

# Study of Packing Safety and Packing Density for Lithium-ion Battery

Binghe Liu<sup>1, 2</sup>, Jun Xu<sup>1, 2</sup>

<sup>1</sup>Department of Automotive Engineering, School of Transportation Science and Engineering, Beihang University, Beijing, China, 100191

<sup>2</sup>Advanced Transportation Vehicle Research Center, Beihang University, Beijing, China, 100191

Email: junxu@buaa.edu.cn

**Abstract:** Crash safety of lithium-ion battery (LIB) has become a heated topic recently due to the wide application of LIB in vehicle industries and fast growth for electric vehicle market. The cell system or the cell modulus is the packing of the battery, including cylindrical battery and prismatic battery. This paper is to investigate the relationship of packing density and mechanical safety for the 18650 LIB packs. First of all, a detailed numerical simulation model is established and verified by experiments, and a simple short circuit onset criterion is built. Then three parameters of  $\theta$ ,  $l$  and  $b$  are proposed to express the packing modes and packing sizes. And the single variable method is used to investigate the influences of the parameters for packing density and mechanical behavior. At last, the relationship of packing density and mechanical behavior is discussed and a quick prediction model for mechanical response of LIB packs is built. Results may shed lights on future safe design and manufacturing of LIB packs.

**Keywords:** Lithium ion battery, Packing density, Finite element analysis, Battery safety

## 锂离子电池堆积密度与堆积安全研究

刘冰河<sup>1, 2</sup>, 许骏<sup>1, 2</sup>

<sup>1</sup>北京航空航天大学交通科学与工程学院汽车工程系, 北京, 中国, 100191

<sup>2</sup>北京航空航天大学先进载运工具研究中心, 北京, 中国, 100191

Email: junxu@buaa.edu.cn

**摘 要:** 随着电动汽车运用越来越广泛, 锂离子电池的碰撞安全已经成为研究的热点问题。一般而言电动车的电池组或电池系统为方形电池或圆柱形电池的堆积。本文主要探究了 18650 锂电池各种堆积形式的安全性能, 讨论了堆积密度与力学行为的关系。首先, 本文建立了锂离子电池堆积的数值模型, 并建立了锂离子电池短路的判据。通过  $\theta$ 、 $l$  和  $b$  三个参数描述锂离子电池的堆积形式与堆积密度。利用单一变量法讨论了各个参数对电池堆积密度和力学行为的影响, 并探讨了堆积密度与力学行为的关系, 最终建立了一个能快速测锂离子电池组力学行为的理论模型。本文的研究结果将对锂离子电池的堆积设计与制造产生积极的作用。

**关键词:** 锂离子电池; 堆积密度; 有限元; 电池安全

## 1 引言

锂离子电池广泛地运用于非汽油车中<sup>[1]</sup>。随着电动汽车与混合动力汽车的推广<sup>[1]</sup>, 电池包的安全被逐渐重视起来, 尤其是锂离子电池的起火<sup>[2-4]</sup>和爆炸<sup>[5-7]</sup>。

近年来, 研究者展开了对单体锂电池机械性能的研究, 包括在不同的加载状态<sup>[8-12]</sup>与不同的电池形状的研究<sup>[8-10, 13-15]</sup>。同时研究者们也对锂离子电池各组分的力学行为进行了系统的研究<sup>[8, 9, 16]</sup>。夏勇<sup>[17]</sup>首先对锂离子电池包的碰撞安全行为展开研究, 同时也有很多文献<sup>[8, 9, 16]</sup>对锂离子电池组的热逃逸行为开展研究工作。

本文主要研究不同堆积形式电池包的碰撞安全行为。本文建立了锂离子电池堆积的有限元模型, 通过  $\theta$ 、 $l$  和  $b$  三个参数描述锂离子电池的堆积形式与堆积密度。利用单一变量法讨论了各个参数对电池堆积密度和力学行为的影响, 并探讨了堆积密度与力学行为的关系, 最终建立了一个能快速预测锂离子电池组力学行为的理论模型。

## 2 方法

本文考虑了 18650 圆柱形电池的堆积模块。首先，本文提出了一个几何模型去定义堆积模块和堆积大小。堆积密度可以由这些几何参数表征。在机械完整性的研究中，有限元被用于描述与预测不同堆积形式的力学行为及失效研究。

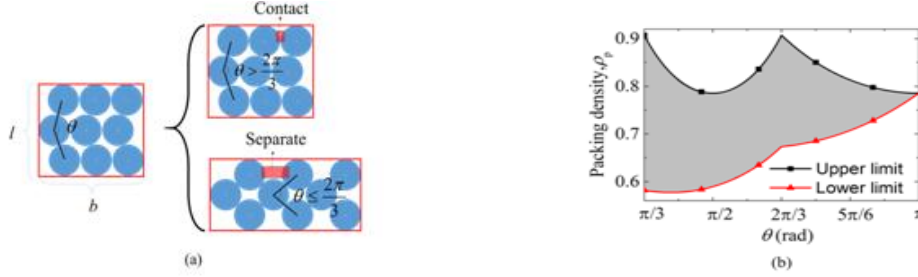


图 1 (a) 电池组的堆积形式

(b) 堆积密度的上下限

### 2.1 几何模型

本文仅研究了圆柱形锂离子电池的堆积。为了简化模型我们讨论了数学上的“圆填充方形的问题”<sup>[18]</sup>。本文讨论 \$b\$ 行 1 列的电池堆积，\$\theta\$ 角表示不同的堆积模式，其中 \$\theta\$ 的范围是 \$\frac{\pi}{3}\$ 到 \$\pi\$，如图 1 (a)。堆积密度可以预测为

$$\rho_p = \begin{cases} \frac{\pi b l}{4(2b \cos \frac{\theta}{2} + 1 - \cos \frac{\theta}{2})(l \sin \frac{\theta}{2} + 1 - \sin \frac{\theta}{2})} \\ (\frac{\pi}{3} \leq \theta \leq \frac{2\pi}{3}) \\ \frac{\pi b l}{4(b + \cos \frac{\theta}{2})(l \sin \frac{\theta}{2} + 1 - \sin \frac{\theta}{2})} \\ (\frac{2\pi}{3} < \theta \leq \pi) \end{cases} \quad (1)$$

### 2.2 锂离子电池组的有限元模型

锂离子电池由电芯、电池壳和中间的卷针组成。单体电池的力学模型已经由文献<sup>[8, 16, 19]</sup>提出。本文基于文献<sup>[19]</sup>所建立的单体锂电池力学模型，建立了基于等效塑性应变的短路判定准则，如下

$$\bar{\epsilon}^{eq} = \bar{\epsilon}_f^{eq} \quad (2)$$

其中，\$\bar{\epsilon}^{eq}\$ 是等效塑性应变，\$\bar{\epsilon}\_f^{eq}\$ 为等效塑性失效应变，其值本文确定为 0.41。

在此基础上本文建立了锂离子电池的堆积模型。本文所选取的加载模式为压缩加载，其中三面刚性墙固定约束，一面刚性墙强制位移加载。ABAQUS/Explicit 用于本文的研究。在有限元仿真中，一个较小的速度用于代替准静态的加载模式。

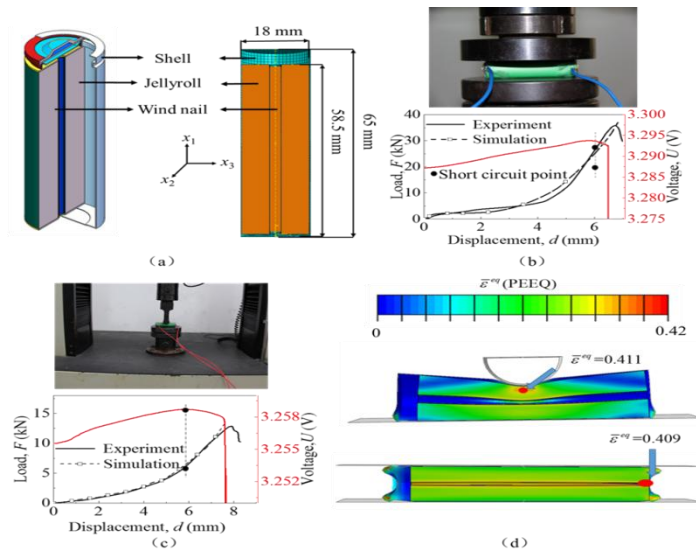


图 2 (a) 锂离子电池的结构图片 (b) 单体锂离子电池的准静态计算结果 (c) 单体锂离子电池压痕计算结果 (d) 在失效时刻的等效塑性应变

### 3 结果与讨论

#### 3.1 代表性结果

电池堆积的典型曲线如图 3 (b) 所示, 在前半段力平稳上升, 而到后半段力快速上升。发现其力学行为与泡沫非常相似。都经历了线性阶段、平台阶段和压实阶段。

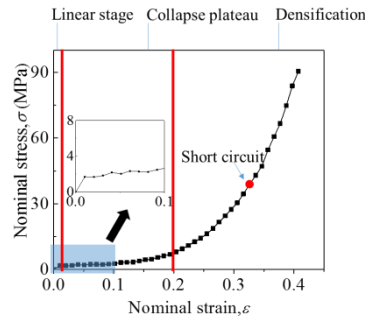


图 3 当  $l$  和  $b$  等于 3,  $\theta$  等于  $\pi$  时的应力-应变曲线

#### 3.2 参数分析

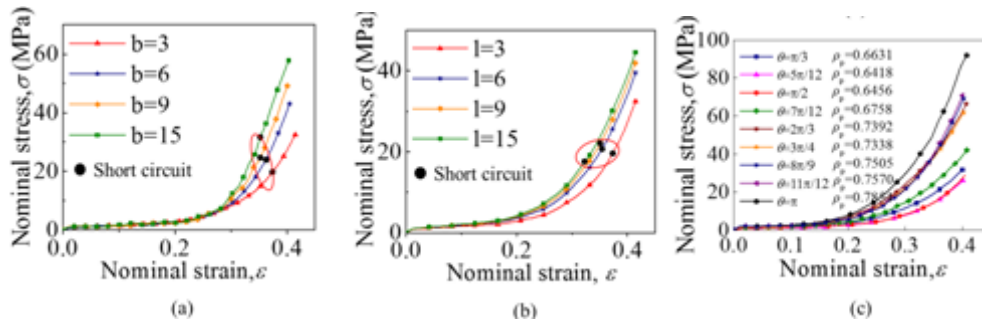


图 4 参数化分析结果

本文对  $\theta$ 、 $b$  和  $l$  进行了参数化分析。发现锂电池组的力学行为随着三个参数的改变都会改变, 经过分析这三个参数引发力学行为改变的主要原因是堆积密度的改变。但同时  $\theta$  也会改变曲线的硬化程度,  $b$  和  $l$  也会改变

边界条件从而改变锂离子电池组的力学行为。同时本文也分析了这三个参数对失效应变的影响，发现失效应变同样与这三个参数有一定的关系。图3为参数化分析的结果。

### 3.2 堆积密度与力学行为的关系

本文将堆积密度与模量、屈服应力、失效应变和应变能密度总结得到以下结论。发现电池组的模量和屈服应力随着堆积密度的增加而增加，应变能密度随着堆积密度的增加而增加。而失效应变却随着堆积密度的增加而减小。本文总结的数据如图4所示。

本文建立了能快速预测锂离子电池组失效应变的力学模型。模型在线性阶段为

$$\sigma_p = 2.6(\rho_p)^{3/2} \quad (3)$$

$$E_p = 260(\rho_p)^{3/2} \quad (4)$$

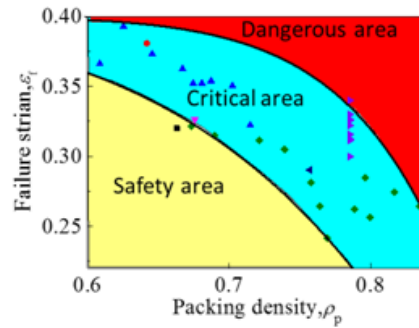


图5 锂离子电池力学行为与堆积密度的关系

$$\sigma = g(\epsilon_p, \theta) = Ak(b)m(l)n(\rho_p)\epsilon_p^{l(\theta)} + 2.6(\rho_p)^{3/2} \quad (5)$$

其中

$$m(b) = 1 \quad (6)$$

$$k(l) = W(l \times 3, \theta = \pi) / W(3 \times 3, \theta = \pi) \\ = 0.0144l + 0.9568 \quad (7)$$

$$n(\rho_p) = \frac{W(\rho_p)}{W_0} = 31.77\rho_p^{5.477} \quad (8)$$

经过验证此模型能过很好的预测锂离子电池组的力学行为。

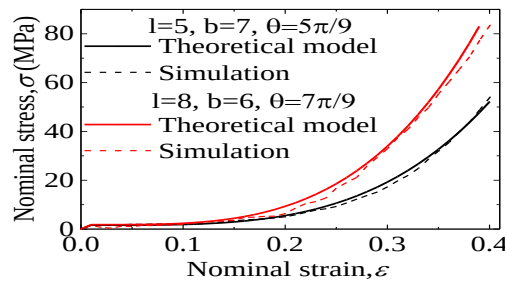


图6 理论模型与有限元模型的对比

## 4 结论

锂离子电池堆积的安全问题已经引发广泛的关注, 本文对锂离子电池堆积的碰撞安全展开研究。首先, 本文建立了锂离子电池堆积的有限元模型, 通过  $\theta$ 、 $l$  和  $b$  三个参数描述锂离子电池的堆积形式与堆积密度。利用单一变量法讨论了各个参数对电池堆积密度和力学行为的影响, 并探讨了堆积密度与力学行为的关系, 最终建立了一个能快速预测锂离子电池组力学行为的理论模型, 本文的研究结果对锂离子电池组的安全设计将会有一定的作用。

## 参考文献

- [1] J. C. Chen, J. Y. Liu, et al. Unveiling the Roles of Binder in the Mechanical Integrity of Electrodes for Lithium-Ion Batteries[J]. Journal of the Electrochemical Society, 2013, 160: A1502-A1509.
- [2] T. R. Hawkins, O. M. Gausen, et al. Environmental impacts of hybrid and electric vehicles-a review[J]. International Journal of Life Cycle Assessment, 2012, 17: 997-1014.
- [3] D. Wang, N. Zamel, et al. Life cycle analysis of internal combustion engine, electric and fuel cell vehicles for China[J]. Energy, 2013, 59: 402-412.
- [4] A. Poullikkas. Sustainable options for electric vehicle technologies[J]. Renewable & Sustainable Energy Reviews, 2015, 41: 1277-1287.
- [5] G. Zhang, F. Huang, et al. Research of the Electric Vehicle Safety Standard[J]. 2012 World Automation Congress (Wac), 2012.
- [6] H. Dai, X. Wei, et al. A novel dual-inductor based charge equalizer for traction battery cells of electric vehicles[J]. International Journal of Electrical Power & Energy Systems, 2015, 67: 627-638.
- [7] Z.-p. Wang, J. Liu, et al. Impact Safety Control Strategy for the Battery System of an Example Electric Bus[J]. Mathematical Problems in Engineering, 2015.
- [8] L. Greve and C. Fehrenbach. Mechanical testing and macro-mechanical finite element simulation of the deformation, fracture, and short circuit initiation of cylindrical Lithium ion battery cells[J]. Journal of Power Sources, 2012, 214: 377-385.
- [9] E. Sahraei, J. Campbell, et al. Modeling and short circuit detection of 18650 Li-ion cells under mechanical abuse conditions[J]. Journal of Power Sources, 2012, 220: 360-372.
- [10] T. Wierzbicki and E. Sahraei. Homogenized mechanical properties for the jellyroll of cylindrical Lithium-ion cells[J]. Journal of Power Sources, 2013, 241: 467-476.
- [11] W. J. Lai, M. Y. Ali, et al. Mechanical behavior of representative volume elements of lithium-ion battery modules under various loading conditions[J]. Journal of Power Sources, 2014, 248: 789-808.
- [12] W.-J. Lai, M. Y. Ali, et al. Mechanical behavior of representative volume elements of lithium-ion battery cells under compressive loading conditions[J]. J. Power Sources, 2014, 245: 609-623.
- [13] E. Sahraei, R. Hill, et al. Calibration and finite element simulation of pouch lithium-ion batteries for mechanical integrity[J]. Journal of Power Sources, 2012, 201: 307-321.
- [14] M. Y. Ali, W.-J. Lai, et al. Computational models for simulations of lithium-ion battery cells under constrained compression tests[J]. Journal of Power Sources, 2013, 242: 325-340.
- [15] I. Avdeev and M. Gilaki. Structural analysis and experimental characterization of cylindrical lithium-ion battery cells subject to lateral impact[J]. Journal of Power Sources, 2014, 271: 382-391.
- [16] J. Xu, B. Liu, et al. Dynamic mechanical integrity of cylindrical lithium-ion battery cell upon crushing[J]. Engineering Failure Analysis, 2015, 53: 97-110.
- [17] Y. Xia, T. Wierzbicki, et al. Damage of cells and battery packs due to ground impact[J]. Journal of Power Sources, 2014, 267: 78-97.
- [18] H. T. Croft, K. J. Falconer, et al. Unsolved Problems in Geometry: Unsolved Problems in Intuitive Mathematics[M]. Springer Science & Business Media, 2012.
- [19] J. Xu, B. Liu, et al. Computational model of 18650 lithium-ion battery with coupled strain rate and SOC dependencies[J]. Applied Energy, 2016, 172: 180-189.