## [新设备·新材料·新方法]

DOI:10.3969/j.issn.1005-2895.2021.05.016

# 扇贝脱壳机特征值屈曲特性分析及优化

卢存壮<sup>1,2</sup>,张建华<sup>1,2\*</sup>,王艾泉<sup>3</sup>,李府谦<sup>4</sup>

(1. 山东大学 机械工程学院, 山东 济南 250061;

2. 高效洁净机械制造教育部重点实验室/机械工程国家级实验教学示范中心,山东济南 250061;
 3. 山东省机械设计研究院,山东济南 250031;4. 山东金瓢食品机械股份有限公司,山东威海 264300)

摘 要:为实现扇贝脱壳机轻量化设计,课题组运用 ANSYS Workbench 18.0 对其进行屈曲特性分析,仿真分析得到屈曲特征值和振型图,确定脱壳机发生失稳时的临界应力值及屈曲发生的位置;在此基础上,基于变密度法优化准则进行拓扑优化,将优化前后的屈曲特性进行对比。拓扑优化结果显示:优化后结构整体减轻了 12.5%,最大变形量基本保持一致。该研究在保证结构满足正常工况要求的同时,达到扇贝脱壳机轻量化要求。

关 键 词:扇贝脱壳机;屈曲分析;拓扑优化;变密度法;ANSYS

中图分类号:TH122;TS254.3 文献标志码:A 文章编号:1005-2895(2021)05-0086-04

## Analysis and Optimization of Eigenvalue Buckling Characteristics of Scallop Sheller

LU Cunzhuang<sup>1,2</sup>, ZHANG Jianhua<sup>1,2\*</sup>, WANG Aiquan<sup>3</sup>, LI Fuqian<sup>4</sup>

(1. School of Mechanical Engineering, Shandong University, Jinan 250061, China;

2. Key Laboratory of High Efficiency and Clean Mechanical Manufacture of Ministry of Education/National

Experimental Teaching Demonstration Center of Mechanical Engineering, Jinan 250061, China;

3. Shandong Institute of Mechanical Design and Reasearch, Jinan 250031, China;

4. Shandong Golden Scoop Food Machinery Co., Ltd., Weihai, Shandong 264300, China)

**Abstract**: In order to achieve the goal of lightweight design of the scallop sheller, the buckling characteristics was analyzed by ANSYS Workbench 18.0. The buckling eigenvalue and the mode diagram were obtained through simulation analysis to determine the critical stress value and the buckling location when sheller instability occurred. On this basis, topology optimization was performed based on the optimization criteria of the variable density method, and the buckling characteristics before and after optimization were compared. The topology optimization results show that the overall structure is reduced by 12.5%, and the maximum deformation almost stays same. The research ensures that the structure meets normal working conditions and achieves the lightweight requirements of scallop sheller. **Keywords**:scallop sheller; buckling analysis; topology optimization; variable density method; ANSYS

扇贝因肉质鲜嫩、营养丰富而深受消费者的喜爱 和追捧<sup>[1]</sup>。实现扇贝闭壳肌与壳体分离是扇贝加工 的关键环节之一<sup>[23]</sup>。河北农业大学谷晓翠<sup>[4]</sup>开发出 一种转盘式闭壳肌剥离生产线,以凸轮分割器作为传 动机构,实现扇贝壳肉分离要求;尹欣玲等<sup>[5]</sup>设计出 一种成形刀撑开式工作台,实现闭壳肌脱离贝壳表面; 解秋阳等<sup>[6]</sup>利用水射流数控装置使闭壳肌脱落;朱其 常<sup>[7]</sup>通过对扇贝生物结合力的测量,研制出一种外套 膜剥离机械手。张建华、王艾泉和李府谦共同提出并 研发一种扇贝脱壳机,对蒸煮后的扇贝进行脱壳处理, 从而实现扇贝闭壳肌与壳体的分离。

课题组基于 SolidWorks 建立扇贝脱壳机实体模型 后,利用 ANSYS Workbench 18.0 对脱壳机进行屈曲分 析,通过变密度法进行拓扑优化设计,以减轻结构质

#### 收稿日期:2021-05-09;修回日期:2021-07-15

基金项目:山东省重点研发计划资助项目(2019JZZY020709)。

**第一作者简介:**卢存壮(1995),男,山东日照人,硕士研究生,主要研究方向为机械设计优化。通信作者:张建华(1964),男,山 东栖霞人,教授,博士生导师,主要研究方向为先进制造与复合加工。E-mail:jhzhang@sdu.edu.cn

量,将优化前后模型的屈曲分析结果分别进行了对比, 以保证优化后的结构仍满足实际工况要求。

扇贝脱壳机三维模型的建立 1

课题组采用 SolidWorks 建立三维实体模型,如图 1 所示,并将模型文件导入 ANSYS Workbench 中。





Figure 1 Three-dimensional model of scallop sheller

有限元分析 2

#### 2.1 建立有限元模型

在 Eigenvalue Buckling 屈曲分析模块中,脱壳机 材料定义及性能参数如表1所示。有限元分析过程 中,模型结构与网格划分的方法影响划分网格的质量 和速度<sup>[8]</sup>,基于上述问题,课题组采用正四面体划分 网格,共划分成115 297 个单元和275 973 个节点。忽 略螺栓、螺母等特征,假定所有焊接接头都为完全焊接 进行有限元模型简化,如图2所示。

表1 材料性能参数

Table I Material performance paramete	Fable 1	e 1 Material	performance	paramete
---------------------------------------	---------	--------------	-------------	----------

Table	i materiai p	enormance	parameters
材料名称	弹性模量/GPa	泊松比	密度/(kg・m <sup>-3</sup> )
304 不锈钢	193	0.31	7 850
		1 000.00 (mm	



### 2.2 施加约束及其载荷

根据实际工况,将脱壳机机架的8个支腿施加固 定约束:每个电机板施加 Z 轴负方向 500 N 的力:每层 筛网施加 Z 轴负方向 400 N 的力; Z 轴负方向翻拨轮 自身的重力为300 N。各处力施加完成后如图3 所示。



图 3 扇贝脱壳机约束及载荷的施加 Figure 3 Scallop sheller restraint and load application

#### 屈曲分析 3

#### 3.1 屈曲分析理论

屈曲分析是研究结构受到外力作用下发生失稳状 态时,结构产生屈曲特征值和模态形状的分析方 法<sup>[9-11]</sup>。课题组采用线性屈曲对脱壳机进行稳定性分 析。线性屈曲是以小位移、小应变的弹性力学为基础, 分析时不考虑结构在受载时发生的变化[12-15]。

发生屈曲时,临界载荷为[16-18]

$$F_{\rm cr} = \lambda \cdot F_{\circ} \tag{1}$$

式中: $F_{\alpha}$ 为临界载荷,N:F为作用载荷,N: $\lambda$ 为屈曲特 征值或屈曲载荷因子。

其中, $\lambda$  的计算方程为

$$([K] + \lambda [S]) \{\Psi\} = 0_{\circ}$$
(2)

式中:[K]为脱壳机的刚度矩阵:[S]为脱壳机的应力 刚度矩阵; Ψ 为脱壳机的位移特征矢量。

#### 3.2 屈曲分析结果

利用 Block Lanczos 法求解脱壳机前6 阶屈曲特 征值,如表2所示。

表2 屈曲特征值

lable	2	B	lucl	ĸ	ing	eig	genv	a	lue
					0	- c			

模态	屈曲特征值	模态	屈曲特征值
1	-46.417	4	- 30. 842
2	- 39.788	5	- 29. 936
3	- 39.043	6	25.385

得到的屈曲特征值既可以是正值也可是负值,负 值表示施加相反方向载荷时结构发生的破坏。屈曲特 征值大于1表明施加载荷未超过临界载荷值,结构整 体满足稳定性要求;反之,结构发生失稳<sup>[19]</sup>。从表2 可知,脱壳机满足设计要求,未发生失稳。

基于发生1阶屈曲变形时的临界载荷最小且1阶 振型表示结构首次发生屈曲失稳的位置,特征值和模 态振型应以1阶为主,如图4所示。



#### 图4 1阶屈曲振型



模态振型可以用来预测脱壳机发生失稳时的特征。通过图4屈曲振型可以看出,屈曲振型主要表现为局部弯曲,变形以局部失稳为主,翻拨轮的上边缘是发生变形的主要位置。如果脱壳机在该位置处存在焊接工艺不符合设计规范及表面有缺陷裂纹等问题,屈曲载荷值会受到直接影响,结构稳定性也会降低。

经有限元屈曲稳定性计算,1 阶屈曲特征值为 46.417,则1 阶屈曲载荷为实际载荷的46.417 倍,在 相应载荷作用下满足屈曲稳定性要求,脱壳机整体结 构是安全的。根据材料力学相关知识<sup>[20]</sup>,失稳时的临 界载荷等于施加的载荷与屈曲特征值的乘积。

#### 4 拓扑优化分析

#### 4.1 拓扑优化分析理论

由屈曲分析结果可知,脱壳机机架结构留有较大的优化空间。将模型导入 Topology Optimization 模块中,采用变密度法数学模型进行拓扑优化以实现轻量化目标<sup>[21-22]</sup>。

针对上述优化方案的要求,以质量最小为优化目标函数,屈曲特征值为约束条件进行连续体结构的拓扑优化,数学模型可由式(3)~(5)表达。

Find: 
$$\rho = \{\rho_1, \rho_2, \rho_3, \cdots, \rho_n\} \in \Omega_\circ$$
 (3)

$$\min m = \sum_{i=1}^{n} \rho_i v_i \, o \tag{4}$$

subject to: 
$$\frac{1 \leq U_{\max};}{0 < \rho_{\min} \leq \rho_i \leq 1, (i = 1, 2, 3, \cdots, n)_{\circ}}$$
(5)

式中: $\Omega$ 为整个结构的设计区域, $\rho$ 为设计变量, $\rho_i$ 为相对密度, $v_i$ 为相对体积,m为目标函数,即脱壳机质量, $U_{max}$ 为最大屈曲特征值。

#### 4.2 拓扑优化结果分析

在 Topology Optimization 模块中材料属性、约束条件与负载的设置和屈曲分析相同。优化区域设定为机架;优化目标设定为去除 25% 的材料,设定完成后进行拓扑分析。

优化结果如图 5 所示。优化后的模型导入 Eigenvalue Buckling 模块中,求解屈曲特征值和1 阶屈 曲振型,结果分别如表3 和图6 所示。









Table 3 Buckling eigenvalues after topology optimization

模态	屈曲特征值	模态	屈曲特征值
1	- 119.310	4	- 84.098
2	- 103.630	5	- 80.095
3	- 97.677	6	68.380



图 6 拓扑优化后的 1 阶屈曲振型 Figure 6 First-order buckling mode shape after topology optimization

根据拓扑优化结果,与脱壳机优化前的参数对比, 如表4所示。由表4可知,脱壳机整体质量减轻了 12.5%,最大变形量由1.244 mm 增加到1.249 mm,增 加0.4%,在合理变化范围内。拓扑优化后,屈曲特征 值由未优化前的-46.417 增加到-119.31,增加显 著,拓扑优化后的脱壳机稳定性并未降低,仍能满足正 常工况需求。

表4 脱壳机拓扑优化分析结果对比

Table 4Comparison of topology optimization<br/>analysis results of sheller

类别	质量/kg	特征值	变形量/mm
优化前	1 281.0	-46.417	1.244
优化后	1 120.7	- 119.310	1.249

#### 5 结论

1) 课题组以扇贝脱壳机为研究对象,以屈曲分析 为理论基础,运用有限元分析软件 ANSYS Workbench 中的 Eigenvalue Buckling 模块,得到了脱壳机在实际 工况下的屈曲特征值和模态振型。仿真结果表明,该 脱壳机屈曲特征值为46.417,脱壳机整体稳定性符合 使用要求,即脱壳机在实际载荷下,不会发生整体 失稳。

2) 课题组利用 Topology Optimization 模块对脱壳 机进行拓扑优化,实现轻量化目标。经过拓扑优化后, 脱壳机质量减轻了 12.5%,但屈曲特征值并未减小, 说明优化后的脱壳机仍能满足实际工况下的载荷。该 方法为脱壳机的后续实际加工生产提供了一定的参考 价值。

#### 参考文献:

- [1] 欧阳杰,张军文,谈佳玉,等. 贝类开壳技术与装备研究现状及发展趋势[J]. 肉类研究,2018,32(5):64.
- [2] 尹欣玲,孔德刚,杨淑华,等. 锯片切割式扇贝开壳试验台的设计 与试验[J]. 中国农机化学报,2016,37(5):118.
- [3] 七景刚,张静,姜海勇,等.水流加热扇贝柱脱壳试验研究[J].食

品科技,2014,39(2):139.

- [4] 谷晓翠.转盘式海湾扇贝闭壳肌剥离生产线的研制[D].保定:河 北农业大学,2018:17-32.
- [5] 尹欣玲, 弋景刚. 成形刀撑开式扇贝开壳试验台设计[J]. 江苏农 业科学,2015,43(6):413-414.
- [6] 解秋阳,王家忠,七景刚,等.利用水射流剥离海湾扇贝贝柱的方 法及装置[J]. 食品与机械,2014,30(3):91-93.
- [7] 朱其霄.海湾扇贝外套膜及脏器剥离装置的设计及试验研究
   [D].保定:河北农业大学,2015:10-16.
- [8] 林冠屹,管殿柱,宋占杰.基于 ANSYS Workbench 的机械手夹爪钢 构仿真与优化[J].制造业自动化,2020,42(11):34.
- [9] 朱帅.基于 ANSYS Workbench 多瓣抓斗颚板的有限元分析[D].
   延吉:延边大学,2014:28-30.
- [10] 闵加丰,阚伟良,朱海清.基于 ANSYS Workbench 变截面压杆屈 曲分析方法[J]. 锻压装备与制造技术,2012,47(4):70-71.
- [11] 夏秋芳.某履带起重机超起结构的力学分析及优化设计[D].沈 阳:东北大学,2015:35-37.
- [12] 余娟,余明友,金建伟,等. 基于 ANSYS 的天线杆屈曲分析[J]. 计算机与数字工程,2013,41(9):1523-1524.
- [13] 张志生.船载起重机臂架有限元分析及优化[D].镇江:江苏大学,2016:35-38.
- XU WJ. External pressure buckling analysis of large pressure vessels
   J. Journal of Physics Conference series, 2019, 1303(1):12020.
- [15] 张硕.起重机卷筒的局部稳定性分析[J].建筑机械,2017(4): 114.
- [16] 温忠宝.港珠澳大桥 CB04 标段钢箱梁吊具结构设计及有限元分析[D].大连:大连交通大学,2015:43.
- [17] 李月.高含硫天然气处理厂液硫储存系统破损分析及改进措施 研究[D].北京:中国石油大学,2016:24.
- [18] 赵璇. 高分子材料音膜/音圈激光微焊接工艺及其过程仿真研究
   [D]. 镇江:江苏大学,2019:41.
- [19] 刘俊红,刘丹,袁夏丽.某乘用车后背门屈曲稳定性分析及优化
   [J].汽车实用技术,2019(3):35-36.
- [20] 刘鸿文. 材料力学[M]. 北京:高等教育出版社,1993:282-286.
- [21] 万明磊. 基于 ANSYS Workbench 的电动城市客车车架轻量化研究[D]. 青岛:青岛大学,2015:46-47.
- [22] 王涛. 基于可制造性的汽车 B 柱轻量化设计分析[J]. 机电工程,2020,37(3):277-282.

#### (上接第85页)

- [5] 胡宝龙,胡贵华,蒋达,等.碳二加氢等温反应过程模拟与操作参数优化[J].化工学报,2015,66(1):366-372.
- [6] 石岩.基于计算流体力学对草地蝗虫吸捕机吸头工况的优化
   [D].呼和浩特:内蒙古农业大学,2008:13.
- [7] 陈婷婷.基于重型机床大型零件铣削加工性能及参数优化的研究 [D].苏州:苏州大学,2011:32.
- [8] 李文浩.某战斗部实验模型设计与气动力特性研究[D].沈阳:沈 阳理工大学,2017:38.
- [9] 徐作卢. 锚固体剪应力分布特征研究及在回采巷道中的应用 [D]. 合肥:安徽理工大学,2010:33.
- [10] 李青绵,李革,苏鸿.多槽锅式茶叶理条机锅体曲线的研究[J]. 机电工程,2019,36(3):307-310.