

文章编号: 1674-5566(2017)02-0278-09

DOI:10.12024/jsou.20160501767

## 环型钓钩拉伸实验与 ANSYS 模拟的对比研究

刘海阳<sup>1,2,3,4</sup>, 宋利明<sup>1,5,6,7</sup>, 袁军亭<sup>8</sup>, 马骏驰<sup>8</sup>, 郭根喜<sup>2,3,4</sup>

(1. 上海海洋大学 海洋科学学院, 上海 201306; 2. 中国水产科学研究院南海水产研究所, 广东 广州 510300; 3. 农业部南海渔业资源开发利用重点实验室, 广东 广州 510300; 4. 广东省网箱工程技术研究中心, 广东 广州 510300; 5. 国家远洋渔业工程技术研究中心, 上海 201306; 6. 大洋渔业资源可持续开发省部共建教育部重点实验室, 上海 201306; 7. 远洋渔业协同创新中心, 上海 201306; 8. 上海海洋大学 工程学院, 上海 201306)

**摘要:** 为了解金枪鱼延绳钓钩的力学性能及验证 ANSYS 有限元分析方法的准确性, 本文对环型钓钩(型号: 3.4-4.5)进行拉伸实验和 ANSYS 模拟分析, 并利用方差分析对其结果进行检验。研究表明: (1) 两种方法得出的环型钓钩位移、应变等力学性能无显著性差异( $P > 0.05$ ), 且最大应变为钩后弯及后侧, 最大总位移为钩前弯及后侧, X 方向最大位移为钩底及后弯, Y 方向最大位移为钩前弯及后侧; (2) 拉伸实验拉力为 500、800 和 1 200 N 时, 钓钩的应变分别为 0.002 76、0.008 14 和 0.069 94, X 方向位移分别为 1.8、3.5 和 7.2 mm, Y 方向位移分别为 -2.4、-4.6 和 -8.7 mm, 总位移分别为 2.8、5.4 和 10.6 mm; (3) ANSYS 模拟与拉伸实验结果之间存在线性关系, 拉伸实验得出的总位移、X、Y 方向位移和应变分别为 ANSYS 模拟结果的 1.0189、1.0272、1.019 5 和 1.088 3 倍。建议今后可利用 ANSYS 有限元分析方法研究金枪鱼延绳钓钩的力学性能。

**关键词:** 拉伸实验; ANSYS; 环型钓钩; 力学性能

**中图分类号:** S 973.3      **文献标志码:** A

金枪鱼延绳钓作业中, 钓钩必须具有足够的刚度与强度<sup>[1]</sup>。钓钩的形式和尺寸, 决定钓钩的渔获性能和上钩率<sup>[2]</sup>。印度学者 EDAPPAZHAM 等对 7 种钓钩进行了拉伸实验, 观测钓钩机械变形, 结果表明钓钩轴径与抗拉强度呈正相关关系<sup>[3]</sup>。马骏驰等针对环型钓钩和圆型钓钩利用 ANSYS 软件进行有限元分析, 研究表明圆型钓钩的强度满足使用要求, 可在延绳钓渔业中使用<sup>[4]</sup>。刘海阳等利用万能试验机<sup>[5]</sup>和数字图像相关测量系统(Digital Image Correlation, DIC)点分析方法对环型钓钩和圆型钓钩力学性能进行了测量<sup>[6]</sup>。仿真模拟技术是科学研究中有效的技术手段之一, 仿真模拟可应用到渔具模拟上, 用于渔具的设计和优化<sup>[1]</sup>。宋利明等建议采用 ANSYS 软件对金枪鱼类钓钩建立 3D 模型, 分析

钓钩受力产生的拉伸、断裂等变形情况<sup>[1]</sup>。但目前关于金枪鱼类钓钩的仿真模拟、受力分析依然较少。起重机吊钩与钓钩结构具有相似性<sup>[1]</sup>, 可参考 ANSYS 软件分析起重机吊钩的方法<sup>[7-8]</sup>, 利用 ANSYS 有限元分析方法研究金枪鱼延绳钓钩力学性能, 但是 ANSYS 有限元分析方法的准确性还有待验证。本文利用万能试验机<sup>[7]</sup>和数字图像相关系统全场分析方法对环型钓钩(型号: 3.4-4.5)进行拉伸实验, 测定其位移、应变来检验 ANSYS 有限元分析方法的有效性, 为进一步研究分析钓钩的力学性能提供有效的方法。

### 1 材料与方 法

#### 1.1 环型钓钩结构及尺寸

参照中国国家标准 GB 3938—1983<sup>[9]</sup>、QB/T

收稿日期: 2016-05-27      修回日期: 2016-07-29

**基金项目:** 国家远洋渔业工程技术研究中心开放基金(A-0209-13-0505-4); 国家高技术研究发展计划项目(2012AA092302); 上海市教育委员会科研创新项目(12ZZ168); 高等学校博士学科点专项科研基金联合(20113104110004); 海洋经济创新发展区域示范专项(GD2013-D01-001); 国家自然科学基金(31402349)

**作者简介:** 刘海阳(1989—), 男, 研究实习员, 硕士研究生, 研究方向为渔具力学。E-mail: 978035094@qq.com

**通信作者:** 宋利明, E-mail: lmsong@shou.edu.cn



内面 A 区域施加 Y、Z 方向位移为零的约束, X 方向无约束, 以符合钩钩拉伸实验受力、约束情况, 见图 2d。

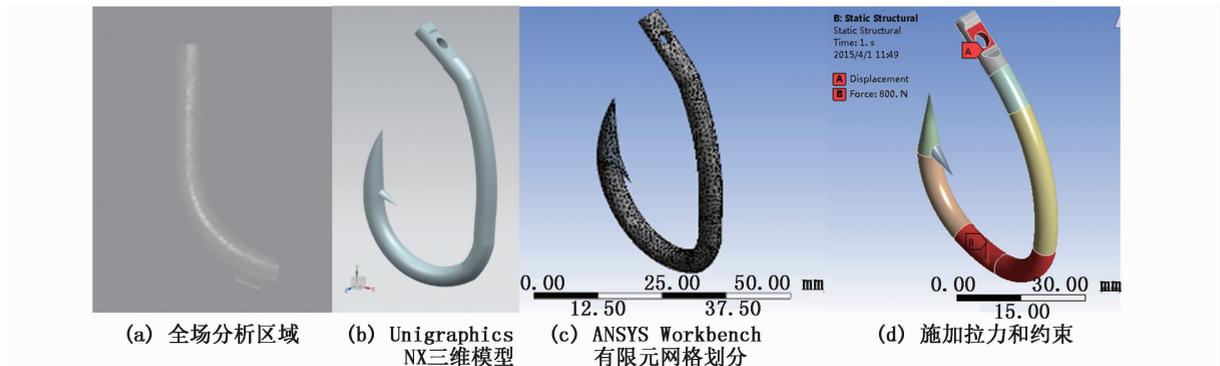


图 2 环型钩钩(型号:3.4-4.5) ANSYS 模拟  
Fig.2 Ring hook (Type:3.4-4.5) ANSYS simulation

## 1.4 对比分析

### 1.4.1 正态性检验

使用 Shapiro-Wilk 正态检验方法 ( $W$  检验)<sup>[19]</sup>, 分别检验环型钩钩拉伸实验与 ANSYS 模拟结果是否符合正态分布。

$$W_i = \frac{[\sum_{i=1}^n a_i(x_{n+1-i} - x_i)]^2}{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}$$

式中:  $W_i$  为  $W$  检验统计量, 拉伸实验:  $i = 1$ ; ANSYS 模拟:  $i = 2$ 。

### 1.4.2 方差齐性检验

利用 Bartlett 检验<sup>[19]</sup>, 检验不同拉力水平的拉伸实验与 ANSYS 模拟结果方差是否相等。

### 1.4.3 方差分析

若环型钩钩(型号:3.4-4.5)拉伸实验与 ANSYS 模拟结果满足正态假设和方差齐性假设, 则可进行单因素方差分析<sup>[20]</sup>, 并检验是否存在显著性差异。

### 1.4.4 钩钩拉力-位移弹塑性阶段非线性方程拟合

采用下列方法对钩钩拉力-位移弹塑性阶段非线性方程进行拟合:

$$T_i = k_1 D_i^2 + k_2 D_i \quad (2)$$

式中:  $T_i$  为拉力;  $D_i$  为位移, X 方向:  $i = 1$ , Y 方向:  $i = 2$ , 总位移:  $i = 3$ ;  $k_1$  和  $k_2$  为回归系数。

1.4.5 钩钩拉力-应变弹塑性阶段非线性方程拟合采用下列方法对钩钩拉力-应变弹塑性阶段非线性方程进行拟合:

$$T = k_3 \ln S + k_4 \quad (3)$$

式中:  $T$  为拉力;  $S$  为应变;  $k_3$  和  $k_4$  为回归系数。

### 1.4.6 总位移

总位移为 X 和 Y 方向位移的合成, 见下式:

$$D_3 = \sqrt{D_1^2 + D_2^2} \quad (4)$$

式中:  $D_3$  为总位移;  $D_1$  为 X 方向位移;  $D_2$  为 Y 方向位移。

### 1.4.7 一元线性回归

环型钩钩拉伸实验与 ANSYS 模拟得出的位移、应变回归方程形式如下<sup>[21]</sup>:

$$y_j = k_j x_j \quad (5)$$

式中:  $y_j$  为拉伸实验值;  $k_j$  为拟合系数;  $x_j$  为 ANSYS 模拟值; 分析位移时,  $x$  方向位移:  $j = 1$ ,  $y$  方向位移:  $j = 2$ , 总位移:  $j = 3$ ; 分析应变时,  $j = 4$ 。

### 1.4.8 Pearson 相关系数

用 Pearson 相关系数<sup>[22]</sup>度量拉伸实验与 ANSYS 模拟结果的线性关系:

$$r = \frac{\sum (x - \bar{x})(y - \bar{y})}{\sqrt{\sum (x - \bar{x})^2 \times \sum (y - \bar{y})^2}} \quad (6)$$

式中:  $r$  为 Pearson 相关系数;  $x$  为 ANSYS 模拟值;  $y$  为拉伸实验值。

## 2 结果

### 2.1 拉伸实验与 ANSYS 模拟结果

环型钩钩(型号:3.4-4.5)拉伸实验与 ANSYS 模拟位移、应变结果见表 1。拉伸实验位移、应变与拉力之间的关系见图 3。

表 1 环型钩钩(型号:3.4-4.5)拉伸实验和 ANSYS 模拟位移、应变汇总表

Tab.1 The displacement, strain summary table of tensile test and ANSYS simulation of ring hook 3.4-4.5

力学性能 Mechanical properties	拉力/N Tension	拉伸实验 Tensile test	区域 Area	ANSYS	区域 Area
位移 X 方向/mm Displacement in X	100	0.2		0.22	
	300	0.9		0.97	
	500	1.8	后弯 back bend	1.86	钩底,后侧 bottom and rear
	700	2.9		2.84	
	800	3.5		3.42	
	1000	5.2	钩底 bottom	5.04	钩底 bottom
	1200	7.2		6.97	
位移 Y 方向/mm Displacement in Y	100	-0.3		-0.33	
	300	-1.2		-1.27	
	500	-2.4	钩底,前侧 bottom and front	-2.43	钩底 bottom
	700	-3.8		-3.73	
	800	-4.6		-4.51	
	1000	-6.6	前弯 back bend	-6.46	前弯,前侧 back bend and front
	1200	-8.7		-8.51	
总位移/mm Total displacement	100	0.3		0.34	
	300	1.4		1.49	
	500	2.8	钩底,前侧 bottom and front	2.88	前弯,前轴 front bend, front axle
	700	4.4		4.38	
	800	5.4		5.31	
	1000	8.0	前弯 back bend	7.82	前弯,前轴 front bend, front axle
	1200	10.6		10.34	
应变 Strain	100	0.000 43		0.000 49	
	300	0.001 17		0.001 27	
	500	0.002 76	后弯,后侧 back bend and rear	0.002 89	后弯,后侧 back bend and rear
	700	0.005 02		0.004 86	
	800	0.008 14		0.007 83	
	1000	0.036 29	后弯 back bend	0.03424	后弯,后轴 back bend, back axle
	1200	0.069 94		0.065 27	

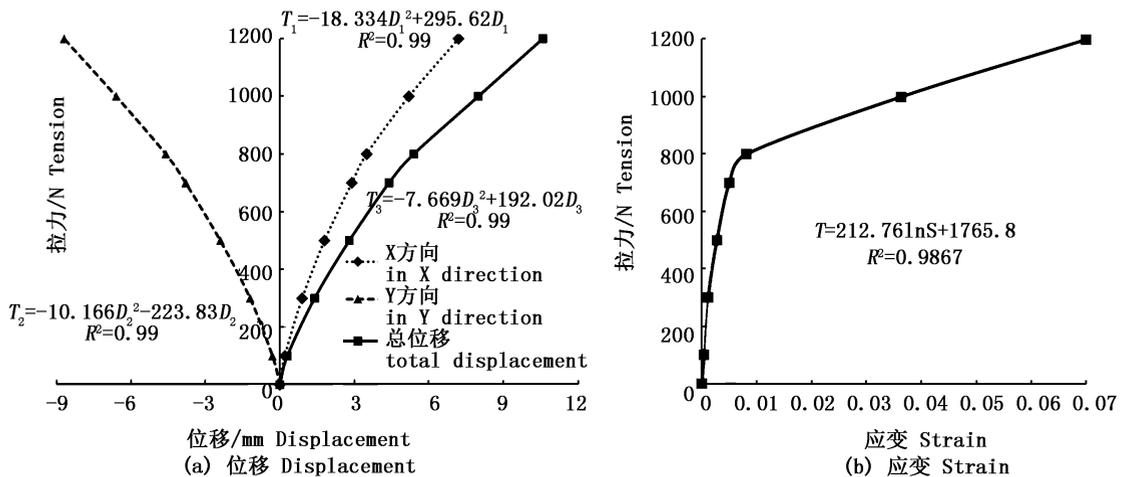


图 3 环型钩钩(型号:3.4-4.5)拉伸实验结果与拉力之间的关系

Fig.3 Displacement, strain and tension curve of ring hook (Type:3.4-4.5) tensile test

由图 3 得,拉力-位移、拉力-应变拟合结果为

X 方向位移:  $T_1 = -18.334D_1^2 + 295.62D_1$

$R^2 = 0.99$  (7)

Y 方向位移:  $T_2 = -10.166D_2^2 - 223.83D_2$

$R^2 = 0.99$  (8)

总位移:  $T_3 = -7.669D_3^2 + 192.02D_3$

$$R^2 = 0.99 \tag{9}$$

应变:  $T = 212.76 \ln S + 1765.8$

$$R^2 = 0.9867 \tag{10}$$

由图 3、式 7~10 得,环型钩钩 Y 方向位移为负方向,X 方向为正方向,Y 方向位移绝对值大于 X 方向,且 Y 方向应变大于 X 方向。当  $0 \text{ N} < T < 1\,200 \text{ N}$  时,环型钩钩拉力-位移为二次函数关系、拉力-应变为对数函数关系,曲线斜率皆随拉力增大而减小。即拉伸实验初期环型钩钩刚度较大,抗拉性能较强;拉伸实验过程中,其刚度、强度等力学性能显著下降。

## 2.2 拉伸实验与 ANSYS 模拟方差分析

### 2.2.1 正态性检验

由 Shapiro-Wilk 正态检验  $W_1 = 0.96, P_1 = 0.395 > 0.05; W_2 = 0.97, P_2 = 0.462 > 0.05,$

结果表明,拉伸实验与 ANSYS 模拟结果均符合正态分布。

### 2.2.2 方差齐性检验

由 Bartlett 检验得  $\text{Bartlett's K-squared} = 0.691, df = 1, P = 0.406 > 0.05,$ 结果表明,拉伸实验与 ANSYS 模拟结果在不同拉力水平下是等方差的。

### 2.2.3 方差分析

对环型钩钩拉伸实验与 ANSYS 模拟结果进行单因素方差分析,  $F = 0.059, P = 0.81 > 0.05,$ 即拉伸实验与 ANSYS 模拟结果无显著性差异。

## 2.3 拉伸实验与 ANSYS 模拟线性回归

### 2.3.1 回归曲线

拉伸实验与 ANSYS 模拟数据采用一元线性回归的方法拟合,拟合结果见图 4。

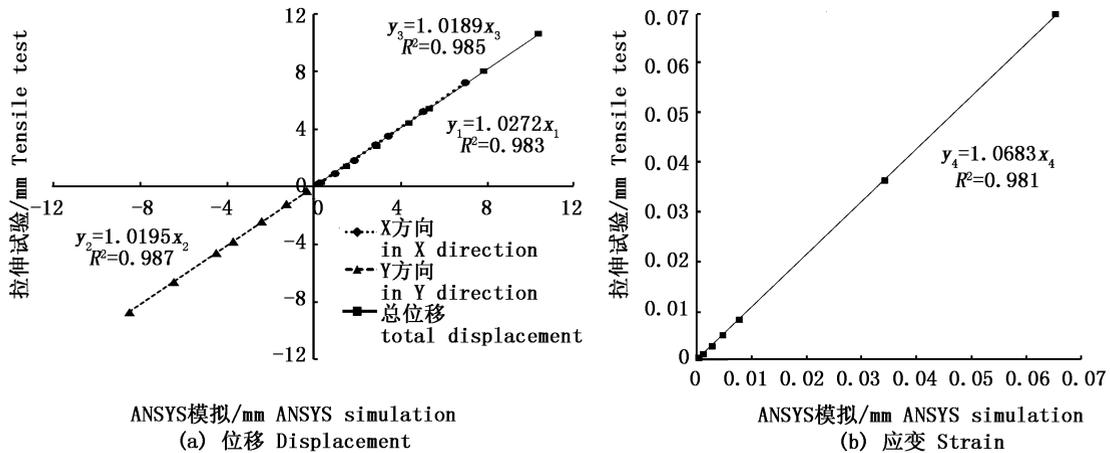


图 4 环型钩钩(型号:3.4-4.5)拉伸实验与 ANSYS 模拟拟合曲线

Fig. 4 The fitting curve between tensile test and ANSYS simulation of ring hook (Type:3.4-4.5)

由图 4 得回归方程如下:

$$\text{X 方向位移: } y_1 = 1.0272x_1, R^2 = 0.983 \tag{11}$$

$$\text{Y 方向位移: } y_2 = 1.0195x_2, R^2 = 0.987 \tag{12}$$

$$\text{总位移: } y_3 = 1.0189x_3, R^2 = 0.985 \tag{13}$$

$$\text{应变: } y_4 = 1.0883x_4, R^2 = 0.981 \tag{14}$$

### 2.3.2 Pearson 相关系数检验

环型钩钩拉伸实验与 ANSYS 模拟位移、应变之间 Pearson 相关系数检验结果见表 2。

由表 2 得  $P < 0.05,$ 表明拉伸实验与 ANSYS 模拟结果之间的线性关系显著。

表2 环型钩钩(型号:3.4-4.5)拉伸实验与 ANSYS 模拟相关系数检验  
 Tab.2 The correlation coefficients test obtained from tensile test  
 and ANSYS simulation for ring hook (Type:3.4-4.5)

	总位移 Total displacement	X 方向位移 X Direction displacement	Y 方向位移 Y Direction displacement	应变 Strain
相关系数 Correlation coefficient	0.985	0.983	0.987	0.981
<i>P</i>	$2.651 \times 10^{-12}$	$7.651 \times 10^{-12}$	$4.645 \times 10^{-13}$	$1.155 \times 10^{-14}$

### 3 讨论

#### 3.1 拉伸实验分析

钩环与钩底分别为受力点,导致钩后弯区域受力较大。而尖芒无约束,导致钩前弯区域受力较小,但钢丝绳受拉力作用后,会滑向前侧,为触发性的瞬态过程,继而影响环型钩钩后续的形变轨迹,导致钩前弯、钩前轴位移较大。万能试验机以 15 mm/min 匀速拉伸,环型钩钩受钢丝绳的拉力加大过程中,应力集中区域随时间变化<sup>[23-24]</sup>,环型钩钩由弹性变形转为塑性变形,继而破坏失效<sup>[25]</sup>。

环型钩钩受力形式类似于拉压杆模型<sup>[26]</sup>,即作用于环型钩钩的拉力作用线与轴线重合,故环型钩钩产生轴向拉伸,但由于环型钩钩结构的特殊性和复杂性,位移、应变为纵向、横向的合成。

#### 3.2 拉伸实验与 ANSYS 模拟对比分析

拉伸实验全场分析对拍摄的环型钩钩拉伸实验图片质量要求较高,运算量较大,适用于钩钩小变形测量<sup>[27]</sup>,且内置自检系统,此非接触测量不易失效,为环型钩钩力学性能研究提供可靠的分析方法,可作为检验 ANSYS 模拟结果的依据。全场云图主要用于分析环型钩钩重点区域,即测量钩底至钩后轴等区域,分析结果从云图读取,直观地展现了环型钩钩不同阶段的受力分布情况。

由于建立的数值分析模型都有各自的假设条件,ANSYS 模拟中涉及的现实因素复杂多变,其受力、约束也相当复杂,都需要不同程度地简化模型中的参数,会影响模拟的精度。环型钩钩 ANSYS 模拟精度主要取决于 Unigraphics NX 模型精度、施加载荷和约束的准确度。

由表 1 得,拉伸实验与 ANSYS 模拟结果中,钩后弯至钩前轴区域,分别为最易破坏区域至最大变形区域,与起重机吊钩有限元分析得出的最大位移、应变区域相同<sup>[28-29]</sup>。钩后弯至钩前轴区

域为钩钩结构优化、设计高抗变钩钩及提高钩钩工作寿命的重点研究区域<sup>[30]</sup>。

ANSYS 模拟可对环型钩钩任意区域进行研究,可对钩钩优化设计提供方案,今后可利用 ANSYS 模拟研究钩钩的力学性能<sup>[31]</sup>,可丰富渔具的研究方法<sup>[32]</sup>,减少实验时间和材料消耗,提高研究效率。

#### 3.3 拉伸实验与 ANSYS 模拟的拟合系数分析

拉伸实验影响因素主要包括环型钩钩表面散斑灰度处理及 DIC 系统拍摄采光处理等。ANSYS 模拟考虑主要实验条件,简化加载模型,且 ANSYS 载荷、约束面积大于环型钩钩拉伸实验时与钢丝绳的作用面积,故结果偏低。

ANSYS 模拟值略小于拉伸实验值,进行方差分析  $P > 0.05$ ,两者无显著性差异。两种方法位移、应变成正比例关系,乘以拟合系数可以提高 ANSYS 模拟精度,本文根据环型钩钩(型号:3.4-4.5)位移、应变数据得出拟合系数  $1 < r < 1.1$ ,可为其他型号金枪鱼类钩钩 ANSYS 模拟确定拟合系数提供参考。

#### 3.4 数字图像相关系统精度分析

DIC 系统测量精度主要受载荷系统、成像系统及相关算法影响<sup>[33]</sup>。相关运算精度主要由图像质量、插值精度和数据处理精度决定<sup>[34]</sup>。在钩钩表面喷涂亚光黑漆涂料,形成人工散斑精细结构<sup>[35]</sup>。DIC 拍摄钩钩拉伸实验过程,利用变形前后图像(目标图像)的散斑灰度特征,建立起对应关系,当前点计算得到的位移和应变值作为下一个点的初始值<sup>[34]</sup>,通过跟踪钩钩平面点对间的长度变化计算位移场,并利用差分法计算应变场<sup>[33]</sup>。在参考散斑图中以  $(x, y)$  为中心,选取大小为  $(2N_x + 1) \times (2N_y + 1)$  的计算窗口 A,然后与目标散斑图中以搜索范围内的一像素为中心,大小为  $(2N_x + 1) \times (2N_y + 1)$  的计算窗口 B 进行相关运算,得到两点间相关系数数值,皆大于 0.95,满足精度要求,且可测量从微米到米范围内钩钩变

形的位移、应变<sup>[35]</sup>。

### 3.5 展望

通过参考其他工程设计等领域力学实验、有限元分析的应用情况,并结合金枪鱼钩力学性能研究现状,今后可采用 ANSYS 模拟对有关金枪鱼类钩的下列问题进行分析研究:

(1) 对不同材料的金枪鱼类钩的弯曲、扭转、剪切、冲击等材料力学性能进行研究,对钩钩受力过程中应力和变形进行量化分析,对有关参数进行调试,推测参数变动带来的影响,确定钩钩的材料和最佳设计方案。

(2) 采用双摄像机数字图像法研究 5°、10°、15° 等偏角的钩钩三维力学性能。

(3) 根据金枪鱼等咬钩后的冲击力、挣扎力等,对金枪鱼类嘴型、延绳钓支绳、海流与钩钩之间的相互作用机理进行力学分析,进一步模拟钩钩在海上的实际作业状态。

### 参考文献:

- [1] 宋利明, 刘海阳, 马骏驰. 金枪鱼延绳钓钩钩和起重机吊钩材料及力学性能研究进展[J]. 渔业现代化, 2014, 41(4): 54-57.  
SONG L M, LIU H Y, MA J C. A review about materials and mechanics of longline hook and lifting hook[J]. Fishery Modernization, 2014, 41(4): 54-57.
- [2] BARANOV F I. Selected works on fishing gear Vol. I. Commercial fishing technique [M]. Jerusalem: Keter Publishing House Ltd., 1976: 1-167.
- [3] EDAPPAZHAM G, THOMAS S N, MEENAKUMARI B, et al. Physical and mechanical properties of fishing hooks[J]. Materials Letters, 2008, 62(10/11): 1543-1546.
- [4] 马骏驰, 袁军亭, 宋利明. 基于有限元分析的金枪鱼延绳钓钩力学性能研究[J]. 水产学报, 2015, 39(11): 1742-1751.  
MA J C, YUAN J T, SONG L M. Mechanical properties of tuna longline hook based on finite element analysis method [J]. Journal of Fisheries of China, 2015, 39(114): 1742-1751.
- [5] 宋秋红, 袁军亭, 兰雅梅. 力学基础实验指导—理论力学、材料力学、流体力学[M]. 上海: 同济大学出版社, 2011: 22-28.  
SONG Q H, YUAN J T, LAN Y M. The guidance of mechanical basic experiment — Theoretical Mechanics, Material Mechanics, Fluid Mechanics [M]. Shanghai: Tongji University Press, 2011: 22-28.
- [6] 刘海阳, 宋利明, 袁军亭, 等. 环型和圆型钩钩的力学性能[J]. 水产学报, 2016, 40(6): 965-975.  
LIU H Y, SONG L M, YUAN J T, et al. The mechanical properties of ring hook and circle hook [J]. Journal of Fisheries of China, 2016, 40(6): 965-975.
- [7] TRIPATHI Y, JOSHI U K. Investigation stress of a lifting hook with different methods: A review [J]. International Journal of Emerging Trends in Engineering and Development, 2013, 1(3): 195-200.
- [8] QIN Y X, XIE W T, REN H P, et al. Crane hook stress analysis upon boundary interpolated reproducing kernel particle method [J]. Engineering Analysis with Boundary Elements, 2016, 63: 74-81.
- [9] GB 3938—1983. 渔具材料基本名词术语[S]. 北京: 中国标准出版社, 1984.  
GB 3938—1983. The basic terms and definitions of materials for fishing gear [S]. Beijing: Standards Press of China, 1984.
- [10] QB/T 2927.1—2007 钓具 第1部分: 钓鱼钩[S]. 北京: 中国轻工业出版社, 2007.  
QB/T 2927.1—2007 Fishing tackle part 1: fishing hook [S]. Beijing: China Light Industry Press, 2007.
- [11] SC/T 4006—1990. 钓钩尺寸系列[S]. 北京: 中国标准出版社, 1990.  
SC/T 4006—1990, Hook Size Series [S]. Beijing: Standards Press of China, 1990.
- [12] GB/T 228—2002. 金属材料室温拉伸试验方法[S]. 北京: 中国标准出版社, 2002.  
GB/T 228—2002. Metallic materials—Tensile testing at ambient temperature[S]. Beijing: Standards Press of China, 2002.
- [13] GB/T 24172—2009. 金属超塑性材料拉伸性能测定方法[S]. 北京: 中国标准出版社, 2010.  
GB/T 24172—2009. Method for evaluation of tensile properties of metallic superplastic materials [S]. Beijing: Standards Press of China, 2010.
- [14] PAN B, ASUNDI A, XIE H M, et al. Digital image correlation using iterative least squares and pointwise least squares for displacement field and strain field measurements [J]. Optics and Lasers in Engineering, 2009, 47(7/8): 865-874.
- [15] LAGATTU F, BRIDIER F, VILLECHAISE P, et al. In-plane strain measurements on a microscopic scale by coupling digital image correlation and an in situ SEM technique[J]. Materials Characterization, 2006, 56(1): 10-18.
- [16] 金观昌, 章伟宝, 刘春阳. 用于位移、应变分析的激光散斑干涉的全场分析[J]. 固体力学学报, 1981(2): 223-234.  
JIN G C, ZHANG W B, LIU C Y. Overall analysis for laser displacement, strain analysis of speckle interferometry [J]. Acta Mechanica Sinica, 1981(2): 223-234.
- [17] MENG L B, JIN G C, YAO X F. Application of iteration and finite element smoothing technique for displacement and strain measurement of digital speckle correlation [J]. Optics and Lasers in Engineering, 2007, 45(1): 57-63.
- [18] YU H L, HUANG X Q. Structure-strength of hook with

- ultimate load by finite element method[J]. *Lecture Notes in Engineering and Computer Science*, 2009, 2175(1): 1799-1802.
- [19] 李诗羽, 张飞, 王正林. 数据分析: R 语言实战[M]. 北京: 电子工业出版社, 2014: 157-164.  
LI S Y, ZHANG F, WANG Z L. *Data analysis: R in action* [M]. Beijing: Publishing House of Electronics Industry, 2014: 157-164.
- [20] 薛毅, 陈立萍. 统计建模与 R 软件[M]. 北京: 清华大学出版社, 2007: 229-234.  
XUE Y, CHEN L P. *Statistical modeling and R software* [M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2007: 229-234.
- [21] KABACOFF R I. *R in Action: Data Analysis and Graphics with R* [M]. New York: Manning Publications, 2011.
- [22] 贾俊平. 统计学: 基于 R 应用[M]. 北京: 机械工业出版社, 2014.  
JIA J P. *Statistics: Based on R application* [M]. Beijing: Mechanical Industry Press, 2014.
- [23] UDDANWADIKER R. Stress analysis of crane hook and validation by photo-elasticity [J]. *Engineering*, 2011, 3(9): 935-941.
- [24] TORRES Y, GALLARDO J M, DOMINGUEZ J, et al. Brittle fracture of a crane hook [J]. *Engineering Failure Analysis*, 2010, 17(1): 38-47.
- [25] 刘鸿文. 材料力学[M]. 3 版. 北京: 高等教育出版社, 1992: 15-31.  
LIU H W. *Mechanics of Materials* [M]. 3rd ed. Beijing: Higher Education Press, 1992: 15-31.
- [26] 单辉祖. 材料力学 (I) (第二版) [M]. 2 版. 北京: 高等教育出版社, 2006: 54-56.  
SHAN H Z. *Mechanics of materials (I) (Second Version)* [M]. 2nd ed. Beijing: Higher Education Press, 2004: 54-56.
- [27] ZHOU Y H, CHEN Y Q. Feature matching for automated and reliable initialization in three-dimensional digital image correlation [J]. *Optics and Lasers in Engineering*, 2013, 51(3): 213-223.
- [28] 李水水, 李向东, 范元勋, 等. 基于 ANSYS 的起重机吊钩优化设计 [J]. *机械设计与制造*, 2012, 58(4): 37-38.  
LI S S, LI X D, FAN Y X, et al. Optimization of crane hook based on ANSYS [J]. *Machinery Design & Manufacture*, 2012, 58(4): 37-38.
- [29] PISKOTY G, MICHEL S A, VALET S, et al. Non-intuitive fracture pattern of a failed crane-hanger: A fracture mechanics-based explanation [J]. *Engineering Failure Analysis*, 2015, 56: 307-319.
- [30] NISHIMURA T, MUROMAKI T, HANAHARA K, et al. Damage factor estimation of crane-hook (A database approach with image, knowledge and simulation) [C] // *Proceedings of the 4th International Workshop on Reliable Engineering Computing*. Singapore: National University of Singapore, 2010.
- [31] HATTORI G, SERPA A L. Contact stiffness estimation in ANSYS using simplified models and artificial neural networks [J]. *Finite Elements in Analysis and Design*, 2015, 97: 43-53.
- [32] WARD P, HINDMARSH S. An overview of historical changes in the fishing gear and practices of pelagic longliners, with particular reference to Japan's Pacific fleet [J]. *Reviews in Fish Biology and Fisheries*, 2007, 17(4): 501-516.
- [33] 白晓虹. 数字图像相关 (DIC) 测量方法在材料变形研究中的应用 [D]. 沈阳: 东北大学, 2011.  
BAI X H. *Application of Digital Image Correlation method in study of material deformation* [D]. Shenyang: Northeastern University, 2011.
- [34] 夏桂锁. 数字图像相关测量方法的理论及应用研究 [D]. 天津: 天津大学, 2004.  
XIA G S. *A study on digital image correlation method (DICM) and its application* [D]. Tianjin: Tianjin University, 2004.
- [35] 张梦迪. 图像相关全场形变测量快速算法研究和应用 [D]. 武汉: 华中科技大学, 2012.  
ZHANG M D. *Fast algorithms on Digital Image Correlation for full-field measurement and its applications* [D]. Wuhan: Huazhong University of Science and Technology, 2012.

## A comparison mechanical property of ring hook between tensile test and ANSYS simulation

LIU Haiyang<sup>1,2,3,4</sup>, SONG Liming<sup>1,5,6,7</sup>, YUAN Junting<sup>8</sup>, MA Junchi<sup>8</sup>, GUO Genxi<sup>2,3,4</sup>

(1. College of Marine Sciences, Shanghai Ocean University, Shanghai 201306, China; 2. South China Sea Fisheries Research Institute, Chinese Academy of Fishery Sciences, Guangzhou 510300, Guangdong, China; 3. The Key Laboratory of South China Sea Fishery Resources Exploitation & Utilization, Ministry of Agriculture, Guangzhou 510300, Guangdong, China; 4. Guangdong Cage Engineering Research Center, Guangzhou 510300, Guangdong, China; 5. National Engineering Research Center for Oceanic Fisheries, Shanghai 201306, China; 6. The Key Laboratory of Sustainable Exploitation of Oceanic Fisheries Resources, Ministry of Education, Shanghai 201306, China; 7. Collaborative Innovation Center for Distant-water Fisheries, Shanghai 201306, China; 8. College of Engineering science and technology, Shanghai Ocean University, Shanghai 201306, China)

**Abstract:** In order to study the mechanical properties of tuna longline hooks, and to verify the accuracy of the finite element analysis method, this study conducted tensile test and ANSYS simulation on the ring hook (Type:3.4-4.5). The results of tensile test and ANSYS simulation were compared and tested by ANOVA. The results showed that: (1) there were no significant differences of the mechanical characteristics e. g. displacement or strain, measured by two methods ( $P > 0.05$ ). The maximum strain area was around the back bent and rear side. The maximum total displacement area was around the front bent and front axle. The maximum displacement in X direction was around the bottom and rear side. The maximum displacement in Y direction was around the back bend and back axle; (2) when the tension was 500, 800, and 1200N, the ring hook's strain was 0.002 76, 0.008 14, and 0.069 94; the displacement in X direction was 1.8, 3.5, and 7.2 mm; the displacement in Y direction was -2.4, -4.6, and -8.7 mm; the total displacement was 2.8, 5.4, and 10.6 mm, respectively; (3) there was a significant linear relationship between the results of tensile test and those of the ANSYS simulation. The displacement in total, X, Y direction, and strain of tensile test were 1.018 9, 1.027 2, 1.019 5, and 1.088 3 times the ANSYS simulation. This study suggested that the ANSYS finite element could be used to analyze tuna longline hooks' mechanical property.

**Key words:** tensile test; ANSYS; ring hook; mechanical property