

白鲢鱼头切割力学特性的试验与分析

张帆 万鹏 宗力 谭鹤群

华中农业大学工学院/国家大宗淡水鱼加工技术研发分中心(武汉), 武汉 430070

摘要 以白鲢(*Hypophthalmichthys molitrix*)为试验对象进行鱼体鱼头切割力学特性试验。通过对白鲢鱼头的长、宽、厚等基础体征参数的统计分析,确定在白鲢去头加工定位时可以分别以鱼体头部吻端和鱼体背部边线为定位基准。对影响鱼体去头切割力的鱼体冷藏时间、切割刀具的滑切角度、鱼体放置方式、刀具厚度等关键因素进行试验研究。通过鱼体去头切割力的测定和去头切断面的感官评定分析,并进行试验优化,确定鱼体去头最佳切割方案:将鲜活鱼体冷藏6 h后,鱼体水平放置,采用厚度为2 mm的弧形刃的切割刀具进行淡水鱼去头加工时,鱼体鱼头切割力值最小为186.7 N,鱼头切断面最平整光滑,去头后鱼肉无明显缺损。

关键词 白鲢; 鱼头切割; 力学特性; 弧形刃; 滑切

中图分类号 Q 66 **文献标识码** A **文章编号** 1000-2421(2016)03-0122-06

我国是世界淡水鱼养殖和消费大国,年产量占世界总产量的70%以上。目前,淡水鱼仍以鲜活销售为主,加工量不足总产量的30%,远远落后于发达国家^[1-4]。淡水鱼鱼体的去头加工是淡水鱼前处理加工的主要内容之一,目前国内淡水鱼去头加工一般都由人工手工操作完成,劳动成本高、卫生系数低且产品质量无法保证,不仅会对鱼体价格产生较大影响,也会造成环境污染^[5-6]。以青鱼、草鱼、鲢、鳙等为代表的大宗淡水鱼,鱼头较大,往往占到鱼体总质量的24%~34%^[7]。淡水鱼鱼头中含有丰富的卵磷脂和EN、DHA等物质,风味较好,营养价值高,市场上某些淡水鱼鱼头的价格比鱼肉的价格还高^[8];此外鱼头也是淡水鱼深加工、提高鱼体附加值的重要原料^[9]。因此,研究淡水鱼去头加工的理论及设备,对于促进淡水鱼的深加工等综合利用以及增加淡水鱼养殖者的收入都具有重要意义。鱼体去头的目的是实现以鱼肉为主的鱼身和以鱼骨为主的鱼头的分离,其加工过程是淡水鱼鱼体鱼头受切割力作用发生形变断开的过程。成功的鱼体去头表现为鱼身没有鱼鳍和头部脊椎骨,并留有最大量的鱼肉,同时鱼头保持完整。切割力的大小和切断面的质量是衡量鱼体去头加工的重要指标,切割力的大

小直接影响去头过程的功耗;切断面的质量与去头过程中鱼体鱼肉的损伤程度正相关^[10-12]。Andrzej等^[13-14]以及Hosain等^[15]研究了鱼体不同部位的组织样本,发现在可比条件下鱼体中脊柱的韧性是肌肉组织韧性的994倍。通过去头切割力对切割刀刃角度的调控以及鱼头切割过程中的受力分析,对比研究了不同切割方式的优缺点。

笔者以我国主要养殖的大宗淡水鱼中具有典型体征代表的白鲢(*Hypophthalmichthys molitrix*)为试验样本,在对鱼头相关特征参数进行测量的基础上,以淡水鱼去头过程中的鱼头切割力学特性为研究内容,以鱼体去头剪切力大小和切断面的感官评价为指标,对影响鱼体去头加工效果的鱼体冷藏时间、切割刀具的滑切角度、鱼体放置方式、切割刀具构型、刀具厚度等关键因素进行试验研究,探寻一种最优的淡水鱼鱼体去头方法,为淡水鱼去头机的设计提供理论参考。

1 材料与方法

1.1 试验材料与设备

选用145条鲜活白鲢(*Hypophthalmichthys molitrix*)作为试验样本,鱼体质量为 (1.25 ± 0.50)

收稿日期: 2015-05-18

基金项目: 中央高校基本科研业务费专项(2013PY126); 国家现代农业产业技术体系建设专项(CARS-46-23)

张帆, 硕士, 研究方向: 农产品加工技术与装备、淡水鱼前处理加工设备. E-mail: zhf880512@sina.com

通信作者: 万鹏, 博士, 副教授, 研究方向: 农产品加工技术与装备、农产品品质智能检测与评价. E-mail: wanpeng09@mail.hzau.edu.cn

kg,在水产品交易市场随机采购获取。由于在淡水鱼前处理加工过程中,鱼体去头加工通常在去鳞加工之后,因此,在试验前对样本鱼体进行去鳞洗净处理,并根据需要对一些样本进行相关冷藏保鲜处理。试验仪器设备主要包括:RGT2000-10 微机控制电子万能试验机(深圳市瑞格尔仪器有限公司生产);AUE-210 电子分析天平,精度为 0.1 g(湘仪天平仪器厂);钢直尺,精度为 1 mm;游标卡尺,精度为0.02 mm;自制剪切刀具、夹具(图 1)等。

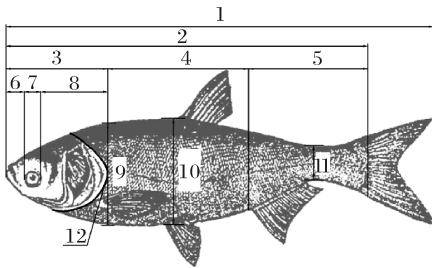


图 1 自制刀具夹具结构图

Fig.1 Structure of cutter and fixture tool

1.2 试验方法

1)白鲢鱼体体型特征参数测量。白鲢鱼体体型特征参数测量示意图如图 2 所示。



- 1.全长 Full length; 2.体长 Body length; 3.头长 Head length;
- 4.躯干长 Torso length; 5.尾长 Tail length; 6.吻长 Mouth length;
- 7.眼径 Eye diameter; 8.眼后头长 Head length behind eye; 9.鱼头宽 Head width;
- 10.体宽 Body width; 11.尾柄宽 Tail hilt width;
- 12.鳃盖骨曲线后沿 Opercular curve.

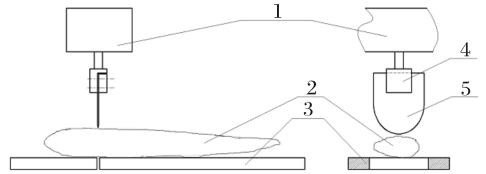
图 2 白鲢鱼体体型特征参数示意图

Fig.2 Body axis test of fish

测量时,将白鲢样本按鱼头朝左舒展平放在测量板上,用钢尺量取从鱼体吻端或上颌前端至鳃盖骨后缘的距离为鱼头长度;量取鳃盖骨外缘平行于腹背轴的切线处鱼体背部至腹部的距离即为鱼头宽度;使用游标卡尺量取鱼头两侧鳃盖骨外缘平行于腹背轴切线处的厚度为鱼头厚度。

2)白鲢鱼体去头切割力值的测定。预试验表

明,加载速率对切割力的测定没有影响,试验选取使用微机控制电子万能试验机的剪切模块,加载速率为 100 mm/min,试验鱼头的切割位置为鳃盖骨外缘处垂直于鱼体头尾轴的切线,当切割刀具完全切穿鱼体时即为 1 次试验结束。分别测量不同试验条件下的切割力值,取其最大值为每次试验的鱼体去头切割力值,并进行切断面评分。切割力学特性试验示意图如图 3 所示。



- 1.带探头测试机横梁 The beam of the testing machine with the probe;
- 2.鱼体 Fish body; 3.去头平台 The flat cutting fish head;
- 4.夹具 Clamps; 5.刀具 Cutter.

图 3 白鲢切割力学试验示意图

Fig.3 Silver carp shear test apparatus

3)白鲢鱼体去头切断面感官评价标准。通过感官检验训练的食品专业人士 5 人组成评定小组,根据食品质量感官评分标准对切割试验切断面结果进行评定,感官评定得分为平均分,以 1.0 分计。其中一等切断面的感官评分为 0.8~1.0 分,标准为鱼体外形保持完好,鱼身切断面十分光滑平整有光泽,去头后鱼身无明显缺损;二等切段面的感官评分为 0.6~0.8 分,标准为鱼体外形保持比较完好,鱼身切断面光滑平整,无明显损伤或缺肉;三等切段面的感官评分为 0.4~0.6 分,标准为鱼身横断面平整但略微粗糙,鱼体外形遭到破坏,有一些缺损或撕裂;四等切段面的感官评分为 0.2~0.4 分,标准为鱼身横断面不平整且比较粗糙,鱼体外形遭受破坏,有多处损伤及缺肉,鱼肉有部分脱落;五等切段面的感官评分为 0~0.2 分,标准为鱼身横断面不平整且十分粗糙;鱼体不能成型,有严重撕裂,鱼肉损伤脱落严重。

2 结果与分析

2.1 白鲢鱼头特征参数

对 145 条白鲢样本的鱼头特征参数进行测量并对数据进行分析,统计鱼头长度、宽度、厚度(图 4)。由图 4 可知,(1.25±0.50) kg 的白鲢样本,鱼头长度均值为 106.8 mm,标准差为 4.7;鱼头宽度均值为 106.4 mm,标准差为 5.8;鱼头厚度均值为 56.9 mm,标准差为 3.4。对比白鲢样本鱼体鱼头长、宽、

厚的正态分布可知: (1.25 ± 0.50) kg 的鲢样本, 鱼体质量的生长在鱼头上的变化主要体现在鱼头的宽度上, 鱼头的长度和厚度变化并不显著, 其长度和宽度变化大致相等, 趋于一个正方形区域。同时研究发现, 对于不同体长体质量的白鲢样本, 鱼体的鳃盖骨曲线差别也不大。因此, 在去头过程中对鱼体进行定位时, 长轴方向选择以鱼头的长度为定位参考; 背腹轴方向, 由于鱼体侧扁, 选择以鱼背边线为定位参考。

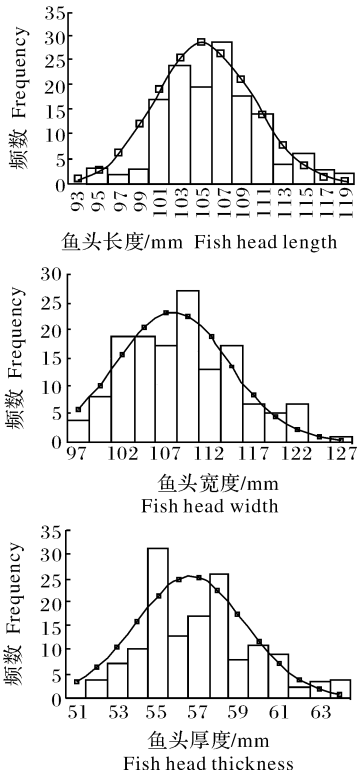


图 4 白鲢鱼头长度、宽度、厚度正态分布图

Fig.4 Head length,width and thickness distribution plot

2.2 白鲢鱼体去头切割特性

1) 冷藏时间对鱼体去头切割力和切断面的影响。采用厚度为 2 mm 的普通剃骨刀作为直刃平刀进行鱼体切割特性试验研究。由于白鲢从捕捞到加工通常需要经过一段时间, 为了考察白鲢出水后时间对鱼体切割的影响, 将鱼体样本在 (-4 ± 1) °C 的冰箱内进行冷藏。由于鱼体在冷藏过程中也在不断发生变化, 以 6 h 作为间隔对鱼体进行检测。将在冰箱中分别冷藏 0、6、12、18、24 h 后的白鲢样本鱼体背部朝左平放固定在鱼体去头试验平台上进行去头切割试验, 读取并记录最大切割力值并进行切断面的感官评分。每个试验水平重复试验 5 次取平均值, 得到冷藏时间与鱼头切割力平均值以及切断面

评分之间的关系(图 5)。

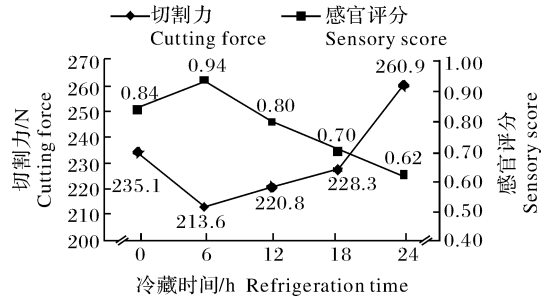


图 5 冷藏时间对切割力及切断面评分的影响

Fig.5 Refrigeration time to the influence of cutting force and sensory score

由图 5 可知, 在鱼体冷藏过程中, 鱼头抗切割力值在开始的一段时间内呈下降趋势, 切口断面感官评分值呈上升趋势, 当冷藏时间到达一定值后, 切割力值逐渐上升, 而切口断面的感官评分值逐渐下降。试验结果表明, 冷藏时间对试验指标影响显著; 鱼体冷藏 6 h 后进行去头切割时, 切割力值最小和切断面感官评定得分最优, 分别为 213.6 N 和 0.94 分。

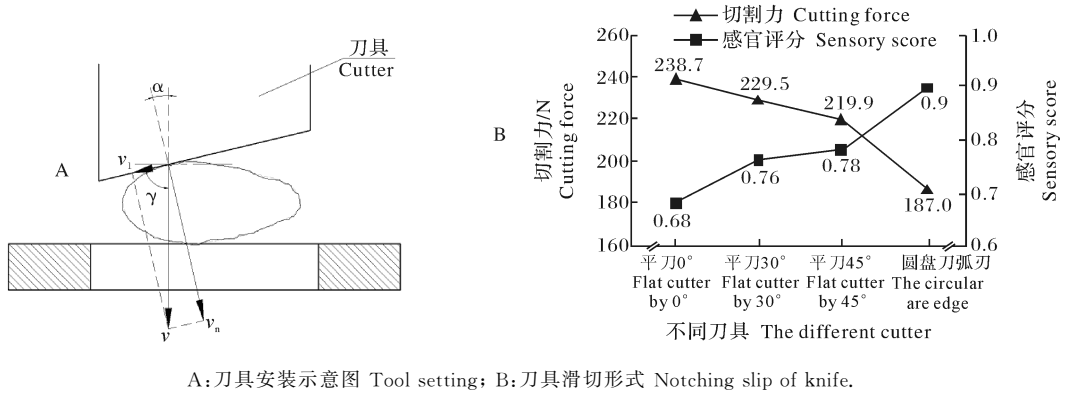
2) 刀具滑切角对鱼体去头切割力和切断面的影响。采用厚度为 2 mm 的普通剃骨刀作为直刃平刀进行鱼体切割特性试验研究。分别调整直刃平刀的滑切角度 α 为 0°、30°、45°以及采用圆盘刀的弧刃共 4 个滑切角水平进行白鲢鱼体去头切割试验, 直刃平刀安装示意图如图 6A 所示。每个滑切角重复 5 次试验取平均值, 得到最大切割力值和切断面的感官评分之间的关系如图 6B 所示。由图 6B 可知, 随着滑切角 α 的增加, 鱼头抗切割力值逐渐减小呈下降趋势, 而切断面感官评分却逐渐升高; 并且在采用弧刃圆盘刀时, 抗切割力最小, 切断面感官评分最高。方差分析表明, 切割刀具的滑切角对淡水鱼去头试验指标影响极显著, 采用弧刃的刀具进行鱼体去头加工时, 剪切力值最小和切断面感官评定得分最优, 分别为 187.0 N 和 0.90 分。

3) 鱼体放置方式对鱼体去头切割力和切断面的影响。采用厚度为 2 mm 的普通剃骨刀作为直刃平刀研究鱼体放置方式对鱼体去头切割力和切断面的影响。分别调整直刃平刀的滑切角 α 为 0°、30°、45°以及采用圆盘刀的弧刃共 4 个滑切角水平进行白鲢鱼体去头切割试验, 将去鳞洗净过后的新鲜白鲢样本采用鱼体背部朝左平放和鱼体背部朝下竖直放置 2 种方式放置在试验台上进行去头切割, 每种放置方式重复 5 次, 读取并记录最大切割力值以

及进行切断面的感官评分,得到鱼体放置方式与鱼头切割力平均值和切断面评分之间的关系如图 7 所示。

由图 7 可知,在进行鱼体去头切割时,不论刀具

采用何种安装滑切角度,鱼体水平放置时的最大切割力值比鱼体竖直放置时的切割力值要小 40 N 左右,同时切断面的感官评定得分也更高。方差分析表明,鱼体去头加工时的鱼体放置方式对试验指标



A: 刀具安装示意图 Tool setting; B: 刀具滑切形式 Notching slip of knife.

图 6 刀具滑切角对切割力及切断面评分的影响

Fig.6 The cutting tool installation to the influence of cutting force and sensory score

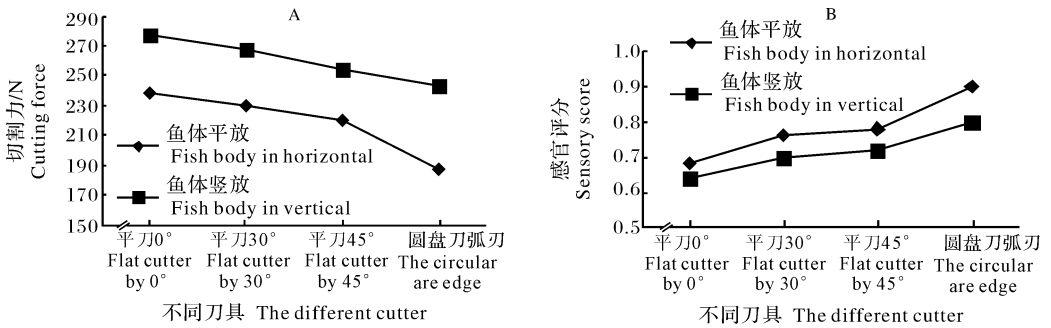


图 7 鱼体放置方式对切割力(A)和切断面(B)的影响

Fig.7 Fish placement impact on cutting force(A) and cutting surface(B)

影响极显著。

4) 鱼体去头试验的优化。根据试验可知,冷藏时间、鱼体放置方式和刀具滑切形式对鱼体去头切割力学特性试验指标有显著影响;同时,考虑刀具厚度的因素,对相关试验因素水平修正后进行正交试验。其中,冷藏时间设置 0、6、12 h 3 个水平;鱼体放置方式设置竖直、平放、平放 3 个水平;刀具滑切形式设置 0°、45°、圆弧 3 个水平;刀具厚度设置 2.0、2.5、3.0 mm 3 个水平。采用 $L_9(3^4)$ 方案进行正交试验,不考虑因素间的交互作用,每个试验号进行 5 次重复试验,以切割力值作为综合评价指标,试验结果如表 1 所示。

由表 1 中极差 R 值可以看出,本试验的 4 个因素对白鲢鱼体去头切割力值的影响从大到小依次为 C 刀具滑切形式 > B 鱼体放置方式 > A 冷藏时间 > D 刀具厚度,其方差分析结果如表 2 所示。

由方差分析可以看出,在本试验条件下,不考虑交互作用的影响,则试验指标切割力值越小越好,故综合评判的优方案也应取各因素最小 k 值所对应的水平,即最佳组合为 $A_2B_2C_3D_1$,即淡水鱼鱼体去头切割的最佳方式为将鲜活鱼在 $(-4 \pm 1)^\circ\text{C}$ 的冰箱中冷藏时间 6 h 后将鱼体水平放置,并采用厚度为 2 mm 的弧形刃刀具切割,此时切割力最小为 186.7 N。

表 1 剪切力试验方案与结果

Table 1 Result of the orthogonal experiment of cutting test

试验号 Test No.	A:冷藏时间/h Refrigeration time	B:放置方式 Fish placement	C:刀具滑切形式 Notching slip of knife	D:刀具厚度/mm Tool thickness	剪切力/N Cutting force
1	0	V	0°	2.0	276.7
2	0	H	45°	2.5	230.4
3	0	H	A	3.0	206.8
4	6	V	45°	3.0	246.4
5	6	H	A	2.0	186.7
6	6	H	0°	2.5	232.4
7	12	V	A	2.5	252.4
8	12	H	0°	3.0	248.7
9	12	H	45°	2.0	235.6
K1	713.90	775.50	757.80	699.00	
K2	665.50	670.30	712.40	715.20	
K3	736.70	/	645.90	701.90	
k1	237.97	258.50	252.60	233.00	
k2	221.83	223.43	237.47	238.40	
k3	245.57	/	215.30	233.97	
极差 R	23.73	36.57	37.30	5.40	

注:Note: V:竖直 Vertical;H:平放 Horizontal;A:圆弧 Arc.

表 2 切割力正交试验方差分析表

Table 2 Variance analysis of cutting test

方差来源 Variance source	SS	df	MS	F	P
组间 Between groups	16 690.66	8	2 086.333	298.237	1.6e-17
组内 Within the group	125.92	18	6.996		
总和 Total	16 816.58	26			

注: $P < 0.01$ 表示影响极显著, $P < 0.05$ 表示影响显著。Note: $P < 0.01$ indicates a very significant effect; $P < 0.05$ indicates a significant effect.

3 讨论

试验以 145 条(1.25±0.50) kg 的白鲢为样本,在对鱼头长度、宽度、厚度等体型特征参数进行测量并分析的基础上,研究了鱼体的冷藏时间、切割刀具滑切角度、鱼体放置方式、刀具厚度等因素对淡水鱼鱼头切割力学特性的影响。在质量为(1.25±0.50) kg,白鲢样本的头长均值为 106.8 mm,标准差为 4.7;鱼头宽度为 106.4 mm,标准差为 5.8;鱼头厚度为 56.9 mm,标准差为 3.4;鱼体去头刀具在定位时,长度方向以鱼头吻端为定位基准,宽度方向以鱼背边线为定位基准。鱼体的冷藏时间、刀具滑切形式、鱼体放置方式、刀具厚度等对鱼体去头切割力学特性有显著影响。正交试验表明,对白鲢样本鱼体去头剪切力值影响从大到小的因素依次为:刀具滑切形式>鱼体放置方式>冷藏时间>刀具厚度;淡水鱼去头切割的最佳方式为将鲜活鱼冷藏时间 6 h 后鱼体水平放置,并采用刀具厚度 2 mm 的弧形刃刀去头时切割力最小,为 186.7 N。

鱼头的长度、宽度和厚度是表征淡水鱼鱼头形状特征的重要参数,其中鱼头的长度与切割位置的

确定密切相关,鱼头的宽度直接决定着切割刀具的切割宽度尺寸,而鱼头的厚度是确定切割刀具行程的重要依据。因此,研究首先对鱼体的长度、宽度和厚度等形态特征进行了统计分析,得到了鱼头长度、宽度和厚度的频数分布及正态分布曲线。同时,在研究过程中也考虑了鱼体出水后冷藏时间对鱼体结构的影响;这是因为白鲢在冷藏过程中,伴随着低温结晶,肌肉细胞间结合力被破坏,使得切割越来越容易,切口也越光滑;在冷藏到一定时间后,肌肉细胞中的水被冻结,使得切割力增大,而且由于鱼体冷冻后的硬度很大,使得慢速加载时刀具产生震动,导致切口不整齐。试验发现,鱼体的切割刀具的刃口对鱼头切割断面会产生直接影响。这是因为当切割刀具以速度 v 切入鱼体进行去头时,由于刀具刀刃的运动方向与刀刃法线间成一定的滑切角度 α ,刀具切入速度 v 被分解成垂直刃口的正切速度 v_t 和沿刃口方向的滑切速度 v_n 2 个分量。当滑切角 α 越大,去头刀刃切入鱼体的实楔角 γ 就越小,刀具切入鱼体所需的法向力就越小。刀具刃口在沿鱼体切向产生滑移,刀刃尖锐的微观齿切开骨骼肌纤维束和鱼骨,使得鱼体鱼头抗切割力值降低。同时,试

验表明切断同样厚度的鱼体鱼头断面,滑切比正切的切割行程更长一些,与鱼体间的摩擦功也会增加,故滑切刀具的尺寸较大且总的切割功也较大。此外,鱼体采用水平放置进行去头切割时,鱼体与切割刃口以及试验台面的接触面积更大,鱼体受切割力的作用面积大,变形作用影响小,各部分受力均匀,因此,鱼体抗切割力值更小,切口更光滑。

参 考 文 献

[1] 王玖玖,宗力,熊善柏.淡水鱼鱼鳞生物结合力与去鳞特性的实验研究[J].农业工程学报,2011,27(9):339-343.

[2] 沈建.欧洲淡水鱼前处理加工技术与装备[J].安徽农业科学,2010,38(23):12491-12495.

[3] 李玲,宗力,王玖玖,等.大宗淡水鱼加工前处理技术和装备的研究现状及方向[J].渔业现代化,2010,37(5):43-46.

[4] 陈庆余,沈建,付润泽,等.典型海产小杂鱼机械去头方法研究[J].渔业现代化,2012,39(5):38-42.

[5] 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.

[6] 徐中伟.努力发展试验用小型水产食品食品加工机械[J].中国水产,2009,409(12):31-32.

[7] 雷树德.小型剖鱼机的研制[D].武汉:华中农业大学,2009.

[8] 张乾能,朱国,宗力,等.鲢鱼鱼体抗压特性的研究[J].食品科学,2009,30(11):95-98.

[9] 朱国,谭鹤群.鱼体在剖鱼机夹片中受力有限元分析[J].农业工程学报,2008,24(4):44-48.

[10] 赵永锋,胡海彦,蒋高中,等.我国大宗淡水鱼的发展现状及趋势研究[J].中国渔业经济,2012,5(30):91-99.

[11] 郝涤非.水产品加工技术[M].北京:中国农业科学技术出版社,2008.

[12] 王锡昌.中国水产品加工的当代思考[J].食品与机械,2006,22(4):10-15.

[13] ANDRZEJ D.The effect of cutting and fish-orientation systems on the deheading yield of carp[J].International journal of food science and technology,2008,43:1688-1692.

[14] ANDRZEJ D,DANIEL D.Possibilities of utilizing the differences of fish tissues stiffness in the mechanization of cyprinid deheading[J].Journal of food engineering,2007,83:111-115.

[15] HOSAIN D,MOHSEN A,ABBAS R.Drying characteristics of sardine fish dried with microwave heating[J].Journal of the sudi society of agricultural sciences,2013,12(2):121-127.

Analyzing the mechanical characteristics of cutting *Hypophthalmichthys molitrix* head

ZHANG Fan WAN Peng ZONG Li TAN Hequn

*College of Engineering, Huazhong Agricultural University/
The Sub-Centre (Wuhan) of National Technology and R&D of Staple
Freshwater Fish Processing, Wuhan 430070, China*

Abstract The silver carp was used to study mechanical characteristics of cutting fish head. The head-cutting machine of freshwater fish was designed to provide an important theoretical basis. Statistical analyses of basic signs parameters of the head of the fish body including length, width and thickness were made to determine the freshwater fish head orientation and to snout the fish head to fish back line for locating datum. To determine the shear force, the important factors affecting the shear effect of freshwater fish head-cutting including fish refrigerating time, the sliding cutting angle, placement of fish were studied with the orthogonal experiment. Results showed that the optimal condition for freshwater fish head-cutting was that fish was horizontally placed after 6 h frozen. The thickness of curved cutting knife used is 2.0 mm. At this time to has The minimum shear force of head-cutting was 186.7 N under the optimal condition. The surface level of fish head-cutting was smooth. There was no obvious defect of fish flesh with head-cutting.

Keywords *Hypophthalmichthys molitrix*; head cutting; mechanical characteristics; curved blade; sliding cut

(责任编辑:陆文昌)