

包装印刷设备的风嘴流场分析及优化

黄雪梅

(江西科技学院, 南昌 330098)

摘要: **目的** 对包装印刷设备风嘴附近流场区域进行数值仿真分析, 并以此为依据对其进行外侧风嘴角度的优化。**方法** 以计算流体力学为理论基础, 按照实际设备烘箱结构进行模型构建、网格切分、数值计算、特征评估, 分析流畅特性, 并以承印物表面为依据确定最优参数范围。**结果** 获取了风嘴至承印物之间的流场分布, 并对承印物表面的温度场、速度场、压力场进行了全面评价, 获取了均值、方差、极差等主要特征。**结论** 风嘴排列结构的外侧风嘴角度对温度场、速度场、压力场分布有着明显影响, 最佳角度为 150° 或 120° 附近, 应避免出现在 135° 附近。

关键词: 凹印机; 柔印设备; 印刷烘干; 风嘴

中图分类号: TS803.6; TH122 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-3563(2017)07-0029-06

Flow Field of Air Nozzle of Package Printing Equipment and Its Optimization

HUANG Xue-mei

(Jiangxi University of Technology, Nanchang 330098, China)

ABSTRACT: The work aims to conduct a numerical simulation analysis on the flow field near the air nozzle of package printing equipment, and then optimize the angles of outside air nozzle according to the results. With the calculation of fluid mechanics as theoretical basis, model building, grid division, numerical calculation and feature evaluation were conducted according to the oven structure of the actual equipment, to analyze the characteristics of flow field. With the printed material surface as the basis, the optimal parameter range was determined. The distribution of the flow field between the air nozzle and the printed material was obtained. Moreover, an overall evaluation for the temperature field, velocity field and pressure field of the printed material surface were made. The major characteristics, such as mean value, variance and range, were obtained. As for the arrangement structure of the air nozzle, the angle of outside air nozzle has a significant influence on the temperature field, velocity field and pressure field. The best angle is near 150° or 120° , and it should not occur around 135° .

KEY WORDS: gravure printing machine; flexographic equipment; drying in printing; air nozzle

在包装印刷中, 凹印、柔印、涂布等工艺流程都与烘干密不可分。随着包装印刷设备自动化程度与生产效率的提高, 各类卷筒纸包装印刷速度已达到 400 m/min 以上。油墨具有一定的厚度, 若不能及时干燥, 将会相互蹭脏, 导致印刷速度无法提高。油墨的干燥效率在很大程度上限制了印刷速度的提升, 基于这样的考虑, 在墨层厚度较大的凹印、柔印设备中, 都安装了专用的烘干系统, 用于保证印刷品的快速干燥, 类似装置在具有一定厚度的涂布工艺中也普遍应用^[1-5]。

凹印机、柔印机、涂布机的烘干系统较为相似, 主要包括风机、加热装置、风管、烘箱、尾气处理装置等。风机将空气引入烘干系统, 由加热装置提升空气温度, 之后经由风管到达烘箱, 在烘箱体中实现干燥。多余尾气经有机废弃物处理后排放或回收, 实现印刷或涂布过程的干燥。根据上述烘干工作流程不难发现, 烘箱是完成烘干的关键部分^[6-7]。烘箱主要包括风嘴、导风板、箱体等部件, 其中箱体主要起密闭作用, 导风板的功能是保证进风能够均匀进入风嘴进

收稿日期: 2017-02-14

基金项目: 江西科技学院 2013 年重点学科项目

作者简介: 黄雪梅 (1976—), 女, 硕士, 讲师, 主要研究方向为机械制造及自动化、数值计算仿真。

风口,风嘴则最终决定风场的温度、速度、压力分布,因此风嘴结构是烘箱的核心部件。无论是传统烘箱或悬浮烘箱,其风嘴参数都是优化设计的关键对象,大量学者对其进行了研究。

黄清明等^[8]系统探讨了节能减排效能体系构建的问题,指出国内凹版印刷干燥系统的关键部件参数一般采用经验设计或参照国外的设计,缺少基础理论研究。刘健等^[9]通过流体动力学的计算来模拟热风在风嘴内的流动状态,为干燥装置的优化改进提供理论依据,分析了风嘴内部的涡流区域,并总结了喷嘴出风口的风速与风压关系,为风嘴出风口局部优化提供了理论基础。张海燕等^[3]人通过数值仿真计算,对凹印机烘箱风嘴横风板参数进行了连续对比分析与优化,改进方案取得了明显效果,进一步完善了喷嘴设计理论。武吉梅等^[10]对大型凹印机的烘箱进行了分析,对烘箱内部热风进行了运动学、动力学及能量分析,求解了各个风嘴的出风速度,并以此为依据进行了风场的评估,论证了风嘴结构对于烘干系统的重要性。

当前研究主要集中于传统的单一风嘴,对整体风嘴排列的研究不足,评价指标较为单一,对温度、速度、压力场综合评定不足。近年来随着烘箱设计方法的改进,惠普等著名国际生产商正在烘箱两侧安装具有一定歪斜角度的新型风嘴,其倾斜角度是核心参数,目前国内对这一新风嘴参数的研究并不充分。基于以上两点,文中拟针对印刷包装印刷烘箱的风嘴倾斜角度展开研究,进行多风嘴数值仿真与综合评定,实现风嘴排列结构整体优化,为提升烘干效率和改进设计方案提供理论支撑。

1 分析方法

1.1 流体数值仿真实论

流体数值仿真计算是当前烘箱结构优化的主要方法,具有成本低、优化效果直观等特点,基本思路是将连续模型划分成离散区域并分别求解。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、流量等物理量的分布规律和随时间变化情况,进而实现结构的优化与改进^[6]。热风的运动遵循质量、动量和能量等 3 个守恒定律。通常情况下以此为依据设定基本控制条件,同时还应结合雷诺系数,在边界条件中附加考虑湍流方程^[10-11]。质量守恒方程表示单位时间内,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,其方程可表示为:

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

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

动量守恒方程表示单位体积流体动量变化率等于作用所有外力之和:

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

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

能量方程见式(3),它表明能量变化率等于单位时间内外力对它所做功和传给它的热量和:

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

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^[11-12]。

1.2 热风场的评价

通常经过数值仿真计算之后,会得到热风在风嘴附近的运动与分布情况,主要包括温度场分布、速度场分布、压力场分布,这些数据对于了解风嘴的性能指标具有重要表征意义。温度、速度、压力各自属于不同范畴,其评价与计算难以统一。由于风嘴最终决定了其分布,因此风嘴附近的风场对实际烘干效果影响最大。

对于承印物烘干过程而言,一方面要求温度、速度、压力都需达到一定数值,从而保证能量的传递效率;另外一方面,要求其分布均匀,以保证印刷品表面同时干燥,否则印刷质量将会出现蹭脏、褶皱等现象,造成大量废品。数值的大小通常使用均值描述,均匀性拟采用方差与局部极差进行描述。研究拟对烘箱的速度场、压力场、温度场同时进行上述特征值计算,以衡量各个方案的优劣。

2 建模分析

2.1 仿真建模

目前烘箱大体可分为开放式与封闭式。前者热风在烘干过程中会在空气中大量耗散,其热风利用效率偏低,但结构简单且造价低廉。后者烘干后的热风绝大部分在箱体内就被完全抽走,以便二次烘干或集中处理,热风利用效率较高,但结构往往较为复杂。随着环境保护要求的提出,目前封闭式烘箱逐步占据主导地位,本次建模主要参考封闭式烘箱。文中针对一定结构的排布进行研究,所采用烘箱排布为包装印刷设备中常见的平行排布方式,风嘴间距相等。

烘箱风嘴结构的实体建模见图 1。由于烘箱多个风嘴共同决定了风场的分布,因此研究建模以实际工程图为基础,同时建立一组多风嘴排列模型。风嘴之间的相互关系可以得到较好体现,风嘴上方为进风口,下方为出风口。一般烘箱为了避免两侧热风流失,往往将其向内侧偏斜,中间部分的风嘴结构通常相同。将模型的下表面设定为边界,来表示承印物表面,

则该表面的风场情况就代表了承印物的风场分布。为获取两侧风嘴的最优角度，这里建立了 3 组模型，分别求解，以确定最优角度。所确立的 3 组角度值分别为 120°，135°，150°，这 3 组数据在实际风嘴设计中常被选用。

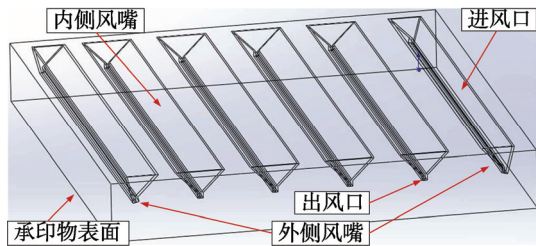


图 1 烘箱风嘴实物
Fig.1 Drying nozzle

2.2 流体域切分

在模型建立后，需要对模型进行流体域确认和网格划分，建立高质量的网格是保证运算可靠性的基础。切分网格过程中不应盲目增加网格数，以避免计算量的激增，对于重要区域可适当进行增强。文中研究的重点为两侧风嘴的倾斜角度，因此增加这一区域网格密度，以提高运算精度。为了消除网格结构性限制，采用非结构网格进行流体与切分。整个流程在 Gambit 环境中实现，采用网格类型为 Hex/Wedge 和 Tet/Hybrid。划分结果见图 2，可以看出模型内部风嘴区域密度较大，该部分对于风场的影响作用最为重要^[13]。

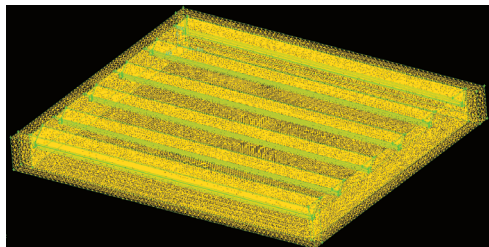


图 2 风嘴流体域划分
Fig.2 Division of fluid domain near nozzle

对其完成流体域网格切分后，需要通过网格检查，检查界面见图 3。3 组模型的网格数量、最大体积、最小体积分别记录在表 1 中。通过检查发现，网格 Jacobian 值均为正值，没有负体积出现。结合表 1，可认为扭曲角度、纵横比、压扁程度等均符合要求^[14—15]。

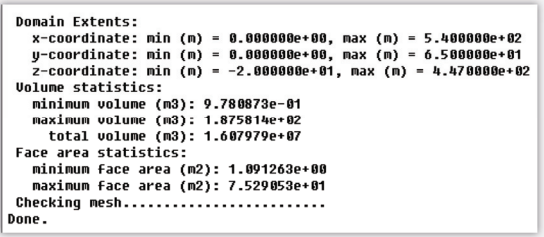


图 3 网格检查数据
Fig.3 Checking of grid

表 1 3 组模型的网格检查结果
Tab.1 Result of grid checking in 3 models

模型 编号	两侧风嘴 角度/(°)	网格数量	最大 体积/m ³	最小 体积/m ³
A	120	1 164 138	188	0.899
B	135	1 059 955	188	0.864
C	150	1 126 096	188	0.895

2.3 边界条件设定

计算前需要确定热风在流体域内的状态，可依据雷诺系数进行判断，其计算式：

$$Re = \frac{\rho v L}{\mu}$$
(4)

式中： ρ 为密度； v 为平均流速； L 为当量直径； μ 为粘性系数^[15]。

综合考虑实际工作情况，设置边界条件如下：温度 t 为 80℃，风嘴进风口速度为 1.5 m/s，风嘴进风面积为 248 cm²，出口的压强设为 -500 Pa；风嘴入风量为 372 cm³/s，喷嘴出口宽度为 2 mm，喷嘴出口到气流冲击壁面间距为 40 mm。承印物有支撑辊支撑，为简化分析，计算中予以省略。

承印物水平移动速度为 1 m/s，模拟印刷机实际生产中的带材运动状态。热风的物理参数设置：空气密度 $\rho=1.225$ kg/m³，动力粘度 $\mu=178$ mPa·s，质量热容 $C_p=1.006$ kJ/(kg·K)，传热系数 $\lambda=0.0242$ W/(m·K)。

在确定了各项参数和初始条件后，在 Fluent 环境中进行计算。根据计算残差是否收敛，来判断求解结果是否合理。依据计算结果，提取相关温度、风速、压强的分布，实现对热风场整体性能分析；提取承印物表面相关物理量数值，计算均值、方差、极差等统计特征，实现烘干效果的评估。

3 结果分析

3.1 热风场分布

根据计算结果，可获取整个烘箱体内部热风场的温度、速度、压力的详细分布情况。结合云图可对其进行评价，为了清楚展示内部关系，截取了中央位置的截面进行对比分析。图 4—6 为中心位置区域切片云图，分别表示 3 组模型中心位置的温度场、速度场、压力场，设定承印物表面从左向右运动。

3 组模型中心切片的温度分布见图 4。对比可发现，中央区域的温度较高，温度极差大约为 20 K，说明烘箱出风的温度普遍存在不均匀现象。对比 3 组模型，发现随着风嘴角度的变化，温度分布更加均匀。

3 组模型中心切片的速度分布见图 5，可以发现，在所有模型的风嘴间隔处都存在着一个明显的低风

速区域。该区域是由热风相遇后形成的气旋区域,气旋的存在可使热风在承印物表面持续经过,从而又有利于整个烘干过程。存在较为明显的气旋是烘箱风嘴排列必须具备的要素。随着模型 B, C 的外侧风嘴角度的增加,导致外侧区域气旋增大。

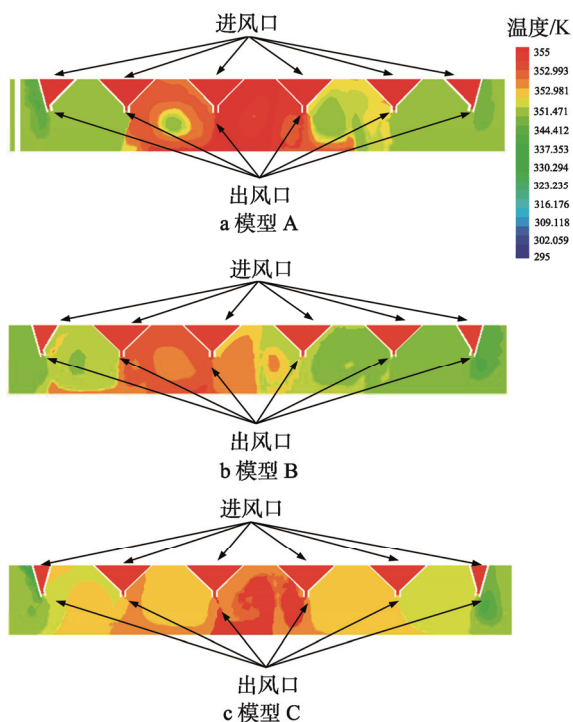


图 4 中心切片温度分布
Fig.4 Temperature distribution of central slice

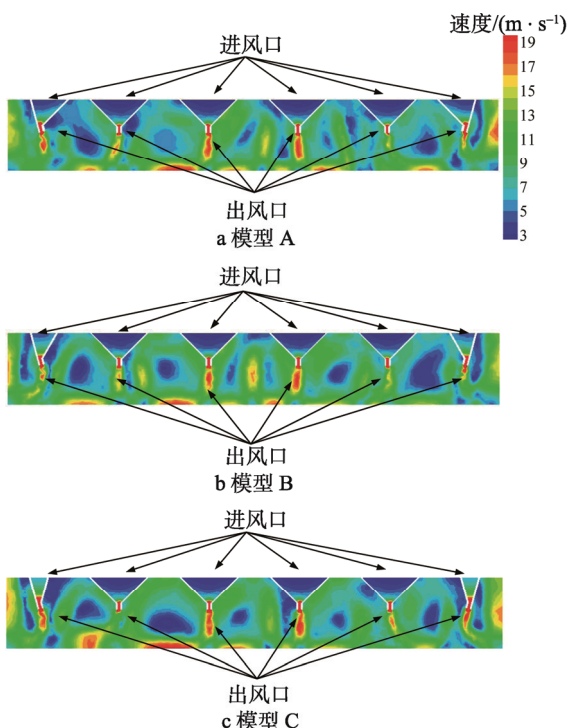


图 5 中心切片速度分布
Fig.5 Velocity distribution of central slice

3 组模型中心切片的压力分布见图 6。随着边缘区域风嘴角度的增加,中间区域的压力分布没有发生明显改变,但是两侧压强出现了明显降低。流体仿真结果可在宏观上清晰地观察热风的分布状态,对于分析评价热风场烘干实际效果、风场随角度的变化趋势提供了客观依据。若要准确评估外侧风嘴的最佳角度,仍需以承印物为对象,综合对温度、速度和压强进行定量分析。

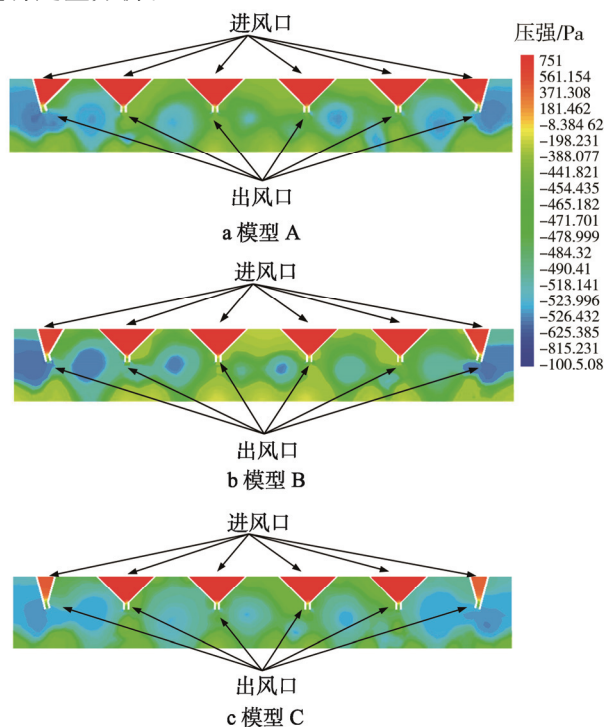


图 6 中心切片压强分布
Fig.6 Pressure distribution of central slice

3.2 承印物表面烘干效果分析

热风分布状态是初步评价设计方案合理与否的依据。由于空间热风分布合理并不能代表承印物表面分布理想,所以在实际应用中,仍要以承印物表面状态为最终标准。研究选取所建立流体域的下表面,其代表了承印物表面,从中提取参考点并计算其均值与方差,以数值仿真计算结果为依据展开最终评价。在承印物表面分别选取 3 组模型的温度、速度、压强数值,共计 9 组数据,每组均匀地在承印物表面选取 9×11 个点,其位置分布见图 7。

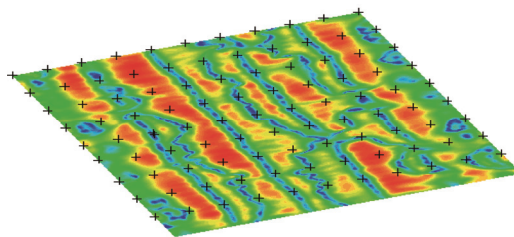


图 7 承印物表面数值选取
Fig.7 Selection of data value on the substrate surface

选取均值、方差、极差等 3 类特征值，见表 2。均值代表热风场温度、速度、压强的整体数值大小，较高的温度、速度、压强均值表示烘箱能源利用效率更高。对于烘箱，方差与极差则代表热风分布的均匀程度。

表 2 承印物表面热风特征
Tab.2 Features of hot air on the substrate surface

模型编号	两侧风嘴角度/(°)	均值	方差	极差
A-温度/K	120	345.20	135.24	43.52
A-速度/(m·s ⁻¹)	120	11.18	21.75	17.22
A-压强/Pa	120	384.50	13919	207.19
B-温度/K	135	343.51	211.17	47.04
B-速度/(m·s ⁻¹)	135	9.92	19.14	14.94
B-压强/Pa	135	378.18	8604	271.82
C-温度/K	150	345.56	123.24	41.14
C-速度/(m·s ⁻¹)	150	11.19	21.48	16.92
C-压强/Pa	150	393.56	7834	332.51

对比 3 组参数可见，外侧风嘴角度的变化并不是呈现简单的线性关系，模型 C 的均值明显较高，同时方差与极差偏低，是最优方案，A 其次，B 最差。由于热风的温度通过风速传递，而风速由于压强之间存在正相关特性，故 3 个物理量的特征值变化规律呈现出一定的相似性，模型 C 与 A 整体优越于 B。

考虑到实际加工中不可避免存在的误差，各类印刷包装类烘箱外侧风嘴的角度应当接近 150°或 120°，远离 135°附近范围，以模型 C 为最优方案，B 其次。

4 结语

对各类包装印刷设备烘干系统的风嘴分布进行了数值仿真研究，利用计算流体力学相关理论进行了建模、网格划分与计算，获取了不同参数下的热风场分布规律，并对边缘风嘴倾斜角度这一参数进行了优化，主要结论如下所述。

1) 常见风嘴排列方式下，中央区域的温度分布较高，且普遍存在不均匀现象。风嘴间隔处都存在明显的气旋区域，边缘风嘴角度的变化会改变温度、速度、压强的分布。

2) 计算分析了边缘风嘴角度为 120°，135°，150°的 3 种模型热风场在承印物表面的分布，并计算了均值、方差、极差等 3 类特征值，依据计算结果证明 150°模型的温度、速度、压力分布最优。

参考文献：

[1] 卫延斌, 侯和平, 张海燕. 悬浮烘干系统烘箱体结构

优化研究[J]. 西安理工大学学报, 2015, 31(2): 171—175.
WEI Yan-bin, HOU He-ping, ZHANG Hai-yan. Research on Drying Oven Body Structure Optimization of Suspension Drying System[J]. Journal of Xi'an University of Technology, 2015, 31(2): 171—175.
[2] 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.
[3] 张海燕, 刘金金, 徐卓飞, 等. 凹印机烘干装置风嘴横风板结构参数研究[J]. 包装工程, 2014, 35(23): 94—99.
ZHANG Hai-yan, LIU Jin-jin, XU Zhuo-fei, et al. Structural Parameters of Cross-wind-board for Drying Nozzle in Gravure Printing Machine[J]. Packaging Engineering, 2014, 35(23): 94—99.
[4] 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.
[5] 张海燕, 刘金金, 薛志成, 等. 涂布机悬浮烘箱的结构参数优化[J]. 机械设计与研究, 2015, 31(4): 142—146.
ZHANG Hai-yan, LIU Jin-jin, XUE Zhi-cheng, et al. A Research on Structural Parameter Optimization of Suspended Drying Equipment in Coating Machine[J]. Journal of Machine Design and Research, 2015, 31(4): 142—146.
[6] 谢利, 于江, 张伟, 等. 印刷工艺参数对食品纸包装中溶剂残留量的影响[J]. 西安理工大学学报, 2016, 32(3): 349—353.
XIE Li, YU Jiang, ZHANG Wei, et al. Influence of Printing Process Parameters on Solvent Residues in Food Paper Packaging[J]. Journal of Xi'an University of Technology, 2016, 32(3): 349—353.
[7] 楚红艳, 黄为, 蔡力钢, 等. 印刷过程中墨辊转速对油墨温度场的影响[J]. 北京工业大学学报, 2015, 41(11): 1699—1704.
CHU Hong-yan, HUANG Wei, CAI Li-gang, et al. Influence of Ink Roller Speed on the Ink Temperature Field in the Printing Process[J]. Journal of Beijing University of Technology, 2015, 41(11): 1699—1704.
[8] 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.
[9] 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.
- [10] 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.
- [11] 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.
- [12] DHUNNY A Z, LOLLCHUND M R, RUGHOOPUTH S D D V. Wind Energy Evaluation for a Highly Complex Terrain Using Computational Fluid Dynamics[J]. Renewable Energy, 2017, 101: 1—9.
- [13] 张敏思, 黄润秋, 王述红, 等. 基于网格划分的全空间块体识别方法及其工程应用[J]. 岩土工程学报, 2016, 38(3): 477—485.
- ZHANG Min-si, HUANG Run-qiu, WANG Shu-hong, et al. Spatial Block Identification Method Based on Meshing and Its Engineering Application[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2016, 38(3): 477—485.
- [14] WANG Shu-hong, HUANG Run-qiu, NI Peng-peng, et al. Fracture Behavior of Intact Rock Using Acoustic Emission: Experimental Observation and Realistic Modeling[J]. Geotechnical Testing Journal, 2013, 36(6): 903—914.
- [15] 卢斌, 陈子涛, 王新. 自然风下大比例模型的雷诺数效应[J]. 长安大学学报, 2014, 34(6): 85—90.
- LU Bin, CHEN Zi-tao, WANG Xin. Reynolds Number Effect of Large-scal Model in Natural Wind[J]. Journal of Chang'an University, 2014, 34(6): 85—90.