

机械与过程控制

锂电池涂布烘箱风嘴射流压强分布优化研究

程千驹^{1,2}, 贺四清², 胡泓¹, 袁登航²

(1. 哈尔滨工业大学(深圳) 机电工程与自动化学院, 深圳 518055;

2. 赢合科技股份有限公司, 深圳 518000)

摘要: **目的** 烘箱射流风嘴对极片烘干的均匀性和一致性具有重要影响, 拟改善干燥过程中由于射流压强分布不均导致的极片烘干质量不良问题。**方法** 利用 SolidWorks 软件对射流风嘴与极片间的空气流场进行建模, 基于 $k-\varepsilon$ 湍流方程完成热风流场的数值仿真计算, 根据流体仿真结果对射流风嘴结构进行优化设计, 最后通过实验对数值仿真计算结果进行验证与完善。**结果** 经数值仿真优化后的极片与风嘴间压强分布较改进前有较大提升, 在相同的测量位置处, 仿真得到的压强差由 20 Pa 下降到了 8 Pa, 实验得到的压强差由 21 Pa 下降到 11 Pa, 在误差允许范围内, 实验结果与仿真结果基本保持一致。**结论** 优化后的射流风嘴完善了射流压强分布, 数值仿真研究对风嘴结构的优化设计具有重要的指导意义。

关键词: 涂布机; 烘箱; 流体仿真; 风嘴; 压强分布

中图分类号: TS803.6 文献标识码: A 文章编号: 1001-3563(2019)05-0180-07

DOI: 10.19554/j.cnki.1001-3563.2019.05.025

Jet Pressure Distribution Optimization in Air Nozzle of Lithium Battery Coating Oven

CHENG Qian-ju^{1,2}, HE Si-qing², HU Hong¹, YUAN Deng-hang²

(1. School of Mechanical Engineering and Automation, Harbin Institute of Technology (Shenzhen), Shenzhen 518055, China; 2. Yinghe Technology Co., Ltd., Shenzhen 518000, China)

ABSTRACT: The work aims to avoid the poor quality of the pole piece drying due to the uneven distribution of the jet pressure during the drying process, because the oven jet nozzle has an important influence on the uniformity and consistency of the lithium battery pole piece drying. The air fluid domain between the jet nozzle and the pole piece was modeled by the SolidWorks software and the numerical simulation of warm air fluid field was calculated by the $k-\varepsilon$ turbulence equation. The design of the jet nozzle structure was optimized according to the fluid simulation results and the experiment was carried out to verify and perfect the numerical simulation. The uniformity of pressure distribution between pole piece and air nozzle after numerical simulation optimization was greatly improved. The pressure difference obtained from simulation at the same test position was reduced from 20 Pa to 8 Pa, while the pressure difference obtained from the experiment was decreased to 11 Pa from 21 Pa. Within the error tolerance, the experimental results were basically consistent with the simulation results. The optimized jet nozzle has improved the pressure distribution, and numerical simulation research has important guiding significance for the optimal design of the jet nozzle structure.

KEY WORDS: lithium battery; oven; fluid simulation; jet nozzle; pressure distribution

收稿日期: 2018-11-05

基金项目: 深圳市技术创新计划技术攻关项目 (JSGG20170411095522440)

作者简介: 程千驹 (1989—), 男, 博士, 哈尔滨工业大学(深圳) 博士后, 主要研究方向为锂电池烘箱流场、锂电池设备除尘。

锂离子电池具有电压高、体积小、质量轻、比能量高以及使用寿命长等突出优点,近年来,随着各国政府陆续鼓励发展纯电动汽车以实现尾气排放降低的政策推动,锂离子动力电池的需求将不断增加,由此对锂离子动力电池的生产质量提出了更高的要求。锂离子电池主要由电极、隔膜及电解液封装组成,其中电极的机械稳定性是决定电池最终极限寿命的关键因素之一,它取决于加工和制作技术等因素。涂布是电池极片生产过程中的前段工艺,通过将极片正负极浆料均匀涂覆到铜箔与铝箔集流体上并经过烘箱烘干,可以得到供给后续辊压分切等工序加工的宽幅极片材料,涂布及烘干过程中的均匀性与一致性将对后续极片加工工序产生重要影响,并直接决定了生产出电池的安全和性能^[1]。

目前锂离子电池极片烘干工艺多使用热风冲击射流干燥技术,主要由纺织品、纸张、印刷品等其他薄膜干燥行业借鉴而来,由于锂电池极片的烘干具有较高的一致性要求,对锂电池极片的热风冲击射流干燥技术研究主要关注烘干介质的物料属性参数、冲击射流方式以及射流喷嘴的构造与排列方式等^[2-6],其中风嘴的射流结构对冲击射流干燥效果产生最直接的影响。随着计算流体仿真技术的不断发展,研究人员可通过分析不同风嘴结构的热风气流分布特性,从而实现烘箱风嘴的射流状态的优化与完善^[7-12]。其中李徐佳等根据几何相似,采用有机玻璃材料,制作了与数值模拟模型的结构尺寸相同的风刀性能测试盒,采用进口和出口压强作为边界条件,与数值模拟相吻合,实现了运动相似性研究。通过对不同流量进出口压强差的测量,得到风刀的阻力特性,并利用热线风速仪沿风刀出口测量风速,得到空气均衡特性,试验结果与数值模拟结果吻合较好^[1]。由于锂离子电池的大规模商业应用始于 21 世纪初,目前国内针对锂电池极片烘箱射流风嘴的理论研究不多,相关文献较少,为此,开展烘箱射流风嘴的结构优化对提高极片烘干质量具有重要意义^[13-16]。

文中结合计算流体力学仿真分析,根据锂电池实际生产过程中的需要,开展烘箱射流风嘴锂电池极片间压强分布优化研究,拟得到能够保证极片最优悬浮压强的风嘴顶部泄压孔尺寸设计方案,并通过开展相关实验对流体仿真结果进行验证及完善。

1 锂电池烘箱射流的结构形式

射流风嘴是锂电池极片烘箱的重要组成部分,是完成热风射流的最后关键环节,现有的风嘴的三维结构见图 1。热风气流由风嘴的入口进入,进过风嘴的射流条缝产生极片托举力。由于极片属于柔性薄膜,当极片中部气压与两边气压相差较大时,极片不可避免地将发生图 2 中所示的极片在沿风嘴横向方向上

弯曲的情况,弯曲的程度将由风嘴与极片间的压强分布决定。极片干燥过程中,过大的弯曲将会造成极片的干燥不均匀,靠近风嘴的极片浆料将比远离风嘴的极片浆料受到更多的传质传热。同时由于极片只有中间部分涂覆有锂电浆料,两边为集流体的留白部分,不均匀的受热还将造成极片的卷曲,最终导致极片的干燥不良。

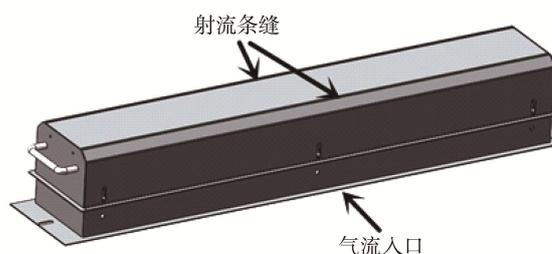


图 1 烘箱射流风嘴三维结构
Fig.1 3D model of oven jet nozzle

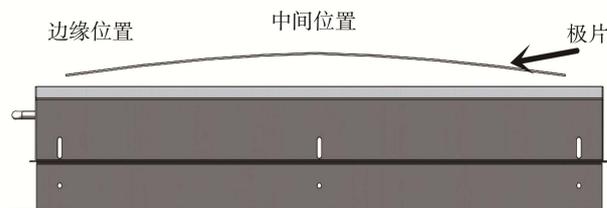


图 2 无泄压口射流风嘴与极片弯曲状态
Fig.2 Jet nozzle without pressure relief port and pole piece bending state

2 烘箱射流风嘴仿真及结构优化

2.1 计算流体域建模与网格划分

对图 2 所示的风嘴与极片的流体域进行如图 3 所示的建模。由于该研究关心的是风嘴顶部与极片之间的压强分布情况,因此在对风嘴进行射流工况的流体域建模时,可认为风嘴射入口的出口风速是均匀的,这样可以排除出口风速不均匀造成的压强分布研究干扰。另外,在进行数值仿真过程中,将极片视为刚性平面可大幅降流体仿真的模型复杂度而不对结果产生较大影响。利用前文方法,设定风嘴下口为进风

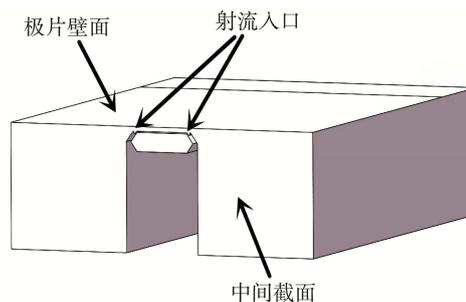


图 3 风嘴射流空气流体域
Fig.3 Air fluid domain model of jet nozzle

口, 条缝区域为出风口。对流体域模型完成网格划分, 在条缝射流面、极片与风嘴断面等尺寸较小的区域进行局部网格加密设置, 最终得到的网格数量为 2 427 932。对网格进行检查可知, 所画网格最小值为 $2.004\ 203 \times 10^{-11}$, 最大值为 $4.160\ 733 \times 10^{-7}$, 网格中未出现负值体积情况, 可通过 FLUENT 软件完成数值计算。

2.2 流场仿真数学模型

该研究的风嘴射流状态为充分发展的湍流, 由于射流风嘴出口离极片表面的距离较近, 从风嘴射流出的热空气将与极片表面完成充分的无强漩涡, 无强烈壁面弯曲以及其他情况的流动接触, 由此可采用 $k-\varepsilon$ 两方程对气流的状态进行求解, 其中湍动能耗散率 ε 方程和湍动能 k 方程如下:

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

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

$$\varepsilon = \frac{\mu}{\rho} \left(\frac{\partial u'_i}{\partial x_k} \right) \left(\frac{\partial u'_j}{\partial x_k} \right) \quad (3)$$

$$\mu_t = \rho C_\mu \frac{k^2}{\varepsilon} \quad (4)$$

式中: $G_k = \mu_t \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) \frac{\partial u_i}{\partial x_j}$, $G_b = \beta g_i \frac{u_i}{P_r} \frac{\partial T}{\partial x_i}$,

$$\beta = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial \rho}{\partial T}, Y_M = 2\rho \varepsilon M_t^2, Ma_t = \sqrt{\frac{k}{a^2}}, a = \sqrt{\gamma RT}。$$

其中 G_k 为由平均速度梯度引起的湍动能 k 的产生项; G_b 为由浮力引起的湍动能 k 的产生项; P_r 为湍动 Prandtl 数; Y_M 为湍流中脉动扩张的贡献; β 为热膨胀系数; g_i 为重力加速度在 i 方向上的分量; γ 为气体绝热指数; T 为热力学温度; M_t 为湍动 Mach 数; R 为通用气体常数; $C_{1\varepsilon}$, $C_{2\varepsilon}$, $C_{3\varepsilon}$, C_μ , σ_k , σ_ε 为经验常数, 其值按经验选取, $C_{1\varepsilon}=1.44$, $C_{2\varepsilon}=1.92$, 当主流与重力方向一致时 $C_{3\varepsilon}$ 取 1, 当主流与重力方向垂直时 $C_{3\varepsilon}$ 取 0, $C_\mu=0.09$, $\sigma_k=1.0$, $\sigma_\varepsilon=1.3$ 。

2.3 流场分布与分析

经由流体仿真软件计算得到的风嘴射流速度三维矢量分布见图 4。由于需要形成双面漂浮干燥效果, 风嘴顶面与极片的距离较小, 一般为 4 mm 左右, 这将造成大部分热气流离开风嘴后从风嘴向两边射流与极片发生热质交换, 只有很少部分气流到达风嘴顶

面的中间位置, 同时风嘴顶面的气流在横向上大量地向风嘴两端汇集, 最后以较高速度射流出。

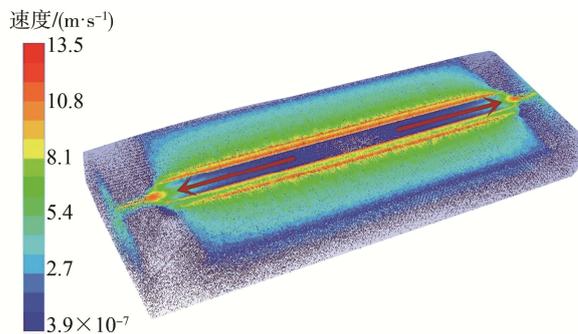


图 4 风嘴射流速度矢量分布
Fig.4 Velocity 3D vector distribution of oven jet nozzle airflow

对应的正对风嘴的极片表面压强分布见图 5。风嘴顶面区域的压强对两面较高, 而且呈现出横向中间部位的压强与两侧部位压强存在较大差值的状况, 定量地对压强分布进行提取, 可以得到压强分布曲线 (见图 6), 可知中间区域的压强相对边缘区域的压强最大差值高达 35 Pa, 因此, 对极片进行受力分析可知, 此状态下的极片将不可避免地出现如图 2 所示的弯曲。

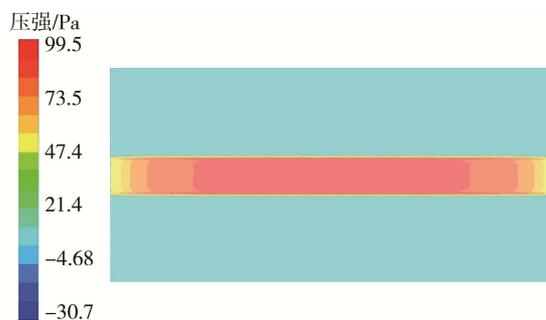


图 5 极片表面的压强分布
Fig.5 Pressure distribution on pole piece surface

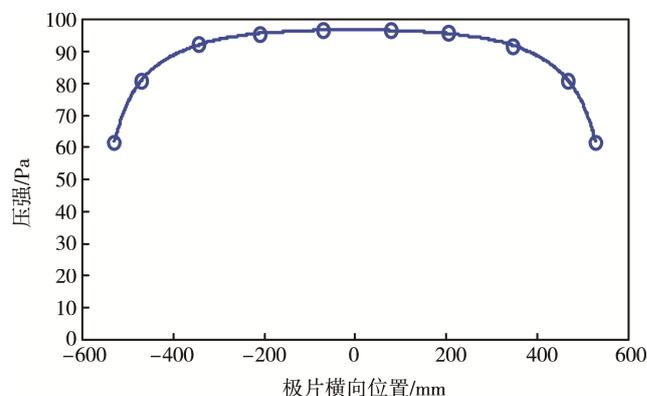


图 6 极片表面中轴线的压强分布曲线
Fig.6 Pressure distribution curve of central axis on pole piece surface

2.4 射流风嘴的结构优化研究

为了对风嘴顶面与极片之间的压强分布进行优化,改善因压强分布不均匀造成的极片弯曲与受热不均匀现象,提出了一种在风嘴顶面开泄压孔的方案。根据压强分布特点,风嘴顶面中间部位的泄压孔必然需要大于或多于两端,为此,采用关于风嘴中轴线对称的余弦曲线开孔方式,可以得到的 3 种开孔方式,见图 7。

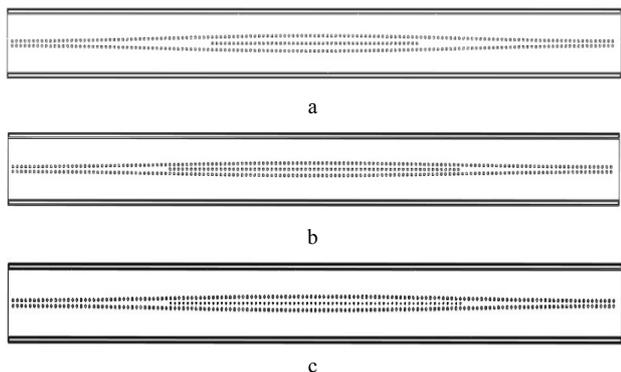


图 7 风嘴表面不同泄压孔尺寸
Fig.7 Different pressure relief hole size on the surface of jet nozzle

图 7 中,图 7a 方式为中间开有一排直径为 $\Phi 3$ mm,圆心间距为 8 mm 的泄压孔,以中轴线为对称轴分布,两端孔心间距 392 mm。上下 2 排开有直径为 $\Phi 3$ mm,圆心间距为 8 mm 的泄压孔,以中轴线为对称轴分布,沿三角函数 $y=3.7 \times \cos(0.0055x)+7.2$ 排列。对应的图 7b 方式在图 7a 方式基础上中间泄压孔的数量增加,两端孔心间距增大到 542 mm,上下两排开孔的轨迹则为沿三角函数 $y=2.5 \times \cos(0.0055x)+6$ 排列。图 7c 方式在图 7b 方式的基础上,将中间泄压孔的直径有 $\Phi 3$ mm 减小为 $\Phi 2$ mm,其他不变。

通过对开有上述不同泄压孔的风嘴射流工况进行流体仿真,可以得到对应的气流速度三维矢量分布与压强分布,由于 3 种泄压孔形式相差不大,对应的气流速度三维矢量分布与压强分布近似相同,见图 8—9。

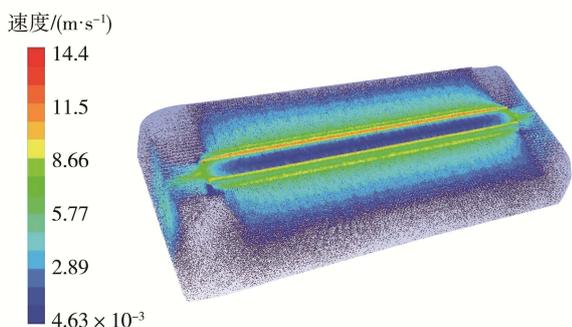


图 8 风嘴射流速度矢量分布
Fig.8 Velocity 3D vector distribution of oven jet nozzle airflow

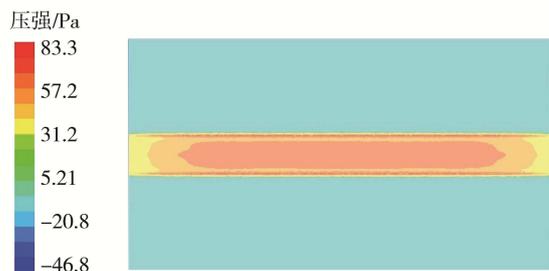


图 9 极片表面的压强分布
Fig.9 Pressure distribution on pole piece surface

分析图 8 可知,由于风嘴顶面上开了泄压孔,经风嘴条缝出口射流的空气除了向两边流动外,部分气流将向风嘴顶面中间流动,与此同时,流向风嘴横向两端的气流量与流速明显减小。对应图 9 可以发现,风嘴长度方向两端与中部的压差明显减少。为了进一步对比各开孔方式对压强分布的影响,可以定量得到各泄压孔工况下的极片表面压强分布曲线见图 10。

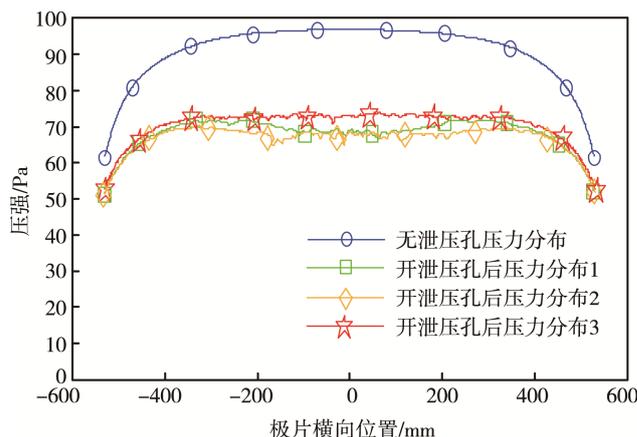


图 10 极片表面中轴线的压强分布曲线对比
Fig.10 Pressure curve comparison of the central axis on the pole piece surface

由图 10 可知,由于在射流风嘴顶面开有泄压孔,离开风嘴射流出口的部分气流将从泄压孔回流。由于泄压孔是间断的圆孔,对应的风嘴中轴线处的气体压强必将发生波动,正如图 10 中 3 条开孔后压强分布曲线所示的锯齿现象。同时,分析图 10 可知,开有泄压孔的压强分布相对未开泄压孔最大压强与最小压强的差值明显下降,由最初的 35 Pa 下降到了 18 Pa,而不同的开孔形式也将形成不同的压强波动曲线,其中按照图 7c 开孔具有较好的压强均匀性。

3 风嘴与极片间压强分布实验研究

3.1 优化前后风嘴样机加工与设计

为对前文的数值仿真结果进行检验,将依据仿真

分析结果，对具有最优压强分布的风嘴结构进行设计。原未开泄压孔的风嘴实验样机见图 11。当极片飘浮于风嘴之上，由风嘴两边条缝射流而出的热风气流将从风嘴横向两边流出，最终形成中间压强大于两边压强的情况，造成极片弯曲。

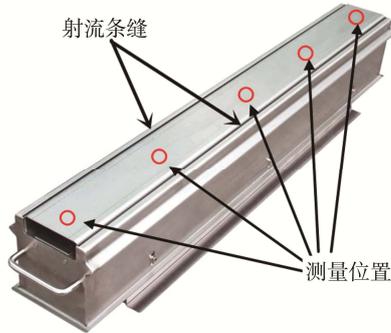


图 11 未开泄压孔的射流风嘴
Fig.11 Jet nozzle without pressure relief hole

基于前文分析，选择具有最优压强分布的仿真结果，在风嘴上端面开第 3 种方式的泄压孔。开孔形式为中间开有一排直径为 $\phi 2$ mm，圆心间距为 8 mm 的泄压孔，以中轴线为对称轴分布，两端孔心间距为 542 mm。上下两排开有直径为 $\phi 3$ mm，圆心间距为 8 mm 的泄压孔，以中轴线为对称轴分布，沿三角函数 $y=2.5\cos(0.0055x)+6$ 排列。同时，结合工程实际情况，将沿着风嘴横向向外侧方向不断将泄压孔直径减小，从而进一步提高风嘴与极片间的压强分布均匀性，最终得到开有纺锤线泄压孔的射流风嘴实验样品，见图 12。



图 12 开泄压孔的射流风嘴
Fig.12 Jet nozzle with pressure relief hole

3.2 实验方法及系统搭建

对风嘴射流压强分析进行测量需要先将风嘴安装在静压风室后形成完整的风嘴射流循环管道，具体的烘箱整体安装见图 13。实验进行压强分布测试时，将于风嘴上端布置平板，将型号为 LBE-CM500Pa-2 压力表的测量端口布置于风嘴横向的 5 个测试点完成，测试点沿射流风嘴的中轴线排列，对应于风嘴横向的坐标分别为 0， ± 240 ， ± 480 mm，具体测量点位

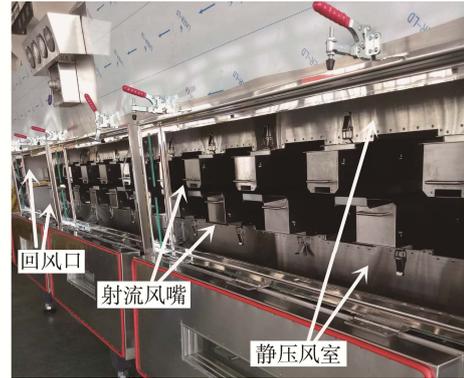


图 13 实验烘箱系统
Fig.13 Experimental oven system

置见图 11 及图 12 中的圆圈标记所示。

3.3 实验结果及讨论

经实验测量后，可得到开有泄压孔风嘴与未开有泄压孔风嘴与极片间的压强分布实验值，实验值与仿真值的对比见图 14。对比实验测量曲线与数值仿真结果曲线可知，实验所测得压强值略小于数值仿真分析结果，这是由于实验测量过程中布置压强测量点时将难免造成极片与风嘴上表面发生泄压现象，从而造成少量的实验误差。从数据变化趋势判断可知，风嘴改进前后的压强差实验值分别为 21 Pa 和 11 Pa，前文数值仿真结果由 35 Pa 下降到了 18 Pa。分析原因可知，由于最外侧的测量点泄压过于严重，难以在风嘴的端部设置测量点，只能在距离端点一定位置处设置压强测量点，因此造成此处压差变化值有所减小。根据前文实验方法可知，实验测量结果为中间 0 mm 与两端 ± 480 mm 处的压强差值，而仿真结果为中间 0 mm 与两端 ± 525 mm 处的压强差，测量位置的不同导致误差较大。为准确比较实验与仿真结果，此处采用相同横向坐标处的压降变化值进行分析。根据前文仿真得到的压强分布曲线可知，

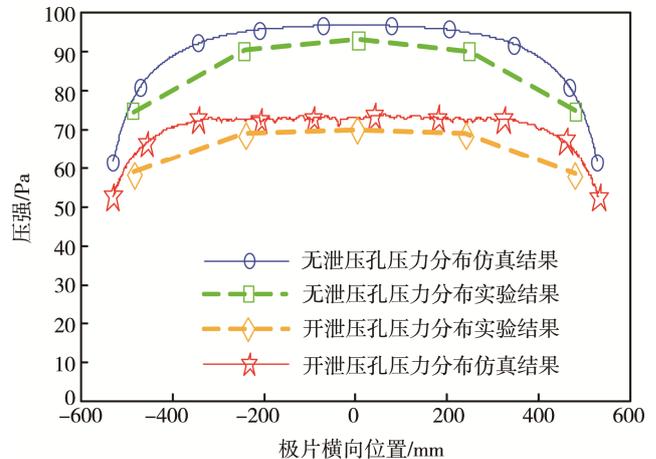


图 14 压强分布曲线实验与仿真对比
Fig.14 Pressure distribution curve comparison between experiment and simulation

在无泄压孔的情况下, 横向中间位置 0 mm 与两端 480 mm 处的压强相减得到结果为 20 Pa, 而有泄压孔的情况下, 同样横向坐标位置的压强差值为 8 Pa, 这与实验得到的压强差由 21 Pa 下降到 11 Pa 相差较少。从实验值与仿真值的变化趋势上分析可知, 实验测量数据与仿真结果也基本保持一致, 开有泄压孔的风嘴能够有较小的压强波动范围。由此表明, 文中的数值仿真研究结果对风嘴结构的优化设计具有重要的指导意义。

4 结语

烘箱射流风嘴是锂电池涂布机完成极片干燥环节重要的零部件, 经由其射流而出的热风气流对极片烘干的均匀性与一致性具有关键影响。针对实际干燥过程中由于射流压强分布不均匀导致的极片烘干质量不良的问题, 基于计算流体仿真软件对射流风嘴与极片间的空气流体域进行了建模与仿真分析, 并对射流风嘴的结构进行了优化设计, 计算得到了结构优化前后的压强分布规律, 结果表明优化后的极片与风嘴间压强分布较改进前有较大提升。为了对仿真结果进行验证与完善, 开展了风嘴与极片间压强分布的实验研究, 通过对仿真与实验结果对比分析可知, 对应测量位置处, 仿真得到的压强差由 20 Pa 下降到了 8 Pa, 实验得到的压强差由 21 Pa 下降到了 11 Pa, 在误差允许的范围内。实验结果与数值仿真结果基本保持一致, 数值仿真研究结果对风嘴结构的优化设计具有重要的指导意义。

参考文献:

- [1] 李徐佳, 高殿荣, 王华山. 锂电池极片干燥箱风刀内流特性的试验与数值模拟对比研究[J]. 机械工程学报, 2015, 51(24): 105—111.
LI Xu-jia, GAO Dian-rong, WANG Hua-shan. Comparative Study on Experiment and Simulation of the Flow Characteristics of Air Nozzles Used in Lithium Battery Film Drying Device[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2015, 51(24): 105—111.
- [2] ZHANG Yan, CUI Qi-peng, SHAO Fu-qun. Influence of Air-knife Wiping on Coating Thickness in Hot-dip Galvanizing[J]. Journal of Iron and Steel Research(International), 2012, 19(6): 70—78.
- [3] LIU Y J, JAMIES A, RITTER, et al. Simulation of Gasoline Vapor Recovery by Pressure Swing Adsorption[J]. Separation and Purification Technology, 2000, 20(1): 111—127.
- [4] FAN J, ZHANG Y, WANG D. Large-eddy Simulation of Three-dimensional Vortical Structures for an Impinging Transverse Jet in the Near Region[J]. Journal of Hydrodynamics, Ser B, 2007, 19(3): 314—321.
- [5] 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. Oven Fluid Analysis and Parameter Optimization for Gravure Printing Machine YF93[J]. Journal of Vibration and Shock, 2013, 32(22): 63—67.
- [6] WANG Wen-hui, LU Xiao-lu, CUI Yi, et al. Modified Pressure Loss Model for T-junctions of Engine Exhaust Manifold[J]. Chinese Journal of Mechanical Engineering, 2014, 27(6): 1232—1239.
- [7] 王新坤, 许文博, 赵坤, 等. 基于 CFD 的多孔管热风数值模拟与设计方法[J]. 排灌机械工程学报, 2011, 29(1): 82—86.
WANG Xin-kun, XU Wen-bo, ZHAO Kun, et al. Numerical Simulation and Design Method of Hot Air for Porous Pipe Based on CFD[J]. Journal of Drainage and Irrigation Machinery Engineering, 2011, 29(1): 82—86.
- [8] LIU Jian, ZHANG Hai-yan, LIU Lin-lin. Fluid Dynamics Analysis about the Lose of the Velocity of the Air Nozzles of Gravure Press[J]. Light Industry Machinery, 2011, 29(3): 1—4.
- [9] 何志霞, 王芬, 刘菊燕, 等. 柴油机喷嘴结构对喷雾特性影响的耦合模拟研究[J]. 机械工程学报, 2014, 50(24): 145—150.
HE Zhi-xia, WANG Fen, LIU Ju-yan, et al. Coupled Simulation of the Effect of Diesel Nozzle Structure on Spray Characteristics[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2014, 50(24): 145—150.
- [10] CHO N C, HWANG I J, LEE C M, et al. An Experimental Study on the Airlift Pump with Air Jet Nozzle and Booster Pump[J]. Journal of Environmental Sciences, 2009, 21(1): 19—23.
- [11] GULATI P, KATTI V, PRABHU S V. Influence of the Shape of the Nozzle on Local Heat Transfer Distribution between Smooth Flat Surface and Impinging Air Jet[J]. International Journal of Thermal Sciences, 2009, 48(3): 602—617.
- [12] KUBACKI S, DICK E. Convective Heat Transfer Prediction for an Axisymmetric Jet Impinging onto a Flat Plate with an Improved $k-\omega$ Model[J]. International Journal of Numerical Methods for Heat & Fluid Flow, 2009, 19(8): 960—981.
- [13] 肖益民, 杨文杰, 吴泽豪, 等. Y 型喉管流场分析及结构优化[J]. 计算机仿真, 2015, 32(5): 270—274.
XIAO Yi-min, YANG Wen-jie, WU Ze-hao, et al.

- Analysis and Structure Optimization of Y-type Throat[J]. *Computer Simulation*, 2015, 32(5): 270—274.
- [14] 冯俊, 郑源. 基于 CFD 的轴流泵三维湍流数值模拟[J]. *流体机械*, 2013, 40(11): 33—36.
FENG Jun, ZHENG Yuan. Numerical Simulation of Three-dimensional Turbulence of Axial Flow Pump Based on CFD[J]. *Fluid Mechanics*, 2013, 40(11): 33—36.
- [15] DJUNAEDY E, CHEONG K W D. Development of a Simplified Technique of Modeling Four-way Ceiling Air Supply Diffuser[J]. *Building and Environment*, 2002, 37(4): 393—403.
- [16] SUN Y, SMITH T F. Air Flow Characteristics of a Room with Square Cone Diffusers[J]. *Building and Environment*, 2005, 40(5): 589—600.