

凹印机烘干装置风嘴横风板结构参数研究

张海燕, 刘金金, 徐卓飞, 侯和平

(西安理工大学, 西安 710048)

摘要: **目的** 研究凹印机烘干装置风嘴横风板结构参数与风场分布的关系,以提高烘干系统热风利用效率。**方法** 通过流体力学输纸模拟计算,对比仿真计算分析不同宽度横风板风嘴的风场,选取风场的迹线图和承印物表面的压力分布为主要评估标准,分析了涡流、迹线和压力分布随横风板长度的变化规律。**结果** 随着横风板长度的增加,涡流逐渐向承印物表面接近,迹线在承印物表面处密度增加,承印物表面整体压力略有下降,压力分布更加均匀。**结论** 在风嘴出风口区域增加横风板有利于提高热风利用率,可使承印物表面风场分布更加均匀。为凹印机烘干风嘴结构设计及优化提供了理论依据。

关键词: 风嘴;凹印机;横风板;结构参数

中图分类号: TH122 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-3563(2014)23-0094-06

Structural Parameters of Cross-wind-board for Drying Nozzle in Gravure Printing Machine

ZHANG Hai-yan, LIU Jin-jin, XU Zhuo-fei, HOU He-ping

(Xi'an University of Technology, Xi'an 710048, China)

ABSTRACT: **Objective** To study the relationship between the length of cross-wind-board of nozzle in gravure printing and the heated air filed, in order to improve the hot wind utilization efficiency of the drying system. **Methods** The wind filed of drying nozzle with different length was analyzed through fluid simulation calculation. Trajectories and pressure distribution were taken as the evaluation parameters to study the fluid field, and the variation rules of vortex, trace and pressure distribution with the length of cross-wind-board were analyzed. **Results** It was found that cyclone became closer to the substrate surface and trajectories became more concentrated with the incensement of length of cross-wind-board. Meanwhile, the pressure decreased slightly and the distribution was more uniform. **Conclusion** It was proved that the cross-wind-board could improve the utilization efficiency of hot wind and make the distribution of wind field on the substrate surface more even. This work provides theoretical reference for the structural design and optimization of the drying nozzle in gravure printing machine.

KEY WORDS: air nozzle; gravure printing machine; cross wind board; structural parameters

凹版印刷与食品安全、药品运输、广告传媒、涂布加工等行业密不可分,在工业生产和经济发展中起着重要作用。凹印机是实现凹版印刷的核心设备,主要用于完成各类薄膜材料、特种纸带、特殊包装等材料的印刷,实现油墨向各类承印物的转移,这类设备在

国内研究较晚,其核心技术大多从国外引进。随着凹印机印刷速度和质量要求的不断提高,烘干装置的效率成为限制凹印发展的瓶颈^[1-3]。

凹印机烘干装置主要由风机、风管、烘箱体和风嘴等部分组成。在烘干过程中,空气经加热后由风机

收稿日期: 2014-07-02

基金项目: 陕西省科学技术研究发展计划项目(2014K07-03)

作者简介: 张海燕(1957—),女,北京人,西安理工大学教授、硕士生导师,主要研究方向为印刷机设计与仿真、印刷机故障诊断技术和印刷图像处理。

引入风管,最后经风嘴吹向承印物表面以完成油墨的干燥。相关学者与企业对烘干系统各个环节进行了深入研究,黄颖为等^[4]通过对热风温度、速度以及油墨含量的实现分析,建立了印品对流干燥参数与溶剂残留量的数学模型,但相关研究局限性较强,在不同场合难以适用;刘健等^[5]根据凹印机烘箱,建立了干燥装置中风嘴的三维流体流动数学模型,获得了风嘴出风场分布,研究发现风嘴出风不均匀且存在湍流,为风嘴的风场优化提供了基础;武吉梅等^[6,7]对凹印机烘箱进行分析并优化了相关参数,应用流体力学对烘箱内部热风进行了运动学、动力学及能量分析,对各个风嘴出风速度进行了对比,提出了烘箱的改进设计方案;白文华等^[8]对印刷涂布设备的烘箱喷嘴冲击流场进行了分析,研究了风嘴高度、宽度与壁面附近流射速度之间的规律,但对于流场的评价缺乏有效标准。从相关的研究内容看,还存在一些不足之处:一是由于需要加热空气导致烘干系统能耗极大,其消耗能源约占整机一半甚至更多。烘干系统最终的风场分布在很大程度上由风嘴决定,若对风嘴进行合理的结构设计可有效优化风场并提高烘干效率;二是当前研究多集中在整个烘干系统中,对于风嘴、管道等基本部件分析不足,缺乏对风场的评价方法和指标;三是缺乏关键参数与风场性能之间的规律研究,企业设计烘箱依靠经验,缺乏理论支撑。

为了解决上述不足,对烘干风嘴结构进行了优化研究,提出了一种添加横风板的改进结构,并对横风板长度、烘干距离等关键参数与风场分布的规律进行探究,通过统计量特征对风场性能进行了评估。

1 分析方法

主要采取流体数值仿真计算(Computational Fluid Dynamics, CFD)进行分析验证,基本思想是将连续的物理场划分成离散的小区域并分别求解,在热风控制方程的基础上,导入热风流动模型和边界条件,分析得到复杂流场内部不同位置上的速度、温度、压力和流量等物理量的分布情况,以及这些物理量随时间变化的规律,从而评估风嘴结构的效果,为其结构设计提供依据。热风在风嘴内部运动遵循流体运动规律,符合质量、动量和能量守恒定律,由此可以得出基本控制方程,再根据热风在风嘴内的雷

诺数,判断出热风在风嘴内为湍流状态,因而还应附加考虑湍流方程^[9-11]。

1.1 质量守恒方程

质量守恒方程又称为连续性方程,它表示单位时间内,流体微元中质量的增量等于同一时间间隔流入该微元体的净质量,其微分形式可表示为:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial(\rho u)}{\partial x} + \frac{\partial(\rho v)}{\partial y} + \frac{\partial(\rho w)}{\partial z} = 0 \quad (1)$$

式中: ρ 为流体密度; u 、 v 和 w 分别为流体在 x 、 y 和 z 方向上的速度。

1.2 动量守恒方程

动量守恒方程又称运动方程,表示单位体积流体动量变化率等于作用的所有外力之和:

$$\rho \frac{dv}{dt} = \rho F + \nabla P \quad (2)$$

式中, ρ 与 v 分别为流体密度和流体速度, F 为质量力; ∇ 为哈密顿算子; P 为应力张量; dv/dt 为流体速度的变化率。

1.3 能量方程

能量变化率等于单位时间内外力对其所做功和传给的热量之和:

$$\rho c_v \frac{dT}{dt} = \rho q + k \nabla^2 T + \Phi \quad (3)$$

式中, k 为导热系数; q 为热源项; c_v 为定容热; Φ 为耗散函数; dT/dt 为温度随时间的变化率。

2 风嘴仿真实验

2.1 风嘴模型建立

凹印机烘箱风嘴结构见图1,主要包括进风口、风嘴箱体与出风口等3个部分。3个部分完成热风的传输并最终吹向承印物,三维模型以此为主要参照建立。在三维设计软件中对其进行建模,建模尺寸参考企业实际产品。为了便于计算分析,对尺寸适当进行了简化,主要尺寸包括风嘴的总长度、出风口宽度、各个斜面角度和高度。在实际应用中,烘箱则由多个风嘴共同构成,风嘴出风口喷出来的风直接作用于基材,对基材进行烘干。

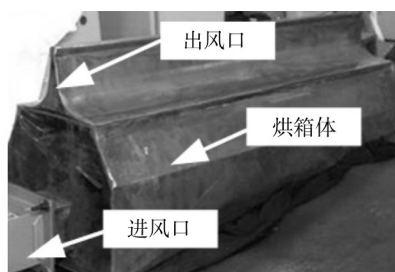


图1 烘箱风嘴实物
Fig.1 Drying nozzle

扭曲角度、纵横比和压扁程度均符合要求^[12-14]。



图3 风嘴网格划分
Fig.3 Meshing of nozzle

2.2 流体域网格划分

对风嘴进行三维建模,以评估热风在出风口附近的分布情况。除了风嘴内部区域,流体域还应当包括风嘴外围区域,将二者进行布尔运算。风嘴流体域见图2,由部分进风管、风嘴箱体、出风口以及外围区域构成。进风口设置为流体域的进口;外围区域的顶端相当于承印物的表面,其压力温度分布即为承印物表面所处的状态;两侧区域是热风散失的主要出口,故将其作为计算流体域的出口。根据实际生产经验和要求,承印物与风嘴表面的距离不宜大于10 mm,因而将其初始值设置为10 mm;考虑到热风耗散后的状态分布,将两侧延长至离风嘴两侧壁面40 mm的区域,按照原结构总宽度的1/2设置。

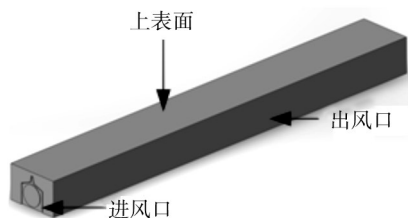


图2 风嘴流体域划分
Fig.2 Fluid filed of nozzle

确定流体域后,需根据模型特征分区域划分网格,并注意对流场中喷嘴处等速度变化较大的区域采用局部加密。使用非结构网格以消除结构网格中节点的结构限制,分别选用Hex/Wedge, Tet/Hybrid等网格单元类型进行划分,对应Cooper, Tgrid等形式扫描生成体网格,网格划分结果见图3。该喷嘴模型共划分网格2 768 059个。划分完成后在FLUENT环境中进行检查,网格体积中最大为111.1073,最小为2.007 280, Jacobian值均为正值,没有负体积出现。其

2.3 模型求解分析

完成了网格划分后,对热风在模型内流动的雷诺数进行计算,以判断热风在风嘴内部属于湍流或层流。

$$Re = \frac{\rho VL}{\mu} \quad (4)$$

式中, ρ 为流体的密度; V 为流体的平均流速; L 为圆管直径(非圆管流动时则为当量直径); μ 为流体的粘性系数。

依据实际工况对喷嘴计算:假定热风温度 t 为60℃,圆管直径60 mm,流体平均流速12 m/s,则有雷诺数 $Re=114\,544$,大于临界雷诺数 $Re_c=2320$,可以判断干燥过程中热风的流动状态为湍流,故选用精度较高的RNG $k-\varepsilon$ 模型计算^[15]。

2.4 风场分析求解

喷嘴仿真采用的参数:风嘴入口直径为60 mm,入口速度为12 m/s,喷嘴出口宽度为2~4 mm,流体域出口宽度为40 mm,喷嘴出口到气流冲击壁面间距为10 mm,承印物水平移动速度为1 m/s;壁面厚度为2 mm;热风的物理性质:空气密度 $\rho=1.225\text{ kg/m}^3$,动力黏度 $\mu=1.78 \times 10^{-5}\text{ Ns/m}^2$,比热容 $C_p=1.006\text{ kJ/(kg}\cdot\text{K)}$,热传导系数 $\lambda=0.0242\text{ W/(m}\cdot\text{K)}$ 。

完成分析运算后,会获得风嘴流体域内的风场的分布特性,通过对迹线图、风压分布的研究可对其进行评估。迹线见图4,主要反映了热风的运动轨迹;压力分布见图5,表征了不同平面内风压分布情况。对于凹印机烘干装置而言,承印物上的风场压力分布最为重要,故选取流体域上表面为分析对象。

通过图4可以发现,原风嘴迹线图在承印物下方两侧区域会形成回旋,热风在回旋处往复运动,相当

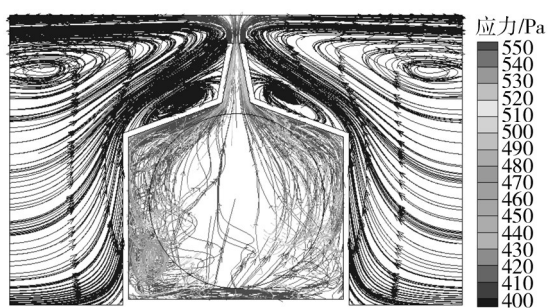


图4 原始风嘴迹线

Fig.4 The traces of original nozzle

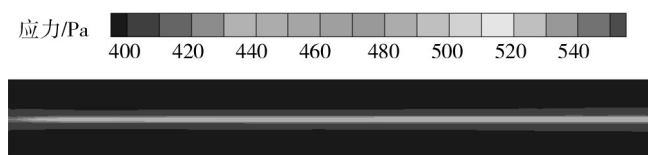


图5 原始风嘴承印物风场分布

Fig.5 The substrate pressure distribution of original nozzle

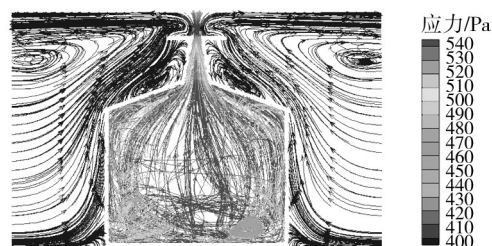
于延长了热风路径和作用时间,有利于干燥,但由于回旋中心与承印物距离较大会导致热风接触压力过小;图5描述了承印物的压力分布状态,若压力不均将会破坏印品画面的均匀性和材料的受力状态,影响烘干效果,因此压力分布应当平稳。研究选取均值和标准差对压力分布进行评价,均值代表压力的整体大小,而标准差体现了压力分布的均匀性。

3 仿真结果分析

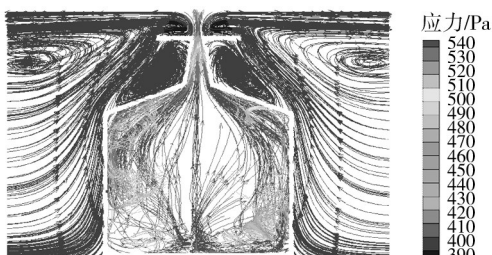
对于凹印机干燥系统而言,热风的利用效率取决于风场的分布情况。为优化风场迹线图 and 承印物压力分布,提出一种增加横风板的风嘴结构,其主要特点是在热风出风口附近区域增添了平台区域。横风板与承印物基本保持平行状态,因而二者之间的热风会形成更为明显的回旋现象;横风区域减小了热风在承印物之间的运动空间,提高了风速和风压,以提高热风利用效率。

虽然横风板的添加可以明显地对风场进行优化,但同时也存在一定弊端:如横风板尺寸不当,将会导致局部风压过大,给承印物张力控制带来困难,使得残存溶剂不能及时导出,限制溶剂的挥发而影响烘干效果。为此,对不同长度的横风板与风场分布之间的关系进行了研究,以便实现横风板尺寸的最优化设

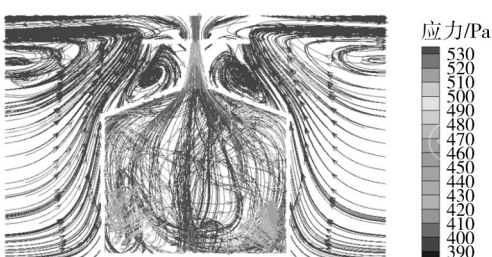
计。选取单向横风板长度为20,30,40,50,60 mm,计算不同尺寸对风场分布和性能的影响,对横风板的性能进行评估,结果见图6—7。



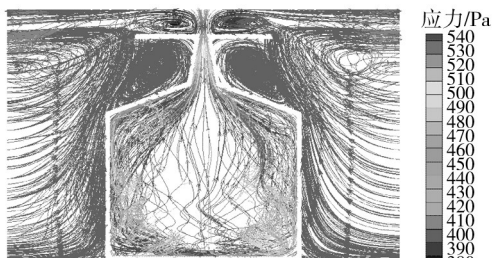
a 横风板长度20 mm



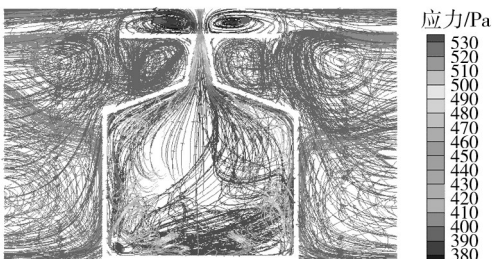
b 横风板长度30 mm



c 横风板长度40 mm



d 横风板长度50 mm



e 横风板长度60 mm

图6 风嘴迹线对比

Fig.6 The contrast of nozzle trajectories with different length

图6对比了不同横风板的热风迹线,发现热风由风

嘴喷出遇到承印物后向两端扩散,在横风板较短时(图6a和图6b),回旋距离承印物较远,回旋附近热风与承印物接触面积较小,不利于热风的高效利用;随着横风板的延长,在平台区域和承印物之间形成了新的回旋(图6d和图6e),此处迹线图密度较大,说明这种情况风速较高,故有利于热风利用效率的提高。

各种改进结构流体域上表面的压力分布见图7,其反映了承印物下表面的受压力情况,随着平台区域面积的增加,压力分布逐渐均匀。在每个平面均匀选取900个点(水平方向600个,竖直方向300个),计算其相应的均值和方差,结果见表1。从表1可以发现:随着横风板长度的增加,整体均值略有下降,这是由于回旋位置改变造成的,而整体压力的降低有利于承印

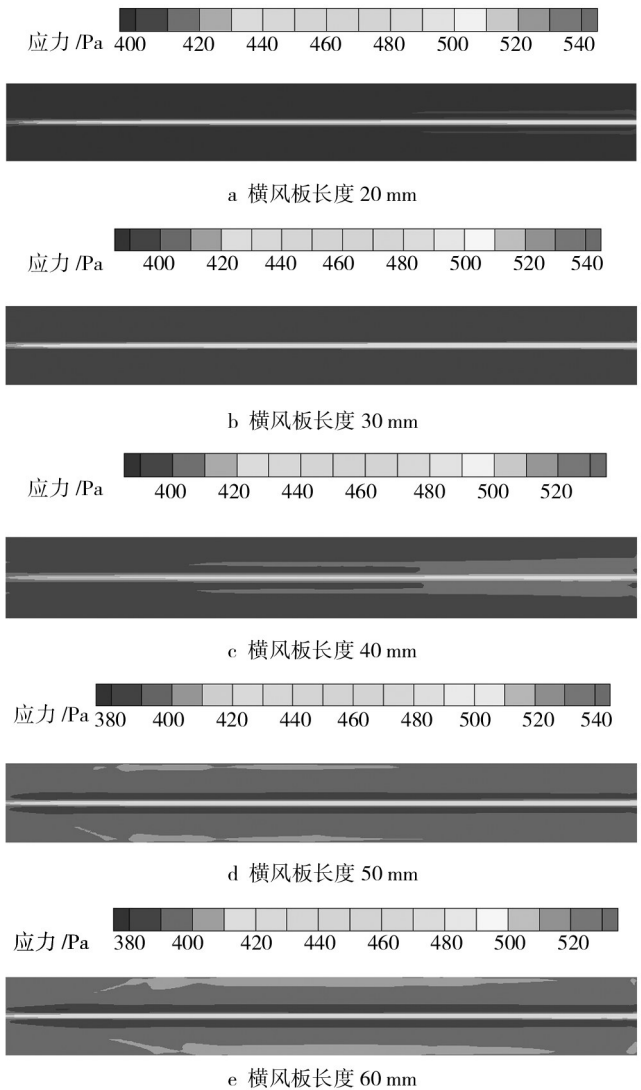


图7 承印物压力分布对比

Fig.7 The contrast of substrate pressure distribution with different length

表1 承印物压力统计参数
Tab.1 Statistical parameters of pressure

风嘴规格	均值/Pa	标准差/Pa
无横风板	454.55	70.42
20 mm 横风板	467.02	70.17
30 mm 横风板	452.24	67.72
40 mm 横风板	449.87	64.53
50 mm 横风板	449.56	63.94
60 mm 横风板	447.89	62.38

物更加平稳的运动;标准差整体也呈下降趋势,说明横风板使整个承印物表面压力场平稳性得到提高。

4 结语

通过对凹印机烘干风嘴的流体仿真计算与分析,发现风嘴具有热风利用率低和风场平稳性差等不足,针对这些问题,研究提出了一种增加横风板的风嘴,并对其宽度参数进行了对比研究。仿真结果表明:横风板可以有效改善凹印机烘干系统的热风利用效率,回旋的迹线密度在横风板处增加,回旋与承印物的接触面积也得到了提升,从而延长了热风作用时间以提高其利用效率;随着横风板变宽和面积的增加,热风场作用于承印物表面的压力会略微下降,压力场的平稳性会逐步得到改善,利于承印物更加平稳地经过烘干区域。

参考文献:

[1] ELSAYAD S, MORSY F, EL-SHERBINY S, et al. Some Factors Affecting Ink Transfer in Gravure Printing[J]. Pigment and Resin Technology, 2002, 31(4): 234—240.

[2] 黄清明, 陈芳园, 许鹏, 等. 凹版印刷机干燥系统节能减排效能研究体系构建[J]. 包装工程, 2010, 31(3): 25—28.

HUANG Qing-ming, CHEN Fang-yuan, XU Peng, et al. Study of the Energy-saving and Emission Reduction of Intaglio Press Drying System[J]. Packaging Engineering, 2010, 31(3): 25—28.

[3] RAHMAN S M A, SAIDUR R, HAWLADER M N A. An Economic Optimization of Evaporator and Air Collector Area in a Solar Assisted Heat Pump Drying System[J]. Energy Conversion and Management, 2013, 76: 377—384.

[4] 黄颖为, 冯培勇, 刘奇龙. 塑料凹印机干燥系统参数的优化研究[J]. 包装工程, 2006, 27(4): 127—128.

- HUANG Ying-wei, FENG Pei-yong, LIU Qi-long. Parameter Optimization of Drying System of Plastic Gravure Printing Machine[J]. Packaging Engineering, 2006, 27(4): 127—128.
- [5] 刘健, 张海燕, 刘琳琳. 凹印机喷嘴风速损失问题的流体动力学分析[J]. 轻工机械, 2011, 29(3): 1—3.
- LIU Jian, ZHANG Hai-yan, LIU Lin-lin. Fluid Dynamics Analysis about the Loss of the Velocity of the Air Nozzles of Gravure Press[J]. Light Industrial Machinery, 2011, 29(3): 1—3.
- [6] 武吉梅, 徐宗磊, 陈允春, 等. 凹版印刷机干燥箱流体动态分析及参数优化[J]. 振动与冲击, 2012, 31(6): 53—57.
- WU Ji-mei, XU Zong-lei, CHEN Yun-chun, et al. Fluid Dynamic Analysis and Parametric Optimization for Drying-oven of a Gravure Printing Machine[J]. Journal of Vibration and Shock, 2012, 31(6): 53—57.
- [7] 武吉梅, 申宪文, 刘琳琳, 等. 凹版印刷机 YF93 烘箱流体分析及参数优化[J]. 振动与冲击, 2013, 32(22): 63—67.
- WU Ji-mei, SHEN Xian-wen, LIU Lin-lin, et al. Oven Fluid Analysis and Parameter Optimization for Gravure Printing Machine YF93[J]. Journal of Vibration and Shock, 2013, 32(22): 63—67.
- [8] 白文华, 包能胜, 许鹏, 等. 印刷涂布烘箱 V 型条缝喷嘴冲击射流流场的输纸模拟[J]. 包装工程, 2011, 32(3): 28—32.
- BAI Wen-hua, BAO Neng-sheng, XU Peng, et al. Numerical Simulation of V-shaped Slot Nozzle Impinging Jet of Printing and Coating Oven[J]. Packaging Engineering, 2011, 32(3): 28—32.
- [9] VAN-DOORMAL J P, RATHBY G D. Enhancement of the Simple Method for Predicting Incompressible Fluid Flows[J]. Numerical Heat Transfer, 1984, 7(2): 147—163.
- [10] LIU Kun, GU Xiao-guang, BA De-chun, et al. Numerical Research on Flow Characteristics of Vortex Stage in Dry High Vacuum Pump[J]. Physics Procedia, 2012, 32: 127—134.
- [11] 樊莉丽. 喷射器流场的计算与分析研究[J]. 煤矿机械, 2014, 35(2): 90—91.
- FAN Li-li. Jet Pump Flow Field Calculation and Analysis[J]. Coal Mine Machinery, 2014, 35(2): 90—91.
- [12] CHOW P, CROSS M, PERICLEOUS K. A Natural Extension of the Conventional Finite Volume Method Into Polygonal Unstructured Meshes for CFD Application[J]. Applied Mathematical Modelling, 1996, 20(2): 170—183.
- [13] MUNSON T. Mesh Shape-quality Optimization Using the Inverse Mean-ratio Metric[J]. Mathematical Programming, 2007, 110(3): 561—590.
- [14] PARK J, SHONTZ S M. Two Derivative-free Optimization Algorithms for Mesh Quality Improvement[J]. International Conference on Computational Science, 2010, 1(1): 387—396.
- [15] 郭爱东, 姜楠. 壁湍流多尺度相干结构复涡黏模型的实验研究[J]. 力学学报, 2010, 42(2): 159—167.
- GUO Ai-dong, JIANG Nan. Experimental Research on Complex Eddy Viscosity Modeling of Multi-scale Coherent Structures in Wall Turbulence[J]. Chinese Journal of Theoretical and Applied Mechanics, 2010, 42(2): 159—167.

(上接第 46 页)

- LI Jian-hua, FU Cai-ming, XIA Ping. Optimal Design of a Conveyor Based on Modal Simulation[J]. Mechanical Science and Technology for Aerospace Engineering, 2011, 30(3): 512—516.
- [11] 陈满儒. 包装工程概论(双语)[M]. 北京: 化学工业出版社, 2004.
- CHEN Man-ru. Fundamentals of Packaging Engineering (In Bilingual)[M]. Beijing: Chemical Industry Press, 2004.
- [12] 周健, 张丽, 王保升. 缓冲材料振动传递率的测试及非线性辨识[J]. 中国现代教育装备, 2010(7): 77—80.
- ZHOU Jian, ZHANG Li, WANG Bao-sheng. Testing and Non-linear Identification of Vibration Transmissibility for Cushioning Materials[J]. China Modern Educational Equipment, 2010(7): 77—80.
- [13] 彭国勋. 物流运输包装设计[M]. 北京: 印刷工业出版社, 2006.
- PENG Guo-xun. Logistics and Transport Packaging Design [M]. Beijing: Printing Industry Press, 2006.
- [14] 陈满儒, 山静民. 美国包装结构优化设计软件 TOPS Pro 的 CASY 功能[J]. 包装工程, 2005, 26(3): 117—118.
- CHEN Man-ru, SHAN Jing-min. CASY Designs of American Packaging Software TOPS Pro[J]. Packaging Engineering, 2005, 26(3): 117—118.
- [15] Technomic Publishing Company. TOPS Pro User Guide[M]. USA: TOPS Engineering Corporation, 2003.