

文章编号: 2095-2163(2020)04-0072-05

中图分类号: TP391

文献标志码: A

方形锂电池碰撞测试及分析

张宇^{1,2}, 周玉凤¹, 陈晓平^{1,2}

(1 上海工程技术大学 机械与汽车工程学院, 上海 201620; 2 宁波工程学院 机械工程学院, 浙江 宁波 315336)

摘要: 锂离子电池在使用中可能会受到外部冲击, 从而破坏电池内部结构, 导致电池无法正常工作。本文以方形锂电池为例, 采用落锤试验, 通过装载不同形状的压头来模拟电池在受到整体碰撞和局部碰撞时所产生的机械响应和电化学变化。研究了不同加载速率、不同荷电状态下, 电池的机械完整性, 探究了电池内部的短路情况, 分析影响内部短路的主要因素, 为研究锂电池安全设计提供理论参考。

关键词: 机械工程; 碰撞; 荷电状态; 加载速率; 力学响应

Finite element analysis of square lithium battery indentation test

ZHANG Yu^{1,2}, ZHOU Yufeng¹, CHEN Xiaoping^{1,2}

(1 School of Mechanical and Automotive Engineering, Shanghai University of Engineering Science, Shanghai 201620, China;

2 School of Mechanical Engineering, Ningbo Institute of Technology, Zhejiang, Ningbo 315336, China)

[Abstract] Lithium-ion batteries may be subjected to external shocks during use, which may damage the internal structure of the battery and cause the battery to malfunction. In this paper, a rectangular lithium battery is taken as an example. The drop hammer test is used to simulate the mechanical response and electrochemical changes of the battery in the event of overall collision and partial collision by loading different shapes of indenters. Study the mechanical integrity of the battery under different loading rates and different state of charge, explore the short circuit inside the battery, analyze the main factors affecting the internal short circuit, and provide a theoretical reference for the study of lithium battery safety design.

[Key words] Mechanical engineering; Collision; Charge state; Loading rate; Mechanical response

0 引言

锂离子电池因为能量密度高、循环寿命长等优点, 在无人机、汽车、机器人、电脑和手机等产品上得到了广泛的应用^[1-2]。随着电动汽车的发展, 不可避免的发生碰撞等问题, 动力电池也必然会受到挤压和冲击。电池外壳在受到挤压后, 内部结构可能会被破坏, 导致电解液泄露, 引发内部短路, 甚至发生燃烧等严重后果。因此, 研究动力电池在冲击载荷下的机械变形及其失效机理已经成为车用动力电池研究的热点。

为了研究由于机械响应引起的电池失效, 不少学者对电池内部热学和电化学方面进行研究。Ahmad^[3]等人提出了锂电池内部结构的三维模型, 用于模拟电池局部热点是如何传播, 进而来预测热失控。也有学者通过研究电池的机械变形来预测电池的失效机理, 在之后的研究中冲击载荷也越来越得到大家的关注。Sahraei^[4]等人研究了软包电池和圆柱电池在局部压痕时所引发的短路机理, 并提出

电池的内部短路和电解液有关。许骏团队^[5-6]提出了加载速率和 SOC 可以加强电池结构刚度的观点, 并验证了电池组件的变形和材料失效决定了电池的电性能。兰凤崇^[7]等人通过对电池包的研究, 探讨了电池包在碰撞过程中箱体及内部结构的变形与响应规律。Elham 和 Tomasz 等人^[8-10]对圆柱电池和小袋电池进行了针刺、压痕和平面压缩实验, 并进行了一系列的准静态测试, 建立了相应的均质化模型。更有部分研究人员通过机械行为和电气相结合的办法^[11-13], 分析了多物理场耦合情况下判断电池短路的方法。

本文以方形三元锂电池作为研究对象, 针对整体和局部受压的典型碰撞载荷进行平头落锤和半球头落锤试验, 分析电池在此类碰撞情况下所产生的机械响应, 结合电压变化来分析电池内部的短路情况, 判断其失效特征。在研究过程中, 充分考虑了压头加载速率、电池荷电状态对电池失效所产生的影响, 通过冲击过程中电压和负载的变化趋势来分析

作者简介: 张宇(1994-), 男, 硕士研究生, 主要研究方向: 锂离子电池安全性; 陈晓平(1978-), 男, 博士, 教授, 硕士生导师, 主要研究方向: 疲劳强度可靠性; 周玉凤(1966-), 女, 硕士, 副教授, 硕士生导师, 主要研究方向: 压力容器设计。

通讯作者: 陈晓平 Email: cxp@nbut.edu.cn

收稿日期: 2020-02-20

电池内部的短路机理,从而为方形锂电池在机械载荷条件下的机械变形响应特性和电池内部短路失效分析提供了参考,对电动汽车动力电池的机械完整性具有实际的工程意义。

1 电池短路机理

锂离子电池一般由电芯和外壳构成,电芯由活性颗粒、集电器、隔膜及电解液4部分组成,其中正极活性颗粒附着在正极集电器上,负极活性颗粒附着在负极集电器上,之间由隔膜隔开,防止两者的物理接触,同时也为锂离子提供通道,电芯内部结构如图1所示。电解液是内部离子在正、负极之间传输的载体,用于保证电池在充放电过程中有足够的锂离子在正、负极之间进行可逆循环。电池的外壳材料一般有钢壳、铝壳和铝塑膜,不同外壳的电池在受到挤压载荷过程中,所表现出的机械响应是不同的。总体来看,钢壳的机械强度更高,在受到低载荷施压下,可以很好的保护电池内部构造,但在大载荷的情况下,外壳容易破裂,易发生起火、爆炸等灾害;铝壳和铝塑膜通常用在软包电池上,由于其延展性好,不易发生破裂,发生电池故障时最多只会引起鼓包,安全性较好。

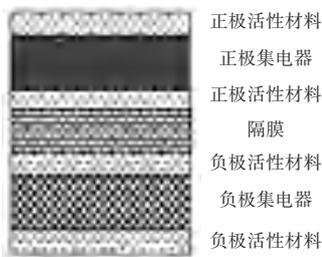


图1 电芯内部结构示意图

Fig.1 Schematic diagram of the internal structure of the battery cell

内部短路是锂离子电池最常见的一种失效形式,其中包括4种情况:正极集流体—负极集流体短路、正极集流体—负极活性材料短路、负极集流体—正极活性材料短路、负极活性材料—正极活性材料短路^[6]。除了在制造工艺上的缺陷和过充滥用的情况下,碰撞变形也是导致电池内部短路的重要因素,而且这种情况在实际车载工况中更容易发生。车用动力电池在受到碰撞、挤压过程中,难免会使隔膜、集电器发生损坏,造成局部或整体的内部短路,这一过程中伴随着热量产生、内部温度升高、最终电池失效。所以研究动力电池在正常使用情况下针对碰撞所产生的机械响应具有重要意义。

2 力学特性试验

图2为方形三元聚合物锂离子电池,电池的正

极活性材料为 $\text{Li}(\text{Ni}_a\text{Co}_b\text{Mn}_c)\text{O}_2$,正极集电器为铝箔,负极活性材料为石墨,负极集电器为铜箔。电池的外形尺寸为 $150\text{ mm}\times 95\text{ mm}\times 28\text{ mm}$ (长 \times 宽 \times 厚),额定容量 $40\text{ A}\cdot\text{h}$,额定电压 3.7 V ,重量为 0.7 kg ,电池的外壳材料是钢质,其中壳体四周的厚度为 0.5 mm ,底部厚度为 1.0 mm ,顶盖厚度为 1.5 mm ,顶盖上方分别有正、负两个极耳,钢壳与内芯之间有一定的间隙。



图2 三元聚合物锂离子电池示意图

Fig.2 Schematic diagram of ternary polymer lithium ion battery

实验开始前,为防止电池内原有电压对实验测试造成影响,先对电池进行放电处理。用带有计算机控制的BK6808AR可充电电池性能测试装置,用于制备电池样品,放电截止电压为 4.2 V ,电池以恒定电流充电至指定的SOC(荷电状态)值,即以 1 C 的速率充电至SOC值为额定容量的 0% 、 20% 和 40% 。最后对制备好的电池样品进行编号,以待测试。

利用DHR-1707型落锤冲击试验系统进行测试,如图3所示,质量块连接锤头,通过上方的电机将锤头提升至一定高度,通过遥控开关释放质量块,使其在导轨内自由落体,让具有一定速度的锤头砸向事先备好放在测试平台上的锂电池。锤头的碰撞速度是根据落锤的初始下落高度决定的,在加载过程中,位移、负载和电压的数据通过连接在电池上的传感器进行实时记录。在实验中,使用半径为 50 mm 的半球头负载模拟局部碰撞的工况。其中质量块、连接杆、传感器和半球头负载的总质量为 89.1 kg 。

用直径为 200 mm 的平头负载,模拟整体碰撞的工况。在此环境下,质量块、连接杆、传感器和平头负载的总质量为 88.4 kg 。由于质量差较小可忽略不计。负载在下落过程中,经过自由落体运动,会将重力势能转化为冲击动能。以电池表面为基准,通过改变负载不同的下落高度,给定不同的碰撞速度,判断不同速度下对电池机械特性的影响。不同

加载速率所对应的下落高度见表1。在实验过程中,电压和力随时间的变化由数字示波器实时监测,记录频率为50 MHz,精度为0.01 V。



图3 DHR-1707型落锤冲击示意图

Fig. 3 Schematic diagram of DHR-1707 drop hammer impact

实验过程中,将电池放在落锤测试平台上,从两个电极处引出电线连接到数字示波器上。测试时,将质量块提升至一定高度,通过远程遥控释放质量块(实验过程会有一定危险性,需撤离至安全区域),实验数据最终由数字示波器记录。实验中通过能量守恒定律预先设定负载的加载速率。

负载下落的初速度由以下关系给出:

$$v_0 = \sqrt{2gH}, \quad (1)$$

其中, g 是重力加速度, H 是负载的提升高度。

表1 高度-速度对应表

Tab. 1 Altitude-speed correspondence table

高度 H / mm	速度 v_0 / (m/s)
460	3
817	4
1 276	5

3 压入过程分析

在压痕过程中,刚性压头对电池表面的挤压过程,使电池表面产生塑性变形,通过对压痕过程的定量分析,对可压缩活性泡沫的电池模型建立相应的应力-应变关系。本文虽只建立了球形压头的模型,但对平头压头也同样适用。为简单起见,参照参考文献[14]中使用抛物线拟合来描述压痕过程中的应力-应变关系,本文只考虑轴向(z 方向)应力 σ_{zz} ,忽略剪切应力 σ_{rz} 。

$$\sigma_{zz} = A\xi_v^2, \quad (2)$$

公式(2)描述电池单元的单轴应力-应变关

系, A 为实验拟合参数, ξ_v 为体积应变。在单轴应变情况下,体积应变仅仅是 z 方向上的应变分量。

$$\xi_v = \frac{W}{H}, \quad (3)$$

其中, W 是冲头下给定材料点的向下位移, H 是电池单元的高度。冲头 $W(r, \delta)$ 下材料点的垂直位移在圆柱坐标系 (r, θ, z) 中,由以下函数近似给出:

$$w(r, \delta) = \delta \frac{r}{r_1} \left(1 - \frac{\partial^2}{\partial r^2} \right) \frac{r}{\delta}, \quad (4)$$

其中, δ 是刚性冲头位移, r_1 是外半径冲头和电池之间的接触面积,在这里近似为 $r = \sqrt{2r\delta}$, r 是球形冲头的半径。

在压头冲压过程中,假设电池单元上所有点的运动轨迹与压头的运动轨迹是平行的,使得位移场的径向分量以及环向应变消失。在压痕过程中,分别讨论电芯的冲压力 P_{foam} 和电池壳的冲压力 P_{foil} 。

由以上分析得到电芯的冲压力 P_{foam} 为:

$$P_{\text{foam}} = 2\pi \int_0^{r_1} \sigma_{zz}(\xi_v) r dr, \quad (5)$$

简化后,得到

$$P_{\text{foam}} = \frac{2\pi A r \delta^3}{3H^2}, \quad (6)$$

由于电池壳为钢壳,将其定义为刚性材料,可采用夹紧薄膜的简单刚性解决方案。

$$P_{\text{foil}} = \frac{2\pi h_f \delta^3}{3}, \quad (7)$$

式中, h_f 是电池壳的厚度。

定义总的冲压力 P 的近似表达式为,

$$P = P_{\text{foam}} + P_{\text{foil}} \frac{2\pi\delta(Ar\delta^2 + h_f H^2)}{3H^2}. \quad (8)$$

式(8)可用于电池初步设计时候研究异物缩进的问题,文中用来模拟压头在压入过程中,压头对电池总的冲压力的表达式。

4 实验结果分析

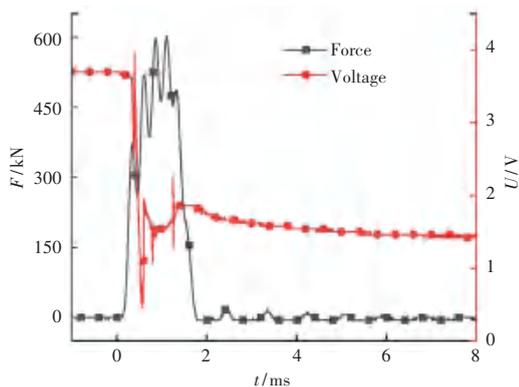
4.1 不同压头测试结果分析

本组落锤设计了9组实验,平头的撞击面积完全覆盖电池表面,可以模拟整体碰撞工况,在此选取 $SOC = 0.4, v_0 = 5 \text{ m/s}$ 的测试结果进行说明。如图4(a)所示,负载的响应时间极其短暂,只有2 ms左右。在大概 $t = 0.2 \text{ ms}$,负载逐渐上升、电压下降,在 $t = 0.5 \text{ ms}$,电压急剧下降至最低值0.5 v左右,而后电压开始升高,此时负载还在上升,在 $t = 1.4 \text{ ms}$ 时,

负载达到最大值,电压上升至一定值后持续波动,最后逐渐稳定在 1.5 V 左右。值得注意的是,在最后阶段,电压值并没有降至 0 V,说明电池并没有完全短路,电池只是发生了软短路。电池在受到剧烈碰撞后,电池外壳发生变形,内部电芯遭受挤压,在变形过程中,集电器的折叠导致发生部分短路,集电器上的活性颗粒释放出来,在这一过程中,隔膜可能发生破裂,引起电化学反应,进而引起更大范围的内部短路,致使电压急剧下降。随着负载的持续增加,集电器和隔膜在发生塑性变形后会有轻微恢复,正、负集电器又彼此分离,内部短路断开,所以导致电压逐渐升高,在 $t = 1.4$ ms,电压值有一定回升,而后在负载逐渐降低后,电压逐渐趋于稳定值。

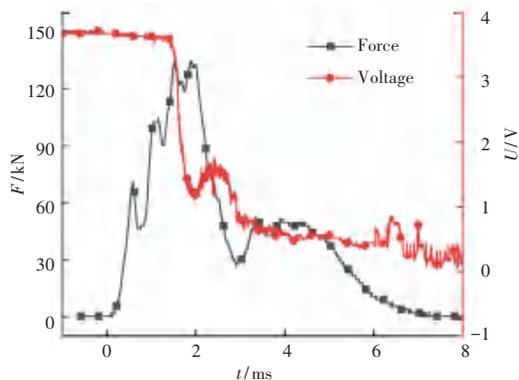
作为对比,选取半球头在 $SOC = 0.4, v_0 = 5$ m/s 的测试结果说明。半球头的撞击面积比电池表面积小很多,可以模拟局部碰撞工况。实验中尽量使碰撞位置发生在电池中央位置,以免带来不必要的误差。如图 4(b) 所示,在图中可以明显的看出,此种情况下的电压下降趋势与图 4(a) 不同,在负载上升阶段,电压没有明显变化,当 $t = 2$ ms,负载上升至最大值时,电压突然下降,相比整体碰撞而言,电压下降幅度并不大,在之后的冲击过程中,负载逐渐下降,而电压则持续波动下降接近 0 V。从电压的变化趋势,可以推测电池内部发生了硬短路,可以观察到电压最后基本稳定在 0 V 附近,说明此时电池在受到碰撞之后已经失效。

在平头压溃的过程中,由于电池表面都受到挤压,所以电池内部受力均匀,不会造成电池内部局部发生严重短路,正是因为大面积的受力才减缓了碰撞冲击。另外,由于是整体遭受挤压,电池内部发生电化学反应后,产生的热量可以与外界形成良好的热传递效应,从而减少短路过程中形成大量的热量对电池内部造成更严重的热失控影响,起到良好的散热作用。在半球头压溃的过程中,由于电池表面只有一小部分受到挤压,所以电池内部受力不均匀,电池中间区域可能发生严重的短路情况,而电池边缘区域在刚受到撞击时,内部正、负集流体还没有受到较大损害,内部短路不是很严重,在中心区域发生大面积短路时,后续会影响到边缘部分的正、负集流体的短路情况。另外,由于是局部遭受碰撞,电池中间区域发生电化学反应后,产生的热量不能及时与外界形成良好的热传递效应,这部分热量会加剧边缘区域发生内部短路,引起更严重的热失控影响,最终导致电池失效。



(a) 平板头载荷位移曲线

(a) Flat head load displacement curve



(b) 半球头载荷位移曲线

(b) Hemispherical head load displacement curve

图 4 不同压头的载荷位移曲线

Fig. 4 Load-displacement curves of different indenters

4.2 不同加载速率对内部短路的影响

选用一组压头为半球头、 $SOC = 0.4$ 时的电荷状态下,分析不同加载速度对电池的载荷位移曲线。如图 5 所示,在速度较小的情况下,载荷曲线先达到峰值,在 3 m/s 时,载荷在 7 mm 处达到最大值;在 5 m/s 时,载荷在 13 mm 处达到最大值,随着加载速度的增大,电池的机械响应越来越慢。同时在小加载速率时,电池的载荷峰值明显小于在大加载速率的载荷峰值。由图中曲线可以例证,在加载速率为 3 m/s 时,所对应的载荷峰值约为 91 kN,加载速率为 5 m/s 时,所对应的载荷峰值约为 135 kN,载荷峰值明显变大。这种现象表明,在实际中大的碰撞速率会对电池内部组分有一定的硬化作用,电池可以承受更大的外加载荷。

4.3 不同 SOC 值对内部短路的影响

选用半球头压头在同一速度 $v_0 = 4$ m/s 下,对应不同 SOC 值,分析电池的动态特性曲线。如图 6 所示,不同 SOC 值下的力-位移曲线大致是一样的,这说明 SOC 值对本次实验对象的短路情况影响不大,与图 5 相比,可以看出在不同 SOC 值下的载

荷一位移曲线几乎相近,变化趋势和峰值情况很接近。有些学者研究了不同 SOC 值对变形与机械响应之间的关系,指出高 SOC 值的电池具有高的结构刚度和负载率,这一现象解释为电荷对电池机械效应的硬化作用。但在本实验中,这种硬化作用并不明显,这一结果可由图 6 曲线中得到印证。

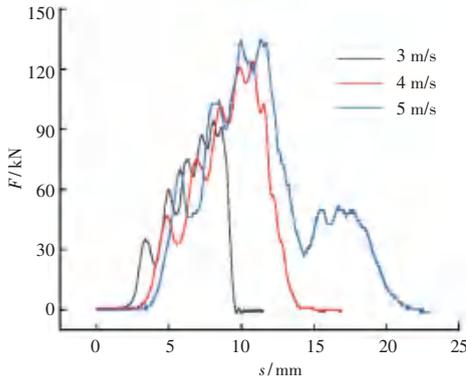


图 5 SOC=0.4,不同速度的载荷位移曲线

Fig. 5 Load displacement curve of SOC=0.4 at different speeds

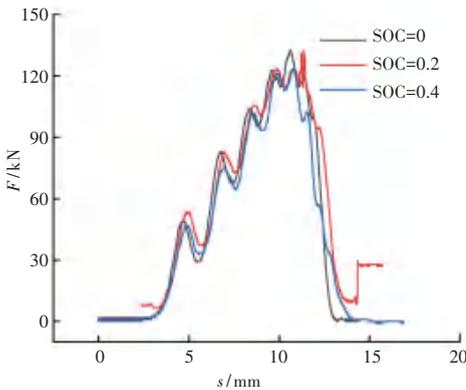


图 6 $v_0=5$ m/s,不同电荷状态的载荷位移曲线

Fig. 6 Load displacement curves of $v_0=5$ m/s for different states of charge

5 结束语

通过实验,研究了锂离子电池在不同压头、不同荷电状态、不同加载速率下的力学特性和电压变化,分析了电池的内部短路影响因素。结果表明:

(1)同等质量和相同冲击速度的落锤试验下,球头冲击比平头冲击对电池的危害更大,容易发生

较为严重的内部短路。

(2)相同荷电状态下,加载速率越大对电池内部组分硬化作用越明显,所引发的电池内部短路更为严重。

(3)相同碰撞速率下,电池内部电荷量对电池的机械特性影响作用不明显,电池所承受的载荷作用相差不大。

参考文献

- [1] 陈洪道. 锂离子电池的安全性评价技术[J]. 电子技术与软件工程, 2016(18): 130.
- [2] 王震坡, 孙逢春. 电动车辆动力电池系统及应用技术[M]. 北京: 机械工业出版社, 2012.
- [3] KIM G H, PESARAN A, SPOTNITZ R. A three-dimensional thermal abuse model for lithium-ion cells[J]. Journal of Power Sources, 2007, 170(2): 476-489.
- [4] KISTERS T, SAHRAEI E, WIERZBICKI T. Dynamic impact tests on lithium-ion cells[J]. International Journal of Impact Engineering, 2017, 108: 205-216.
- [5] JIA Y, YIN S, LIU B, et al. Unlocking the coupling mechanical-electrochemical behavior of lithium-ion battery upon dynamic mechanical loading[J]. Energy, 2019, 166: 951-960.
- [6] 许骏, 王璐冰, 刘冰河. 锂离子电池机械完整性研究现状和展望[J]. 汽车安全与节能学报, 2017, 8(1): 15-29.
- [7] 兰凤崇, 刘金, 陈吉清, 等. 电动汽车电池包箱体及内部结构碰撞变形与响应分析[J]. 华南理工大学学报(自然科学版), 2017, 45(2): 1-8.
- [8] 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.
- [9] SAHRAEI E, HILL R, WIERZBICKI T. Calibration and finite element simulation of pouch lithium-ion batteries for mechanical integrity[J]. Journal of Power Sources, 2012, 201: 307-321.
- [10] SAHRAEI E, MEIER J, WIERZBICKI T. Characterizing and modeling mechanical properties and onset of short circuit for three types of lithium-ion pouch cells[J]. Journal of Power Sources, 2014, 247: 503-516.
- [11] MALEKI H, HOWARD J N. Internal short circuit in Li-ion cells[J]. Journal of Power Sources, 2009, 191(2): 568-574.
- [12] ABADA S, MARLAIR G, LECOCQ A, et al. Safety focused modeling of lithium-ion batteries: A review[J]. Journal of Power Sources, 2016, 306: 178-192.
- [13] CAI W, WANG H, MALEKI H, et al. Experimental simulation of internal short circuit in Li-ion and Li-ion-polymer cells[J]. Journal of Power Sources, 2011, 196(18): 7779-7783.
- [14] SAHRAEI E, HILL R, WIERZBICKI T. Calibration and finite element simulation of pouch lithium-ion batteries for mechanical integrity[J]. Journal of Power Sources, 2012, 201: 307-321.

(上接第 71 页)

- [8] SODERBLOM L A, CONDIT C D, WEST A, et al. Martian Planet Wide Crater Distributions: Implications for Geologic History and Surface Processes[J]. Icarus, 1974, 22(3): 239-263.
- [9] CINTALA M J, HEAD J W, MUTCH T A. Martian Crater Depth/Diameter Relationship: Comparison with the Moon and Mercury[C]// Proceedings of the Lunar Science Conference. New York: Pergamon Press, 1976(3): 3375-3587.
- [10] 蒋彩霞. 超高速撞击碎片云损伤建模[D]. 哈尔滨工业大学, 2007.

- [11] 柳森, 谢爱民, 黄洁, 等. 超高速碰撞碎片云的四序列激光阴影照相[J]. 实验流体力学, 2010, 24(01): 1-5.
- [12] 崔伟峰, 曾新吾. SPH 算法在超高速碰撞数值模拟中的应用[J]. 国防科技大学学报, 2007(02): 43-46.
- [13] 崔伟峰, 曾新吾. 超高速碰撞数值模拟的工程算法模型[J]. 宇航学报, 2007(01): 136-140.
- [14] 朱玉荣, 吴祖堂, 谭书舜, 张向荣, 刘冠兰. 图像处理技术在碎片云参数测量中的应用[J]. 弹箭与制导学报, 2010, 30(6): 199-201.