

细长状海蜇丝自动切割刀具设计与分析

Design and analysis of automatic cutting blade for slender jellyfish silk

冯怡然^{1,2}陶学恒¹王学俊¹芦金石¹李应柱²FENG Yi-ran^{1,2} TAO Xue-heng¹ WANG Xue-jun¹ LU Jin-shi¹ LEE Eung-joo²

(1. 大连工业大学辽宁省海洋食品加工技术装备重点实验室, 辽宁 大连 116034; 2. 东明大学, 韩国 釜山 485201)

(1. Key Laboratory for Seafood Processing Technology and Equipment, Dalian Polytechnic University, Dalian, Liaoning 116034, China; 2. Tongmyong University, Busan 485201, Korea)

摘要:通过分析自动切割机的结构组成与工作原理,采用 Frenet-serret 标架公式结合海蜇皮的外形对刀刃线的曲率和挠率进行了数值模拟,得到刀刃轨迹为空间非等距螺旋线;结合实际工作环境,选用热处理后的 440C 不锈钢作为刀具材料,设计了两款碗形海蜇的专用切丝刀具;分别对两款刀具进行力学性能分析,得到了凸型刀具的应力值仅为凹型刀具的 53.4%;在相同的条件下对凹、凸两种切丝刀具进行磨损分析,得出凹型刀具磨损量较凸型刀具高出一倍;经实验验证,凸型刀具的可靠性、稳定性和切削效果较好。通过综合分析,凸型刀具作为细长状海蜇丝的自动切割刀具,能够满足碗形海蜇批量切割加工的需求。

关键词:碗形海蜇;细长丝;冲压式;螺旋线刀具;数值模拟;实验验证

Abstract: To satisfy the demand for batch cutting and processing of bowl shaped jellyfish, a slender jellyfish cutting automatic cutting blade was designed for bowl shaped jellyfish. The curvature and deflection of the blade were numerically simulated using the Frenet-serret frame formula combined with the shape of the jellyfish skin, and the blade trajectory was obtained as a spatially non-isometric spiral. Two special cutting blades for bowl shaped jellyfish were designed by using heat-treated 440C stainless steel as the material for the blades, taking into account the actual working environment. The mechanical properties of the two blades were analyzed and the stress value of the convex blade was only 53.4% of that of the concave blade; the wear analysis of both concave and convex cutting blades was carried out under the

same conditions and it was concluded that the wear of the concave blade was twice as large as that of the convex blade; experiments have proven the reliability, stability and better cutting results of convex blade. Through comprehensive analysis, the convex blade is used as an automatic cutting blade for slender jellyfish filaments and is able to satisfy the needs of batch cutting and processing of bowl shaped jellyfish.

Keywords: bowl jellyfish; fine filaments; pressed; spiral tools; numerical simulation; experimental verification

海蜇的营养极为丰富,是六大抗癌食品之一^[1],具有很高的保健和药用功能^[2]。目前百姓消费的海蜇主要是宽度为 6~8 mm,长度 200 mm 左右的细长状海蜇丝,传统的海蜇丝状切割依靠人工完成,产量低、成品率不稳定、很难达到食品卫生标准。近年来随着海蜇丝消费量的大幅增加^[3],传统的加工方式已不能满足其生产需要,急需寻求高效、连续、自动化的海蜇切丝加工方式。

目前海蜇丝加工很难实现连续切丝的效果,并且仅能单一地针对平面海蜇皮切丝加工。王德强等^[4]以海蜇皮为研究对象,运用质构仪进行了 TPA 和剪切力测试,分析了不同取样半径对硬度、弹性和剪切力的影响,得到了海蜇皮的切割特性,该剪切方式仅适用于平面海蜇皮的切割;韩传龙等^[5]对海蜇切割系统进行了运动学仿真,得到了海蜇切丝过程中剪切力变化曲线与应力、应变及动态特性变化,验证了切割系统的可靠性,但应用性还尚未验证。

试验在前期研究^[5]的基础上,拟利用 Solidworks 软件设计出两种针对碗形海蜇细长丝切割刀具,通过数值模拟分析刀具在切丝过程中的变化趋势、应力分布及磨损情况,并通过实验验证其使用效果,以期对细长状海蜇丝刀具的设计及参数选取提供参考和依据。

1 细长状海蜇丝切割刀具设计

1.1 细长状海蜇丝自动切割机的结构与工作原理

细长状海蜇丝自动切割机^[6]结构见图 1。其原理为

基金项目:海洋公益性行业科研专项经费资助(编号:201505029);辽宁省自然科学基金(编号:2020-MS-273)

作者简介:冯怡然,男,大连工业大学实验师,博士。

通信作者:陶学恒(1963—),男,大连工业大学教授,博士生导师,博士。E-mail: xhtao@dlpu.edu.cn

收稿日期:2021-02-03

由液压油箱 5 提供动力驱动液压缸 3 活塞做往复动力装置运动,带动切割装置 4 上下往复运动完成对碗形海蜇的细长丝切割,切割装置 4 向上运动时将切完的细长丝通过螺旋剔料盘 9 剔除退料至盛料盘 6 内。切割装置 4 上安装螺旋刀具 11 和螺旋剔料盘 9,一次冲压螺旋切割即可完成整片海蜇切丝—退料作业,与传统海蜇剪丝作业方法相比效率提高显著。

1.2 不同形状刀具的结构设计

1.2.1 切割装置机构原理 切割刀具是影响海蜇丝切割质量的关键因素^[7]。切割装置结构见图 2,刀具和固定板通过定位销固定连接,弹簧安装在固定板和螺旋剔料盘之间且沿着垂直方向收缩。油缸活塞垂直向下推动切割装置。当螺旋剔料盘与海蜇接触时,位置传感器可实现精确定位,螺旋剔料盘停止移动,液压缸驱动刀具切割海

蜇,切割完成后,刀具缩回,为了防止海蜇与刀具之间的黏连,采用弹簧带动螺旋剔料盘向下移动,从而将海蜇丝从刀具中剔出放入托盘。

1.2.2 刀具的数学模型 鉴于研究对象为碗形海蜇,因此将切割装置的刀具也设计为碗形。

为实现海蜇丝的整齐、均匀、连续和高效切割,将刀具设计成空间非等距螺旋线形。这样既能保证切割的均匀性、连续性,又能保证产量,最大限度地利用加工材料,避免材料的浪费。试验用碗形海蜇的半径为 152 mm,厚度为 3 mm,螺旋刀刃线在 XOY 平面上的投影是等距的螺旋线,刀具尺寸和技术参数应根据轮廓的曲率和挠率来确定,主要取决于细长丝状海蜇的长度和宽度。在刀刃线轮廓设计过程中,采用 Frenet-serret 标架公式对刀刃线的曲率和挠率进行数值模拟^[8]。模型的相关方程表示如下:

(1) 平面方程:

$$\vec{e}(\varphi) = \cos\varphi \cdot \vec{i} + \sin\varphi \cdot \vec{j}, \quad (1)$$

$$\vec{e}_1(\varphi) = -\sin\varphi \cdot \vec{i} + \cos\varphi \cdot \vec{j}, \quad (2)$$

$$\vec{e}_2(\varphi) = -\cos\varphi \cdot \vec{i} - \sin\varphi \cdot \vec{j}, \quad (3)$$

式中:

φ ——极角,°;

$\vec{e}(\varphi)$ ——平面坐标的任意向量;

$\vec{e}_1(\varphi)$ ——X 坐标的任意向量;

$\vec{e}_2(\varphi)$ ——Y 坐标的任意向量;

$\vec{i}, \vec{j}$ ——正交向量。

(2) 空间单位向量方程:

$$\vec{\gamma} = H\varphi \cdot \vec{e}(\varphi) + (R - R\cos\theta) \cdot \vec{k}, \quad (4)$$

$$\vec{r}'(\varphi) = H \vec{e}(\varphi) + H\varphi \cdot \vec{e}_1(\varphi) + \frac{H^2\varphi}{\sqrt{R^2 - H^2\varphi^2}} \cdot \vec{k}, \quad (5)$$

式中:

$\vec{\gamma}$ ——空间坐标的任意向量;

$\vec{r}'$ ——坐标原点到球面任意一点的矢量;

$\vec{k}$ ——Z 轴单位向量;

H ——平面等距螺旋线间距,mm;

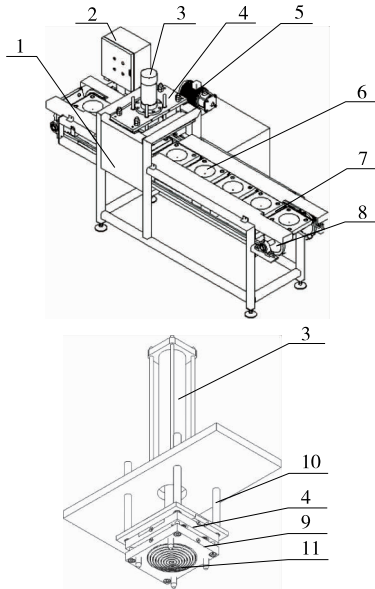
R ——球半径,mm;

θ ——矢量 $\vec{r}'$ 与起始点在 XOY 面投影点的夹角,°。

为了直观地体现出刀具螺旋刀刃线的轮廓,使用 Matlab 9.0 进行计算,将表 1 中的海蜇尺寸参数代入式(4)和式(5)中,得到刀刃线的数学模型如图 3 所示。

(3) Frenet-serret 标架方程:

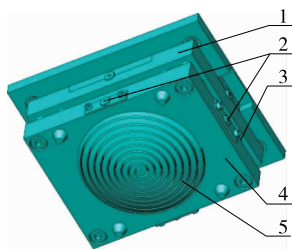
$$\vec{\alpha} = \frac{\vec{\gamma}'}{|\vec{\gamma}'|}, \quad (6)$$



1. 机架 2. 控制柜 3. 液压缸 4. 切割装置 5. 液压油箱 6. 盛料盘 7. 送料装置 8. 盛料盘链轮 9. 螺旋剔料盘 10. 刀具导向柱 11. 螺旋线刀具

图 1 碗形海蜇丝自动切割机的结构图

Figure 1 Automatic bowl jellyfish cutting machine construction diagram



1. 固定板 2. 销孔 3. 弹簧 4. 螺旋剔料盘 5. 刀具

图 2 切割装置的结构图

Figure 2 Construction diagram of the cutting device

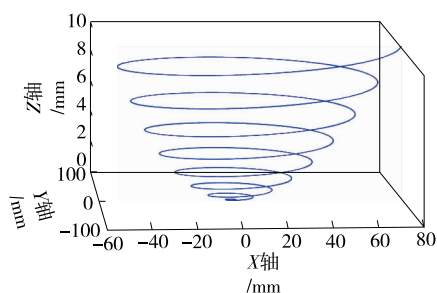


图 3 刀刃的空间轨迹

Figure 3 The space track of blade

$$\vec{\beta} = \frac{\vec{\gamma}''}{|\vec{\gamma}''|}, \quad (7)$$

$$\vec{\gamma} = \vec{\alpha} \times \vec{\beta}, \quad (8)$$

$$\begin{cases} \frac{d\vec{\alpha}}{ds} = K \vec{\beta} \\ \frac{d\vec{\beta}}{ds} = -K \vec{\alpha} + W \vec{\gamma}, \\ \frac{d\vec{\gamma}}{ds} = -W \vec{\beta} \end{cases} \quad (9)$$

$$\begin{bmatrix} 0 & K & 0 \\ -K & 0 & W \\ 0 & -W & 0 \end{bmatrix}, \quad (10)$$

式中:

$\vec{\alpha}$ ——空间坐标的任意向量;

$\vec{\beta}$ ——空间坐标的任意向量;

K ——曲率;

W ——挠率。

方程中,曲率 K 和挠率 W 的计算如下:

$$H\varphi = R \cdot \sin\varphi, \quad (11)$$

$$W = \vec{\beta} \cdot \vec{\gamma}', \quad (12)$$

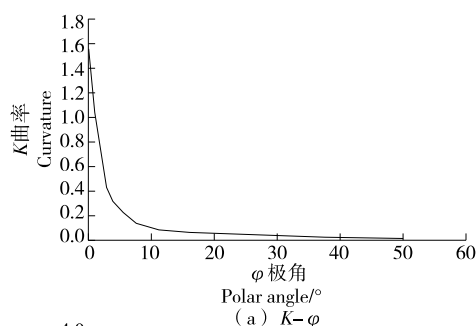
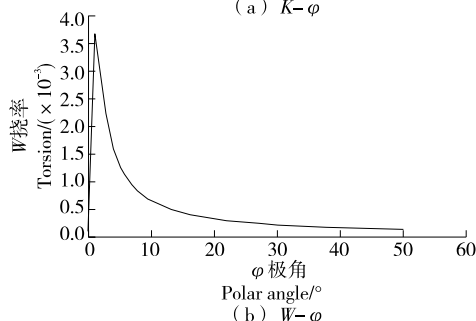
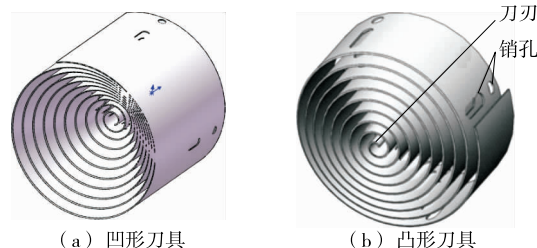
$$K = \vec{\alpha}' \cdot \vec{\beta}, \quad (13)$$

式中:

H ——平面等距螺旋线间距,mm。

使用 Matlab 9.0 来模拟曲率和挠率的大小随刀具的刀刃线极角 φ 的变化规律。如图 4 所示,曲率的变化与极角变化呈反比,该变化符合刀具的结构要求。在极角为 0° 时,曲率达到最大值,为 1.573;在极角为 60° 时,挠率达到最大值,为 3.678×10^{-3} 。此时刀具刀刃线弯曲和扭曲程度最大,由此可知,当刀具在极角为 0° 和 60° 时破坏程度最严重。

1.2.3 刀具的结构设计 基于刀具的数学模型以及海蜇朝向,设计了凹形和凸形两种形状的刀具,如图 5 所示。这两种形状的刀具刀刃线相同,由于加工工艺不同,凸形刀具的高度为 83 mm,凹形刀具的高度为 131.8 mm。由

(a) $K-\varphi$ (b) $W-\varphi$ 图 4 $K-\varphi$ & $W-\varphi$ 曲线图Figure 4 $K-\varphi$ & $W-\varphi$ 

(a) 凹形刀具

(b) 凸形刀具

图 5 刀具的结构图

Figure 5 Figure of the structure of the blade

于海蜇丝的切割是在腐蚀性较强的环境中进行的,所以在刀具材料的选用时要充分考虑其耐腐蚀性和一定的强度。440C 是一种马氏体不锈钢,是最硬的不锈钢之一,主要用于制造在腐蚀性环境和非润滑性、强氧化性环境中工作的零件。440C 不锈钢经淬火处理后,表面硬度可达 HRC60,同时保证了耐蚀性。考虑到 440C 不锈钢具有良好的机械性能和耐腐蚀性,将其用作细长状海蜇丝切割刀具的材料。

2 分析与仿真

2.1 不同形状刀具的力学性能分析

采用质构仪对碗形海蜇进行剪切力测试^[9-11],得出总剪切力为 33.10 N,刀刃线总长为 2 729 mm,厚度为 1 819 mm,得到刀刃面积为 $0.027\ 29\ \text{m}^2$,经计算求得加载在刀刃面的压力为 1 213 Pa。使用 Ansys Workbench 15.0 软件对凹形和凸形两种刀具进行静力学分析和模态分析。

2.1.1 静力学分析 为了缩短计算时间,对整个计算区域进行了简化。刀具主体采用无四面体网格啮合法划分

网格,该方法适应性强,对复杂几何形状填充性好。图 6 为两种刀具的网格模型。凹形刀具模型中节点数为 187 953,单元数为 92 189;凸形刀具模型中节点数为 216 686,单元数为 106 927。对于刀具而言,为加快计算速度,在满足计算精度的前提下,宜采用相对稀疏的网格且网格尺寸控制在 4 mm 左右。

将刀具与固定板的连接面进行约束^[12],定义材料属性,如表 1 所示。由于刀具在实际切割作业中会受到环境的影响,因此将分析中压力设定为工作压力的 3 倍,以满足冲击系数,从而保证刀具的安全可靠。采用 Ansys Workbench 15.0 对刀具在最大载荷(3 639 Pa)下的应力和变形进行分析,结果如图 7 和图 8 所示。

分析结果为两种刀具的最大应力和位移值,证实两种刀具强度设计符合材料许用应力要求,因此,在正常工作情况下,刀具可靠且稳定。最大应力与变形处均为刀具刀尾端部位(见图 7 和图 8)。因此,作业时无论刀具受力如何,刃口表面都会受到离中心点由近到远的变形和位移的影响。由表 2 可知:刀具切割时,凹形刀具刀身承受的应变量相对较大,而凸形刀具的应变量较小,稳定性更好。

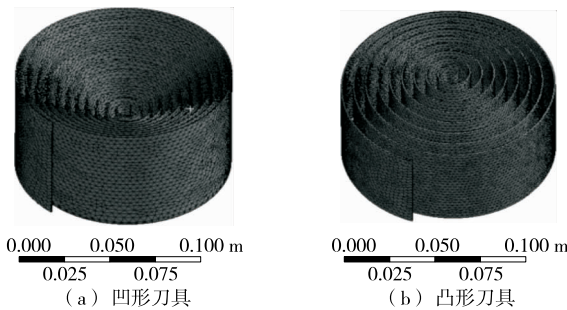


图 6 刀具的网格划分

Figure 6 Meshing of blades

表 1 刀具的材料属性

Table 1 Material properties of blades

弹性模量/GPa	泊松比	密度/(kg · m ⁻³)	屈服强度/GPa	切线模量/GPa
1.3	0.38	1 300	0.01	0.012

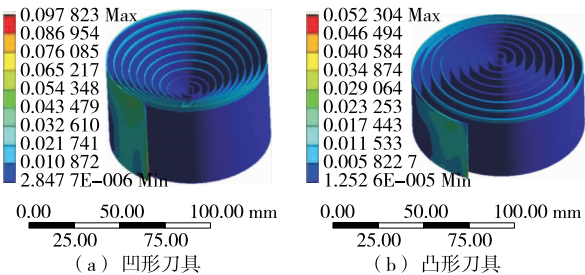


图 7 应力云图

Figure 7 Stress cloud map

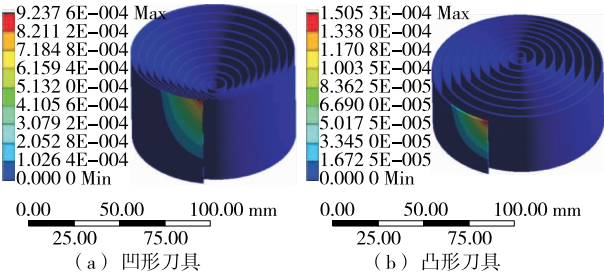


图 8 位移云图

Figure 8 Displacement cloud map

表 2 两种刀具的静力学分析结果对比

Table 2 Comparison of the results of the hydrostatic analysis of the two blades

名称	位移最大值/mm	应力最大值/MPa
凹形刀具	9.127 6E-004	9.782 3E-002
凸形刀具	1.505 3E-004	5.230 4E-002

2.1.2 模态分析 刀具的固有频率与外界激励频率包括震动、液压缸的工作频率等十分接近时,会产生共振现象,带来极大的潜在危险。试验借助 ANSYS 模态分析法对刀具结构进行优化设计。

定义参数公式:无阻尼模态分析求解方程为:

$$[M]\{x''\} + [K]\{x\} = \{0\}, \quad (14)$$

式中:

$[M]$ ——质量矩阵;

$[K]$ ——刚度矩阵;

$\{x\}$ ——位移特征向量;

$\{x''\}$ ——加速度矢量。

结构的自由振动为简谐振动,即位移是正弦函数 $x = x \sin(\omega x)$,代入式(14)得到:

$$([K] - \omega^2[M])\{X\} = \{0\}, \quad (15)$$

式中:

$\{X\}$ ——自振频率 f 对应的振型;

f ——自振频率;

ω ——自振圆频率。

式(15)是经典的特征值问题,函数中的特征值为 ω_i^2 ,

ω_i 为自振圆频率,自振频率 $f = \frac{\omega_i}{2\pi}$,特征值 ω_i 对应的特征

向量 $\{X\}$ 为自振频率 $f = \frac{\omega_i}{2\pi}$ 对应的振型。模态分析定义的材料属性如表 1 所示。

凹形和凸形刀具的模态分析 1~5 阶振频如表 3 和表 4 所示,在固定约束条件下,凹形刀具的共振频率最大为 14 777 Hz,其值从刀具外圈向中心递减,固定位置共振频率为 0 Hz,为刀具共振频率的最小值,前 5 阶振型图如图 9 所示;凸形刀具的共振频率最大为 24 083 Hz,其值从刀具外圈向中心递减,固定位置共振频率为 0 Hz,为

刀具共振频率的最小值,前 5 阶振型图如图 10 所示。

由表 3 和表 4 可知,凸形刀具频率最大值为 24 083 Hz,因实际工作时的液压缸为低频工作,所以,凸形刀具作业过程中具有更好的稳定性。刀具在液压缸的推动下快速切割碗形海蜇频率达到最大数值。

2.2 刀具磨损分析

为了准确预判和分析海蜇切丝刀具的磨损情况^[13-14],采用黏着磨损分析和质量磨损量法对凹、凸两种切丝刀具进行磨损分析^[15]。

2.2.1 黏着磨损分析 刀具在切丝作业时,切丝刀具承受载荷,再加上盛料盘与切丝刀具直接接触,容易发生黏着磨损,根据 Archard 提出的黏着磨损计算模型推导出磨损公式:

$$\frac{Q}{L} = \frac{K}{H} F_N,$$
 (16)

式中:

Q——刀具磨损量,mg;

L——盛料盘与切丝刀具的滑动距离,m;

K——黏着磨损系数;

H——刀具材料的硬度,HR;

F_N——刀具所受垂向载荷,N。

影响刀具磨损的主要原因是机身对刀具的垂向载荷、刀具的硬度以及盛料盘与切丝刀具相对滑动距离。以刀具所受垂向载荷为例,对不同刀具的磨损率进行分析,如图 11 所示。

由图 11 可知,凸形刀具的磨损率相关较低。这可能是凹形、凸形刀具均采用 440C 作为刀具材料,由于其结构设计原因,两种刀具的总高不同,而凸形刀具的相对滑

动距离短,有效地降低了刀具的磨损。

2.2.2 质量磨损量 利用称重来测定磨损量^[16],质量磨损量按式(17)计算:

$$\Delta W = W_b - W_0,$$
 (17)

式中:

ΔW——质量磨损量,g;

W_b——磨损前质量,g;

W₀——磨损后质量,g。

表 3 凹形刀具的前 5 阶振频

Table 3 First 5 orders of vibrational frequency for concave blade

阶数	频率/Hz	阶跃	子步数	累积
1	14 777.0	1	1	1
2	6 744.1	1	2	2
3	4 523.4	1	3	3
4	4 568.4	1	4	4
5	3 911.7	1	5	5

表 4 凸形刀具的前 5 阶振频

Table 4 First 5 orders of vibrational frequency for convex blade

阶数	频率/Hz	阶跃	子步数	累积
1	24 083.0	1	1	1
2	16 871.0	1	2	2
3	8 652.4	1	3	3
4	5 357.3	1	4	4
5	5 285.9	1	5	5

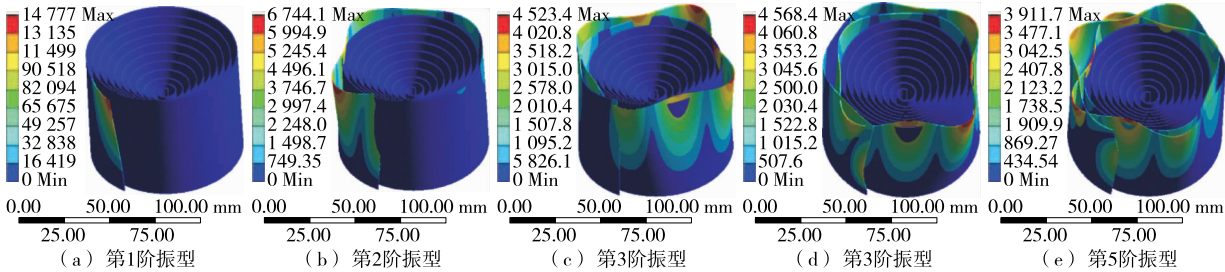


图 9 凹形刀具的前 5 阶振频图

Figure 9 Plot of the first 5 orders of vibration frequency of a concave blade

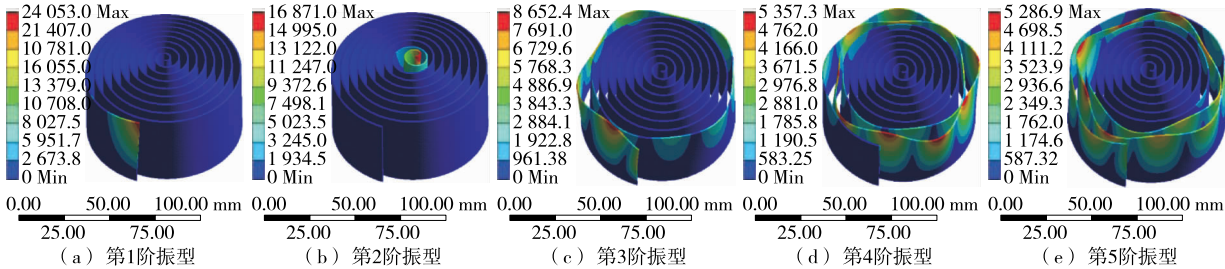


图 10 凸形刀具的前 5 阶振频图

Figure 10 Plot of the first 5 orders of vibration frequency of a convex blade

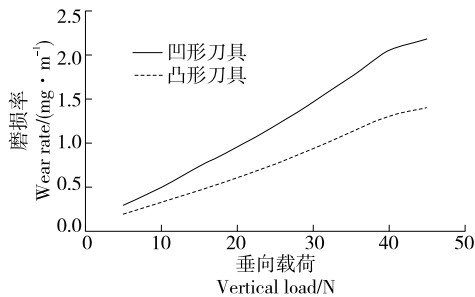


图 11 刀具的磨损率

Figure 11 Blades wear rate

由表 5 可知,凹形刀具切丝后质量变化较大,可能是由于凹形刀具整体较高,作业时悬臂较长^[17],滑动距离较长,所以造成磨损相对严重;凸形刀具作业时,磨损较小。因此,选择凸形刀具作为海蜇长丝的切割刀具。

2.3 凸形刀具的实验验证

经过 11 个月共 438 批次,每批次 294 kg 的试验,凸形刀具工作良好,未出现夹刀、断切等故障,实现了对碗状海蜇皮的连续等宽切割,满足了海蜇丝的等宽、长度和连续性的要求。而且材料利用率和优质品率都有了大幅的提高(见表 6)。

表 5 刀具的磨损量结果对比

Table 5 Comparison of blades wear results ($n=10$)

刀具	磨损量/g
凹形刀具	1.09 ± 0.34
凸形刀具	0.55 ± 0.28

表 6 海蜇丝切割刀具与传统加工方式对比

Table 6 Cutting blade for jellyfish silk versus conventional machining method

参数	单位	海蜇丝切割刀具	传统加工
生产量	kg/h	73.5	8.1
操作人数	人	2	8
优质品率	%	88.72	47.12
材料利用率	%	95.84	78.79
废品率	%	4.16	21.21

3 结论

利用 Solidworks 软件设计出两种针对碗形海蜇细长丝切割刀具,通过数值模拟分析刀具在切丝过程中的变化趋势、应力分布及磨损情况,并通过实验验证其使用效果。结果表明,凸形刀具的力学性能优于凹形刀具,其耐磨性也更好;经过大量的试验得出,凸形刀具的切削效果符合设计要求,适用于细长状海蜇丝的切割。但是目前细长状海蜇切丝刀具仅能同时切割两张碗形海蜇皮,生产效率有待提高,优化刀具结构、改变螺旋剔料盘的工作方式将是后续攻克的技术方向。

参考文献

[1] PALMIERI M G, BARAUSSE A, LUISETTI T, et al. Jellyfish blooms in the northern adriatic sea: Fishermen's perceptions and economic impacts on fisheries [J]. Fisheries Research, 2014, 155: 51-58.

[2] ZHANG Yu-ying, CHAI Yan-ping, QIN Lei, et al. Analysis and evaluation of the nutrient compositions in different tissues of jellyfish[J]. Food Science, 2017, 38(2): 133-138.

[3] ZHANG Xin-dan, ZHANG Xu, SUN Lian-zheng, et al. Analysis of solid-liquid two-phase flow field for shellfish precooking processing machine[J]. International Journal of Mechanical Engineering and Applications. 2017, 5(1): 20-27.

[4] 王德强, 陶学恒, 王明伟, 等. 取样半径对碗形海蜇皮质构和剪切力的影响[J]. 食品研究与开发, 2018, 39(2): 1-5.

[5] 韩传龙, 芦金石, 陶学恒, 等. 新型碗状海蜇螺旋切割系统设计与仿真研究与验证[J]. 食品与机械, 2020, 36(3): 105-108.

[6] 雷晓静, 陶学恒, 冯怡然, 等. 碗状海蜇切丝装置: 201610977195.4[P]. 2017-03-22.

[7] 杨传华, 方宪法, 杨学军, 等. 基于 PLC 的蔬菜钵苗移栽机自动输送装置[J]. 农业机械学报, 2013, 44(增刊 1): 19-23, 18.

[8] 刘涛, 郭再新, 芮执元. 基于 Frenet 标架的涡旋始端型线重构与几何特性分析[J]. 农业机械学报, 2011, 42(2): 197-202.

[9] CHOE Jee-hwan, CHOI Mi-hee, RHEE Min-suk, et al. Estimation of sensory pork loin tenderness using warner-bratzler shear force and texture profile analysis measurements[J]. Asian-Australasian Journal of Animal Sciences, 2016, 29(7): 1 029-1 036.

[10] RAHMANA Mohammad Shafiur, AL-MAHROUQIA Abdullah Issa. Instrumental texture profile analysis of gelatin gel extracted from grouper skin and commercial (bovine and porcine) gelatin gels[J]. International Journal of Food Sciences and Nutrition, 2009, 60(S7): 229-242.

[11] 马璐璐, 李岩, 温成荣, 等. 脱盐过程中盐渍海蜇质构及组织结构的变化[J]. 中国食品学报, 2016, 16(5): 61-67.

[12] SAHIN Abdurrahman, BAYRAKTAR Alemdar. ModalCAD-interactive dynamic characteristic identification software for experimental and operational modal analysis of engineering structures[J]. Journal of Testing and Evaluation: A Multidisciplinary Forum for Applied Sciences and Engineering, 2010, 38(6): 738-758.

[13] 欧阳玉平, 孙哈, 洪添胜, 等. 果园运输机钢丝绳损伤试验平台设计与试验[J]. 农业机械学报, 2020, 51(7): 118-128.

[14] 李海涛, 熊亚, 陈龙健, 等. 打结器割绳脱扣机构磨损分析与改进设计[J]. 农业机械学报, 2015, 46(3): 118-124.

[15] 张自超, 王福军, 陈鑫, 等. 基于改进欧拉算法的双吸离心泵泥沙磨损特性研究 [J]. 农业机械学报, 2017, 48(3): 124-133, 147.

[16] 黄先北, 杨硕, 刘竹青, 等. 基于颗粒轨道模型的离心泵叶轮泥沙磨损数值预测[J]. 农业机械学报, 2016, 47(8): 35-41.

[17] 白茂东, 杨继新, 王学俊, 等. 平结式双条海带打结新方法[J]. 大连工业大学学报, 2017, 36(4): 300-303.