

[制造·使用·改进]

DOI:10.3969/j.issn.1005-2895.2019.02.017

锂电池烘箱匀流特性分析及结构优化

程千驹^{1,2}, 贺四清², 胡泓¹

(1. 哈尔滨工业大学(深圳)机电工程与自动化学院, 广东 深圳 518055;
2. 赢合科技股份有限公司, 广东 深圳 518000)

摘要:烘箱热风射流速度的均匀性对锂电池极片材料的一致性具有重要影响,为了提高射流速度的均匀性,建立了烘箱静压风室的三维模型;利用 FLUENT 流体仿真软件,基于 $k-\varepsilon$ 湍流方程完成了装有导流板的静压风室热风流场的数值仿真计算;通过提取分析射流风嘴的射流速度分布情况,对静压风室导流板安装尺寸进行了优化,流场仿真分析结果表明:经过优化后的风嘴射流速度均匀性得到了改善,热风射流速度沿风嘴长度方向波动由 1.87% 下降到了 0.73%,各风嘴射流速度波动由 5.06% 下降到了 2.69%。改进后的射流速度能够满足锂电池极片烘干的一致性要求。

关键词:锂电池涂布机;烘箱;FLUENT 软件;导流板; $k-\varepsilon$ 湍流方程

中图分类号:TS735.1 文献标志码:A 文章编号:1005-2895(2019)02-0089-05

Uniform Flow Characteristics Analysis and Structural Optimization on Lithium Battery Oven

CHENG Qianju^{1,2}, HE Siqing², HU Hong¹

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

Abstract: Uniformity of jet velocity in oven has an important influence on the consistency of the lithium battery pole piece. A three-dimensional model of the oven static pressure chamber was established to improve the uniformity of the jet velocity. FLUENT simulation software and $k-\varepsilon$ turbulence equation model were used for numerical simulation calculation of the hot air flow field in static pressure chamber with deflector. By analyzing the jet velocity distribution of the nozzle, the installation size optimization of the hydrostatic chamber deflector was carried out. The flow field simulation analysis shows that the uniformity of the jet velocity is improved after optimization. The hot air jet velocity fluctuates along the jet length from 1.87% to 0.73%, the velocity fluctuation of each nozzle decreased from 5.06% to 2.69%. The optimized jet velocity can meet the consistency requirement of lithium battery pole drying.

Keywords: lithium battery coating machine; oven; FLUENT software; deflector plate; $k-\varepsilon$ turbulence equation

锂离子电池自 20 世纪 90 年代开发成功以来,已经在移动电子设备中得到广泛应用。近年来,随着新能源锂电池汽车产业在各国政府的推动下不断发展,未来对锂离子动力电池的需求将进一步增加,由此也对生产锂离子电池的自动化设备提出了更高的要求。分析锂离子电池的生产工艺可知,电池质量主要取决于电池正负极片的加工和制造技术,其中极片及电解质的一致性决定了电化学的稳定、可逆以及锂离子脱

嵌运动过程,并直接影响电池的最终寿命极限。作为电池极片生产工艺中较为前端的工序,极片涂布与烘干过程中的均匀性将对后段的各项生产工序产生重要影响,直接决定了生产出电池的安全和性能^[1-2]。

作为一种强化传质传热方法,热风冲击射流干燥技术广泛应用于纸张、纺织品、印刷品以及锂电池极片等产品的干燥过程。由于其复杂的热风冲击传质传热过程,要完成均匀性较好的冲击射流干燥,不仅涉及到

收稿日期:2018-09-06;修回日期:2019-01-02

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

第一作者简介:程千驹(1989),男,湖北黄冈人,博士,主要研究方向为锂电池涂布机流场优化。E-mail:qianju1990@163.com

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,而且对冲击热风气流的速度均匀性有较高的要求^[3-5]。涂布机烘干系统中,烘箱是完成热风分布及射流干燥的重要工具,随着计算流体力学数值模拟技术的发展成熟,热风冲击干燥技术在印刷品、仿制品等领域的烘箱研究中已得到广泛应用。研究人员通过对不同结构参数开展计算流体仿真对比分析,借助流场数值模拟方法对干燥箱进行结构改进,最终可实现烘箱内热风气流速度场分布特性的改善。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涂布机烘箱的理论研究不多,相关文献较少^[6-9]。李徐佳等^[10]通过计算流体数值模拟方法对锂电池极片烘箱的风速场开展了模拟研究,依据均匀气流速度分布场要求,对具有两种不同结构的烘箱内流场进行对比分析,最终完成了进风口位置、尺寸和数量的参数优化,完成了烘箱的结构改进。

由于锂电池需求量的不断增加,对涂布机烘箱的干燥效率及均匀性提出了更高的要求。课题组结合计算流体力学仿真分析,参考其他成熟的烘箱研究领域,开展了烘箱内导流板安装尺寸对热风场匀流特性的影响研究,得到了具有最佳沿风嘴长度方向射流均匀性的导流板安装尺寸,为实际生产加工过程中的烘箱结构设计调整提供理论依据。

1 锂电池烘箱的结构及性能要求

目前使用的锂电池涂布烘箱结构如图1所示。烘箱结构分为两大部分:前一部分为干燥箱,主要功能是利用热风射流完成极片湿料的干燥,一般由静压风室、射流风嘴以及回风口组成;后一部分为循环管路,主要功能是实现干燥后气体的排出以及混合新空气的循环加热。干燥箱中热风气流经由侧边管路进入静压风室后,通过射流风嘴吹覆到极片涂层上发生涂布浆料的传质传热过程,完成极片浆料湿料部分的干燥,带有湿度的空气通过回风口进入循环管路部分被排出,剩余部分与新空气混合加热再次通入静压风室后用于下一循环的射流干燥。干燥箱内的射流风嘴一般呈间隔布置从而形成悬浮双面干燥工艺,可减小极片与过辊的接触,提高极片的干燥质量。

烘箱静压风室是连接循环风室与射流风嘴的重要部件,其内部流道结构参数的设计对射流风嘴沿风嘴长度方向出口速度均匀性有着重要的影响。在图2所示的烘箱静压风室结构图中,由于结构设计限制,静压风室的进风口与射流风嘴的布置方向相互垂直,同时侧向进口距离静压风室末端处的射流风嘴较远,这就

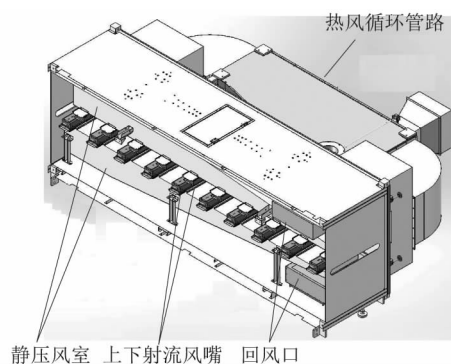


图1 烘箱三维结构

Figure 1 3D model of oven

导致了气流在进入风室后难以均匀分布到各风嘴。因此,需要对射流进入静压风室的热风进行导流才能保证射流风嘴出口速度沿风嘴长度方向均匀性。

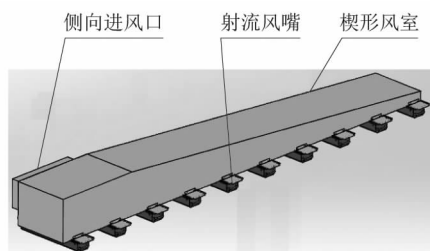


图2 静压风室三维模型

Figure 2 3D model of static pressure chamber

2 静压风室流体仿真及分析

2.1 计算流体域建模与边界条件设定

根据烘箱静压风室模型,在SolidWorks三维设计软件中对装有导流板的静压风室内部空气流体域建模如图3所示,进风口尺寸为750 mm × 350 mm,流体域模型下方挂有10个射流风嘴,每个射流风嘴均有2条900 mm × 7 mm的条缝型出风口,在进风口处均匀布置导流板用于将侧向射入静压风室的热空气导向沿静压风室纵向均匀地流动。

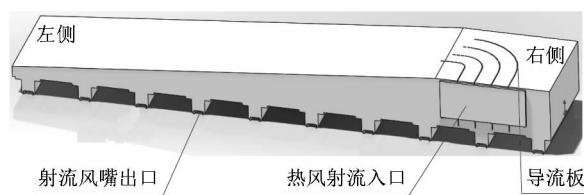


图3 静压风室的空气流体域模型

Figure 3 Air fluid domain model of static pressure chamber

2.2 网格划分与检查

完成流体域建模后,采用ICEM专业网格划分软

件根据模型的各分区特征对流体域进行网格划分,对尺寸较小区域如射流出口区域、导流板区域及进口区域等进行局部加密设置。由于流体域模型的几何形状较为复杂,大部分区域采用非结构网格设置代替结构网格,从而消除节点的结构限制;个别区域采用楔形体网格、锥体网格以及六面体网格混合划分,该模型中的网格总数为 4 392 638。在 FLUENT 中对静压风室流体域网格检查可知,网格体积的最小值为 $2.234\ 467\text{E}-11\text{ m}^3$,最大值为 $2.337\ 571\text{E}-6\text{ m}^3$ 。由于静压风室网格中未出现负值最小体积情况,故可通过 FLUENT 软件完成计算。

2.3 流场仿真数学模型

静压风室内的热空气流动状态一般为充分发展的湍流,特别是在导流板的作用下,热空气的流动应是无强漩涡,无强烈壁面弯曲以及其他情况。因此,对模型选用 $k-\varepsilon$ 两方程进行求解,流体控制方程中除包含有连续性方程、动量方程和能量方程外,还包括湍动能耗散率 ε 方程和湍动能 k 方程。静压风室工作过程中的热风气流流速较小,故可在数值仿真过程中将空气视为不可压缩流体进行处理,湍动能方程和湍动能耗散率方程如下:

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

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

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

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

$$\text{其中: } G_k = \mu_t \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) \cdot \frac{\partial u_i}{\partial x_j}; G_b = \beta g_i \frac{u_i}{Pr_i} \cdot \frac{\partial T}{\partial x_i}; \beta = -\frac{1}{\rho} \cdot \frac{\partial \rho}{\partial T}; Y_M = 2\rho\varepsilon Ma_i^2; Ma_i = \sqrt{k/a^2}; a = \sqrt{\gamma RT}.$$

式中: ρ 表示流体密度; u_i, u_j 表示流体质点速度在 i, j 方向的分量; u'_i, u'_j 则表示流体质点湍流脉动速度在 i, j 方向的分量; x_i, x_j, x_k 为流体质点位移在 i, j, k 方向上的分量; μ 及 μ_t 则分别表示流体动力黏性系数及湍流黏性系数; 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; Pr_i 为湍动普朗特数; 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; Ma_i 为湍动马赫数; R 为通用气体常数; $C_{1\varepsilon}, C_{2\varepsilon}, C_{3\varepsilon}, C_\mu, \sigma_k, \sigma_\varepsilon$ 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 1.00, 当主流与重力方向垂直时 $C_{3\varepsilon}$ 取 0, $C_\mu = 0.09, \sigma_k = 1.0, \sigma_\varepsilon = 1.3$ 。

2.4 流场分布与分析

经由流体仿真软件计算得到的静压风室气流速度三维矢量分布如图 4 所示。热风气流从进风口进入静压风室后,经过导流板的导向作用,其运动速度十分流畅地由垂直静压风室方向流动转化为了沿静压风室纵向方向流动,整体过程中未出现涡流等影响流动均匀性的情况,能够保证气流进入射流风嘴入口时的均匀性。

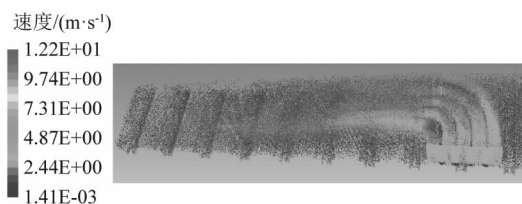


图 4 静压风室气流速度三维矢量分布

Figure 4 Velocity 3D vector distribution of airflow in static pressure chamber

为了定量地研究风嘴沿长度方向出口速度分布规律以及不同风嘴的出口速度分布规律,特别沿风嘴长度方向提取特征点速度进行分析。由于各风嘴在静压风室上等距离安装,风嘴长度方向与静压风室长度方向垂直,故在每个风嘴沿长度方向上设置 9 个数据观察点,烘箱进风口位于风嘴长度方向坐标值较大的一侧。提取对应坐标的风嘴射流速度,对不同风嘴在长度方向相同的坐标观察点射流速度处做平均处理后,可以得到如图 5 所示的射流风嘴沿长度方向的出口速度分布。对同一射流风嘴的各坐标观察点射流速度做平均处理后,可以得到如图 6 所示的不同风嘴出口速度分布。

由图 5 可知沿风嘴长度方向风速最大波动为 1.87%;由图 6 可知各风嘴风速最大波动为 5.06%。从导流板的安装结构分析造成上述波动范围较大的原因。导流板在设计时,进口紧贴静压风室的进风口,同时导流板的下端面几乎与靠近进风口处的几个风嘴的入口面平齐,虽然在尺寸上将射入的气流平均分成了 5 等进行沿风嘴长度方向导流,但是分析气流的流动可知,最右侧的导流区域所分配的空气不仅要完成导

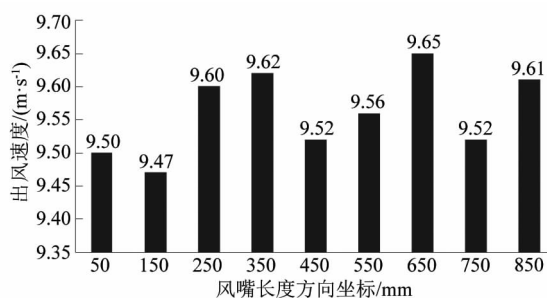


图5 静压风室沿风嘴长度方向射流平均速度分布

Figure 5 Transverse velocity distribution in static pressure chamber

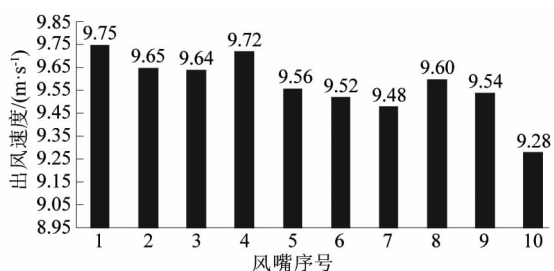


图6 静压风室各风嘴射流平均速度分布

Figure 6 Velocity distribution of each nozzle in static pressure chamber

向作用,还要满足静压风室最右侧10号风嘴的射流需求,由此将会造成离进风口最远端风嘴的射流速度与10号风嘴处的射流速度都相对较小。另外,导流板中间位置的流道也会发生相同的情况,该流道中的气流除了完成导向外,还需要满足静压风室右侧9号风嘴的部分射流需求,这里之所以表述为部分满足是因为该流道呈弧形布置,该流道覆盖了大部分9号风嘴,还有部分面积会由最右侧流道覆盖,也因此加剧了最右侧导流板流道空气流量的不均匀性。

3 静压风室导流板结构改进

锂电池极片涂布工艺中极片浆料涂布的面密度波动要求在1%以下。因此,对涂布机烘箱的热风射流沿风嘴长度方向出风速度波动要求也应该保证在1%以内。前文在增加导流板的情况下虽然能够改善静压风室的进风流畅性,但经过风嘴射流速度定量分析可知,由于导流板的结构设置不合理,造成了射流波动无论在沿风嘴长度方向上还是在纵向上均有较大波动,无法满足锂电池极片均匀烘干的要求。为此,需要对导流板的安装尺寸进行优化。

经过优化导流板后的静压风室流体域模型如图7所示。图7中,最外侧导流板处切割15°豁口,同时新导流板的下端与风嘴进口面留出一定距离,主要目的

是使静压风室进风口的气流在进入导流板流道之前能够通过15°扇形角及导流板下部区域对9号及10号射流风嘴的射流空气进行补充,从而减小后续沿风嘴长度方向不均匀性。按照前文中的方法对该流体域进行相同的边界条件设置并完成仿真分析,可得到如图8所示的静压风室速度三维矢量分布。

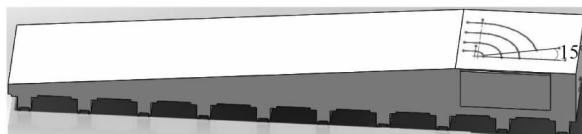


图7 优化导流板后的静压风室流体域模型

Figure 7 Air fluid domain model of static pressure chamber with Optimized baffle

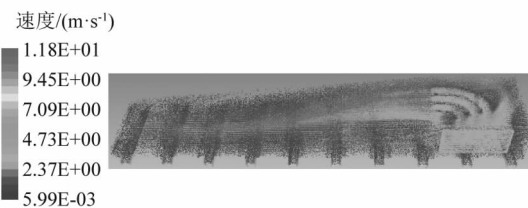


图8 静压风室速度三维矢量分布

Figure 8 Velocity 3D vector distribution of airflow in static pressure chamber

由图8可知,由于将靠左边的几块导流板进口位置设计为平行,对进入导流板流道的流体没有产生向右的分速度影响,仅产生对气流改变横向流动为纵向流动的效果。而由于最外侧导流板开有15°豁口,在气流由进风口流入静压风室完成9号与10号位置射流风嘴的流量补偿后,同时可以看到气流速度有一个明显的向右流动扩散过程,也完成了对静压风室最右侧流道的流量补偿。对各风嘴的射流速度进一步完成量化分析,按照前文相同的方法对射流风嘴出口速度进行提取,可得到如图9和图10所示的新导流板布置下的风嘴沿风嘴长度方向平均速度分布和各风嘴出口速度分布。

由图9和图10可知优化后沿风嘴长度方向出风速度最大波动为0.73%,各风嘴出风速度最大波动为2.69%。

分析图9可知通过对导流板安装尺寸的优化,射流风嘴出口速度波动由1.87%降到了0.73%,达到了涂布干燥要求1.00%以内速度波动范围的目标。计算可知,沿风嘴长度方向出口平均速度的最大波动不超过0.1 m/s,在此波动下,烘箱的极片烘干质量将得到有效保证。

由图 10 可知,优化安装尺寸的导流板将风室内的各风嘴出口风速波动由 5.06% 降低到了 2.69%,风嘴出风最大位置出现在远离进风口的 1 号风嘴,而中间位置的 6 号与 7 号风嘴出现了最小风速,这与导流板设计意图相一致。由于在纵向上,对各风嘴出口速度均匀性的要求并没有沿风嘴长度方向上均匀性要求高,在优化后的纵向出风速度均匀性下,烘箱能够满足保证极片烘干一致性的要求。

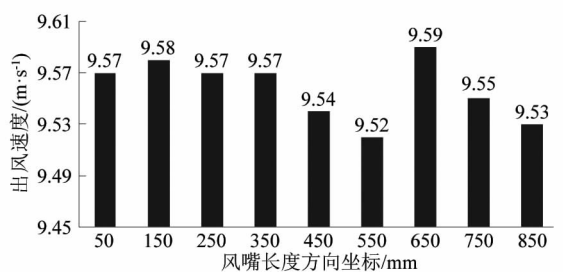


图 9 优化后静压风室沿风嘴长度方向射流速度分布

Figure 9 Velocity distribution along the jet length in optimized static pressure chamber

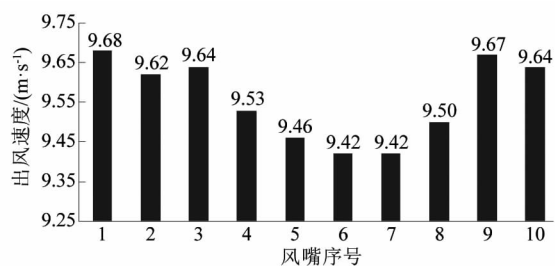


图 10 优化后静压风室各风嘴射流速度分布

Figure 10 Velocity distribution of each nozzle in optimized static pressure chamber

4 结语

烘箱是锂电池极片涂布机干燥系统的重要结构,经由烘箱射流出的热风速度均匀性对极片的一致性具有重要影响,课题组基于计算流体仿真软件对安装有

导流板的静压风室进行了结构建模与仿真分析,计算得到了热风气流在静压风室内的流动状态,结果表明在静压风室内添加导流板能够有效保证热风气流在静压风室内均匀流动。通过对风嘴射流速度的均匀性定量分析,进一步完成了静压风室内导流板安装尺寸的优化设计,仿真结果表明经过优化后的风嘴射流速度均匀性得到了改善,热风射流速度沿风嘴长度方向波动由 1.87% 下降到了 0.73%,各风嘴射流速度波动从 5.06% 下降到了 2.69%,风嘴射流速度均匀性达到了实际工况要求。

参考文献:

- [1] 薛雯娟,曾斌,王联,等. 锂离子电池研究进展以及重庆市的发展现状和前景[J]. 重庆工商大学学报(自然科学版),2013,30(11):85.
- [2] ZHANG Yan, CUI Qipeng, SHAO Fuqun, et al. Influence of air-knife wiping on coating thickness in hot-dip galvanizing[J]. Journal of Iron and Steel Research(International),2012,19(6):70.
- [3] 李徐佳,王亚男,王华山,等. 锂电池极片干燥过程供风量计算模型[J]. 电源技术,2017,41(2):198.
- [4] 王福军. 计算流体动力学分析[M]. 北京:清华大学出版社,2004:26-86.
- [5] 郑新,李新芳. 涂布机悬浮烘干系统中气翼风嘴的优化设计[J]. 轻工机械,2016,34(6):98.
- [6] 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):S19-S23.
- [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.
- [8] WANG Wenhui, LU Xiaolu, 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.
- [9] 张羽玲,马海山,武秋敏,等. FR-300 凹版印刷机干燥箱数值模拟与改进[J]. 包装工程,2015,36(11):132-139.
- [10] 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.