = 0, q|_{z=h} = q$ 。采用 Abaqus/Standard 求解套筒边界约束芯材静压问题,单元类型采用 C3D8R,模型参数:芯材模量 30MPa,泊松比 0.45,芯材试件高度 50mm,圆柱直径 50mm,模型如图 2(b)所示。

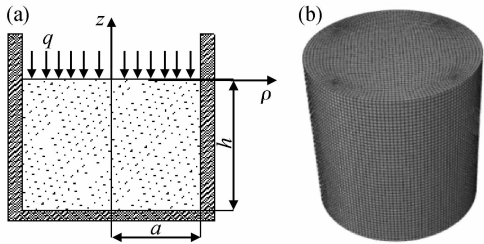


图 2 套筒压缩示意图(a)及芯材有限元模型(b)

Fig. 2 Bushing compression schematic (a) and FEM model for PUEPM core material (b)

通过计算上述模型的应力和变形可知整个芯材柱体的位移呈现一种整体上下沉降模式,且同一高度平面内的位移为同一值,芯材应力计算结果如下:

$$\sigma_x = \sigma_y = 0.82\text{MPa}, \sigma_z = 1.0\text{MPa} \quad (2)$$

其计算结果满足关系式(1)。

2.2 实验平台设计

对比套筒压缩下芯材位移、应力的有限元计算结果和夹芯结构在深水静压环境中芯材的力学状态分析结果,发现两者是一致的,因此,套筒压缩实验可以进行深水静压环境中夹芯结构芯材的蠕变特性测试。本工作设计了套筒压缩蠕变加载平台,示意图如图 3 所示。

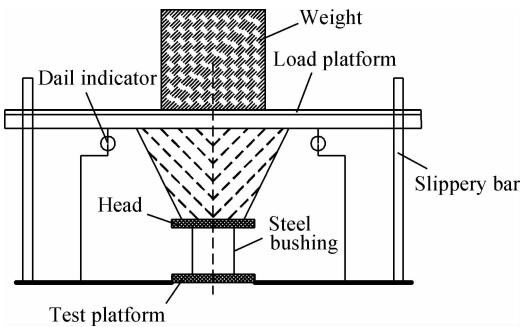


图 3 蠕变实验装置示意图

Fig. 3 Creep test equipment schematic

套筒蠕变测试平台主要由试件平台、载荷平台、定位滑杆、压头、环向钢套以及百分表位移计等构成,其中环向钢套主要用于限制试件的环向变形,以模拟深水静压环境中芯材的实际受力状态。正常实验工作时,压铁置于载荷平台上,平台沿定位滑杆可上下运动,试件的形变由载荷平台下的百分位移计测得。

表 1 PUEPM 试件配方
Table 1 PUEPM sample recipe

Type of samples	Proportion of reinforced chopped fiber	Average density/(g · cm ⁻³)
A	Low density single layer structure with 1 portion of chopped glass fiber	0.707
B	Fluctuation layered structure with 3 portion of chopped glass fiber	0.817
C	Fluctuation layered structure with 0.8 portion of chopped glass fiber	0.789

以上三种试件中 B,C 两型试件配方基本一致,其主要差别在于短切玻璃纤维的含量存在较大差别,C 型试件玻璃微珠含量较 B 型试件含量高。A 型试件是用 B,C 两型试件上下分层结构的底层配方制作,玻璃微珠含量最大,因此其密度较 B,C 明显偏低。实验用套筒及试件实物照片如图 4 所示。



图 4 套筒装置及芯材试件

Fig. 4 Bushing equipment and core material sample

3.2 实验过程

测量试件的初始平均厚度,并对套筒试件进行准静态压缩实验,得出其相应载荷作用下的弹性压缩位移值,因为其处于弹性阶段,忽略该阶段蠕变特性对芯材位移的贡献,可将其视为蠕变起始位移值。对于加载重物 231,393,511kg,分别可模拟夹芯结构处于水深 91m(0.91MPa),154m(1.54 MPa),200m(2MPa)的深水载荷。加载 2min 后,认为其弹性形变已经完成,开始记录试件蠕变形变。蠕变初期采用短间隔记录,基本稳定后,延长记录时间间隔进行记录。

3.3 实验结果及分析

对 A,B,C 三种套筒试件进行常规压缩实验,由载荷位移曲线获得定载荷下试件产生的位移值,如表 2 所示,对各试件蠕变实验前后的厚度进行测量,得到永久蠕变变形,结果见表 3。各载荷下的试样变形值随时间变化的曲线如图 5 所示。

图 5 显示:各载荷下的 PUEPM 蠕变曲线随时间逐渐趋于水平,即随着材料的体积压缩,蠕变现象越来

3 PUEPM 芯材蠕变实验

3.1 PUEPM 试件制备

针对 PUEPM 芯材,参照 GB/T15048—1994《硬质泡沫塑料压缩蠕变实验方法》的要求制作了三种配方的 PUEPM 试件,如表 1 所示。

表 2 定载荷作用下 PUEPM 芯材试件弹性变形值

Table 2 PUEPM core material samples elastic deformation under given load

Type of samples	Average deformation under compression load /mm		
	0.91MPa	1.54MPa	2MPa
A	1.27	1.80	2.25
B	0.54	0.70	0.81
C	0.67	0.99	1.19

越不明显。表 3 给出了实验前后试件厚度和试件的永久蠕变变形率。由表 3 可以看出,最大载荷 2MPa 下,C1 试件蠕变变形特性最为明显,A1 次之(即使 A1 试件蠕变实验时间长于 C1 试件),B 型试件最小。产生如此差异是因为 B 型和 C 型试件的增强短切玻璃纤维不但对芯材的静刚度有较大影响,同时影响芯材的蠕变特性,且短切纤维量越大,材料蠕变性能越好;A 型和 C 型试件因玻璃微珠含量较 B 型试件高,增加了芯材的蠕变变形。从图 5 和表 3 可以看出,A 型试件的变形较大,但其蠕变形变率要小于 C 型试件,这主要是因为 A 型试件空心玻璃微珠的含量较大,产生的弹性变形值较大,卸载后恢复性能比 C 型试件要好,综合以上结果,B 型试件的蠕变性能相对较好。

B 型试件在 0~2MPa 静水压力载荷作用下加载 48h 后,其蠕变变形量不大于 2.4%,蠕变曲线显示:在加载 48h 后,曲线几乎趋于水平,蠕变效应很小,也能证明 B 型试件的蠕变特性较好。另外,因为 B 型试件密度在 0.8 左右,同时在定载荷作用下压缩变形最小(见表 2),满足夹芯结构芯材轻质、高强的设计要求,因此采用 B 型配方的芯材,其综合力学性能较好。

本工作将常规压缩实验载荷/位移曲线与蠕变压缩实验结果相结合进行综合分析,因为在常规压缩实验中试件并非完全的弹性变形,它同时包含蠕变变形影响因素,带来蠕变曲线斜率突变点的误差。但以加载前后试件厚度变化(即真实的蠕变值)为主,蠕变曲线为辅,对试件进行蠕变特性分析是可取的。

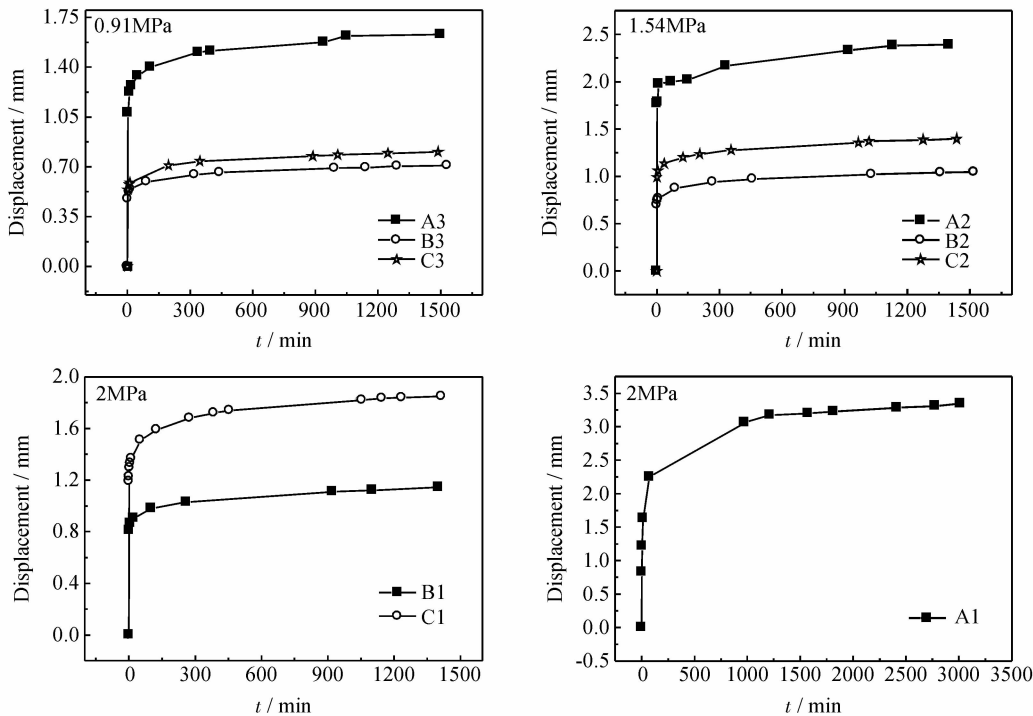


图 5 PUEPM 芯材试件的蠕变曲线
Fig. 5 Creep curves of PUEPM core material samples

表 3 蠕变实验前后试件厚度及永久蠕变变形率

Table 3 Sample thickness before and after creep test and permanent creep deformation rate

Sample	Original thickness /mm	Thickness after test/mm	Creep thickness /mm	Deformation rate of creep/%
A1	30.93	29.93	1.00	3.23
A2	30.27	29.74	0.53	1.75
A3	30.60	30.23	0.37	1.21
B1	22.96	22.41	0.55	2.39
B2	21.91	21.48	0.43	1.96
B3	22.04	21.66	0.38	1.72
C1	21.90	21.10	0.80	3.65
C2	21.50	20.73	0.77	3.58
C3	21.23	20.66	0.57	2.68

4 结论

- (1)玻璃微珠含量较低,短切纤维含量较高的分层 PUEPM 芯材具备较好的蠕变性能。
- (2)玻璃微珠含量越大,PUEPM 芯材变形回弹性能越好。
- (3)上下分层且短切玻璃纤维含量较高的 B 型 PUEPM 芯材的综合力学性能较好。

参考文献

[1] MOURITZ A P,GELLERT E,BURCHILL P,et al. Review of advanced composite structures for naval ships and submarines

[J]. Composite Structures,2001,53 (1):21-41.
[2] 蔡斌. 复合材料在船艇工业中的应用[J]. 功能高分子学报,2003, 16 (1):113-119.
[3] ICARDI U. Higher-order zig-zag model for analysis of thick composite beams with inclusion of transverse normal stress and sub-laminates approximations[J]. Composites: Part B, 2011,32(4): 343-354.
[4] 中国科学院北京力学研究所. 夹层板壳的弯曲、稳定和振动[M]. 北京:科学出版社,1977.
[5] YANG W P, CHEN L W, WANG C C. Vibration and dynamic stability of a traveling sandwich beam[J]. Journal of Sound and Vibration, 2005, 285(3): 597-614.
[6] 李华东,朱锡,梅志远. 静水压力作用下夹芯板结构的变形规律研究[J]. 华中科技大学学报:自然科学版,2010,38(11):119-123.
[7] KESLER O, CREWS L K, GIBSON L J. Creep of sandwich beams with metallic foam cores[J]. Materials Science & Engineering A, 2003,341(1-2):264-272.
[8] 李辉,张久鹏,黄晓明. 沥青混合料高温稳定性的单轴静载蠕变实验[J]. 河南科技大学学报:自然科学版,2006,27(3):48-51.
[9] 王登科,刘建,尹光志,等. 三轴压缩下含煤样蠕变特性实验研究[J]. 岩石力学与工程学报,2010,29(2):349-357.
[10] 徐芝纶. 弹性力学[M]. 北京:高等教育出版社,2006. 212-213.

基金项目:国家自然科学基金资助项目(50979110)
收稿日期:2011-03-11;修订日期:2011-11-07
作者简介:杨坤(1986—),男,博士生,主要研究方向为舰艇结构强度与振动,船用材料应用,联系地址:湖北武汉解放大道 717 号海军工程大学船舶与动力学院 102 教研室(430033),E-mail:yangkuntuo@163.com