

单张纸印刷机理纸部纸张的空气动力学分析与机构优化

李双芝¹, 武吉梅², 唐嘉辉²

(1.烟台职业学院, 山东 烟台 264670; 2.西安理工大学 印刷包装与数字媒体学院, 西安 710054)

摘要: **目的** 提高单张纸印刷机理纸机构的理纸效率, 使纸张快速、平稳地降落到收纸台上, 从而提高整个印刷机的工作速度。**方法** 本文从空气动力学的角度, 对单张纸印刷机高速运行状态下待收的纸张进行受力分析, 构建单张纸印刷机理纸机构气流的空气动力学模型, 用于指导理纸机构的优化。**结果** 提出了基于空气动力学分析的胶印机理纸机构优化思路, 对南京造币公司 J20 型印刷机的理纸机构进行了优化改进。实验结果表明, 优化后的机构理纸故障率减少了 30% 左右。**结论** 该研究对印刷机理纸机构的机构设计与优化开创了一个新的思路, 此优化设计的机构收纸故障率明显降低。

关键词: 理纸机构; 纸张; 空气动力学; 射流

中图分类号: TS803 文献标识码: A 文章编号: 1001-3563(2023)09-0306-06

DOI: 10.19554/j.cnki.1001-3563.2023.09.037

Aerodynamic Analysis and Optimization of Paper Arrangement Section in Sheet-fed Printing Press

LI Shuang-zhi¹, WU Ji-mei², TANG Jia-hui²

(1. Yantai Vocational College, Shandong Yantai 264670, China; 2. School of Printing, Packaging and Digital Media, Xi'an University of Technology, Xi'an 710054, China)

ABSTRACT: The work aims to improve the efficiency of the sheet-fed printing press, and make paper fall on the delivery table quickly and smoothly, so as to improve the speed of the press. From the perspective of aerodynamics, the force of the paper to be received under high-speed operation of the sheet-fed printing press was analyzed and the aerodynamic model of the air-jet flow was constructed and used to guide the optimization of the paper arrangement section. The optimization idea of the paper arrangement section of offset press based on aerodynamic analysis was put forward. The paper arrangement section of J20 press in Nanjing Mint Company was optimized and improved. The experimental results showed that the failure rate of the optimized paper arrangement section was reduced by about 30%. This study provides a new idea for design and optimization of the paper arrangement section, which significantly improves the paper delivery efficiency.

KEY WORDS: paper arrangement section; paper; aerodynamics; air-jet flow

单张纸平版印刷机是印刷工业的骨干设备, 广泛应用于书刊印刷、新闻出版印刷、包装印刷、办公印刷和短版商业印刷等诸多领域^[1]。目前, 单张纸印刷机的工作速度基本都可达到 15 000 ~ 20 000 张/h^[2]。

然而最近十几年, 单张纸印刷机速度的提高明显遇到了瓶颈。究其原因, 作者认为, 目前国内外关于印刷机速度提高研究的重点, 大多局限在机构原理的设计和结构的改进上, 而对制约速度提高的自身以外其他

收稿日期: 2022-07-09

作者简介: 李双芝 (1969—), 男, 副教授、高级工程师、高级技师, 主要研究方向为机械设计与制造技术。

因素, 如纸张的快速有效堆积等研究不够。

收纸机构是印刷机的最后工作单元, 其主要作用是承接压印滚筒上过来的印品, 利用传送装置把印品送到收纸台上完成印刷。目前, 常见的单张纸印刷机收纸装置包括传纸滚筒、传纸机构 (传纸链条、叼纸牙排、导轨等)、理纸机构、收纸台等部位。收纸台上的理纸机构也称为齐纸机构, 作用是把落到收纸台上的印张整理平齐, 其组成包括前齐纸挡板、侧齐纸挡板、后挡纸板、纸张制动辊、压纸风扇等, 前齐纸挡板前后轻幅度地摆动, 后挡纸板固定不动, 共同将纸堆的前后理齐。侧齐纸板分左右 2 块, 它们做往复相向运动, 将纸堆的两侧推齐。纸张制动辊是吸气减速装置, 主要由吸气制动辊、吸气座、气量调节圈等机构组成, 目的是降低随收纸叼纸排传输的印张的速度。纸张脱离印刷机收纸叼纸排进入理纸状态后, 纸张在下落过程中, 在受到理纸机构部件机械作用的同时, 压纸风扇吹向纸张的风力直接作用于纸张, 侧理纸的轴流风机抽出纸下的空气形成的吸力也直接作用于纸张。此时, 纸张的初始状态、相关机构的吹吸力、外界空气的作用力等对收纸效率是起决定性作用的。

单张纸印刷机收纸机构是制约收纸效率的一个重要因素。国内学者鲁文行等^[3]、冯平^[4]在收纸链条机构的优化设计和系统动态性能上都进行了高水平的研究。目前, 国内外对脱离机构直接控制纸张下落状态的分析研究却寥寥无几。上海交通大学的张百灵^[5]研究了空气阻力影响送纸机构的仿真优化设计。燕山大学的 Pang 等^[6]研究了轻质物料空气阻力的数值模拟。诸多学者的类似研究给笔者的工作提供了思路和参考。本文通过对纸张在收纸部位进行受力和空气动力学分析, 为设计高效的印刷机理纸机构提供理论指导依据。

1 纸张进入理纸状态的空气动力学分析

图 1 是收纸装置结构简图, 可以看到, 纸张脱离印刷机收纸叼牙后进入理纸状态, 此时, 纸张的下落状态主要取决于空气动力受力情况。纸张质量非常小, 下落过程中会明显受到空气对其的浮力的作用。实践证明, 空气的浮力对纸张的收齐影响是非常大的, 这对高速印刷机的收纸是非常不利的。为了使纸张快速、平稳地降落到收纸台上, 必须在纸张的上方添加强制力, 克服下落过程中的浮力, 达到纸张快速降落的目的。添加强制力的工程方法很多, 国内外通常的做法都是采用在印张上方设置若干压纸吹风风扇, 通过操作工人观察理纸效果, 决定打开风扇的数目来控制风量, 理纸效果很差。

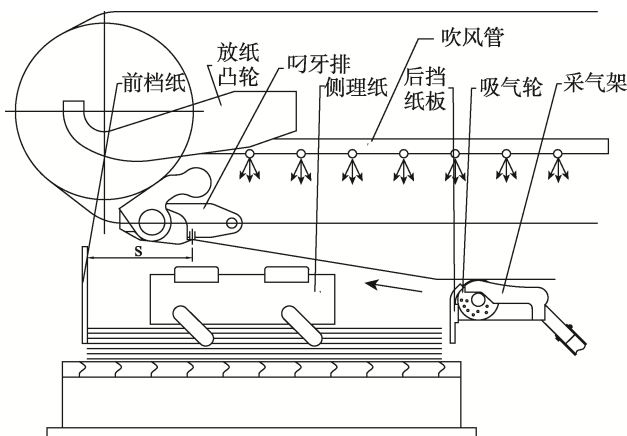


图 1 收纸装置结构简图
Fig.1 Diagram of paper delivery device

在 J20 型印刷机的设计中, 采用了吹风管吹风压纸的方法。其原理是把高压风泵吹出的空气利用风管导入收纸台上方, 在风管靠近纸张一侧开出小孔, 把高压空气喷向纸张。从小孔喷出的气流在这里称之为空气射流, 如图 2 所示。

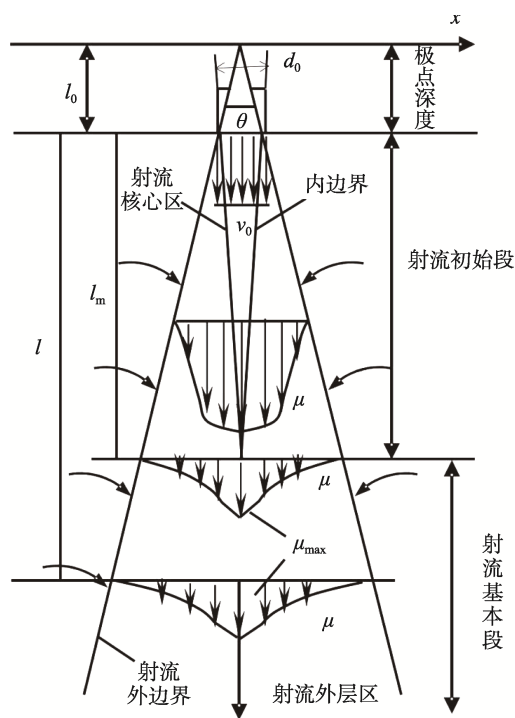


图 2 空气射流示意图
Fig.2 Diagram of air-jet flow

1.1 空气射流的淹没效应分析

从印刷机吹风管小孔中喷出的射流介质为空气, 射流周围的空间介质也是空气, 周围的空气在射流到来之前是静止不动的, 射流到来之后就会被相同的介质所淹没, 动力学称之为自由淹没射流^[7]。

如图 2 所示, 当射流气体以初始速度 v_0 从直径

为 d_0 的小孔中流出时, 气体质点会发生不规则的运动, 尤其是射流微团的横向脉动速度使其与周围介质进行质量和动量交换, 引起或带动周围介质的流动, 使射流质量和宽度增加^[8]。射流宽度加大, 而射流气体的速度会逐渐降低^[9], 最后在这一空间介质中射流的能量完全消失^[10]。由于卷吸作用, 射流能够吸引外界流体进入到其边界范围内。根据其特点, 将自由淹没射流分成几个区域:

1) 转折截面。气体射流刚出吹风管小孔时流速均匀, 随着射流流程的增加, 沿射流向周围的空气会受作用不断进入, 射流边界会不断增大, 射流能量会逐渐下降, 流速等于 v_0 的区域会不断变小。通常把速度为 0 的边界线称为射流的外边界, 射流速度 v_0 不变的边界称为内边界, 射流内、外边界之间的区域称为射流边界层区, 自射流出口, 内边界之间区域称为射流核心区^[11]。沿射流方向, 核心区不断缩小, 最后只有射流中心轴线上的流速仍为 v_0 , 把射流核心区消失的截面称为转折截面, 在该截面之后射流中心轴线上的流速开始逐渐下降。

2) 射流初始段和基本段。把射流出口至转折截面的距离称为流动形成区, 也叫射流初始段^[11], 长度为 l_m , 在该区域内既有核心区又有边界层区。在转折截面之后的区域称为射流基本段或完全发展流动区。该区域完全为射流边界层区所占据, 射流中心轴线上的速度开始下降。

3) 射流极点。射流外边界的反向长线交于 o 点, 称为射流极点, 它是吸风管小孔内部的一个几何点, 其到小孔口的距离为极点深度 l_0 。

4) 射流基本段速度分布规律。由动力学分析可知, 自由淹没射流中任一截面上横向速度 u_x 远远小于轴向速度 u_y , 则 u_x 可忽略不计。故以下讨论射流速度 u_y 时, 均以 u 代替, 射流内部流体的静压强等于周围介质的静压强^[12]。

根据射流基本段中各截面流速分布几何相似的假定, 其相似条件见式 (1)。

$$\frac{u}{u_{\max}} = f\left(\frac{x}{y}\right) \quad (1)$$

式中: u_{\max} 为射流中心轴线上的流速。射流段是相似的流速分布, 其形态具有正态分布特征, 见式 (2)。

$$\frac{u}{u_{\max}} = \exp\left(-\frac{x^2}{2C_1^2 y^2}\right) \quad (2)$$

式中: C_1 为待定常数。经相关圆孔自由紊流射流研究结果可知^[13], 式 (1)、式 (2) 中的指数流速分布符合紊流射流中的实验流速分布, 且有 $C_1=0.109$, $l_m=5.2b_0$, 则有:

$$\frac{u_{\max}}{v_0} = 2.28\sqrt{\frac{b_0}{y}} \quad x > l_0 + l_m \quad (3)$$

$$\frac{\Phi}{\Phi_0} = 0.62\sqrt{\frac{y}{b_0}} \quad x > l_0 + l_m \quad (4)$$

式中: Φ_0 为初始时单位厚度上的流量; Φ 为射流总单位流量。对射流整个截面上流速进行积分, 则有:

$$\Phi = \int_{-\infty}^{+\infty} u dx = u_{\max} \int_{-\infty}^{+\infty} f\left(\frac{x}{y}\right) dx = 0.272 y u_{\max} \quad (5)$$

1.2 射流的轴对称分析

从印刷机吹风管小孔中喷出的射流及其与周围流体介质的掺混也可以按照流动对称于射流的轴线来进行分析。假设 u 是径向坐标为 r 处的流速, 根据射流各断面上纵向流速分布具有相似性的流速分布规律, 利用如下边界条件:

$$\text{在 } r = \infty \text{ 处, } u_r = u = 0$$

$$\text{在 } r = 0 \text{ 处, } u_r = 0, \frac{\partial u_y}{\partial r} = 0$$

根据轴对称射流运动方程和连续性方程可以得到流速分布的表达式见式 (6)。

$$\frac{u}{u_{\max}} = \left[1 + \left(\frac{r^2 u_{\max}}{8 \varepsilon y}\right)\right]^{-2} \quad (6)$$

式 (6) 中, 当 $\varepsilon=0.0194xu_{\max}$ 时^[13], 按照纵坐标 y 的原点是从相似形几何原点算起, 可算出该原点到孔射流截面的距离为 $0.6d$ 。

式 (6) 的计算结果与圆形紊流射流的假设结果极为相符, 以 u/u_{\max} 为纵坐标, 以 r/y 为横坐标, 可以得到所有截面上的流速分布曲线, 如图 3 所示。

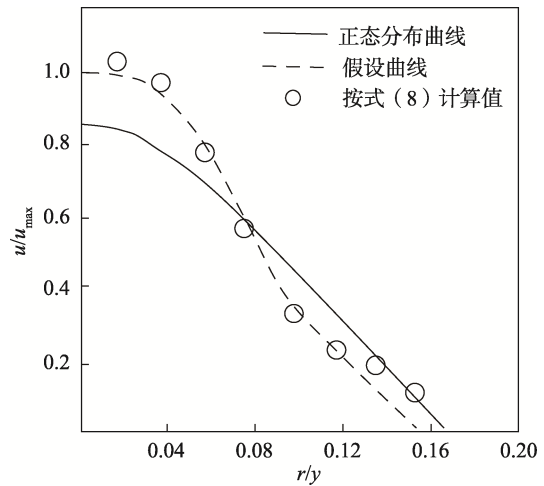


图3 流速分布曲线
Fig.3 Velocity distribution curve

因此在射流基本段内流速分布见式 (7)。

$$\frac{u}{u_{\max}} = \left(1 + \frac{r^2}{0.016y^2}\right)^{-2} \quad (7)$$

沿射流轴线上流速变化见式 (8)。

$$\frac{u_{\max}}{v_0} = 6.4 \frac{d_0}{y} \quad (8)$$

当 $y=6.4d_0$ 时, 射流从初始段变为基本段, 所以射流初始段

$$l_m = 6.4d_0 + 0.6d_0 = 7d_0 \quad (9)$$

图 3 同时也表明射流的流速分布与正态分布非常接近。

1.3 射流的附壁效应分析

由于印刷机中存在两侧机帮, 机帮墙板内壁面围成的狭小空间会对吹风管小孔喷出的射流产生限制, 形成卷吸作用^[14]。卷吸作用会降低射流周围的压强, 使得周围较远的空气向射流低压区流动, 以填补被射流卷吸走的气体, 如图 4 所示。若射流距离两侧机帮的距离不等时, 射流射出后会主要附在距离较近的机帮上流动, 使射流方向发生偏移, 形成附壁效应。如图 5 所示。

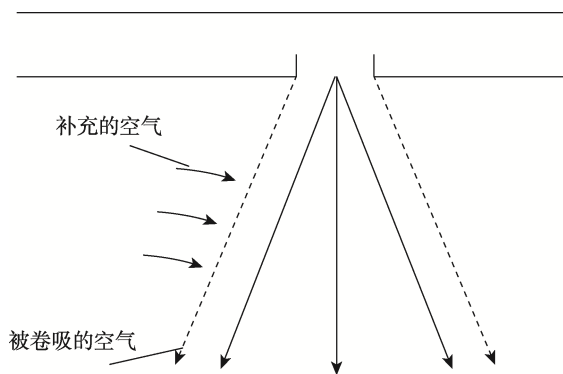


图 4 卷吸作用示意图
Fig.4 Diagram of rolling and suction action

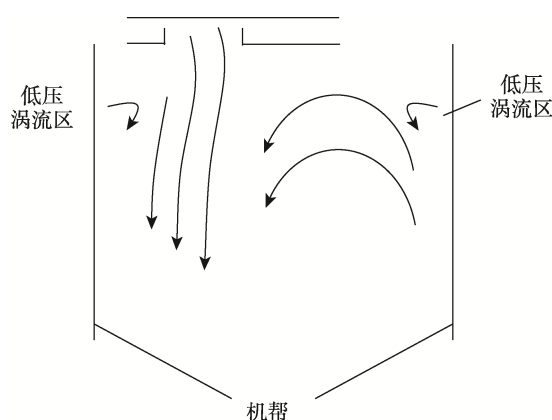


图 5 附壁效应示意图
Fig.5 Diagram of the attached wall effect

由于主射流距两侧机帮的距离不等, 较近者比较远者从外界补充空气要困难一些, 主射流的卷吸作用在同一时间被卷吸的流量应等于沿机帮形成的附加流动所补充的流量。射流在近帮侧流速大而压强小,

在远帮侧流速小而压强大。由于压强差的存在, 射流会靠近近帮侧, 最后附在近侧机帮壁上流动。最终, 在附壁点上游, 射流和附着机帮之间形成了不断卷吸又不断回流的低压涡流区。附壁效应也会给纸张的正确收取带来困难, 这也是机构优化过程中需要考虑的问题。

图 6 为利用 Fluent 软件对吹风管流场进行仿真得到的中心截面处流速分布图, 图 7 为吹风管圆心出口处速度矢量分布图。由图 6、图 7 结果可以看出, 仿真结果与本节中射流附壁效应保持一致。

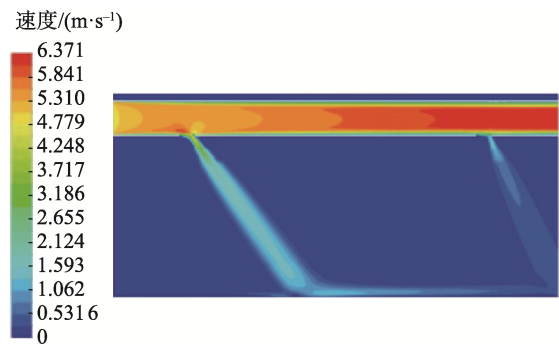


图 6 流速分布
Fig.6 Velocity distribution

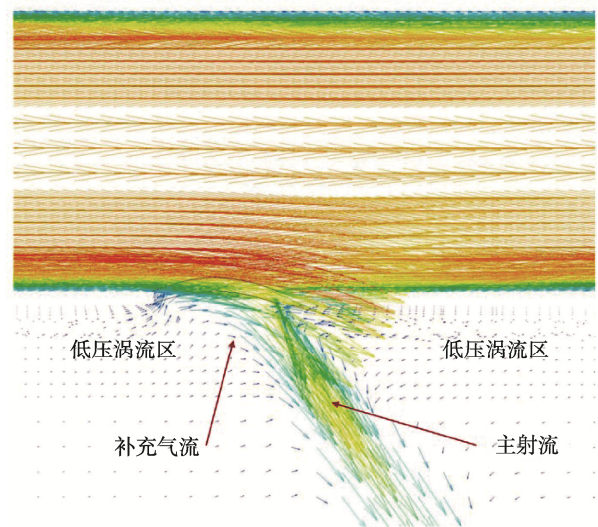


图 7 速度矢量分布
Fig.7 Velocity vector distribution

2 理纸机构的设计优化

根据上述的分析和计算, 本文确定理纸机构的优化方向: 保证纸张在任何情况下都能达到机器需求的纸张下落速度; 保证纸张平稳下落; 结构简单, 容易实施, 尽量不产生大改动, 避免引起其他问题。

2.1 调整吹风管高度

本文设计的压纸吹风机构的吹风管采用的是支

风管小孔吹风排列方式(见图1)。因机器结构的限制,吹风管必须放在链排以上位置,如果把收纸高度考虑在内,在开始收纸的某一段时间,收纸台的位置就可能超出射流基本段,使到达纸张的风速减小,导致对纸张的压力减小,因此调整吹风管高度可以使结果优化。

图8为吹风管高度简图,圆形出口射流的射出角为定值 14.5° ,按照图2可以计算出转折截面的直径为 8.9 mm 。根据图8可知,两射流孔间距为 100 mm ,所以,从转折截面直至纸面,两股射流互不干涉,保证了纸张的平稳下落。

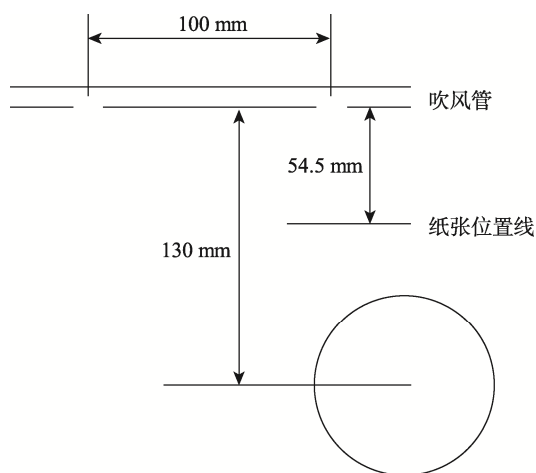


图8 吹风管高度简图

Fig.8 Brief diagram of blowpipe height

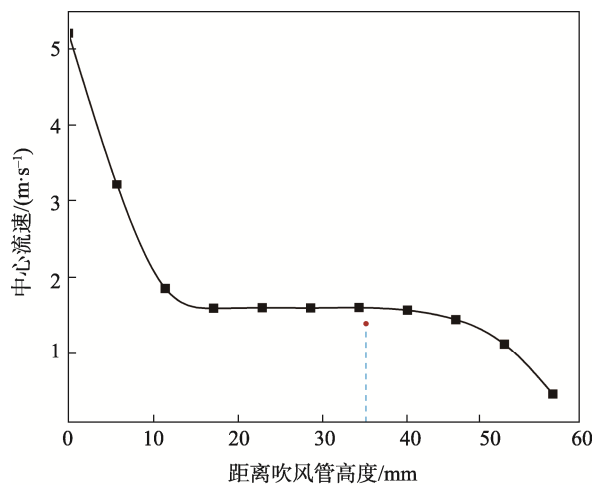
从式(9)的计算结果可以看出,当射流至7倍的射口直径时,流速开始减小,压纸吹风管上的吹风口直径为 5 mm ,则在吹风管下 35 mm 时,中心流速开始下降,吹风效果开始变差。从图8可以看出,吹风管与纸张的距离为 54.5 mm ,因机器其他结构的限制,无法降低,而这个距离已超出吹风管射流的转折截面,所以,仅通过调整吹风管高度无法满足压纸要求。

图9为仿真得到的射流中心流速与距离吹风管高度变化的分布曲线图。由图9a中曲线变化趋势可看出,射流喷出吹风管后,流速迅速下降,随后在距离吹风管 $25\sim 35\text{ mm}$ 处流速稳定,当射流到达距离吹风管 35 mm 后,流速开始下降。理论转折截面与纸张表面的流速分布如图9b—c所示。

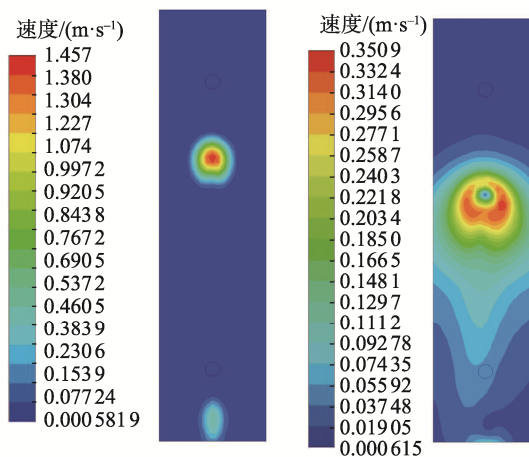
2.2 吹风管道光滑设计

经计算分析,若条件允许,通过增加射流流速便可提高纸张压力,使纸张快速下落。在气源(风泵)确定时,采用减少管路沿程阻力的方法可改变射流的出流状态,比如减少管径突变产生的碰撞损失(管径半径减小)和涡流损失(管径半径增大)。由于惯性的作用,气流经过弯道时,受弯道内外侧的增压减压形成流线分离,产生涡流损失。另外,空气在弯道

处的外侧压力大于内侧压力,高压部位气流向低压部位挤压,会在截面方向产生回流,使管道内气流呈螺旋状,产生较大的阻力,因此,保持弯曲过渡处内部光滑和管径不变都可以保证射流流速。



a 变化曲线



b 理论转折截面仿真结果

c 纸张表面仿真结果

图9 中心流速变化曲线及仿真
Fig.9 Center velocity curve and simulation

2.3 对纸张进行反向加力

在侧理纸部利用轴流风机减少纸张下方的空气量,轴流风机持续的抽取,周围的空气就被压向纸张的上方,补充了射流流量不足造成的对纸张压力的欠缺,增加了纸张的压力。还可以采用在顶部适当增设压纸风扇的方法,补充纸张受到的吹风压力,减少附壁效应,增强纸张平稳降落的效率和稳定性。

3 结语

在以往理纸机构设计中,设计者通常只注重结构试验,然后根据试验结果的优劣进行调整,但实际设计实践中,往往效果不理想。本文通过对J20型印刷机理纸状态下纸张所受压纸射流的空气动力进行分

析, 给出了理纸机构气流设计优化的计算方法和空气动力学模型, 根据本文提出的原理和模型, 对理纸机构进行了改进和优化, 理纸效果较传统结构的机型提高明显。

参考文献:

- [1] 佚名. 单张纸平版印刷机全张及以上幅面[J]. 印刷工业, 2019, 14(4): 66-79.
Anon. Sheet-Fed Lithographic Printing Machine Full Sheet and Above[J]. Printing industry, 2019, 14(4): 66-79.
- [2] 张江江. 收纸装置常见故障的再梳理[J]. 印刷技术, 2017(10): 67-69.
ZHANG Jiang-jiang. Re-Carding of Common Faults of Delivery Device[J]. Printing Technology, 2017(10): 67-69.
- [3] 鲁文行, 刘颖辉, 徐宏伟. 单张纸胶印机辅助收纸系统自动化改造方法探索[J]. 印刷杂志, 2018(8): 40-42.
LU Wen-xing, LIU Ying-hui, XU Hong-wei. Exploration on Automatic Transformation Method of Auxiliary Delivery System of Sheet-Fed Offset Press[J]. Printing Field, 2018(8): 40-42.
- [4] 冯平. 印刷机收纸链条纵向振动故障优化检测仿真[J]. 计算机仿真, 2018, 35(7): 301-304.
FENG Ping. Printing Machine Chain Longitudinal Vibration Fault Detection Simulation Optimization[J]. Computer Simulation, 2018, 35(7): 301-304.
- [5] 张百灵. 考虑空气阻力影响的送纸机构仿真及优化研究[D]. 上海: 上海交通大学, 2009: 11-12.
ZHANG Bai-ling. Simulation and Optimization of Paper Feeding Mechanism Considering the Influence of Air Resistance[D]. Shanghai: Shanghai Jiao Tong University, 2009: 11-12.
- [6] PANG Jin-fei, CAI Yun-tao, DU Guo-jun. Controlled Experimental Research and Model Design of Double-Layer High-Frequency Vibrating Screen Machine[J]. Journal of Vibroengineering, 2021, 2(23): 298-315.
- [7] PENG Guo-yi, SHIMIZU S, FUJIKAWA S, et al. Numerical Simulation of Cavitating Water Jet by a Compressible Mixture Flow Method[J]. Journal of Fluid Science and Technology, 2011, 6(4): 499-509.
- [8] 刘福平, 杨凯珍, 刘凤美. 环孔雾化器出口气体射流结构参数的研究[J]. 粉末冶金技术, 2009, 27(4): 255-258.
LIU Fu-ping, YANG Kai-zhen, LIU Feng-mei. Analysis on Structural Parameters of the Atomizer with Ring Gas Jet by Holes[J]. Powder Metallurgy Technology, 2009, 27(4): 255-258.
- [9] 程相杰, 章名耀, 韩云龙, 等. SL-II型乙烯裂解炉冷态流动特性的数值模拟[J]. 工业炉, 2006, 28(1): 4.
CHENG Xiang-jie, ZHANG Ming-yao, HAN Yun-long, et al. Numerical Simulation of Cold Flow Character in Ethylene Pyrolyzing Furnace[J]. Industrial Furnace, 2006, 28(1): 4.
- [10] 苏飞. 低温送风诱导式缩放风管优化研究[D]. 北京: 华北电力大学: 6-10.
SU Fei. Study on Optimization of Induced Contraction Duct for Low Temperature Air Supply[D]. Beijing: North China Electric Power University: 6-10.
- [11] 关振民. 空气管道出口处的负压问题[J]. 硫磷设计与粉体工程, 2001(5): 34-37.
GUAN Zhen-min. Vacuum Phenomena in the Outlet of Air Pipeline[J]. Sulphur Phosphorus & Bulk Materials Handling Related Engineering, 2001(5): 34-37.
- [12] 王文静, 赵宏欣, 潘贻芳, 等. 氧枪喷头射流的数值模拟[J]. 钢铁研究学报, 2010, 22(5): 7-10.
WANG Wen-jing, ZHAO Hong-xin, PAN Yi-fang, et al. Numerical Simulation on Flow Behavior of Nozzle Jets in Oxygen Lance[J]. Journal of Iron and Steel Research, 2010, 22(5): 7-10.
- [13] LU Z, PIRO M H A, CHRISTON M A. Mesh and Turbulence Model Sensitivity Analyses of Computational Fluid Dynamic Simulations of a 37M CANDU Fuel Bundle[J]. Nuclear Engineering and Technology, 2022, 54(11): 4296-4309.
- [14] 高玉芝. 育苗制钵机及播种装置的试验研究[D]. 沈阳: 沈阳农业大学, 2005: 7-9.
GAO Yu-zhi. Experimental Study on Seedling Pot-Making Machine and Sowing Device[D]. Shenyang: Shenyang Agricultural University, 2005: 7-9.