

doi: 10.19562/j.chinasae.qcgc.2024.07.003

# 软包锂离子电池用铝塑膜成形性能研究

邓道林

(宁德新能源科技有限公司研究院, 宁德 352000)

**[摘要]** 为保证软包锂离子电池用铝塑膜封装的可靠性,须严格控制成形后的铝层厚度,而其获得依赖大量的实物试验,导致前期设计优化和后期生产过程质量监控均须耗费高额成本。本文采用实物试验和仿真模拟相结合的方法,构建能精准表征铝塑膜力学性能的本构方程,并提出基于整体铝塑膜厚度对铝层厚度的预测方法,实现成形后铝塑膜和铝层厚度的精准预测。同时,基于仿真DOE,筛选关键影响因子,构建响应曲面模型,实现不同产品的快速预测及最佳参数匹配设计,也为生产实时质量监控提供解决方案。研究表明,多层复合铝塑膜在塑性阶段表现出了明显的各向异性,3参数Barlat-Lian本构模型,可较好表征铝塑膜的各向异性性能,明显优于单一方向弹塑性模型,可实现铝塑膜成形性能的精准预测。所构建的响应曲面模型可替代精细化有限元模型,实现对铝塑膜和铝层厚度精准预测和参数优化,误差小于5%,工艺参数优化后冲压成形铝层厚度可提升10%~20%。集成开发的应用APP可满足冲压工艺参数的快速设计评估、优化及成形质量实时监控等应用需求。

**关键词:** 锂电池; 铝塑膜; 冲压成形; 各向异性; 响应曲面; 预测及优化

## Study on Forming Performance of Aluminum-Plastic Film for Pouch Lithium-Ion Batteries

Deng Daolin

Research Institute, Ningde Ampere Technology Limited, Ningde 352000

**[Abstract]** To ensure the reliability of aluminum-plastic film encapsulation for lithium-ion batteries, strict control of the aluminum layer thickness after forming is necessary. However, obtaining the thickness relies heavily on physical experiments, resulting in high cost for both early design optimization and later production process quality monitoring. In this paper, a combination of physical experiments and simulation modeling is adopted to establish a constitutive equation that can well characterize the mechanical properties of the pouch during forming. Additionally, a prediction method for the aluminum layer thickness based on the overall aluminum-plastic film thickness is proposed, enabling precise prediction of the aluminum-plastic film and aluminum layer thickness after forming. Furthermore, based on simulation Design of Experiments (DOE), key influencing factors are screened to construct a response surface model, facilitating rapid prediction and optimal parameter matching design for different products, which also provides a solution for online monitoring of forming quality during production. The results show that the multi-layer composite aluminum-plastic film exhibits obvious anisotropy during the plastic stage. The 3-parameters Barlat-Lian constitutive model effectively represents the anisotropic properties of the film, and outperforms the single-directional elastic-plastic model, achieving accurate prediction of the aluminum-plastic film performance after forming. The constructed response surface model can replace the refined finite element model, and have excellent prediction accuracy for the thickness of the composite aluminum-plastic film and the aluminum layer, with an error less than 5%. By optimizing the process parameters, the formed thickness of the aluminum layer can be increased by 10%~20%. The integrated development application APP can meet the requirements for quick design evaluation,

原稿收到日期为2024年02月07日,修改稿收到日期为2024年03月23日。

通信作者:邓道林,中级工程师,工学硕士,E-mail:DengDL@atlbattery.com。

parameters optimization, and online monitoring of the forming quality.

**Keywords:** lithium-ion batteries; aluminum-plastic film; pouch forming; anisotropy; response surface; prediction and optimization

## 前言

近几年,新能源汽车的持续热销,带动整个新能源汽车产业链的高速发展。铝塑膜作为软包锂电池的主要包装材料,市场对其的需求也出现了激增。然而,软包锂电池使用的铝塑膜技术壁垒非常高,国内铝塑膜市场长期被日韩企业垄断,国产化率不足30%,是国产化率最低的锂电池材料之一<sup>[1-3]</sup>。同时,国产铝塑膜和进口产品有20%~30%的价格差异,国内电池厂商基于成本的管控需求,对国产铝塑膜的替代需求日益凸显。面对巨大的市场空间和价值诱惑,以及下游锂电池厂商对进口替代的迫切需求,国内各大企业先后布局锂电池软包铝塑膜产业<sup>[2]</sup>。

铝塑膜通常由铝箔、多种塑料和粘合剂组成。常见结构为尼龙层(PA)+粘合剂+铝层(AL)+粘合剂+内层热封层(PP)<sup>[1-5]</sup>。其中PA层主要为保护层,通过PA提升铝塑膜的强度和铝层的延展性,以提高抗外部载荷能力。AL层主要是起隔绝水汽和电解液的作用,为锂电池提供一个密闭环境。PP层为热封层,除了便于实现封装,提升延展性,还具备一定阻隔性,防止电解液中的腐蚀物质腐蚀铝层<sup>[5]</sup>。

当前国内软包电池用铝塑膜要突破日韩企业垄断,主要面临3个方面挑战。(1)阻隔性能差:用于软包锂电池封装后直接影响电池寿命及安全性。(2)延展性能差:成形后冲壳深度只能在5 mm左右,国外甚至达到12 mm。(3)耐电解液性能差:界面处理达不到耐腐蚀的要求造成电池的失效。铝塑膜的制备主要有干法和热法两种<sup>[4]</sup>。近年国内独创的干热复合法<sup>[6]</sup>,以及学者和产业界对铝塑膜的失效和应用研究认识的加深,为国内电池用铝塑膜产业突破困局提供了关键的助力。

对于铝塑膜封装工艺和封装可靠性技术研究,主要集中在如何提升封装后封印的强度。文献[7]~文献[11]的研究结果表明,不同封装温度、时间、压力等对不同铝塑膜厚度和材料封装强度的影响不同,并且表现出了不同的失效模式。王雪峰等<sup>[8]</sup>除了研究不同热封工艺对封装强度的影响外,还构建了工艺参数于封装强度的数学模型,用于封装工艺参数设计和评估。范洋等<sup>[12]</sup>还研究了电解液浸泡对

封装强度的影响。

对于铝塑膜的拉伸和断裂行为,普遍的研究结论和观点表明,在拉伸过程中,聚合物层的形变对夹层材料的拉伸性能非常重要。Andreasson等<sup>[13]</sup>研究了铝塑膜的微观断裂机制,发现铝层的断裂或破裂过程是先出现局部的分层,然后再出现铝层局部塑性形变和变薄,最后出现断裂。聚合物夹层之所以能大大提升铝的延展率,是因为复合粘接层避免了局部过大颈缩变形出现。Li等<sup>[14-15]</sup>研究了复合夹层粘接力对拉伸性能的影响,随着粘接力增强,铝塑膜的断裂应变不断增大,从百分之几增大到百分之几十。Zeng等<sup>[16]</sup>研究了单层膜(AL/PA/PP)、不同复合膜(PA-AL/PP-AL/PA-AL-PP)以及不同复合工艺对拉伸强度的影响。

在铝塑膜的冲压成形性能研究方面,主要集中在冲压工艺参数的影响分析及优化来提升成形能力。张鹏博等<sup>[2]</sup>基于物理试验和仿真手段对冲压模具和工艺参数进行优化,提升了冲压剩余厚度,并提出了一种离线测量铝层厚度的方法。关玉明等<sup>[17]</sup>和赵越等<sup>[18]</sup>通过设计一系列的仿真试验,分析了冲压成形的关键影响因子,并建立相应曲面模型进行相应参数的优化来提升成形的剩余厚度。曲杰等<sup>[19]</sup>通过试验和仿真结合,研究了成形过程中的开裂问题。陈伟等<sup>[1]</sup>还综述了铝箔的成分、微观组织和晶粒尺寸等对成形性能的影响。

以上关于铝塑膜成形的研究主要集中在如何提升极限冲压深度。而实际使用过程中常面临两个难点:一是当铝塑膜的种类、产品形状、冲压模具、工艺参数等变化时,极限坑深会发生变化,如何快速预测并优化设计工艺参数成为难点;二是量产过程、工艺参数会发生波动,如何监控成形后的局部减薄还能满足使用要求成为难点。对此业界还未看到比较好的解决方案,前者主要依赖实物试验,后者主要依靠抽检,对成形后铝塑膜进行切片,监控最小铝层厚度。

另外,为节约时间和试验成本,学者常借助商业有限元软件进行成形过程的仿真模拟来研究和优化其性能。常见的软件有Abaqus、Dyna和Deform等,都可以满足使用要求,该项技术在金属板料成形上已经得到广泛的应用。对于铝塑膜力学性能的表

征,多数研究采用简单弹塑性本构来表征其力学行为<sup>[2,17-19]</sup>,通过单向拉伸试验获得应力-应变曲线,作为仿真材料的输入,基于此,可以满足一定场景下的成形性能研究和优化提升,但是还无法实现较高精度的厚度预测,特别是当铝塑膜各个方向的拉伸性能有显著差异时,用单一方向的力学性能来预测成形厚度,误差较大,本研究中有做相应的对比分析。因此,找到一种可以准确表征铝塑膜各向异性力学行为的本构模型对成形厚度的精准预测至关重要。

本文选取当前软包锂电池主流应用的铝塑膜为例,构建能表征其各向异性力学行为的3参数Barlat-Lian本构模型,运用仿真模拟,实现成形后铝塑膜和铝层厚度的精准预测。同时基于仿真DOE,构建响应曲面模型来替代精细化有限元模型,实现不同产品的快速预测及最佳参数匹配设计,同时为生产过程中成形质量的在线实时监控提供解决方案。

## 1 试验方法

### 1.1 铝塑膜拉伸试验

铝塑膜拉伸性能试验方法参考GB/T1040.3-006《塑料拉伸性能的测定第3部分:薄膜和薄片的试验条件》,以日本株式会社DNP153(各层结构:PA\_27+AL\_40+PP\_80+Adhesive\_6)为例,试样形状和尺寸见图1和表1。

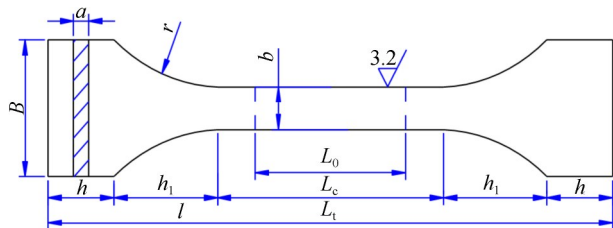


图1 试样形状及尺寸

表1 试样尺寸

a/ $\mu\text{m}$	b/mm	r/mm	$L_0$ /mm	$L_c$ /mm	$L_t$ /mm	B/mm	$h_1$ /mm	h/mm
153	15	25	50	90	160	30	20	15

由于铝塑膜用铝箔主要是轧制而成,并具有明显的方向性<sup>[20]</sup>。所以在裁剪试样时,分别选取 $0^\circ$ 、 $45^\circ$ 、 $90^\circ$  3个方向的试样,如图2所示,测试设备为岛津万能试验机,选用500 N传感器和楔形夹具,试样拉伸位移采用光学引伸计方式测量,每个方向采用5组平行样。

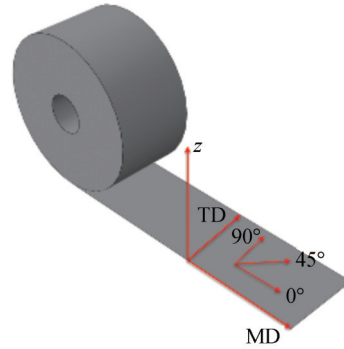


图2 试样裁切示意图

### 1.2 冲压成形试验

为保证成形后铝塑膜不出现影响包装及机械可靠性的损伤,常见的检测方式有暗室检测微观裂纹法、离线切片测量铝层厚度法<sup>[2]</sup>。由于复合铝塑膜,铝层最容易也最先出现失效。考虑到效率和生产实时监控操作便利性,实际生产应用过程中,通常会基于高温/高湿等可靠性试验给出最小铝层厚度规格作为管控要求,然后通过物理切片测量铝层厚度来监控质量。

本文主要研究铝塑膜成形性能,采用如图3所示模具结构,模具参数见表2,包括冲公(凸模)、卸料板、铝塑膜、凹模。分别进行不同冲压深度试验(5-9 mm),每组试验3组平行样品(图4)。成形后铝塑膜,对关键位置进行切片,并测量其关键角位A、B两点的铝塑膜整体厚度和铝层厚度。

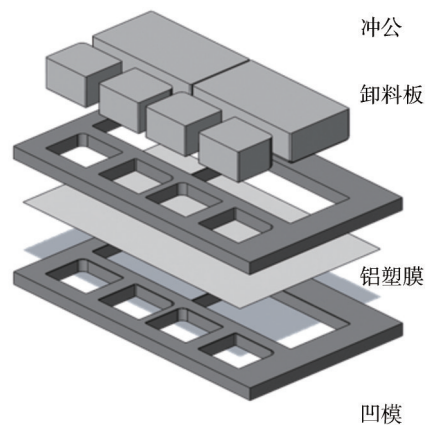


图3 关键模具结构示意图

表2 冲压成形模具关键尺寸

凸模	长度/mm	宽度/mm	顶边圆角/mm	侧边圆角/mm	顶边棱角/mm
	208.9	116.5	2	5	2
凹模	长度/mm	宽度/mm	圆角/mm	棱边圆角/mm	
	209.8	117.4	0.8	2.15	
配合参数	压力力/N		凹凸模间隙/mm		中间茎宽/mm
	70 000		0.45		0.4

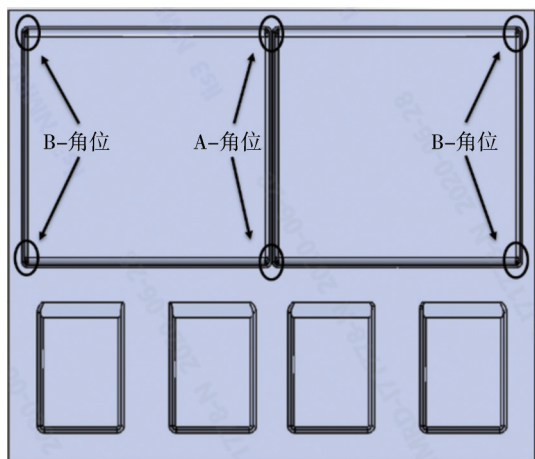


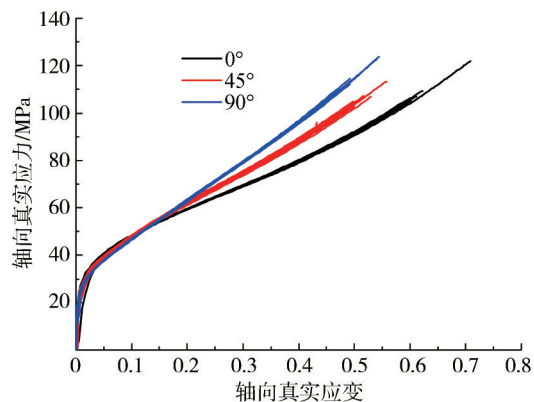
图4 冲压试样形状和位置示意图

## 2 试验结果与分析

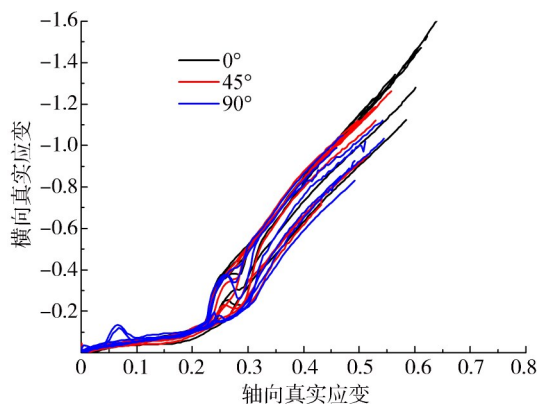
### 2.1 铝塑膜拉伸试验结果

根据1.1节所述试验方法,所得应力-应变曲线并转化为真实应力应变曲线见图5,具体参数见表3。图5(a)为拉伸轴向应力应变曲线,可见铝塑膜在弹性阶段,各方向性能差异不大,但进入塑性阶段后,逐步表现出了明显的各向异性。 $0^\circ$ 方向延展性最好(断裂应变均值0.68), $90^\circ$ 方向延展性最差(0.49), $45^\circ$ 方向居中,最大最小差值近20%,差异显著。3个方向材料的极限抗拉强度在 $0^\circ$ 方向最大,均值约为120 MPa, $90^\circ$ 方向最小(113 MPa)。根据观察发现,铝塑膜内铝层可见金属纹理方向且 $0^\circ$ 对应为纹理方向,分析 $0^\circ$ 应为铝箔轧制方向。所以,铝塑膜之所以呈现明显的塑性各向异性,与铝箔的制造工艺有较大相关性。而3个方向的抗拉强度差异较小,分析其原因为铝层经过与PA和PP合成后,其强度性能主要由PA占主导<sup>[16]</sup>,因而各方向表现出来的强度差异不大。当然,铝塑膜的拉伸性能及各方向性能的差异与其制备工艺、层间界面粘接等都有很大的关系<sup>[13-16]</sup>。

由图5(b)可见,横向应变与轴向应变比值即泊松比呈现双线性关系,前期接近铝箔的泊松比0.3,当轴向应变接近0.2时,泊松比快速增大。分析其原因为铝塑膜在拉伸变形时,当进入较大塑性时,边缘出现卷曲,导致测量不准确,且从结果可以看出同一方向试样的横向应变差异也较大。



(a) 轴向真实应力-应变曲线



(b) 轴向应变-横向应变曲线

图5 DNP153拉伸应力-应变曲线

表3 DNP153材料参数1

方向	$E/\text{MPa}$	$\nu$	抗拉强度/MPa	断裂应变
$0^\circ$	6 000	0.31	120.8	0.68
$45^\circ$			113.2	0.54
$90^\circ$			116.0	0.49

### 2.2 冲压成形试验结果

试验获取不同坑深情况下的铝塑膜整体厚度与铝层厚度,并将铝层厚度与整体厚度进行拟合,结果如图6所示。从图中可以看出,在其成形过程中铝塑膜的整体厚度与铝层厚度可以通过一个关系式来拟合( $R^2 > 0.95$ ),且呈较好的线性。分析其原因为对一个特定的位置,其受力变形的状态相对一致,在一定变形范围内,PA-AL-PP 3层均匀变形,各层的厚度减薄保持一个特定的比例进行。同时也反映在此范围内延展变形,各层界面良好,各层无局部颈缩和界面失效情况。

另外,角位A和角位B,由于成形时材料的流动

和变形的差异,其拟合关系不同。主要是由于不同位置受力状态不同,导致各层的减薄比例不同。

因此,对特定的铝塑膜和电池结构形状设计中,有整体铝塑膜的厚度后,基于上述拟合关系,即可获得铝层厚度。所以,只要能实现冲压成形后铝塑膜厚度的准确预测,就可以获得准确的铝层厚度。在后文所述的仿真对标和实际应用结果,也验证了此方法的有效性。

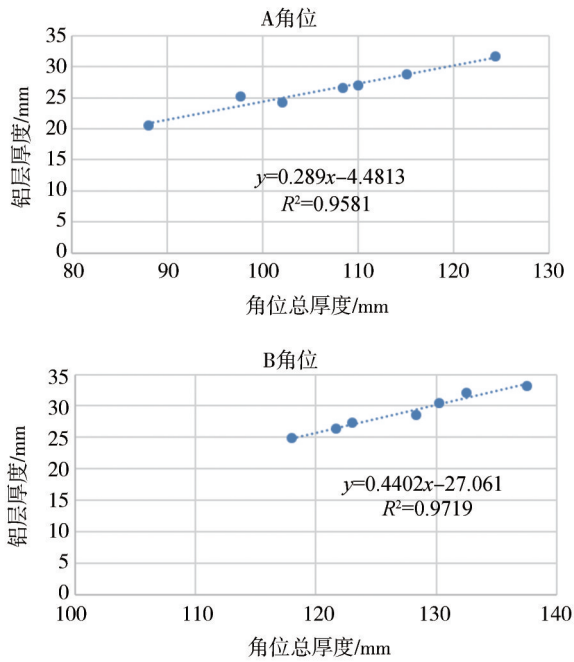


图6 铝塑膜厚度与铝层厚度

### 3 成形有限元仿真

#### 3.1 Barlat-Lian 各向异性塑性屈服模型

由于铝塑膜进入塑性阶段后,逐步开始出现塑性各向异性,如果要准确描述其冲压成形性能,并实现精准的厚度预测,其塑性阶段的各向异性不可忽略。本文引进了 Barlat 和 Lian 提出的 3 参数 B-L 屈服准则,可以解决平面应力状态,材料各向异性主轴与应力主轴不重合的情形,符合铝塑膜此类薄膜类成形变形受力模式,其屈服函数表达式为<sup>[21]</sup>

$$\bar{\sigma} = a|K_1 + K_2|^m + a|K_1 - K_2|^m + c|2K_2|^m = 2(\sigma_y)^m \quad (1)$$

式中: $\sigma_y$ 为屈服应力; $K_{i=1,2}$ 为应力张量不变量; $m$ 为 Barlat 常数; $a, c$ 为各向异性相关的参数。各个参数计算如式(2)所示。

$$\begin{cases} K_1 = (\sigma_x + h\sigma_y)/2 \\ K_2 = \sqrt{\left(\frac{\sigma_x - h\sigma_y}{2}\right)^2 + p^2\tau_{xy}^2} \\ a = 2 - 2\sqrt{\left(\frac{r_0}{1+r_0}\right)\left(\frac{r_{90}}{1+r_{90}}\right)} \\ c = 2 - a \\ h = \sqrt{\left(\frac{r_0}{1+r_0}\right)\left(\frac{1+r_{90}}{r_{90}}\right)} \\ p = (\bar{\sigma}/\tau_{s1})\left(\frac{2}{2a+2^m c}\right)^{1/m} \end{cases} \quad (2)$$

式中 $r_0, r_{45}, r_{90}$ 为材料的各向异性值,可通过材料单向拉伸试验获得。

#### 3.2 仿真模型对标

##### 3.2.1 铝塑膜拉伸对标

将图5中各方向材料的单向拉伸应力-应变曲线作为输入,结合B-L各向异性塑性屈服本构,确定对应 LS-DYNA 中 36 材料卡片(\*MAT\_3-PARAMETER\_BARLAT),具体所得材料参数见表4。

表4 DNP153材料参数2

E/MPa	$\nu$	$m$	$r_0$	$r_{45}$	$r_{90}$
6 000	0.31	6	1.234	4.227	1.075

按图1和表1所述试样形状和尺寸,建立材料单向拉伸模型,将表4中所示的参数作为材料输入,分别进行 $0^\circ, 45^\circ, 90^\circ$ 3个方向的材料拉伸试验仿真模拟,仿真结果如图7所示。

从仿真结果可见,3个方向拉伸试验和仿真力-位移曲线基本吻合,证明所选B-L材料本构,可以较准确地描述在3个方向的拉伸力学行为。

##### 3.2.2 冲压成形对标

由于实际冲压成形过程是一个复杂的受力状态,材料的拉伸变形并非单纯沿着某个单一的材料方向。为校验实际冲压过程材料模型及本构参数的有效性,建立了与试验相对应的有限元仿真模型,如图8所示,用LS-DYNA软件进行冲压成形过程仿真。同时对比了不同材料本构模型下的仿真结果,如表5所示(冲坑深度7 mm, A角位)。由此可以看出,采用B-L各向异性塑性屈服模型本构,可以较好地模拟在冲压成形过程中的变形及减薄行为。而采用简单的弹塑性本构模型,无论采用哪一个方向材料曲线作为输入,其仿真结果均有较大的偏差。同

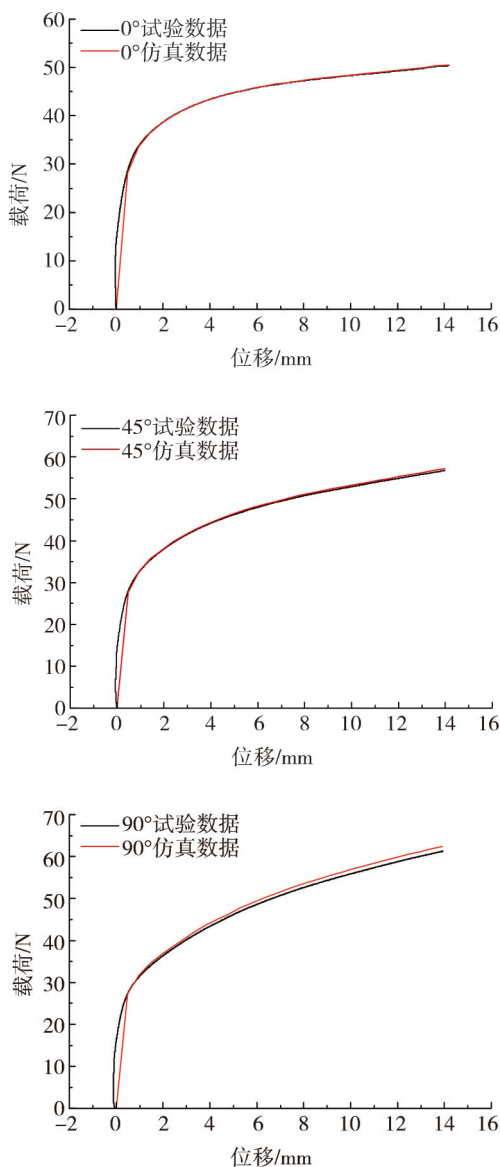


图7 铝塑膜单向拉伸仿真-试验对标结果

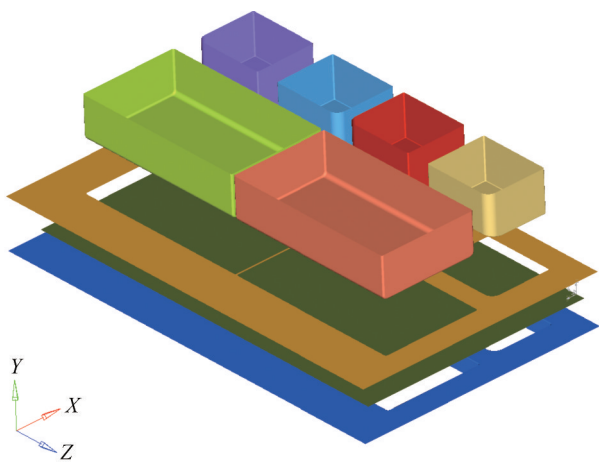


图8 冲压有限元仿真模型示意图

表5 试验-仿真对标结果

项目	试验值	仿真 MAT36	仿真 MAT24		
材料参数	弹性	$E=6000 \text{ MPa}, \nu = 0.31$			
	塑性曲线	$0^\circ/45^\circ/90^\circ$	$0^\circ$	$45^\circ$	$90^\circ$
	各向异性	$m, r_0, r_{45}, r_{90}$ 见表4			
角位铝塑膜厚度/ $\mu\text{m}$	99	98	84	87	90
角位铝层厚度/ $\mu\text{m}$	24.2	24	19.8	20.7	21.5

时,基于2.2节所述的映射关系得到的铝层厚度也与试验结果相吻合。

### 4 快速预测模型

基于有限元的仿真模拟可以实现成形过程厚度预测及工艺优化。但在实际电池产品设计,其形状类似(方形),仅尺寸有差异,如每个设计都去建立精细化有限元模型,比较耗时、低效。同时,生产制造过程中实时的铝层厚度监控也无法通过有限元仿真模拟来预测。为此,本文提出一种能够快速预测铝塑膜成形厚度的方法。

#### 4.1 仿真试验设计

常用的试验设计可分为两大类:全因子设计和部分因子设计。全因子设计试验数量为 $n^k$ 次,其中 $n$ 为因子水平个数, $k$ 为因子个数,在工程实际应用中,因全因子设计试验数量过多,通常采用部分因子设计。常见的部分因子设计有正交试验设计也叫田口设计、拉丁超立方试验设计、中心复合设计、Box-Behnken等。前两者主要用在因子影响和显著性分析上,后两种主要用于建立响应曲面模型。

常见影响成形的参数有压边力、凹凸模摩擦因数、冲模速度、模具 $R$ 角间隙等参数<sup>[2,17-18]</sup>。但在工程实际中,为综合考虑起皱、铝塑膜利用率、局部缩口变形等,压边力基本已达极限,可优化的空间很小,除非采用小压力弹簧模,实现非均匀压边力。而摩擦因数和冲模速度,基于多年的工程经验,也较难进一步提升。所以本文主要是通过模具的局部结构参数的优化,实现不同尺寸下的最优模具匹配设计。

选取的模具设计参数及取值范围见表6,用正交试验设计法,查阅试验设计表可知,7个因子,可选16组试验设计,分辨度为IV,另外为检验模型是否弯曲,增加一组中心点共17组试验,见表7。

#### 4.2 关键影响因子筛选

根据表7中仿真结果,对影响成形厚度的因子进行方差分析,检验因子显著性,结果见表8。

表6 模具设计参数及取值范围 mm

参数名称		低水平	高水平
冲压深度	A	5	10
凹凸模间隙	B	0.35	0.7
凸模顶边R角	C	1	3
凸模侧边R角	D	5	10
凸模棱边R角	E	1	3
凹模R角	F	0.8	1.8
中间茎宽	G	0.3	0.6

表7 仿真试验表

序号	A/mm	B/mm	C/mm	D/mm	E/mm	F/mm	G/mm	A角位铝塑膜厚度/ $\mu\text{m}$	A角位铝层厚度/ $\mu\text{m}$
1	5	0.35	1	5	1	0.8	0.3	117.52	29.48
2	10	0.7	1	10	1	0.8	0.3	114.17	28.51
3	10	0.7	3	10	3	1.8	0.6	116.63	29.22
4	5	0.7	1	10	3	0.8	0.6	129.58	32.97
5	10	0.35	1	10	3	1.8	0.3	112.21	27.95
6	5	0.35	1	10	1	1.8	0.6	132.67	33.86
7	10	0.7	3	5	3	0.8	0.3	104.33	25.67
8	10	0.35	3	5	1	1.8	0.3	103.63	25.47
9	5	0.7	3	5	1	0.8	0.6	127.46	32.35
10	10	0.35	1	5	3	0.8	0.6	97.25	23.62
11	5	0.35	3	5	3	1.8	0.6	131.13	33.41
12	5	0.7	3	10	1	1.8	0.3	141.88	36.52
13	10	0.7	1	5	1	1.8	0.6	101.29	24.79
14	5	0.7	1	5	3	1.8	0.3	126.33	32.03
15	10	0.35	3	10	1	0.8	0.6	113.50	28.32
16	5	0.35	3	10	3	0.8	0.3	130.88	33.34
17	7.5	0.525	2	7.5	2	1.3	0.45	114.92	28.73

表8 因子方差分析结果

来源	自由度	平方和	均方和	F值	P值
模型	12	2 592.7	216.1	525.3	0.000
线性	7	2 514.0	359.2	873.2	0.000
A	1	1 901.8	1 901.8	4 623.7	0.000
B	1	32.8	32.8	79.7	0.001
C	1	92.1	92.1	224.0	0.000
D	1	426.0	426.0	1 035.8	0.000
E	1	0.9	0.9	2.2	0.215
F	1	60.3	60.3	146.6	0.000
G	1	0.1	0.1	0.3	0.605
2因子交互作用	4	64.6	16.2	39.3	0.002
AC	1	9.1	9.1	22.1	0.009
AD	1	19.0	19.0	46.2	0.002
AF	1	30.4	30.4	74.0	0.001
AG	1	6.1	6.1	14.9	0.018
弯曲	1	14.0	14.0	34.1	0.004
误差	4	1.65	41		
合计	16				

可见除E、G外,其他因子均对成形厚度影响显著,在建立响应曲面模型时这些因子必须考虑。同时A和G间的交互作用影响显著,因此G因子也须考虑。最终选定的关键影响因子共6个,分别为:A、B、C、D、F、G。另外,从检验结果看,各因子对成形后铝塑膜厚度的影响存在弯曲,故在响应曲面模型建立时,须考虑2阶项。

#### 4.3 响应曲面模型建立

基于前述因子筛选结果,为建立响应曲面模型,重新进行响应曲面试验设计,共6个因子,各因子参数范围如表5所示。采用中心复合一半设计,共53组仿真DOE,具体试验数据表与表7所示类似,在此不做累述。

响应曲面模型拟合的方法很多,常见的有多项式模型、正交多项式模型、高斯回归模型、神经网络模型和支持向量机模型等。本文采用工程上最常用、最简单的多项模型来进行响应曲面拟合。拟合得到的预测模型如式(3)所示,模型拟合误差结果如图9所示,其残差符合正态随机分布, $R^2$ 预测98.55%,拟合的模型有效。

$$y_1 = 125.44 - 9.53A - 4.39D - 5.57C + 23.23F + 63.9B + 64G + 0.383A^2 + 0.463D^2 + 3.395C^2 - 6.42F^2 - 36.1B^2 - 71.3G^2 + 0.05AD - 0.55AC - 0.714AB - 0.35CD - 0.714BD - 4.29BF \quad (3)$$

## 5 快速预测模型应用及验证

快速预测模型主要有两方面应用:一是对模具工艺参数进行快速寻优,提升成形性能;另一方面是对现有设计进行快速厚度与评估。

### 5.1 冲压模具及工艺参数最优设计

基于式(3),以冲压成形后铝塑膜厚度 $y_1$ 最大化为目标,进行优化求解,以表2所述模具设计参数为例,其优化求解表达式可写为

$$\begin{cases} \max f(y_1, A, B, C, D, F, G) \\ \text{s. t.} & 5 \leq A \leq 10 \\ & 0.35 \leq B \leq 0.7 \\ & 1 \leq C \leq 3 \\ & 5 \leq D \leq 10 \\ & 0.8 \leq F \leq 1.8 \\ & 0.3 \leq G \leq 0.6 \end{cases} \quad (4)$$

优化得到的最优工艺参数组合为:A=5 mm, B=0.64 mm, C=3 mm, D=10 mm, F=1.6 mm, G=0.45 mm。

建立优化后工艺参数对应的有限元模型,并模

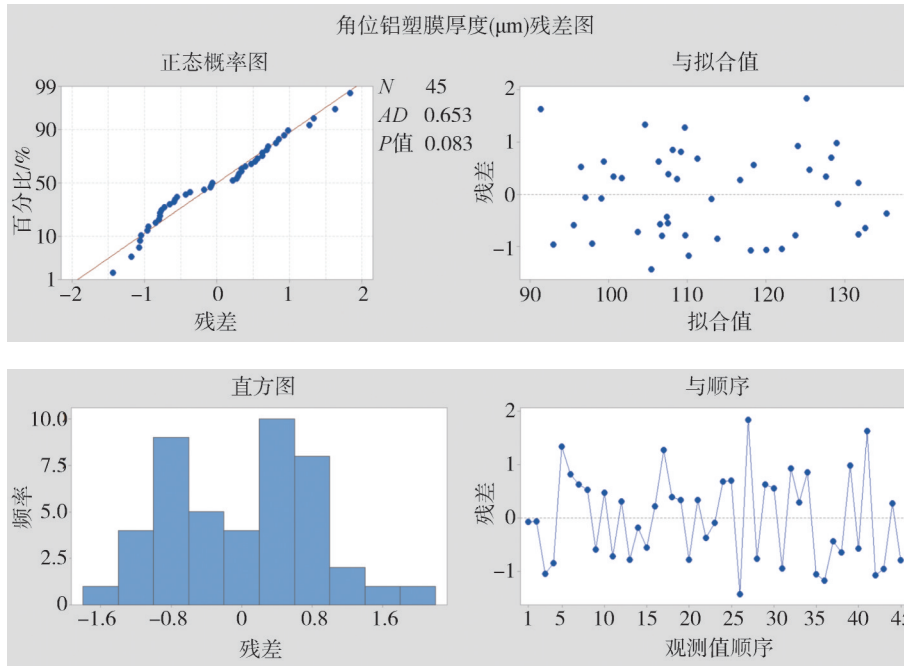


图9 成形厚度响应曲面模型误差结果

拟不同冲压深度下的冲压成形过程,得到对应坑深下的铝塑膜厚度,结果如图10所示。从图中可以看出,不同坑深下成形后铝层厚度均得到显著的提升(10.7%~18.69%),随着成形深度加大,改善效果更显著。

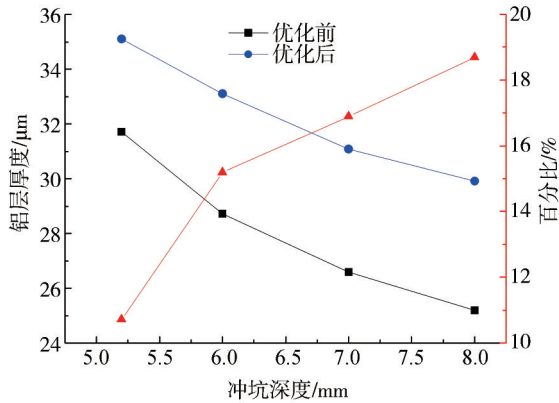


图10 优化前后成形结果对比

结果表明,建立的响应曲面模型能较好地拟合冲压成形过程铝塑膜厚度的变化与各关键工艺参数的关系,优化得到的设计方案能够实现各工艺参数最优匹配,可有效提升成形性能。

### 5.2 快速设计评估应用

基于式(3)的响应曲面模型,本文还进行了设计方案的快速评估应用验证,选取验证的模具形状与

图3所示类似,关键尺寸和参数如表9所示。

表9 设计评估验证模具尺寸和参数

参数名称		Model_1	Model_2
凸模	长度/mm	208.9	135
	宽度/mm	116.5	83.5
	凸模顶边R角/mm	2	2
	凸模侧边R角/mm	5	6
	凸模棱边R角/mm	2	1.8
凹模	长度/mm	209.8	136.2
	宽度/mm	117.4	84.7
	凹模R角/mm	0.8	1.8
	棱边R角/mm	2.15	1.95
配合	中间茎宽/mm	0.4	0.6
	凹凸模间隙/mm	0.45	0.6

分别对不同尺寸的Model\_1和Model\_2进行不同冲压深度的实物试验,并对成形后A角位的铝塑膜厚度和铝层厚度进行切片测量。同时利用响应曲面模型对不同坑深下的铝塑膜厚度和铝层厚度进行预测,试验和预测结果的对比如图11所示。从图中可以看出,利用快速预测模型预测的成形后铝塑膜厚度和铝层厚度与试验结果很好地吻合,误差小于5%,可以满足工程设计对不同尺寸设计的快速评估应用要求。

### 5.3 设计应用APP

由于不同型号和厂家生产的铝塑膜其性能有显

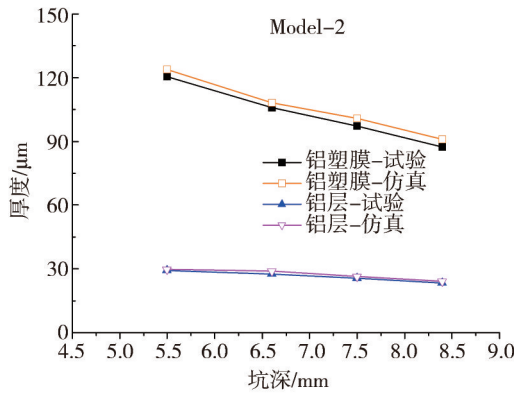
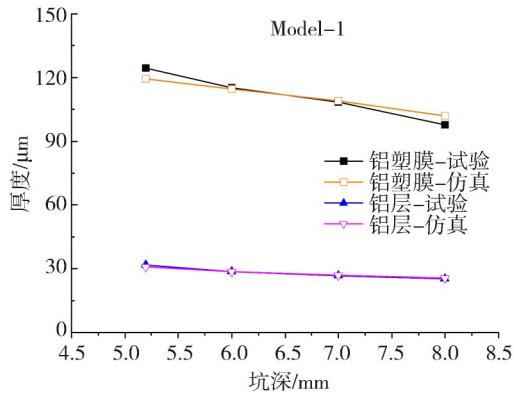


图 11 快速设计评估结果对比

著差异,要在实际产品设计中实现快速设计应用,就必须建立不同铝塑膜的快速预测模型库,并进行集成封装。

图 12 为某国产铝塑膜 ZJ153(各层结构:PA\_21+AL\_55+PP\_70+Adhesive\_7)各方向拉伸应力-应变曲线,具体关键参数如表 10 所示。从图中可见,相比 DNP153(见图 5(a)),其各个方向塑性行为更早出现了各向异性,在刚刚进入塑性段就开始分叉。另一方面各个方向抗拉强度和延展性均要弱于进口铝塑膜。分析其原因主要有两个,一是铝塑膜复合结构和各层厚度差异,另一个是层间的界面粘接和处理工艺上的差异。从文献[16]的研究可以看出,这两个差异对铝塑膜拉伸性能有关键影响,从而影响了其成形性能。

为验证本文所述方法对不同铝塑膜的适应性,建立了 ZJ153 快速预测模型,并进行实物验证,验证结果如图 13 所示,从图中可以看出,快速预测模型预测成形后铝塑膜厚度和铝层厚度与试验结果很好地吻合,误差小于 5%,说明本文所述方法可以适用于不同类型的铝塑膜,且具备较好的精度,可用于预测模型库的建立。

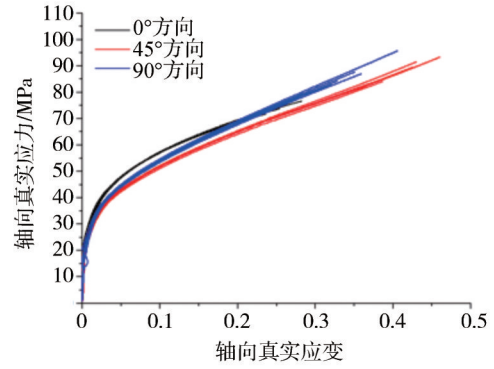


图 12 ZJ153 拉伸应力-应变曲线

表 10 ZJ153 材料参数

方向	E/MPa	$\nu$	抗拉强度/MPa	断裂应变
0°	6 000	0.31	74.6	0.26
45°			73.4	0.44
90°			75.8	0.39

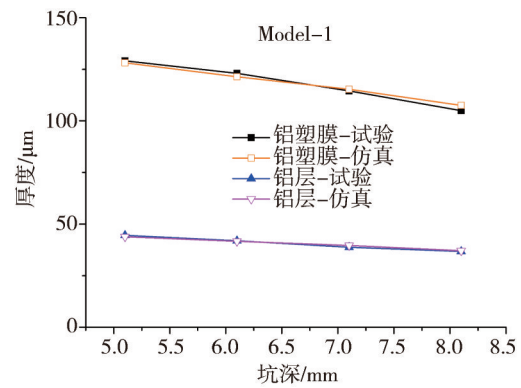


图 13 ZJ153 快速设计评估结果对比

为实现产品设计的快速应用,将 5.1 节和 5.2 节所述的功能进行封装,利用 python 开发交互界面,形成设计应用 APP,如图 14 所示。针对不同铝塑膜须重复前述过程,建立不同种类的铝塑膜的预测模型库,以满足日常快速设计评估及优化功能的需求,同时也可应用于量产成形质量监控,实现实时预测。



图 14 冲压成形快速设计评估及优化 APP

## 6 结论

本文通过实物试验与仿真模拟相结合,对铝塑膜的材料及成形性能进行了研究。主要得出以下结论。

(1)多层复合铝塑膜在弹性阶段,各方向性能差异不大,但进入塑性阶段后,逐步表现出了明显的各向异性,且与铝箔轧制方向有关。

(2)在特定受力状态下,铝塑膜冲压成形整体厚度与铝层厚度的映射关系,可通过一个关系式来拟合( $R^2>0.95$ )。成形时由于不同位置材料的流动和变形的差异,其映射关系也不同。

(3)采用Barlat-Lian各向异性塑性屈服模型本构,可以较好模拟在实际冲压成形过程中铝塑膜的变形及减薄行为,明显优于采用单一方向弹塑性曲线的结果。

(4)基于试验设计构造的响应曲面模型能实现冲压成形厚度的快速设计评估和优化,经验证,预测精度误差小于5%,可以用于替代精细化有限元模型,提升效率,优化后冲压成形厚度可提升10%~20%。

(5)集成开发的应用APP,涵盖多款铝塑膜快速预测模型,包括国产/进口。可以满足日常冲压成形工艺参数的快速设计评估及优化,同时也为量产冲压成形质量监控提供了解决方案。

### 参考文献

- [1] 陈伟,雷中伟,冯绍辉,等.软封装锂电池铝塑膜成形性能研究进展[J].包装工程,2022,43(9):22-30.  
CHEN W, LEI Z W, FENG S H, et al. Research progress on forming performance of aluminum-plastic laminated film for soft encapsulated lithium-ion batteries [J]. Packaging Engineering, 2022, 43(9): 22-30.
- [2] 张鹏博,张晓华,王训,等.锂离子电池用铝塑复合膜精密冲压工艺研究[J].热加工工艺,2016,45(7):167-170.  
ZHANG P B, ZHANG X H, WANG X, et al. Study on precision stamping process of al-plastic compound film for li-ion battery [J]. Hot Working Technology, 2016, 45(7): 167-170.
- [3] 邓可.锂离子电池软包铝塑复合膜综述[J].有色金属加工,2021,50(5):9-17.  
DENG K. Overview of flexible packaging aluminum-plastic composite film for lithium-ion battery [J]. Nonferrous Metals Processing, 2021, 50(5): 9-17.
- [4] 袁瑞建,姚杏梅,成石壮.软包锂离子电池用复合铝塑膜的制备工艺[J].内蒙古石油化工,2022(9):49-51.  
YUAN R J, YAO X M, CHENG S Z. The process of producing composite film for lithium-ion batteries [J]. Inner Mongolia Petro-
- chemical Industry, 2022(9): 49-51.
- [5] 高艳飞.用于锂电池包装的铝塑膜印刷封装新工艺[J].包装工程,2017,38(7):206-209.  
GAO Y F. New printing and packaging process of lithium battery with aluminum plastic film [J]. Packaging Engineering, 2017, 38(7): 206-209.
- [6] 徐雅慧,陈思琦,黄冉军,等.软包电池在纯电动汽车中应用的机遇与挑战[J].电源技术,2022,46(6):585-590.  
XU Y H, CHEN S Q, HUANG R J, et al. Opportunities and challenges of pouch cell applied in electric vehicles [J]. Chinese Journal of Power Sources, 2022, 46(6): 585-590.
- [7] GUO Zhangsheng, YANG Fan. Heat seal properties of polymer-aluminum-polymer composite films for application in pouch lithium-ion battery [J]. The Royal Society of Chemistry, 2016, 6: 8971-8979.
- [8] 王雪峰,纪小刚.软包锂电池铝塑膜热封强度工艺参数研究[J].实验力学,2023,38(2):222-230.  
WANG X F, JI X G. Study on process parameters of heat seal strength for aluminum plastic film of soft package lithium battery [J]. Journal of Experimental Mechanics, 2023, 38(2): 222-230.
- [9] 吕尚书.软包锂离子电池铝塑膜的热封性能研究[J].功能材料,2019,50(7):7115-7119.  
LV S S. Study on thermal sealing performance of aluminum-plastic film of soft pack Li-ion battery [J]. Functional Materials, 2019, 50(7): 7115-7119.
- [10] JANG J H, ABN S H. Numerical and experimental analysis of heat sealing of multi-layered laminate films used in lithium polymer battery packaging [J]. Journal of Plastic Film & Sheeting, 2017, 33(2):1-26.
- [11] 范洋,郭战胜,徐艺伟,等.软包装锂离子电池铝塑复合膜的热封工艺[J].储能科学与技术,2016,5(1):85-90.  
FANG Y, GUO Z S, XU Y W, et al. Investigation on heat-sealing process of the aluminum plastic composite foil in pouch Li-ion battery [J]. Energy Storage Science and Technology, 2016, 5(1): 85-90.
- [12] 范洋,郭战胜,冯捷敏.电解液浸泡对铝塑复合膜热封强度的影响[J].储能科学与技术,2016,5(4):545-550.  
FANG Y, GUO Z S, FENG J M. Investigation on the influence of electrolyte immersion on heat sealing strength of aluminum-plastic composite foil [J]. Energy Storage Science and Technology, 2016, 5(4): 545-550.
- [13] ANDREASSON E, KAO W S, STAHL P. Micro-mechanisms of a laminated packaging material during fracture [J]. Engineering Fracture Mechanics, 2014, 127:313-326.
- [14] LI T, SUO Z. Ductility of thin metal films on polymer substrates modulated by interfacial adhesion [J]. International Journal of Solids and Structures, 2007, 44:1696-1705.
- [15] LI T, HUANG Z Y, XI Z C, et al. Delocalizing strain in a thin metal film on a polymer substrate [J]. Mechanics of Materials, 2005, 37:261-273.