

鳝鱼自动剖切机设计与试验

Design and processing test of eel automatic filleting machine

刘明勇

欧阳周寰

韩新光

向雪

朱林

LIU Mingyong OUYANG Zhouhuan HAN Xinguang XIANG Xue ZHU Lin

(湖北工业大学湖北省农机装备智能化工程技术研究中心, 湖北 武汉 430068)

(Hubei University of Technology, Hubei Engineering Technology Research Center for Intelligent Agricultural Machinery, Wuhan, Hubei 430068, China)

摘要:目的:设计一款专门用于剖杀细长且表面光滑的鱼类剖切机构。方法:以体表黏滑的鳝鱼为研究对象,开展夹持与剖切作业机理分析。以剖切质量和剖切时间为试验指标,探究夹轮转速、剖刀转速、夹轮表面几何形状等主要参数对剖切质量和剖切时间的影响规律。结果:影响剖切质量的主要因素为刀片转速和夹持轮限位高度,影响剖切时间的最主要因素为夹轮转速。当夹轮限位高度为 5 mm、刀片转速为 1 350 r/min、夹轮转速为 167 r/min 时,可获得较高的剖切质量评分与剖切时间。结论:使用夹持轮可以有效输送鳝鱼,通过调配夹持轮转速、刀片转速和限位高度可以实现高效高速剖腹。

关键词:鳝鱼;剖切加工;剖切质量;剖切时间;刀片转速

Abstract: **Objective:** A special cutting mechanism for slicing elongated fish with smooth surface was designed. **Methods:** Taking the slimy eel as the research object, the mechanism of clamping and cutting operation was analyzed. Taking cutting quality and cutting time as test indexes, the influence of main parameters such as clamping wheel speed, cutting tool speed and clamping wheel surface geometry on cutting quality and cutting time were investigated. **Results:** The main factors affecting cutting quality were blade speed and clamping wheel limit height, and the most important factors affecting cutting time were clamping wheel speed. When the clamping wheel limit height was 5 mm, the blade speed was 1 350 r/min, and the clamping wheel speed was 167 r/min, the higher cutting quality score and cutting time could be obtained. **Conclusion:** The eel can be effectively transported by using the gripper wheel, and efficient

and high-speed laparotomy can be achieved by adjusting the speed of the gripper wheel, the speed of the blade and the height of the limit.

Keywords: eel; sectioning processing; sectioning quality; sectioning time; blade speed

据调查^[1],2021 年中国鳝鱼养殖产量达 31 万 t。目前,鳝鱼主要以人工宰杀为主,劳动强度高、工效低、安全性差。现有鳝鱼剖切机构的研究成果主要为专利。林天祥^[2]发明的鳝鱼宰杀器实现了自适应鳝鱼大小的功能,但仍停留在手工宰杀阶段。夏明友^[3]设计的鳝鱼剖切装置用一组自适应夹持块固定鳝鱼,但缺少输送机构,剖切效率低。别传召^[4]设计的鳝鱼宰杀机设置回旋管道,利用鳝鱼自身重力下滑进入旋转的压鳝槽内完成剖切,其刀片设置固定,剖切过程会产生较大阻力。程娟^[5]发明的简易鳝鱼宰杀装置利用螺旋型刀片旋转固定输送鳝鱼。李平等^[6]研制的黄鳝初加工机台实现了剖切过程自动化,提出鳝鱼宰杀需要有专门的输送和限位装置。

在鱼类加工研究方面,国内外学者作出了许多有益探索。刘静等^[7]得出了鱼体定位距离和刀具结构对鱼体头部切除的影响规律;夏伟伟等^[8]设计了淡水鱼往复式去脏装置并获得了较优的工作参数;黄鹏飞等^[9]设计了带式夹送淡水鱼剖鱼机,并确定了针对白鲢鱼的最优皮带间距高度取值范围;谭鹤群等^[10]设计的链式剖鱼机使用两瓣弹性夹片夹持鱼体,具有较好的喂入效果;王小琴^[11]设计的高压冲洗型剖鱼机使用多对上下对称的仿形锥运输鱼体。国外的鱼类加工平台多为片机与输送机^[12],且较依赖人工。Ali Muhammed 等^[13]设计了一种用于鱼类加工的小型鱼肉骨分离器,使用尼龙带输送鱼体。该机构针对的对象为生鱼片而非活鱼,活鱼在剖切过程会挣扎导致剖切质量降低。Yamamoto^[14]设计了一款通用的肉类切片机,通过刀架循环上下移动和置肉平台向前输送

基金项目:现代制造质量工程湖北省重点实验室开放基金(编号:KFJJ-2022013);省级农机购置与应用补贴基金(编号:HBSNYT202221)

作者简介:刘明勇(1985—),男,湖北工业大学副教授,硕士生导师,博士。E-mail:lmv8508@hbut.edu.cn

收稿日期:2023-06-24 **改回日期:**2023-11-22

将肉切为薄片。国内相关水产宰杀设计^[15-16]夹持方式对于体表黏滑的鳙鱼不可靠,且鳙鱼头部受到刀片剖切时身体会剧烈摆动导致杀偏甚至无法宰杀。

研究拟设计一款专用于剖杀细长且表面光滑的鱼类剖切机构,建立鱼体与夹持剖切机构的力学模型,得出影响鱼体剖切质量和剖切时间的关键因素。以剖切质量和剖切时间为指标,进行正交试验工艺优化,以期为鳙鱼加工设备研发提供依据。

1 自动剖切机结构设计与工作原理

1.1 机器结构设计

为降低机械振动,确保可靠性并降低成本,采用单电机驱动。设计传动组将电机动力传递到刀与夹轮上。相关研究^[17]表明,刀片采用圆刀、逆向转动对鱼体剖切的效果较好。刀片与夹轮转向不同,故采用锥齿轮实现转向。传动机构主体由电机、轴、轴承、带、齿轮副组成,电机通过同步带带动刀旋转;同时,电机动力通过直齿轮副和锥齿轮副带动夹轮旋转。滑道设置限位块,防止剖切时鱼体受激过度摆动无法剖杀。

为保证传动组的可靠性和减小整机体积,采用带传动连接电机轴与刀轴。采用直齿轮副和两对锥齿轮副连接电机轴与夹轮,设计的传动简图如图 1 所示。

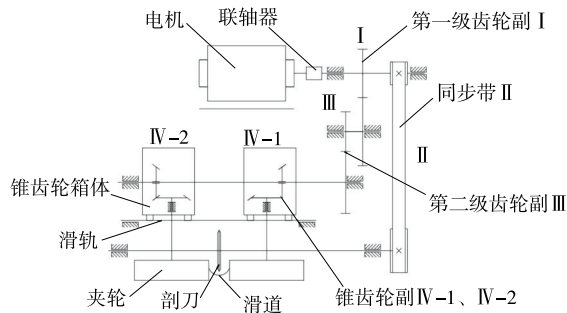


图 1 鳝鳅自动宰杀机简图

Figure 1 Diagram of automatic eel killing machine

试验时,启动电机并放下集料箱,鱼体滑入集料箱狭口进入滑道被夹轮捕获向前输送。滑道中间布置一对夹轮 8。电机启动后,转矩由电机通过直齿轮副 I 和 III、锥齿轮副 IV 传递到夹轮 8 上带动夹轮旋转;同时,电机动力通过同步带 II 传递到剖刀 7 上。夹轮旋转定向输送鱼体,经过刀片完成剖杀。两锥齿轮箱体 10 之间设置弹性件,可在滑轨 9 上左右滑移,可自适应不均匀鱼体和不同大小的鳊鱼。

1.2 剖切机关键参数设计

参考已有的鱼类剖切除杂装置^[18],剖刀转速范围为 800~1 100 r/min,刀轴设于滑道上方用于剖背。选取电机型号 80-ST-M02430LBX,转速 0~3 000 r/min,额定功

率 0.75 kW。实际观察电机转速超过 900 r/min 时整机振动较明显,设置电机初始速度为 450 r/min。刀外圆与夹轮中心的前后距离为 3 cm。根据文献[19],鳙鱼触觉神经反射时间约为 0.05 s。为保证夹持可靠性,预设置夹轮线速度 v_1 为 0.6 m/s。考虑宰杀机器整体体积,设计夹轮半径 R 为 45 mm,则夹轮转速 $n_1 = v_1/R = 127$ r/min。

由电机转速和夹轮转速得夹轮传动组总传动比为
 $i_1 = 3.6$ 。根据质量最小原则确定各级传动比。

其中各齿轮质量和为

$$w = \pi \rho b \left[\left(\frac{D_1}{2} \right)^2 + \left(\frac{D_2}{2} \right)^2 + \left(\frac{D_3}{2} \right)^2 + \left(\frac{D_4}{2} \right)^2 \right]. \quad (1)$$

$D_1 = D_3, i_1 = i_2 \times i_3$, 代入式(1)得

$$w = \frac{\pi \rho b}{4} D_1^2 \left(2 + i_2^2 + \frac{i_1^2}{i_2^2} \right), \quad (2)$$

式中:

ρ ——齿轮材料密度, g/mm^3 ;

 w ——齿轮质量和, kg;

b ——齿宽, mm;

$D_1、D_2$ ——齿轮副 I 分度圆直径, mm;

 D_3, D_4 ——齿轮副Ⅲ分度圆直径, mm; i_2 ——齿轮副 I 传动比; i_3 ——齿轮副Ⅲ传动比。

令 $\partial w / \partial i^2 = 0$, 有 $i_2 = \sqrt{i_1} = i_3$ 。

根据 $i_1 = 3.6$ 得第一级齿轮副传动比 $i_2 = 1.9$, 第二级齿轮副传动比 $i_3 = 1.9$ 。通过配齿设置小齿轮齿数为 18, 则其大齿轮齿数为 34, 实际传动比为 $i_1 = \left(\frac{D_2}{D_1}\right)^2 \approx 3.57$ 。

设鱼体输送速度 v_2 等于夹轮线表面速度, 则鱼体向前输送的速度和刀片转速为

$$v_2 = \frac{\pi R n_1}{30}, \quad (3)$$

$$n_2 = \frac{n_3}{i_4}, \quad (4)$$

式中:

 v_2 ——鱼体输送速度, m/s; n_2 ——刀片转速, r/min;

R ——夹轮半径, mm;

 n_3 ——伺服电机转速, r/min; i_4 ——同步带Ⅱ传动比。

根据已知条件,计算剖切机参数如表 1 所示,建立的剖切机模型如图 2 所示。

2 喂入及夹持剖切作业机理

2.1 喂入过程

鱼体在滑道中受重力和自身生物特性影响,下滑经

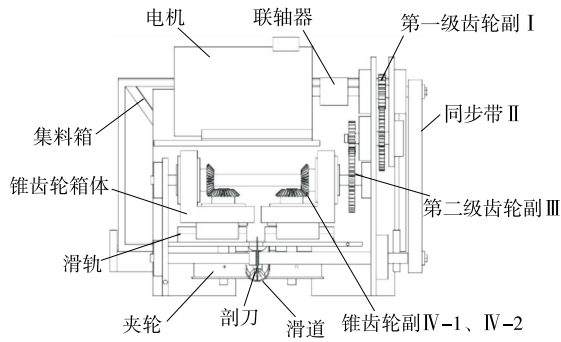


图2 鳝鱼自动宰杀试验平台结构示意图

Figure 2 Structural diagram of eel automatic killing test platform

表1 自动剖切机参数

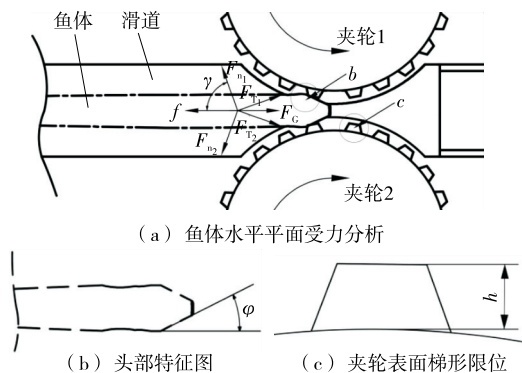
Table 1 Parameter table of automatic killing machine

参数	单位	取值
电机转速	r/min	0~3 000
夹轮直径	mm	90
剖刀直径	mm	70
带轮中心距	mm	255
直齿轮组 I、II 齿数		18, 34
直齿轮组 I、II 模数	mm	2
锥齿轮组 IV-1、IV-2 齿数		20
锥齿轮组 IV-1、IV-2 模数	mm	1.5
长×宽×高	mm ³	320×200×310

过滑道与夹轮接触。此时受自身重力和滑道、夹轮的共同作用,其主要受 1 对夹轮给予的大小相同的切向力 F_{T1} 、 F_{T2} 和法向力 F_{n1} 、 F_{n2} 、滑道的水平向摩擦力 f 和重力沿滑道方向的分力 F_G (图 3)。

根据静力平衡原理可得

$$\begin{cases} f = G(\cos\beta)^2 \times \mu \\ F_{T1} = F_{n1} \times k \\ F_G = G \sin\beta \end{cases} \quad (5)$$



(a) 鱼体水平平面受力分析

(b) 头部特征图

(c) 夹轮表面梯形限位

图3 鱼体喂入过程受力分析

Figure 3 Analysis of horizontal force on a fish

式中:

β ——滑道与水平面夹角,°;

k ——形状参数(与 φ 大小和夹轮限位形状有关);

μ ——鱼体与滑道的摩擦系数。

鳝鱼顺利进入夹轮应满足水平向右方向的合力大于水平向左方向的合力,则

$$F_G + F_{T1} \sin\gamma + F_{T1} \sin\gamma > F_{n1} \cos\gamma + F_{n2} \cos\gamma + f, \quad (6)$$

式中:

γ ——法向力与水平方向夹角,°。

将式(5)代入式(6)得

$$G[\sin\beta - (\cos\beta)^2 \mu] + 2F_{n1}(k \cdot \cos\gamma - \sin\gamma) > 0. \quad (7)$$

由式(7)可知,通过调整夹轮间距,改变夹轮表面形状会改变 k 值大小,从而增大夹轮对鱼的作用力,促使鱼体进入夹轮。同时,增大滑道 β 角,扩大 F_G 值也有利于鱼体向前进入夹轮。

2.2 夹持剖切过程

鳝鱼骨质在鱼头部分分布较多,剖切时头部会产生较大阻力,因此在剖切过程中只考虑头部接触剖刀后的受力情况。试验发现,若头部剖切成功则鱼体能顺利完成剖切。头部接触剖刀后受力分析如图 4 所示,鱼体主要受重力 G 、夹轮摩擦力 F 、滑道摩擦阻力 f_1 ,剖刀切向力 F_n 和法向力 F_T 。

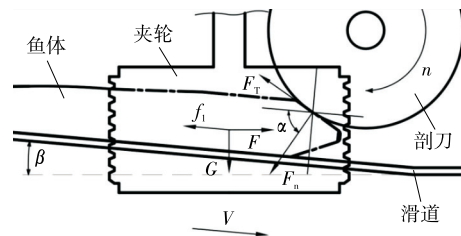


图4 鱼体夹持剖切过程受力分析

Figure 4 Stress diagram of fish body during sectioning

根据鱼体与夹轮的几何关系可知

$$\begin{cases} \alpha = 90^\circ - \varphi - \beta \\ f_1 = (G \cos\beta + F_n \cos\alpha - F_T \sin\alpha) \times \mu \end{cases} \quad (8)$$

式中:

φ ——鱼头部斜角,°;

α ——剖刀对鱼作用力的法向分力与滑道的夹角,°。

根据图 4,鱼体顺利经过剖刀并完成剖切,受力应满足:

$$G \sin\beta + F \cos\beta - f_1 > F_T \sin\alpha + F_n \sin\alpha. \quad (9)$$

将式(8)代入式(9)得

$$G(\sin\beta - \mu \cos\beta) + F \cos\beta > F_T \sin(\varphi + \beta)(1 - \mu) + F_n \cos(\varphi + \beta)(1 + \mu), \quad (10)$$

式中:

F_T ——剖刀对鱼作用力的切向分力, N;

F_n ——剖刀对鱼作用力的法向分力, N。

夹持过程中鳙鱼所受夹轮压力 F_{x_1} 与鳙鱼对夹轮的
压力 F_{x_2} 大小相等, 故

$$K_1 x_1 = K_2 x_2。 \tag{11}$$

弹性件变形量 x_1 与鳙鱼单侧法向压缩变形量 x_2 的
关系为

$$b^* - 2x_1 - (d - 2h) = x_2。 \tag{12}$$

将式(11)代入式(12)得

$$x_2 = \frac{k_1 b^* - k_1 d + 2k_1 h}{k_1 + 2k_2}。 \tag{13}$$

则

$$F = \mu^* F_{x_2} = \mu^* \times \frac{k_1 b^* - k_1 d + 2k_1 h}{k_1 + 2k_2} \times k_2, \tag{14}$$

式中:

b^* ——鱼体正常状态宽度, m;

b ——夹轮未设限位的间隙宽度, m;

h ——夹轮表面限位高度, m;

x_1 ——夹持过程鱼体单侧法向压缩变形量, m;

x_2 ——夹持过程锥齿轮箱体间弹性件拉伸变形

量, m;

k_1 ——锥齿轮箱体间弹性件刚度, N/m;

k_2 ——鱼体综合刚度, N/m;

μ^* ——鱼体与夹轮的摩擦系数。

由式(10)和式(14)可知, 通过改变夹轮间隙或表面
形状, 增加 h 从而增大 F 有利于鱼体输送。通过加快剖
刀转速, 减小剖刀作用力 F_T 、 F_n , 增大滑道 β 角或降低滑
道摩擦系数 μ 均有利于鱼体向前输送完成剖切。

3 鳙鱼剖切试验

3.1 试验设备与材料

主要试验设备为鳙鱼自动宰杀机, 其他仪器设备及
配件包括游标卡尺、钢尺、电子秤(精度 0.1 g)、量角器、
秒表、圆形刀片等。为确保试验的一致性, 排除无关变
量, 试验对象统一选取长度 37~43 cm、质量 70~90 g 的
成年鳙鱼。共测 50 尾鱼的体长与体重, 统计结果见图 5。

3.2 试验评价指标

剖切质量的结果评分包括剖切程度、鱼体损伤程度、
感官指标。客观指标中, 剖切程度的切口长度采用测量
法, 用游标卡尺测量切口长度和体长得到。剖切程度中
剖切深度、鱼体损伤程度和感官指标等为主观指标, 由
3 位实验员观察后评分取平均值。参考现有标准^[20], 设
计质量评定标准见表 2。

3.3 影响鱼体剖切指标的优化试验

更换不同齿数带轮使剖刀与夹轮转速比可调。以剖

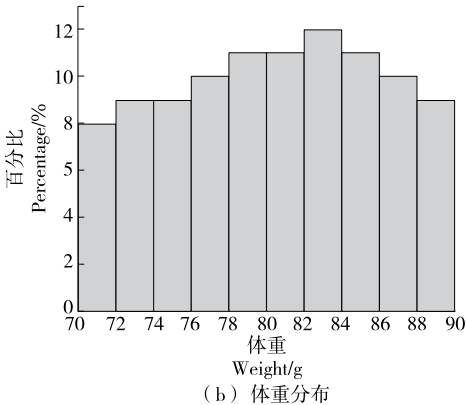
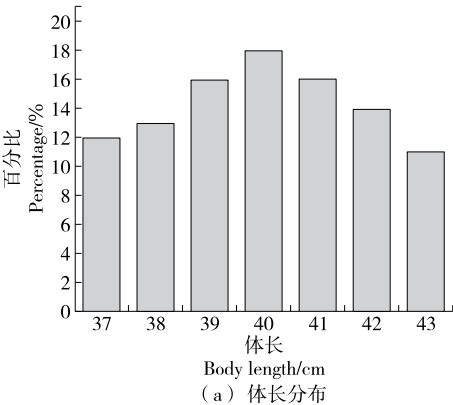


图 5 鳙鱼物理参数测定结果

Figure 5 Determination of physical parameters of eel

表 2 剖切质量评定标准

Table 2 Sectioning quality assessment standards

剖切程度	鱼体损伤程度	感官指标	评分
剖切深度至腹部, 切口长度从头部至尾鳍处	鱼体保留完整, 两侧无表皮破损	切口平整, 伤口为一条连续直线	5
剖切深度至腹部, 切口长度小于体长 70%	鱼体保留较完整, 两侧有少量表皮破损	切口处少量肉质破碎, 伤口部分倾斜	4
背部切开但剖切深度未至腹部, 切口长度小于体长 60%	鱼体有损失, 两侧有较多表皮破损, 鱼体出现变形	切口处肉质破碎, 伤口不连续且为弧线	3
背部未剖开, 切口长度小于体长 50%	鱼体损失严重, 两侧大量表皮破损, 鱼体出现严重变形	切口处肉质大量破碎, 伤口断断续续不为线形	2

切质量和剖切时间为评价指标,探究剖切结果与限位类型(矩形、梯形和圆形)、限位高度(4,5,6 mm)、刀片转速(375,563,750,938,1 125,1 500 r/min)、夹轮转速(83, 125,167,208,222,250 r/min)的关系。并在此基础上,以限位高度、刀片转速和夹轮转速为因素,设计三因素三水平正交试验优化剖切质量和剖切时间的最佳工艺条件。

3.4 结果与分析

3.4.1 夹轮表面限位形状对鱼体剖切质量的影响 鳙鱼表面无鱼鳞,摩擦系数较小,所以输送鱼体需要设置专门的柔性夹具^[21-22]或设置特殊表面结构^[23]。因此,夹轮限位形状设置矩形限位、半圆形限位和梯形限位3种,设定刀片转速1 080 r/min,凸起高度4 mm。

试验表明,圆形限位在低转速时剖切效果较差,剖切时头部一侧组织被大量切除。调高转速后再进行试验,发现矩形限位在高转速时会使鱼头和鱼体表面磨损一部分,且切口大部分不为一条直线。两种试验条件下鱼体的切口长度均较短,而梯形限位并未出现此类结果。因此,后续试验使用梯形限位。

3.4.2 夹轮限位高度对鱼体剖切结果的影响 设置刀片转速900 r/min,夹轮转速150 r/min,探究夹轮限位高度对剖切结果和剖切时间的影响。由表3可知,随着限位高度的增加,剖切时间缩短,夹持输送速度变快,剖切深度降低。限位高度较低时,鱼体剖切切口不为直线,是因为限位高度较低鱼体经过夹轮时身体会过度摆动。而夹轮限位过高会使两夹轮与滑道形成的间隙变小,过度挤压导致鳙鱼在试验过程中血液流出较多。

表3 限位高度对剖切质量的影响

Table 3 Effects of positioner height on fish body sectioning

限位高度/mm	剖切时间/s	质量评分		
		剖切程度	损伤程度	感官指标
4	7.1	3	5	3
5	6.5	4	5	4
6	6.2	4	4	4

3.4.3 夹轮转速对鱼体剖切结果的影响 设置限位高度5 mm,刀片转速900 r/min,探究夹轮转速对剖切质量和剖切效率的影响。试验发现,转速为250 r/min时,鱼体表皮出现少量磨损;转速为83 r/min时,鱼体头部被剖刀切开后身体剧烈摆动,导致鱼体身体部分组织损失较多,切口不为连续直线型,鱼体表面破坏严重。由图6可知,随着夹轮转速的增加,3类评分先增大后减小。低转速下各类评分均较低,主要是夹持过程不可靠。高转速下鱼体损伤严重,剖切程度也相对较差。

由图7可知,夹轮转速对剖切时间有直接影响,随着夹轮转速的增加,剖切时间明显缩短。当夹轮转速为

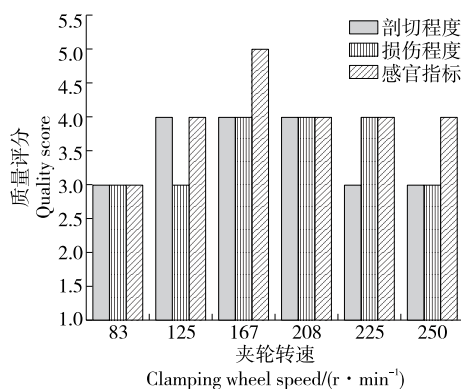


图6 夹轮转速对鱼体剖切质量评分的影响

Figure 6 The effects of the rotating speed of the clamping wheel on the cutting quality of the fish

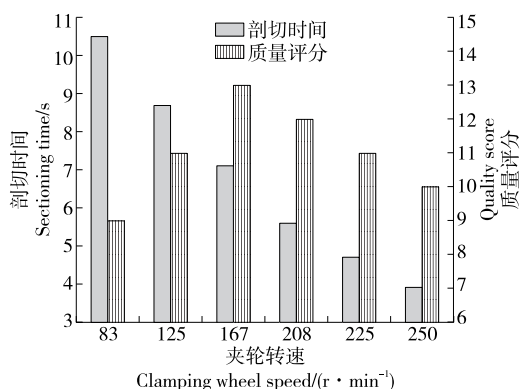


图7 夹轮转速对鱼体剖切效果的影响

Figure 7 Multiple influence of clamping wheel speed on fish body sectioning

225 r/min时,剖切时间下降较平缓,而机械振动明显。

3.4.4 刀片转速对鱼体剖切结果的影响 设置限位高度5 mm,夹轮转速167 r/min,探究刀片转速对剖切质量和剖切效率的影响。试验发现,刀片转速过低,鱼头接触剖刀后会卡住一段时间,受到刺激后频繁扭动身体后再挤出夹轮,导致头部大部分组织被切除。同时鱼身也有多处非剖切的损伤。

由图8可知,刀片转速越快,其剖切程度评分也越高。这是因为刀片转速越快,刀锋部分在单位时间内对鱼肉做的功也越大,破坏鱼体组织也越容易。转速过快会使鱼肉破损,切口的感官评分较低。

由图9可知,随着刀片转速的增大,剖切时间下降。当刀片转速>540 r/min时,剖切时间下降缓慢,说明转速满足切割头部和鱼肉的条件下,剖切时间与刀片转速关系不大。开始时剖切质量评分随刀片转速的增大而上升,当刀片转速达到1 350 r/min时开始有下降趋势。

3.4.5 正交试验 根据单因素试验结果,选择夹轮限位高度、刀片转速、夹轮转速3个因素进行正交试验,各因

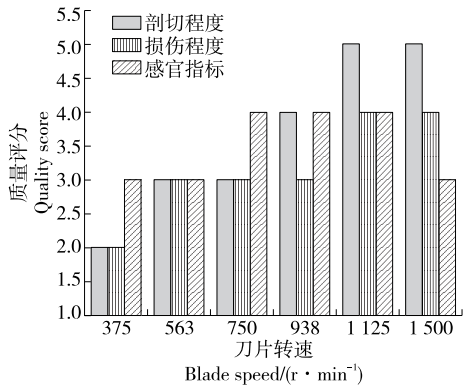


图 8 刀片转速对鱼体剖切质量评分的影响
Figure 8 Effects of blade speed on fish body cutting quality

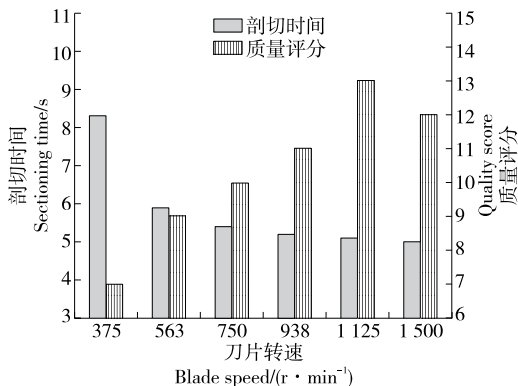


图 9 刀片转速对鱼体剖切效果的影响
Figure 9 Multiple influence of blade speed on fish body sectioning

素水平见表 4,试验设计及结果见表 5。根据极差分析,影响剖切质量评分的因素排序为刀片转速>限位高位>夹轮转速,最优组合为 A₂B₃C₂;影响剖切时间的因素排序为夹轮转速>限位高度>刀片转速,最优组合为 A₃B₃C₃。为进一步探究各因素对评价指标的显著性影响,运用 SPSS 20.0 软件进行方差分析,结果见表 6。

由表 6 可知,在 95%置信度下,刀片转速对剖切质量评分影响显著,是由于刀片转速决定了单位时间内刀锋

表 4 正交试验因素水平表

Table 4 Horizontal factors of orthogonal test			
水平	A 限位高度/ mm	B 刀片转速/ (r · min ⁻¹)	C 夹轮转速/ (r · min ⁻¹)
1	4	900	125
2	5	1 125	167
3	6	1 350	208

表 5 正交试验设计及结果

Table 5 Orthogonal test results						
试验号	A	B	C	空白	质量 评分	剖切时 间/s
1	1	1	1	1	9	8.7
2	1	2	2	2	11	6.6
3	1	3	3	3	10	4.7
4	2	1	2	3	11	6.3
5	2	2	3	1	12	3.9
6	2	3	1	2	13	7.4
7	3	1	3	2	8	4.5
8	3	2	1	3	11	7.1
9	3	3	2	1	12	5.2
质量	k ₁	10.00	9.33	11.00		
评分	k ₂	12.00	11.33	11.33		
	k ₃	10.33	11.67	10.00		
	R	2.00	2.34	1.33		
剖切	k ₁	6.67	6.50	7.83		
时间	k ₂	5.87	5.87	5.63		
	k ₃	5.60	5.77	4.57		
	R	1.07	0.73	3.26		

部分对肉体组织做的功,其做的功需要大于生物组织的切割能^[24]才能顺利完成剖切。夹持轮限位高度决定了两夹持轮与滑道形成的间隙,影响夹持力大小进而影响夹持过程对鱼体的摩擦力。摩擦力增大,鱼体输送速度也会变快,而夹持力过大会使鱼体过度变形,过小会使夹持不可靠、鱼体摆动过度,所以夹持轮凸起高度对剖切质量评分和剖切时间的影响均显著。

表 6 方差分析[†]

Table 6 Analysis of variance									
来源	平方和		自由度	均方		F 值		P 值	
	质量评分	剖切时间		质量评分	剖切时间	质量评分	剖切时间	质量评分	剖切时间
A	6.889	1.789	2	3.445	3.766	31.036	91.854	0.031 *	0.044 *
B	9.445	0.949	2	4.723	0.475	42.550	11.585	0.023 *	0.079
C	2.889	17.002	2	1.445	8.501	13.006	207.341	0.071	0.005 * *
误差	0.222	0.082	2	0.111	0.041				

[†] * 表示显著($P<0.05$); * * 表示极显著($P<0.01$)。

夹轮转速对剖切时间的影响为极显著, 是因为夹持轮表面线速度越快, 单位时间内摩擦力对鱼体做功越多, 鱼体动能越大。为了在保证剖切质量评分最优时尽量缩短剖切时间, 选取组合 $A_2B_3C_2$ 即夹持轮限位高度 5 mm、刀片转速 1 350 r/min、夹轮转速 167 r/min。此时剖切完成后被输送出来的鳊鱼切口深至腹部且从头至尾, 多本加工后只有少数鱼体两侧表皮出现较小破损, 且剖切时间较短, 适合大批量加工。

4 结论

通过对鱼体夹持过程和剖切过程的理论分析, 得出了鳊鱼宰杀机的关键影响因素。试验表明, 针对鳊鱼这种细长且截面类似椭圆的鱼体, 需要有专门的夹持输送装置。刀片转速达到剖切条件后对剖切时间的影响不大, 夹轮转速是影响剖切时间的主要因素, 但过快的夹轮转速会使剖切效果变差, 也会增加机体震动。综上, 鳊鱼宰杀机的相对最优工作参数为夹轮限位高度 5 mm, 夹轮转速 167 r/min, 刀片转速 1 350 r/min, 此时的剖切时间较短且剖切效果较好。试验设计的宰杀机对一定尺寸范围内的鳊鱼宰杀效果良好, 尺寸过大或过小则需要额外的自适应装置保证输送的稳定性, 且整体重量较大, 需进行轻量化优化, 后续可通过仿真软件进行整机迭代。

参考文献

- [1] 王丹, 吴反修. 中国渔业统计年鉴[M]. 北京: 中国农业出版社, 2021: 2-5.
WANG D, WU F X. China fishery statistical yearbook[M]. Beijing: China Agricultural Press, 2021: 2-5.
- [2] 林天祥. 带钉子的鳊鱼宰杀器: CN108208099A[P]. 2018-06-29.
LIN T X. Eel slaughter with nails: CN108208099A[P]. 2018-06-29.
- [3] 夏明友. 一种泥鳅、鳊鱼剖切装置: CN112425637A[P]. 2021-03-02.
XIA M Y. A cutting device for loach and eel: CN112425637A[P]. 2021-03-02.
- [4] 别传召. 鳊鱼宰杀机: CN105454387B[P]. 2019-07-26.
BIE C Z. Eel killing machine: CN105454387B[P]. 2019-07-26.
- [5] 程娟. 简易鳊鱼宰杀装置: CN109090195A[P]. 2018-12-28.
CHENG J. Simple eel killing device: CN109090195A[P]. 2018-12-28.
- [6] 李平, 张黎, 杜开松, 等. 一种黄鳊、泥鳅初加工机台: CN112450254B[P]. 2022-02-25.
LI P, ZHANG L, DU K S, et al. A primary processing machine for eel and loach: CN112450254B[P]. 2022-02-25.
- [7] 刘静, 张帆, 万鹏, 等. 白鲢气动式机械去头方法研究[J]. 食品与机械, 2017, 33(1): 87-92.
LIU J, ZHANG F, WAN P, et al. Fresh water fish pneumatic machinery to head-cutting method research[J]. Food & Machinery, 2017, 33(1): 87-92.
- [8] 夏伟伟, 孟庆国, 张畅原, 等. 淡水鱼往复去脏装置设计与工艺优化[J]. 食品与机械, 2021, 37(1): 124-129.
XIA W W, MENG Q G, ZHANG C Y, et al. Design and process optimization of reciprocating device for freshwater fish[J]. Food & Machinery, 2021, 37(1): 124-129.
- [9] 黄鹏飞, 谭鹤群, 张春吉, 等. 带式夹送淡水鱼剖鱼机的研制[J]. 食品与机械, 2016, 32(12): 83-86.
HUANG P F, TAN H Q, ZHANG C J, et al. Design of freshwater fish splitter by belt-clamp[J]. Food & Machinery, 2016, 32(12): 83-86.
- [10] 谭鹤群, 高星星. 链式剖鱼机工艺参数优化试验[J]. 农业工程学报, 2011, 27(6): 332-336.
TAN H Q, GAO X X. Experiment on optimizing technical parameters of fish sheafing machine[J]. Journal of Agricultural Engineering, 2011, 27(6): 332-336.
- [11] 王小琴. 一种高压冲洗型去鳞剖鱼机: CN202011318642.8[P]. 2021-03-23.
WANG X Q. A high pressure washing type fish cutter: CN202011318642.8[P]. 2021-03-23.
- [12] HILDUR EINARSDOTTIR, BERGUR G, VALDIMAR Ó. Automation in the fish industry[J]. Animal Frontiers, 2022, 12(2): 32-39.
- [13] ALIMUHAMMED M, MANJUNATHA N, MURTHY K V, et al. Design and testing of small scale fish meat bone separator useful for fish processing[J]. Food Sci Technol, 2015, 52: 3 520-3 528.
- [14] YAMAMOTO T. Machine for immediately killing living fish: JP2013153683A[P]. 2013-08-15.
- [15] 莫盛秋. 一种鱼类去鳞开膛机的设计[J]. 中国农机化学报, 2013, 34(6): 236-238.
MO S Q. Design of one kind of machine for scrape the scales and tipper[J]. China Agricultural Machinery Chemistry News, 2013, 34(6): 236-238.
- [16] 雷树德, 谭鹤群. 链式剖鱼机的研制与试验研究[J]. 农机化研究, 2009, 31(9): 81-84.
LEI S D, TAN H Q. Research on the chain fish shearing machine[J]. Research on Agricultural Mechanization, 2009, 31(9): 81-84.
- [17] 陈庆余, 沈建, 欧阳杰. 典型海产小杂鱼机械去脏试验[J]. 农业工程学报, 2013, 29(20): 278-285.
CHEN Q Y, SHEN J, OUYANG J, et al. Experiment of mechanized gutting for typical small marine fish[J]. Journal of Agricultural Engineering, 2013, 29(20): 278-285.
- [18] 胡晓亮, 陈庆余, 沈建. 竹筴鱼去脏加工用剖切刀具的优化试验[J]. 农业工程学报, 2014(12): 270-277.
HU X L, CHEN Q Y, SHEN J. Optimization of slitting cutters used for gutting Trachurus japonicus [J]. Journal of Agricultural Engineering, 2014(12): 270-277.
- [19] DR IAN K. Introduction to animal physiology[M]. [S.l.]: CRC Press, 2020: 10-25.

(下转第 226 页)

- Industry, 2021, 42(2): 135-138.
- [24] JIA M, YU Q, CHEN J, et al. Physical quality and in vitro starch digestibility of biscuits as affected by addition of soluble dietary fiber from defatted rice bran [J]. Food Hydrocolloids, 2020, 99: 105349.
- [25] 赵云蛟, 张巍毅, 李乐铨, 等. 固体发酵麦麸对小麦粉和面条品质的影响[J]. 食品科学, 2021, 42(22): 45-52.
- ZHAO Y J, ZHANG W Y, LI L C, et al. Effect of solid fermented wheat bran on the quality of wheat flour and noodles[J]. Food Science, 2021, 42(22): 45-52.
- [26] 黄现青, 郭沛强, 赵秋艳, 等. 发酵豆渣对面团性质和面条品质的影响[J]. 河南农业大学学报, 2019, 53(6): 959-965.
- HUANG X Q, GUO P Q, ZHAO Q Y, et al. Effect of fermented soybean residue on dough properties and noodle quality[J]. Journal of Henan Agricultural University, 2019, 53(6): 959-965.
- [27] FAN L, LI L, XU A, et al. Impact of fermented wheat bran dietary fiber addition on dough rheological properties and noodles quality [J]. Frontiers in Nutrition, 2022, 9: 1 423.
- [28] 王彪. 青稞膳食纤维的改性及其应用研究[D]. 安徽: 安徽工程大学, 2019: 42-43.
- WANG B. Study on the modification of dietary fiber of barley and its application[D]. Anhui: Anhui University of Engineering, 2019: 42-43.
- [29] LI D, ZHAO Y, FEI T, et al. Effects of streptococcus thermophilus GtfB enzyme on dough rheology, bread quality and starch digestibility[J]. Food Hydrocolloids, 2019, 96: 134-139.
- [30] 肖志刚, 李芮芷, 罗志刚, 等. 添加改性麸皮对含麸皮面包结构及消化特性的影响[J]. 食品科学, 2021, 42(6): 39-45.
- XIAO Z G, LI R Z, LUO Z G, et al. Effect of adding modified bran on the structure and digestive characteristics of bread containing bran[J]. Food Science, 2021, 42(6): 39-45.
- [31] 甘佳攀. 微波联合改性制备柚子皮可溶性膳食纤维及其添加对面包品质的影响[D]. 南昌: 南昌大学, 2021: 34-40.
- GAN J P. Preparation of soluble dietary fiber from grapefruit peel by combined microwave modification and the effect of its addition on the quality of bread[D]. Nanchang: Nanchang University, 2021: 34-40.
- [32] 张逢温, 杨文丹, 张宾乐, 等. 发酵麦麸对面包膳食纤维组成及烘焙特性的影响[J]. 食品工业科技, 2019, 40(5): 1-6.
- ZHANG F W, YANG W D, ZHANG B L, et al. Effect of fermented wheat bran on dietary fiber composition and baking characteristics of bread[J]. Food Industry Technology, 2019, 40(5): 1-6.
- [33] YAO J L, ZHANG Q A, LIU M J, et al. Utilization of apricot kernel skins by ultrasonic treatment of the dough to produce a bread with better flavor and good shelf life[J]. LWT-Food Science and Technology, 2021, 145: 111545.
- [34] LIU X, YANG L, ZHAO S, et al. Characterization of the dough rheological and steamed bread fortified with extruded purple sweet potato flour[J]. International Journal of Food Properties, 2020, 23 (1): 765-776.
- [35] ZHU F, SUN J. Physicochemical and sensory properties of steamed bread fortified with purple sweet potato flour[J]. Food Bioscience, 2019, 30: 100411.
- [36] 王太军. 麸皮乳酸菌发酵改性及其在馒头中的应用[D]. 郑州: 河南工业大学, 2017: 36-40.
- WANG T J. Modification of bran lactic acid bacteria fermentation and its application in steamed buns [D]. Zhengzhou: Henan University of Technology, 2017: 36-40.
- [37] ZHENG Y, TIAN H, LI Y, et al. Effects of carboxymethylation, hydroxypropylation and dual enzyme hydrolysis combination with heating on physicochemical and functional properties and antioxidant activity of coconut cake dietary fibre [J]. Food Chemistry, 2021, 336: 127688.
- [38] HUANG M, YANG H. Eucheuma powder as a partial flour replacement and its effect on the properties of sponge cake[J]. LWT-Food Science and Technology, 2019, 110: 262-268.
- [39] DIEZ-SANCHEZ E, LLORCA E, TARREGA A, et al. Changing chemical leavening to improve the structural, textural and sensory properties of functional cakes with blackcurrant pomace[J]. LWT-Food Science and Technology, 2020, 127: 109378.
- [40] 魏楠, 赵世航. 大豆膳食纤维改性及在烘焙食品中的应用研究[J]. 现代食品, 2022, 28(1): 32-34.
- WEI N, ZHAO S H. Soybean dietary fiber modification and application in baked goods[J]. Modern Food, 2022, 28(1): 32-34.

(上接第 103 页)

- [20] 赵镭, 刘文, 汪厚银. 食品感官评价指标体系建立的一般原则与方法[J]. 中国食品学报, 2008(3): 121-124.
- ZHAO L, LIU W, WANG H Y. General guidance and methods for establishing index system of food sensory evaluation[J]. Journal of Chinese Institute of Food Science and Technology, 2008(3): 121-124.
- [21] HU S Y, HU M J, ZHANG W Y. Design and experiment of flexible clamping device for pepper plug seedlings [J]. Advances in Mechanical Engineering, 2022, 14(6): 2-6.
- [22] ZHANG Y H, XU D F, LI J J, et al. Mechanical properties and clamping behaviors of snow crab claw [J]. Journal of the Mechanical Behavior of Biomedical Materials, 2021, 124: 3-5.
- [23] 万鹏, 郭三琴, 杨俊, 等. 淡水鱼水平往复振动头尾定向输送方法[J]. 农业工程学报, 2021, 37(4): 40-48.
- WAN P, GUO S Q, YANG J, et al. Horizontal reciprocating vibration method for head-to-tail directional transportation of fresh water fish[J]. Journal of Agricultural Engineering, 2021, 37(4): 40-48.
- [24] 胡中伟, 张璧. 生物软组织切割过程建模[J]. 中国机械工程, 2011, 22(17): 2 043-2 047.
- HU Z W, ZHANG B. Modeling of soft tissue cutting process[J]. China Mechanical Engineering, 2011, 22(17): 2 043-2 047.