

基于Kuhn屈服准则的锂离子电池极片辊压力建模与分析

王国栋¹ 王东城^{1,2*} 段伯伟¹ 刘宏民¹

1.燕山大学国家冷轧板带装备及工艺工程技术研究中心,秦皇岛,066004

2.金属成形技术与重型装备全国重点实验室,西安,710032

摘要: 辊压是锂离子电池极片制造过程中的重要工序,辊压力是极片辊压的重要参数,由于电池极片的特殊结构,辊压力难以预测。为解决这一问题,基于粉末成形领域的Kuhn屈服准则,建立了一种锂离子电池极片辊压过程单位压力分布预测模型,并通过辊压实验对模型进行了验证。结果表明,模型计算结果与实验数据吻合良好,对单位宽度压力的预测误差保持在10%以内。进一步研究分析了辊缝内单位压力与摩擦应力分布特征,分别讨论了压下率与轧辊直径对单位宽度压力与单位宽度力矩的影响,研究结果显示,随着压下率和轧辊直径的增大,单位宽度压力与单位宽度力矩均随之增大。

关键词: 锂离子电池极片;辊压;Kuhn屈服准则;单位压力分布;单位宽度压力;力矩

中图分类号: TG335; TM912

DOI:10.3969/j.issn.1004-132X.2026.03.020

开放科学(资源服务)标识码(OSID):



Modeling and Analyses of Calendering Pressure for Lithium-ion Battery Electrodes Based on Kuhn Yield Criterion

WANG Guodong¹ WANG Dongcheng^{1,2*} DUAN Bowei¹ LIU Hongmin¹

1.National Engineering Research Center for Equipment and Technology of Cold Rolling Strip, Yanshan University, Qinhuangdao, Hebei, 066004

2.National Key Laboratory of Metal Forming Technology and Heavy Equipment, Xi'an, 710032

Abstract: Calendering was a crucial process in the manufacturing of lithium-ion battery electrodes, and the calendering pressure was an important parameter for electrode calendering. Due to the special structures of battery electrodes, the calendering pressure was difficult to predict. To address this issue, a predictive model was established for the unit pressure distribution during the calendering processes of lithium-ion battery electrodes based on Kuhn yield criterion in the field of powder forming. The model was validated through calendering experiments. The results demonstrate good agreement with experimental data, and the prediction errors of the unit width pressure remain within 10%. Further analyses exploring the distribution characteristics of unit pressure and frictional stress within the roll gap were carried out, and the effects of compression rate and roll diameter on unit width pressure and unit width torque were discussed. The results indicate that both unit width pressure and unit width torque increase with the increasing compression rate and roll diameter.

Key words: lithium-ion battery electrode; calendering; Kuhn yield criterion; unit pressure distribution; unit width pressure; torque

0 引言

锂离子电池凭借比能量高、循环寿命长、无记忆效应和环境友好等优势,广泛应用于电动汽车、储能和消费电子等领域^[1-3]。锂离子电池制造工艺过程对电池性能的影响不容忽视^[4]。

锂离子电池制造包括制浆、涂布、干燥、辊压、

分切、组装和激活等工序^[4-6]。电池极片由多孔涂层(活性物质、导电剂、黏结剂)与金属集流体(正极铝箔/负极铜箔)构成。作为关键环节,辊压工艺利用摩擦力将极片曳入辊缝并压实,直接决定了涂层的压实密度、孔隙结构及电化学性能^[7-9]。因此,揭示辊压力与单位压力分布规律对工艺及设备优化具有重要意义。然而,受限于极片复杂的复合结构,其辊缝内受力状态预测及理论建模仍存在不足。

近年来,关于锂离子电池极片辊压工艺的研究主要集中在辊压对极片微观结构与电池性能的

收稿日期:2025-02-22

基金项目:国家自然科学基金(U21A20118);河北省自然科学基金(E2023203065);金属成形技术与重型装备全国重点实验室(中国重型院)开放课题(S2208100.W04)

影响。现有辊压工艺研究主要涵盖实验、数值模拟与机器学习 3 个维度。

实验方面, ZHANG 等^[10]、WANG 等^[11]揭示了辊压载荷对极片孔隙率、孔隙结构及集流体机械失效的影响; HIDALGO 等^[12]、GANDERT 等^[13]分别从辊压温度与压下率入手, 阐明了其对涂层微观结构与电池电化学性能、有效热导率的作用机制; PARK 等^[14]分析了辊压次数对极片电解液浸润性和极片涂层剥离强度的影响。

数值模拟方面, 离散元法 (DEM) 被广泛应用; SANGRÓS GIMÉNEZ 等^[15-17]使用 DEM 用于分析极片辊压的弹性回复行为, 以及辊压对电极电导率与黏附强度的影响; GE 等^[18]、XU 等^[19]进一步结合 CT 表征和断裂模型模拟了微观应力与颗粒破碎; SONG 等^[20]、NGANDJONG 等^[21]通过 DEM-FEM 耦合实现了对集流体损伤及电池性能的预测; ZHANG 等^[22]基于 DEM 量化了接触力网络对传热各向异性的影响。

机器学习方面, DUQUESNOY 等^[23-24]构建了一个智能模型用以预测辊压参数对极片特性的影响, 并进一步通过机器学习算法对辊压工艺过程进行优化, 以达到最佳电池性能; FARAJI NIRI 等^[25]建立的机器学习模型能够较好地预测辊压参数与电池阻抗和容量衰退的依赖关系。

尽管近年来锂离子电池极片辊压工艺的研究在极片结构和电池性能方面取得了诸多进展, 但关于辊压力的系统性分析仍相对较少。现有研究多依赖经验拟合, 如 MEYER 等^[26]、WANG 等^[27]分别利用粉末冶金领域的 Heckel 及 Kawakita 方程描述辊压力与孔隙率/压下率的关系, 但这通常需大量实验数据支撑且通用性有限。张俊鹏等^[28]沿用致密金属轧制理论建立了辊压力模型, 却忽略了致密金属与电极材料在结构和性质上存在显著差异。

针对上述不足, 本文引入粉末冶金领域的 Kuhn 屈服准则, 建立了考虑多孔涂层力学行为的辊压力计算模型。通过求解辊缝内的平衡微分方程, 系统解析了单位压力、摩擦应力及单位宽度压力与力矩的变化规律。

1 机理建模

1.1 基本假设与屈服准则介绍

图 1 为电池极片辊压示意图, 由于极片以及辊压条件均对称, 故示意图只展示 1/2 模型。如图 1 所示, 建立平面直角坐标系: 坐标原点位于辊压出口处, x 轴沿水平方向指向辊压入口, z 轴沿

极片厚度方向竖直向上。鉴于电池极片在辊压过程变形与受力状态的复杂性, 为简化问题, 有必要对辊压过程的极片状态作一些基本假设: ① 由于极片宽厚比很大, 故将辊压过程视为平面应变问题, 忽略宽度方向的应变; ② 考虑到极片的弹性回复对辊压力影响较小^[28], 故将涂层与集流体视为刚塑性体; 同时, 借鉴金属薄板轧制过程中轧制力计算的处理方式, 忽略集流体的加工硬化效应^[29]; ③ 辊压前极片的垂直横断面在经过辊缝的过程中仍保持为平面; ④ 由于集流体厚度相较于涂层厚度很小, 故忽略集流体在辊压过程中的厚度变化; ⑤ 涂层与集流体水平法向应力沿着各自断面高度方向均匀分布; ⑥ 极片厚度与长度方向为主应力方向; ⑦ 涂层相对密度在涂层厚度方向均匀分布, 仅在长度方向变化。

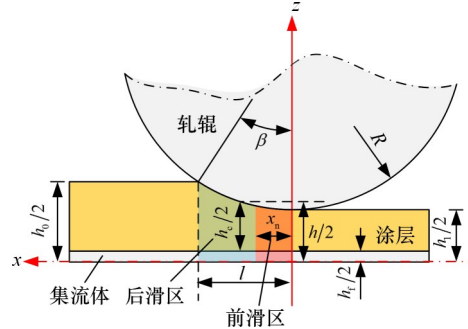


图 1 电池极片辊压示意图

Fig.1 Schematic diagram of the battery electrode calendaring process

Kuhn 屈服准则通过引入静水压力对材料屈服的影响来描述金属或非金属多孔材料塑性加工行为^[30]。平面应变条件下 Kuhn 屈服准则为

$$(\sigma_3 - \sigma_1)^2 + (1 - 2\nu)(\sigma_3 + \sigma_1)^2 = \frac{2\sigma_{sc}}{1 + \nu} \quad (1)$$

式中: σ_1 、 σ_3 为主应力; ν 为多孔材料泊松比; σ_{sc} 为材料屈服应力。

图 2 所示为不同泊松比条件下, Kuhn 屈服准则在平面应变状态下的屈服轨迹。由图可知, 该屈服轨迹呈椭圆形, 且关于直线 $\sigma_1/\sigma_{sc} = \sigma_3/\sigma_{sc}$ 对称。随着泊松比的增大, 屈服轨迹的离心率也随之增大。当泊松比达到 0.5 时, Kuhn 屈服准则的屈服轨迹退化为 von Mises 屈服准则的屈服轨迹。

多孔材料泊松比的计算方法如下:

$$\nu = \frac{1}{2} \exp(-m(1 - \rho)^2) \quad (2)$$

式中: m 为与材料相关的常数; ρ 为材料相对密度 (材料密度与理论真密度的比值)。

屈服应力的计算方法如下:

$$\sigma_{sc} = \sigma_0 \rho^n \quad (3)$$

式中: σ_0 为基体材料 (同种材料致密体) 屈服强度; n 为与

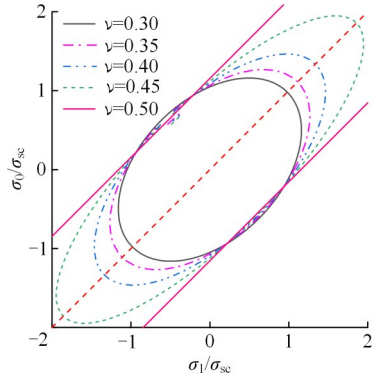


图2 Kuhn屈服准则在平面应变状态下的屈服轨迹
Fig.2 The yield locus of the Kuhn yield criterion under plane strain conditions

材料相关的常数^[31]。

基体材料屈服强度的计算方法如下：

$$\sigma_0 = K\bar{\epsilon}_0^s \quad (4)$$

式中： K 为基体材料强化参数； $\bar{\epsilon}_0$ 为基体材料的累计塑性应变； s 为应变硬化指数。

基体材料累计塑性应变增量 $d\bar{\epsilon}_0$ 与材料相对密度有关：

$$d\bar{\epsilon}_0 = \rho d\bar{\epsilon}_c \quad (5)$$

式中： $d\bar{\epsilon}_c$ 为多孔材料累计塑性应变增量。

基体材料累计塑性应变为 $d\bar{\epsilon}_0$ 对时间或路径的积分：

$$\bar{\epsilon}_0 = \int d\bar{\epsilon}_0 \quad (6)$$

辊压条件下 $d\bar{\epsilon}_c$ 的计算方法将在1.2节给出。

1.2 模型推导

由于极片在辊压过程中发生延伸现象^[27]，与金属轧制类似，故可将辊压变形区分为两部分：后滑区与前滑区（见图1）。在后滑区极片表面速度低于轧辊表面速度，位于辊缝入口侧；在前滑区极片表面速度高于轧辊表面速度，位于辊缝出口侧。后滑区与前滑区的交界点为中性点 x_n ，中性点处极片表面速度与轧辊速度相同。

用垂直于辊压方向的两个无限接近的平面截取一个微元体，分别分析微元体涂层与集流体部分的受力。图3a、图3b分别为后滑区与前滑区微元体的受力示意，在涂层与集流体左右两个截面上分别作用有各自的水平法向应力 σ_c 与 σ_f ；在涂层与轧辊接触面上作用有轧辊对涂层的单位压力 p 与轧辊与涂层之间的摩擦应力 τ_{Rc} ；在涂层与集流体结合面上作用有涂层与集流体的单位压力 p_{cf} 与两者之间的切应力 τ_{cf} 。

由于涂层与轧辊接触面处的倾角 α 很小（图3），所以可近似认为 $p_{cf} = p$ 。在涂层与集流体水平方向分别建立平衡微分方程。

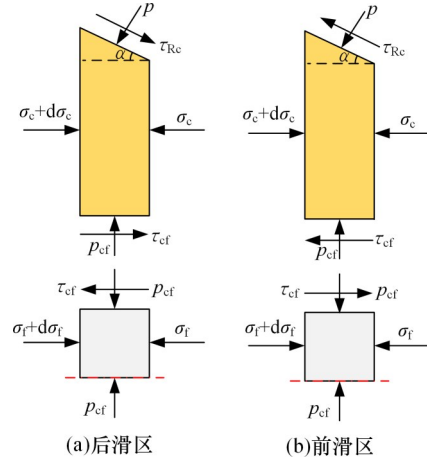


图3 极片微元体受力示意图
Fig.3 Schematic diagram of the forces on electrode differential element

后滑区与前滑区涂层水平方向平衡微分方程为

$$\frac{d\sigma_c h_c}{dx} = 2(p \frac{dh_c}{dx} - \tau_{cf} - \tau_{Rc}) \quad (7)$$

$$\frac{d\sigma_c h_c}{dx} = 2(p \frac{dh_c}{dx} + \tau_{cf} + \tau_{Rc}) \quad (8)$$

式中： h_c 为辊缝中极片涂层厚度，即极片厚度 h 与集流体厚度 h_f 之差。

后滑区与前滑区集流体水平方向的平衡微分方程为

$$\frac{d\sigma_f}{dx} = \frac{2\tau_{cf}}{h_f} \quad (9)$$

$$\frac{d\sigma_f}{dx} = -\frac{2\tau_{cf}}{h_f} \quad (10)$$

根据假设⑥与平面应变条件下的 von Mises 屈服准则，集流体的屈服条件如下：

$$p - \sigma_f = \frac{2}{\sqrt{3}} \sigma_{st} \quad (11)$$

式中： σ_{st} 为集流体的屈服应力。

联立式(7)~式(11)，可得

$$\frac{dp}{dx} h_f + \frac{d\sigma_c}{dx} h_c = (2p - \sigma_c) \frac{dh_c}{dx} \mp 2\tau_{Rc} \quad (12)$$

式(12)最后一项如果取“-”，表示后滑区的微分方程；如果取“+”，表示前滑区的微分方程。若对式(12)求解，还需知道 p 与 σ_c 之间的关系。假设⑥将极片厚度与长度方向作为主应力方向，结合式(1)可知： $\sigma_3 \approx p$ ， $\sigma_1 \approx \sigma_c$ 。根据基本辊压理论， $p \geq \sigma_c$ ，可由式(1)将 p 与 σ_c 之间的关系求解出来：

$$\sigma_c = \frac{1}{1-\nu} [\nu p - \sqrt{\frac{1-\nu}{1+\nu} \sigma_{sc}^2 - (1-2\nu)p^2}] \quad (13)$$

τ_{Rc} 采用库仑摩擦定律计算：

$$\tau_{Rc} = \mu p \quad (14)$$

式中： μ 为摩擦因数。

由1.1节可知，计算基体材料累计塑性应变需要用到涂层材料的累计塑性应变增量 $d\bar{\epsilon}_c$ ，平面

应变条件下 $d\bar{\epsilon}_c$ 的计算方法如下:

$$d\bar{\epsilon}_c = \sqrt{\frac{d\epsilon_x^2 + d\epsilon_z^2 + (d\epsilon_z - d\epsilon_x)^2}{3(1+\nu)} + \frac{(d\epsilon_z + d\epsilon_x)^2}{3(1-2\nu)}} \quad (15)$$

$$d\epsilon_z = -\frac{dh_c}{h_c} \quad (16)$$

式中: $d\epsilon_x$ 、 $d\epsilon_z$ 分别为极片长度和厚度方向的应变增量, $d\epsilon_z$ 与 h_c 在辊缝中的分布有关, $d\epsilon_x$ 与极片在辊缝中的延伸率分布有关, 将在 1.3 节给出。

辊压过程涂层基体材料累计塑性应变为

$$\bar{\epsilon}_0 = \int_l^{l-x} d\bar{\epsilon}_0 \quad (17)$$

若不考虑轧辊弹性变形, 则极片厚度为

$$h = 2R + h_1 - 2\sqrt{R^2 - x^2} \quad (18)$$

式中: R 为轧辊半径; h_1 为辊压后极片厚度。

变形区长度为

$$l = \sqrt{R^2 - \frac{1}{4}(2R + h_1 - h_0)^2} \quad (19)$$

式中: h_0 为辊压前极片厚度。

1.3 延伸率与相对密度分布

根据上文分析, 涂层屈服应力和泊松比均与相对密度相关, 故需确定涂层相对密度在辊缝中的分布。辊压过程中涂层不仅产生厚度方向的压缩, 也产生长度方向的延伸。

文献[27]曾通过大量辊压实验发现极片压下率 C 与延伸率 λ 近似符合线性关系:

$$\lambda = aC + b \quad (20)$$

式中: a 与 b 为常数。

极片延伸率 λ 与压下率 C 分别表示辊压前后极片长度与厚度的相对变化量。

假设延伸率在辊缝中的分布 λ_d 与极片厚度线性相关:

$$\lambda_d = \frac{h_0 - h}{h_0 - h_1} \lambda \quad (21)$$

式中: λ_d 为辊缝内延伸率分布。

在 λ_d 已知的条件下, $d\epsilon_x$ 也可求出:

$$d\epsilon_x = \frac{d\lambda_d}{1 + \lambda_d} \quad (22)$$

在轧辊轮廓确定的条件下, 若辊缝中的延伸率分布已知, 则可用简单的几何关系求出相对密度分布:

$$\rho = \frac{h_{c0}\rho_0}{(\lambda_d + 1)h_c} \quad (23)$$

式中: h_{c0} 为辊压前涂层厚度; ρ_0 为辊压前涂层相对密度。

此外, 文献[27]给出了轧辊直径与延伸率之间的关系:

$$\lambda_1 = \lambda_2 \sqrt{\frac{D_2}{D_1}} \quad (24)$$

式中: λ_1 、 λ_2 为不同直径轧辊辊压极片的延伸率; D_1 、 D_2 为不同轧辊直径。

式(24)表明, 只要确定某一直径轧辊下极片的延伸率, 用此公式便可获得任意直径轧辊下极片的延伸率。

1.4 边界条件

式(12)求解还需要边界条件, 假设极片辊压过程不存在张力, 则在辊缝入口与出口处的 σ_c 均为 0。由于式(12)中的未知函数为 p , 结合式(13)便可得到式(12)的边界条件:

$$p|_{x=l} = \sqrt{\frac{\sigma_c(l)^2}{1-\nu(l)^2}} \quad (25)$$

$$p|_{x=0} = \sqrt{\frac{\sigma_c(0)^2}{1-\nu(0)^2}} \quad (26)$$

由此, 使用欧拉法或 Runge-Kutta 法, 分别由极片入口与出口向变形区内部计算单位压力 p , 在中性点 x_n 处的单位压力应相等。将 p 在整个变形区域上进行积分便可得到单位宽度压力:

$$p_0 = \int_0^l p dx \quad (27)$$

1.5 轧辊弹性压扁

为提高计算精度, 在求解辊压力的时候需要考虑轧辊的弹性变形, 平面应变条件下轧辊弹性变形体现为弹性压扁; 在辊压力作用下, 轧辊产生局部弹性压缩, 使得接触弧的长度增加。轧辊弹性压扁计算采用赫希柯克(Hitchcock)理论^[29], 该理论假设轧辊在发生弹性压扁后, 轧辊与极片的接触弧仍然近似于圆弧, 见图 4。

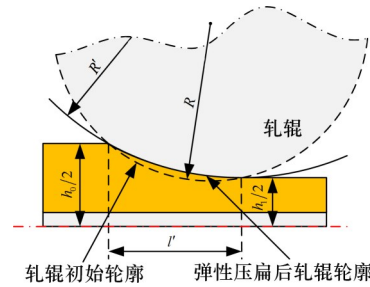


图 4 轧辊弹性压扁示意图

Fig. 4 Schematic diagram of roll elastic flattening

当轧辊发生弹性压扁时轧辊半径为

$$R' = R \left(1 + \frac{p_0}{M(h_0 - h_1)} \right) \quad (28)$$

$$M = \frac{\pi E_R}{16(1 - \nu_R^2)} \quad (29)$$

式中: E_R 为轧辊弹性模量; ν_R 为轧辊泊松比。

轧辊出现弹性压扁时变形区长度 l' 的计算方法与式(19)相同, 仅将 R 替换为 R' 即可。由于轧辊出现弹性压扁后的轧辊半径与变形区长度和单位宽度压力有关, 故在求解辊压力时需迭代求解。

2 模型验证

为验证模型准确性, 本文采用实验辊压机(图

5)对 NMC 正极片(初始厚度 145 μm, 12 μm 铝箔)和石墨负极片(初始厚度 196 μm, 7 μm 铜箔)进行辊压,记录了辊压前后极片厚度变化及辊压力。实验采用直径 130 mm 与 110 mm 的合金钢轧辊($E_R=206\text{ GPa}, \nu_R=0.3^{[32]}$)。



图5 实验辊压机

Fig.5 Experimental calender

如图6所示,取稳定辊压阶段(红框区域)的平均力作为该工况下的有效辊压力。为确保测量准确性,实验全程监控极片对中状态以防止轧辊压靠,保证传感器读数完全源于极片压实反力。

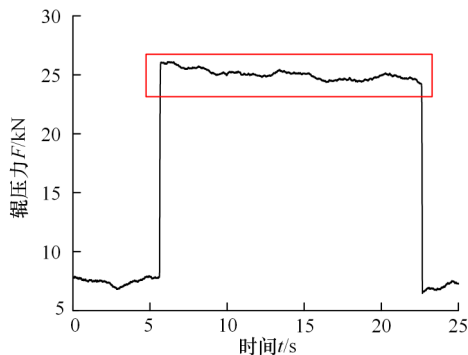


图6 辊压实验采集的辊压力

Fig.6 Calendering pressure measured during the calendering experiment

辊压前涂层相对密度由 AutoPore IV 9500 压汞仪测定(参数见表1)。模型中正、负极片摩擦因数分别设为 0.15 和 0.1,其余涂层参数列于表2。鉴于多孔涂层的力学属性难以直接实验表征,本文将除相对密度外的涂层相关参数及摩擦因数作为待定变量,基于辊压实验数据在合理范围内进行校准,以确保模型预测的可靠性与准确性。

表1 压汞仪参数

Tab.1 Mercury intrusion porosimeter parameters

	低压站	高压站
压力变化范围/Pa	0~3.45×10 ⁵	大气压~2.28×10 ⁸
分辨率/Pa	68.9	689
孔径测量范围/μm	3.6~360	0.005~6

表2 涂层参数

Tab.2 Coating parameters

	σ_0/MPa	n	K/MPa	s	m	ρ_0
正极	410	3.5	4200	1	4	0.581
负极	153	2.5	700	1	6	0.461

使用直径为 110mm 轧辊辊压极片的压下率与延伸率关系如下:

$$\left. \begin{aligned} \lambda_{Ca} &= 0.116C_{Ca} - 0.007 \\ \lambda_{An} &= 0.025C_{An} - 0.002 \end{aligned} \right\} \quad (30)$$

式中: $\lambda_{Ca}, \lambda_{An}$ 分别为正、负极片的延伸率; C_{Ca}, C_{An} 分别为正、负极片的压下率。

以此为基准通过式(24)计算其他轧辊直径下极片的延伸率。

为验证模型预测能力,本文将模型计算的单位宽度压力、实验测量值及 Kawakita 方程拟合值进行了对比。图7和图8分别展示了正极片与负极片在不同轧辊直径下的对比结果。

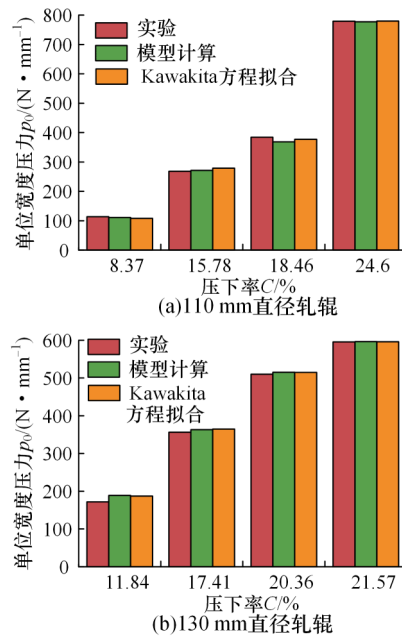


图7 辊压正极片单位宽度压力对比

Fig.7 Comparison of unit width pressure for cathode electrode during calendering

Kawakita 方程在文献[27]中被用来预测极片辊压过程压下率与单位宽度压力之间的关系:

$$C = \frac{Ap_0}{p_0 + B} \quad (31)$$

式中: A, B 为拟合常数。

基于实验数据拟合得到的 A 与 B 汇总于表3。

根据图7和图8中模型计算结果与实验测量结果的对比可知,对于正极片,采用 110 mm 直径轧辊辊压时,最大计算误差为 4.1%,平均计算误差为 1.9%;采用 130 mm 直径轧辊辊压时,最大计算误差为 9.9%,平均计算误差为 3.2%。对于

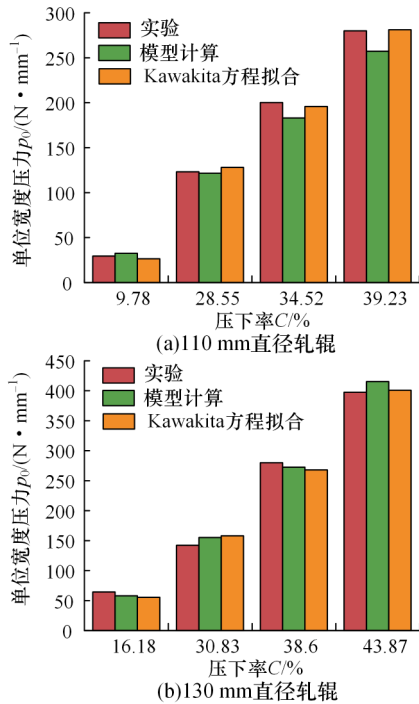


图8 辊压负极片单位宽度压力对比

Fig.8 Comparison of unit width pressure for anode electrode during calendaring

表3 Kawakita 方程拟合参数

Tab.3 Fitting parameters of the Kawakita equation

轧辊直径/mm	极片类型	A	B
110	正极	0.357	352.77
	负极	0.571	127.99
130	正极	0.329	314.41
	负极	0.605	152.28

负极片,采用 110 mm 直径轧辊辊压时,最大计算误差为 9.8%,平均计算误差为 6.9%;采用 130 mm 直径轧辊辊压时,最大计算误差为 10%,平均计算误差为 6.6%。总体而言,正极片平均计算误差为 2.6%,负极片平均计算误差为 6.8%,这说明计算得到的单位宽度压力与实验数据吻合良好,表明所建立的模型具有较高的准确性。

当轧辊直径变化时,尽管极片最大计算误差有所增加,但正、负极片辊压力的平均计算误差相差不大。正极片计算误差小于负极片计算误差的主要原因可能有两个:一是相同压下率情况下,正极片的辊压力显著高于负极片的辊压力,因此正极片采集的压力信号具有更高的信噪比;二是负极片涂层的初始相对密度更小(初始孔隙率更高),在辊压过程中其涂层材料变形可能存在更高的不确定性。

进一步对比 Kawakita 方程拟合结果与实验数据可知,对于正极片,110 mm 和 130 mm 直径轧辊条件下的平均拟合误差分别为 2.7% 和 3.1%;对于负极片,则分别为 4.3% 和 6.9%。尽

管 Kawakita 方程的拟合结果在部分工况下也具有较高的精度,但其准确性依赖于样本数据的数量和分布,且通用性有限,当轧辊直径或其他工艺参数发生变化时,需重新进行拟合调整。相比之下,本文所建立的力学模型具有更好的通用性,可为不同工况下的压力预测提供理论支撑。

3 讨论

3.1 单位压力与摩擦应力分布

当轧辊直径为 110 mm 时,不同压下率条件下正极片和负极片在辊压过程中辊缝内的单位压力分布如图 9 所示。图 9 表明,单位压力随压下率增大而显著增大,且分布曲线由平缓趋于陡峭。单位压力峰值位于中性点附近,且因涂层致密化导致屈服应力升高,使出口单位压力大于入口;而入口单位压力受一致初始条件控制保持恒定。此外,高压下率加剧了轧辊弹性压扁,导致变形区长度显著增加。

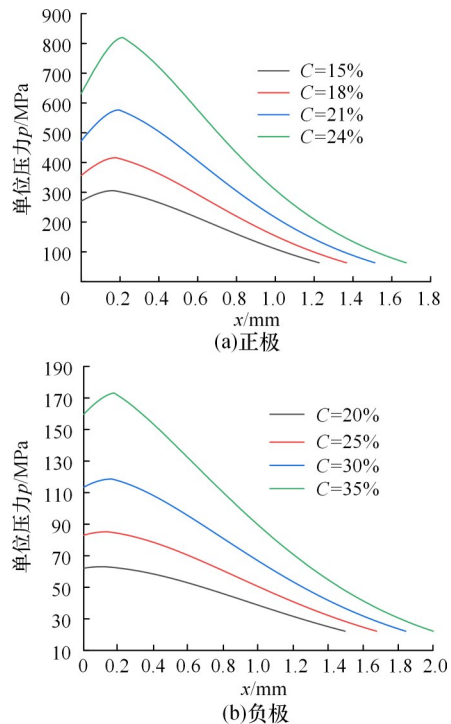


图9 不同压下率条件下极片单位压力分布

Fig.9 Unit pressure distribution of the electrode under different compression rates

图 10 展示了相同条件下辊缝内的摩擦应力分布。由于摩擦应力与单位压力之间仅相差一个比例系数(摩擦因数),因此在后滑区和前滑区,摩擦应力分布趋势与单位压力分布趋势一致。在中性点处,摩擦应力发生突变。这是由于极片与轧辊的相对速度在此处改向,导致摩擦应力方向反转,结合常摩擦因数假设,形成了摩擦应力的间断点。

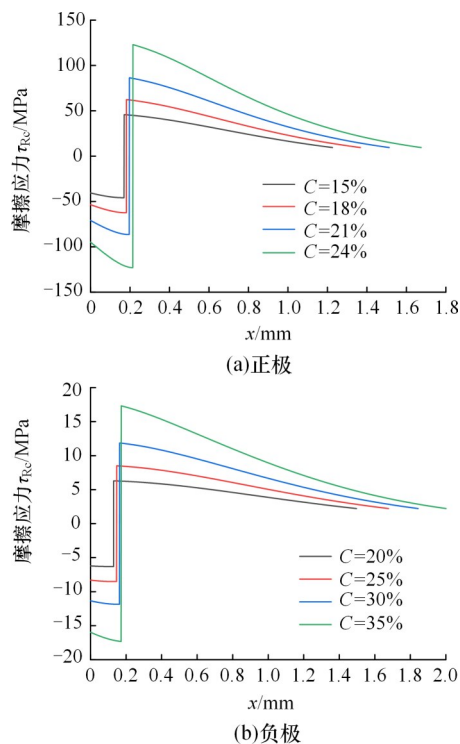


图 10 不同压下率条件下极片摩擦应力分布

Fig.10 Frictional stress distribution of the electrode under different compression rates

鉴于辊压过程单位压力与摩擦应力难以直接测量,本文开展了极片平面压制实验进行间接验证。图 11 对比了平面压制与 130 mm 轧辊辊压过程的平均单位压力 p_a (前者为压制力与极片面积的比值,后者为辊压力与接触投影面积的比值)。结果显示,正、负极片辊压的平均单位压力均显著低于平面压制的平均单位压力。由于平面压制可视为均匀受力过程,而辊压平均单位压力偏低意味着变形区内存在显著的低单位压力区域,从而拉低了均值。这种差异有力地侧面验证了辊压过程单位压力在变形区内呈现非均匀分布的特征。

3.2 单位宽度压力与力矩

辊压力直接影响极片结构,而辊压力矩则是校验设备能力与电机选型的核心参数。本节重点分析核心工艺变量——压下率与轧辊直径对单位宽度压力及力矩的影响规律。

依据摩擦应力分布,单位宽度力矩为

$$T = R^2 \int_0^\beta \tau_{Rc} d\beta_x \quad (32)$$

式中: β 为接触角(即轧辊与极片接触弧对应的圆心角,见图 1); β_x 为 x 位置对应的轧辊圆心角。

图 12 和图 13 展示了 110 mm 轧辊压下率对单位宽度压力与力矩的影响。两者均随压下率呈非线性单调递增,且斜率逐渐增大。这表明在高压下率区间,载荷对压下量变化更为敏感,致密

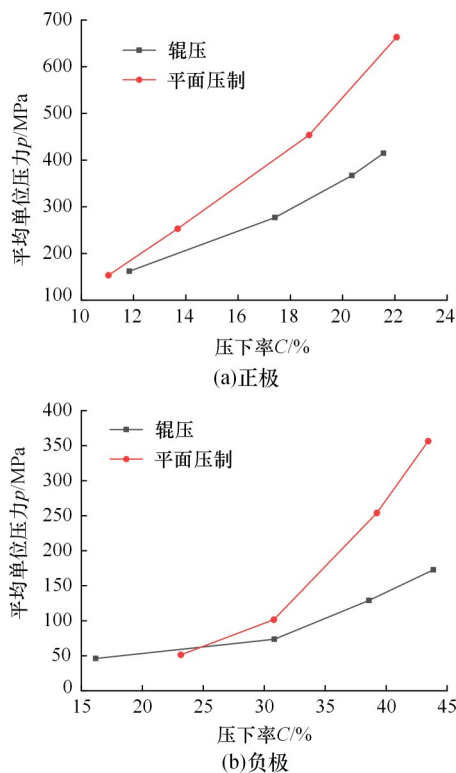


图 11 辊压与平面压制平均单位压力对比

Fig.11 Comparison of average unit pressure between calendaring and flat pressing

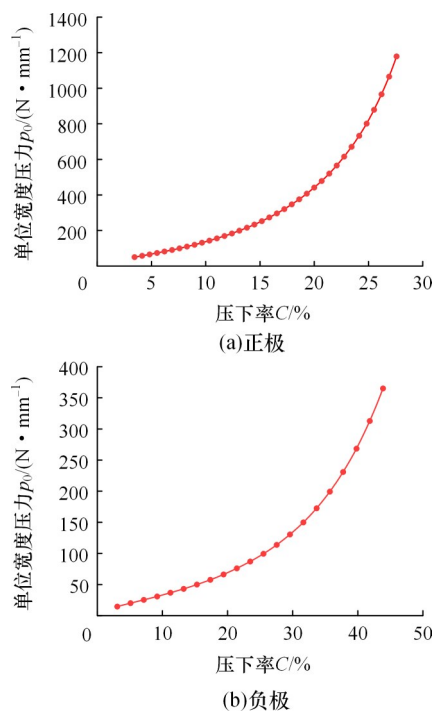


图 12 压下率与单位宽度压力之间的关系

Fig.12 The relationship between compression rate and unit width pressure

化难度显著提高。此外,NMC 较高的变形抗力导致同等工况下正极片的载荷始终大于负极片。

图 14 和图 15 展示了不同压下率下轧辊直径对单位宽度压力与力矩的影响。两者均随轧辊直

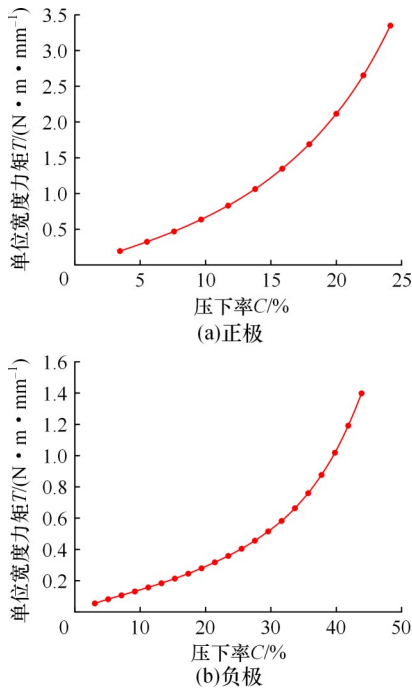


图13 压下率与单位宽度力矩之间的关系

Fig.13 The relationship between compression rate and unit width torque

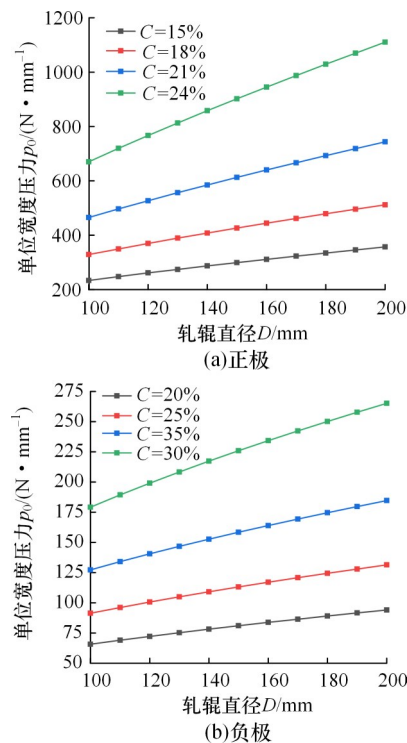


图14 不同压下率条件下轧辊直径与单位宽度压力之间的关系

Fig.14 The relationship between roll diameter and unit width pressure under different compression rates

径增大而显著增大。尽管单位宽度压力曲线斜率略有减小而单位宽度力矩曲线斜率略有增大,但整体均呈现近似线性关系。值得注意的是,高压下率下的两种曲线斜率更陡,表明单位宽度载荷在高压实阶段对轧辊直径的变化更为敏感。

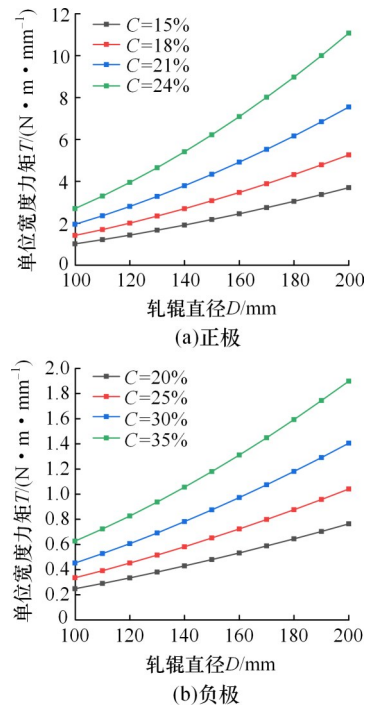


图15 不同压下率条件下轧辊直径与单位宽度力矩之间的关系

Fig.15 The relationship between roll diameter and unit width torque under different compression rates

4 结论

本文建立了基于Kuhn屈服准则的锂离子电池极片辊压力学模型,并通过实验验证了其准确性。基于此模型,分析了极片在辊压过程中单位压力与摩擦应力的分布特点,并探讨了压下率与轧辊直径对单位宽度压力和力矩的影响。

结果显示,辊缝内单位压力分布不均匀,峰值位于中性点附近,且出口大于入口;随着压下率增加,压力分布愈发陡峭。摩擦应力分布趋势在前滑区和后滑区与单位压力分布一致,但由于常摩擦因数假设,摩擦应力在中性点处发生突变。

进一步分析表明,单位宽度压力与力矩随压下率呈非线性增长(斜率渐增),随轧辊直径呈近似线性增长,且高压下率下两者对轧辊直径变化的敏感性更为显著。

参考文献:

- [1] 胡成志, 王国栋, 唐伟建, 等. 高比能锂离子电池高镍正极材料的表面包覆改性研究进展[J]. 化工学报, 2024, 75(11): 4020-4036.
HU Chengzhi, WANG Guoxian, TANG Weijian, et al. Research Progress on Surface Coating Modification of Nickel-rich Cathode Materials for High Energy Density Lithium-ion Battery[J]. CIESC Journal, 2024, 75(11): 4020-4036.
- [2] 李文俊, 徐航宇, 杨琪, 等. 高能量密度锂电池开发策略[J]. 储能科学与技术, 2020, 9(2): 448-478.

- LI Wenjun, XU Hangyu, YANG Qi, et al. Development of Strategies for High-energy-density Lithium Batteries [J]. *Energy Storage Science and Technology*, 2020, 9(2): 448-478.
- [3] 黄江, 金建泉, 赵梁, 等. 锂离子电池火灾灭火剂及灭火策略研究进展[J]. *工程科学学报*, 2024, 46(11): 2121-2132.
- HUANG Jiang, JIN Jianquan, ZHAO Liang, et al. Review of Fire Extinguishing Agents and Fire Suppression Strategies for Lithium-ion Battery Fire[J]. *Chinese Journal of Engineering*, 2024, 46(11): 2121-2132.
- [4] LIU Yangtao, ZHANG Ruihan, WANG Jun, et al. Current and Future Lithium-ion Battery Manufacturing [J]. *iScience*, 2021, 24(4): 102332.
- [5] HAWLEY W B, LI Jianlin. Electrode Manufacturing for Lithium-ion Batteries—Analysis of Current and Next Generation Processing[J]. *Journal of Energy Storage*, 2019, 25: 100862.
- [6] LIU He, CHENG Xinbing, CHONG Yan, et al. Advanced Electrode Processing of Lithium Ion Batteries; a Review of Powder Technology in Battery Fabrication[J]. *Particuology*, 2021, 57: 56-71.
- [7] ABDOLLAHIFAR M, CAVERS H, SCHEFFLER S, et al. Insights into Influencing Electrode Calendering on the Battery Performance [J]. *Advanced Energy Materials*, 2023, 13(40): 2300973.
- [8] PARIKH D, CHRISTENSEN T, LI Jianlin. Correlating the Influence of Porosity, Tortuosity, and Mass Loading on the Energy Density of $\text{LiNi}_{0.6}\text{Mn}_{0.2}\text{Co}_{0.2}\text{O}_2$ Cathodes under Extreme Fast Charging (XFC) Conditions[J]. *Journal of Power Sources*, 2020, 474: 228601.
- [9] ZHAI Peiyan, HUANG Jiaqi, ZHU Lin, et al. Calendering of Free-standing Electrode for Lithium-sulfur Batteries with High Volumetric Energy Density[J]. *Carbon*, 2017, 111: 493-501.
- [10] ZHANG Junpeng, SUN Jingna, HUANG Huagui, et al. Deformation and Fracture Mechanisms in the Calendering Process of Lithium-ion Battery Electrodes[J]. *Applied Energy*, 2024, 373: 123900.
- [11] WANG Yu, SU Boman, YUAN C. An Integrated Simulation and Experimental Study of Calendering Process in Water-based Manufacturing of Lithium-ion Battery Graphite Electrode [J]. *Journal of Manufacturing Processes*, 2024, 131: 861-865.
- [12] HIDALGO M F V, APACHITEI G, DOGARU D, et al. Design of Experiments for Optimizing the Calendering Process in Li-ion Battery Manufacturing[J]. *Journal of Power Sources*, 2023, 573: 233091.
- [13] GANDERT J C, MÜLLER M, PAARMANN S, et al. Effective Thermal Conductivity of Lithium-ion Battery Electrodes in Dependence on the Degree of Calendering [J]. *Energy Technology*, 2023, 11(8): 2300259.
- [14] PARK K, MYEONG S, SHIN D, et al. Improved Swelling Behavior of Li Ion Batteries by Microstructural Engineering of Anode[J]. *Journal of Industrial and Engineering Chemistry*, 2019, 71: 270-276.
- [15] SANGRÓS GIMÉNEZ C, FINKE B, SCHILDE C, et al. Numerical Simulation of the Behavior of Lithium-ion Battery Electrodes during the Calendering Process via the Discrete Element Method[J]. *Powder Technology*, 2019, 349: 1-11.
- [16] SANGRÓS GIMÉNEZ C, SCHILDE C, FROBÖSE L, et al. Mechanical, Electrical, and Ionic Behavior of Lithium-ion Battery Electrodes via Discrete Element Method Simulations[J]. *Energy Technology*, 2020, 8(2): 1900180.
- [17] SANGRÓS GIMÉNEZ C, FINKE B, NOWAK C, et al. Structural and Mechanical Characterization of Lithium-ion Battery Electrodes via DEM Simulations [J]. *Advanced Powder Technology*, 2018, 29(10): 2312-2321.
- [18] GE Ruihuan, CUMMING D J, SMITH R M. Discrete Element Method (DEM) Analysis of Lithium Ion Battery Electrode Structures from X-ray Tomography—the Effect of Calendering Conditions [J]. *Powder Technology*, 2022, 403: 117366.
- [19] XU Jiahui, PAREDES-GOYES B, SU Zeliang, et al. Computational Model for Predicting Particle Fracture during Electrode Calendering [J]. *Batteries & Supercaps*, 2023, 6(12): e202300371.
- [20] SONG Yanjie, GAO Kai, HE Chunwang, et al. Exploring Particle-current Collector Contact Damage in Li-ion Battery Using DEM-FEM Scheme[J]. *Applied Energy*, 2023, 351: 121904.
- [21] NGANDJONG A C, LOMBARDO T, PRIMO E N, et al. Investigating Electrode Calendering and Its Impact on Electrochemical Performance by Means of a New Discrete Element Method Model: Towards a Digital Twin of Li-ion Battery Manufacturing [J]. *Journal of Power Sources*, 2021, 485: 229320.
- [22] ZHANG Junpeng, SUN Jingna, HUANG Huagui, et al. Influence of Calendering Process on the Structural Mechanics and Heat Transfer Characteristics of Lithium-ion Battery Electrodes via DEM Simulations [J]. *Particuology*, 2024, 85: 252-267.
- [23] DUQUESNOY M, LOMBARDO T, CHOUCANE M, et al. Data-driven Assessment of Electrode Calendering Process by Combining Experimental Results, in Silico Mesostuctures Generation and Machine Learning[J]. *Journal of Power Sources*, 2020, 480: 229103.
- [24] DUQUESNOY M, LIU Chaoyue, KUMAR V, et al. Toward High-performance Energy and Power Battery Cells with Machine Learning-based Optimization of Electrode Manufacturing[J]. *Journal of Power Sources*, 2024, 590: 233674.
- [25] FARAJI NIRI M, APACHITEI G, LAIN M, et al. The Impact of Calendering Process Variables on the Impedance and Capacity Fade of Lithium-ion Cells: an Explainable Machine Learning Approach [J]. *Energy Technology*, 2022, 10(12): 2200893.
- [26] MEYER C, WEYHE M, HASELRIEDER W, et al. Heated Calendering of Cathodes for Lithium-ion Batteries with Varied Carbon Black and Binder Contents[J]. *Energy Technology*, 2020, 8(2): 1900175.
- [27] WANG Dongcheng, WANG Guodong, XU Chengjie, et al. Mechanics and Deformation Behavior of Lithium-ion Battery Electrode during Calendering Process[J]. *Journal of Energy Storage*, 2024, 87: 111521.
- [28] 张俊鹏, 黄华贵, 孙静娜, 等. 锂离子电池极片辊压微观结构演化与过程建模[J]. *中国有色金属学报*, 2022, 32(3): 776-787.
- ZHANG Junpeng, HUANG Huagui, SUN Jingna, et al. Microstructure Evolution and Process Modeling for Calendering of Lithium-ion Battery Electrode[J]. *The Chinese Journal of Nonferrous Metals*, 2022, 32(3): 776-787.
- [29] 曹鸿德. 塑性变形力学基础与轧制原理[M]. 北京: 机械工业出版社, 1981: 214-217.
- CAO Hongde. *Mechanical Basis of Plastic Deformation and Rolling Principle*[M]. Beijing: China Machine Press, 1981: 214-217.