

DOI: 10.11883/bzycj-2024-0188

冲击载荷下圆柱形锂离子电池的动态响应预测*

黄子轩¹, 张新春^{1,2}, 顾丽蓉¹, 安利强^{1,2}, 饶理想^{1,2}, 张玮琦¹

(1. 华北电力大学机械工程系, 河北 保定 071003;

2. 华北电力大学河北省电力机械装备健康维护与失效预防重点实验室, 河北 保定 071003)

摘要: 为提高径向冲击载荷下圆柱形锂离子电池的安全性, 基于膜力因子法研究了大变形下电池的动态响应特性。将电池首先简化为包括内芯和外壳的夹层梁结构, 根据抗拉屈服强度建立了电池横截面的塑性屈服准则和膜力因子, 进一步将膜力因子引入运动方程实现了大变形下动态响应的求解。此外, 基于拉压试验测定了电池构件的力学性能, 进一步建立了电池整体有限元模型。研究表明: 电池位移响应和速度响应的理论结果和有限元结果具有一致性; 冲击载荷下电池初始速度越高, 轴力效应对动态响应的影响越大; 电池最大挠度随初始速度近似线性增加, 且实际的响应时间具有饱和性; 电池最大挠度随内芯和外壳屈服强度之比的减小而增大, 电池外壳越薄, 屈服强度的影响越显著; 电池最大挠度随外壳厚度的增大而减小, 屈服强度比越大, 外壳厚度的影响越显著。

关键词: 锂离子电池; 动态响应; 大变形; 冲击载荷; 膜力因子法

中图分类号: O347; U469.72

国标学科代码: 13015

文献标志码: A

Dynamic response prediction of cylindrical lithium-ion batteries under impact loading

HUANG Zixuan¹, ZHANG Xinchun^{1,2}, GU Lirong¹, AN Liqiang^{1,2}, RAO Lixiang^{1,2}, ZHANG Weiqi¹

(1. Department of Mechanical Engineering, North China Electric Power University, Baoding 071003, Hebei, China;

2. Hebei Key Laboratory of Electric Machinery Health Maintenance and Failure Prevention,

North China Electric Power University, Baoding 071003, China)

Abstract: To improve the safety performance of cylindrical lithium-ion batteries under radial dynamic impacting, the dynamic response characteristics of the batteries under large deformation were investigated based on the membrane factor method. Firstly, the battery was simplified to sandwich beam including the casing and inner core. The plastic yield criterion and membrane factor of the battery cross-section were established based on tensile yield strengths. The membrane factor was introduced into the motion equation to solve the dynamic response under large deformation. Furthermore, the mechanical properties of the battery components were determined based on tensile and compression tests. Then the finite element (FE) model of the battery was developed. It has been shown that the theoretical results and FE results of the displacement responses and velocity responses of the battery were in good agreement. The larger the initial velocity of the battery under impact loading, the larger the effect of axial force effect on the dynamic response. The maximum deflection of the battery increases approximately linearly with initial velocity, and the actual response time shows saturation. The maximum deflection of the battery increases with the decrease of the ratio of casing yield strength to core yield strength. The effect of yield strength is significant under thin battery casings. The maximum deflection of the battery decreases with the increase of the casing thickness. Under high yield strength ratio, the effect of casing thickness is significant. The research can provide technical

* 收稿日期: 2024-06-17; 修回日期: 2024-09-09

基金项目: 国家自然科学基金(12304116); 河北省自然科学基金(A2020502005)

第一作者: 黄子轩(1999—), 男, 博士研究生, zxhuang@ncepu.edu.cn

通信作者: 张新春(1980—), 男, 博士, 副教授, xczhang@ncepu.edu.cn

support for the failure prediction and structural safety design of the battery.

Keywords: lithium-ion battery; dynamic response; large deformation; impact loading; membrane factor method

锂离子电池由于循环性能好、自放电率低、体积小、重量轻等优势而被广泛应用于航空航天以及交通运输等领域^[1],特别是作为电动汽车的储能元件具有不可替代的地位。然而服役期间电动汽车不可避免会发生碰撞等事故,导致电池结构发生大变形引发内部短路,造成热失控、爆炸等灾难性后果。研究表明,机械滥用下电池的失效模式与其力学行为直接相关^[2]。因此,压缩、冲击等载荷作用下电池的力学响应研究受到了广泛关注。

近年来,关于锂离子电池在机械载荷作用下的力学行为和失效机理的研究业已展开。在准静态加载方面,Xu 等^[2]研究了不同荷电状态(state of charge, SOC)下锂离子电池在挤压载荷下的电化学失效行为,并从结构刚度的角度分析了电池整体的力学行为。Wang 等^[3]通过平板压缩和径向压痕等多项试验,揭示了圆柱形锂离子电池的基本力学行为特性,并使用可压缩泡沫的本构关系建立了电池内芯的有限元模型。Sahraei 等^[4]采用 10% SOC 的锂离子电池进行了球头压痕、圆杆压痕、平板压缩和三点弯曲试验,并开发了由壳单元和实体单元组成的电池有限元模型。Gilaki 等^[5]将锂离子电池内芯各层逐级堆叠并进行压缩试验,此外还对电池湿制和干制内芯的应力-应变关系进行了对比。与准静态加载不同,动态载荷下电池更容易发生大变形导致电池失效,冲击速度越高,应变率效应和应力波效应的影响越显著。Zhang 等^[6]采用应力波理论对圆柱形锂离子电池的动力学行为进行分析,根据有限元模拟结果,绘制了具有“上升-下降-平台-上升”趋势的力-位移曲线并预测了与速度相关的裂纹位置。Zhang 等^[7]研究了不同冲击载荷下锂离子电池的力学行为,通过试验和有限元的方法揭示了电池的动态失效机制,并拟合得到了短路失效判据。Zhu 等^[8]比较了干电池和湿电池样品在五种加载速度下的动态行为,建立了孔隙力学模型来描述电解质的压力梯度和速度从而量化了电解液的应变率效应。Wang 等^[9]建立了多物理场耦合模型来描述圆柱形锂离子电池在动态负载下的机械、电气和热响应,并利用该模型预测了不同冲击能量下不同 SOC 电池的内部短路和热失控演化过程。上述研究涵盖试验、仿真等多种表征方法,为锂离子电池的机械完整性研究奠定了基础。

然而,现有研究中的刚性支撑限制了电池的面外变形,现实中电池包并不对电池单体提供完全刚性约束^[10],有必要对电池在大变形下的动态响应进行进一步研究。针对边界受到膜(轴)力约束的结构,陈发良等^[11]开创性地提出了膜力因子法,实现了大变形下结构动态响应的准确计算。Chen 等^[12]应用膜力因子法获得了两端简支和固支下均质梁在大变形下的动态响应,研究表明,采用准确屈服准则预测的最大挠度相较早期的平方极限屈服准则精确度更高。Qin 等^[13]和 Xiang 等^[14]依托膜力因子法研究了固支的金属夹层梁在冲击载荷作用下的动态响应,并基于最大挠度提出了断裂标准,加载位置、几何形状和材料特性对夹层梁初始破坏和最终断裂的影响得到了进一步研究。谌勇等^[15]将膜力因子法推广到受爆炸载荷的简支刚塑性圆板,通过有限元计算结果验证了理论方法的准确性。张新春等^[16]和 Zhang 等^[17]将膜力因子法应用锂离子电池的动态响应预测,分析了电池在冲击载荷下的动态响应机制和最大挠度变化规律。由于锂离子电池内部结构复杂,现有的试验和仿真手段存在成本高、效率低等问题,且不同种类电池在内部结构和力学性能上差异较大,因此,冲击载荷下锂离子电池的动态响应研究亟需进一步展开。

本文中,以圆柱形锂离子电池为研究对象,在两端固定的条件下建立电池的夹层梁力学模型,基于膜力因子法构建大变形下电池的运动方程,进一步通过有限元模拟验证理论模型的可靠性。在此基础上,研究不同初始速度下电池的动态响应特性,提出最大挠度随初速度变化的近似公式和饱和冲击时间,并获得电池整体变形情况随质量、尺寸和抗拉性能的变化趋势。

1 模型构建及运动方程

1.1 圆柱形锂离子电池的模型简化

图 1 为 18650 圆柱形锂离子电池在冲击载荷下的力学模型示意图,模型中电池两端受到横向完全固定

约束, 从而防止底部刚性支撑对面外大变形的限制。在大尺寸异物冲击和电动汽车整体发生高速碰撞时, 电池单体遭受径向均布冲击载荷作用, 在全长 $2L$ 上获得均匀初始速度 v_0 , 电池整体的质量为 m 。由于电池材料变形过程中的弹性阶段较短, 因此将电池视为刚塑性材料处理。由于应力波效应在低中速冲击中对动态响应结果影响较小, 因此本研究未考虑结构中应力波的传播。

18650 圆柱形锂离子电池内芯和外壳的机械强度相差大, 因此, 电池可简化为由内芯和外壳组成的夹层梁模型^[4]。大变形条件下, 轴向的弯曲和拉伸主导电池结构的变形^[18], 因此, 塑性极限状态下载面的完全塑性弯矩 M_0 和完全塑性轴力 N_0 分别为:

$$M_0 = \frac{4}{3}r_1^3\sigma_c + \frac{4}{3}(r_2^3 - r_1^3)\sigma_s, \quad N_0 = \sigma_c\pi r_1^2 + \sigma_s\pi(r_2^2 - r_1^2) \quad (1)$$

式中: r_1 为电池内芯半径, r_2 为电池整体的半径, σ_c 为电池内芯的塑性拉伸屈服强度, σ_s 为电池外壳的塑性拉伸屈服强度。假设电池外壳厚度为 h , 塑性中面到电池截面形心的距离为 H , 图 2 中给出了不同塑性中面下电池截面的应力分布, 由于 h 远小于 r_1 , 可以认为 $\alpha_1 = \alpha_2 = \alpha$, 当 $r_1 \leq H \leq r_2$ 时, 可以认为 $\alpha_1 = 0$ 。

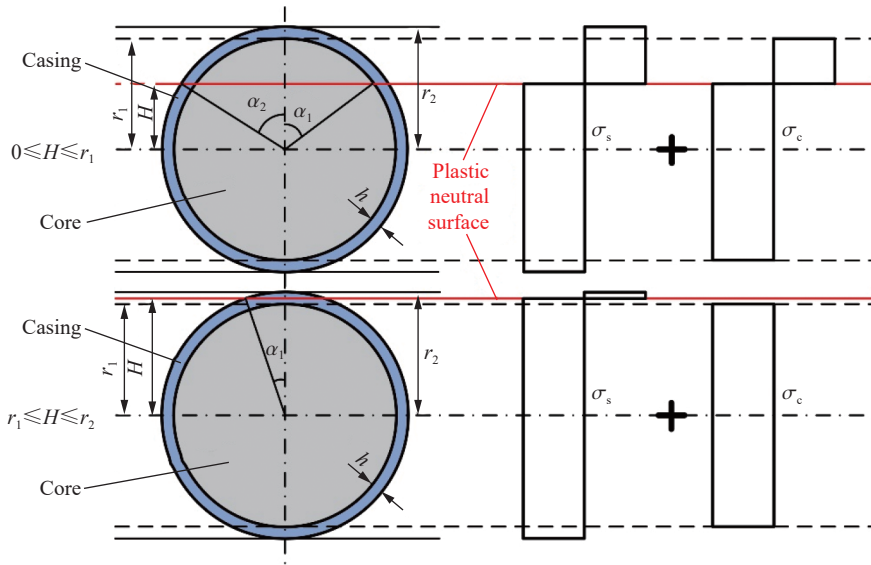


图 2 不同塑性中面下电池截面的应力分布

Fig. 2 Stress distribution along the cross-section of the battery with the plastic neutral surface at various locations

作用在电池截面塑性中面上的弯矩 M 和轴力 N 分别为:

$$M = \sigma_c A_{M1} D_{x1} + \sigma_s A_{M2} D_{x2}, \quad N = \sigma_c A_{N1} + \sigma_s A_{N2} \quad (2)$$

式中: $A_{M1} = \frac{r_1^2(2\alpha - \sin 2\alpha)}{2}$, $D_{x1} = \frac{8r_1 \sin^3 \alpha}{3(2\alpha - \sin 2\alpha)}$, $A_{M2} = \frac{r_2^2(2\alpha - \sin 2\alpha)}{2} - A_{M1}$, $D_{x2} = \frac{8(r_2^3 - r_1^3)\sin \alpha}{6\alpha(r_2^2 - r_1^2)}$, $A_{N1} = \pi r_1^2 - 2A_{M1}$, $A_{N2} = \pi(r_2^2 - r_1^2) - 2A_{M2}$, α 为塑性中面对应的圆心角。令 $\sigma_s = k_1\sigma_c$, $r_2 = k_2r_1$, 可得无量纲弯矩 M^* 和无量纲轴力 N^* 分别为:

$$M^* = \frac{M}{M_0} = \frac{2\alpha \sin^3 \alpha + c_1(2\alpha - \sin 2\alpha)\sin \alpha}{2(c_1 + 1)\alpha}, \quad N^* = \frac{N}{N_0} = \frac{\pi - 2\alpha + \sin 2\alpha}{\pi} \quad (3)$$

式中: $c_1 = k_1(k_2^3 - 1)$, k_1 为材料的抗拉性能参数; k_2 为材料的尺寸参数。参数 c_1 确定后, 通过拟合可建立夹层梁模型的塑性屈服准则。

1.2 大变形下电池运动方程建立

受几何和物理非线性的影响, 大变形下电池运动过程中的轴力随挠度变化, 因此, 本文中首先基于小变形假设建立运动方程。电池受到瞬态动载的变形过程分为 2 个阶段: 第一阶段 2 个塑性铰从两端向中点移动; 第二阶段塑性铰在电池中点驻定, 电池继续向下变形直到动能全部耗散^[13]。

第一阶段电池的速度场为:

$$v = \begin{cases} \dot{w} \frac{x}{\xi} & 0 \leq x \leq \xi \\ \dot{w} & \xi < x \leq L \end{cases} \quad (4)$$

式中: w 为某一时刻电池中点的挠度, 即最大挠度; $(\cdot) = d()/dt$; 坐标原点设置为电池在轴向的中点处, x 为电池上一点到坐标原点的轴向距离; ξ 为塑性铰到电池端点的距离。由于电池整体初始速度为 v_0 , 因此第一阶段中 $\dot{w} = v_0$, 平衡方程列写为:

$$\frac{d}{dt} \left[\bar{m}(L-\xi) \left(\xi + \frac{L-\xi}{2} \right) v + \int_0^\xi \bar{m}v x dx \right] = -2M_0 \quad (5)$$

式中: \bar{m} 为单位长度电池的质量, 即 $\bar{m} = m/(2L)$ 。联立式 (4)~(5), 第一阶段的运动方程为:

$$v = \dot{\xi} = \frac{6M_0}{v_0 \bar{m} \xi} \quad (6)$$

当塑性铰到达中点时运动第一阶段结束, 结束时间为 $t_1 = \bar{m}v_0 L^2 / (12M_0)$, 此时电池中点的位移为:

$$w_1 = v_0 t_1 = \frac{\bar{m}v_0^2 L^2}{12M_0} \quad (7)$$

第二阶段电池的速度场为 $v = x\dot{w}/L$, 由位移场列写平衡方程:

$$\frac{d}{dt} \int_0^L \bar{m}v x dx = -2M_0 \quad (8)$$

因此, 第二阶段的运动方程为:

$$\dot{w} = -\frac{6M_0}{\bar{m}L^2} \quad (9)$$

式中: \dot{w} 为电池中点的加速度。求解微分方程 (9) 并利用连续性条件可以得到电池中点位移随时间的变化关系, 第二阶段将在电池中点速度变为零时结束, 因此变形结束时间为 $t_2 = \bar{m}v_0 L^2 / (4M_0)$, 中点变形为:

$$w_2 = \frac{\bar{m}v_0^2 L^2}{12M_0} \quad (10)$$

对于大变形问题, 引入表征轴力贡献率的膜力因子 f_n , 将 M_0 替换为 $f_n M_0$, 从而将结构中的轴力效应纳入考虑。定义无量纲位移 $\bar{w}_i = w_i / r_1$, $i=1, 2$, 无量纲时间 $\bar{t} = \frac{4f_n M_0 t}{\bar{m}v_0 L^2}$, 则电池无量纲位移响应的时间历程为:

$$\bar{w} = \begin{cases} \frac{\bar{m}v_0^2 L^2}{4r_1 f_n M_0} \bar{t} & 0 \leq \bar{t} \leq \frac{1}{3} \\ -\frac{3\bar{m}v_0^2 L^2}{16r_1 f_n M_0} \bar{t}^2 + \frac{3\bar{m}v_0^2 L^2}{8r_1 f_n M_0} \bar{t} - \frac{\bar{m}v_0^2 L^2}{48r_1 f_n M_0} & \frac{1}{3} < \bar{t} \leq 1 \end{cases} \quad (11)$$

无量纲最大挠度为:

$$\bar{w} = \bar{w}_1 + \bar{w}_2 = \frac{w_1}{r_1} + \frac{w_2}{r_1} = \frac{\bar{m}v_0^2 L^2}{6r_1 f_n M_0} \quad (12)$$

2 模型求解及可靠性验证

根据电池内芯和外壳的抗拉性能参数和尺寸参数确定了夹层梁模型对应的膜力因子, 进一步实现

了冲击载荷下圆柱形锂离子电池动态响应的理论求解。此外, 为验证理论模型的可靠性, 利用非线性有限元方法对径向冲击下电池的动态响应进行了数值模拟。

2.1 电池力学性能的试验研究

圆柱形锂离子电池由内芯和外壳组成, 内芯为层级结构, 由正负极金属箔、活性物质涂层、隔膜、电解质和钢芯组成, 如图 3(a) 所示。研究表明, 层间的摩擦滑移和间隙对内芯整体的力学性能影响可以忽略, 因此, 可将内芯进行均值化处理^[3], 图 3(b) 给出了电池的组成结构图。在两端完全固定约束下的变形过程中, 电池结构的受力以拉伸为主, 因此, 需要获得电池内芯和外壳在轴向拉应力作用下的屈服强度, 从而确定电池的动态屈服准则, 并为有限元模型提供相应的材料力学性能参数。

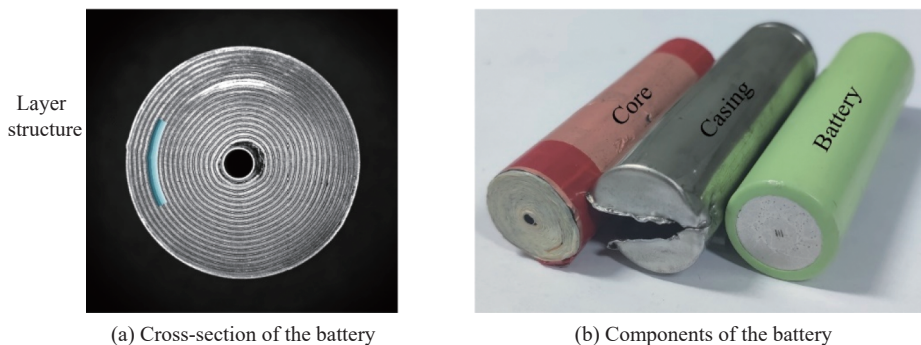


图 3 电池的结构

Fig. 3 Structure of the battery

采用准静态轴向拉伸试验对电池外壳的力学性能进行测定, 以额定容量为 2 900 mA·h 的 NCR18650PF 型锂离子电池为研究对象, 将电池放电至 0% SOC 从而避免热失控发生。电池整体质量为 48 g, 将端帽移除, 并将外壳纵向切割, 测得外壳厚度为 0.25 mm, 内芯半径为 8.75 mm。将展平后的金属外壳切割为狗骨试件, 由于电池尺寸限制, 试件长度为 60 mm。试件置于台式单轴试验机 (LABSANS LD24) 上以 0.5 mm/min 的加载速度进行拉伸, 采用数字图像相关技术 (digital image correlation, DIC) 测量虚拟引伸计应变, 如图 4(a) 所示。图 5(a) 为电池外壳的应力应变曲线, 对于无明显屈服现象的金属材料以产生 0.2% 残余变形的应力值作为屈服强度, 因此外壳在轴向拉伸下的屈服强度 σ_s 为 235 MPa。由于内芯的卷绕结构使其在整体轴向拉伸实验中存在层间滑动等问题, 因此, 采用文献 [19] 中电池在轴向载荷下的力-位移关系确定其屈服强度 σ_c 约为 21.8 MPa。

电池内芯的力学性能具有显著的各向异性和拉压不对称性, 为获取有限元模型中的材料本构关系, 对内芯进行径向平板压缩试验。采用电子万能试验机 (SANS) 的平面压盘以 0.5 mm/min 的速度压缩, 并利用 DIC 测量压头位移, 如图 4(b) 所示, 多次试验以获得准确的力和位移关系。根据文献 [3], 电池内芯的平均应力 σ_{av} 和平均应变 ε_{av} 的表达式分别为:

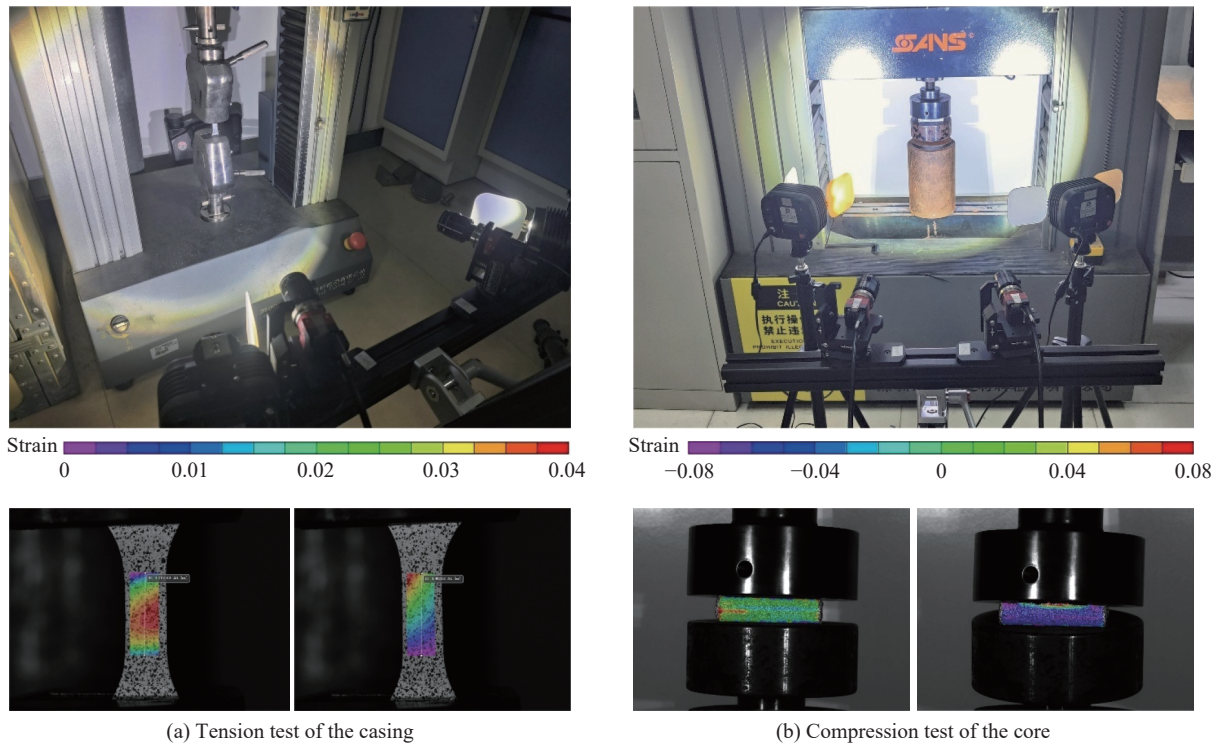
$$\sigma_{av} = \frac{F}{\pi l_0 L}, \quad \varepsilon_{av} = \frac{l_0}{2r_1} \quad (13)$$

式中: F 为施加在电池内芯上的力; l_0 为平板的挤压距离。由于电池内芯中的电解液对内芯的径向压缩力学性能没有显著影响^[5], 因此, 允许采用干制试样获取内芯的力学性能, 图 5(b) 给出了内芯的应力-应变曲线。

根据电池的抗拉性能参数和尺寸参数获得参数 c_1 , 将 c_1 代入式 (5), 拟合式 (5) 和 (6) 可得到电池夹层梁模型的轴力-弯矩塑性屈服准则为:

$$M^* = -0.8N^{*2} - 0.2N^* + 1 \quad (14)$$

图 6 给出了对应的塑性屈服面, 当梁截面内的轴力和弯矩位于屈服面上时, 该截面达到塑性流动状态^[20]。



(a) Tension test of the casing

(b) Compression test of the core

图 4 电池外壳的拉伸和内芯的压缩试验

Fig. 4 Tension test of the casing and compression test of the inner core for the battery

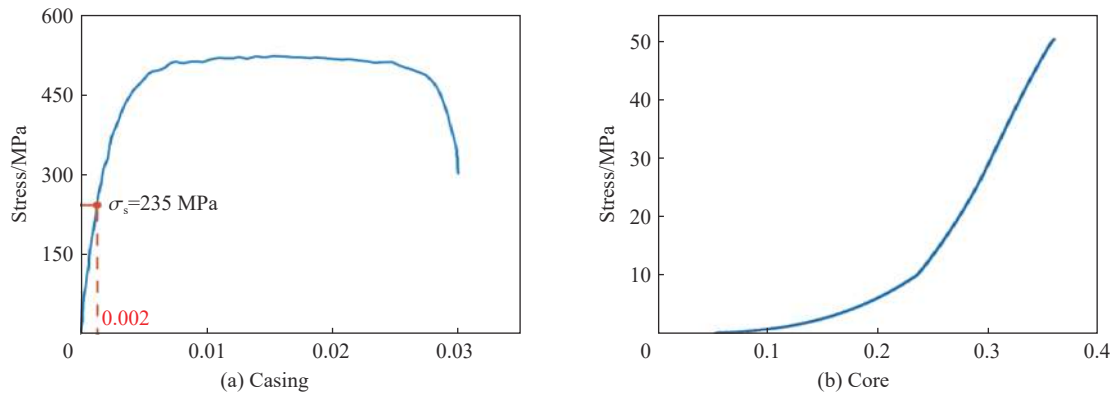


图 5 电池内芯和外壳的应力应变曲线

Fig. 5 Stress-strain curves for core and casing of the battery

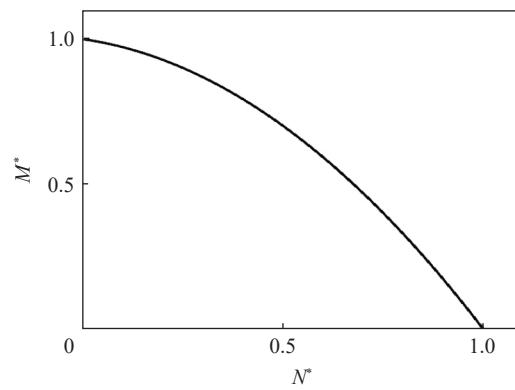


图 6 电池夹层梁模型的轴力-弯矩屈服面

Fig. 6 Axial force-moment yield surface for the sandwich beam model of the battery

2.2 膜力因子的定义

根据已有的梁模型的变形协调关系^[12]以及关联流动法则中的 Drucker 公设, 电池中点处的挠度为:

$$w = \frac{\dot{\varepsilon}}{\dot{\kappa}} = -\frac{dM}{dN} = \frac{2M_0(1.6N + 0.2N_0)}{N_0^2} \quad (15)$$

式中: $\dot{\kappa}$ 为曲率变化率, $\dot{\varepsilon}$ 为拉伸应变率。将式 (1) 和 (14) 代入式 (15), 得到无量纲轴力与无量纲位移的关系为:

$$N^* = \frac{5}{16c_2}\bar{w} - \frac{1}{8} \quad c_2 = \frac{4[1 + k_1(k_2^3 - 1)]}{3\pi[1 + k_1(k_2^2 - 1)]} \quad (16)$$

电池在纯弯矩作用下的能量耗散率 J_m 为:

$$J_m = 2M_0\dot{\kappa} \quad (17)$$

电池在弯矩和轴力共同作用下的能量耗散率 J_{mn} 为:

$$J_{mn} = 2M\dot{\kappa} + N\dot{\varepsilon} = 2M_0\dot{\kappa} \left(M^* + N^* \frac{N_0\dot{\varepsilon}}{2M_0\dot{\kappa}} \right) \quad (18)$$

综合式 (1)、(14)、(16) 和 (18), 进一步推导可得:

$$J_{mn} = \begin{cases} J_m(0.8N^{*2} + 1) & 0 < \bar{w} < 3.6c_2 \\ J_m(1.6N^{*2} + 0.2) & \bar{w} \geq 3.6c_2 \end{cases} \quad (19)$$

从能量耗散的角度来看, 考虑大挠度引起的轴力贡献, 相当于将电池视为塑性弯矩随挠度变化的梁, 因此, 膜力因子被定义为:

$$f_n = J_{mn}/J_m \quad (20)$$

将式 (16) 和 (19) 代入式 (20), 可得:

$$f_n = \begin{cases} \frac{5}{64c_2^2}\bar{w}^2 - \frac{1}{16c_2}\bar{w} + \frac{81}{80} & 0 < \bar{w} < 3.6c_2 \\ \frac{1}{2c_2}\bar{w} & \bar{w} \geq 3.6c_2 \end{cases} \quad (21)$$

将求解后的膜力因子代入动态响应预测公式, 即可通过理论模型获得圆柱形锂离子电池在冲击载荷作用下的动态响应。

2.3 有限元模型

利用有限元软件 ABAQUS, 对径向冲击载荷下圆柱形锂离子电池的动态响应开展数值研究。为提高仿真效率, 将电池的实际结构简化为内芯和外壳, 与理论模型一致, 如图 7(a) 所示。电池内芯和外壳均采用三维实体单元 (C3D8R): 外壳网格尺寸为 0.5 mm, 采用各向同性弹塑性材料模型; 内芯网格尺寸为 1 mm, 为更好地描述弯曲下电池的力学行为, 采用各向异性的材料模型, 径向上电池可视为各向同性^[21]。弹性阶段, 其应力-应变的本构关系为:

$$\begin{pmatrix} \varepsilon_{11} \\ \varepsilon_{22} \\ \varepsilon_{33} \\ \gamma_{12} \\ \gamma_{23} \\ \gamma_{31} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \frac{1}{E_r} & -\frac{\mu_r}{E_r} & -\frac{\mu_{ar}}{E_a} & 0 & 0 & 0 \\ -\frac{\mu_r}{E_r} & \frac{1}{E_r} & -\frac{\mu_{ar}}{E_a} & 0 & 0 & 0 \\ -\frac{\mu_{ra}}{E_r} & -\frac{\mu_{ra}}{E_r} & \frac{1}{E_a} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \frac{1}{G_r} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{1}{G_a} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{1}{G_a} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \sigma_{11} \\ \sigma_{22} \\ \sigma_{33} \\ \tau_{12} \\ \tau_{23} \\ \tau_{31} \end{pmatrix} \quad (22)$$

式中: r 代表径向, a 代表轴向, E 为杨氏模量, G 为剪切模量, μ 为泊松比; 此外, $\mu_{ar}/E_a = \mu_{ra}/E_r$, $G_r = E_r/[2(1+\mu_r)]$ 。采用如下硬化函数^[22]描述电池内芯在高速加载下塑性阶段的应力-应变关系:

$$\sigma = (1.8 + 7960\varepsilon_p^{4.5})(1 + 0.009 \ln \dot{\varepsilon}_p^*) \quad (23)$$

式中: σ 的单位为? ; ε_p 为塑性应变; $\dot{\varepsilon}_p^* = \dot{\varepsilon}_p/\dot{\varepsilon}_{p0}$, $\dot{\varepsilon}_{p0} = 1 \text{ s}^{-1}$ 为参考应变率。此外, 采用 Hill'48 各向异性屈服准则描述内芯的屈服特性, 屈服情况为^[22]:

$$\sigma_{\text{Hill}} = \sqrt{(\sigma_2 - \sigma_3)^2 + (\sigma_3 - \sigma_1)^2 + 12.5(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + 6\sigma_{23}^2 + 6\sigma_{31}^2 + 2\sigma_{12}^2} \quad (24)$$

式中: σ_1 、 σ_2 、 σ_3 、 σ_{12} 、 σ_{23} 和 σ_{31} 为不同方向的应力分量。

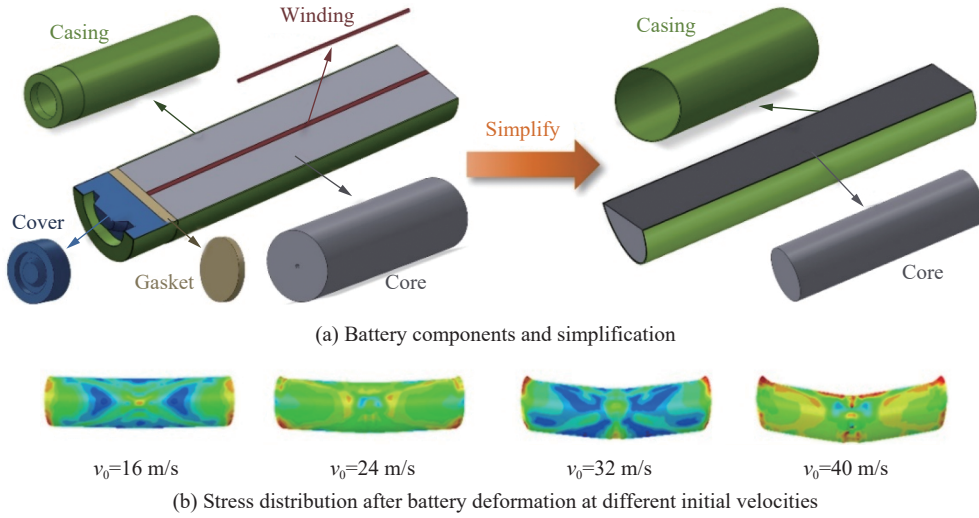


图 7 有限元建模及模拟结果

Fig. 7 Finite element modeling and simulated results

根据电池外壳拉伸、内芯压缩试验数据和文献 [6-7, 21-22], 获得了材料力学性能的相关参数, 见表 1。为了简化理想的界面粘接, 将内芯和外壳的接触方式设置为绑定约束。采用显式动力学分析了电池在大变形下的力学行为, 将电池两端设置为完全固定约束, 为整个电池创建大小为 v_0 的预定义速度场。不同初始速度下, 电池变形后的应力分布如图 7(b) 所示, 可以看出, 初始速度越高, 电池越容易在中间处产生应力集中。因此, 高速冲击下, 电池发生大变形容易造成局部断裂, 有必要进行动态安全设计从而提高电池的耐撞性。

表 1 有限元模型材料参数

Table 1 Material parameters of the finite element model

构件	厚度/mm	密度/($\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$)	杨氏模量	剪切模量	屈服强度/MPa	泊松比
内芯	8.75	2090	$E_r = 0.5 \text{ GPa}$ $E_a = 1.5 \text{ GPa}$ ^[22]	$G_r = 0.217 \text{ GPa}$ ^[21] $G_a = 0.3 \text{ GPa}$ ^[21]		$\mu_r = 0.15$ ^[16] $\mu_{ra} = 0.1$ ^[21] $\mu_{ar} = 0.3$ ^[21]
外壳	0.25	7850	160 GPa		235	0.3 ^[7]

3 动态响应特性分析

3.1 模型的可靠性验证

为验证本文中在大变形下电池动态响应求解理论模型的可靠性, 采用以上有限元模型结果和对应参数下理论模型的动态响应结果进行对比。研究对象仍为同种型号锂离子电池, 质量为 48 g, 抗拉性能参

数 $k_1 = \sigma_s/\sigma_c = 10.78$, 尺寸参数 $k_2 = r_2/r_1 = 1.03$, 起始时刻电池整体获得初速度 v_0 。

图 8 给出了理论结果和有限元结果的最大挠度及 10 m/s 初始速度下电池中点处的无量纲位移和无量纲速度, 对比发现, 该理论模型对大变形下电池最大挠度的预测结果精确度较高, 此外, 位移和速度的时程曲线在电池变形的两个阶段均与有限元结果吻合良好。理论结果略高于有限元结果, 这是因为理论模型中没有考虑材料的弹性效应, 并且忽略了惯性和材料应变硬化的影响, 这导致结构吸收能量的速率比实际低。

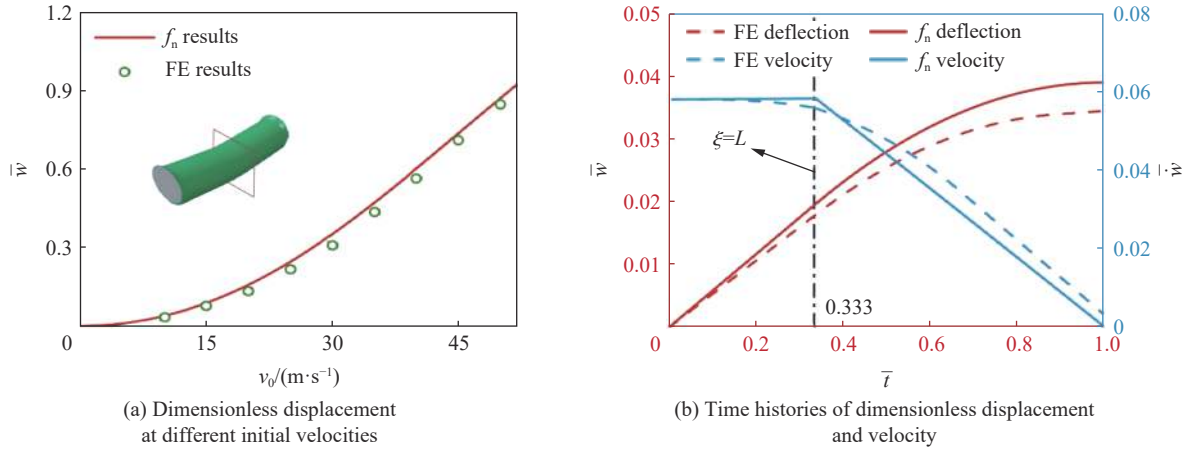


图 8 理论计算结果和有限元模拟结果的对比

Fig. 8 Comparison of theoretical and finite element results

实际中, 锂离子电池 SOC 越高, 阳极插入的锂离子越多, 导致结构刚度越高^[2], 从而使电池实际的最大挠度小于该理论结果; 另一方面, 考虑到电解质的影响, 电池刚度随应变率的升高而提高^[8]。尽管如此, 在工程中应用本文理论方法对冲击载荷下电池的动态响应进行预测仍然具有安全性和高效性。

3.2 初始速度的影响

由于冲击动能主导着结构的承载能力^[14], 而冲击动能大小可以通过改变初始速度来调整, 因此, 利用理论模型探究不同冲击速度下圆柱形锂离子电池的动态响应特性, 对提高电池的动态安全性能具有重要意义, 理论研究中仍以 NCR18650PF 型号锂离子电池为研究对象。

图 9 给出了不同初始速度下电池位移响应和时间响应的变化趋势。低速冲击下动态响应曲线基本重合, 这是因为较低初始速度下电池变形程度小, 此时弯矩主导电池结构变形, 几何非线性的影响可以

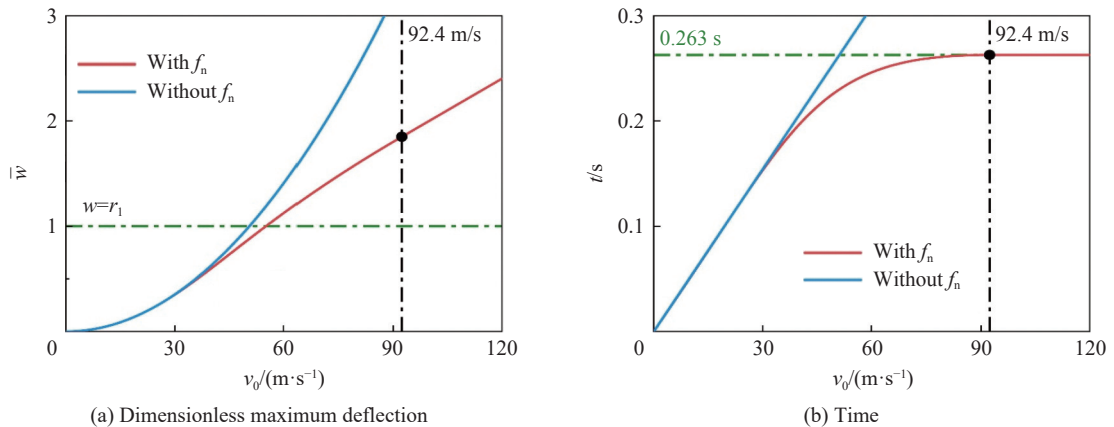


图 9 初始速度对电池动态响应的影响

Fig. 9 Effect of initial velocity on the dynamic responses of the battery

忽略; 高速冲击下, 电池发生大变形, 其挠度甚至大于内芯半径, 和利用膜力因子获得的位移响应和时间响应相比, 不考虑轴力效应的响应结果大很多, 这是因为大变形下电池轴力接近完全塑性轴力, 弯矩接近于零。因此, 高速冲击下轴力参与承载能够大幅度提高电池结构的吸能效率。无量纲位移在临界速度(92.4 m/s)处由指数上升变为线性上升, 这和电池夹层梁结构的塑性屈服准则相关, 曲线整体近似呈线性增长, 因此, 在高速碰撞安全的工程设计中, 电池无量纲最大挠度随冲击速度的变化可以近似表示为:

$$\bar{w} = 0.02v_0 \quad (25)$$

由图 9(b) 可以发现, 初速度足够低时, 响应时间近似线性增加, 而在高速冲击下, 响应时间几乎与初始速度的大小无关, 也就是说, 响应时间在冲击速度达到 92.4 m/s 后出现饱和现象。因此, 无论初始速度如何提高, 电池变形时间不会超过 0.263 ms, 而对于电动汽车电池管理系统来说, 如此短的动作时间具有挑战性。

3.3 电池参数的影响

图 10(a) 给出了不同初始速度下电池无量纲最大挠度随质量的变化趋势。相同初始冲击速度, 在电池尺寸和力学性能不变的条件下, 电池的位移响应随质量增加而增大。原因是质量越大, 初始的冲击动能越大, 需要更大程度的变形将初始动能完全耗散; 此外, 初始速度越高, 电池质量对变形程度的影响越明显, 可以推测其最大挠度不仅和初始动能相关, 还和冲量相关。因此, 高速冲击下在合适范围内调整电池质量以减小变形程度具有可行性。

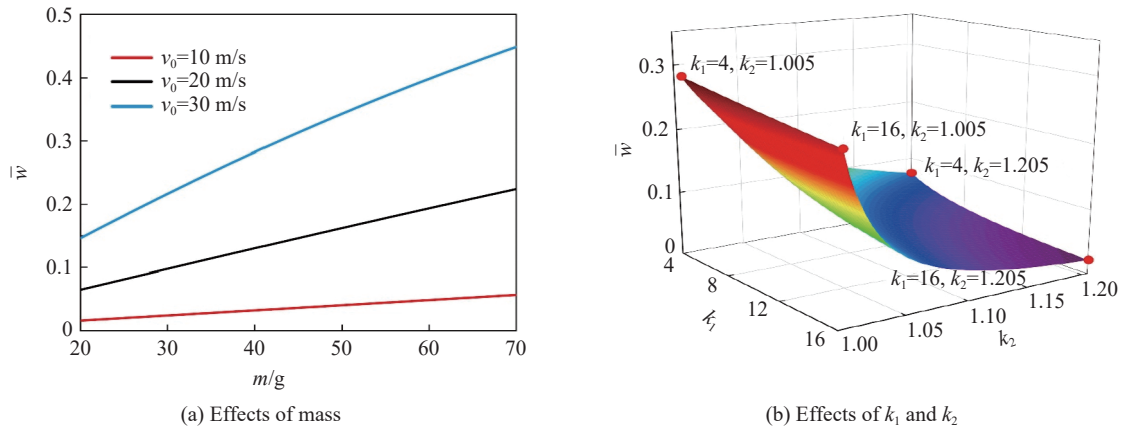


图 10 电池质量 m 和参数 k_1 和 k_2 对无量纲最大挠度的影响

Fig. 10 Effects of mass and parameters k_1 and k_2 of the battery on dimensionless maximum deflection

图 10(b) 为抗拉性能参数 k_1 和尺寸参数 k_2 对电池无量纲最大挠度的影响。初始速度为 20 m/s, 在电池内芯的拉伸屈服强度为 21.8 MPa, 半径为 8.75 mm 的条件下进行讨论。不难发现, 电池的无量纲最大挠度随着外壳和内芯屈服强度之比减小而增大, 随着外壳厚度的增大而减小; 和改变材料屈服强度相比, 电池外壳厚度的微小改变对最终变形的影响更大, 这是因为外壳屈服强度远高于内芯, 进一步强化外壳强度对保护电池结构作用较小。此外, 由式 (3) 和 (21) 可知, 参数 k_1 的变化对动态屈服准则和膜力因子 f_n 的影响更大, 这种特性在电池结构的安全设计中具有参考价值。参数 k_1 越大, 曲面的陡度越大, 参数 k_2 对电池最大挠度的影响越大; 参数 k_2 越大, 曲面的陡度也越大, 参数 k_1 对电池最大挠度的影响也越大。此外, 电池最大位移在 k_1 和 k_2 较小时对 k_1 和 k_2 的变化更为敏感, 因此, 无限制地提高外壳材料的屈服强度和厚度来减小变形程度不具有实用性。

4 结 论

基于膜力因子法研究了圆柱形锂离子电池的动态响应特性, 得到如下结论:

(1) 冲击载荷下圆柱形锂离子电池动态响应的理论结果和有限元结果在位移响应和速度响应上均具有高度一致性, 本研究建立的理论模型可准确预测大变形下电池的力学行为。此外, 冲击过程中的两个阶段能够完整描述电池结构的变形机制。

(2) 低速冲击下弯矩主导电池的变形, 轴力效应对动态响应的影响不大, 初始速度越高, 结构的轴力效应对电池动态响应的影响越大。在电池安全性设计中, 无量纲位移和初始速度的关系可以近似表示为 $\bar{w} = 0.02v_0$, 饱和响应时间为 0.263 ms。

(3) 电池尺寸和力学性能不变, 电池的变形量随质量增加而增大, 且在较高初始速度下质量增加引起的变形增大更明显。电池的最大挠度随外壳和内芯屈服强度之比减小而增大, 电池外壳越薄, 屈服强度的影响越显著; 随着外壳厚度的增大而减小, 屈服强度比越大, 外壳厚度影响越显著。电池最大挠度在抗拉性能参数 k_1 和尺寸参数 k_2 较小时对二者更敏感。

参考文献:

- [1] HUANG Z X, ZHANG X C, Liu N N, et al. Failure mechanisms and acoustic responses of cylindrical lithium-ion batteries under compression loadings [J]. *Engineering Failure Analysis*, 2024, 163: 108594. DOI: 10.1016/j.engfailanal.2024.108594.
- [2] XU J, LIU B H, HU D Y. State of charge dependent mechanical integrity behavior of 18650 lithium-ion batteries [J]. *Scientific Reports*, 2016, 6: 21829. DOI: 10.1038/srep21829.
- [3] WANG W W, YANG S, LIN C. Clay-like mechanical properties for the jellyroll of cylindrical lithium-ion cells [J]. *Applied Energy*, 2017, 196: 249–258. DOI: 10.1016/j.apenergy.2017.01.062.
- [4] SAHRAEI E, CAMPBELL J, WIERZBICKI T. Modeling and short circuit detection of 18650 Li-ion cells under mechanical abuse conditions [J]. *Journal of Power Sources*, 2012, 220: 360–372. DOI: 10.1016/j.jpowsour.2012.07.057.
- [5] GILAKI M, AVDEEV I. Impact modeling of cylindrical lithium-ion battery cells: a heterogeneous approach [J]. *Journal of Power Sources*, 2016, 328: 443–451. DOI: 10.1016/j.jpowsour.2016.08.034.
- [6] ZHANG H J, ZHOU M Z, Hu L L, et al. Mechanism of the dynamic behaviors and failure analysis of lithium-ion batteries under crushing based on stress wave theory [J]. *Engineering Failure Analysis*, 2020, 108: 104290. DOI: 10.1016/j.engfailanal.2019.104290.
- [7] ZHANG X C, ZHANG T, LIU N N, et al. Dynamic crushing behaviors and failure of cylindrical lithium-ion batteries subjected to impact loading [J]. *Engineering Failure Analysis*, 2023, 154: 107653. DOI: 10.1016/j.engfailanal.2023.107653.
- [8] ZHU J E, LUO H L, LI W, et al. Mechanism of strengthening of battery resistance under dynamic loading [J]. *International Journal of Impact Engineering*, 2019, 131: 78–84. DOI: 10.1016/j.ijimpeng.2019.05.003.
- [9] WANG L B, LI J P, CHEN J Y, et al. Revealing the internal short circuit mechanisms in lithium-ion batteries upon dynamic loading based on multiphysics simulation [J]. *Applied Energy*, 2023, 351: 121790. DOI: 10.1016/j.apenergy.2023.121790.
- [10] ZHOU D, LI H G, LI Z H, et al. Toward the performance evolution of lithium-ion battery upon impact loading [J]. *Electrochimica Acta*, 2022, 432: 141192. DOI: 10.1016/j.electacta.2022.141192.
- [11] 陈发良, 余同希. 正多边形板的塑性动力响应: 小挠度分析和大挠度分析 [J]. *爆炸与冲击*, 1991, 11(2): 106–116. DOI: 10.11883/1001-1455(1991)02-0106-11.
CHEN F L, YU T X. Dynamic plastic response of regular polygonal plates [J]. *Explosion and Shock Waves*, 1991, 11(2): 106–116. DOI: 10.11883/1001-1455(1991)02-0106-11.
- [12] CHEN F L, YU T X. Analysis of large deflection dynamic response of rigid-plastic beams [J]. *Journal of Engineering Mechanics*, 1993, 119(6): 1293–1301. DOI: 10.1061/(ASCE)0733-9399(1993)119:6(1293).
- [13] QIN Q H, WANG T J. A theoretical analysis of the dynamic response of metallic sandwich beam under impulsive loading [J]. *European Journal of Mechanics-A/Solids*, 2009, 28(5): 1014–1025. DOI: 10.1016/j.euromechsol.2009.04.002.
- [14] XIANG C P, QIN Q H, WANG M S, et al. Low-velocity impact response of sandwich beams with a metal foam core: Experimental and theoretical investigations [J]. *International Journal of Impact Engineering*, 2019, 130: 172–183. DOI: 10.1016/j.ijimpeng.2019.04.014.
- [15] 湛勇, 唐平, 汪玉, 等. 刚塑性圆板受水下爆炸载荷时的动力响应 [J]. *爆炸与冲击*, 2005, 25(1): 90–96. DOI: 10.11883/1001-1455(2005)01-0090-07.

- CHEN Y, TANG P, WANG Y, et al. Dynamic response analysis of rigid-plastic circular plate under underwater blast loading [J]. *Explosion and Shock Waves*, 2005, 25(1): 90–96. DOI: 10.11883/1001-1455(2005)01-0090-07.
- [16] 张新春, 王俊瑜, 汪玉林, 等. 基于膜力因子法的方形锂离子电池冲击动力响应研究 [J]. *应用数学和力学*, 2022, 43(11): 1203–1213. DOI: 10.21656/1000-0887.430289.
- ZHANG X C, WANG J Y, WANG Y L, et al. Impact responses of prismatic lithium-ion battery based on the membrane factor method [J]. *Applied Mathematics and Mechanics*, 2022, 43(11): 1203–1213. DOI: 10.21656/1000-0887.430289.
- [17] ZHANG X C, HUANG Z X, WANG Y L, et al. Dynamic responses of cylindrical lithium-ion battery under localized impact loading [J]. *Mechanics of Advanced Materials and Structures*, 2024. DOI: 10.1080/15376494.2024.2359648.
- [18] YU T X, STRONGE W J. Large deflections of a rigid-plastic beam-on-foundation from impact [J]. *International Journal of Impact Engineering*, 1990, 9(1): 115–126. DOI: 10.1016/0734-743X(90)90025-Q.
- [19] XIA Y, WIERZBICKI T, SAHRAEI E, et al. Damage of cells and battery packs due to ground impact [J]. *Journal of Power Sources*, 2014, 267: 78–97. DOI: 10.1016/j.jpowsour.2014.05.078.
- [20] JIANG W Z, LIU Y, WANG B. Dynamic responses of metal sandwich beams under high velocity impact considering time inhomogeneity of core deformation [J]. *International Journal of Impact Engineering*, 2017, 110: 311–323. DOI: 10.1016/j.ijimpeng.2017.05.010.
- [21] XU J, LIU B H, WANG X Y, et al. Computational model of 18650 lithium-ion battery with coupled strain rate and SOC dependencies [J]. *Applied Energy*, 2016, 172: 180–189. DOI: 10.1016/j.apenergy.2016.03.108.
- [22] WANG L B, CHEN J Y, LI J P, et al. A novel anisotropic model for multi-stage failure threshold of lithium-ion battery subjected to impact loading [J]. *International Journal of Mechanical Sciences*, 2022, 236: 107757. DOI: 10.1016/j.ijmecsci.2022.107757.

(责任编辑 张凌云)