

文章编号:1004-7220(2013)05-0538-04

采用镜头套筒进行水下数字图像测量

毛霜霜¹, 陈立¹, 张东升^{1,2}

(1. 上海大学力学系, 上海 200444; 2. 上海市力学在能源工程中的应用重点实验室, 上海 200072)

摘要: **目的** 研究适用于水环境的生物材料力学测试技术。**方法** 基于数字图像相关法(digital image correlation, DIC)设计独特的镜头套筒,避免水下摄影的畸变,并将该技术应用到鱼鳞的力学性能测试中。**结果** 水槽平移实验表明:使用镜头套筒可以有效减小水下测量的误差,测试精度可靠。鱼鳞的力学性能测试表明:鱼鳞不同部位的力学性能具有明显差异,而失水后这种差异的显著性降低。**结论** 设计的镜头套筒能够有效地运用到图像采集系统中,利用DIC技术实现水下生物材料的力学测试。

关键词: 数字图像相关; 水环境; 生物材料; 力学测试; 镜头套筒; 图像采集

中图分类号: R 318.01 **文献标志码:** A

Underwater digital image measurement using lens sleeves

MAO Shuang-shuang¹, CHEN Li¹, ZHANG Dong-sheng^{1,2} (1. Department of Mechanics, Shanghai University, Shanghai 200444, China; 2. Shanghai Key Laboratory of Mechanics in Energy Engineering, Shanghai 200072, China)

Abstract: **Objective** To explore the mechanical testing technique suitable for biological materials under water environment. **Methods** Based on digital image correlation (DIC) method, the unique lens sleeves which can avoid the distortion caused by underwater photography was designed, and this technique was applied to determining mechanical properties of the fish scales. **Results** The experiment on translation of the water sink indicated that the use of the designed lens sleeves could effectively reduce errors for underwater measurement with high precision; the mechanical testing on fish scales showed that different regions of the fish scales had obviously different mechanical properties, but the differences induced by regions of the dehydrated fish scales were significantly reduced. **Conclusions** The designed lens sleeves in this study can be applied to image acquisition effectively, and determination of mechanical properties of the biological materials under water environment was achieved using DIC method.

Key words: Digital image correlation (DIC); Water environment; Biological materials; Mechanical testing; Lens sleeves; Image acquisition

力学实验技术是探知和评价各类材料力学行为的必要手段。随着现代技术的发展,基于图像的光学测量技术越来越广泛地应用在各种测试中。数字图像相关(digital image correlation, DIC)测量技术是一种非接触的光学变形测量方法,它利用光学技

术,跟踪物体表面图像子区域的运动形态,推算物体变形的位移和应变^[1-2]。由于DIC技术测试光路简单,可以同时获得全场变形信息,具有很大的测量范围,特别适用于生物材料的变形测量^[3-5]。

生物材料与其他材料相比具有明显的不同之

收稿日期:2012-09-08; 修回日期:2012-10-26

基金项目:国家自然科学基金资助项目(11172161),上海市科委基金项目(11195820900),国家级大学生创新实践活动项目(CXGJ09-02),上海市重点学科建设项目(S30106)。

通信作者:张东升,教授, Tel:(021)66135258; E-mail:donzhang@staff.shu.edu.cn。

处,除了大变形外,生物材料中的水分对材料的力学性能有很大的影响^[6]。因此,在测量生物材料力学性能时,应采用特别的措施,保持材料中的水分。把生物材料浸泡在水中测试是一种有效保持材料水分的方法,但是水对测试手段有不同程度的影响。例如:电测法要对应变片进行繁琐的防水处理;光测法受折射影响易引起图像失真^[7];防水摄像机可以直接伸入水下进行拍摄,但造价昂贵。

本文设计了一个特殊的镜头套筒,结合 DIC 测量技术,用于提高水下变形测量的精度。通过水槽平移实验验证镜头套筒使用的有效性和精确性,并对鱼鳞的力学性能进行定量测试。

1 材料与方法

1.1 图像采集方案

图像采集系统包括 JAI cv-a1 型电视摄像机和 Optem 70X 微观成像镜头,可实现 $1\text{ mm} \times 0.8\text{ mm} \sim 10\text{ mm} \times 8\text{ mm}$ 范围内的图像采集。光线从空气入射到水面时,若入射角不为 0,就会发生折射现象。水面受环境影响会产生波动,故光入射到水面时会发生折射现象,而且隔着水面拍摄的图像有较大的畸变。本文设计了一个可以直接安装在 Optem 70X 镜头前部的镜头套筒(见图 1),前端固定着镀有增透膜的平面透镜。该镜头套筒是一个防水装置,隔绝了图像采集系统与水的联系。拍摄时,带套筒的镜头可以直接伸入水下。平面透镜的法向与光路重合,可消除光的折射影响。虽然波动会使图像产生

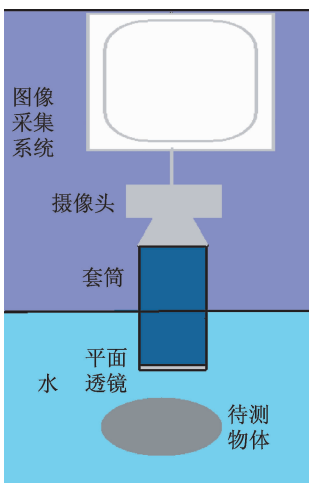


图1 图像采集原理图

Fig. 1 Schematic of the image capture

畸变,但是考虑到水是不可压缩介质,故水下的平面透镜可以有效地避免波动引起的图像畸变。考虑到不同镜头的工作距离和液面高度的问题,可以把套筒设计为可伸缩形式。

1.2 水槽平移实验

为了验证镜头套筒使用的有效性和精确性,设计水槽平移实验。把水槽安装在一个二维精密移动平台上,保证水槽的移动精度,同时利用 DIC 法测试不同实验情况下水槽的平移量,测试面积 $1.6\text{ mm} \times 1.1\text{ mm}$ 。设计 5 种实验情况:

- (1) 水槽加水、套筒伸入水中、液面无扰动;
- (2) 水槽加水、套筒不伸入水中、液面无扰动;
- (3) 水槽不加水、用套筒、液面无扰动;
- (4) 水槽加水、不用套筒、液面无扰动;
- (5) 水槽加水、套筒伸入伸入水中、液面有扰动。

调试图像采集系统使图像清晰,调节移动平台使水槽逐次产生平移,每次移动 0.05 mm ,共移动 10 次,采集 11 幅图像。

1.3 鱼鳞力学性能测试

作为一个应用实例,利用该技术对鱼鳞的力学性能进行测试。从鲤鱼的头部、鱼身和尾部 3 个部位获取鱼鳞(见图 2),做成试件进行微拉伸实验。试件的几何尺寸如图 3 所示:拉伸部位的宽度 $w = 3\text{ mm}$,拉伸部位的长度 $L = 7\text{ mm}$,总长度 $L_t = 16\text{ mm}$,试件的拉伸方向与鱼身方向一致。所有试件按部位分别保存在 HBSS 平衡液中,并在 72 h 内完成测试。受试件尺寸限制,采用实验室自制的微型材料力学测试系统进行单向拉伸实验^[8-9],最大载荷 100 N ,精度 1 mN 。为保持鱼鳞组织内部的水分,测试在水槽中进行(见图 4)。测试前,先擦拭试件表面水分,在空气中干燥几分钟,再在试件表面喷漆

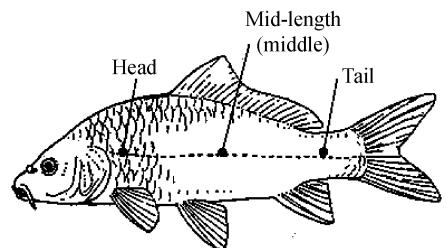


图2 鱼鳞获取位置示意图

Fig. 2 Schematic of obtaining the fish scale

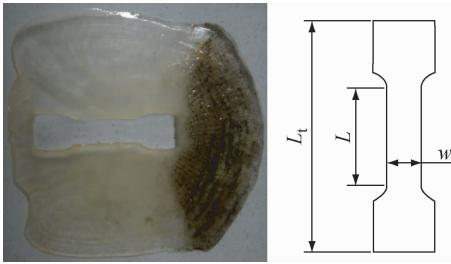


图3 鱼鳞拉伸试件的制备与几何尺寸

Fig. 3 Preparation for tensile specimens of the fish scale and its geometry

表1 在5种情况下水槽的平移位移

Tab. 1 Translational displacement of the sink corresponding to five cases

真实位移	情况(1)	情况(2)	情况(3)	情况(4)	情况(5)
0.050	0.049	0.043	0.048	0.044	0.045
0.100	0.098	0.089	0.097	0.092	0.092
0.150	0.144	0.139	0.145	0.132	0.142
0.200	0.191	0.182	0.194	0.184	0.190
0.250	0.238	0.230	0.241	0.227	0.238
0.300	0.285	0.273	0.288	0.270	0.283
0.350	0.333	0.316	0.335	0.312	0.330
0.400	0.382	0.359	0.381	0.355	0.377
0.450	0.430	0.406	0.431	0.403	0.424
0.500	0.477	0.455	0.477	0.449	0.472

的初始部分呈线性,并逐步过渡到非线性。因此,采用割线法计算1%应变范围内的曲线斜率作为材料的弹性模量,同时计算各个部位鱼鳞的拉伸强度。为了比较水分对生物材料力学性能的影响,在完成下测试后,将鱼鳞取出暴露在空气中干燥,并在第2、4、8和24 h后分别进行测量。测量结果如图6所示。



图4 鱼鳞拉伸实验装置

Fig. 4 Experimental facilities for testing tension of the fish scales

形成人工散斑^[10],该散斑层厚度在25 μm以内,且不溶于水。将处理好表面的鱼鳞试件安装在水槽内特制的夹具中,通过带镜头套筒的图像采集系统采集试件的变形图像。加载速度为0.2 mm/min,图像采集速率为2 Hz。

2 实验结果

用DIC软件(上海麦田富润科技有限公司)对5种情况采集的平移图像分别进行分析,获得各种情况下的平移位移(见表1)。实验数据显示,情况1、3、5的测量结果基本一致,说明镜头套筒的使用可以降低光线的折射影响和镜头在水下的畸变影响,显著减小水下测量的误差。

上述水下测量技术用于鱼鳞的力学性能测试,分别对头部、鱼身和尾部3个部位的鱼鳞进行单向拉伸实验,获得典型的应力应变曲线(见图5)。鱼身不同部位的应力应变曲线呈现明显的差异。曲线

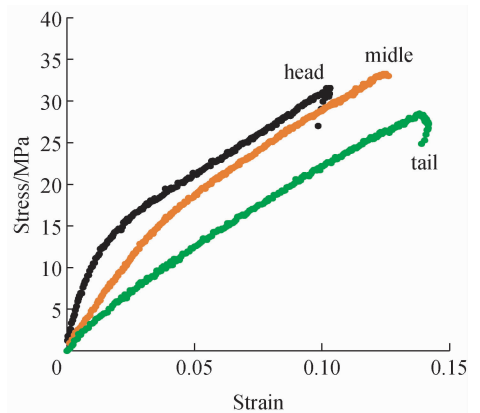


图5 鱼鳞不同部位的应力应变曲线

Fig. 5 Stress-strain curves for different regions of the fish scales

考虑鱼鳞力学性能受水分丢失时间和部位两个因素的影响,采用双因素方差分析ANOVA中Tukey's HSD检测方法($\alpha = 0.05$)。结果表明,在鱼鳞含水状态下,各部位的力学性能(弹性模量和拉伸强度)具有明显差异($P < 0.001$),干燥24 h后差异的显著性下降;随着水分丢失,鱼鳞各部位的弹性模量呈增大趋势($P < 0.001$)。

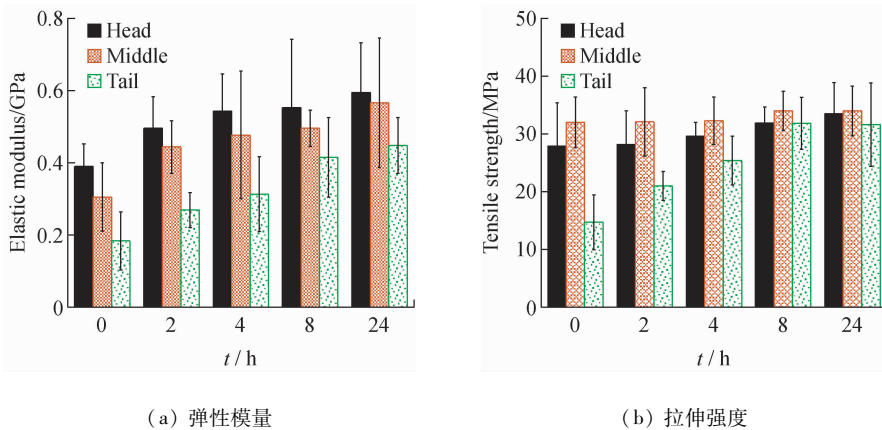


图6 鱼身各部位鱼鳞力学参数

Fig. 6 Mechanical parameters fish scale obtained from different regions of fish (a) Elastic modulus, (b) Tensile strength

3 讨论

从5组刚体平移实验测试结果分析发现:把本文设计的镜头套筒伸入水中进行位移测量的精度(情况1和5)与在空气中(情况3)的测量基本一致。不考虑二维平动装置和成像系统的系统误差,情况3与情况1、5之间的最大相对误差为1%;而不采用本文设计的镜头套筒,直接测量水中材料刚体平移的实验测试结果(情况2和4)与在空气中(情况3)的测量的最大相对误差可达6%以上。

对于许多生物材料,组织内部的水分对其力学性能有重要的影响^[4]。以鱼鳞为例,保有水分的鱼鳞在身体各部位的力学性质(弹性模量和拉伸强度)具有明显差异性,然而随着组织内部水分的丢失,这种差异性变得不明显。如果没有适当的水下力学测量方法,生物材料长时间放置在空气中引起组织内部水分丢失,将导致生物材料力学性能的变化,引起测试结果的失真。

本文提出了一种简易的水下力学测量方法,通过设计镜头套筒,可借助DIC测量生物材料的力学性能。

参考文献:

[1] Chu TC, Ranson WF, Sutton MA, *et al.* Applications of digital-image-correlation techniques to experimental mechanics [J]. *Exp Mech*, 1985, 25(3): 232-244.

[2] Peters WH, Ranson WF. Digital image technique in experimental stress analysis [J]. *Opt Eng*, 1982, 21(3): 427-431.

[3] Zhang D, Eggleton CD, Arola D. Evaluating the mechanical behavior of the arterial tissue using digital image correlation [J]. *Exp Mech*, 2002, 42(4): 409-416.

[4] Zhang D, Arola D. A method for characterizing the mechanical behavior of hoof horn [J]. *J Mater Sci*, 2007, 42(4): 1108-1115.

[5] Libertiaux V, Pascon F, Cescotto S. Experimental verification of brain tissue incompressibility using digital image correlation [J]. *J Mech Behav Biomed Mater*, 2011, 4(7): 1177-1185.

[6] 张东升, 鲁成林. 牙本质断裂力学行为的研究[J]. *中华口腔医学杂志*, 2007, 42(12): 733-736.

[7] Haile MA, Yin W, Ifju PG. MATLAB® based image Pre-Processing and digital image correlation of objects in liquid [C]// *Proceedings of the SEM Annual Conference and Exposition on Experimental and Applied Mechanics*. Albuquerque, USA: [s. n.], 2009: 350-360.

[8] Zhang D, Luo M, Lu P, *et al.* A study of mechanical and thermal properties of materials in electronic packaging [J]. *Int J Mater Prod Tech*, 2009, 34(1-2): 200-213.

[9] Zhang D, Nazari A, Soappman M, *et al.* Methods for examining the fatigue and fracture behavior of hard tissues [J]. *Exper Mech*, 2007, 47(3): 325-336.

[10] 张东升. 数字图像相关测量技术及其应用[J]. *医用生物力学*, 2009, 24(2): 85-88.

Zhang DS. Digital image correlation: Theory and applications [J]. *J Med Biomech*, 2009, 24(2): 85-88.