硅含量对锂离子动力电池热失控特性影响的试验研究*

李军[1,2]　金强[1]　王艺云[2]　隗寒冰[1]　孔思琴[2]

（1.重庆交通大学，重庆 400074；2.重庆机电职业技术大学，重庆 402760）

【摘要】针对汽车锂离子动力电池热失控问题，基于绝热加速量热法实验，以1 A·h软包电池为研究对象，结合侧向加热方式，分析不同硅含量（SiO_x质量分数0%、5%、10%、15%）电池的热失控过程及变化特征，研究硅含量对热失控特征温度和电池电压的影响，以及热失控时火焰喷射的变化特征，提出硅含量-固态电解质相界面（SEI）膜稳定性-热失控的定量关系建议。实验结果表明：随着SiO_x含量增加，SEI膜热稳定性指标（温度阈值）T_1逐渐降低，热失控的触发温度T_2升高，其热失控最高温度T_3升高30.3%（SiO_x含量15%时，达836.2 ℃），且与石墨材料锂离子电池相比，单位热释放量增加42.3%。在侧向加热实验研究中，电池热失控最高温度可达1 003.5 ℃（SiO_x含量15%时），火焰喷射更加剧烈、持续时间更短（10 s）。

主题词：锂离子电池　硅基负极　热失控特性　侧向加热　绝热加速量热法

中图分类号：TU46　　**文献标志码：**A　　**DOI:** 10.19620/j.cnki.1000-3703.20250859

Research on the Influence of Silicon Content on Thermal Runaway Characteristics of Lithium-Ion Power Battery

Li Jun[1,2], Jin Qiang[1], Wang Yiyun[2], Wei Hanbing[1], Kong Siqin[2]

(1. Chongqing Jiaotong University, Chongqing 400074; 2. Chongqing Vocational and Technical University of Mechatronics, Chongqing 402760)

【Abstract】Regarding the problem of thermal runaway in automotive lithium-ion batteries, in this paper the experiments were performed based on 1 Ah soft pack batteries, Adiabatic Accelerating Rate Calorimetry (ARC) and lateral heating experiments. The thermal runaway behavior and changing process of silicon-based negative batteries with different SiO_x mass fractions (0%, 5%, 10%, 15%) was researched. It is studied that the influence of silicon content on the characteristic temperature of thermal runaway and the battery voltage, as well as the changing characteristics of flame jetting during thermal runaway. The quantitative relation between silicon content-SEI stability-thermal runaway was established. The results show that the thermal stability index (temperature threshold) T_1 of the SEI film gradually decreases with the increase of SiO_x, and the triggering temperature T_2 of thermal runaway increases, and the highest temperature T_3 gets to 30.3% (when the SiO_x content is 15%). At the same time, comparing with lithium-ion batteries made of graphite materials, the unit heat release increases by 42.3%. In the lateral heating experiment, the highest temperature of battery thermal runaway gets to 1 003.5 ℃ (when the SiO_x content is 15%), and the flame jetting is more intense and the duration is shorter (10 s).

Key words: Lithium-ion battery, Silicon-based anode, Thermal runaway characteristic, Side heating, ARC

【引用格式】李军，金强，王艺云，等. 硅含量对锂离子动力电池热失控特性影响的试验研究[J]. 汽车技术，2026(9)：37-44.

LI J, JIN Q, WANG Y Y, et al. Research on the Influence of Silicon Content on Thermal Runaway Characteristics of Lithium-Ion Power Battery[J]. Automobile Technology, 2026(9): 37-44.

1　前言

锂离子电池作为新能源汽车的核心动力源，是高效储能设备，在电动汽车领域占据重要地位[1,2]。但随着商业化石墨负极理论容量接近极限，传统的石墨负极电池难以支持高比能电池的发展，硅基负极（SiO_x）以其超高的理论比容量已成为下一代电极材料的优选[3,4]。

然而，硅基负极虽具有高容量，但硅基负极高含量

*基金项目：国家自然科学基金项目（52172381）；重庆市技术创新重大专项（CSTB2022TIAD-STX0003）。

通信作者：王艺云（1984—），女，副教授，研究方向为新能源汽车、汽车自动驾驶技术，m18996000055@163.com。

与热稳定性的矛盾尚未有效解决，其在工作过程中会出现硅颗粒嵌入锂时不可逆膨胀，导致固态电解质相界面（Solid Electrolyte Interphase，SEI）膜反复碎裂，从而造成负极与电解液间发生系列副反应[5-7]，在其副反应后于电池内部产生H_2、CH_4等可燃气体[8-9]；其中H_2极易与正极晶格释放的O_2发生串扰造成电池内部热量的叠加温升，引发电池的膨胀、漏液、热失控等，最终导致电池燃烧[10-11]。因此，为降低硅基负极电池的安全隐患，硅基负极电池的硅含量（SiO_x质量分数）需要严格的限制[12]；Jinyong Kim等[13]研究了18650锂离子电池热回收过程中气相反应的数值模型；Lou等[14]分析了固体锂-硫化聚丙烯腈电池，表明长寿命固体锂-硫化聚丙烯腈电池的柔性固体纤维网络，可增强复合固体电解质；Mostafa等[15]分析了锂离子电池中碳酸盐溶剂的燃烧化学过程；此外，其不同属性和电化学体系上的差异也会体现在电池的库伦效率、鼓包胀气、热失控特征温度、喷发时间，以及热失控的剧烈程度等方面[16-17]。

根据国际电工委员会标准KS C IEC 62660-3：2023《Secondary lithium-ion cells for the propulsion of electric road vehicles—Part 3: Safety requirements》[18]，在动力电池安全性能和热失控防护方面提出了明确要求。Ying Zhang[19]等对$Li(Ni_xCo_yMn_z)O_2$/石墨（Graphite，GR）系列锂离子电池热失控机理进行研究，建立了相应的热失控分析数据库，为锂离子电池的安全建模和设计提供了指导；许辉勇等[20]对硅基负极软包电池进行了针刺热失控特性研究，分析不同荷电状态（States of Charge，SOC）对热失控特性的影响，并提取了热失控的现象和数据，为电池的热安全设计提供了重要参考依据；王莉、Wang等[21-22]采用加速量热仪（Accelerating Rate Calorimeter，ARC）、差示扫描量热法（Differential Scanning Calorimetry，DSC）等多种测试手段研究锂离子电池的热特性与热失控机理，发现锂化石墨负极的相变和NCM523脱锂时正极晶格释放的O_2会加速热失控；Qi[23]等分析研究了锂离子电池中硅基多孔负极对电池性能寿命的影响，设计了硅基多孔负极，提出多尺度电极膜型；Sohan Thombare[24]等探索研究了锂离子电池用硅碳复合阳极，在硅碳复合阳极的合成、结构设计、性能改性方面进行了试验研究，同时也指出了现有硅碳复合负极材料存在的局限性。

目前，尽管已经有通过多物理场耦合模型揭示硅基负极热膨胀对电池循环稳定性的影响研究，但对硅含量与热失控的定量性分析及试验研究仍较为缺乏，现有的研究多聚焦于电化学性能及SOC的影响，在硅基（SiO_x/Graphite）负极电池的研究中多集中于电池电性能、不同SOC对热安全性的影响方面，而硅基负极软包动力电池硅含量对电池热失控、产热特性的研究仍然较少。因此，本文依据标准KS C IEC 62660-3：2023的规定，利用ARC设备与侧向加热相结合，试验研究不同硅含量对软包动力电池热失控特性的影响，以NCM811/SiO_x电池试验研究不同SiO_x含量（其质量分数分别为0%、5%、10%、15%）硅基负极电池的热失控过程、热失控特征温度与电压之间的变化关系，并对比性分析其热失控过程，以及硅含量-SEI膜稳定性-热失控能量的定量关系；结合试验研究中热失控最高温度与电压的变化关系，分析不同硅含量（SiO_x质量分数）电池的不同热失控变化情况、硅含量对热失控过程中火焰喷射燃烧特征，通过试验研究得到硅基负极电池防止热失控的硅基含量合理值。

2 试验设计

2.1 ARC与侧向加热装置

本文采用清华大学国家电池安全重点实验室的EV-ARC型绝热加速量热仪，温度测量精度±0.1 ℃，热电偶为K型（精度I级，±1.5 ℃），采用常用的比较法进行校准；ARC试验的升温速率0.1 ℃/min，其灵敏度0.02 ℃/min，气氛N_2 50 mL/min。侧向加热装置采用定制陶瓷加热板（3.5 cm×3.5 cm，功率0~48 W可调），试验加热功率梯度为5 W/min，热电偶响应时间<1 s。试验中，ARC通过“加热-等待-搜寻”模式获取样品的放热反应，系统自设灵敏度为0.02 ℃/min，试验中每次等待时间设定为15 min。ARC试验装置如图1所示。

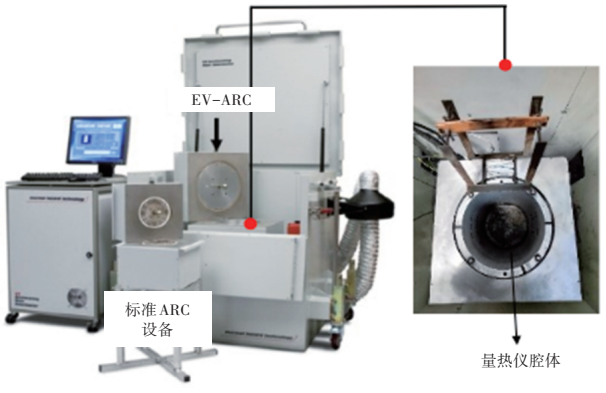


图1 ARC试验装置

侧向加热通过功率为48 W的陶瓷加热板贴附于软包电池表面，从而诱发锂电池热失控。陶瓷加热片的加热功率在0~48 W范围内可调，以逐步调整陶瓷加热板功率实现对电池的侧向加热。侧向加热布置方式如图2所示。

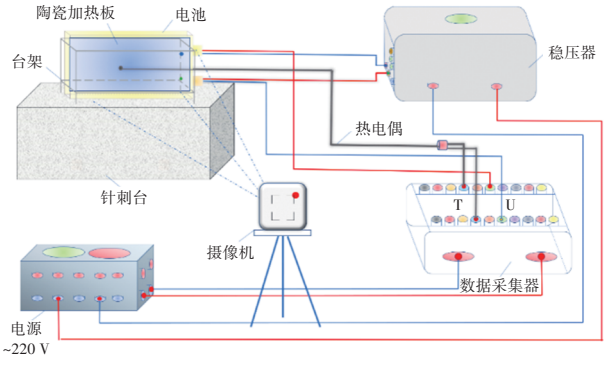


图2　侧向加热设备

2.2　试验用电池

试验采用1 A·h软包锂离子动力电池，正极为NCM811（Ni、Co、Mn的物质的量之比为8∶1∶1），粒度分布D50（10~20 μm），负极为SiO_x，采用不同硅含量的硅基材料，其SiO_x质量分数为0%、5%、10%、15%。为使电池具有一致性，对所有电芯进行统一注液化成。首先在惰性氛围下向电芯注液，在常温下搁置24 h再首次充电，使隔膜能被电解液完全浸润，再进行充放电，即化成工序，激活正负极表面的活性物质进行电化学反应。试验设计的信息如表1所示。

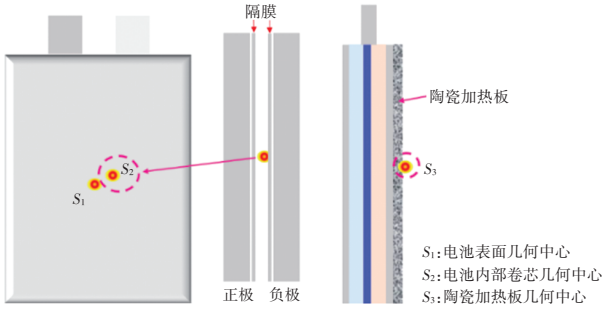
表1　试验设计信息

试验样品信息	硅基材料锂离子动力电池	石墨材料锂离子动力电池
电池正极	NCM811	NCM811
电池负极	硅基复合物（其中SiO_x的质量分数为5%、10%、15%）其余为石墨	石墨（即SiO_x的质量分数为0%）硅基复合物为零
额定电压/V	3.55	3.7
额定容量/A·h	1	1
充电终止电压/V	4.3	4.3
放电终止电压/V	2.75	2.75

2.3　试验方法

通过热电偶、外置摄像机分别记录加热期间电池的温度、电压以及热失控变化过程。如图3所示，热电偶均布于各试验电池上，位置分别为电池正表面中心S_1、内部集流体与隔膜间中心位置S_2、加热板表面中心位置S_3。其中，S_1用于获取电池表面不同区域的温度变化，S_2用于获取电池内部集流体与隔膜间中心的温度变化，S_3用于更好地对比加热板和电池间的温度变化。

电池SEI膜温度变化主要与电池成分、结构及外部环境因素有关，特别是SEI膜的热稳定性与其化学组成密切相关[25-27]。SEI膜的结构存在自身缺陷，如其非均匀性与多孔性问题[28-29]，在循环过程中，SEI膜会因反复膨胀与收缩而产生细微裂纹或孔隙，导致其局部结构脆弱，是电池热分解的起源。在长期重复性地循环中，SEI膜会不断微裂又重新形成，且新生成的SEI膜含有更多不稳定的有机成分，导致其热稳定性再次下降。电池的电解液与添加剂对其也有影响，电解液分解产物含有氟溶剂，可促使无机LiF的形成，提高分解的温度值；若电解液配方不合理，则可导致SEI膜有机化[30]；在电池添加剂中的盐类，其分解则会腐蚀SEI膜中的Li_2CO_3等成分，生成热稳定性较差的LiF和CO_2[31-32]。另外，电池的外部环境会诱导其降解，如外部高温、高电压或过充、锂枝晶生长都会形成不稳定的结构；电池界面的副反应（如金属锂沉积、过渡金属溶解）会导致热稳定性降低，加速其热失效。主要通过优化电解液、表面改性、温度管理等方式改善和提高电池的热稳定性。因此，本文在试验研究中，以SEI膜为分析重点，试验研究不同硅含量负极锂电池对电池热稳定性的影响。



（a）电池表面　　（b）加热板表面

图3　热电偶在电池上的布置

电池的热失控主要通过3个特征温度T_1、T_2、T_3体现。其中，T_1为自产热起始温度，T_2为临界温度，指数升温，T_3为最高温度。T_1与负极SEI膜的稳定性关系密切，是电池的自产热起始温度，当电池内部温度达到T_1时，电池的自产热速率可达到0.01 ℃/min；T_2为热失控的触发温度，属于热失控的临界温度，此时电池的温度上升速率呈指数上升趋势，每秒能达到数百摄氏度；T_3为热失控的最高温度（自燃破坏性温度）。另外，在侧向加热试验中，电池的热失控过程通过电池热失控最高温度T_3、热失控触发至结束电池燃烧的时间以及电池热失控时火焰喷发的剧烈程度评判。本文每组将重复进行3~4次相关试验。

3　试验结果与讨论

3.1　硅含量对热失控特征温度的影响

图4为不同SiO_x质量分数的硅基负极电池热失控特征温度T_1、T_2、T_3的变化曲线。T_1能反映电池负极侧SEI膜的分解温度，提高T_1温度是提高电池热稳定性的

重要举措。

硅基负极锂电池具有超高的理论比容量，但是硅基在充放电过程中会发生很高的体积膨胀/收缩问题；反复膨胀/收缩导致材料的破碎，发生一定的物理-化学耦合失效，SEI膜会动态破裂，且与电解液发生剧烈放热反应，产生大量可燃性气体（C_2H_4、CO_x以及LiF等），随着硅基材料含量增加，热失控则发生相应的变化或加剧。采用硅基复合材料（SiO_x）负极能有效缓冲电池体积的膨胀/收缩问题。尽管纯石墨负极结构相对稳定，其热失控主要源于SEI膜分解和锂嵌入态的高活性，但其电池的比容量相对于硅基复合负极锂电池较低，并且在其快充或低温充电时，石墨表面会析出金属锂，同样会加剧热失控。因此，在充分利用硅基复合材料锂离子电池高比容量基础上，试验分析确定锂电池硅基复合材料（SiO_x）的含量，在提高电池比容量时，对有效控制电池的热失控具有重要的应用价值。

本文在ARC“加热-等待-搜寻”过程中，试验初次检测到锂离子电池的自产热温度约为148 ℃，此时电池T_1附近出现能够被检测到的放热现象；随着SiO_x质量分数的增加，电池的自产热温度T_1呈降低趋势，其值分别为158.9 ℃、127.6 ℃、94 ℃。

随着ARC试验腔体温度的持续升高，在173 ℃时，5%含量SiO_x锂离子电池最先热失控，而0%负极电池未发生热失控。随着温度的升高，在201 ℃和246 ℃时10%、15%的SiO_x负极电池分别发生热失控现象，相对于较高含量的硅负极，不含硅的负极电池则最后热失控。试验结果表明：随着SiO_x质量分数的增加，热失控触发温度更高，负极的安全性逐渐降低。

当电池发生热失控后，出现了一系列的连续放热反应，从图4可以发现，随着SiO_x质量分数的增大，热失控的最高温度T_3逐渐增加。经过计算和试验对比发现，在热失控过程中，15% SiO_x含量的负极电池最高温度比0% SiO_x电池高出30.2%；试验还发现不同SiO_x质量分数的硅基负极电池发生热失控瞬间还会伴随着明显的火焰喷射现象出现，并产生一系列连续放热反应，其过程中会出现黑色（燃烧后的活性物质）或银色（部分正极集流体碎屑）的颗粒物。

另外，通过估算非绝热环境下不同SiO_x质量分数电池在热失控状态下的热量Q。具体计算公式为：

$$Q = CM \cdot \Delta T = CM(T_3 - T_1) \tag{1}$$

式中：Q为电池发生热失控释放的热量，C为电芯材料的比热容，M为电池质量（试验的硅基负极电池质量为16.2 g，石墨负极电池质量为16.4 g），ΔT为温度的变化量。

$Q_{0\%(GR)}$、$Q_{5\%}$、$Q_{10\%}$和$Q_{15\%}$分别为6 564.232 kJ、8 076.964 kJ、10 159.28 kJ、11 383.776 kJ。根据研究团队[33]的试验结果，得到15% SiO_x电池单位热释放量比0% SiO_x（GR）电池高出42.3%，严重威胁着硅基负极电池的安全性。

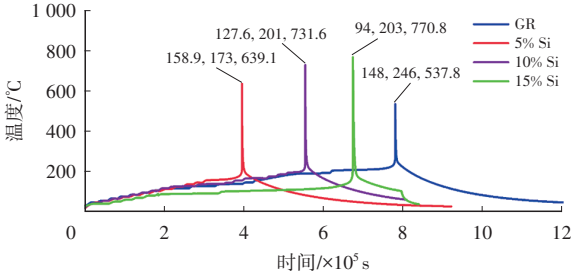


图4　石墨负极、5%硅负极、10%硅负极、15%硅负极电池的ARC试验热失控特征温度曲线

图5为ARC试验时电压变化曲线。试验中发现：在SiO_x质量分数为0%（GR）、第400 167 s时电池才开始出现微短路，此时电压降至3.96 V；到第774 130 s，电池则完全短路，此时电池内部的热量急剧增加，电压瞬间降至0.86 V。当SiO_x质量分数增加至5%时，电池发生短路时间有所提前，在第39 874 s时发生局部短路现象，至第394 577 s电池则完全短路，此时电压瞬间降低至0.34 V。当SiO_x质量分数增加至10%，第295 883 s时电池发生局部短路，电压开始降低，至第377 975 s电压降低为1.81 V，之后电压则出现一定的回升，这是电池内部温度增加导致电池发生极化的结果；但是紧接着在第553 381 s，电池则完全短路。当SiO_x质量分数达到15%、第561 s时电池出现间隙性短路，电压瞬间降低至0.86 V，之后又恢复至初始状态；在第652 549 s再次发生短路。通过绝热加热试验获取的电压信号变化分析发现：随着SiO_x质量分数的增加，电池短路时间逐渐提前，电池的安全性不断降低。

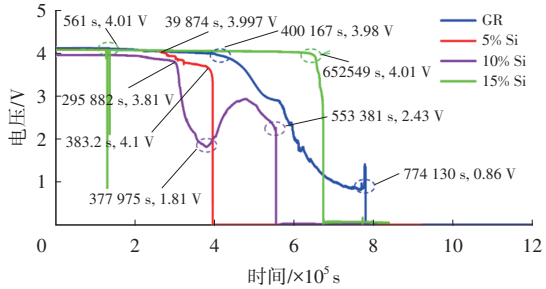


图5　石墨负极、5%、10%、15%硅负极电池ARC试验时电压变化曲线

由此可得，随着SiO_x含量从0%增至15%，T_1则由158.9 ℃降至94 ℃，试验结果表明：SiO_x硅含量增加加速了SEI膜分解，同时T_2与T_3也增高（如15% SiO_x电池T_3

达836.2 ℃）。

3.2 侧向加热试验热失控现象分析

锂离子电池工作过程中在受到各种滥用影响（如机械滥用、电滥用以及热滥用等）会诱发电池的热失控。高能量密度的硅基负极电池在汇聚大量热量时极易发生热失控。为此，本文通过侧向加热方法试验研究不同SiO_x质量分数的硅基负极电池在发生滥用时热失控过程与变化特征。

图6所示为硅基负极电池侧向加热过程的温度变化曲线，试验同样采用不同SiO_x质量分数的锂电池。在SiO_x质量分数为0%的石墨负极电池侧向加热时发现，从开始加热至电池发生热失控约为533 s，并且热失控最高温度T_3值是所有电池中最低的。当SiO_x含量为5%时，电池发生热失控的时间提前至111.8 s。随着SiO_x质量分数的增加，当SiO_x质量分数达到10%时，在第301.9 s电池即发生热失控，且热失控时间大幅度缩短，热失控的最高温度T_3值达956.8 ℃；在SiO_x质量分数为15%时，硅基负极电池的热失控最高温度T_3为1 003.5 ℃，远高于0%、5%、10% SiO_x的硅基负极电池。由此可见，随着硅含量SiO_x的增加，热失控最高温度T_3升高，且热失控发生时间显著缩短。

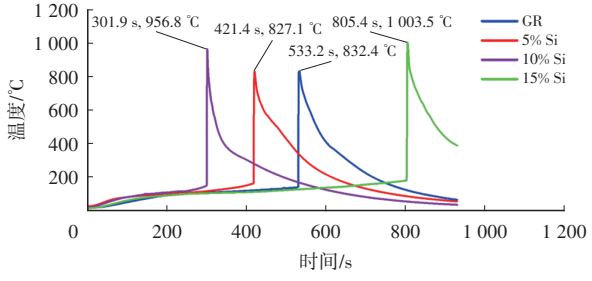


图6 不同SiO_x质量分数的硅基负极电池侧向加热过程中温度变化曲线

根据图7所示试验电池内部的电压变化可发现，SiO_x质量分数为0%的石墨负极电池在第487 s时即开始发生短路热失控，电压瞬间降低至0.03 V；5% SiO_x含量电池在第383.2 s时开始发生热失控，电压瞬间降低至0 V左右；10% SiO_x含量电池发生热失控时间则提前至第224 s，在第298 s则完全短路热失控，电压瞬间降低至0.01 V；15% SiO_x含量电池热失控时间有所延长，但其总体趋势基本一致。

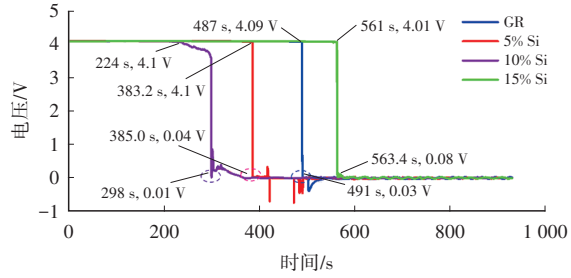


图7 不同SiO_x质量分数的硅基负极电池侧向加热过程的电压变化曲线

图8所示为不同SiO_x质量分数硅基负极电池热失控变化过程。石墨负极电池（0% SiO_x）在第487 s时，电池开始短路发生热失控，此时电池内部并没有产生大规模的放热反应。结合电压变化曲线可看出，在第491 s电池完全短路，此时内部出现强烈的放热反应，电池内部热量增加，至第530 s热量急剧增加，导致电解液大量挥发而呈现白烟；在第533 s，由大量白烟转为强烈的火焰喷燃，呈现完全热失控燃烧现象，直至第557 s电池内的活性物质由强烈燃烧转为微弱燃烧，其整个过程持续时间24 s（图8a）。

5% SiO_x质量分数的硅基负极电池在第383 s时开始短路，第385 s电池完全短路，第420 s有大量白烟从极耳处喷出，第421 s电池内部的可燃物燃烧喷发出剧烈的火焰，电池内部的活性物质与电解液在高温下生成的可燃物（如H_2、CH_4等）发生剧烈的火焰喷射；尽管在第3~85 s，电池内部电压已经降低至0 V左右，但直至第441 s电池才逐渐结束燃烧；从电池发生热失控至燃烧结束时间为20 s（图8b）。

同样，10%、15%SiO_x质量分数硅基负极电池发生短路热失控，直至电池内部出现白烟到产生剧烈的火焰喷射变化过程如图8c、图8d所示，电池发生热失控至燃烧



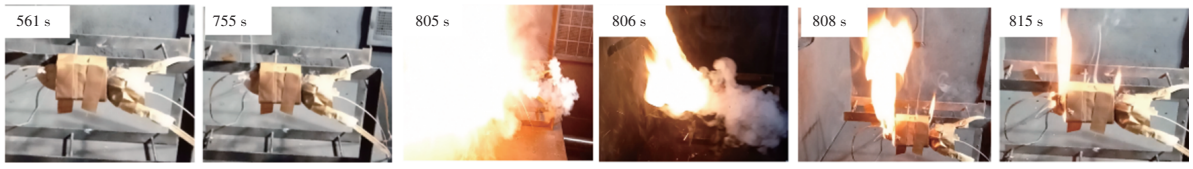
（a）GR



（b）5% SiO_x



（c）10% SiO_x



（d）15% SiO_x

图8　不同SiO_x质量分数的硅基负极电池侧向加热试验

结束时间分别为15 s、10 s。通过热失控时的喷发现象可以明显看出，15% SiO_x含量的负极电池火焰喷发更加急促，在发生剧烈喷发燃烧时电池内部的温度T_3高达1 003.5 ℃，远高于SEI膜的熔解温度（660 ℃）。

4　结束语

本文采用ARC与侧向加热试验方法，以NCM811为正极活性物质、SiO_x质量分数分别为0%、5%、10%、15%的负极活性物质的1 A·h软包动力电池及电池组为试验研究对象，开展了硅含量对软包动力电池热失控特征试验研究。研究结果如下：

a. 锂电池硅含量的提升尽管能提高电池能量密度，但电池的热失控风险增大。硅含量的增加会导致SEI膜热稳定性下降（T_1降低40.8%），加剧了热失控剧烈程度（在NCM811体系下，15% SiO_x电池T_3温度提升30.2%）；硅含量每增加5%，电池热失控发生的时间将缩短近20%，其中15% SiO_x质量分数锂电池热失控自开始到失控燃烧的时间为10 s。

b. 在侧向加热条件下，15% SiO_x电池热失控温度高出石墨负极电池热失控温度171.1 ℃，燃烧持续时间缩短58.3%（为10 s），表明高硅电池在提升电池能量密度时需要强化锂电池的热蔓延防护，需严格合理控制硅的含量。

c. 通过实践研究，本文建议工业界电池硅含量安全阈值需控制在10%及以下，使之在一定程度上平衡电池的能量密度与电池热稳定性及安全性问题。

本文试验研究是在未考虑电池循环老化对SEI膜的影响、未测试全电池级热失控情况下所完成的，在后续的研究中，将进一步完成其他有关的试验。为进一步提高硅基负极电池的热稳定性，建议可采用纳米硅碳复合、固态电解质等技术，以改善SEI膜的微观结构和热稳定性，提高电池的安全性。

参　考　文　献

[1] 魏一凡，韩雪冰，卢兰光，等. 面向碳中和的新能源汽车与车网互动技术展望[J]. 汽车工程，2022，44(4)：449-464.
WEI Y F，HAN X B，LU G L，et al. Prospects of New Energy Vehicle and Vehicle-to-Grid Interaction Technology for Carbon Neutrality[J]. Automotive Engineering，2022，44(4)：449-464.

[2] 陈汝颂. 先进电池体系的热失控机理与高安全电池设计[D]. 北京：中国科学院大学（中国科学院物理研究院），2022.
CHEN R S. Thermal Runaway Mechanism of Advanced Battery Systems and Design for High Safety Batteries[D]. Beijing：University of Chinese Academy of Sciences (Institute of Physics，Chinese Academy of Sciences)，2022.

[3] HOU C P，YUE Z Y，SUN H H，et al. The Facile Preparation and Performances of Prelithiated Silicon Oxide Anode Materials[J]. Journal of Materials Science：material in Electronics，2024，35：956.

[4] SKUNDIN A M，KULOVA T L. All-Solid-State Thin-Film Lithium-Ion Batteries：A Review[J]. Russian Journal of Electrochemistry，2025，60：1228-1242.

[5] CHUNG H，KIM J，BAE Y S，et al. Predictive Modeling of Lithium-Ion Battery Degradation：Incorporating SEI Layer Growth and Mechanical Stress Factors[J]. Journal of Mechanical Science and Technology，2024，38：6157-6167.

[6] HE Y L，XU P，JIANG D F，et al. Quantifying The Solid Electrolyte Interphase Stress Induced Capacity Fading of Lithium-Ion Batteries Via a Multiscale Mechanical-Electrochemical Coupling Model[J]. Science China Technological Sciences，2024，67：3168-3181.

[7] 杨井玉，侯果林，静若盈，等. 锂离子电池硅基阳极预锂化研究进展[J]. 化学试剂，2023，45(5)：120-129.
YANG J Y，HOU G L，JING R Y，et al. Research Progress on Pre-Lithiation of Silicon-Based Anodes for Lithium-Ion Batteries [J]. Chemical Reagents，2023，45(5)：120-129.

[8] WANG X，LIU H，PAN K，et al. Exploring Thermal Hazard of Lithium-Ion Batteries by Bibliometric

Analysis[J]. Journal of Energy Storage, 2023, 67: 107578.

[9] ZHANG J B, ZHONG A H, HUANG Z, et al. Experimental and Kinetic Study on The Stabilities and Gas Generation of Typical Electrolyte Solvent Components under Oxygen-Lean Oxidation and Pyrolysis Conditions[J]. Science China Technological Sciences, 2022, 65(12): 2883-2894.

[10] SUN T, WANG L Y, REN D S, et al. Thermal Runaway Characteristics and Modeling of $LiFePO_4$ Power Battery for Electric Vehicles[J]. Automotive Innovation, 2023, 6: 414-424.

[11] WANG Q S, MAO B B, STANISLAV I S, et al. A Review of Lithium Ion Battery Failure Mechanisms and Fire Prevention Strategies[J]. Progress in Energy and Combustion Science, 2019, 73: 95-131.

[12] ZHANG G X, CHEN X, MA Y L, et al. Recent Advances and Practical Challenges of High-Energy-Density Flexible Lithium-Ion Batteries[J]. Frontiers of Chemical Science and Engineering, 2024, 18: 91.

[13] KIM J Y, MALLARAPU A, FINEGAN D P, et al. Modeling Cell Venting and Gas-Phase Reactions in 18650 Lithium Ion Battery during Thermal Runaway[J]. Journal of Power Sources,2021, 489.

[14] LUO S Q, ZHAO E Y, GU Y X, et al. Flexible, Solid-State, Fiber-Network-Reinforced Composite Solid Electrolyte for Long Lifespan Solid Lithium-Sulfurized Polyacrylonitrile Battery[J]. Nano Research, 2022, 15(4): 3290-3298.

[15] MOSTAFA M E H, ALI M G. Thermal and Combustion Characteristics of Vent Gases from Lithium-Ion Battery Thermal Runaway: a Comprehensive Review[J]. Journal of Thermal Analysis and Calorimetry, 2025, 150: 13925-13952.

[16] 廉玉波, 凌和平, 王钧斌, 等. 基于混合高斯-隐马尔可夫模型的动力电池实时热失控检测[J]. 汽车工程, 2023, 45(01): 139-146.
LIAN Y B, LING H P, WANG J B, et al. Real-Time Thermal Uncontrolled State Detection of Batteries Based on Hybrid Gaussian-Hidden Markov Model[J]. Automotive Engineering, 2023, 45(1): 139-146.

[17] YAN J. Separator Coating for Lithium Metal Batteries: A Review[J]. Journal of Measurement Science and Instrumentation, 2023, 14(1): 95-102.

[18] International Electrotechnical Commission. Secondary Lithium-Ion Cell for the Propulsion of Electric Road Vehicles—Part 3: Safety requirements: IEC 62660-3: 2022[S]. Geneva, Switzerland: IEC: 2023.

[19] ZHANG Y, WANG H, YU H, et al. Influence of Cathode Materials on the Characteristics of Lithium-Ion Battery Gas Generation During Thermal Runaway[J]. Fire Technology, 2024, 61: 3935-3954.

[20] 许辉勇, 李远宏, 张志萍, 等. 硅基负极软包动力电池针刺热失控特性研究[J]. 储能科学与技术, 2021, 10(1): 218-228.
XU H Y, LI Y H, ZHANG Z P, et al. Research on the Thermal Uncontrolled Characteristics of Silicon-Based Negative Electrode Soft-Packaged Battery Cells under Pinching Test[J]. Energy Storage Science and Technology, 2021, 10(1): 218-228.

[21] 王莉, 冯旭宁, 薛钢, 等. 锂离子电池安全性评估的ARC测试方法和数据分析[J]. 储能科学与技术, 2018, 7(6): 1261-1270.
WANG L, FENG X N, XUE G, et al. The ARC Testing Method and Data Analysis for Safety Evaluation of Lithium-Ion Batteries[J]. Energy Storage Science and Technology, 2018, 7(6): 1261-1270.

[22] WANG Y, REN D S, FENG X N, et al. Thermal Runaway Modeling of Large Format High-Nickel/Silicon-Graphite Lithium-Ion Batteries Based on Reaction Sequence and Kinetics[J]. Applied Energy, 2022, 1.

[23] QI J Y, FANG R Q, LI Z. Design of Silicon-Based Porous Electrode in Lithium-Ion Batteries: Insights from Multiscale Electrode Model Simulations[J]. Journal of Energy Storage, 2024, 104.

[24] THOMBARE S, PATIL R, HUMANE R, et al. Exploring Silicon Nanoparticles and Nanographite-Based Anodes for Lithium-Ion Batteries[J]. Journal of Materials Science: Materials in Electronics, 2024, 35.

[25] ZHOU J J, LI B C, XIE L L, et al. Progress in Optimizing The Application Strategy of SEI Membranes for HC Sodium Ion Batteries[J]. Journal of Energy Storage, 2024, 104.

[26] LIANG Y, BURTON M, JAGGER B, et al. In Situ XPS Investigation of The SEI Formed on LGPS and LAGP with Metallic Lithium[J]. Chemical Communications, 2024, 60: 12597-12600.

[27] HYUNWOO C, JAEHYUN K, BAE Y S, et al. Predictive Modeling of Lithium-Ion Battery Degradation: Incorporating SEI Layer Growth and Mechanical Stress Factors[J]. Journal of Mechanical Science and Technology, 2024, 38: 6157-6167.

[28] KO C J, CHEN C H, CHEN K C. Influence of Inhomogeneity of Lithium-Ion Transport within The Anode/Electrolyte Interface on Mossy Lithium Formation[J]. Journal of Power Sources, 2023, 563.

[29] EBERT F, SPIELBAUER M, BRUCKMOSER M, et al. Simulation of Spatial Strain Inhomogeneities in Lithium-Ion-Cells Due to Electrode Dilation Dependent on Internal and External Cell Structures[J]. Journal of Energy Storage, 2022, 49.

[30] XU N B, SHI J W, LIU G P, et al. Research Progress of Fluorine-Containing Electrolyte Additive for Lithium Ion Batteries[J]. Journal of Power Sources Advances, 2021, 7.

[31] CHEN M T, JIANG Y L, HONG H F, et al. Salt-in-Metal-Assisted Formation of LiF-Rich Interphase for Lithium Metal Anodes[J]. Journal of Energy Storage, 2024, 101.

[32] NIE B S, DONG Y S, CHANG L. The Evolution of Thermal Runaway Parameters of Lithium-Ion Batteries under Different Abuse Conditions: A Review[J]. Journal of Energy Storage, 2024, 96.

[33] 金强. 基于FDMA基电解液的硅碳负极电池热失控抑制研究[D]. 重庆: 重庆交通大学, 2023.
JIN Q. Research on Thermal Runaway Suppression of Silicon-Carbon Anode Battery Based on FDMA-Based Electrolyte[D]. Chongqing: Chongqing Jiaotong University, 2023.

（责任编辑　天下溪）
修改稿收到日期为2026年9月8日。

《汽车文摘》征文

《汽车文摘》（月刊）于1963年7月3日创刊，由国务院国有资产监督管理委员会主管、中国第一汽车集团有限公司主办，为中国汽车工程学会会刊。《汽车文摘》以“览全球汽车技术文献，指中国汽车技术之道”为使命，以打造“中国汽车前沿与创新技术传播与交流的重要平台”为愿景，致力于成为汽车领域最具影响力的综述类期刊。

《汽车文摘》深耕电动化、智能化、网联化、共享化和智能制造5大方向和10大领域，聚焦新能源、燃料电池与混合动力汽车、智能网联汽车、氨氢融合零碳和碳中性燃料、汽车安全、健康与舒适、碳达峰与碳中和、生命周期评价（LCA）与技术经济分析、智能制造、材料轻量化与一体化压铸、飞行汽车前沿与创新技术综述论文，揭示相关领域的新动态、新趋势、新技术和新进展，为广大科研和工程技术人员进一步发展这一领域提供新突破口、新出发点和新基准。

欢迎高等院校师生、研发工程技术人员、技术管理人员，充分发挥专业领域优势，深度挖掘国内外高影响力学术期刊与其它文献，形成某个技术领域前沿综述。

《汽车文摘》选题范围：

电动化：混合动力关键技术；动力电池关键技术；先进充电技术；电驱动系统及电力电子技术；智能底盘及子系统线控关键技术；燃料电池动力系统设计与优化。

智能化：新型电子电气架构；自动驾驶感知、决策与运动控制；智能新能源汽车测试评价方法与工具链；车辆智能安全技术。

网联化：智能网联云控技术；车用通信及网络技术；车路协同技术；汽车人因、人机交互与智慧座舱；信息安全与预期功能安全；车网融合（V2G）及应用。

低碳化：汽车节能与排放技术；清洁能源动力系统技术；碳达峰、碳中和；氢燃料制、储、运、加及安全管控技术；生命周期评价（LCA）、标准法规与技术经济分析；氨氢融合零碳和碳中性燃料。

轻量化：新能源汽车新材料技术；混合材料轻量化设计；一体化压铸。

共享化：区块链技术与移动出行；车辆大数据挖掘方法与应用案例。

燃料电池：电池堆、电池系统与基础设施。

智能制造：机器人与自动化控制、四大工艺、物流技术、设计-制造-服务。

颠覆式出行：飞行汽车；未来低空智能交通体系及其关键技术。

汽车安全：主被动安全与融合；智能安全；健康与舒适。

《汽车文摘》发表论文的独特优势：

《汽车文摘》是国家级刊物、中国汽车工程学会会刊、汽车领域唯一的综述期刊。《汽车文摘》不收版面费、4个月左右可发稿。

投稿要求：

1. 综述篇幅在10 000～15 000字（6~10页），图文并茂，图、表和公式非原创要求标注引用文献；

2. 请按科技论文要求撰写文章摘要，摘要中文字数约200字；

3. 文章必须附有公开发表、体现本领域最新研究成果和高影响力出版物作为参考文献，一般要求参考文献在20篇以上，一半左右为外文参考文献，且在文中标注所引用文献；

4. 来稿保密审查工作由作者单位负责，确保署名无争议，文责自负；

5. 切勿一稿多投。

《汽车文摘》投稿网址：http://www.qcwz.cbpt.cnki.net

邮箱：autodigest@faw.com.cn

《汽车文摘》编辑部