

DOI:10.11918/202403028

热风-极片耦合的湿涂层热-质传递数理模型

王佳骏, 曾月, 麻宏强, 谢越, 王圣寻

(华东交通大学 土木建筑学院, 南昌 330013)

摘要:为解决对流干燥过程中极片湿涂层热-质传递过程数值计算复杂的问题,综合考虑热风和基材铝板对湿涂层热-质传递特性的共同影响,基于多孔介质多场耦合理论,采用无网格并行方法建立三维热风-极片湿涂层热-质传递数理模型,提出湿涂层热-质传递过程的差分计算方法。由于数理模型对计算精度要求较高,模拟计算时间长,为提高计算效率,基于相似理论提出缩尺模拟方法,并通过对比不同缩尺比例湿涂层的温、湿度变化规律验证其可靠性。结果表明:不同缩尺比例下湿涂层湿度判定系数 R^2 均大于0.99;原尺模型的模拟时间为5 h,缩尺倍数为800的缩尺模型的模拟计算时间为2.77 h,相比原尺模型减少了44.6%,有效提高了数值计算效率。最后,基于缩尺模拟方法对数理模型进行可靠性验证,结果表明,热风-极片湿涂层热-质传递数理模型温、湿度模拟结果与实验数据的误差均在 $\pm 15\%$ 以内,仅个别数据点偏大,说明该模型具有可靠性。

关键词: 传热传质;湿涂层热-质传递数理模型;多孔介质多场耦合理论;差分计算方法;缩尺模拟方法

中图分类号: TB61

文献标志码: A

文章编号: 0367-6234(2025)05-0077-11

Mathematical model of heat and mass transfer in wet coating coupled with hot air and electrode plate

WANG Jiajun, ZENG Yue, MA Hongqiang, XIE Yue, WANG Shengxun

(School of Civil Engineering and Architecture, East China Jiaotong University, Nanchang 330013, China)

Abstract: In order to address the complex numerical calculations of the heat and mass transfer processes in the wet coating of electrode plates during convective drying, this study comprehensively considers the combined effects of hot air and the aluminum substrate on the thermal and mass transfer characteristics of the wet coating. Based on the multi-field coupling theory in porous media, a three-dimensional mathematical model of heat and mass transfer in the hot air-electrode plate wet coating is established using a meshless parallel method. Meanwhile, a difference calculation method for the heat and mass transfer process in the wet coating is proposed. Due to the high requirements for computational accuracy in mathematical model, a scale simulation method based on similarity theory is proposed to improve computational efficiency. The reliability of this method is validated through the comparison of temperature and humidity variations of wet coatings at different scaling ratios. The results show that the determination coefficient R^2 of humidity assessment of the wet coating at different scaling ratios is greater than 0.99. The simulation time for the original-scale model is 5 hours, while the simulation time for the scaled model with a scaling factor of 800 is 2.77 hours, representing a 44.6% reduction compared to the original model, thus effectively improving the numerical computation efficiency. Finally, the reliability of mathematical model is validated based on scale simulation method. The results show that the simulation temperature and humidity values from the hot air-electrode plate wet coating heat and mass transfer model have errors within $\pm 15\%$ of the experimental data, with only a few data points exhibiting slightly larger discrepancies, indicating that the model is reliable.

Keywords: heat and mass transfer; mathematical model of heat and mass transfer in wet coating; coupled multi-field theory in porous media; difference calculation method; scale simulation method

湿涂层的干燥工艺为锂电池用极片制造过程中的关键环节^[1]。然而,湿涂层干燥主要以多相多孔介质干燥模型为基础^[2],其热-质传递过程非常复

杂。因此,构建可靠的热风-极片湿涂层热-质传递数理模型对评估湿涂层热-质传递特性尤为重要。

目前,评估湿涂层热-质传递特性的方法有很

收稿日期: 2024-03-11; 录用日期: 2024-04-17; 网络首发日期: 2024-07-14

网络首发地址: <https://link.cnki.net/urlid/23.1235.T.20240710.0842.002>

基金项目: 国家自然科学基金(52368071); 江西省创新领军人才项目(jxsq2023101064, jxsq2023102132); 江西省2023年度研究生创新专项资金(YC2023-S486)

作者简介: 王佳骏(2000—),男,硕士研究生;麻宏强(1984—),男,教授,博士生导师

通信作者: 曾月, yuyan116@qq.com; 麻宏强, mahq2014@sina.com

多,主要包括实验研究和数值模拟等。然而,评估过程中存在多孔介质建模困难^[3]、评估误差大以及数值计算复杂^[4-6]等问题。在实验测量方面,许多学者采用宏观测量法以及扫描电子显微镜 (SEM) 观测法对湿涂层热-质传递特性进行评估^[7]。由于湿涂层内部结构复杂,评估误差非常大^[8]。在数值模拟方面,Font 等^[9]建立了一种二维湿涂层干燥数理模型,实现了对湿涂层薄膜收缩阶段温、湿度参数的准确评估。Susarla 等^[10]通过建立二维多孔介质数理模型发现,湿涂层干燥过程的 90% 在近一半的时间内完成,另一半的干燥时间仅用于去除最后 10% 的溶剂,精确监测了孔隙排空阶段湿涂层的参数变化。然而,由于简化过度,二维模型不能完整地描述湿涂层整体的热-质传递过程^[11]。另外,湿涂层复杂的热-质传递过程将极大增加数值计算的难度^[12],也难以保证其热-质传递特性评估结果的准确性。综上,现有研究仍存在三维建模困难以及数值计算复杂的问题,并且未综合考虑热风 and 铝板对湿涂层热-质传递特性的共同影响,难以确保其数理模型的可靠性。

为解决极片湿涂层热-质传递过程数值计算复杂、误差大的问题,基于多孔介质多场耦合理论,采用无网格并行方法建立三维热风-极片湿涂层热-质传递数理模型,提出湿涂层热-质传递过程的差分计算方法。为提高计算效率,基于相似理论提出缩尺模拟方法,通过对比不同缩尺比例湿涂层的温、湿度变化规律验证其可靠性。最后,基于缩尺模拟方法验证数理模型的可靠性。

1 热风-极片湿涂层的热-质传递模型建立

1.1 热风-极片湿涂层物理模型

为了降低实验成本,现有研究主要通过恒温恒湿鼓风干燥箱对湿涂层进行干燥^[8]。选用尺寸为 560 mm(长) × 500 mm(宽) × 550 mm(高)的恒温

恒湿干燥箱和 160 mm(长) × 90 mm(宽)的薄极片建立热风-极片湿涂层物理模型,如图 1 所示。其中,薄极片位于距 xz 平面 250 mm、 yz 平面 280 mm 及 xy 平面 275 mm 位置处,主要由湿涂层和基材铝板组成,二者的厚度分别为 100 μm 和 10 μm 。

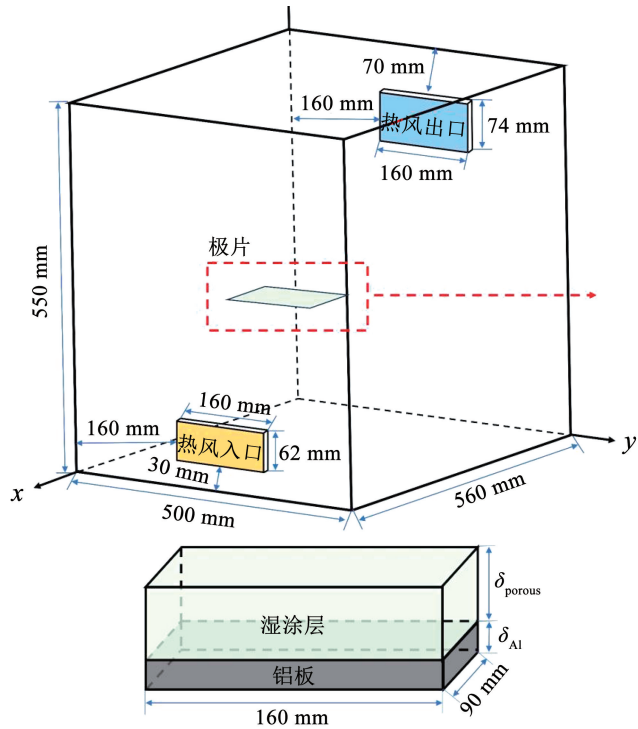


图 1 对流干燥过程中的热风-极片湿涂层物理模型

Fig. 1 Physical model of hot air and electrode plate wet coating in convective drying process

为了降低多孔介质建模的难度,通过无网格并行方法和用户自定义函数 (UDF) 对极片的计算域进行简化,建立了一种极片薄层三维简化模型。图 2 为极片厚度方向 (xz 平面) 的计算域。其中,湿涂层和铝板两个薄层计算过程分别被简化成一维 (计算过程在 z 轴方向上界面和下界面进行),简化后的模型可以避免湿涂层-铝板交界面的复杂耦合过程。在模拟计算过程中,极片初始厚度、含水量及孔隙率等物性参数均通过 UDF 进行调整。

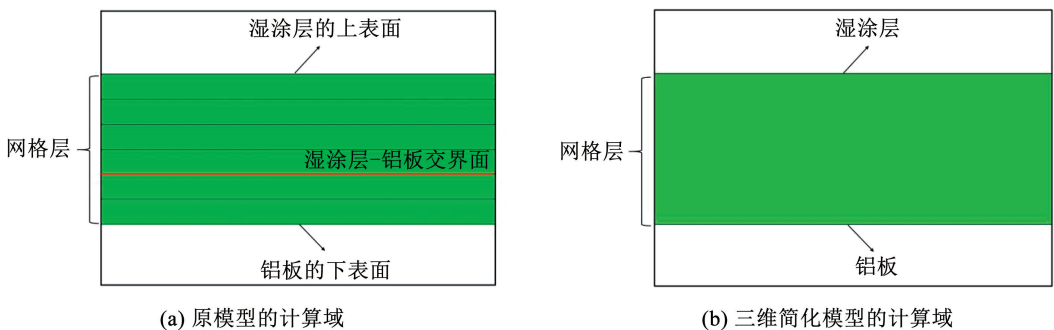


图 2 极片厚度方向 (xz 平面) 的计算域

Fig. 2 Computational domain in the thickness direction (xz plane) of electrode plate

1.2 热风-极片湿涂层的热-质传递数学模型

为了精确评估湿涂层热-质传递特性,基于多孔介质多场耦合理论建立了热风-极片湿涂层的热-质传递数学模型。热风-极片湿涂层的热-质传递过程主要包括以下几个方面:1)湿涂层-湿空气间的热-质传递过程;2)湿空气的热-质传递过程;3)湿涂层-铝板间的热传导过程;4)铝板-湿空气间的对流换热过程(由于该理论过程通过 Fluent 软件迭代计算,未在文中详述其数学模型,铝板下表面所产生的热流量通过 UDF 的并行化计算完成,详见 3.1 节)。干燥过程的数学模型建立基于如下合理假设:1)湿涂层与湿空气交界面处无接触热阻;2)因导热进入湿涂层的能量、因热对流进入湿涂层的能量以及湿涂层水分蒸发进入空气的蒸发潜热量仅来自 z 轴方向, x 轴和 y 轴方向导入湿涂层的净热量忽略不计;3)湿涂层的孔隙率和厚度在对流干燥过程中保持不变;4)根据道尔顿分压定律,由于环境相对湿度为定值,忽略水分蒸发对湿空气密度的影响,湿空气的密度根据干空气和水蒸气的平均值取一定值。

$$\begin{cases} \frac{\partial(\rho_g k)}{\partial \tau} + \nabla \cdot (\rho_g u k) = \frac{\partial}{\partial x} \left[\left(\mu_g + \frac{\mu_l}{\sigma_k} \right) \frac{\partial k}{\partial x} \right] + \frac{\partial}{\partial y} \left[\left(\mu_g + \frac{\mu_l}{\sigma_k} \right) \frac{\partial k}{\partial y} \right] + \frac{\partial}{\partial z} \left[\left(\mu_g + \frac{\mu_l}{\sigma_k} \right) \frac{\partial k}{\partial z} \right] + G_k - \rho_g \varepsilon \\ \frac{\partial(\rho_g \varepsilon)}{\partial \tau} + \nabla \cdot (\rho_g u \varepsilon) = \frac{\partial}{\partial x} \left[\left(\mu_g + \frac{\mu_l}{\sigma_\varepsilon} \right) \frac{\partial \varepsilon}{\partial x} \right] + \frac{\partial}{\partial y} \left[\left(\mu_g + \frac{\mu_l}{\sigma_\varepsilon} \right) \frac{\partial \varepsilon}{\partial y} \right] + \frac{\partial}{\partial z} \left[\left(\mu_g + \frac{\mu_l}{\sigma_\varepsilon} \right) \frac{\partial \varepsilon}{\partial z} \right] + C_{1\varepsilon} \frac{\varepsilon}{k} G_k - C_{2\varepsilon} \rho_g \frac{\varepsilon^2}{k} \end{cases} \quad (3)$$

式中: k 和 ε 分别为湿空气的湍流动能和耗散率; σ_k 和 σ_ε 分别为湿空气湍流动能和耗散率的湍流普朗特数,取 1.0 和 1.3; G_k 为由湿空气速度梯度产生的湍流动能; $C_{1\varepsilon}$ 和 $C_{2\varepsilon}$ 分别取 1.44 和 1.92。

湿空气的湍流动力黏度 μ_l 可表达为

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

式中 C_μ 为常数,取 0.09。

根据能量守恒原理,湿空气的能量变化可表达为

$$\frac{\partial(\rho_g C_{p,g} T_g)}{\partial \tau} + \nabla \cdot (\rho_g C_{p,g} u T_g) = \nabla \cdot (\lambda_g \nabla T_g) + S_{\text{evap}} h_{\text{evap}} \quad (5)$$

式中: $C_{p,g}$ 为湿空气的比热容, $\text{J}/(\text{kg} \cdot \text{K})$; T_g 为湿空气的温度, K ; λ_g 为湿空气的热导率, $\text{W}/(\text{m} \cdot \text{K})$; h_{evap} 为水蒸气的汽化潜热, J/kg , 可表达为

$$h_{\text{evap}} = 2\,503\,000 - 2\,386(T_g - 273.16) \quad (6)$$

1.2.2 湿涂层-湿空气间的热-质传递过程推理

根据质量守恒定理,湿涂层中水蒸气和水的质量传输过程可表达为

1.2.1 湿空气的热-质传递过程推理

根据质量守恒定理,湿空气的质量传输方程可表达为

$$\frac{\partial \rho_g}{\partial \tau} + \nabla \cdot (\rho_g u) = S_{\text{evap}} \quad (1)$$

式中: ρ_g 为湿空气的密度, kg/m^3 ; u 为气体的速度, m/s ; S_{evap} 为湿涂层蒸发过程的蒸发源项(具体描述见 1.2.2 节), $\text{kg}/(\text{m}^3 \cdot \text{s})$ 。

根据动量守恒原理,湿空气中的动量方程可表达为

$$\rho_g \frac{\partial u}{\partial \tau} + \rho_g (u \cdot \nabla) u = F - \nabla P + \nabla \cdot \left[(\mu_g + \mu_l) (\nabla u + (\nabla u)^T) - \frac{2}{3} (\mu_g + \mu_l) \nabla \cdot u \right] \quad (2)$$

式中: F 为湿空气受到外界的合力, $\text{kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{s}^2)$; P 为单位体积湿空气的压力, Pa ; μ_g 为湿空气的动力黏度, $\text{Pa} \cdot \text{s}$; μ_l 为湿空气的湍流动力黏度, $\text{Pa} \cdot \text{s}$ 。

使用的湍流方程为 $k-\varepsilon$ 模型,湍流动能 k 和耗散率 ε 的相关方程可表达为

$$\begin{cases} \frac{\partial \rho_v}{\partial \tau} + \nabla \cdot J_v = S_{\text{evap}} \\ \frac{\partial \rho_l}{\partial \tau} + \nabla \cdot J_l = -S_{\text{evap}} \end{cases} \quad (7)$$

式中: ρ_v 和 ρ_l 分别为水蒸气和液态水的密度, kg/m^3 ; J_v 和 J_l 分别为水蒸气和液态水的质量通量, $\text{kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$ 。

在干燥过程中,湿涂层蒸发的水分主要分为表面自由水和内部吸附水。具体而言,自由水在湿涂层的表面被直接蒸发成水蒸气,然后扩散至湿空气中;内部吸附水则首先通过毛细管力扩散到湿涂层表面,然后再蒸发成水蒸气,最后扩散至湿空气中。然而,当湿涂层的含水量降至饱和含水点时,仅靠毛细管力难以将吸附水完全扩散,未扩散至表面的水分只能在内部直接被蒸发成水蒸气,再以水蒸气的形式由内部扩散至表面^[13]。其中,饱和含水点为多孔介质的自由水完全蒸干,而内部吸附水仍处于饱和状态时所对应的含水率^[14]。综上,湿涂层的蒸发速率 R_{evap} 可表达为

$$\begin{cases} R_{\text{evap}} = h_D (c_v - c_{v,g}) M_l, M_d > M_{d,\text{sat}} \\ R_{\text{evap}} = h_D^{\text{in}} (c_{v,s} - c_{v,e}) M_l, M_d < M_{d,\text{sat}} \end{cases} \quad (8)$$

式中: R_{evap} 为湿涂层的蒸发速率, $\text{kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$; h_{D} 为湿涂层的表面传质系数, m/s ; h_{D}^{in} 为湿涂层的内部传质系数, m/s ; c_{v} 、 $c_{\text{v,g}}$ 、 $c_{\text{v,s}}$ 和 $c_{\text{v,e}}$ 分别为湿涂层水蒸气的浓度、周围湿空气中水蒸气的浓度、湿涂层达到饱和含水点后对应水蒸气的浓度以及周围湿空气中水蒸气的平衡浓度, mol/m^3 ; M_1 为液态水的摩尔质量, kg/mol ; M_{d} 为当前时刻湿涂层的干基含水量, 其计算过程详见 1.3 节式 (43); $M_{\text{d,sat}}$ 为湿涂层达到饱和含水点时对应的干基含水量, 一般在 30% ~ 40%^[9], 本文取平均值 35%。

同时, 在湿涂层蒸发过程中的气体满足理想气体状态方程, 可表达为

$$p_{\text{v}}V = nRT_{\text{g}} \quad (9)$$

式中: p_{v} 为气体的饱和水蒸气分压力, Pa ; V 为气体的体积, m^3 ; R 为通用气体常数, $\text{J}/(\text{mol} \cdot \text{K})$ 。

根据式 (8) 和式 (9), 湿涂层水蒸气的浓度 c_{v} 和 $c_{\text{v,s}}$ 可表达为

$$\begin{cases} c_{\text{v}} = \frac{p_{\text{v,sat}}(T_{\text{w}_1})}{RT_{\text{w}_1}} \\ c_{\text{v,s}} = M_{\text{d}} \frac{p_{\text{v,sat}}(T_{\text{w}_1,\text{sat}})}{RT_{\text{w}_1,\text{sat}}} \end{cases} \quad (10)$$

式中: $p_{\text{v,sat}}$ 为湿涂层的饱和水蒸气分压力, Pa ; T_{w_1} 为湿涂层-湿空气界面处的温度, K ; $T_{\text{w}_1,\text{sat}}$ 为湿涂层达到饱和含水点时的表面温度, K 。

根据式 (8), 湿涂层-湿空气界面两侧的压差为湿涂层表面水蒸气向空气扩散的推动力, 与界面两侧温度有关。因此, 对湿涂层-湿空气界面处两侧的温度分开讨论, 其中, 界面处空气侧的温度为 T_1 , 周围湿空气中水蒸气浓度 $c_{\text{v,g}}$ 以及平衡浓度 $c_{\text{v,e}}$ 可表达为

$$\begin{cases} c_{\text{v,g}} = \phi_{\infty} \frac{p_{\text{v,sat}}(T_1)}{RT_1} \\ c_{\text{v,e}} = M_{\text{d,e}} \frac{p_{\text{v,sat}}(T_{\text{w}_1,\text{sat}})}{RT_{\text{w}_1,\text{sat}}} \end{cases} \quad (11)$$

式中: ϕ_{∞} 为湿空气的环境相对湿度; T_1 为湿涂层-湿空气界面处空气侧的温度, K 。

根据假设 1), 二者交界面处无接触热阻, 即界面处两侧温度相等。可表达为

$$T_{\text{w}_1} = T_1 \quad (12)$$

由于湿涂层达到饱和含水点时对应的蒸发速率具有连续性, 湿涂层的传质系数 h_{D} 和 h_{D}^{in} 可表达为

$$\begin{cases} h_{\text{D}} = \frac{h}{\rho_{\text{g}} C_{\text{p,g}} Le^{2/3}} \\ h_{\text{D}}^{\text{in}} = \frac{h_{\text{D}}(c_{\text{v}} - c_{\text{v,g}})}{c_{\text{v,s}} - c_{\text{v,e}}} \end{cases} \quad (13)$$

式中: h 为湿涂层-湿空气间的对流换热系数, $\text{W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$; Le 为刘易斯数, 本文取 0.8。

湿涂层的饱和蒸汽压力 $p_{\text{v,sat}}(T_{\text{w}_1})$ 可表达为

$$p_{\text{v,sat}}(T_{\text{w}_1}) = 610.7 \times 10^{\frac{7.5(T_{\text{w}_1} - 273.15)}{(T_{\text{w}_1} - 35.85)}} \quad (14)$$

将式 (10) ~ (14) 代入式 (8) 中, 湿涂层的蒸发速率 R_{evap} 可表达为

$$\begin{cases} R_{\text{evap}} = \frac{hM_1}{\rho_{\text{g}} C_{\text{p,g}} Le^{2/3}} \frac{610.7 \times 10^{\frac{7.5(T_{\text{w}_1} - 273.15)}{(T_{\text{w}_1} - 35.85)}}}{RT_{\text{w}_1}} \cdot (1 - \phi_{\infty}), M_{\text{d}} > M_{\text{d,sat}} \\ R_{\text{evap}} = \frac{hM_1}{\rho_{\text{g}} C_{\text{p,g}} Le^{2/3}} \frac{610.7 \times 10^{\frac{7.5(T_{\text{w}_1,\text{sat}} - 273.15)}{(T_{\text{w}_1,\text{sat}} - 35.85)}}}{RT_{\text{w}_1,\text{sat}}} \cdot \frac{(1 - \phi_{\infty})}{M_{\text{d,sat}} - M_{\text{d,e}}}, M_{\text{d}} < M_{\text{d,sat}} \end{cases} \quad (15)$$

基于湿涂层质量守恒的优化, 式 (1)、(5) 和 (7) 中的蒸发源项 S_{evap} 可表达为

$$\begin{cases} S_{\text{evap}} = \frac{hM_1}{\rho_{\text{g}} C_{\text{p,g}} Le^{2/3} \delta_{\text{porous}}} \frac{610.7 \times 10^{\frac{7.5(T_{\text{w}_1} - 273.15)}{(T_{\text{w}_1} - 35.85)}}}{RT_{\text{w}_1}} \cdot (1 - \phi_{\infty}), M_{\text{d}} > M_{\text{d,sat}} \\ S_{\text{evap}} = \frac{hM_1}{\rho_{\text{g}} C_{\text{p,g}} Le^{2/3} \delta_{\text{porous}}} \frac{610.7 \times 10^{\frac{7.5(T_{\text{w}_1,\text{sat}} - 273.15)}{(T_{\text{w}_1,\text{sat}} - 35.85)}}}{RT_{\text{w}_1,\text{sat}}} \cdot \frac{(1 - \phi_{\infty})}{M_{\text{d,sat}} - M_{\text{d,e}}}, M_{\text{d}} < M_{\text{d,sat}} \end{cases} \quad (16)$$

式中 δ_{porous} 为湿涂层的厚度, m 。

对流换热系数 h 与努塞尔特数 Nu 有关, 可表达为

$$h = \frac{Nu\lambda_{\text{g}}}{l} \quad (17)$$

式中: l 为湿涂层的特征尺度, m , 本研究取极片湿涂层的长度。

层流状态和湍流状态的努塞尔特数 Nu 、雷诺数 Re 和普朗特数 Pr 可表达为^[15]

$$\begin{cases} Nu_{\text{lam}} = 0.664Re^{0.5}Pr^{0.67} \\ Nu_{\text{tur}} = 0.023Re^{0.8}Pr^{0.4} \end{cases} \quad (18)$$

$$Re = \frac{\rho_{\text{g}}ul}{\mu_{\text{g}}} \quad (19)$$

$$Pr = \frac{\nu}{\alpha} \quad (20)$$

式中: Nu_{lam} 为层流状态的努塞尔特数; Nu_{tur} 为湍流状态的努塞尔特数; ν 为湿空气的运动黏度, m^2/s ; α 为湿空气的热扩散系数, m^2/s 。

由于湿涂层内部的流速较小, 湍流黏性阻力可忽略。湿涂层流体域中的动量方程可表达为^[16]

$$\frac{\rho_{\text{g}}}{\varphi S_{\text{a}}} \frac{\partial u}{\partial \tau} + \frac{\rho_{\text{g}}}{\varphi S_{\text{a}}} (u \cdot \nabla) u = -\nabla P + \nabla \cdot$$

$$\left[\frac{\mu_g}{\varphi S_a} (\nabla u + (\nabla u)^T) - \frac{2}{3} \frac{\mu_g}{\varphi S_a} (\nabla \cdot u) \right] - \left(\mu_g (k_c k_{rg})^{-1} + \frac{1}{2} \rho_g F_p |u| \right) u \quad (21)$$

式中: φ 为湿涂层的孔隙率; S_a 为湿涂层的含空气饱和度; k_c 为湿涂层的固有渗透率; k_{rg} 为湿涂层中气体的相对渗透率; F_p 为湿涂层中单位体积的合力, $\text{kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{s}^2)$ 。

湿涂层由固体基质和孔隙组成,其孔隙由液态水和气体组成。根据文献[17],有效气体扩散系数与孔隙率和含空气饱和度有关,可表达为

$$D_{\text{eff}} = 2.6 \times 10^{-5} \frac{(S_a \varphi)^{3-\varphi}}{\varphi} \quad (22)$$

式中: D_{eff} 为湿涂层的有效气体扩散系数。湿涂层的含水饱和度 S_w 、含空气饱和度 S_a 、总体积 V 和孔隙率 φ 可表达为

$$S_w = \frac{V_l}{\varphi V} \quad (23)$$

$$S_a = \frac{V_g}{\varphi V} \quad (24)$$

$$V = V_l + V_g + V_s \quad (25)$$

$$\varphi = \frac{V_l + V_g}{V} \quad (26)$$

式中: S_w 为湿涂层的含水饱和度; V 为湿涂层的总体积, m^3 ; V_l 为湿涂层内所含液态水的体积, m^3 ; V_g 为湿涂层内所含气体的体积, m^3 ; V_s 为湿涂层内所含固体基质的体积, m^3 。

根据能量守恒定理,湿涂层的能量变化可表达为

$$\frac{\partial((\rho C_p)_{\text{eff}} T_c)}{\partial \tau} + \nabla \cdot (J_s C_{p,s} T_c + J_l C_{p,l} T_c + J_g C_{p,g} T_c) = \nabla \cdot (\lambda_{\text{eff}} \nabla T_c) - \frac{R_{\text{evap}} h_{\text{evap}}}{\delta_{\text{porous}}} \quad (27)$$

式中: ρ_{eff} 为湿涂层的有效密度, kg/m^3 ; $C_{p,\text{eff}}$ 为湿涂层的有效比热容, $\text{J}/(\text{kg} \cdot \text{K})$; T_c 为湿涂层的温度, K ; $C_{p,s}$ 和 $C_{p,l}$ 分别为湿涂层所含固体基质和液态水的比热容, $\text{J}/(\text{kg} \cdot \text{K})$; J_s 和 J_g 分别为湿涂层所含固体基质和气体的质量通量, $\text{kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$; λ_{eff} 为湿涂层的有效热导率, $\text{W}/(\text{m} \cdot \text{K})$ 。

为便于理解,取湿涂层一微元体进行分析,如图3所示。可以看出,湿涂层的吸热量 q_a 等于净导入湿涂层的导热、对流换热和蒸发热量之和。根据假设2),湿涂层的能量方程也可表达为

$$(\rho C_p)_{\text{eff}} \frac{\partial T_c}{\partial \tau} \delta_{\text{porous}} = q_{\text{cond}} + q_{\text{conv}} - q_{\text{evap}} \quad (28)$$

式中: q_{cond} 为净导入湿涂层的导热, W/m^2 ; q_{conv} 为内部扩散和对流换热流体净携入湿涂层的对流换热, W/m^2 ; q_{evap} 为湿涂层通过水分蒸发进入湿空气的潜热量之和, W/m^2 。

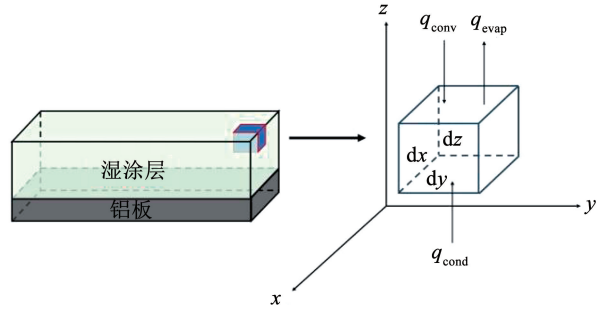


图3 湿涂层微元体的能量变化

Fig. 3 Energy changes in wet coating microelement

由于湿涂层厚度非常小,采用集总参数法求解其非稳态导热问题。结合1.1节简化模型描述,极片表面的温、湿度参数即代表湿涂层整体的温、湿度参数。其中,湿涂层的毕渥数 Bi_v 需满足

$$Bi_v = \frac{h \delta_{\text{porous}}}{\lambda_{\text{eff}}} < 0.1 M \quad (29)$$

式中: M 为与几何形状相关的无量纲量,研究对象湿涂层等效为平板,本文取1;通过计算,湿涂层均能满足毕渥数 $Bi_v < 0.1$,可以采用集总参数法。

式(27)和式(28)中湿涂层的温度 T_c 、湿涂层的有效密度 ρ_{eff} 、有效比热容 $C_{p,\text{eff}}$ 和有效热导率 λ_{eff} 可表达为^[16]

$$T_c = T_{w1} \quad (30)$$

$$(\rho C_p)_{\text{eff}} = \rho_s (1 - \varphi) C_{p,s} + \rho_l \varphi S_w C_{p,l} + \varphi S_a \rho_g C_{p,g} \quad (31)$$

$$\lambda_{\text{eff}} = \lambda_s (1 - \varphi) + \lambda_l \varphi S_w + \lambda_g \varphi S_a \quad (32)$$

式中: ρ_s 为湿涂层所含固体基质的密度, kg/m^3 ; λ_s 和 λ_l 分别为湿涂层所含固体基质和液态水的热导率, $\text{W}/(\text{m} \cdot \text{K})$ 。

将式(30)~(32)代入式(28),湿涂层的能量方程可表达为

$$[\rho_s (1 - \varphi) C_{p,s} + \rho_l \varphi S_w C_{p,l} + \varphi (1 - S_w) \rho_g C_{p,g}] \cdot \delta_{\text{porous}} \frac{\partial T_{w1}}{\partial \tau} = q_{\text{cond}} + q_{\text{conv}} - R_{\text{evap}} h_{\text{evap}} \quad (33)$$

1.2.3 湿涂层-铝板间的热传导过程推理

同样地,基材铝板受到 z 轴方向热风的冲击,通过对流换热使铝板-湿空气界面处的温度升高。随后,通过导热将热量传递至湿涂层-铝板界面,该热流传递过程可表达为

$$q_{Al} = \lambda_{Al} \frac{T_{w2} - T_{w1}}{\delta_{Al}} \quad (34)$$

式中: q_{Al} 为铝板向湿涂层的导热, W/m^2 ; T_{w2} 为铝板-湿空气界面处的温度, K ; λ_{Al} 为铝板的热导率, $\text{W}/(\text{m} \cdot \text{K})$; δ_{Al} 为铝板的厚度, m 。

基于无网格并行方法,湿涂层的总吸热量等于简化模型上表面的吸热量与下表面的吸热量之和,可表达为

$$q_a = q_{w_1} + q_{w_2} \quad (35)$$

式中: q_a 为湿涂层的吸热量, W/m^2 ; q_{w_1} 为湿涂层-湿空气界面处的吸热量, W/m^2 ; q_{w_2} 为铝板-湿空气界面处的吸热量, W/m^2 。

综上, 湿涂层的能量方程可表达为

$$[\rho_s(1-\varphi)C_{p,s} + \rho_1\varphi S_w C_{p,1} + \varphi(1-S_w)\rho_g C_{p,g}] \delta_{\text{porous}} \frac{\partial T_{w_1}}{\partial \tau} = q_{w_1} + q_{w_2} - R_{\text{evap}} h_{\text{evap}} \quad (36)$$

1.3 数学模型的差分计算方法研究

为了进一步求解数学模型, 提出了热风-湿涂层-质传递特性的差分计算方法。根据式(15), 时间从 $\tau=0$ 开始, 按 $\Delta\tau$ 分割为 k 段, k 表示 $k\Delta\tau$ 时刻, 某 $k\Delta\tau$ 时刻湿涂层的蒸发速率 R_{evap}^k 可表达为

$$R_{\text{evap}}^k = \begin{cases} \frac{hM_1}{\rho_g C_{p,g} Le^{2/3}} \frac{610.7 \times 10^7 \times 10^{\frac{7.5(T_{w_1} - 273.15)}{(T_{w_1} - 35.85)}}}{RT_{w_1}} (1 - \phi_\infty), & M_d^k > M_{d,\text{sat}} \\ \frac{hM_1}{\rho_g C_{p,g} Le^{2/3}} \frac{610.7 \times 10^7 \times 10^{\frac{7.5(T_{w_1,\text{sat}} - 273.15)}{(T_{w_1,\text{sat}} - 35.85)}}}{RT_{w_1,\text{sat}}} \frac{(1 - \phi_\infty)}{M_{d,\text{sat}} - M_{d,e}} (M_d^k - M_{d,e}), & M_d^k < M_{d,\text{sat}} \end{cases} \quad (37)$$

$$T_{w_1}^k = \begin{cases} T_{w_1}^0, & k=0 \\ \frac{q_{w_1}^k + q_{w_2}^k - R_{\text{evap}}^k h_{\text{evap}}}{\left[\rho_s(1-\varphi)C_{p,s} + \rho_1\varphi \left(\frac{\delta_1^{k-1} - \frac{R_{\text{evap}}^{k-1}}{\rho_1} \Delta\tau}{\varphi\delta_{\text{porous}}} \right) C_{p,1} + \varphi \left(1 - \frac{\delta_1^{k-1} - \frac{R_{\text{evap}}^{k-1}}{\rho_1} \Delta\tau}{\varphi\delta_{\text{porous}}} \right) \rho_g C_{p,g} \right] \delta_{\text{porous}}} \Delta\tau + T_{w_1}^{k-1}, & k > 0 \end{cases} \quad (41)$$

其中 $k=0, 1, 2, \dots$ 。

基于湿涂层-铝板间的热传导过程的数学描

$$T_{w_2}^k = \begin{cases} T_{w_2}^0, & k=0 \\ \frac{q_{w_1}^k + q_{w_2}^k - R_{\text{evap}}^k h_{\text{evap}}}{\left[\rho_s(1-\varphi)C_{p,s} + \rho_1\varphi \left(\frac{\delta_1^{k-1} - \frac{R_{\text{evap}}^{k-1}}{\rho_1} \Delta\tau}{\varphi\delta_{\text{porous}}} \right) C_{p,1} + \varphi \left(1 - \frac{\delta_1^{k-1} - \frac{R_{\text{evap}}^{k-1}}{\rho_1} \Delta\tau}{\varphi\delta_{\text{porous}}} \right) \rho_g C_{p,g} \right] \delta_{\text{porous}}} \Delta\tau + T_{w_1}^{k-1} + \frac{q_w^k \delta_{Al}}{\lambda_{Al}}, & k > 0 \end{cases} \quad (42)$$

其中 $k=0, 1, 2, \dots$ 。

另外, 列出了湿涂层干燥过程的重要评价指标。

干基含水量为湿物料中的水分质量与湿物料中的绝对干料质量之比; 干燥速率为单位时间内干基含水量的变化量^[18]。某 $k\Delta\tau$ 时刻湿涂层的干基含水量

M_d^k 和干燥速率 R_d^k 可表达为

其中 $k=0, 1, 2, \dots$ 。

同样地, 某 $k\Delta\tau$ 时刻湿涂层的温度变化可表达为

$$[\rho_s(1-\varphi)C_{p,s} + \rho_1\varphi S_w C_{p,1} + \varphi(1-S_w)\rho_g C_{p,g}] \delta_{\text{porous}} \left(\frac{\partial T_{w_1}}{\partial \tau} \right)^k = q_{w_1}^k + q_{w_2}^k - R_{\text{evap}}^k h_{\text{evap}} \quad (38)$$

其中 $k=0, 1, 2, \dots$ 。

为了获得温度稳定的数值解, 对湿涂层温度变化过程进行离散化处理, 其中, 温度对时间的一阶导数采用向后差分, 可表达为

$$\left(\frac{\partial T_{w_1}}{\partial \tau} \right)^k = \frac{T_{w_1}^k - T_{w_1}^{k-1}}{\Delta\tau} \quad (39)$$

根据假设 3), 某 $k\Delta\tau$ 时刻湿涂层的含水饱和度 S_w^k 可表达为

$$S_w^k = \begin{cases} \frac{\delta_1^0}{\varphi\delta_{\text{porous}}}, & k=0 \\ \frac{\delta_1^{k-1} - \frac{R_{\text{evap}}^{k-1}}{\rho_1} \Delta\tau}{\varphi\delta_{\text{porous}}}, & k > 0 \end{cases} \quad (40)$$

式中 δ_1 为湿涂层的液膜厚度, m 。

将式(39)和式(40)代入式(38)中, 某 $k\Delta\tau$ 时刻简化模型中湿涂层的温度 $T_{w_1}^k$ 可表达为

述, 某 $k\Delta\tau$ 时刻简化模型铝板的温度 $T_{w_2}^k$ 可表达为

$$M_d^k = \begin{cases} \frac{\varphi S_1^0 \rho_1}{(1-\varphi)\rho_s}, & k=0 \\ \left(\delta_1^{k-1} - \frac{R_{\text{evap}}^{k-1}}{\rho_1} \Delta\tau \right) \rho_1, & k > 0 \end{cases} \quad (43)$$

$$R_d^k = \frac{M_d^{k-1} - M_d^k}{\Delta\tau} \quad (44)$$

式中 R_d 为湿涂层的干燥速率, $1/\text{s}$ 。

2 基于相似理论的缩尺模拟方法

2.1 缩尺模拟方法

由于数理模型对计算精度要求较高,模拟计算时间长,可靠性验证成本高。为提高其数值模拟的计算效率,基于相似理论提出一种缩尺模拟方法,通过定义相似比的方法对湿空气热-质传递过程的相似准则关系进行分析。例如,原尺模型的物理量用 n 表示,缩尺模型的物理量用 n' 表示,物理量之间的相似比用 C_n 表示,原尺模型和缩尺模型物理量的相似比可表达为

$$\begin{aligned} \frac{x'}{x} = \frac{y'}{y} = \frac{z'}{z} = C_l, \frac{\rho'_g}{\rho_g} = C_\rho, \frac{u'}{u} = C_u, \frac{\tau'}{\tau} = \frac{C_l}{C_u}, \\ \frac{S'_{\text{evap}}}{S_{\text{evap}}} = \frac{C_h}{C_\rho C_{c_p} C_l C_T}, \frac{F'}{F} = \frac{C_\rho C_u^2}{C_l}, \frac{P'}{P} = C_u^2 C_\rho, \frac{\mu'_g}{\mu_g} = C_\mu, \\ \frac{k'}{k} = C_k, \frac{\varepsilon'}{\varepsilon} = C_\varepsilon, \frac{\mu'_l}{\mu_l} = \frac{C_\rho C_k^2}{C_\varepsilon}, \frac{\sigma'_k}{\sigma_k} = C_{\sigma_k}, \frac{\sigma'_\varepsilon}{\sigma_\varepsilon} = C_{\sigma_\varepsilon}, \\ \frac{G'_k}{G_k} = \frac{C_\rho C_k^2 C_u}{C_\varepsilon C_l^2}, \frac{J'_v}{J_v} = C_\rho C_u, \frac{C'_{p,g}}{C_{p,g}} = C_{c_p}, \end{aligned}$$

$$\frac{T'_g}{T_g} = C_T, \frac{\lambda'_g}{\lambda_g} = C_\lambda, \frac{h'}{h} = C_h \quad (45)$$

由于等式左右两侧的量纲一致,将方程一侧无量纲系数化为 1,另一侧即可得到相似准则关系式。将式(45)代入式(1),可表达为

$$\frac{\partial \rho'_g}{\partial \tau'} + \nabla \cdot (\rho'_g u') = \frac{C_\rho^2 C_u C_{c_p} C_T}{C_h} S'_{\text{evap}} \quad (46)$$

将式(45)代入式(2),原尺模型和缩尺模型之间湿空气的动量方程关系式可表达为

$$\begin{aligned} \rho'_g \frac{\partial u'}{\partial \tau'} + \rho'_g (u' \cdot \nabla) u' = F' - \nabla P' + \nabla \cdot \\ \left[\left(\frac{C_l C_u C_\rho}{C_\mu} \mu'_g + \frac{C_l C_u C_\varepsilon}{C_k^2} \mu'_l \right) (\nabla u' + (\nabla u')^T) - \right. \\ \left. \frac{2}{3} \left(\frac{C_l C_u C_\rho}{C_\mu} \mu'_g + \frac{C_l C_u C_\varepsilon}{C_k^2} \mu'_l \right) \nabla \cdot u' \right] \quad (47) \end{aligned}$$

将式(45)代入式(3),原尺模型和缩尺模型之间湿空气的 k - ε 关系式可表达为

$$\begin{aligned} \left\{ \frac{\partial(\rho'_g k')}{\partial \tau'} + \nabla \cdot (\rho'_g u' k') = \frac{\partial}{\partial x'} \left[\left(\frac{C_l C_u C_\rho}{C_\mu} \mu'_g + \frac{C_l C_\varepsilon C_{\sigma_k} C_u}{C_k^2} \frac{\mu'_l}{\sigma'_k} \right) \frac{\partial k'}{\partial x'} \right] + \frac{\partial}{\partial y'} \left[\left(\frac{C_l C_u C_\rho}{C_\mu} \mu'_g + \frac{C_l C_\varepsilon C_{\sigma_k} C_u}{C_k^2} \frac{\mu'_l}{\sigma'_k} \right) \frac{\partial k'}{\partial y'} \right] + \right. \\ \left. \frac{\partial}{\partial z'} \left[\left(\frac{C_l C_u C_\rho}{C_\mu} \mu'_g + \frac{C_l C_\varepsilon C_{\sigma_k} C_u}{C_k^2} \frac{\mu'_l}{\sigma'_k} \right) \frac{\partial k'}{\partial z'} \right] + \frac{C_\varepsilon C_l}{C_k C_u} G'_k - \frac{C_k C_u}{C_\varepsilon C_l} \rho'_g \varepsilon' \right\} \\ \left\{ \frac{\partial(\rho'_g \varepsilon')}{\partial \tau'} + \nabla \cdot (\rho'_g u' \varepsilon') = \frac{\partial}{\partial x'} \left[\left(\frac{C_l C_u C_\rho}{C_\mu} \mu'_g + \frac{C_l C_{\sigma_\varepsilon} C_u C_\varepsilon}{C_k^2} \frac{\mu'_l}{\sigma'_\varepsilon} \right) \frac{\partial \varepsilon'}{\partial x'} \right] + \frac{\partial}{\partial y'} \left[\left(\frac{C_l C_u C_\rho}{C_\mu} \mu'_g + \frac{C_l C_{\sigma_\varepsilon} C_u C_\varepsilon}{C_k^2} \frac{\mu'_l}{\sigma'_\varepsilon} \right) \frac{\partial \varepsilon'}{\partial y'} \right] + \right. \\ \left. \frac{\partial}{\partial z'} \left[\left(\frac{C_l C_u C_\rho}{C_\mu} \mu'_g + \frac{C_l C_{\sigma_\varepsilon} C_u C_\varepsilon}{C_k^2} \frac{\mu'_l}{\sigma'_\varepsilon} \right) \frac{\partial \varepsilon'}{\partial z'} \right] + \frac{C_\varepsilon C_l}{C_k C_u} C_{1\varepsilon} \frac{\varepsilon'}{k'} G'_k - \frac{C_k C_u}{C_\varepsilon C_l} C_{2\varepsilon} \rho'_g \frac{\varepsilon'^2}{k'} \right\} \quad (48) \end{aligned}$$

将式(45)代入式(5),原尺模型和缩尺模型之间湿空气的能量方程关系式可表达为

$$\begin{aligned} \frac{\partial(\rho'_g C'_{p,g} T'_g)}{\partial \tau'} + \nabla \cdot (\rho'_g C'_{p,g} u' T'_g) = \\ \frac{C_l C_u C_\rho C_{c_p}}{C_\lambda} \nabla \cdot (\lambda'_g \nabla T'_g) + \frac{C_\rho^2 C_u C_{c_p}^2 C_T}{C_h} S'_{\text{evap}} h'_{\text{evap}} \quad (49) \end{aligned}$$

为了保证原尺模型和缩尺模型之间换热过程相似,通过量纲分析法对对流换热系数进行相似性分析,对流换热系数 h 可表达为

$$h = f(l, u, \rho_g, \lambda_g, \mu_g, C_{p,g}) \quad (50)$$

根据几何相似性、流动相似性、动力相似性以及换热过程相似性,选出 4 个基本物理量。其中,几何量代表长度的量纲为 L ,选择湿涂层的特征尺度 l ;运动量代表时间的量纲为 T ,选择湿空气的速度 u ;动力量代表质量的量纲为 M ,选择湿空气的密度 ρ_g ;

换热过程相关量代表温度的量纲为 θ ,选择湿空气的热导率 λ_g 。这 4 个基本物理量的组合为 $l^a u^b \rho_g^c \lambda_g^d$ (a, b, c, d 为无量纲指数),其量纲可表达为

$$\text{dim} l^a u^b \rho_g^c \lambda_g^d = L^a (LT^{-1})^b (ML^{-3})^c (ML\theta^{-1}T^3)^d \quad (51)$$

根据 π 定理可知,原尺模型和缩尺模型的换热过程具有相似性。综上,原尺模型和缩尺模型的相似准则关系式可表达为

$$\begin{aligned} \frac{C_\rho^2 C_u C_{c_p} C_T}{C_h} = \frac{C_l C_u C_\rho}{C_\mu} = \frac{C_l C_u C_\varepsilon}{C_k^2} = \frac{C_l C_\varepsilon C_{\sigma_k} C_u}{C_k^2} = \\ \frac{C_l C_{\sigma_\varepsilon} C_u C_\varepsilon}{C_k^2} = \frac{C_\varepsilon C_l}{C_k C_u} = \frac{C_l C_u C_\rho C_{c_p}}{C_\lambda} = \frac{C_h C_l}{C_\lambda} = \frac{C_{c_p} C_\mu}{C_\lambda} = \\ \frac{C_\rho^2 C_u C_{c_p}^2 C_T}{C_h} = 1 \quad (52) \end{aligned}$$

缩尺倍数用字母 m 表示,给定部分相似比,可表达为

$$C_l = \frac{1}{m}, C_\rho = 1, C_u = m, C_\lambda = 1 \quad (53)$$

根据式(52)和式(53),其余相似比可由相似准则推出,可表达为

$$\begin{aligned} \frac{\tau'}{\tau} &= \frac{1}{m^2}, \frac{S'_{\text{evap}}}{S_{\text{evap}}} = m^2, \frac{F'}{F} = m^3, \frac{P'}{P} = m^2, \frac{\mu'_g}{\mu_g} = 1, \\ \frac{k'}{k} &= m^2, \frac{\varepsilon'}{\varepsilon} = m^4, \frac{\mu'_l}{\mu_l} = 1, \frac{\sigma'_k}{\sigma_k} = 1, \frac{\sigma'_\varepsilon}{\sigma_\varepsilon} = 1, \frac{G'_k}{G_k} = m^4, \\ \frac{J'_v}{J_v} &= m, \frac{C'_{p,g}}{C_{p,g}} = 1, \frac{T'_g}{T_g} = 1, \frac{h'}{h} = m \end{aligned} \quad (54)$$

其中,不同缩尺比例的模拟数据对比结果主要通过

判定系数 R^2 确定,可表达为

$$R^2 = 1 - \frac{S_{\text{SE}}}{S_{\text{ST}}} \quad (55)$$

式中: R^2 为不同缩尺比例模拟数据的判定系数, S_{SE} 为不同缩尺比例模拟结果之间的残差平方和, S_{ST} 为模拟结果的总平方和。

2.2 缩尺模拟方法可靠性验证

通过对比不同缩尺比例模型温、湿度参数的差异性(仅验证不同缩尺比例的判定系数)对缩尺模拟方法的可行性进行验证。根据文献[19],原尺模型和缩尺模型的物性参数如表1、2所示。

表1 模型参数和材料特性

Tab.1 Model parameters and material properties

主要参数	数值	单位	主要参数	数值	单位
大气压 P_a	101 325	Pa	热风温度 T_{in}	373.15/383.15	K
通用气体常数 R	8.314	J/(mol·K)	湿涂层的初始温度 T_0	301.65	K
湿空气的比热容 $C_{p,g}$	1 005	J/(kg·K)	热风速度 u_{in}	0.8	m/s
水的比热容 $C_{p,l}$	4 186	J/(kg·K)	空气的摩尔质量 M_a	0.028	kg/mol
固体基质的比热容 $C_{p,s}$	710	J/(kg·K)	水的摩尔质量 M_l	0.018	kg/mol
湿空气的密度 ρ_g	1.205	kg/m ³	湿空气的动力黏度 μ_g	2×10^{-5}	Pa·s
水的密度 ρ_l	998	kg/m ³	湿涂层的厚度 δ_{porous}	1.0×10^{-4}	m
固体基质的密度 ρ_s	990	kg/m ³	铝板的厚度 δ_{Al}	1.0×10^{-5}	m
湿空气的热导率 λ_g	0.042 4	W/(m·K)	湿涂层的初始液膜厚度 δ_0	3.27×10^{-5}	m
水的热导率 λ_l	0.59	W/(m·K)	湿涂层的初始含水饱和度 $S_{l,0}$	0.506	—
固体基质的热导率 λ_s	2 250	W/(m·K)	湿涂层的孔隙率 φ	0.642	—
铝板的热导率 λ_{Al}	401	W/(m·K)	相对湿度 ϕ_∞	0.45	—

表2 缩尺模型参数

Tab.2 Parameters of scaled model

主要参数	数值($m=400$)	数值($m=800$)	单位
干燥箱的长/宽/高	1.4/1.25/1.375	0.7/0.625/0.687 5	mm
热风速度	320	640	m/s
湿空气的密度	1.205	1.205	kg/m ³
湿空气的动力黏度	2×10^{-5}	2×10^{-5}	Pa·s
湿空气的湍流动能	1.6×10^5	6.4×10^5	J/(kg·K)
湿空气的湍流耗散率	2.56×10^{10}	4.096×10^{11}	kg/m ³
湍流动能的普朗特数	1	1	—
湍流耗散率的普朗特数	1.3	1.3	—
湿空气的比热容	1 005	1 005	J/(kg·K)
热风温度	373.15/383.15	373.15/383.15	K
湿空气的热导率	0.042 4	0.042 4	W/(m·K)

在热风速度为 0.8 m/s、热风温度为 373.15 K/383.15 K 以及环境相对湿度为 55% 的条件下,比较缩尺比例 $m=400$ 和 $m=800$ 下湿涂层的含水饱和

度、含空气饱和度及有效气体扩散系数,结果如图 4 所示。根据式(55),两种工况不同缩尺比例下判定系数 R^2 均大于 0.99,证明缩尺模型具有可靠性。另

外,原尺模型的模拟时间为 5 h,缩尺倍数为 800 的缩尺模型的模拟计算时间为 2.77 h,计算效率提高

了 44.6%。因此,可采用缩尺模拟方法对数理模型进行验证。

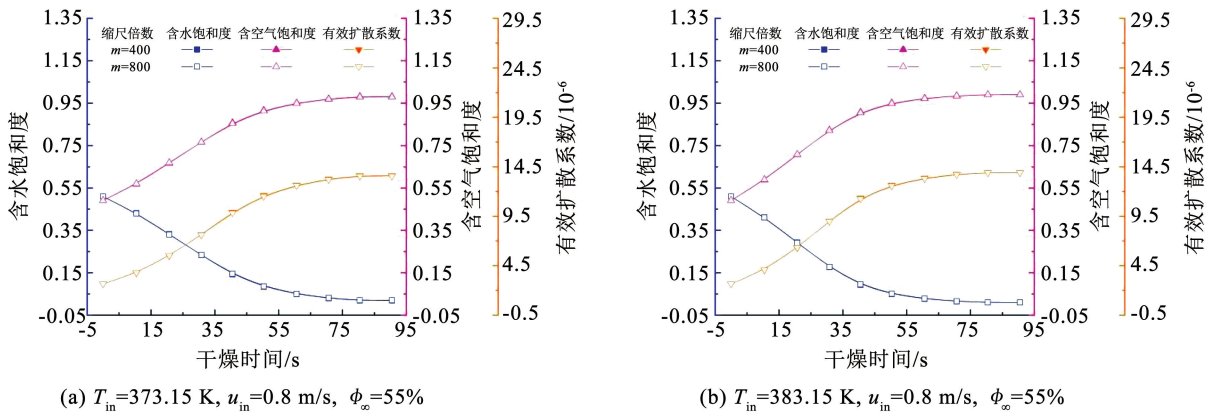


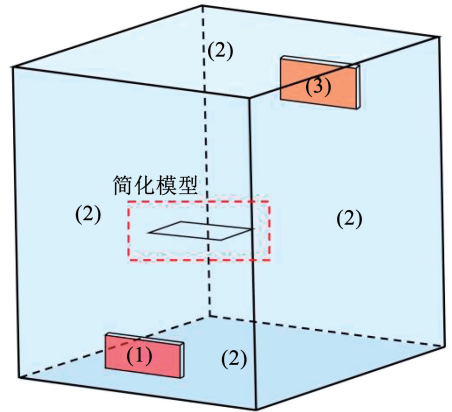
图 4 不同缩尺比例下湿涂层含水饱和度、含空气饱和度以及有效气体扩散系数的对比结果

Fig. 4 Comparison of water saturation (S_w), air saturation (S_a) and D_{eff} of wet coating at different scaling ratios

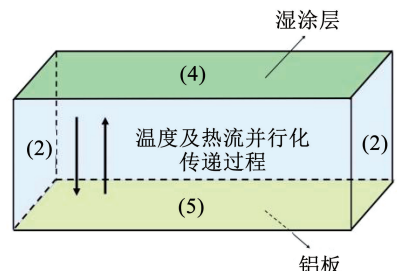
3 数理模型可靠性验证及误差分析

3.1 边界条件

本模拟过程通过 Fluent 软件实现,热风-湿涂层热-质传递过程的边界条件如图 5 和表 3 所示。边界(1)代表干燥箱的入口,其速度、温度以及湿度在干燥过程中保持不变;边界(2)代表干燥箱的壁面以及三维简化模型在 x 轴、 y 轴方向的壁面,根据假设 3),二者均属于绝热壁面;边界(3)代表干燥箱的出口,其速度、温度以及湿度法向梯度均为 0;边界(4)代表湿涂层,该界面属于温度边界、含湿边界;边界(5)代表铝板,该界面属于温度边界,但湿度为 0。为保证数学模型的准确性,通过 UDF 节点并行化实现了简化模型的上、下表面之间温度和热流量的并行传递过程。根据集总参数法,湿涂层温度与铝板温度保持一致,将湿涂层的温度并行传递给铝板作为温度边界。同时,将铝板与湿空气之间产生的热流量并行传递至湿涂层以更新下一步的温度。综上,热风-极片耦合的湿涂层热-质传递模型为三维物理模型,其数学模型的求解过程主要通过三维极片的上、下表面施加边界条件实现,在模拟过程中需要调用三维速度场及温度场参数以完成迭代计算。



(a) 干燥箱的边界条件



(b) 三维简化模型的边界条件

图 5 热风-湿涂层的边界条件示意

Fig. 5 Schematic diagram of boundary conditions for hot air and wet coating

表 3 边界条件

Tab. 3 Boundary conditions

量	边界(1)	边界(2)	边界(3)	边界(4)	边界(5)
速度	u_{in}	0	$(\nabla u) \cdot n = 0$	—	—
温度	T_{in}	$(\nabla T) \cdot n = 0$	$(\nabla T) \cdot n = 0$	T_{w1}^k	T_{w2}^k
水蒸气浓度	$c_{v,g}(T_{in})$	$(\nabla c_{v,g}) \cdot n = 0$	$(\nabla c_{v,g}) \cdot n = 0$	$c_v(T_{w1}^k)$	$(\nabla c_{v,g}) \cdot n = 0$

3.2 网格无关性验证

为了确保网格能更准确地模拟湿涂层的热-质传递过程,基于缩尺模拟方法在缩尺倍数为 800、热风温度为 373.15 K、热风速度为 0.8 m/s、环境湿度为 55% 时分别选取 9.87×10^3 、 1.62×10^5 、 4.86×10^5 和 7.79×10^5 4 组网格验证网格无关性,如图 6 所示。结果表明,当网格数量从 4.86×10^5 增加至 7.79×10^5 时,温度的计算精确度没有显著提高。因此,本次研究采用网格数为 4.86×10^5 ,可确保求解的稳定性。

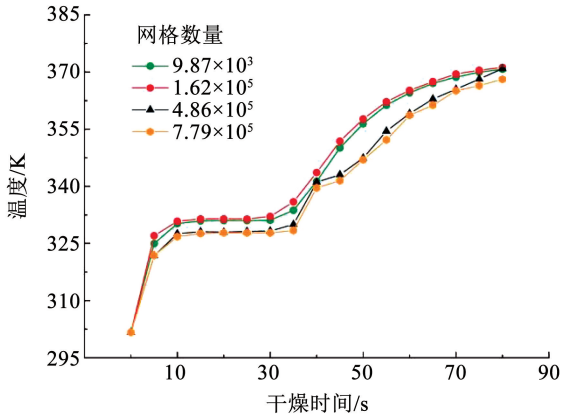
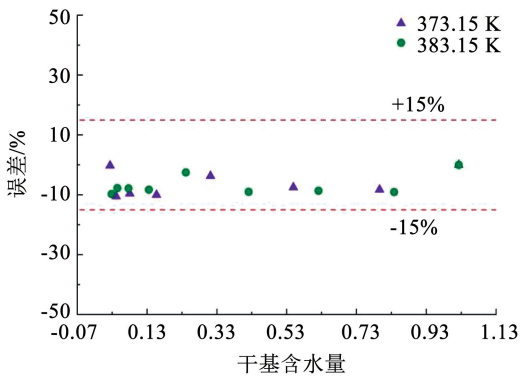


图 6 不同网格数量下湿涂层温度的对比结果

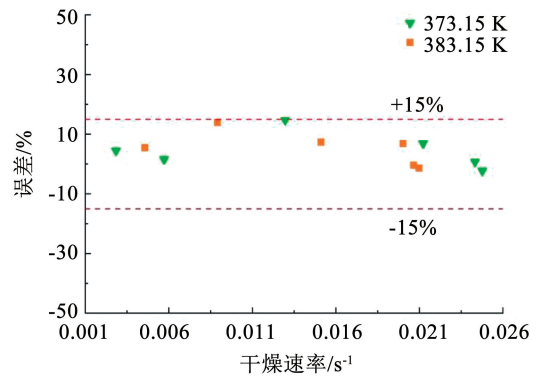
Fig. 6 Comparison of wet coating temperature under different grid numbers

3.3 模型可靠性验证

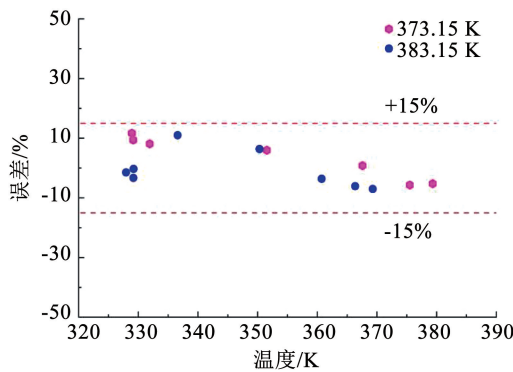
为了确保热风-极片湿涂层热-质传递数学模型的可靠性,采用与文献[19]相同的条件,基于缩尺模拟方法比较缩尺倍数为 800 时不同热风温度下 (373.15 K/383.15 K) 湿涂层干基含水量、干燥速率以及温度的模拟数据与文献中实验数据的误差,如图 7 所示。可以看出,当热风温度为 373.15 K 时,干基含水量、干燥速率以及温度的模拟数据与文献中实验数据的最大误差分别为 9.7%、13.9% 和 11%,平均误差分别为 6.98%、3.98% 和 5.3%;当热风温度为 383.15 K 时,干基含水量、干燥速率以及温度的模拟数据与文献中实验数据的最大误差分别为 10.5%、14.7% 和 11.6%,平均误差分别为 6.21%、4.37% 和 3.58%。由对比结果可知,不同工况下湿涂层温、湿度模拟结果与实验结果的最大误差均在 $\pm 15\%$ 以内,仅个别数据点偏大。这主要是因为文献中湿涂层湿度的测定方法为手动称重法,在反复取放极片的过程中,湿涂层与外界空气会发生热-质传递,进而导致部分实验数据测定不准确。综上,该数理模型具有可靠性。



(a) 干基含水量模拟计算数据与文献中实验数据的比较



(b) 干燥速率模拟计算数据与文献中实验数据的比较



(c) 温度模拟计算数据与文献中实验数据的比较

图 7 不同热风温度下湿涂层干基含水量、干燥速率以及温度的误差

Fig. 7 Errors in dry basis moisture content (M_d), drying rate (R_d) and temperature of wet coating at different temperatures of hot air

4 结 论

1) 极片三维简化模型的上界面代表湿涂层,下界面代表铝板,即湿涂层和铝板两个薄层计算过程分别被简化成一维(计算过程在 z 轴方向上界面和下界面进行),简化模型内部无需划分网格,避免了湿涂层-铝板交界面的复杂耦合过程。

2) 不同缩尺比例下湿涂层温、湿度判定系数 R^2 均大于0.99。原尺模型的模拟时间为5 h,缩尺倍数为800的缩尺模型的模拟计算时间为2.77 h,相比原尺模型减少了44.6%,有效提高了数值计算效率。

3) 热风-极片湿涂层热-质传递数学模型温、湿度模拟结果与文献实验数据的误差均在 $\pm 15\%$ 以内,仅个别数据点偏大,说明热风-极片湿涂层热-质传递数学模型具有可靠性。

参 考 文 献

- [1] ROLLAG K, JUAREZ-ROBLES D, DU Z, et al. Drying temperature and capillarity-driven crack formation in aqueous processing of Li-ion battery electrodes[J]. ACS Applied Energy Materials, 2019, 2(6): 4464. DOI:10.1021/acsam.9b00704
- [2] BRYNTESEN S N, KAHROM A, LAMB J, et al. Experimental analysis of drying kinetics and quality aspects of convection-dried cathodes at laboratory scale[J]. Batteries, 2023, 9(2): 96. DOI: 10.3390/batteries9020096
- [3] SU Yongjian, ZHOU Kai, YUAN Yingchun, et al. Study on prediction of binder distribution in the drying process of the coated web of positive electrode for lithium ion battery[J]. IOP Conference Series: Materials Science and Engineering, 2020, 793(1): 012025. DOI:10.1088/1757-899X/793/1/012025
- [4] FRANCO A, LOMBARDO T, NGANDJONG A, et al. Carbon-binder migration: a three-dimensional evaporation model for lithium ion batteries[J]. Chem Rxiv, 2021. DOI:10.33774/chemrxiv-2021-4133f
- [5] 麻宏强, 丁瑞祥, 韩喜莲, 等. 气液分离闪蒸撬折流板分离特性试验[J]. 哈尔滨工业大学学报, 2023, 55(8): 143
MA Hongqiang, DING Ruixiang, HAN Xilian, et al. Separation characteristics test of corrugated plate in gas-liquid separation flash skid[J]. Journal of Harbin Institute of Technology, 2023, 55(8): 143. DOI:10.11918/202205082
- [6] 麻宏强, 刘叶敏, 厚彩琴, 等. 外掠管束间空气-水蒸发冷却传热质及压降特性模拟[J]. 哈尔滨工业大学学报, 2022, 54(6): 147
MA Hongqiang, LIU Yemin, HOU Caiqin, et al. Simulation of heat/mass transfer and pressure drop characteristics of air-water evaporative cooling between staggered tube bundles[J]. Journal of Harbin Institute of Technology, 2022, 54(6): 147. DOI:10.11918/202005150
- [7] SHAO Jin, YANG Yi, ZHANG Xiaoyan, et al. 3D yolk-shell

- structured Si/void/rGO free-standing electrode for lithium-ion battery [J]. Materials, 2021, 14(11): 2836. DOI:10.3390/ma14112836
- [8] WU Xianfeng, LI Xujia, BEI Xinzhi. Experiments on hot-air and infrared drying characteristics of LiCoO₂ cathode coating for lithium-ion battery[J]. Materials Science Forum, 2020, 1003: 260. DOI: 10.4028/www.scientific.net/MSF.1003.260
- [9] FONT F, PROTAS B, RICHARDSON G, et al. Binder migration during drying of lithium-ion battery electrodes: modelling and comparison to experiment[J]. Journal of Power Sources, 2018, 393: 177. DOI:10.1016/J.JPOWSOUR.2018.04.097
- [10] SUSARLA N, AHMED S, DEES D W. Modeling and analysis of solvent removal during Li-ion battery electrode drying[J]. Journal of Power Sources, 2018, 378: 660. DOI:10.1016/j.jpowsour.2018.01.007
- [11] KARAMI A, KOWSARY F, HANAFIZADEH P, et al. Enhancement of convective drying of a moist porous material with impinging slot jet by implementation of micro-encapsulated phase change material: a numerical feasibility study [J]. International Journal of Heat and Mass Transfer, 2022, 191: 122828. DOI:10.1016/j.ijheatmasstransfer.2022.122828
- [12] CHEN Sheng, YANG Bo, ZHENG Chuguang. Simulation of double diffusive convection in fluid-saturated porous media by lattice Boltzmann method [J]. International Journal of Heat and Mass Transfer, 2017, 108: 1501. DOI:10.1016/j.ijheatmasstransfer.2017.01.020
- [13] YIOTIS A G, SALIN D, YORTSOS Y C. Pore network modeling of drying processes in macroporous materials: effects of gravity, mass boundary layer and pore microstructure [J]. Transport in Porous Media, 2015, 110(2): 175. DOI:10.1007/s11242-015-0529-2
- [14] PAN Yongkang, WANG Xizhong, LIU Xiangdong. Modern drying technology [M]. Beijing: Chemical Industry Press, 1998
- [15] MA Hongqiang, LIU Yu, HOU Caiqin, et al. Numerical investigation on the thermal-flow performance of humid air-water in the interspace outside staggered tube bundles [J]. International Journal of Heat and Mass Transfer, 2021, 166: 120784. DOI:10.1016/j.ijheatmasstransfer.2020.120784
- [16] DAI Jiaao, DIAO Yongfa. Numerical analysis of transient coupled heat and moisture transfer in textile drying with porous relative impact jet [J]. Applied Thermal Engineering, 2022, 212: 118613. DOI:10.1016/j.applthermaleng.2022.118613
- [17] ZHU H, GULATI T, DATTA A K, et al. Microwave drying of spheres: coupled electromagnetics-multiphase transport modeling with experimentation. Part I: model development and experimental methodology [J]. Food and Bioproducts Processing, 2015, 96: 314. DOI:10.1016/j.fbp.2015.08.003
- [18] DEGHANNYA J, POURAHMAD M, GHANBARZADEH B, et al. Heat and mass transfer enhancement during foam-mat drying process of lime juice: impact of convective hot air temperature [J]. International Journal of Thermal Sciences, 2019, 135: 30. DOI: 10.1016/j.ijthermalsci.2018.07.023
- [19] WANG Yanan. Experimental study on thermal wind drying of graphite anode coating for lithium battery [D]. Qinhuangdao: Yanshan University, 2018