DOI：10.13234/j.issn.2095-2805.2026.2.324 **中图分类号**：TM912 **文献标志码**：A

三元锂电池热失控产气爆炸风险评估研究

张青松，包防卫，牛江昊
(中国民航大学民航热灾害防控与应急重点实验室，天津 300300)

摘要：为研究三元锂离子电池热失控气体爆炸的危险性，利用自主搭建锂电池热失控气体爆炸实验平台，基于风险评估理论对不同荷电状态 SOC(state-of-charge)锂电池安全性进行定量评价，将锂电池点燃参数和气体爆炸危险度的乘积表征为热失控气体发生爆炸的概率，以爆炸严重程度表征为气体爆炸所造成的后果，通过实验对热失控气体爆炸风险进行综合评估。实验结果表明，高 SOC 电池更容易引发热失控且更加剧烈，其热失控气体爆炸范围更广、危险度更大。在爆炸极限内，相同位置节点高 SOC 电池有着更大的风险，不同 SOC 电池产生的混合气体随着热失控气体浓度增加，爆炸最高温度、最大压力、最大压力上升速率和爆炸风险均呈现出先增大后减小的变化规律，且在爆炸上下限浓度的中间位置附近，各参数达到最大值。

关键词：锂电池；热失控；爆炸风险；爆炸极限；风险评估

Study on Risk Assessment of Thermal-runaway Gas Explosion of Ternary Lithium Batteries

ZHANG Qingsong, BAO Fangwei, NIU Jianghao
(Key Laboratory of Civil Aviation Thermal Hazards Prevention and Emergency Response, Civil Aviation University of China, Tianjin 300300, China)

Abstract: To study the explosion risk of thermal-runaway gas of ternary lithium-ion batteries, an experimental platform for the thermal-runaway gas explosion of lithium batteries was independently built. Based on the risk assessment theory, the safety of lithium batteries in different states-of-charge (SOHs) was quantitatively evaluated. The probability of thermal-runaway gas explosion was represented by the product of the ignition parameters of lithium batteries and the risk degree of gas explosion, the result of gas explosion was characterized by the explosion severity, and the risk of thermal-runaway gas explosion was evaluated comprehensively through experiments. Experimental results show that the battery with a high SOC is more likely to cause thermal runaway in a more intense manner, its thermal-runaway gas explosion range is wider, and the corresponding risk degree is greater. Within the explosion limit, the batteries with higher SOCs at the same location have higher risks. With an increase in the thermal-runaway gas concentration in the mixed gas produced by batteries with different SOCs, all the maximum explosion temperature, maximum pressure, maximum pressure rise rate and explosion risk show a changing rule of first increasing and then decreasing, and the parameters reach their maximums near the middle value between the upper and lower explosion concentrations.

Keywords: Lithium battery; thermal runaway; explosion risk; explosion limit; risk assessment

收稿日期：2023-03-02；**修回日期**：2023-07-05；**录用日期**：2023-10-20；**网络首发日期**：2023-12-20
基金项目：国家自然科学基金民航联合基金重点支持项目(U2033204)
This work is supported by Key Program of the Joint Fund for Civil Aviation Research with National Natural Science Foundation of China under the grant U2033204

随着社会的发展和全球变暖的形势逐渐严峻，传统能源已无法满足目前形势的需求，因此在传统能源的基础上，具有循环性能好、能量密度高及对环境友好等特点的锂离子电池成为目前主要研究的新能源，并广泛应用于通信和交通等领域[1-3]。然而随着锂离子电池的普及，由锂电池引发的灾害

也随之而来。

锂离子电池造成的危害主要是因为其在不同滥用条件下发生热失控，电池内部压力和温度迅速上升，甚至带来燃烧和爆炸等危害[4-5]。这是由于电池在不同滥用条件下，内部结构会发生非常剧烈且不可控的链式放热反应，放热产生热量超过了散热的热量所导致[6-7]。Wang 等[8]指出锂电池产热和散热分别遵循指数函数和线性函数，若散热不及时，升高的温度进一步加快内部化学反应，产生更多热量，最终导致电池发生热失控；Fu 等[9]在锥形量热仪中对锂电池进行实验测试，结果表明，100% SOC 锂电池热失控后表面最高温度达到 797 ℃，热释放率最大峰值达到 6.8 kW，危险性远高于其他正常可燃材料。

在锂电池热失控的危险因素中，热失控释放气体爆炸是 1 个非常严重的风险因素。由于锂电池的使用环境多为密闭空间，因此燃爆威力巨大，造成更大的威胁。Baird 等[10]通过建模方法对锂电池燃烧爆炸特性进行分析，用可燃性下限、层流火焰速度和最大过压量化电池爆炸危险性；Li 等[11]研究了电池热失控释放气体的燃烧爆炸特性，包括燃烧上下限、可燃性危险指数和防火安全阈值等参数。Zhang 等[12]通过外部加热使锂电池在 N_2 环境下发生热失控，并基于气体爆炸指数定量分析气体爆炸危险性。

目前，国内外对于电池热失控释放气体的研究主要集中在气体成分、燃烧火焰速度等方面，缺乏对电池热失控释放气体爆炸风险进行分析的研究。因此，本文将使用 18650 型商用三元锂电池进行热失控实验，分析热失控后电池的各参数，并依据广泛使用的立方根定律、锂离子电池点燃参数和爆炸危险度对锂电池热失控气体爆炸危险性进行定量分析，为锂电池相关事故的消防救援提供理论支撑，为研究锂电池安全性提供技术支撑。

1　分析方法提出

风险从定性上是指某系统内现存或者潜在的可能导致事故的状态，在特定的时间和环境内发展成为事故，从而造成损失。从定量角度来看，风险 R(risk)指不期望发生事件的不可靠性 U(uncertainty)与其可能后果的严重程度D(damage)的结合。因此，在评价锂电池热失控气体爆炸风险时，不仅要考虑电池热失控气体爆炸的概率，还要综合考虑电池热失控气体爆炸后造成的损失大小。

张宇等[13]和张青松等[14]在考虑电池发生热失控的概率时，考虑了电池发生热失控时温度和加热时长等因素，定义电池到达热失控的时间和温度乘积的对数为点燃参数 TI，即

$$TI = \lg(T_{\mathrm{TR}}\Delta t) \tag{1}$$

式中：T_{TR} 为电池发生热失控时的温度，温度出现小幅下降再上升到达最高温度；Δt 为电池安全阀打开到热失控开始的时间。

使用点燃参数来表示电池发生热失控的概率，当热失控开始温度较高、时间较长时，说明电池在高温下不易发生热失控，因此电池更为安全，不易产生危险。

Li 等[9]在评估电池热失控释放气体燃烧爆炸特性时，使用爆炸危险度 H_{f} 来衡量气体发生爆炸的概率。锂离子电池是在特定情况下发生热失控，而热失控后释放的气体浓度仅有在爆炸极限范围之内时，才可能发生爆炸，故气体发生爆炸概率的计算式为

$$H_{\mathrm{f}} = \frac{UEL - LEL}{LEL} \tag{2}$$

式中：UEL 为气体爆炸上限；LEL 为气体爆炸下限。可以看出，爆炸下限越低，上限越高，发生爆炸的可能性越大。

结合点燃参数和气体爆炸危险度，本文在分析锂电池热失控释放气体爆炸可能性时，同时考虑锂电池热失控加热时长、温度和气体发生爆炸的可能因素。热失控气体发生爆炸不可靠性 U 计算式为

$$U = \frac{1}{TI}\cdot H_{\mathrm{f}} = \frac{1}{\lg(T_{\mathrm{TR}}\Delta t)}\cdot\frac{UEL - LEL}{LEL} \tag{3}$$

在国际标准化组织 ISO 发布的 ISO 6184-2 和中国国家标准化管理委员会发布的 GB/T 803—

2008 中，均基于 Bartknecht 在 1971 年开始使用的立方根定律作为测量气体或粉尘爆炸的爆炸严重程度的方法[15-16]，因此在衡量锂电池热失控释放气体的爆炸危害时引入立方根定律，即

$$D = K = \left(\frac{\mathrm{d}p}{\mathrm{d}t}\right)_{\mathrm{m}} \cdot V^{1/3} \tag{4}$$

式中：K 为气体爆炸指数，MPa·m/s；$\left(\frac{\mathrm{d}p}{\mathrm{d}t}\right)_{\mathrm{m}}$ 为爆炸时压力上升速率的最大值；V 为爆炸容器的容积。

锂离子电池热失控气体爆炸风险分析方法可表示为

$$R = UD = \frac{1}{\lg(T_{\mathrm{TR}}\Delta t)} \cdot \frac{UEL - LEL}{LEL} \cdot \left(\frac{\mathrm{d}p}{\mathrm{d}t}\right)_{\mathrm{m}} \cdot V^{1/3} \tag{5}$$

2 验证实验设计

2.1 实验样品

本文选取正极材料为 NCM 的 18650 型锂电池进行实验，该电池的具体性能参数见表 1。使用电池充放电测试装置 CT3001D 对电池进行充放电，以获得 100%荷电状态 SOC(state-of-charge)、70%SOC 和 50%SOC 不同状态电池，由于单节 30%SOC 电池热失控气体不足以支撑爆炸极限测试实验，因此本文不考虑。充放电时采用 0.2C 的放电速率将电池放至截止电压 2.75 V，然后通过恒压限流的方式分别使电池充至所需要的荷电状态，并将电池放入 25 ℃的恒温箱内静置 24 h，以确保电池的稳定性。

表 1 电池具体参数

Tab. 1 Specific parameters of battery

参数	数值或成分	
高度/mm	65.00	
直径/mm	18.40	
额定容量/(mA·h)	2 600	
额定电压/V	3.63	
截止电压/V	2.75	
充电电压/V	4.20±0.05	
阳极	石墨	
阴极	NCM($LiNi_{1/3}Co_{1/3}Mn_{1/3}O_2$)	
两端电压(±0.05)/V	50%SOC	3.66
	70%SOC	3.82
	100%SOC	4.14

2.2 实验流程

本文实验由自主搭建实验平台完成，如图 1 所示。实验平台主要包括 2 个部分，一部分是锂离子电池热失控装置，另一部分是热失控气体爆炸装置。其中电池热失控密闭实验舱体积为 3 L，使用螺栓和垫片使其密封，热失控气体点燃舱体积为 5 L，2 个舱之间通过通气管和快拧球阀进行连接。

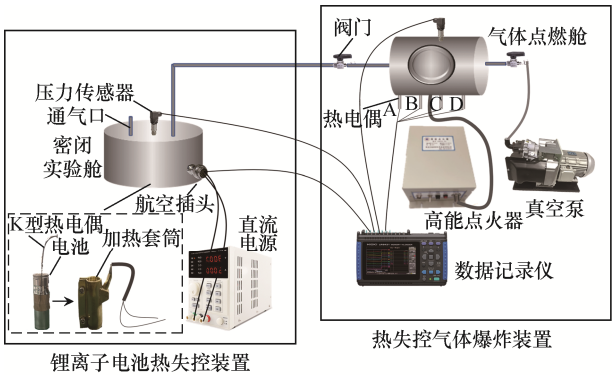


图 1 实验平台示意

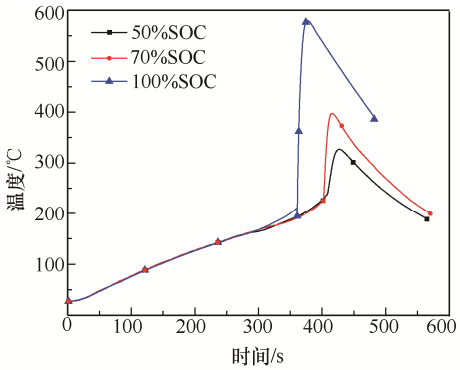
Fig. 1 Schematic of experimental platform

在实验准备阶段，使用加热带对通气管道和点燃舱加热至 110 ℃以上，以防止气体在整个过程发生冷凝。同时对实验舱进行多次洗气，洗掉上次实验遗留的热失控气体，最后一次洗气使实验舱内保持 1 个大气压的氮气环境，以获得未爆炸的原位气体。在实验电池侧面使用镍片、点焊机和隔热胶带对 K 型热电偶进行固定，记录电池在整个热失控阶段表面温度的变化。使用 60 W 稳定功率的直流电源对套筒进行加热，诱导电池发生热失控。一旦热失控发生，立即关闭直流电源，并通过热失控气体爆炸装置的两端阀门控制气体进入，对产生热失控气体的量、原有环境内氮气的量和所需要测量的浓度进行计算，从而确定需要通入点燃舱内热失控气体和空气的量。通过压力来衡量通入气体的量，进行配比得到不同浓度的混合气体用于爆炸实验。

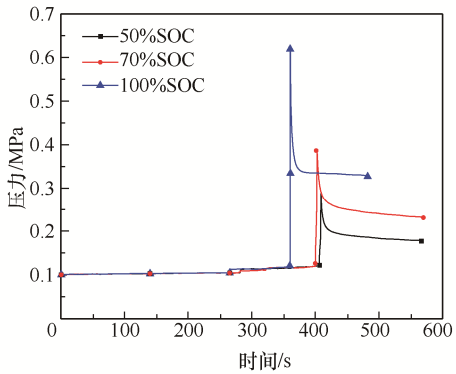
3　验证结果与讨论

3.1　锂电池热失控特性

在电池热失控密闭实验舱内，锂电池随着加热套筒的升温逐渐升温，当到达一定温度时会发生热失控。不同 SOC 锂电池在整个过程中电池的表面温度和反应舱内部压力变化如图 2 所示。在安全阀打开前，电池表面温度随着加热套筒温度升高稳定升高，当安全阀打开后，内部压力出现小幅度上升，温度则出现小幅度下降后再稳定上升，这是由于安全阀打开后，电池内部在此温度下反应产生的气体和少部分电解液喷出，同时带走部分热量造成温度下降。当电池完全热失控时，内部反应剧烈，喷出大量气体，电池表面温度迅速升高，反应舱内部压力急剧增大。



(a) 不同SOC电池表面温度变化



(b) 不同SOC电池压力变化

图 2　不同 SOC 下电池温度、压力变化曲线

Fig. 2 Curves of battery temperature and pressure under different SOCs

根据不同 SOC 锂电池实验结果，确定各种关键参数，分别是热失控起始温度 T_{TR} 、安全阀打开到热失控开始时间间隔 Δt 、电池表面最高温度 T_{max} 和反应舱内部最大压力 P_{max} ，并根据式(1)计算出点燃参数 TI ，见表 2。由不同 SOC 电池实验数据可知，电池 SOC 越高，其内部稳定性越差，在较低温度下更容易发生热失控。此外，高 SOC 电池内部反应更加剧烈，产生更多的气体和更高的温度，从而导致电池表面温度更高、反应舱内部压力更大。从点燃参数 TI 可以看出，高 SOC 电池点燃参数更小，更容易发生热失控。

表 2　不同 SOC 电池实验数据

Tab. 2 Experimental data of batteries with different SOCs

参数	50%SOC	70%SOC	100%SOC
T_{TR} /℃	238.6	224.9	210.1
Δt/s	124.4	118.8	93.8
T_{max} /℃	326.9	397.4	579.9
P_{max} /MPa	0.288 3	0.388 6	0.623 4
TI	4.472 5	4.426 8	4.294 6

3.2　锂电池热失控气体爆炸极限实验

锂离子电池热失控释放的气体发生爆炸是锂电池造成的非常严重的危险因素，因此对表征气体爆炸危害的爆炸极限进行分析具有重要意义。为了确定热失控释放气体的爆炸极限和气体爆炸时压力、温度特征，将热失控气体按照一定比例通入气体点燃舱进行点燃，从而确定各种参数。在通入气体之前，使用真空泵将点燃舱抽至真空状态，约 0.001 2 MPa，选择所测浓度值，计算热失控气体所占比例和空气所占比例，利用点燃舱内压力变化衡量通入气体体积，按先通热失控气体再通空气的顺序进行配比得到混合气体，高速冲入的空气及 1 min 的静置处理使点燃舱内气体均匀混合。使用 BWGD-20 高能点火器将得到的热失控气体和空气的混合气体进行点燃，通过不断改变热失控气体和空气的比例来确定气体的爆炸极限。

本文主要依据火焰传播判断爆炸极限，参考美国标准 ASTM E681-2015《化合物(蒸气和气体)易燃性浓度极限的标准试验方法》和国家标准 GB/T

21844—2008《化合物(蒸气和气体)易燃性浓度限值的标准试验方法》[17-18]，标准要求点火源产生的火焰向外蔓延至容器壁或距离容器壁 13 mm 以内，则认定火焰产生传播并造成气体爆炸。其次依据压力判断爆炸极限作为辅助，参考美国标准 ASTM E918-2019《测定高温高压下化学物质可燃性极限的标准实施规程》[19]，在此标准中，对于燃爆的定义为：在某浓度下，点火源引起的最大压力相比于初始大气压至少升高 7%，该压力变化被视为发生了燃爆。

ASTM E918-2019 和 ASTM E681-2015 提供相同的爆炸极限计算公式，即

$$\begin{cases} LEL=\dfrac{1}{2}(L_1+L_2) & L_1>L_2 \\ UEL=\dfrac{1}{2}(U_1+U_2) & U_1>U_2 \end{cases} \tag{6}$$

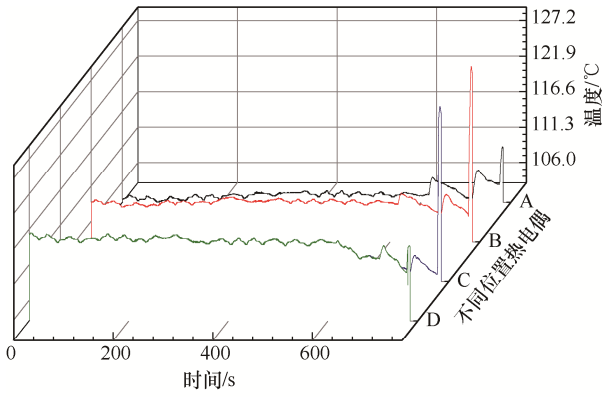
式中：L_1 为爆炸下限附近时产生压力上升或火焰传播的混合气体浓度；L_2 为爆炸下限附近时不产生压力上升或火焰传播的混合气体浓度；U_1 为爆炸上限附近时产生压力上升或火焰传播的混合气体浓度；U_2 为爆炸上限附近时不产生压力上升或火焰传播的混合气体浓度。

如式(6)所示，将产生火焰传播和压力上升的浓度值与不产生火焰传播和压力上升的浓度值取平均值得到爆炸极限。通过对不同 SOC 电池进行多次实验，使用式(6)对爆炸极限进行预测并在实验中验证，通过观察点燃舱内火焰，结合温度变化和压力变化辅助判断混合气体是否被点燃。在实验时，使用 4K 高速摄像机记录点燃舱内火焰变化，如图 3 所示。图 3 分别为点火器产生的火焰、临界点浓度燃烧时的苍白色火焰及浓度较高时被点燃产生的火焰。点燃舱内混合气体使用点火器点火时的温度变化如图 4 所示，图 4(a)为空白试验(在空气环境下点火)温度变化，B、C 两处热电偶因靠近点火器的火焰，温度升高；图 4(b)为爆炸极限附近的温度变化，平均温度上升到 140.27 ℃；图 4(c)为爆炸极限内混合气体点燃时的火焰温度变化，平均温度上升到 203.98 ℃。

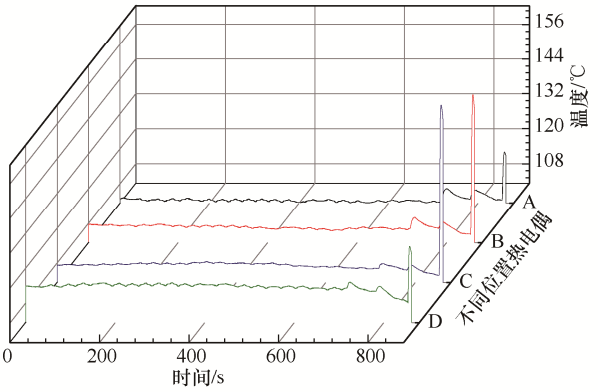


图 3 混合气体点火现象

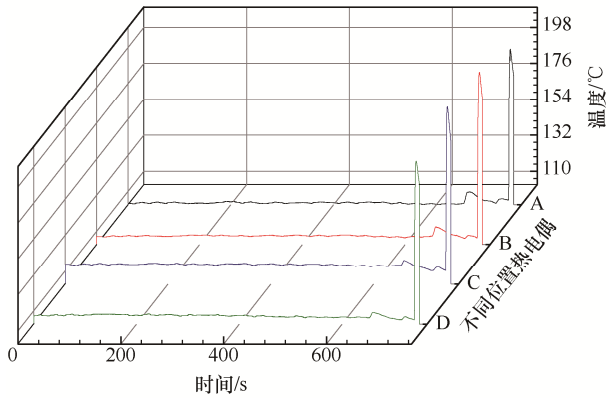
Fig. 3 Phenomenon of mixed gas ignition



(a) 点火器点火温度变化



(b) 爆炸极限临界点浓度爆炸温度变化



(c) 混合气体充分爆炸温度变化

图 4 锂离子电池热失控气体爆炸的火焰温度变化曲线

Fig. 4 Temperature curves of lithium-ion battery thermal-runaway gas explosion flame

点燃舱内混合气体使用点火器点火时的压力

变化如图 5 所示，可以看出，在空白试验中，点火器引起的压力变化最高值为 0.108 1 MPa；当点燃舱内气体浓度处于爆炸极限临界值时，最大压力有所上升；当浓度处于爆炸极限内，最大压力显著升高[20]。

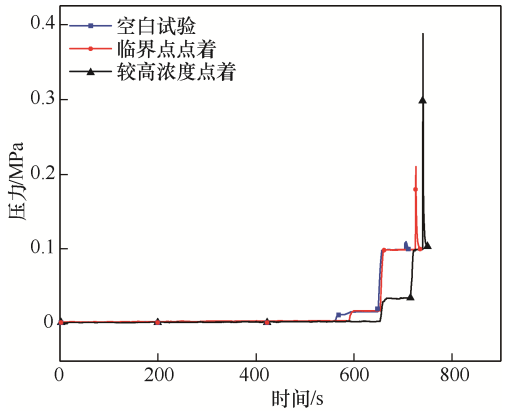


图 5　锂离子电池热失控气体爆炸的压力变化曲线

Fig. 5 Pressure curves of lithium-ion battery thermal-runaway gas explosion

根据多次实验最终确定 3 种 SOC 电池的爆炸上限和爆炸下限，如图 6 所示。从实验数据可以看出，随着 SOC 升高，热失控气体爆炸上限呈上升趋势，爆炸下限则稍有下降，且高 SOC 电池热失控气体爆炸极限范围更大，气体更易发生爆炸，这与相关研究结论基本一致[21-22]。爆炸上限的变化趋势可能与热失控反应强度有关，随着电池 SOC 增加，反应更剧烈，电解液在极短时间内释放到外部，无法及时充分地与空气反应，从而产生大量 CO，导致爆炸上限上升。此外，文献[19]指出，随着 SOC 增加，电池热失控过程中通过还原和亲核反应产生的不饱和烃增多，导致爆炸下限降低，这也是热失控气体爆炸范围变化的主要因素。

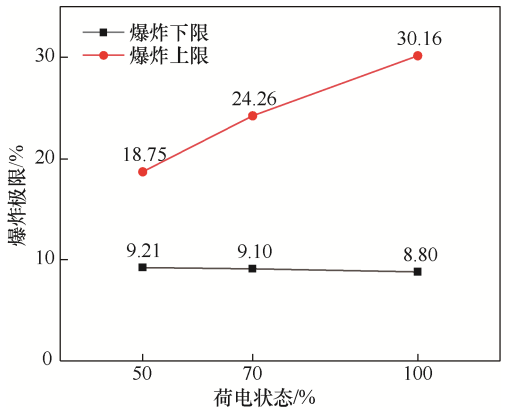
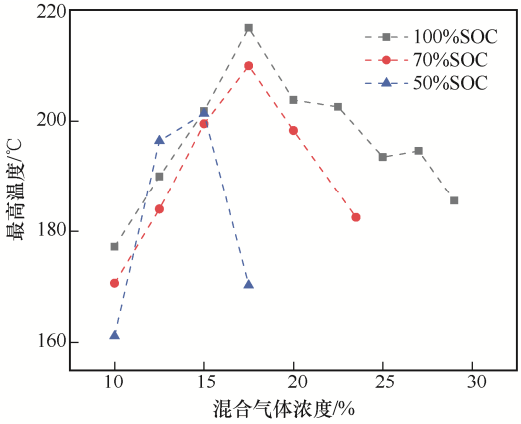


图 6　热失控气体爆炸极限

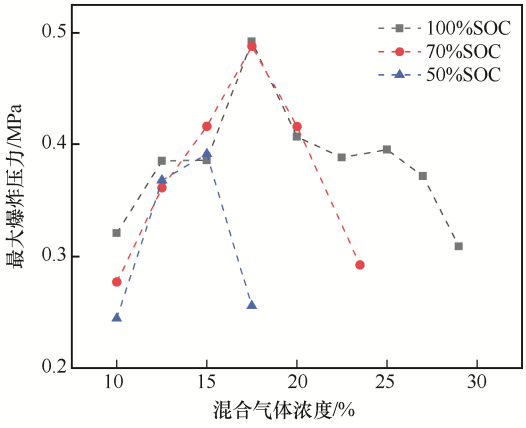
Fig. 6 Explosion limit of thermal-runaway gas

3.3　锂电池热失控气体不同浓度爆炸特性

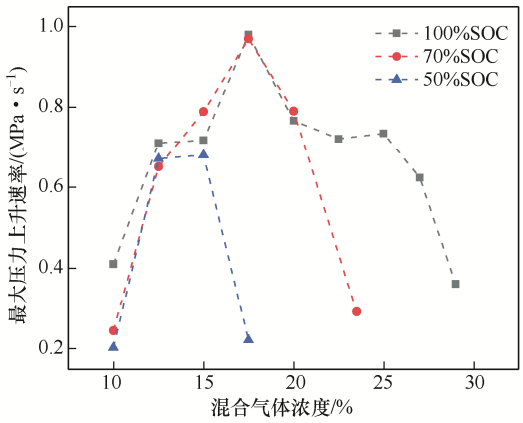
为进一步探究热失控气体浓度对混合气体爆炸威力的影响，对于不同 SOC 锂电池，在爆炸上限和爆炸下限范围内选取多个节点进行浓度配比，并使用点火器进行点燃，测量其爆炸产生的压力、温度等参数，比较其在不同浓度下的危险性。对于 100%SOC 电池，选取 10.0%、12.5%、15.0%、17.5%、20.0%、22.5%、25.0%、27.0%和 29.0%共 9 个节点进行实验；70%SOC 电池选取 10.0%、12.5%、15.0%、17.5%、20.0%和 23.5%共 6 个节点进行实验；50%SOC 电池选取 10.0%、12.5%、15.0%和 17.5%共 4 个节点进行实验。不同 SOC 电池热失控气体不同浓度下的最高温度、最大爆炸压力和最大压力上升速率如图 7 所示。



(a) 不同浓度气体爆炸最高温度



(b) 不同浓度气体爆炸最大压力



(c)不同浓度气体爆炸最大压力上升速率

图 7 锂电池热失控气体在不同浓度下的爆炸特性曲线

Fig. 7 Explosion characteristic curves of lithium battery thermal-runaway gas at different concentrations

数据表明，不同 SOC 锂电池混合气体均呈现相同的趋势，即在爆炸极限内，随着热失控气体浓度逐渐增大，混合气体爆炸的最高温度、最大压力和最大压力上升速率均先上升，达到最大值后下降。这是由于在低浓度时，爆炸容器内氧气充足，限制爆炸威力的主要因素是热失控气体浓度，而随着热失控气体浓度升高，密闭容器内氧气量一定，理论上仅能维持一部分锂电池热失控气体的燃爆，因此气体对氧分子的争夺更加激烈，造成氧气不足，未参与反应的热解气体吸收反应产生的能量，导致最大爆炸压力和温度均随热失控气体浓度的进一步增大而逐渐下降。此外，随着电池 SOC 增加，高 SOC 电池接近于爆炸极限处的混合气体，其爆炸最高温度、最大压力和最大压力上升速率比低 SOC 电池更大、危险性更高。

3.4 锂电池热失控气体爆炸风险分析

根据式(2)~式(5)及以上实验分析所获得的各种关键参数，可进行不同 SOC 锂电池热失控释放气体的定量风险分析，本文选取不同 SOC 锂电池爆炸极限附近浓度节点，以及不同 SOC 锂电池混合气体爆炸最高温度、最大压力、最大压力上升速率最大值的节点进行定量风险分析，50%SOC 锂电池选取 10.0%、15.0%和 17.5%共 3 个浓度节点，70%SOC 锂电池选取 10.0%、17.5%和 23.5%共 3 个浓度节点，100%SOC 锂电池选取 10.0%、17.5%和 29.0%共 3 个浓度节点，如表 3 所示。

表 3 锂电池热失控气体爆炸风险

Tab. 3 Risk of thermal-runaway gas explosion of lithium batteries

荷电状态/%	浓度/%	点燃参数 TI	爆炸危险度 H_f	爆炸严重度 K	热失控气体爆炸风险 R
50	10.0	4.472 5	1.035 8	0.348 0	0.080 6
	15.0			1.164 1	0.269 6
	17.5			0.380 5	0.088 1
70	10.0	4.426 8	1.665 9	0.419 8	0.158 0
	17.5			1.660 0	0.624 7
	23.5			0.499 3	0.187 9
100	10.0	4.294 6	2.427 3	0.703 7	0.397 7
	17.5			1.676 6	0.947 6
	29.0			0.618 7	0.349 7

由表 3 数据可以看出，100%SOC 电池爆炸危险度为 2.427 3，70%SOC 电池爆炸危险度为 1.665 9，50%SOC 电池爆炸危险度为 1.035 8，这表明高 SOC 电池热失控释放的气体更容易爆炸，易造成事故危害。爆炸发生后，高 SOC 电池在爆炸上、下限浓度附近的爆炸严重度比低 SOC 电池更大；高 SOC 电池在所选中间浓度节点的爆炸严重度也比低 SOC 电池更大。综合考虑锂电池热失控气体爆炸发生的概率和后果，计算得到热失控气体爆炸风险，数据表明，在爆炸上、下限附近时，SOC 越高，热失控气体爆炸风险越大；在爆炸极限中间浓度节点，高 SOC 电池的爆炸风险明显高于低 SOC 电池，且对于同一 SOC 电池，其中间浓度节点的爆炸风险明显高于其他浓度节点，具有更高的危险性。

4 结论

(1)锂离子电池 SOC 越高，其热稳定性越差，引发热失控所需的温度更低，且热失控过程更快、更剧烈，释放出更多的气体，热危险性更严重。

(2)基于自主搭建的实验平台，对正极材料为 NCM 的 18650 型锂电池进行实验，得到了 3 种 SOC 电池热失控气体的爆炸极限。其中，100%SOC 电池热失控气体爆炸下限为 8.80%，爆炸上限为

30.16%；70%SOC 电池热失控气体爆炸下限为 9.10%，爆炸上限为 24.26%；50%SOC 电池热失控气体爆炸下限为 9.21%，爆炸上限为 18.75%。随着电池 SOC 的升高，气体爆炸范围更广，更容易引起爆炸，危险度更大。

(3)不同 SOC 电池的混合气体均呈现相同的变化规律，对于同一 SOC 锂电池，其混合气体的爆炸最高温度、最大压力和最大压力上升速率，均随热失控气体浓度的增加呈先增大后减小的变化趋势，且在爆炸上、下限浓度的中间附近达到最大值。

(4)高 SOC 电池的热失控气体相对于低 SOC 电池更易发生爆炸，且在爆炸极限附近，高 SOC 电池具有更大的爆炸威力和更高的爆炸风险。在各 SOC 电池爆炸极限的中间浓度节点，高 SOC 电池同样危险性更高、爆炸风险更大，易对周围人员和财产造成更大的威胁。

(5)通过风险评估理论对锂电池热失控气体进行评估，引入点燃参数和爆炸危险度表征爆炸发生的可能性，使用爆炸严重度表征爆炸造成的后果，提出 1 种针对锂电池热失控气体爆炸风险分析的方法，该方法可为相关研究及管理提供指导与参考。

参考文献：

[1] 李明浩, 黎桂树, 谢松. 航空运输环境中锂离子电池热失控研究[J]. 电源学报, 2024, 22(6): 253-259, 268.
Li Minghao, Li Guishu, Xie Song. Research on thermal runaway of lithium-ion battery in aviation transportation environment [J]. Journal of Power Supply, 2024, 22(6): 253-259, 268. (in Chinese)

[2] 何文轩, 耿磊, 姚芳. 电动汽车动力锂离子电池可靠性关键技术综述[J]. 电源学报, 2024, 22(2): 183-196.
He Wenxuan, Geng Lei, Yao Fang. Overview of key reliability technologies for power lithium-ion batteries used in electric vehicles [J]. Journal of Power Supply, 2024, 22(2): 183-196. (in Chinese)

[3] 孔祥博, 彭丽莎, 蒋超凡, 等. 锂电池无损检测技术研究进展与比较分析[J/OL]. 电工技术学报, 1-27. (2025-11-04)[2026-01-28]. https://doi.org/10.19595/j.cnki.1000-6753.tces.250943.
Kong Xiangbo, Peng Lisha, Jiang Chaofan, et al. Research progress and comparative analysis of non-destructive testing technologies for lithium batteries [J/OL]. Transactions of ChinaElectrotechnical Society, 1-27. (2025-11-04)[2026-01-28]. https://doi.org/10.19595/j.cnki.1000-6753.tces.250943. (in Chinese)

[4] 赵春朋, 王青松, 余彦. 密闭空间中锂离子电池的热爆炸危险性[J]. 储能科学与技术, 2018, 7(3): 424-430.
Zhao Chunpeng, Wang Qingsong, Yu Yan. Thermal explosion hazards of lithium-ion batteries in hermetic space [J]. Energy Storage Science and Technology, 2018, 7(3): 424-430. (in Chinese)

[5] 马敬轩, 赖铱麟, 吕娜伟, 等. 锂离子电池智能传感监测及预警技术[J]. 电工技术学报, 2025, 40(3): 941-963.
Ma Jingxuan, Lai Yilin, Lü Nawei, et al. Lithium-ion battery intelligent sensing monitoring and early warning technology [J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2025, 40(3): 941-963. (in Chinese)

[6] 张青松, 曲奕润, 郝朝龙, 等. 三元锂离子电池热失控气体原位分析[J]. 高电压技术, 2022, 48(7): 2817-2825.
Zhang Qingsong, Qu Yirun, Hao Chaolong, et al. In-situ analysis of thermal runaway gas in ternary lithium-ion battery [J]. High Voltage Engineering, 2022, 48(7): 2817-2825. (in Chinese)

[7] 张青松, 刘添添, 郝朝龙, 等. 锂离子电池热失控气体快速检测及危险性分析方法[J]. 北京航空航天大学学报, 2023, 49(9): 2227-2233.
Zhang Qingsong, Liu Tiantian, Hao Chaolong, et al. Rapid detection analysis method of thermal runaway gas composition and risk of lithium ion battery [J]. Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics, 2023, 49(9): 2227-2233. (in Chinese)

[8] Wang Qingsong, Ping Ping, Zhao Xuejuan, et al. Thermal runaway caused fire and explosion of lithium ion battery [J]. Journal of Power Sources, 2012, 208: 210-224.

[9] Fu Yangyang, Lu Song, Li Kaiyuan, et al. An experimental study on burning behaviors of 18650 lithium ion batteries using a cone calorimeter [J]. Journal of Power Sources, 2015, 273: 216-222.

[10] Baird A R, Archibald E J, Marr K C, et al. Explosion hazards from lithium-ion battery vent gas [J]. Journal of Power Sources, 2020, 446: 227257.

[11] Li Weifeng, Wang Hewu, Zhang Yajun, et al. Flammability characteristics of the battery vent gas: A case of NCA and LFP lithium-ion batteries during external heating abuse [J]. Journal of Energy Storage, 2019, 24: 100775.

[12] Zhang Yajun, Wang Hewu, Li Weifeng, et al. Quantitative analysis of eruption process of abused prismatic Ni-rich automotive batteries based on in-chamber pressure [J]. Journal of Energy Storage, 2020, 31: 101617.

[13] 张宇, 白伟, 史砚磊, 等. 基于热失控风险指数的锂电池安全评价方法[J]. 北京航空航天大学学报, 2021, 47(5): 912-918.
Zhang Yu, Bai Wei, Shi Yanlei, et al. Evaluation method of lithium battery safety based on thermal runaway risk index [J]. Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics, 2021, 47(5): 912-918. (in Chinese)

[14] 张青松, 曲奕润, 刘添添. 锂离子电池热失控气体毒性风险分析方法[J]. 北京航空航天大学学报, 2024, 50(1): 12-19.
Zhang Qingsong, Qu Yirun, Liu Tiantian. Risk analysis method for thermal runaway gas toxicity of lithium-ion batteries [J]. Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics, 2024, 50(1): 12-19. (in Chinese)

[15] Explosion protection systems - Part 1: Determination of explosion indices of combustible dusts in air: ISO 6184-1: 1985 [S]. International Organization for Standardization, 1985.

[16] 国家质量监督检验检疫总局, 中国国家标准化管理委员会. 空气中可燃气体爆炸指数测定方法: GB/T 803—2008[S]. 北京: 中国标准出版社, 2008.
General Administration of Quality Supervision, Inspection and Quarantine of the People's Republic of China, Standardization Administration of the People's Republic of China. Determination of explosion indices of combustible gases in air: GB/T 803—2008 [S]. Beijing: Standards Press of China, 2008. (in Chinese)

[17] ASTM International. Standard test method for concentration limits of flammability of chemicals (vapors and gases): ASTM E681-2015 [S]. West Conshohocken, USA: ASTM International, 2015.

[18] 国家质量监督检验检疫总局, 国家标准化管理委员会. 化合物(蒸气和气体)易燃性浓度限值的标准试验方法: GB/T 21844—2008[S]. 北京: 中国标准出版社, 2008.
General Administration of Quality Supervision, Inspection and Quarantine of the People's Republic of China, Standardization Administration of the People's Republic of China. Standard test method for concentration limits of flammability of chemicals (vapors and gases): GB/T 21844—2008 [S]. Beijing: Standards Press of China, 2008. (in Chinese)

[19] ASTM International. Standard practice for determining limits of flammability of chemicals at elevated temperature and pressure: ASTM E918-2019 [S]. West Conshohocken, USA: ASTM International, 2019.

[20] 张青松, 包防卫, 牛江昊. 环境压力对锂电池热失控产气及爆炸风险的影响[J]. 储能科学与技术, 2023, 12(7): 2263-2270.
Zhang Qingsong, Bao Fangwei, Niu Jianghao. Risk analysis method of thermal runaway gas explosion in lithium-ion batteries [J]. Energy Storage Science and Technology, 2023, 12(7): 2263-2270. (in Chinese)

[21] Zhang Qingsong, Niu Jianghao, Zhao Ziheng, et al. Research on the effect of thermal runaway gas components and explosion limits of lithium-ion batteries under different charge states [J]. Journal of Energy Storage, 2022, 45: 103759.

[22] Chen Shichen, Wang Zhirong, Wang Jinghong, et al. Lower explosion limit of the vented gases from Li-ion batteries thermal runaway in high temperature condition [J]. Journal of Loss Prevention in the Process Industries, 2020, 63: 103992.



张青松

作者简介：

张青松(1977—), 男, 博士, 教授。研究方向：锂电池火灾防控理论与技术。E-mail：nkzqsong@126.com。

包防卫(1999—), 男, 通信作者, 硕士。研究方向：锂电池热失控安全性分析。E-mail：bfw1118@126.com。

牛江昊(1998—), 男, 硕士。研究方向：锂电池热失控安全性分析。E-mail：449076343@qq.com。

(责任编辑：耿越)