

受力分析提升包装结构稳定性研究

——基于材料结构与应力响应的计算模拟

陈昭莹¹ 李俏琰² 高艺嘉² 谢青西¹ 景鹏飞³

(¹ 北京师范大学文理学院, 广东 珠海 519087; ² 北京师范大学未来教育学院, 广东 珠海 519087;

³ 北京师范大学物理学系, 北京 100875)

摘要 为解决塑料食品包装的结构稳定性不足问题, 本文从力学角度探究包装结构与受压力时包装最大形变之间的关系, 对拱形结构进行受力分析, 并使用 ANSYS 有限元分析系统探究施加相同压力下不同高斯曲率与不同结构的包装的最大形变, 设计出可将最大形变减少 12.4% 的新型拱形包装结构, 从理论与数值计算两个方面验证了拱形结构对提升包装结构稳定性的可行性。本实验结果将物理理论与实际应用结合, 设计出更稳定的食品包装结构, 为包装快递行业提供技术支持与理论参考, 以减少因食品过度包装带来的环境污染。

关键词 受力分析; 包装结构; 高斯曲率; 稳定性

STRESS ANALYSIS TO IMPROVE THE STABILITY OF PACKAGING STRUCTURE COMPUTATIONAL SIMULATION —BASED ON MATERIAL STRUCTURE AND STRESS RESPONSE

CHEN Zhaoying¹ LI Qiaolian² GAO Yijia² XIE Qingxi¹ JING Pengfei³

(¹ Faculty of Arts and Sciences, Beijing Normal University, Zhuhai, Guangdong 519087;

² Faculty of Future Education, Beijing Normal University, Zhuhai, Guangdong 519087;

³ Department of Physics, Beijing Normal University, Beijing 100875)

Abstract In order to solve the problem of insufficient structural stability of plastic food packaging, this paper explores the relationship between the packaging structure and the maximum deformation of packaging under pressure from the perspective of mechanics, carries out force analysis on arch structure, and uses ANSYS finite element analysis system to explore the maximum deformation of packaging with different Gaussian curvature and different structures under the same pressure. This project designed a new type of arch packaging structure which can reduce the maximum deformation by 12.4%, and verified the feasibility of arch structure to improve the stability of packaging structure from two aspects of theory and numerical calculation. This experiment combines physical theory with practical application, designs a more stable food packaging structure, provides technical support and theoretical reference for the packaging express industry, and reduces environmental pollution caused by excessive food packaging.

Key words force analysis; packaging structure; Gaussian curvature; stability

收稿日期: 2022-07-22

基金项目: 北京师范大学校级大学生创新创业训练计划项目(X202119027057)。

通信作者: 景鹏飞, 北京师范大学物理学系助理研究员, pfjing@bnu.edu.cn。

引文格式: 陈昭莹, 李俏琰, 高艺嘉, 等. 受力分析提升包装结构稳定性研究——基于材料结构与应力响应的计算模拟[J]. 物理与工程, 2024, 34(3): 85-89, 122.

Cite this article: CHEN Z Y, LI Q L, GAO Y J, et al. Stress analysis to improve the stability of packaging structure computational simulation—Based on material structure and stress response[J]. Physics and Engineering, 2024, 34(3): 85-89, 122. (in Chinese)

固体材料在不同结构形态下的应力响应不同,了解结构与应力之间的关系,是解决建筑、产品、包装等领域设计问题的基础。各种固体和凝聚体材料的结构与应力关系研究,已成为凝聚态物理的一个重要研究方向。随着计算机技术的发展,利用计算方法进行实验设计与数值模拟来解决各种复杂结构形态的应力问题,已成为相关研究的一个核心领域。产品包装是市场广阔的应用领域,但目前国内外较少从结构、受力等方面研究产品包装的稳定性问题,市面上的塑料包装产品大部分采用方形或圆柱形设计,结构单一,不能满足特定的防渗漏、防挤压等目标要求。新的产品设计应具有特定结构形态,且以相关材料的结构形态与应力分析为基础。本项目利用 ANSYS 有限元分析系统,对塑料材料的拱形结构在不同结构参数下的应力响应进行了细致研究与分析,并在此基础上提出了新的包装产品设计建议方案。

1 包装模型的受力分析

1.1 外卖包装模型的受力分析

本研究中将外卖包装内的液体理想化为静止液体,分析液体作用在平面上的总压力大小。已知重力场中静止压强分布为(取垂直坐标与重力加速度方向一致)

$$p = p_0 + \rho g z \quad (1)$$

其中, p_0 为海平面 $z=0$ 上的大气压强。

柱体容器内水面上部压力分布均匀

$$p \times A = p_0 \times A + (\rho g z) \times A \quad (2)$$

水面下部压力为 p_0 , 因此由液体产生的力为

$$F_p = (\rho g z) \times A \quad (3)$$

即作用在水下受力斜面 A 上的静水作用力等于以该面积为底面,以该面积面的深度为高的柱体中的水重,方向垂直于斜面。

对截面为如图 1 所示倒圆台形的容器,容器形心位置为

$$y_c = \frac{1}{3} h \frac{a + 2b}{a + b} \quad (4)$$

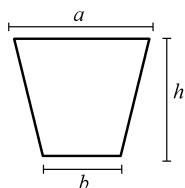


图1 斜面参数

对斜面,总压力的作用点为

$$y_p = \frac{y_c^2 A + I_{cx}}{y_c A} = y_c + \frac{I_{cx}}{y_c A} \quad (5)$$

其中, y_c 为平面形心的 y 坐标, I_{cx} 为面积对通过形心且平行于 ox 轴的轴线的惯性矩。由式(5)可知,压力的中心总位于形心的下方,随着淹没深度的增加,压力中心逐渐靠近形心。本实验中假设液体盛满整个容器,其压力中心即为形心,在分析容器受力时,仅需分析形心位置受力即可。

1.2 塑料包装容器结构设计

设计塑料包装容器时,应保证其力学性能、强度性能、密封性能与稳定性测试均达到合格标准。传统包装结构的侧面是曲率为0的斜面结构,斜面结构较易变形,稳定性较差。

拱形结构的力学特点是能够承载较大的压力。拱的结构由拱券及支座组成,在荷载作用下主要承受轴向压力,有时也承受弯矩。拱的性质使应力可以较为均匀地分布,避免集中在中央导致中央形变过大(见图2)。在受压状态下能把受到的压力分解为向下的压力和向外的推力,受力点将力传递给相邻的区域,外力沿瓶身曲面分散开,使拱形的每个部位都分担一部分力,能有效起到抗挤压的作用。

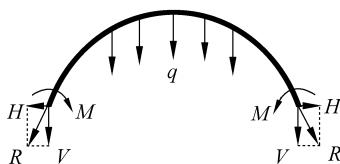


图2 拱形结构受力分析

注: q 是竖向荷载作用, V 是竖向反力, H 是水平推力, R 是轴力, M 是弯矩

2 模型设计

本文使用 ANSYS 有限元软件来建模和模拟计算。在模型设计中,考虑网格划分与曲率改变的难易程度,采用正六面体(见图3)模型近似模拟塑料包装的圆柱体结构,当立方体的边的数目足够多时,可认为立方体趋近于平滑圆柱体,使用正六面体进行静力学结构受力的有限元分析有理论依据与可操作性。在改变模型结构时,调整正六面体每个面的高斯曲率并施加压力,通过观察正六面体模型的最大形变来探究包装设计的拱形结构对应力的响应,验证拱形结构对稳定性的改进情况。

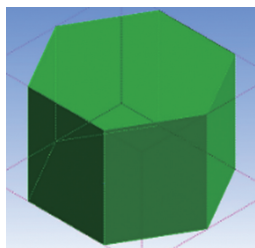


图3 正六面体模型

3 研究结果与讨论

通过市场调研,将有限元分析系统中,正六面体模型的材料设置为市面上塑料餐盒常用的材料,即塑性 PP 材料,查阅市场资料,得到材料各参数如表 1 所示。

表1 塑性 PP(均聚物、低流量)材料参数

塑性, PP(均聚物、低流量)材料			
密度	903.4 kg/m ³	比热容	1600 J/(kg · K)
杨氏模量	1.461 × 10 ⁹ Pa	拉伸屈服强度	3.46 × 10 ⁷ Pa
热导率	0.209 W/m℃	拉伸极限强度	3.762 × 10 ⁷ Pa

采用高为 0.02m,底边边长为 0.01m 的 PP 材料的平行六面体作为包装模型,建立坐标系,坐标系中心位于包装底面正六面体中心位置, z 轴指向包装顶面。仅考虑弹性形变,设包装材料均匀。在有限元分析中,改变包装模型受到的压力,施力点位于包装顶部中心位置,压力方向竖直向下,即沿 $-z$ 轴方向,改变压力的数值大小。考虑到塑料包装的塑性形变更易发生在最大形变处,以不同压力下包装模型的最大形变为标准,判断包装的稳定性。将模型进行网格划分后,将模型底面设置为固定支撑,设模型受到的标准重力加速度为 9.8066m/s^2 ,进行静力学分析。

3.1 包装侧面曲率为 0 时

改变包装受到的压力,探究不同压力下包装的最大形变情况如图 4 所示。

图 4 说明,仅考虑弹性形变,包装侧面曲率为 0 时,包装的最大形变与受到的压力正相关,最大形变与压力关系的直线拟合曲线的比例系数为 0.2984,当压力增加 1N 时,最大形变增加 $0.2984 \times 10^{-7}\text{m}$ 。

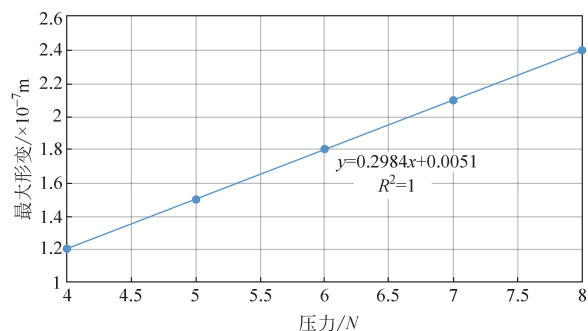


图4 包装侧面曲率为 0 时

3.2 改变包装侧面为高斯曲率时

在有限元分析中采用高斯曲率作为曲率的度量,在微分几何中,曲面上一点的高斯曲率即该点主曲率 κ_1 与 κ_2 的乘积。高斯曲率的值仅依赖于曲面上的距离如何测量,更能反映曲面在两个方向上的弯曲情况。分别对包装模型的顶部相同位置施加不同大小的压力,记录改变包装侧面曲率(如图 5 所示)时,相同压力下包装的最大形变的变化。

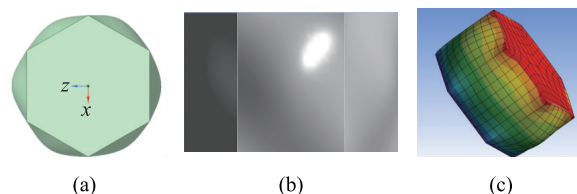


图5 改变包装侧面曲率

(a) 俯视图; (b) 主视图; (c) 有限元分析

由图 6 可知,高斯曲率越大,相同压力下的包装的最大形变越小,包装的最大形变随压力线性变化。控制模型受到的压力大小与压力的受力点不变,改变模型侧面的高斯曲率。当压力为 4N 时,研究不同曲率包装模型的最大形变变化。

如图 7 所示,对数据进行对数函数拟合后发现,增加包装侧面的高斯曲率可以减小相同压力下包装的最大形变,提升包装的稳定性。压力为 4N,当侧面高斯曲率为 $0.11/\text{mm}^2$ 时,包装的侧面最大形变减少了 10%,当侧面高斯曲率为 $0.21/\text{mm}^2$ 时,包装侧面最大形变减少了 11.5%。由数据拟合发现,包装侧面的高斯曲率与受到压力下包装最大形变的关系呈对数关系,即随着包装侧面的高斯曲率的增加,最大形变的减小速度变慢,且高斯曲率越大,包装的开模

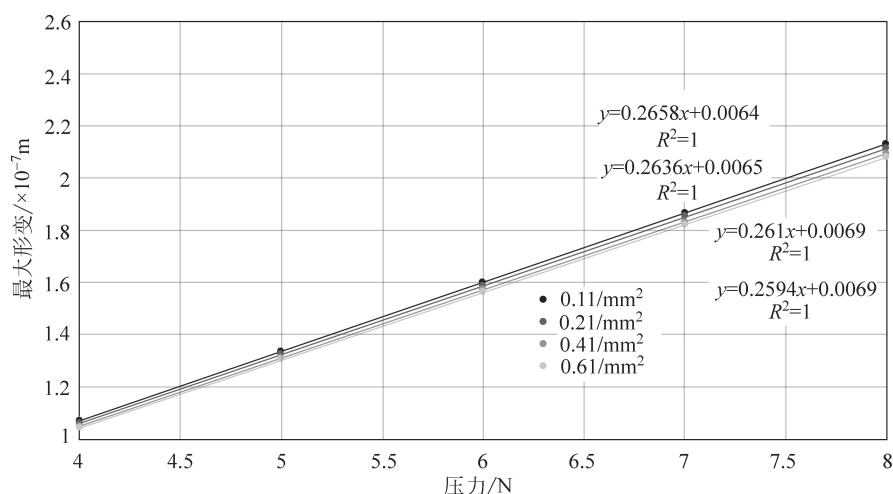


图6 改变包装侧面曲率时最大形变的变化

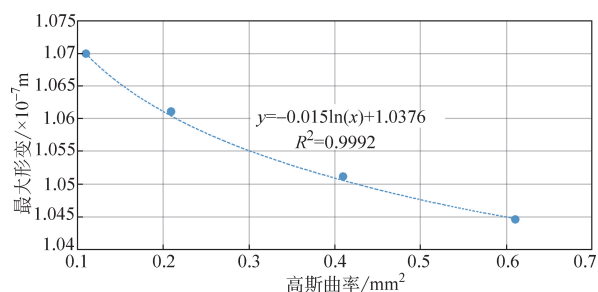


图7 压力为4N时,不同曲率模型的最大形变

难度越大,因此不能通过一直增加包装的高斯曲率提升包装的稳定性。

3.3 侧面两个方向的曲率的配合

当仅改变包装的每个面的高斯曲率时,包装的稳定性提升有限,随着每个面的高斯曲率的增加,包装的开模难度增大,为了进一步提升包装的稳定性,结合拱形结构的优势,在已有的曲率下增加小面积的大曲率部分作为包装加强筋。经过图7分析,认为在包装曲率为 $0.21/\text{mm}^2$ 时,包装的最大形变较小,且开模难度较小,因此以该曲率模型为基础,增加小面积的曲率,分析模型受到压力时的最大形变。

在原有曲率上进一步改变曲率部分面积的曲率,得到结果如表2所示。当小面积拱形曲率为 $0.221/\text{mm}^2$ 时,同一压力下模型的最大形变相较单一拱形模型减小了1.03%。且在已有拱形上增加拱形结构时,后加的拱形结构的高斯曲率的大小对减小包装最大形变的影响不大。

表2 在拱形基础上再加拱形结构

		最大形变/ $\times 10^{-7}\text{m}$		
外加拱形 高斯曲率/ mm^2	力/N	0.221	0.291	1.161
	4	1.0498	1.0493	1.0467
	5	1.3106	1.3099	1.3065
	6	1.5713	1.5704	1.5564
	7	1.8320	1.8310	1.8263
	8	2.0927	2.0916	2.0862

综合以上有限元分析结果可知,将塑料包装的侧面结构改为有曲率的拱形结构可以有效减少受到压力时的包装最大形变,从而提升模型的稳定性,在拱形结构的基础上增加进一步的拱形结构可以进一步提升模型的稳定性,但效果不大。

4 模型设计

使用3D建模软件Rhino犀牛,将通过理论分析设计的外卖包装模型可视化,得到的模型结构图如图8所示。将侧面改进为拱形结构,为了提升模型的稳定性,进一步将模型的底面进行改进,使用了较为稳定的花瓣形结构作为包装底部。

设计的模型在主体上采用碗身加盖的结构。其中模型侧壁采用对称的拱形设计,整个包装的拱形结构高斯曲率为 $0.21/\text{mm}^2$,凸起部分高斯曲率为 $0.221/\text{mm}^2$,经过有限元分析,该结构可将最大形变减少12.4%。为了保证包装的稳定

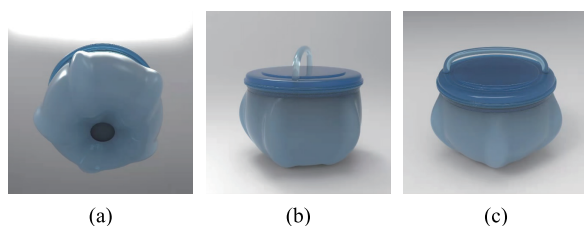


图 8 改进外卖包装整合性设计
(a) 底面结构; (b) 正面结构; (c) 顶部结构

性,底部采用花瓣形结构,通过凹陷设计和拉长筋的结构把容器内的压力在容器底部均衡分散。为方便运输,模型顶部为加装有把手的盖子,其中盖子底部设计有简单的螺纹,更好地增加了外卖盒的密闭性。盖子上加装的简易把手能够使得外卖包装在运输过程中更加便于携带,减少塑料袋在运输过程中的使用。盒子的四壁与盒子的底部转折处设计成了大曲率半径过度,防止因转折处半径过小而使得吹塑厚度不足与应力集中导致容器受挤压与跌落时的凹陷与破裂。

5 结论

本项目为北京师范大学珠海校区 2022 年大学生创新创业训练计划校级推选优秀项目(已答辩结项)。本文关注日常生活中常使用的塑料食品包装的结构稳定性问题,利用 ANSYS 有限元分析系统对塑料包装模型进行了结构改进,探究了不同曲率下包装受到压力后的最大形变的变化。通过有限元分析得出拱形结构可以提升包装的稳定性,随着高斯曲率的增大,包装的最大形变减小。本文创新性地在单一拱形结构的基础上进一步增加小面积的大曲率拱形结构,经过有限元分析发现该结构对提升包装稳定性有一定效果,且在实际生产过程中开模难度较小,最终得到当包装的拱形结构高斯曲率为 $0.21/\text{mm}^2$,凸起部分高斯曲率为 $0.221/\text{mm}^2$ 时,可将最大形变减少 12.4%,从结构上提升了塑料食品包装的稳定性,从源头上减少因包装稳定性不足导致的过度包装以提升稳定性造成的环境污染。改进的拱形塑料包装有助于节省塑料包装的原料,减少塑料污染。

本项目利用 ANSYS 有限元分析系统,对塑料材料的拱形结构在不同结构参数下的应力响应进行了细致研究与分析,将物理理论与实际应用结合,改进的塑料包装为包装快递行业提供技术

支持与理论参考,减少食品过度包装带来的环境污染,提升人民生活质量。

参 考 文 献

- [1] 熊跃龙,叶海明,杜文康,等. 物态方程曲面上临界点高斯曲率的物理意义[J]. 物理与工程, 2022, 32(4): 5-7, 23.
XIONG Y L, YE H M, DU W K, et al. Physical significance of Gaussian curvature at critical points of equation of state surfaces[J]. Physics and Engineering, 2022, 32(4): 5-7, 23. (in Chinese)
- [2] 刘利. 拱结构稳定研究的传递矩阵法[D]. 长沙: 湖南大学, 2019.
- [3] 薛璟, 张晓霞. 餐饮外卖包装盒创新设计研究[J]. 艺术科技, 2019, 32(1): 184-185.
XUE J, ZHANG X X. Research on Innovative Design of Food Takeaway Box [J]. Art Science and Technology, 2019, 32(1): 184-185. (in Chinese)
- [4] 王安霞, 侯贺维. 以用户体验为中心的外卖食品包装创新设计研究[J]. 包装工程, 2020, 41(10): 186-192.
WANG A X, HOU H W. Research on innovative design of take-away food packaging based on user experience [J]. Packaging Engineering, 2020, 41(10): 186-192. (in Chinese)
- [5] 王超颖. 压拱型预应力型钢混凝土框架试验研究及有限元分析[D]. 济南: 济南大学, 2019
- [6] 严国平, 彭震奥, 钟飞, 等. 精密包装弹性支撑缓冲系统振动特性修正模型及分析[J]. 振动与冲击, 2021, 40(22): 251-258.
YANG P, PENG Z A, ZHONG F, et al. Precision packaging correction model and elastic buffer system vibration characteristics analysis[J]. Journal of Vibration and Shock, 2021, 40(22): 251-258. (in Chinese)
- [7] 苏潇阳, 朱国敬, 康厚军. 具有弹性转动约束的斜拉桥多索-浅拱模型及其面内自由振动分析[J]. 地震工程与工程振动, 2021, 41(3): 75-85.
SU X Y, ZHU G J, KANG H J. Multi-cable-shallow arch model and in-plane free vibration analysis of cable-stayed bridge with elastic rotation constraint[J]. Earthquake Engineering and Engineering Vibration, 2021, 41(3): 75-85. (in Chinese)
- [8] 雷家艳, 崔怡观, 周志成, 等. 刚性吊杆拱桥主要受力构件冲击效应差异性[J]. 厦门大学学报(自然科学版), 2022, 61(4): 600-607.
LEI J Y, CUI Y G, ZHOU Z C, et al. Difference of impact effects of Main stressed members of rigid derrick arch bridge [J]. Journal of Xiamen University (Natural Science Edition), 2022, 61(4): 600-607. (in Chinese)
- [9] 胡雅芬, 赵增辉, 付靖宇. 从一道力学竞赛题解析扭曲变形效应对梁应力分布的影响[J]. 力学与实践, 2023, 45(1): 200-205.
HU Y F, ZHAO Z H, FU J Y. Analysis of the influence of distortion effect on stress distribution of beam from a mechanical competition problem[J]. Mechanics and Practice, 2023, 45(1): 200-205. (in Chinese)

(下转第 122 页)

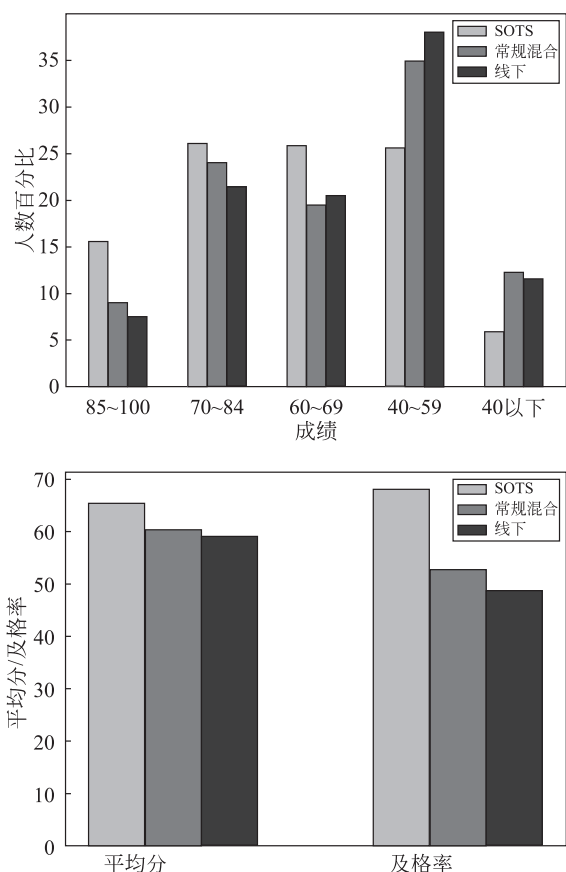


图7 三种教学模式卷面成绩对比

物理线上聊课模式让学生实现深度学习的同时培养了其自我学习的能力。主观题作业电脑全批全改对学生和教师都形成及时的学情反馈,一方面使教学持续改进的闭环得以实现,另一方面也使得教师从低质量的重复劳动中得以解放,给教师从事高质量育人工作开创了空间。按照学习活动周期,从十分钟左右的一小节学习互动到一学期的期末考试的“五个一”的全过程考核激励机制,对学生倒逼效果明显。

参 考 文 献

- [1] 史旭光.“慕课”的兴起与高校教学的发展[J]. 中国林业教育, 2022, 40(2):1-5.
SHI X G. The rise of “MOOCs” and the development of higher education teaching[J]. Forestry Education in China, 2022, 40(2): 1-5. (in Chinese)
- [2] 邓莉,张亚培.“互联网+”时代中国高校慕课的发展现状及主要问题[J]. 牡丹江大学学报, 2016, 25(11):185-187.
DENG L, ZHANG Y P. The current situation and main problems of the development of Chinese universities' MOOC in the era of “Internet plus”[J]. Journal of Mudanjiang University, 2016, 25(11): 185-187. (in Chinese)
- [3] 仲英济.“互联网+”时代人工智能慕课大数据应用平台在高等教育中的应用[J]. 教育科学, 2021(12):3.
ZHONG Y J. The application of artificial intelligence MOOC big data platform in higher education in the era of internet plus[J]. Educational Science, 2021(12): 3. (in Chinese)
- [4] 龚晖.“慕课”在疫情中找到了差距[J]. 高等工程教育研究, 2021, No. 188(3):146-151.
GONG H. MOOCs have found gaps in pandemic period[J]. Research in Higher Education of Engineering, 2021, 188(3): 146-151. (in Chinese)
- [5] 何跃,龚代军. 大学慕课助教困境及其破解[J]. 山西能源学院学报, 2022, 35(1):27-29.
HE Y, GONG D J. The dilemma and solution of university MOOC teaching assistants[J]. Journal of Shanxi Institute of Energy, 2022, 35(1): 27-29.
- [6] 刘晓燕,徐颖,马川,等.“慕课”在高校中的发展及其面临的问题[J]. 教育现代化, 2018, 5(12):175-176.
LIU XY, XU Y, MA C, et al. The development of MOOCs in universities and the challenges they face[J]. Education Modernization, 2018, 5(12): 175-176. (in Chinese)
- [7] 邓莉,张亚培.“互联网+”时代中国高校慕课的发展现状及主要问题[J]. 牡丹江大学学报, 2016, 25(11):185-187.
DENG L, ZHANG Y P. The current situation and main problems of the development of Chinese universities' MOOC in the era of “internet plus”[J]. Journal of Mudanjiang University, 2016, 25(11): 185-187. (in Chinese)
- [8] 龚晖,江晓禹,张娟,等. 材料力学在线考试技术的研究与实践[J]. 西南交通大学学报(社会科学版), 2023, 24(S1):98-107.
GONG H, JIANG X Y, ZHANG, et al. Research and practice on online examination technology of materials mechanics[J]. Journal of Southwest Jiaotong University (Social Sciences Edition), 2023, 24(S1): 98-107. (in Chinese)
- [9] 龚晖,李永强. 慕课:风已起,潮将至[J]. 中国大学教学, 2018, 339(11): 21-25.
GONG H, LI Y Q. MOOC: The wind has risen, and the tide is approaching[J]. Teaching in Chinese Universities, 2018, 339(11): 21-25. (in Chinese)

(上接第 89 页)

- [10] 张伟,康元顺,崔哲华,等. 基于正交试验方法的大型有面外支撑杆 X 撑结构的屈曲分析和优化设计[J]. 工程力学, 2022, 39(S1):261-271.
ZHANG W W, KANG Y S, CUI Z H, et al. Buckling

analysis and optimization design of large X-braced structure with out-of-plane support based on orthogonal test method [J]. Engineering Mechanics, 2022, 39(S1):261-271. (in Chinese)