

基于组合优化策略的热封机构设计

薛兵财, 石秀东, 张丹静, 梁小龙

(江南大学, 无锡 214122)

摘要: **目的** 通过组合优化策略对热封机构进行结构优化设计。**方法** 建立热封机构有限元参数化模型和多目标优化模型,通过动力学有限元分析获得热封机构结构强度薄弱环节,并采用最优拉丁超立方实验设计对影响热封机构结构强度的主要参数进行研究,分析参数与应力位移之间的响应规律,构造基模型对热封机构进行基于组合优化策略的结构优化设计,取多岛遗传算法和序列二次规划法组合的优化策略逼近最优解。**结果** 组合优化过程中的校正决定系数接近1,模型的结构应力最大值和位移最大值均降至许用范围内。**结论** 对热封机构优化设计采用组合优化策略可行,结果可信度高,效果明显。

关键词: 热封机构; 最优拉丁超立方实验设计; 组合优化策略; 多岛遗传算法; 序列二次规划法

中图分类号: TB486⁺.2

文献标识码: A

文章编号: 1001-3563(2014)05-0067-06

Optimal Design of Sealing Mechanism Based on Hybrid Optimization Strategy

XUE Bing-cai SHI Xiu-dong ZHANG Dan-jing LIANG Xiao-long

(Jiangnan University, Wuxi 214122, China)

ABSTRACT: **Objective** To optimize the structure of sealing mechanism by hybrid optimization strategy. **Methods** The finite element parametric modeling and multi-objective optimization model of sealing mechanism were established. The structure weaknesses of the sealing mechanism were found out through dynamic finite element analysis. And Optimal Latin Hypercube Design (Opt LHD) was used to study the main parameters affecting the structural strength, the response regularity between the parameters and stress and displacement was analyzed. The base model was built with the help of Opt LHD and was used to optimize the sealing mechanism based on Hybrid Optimization Strategy which contained Multi-Island Genetic Algorithm (MIGA) and Non-linear Programming by Quadratic Lagrangian (NLPQL) Algorithm. **Results** Adjusted R Square was close to 1 in hybrid optimization. The maximum stress and the maximum displacement were decreased to the allowable range. **Conclusion** Optimal design for sealing mechanism with hybrid optimization strategy is feasible, the result is highly reliable and the effect is apparent.

KEY WORDS: sealing mechanism; Opt LHD; hybrid optimization strategy; MIGA; NLPQL

高频热封是用高频电流的电极板压住待封薄膜,同时使薄膜由内向外升温,达到热熔状态后加压封合^[1]。高频感应加热具有加热温度高、效率高、速度快、温度容易控制、作业环境好等优点,因而广泛地应用于包装行业中纸铝塑等复合包装材料的热封合。热封机构长期高速循环的工作,可能出现设备结构的疲劳损坏,影响工作可靠性和稳定性,甚至出现安全

事故。目前国内外研究的重点都集中在如何提高机构使用效率的问题上。如赵惠文基于配重方法对横封机构进行了平衡研究^[2];乔峰丽等人基于运动学对横封机构进行了仿真研究^[3];Tsujii Tetsuya研究了温度因素对热封的影响^[4];李雷对热封机构的磁场、温度场及高频电源进行了研究^[5];Suramya D等人进行传热建模并对线性低密度聚乙烯层进行了研究^[6];李

收稿日期: 2013-11-17

作者简介:薛兵财(1987—),男,安徽人,江南大学硕士生,主攻机械动态设计及多学科优化。

通讯作者:石秀东(1965—),男,安徽人,博士,江南大学副教授,主要研究方向为食品加工装备、机械装备动态设计技术。

志忠等人对高频感应加热的电源电路进行了设计^[7]。对于高速运转的热封机构的结构强度和结构参数化优化问题的研究并不多见。

基于上述情况,文中对砖型袋包装机械中的热封机构进行了实体建模和有限元建模,并进行动力学有限元分析。在此基础之上,进行实验设计,对影响热封机构可靠性的主要参数进行研究,以热封机构结构参数为自变量,以响应中的应力、位移可行域为约束条件,以结构参数值最小为目标函数,建立优化模型,结合组合优化策略对热封机构进行结构优化,获得了合理的优化参数,为热封机构多目标参数综合设计提供理论参考。

1 组合优化策略理论

优化设计首先将实际问题转化为标准格式的抽象数学模型,再选择合适的优化策略,最后通过计算机求解获得最优化的设计方案。组合优化策略是以优化设计理论和优化设计方法为基础,将 2 种或 2 种以上的优化方法叠加使用,从而避免全局算法耗时成本高问题和梯度算法易落入局部最优解的弊端,实现优点互补。

一个好的初始基模型,可以为优化设计节省大量的成本与时间,文中基于原始模型,采用最优拉丁超立方实验设计^[8-9](Opt LHD),对影响热封机构结构强度的主要参数进行研究,分析参数对应力位移与设置参数之间的响应规律,并提供有利的基模型数据。在此基础上,选用多岛遗传算法^[10-11](MIGA)和序列二次规划法(NLPQL)组合策略^[12]对基模型进行优化。组合优化方法流程见图 1。

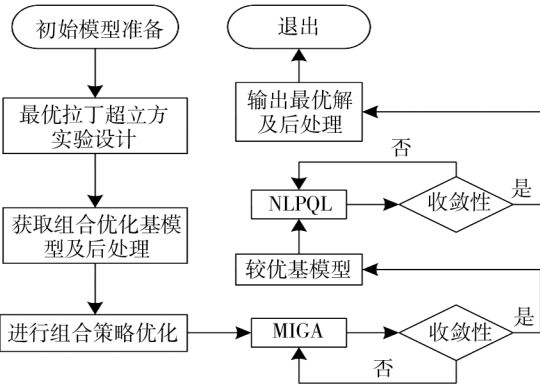


图 1 组合优化策略流程
Fig. 1 Flow chat of Hybrid Optimization Strategy

2 热封机构动力学有限元分析

热封机构有限元模型(见图 2)由主动刀架(含轴段 1)、被动刀架(含轴段 2)、连杆、销轴 1、销轴 2、纸铝塑材料共同组成。热封机构的运作过程为:主动刀架在拉力作用下绕其轴旋转,并通过连杆将运动传递给被动刀架,使得主动刀架和被动刀架相向运动,夹紧纸铝塑材料实现封口,且在接触后夹紧力迅速上升。

定义材料属性,除纸铝塑材料是复合材料外,其他部件均为 0Cr18Ni9 不锈钢;设置安全系数为 1.5;建立接触关系对;设置轴承位约束,并在施力处施加随时间变化的 6.16 MPa 的压力(见图 3),其中 $t_0 = 0.0306\text{ s}$, $t_1 = 0.4\text{ s}$;建立任务并送入求解器,对其进行动力学有限元分析。

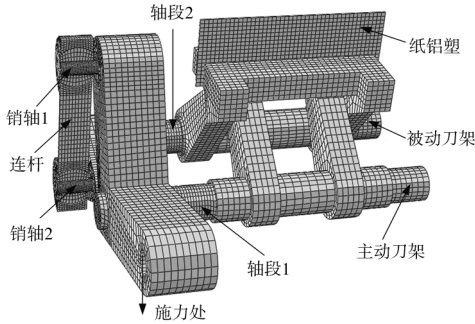


图 2 热封机构的有限元模型
Fig. 2 The finite element model of sealing mechanism

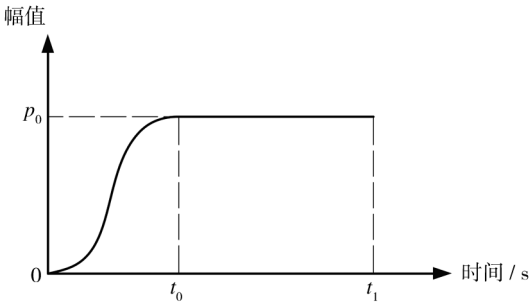


图 3 载荷-时间曲线
Fig. 3 Load-Time curve

经过分析,结果见图 4—5,后处理时,发现销轴 1、销轴 2、轴段 1 和轴段 2 处应力均大于 0Cr18Ni9 不锈钢的许用应力 $[\sigma] = 114\text{ MPa}$ ^[13],且位移超过允许最大位移 $[\mu] = 0.23\text{ mm}$,易造成夹头压力的不精确,需要对薄弱环节进行加强。

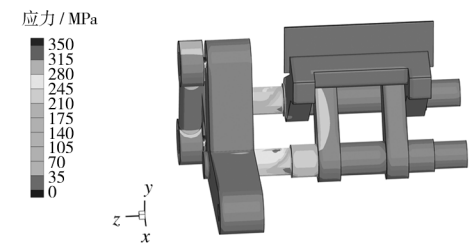


图 4 热封机构应力云图
Fig. 4 Stress of sealing mechanism

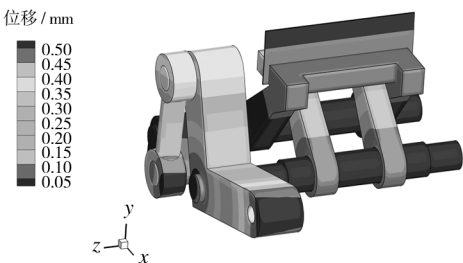


图 5 热封机构位移云图
Fig. 5 Displacement of sealing mechanism

3 热封机构基模型

3.1 热封机构数学模型的建立

在这个过程中,对于销轴 1 和销轴 2,主要是受到横向力作用下的切应力,对于轴段 1 和轴段 2,主要承受的是旋转扭矩带来的切应力。由材料力学相关理论,应力值和位移值都与直径参数息息相关,由此建立热封机构结构强度优化的数学模型为:

Minimize $F(X)$

Where $X=(d_{11},d_{12},d_{21},d_{22},\sigma_{\max},\mu_{\max})^T$

$12\text{ mm}\leq d_{11}\leq 22\text{ mm}$

$25\text{ mm}\leq d_{12}\leq 40\text{ mm}$

Subject to $\sigma_{\max}\leq[\sigma]=114\text{ MPa}$

$\mu_{\max}\leq[\mu]=0.23\text{ mm}$

$d_{11}=d_{21}$

$d_{21}=d_{22}$

(1)

式中: $F(X)$ 为目标函数; d_{11} 为销轴 1 直径; d_{12} 为销轴 2 直径; d_{21} 为轴段 1 直径; d_{22} 为轴段 2 直径; $\sigma_{\max}$ 为应力最大值; $\mu_{\max}$ 为位移最大值。

3.2 热封机构响应研究

为了分析销轴 1,2 和轴段 1,2 对热封机构结构强度的影响,采用 Opt LHD 方法在可行域上均匀采取样

本点,为输出变量的总均值提供 1 个无偏估计,即 $E(A(x_i))=E(A)$,且方差 $D(A(x_i))$ 最小^[14]。经过 46 次有效计算,获取可行域上因子和响应精确拟合的近似变化规律,并选取有利的基模型。运算后得到了反应每个因素对响应的贡献程度的 Pareto 图(见图 6)、基于方差分析的主效应图(见图 7)、阐述某 2 个因子交互性对响应的影响关系和程度的交互效应图(见图 8)。

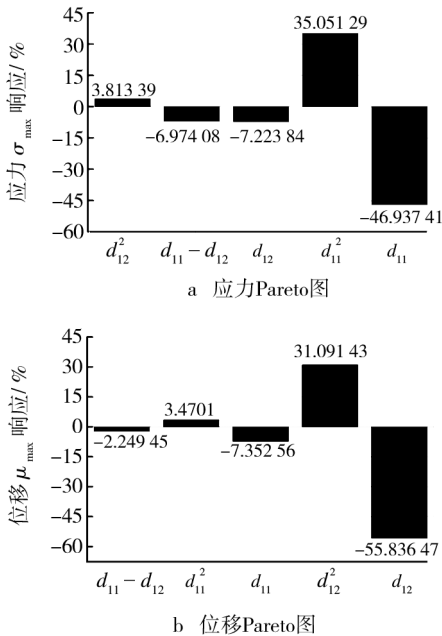
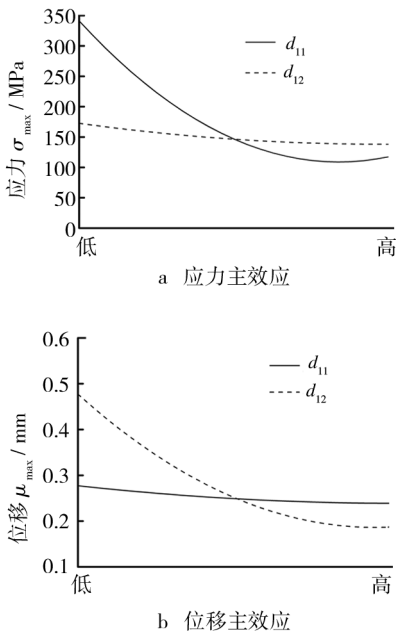


图 6 Pareto 图
Fig. 6 Pareto Graph



b 位移主效应

图 7 主效应

Fig. 7 Main Effect Graph

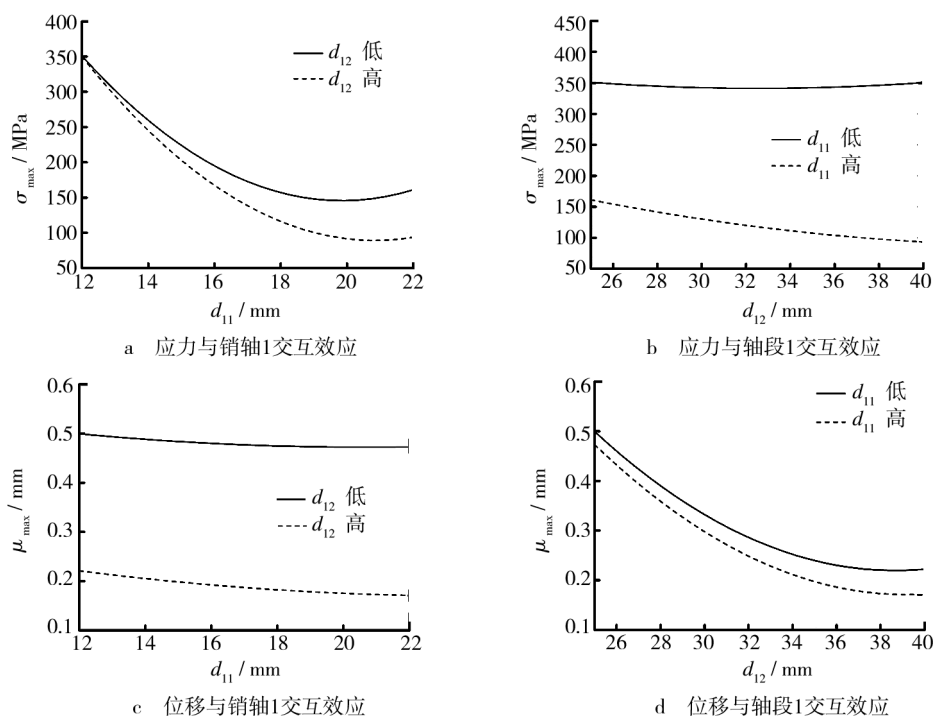


图 8 交互效应
Fig. 8 Correlation Graph

从 Pareto 图 6 中可以看到,销轴 1 直径 d_{11} 的增大会对应力最大值 $\sigma_{\max}$ 产生负效应,但是对位移最大值 $\mu_{\max}$ 的负效应较弱;轴段 1 的直径 d_{12} 增大对应力最大值 $\sigma_{\max}$ 产生的负效应不明显,但是对位移最大值 $\mu_{\max}$ 的负效应显著。从主效应图 7 中可以看到,对销轴 1 直径 d_{11} 单一因子而言, d_{11} 逐渐增大过程中,应力最大值 $\sigma_{\max}$ 迅速减小,且在接近销轴 1 直径最大值处有逆势增大迹象,位移最大值 $\mu_{\max}$ 也有降低,但坡度较缓;与销轴 1 直径 d_{11} 的影响相反,轴段 1 的直径 d_{12} 单独作用时,随着 d_{12} 由小增大,应力最大值 $\sigma_{\max}$ 有下降趋势,但是不明显,而位移最大值 $\mu_{\max}$ 显现出急剧下降的特点。从交互效应图 8 中,可以发现销轴 1 直径 d_{11} 、轴段 1 的直径 d_{12} 与应力最大值 $\sigma_{\max}$ 、位移最大值 $\mu_{\max}$ 之间都存在交互效应,但是交互效应较弱。

3.3 热封机构基模型构造

通过 Opt LHD 实验设计并对结果进行方差分析(见表 1),分析结果中,应力与位移的决定系数分别为 $R^2_{\sigma_{\max}}=0.9424>0.9$, $R^2_{\mu_{\max}}=0.9950>0.9$,均为高度精确,在整个可行域范围内有效,因此接受分析的结果,组合优化时的基模型选用 $d_{11}=d_{21}=19.44\text{ mm}$, $d_{12}=d_{22}=33.62\text{ mm}$ 的热封机构模型。

表 1 方差分析结果
Tab.1 Analysis of Variance

应力方差分析						
方差来源	自由度	离差平方和	均方	F 比	校正决定系数	
因素	5	251 202.86	50 240.57	130.83	0.9424	
误差	40	15 360.32	384.01			
总和	45	266 563.18				
位移方差分析						
方差来源	自由度	离差平方和	均方	F 比	校正决定系数	
因素	5	0.3535	0.0707	1580.4184	0.9950	
误差	45	0.0018	0			
总和	50	0.3553				

4 热封机构组合优化

以销轴 1 直径 d_{11} 、销轴 2 直径 d_{12} 、轴段 1 直径 d_{21} 和轴段 2 直径 d_{22} 为自变量,以应力最大值 $\sigma_{\max}$ 和位移最大值 $\mu_{\max}$ 可行域为约束条件, $d_{11}, d_{12}, d_{21}, d_{22}$ 直径最小为目标函数,对热封机构的基模型进行基于 MIGA 算法和 NLPQL 法组合优化策略的参数设置。MIGA 考虑多个种群且互有迁移,优化时对问题可行域空间进行编码,模仿生物进化过程中“适者生存”的

规律和遗传机制,通过迭代从新种群中获取含有最优解或较优解的组的区域;再利用 NLPQL 处理中、小规模非线性规划问题的优异性能,对优化问题局部寻优,获取最优解,最后设置多目标优化过程中的权重系数并启动软件求解,优化结果见表 2,二次多项式响应面^[15]误差分析结果见图 9。

表 2 热封机构优化结果

Tab.2 Optimization result of sealing mechanism				
	d_{11}	d_{12}	$\sigma_{\max}$	$\mu_{\max}$
	/mm	/mm	/MPa	/mm
原始模型	12	25	219.885	0.313
基模型	19.44	33.62	108.499	0.226
组合策略优化	19.34	33.37	110.919	0.23

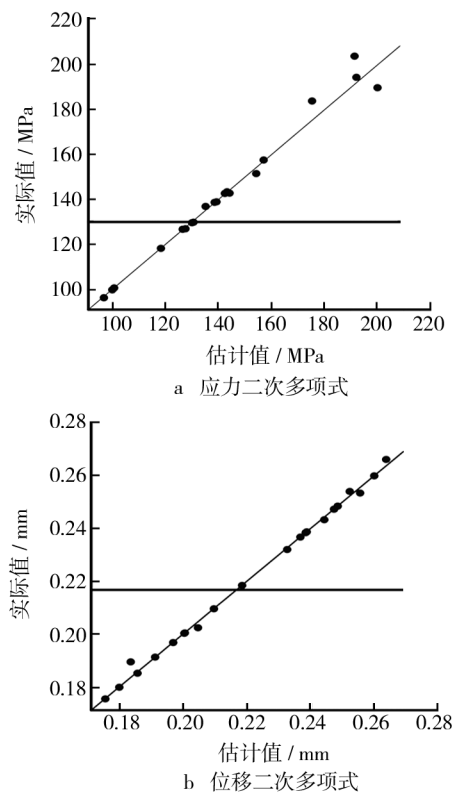


图 9 二次多项式响应面误差分析

Fig.9 Quadratic response surface error analysis

由图 9 可见,评估点均匀地分布在坐标系的角平分线两侧,且查看多项式二次回归分析显著值 $P_{\sigma_{\max}} = 0.0216 < 0.05$, $P_{\mu_{\max}} = 0.0035 < 0.05$,回归模型显著。校正决定系数 $\bar{R}_{\sigma_{\max}}^2 = 0.9845 > 0.9$, $\bar{R}_{\mu_{\max}}^2 = 0.9997 > 0.9$,均高度接近 1,因此评判表 2 中所得优化结果高度可信,接受优化结果。从表 2 结果看,基模型与最终优化结构中参数差距不大,表明基模型已有较好的

精度,Opt LHD 方法为组合优化提供了较好基模型,加快了计算进程。相对于原始模型,优化后最大应力和最大位移有明显降低,均降至许用范围以内,符合材料力学关系,优化效果明显。

5 结语

通过最优拉丁超立方实验设计,得到了影响热封机构结构强度因素与应力、位移之间的关系曲线,构造了组合优化设计时的基模型。结果表明,热封机构应力主要受销轴 1 和销轴 2 直径大小的影响,位移主要受轴段 1 和轴段 2 直径大小的影响。通过多岛遗传算法和序列二次规划法结合的组合优化策略,获得了最优销轴 1、销轴 2、轴段 1 和轴段 2 的尺寸组合,热封机构的应力和位移符合设计要求。

参考文献:

[1] 杜锦才,王晓平. 电磁感应加热技术在包装工程中的应用[J]. 包装工程,2005,26(5):21—23.
DU Jing-cai, WANG Xiao-ping. Applications of Electromagnetic Induction Heating Technology in Packaging Engineering[J]. Packaging Engineering,2005,26(5):21—23.

[2] 赵惠文,杜文华,段能全,等. 枕式包装机横封机构的动力平衡研究[J]. 包装工程,2013,34(15):78—81.
ZHAO Hui-wen, DU Wen-hua, DUAN Neng-quan, et al. Dynamic Balancing of Traverse Seal Mechanism of Pillow-style Packaging Machine[J]. Packaging Engineering,2013,34(15):78—81.

[3] 乔峰丽,苗鸿宾. 包装机横封机构仿真研究[J]. 包装工程,2008,29(1):75—77.
QIAO Feng-li, MIAO Hong-bin. Simulation on Traverse Seal Mechanism of Packaging Machine[J]. Packaging Engineering,2013,34(15):78—81.

[4] TETSUYA T, ISHIAKU U S, MACHIKO M, et al. The Effect of Heat Sealing Temperature on the Properties of OPP or CPP Heat Seal I Mechanical Properties[J]. Journal of Applied Polymer Science,2005,87(3):753—760.

[5] 李雷. 高速包装机感应加热封合问题的研究[D]. 上海:上海交通大学,2011.
LI Lei. The Study in Induction Heating Sealing of High-Speed Packaging Machine[D]. Shanghai:Shanghai Jiaotong University,2011.

[6] SURAMYA D, MIHINDUKULASURIYA, LIM L T. Heat Sealing of LLDPE Films; Heat Transfer Modeling with Liquid Presence at Film-film Interface[J]. Journal of Food Engineering,

- 2013,116:532—540.
- [7] 李志忠,虞龙,王志强. 新型半桥串并联谐振高频感应加热封口机电源[J]. 电力电子技术,2008,42(5):42—44.
LI Zhi-zhong, YU Long, WANG Zhi-qiang. New Half-bridge Series-parallel Resonant Power Supply for High Frequency Induction Heating Sealing Equipment[J]. Power Electronics, 2008, 42(5): 42—44.
- [8] 刘晓路,陈英武,荆显荣,等. 优化拉丁方试验设计方法及其应用[J]. 国防科技大学学报,2011,33(5):73—77.
LIU Xiao-lu, CHEN Ying-wu, JING Xian-rong, et al. Optimized Latin Hypercube Sampling Method and Its Application[J]. Journal of National University of Defense Technology, 2011, 33(5): 73—77.
- [9] FABIAN F, JOHANN S. Decomposed Surrogate Based Optimization of Carbon-fiber Bicycle Frames Using Optimum Latin Hypercubes for Constrained Design Spaces[J]. Computers & Structures, 2013, 119: 48—59.
- [10] 李文钊,高敏,刘俊涛. 基于自适应遗传算法的弹药单元包装的优化设计[J]. 包装工程,2008,29(2):67—69.
LI Wen-zhao, GAO Min, LIU Jun-tao. Optimized Design of Ammunition Unit Packaging Based on Self-adaptive Genetic Algorithm[J]. Packaging Engineering, 2008, 29(2): 67—69.
- [11] MENG Xiang-zhong, SHI Xiu-hua, DU Xiang-dang. Application of MIGA to Multi-objective Optimization in Active Vibration Control[J]. Modern Applied Science, 2007, 1(2): 24—26.
- [12] ZHANG Yan, XIE Ji-long. Truss Structural Optimization Based on NLPQL and MIGA[J]. Applied Mechanics and Materials, 2013, 365—366: 150—154.
- [13] GB 150.2—2011, 钢制压力容器[S].
GB 150.2—2011, Steel Pressure Vessels[S].
- [14] 王东衡,石秀东. 基于综合策略的金属簧片阻尼隔振器参数优化[J]. 机械设计,2011,28(7):34—38.
WANG Dong-heng, SHI Xiu-dong. Parameter Optimization of Metal Plate Spring Damping Isolator Based on Comprehensive Strategy[J]. Journal of Machine Design, 2011, 28(7): 34—38.
- [15] 李俊承,张思才,张方晓. 基于响应面法的刀口金属密封结构优化设计[J]. 包装工程,2012,33(5):32—35.
LIU Jun-cheng, ZHANG Si-cai, ZHANG Fang-xiao. Optimization Design of Knife-edge Metals Sealing Structure Based on Response Surface Method[J]. Packaging Engineering, 2012, 33(5): 32—35.

(上接第45页)

- [7] 陶慧君,盖作有. 塑料制袋机的科学发展及技术创新[J]. 饮料工业,2010,13(10):42—45.
TAO Hui-jun, GAI Zuo-you. Scientific Development and Technological Innovation of Plastic Bag Making Machines[J]. The Beverage Industry, 2010, 13(10): 42—45.
- [8] 姜久红,朱若燕,杨明涛. 多列立式袋成形包装机的自动纠偏控制[J]. 包装工程,2004,25(4):187—188.
JIANG Jiu-hong, ZHU Ruo-yan, YANG Ming-tao. Intelligent Deviation Rectifying Control of the Multi-row-Vertical-forming Packaging Machine[J]. Packaging Engineering, 2004, 25(4): 187—188.
- [9] PETRONI A, PANCIOLOLI B. Innovation As a Determinant of Suppliers' Roles and Performances: An Empirical Study in the Food Machinery Industry[J]. European Journal of Purchasing & Supply Management, 2002, 8(3): 135—149.
- [10] 戴远敬. 立式袋成形包装机中常用拉膜机构分析[J]. 包装与食品机械,1999,17(1):7—9.
DAI Yuan-jing. Analysis on the Conventional Film-drawing Mechanisms in Vertical Bag-forming Packaging Machine[J]. Packaging and Food Machinery, 1999, 17(1): 7—9.
- [11] 尚锐,何云芳,张祯,等. 基于 ANSYS 的立式袋包装机有限元分析[J]. 辽宁工业大学学报(自然科学版),2012,32(6):397—400.
- SHANG Rui, HE Yun-fang, ZHANG Zhen, et al. Finite Element Analysis of Vertical Bag Packing Machine Based on ANSYS[J]. Journal of Liaoning University of Technology (Natural Science Edition), 2012, 32(6): 397—400.
- [12] 张改梅,仵季红,郭福宾. 基于 ANSYS /LS-DYNA 的易拉罐跌落研究[J]. 包装工程,2011,32(5):4—6.
ZHANG Gai-mei, WU Ji-hong, GUO Fu-bin. Drop Analysis of Pop Can Based on ANSYS /LS-DYNA[J]. Packaging Engineering, 2011, 32(5): 4—6.
- [13] OKAMOTO N, OHTANI K, MISAWA K, et al. Study on Velocity Characteristics and Mechanics of Paper Feeding with Rubber-covered Roller Drive[J]. Transactions of the Japan Society of Mechanical Engineers, Series C, 2001, 67(654): 475—482.
- [14] TAMAMOTO J, YOSHIDA K. A Paper-transport Mechanism Using Tapered Rubber Rollers to Generate Cross-directional Tractive Force[J]. Microsystem Technologies, 2003, 9(8): 567—572.
- [15] YANABE S, ENDO M, NAKANISHI M. Wrinkle Occurring Process of a Paper Fed to a Fixing Roller Unit in Printers and Copiers[J]. Journal of Environment and Engineering, 2011, 6(1): 28—40.