

电池智能制造、在线监测与原位分析专刊



电极浆料涂布模头流场分析与结构优化

杨家沐¹, 陈育新¹, 练 成^{1,2}, 徐 至¹, 刘洪来^{1,2}

(¹化学工程联合国家重点实验室, 华东理工大学化工学院, ²华东理工大学化学与分子工程学院, 上海 200237)

摘 要: 涂布工艺是锂电池极片制造过程的关键工序之一, 涂层的稳定性和厚度一致性决定了极片的结构, 进而影响电池的性能和循环寿命。大尺寸动力锂电池产品对涂布幅宽提出更高的要求, 保证涂布模头出口处电极浆料的流动均匀性成为核心技术问题之一。因此, 对涂布模头的流道结构进行合理优化显得尤为重要。本研究针对宽幅涂布模头出口速度分布不均的问题, 构建了不同尺寸和结构的模头流道模型进行流场仿真, 分析电极浆料在模头内部的流动特性, 并采用 Box-Behnken 设计对衣架式模头的结构尺寸进行优化。具有倾斜变径式匀料腔结构的衣架式模头对浆料有更强的引流效果, 有助于提升幅宽方向浆料流动的均匀性。采用 Box-Behnken 设计对衣架式模头的主要结构参数进行优化, 使浆料的均匀性提升至 0.99。

关键词: 锂离子电池; 狭缝涂布; 衣架式模头; 计算流体力学; Box-Behnken 设计

doi: 10.19799/j.cnki.2095-4239.2024.0100

中图分类号: TQ 024.1

文献标志码: A

文章编号: 2095-4239 (2024) 04-1109-09

Flow field analysis and structural optimization of coating die with electrode slurry

YANG Jiamu¹, CHEN Yuxin¹, LIAN Cheng^{1,2}, XU Zhi¹, LIU Honglai^{1,2}

(¹State Key Laboratory of Chemical Engineering, School of Chemical Engineering, East China University of Science and Technology, ²School of Chemistry and Molecular Engineering, East China University of Science and Technology, Shanghai 200237, China)

Abstract: The coating process is one of the key processes in the manufacturing of lithium battery electrodes. The stability and consistency of the coating determine the structure of the electrode, which in turn affects the performance and cycle life of the battery. As large-sized power lithium battery products had higher requirements for coating width, one of the core technical issues is how to ensure the flow uniformity of electrode slurry at the outlet of the coating die. Therefore, rational design of the flow channel structure of the coating die is crucial. This study aims to address the issue of inhomogeneous velocity distribution at the outlet of the wide coating die, and constructs die head flow channel models with different sizes and structures for flow field simulation. The flow characteristics of electrode slurry inside the die head are analyzed, and the structural dimensions of the coat-hanger die are optimized by using Box-Behnken design. The coat-hanger die with an inclined variable-diameter

收稿日期: 2024-02-01; 修改稿日期: 2024-03-12。

基金项目: 国家自然科学基金 (22278127), 中央高校基本科研业务费专项 (2022ZFJH004)。

第一作者: 杨家沐 (2000—), 男, 硕士研究生, 研究方向为锂离子电池极片制造工艺, E-mail: yjm1006i@163.com; 通信作者: 练成, 教授, 研究方向为电池材料设计与工艺仿真, E-mail: liancheng@ecust.edu.cn。

引用本文: 杨家沐, 陈育新, 练成, 等. 电极浆料涂布模头流场分析与结构优化[J]. 储能科学与技术, 2024, 13(4): 1109-1117.

Citation: YANG Jiamu, CHEN Yuxin, LIAN Cheng, et al. Flow field analysis and structural optimization of coating die with electrode slurry[J]. Energy Storage Science and Technology, 2024, 13(4): 1109-1117.

homogenizing cavity had a stronger drainage effect on the slurry, helping to improve the flow uniformity in the width direction. Adjustments to the die structure dimensions significantly impacted flow uniformity. The main structural parameters of the coat-hanger die were optimized using Box-Behnken design, resulting in an increase in the uniformity of the slurry to 0.99.

Keywords: lithium-ion batteries; slot-die coating; coat-hanger die; computational fluid dynamics; Box-Behnken design

锂离子电池作为一种高能量密度、长使用寿命的新型能源,被广泛应用于电动汽车、储能系统等领域^[1-3]。尽管在电极材料方面已有大量研究,但只有合理的制造工艺才能使电池实现理论性能^[4-5]。电池规格和产能的提高对制造工艺提出更高的要求,如何在提高生产效率的同时保证产品质量成为行业难题。锂离子电池的电化学性能主要依赖于充放电过程中电极与电解液界面发生的反应,极片的平整性和一致性对于电池整体性能具有重要影响。涂布是锂离子电池极片制造的关键步骤之一,与极片的活性物质载量和电极结构直接相关,须保证涂布过程的稳定性和涂层厚度的一致性^[6-7]。狭缝挤压式涂布可以精确控制涂层厚度且对不同浆料的适应性好,在锂离子电池极片的生产中得到了广泛应用^[8-10]。影响涂层质量的因素主要有模具的结构尺寸、浆料的流变性能,以及具体的操作参数等^[11-13]。应用于宽幅涂布(1000 mm 以上)时模头出口处的流动均匀性显著下降,如何保证宽幅涂布下浆料流动的均匀性是提升涂布工艺质量的关键问题之一。因此,结合浆料特性与模头结构分析模头出口处的均匀性,是改进涂布工艺的重要环节。由于工业级涂布模头的开模费用极高,且涂布过程消耗大量电极浆料,实验研究的成本居高不下。基于流体动力学的数值仿真方法能在降低研发成本的同时缩短研发周期,是一种较理想的研究方案^[14-15]。

狭缝挤压式模头是涂布过程中的关键组件,一般由上模、垫片及下模构成。涂布过程中浆料在压力作用下由进料口进入,经匀料腔和狭缝从底部流出,涂覆至铜箔或铝箔基材的表面。随着涂布幅宽的增大,模头中心区和边缘区流动阻力的差异增大,导致浆料流量分布的均匀性降低。Creel等^[16]对比了不同浓度油墨的涂布窗口,高浓度油墨的更高黏度会显著提高均匀涂层的操作范围。Sunilunmar等^[17]分析了浆料剪切增厚对狭缝涂布稳

定性的影响,随着颗粒浓度和流体黏度的增加,涂层稳定性得到了提升。Hawley等^[18]分析了涂布温度对浆料流变性能的影响,高温使浆料的黏度降低进而提高流动速度,抑制了涂布缺陷的产生。Ruschak等^[19]将模头结构参数与雷诺数和幂律系数相关联,考虑了组合腔体和狭缝的性能,实现模头结构的优化设计。针对模头结构参数对浆料流动分布的影响,Han等^[20]基于聚合物流动的数值模拟分析流动过程,结合多目标遗传算法得到优化后的模头结构参数。杨广军等^[21]基于表征值方法简化了衣架式模头匀料腔的设计,实现了计算机辅助设计,优化了模头出口浆料分布。这些研究常用于传统的造纸和胶卷等行业,幅宽较小,而电极由溶剂、高分子黏结剂、固体颗粒构成的电极浆料流变性能更加复杂。王晨语^[22]以保持平均滞留时间和剪切速率恒定为准则设计衣架式模头,结合正交设计方法优化工艺参数和流道结构。林黎明^[23]对涂布模头内部浆料的流动规律进行分析,系统研究了模头垫片和涂布工艺参数对流动稳定性的影响。梁军杰等^[24]针对双腔模头内部浆料的流动情况进行研究,分析了模头结构参数对浆料出口流速的影响,并建立了模型参数与浆料流动阻力的关联模型。

上述研究虽然对特定类型的涂布模头中浆料的流动情况进行了系统分析,但针对宽幅涂布时浆料流动均匀性下降的问题仍需深入研究。为了满足电池工业对涂布幅宽的更高需求,本文对单腔式、双腔式、衣架式3种典型模头结构中的浆料流动特征进行系统分析,寻找造成涂布性能差异的内在机理。基于3种典型的模头内部流场结构建立流体动力学模型进行数值仿真研究,分析了涂布幅宽对浆料流速均匀性的影响。针对宽幅涂布的特点对衣架式模头的主要结构参数进行了系统分析,并结合Box-Behnken设计对模头结构进行优化设计^[25]。

1 流场数值模拟

1.1 模型描述

典型的狭缝挤压式涂布过程如图 1 所示，模头内部流场主要由进料口、匀料腔、狭缝 3 部分构成。电极浆料由模头顶部的进料口流入内部，流经匀料腔、狭缝并在幅宽方向上均匀分布，挤出模头并涂覆至基材表面。

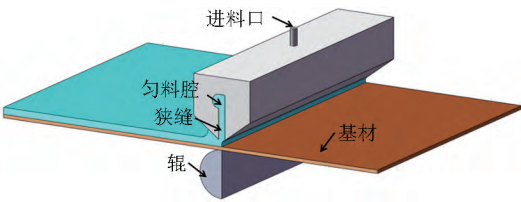


图 1 狭缝涂布工艺示意图

Fig. 1 Schematic diagram of slot die coating process

图 2 展示了单腔式、双腔式和衣架式 3 种典型模头结构。单腔式模头结构简单，但对浆料的均布效果有限。双腔式模头则在单腔式模头的基础上引入二级匀料腔结构，对浆料流动进一步匀化。衣架式模头常用于具有较大幅宽的涂布工艺，通过倾斜变径式匀料腔结构实现对浆料流动的精细化分配。

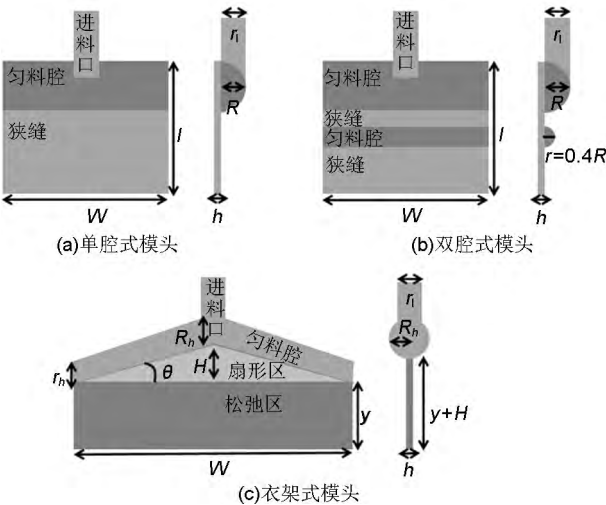


图 2 单腔式模头、双腔式模头和衣架式模头的结构示意图
Fig. 2 Schematic diagrams of single cavity die, dual-cavity die, and coat-hanger die

模头主要结构参数及浆料的物性参数如表 1 所示，其中浆料的物性参数来自之前的研究^[3]。本文将对模头的几何结构参数对模头出口速度分布的影响展开研究，并采用 Box-Behnken 设计对模头结

表 1 模型结构参数及浆料性质参数

Table 1 Structural parameters of model and properties parameters of slurry

参数	数值	单位
模头宽度, W	600, 800, 1000, 1200, 1400	mm
狭缝厚度, h	1	mm
模头高度, l	100	mm
进料管半径, r_i	5	mm
匀料腔半径, R	10	mm
二级匀料腔半径, r	4	mm
进料管长, L	80	mm
浆料密度, ρ	1320	kg/m ³
浆料表面张力, σ	0.066	N/m
浆料黏度, μ	$M \left(\frac{\gamma}{\gamma_{ref}} \right)^{N-1}$	Pa·s
参考剪切速率, γ_{ref}	1	s ⁻¹
流体一致性系数, M	3.585	Pa·s
流动特性指数, N	0.6322	—
倾斜角, θ	0, 2.5, 5, 7.5, 10	(°)
衣架式匀料腔中心半径, R_h	10	mm
衣架式匀料腔端部半径, r_h	10, 7.5, 5, 2.5, 1	mm
扇形区高度, H	$W \tan \theta$	mm
松弛区高度, y	40, 60, 80, 100, 120	mm

构尺寸进行参数优化。

1.2 控制方程

锂离子电池的电极浆料的黏度较大，一般为具有剪切稀化特性的非牛顿流体，在模头内部流动时雷诺数较小，可采用层流模型进行描述。假设浆料为不可压缩的非牛顿流体，并且在通常工况下涂布过程中的浆料流量保持恒定，故可将其视作稳态进行求解；假设浆料流动过程温度不发生变化，即不考虑传热因素的影响。因此，本文采用 Naiver-Stokes 方程描述浆料在模头内部流道的流动。

连续性方程：

$$\rho \nabla \cdot \mathbf{v} = 0 \tag{1}$$

动量守恒方程：

$$\rho \cdot (\mathbf{v} \cdot \nabla) \cdot \mathbf{v} = \nabla \cdot [-p\mathbf{I} + \mathbf{K}] + \mathbf{f} \tag{2}$$

其中， ρ 为密度， $\mathbf{v}$ 为速度矢量， p 为压强， $\mathbf{I}$ 为单位矩阵， $\mathbf{K}$ 为应力张量， $\mathbf{f}$ 为外力矢量。

1.3 边界条件

模型采用的边界条件如图 3(a)~图 3(c)所示。

- (1) 浆料入口：设置恒定的浆料流速进入模头内部，采用充分发展的流动条件。
- (2) 浆料出口：出口压强为 101325 Pa。
- (3) 无滑移壁面：其余边界的速度和滑移长度

设置为0。

基于有限元方法(finite element method, FEM)对上述模头内流场的控制方程进行计算。其中,狭缝区域采用尺寸均匀的六面体网格,匀料腔和进料口区域采用自由四面体网格[图3(d)]。由于模头结构具有高度对称性,为了提高计算效率,单腔式模头和双腔式模头可简化为其模型的1/2部分,衣架式模头简化至1/4部分。

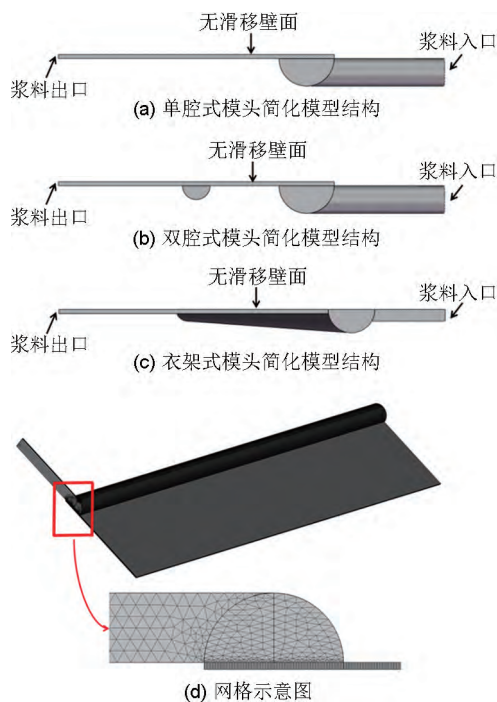


图3 单腔式模头、双腔式模头和衣架式模头的简化模型结构, 以及网格示意图

Fig. 3 The simplified model structure of single cavity die, dual-cavity die, and coat-hanger die, and the model grid diagram

1.4 模型验证

为了确保计算结果不受网格密度的影响, 首先进行网格无关性分析。如图4所示, 采用5个级别大小的网格密度对单腔式模头中的浆料流动进行了模拟。其中, 级别1至级别5的总网格数分别为120534、203428、451020、970738、1789838, 进料速度2 m/s、模头宽度1000 mm。如图4(a)所示, 网格密度对计算结果的影响可忽略不计, 为兼顾计算精度和计算效率在下文中均采用级别3的网格密度。为验证模型的准确性, 与Meng等^[26]的实验研究结果进行对比。模头结构为衣架式, 进料管直径为10 mm, 倾斜角为30°, 匀料腔中心和端部直径分

别为10 mm和5 mm, 松弛区高度为50 mm, 狭缝厚度为1.5 mm, 进料流量为 $2.5 \times 10^{-5} \text{ m}^3/\text{s}$ 。图4(b)展示了模拟结果与实验结果的对比, 在整个幅宽范围内均保持了较高的一致性。

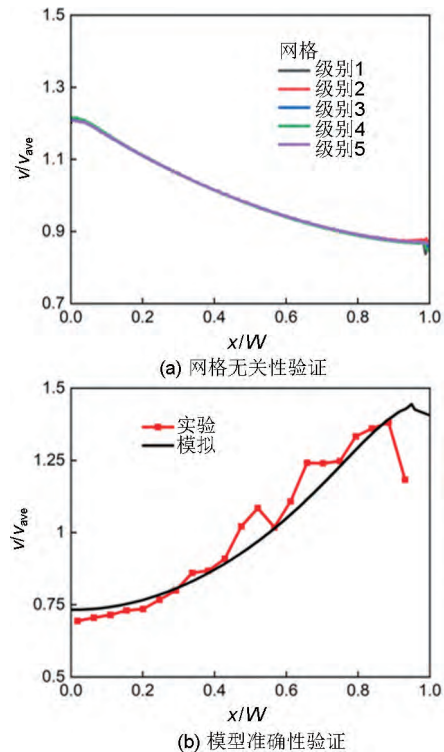


图4 (a)不同网格密度对浆料出口速度分布均匀性的影响, (b)计算结果与实验对比

Fig. 4 (a) The influence of different grid densities on the uniformity of slurry outlet velocity distribution, (b) Comparison between calculated results and experiments

1.5 Box-Behnken 设计

Box-Behnken 设计(Box-Behnken design, BBD)是一种响应曲面设计, 流程如图5所示, 所需的实验点数量相对较少, 可以高效估计一阶(线性)和二阶效应, 适用于因素水平较少的情况。在模头结构参数的优化中, Box-Behnken设计提供了一个系统化的方法评估不同设计参数对结构的影响, 从而确定最优化的模头结构。与全因子设计相比, BBD可在尽可能少的实验次数内, 准确估计模头设计参数对涂布均匀性的影响; 与中心组合设计(central composite design, CCD)相比, BBD无需进行连续试验, 样本点不超出设计范围, 优化过程更灵活, 具有更广泛的适用性^[27]。

二阶响应面模型:

$$U_v = k_0 + k_1x_1 + k_2x_2 + k_3x_3 + k_{12}x_1x_2 + k_{13}x_1x_3 + k_{23}x_2x_3 + k_{11}x_1^2 + k_{22}x_2^2 + k_{33}x_3^2 \quad (3)$$

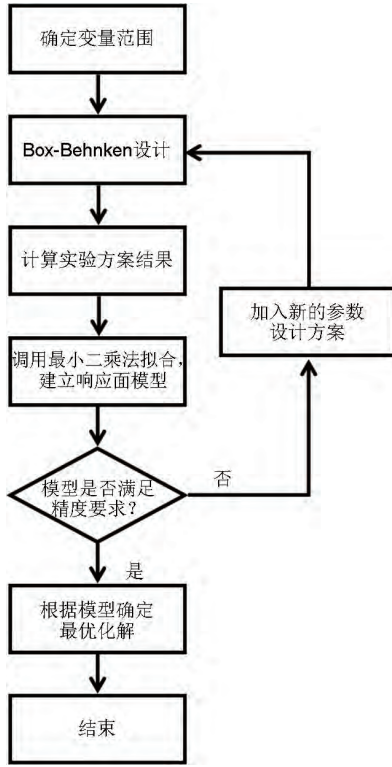


图5 Box-Behnken 设计流程

Fig. 5 Box-Behnken design process

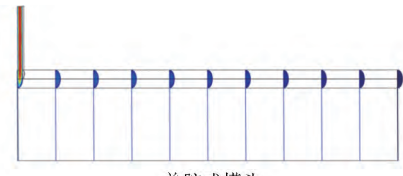
2 结果与讨论

2.1 单腔式、双腔式模头的涂布均匀性

基于表1中的模头结构尺寸数据建立流道模型进行数值仿真，并分析了浆料在模头内部的流动。由图6(a)可知，模头内部流场不存在涡流。浆料进入匀料腔后呈现向两端分散的趋势，在进料口与匀料腔连接处速度值最大，沿匀料腔两端速度值逐渐减小，呈现出中间高两端低的流动分布。

沿模头幅宽方向，浆料的压强呈现梯度式下降的趋势[图6(b)]。在单腔式模头匀料腔内压强的变化幅度较大，这是由于轴向压力梯度的作用使得浆料沿幅宽方向的流动阻力较大，易导致浆料在狭缝出口处的流动分布不均匀。双腔式模头引入了额外的二级匀料腔对浆料流动进行匀化，进一步降低了幅宽方向上的压力差异，从而提高了出口处的流动均匀性。

浆料出口速度分布与涂层质量密切相关^[23]。因此，通过出口速度均匀性考察模头的性能是最有效

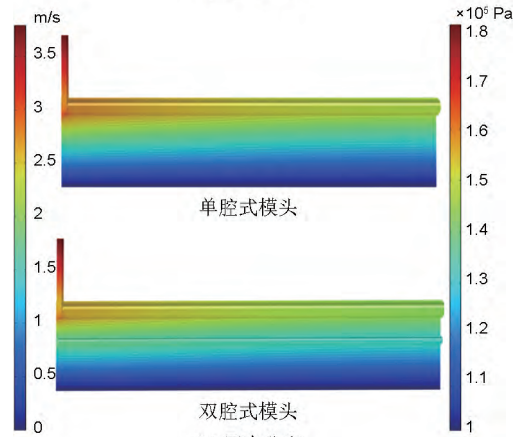


单腔式模头



双腔式模头

(a) 速度分布



(b) 压力分布

图6 模头内部浆料切面速度分布和压力分布

Fig. 6 The velocity distribution of the slurry section and pressure distribution inside the mold head

的方式。为便于直接比较不同结构尺寸下的浆料流动情况，对浆料流速、涂布宽度进行归一化处理^[24]：

$$v_{ave} = \frac{\sum_{i=1}^n v_i}{n} \quad (4)$$

$$\tilde{v} = \frac{v}{v_{ave}} \quad (5)$$

$$\tilde{x} = \frac{x}{W} \quad (6)$$

为了研究浆料出口速度分布均匀性，在模头出口处沿模头宽度方向设置居中的截线考察出口处浆料速度。其中， v_{ave} 表示出口处浆料的平均速度， $\tilde{v}$ 表示归一化处理浆料的平均速度， $\tilde{x}$ 表示归一化处理模头宽度。

$$U_v = 1 - \left(\frac{\sum_{i=1}^n |v_i - v_{ave}|}{v_{ave}} \right) / n \quad (7)$$

基于流速的标准差定义了速度分布的均匀性， n 表示计算得到的速度值对应的节点总数， U_v 表示浆料出口速度分布均匀性。

选取狭缝高度 100 mm，狭缝宽度 1 mm，进

料速度 2 m/s 及匀料腔半径 10 mm 为基准条件对不同模头宽度下的出口速度分布均匀性展开研究。随着模头宽度的增加,单腔式模头[图 7(a)]和双腔式模头[图 7(b)]的出口流速均匀性均明显降低。为提高宽幅涂布的均匀性,需对匀料腔结构进行优化以调节浆料的分布。

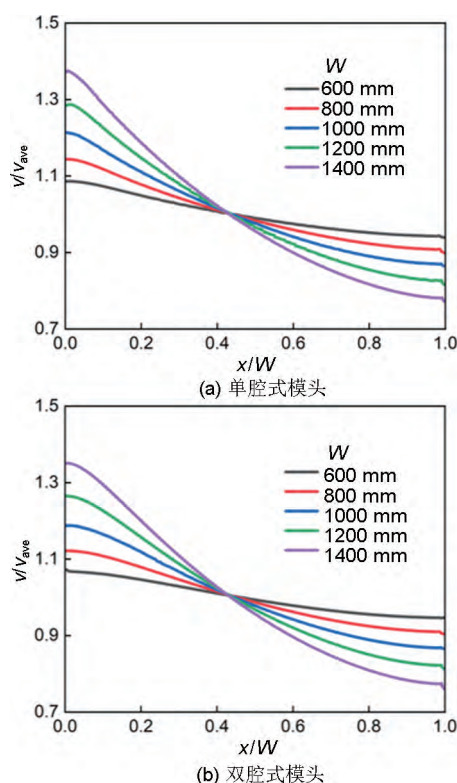


图7 不同模头宽度对浆料出口速度分布均匀性的影响
Fig. 7 The influence of different die widths on the uniformity of slurry outlet velocity distribution

2.2 衣架式模头的涂布均匀性

单腔式模头和双腔式模头的结构较简单,但宽幅涂布下的均匀性较差,对不同浆料的适应性较差,而衣架式模头因其采用了倾斜变径式匀料腔结构,对浆料流动有更强的约束效果,在宽幅涂布中得到广泛应用。本文选择以松弛区高度 80 mm、匀料腔端部半径 5 mm 和倾斜角 5° 为基准条件,研究衣架式模头内部的流动分布。由图 8 可知,相较于单腔式模头和双腔式模头,衣架式模头内部的压力分布得到了优化,一定程度上缓解了幅宽方向上流动分布不均匀的情况。

图 9(a)~(c) 分别展示了倾斜角、松弛区高度以及匀料腔端部半径对出口速度分布均匀性的影响。随着倾斜角增大,浆料流动逐渐边缘化,其中 2.5°

的倾斜角取得了最理想的均布效果。松弛区高度的增大使浆料有更长的停留时间,有利于其进一步均布。同时,流道长度的增加也会导致总流动阻力的提高,对传动系统的经济性有一定影响。与匀料腔倾斜角类似,端部半径的增大促使浆料更多地流向模头边缘。

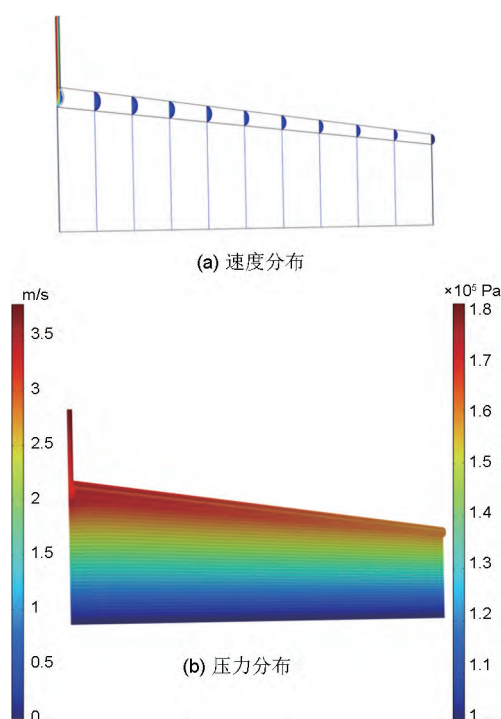


图8 模头内部浆料切面速度分布和压力分布
Fig. 8 The velocity distribution of the slurry section and pressure distribution inside the mold head

2.3 衣架式模头结构优化

为进一步提高宽幅涂布的均匀性,结合上述衣架式模头均匀性的研究对模头结构进行定量优化。采用 3 因素 3 水平 Box-Behnken 设计,选择倾斜角、匀料腔端部半径及松弛区高度 3 个关键因素,分别以 x_1 、 x_2 和 x_3 表示。 x_1 取 0°、2.5°、5°, x_2 取 1 mm、2.5 mm、5 mm, x_3 取 60 mm、80 mm、100 mm,并以 -1、0、1 代表每个因素的最小值、中间值和最大值,以出口均匀度 U_v 的值作为目标变量。表 2 展示了每组模拟采用的因素组合及出口均匀度。

根据 Box-Behnken 设计方案的 17 组数据,通过 MATLAB 进行数据处理和分析,拟合建立二阶响应面模型计算得误差自由度为 7,均方根误差 (RMSE) 为 0.0333,方差分析 F 值为 7.08,显著性

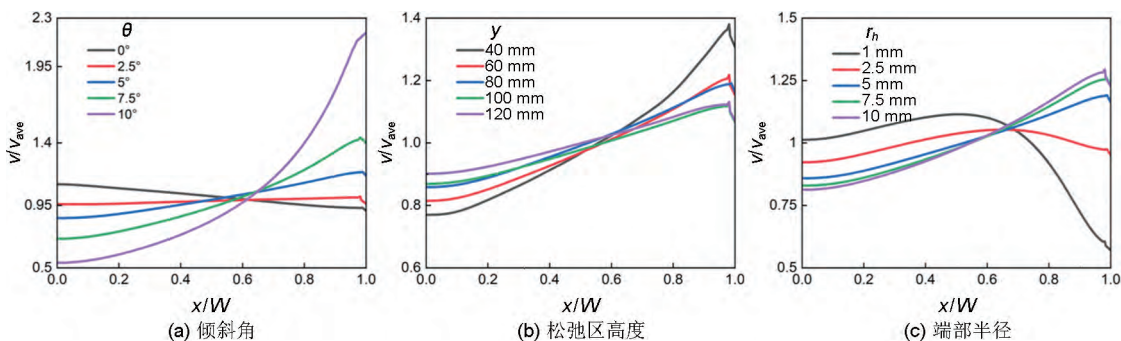


图9 模头结构对均匀性的影响, 依次为(a)倾斜角、(b)松弛区高度、(c)匀料腔端部半径

Fig. 9 The influence of the die structure on uniformity is as follows: (a) inclination angle, (b) height of the relaxation zone, and (c) radius of the end of the cavity

表2 Box-Behnken 设计方案参数值

Table 2 Scheme parameter values of Box-Behnken design

序号	因素 x_1 : 倾斜角	因素 x_2 : 匀料腔端部半径	因素 x_3 : 松弛区高度	均匀度 U_v
1	0	0	0	0.91
2	1	0	1	0.956
3	-1	0	-1	0.805
4	1	0	-1	0.932
5	-1	0	1	0.875
6	0	0	0	0.91
7	0	-1	-1	0.748
8	0	1	1	0.982
9	0	1	-1	0.978
10	0	-1	1	0.823
11	-1	1	0	0.921
12	0	0	0	0.91
13	1	-1	0	0.861
14	0	0	0	0.91
15	-1	-1	0	0.748
16	1	1	0	0.874
17	0	0	0	0.91

差异 P 值为 0.0086, 表明模型在统计上是显著的。回归决定系数 R^2 为 0.901, 调整 R^2 为 0.774, 表明模型对数据有很好的拟合度, 能很好地解释响应变量的变异。最终得到的二阶响应面模型如式(8)所示。

$$U_v = 0.91 + 0.0345x_1 + 0.071875x_2 + 0.021875x_3 - 0.04x_1x_2 - 0.011x_1x_3 - 0.01775x_2x_3 - 0.024625x_1^2 - 0.034375x_2^2 + 0.007125x_3^2 \quad (8)$$

预测最优组合为倾斜角 1.73° 、端部半径 4.83 mm 及松弛区高度 100 mm, 模型预测值 U_v 为 0.989。图 10 展示了基于最优化参数的数值模拟结果, 实际均匀度 0.99, 表明模型的预测值具有较好

的准确性。通过这种设计方法, 能有效提高宽幅涂布中浆料的均匀性。

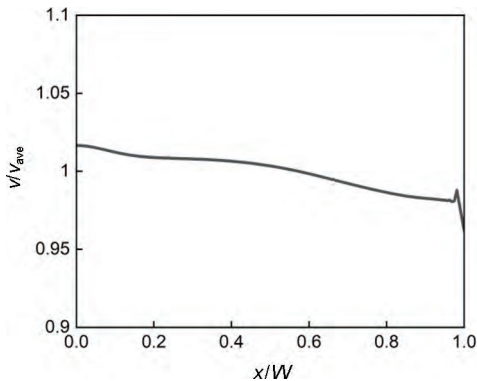


图10 预测最优化解模型的出口分布均匀度

Fig. 10 The uniformity of outlet distribution in the optimal solution model

3 结 论

本文通过有限元方法模拟了锂电池电极浆料在几种常见的狭缝挤压式涂布模头的内部流场, 分析了浆料在模头内部的流动分布, 并对出口处分布不均匀的问题进行探讨和优化。主要结论如下。

(1) 浆料在模头内部的流速呈中间高、两端低的分布。双腔式模头由于引入额外的匀料腔, 对浆料的均布效果略好于单腔式模头。但随着涂布幅宽增大, 两种模头的涂布均匀性均出现明显的下降。

(2) 采用具有倾斜变径匀料腔结构的衣架式模头可以提升宽幅下的涂布均匀性, 适中的倾斜角、匀料腔端部半径以及较大的松弛区高度有助于浆料的均匀流动。

(3) 结合 Box-Behnken 设计, 对倾斜角、松弛区高度及匀料腔端部半径进行了优化设计, 优化

后的浆料均匀度提升至 0.99。

符 号 说 明

F	方差分析值
f	外力, N
H	扇形区高度, mm
h	狭缝厚度, mm
I	单位矩阵
K	应力张量
k_0	BBD 常数项系数
k_1, k_2, k_3	—— BBD 一次项系数
k_{11}, k_{22}, k_{33}	—— BBD 二次项系数
k_{12}, k_{13}, k_{23}	—— BBD 交叉项系数
L	进料管长, mm
l	模头高度, mm
M	流体一致性系数, Pa·s
N	流动特性指数
P	显著性差异
p	压力, Pa
R	匀料腔半径, mm
R_n	衣架式模头匀料腔中心半径, mm
R^2	回归决定系数
r	双腔式模头二级匀料腔半径, mm
r_n	衣架式模头匀料腔端部半径, mm
r_i	进料管半径, mm
U_v	出口速度均匀度
v	速度, m/s
v_{ave}	平均速度, m/s
$\tilde{v}$	归一化速度值
W	模头宽度, mm
x_1, x_2, x_3	BBD 关键因素
$\tilde{x}$	归一化模头宽度坐标
y	松弛区高度, mm
γ	剪切速率, s^{-1}
γ_{ref}	参考剪切速率, s^{-1}
θ	倾斜角, ($^\circ$)
μ	黏度, Pa·s
ρ	浆料密度, kg/m^3
σ	表面张力, N/m
下标	
ave	平均值
ref	参考值

参 考 文 献

- [1] 李凌萱, 王子轩, 赵辰孜, 等. 复合金属锂负极的定量模型新进展[J]. 储能科学与技术, 2023, 12(7): 2059-2078.
- [2] 李晋, 王青松, 孔得朋, 等. 锂离子电池储能安全评价研究进展[J]. 储能科学与技术, 2023, 12(7): 2282-2301.
- [3] 李放, 闵永军, 张涌. 基于大数据的动力锂电池可靠性关键技术研究综述储能测试与评价[J]. 储能科学与技术, 2023, 12(6): 1981-1994.
- [4] 赵争光, 陈振营, 翟光群, 等. Sc/O 掺杂硫化物固态电解质的制备及全固态电池性能[J]. 储能科学与技术, 2023, 12(8): 2412-2423.
- [5] 李森, 于永利, 吴剑扬, 等. 高能量密度磷酸铁锂正极设计[J]. 储能科学与技术, 2023, 12(7): 2045-2058.
- [6] LEE J, KIM S, LEE C. Large area electrolyte coating through surface and interface engineering in roll-to-roll slot-die coating process[J]. Journal of Industrial and Engineering Chemistry, 2019, 76: 443-449.
- [7] ZHENG G, WACHTER F, AL-ZOUBI A, et al. Computations of coating windows for reverse roll coating of liquid films[J]. Journal of Coatings Technology and Research, 2020, 17(4): 897-910.
- [8] 钟健平, 费韬. 基于 WOA-BPNN 的锂电池极片涂布缺陷检测识别[J]. 储能科学与技术, 2022, 11(8): 2537-2545.
- [9] 梁卫华, 吴大勇, 舒均国. 逗号刮刀涂布流场理论分析与数值模拟[J]. 储能科学与技术, 2021, 10(2): 565-576.
- [10] ZHU C B, FU Y P, YU Y. Designed nanoarchitectures by electrostatic spray deposition for energy storage[J]. Advanced Materials, 2019, 31(1): e1803408.
- [11] HUANG T L, TAN P H, ZHONG Z Y, et al. Numerical and experimental investigation on the defect formation in lithium-ion-battery electrode-slot coating[J]. Chemical Engineering Science, 2022, 258: 117744.
- [12] SPIEGEL S, HECKMANN T, ALTVATER A, et al. Investigation of edge formation during the coating process of Li-ion battery electrodes[J]. Journal of Coatings Technology and Research,

- 2022, 19(1): 121-130.
- [13] 陈育新, 杨家沐, 练成, 等. 基于相场模型的锂电池电极浆料稳定涂布窗口分析[J]. 储能科学与技术, 2023, 12(7): 2185-2193.
CHEN Y X, YANG J M, LIAN C, et al. Analysis of stable coating window of lithium battery electrode paste based on phase field models[J]. Energy Storage Science and Technology, 2023, 12(7): 2185-2193.
- [14] 吴宜琨, 何杰, 杨乐, 等. 锂离子电池多物理场多尺度变形理论模型与计算方法[J]. 储能科学与技术, 2023, 12(7): 2141-2154.
WU Y K, HE J, YANG L, et al. Multiscale and multiphysics theoretical model and computational method for lithium-ion batteries[J]. Energy Storage Science and Technology, 2023, 12(7): 2141-2154.
- [15] DING X Y, FULLER T F, HARRIS T A L. A simulation model to approximate penetration of a non-Newtonian fluid into a porous media during slot die coating[J]. Journal of Coatings Technology and Research, 2014, 11(1): 83-87.
- [16] CREEL E B, TJIPTOWIDJOJO K, ALEX LEE J, et al. Slot-die-coating operability windows for polymer electrolyte membrane fuel cell cathode catalyst layers[J]. Journal of Colloid and Interface Science, 2022, 610: 474-485.
- [17] SUNILKUMAR K, JONATHAN P. R. The effect of shear-thickening on the stability of slot-die coating[J]. AIChE Journal, 2016, 62(12): 4536-4547.
- [18] HAWLEY W B, LI J L. Beneficial rheological properties of lithium-ion battery cathode slurries from elevated mixing and coating temperatures[J]. Journal of Energy Storage, 2019, 26: 100994.
- [19] RUSCHAK K J, WEINSTEIN S J. Model for the outer cavity of a dual-cavity die with parameters determined by two-dimensional finite-element analysis[J]. AIChE Journal, 2018, 64(2): 708-716.
- [20] HAN W L, WANG X H. Multi-objective optimization of the coat-hanger die for melt-blowing process[J]. Fibers and Polymers, 2012, 13(5): 626-631.
- [21] 杨广军, 朱世杰, 黄醒春, 等. 衣架式机头口模设计公式的修正探讨[J]. 塑料科技, 2005, 33(4): 46-50.
YANG G J, ZHU S J, HUANG X C, et al. Discussion on the correction of design formula of coathanger type extrusion dies[J]. Plastics Science and Technology, 2005, 33(4): 46-50.
- [22] 王晨语. 基于流固耦合的衣架型模头多目标优化设计[D]. 大连: 大连理工大学, 2019.
WANG C Y. Multi-objective optimization design of hanger die based on fluid-solid coupling[D]. Dalian: Dalian University of Technology, 2019.
- [23] 林黎明. 动力锂电池浆料狭缝式挤压涂布流场数值模拟研究[D]. 郑州: 郑州大学, 2021.
LIN L M. Numerical simulation of flow field in slot coating of slurry for power lithium battery[D]. Zhengzhou: Zhengzhou University, 2021.
- [24] 梁军杰, 周华民, 陶波, 等. 双腔式锂电池涂布浆料挤压模头的流场数值模拟与分析[J]. 模具工业, 2016, 42(10): 5-10.
LIANG J J, ZHOU H M, TAO B, et al. Numerical simulation and analysis of the flow field in double-cavity extrusion die with coating Li-ion power battery[J]. Die & Mould Industry, 2016, 42(10): 5-10.
- [25] ZALEWSKI M J, MAMIŃSKI M Ł, PARZUCHOWSKI P G. Synthesis of polyhydroxyurethanes-experimental verification of the box-behnken optimization model[J]. Polymers, 2022, 14(21): 4510.
- [26] MENG K, WANG X H, CHEN Q G. Fluid flow in coat-hanger die of melt blowing process: Comparison of numerical simulations and experimental measurements[J]. Textile Research Journal, 2011, 81(16): 1686-1693.
- [27] MOUSAVI L, TAMIJI Z, KHOSHAYAND M R. Applications and opportunities of experimental design for the dispersive liquid-liquid microextraction method-A review[J]. Talanta, 2018, 190: 335-356.