

## 基于有限元分析的金枪鱼延绳钓钩力学性能研究

马骏驰<sup>1</sup>, 袁军亭<sup>1</sup>, 宋利明<sup>2,3,4,5\*</sup>

(1. 上海海洋大学工程学院, 上海 201306;

2. 上海海洋大学海洋科学学院, 上海 201306;

3. 国家远洋渔业工程技术研究中心, 上海 201306;

4. 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;

5. 远洋渔业协同创新中心, 上海 201306)

**摘要:**掌握金枪鱼延绳钓钩的应力、变形等力学性能有利于改进钓钩设计和正确选用材料。实验针对生产实际中常用的 2 种钓钩(环形钩和圆形钩)进行三维实体建模,利用 ANSYS 软件对其进行有限元分析,获得钓钩的等效应力、变形的分布模式和可能的破坏条件及形式;由同尺寸和同结构钓钩的拉伸实验结果验证了数值分析得到的最大应力和变形结果,并根据数值分析的结果对钓钩进行了结构优化分析。结果显示:(1)同规格环形钩的抗拉强度优于圆形钩 15.80%~29.40%,环形钩 X、Y 轴最大变形率比圆形钩分别小 3.00%和 0.21%;(2)钓钩的主要受力区域在后弯处(承受 83.00%~86.00%的应力),轴头孔下端存在应力集中;(3)对后弯、前弯表面进行压扁处理(压下率为 15.00%),适当增加钓钩后弯的圆弧曲率(曲率半径由 14 mm 增至 16 mm)、钩轴采用圆弧过渡等措施,可提升钓钩强度 4.60%~10.80%。研究表明,圆形钩是良好的生态保护型钓钩,强度满足使用要求,可在延绳钓渔业中使用。

**关键词:**延绳钓;钓钩;力学性能;结构优化;有限元分析

**中图分类号:** S 973.3

**文献标志码:** A

延绳钓渔具属被动性渔具<sup>[1]</sup>。钓钩是延绳钓捕捞作业中最重要的组成部分之一,常用的钓钩一般有环形钩、圆形钩和 J 形钩<sup>[2-3]</sup>。圆形钩具有减少海龟误捕率、渔获物释放后存活率高、脱钩率较低等优点<sup>[2-5]</sup>。因此,圆形钩有逐渐取代环形钩和 J 形钩的趋势。钓钩变形或断裂会导致延绳钓无法正常作业。因此,在钓钩设计和材料选用过程中,必须保持钓钩具有足够的刚度与强度<sup>[3]</sup>。印度学者 Edappazham 等<sup>[6]</sup>对七个不同尺寸的捕捞金枪鱼和中等体型鱼的钓钩进行垂直拉伸,观测钓钩的特性、硬度和变形,结果表明拉伸实验能有效分析钓钩的力学性能,钓钩直径与抗拉强度呈正相关关系。陈启亮等<sup>[7]</sup>通过介绍鱼钩的制作工艺,提出制作鱼钩的钢丝的技术要求,

指出温度控制精确可以使钓钩的力学性能更加稳定。钓钩受力后产生的应力、应变及变形对其力学性能和结构稳定起着决定性的作用,钓钩力学性能的优劣直接影响到能否有效捕获目标鱼种。因此,研究金枪鱼延绳钓钩在钓获渔获物时的受力和变形具有重要意义<sup>[8]</sup>。实验针对两种典型钓钩(环形钩和圆形钩),利用 ANSYS 软件对其应力、变形等进行有限元分析,为今后钓钩设计和正确选用材料提供参考。

### 1 材料与方法

#### 1.1 钓钩拉伸实验

选取一系列环形钩与圆形钩进行拉伸实验,测试钓钩的结构强度,确定钓钩刚开始出现塑性

收稿日期:2014-10-17 修回日期:2015-05-10

资助项目:国家远洋渔业工程技术研究中心开放基金项目(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)

通信作者:宋利明,E-mail:lmsong@shou.edu.cn

变形时的拉力值  $A$  (精确到 0.01 kN)。拉力试验机性能参数如表 1。

表 1 拉力试验机性能参数  
Tab. 1 Performance parameters of tension instrument

型号 type	最大行程/mm max stroke	误差 deviation	速度/(mm·min) velocity	宽度/mm breadth	最大拉力/N max pulling force
FL-8612	400	±0.1%	50~300	250	5 000

实验方法:(1)用钩钩专用夹具分别固定好钩钩的上下两端,并分别挂到拉力机的上下受力点;(2)启动开关,按合适的速度(100 mm/min)将钩钩拉伸至完全变形;(3)读出显示器上拉力的数值,记录拉力值  $A$ 。

### 1.2 钩钩有限元模型的建立

经市场调研,14/0 号圆形钩(线径 4.5 mm)为需求量最大的金枪鱼钩钩,选取 3.4 寸环形钩(线径 4.5 mm)作为对照组。钩钩各部分的名称如图 1,两种钩钩各部分的尺寸见表 2。对两种钩钩运用 UG 软件建立三维实体模型(图 2)。

钩钩有限元网格模型的建立 钩钩为小型不规则构件,为提高求解效率,在不影响分析结

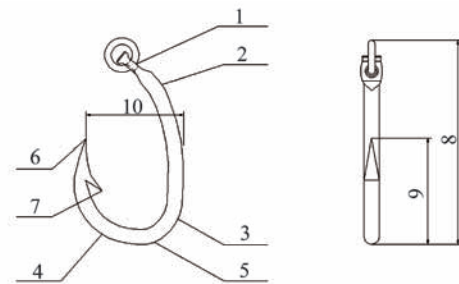


图 1 钩钩示意图

1. 轴头; 2. 钩轴; 3. 后弯; 4. 前弯; 5. 钩底; 6. 尖芒; 7. 倒刺; 8. 钩轴长; 9. 尖高; 10. 钩宽

Fig. 1 Schematic diagram of the hook

1. eye; 2. shank; 3. back-bend; 4. front-bend; 5. bottom; 6. point; 7. barb; 8. total length; 9. bite; 10. gape

表 2 线径 4.5 mm 的圆形钩和环形钩各部分尺寸  
Tab. 2 Dimensions of the 4.5 mm diameter ring hook and circle hook

项目 items	轴头 eye	钩轴 shank	后弯 back-bend	前弯 front-bend	尖芒 point	倒刺 barb	尖高 bite	钩宽 gape	钩轴长 total length
圆形钩 circle hook	11	20	20	14	14	4.5	39	18	58
环形钩 ring hook	10	28	26	20	20	5	36	24	55

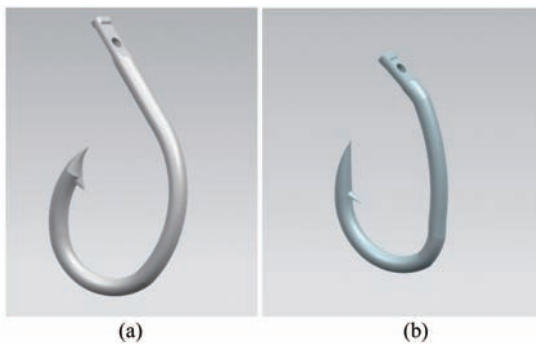


图 2 圆形钩(a)和环形钩(b)三维模型

Fig. 2 Models of circle hook (a) and ring hook (b)

果的前提下,对钩钩的轴头、倒刺、尖芒部分的部分尺寸进行适当简化,如简化尖芒的外形尺寸,倒刺的定位基准等。

钩钩材料为马氏体不锈钢 Cr13,密度  $\rho = 7\,750 \text{ kg/m}^3$ ,弹性模量  $E = 217 \text{ GPa}$ ,泊松比  $\mu =$

0.27,抗拉强度 1 000 MPa,屈服强度 850 MPa<sup>[9]</sup>。安全系数取 1.3,许用应力为 650 MPa。

根据钩钩实体模型及结构力学特性,采用四面体与六面体结合的方法(钩钩是非规则件)对钩钩结构进行自动精细网格(尺寸为 0.5 mm × 0.5 mm)划分。

综上建立圆形钩和环形钩的有限元网格模型(图 3)。

钩钩的边界条件与加载方式 钩钩在海水中由支绳在轴头孔处拴住,当鱼咬上钩时,锋利的尖芒迅速刺穿鱼体的上颚,伴随鱼体在海水中的剧烈挣扎,鱼体的上颚会沿钩钩的轮廓移动,在此过程中,钩钩主要受鱼体作用力和支绳张力作用。由于支绳属柔性体,钩钩可以绕轴头孔任意转动和移动,因此在有限元分析时轴头孔处可以看作铰链约束。当鱼体的挣扎使支绳和干线绷紧时,支绳、轴头孔和金枪鱼施加于钩钩的咬钩力在同

一条直线上,钩钩受到的外力最大,在此位置进行建模,分析钩钩的应力、强度和变形。为了便于计算,假设此时支绳、钩钩以及咬钩力均处于竖直位

置。支绳绷紧后,不再考虑支绳的伸长,钩钩在轴头孔处沿竖直方向的位移假设为0。

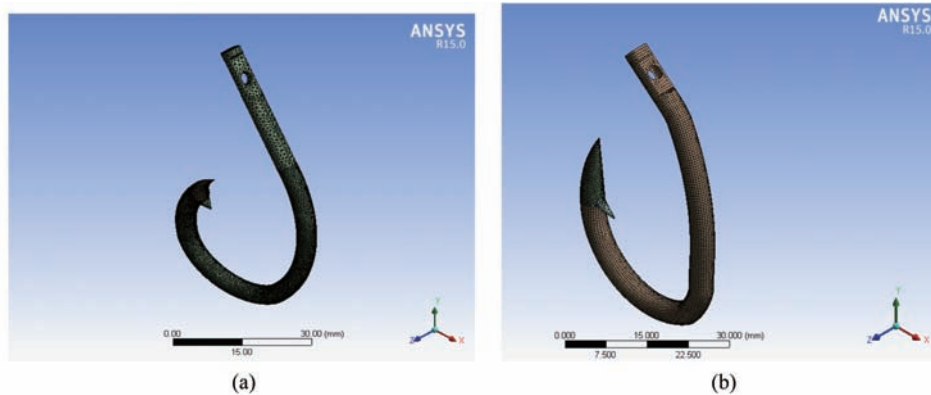


图3 圆形钩(a)和环形钩(b)有限元网格分布

Fig. 3 Finite element gridding of circle hook (a) and ring hook (b)

由于鱼体咬钩的随机性,咬钩力的作用点可以在靠近倒刺下方的前弯至钩钩受力张紧时竖直位置最低点间的圆弧AD上(图4)。为了比较咬钩力作用点不同对钩钩强度的影响,确定钩钩产生最大应力时施力点的位置,对该段圆弧均匀选取4个点A、B、C、D(图4),分别施加相同的载荷,选取产生最大等效应力的点作为后续分析时鱼体施加给钩钩的载荷作用点。

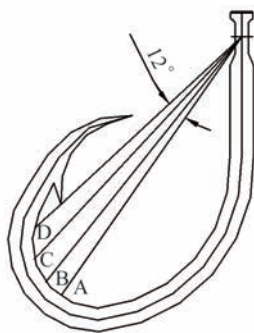


图4 钩钩施力点的选取

Fig. 4 The selection of the force point of hook

### 1.3 钩钩有限元分析求解

将实验中建立的钩钩网格模型导入有限元分析软件 ANSYS 中的结构静力分析模块中,通过施加载荷、设置边界条件,然后进行静力学结构分析得到钩钩的等效应力云图和变形云图,从等效应力图中可以看出应力分布规律以及最大应力的位置和大小,标出最大应力以此进行强度分析。受力变形云图可导出总变形云图及沿 X、Y、Z 方

向的变形云图,从变形云图中可看出钩钩各部位的变形程度及变形分布规律、最大变形量的大小及位置,以此来确定变形率。

按下列公式计算变形率:

$$\delta_1 = X \text{ 轴最大变形量} / \text{钩宽} \times 100\%$$

$$\delta_2 = Y \text{ 轴最大变形量} / \text{尖高} \times 100\%$$

若计算出的变形率超过 12%,则钩钩失去使用价值<sup>[10]</sup>。

### 1.4 钩钩受力分析

钩钩在海水中主要受鱼体作用力  $F$  和干线张力  $T$  作用(将钩钩与支绳部分等效为一点)。鱼上钩后干线张力的大小随鱼体作用力的变化而变化(图5)。

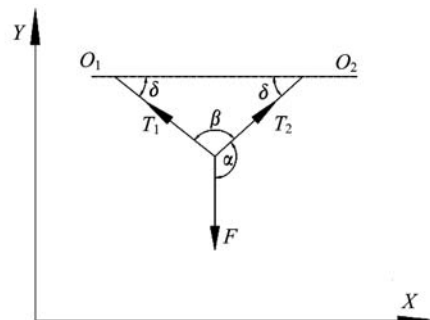


图5 钩钩受力图

Fig. 5 The force diagram of the hook

捕到鱼时,鱼体发出的力  $F$  作用于干线,当  $F$  垂直于干线时,干线张力  $T$  最大,这时<sup>[8]</sup>

$$T = \frac{F}{\sin\alpha} = \frac{F}{\sin^2\delta} \quad (1)$$

式中,  $\alpha$  为干线与支绳夹角;  $\delta$  为干线与水平面夹角。

鱼体作用力  $F$  可按鱼体发出的静拉力  $F_j$  和鱼体急剧挣扎所发出的动拉力  $F_d$  进行计算。

(1) 静拉力  $F_j$ , 可表示为<sup>[8]</sup>

$$F_j = kWl^{-1/3} \quad (2)$$

式中,  $W$  为鱼体重量(N);  $l$  为鱼体体长(cm);  $k$  为系数, 与鱼种有关。对于金枪鱼, 取  $k=0.3l^{1/3}$ 。

(2) 动拉力  $F_d$ , 可表示为<sup>[8]</sup>

$$F_d = cd \quad (3)$$

式中,  $c$  为钓具刚度(N/m);  $d$  为弹性位移(m)。

$$\frac{W}{F_d} = \frac{v^2}{gd} = q \quad (4)$$

式中,  $v$  为鱼的最大游速(m/s);  $g$  为重力加速度(m/s<sup>2</sup>);  $q$  为系数, 表示鱼体动负荷与鱼体自重的比值。金枪鱼类的  $q$  值为 1.1<sup>[8]</sup>。

延绳钓捕获的大眼金枪鱼 (*Thannus obesus*) 的叉长范围为 79 ~ 206 cm, 优势叉长组是 100 ~ 150 cm。净重范围为 9 ~ 138 kg, 优势净重为 10 ~ 50 kg<sup>[11]</sup>。所以选定金枪鱼鱼体体长为 150 cm, 体质量为 50 kg。

大眼金枪鱼一般游速为 10 ~ 14 m/s, 最高游速可达 20 m/s<sup>[1]</sup>。

将相关数据代入式(2)和(4), 得鱼体静拉力  $F_j = 150$  N, 动拉力  $F_d = 450$  N。

### 1.5 钓钩的结构优化与验证

根据实验结果对比圆形钩、环形钩的应力分布特点和强度, 对强度较小的钓钩结合材料力学理论对其结构进行优化。

拟采取的钓钩结构优化方案: 对钩柄、钩弯进行压扁操作, 将其原有的圆形截面压扁成近似于长方形的截面, 其压下率为 10% ~ 20%。适当增加钩钩前弯的圆弧曲率可以减小其受应力的区域, 钩柄采用圆弧过渡以避免应力集中。本实验主要讨论优化方法的有效性, 对方案中的具体取值(如压下率等)不作详细讨论。

对采用优化方案加工后的钓钩进行拉伸实验, 测试钓钩的结构强度以验证优化方案的有效性。

## 2 结果

### 2.1 钓钩的拉伸试验结果

钓钩拉伸试验测得一系列环形钩与圆形钩的

拉力值(表 3)。

通过实验数据对比, 可得:

(1) 钓钩随着线径增大, 其能承受的拉力也逐渐增大。说明钓钩线径与强度呈正相关关系。

(2) 同线径环形钩能承受的最大拉力大于圆形钩 15.80% ~ 29.40%, 说明环形钩的结构强度要优于圆形钩。

(3) 通过观察拉伸实验过程, 可知钓钩主要的变形区域集中在钩弯处, 由于钓钩的材料属于超塑性材料, 其伸长率可超过 25%, 硬度超过 159HB<sup>[9]</sup>, 所以钓钩的失效形式主要为变形率过大(超过 12%), 钩弯拉平, 尖芒外凸, 失去使用意义。但实验过程中钓钩未出现断裂。

表 3 环形钩与圆形钩拉力对比

Tab. 3 Comparison of ring hook and circle hook ultimate tension

序号 No.	线径/mm diameter	拉力/N ultimate tension		相对拉力差/% relative tension difference
		圆形钩 circle hook	环形钩 ring hook	
1	4.2	600	800	25.00
2	4.35	600	-	-
3	4.5	600	850	29.40
		650	-	-
4	4.8	-	900	-
		800	950	15.80
5	5.0	850	-	-
		900	-	-
6	5.3	-	1 000	-
7	5.5	-	1 050	-
8	5.8	-	1 100	-

注: 表中“-”表示无该尺寸的圆形钩或环形钩

Notes: “-” means there is no circle hook or ring hook at this size

### 2.2 钓钩有限元分析结果

钓钩施力点位置的确定 按照实验加载方案对圆形钩施加拉力 650 N 后得到的计算结果如表 4。

表 4 圆形钩加载结果对比

Tab. 4 Comparison of circle hook load results

施力点 action point	MPa			
	A	B	C	D
圆形钩最大等效应力 max equivalent stress of circle hook	636	612	605	600

由此, 初步认为钓钩产生最大应力时的施力点

在 A 点,也就是假设支绳、钓钩以及咬钩力均处于竖直位置时的最低点。环形钩与圆形钩结果类似。

圆形钩有限元分析 对圆形钩最低点处施加 650 N 拉力得到等效应力分布云图,(图 6)圆形钩的最大等效应力出现在钓钩后弯处,应力分布区域从钓钩钩底一直延伸至轴头处,轴头孔处存在应力集中,等效应力值为 620 MPa,小于等效应力的最大值。尖芒、倒刺、钓钩前弯及轴头顶端区域受到的应力很小。钓钩后弯内侧受拉应力,外侧受压应力,两侧应力分布相似,圆形钩等效应力最大值为 636.68 MPa,其值较大,这是由于假设鱼体咬钩力是作用于钓钩最低点的一个集中力,实际作业中,鱼体咬钩力因鱼嘴具有一定宽度,是一个分布力,应力值会较小。此时,钓钩不会变形,这与当拉力是 650 N 时才开始出现塑性变形的结果(表 4)较为接近。因此,圆形钩基本满足强度设计要求。最大值在圆形钩后弯圆弧中心偏上处,且应力分布随着后弯应力最大值点向圆弧两侧逐渐减小,最小值在尖芒下端,由此可看出,外载荷主要由圆形钩后弯部分来承担,约占整

体应力的 86.00%。

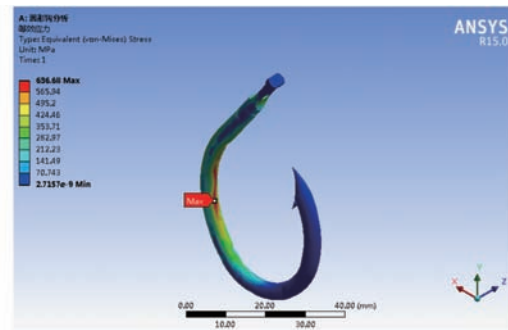


图 6 圆形钩的等效应力分布图

Fig. 6 Equivalent stress distribution of the circle hook

图 7 为其总变形云图及沿 X、Y、Z 方向的变形云图,圆形钩整体变形集中在钩弯处,而鱼体拉力亦主要由钩弯承受,因此钩弯是钓钩的主要受力区域,也是产生变形甚至失效的主要区域。钓钩整体最大变形出现在钓钩前弯外侧。钓钩整体最大变形量,在 X、Y 和 Z 轴的最大变形量,X 轴和 Y 轴变形率见表 5。由表 5 得出钓钩的主要变形集中在 X 轴方向。

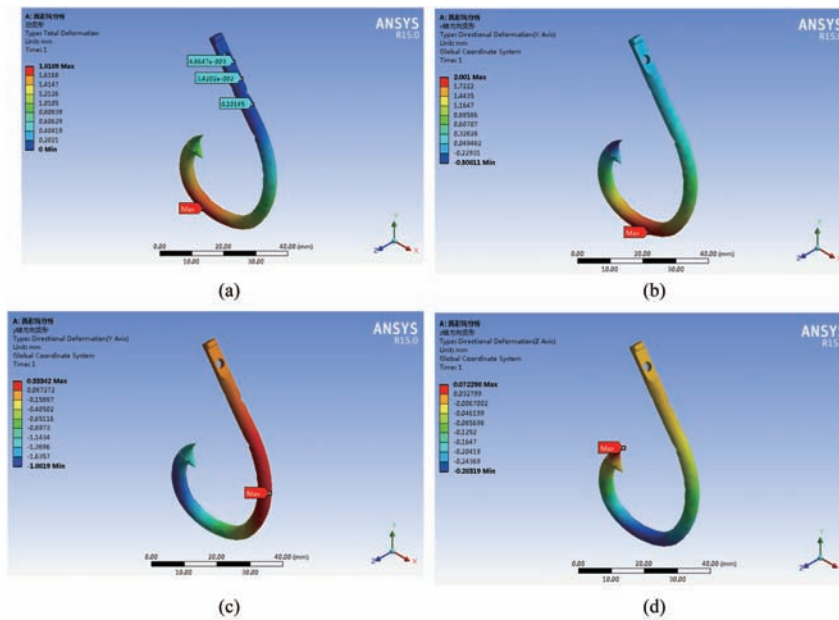


图 7 圆形钓钩受力变形云图

(a) 总变形,(b) X 方向变形,(c) Y 方向变形,(d) Z 方向变形

Fig. 7 Deformation of circle hook under loads

(a) Total deformation, (b) Deformation in X axis, (c) Deformation in Y axis, (d) Deformation in Z axis

最大变形率为 11.1%,接近 12%,基本满足钓钩力学性能设计要求<sup>[10]</sup>。

### 2.3 环形钩有限元分析

对环形钩于最低点处分别施加650 N的拉力

得到等效应力分布云图(图 8)。在与圆形钩承受相同载荷 650 N 的情况下,环形钩的等效应力最大值为 557.25 MPa,小于圆形钩。说明环形钩的结构强度优于圆形钩。图 9 为对其施加 850 N 拉

力所得到的等效应力分布云图。在 850 N 的拉力作用下,最大等效应力出现在环形钩后弯圆弧中心偏上处,等效应力最大值为 629.94 MPa,与钩钩材料的许用应力接近,与实验结果接近,基本满足强度设计要求。应力分布特征与圆形钩钩类似,轴头与钩轴连接处存在应力集中,而尖芒、倒刺、钩钩前弯及钩柄顶端区域几乎不受力。应力分布随着后弯最大值点沿钩钩轴线向轴头、尖芒处逐渐减小,最小值在尖芒下端,由此可看出外载荷主要由环形钩后弯承担,约占整体应力的 83.00%。

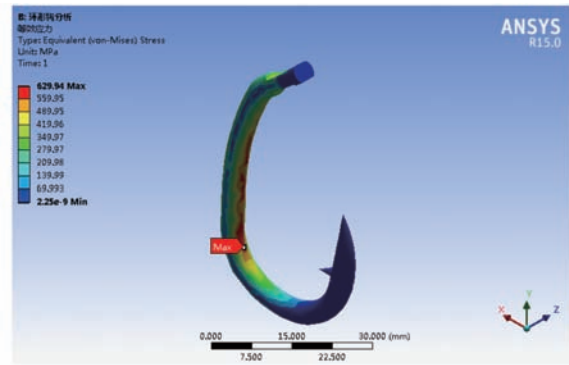


图 9 环形钩的等效应力分布图 (850 N)

Fig. 9 Equivalent stress distribution of the ring hook (850 N)

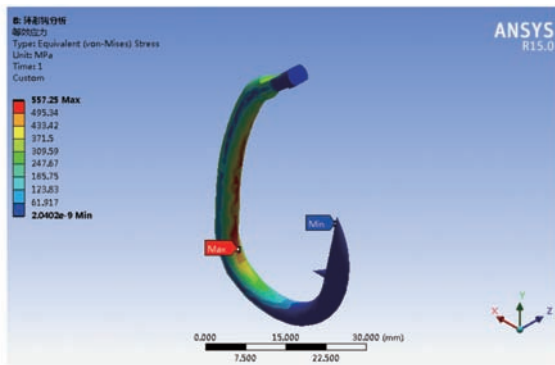


图 8 环形钩的等效应力分布图 (650 N)

Fig. 8 Equivalent stress distribution of the ring hook (650 N)

图 10 为环形钩总变形云图及沿 X、Y、Z 方向的变形云图,环形钩的变形特征与圆形钩相似,钩弯和钩轴是环形钩整体变形最集中的区域,钩弯是环形钩的主要受力区域,也是产生变形甚至失效的主要区域。钩钩整体最大变形出现在钩钩前弯外侧。钩钩整体最大变形量,在 X 轴、Y 轴和 Z 轴的最大变形量,X 轴和 Y 轴的最大变形率见表 5。由表 5 可看出环形钩的主要变形集中在 X 轴方向。

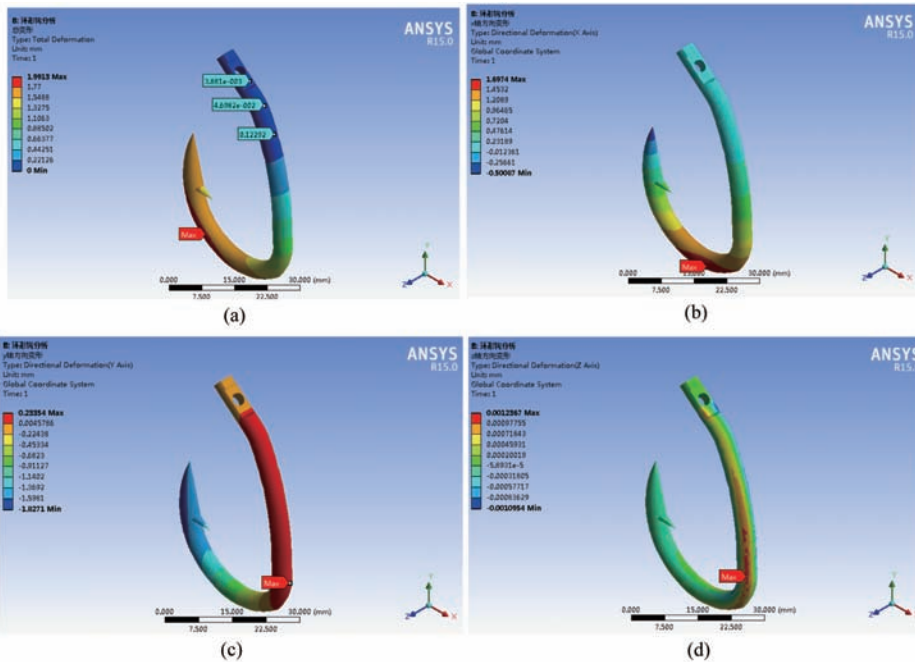


图 10 环形钩钩受力变形云图

(a) 总变形, (b) X 方向变形, (c) Y 方向变形, (d) Z 方向变形

Fig. 10 Deformation of ring hook under loads

(a) Total deformation, (b) Deformation in X axis, (c) Deformation in Y axis, (d) Deformation in Z axis

表 5 钓钩的变形数据  
Tab. 5 The data of hook's deformation

	X 轴最大 变形量/mm max deformation in X axis	Y 轴最大 变形量/mm max deformation in Y axis	Z 轴最大 变形量/mm max deformation in Z axis	整体最大 变形量/mm max entire deformation	X 轴最大 变形率 $\delta_1$ / % max deformation rate in X axis	Y 轴最大 变形率 $\delta_2$ / % max deformation rate in Y axis
圆形钩 circle hook	2.000	0.330	0.072	2.340	11.10	0.85
环形钩 ring hook	1.700	0.230	0.001	1.990	7.10	0.64

最大变形量均未超过 12%，基本满足钓钩刚度性能设计要求<sup>[10]</sup>。

有限元分析结果 从有限元分析中可以得到：

(1) 圆形钩与环形钩的力学性能基本满足设计使用要求,在线径相同的条件下,承受相同载荷时,环形钩 X、Y 轴最大变形率比圆形钩分别小 3.00% 和 0.21%,说明环形钩的强度更高,抗变形能力更强。

(2) 圆形钩与环形钩的主要受力区域都在钩弯处,分别占 86.00%、83.00%,轴头与钩轴连接处皆存在应力集中,最大变形都出现在钩钩前弯外侧,而尖芒、倒刺及钩柄顶端区域受到的力很小,因此钩弯的设计对钓钩整体性能的影响至关重要。

(3) 14/0 号圆形钩可承受的最大拉力为 650 N,已经超过了 50 kg 大眼金枪鱼所能产生的动拉力(450 N),说明该钓钩已能满足使用要求。但在实际捕捞作业中,可能有更大的渔获,如大眼金枪鱼最大可达 138 kg,对应的动拉力是 1 250 N,这时,钓钩的强度已经不够,故需增加钓钩的强度或更换更大尺寸的钓钩。

#### 2.4 圆形钩的结构优化

优化后的圆形钩有限元分析 对圆形钩,其具体优化方案:

(1) 对钩柄、钩弯进行压扁操作,将其原有的圆形截面压扁成近似于长方形的截面,其压下率(压下量与轧件轧制前的宽度之比)为 15%。

(2) 适当增大钓钩前弯的圆弧曲率,原前弯曲率半径为 14 mm,现增至 16 mm。钩轴采用圆弧过渡以避免应力集中。

采用与上述分析类似的步骤,按照优化方案,重新对 14/0 号圆形钩建模,然后导入 ANSYS 软件进行分析,求解后的等效应力如图 11。

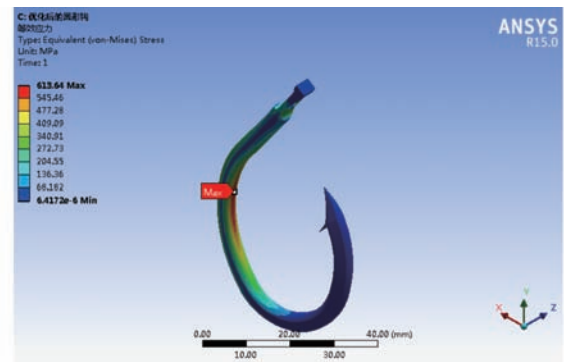


图 11 优化后的圆形钩的等效应力分布图  
Fig. 11 Equivalent stress distribution of the circle hook after optimization

求解后得到的最大等效应力值为 613.64 MPa,小于优化前的最大等效应力值 636.68 MPa,说明在用料相同的情况下,强度提升了 3.60%。有限元分析初步证实上述优化方案可以有效提升圆形钩的结构强度。

优化后的圆形钩拉伸实验 选取 14/0 号圆形钩(线径 4.5 mm)和结构优化后的 14/0 号圆形钩进行拉伸实验,针对实验中的两种措施分别测试相应可承受的最大拉力值,拉力 A 为增大圆弧曲率后的拉力值,拉力 B 为压扁操作后的拉力值(表 6)。

表 6 优化前后 14/0 圆形钩拉力对比  
Tab. 6 The comparison of ultimate tension for the circle hook 14/0 before and after optimization

项目 item	直径/mm diameter	拉力 A/N ultimate tension	拉力 B/N ultimate tension
优化前 before optimization	4.5	650	650
优化后 after optimization	4.45	680	720
相对拉力差/% relative tension difference	/	4.60	10.80

实验数据对比发现:优化后的圆形钩较优化之前抗拉强度分别提升了 4.60%、10.80%,其结构强度较之前有了提高,在应对金枪鱼的主要捕捞群体(10~50 kg)方面能满足使用要求,但在应对超大型金枪鱼(超过 100 kg)时强度欠缺。

### 3 讨论

#### 3.1 钩钩的力学性能及优化

经过有限元分析与实验研究可得:环形钩的部分力学性能(强度和刚度)优于圆形钩,但圆形钩亦满足正常的使用要求,钩钩线径与抗拉强度呈正相关关系。钩弯是主要受力及变形区域,其设计对钩钩整体性能的影响至关重要。

钩钩的主要受力区域在后弯处,轴头孔下端存在应力集中。适当增加钩钩钩弯的圆弧曲率并对表面进行压扁处理、钩轴采用圆弧过渡可避免应力集中,压扁操作有效增大了惯性矩,根据材料力学理论,材料一定的条件下(弹性模量不变时),惯性矩越大,抗弯刚度越大,钩钩的承载能力也越强。通过钩钩拉伸实验证实,上述措施可有效提升圆形钩的力学性能。

结合钩钩拉伸实验结果与软件分析的钩钩力学性能,环形钩虽然部分力学性能优于圆形钩,但其结构容易造成鱼体死亡,会威胁海龟等保护动物的生存,而圆形钩是良好的生态保护型钩钩,可降低对海龟等保护动物的兼捕,满足生态保护等要求<sup>[12]</sup>,且其力学性能基本满足使用要求。

Cooke 等<sup>[12]</sup>分析得出圆形钩是有效的保护型钩钩。Andrew<sup>[13]</sup>通过实验对比得出,在延绳钓渔业中使用圆形钩可降低海龟的死亡率。Hall<sup>[14]</sup>研究表明,与传统环形钩相比,金枪鱼延绳钓渔业中使用圆形钩使海龟的钓获率下降 44%~88%。戴小杰等<sup>[15]</sup>通过实验证明使用环形钩确实会引起海龟的兼捕。

由此可初步认定,圆形钩相对于环形钩而言,可以减少海龟等的兼捕,有效保护濒危物种,是良好的生态保护型钩钩,是今后钩钩发展的趋势,在尺寸相同的条件下,圆形钩的强度虽比环形钩低,但仍能满足使用要求,在延绳钓作业中可放心使用,但在钓大型金枪鱼时需选用大尺寸钩钩。

#### 3.2 展望

钩钩的偏角对渔获的捕获率、伤害和死亡率产生影响<sup>[16-19]</sup>。因此,具有偏角的钩钩的力学性

能研究势在必行。另外,有学者指出大号圆形钩能防止海龟的误捕,但小号圆形钩和传统的环形钩对海龟的钓获率没有实质性区别<sup>[20-21]</sup>。本实验选用的分析对象为 14/0 号圆形钩,属于小号钩,需要进一步对大号(18/0)圆形钩进行研究<sup>[22]</sup>。

也有研究表明,使用无倒刺钩钩可降低渔获的死亡率,并在渔获拉上船时可较快地取出钩钩,也可降低渔获受伤程度甚至死亡<sup>[23-24]</sup>,但钩钩在鱼体拉力等作用下有无可能通过倒刺部位逃脱还未研究,因此,应进一步研究倒刺的利弊。

本研究得到宁波捷胜海洋开发有限公司的大力支持,提供了试验用钩钩及其技术参数,谨致谢意!

#### 参考文献:

- [1] Sun M C. Marine Fishery Technology[M]. Beijing: China Agriculture Press, 2012: 187. [孙满昌. 海洋渔业技术学. 北京: 中国农业出版社, 2012: 187.]
- [2] Curran D, Bigelow K. Effects of circle hooks on pelagic catches in the Hawaii-based tuna longline fishery[J]. Fisheries Research, 2011, 109(2-3): 265-275.
- [3] Song L M, Liu H Y, Ma J C. A review of longline hook and lifting hook material and mechanics[J]. Fishery Modernization, 2014, 41(4): 54-57. [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. 渔业现代化, 2014, 41(4): 54-57.]
- [4] Cooke S, Suski C. Are circle hooks an effective tool for conserving marine and freshwater recreational catch-and-release fisheries? [J]. Aquatic Conservation: Marine Freshwater Ecosystems, 2004, 14(3): 299-326.
- [5] Serafy J E, Cooke S J, Diaz G A, et al. Circle hooks in commercial, recreational, and artisanal fisheries: research status and needs for improved conservation and management[J]. Bulletin of Marine Science, 2012, 88(3): 371-391.
- [6] 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.
- [7] Chen Q L, Zhang X M. Development of steel wire for fish hook[J]. Steel Wire Products, 2006, 32(5):



- 23 - 24. [陈启亮,张鑫明. 鱼钩用钢丝的开发. 金属制品,2006,32(5):23 - 24.]
- [ 8 ] Xu L X. Theory and design of fishing gear [ M ]. Beijing: China Agriculture Press, 2005: 245 - 247. [许柳雄. 渔具理论与设计学. 北京: 中国农业出版社,2005:245 - 247.]
- [ 9 ] Liu Y R. Effect of heat treatment on the microstructure and properties of super martensitic stainless steel [ D ]. Kunming: Kunming University of Science and Technology, 2011. [刘玉荣. 热处理工艺对超级马氏体不锈钢组织和性能的影响. 昆明: 昆明理工大学,2011.]
- [ 10 ] QB/T 2927. 1 - 2007. Fishing Tackle. Part 1: Fishing Hooks [ S ]. Beijing: Standards Press of China, 2007. [ QB/T 2927. 1 - 2007. 钓具. 第一部分: 钓鱼钩. 北京: 中国标准出版社,2008.]
- [ 11 ] Song L M, Chen X J, Xu L X. Biological characteristics of *Thunnus obesus* in longlining ground of the Central Atlantic Ocean [ J ]. Journal of Fisheries of China, 2004, 28 ( 2 ): 216 - 220. [宋利明,陈新军,许柳雄. 大西洋中部金枪鱼延绳钓渔场大眼金枪鱼的生物学特性. 水产学报,2004,28(2):216 - 220.]
- [ 12 ] Swimmer Y, Suter J, Arauz R, *et al.* Sustainable fishing gear; the case of modified circle hooks in a Costa Rican longline fishery [ J ]. Marine Biology, 2011, 158 ( 4 ): 757 - 767.
- [ 13 ] Andrew J R. Do circle hooks reduce the mortality of sea turtles in pelagic longlines ? A review of recent experiments [ J ]. Biological Conservation, 2007, 135 ( 2 ): 155 - 169.
- [ 14 ] Hall M A. A regional program to reduce sea turtle bycatch in the eastern Pacific; Activities and results from the first year in Ecuador, and regional development [ C ]//Inter-Continental Grand, Yokohama, Japan; Proceedings of the International tuna fishers conference on responsible fisheries & third international fishers forum. July, 25 - 29, 2005.
- [ 15 ] Dai X J, Li Y, Xu L X, *et al.* Observation and analysis of sea turtle's mortality longline fishing in high seas of Central and Eastern Pacific Ocean [ J ]. Journal of Fisheries of China, 2009, 33 ( 6 ): 1044 - 1048. [戴小杰,李延,许柳雄. 中东太平洋公海金枪鱼延绳钓误捕海龟的观察和分析. 水产学报, 2009, 33 ( 6 ): 1044 - 1048.]
- [ 16 ] Swimmer Y, Arauz R, Wang J, *et al.* Comparing the effects of offset and non-offset circle hooks on catch rates of fish and sea turtles in a shallow longline fishery [ J ]. Aquatic Conservation: Marine and Freshwater Ecosystems, 2010, 20 ( 4 ): 445 - 451.
- [ 17 ] Stokes L W, Epperly S, McCarthy K. Relationship between hook type and hooking location in sea turtles incidentally captured in the United States Atlantic pelagic longline fishery [ J ]. Bulletin of Marine Science, 2012, 88 ( 3 ): 703 - 718.
- [ 18 ] Stroud E M, Rice P H, O'Connell C P. Effects of SMART TM circle hooks on shark feeding behavior and catch rate [ J ]. Bulletin of Marine Science, 2012, 88 ( 3 ): 791 - 815.
- [ 19 ] Swimmer Y, Wang J, Arauz R, *et al.* Effects of hook offsets on target species catch rates and sea turtle bycatch in a shallow Costa Rican longline fishery [ J ]. Aquatic Conservation: Marine Freshwater Ecosystem, 2010, 10 ( 4 ): 245 - 254.
- [ 20 ] Minami H, Yolota L, Kiyota M. Japanese research activities to reduce incidental mortality of sea turtles in tuna longline fishery [ C ]//Inter-Continental Grand, Yokohama, Japan; Proceedings of the International tuna fishers conference on responsible fisheries & third international fishers forum. July, 25 - 29, 2005.
- [ 21 ] Watson J W, Foster D G, Epperly S, *et al.* Experiments in the Western Atlantic Northeast distant waters to evaluate sea turtle mitigation measures in the pelagic longline fishery [ R ]. Pascagoula: National Marine Fisheries Service, 2004.
- [ 22 ] Xu L X, Song L M, Wang J Q, *et al.* Comparison on catch rate between circle hooks and ring hooks of tuna longline in the tropical high seas of the Indian Ocean [ J ]. Marine Fisheries, 2008, 30 ( 3 ): 227 - 232. [许柳雄,宋利明,王家樵. 金枪鱼延绳钓环形钩和圆形钩钩获率比较. 海洋渔业, 2008, 30 ( 3 ): 227 - 232.]
- [ 23 ] Jeffrey A S, Aaron D S, Steven J C, *et al.* The influence of hook size, type, and location on hook retention and survival of angled bonefish [ J ]. Fisheries Research, 2012, 113 ( 1 ): 147 - 152.
- [ 24 ] Andraka S, Mug M, Hall M, *et al.* Circle hooks: Developing better fishing practices in the artisanal longline fisheries of the Eastern Pacific Ocean [ J ]. Biological Conservation, 2013, 160 ( 4 ): 214 - 224.

## Mechanical properties of tuna longline hook based on finite element analysis method

MA Junchi<sup>1</sup>, YUAN Junting<sup>1</sup>, SONG Liming<sup>2,3,4,5\*</sup>

(1. College of Engineering Science and Technology, Shanghai Ocean University, Shanghai 201306, China;

2. College of Marine Sciences, Shanghai Ocean University, Shanghai 201306, China;

3. National Distant-water Fisheries Engineering Research Center, Shanghai Ocean University, Shanghai 201306, China;

4. The Key Laboratory of Sustainable Exploitation of Oceanic Fisheries Resources, Shanghai Ocean University, Ministry of Education, Shanghai 201306, China;

5. Collaboration Innovation Center for National Distant-water Fisheries, Shanghai Ocean University, Shanghai 201306, China)

**Abstract:** The stress, strain and deformation after the hook in the stress play a decisive role on the mechanical properties and structural stability of the hook. The pros and cons of the mechanical properties of the hook directly affect the capture effectiveness of the target species. It is beneficial to improving the hook design and material selection to understand the mechanical properties (eg. tension and deformation) of tuna longline hook. There are some advantages for the circle hooks, such as reducing the sea turtle by catch rate, high survival rate after capture release, low escaping rate, etc. There is a trend that circle hook replaces the ring hook and J hook. The deformation or fracture of hook will make longline fishing invalid. Therefore, the hook should have enough stiffness and strength when the hook is designed and the material is determined. Mechanical analyses are carried out on two kinds of typical hooks (ring hook and circle hook) using finite element analysis method (FEM) by ANSYS. The distribution of equivalent stress, strain and deformation of hook are obtained, and the possible failure condition and the failure type are also analyzed. Intensity examination and optimization design are made on hook structure based on material mechanics theory, compare with hook's data obtained in the tensile test. Results showed: (1) With the same specifications, ring hook's tensile strength is higher than that of circle hook by 15.80% - 29.40%, and the max. deformation rate in X and Y axis of ring hook is smaller than that of circle hook by 3.00% and 0.21% respectively; (2) Hook's main stress is undertaken by the bend of the hook (83.00% - 86.00%), and there is a stress concentration in the hole of hook eye; (3) Flattening the bends surface (flattening rate is 15%), increasing the hook circular arc of the bending curvature appropriately (the radius increased from 14 mm to 16 mm), connection of hook eye and shank added with arc transition can avoid stress concentration and enhance the strength of the hook by 4.60% - 10.80%. This study suggests that (1) Circle hook is the eco-friendly hook type; (2) Its tensile strength meets the requirement of the fishing; and (3) It can be used in the longlining.

**Key words:** longline; hook; mechanical properties; structure optimization; FEM

**Corresponding author:** SONG Liming. E-mail: lmsong@shou.edu.cn

**Funding projects:** National Engineering Research Center for Oceanic Fisheries (A-0209-13-0505-4); National High Technology Research and Development Program of China (2012AA092302); Shanghai Municipal Education Commission Innovation Project (12ZZ168); Specialized Research Fund for the Doctoral Program of Higher Education (20113104110004)