

doi:10.3969/j.issn.1674-7100.2016.01.008

纸浆模塑吸浆模具背腔气流均匀性的数值模拟

廖泽顺¹, 滑广军¹, 谢 勇¹, 莫灿梁², 费伟民¹

(1. 湖南工业大学 包装新材料与技术重点实验室, 湖南 株洲 412007; 2. 东莞市汇林包装有限公司, 广东 东莞 523520)

摘 要: 建立了模具背腔流场的 CFD 三维数值模型, 并且对气流分布板不同的开孔率、不同布置位置进行了数值模拟分析。结果表明: 模具背腔无气流分布板时, 背腔出口截面的速度分布很不均匀, 而添加了气流分布板后, 背腔气流分布均匀性明显改善; 随着开孔率由 5%, 15%, 20%, 25% 依次增加, 气流分布均匀性依次降低; 随着气流分布板距背腔入口 L 由 90, 100, 110, 120, 130, 140 mm 依次增加, 背腔气流分布均匀性先增加后降低, 在 120 mm 时其均匀性最好。在确定气流分布板的结构及位置的基础上, 对背腔截面突变位置进一步优化, 可减小气流的局部能量损失, 优化后出口截面的气流平均速度较优化前提高了近 11%, 进一步提高了产品脱模效率。

关键词: 纸浆模塑; 模具背腔; 气流分布板; 数值模拟

中图分类号: TB486+.3

文献标志码: A

文章编号: 1674-7100(2016)01-0041-08

Numerical Simulation of Airflow Uniformity in Pulp Molding Back Cavity

LIAO Zeshun¹, HUA Guangjun¹, XIE Yong¹, MO Canliang², FEI Weimin¹

(1. Key Laboratory of New Packaging Materials and Technology, Hunan University of Technology, Zhuzhou Hunan 412008, China; 2. Huilin Packaging Co., Ltd., Dongguan Guangdong 523520, China)

Abstract : CFD three-dimensional numerical model of the cavity flow field of the mold was established, and the numerical simulation analysis was carried out on the different open hole ratios and different layout positions of the air distribution plate. The results show that the velocity distribution in outlet cross section of back cavity was very uneven without air distribution plate, while it was obviously improved after air distribution plate was added. With the opening rate increased from 5%, 10%, 15%, 20% to 25% sequentially, the airflow uniformity decreased accordingly. With the air distribution plate location from the entrance of mold back cavity L increased from 90, 100, 110, 120, 130, 140 mm in proper order, the airflow uniformity firstly increased but then decreased, and the airflow distribution is optimum when it was 120 mm. Based on the determination of the structure and position of the air distribution plate, the position of the back cavity is further optimized, and the local energy loss of the airflow could be reduced. The average velocity of the airflow in the outlet cross section is increased by nearly 11% with further improvement in the efficiency of product release.

Key words : pulp molding ; mold back cavity ; air distribution plate ; numerical simulation

收稿日期: 2015-08-12

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(61170101), 湖南省重点研究发展计划基金资助项目(2015JC3114), 湖南工业大学研究生创新基金资助项目(cx1501)

作者简介: 廖泽顺(1989-), 男, 湖南永州人, 湖南工业大学硕士生, 主要研究方向为产品包装设计及制造,
E-mail: 778496958@qq.com

通信作者: 滑广军(1975-), 男, 河南长垣人, 湖南工业大学副教授, 博士, 主要从事运输包装技术, CAD/CAE 方面的教学与研究, E-mail: 846620681@qq.com

0 引言

随着我国对外贸易的迅速增长和社会对包装环保要求的不断提高,纸浆模塑产业作为绿色包装的重要组成部分,在全国各地迅速崛起。纸浆模塑制品的成型方式有多种,我国目前主要采用真空吸滤成型方式,其主要工序如下^[1-3]:吸浆模具吸滤形成湿纸坯—冷挤压模冷压成型—热压模热压定型—紫外杀菌及成品包装。纸塑产品在热压模具上热压定型前,需要向吸浆模具背腔压缩空气以形成正压,从而使得制品受压脱模。由于吸浆模具背腔出口截面的气流分布不均匀,导致吸附在模具上不同区域的产品受压不均匀,模具中心处的产品因受压过大而脱模较快,而四周处的产品因受压过小而不能脱模,需人为操作。产品脱模的压力不均匀不仅会降低纸浆模塑的生产效率,也会给现场操作人员带来安全隐患。

国内外关于纸浆模塑成型方面的理论研究还不够成熟,厂家基本上依靠经验对模具参数进行设计,因而对模具参数的确定有着较大的盲目性。在已有的相关研究中,王惠书^[4]研究了真空吸滤成型模具,其研究主要集中在成型模具结构设计与浆液的关系方面;刘志忱^[5]同样对真空吸滤成型模具进行了研究,其研究主要探讨了磨具在生产中的具体应用:这些研究均没有分析吸浆模具背腔参数对产品脱模压力均匀性的影响。业内其他学者们^[6-7]也针对纸塑生产的具体工艺或生产线的某些问题进行了分析,但是对于吸滤成型模具背腔结构参数的理论分析较少涉及。因此,本文拟基于ANSYS/FLOTTRAN CFD,建立吸浆模具背腔流场的三维数值模型,并且对吸浆模具背腔内部流场进行数值模拟分析。利用所得模拟结果,提出在背腔内添加气流分布板的改进措施,然后对气流分布板开孔率以及气流分布板与背腔距离对模具背腔出口截面气流分布的影响进行研究。通过对比与分析,得出最优的配置方案,以期为纸浆模塑吸浆模具背腔结构的优化设计提供一定的参考依据。

1 几何模型的建立和 CFD 数值模拟

1.1 建立几何模型

纸浆模塑吸浆模具的整体结构如图1所示。模具的背腔与模具直接相连,产品脱模时,向背腔入口压缩空气形成正压;背腔出口跟模具上的孔隙相通,模具内外两侧形成的压力差使得吸附在模具表面的产品脱模。

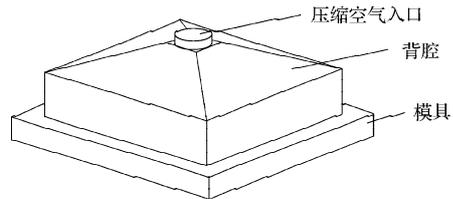


图1 吸浆模具的整体结构

Fig. 1 The overall structure of grout mold

本研究所建立的吸浆模具几何模型的主要参数如下:背腔总高 H 为200 mm,出口截面为560 mm × 560 mm,入口直径为80 mm,背腔顶面锥度为17°。在距模具背腔入口 L 处添加长×宽×厚为540 mm × 540 mm × 5 mm的气流分布板(见图2),气流分布板的结构如图3所示。实验时,通过改变气流分布板上的细孔孔径大小以改变开孔率,开孔率分别设为5%, 10%, 15%, 20%。

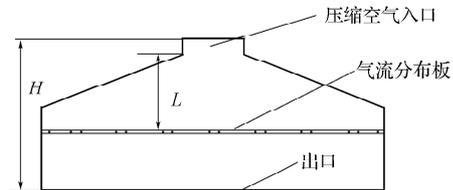


图2 背腔结构截面图

Fig. 2 The sectional view of the back cavity structure

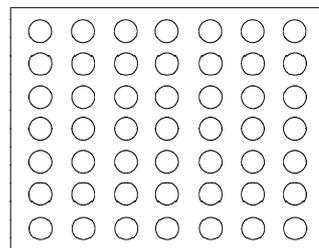


图3 气流分布板结构图

Fig. 3 The structure of air distribution plate

1.2 数值模拟

1.2.1 计算方法和计算模型的确定

模具背腔内部流场是复杂的三维湍流流场,为方便计算,假定流体是等温定常、连续、不可压缩流动,根据计算,所得雷诺数远大于2 300,模拟计算选用标准 $k-\varepsilon$ 湍流模型进行求解计算^[8-10]。

湍动能 k 方程:

$$\frac{\partial(\rho k)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho k u_i)}{\partial x_i} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k} \right) \frac{\partial k}{\partial x_j} \right] + G_k + G_b - \rho \varepsilon - Y_M + S_k \quad (1)$$

耗散率 ε 方程:

$$\frac{\partial(\rho \varepsilon)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho \varepsilon u_i)}{\partial x_i} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\varepsilon} \right) \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_j} \right] + C_{1\varepsilon} \frac{\varepsilon}{k} (G_k + C_{3\varepsilon} G_b) - C_{2\varepsilon} \rho \frac{\varepsilon^2}{k} + S_\varepsilon \quad (2)$$

式(1)和(2)中: ρ 为流体密度; μ 为流体动力黏度; t 为流体温度; S_k 和 S_ϵ 是用户自定义的源项; G_k 为平均速度梯度引起的湍动能 k 的产生项; G_b 为由于浮力引起的湍动能 k 的产生项; Y_M 代表可压湍流中脉动扩张的贡献; $C_{1\epsilon}$, $C_{2\epsilon}$ 和 $C_{3\epsilon}$ 均为经验常数, 且 $C_{1\epsilon}=1.44$, $C_{2\epsilon}=1.92$, $C_{3\epsilon}=0.09$; σ_k 和 σ_ϵ 分别是与湍动能 k 和耗散能 ϵ 对应的普朗特数, 且 $\sigma_k=1.0$, $\sigma_\epsilon=1.3$; u_i 为正交速度, x_i 为总体笛卡儿坐标 ($i=x, y, z$)。

1.2.2 网格的划分

根据几何相似原理, 本文按1:10的比例建立试验模型, 即用soildworks建立背腔流场三维模型, 导入ANSYS/FLOTRAN CFD中, 模型的网格划分节点数为144 660, 有限元模型如图4所示。

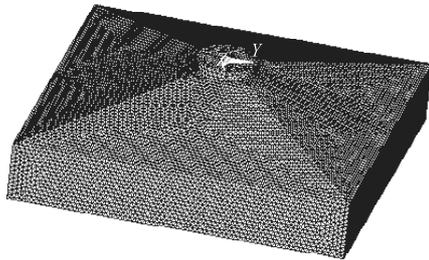


图4 背腔流场有限元模型

Fig. 4 Back cavity flow finite element model

1.2.3 边界条件及求解控制

数值模拟时流体为20℃时的空气, 密度为1.2 kg/m³, 采用压力入口边界条件, 入口处的相对压力为 $P=0.6$ MPa。在背腔内壁上施加无滑移边界条件(即所有的速度分量均为0)^[11-12]; 采用压力出口边界条件, 静压取值为0 Pa。设置流体求解稳定参数为0.25, 计算的迭代步数为20, 求解收敛检测曲线, 所得结果如图5所示。

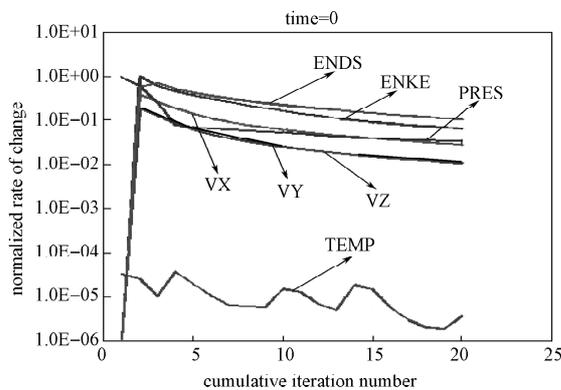


图5 收敛检测曲线

Fig. 5 Convergence detection profile

由图5可知: 迭代到20步时VX, VY, VZ, PRES, ENKE, ENDS都成功收敛于某一稳定值, 可认为计算已经终止。

2 结果与分析

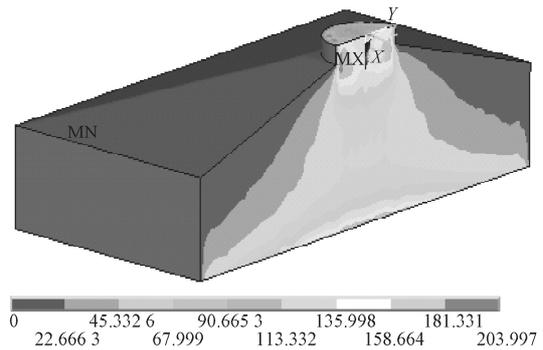
2.1 求解结果及分析

气流均匀性判定可借鉴美国的RMS标准^[13], 断面气流速度的相对均方根表达式如下:

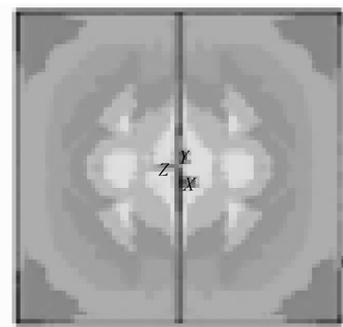
$$\sigma = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \left[\frac{v_i - v_0}{v_0} \right]^2} \quad (3)$$

式(3)中: n 为测量断面上的测点总数; v_i 为每个测点测得的气流速度, m/s; v_0 为测量断面各测点气流速度的算术平均值; σ 为断面气流速度相对均方根, 其值的大小表示各测点的气流速度 v_i 和平均速度 v_0 的离散程度, σ 值越大, 气流分布均匀性越差。

对吸浆模具背腔无气流分布板、添加气流分布板进行比较, 对气流分布板开孔率为5%, 10%, 15%, 20%, 及距离入口 L 为90, 100, 110, 120, 130, 140 mm进行仿真分析, 所得结果见图6~12, 各计算模型的相对均方根值见表1, 速度相对均方根曲线见图13。



a) 背腔截面



b) 背腔出口截面

图6 无气流分布板截面速度云图

Fig. 6 Sectional velocity cloud chart without air distribution plate

由图6所示无气流分布板背腔截面速度云图可知, 不加气流分布板时, 出口截面中间位置处的气流速度相对较高, 而四周的气流速度较低, 出口气流分布很不均匀, 相对均方根值为0.73。

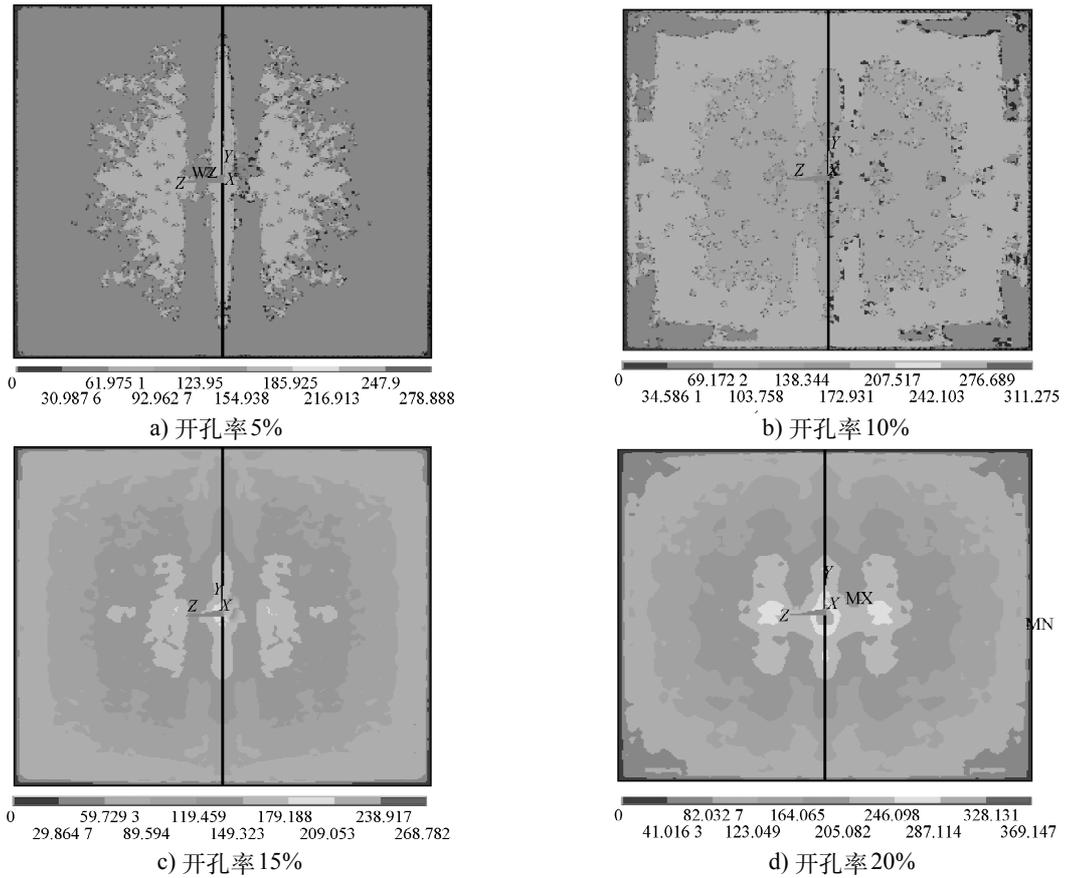


图7 距背腔入口90 mm处不同开孔率出口截面速度云图

Fig. 7 Outlet sectional velocity cloud chart with different opening rate in location 90 mm from the back cavity entrance

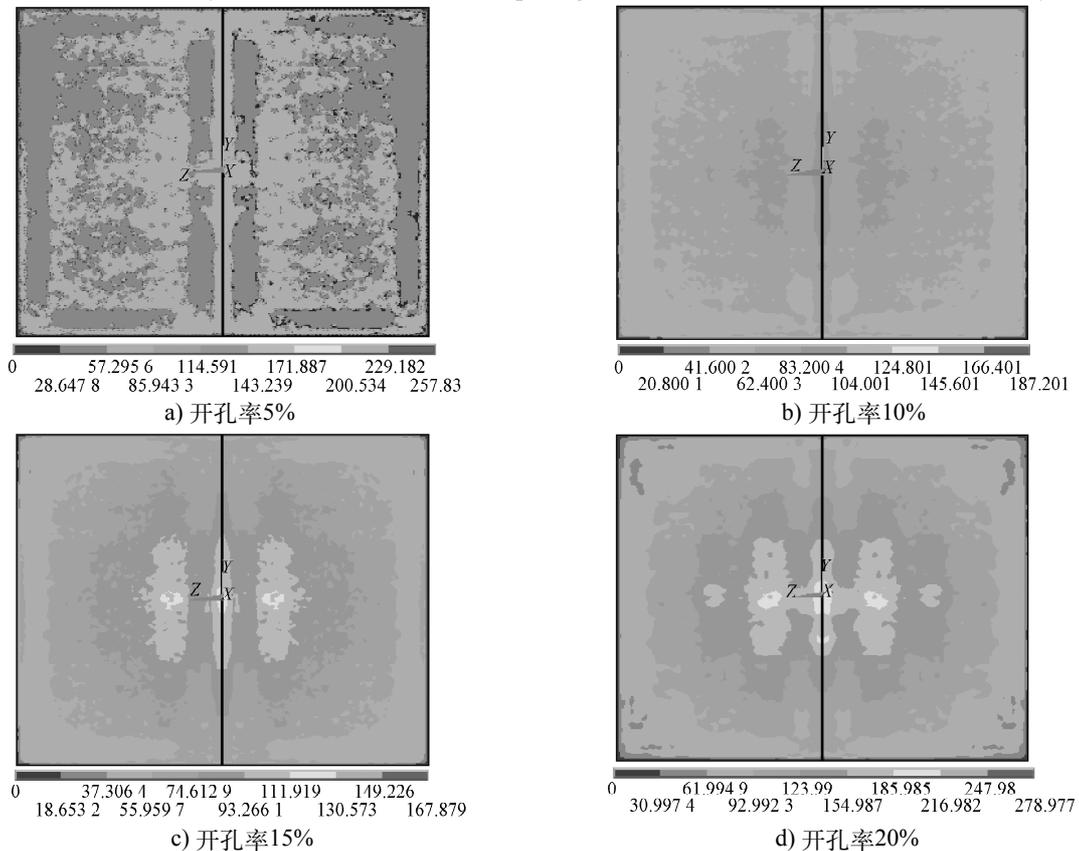


图8 距背腔入口100 mm处不同开孔率出口截面速度云图

Fig. 8 Outlet sectional velocity cloud chart with different opening rate in location 100 mm from the back cavity entrance

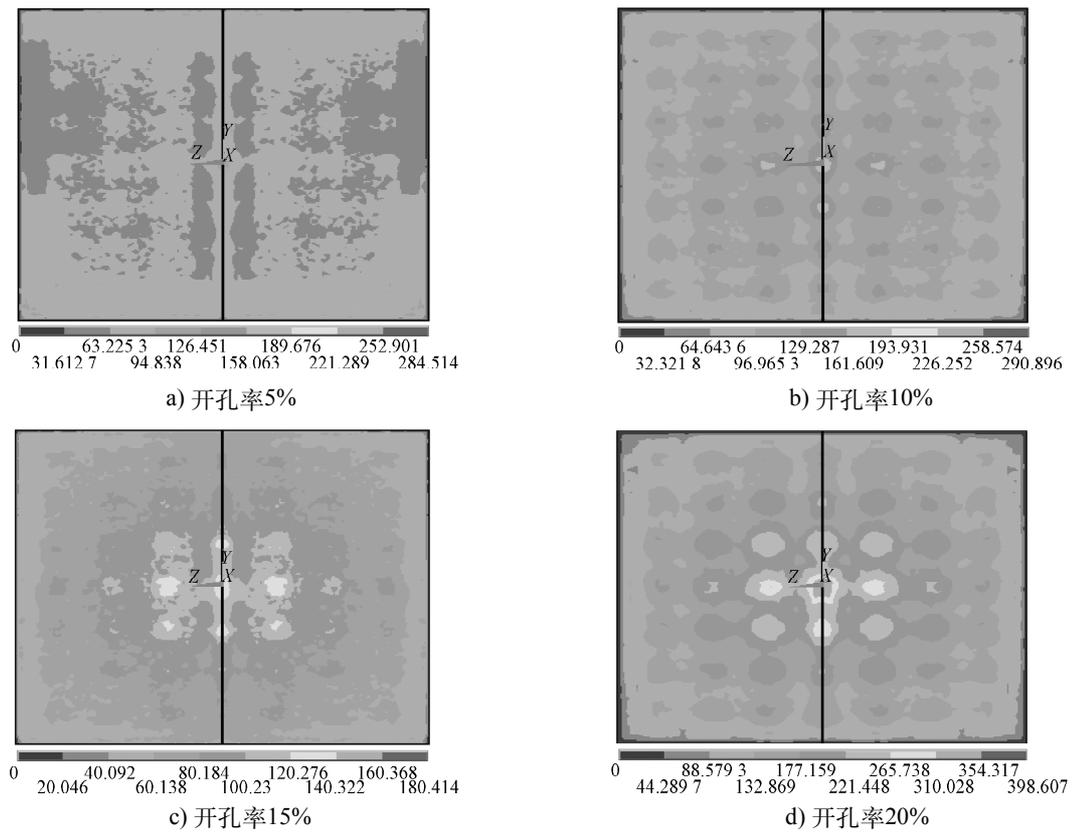


图9 距背腔入口 110 mm 处不同开孔率出口截面速度云图

Fig. 9 Outlet sectional velocity cloud chart with different opening rate in location 110 mm from the back cavity entrance

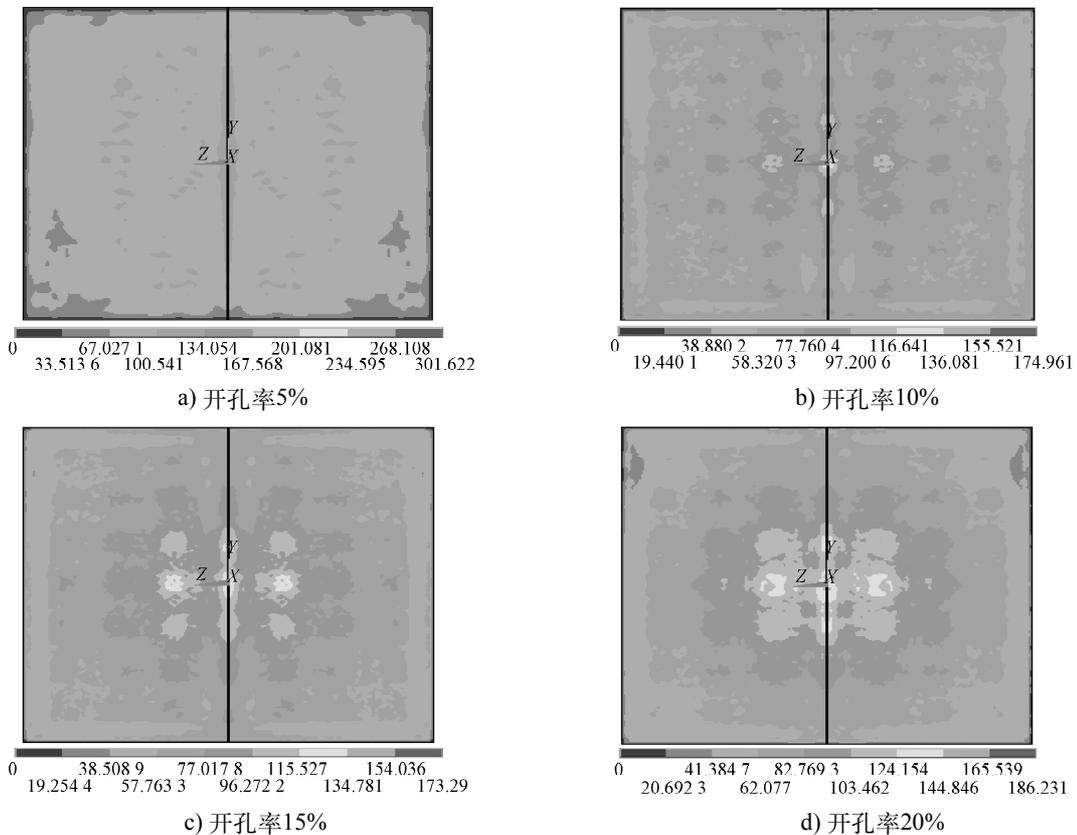


图10 距背腔入口 120 mm 处不同开孔率出口截面速度云图

Fig. 10 Outlet sectional velocity cloud chart with different opening rate in location 120 mm from the back cavity entrance

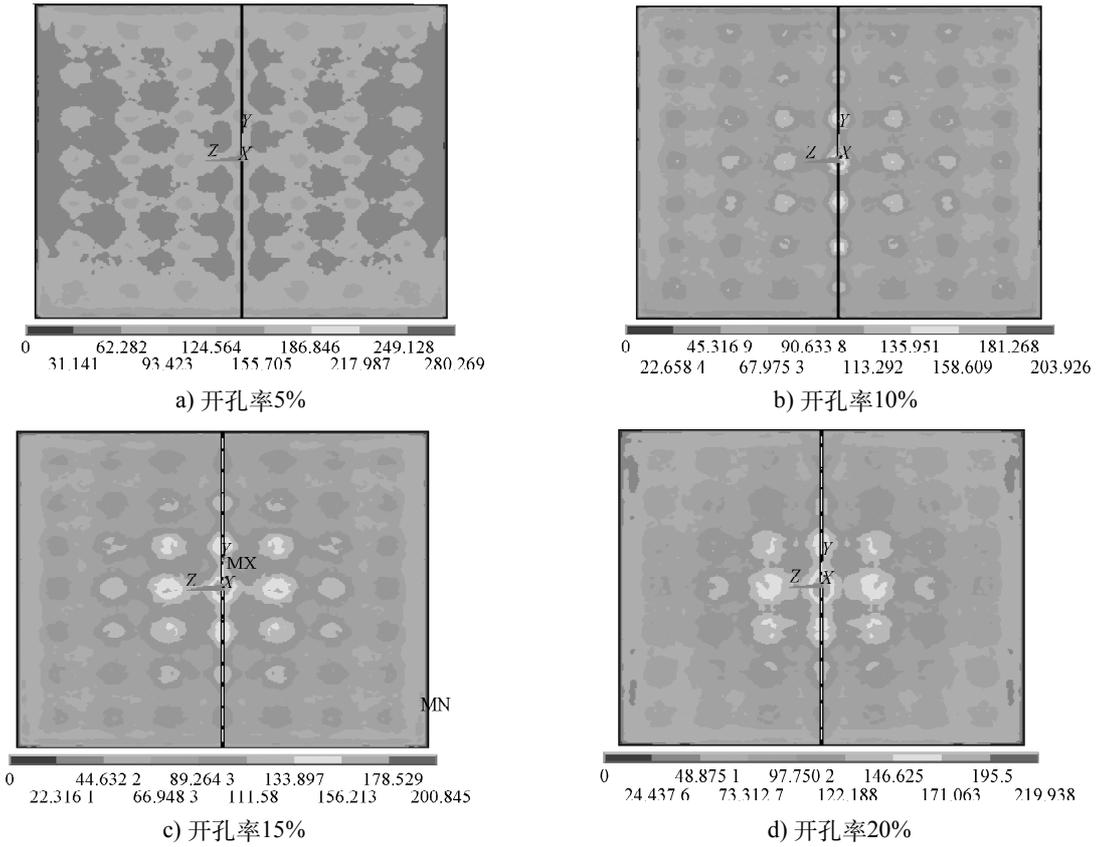


图 11 距背腔入口 130 mm 处不同开孔率出口截面速度云图

Fig . 11 Outlet sectional velocity cloud chart with different opening rate in location 130 mm from the back cavity entrance

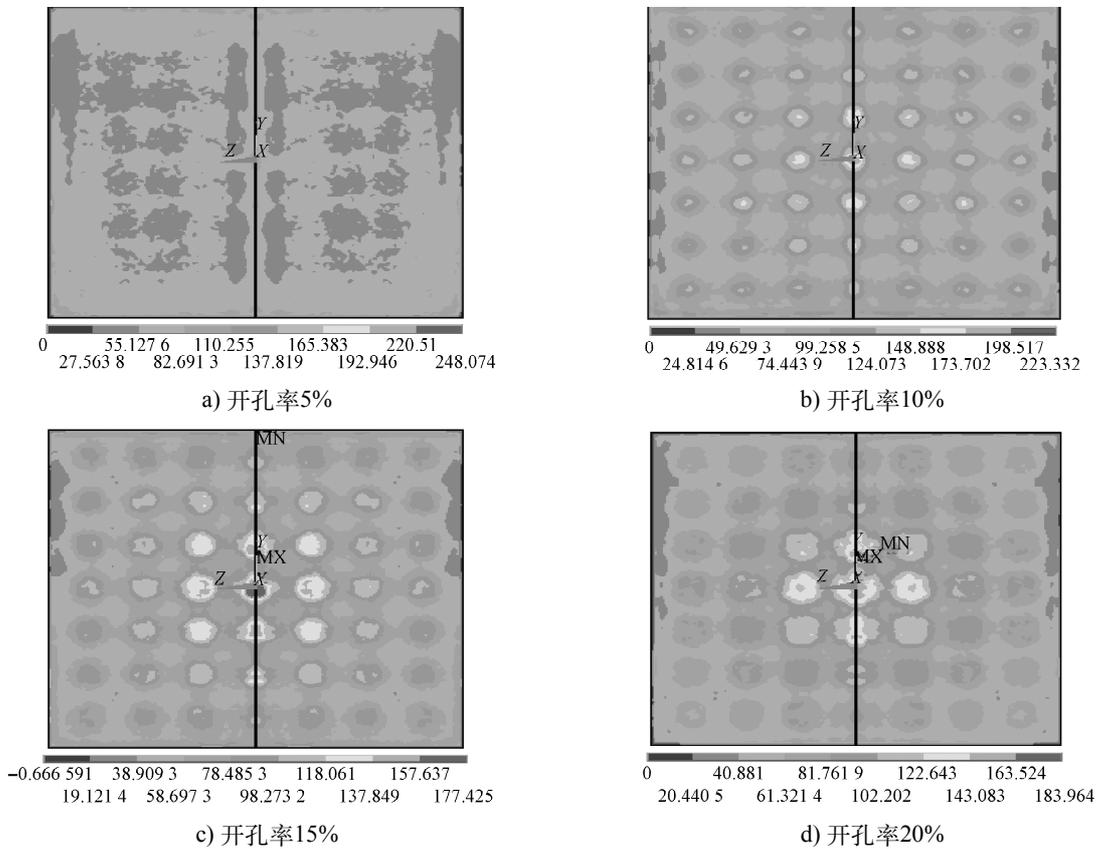


图 12 距背腔入口 140 mm 处不同开孔率出口截面速度云图

Fig . 12 Outlet sectional velocity cloud chart with different opening rate in location 140 mm from the back cavity entrance

由出口截面速度云图 7~12 及表 1 中的数据可以得知, 加了气流分布板后, 气流的均匀性明显得到了改善, 相对均方根值均有所降低。

表 1 各计算模型相对均方根值
Table 1 Computing model relative rms

开孔率/ %	L/mm						无气流 分布板
	90	100	110	120	130	140	
5	0.300	0.265	0.264	0.240	0.300	0.340	0.730
10	0.374	0.363	0.362	0.301	0.320	0.350	
15	0.402	0.388	0.380	0.360	0.400	0.450	
20	0.430	0.423	0.421	0.370	0.410	0.550	

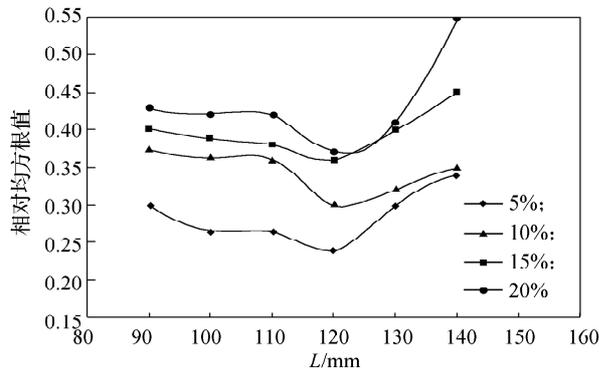


图 13 出口截面速度相对均方根曲线

Fig. 13 Outlet sectional relative rms velocity curve

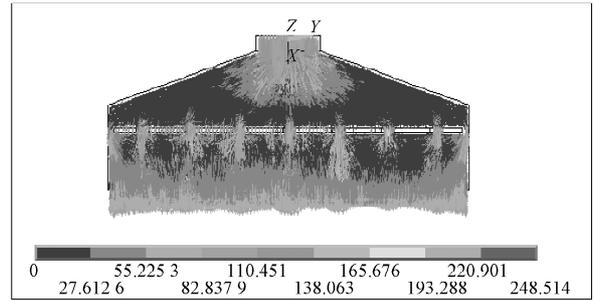
由图 13 所示的均方根值曲线可以看出: 在同一位置 (即 L 值一致) 处, 随着开孔率由 5%, 10%, 15%, 20% 依次增大, 其均方根值依次增大, 气流的均匀性依次降低。

气流分布板虽然能使气流沿整个出口截面大体分布均匀, 但刚刚穿过气流分布板的气流又会使得以小孔为中心的小范围内的气流出现不均匀现象, 即出现孔板后的紊乱区。在紊乱区中, 正对小孔的气流速度相对较大, 而孔与孔之间连接处的气流速度较小, 这使得气流流速呈现出波浪形状。但因小孔面积较小, 这种小区域内的紊乱状态经过一段距离后会逐步稳定下来, 这段逐步稳定下来的区域称为过渡区。由均方根值曲线图 13 可知: 随着 L 从 90, 100, 110, 120, 130, 140 mm 依次增加, 各断面气流速度的均方根值均先降低后增加, 均在 120 mm 处达最小值, 且开孔率为 5% 的最低, 为 0.240。

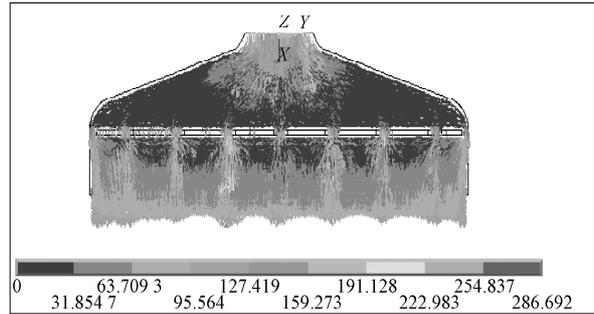
根据以上分析结果, 可知气流分布板设置的最优方案为 5% 开孔率, 距入口距离 L 为 120 mm。

2.2 背腔结构优化

确定了背腔结构气流分布板的最优设置方案后, 可进一步对背腔结构进行优化, 即将背腔入口及拐角处进行圆角处理。实验所得优化前后的截面速度矢量图如图 14 所示。



a) 优化前



b) 优化后

图 14 背腔优化前后截面速度矢量图

Fig. 14 Back cavity cross-sectional velocity vector before and after optimization

由图 14 可知, 优化前背腔气流入口处存在着一定量的小漩涡及回流区, 这些漩涡及回流会造成局部的能量损失, 经过计算, 可得背腔出口截面的平均流速为 3.8 m/s。优化后, 背腔入口漩涡及回流状态得到了改善, 经过计算, 得出背腔出口截面平均流速达 4.2 m/s, 相较优化前的速度, 约提升了 11%。

背腔结构的进一步优化, 降低了背腔内气流的局部能量损失, 提高了出口截面平均速度, 从而提高了产品脱模的效率。

3 结论

本文采用 ANSYS 软件的 FLOTTRAN CFD 流体分析模块, 对纸浆模塑吸浆模具背腔出口截面的气流均匀性进行了研究。主要研究了模具背腔气流分布板的开孔率及气流分布板布置位置对模具背腔出口截面气流均匀性的影响, 研究结果表明:

- 1) 纸浆模塑吸浆模具背腔无气流分布板时, 背腔出口截面的速度分布很不均匀, 其均方根值为 0.730, 添加气流分布板后, 其相对均方根值均有所降低, 气流分布均匀性明显得到了改善;
- 2) 气流分布板随着开孔率由 5%, 10%, 15%, 20% 依次增加, 其相对均方根值依次增大, 气流分布均匀性变差;
- 3) 随着气流分布板距背腔入口 L 由 90, 100, 110, 120, 130, 140 mm 依次增加, 其均方根值先降低后增

加, 在 120 mm 时达最小值, 且开孔率为 5% 的最低, 为 0.240;

4) 确定气流分布板的最优设置方案后, 对模具背腔结构进一步优化, 使得背腔入口漩涡及回流状态得到改善, 减小了气流局部能量损失, 优化后较优化前的出口截面平均速度约提升了 11%。

本研究通过对比分析, 得出了纸浆模塑吸浆模具背腔气流分布板设置的最优方案, 为纸浆模塑吸浆模具背腔结构优化设计提供了参考依据。

参考文献:

- [1] 覃秀凤, 黄勤芳. 浅谈纸模制品及其模具的国内外概况[J]. 轻工科技, 2014(11): 23-24.
QIN Xiufeng, HUANG Qinfang. On Paper Mold Products and Mold Overview Abroad[J]. Light Industry Science and Technology, 2014(11): 23-24.
- [2] 陆金发, 王惠书. 纸浆模塑成型工艺的设计基础[N]. 中国包装报, 2001-08-01(03).
LU Jinfa, WANG Huishu. Design Basics of Pulp Molding Process[N]. China Packaging News, 2001-08-01(03).
- [3] 金国斌, 徐兰萍. 纸浆模塑件生产工艺方法综合研究[J]. 包装工程, 2004, 25(3): 1-3, 23.
JIN Guobin, XU Lanping. Research on Production Techniques of Molded Pulp Products[J]. Packaging Engineering, 2004, 25(3): 1-3, 23.
- [4] 王惠书. 谈纸模餐具湿部成型工艺条件[N]. 中国包装报, 2000-09-22(03).
WANG Huishu. Tableware Wet Pulp Molding Processing Conditions[N]. China Packaging News, 2000-09-22(03).
- [5] 刘志忱. 纸浆模塑机理及其模具设计研究[J]. 包装世界, 2002(6): 31-35.
LIU Zhichen. Research on Mechanism and Pulp Molding Die Design[J]. Packaging World, 2002(6): 31-35.
- [6] 黄俊彦, 刘志忱. 纸浆模塑制品的模具及其设计[J]. 包装世界, 2002(6): 40-42.
HUANG Junyan, LIU Zhichen. Pulp Molding Products Mold and Its Design[J]. Packaging World, 2002(6): 40-42.
- [7] 于永建. 纸浆模塑真空吸滤成型机理及其模具参数研究[D]. 无锡: 江南大学, 2005.
YU Yongjian. Pulp Molding Vacuum Filter Forming Mechanism and Mold Parameter Research[D]. Wuxi: Jiangnan University, 2005.
- [8] 王福军. 计算流体动力学分析-CFD软件原理与应用[M]. 北京: 清华大学出版社, 2004: 120-125.
WANG Fujun. Computational Fluid Dynamics Analysis Software-CFD Principles and Applications[M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2004: 120-125.
- [9] 赵友军, 付海明, 李阳, 等. 袋式除尘器内部流场分布实验研究[J]. 建筑热能通风空调, 2008, 27(1): 83-86.
ZHAO Youjun, FU Haiming, LI Yang, et al. Study of Flow Field Distribution in Bag Filter[J]. Building Energy & Environment, 2008, 27(1): 83-86.
- [10] 张广朋, 袁竹林. 袋式除尘器内部流场的数值模拟研究[J]. 动力工程学报, 2010, 30(7): 518-522.
ZHANG Guangpeng, YUAN Zhulin. Numerical Simulation Study on Internal Flow Field of Bag Filters[J]. Journal of Chinese Society of Power Engineering, 2010, 30(7): 518-522.
- [11] 贾雪松. 基于CFD的热油管道数值模拟[D]. 大庆: 大庆石油学院, 2010.
JIA Xuesong. CFD Numerical Simulation Based on Hot Oil Pipeline[D]. Daqing: Daqing Petroleum Institute, 2010.
- [12] 侯文龙, 胡满银. 内滤式袋式除尘器中气流分布特点的研究[J]. 热力发电, 2008, 37(11): 44-48.
HOU Wenlong, HU Manyin. Study on Distribution Behavior of Gas Flow in the Inwarding Bag Type Dust Collector[J]. Thermal Power Generation, 2008, 37(11): 44-48.
- [13] 赵勇凯, 蒋蓬勃. 电除尘器气流分布均匀性试验评判标准探讨[J]. 电站系统工程, 2008, 24(3): 68.
ZHAO Yongkai, JIANG Pengbo. ESP Gas Distribution Test Criteria Discussion[J]. Power System Engineering, 2008, 24(3): 68.

(责任编辑: 廖友媛)