储能XXXX

高压磷酸铁锂电池系统热失控电解液污染下的电弧触发与演化特性

顾江娜[1]，武士斌[2]，徐成善[3,4]
（[1]湖州耀宁固态电池研究院有限公司，浙江 湖州 313027；[2]河北工业大学电气工程学院，天津 300401；[3]清华大学车辆与运载学院，北京 100084；[4]清华大学智能绿色车辆与交通全国重点实验室，北京 100084）

摘 要：高压车载动力电池系统及储能电池系统热失控过程中泄漏或喷发的电解液可能进入模组或电池簇内部带电间隙，削弱原有绝缘环境并诱发二次电弧故障，严重威胁电池系统安全。为探究电解液诱发电弧的演化规律与临界条件，本研究基于电解液诱发电弧的实验平台，系统开展了电解液诱发电弧实验。实验采用磷酸铁锂电池的电解液，研究了不同电极材料组合、电极间距及施加电压对电解液诱发电弧行为的影响，进一步分析了电解液组分和电导率与电弧诱发之间的关系。结果表明，电解液可显著降低电弧临界触发电压。铝-铝电极组合在9 mm间距下电解液诱发电弧的临界触发电压低至280 V，远低于电池系统620 V的额定电压。电解液诱发电弧过程主要表现为电解液蒸发、沿面爬电、电弧产生和电弧熄灭等阶段。随着电极间距增大，电弧临界触发电压整体升高，且铜-铝电极组合较铝-铝电极组合更易触发电弧。此外，纯溶剂或纯锂盐因不具备导电能力从而无法诱发电弧。基于8种电导率为0.17~13.45 mS/cm的样品，建立了同时考虑电导率与电极间距的经验关系；铝-铝和铜-铝电极组合的整体拟合优度R^2分别为0.90和0.91，表明该关系可以描述临界触发电压的变化趋势。本研究阐明了电解液诱发电弧的演化过程与主要影响因素，可为高压电池系统热失控后二次电弧灾害防护设计提供参考。

关键词：高压电池系统；锂离子电池；热失控；电解液；电弧
doi：10.19799/j.cnki.2095-4239.2026.0650
中图分类号：TK 02　　文献标志码：A　　文章编号：2095-4239（XXXX）XX-1-13

Triggering and evolution characteristics of arcs under thermal-runaway electrolyte contamination in high-voltage $LiFePO_4$ battery systems

GU Jiangna[1], WU Shibin[2], XU Chengshan[3,4]
([1]Huzhou Yoening Solid State Battery Research Institute Co., Ltd., Huzhou 313027, Zhejiang, China; [2]School of Electrical Engineering, Hebei University of Technology, Tianjin 300401, China; [3]School of Vehicle and Mobility, Tsinghua University, Beijing 100084, China; [4]State Key Laboratory of Intelligent Green Vehicle and Mobility, Tsinghua University, Beijing 100084, China)

Abstract: During thermal runaway in high-voltage automotive traction battery systems and energy storage battery systems, leaked or ejected electrolyte may enter energized gaps within

收稿日期：2026-07-24；修改稿日期：2026-10-01。
基金项目：国家自然科学基金（52506255）；清华大学智能绿色车辆与交通全国重点实验室自主研究课题（ZZ-PY-20250109）；北京“高创计划”-青年人才托举工程（20250923）。
第一作者：顾江娜（1989—），女，硕士研究生，中级工程师，电池系统热安全，E-mail：JiangNa.Gu@geely.com；通信作者：徐成善（1993—），男，博士，助理研究员，研究方向为动力及储能电池系统失效机理、建模和安全设计，E-mail：xcs_pcg@mail.tsinghua.edu.cn。
引用本文：顾江娜, 武士斌, 徐成善. 高压磷酸铁锂电池系统热失控电解液污染下的电弧触发与演化特性[J]. 储能科学与技术, XXXX, XX(XX): 1-13.
Citation: GU Jiangna, WU Shibin, XU Chengshan. Triggering and evolution characteristics of arcs under thermal-runaway electrolyte contamination in high-voltage $LiFePO_4$ battery systems[J]. Energy Storage Science and Technology, XXXX, XX(XX): 1-13.

battery modules or battery clusters, degrade the original insulation environment, and induce secondary arcing faults, thereby posing a serious threat to battery system safety. To investigate the evolution characteristics and critical conditions of electrolyte-induced arcing, an experimental platform was established and systematic tests were conducted. The electrolyte from lithium iron phosphate batteries was used, and the effects of different electrode material combinations, electrode gaps, and applied voltages on electrolyte-induced arcing behavior were examined. The relationship between electrolyte composition, ionic conductivity, and arc initiation was further analyzed. The results show that the presence of electrolyte can significantly reduce the critical arc initiation voltage. For the aluminum-aluminum electrode combination, the critical voltage for electrolyte-induced arcing was as low as 280 V at an electrode gap of 9 mm, which is much lower than the rated voltage of 620 V for the battery system. The electrolyte-induced arcing process mainly consisted of electrolyte evaporation, surface tracking, arc ignition, and arc extinction. As the electrode gap increased, the critical arc initiation voltage generally increased. In addition, the copper-aluminum electrode combination was more prone to arc initiation than the aluminum-aluminum combination. Pure solvent or pure lithium salt could not induce arcing because they lacked sufficient electrical conductivity. Moreover, based on eight electrolyte samples with conductivities ranging from 0.17 to 13.45 mS/cm, an empirical relationship incorporating both electrolyte conductivity and electrode spacing was established. The overall coefficients of determination, R^2, were 0.90 and 0.91 for the aluminum–aluminum and copper-aluminum electrode combinations, respectively, indicating that the proposed relationship can effectively describe the variation trend of the critical arc triggering voltage. This study clarifies the evolution process and key influencing factors of electrolyte-induced arcing, and provides a reference for the protection design against secondary arcing hazards after thermal runaway in high-voltage battery systems.

Keywords: high-voltage battery system; lithium-ion battery; thermal runaway; electrolyte; arc

锂离子电池因具有高能量密度、长循环寿命和低自放电率等优势，已广泛应用于电化学储能系统和电动汽车中[1-4]。然而，随着电池系统能量密度和集成规模不断提高，热失控引发的火灾、爆炸及有毒可燃气体释放等安全问题日益突出，已成为制约锂离子电池大规模应用的重要因素[5-9]。导致锂离子电池热失控的安全隐患主要分为三类：热滥用、电滥用和机械滥用[10-12]。针对上述滥用的情况，可采用电池材料的改进[13-14]、增强的热管理[15-17]、稳健的热屏障[18-19]、电池状态监测与健康预测[20-21]以及抑制锂枝晶生长[22]等方法进行抑制。

热失控不仅会引发火灾、爆炸等热安全问题，随着储能系统和电动汽车电压平台持续提升，其伴生的电气安全风险也日益突出。其中，直流电弧故障由于缺少自然过零点，具有持续燃烧、高温烧蚀和能量释放集中的特点，一旦发生在电池系统内部或邻近区域，可能造成绝缘材料破坏、金属连接件熔融、电池外壳损伤甚至热失控扩展[23-24]。因此，电弧故障已成为高压电池系统内导致电池失效和热失控的新风险因素，对电池系统安全设计构成重大挑战。

电池系统内电弧的产生通常与喷发物质污染、绝缘失效和结构变形等因素密切相关[25]。热失控喷发物质污染是诱发二次电弧的重要途径。热失控过程中喷出的高温气体、固体颗粒和液态电解液可能进入电池模组或电池簇内部的高压电气间隙，改变原有空气介质的绝缘状态[26-27]。其中，固体颗粒沉积后可能形成局部导电桥接或增强电极边缘电场畸变，降低间隙击穿阈值；液态电解液则兼具导电性、流动性和润湿性，可在极片、汇流排、连接件

及绝缘材料表面形成液膜或液桥，从而改变局部电场分布和电流传导路径，显著降低电弧触发阈值[28-33]。因此，喷发物质并非仅作为热失控的伴生产物存在，而可能直接参与高压系统中电气间隙的击穿过程，成为二次电弧形成的关键介质。

结构变形是热失控诱发电弧的重要因素。电池在热失控过程中会出现产气膨胀、壳体鼓胀、泄压阀开启、连接件受热变形以及模组结构移位等现象。这些结构变化可能减小正负极、汇流排、电池壳体及连接端子之间的有效电气间距，甚至造成带电金属部件暴露或相互靠近，从而导致局部电场强度升高[24]。当电气间隙进一步缩短或接触界面发生松动时，可能形成接触电弧。由此可见，结构变形并不仅是热失控后的机械损伤结果，也可能通过改变电气间距和接触状态参与电弧触发过程。

绝缘失效会显著提高电池系统内部电弧发生概率。储能电池系统内部通常依赖绝缘膜、结构胶、隔热材料、套管及电气安全间隙实现带电部件之间的隔离。然而，热失控释放的高温气体、火焰、熔融物和腐蚀性产物会导致绝缘材料发生热老化、烧蚀、开裂甚至碳化，使其绝缘电阻下降并形成局部导电路径。当绝缘结构被破坏后，原本满足安全要求的电气间距可能低于临界击穿距离，进而发生气体介质击穿、沿面放电或持续电弧[25]。

综上，喷发物质污染、绝缘失效和结构变形并不是相互独立的电弧诱因，而是在热失控过程中相互耦合、共同作用：喷发物质改变局部介质环境，绝缘失效削弱电气隔离能力，结构变形缩短有效安全间距，最终导致高压电池系统更容易发生二次电弧故障。实际热失控喷发物由气、液、固多相组分构成。可燃气体及挥发出的有机蒸气可能改变间隙局部气氛，并在已有点火源或电弧形成后参与燃烧和能量释放；固体颗粒沉积则可能改变表面电场与导电路径。上述过程可能与液态电解液形成的液膜导电、焦耳热蒸发和沿面放电相互耦合。已有研究主要集中于热失控喷发颗粒物诱发电弧以及安全阀、极柱等典型位置的电弧行为，而对电解液作为介质诱发电弧时，电导率与电极间距耦合作用下临界触发边界的系统量化仍有限。对于磷酸铁锂电池系统，喷发的主要物质是电解液，因此研究电解液诱发电弧的特性与机理，阐明其触发电弧的临界电压，对电池系统的安全设计具有重要意义。本文围绕工程触发边界开展研究：（1）比较铝-铝与铜-铝电极组合在1~9 mm间距下的临界触发电压；（2）利用0.17~13.45 mS/cm的8种样品定量分析电导率影响，并建立含间距修正项的经验关系。为探究液态电解液本身对绝缘表面污染和沿面放电的影响，本文在未引入受控气体和固体颗粒的条件下开展简化实验。因此，本文结果表征的是液相电解液污染路径，不能据此排除或定量评价实际热失控喷发气体对电弧触发与维持的影响。

1 电解液诱发电弧实验

1.1 电解液诱发电弧实验平台

本研究基于诱发电弧的专用实验平台展开[25]，如图1所示。该平台主要由直流电源、保护电阻、霍尔电流传感器、高精度数据存储记录仪、电弧发生区组成，并用摄像机全程记录实验过程。其中，直流电源用于模拟电池系统内部的高压直流环境，型号为安耐斯ANT100060D-Z高频开关电源，输出电流范围为0~60 A连续可调，输出电压范围为0~1000 V连续可调，可覆盖LFP电池系统高压运行环境。保护电阻的阻值范围为0~30 Ω，主要用于限制回路电流，避免电流过大造成实验设备损坏。电流测量采用定制霍尔电流传感器，量程为50 A，可满足电解液诱发电弧过程中瞬态电流采集需求。高精度数据存储记录仪采用HIOKI MR6000，用于同步采集实验过程中的电压、电流和温度信号，最高采样频率为200 Hz，并具备多通道同步采集与实时存储功能。实验过程中，摄像机用于全程记录电弧发生区的宏观现象，以便与电压、电流和温度信号进行对照分析。

针对电解液诱发电弧实验，经过前期调研与筛选，本研究选用电工木作为电弧发生区的结构材料。电工木具有较好的耐高温性能和电绝缘性能，能够满足实验过程中对支撑结构稳定性和绝缘性的要求。为实现电解液的定量存储及其与电极的稳定接触，在电工木平台中央加工深度为1.5 mm的凹槽，用于容纳电解液并限制其流动范围。凹槽两侧设置极片放置区域，并设计为斜面结构，使极片能够沿斜面伸入凹槽内部，其端部与凹槽内电解液充分接触，从而模拟热失控后电解液泄漏或喷发并浸润高压带电间隙的状态。凹槽宽度可根据实验需求进行调节，以实现对两极片之间有效间距的精确控

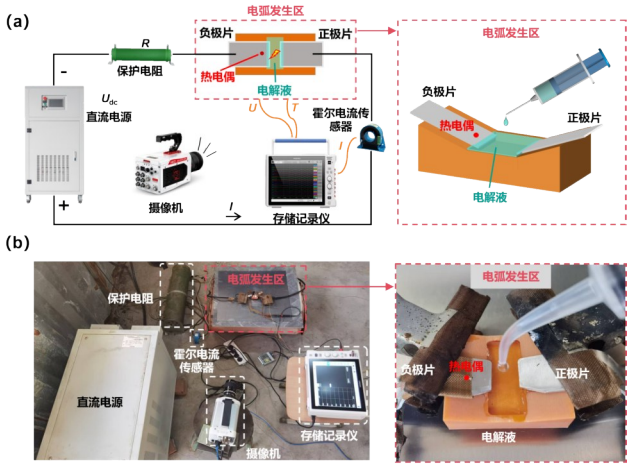


图1 电解液诱发电弧实验平台；(a) 实验平台示意图；(b) 实验平台实物图

Fig. 1 Experimental platform for electrolyte-induced arc; (a) schematic diagram of the experimental platform; (b) photograph of the experimental platform

制。此外，将热电偶布置于负极侧、距电弧发生区域约5 mm的位置，用于监测电弧诱发过程中电极附近的温度变化。

1.2 电解液诱发电弧实验设置

本实验所采用的极片材料为铝和铜，均为实际电池系统内部常用的电气连接材料。实验装置可对两极片之间的间距进行调节，以满足不同实验工况下对极间距离这一关键变量的控制需求。本实验所用电解液取自0% SOC、额定容量为122.7 Ah的LFP电池。电解液样品均从电池中现场提取，以保证样品状态接近实际电池系统中的电解液状态，采用斜口钳剪开电芯壳体，并从形成的豁口处收集内部液态电解液，收集后的样品置于密闭容器中并于室温条件下保存，随后用于电解液诱发电弧实验。实验过程中，每组实验均使用新的电解液样品，并采用注射器向电工木凹槽内缓慢注入电解液。由于实验凹槽宽度随电极间距变化，为保证不同工况下电解液与电极的接触状态一致，本文不以固定注入体积作为控制条件，而以电解液完全填满凹槽、液面连续且能够同时与两端电极稳定接触作为统一的注液判据。每次实验结束后均更换新的电解液样品及电弧发生区相关材料，避免前次实验产生的碳化、烧蚀及残余电解液对后续实验结果造成影响。实验均在同一实验室常温环境下进行，实验过程中保持场地相对封闭、无明显气流扰动和阳光直射，并保证照明条件基本一致。

由于电解液具有流动性和导电性，电极通电后，电解液会在电场作用下形成电流通路，并因焦耳热效应迅速升温、蒸发，短时间内颜色变为棕色。由于电解液在一次通电后即发生不可逆变化，无法在后续电压条件下继续作为有效样品进行重复验证。因此，本实验无法采用电压阶梯逐级升高的方法，而采用“一组实验施加一组电压”的测试方案：每一工况分别开展3组独立测试，每组均采用新的电解液样品，并按5 V步长逐级提高不同组实验的固定施加电压，直至观察到电弧触发。当V_c下3次实验均触发电弧，而V_c-5下3次实验均未触发电弧时，将V_c定义为该工况下的临界触发电压。由于电压调节步长为5 V，本文临界触发电压的实验判定分辨率为5 V。

为系统分析电解液诱发电弧的影响因素，本研究采用控制变量法，重点考察电极材料组合和电极间距对临界触发电压的影响规律。具体实验方案及变量组合如表1所示。

表1 电解液诱发电弧实验方案

Table 1 Experimental scheme of electrolyte-induced arc

电极材料	样品	电极间距/mm	保护电阻/Ω
铝正极-铝负极	LFP电解液	1，3，5，7，9	20
铜正极-铝负极	LFP电解液	1，3，5，7，9	20

在实验变量设置方面，采用铝正极-铝负极组合以及铜正极-铝负极组合开展对比实验。电极间距设置为1、3、5、7、9 mm。

2 结果与讨论

2.1 电解液诱发电弧实验现象

图2展示了电解液诱发电弧过程中的典型实验现象及对应的电压、电流和温度变化。本节以铝正极-铝负极组合、电极间距为5 mm的实验工况为例进行说明。在实验初始阶段，电极间未施加电压，电解液稳定存在于电工木凹槽内，无明显放电现象。第10 s时，开启直流电源并施加230 V电压，电极边缘出现微弱的局部火花放电，此时并未形成稳定的电弧放电。由于电解液具有一定离子导电能力，通电后回路中出现微小的泄漏电流，电解液在焦耳热作用下开始升温并蒸发，实验现象表现为凹槽区域产生大量白色烟气。该阶段电压基本维持在

外加电压附近，电流较小且波动不明显，说明此时尚未形成贯通的电弧通道，电解液主要处于受热蒸发和局部导电阶段。随着通电时间延长，电解液持续蒸发并使电工木表面逐渐受到污染和热作用影响。在第19 s左右，绝缘底座表面出现明显的高亮爬电通道，表明电极间局部绝缘状态已被破坏，放电过程由单纯的电解液导电和蒸发逐渐转变为沿面放电发展阶段。该阶段虽然尚未形成稳定电弧，但放电路径已开始向两极之间扩展，为后续电弧贯通提供了条件。当时间达到约25 s时，爬电通道进一步发展并连通两侧极片，电极间瞬间发生剧烈电弧放电。此时实验现象表现为强烈弧光和明火，电压出现明显下降，电流迅速升高并产生剧烈波动，说明电极间已形成低阻放电通道。与此同时，热电偶记录到测点温度快速上升，采集到的最高温度达到855℃。由于测温点距离电弧中心约5 mm，实际电弧核心区域温度会远高于测点温度，说明电解液诱发电弧具有强烈的局部热效应。电弧发生后持续燃烧约8 s，随后切断电源，电弧迅速熄灭。断电后残余火焰仍短时间存在，直至剩余电解液基本耗尽。实验结束后可以观察到，电极表面出现明显烧蚀和熔融痕迹，电工木表面也出现明显的碳化痕迹，说明电解液诱发电弧不仅会造成强烈热释放，还会导致电极材料和绝缘结构损伤。电工木本身具有较好的耐高温性能和电绝缘性能，但在电弧作用下仍出现明显碳化失效，由此可见，当电池系统内部绝缘材料受到电解液污染并发生电弧后，其绝缘防护能力可能迅速下降。

2.2 电解液诱发电弧机理分析

根据实验现象及电解液诱发电弧过程，可以将其基本机理概括为电解液污染介质、沿面爬电发展和电弧发生三个阶段，如图3所示。正常情况下，电池系统内正负极之间主要依靠空气间隙和绝缘结构进行电气隔离，带电部件之间能够保持较高的绝缘强度。当电池发生热失控、电解液泄漏或喷发后，液态电解液可能进入正负极之间的电气间隙，并浸润绝缘材料、极片或连接件表面，使原本干燥、清洁的绝缘环境转变为被电解液污染的介质环境。

电解液中含有锂盐和有机溶剂，具有一定的导电能力。当其附着在电极之间或绝缘材料表面时，会削弱原有绝缘结构的电气隔离作用，使泄漏电流

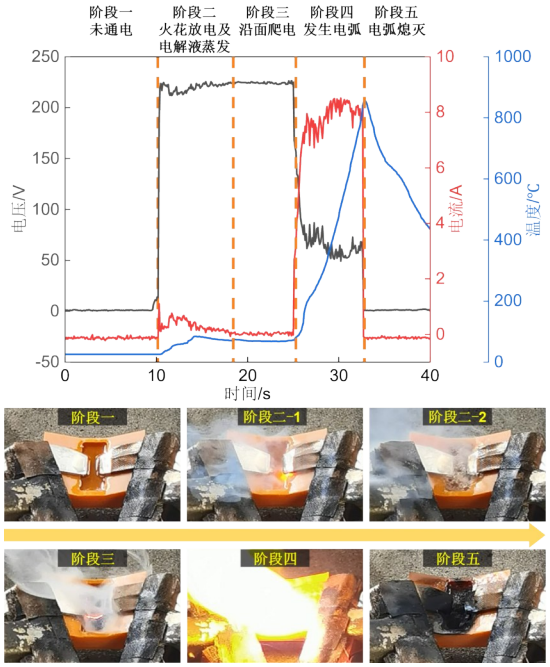


图2 电解液诱发电弧实验现象

Fig. 2 Experimental phenomena of electrolyte-induced arc

沿电解液浸润区域或绝缘材料表面发展，从而形成沿面爬电现象。随着通电过程持续，电解液及其接触区域温度升高，电解液发生蒸发，绝缘材料表面也可能出现烧蚀和碳化现象，使表面绝缘性能进一步下降。

在电场和热作用的共同影响下，沿面爬电路径逐渐向两侧电极延伸，并可能在被污染和碳化的绝缘表面形成连续导电通道。当该通道进一步发展并连接正负极时，电极间形成低阻放电路径，沿面爬电过程便会转变为明显的电弧放电。电弧形成后，会伴随强烈弧光、局部高温、燃烧及电极烧蚀等现象，并进一步加剧绝缘材料损伤，最终导致绝缘失效。

综上，电解液诱发电弧的本质在于电解液改变了电极间原有的绝缘环境。电解液的导电性、流动性和润湿性使其能够附着并扩散于绝缘表面，降低局部绝缘强度；而通电后的局部发热、蒸发和碳化又会进一步促进沿面爬电通道发展，最终导致电弧贯通。因此，热失控过程中电解液泄漏或喷发不仅会带来燃烧风险，也可能显著增加高压电池系统二次电弧故障风险。

2.3 电解液诱发电弧实验结果

基于上述实验方案，本研究对不同电极材料组



图3 电解液诱发电弧机理图

Fig. 3 Mechanism diagram of electrolyte-induced arc

合和不同电极间距条件下的电解液诱发电弧临界触发电压进行了测试，结果如图4（a）所示。结果表明，在所有实验工况下，电解液诱发电弧的临界触发电压均明显低于LFP电池系统620 V的额定电压。这说明当电池系统发生电解液泄漏或热失控喷发后，若电解液进入高压带电间隙并浸润电气连接结构，即使系统仍处于正常工作电压范围内，也可能满足电弧触发条件，从而增加热失控后二次电气故障风险。为验证临界触发电压判定结果的重复性，分别在10个工况对应的临界触发电压V_c和低一级电压V_c-5下进行了3次重复实验。结果表明，各工况在V_c下的30次实验均成功触发电弧，而在V_c-5下的30次实验均未触发电弧。因此，在本文实验条件和5 V电压判定分辨率下，各工况的临界触发电压判定结果具有较好的一致性。各工况的重复性验证结果见表2及图4（b）。

从电极间距的影响来看，电解液诱发电弧的临界触发电压随电极间距增大而整体升高。当电极间距较小时，两种电极材料组合对应的临界触发电压差异较小；随着电极间距逐渐增大，铝-铝电极组合与铜-铝电极组合之间的差异逐渐显现。以9 mm电极间距为例，铝-铝电极组合的临界触发电压为280 V，仍远低于电池系统额定电压。该结果表明，电极间距是影响电解液诱发电弧临界触发条件的重要因素，增大电极间距能够在一定程度上提高电弧触发电压。

表2 各工况临界触发电压的重复性验证结果

Table 2 Repeatability verification of the critical arc initiation voltages

电极间距/mm	电极组合	V_c-5/V	拉弧次数	V_c/V	拉弧次数
1	铝-铝	190	0/3	195	3/3
1	铜-铝	190	0/3	195	3/3
3	铝-铝	195	0/3	200	3/3
3	铜-铝	195	0/3	200	3/3
5	铝-铝	225	0/3	230	3/3
5	铜-铝	220	0/3	225	3/3
7	铝-铝	235	0/3	240	3/3
7	铜-铝	230	0/3	235	3/3
9	铝-铝	275	0/3	280	3/3
9	铜-铝	255	0/3	260	3/3

从电极材料组合的影响来看，铜-铝电极组合的临界触发电压整体低于铝-铝电极组合，说明铜-铝组合在电解液浸润条件下更容易发生电弧放电。这可能与不同金属材料表面状态、导电特性以及与电解液接触后的局部电流分布差异有关。对于实际电池系统而言，铜、铝材料均广泛存在于极片、汇流排和连接结构中，因此在电解液泄漏或喷发后，不同金属连接部位均可能成为电弧触发的薄弱区域。

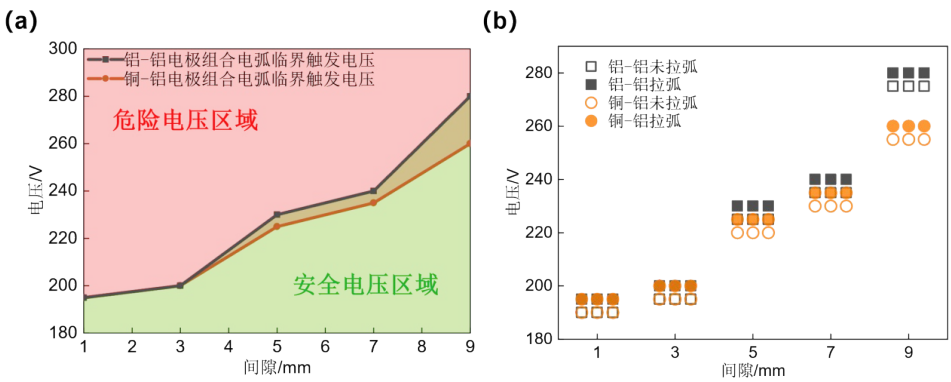


图4 电解液诱发电弧临界触发电压曲线图与重复性验证结果；(a) 临界触发电压曲线图；(b) 重复性验证结果

Fig. 4 Critical triggering voltage curves and repeatability verification results of electrolyte-induced arc; (a) critical triggering voltage curves; (b) repeatability verification results

为进一步分析施加电压对电解液诱发电弧过程的影响，以铝-铝电极组合、电极间距9 mm工况为例开展不同电压条件下的对比实验，如图5所示。该工况下电解液诱发电弧的临界触发电压为280

V。当施加电压为200 V时，实验过程中仅出现较弱电流响应，未发生明显电弧放电；当施加电压达到280 V及以上时，电解液均能够成功诱发电弧。随着施加电压由280 V升高至400 V和500 V，通电瞬间的峰值电流逐渐增大，表明较高电压会增强电解液初始导电响应，使通电初期电流响应增强。

不同电压条件下，电弧孕育时间也表现出明显差异。280 V条件下，电弧孕育时间约为19.1 s；当电压升高至400 V时，孕育时间缩短至约2.4 s；当电压进一步升高至500 V时，孕育时间缩短至约1.9 s。由此可见，施加电压升高后，电弧孕育时间明显缩短，这可能与初始电流响应和局部发热增强有关。在实际LFP电池系统高压运行条件下，一旦电解液泄漏并浸润高压电气结构，电弧可能在较短时间内被触发，给系统安全防护和故障响应提出更高要求。

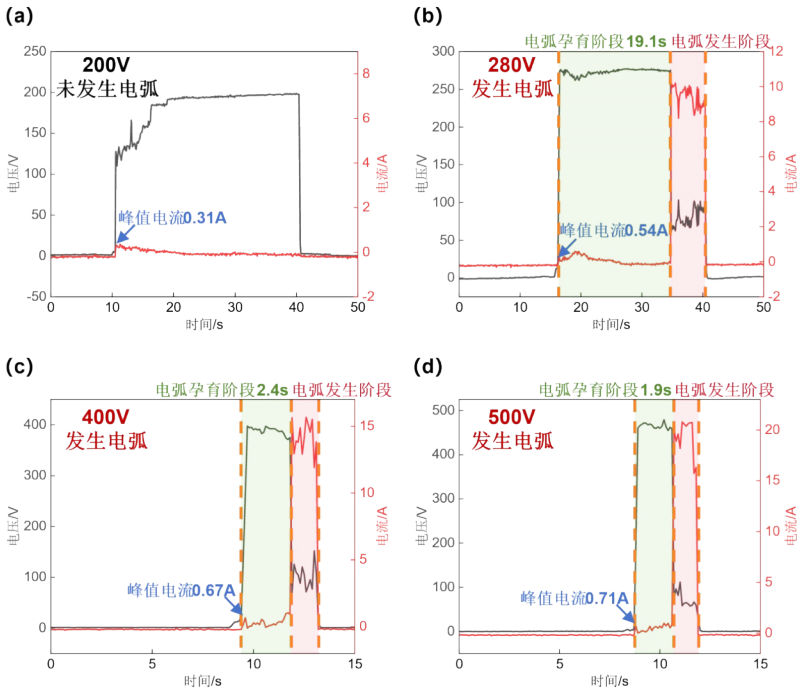


图5　不同电压下电解液诱发电弧演化规律

Fig. 5　Evolution law of electrolyte-induced arc under different voltages

图6进一步统计了不同电极间距下电解液诱发电弧的特征参数变化规律。其中，图6（a）（b）为不同电极间距对应的电弧电压和电弧电阻统计结果，图6（c）（d）为各实验工况在电弧发生阶段的平均功率及测温点平均温升速率，图6（e）（f）为不同电极间距下电弧阶段的温度变化曲线。其中电弧阶段电压和电流分别记为U和I，电弧发生阶段电阻R及功率P的计算公式如式（1）（2）所示。

$$R = \frac{U}{I} \tag{1}$$

$$P = UI \tag{2}$$

由图6（a）（b）可知，随着电极间距增大，两种电极组合的电弧电压和电弧电阻整体呈上升趋势。这说明电极间距增大后，电弧通道长度增加，维持电弧所需的电压提高，同时放电通道的等效阻抗也相应增大。此外，较大间距下电压和电阻的波动范围更宽，表明电解液诱发电弧在大间距工况下更容易受到液膜断续、蒸发过程和弧根位置变化等因素影响。

由图6（c）（d）可知，各实验工况下电弧发生阶段的平均功率和测温点平均温升速率整体随电极间距增大而升高。对于铝-铝电极组合，平均温升速率由1 mm间距下的41.47℃/s提高至9 mm间距下的105.94℃/s；对于铜-铝电极组合，平均温升速率由1 mm间距下的46.44℃/s提高至9 mm间距下的98.26℃/s。该结果表明，电弧阶段平均功率越高，单位时间内向电极及周围区域释放的热量越多，局部温度上升越快。

图6（e）（f）中的温度曲线进一步表明，较大

电极间距下温度上升更为迅速，电弧热效应更强。综合来看，电极间距增大虽然会提高电解液诱发电弧的临界触发电压，但一旦电弧形成，其电弧电压、电弧电阻和平均功率均有所提高，并导致更高的平均温升速率，说明大间距工况下电弧形成后的局部升温效应更强。

为进一步分析电弧输入功率与局部温度响应之间的关系，本文以30次独立成功拉弧数据为统计对象。对于每次试验，以电压明显下降且电流同步升高的时刻作为电弧阶段起始时刻t_1，以电弧熄灭前最后一个有效采样时刻作为结束时刻t_2。电弧阶段平均功率$\overline{P}$和5 mm测点平均温升速率v_T分别定义为：

$$\overline{P} = \frac{1}{t_2 - t_1}\int_{t_1}^{t_2} U(t)\, I(t)\, dt \tag{3}$$

$$v_T = \frac{T(t_2) - T(t_1)}{t_2 - t_1} \tag{4}$$

式中，U（t）和I（t）分别为电弧阶段同步采集的电压和电流，T（t_1）和T（t_2）分别为电弧开始和结束时5 mm测点的温度。对30组实验数据进行线性回归后，平均功率与平均温升速率满足：

$$v_T = 0.112\overline{P} + 14.1 \tag{5}$$

拟合优度为R^2=0.387，Pearson相关系数为r=0.622，且p<0.001。结果表明，电弧阶段平均功率与局部平均温升速率之间呈正相关，该结果反映的是二者之间的经验关联，不能据此推断直接因果关系，因为测点温升还受到电弧持续时间、电极间距、电极组合、弧根位置和传热路径等因素影响。

此外，将温度信号出现可识别升高的时刻t_T与电弧起始时刻t_{arc}之差定义为综合观测滞后：

$$\Delta t_{lag} = t_T - t_{arc} \tag{6}$$

30次试验的综合观测滞后平均为0.12±0.1 s，中位数为0.10 s。由于温度信号采样间隔为0.1 s，该结果已接近测试系统的时间分辨率，因此仅表明5 mm测点相对于电弧电信号存在约0.1 s量级的短时响应延迟，不能等同于热电偶自身的响应时间。热电偶的动态响应还可能使温度变化起点和峰值出现时间滞后，并使瞬态峰值温度及温升速率产生一定衰减。

2.4 电解液电导率对电弧影响分析

电解液是锂离子电池中实现离子传输的关键介质，其导电能力主要来源于锂盐在有机溶剂中的溶解与离解。在电池正常工作状态下，电解液被密封于电芯内部，用于维持正负极之间的离子传输；当电池发生热失控、机械损伤或密封失效时，泄漏或喷发出的电解液可能进入电池系统内部的高压电气间隙，并在带电部件之间形成液膜或液桥。此时，电解液的离子导电性会促使电极间产生泄漏电流，进而通过焦耳热作用引发蒸发、爬电和电弧放电。因此，电解液电导率是影响电弧触发条件的重要因素之一。

为进一步分析电解液组分及电导率对电弧诱发行为的影响，本研究选取两种典型锂离子电池电解液作为对比样品。其中，电解液A由DMC、EMC和EC按体积比1∶1∶1混合，并添加1 mol/L $LiPF_6$；电解液B由EMC和EC按体积比7∶3混合，同样添加1 mol/L $LiPF_6$。两种电解液在溶剂组成和电导率上存在差异，可用于对比分析电导率变化对电弧临界触发电压的影响。

同时，为明确电解液中溶剂和锂盐组分在电弧诱发过程中的作用，进一步设置纯溶剂和纯$LiPF_6$样品作为对照组。通过对完整电解液、纯溶剂及纯锂盐样品分别开展电弧诱发实验，可判断电弧触发是否依赖于溶剂与锂盐共同形成的离子导电体系。具体实验样品、极片材料、电极间距及电导率参数如表3所示。

为获得不同样品的电导率参数，本研究采用梅特勒-托利多（METTLER TOLEDO）公司生产的SevenCompact™ S230型台式电导率仪对各实验样品进行测试。测试过程中，每种样品均独立测量三次，并取三次测量结果的算术平均值作为该样品的最终电导率，以减小环境温度波动、样品挥发及电极接触状态差异等因素对测量结果的影响。

电导率测试结果表明，电解液A和电解液B均具有明显的离子导电能力，其中电解液A的电导率为11.24 mS/cm，高于电解液B的9.38 mS/cm。而纯溶剂和纯$LiPF_6$样品的电导率均处于仪器难以有效检测的水平，说明单独的有机溶剂或锂盐并不能形成有效的离子导电通路。完成电导率表征后，分别对上述样品开展电解液诱发电弧实验，以进一步分析电解液组分和电导率对电弧临界触发电压的影响。

图7展示了电解液A和电解液B在不同电极材料组合及不同电极间距条件下的电弧临界触发电压变化规律。由图可知，两种电解液均表现出相似的

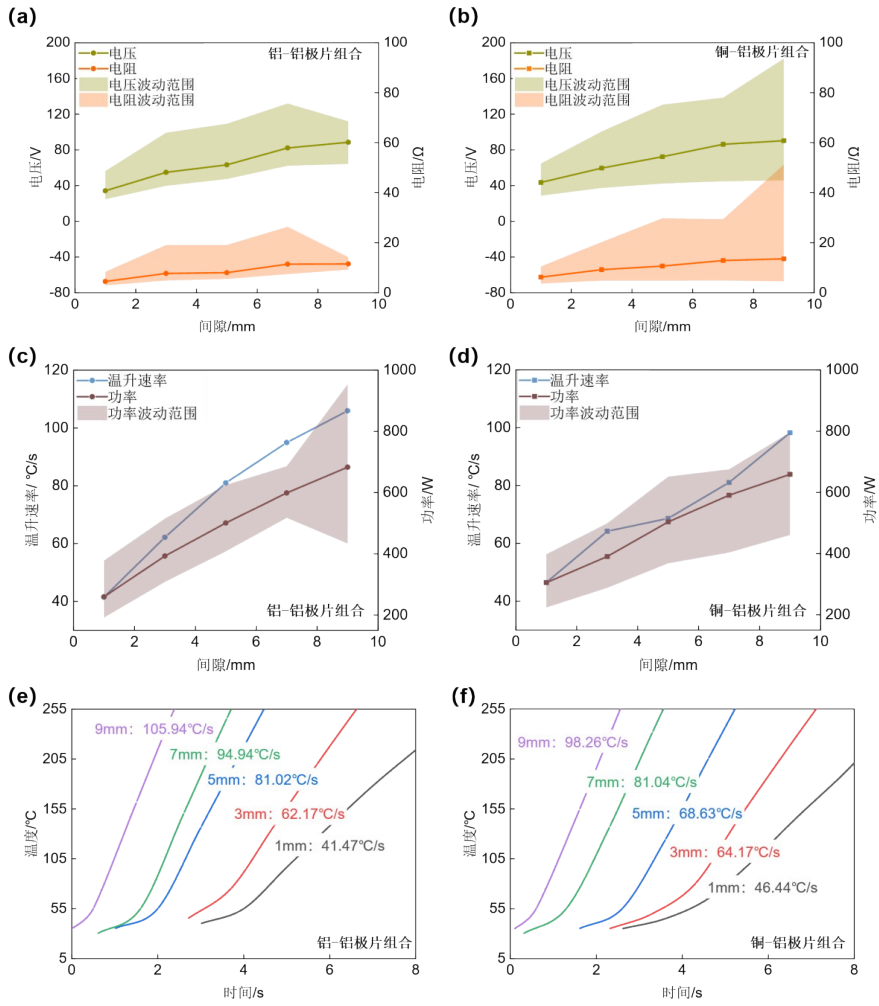


图6　不同电极间距电解液诱发电弧特性规律

Fig. 6　Characteristics of electrolyte-induced arc at different electrode spacings

表3　不同类型电解液诱发电弧实验方案

Table 3　Experimental scheme of electrolyte-induced arcs for different types of electrolytes

序号	实验样品	电极材料	电极间距/mm	电导率/mS/cm
1	DMC：EMC：EC=1：1：1 1 mol/L $LiPF_6$	铝正极-铝负极 铜正极-铝负极	1，3，5，7，9	11.24
2	EMC：EC=7：3 1 mol/L $LiPF_6$	铝正极-铝负极 铜正极-铝负极	1，3，5，7，9	9.38
3	DMC：EMC：EC=1：1：1	铝正极-铝负极 铜正极-铝负极	1，3，5，7，9	/
4	EMC：EC=7：3	铝正极-铝负极 铜正极-铝负极	1，3，5，7，9	/
5	$LiPF_6$	铝正极-铝负极 铜正极-铝负极	1，3，5，7，9	/

变化趋势：随着电极间距增大，电解液诱发电弧的临界触发电压逐渐升高。这说明电极间距仍是影响电弧触发条件的重要因素，间距越大，形成电弧所需的电压越高。

对比不同电解液可以发现，在相同电极材料组合和相同电极间距下，电解液A对应的临界触发电压整体低于电解液B。结合前述电导率测试结果，电解液A的电导率高于电解液B，说明电导率较高

的电解液更容易在电场作用下形成泄漏电流，并通过焦耳热促进电解液蒸发和沿面放电发展，从而降低电弧触发电压。因此，电解液电导率与电弧临界触发电压之间呈现负相关关系。

此外，从电极材料组合来看，两种电解液中铜-铝电极组合的临界触发电压均低于铝-铝电极组合，表明铜-铝组合在电解液浸润条件下更易诱发电弧。综合来看，电解液组分、电导率、电极间距和电极材料均会影响电解液诱发电弧的触发条件，其中电导率升高会增强电解液的导电作用，使电弧更容易发生。由于纯溶剂和纯$LiPF_6$不具备导电能力，所以当直流电源施加电压至1000 V时均未发生电弧放电。

为进一步验证电解液电导率与电弧临界触发电压之间的关系，仅依靠两种常规电解液样品仍难以充分反映不同电导率条件下的变化规律。因此，有必要构建电导率范围更宽的电解液样品体系，进一步分析电导率对电解液诱发电弧行为的影响。

本研究以LFP电池中提取的电解液作为初始参考样品，并结合不同来源及不同状态的电解液样品进行对比。由于低电导率电解液在常规商业产品中较难直接获取，本研究额外收集了部分电池系统热失控实验后放置数月的喷发物样品。这些喷发物样品因长期暴露及成分变化，其电导率已发生显著衰减，具备低电导率特性。通过将原始电解液与上述老化喷发物样品按不同比例进行调配混合，并经电导率测试仪检测，获得了5个电导率各不相同且覆盖范围较广的实验样品。针对共8个电导率各不相同的电解液样品开展电解液诱发电弧实验，可以更清晰地分析电导率变化对电弧临界触发电压的影响。后续实验仍采用与前述实验一致的电极材料组合和电极间距设置，即选用铝-铝电极组合和铜-铝电极组合，电极间距设置为1、3、5、7、9 mm。不同电导率电解液诱发电弧实验方案如表4所示。

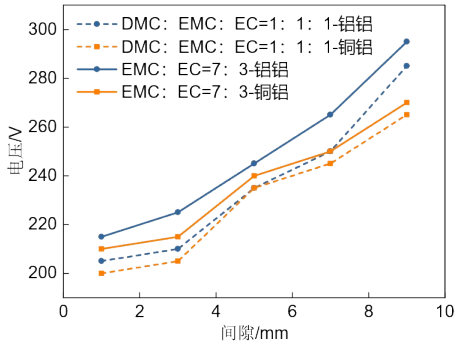


图7 不同类型电解液诱发电弧临界触发电压曲线

Fig. 7 Critical triggering voltage curves of electrolyte-induced arcs for different electrolytes

表4 不同电导率电解液诱发电弧实验方案

Table 4 Experimental scheme of electrolyte-induced arc for varying electrolyte conductivities

序号	实验样品	电极材料	电极间距/mm	电导率/mS/cm
1	LFP电解液	铝正极-铝负极 铜正极-铝负极	1，3，5，7，9	13.45
2	DMC：EMC：EC=1：1：1 1 mol/L $LiPF_6$	铝正极-铝负极 铜正极-铝负极	1，3，5，7，9	11.24
3	EMC：EC=7：3 1 mol/L $LiPF_6$	铝正极-铝负极 铜正极-铝负极	1，3，5，7，9	9.38
4	电解液样品1	铝正极-铝负极 铜正极-铝负极	1，3，5，7，9	8.64
5	电解液样品2	铝正极-铝负极 铜正极-铝负极	1，3，5，7，9	4.74
6	电解液样品3	铝正极-铝负极 铜正极-铝负极	1，3，5，7，9	0.86
7	电解液样品4	铝正极-铝负极 铜正极-铝负极	1，3，5，7，9	0.55
8	电解液样品5	铝正极-铝负极 铜正极-铝负极	1，3，5，7，9	0.17

图8展示了不同电导率电解液在不同电极间距下诱发电弧的临界触发电压变化规律。由图可知，在相同电极间距条件下，随着电解液电导率增大，电弧临界触发电压整体呈下降趋势，说明电导率越高，电解液越容易在电场作用下形成泄漏电流和导电通路，从而降低电弧触发所需电压。从变化趋势

来看，临界触发电压随电导率升高并非线性下降，而是表现出明显的非线性衰减特征。当电导率处于较低水平时，临界触发电压随电导率增加下降较快，说明低电导率区间内电解液导电能力的变化对电弧触发条件影响更为显著；当电导率进一步升高后，临界触发电压下降幅度逐渐减小，曲线趋于平缓，表明高电导率条件下电导率继续增加对触发电压的影响有所减弱。此外，在相同电导率条件下，电极间距越大，电弧临界触发电压越高，说明电极间距仍然是影响电弧触发条件的重要因素。进一步观察可以发现，不同电极间距下的曲线均表现出相似的下降趋势，说明在本实验范围内，电解液电导率对电弧临界触发电压的影响具有较好的一致性。

为进一步定量描述电解液电导率和电极间距对电弧临界触发电压的共同影响，本文对不同电导率条件下的实验数据进行了经验拟合。由于3 mm电极间距位于本文所设置间距范围的中间水平，且能够较好反映电解液电导率对临界触发电压的影响规律，因此选取3 mm间距下的实验数据作为基准，分别对铝-铝电极组合和铜-铝电极组合进行非线性拟合。铝-铝电极组合3 mm间隙下电导率与电弧临界触发电压的拟合关系如式（7）所示，铜-铝电极组合3 mm间隙下的拟合关系如式（8）所示。其中，式（7）和式（8）的拟合优度R^2分别为0.99和0.95。

$$y = \frac{339.96}{x^{0.18}} \tag{7}$$

$$y = \frac{294.65}{x^{0.13}} \tag{8}$$

式中，y代表电弧临界触发电压，单位为V；x代表电解液样品的电导率，单位为mS/cm。在固定电极间距条件下，电弧临界触发电压随电解液电导率升高呈非线性下降趋势。基于该变化规律，结合不同电极间距下实验数据相对于3 mm基准曲线的偏移规律，引入间隙修正项，得到包含电导率和电极间距的经验拟合公式。铝-铝电极组合下电导率、电极间距与电弧临界触发电压的拟合关系如式（9）所示，铜-铝电极组合下的拟合关系如式（10）所示。

$$y = \frac{339.96}{x^{0.18}} + 12(d - 3) \tag{9}$$

$$y = \frac{294.65}{x^{0.13}} + 16(d - 3) \tag{10}$$

式中，d代表电极间距，单位为mm。为评价最终经验公式对不同电极间距工况的整体描述效果，本文将1、3、5、7、9 mm间距下的全部实验数据代入公式进行预测，并计算预测值与实验值之间的拟合优度。结果表明，铝-铝电极组合经验公式的整体拟合优度为R^2=0.90，铜-铝电极组合经验公式的整体拟合优度为R^2=0.91，说明引入间隙修正项后的经验公式能够较好描述本实验范围内电解液电导率和电极间距对电弧临界触发电压的共同影响。

上述结果表明，电解液电导率是影响电解液诱发电弧的重要因素之一。对于高压电池系统而言，若电解液泄漏或喷发后仍具有较高导电性，则更容易在带电部件之间形成泄漏电流和导电通道，从而增加二次电弧故障风险。因此，在电池系统安全设计中，可将提高电弧临界触发电压作为防护目标之一，通过优化绝缘结构、增加有效电气间距以及降低泄漏电解液形成连续导电通路的可能性，提高系统在电解液污染条件下的电气安全裕度。

本文研究仍存在一定局限性。实验采用简化电极及绝缘基底结构，与实际电池系统内部复杂几何和电场环境存在差异；部分不同电导率样品的电导率变化同时伴随组分和老化状态变化，因此所得关系主要反映本文样品体系下的经验关联；此外，5 mm单点热电偶只能表征局部热响应，不能代表弧柱核心温度，也不足以准确反演真实热通量。后续工作需在真实模组材料和结构中，引入受控热失控气氛、多点/红外测温、更多重复与概率统计，并通过独立样品验证经验公式的外推能力。

3 结 论

本文针对高压电池系统热失控过程中电解液泄漏或喷发可能诱发二次电弧的问题，搭建了电解液诱发电弧实验平台，系统研究了电极材料组合、电极间距、施加电压及电解液电导率对电弧触发和发展过程的影响，得到以下结论。

（1）电解液进入高压带电间隙后会显著削弱原有绝缘环境，使电极间在较低电压下发生沿面爬电并进一步发展为电弧放电。以铝-铝电极组合、5 mm间距工况为例，电解液参与后在230 V下即可诱发电弧。电弧形成过程中伴随电解液蒸发、爬电通道发展、弧光产生、电极烧蚀及绝缘材料碳化等现象，表明电解液泄漏可能显著增加高压电池系统

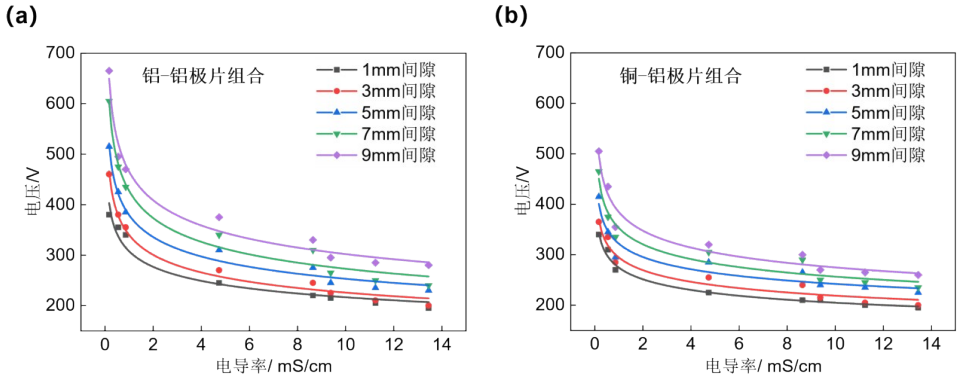


图8 不同电导率电解液诱发电弧临界触发电压曲线图

Fig. 8 Critical triggering voltage curves of electrolyte-induced arc for electrolytes with different conductivities

二次电气故障风险。

（2）电极间距和电极材料组合会明显影响电解液诱发电弧的临界触发电压。随着电极间距由1 mm增大至9 mm，电弧临界触发电压整体升高，但各工况下的临界触发电压仍低于LFP电池系统620 V的额定电压，说明在电解液污染条件下，仅依靠常规电气间距难以完全避免电弧风险。对比不同材料组合可知，铜-铝电极组合的临界触发电压整体低于铝-铝电极组合，表明铜-铝组合在电解液浸润条件下更易诱发电弧。

（3）施加电压会影响电弧孕育时间和通电初期电流响应。以铝-铝电极组合、9 mm间距工况为例，当施加电压为200 V时未发生明显电弧；当电压达到280 V及以上时，电解液能够诱发电弧。随着施加电压由280 V升高至400 V和500 V，电弧孕育时间由19.1 s分别缩短至2.4 s和1.9 s，说明施加电压越高，电弧触发过程越迅速。

（4）电弧形成后具有明显的热效应和材料破坏作用。随着电极间距增大，电弧阶段的电压、平均功率及测温点平均温升速率整体提高。铝-铝电极组合中，平均温升速率由1 mm间距下的41.47℃/s提高至9 mm间距下的105.94℃/s；铜-铝电极组合中，平均温升速率由1 mm间距下的46.44℃/s提高至9 mm间距下的98.26℃/s。结果表明，较大电极间距虽然会提高电弧触发电压，但一旦电弧形成，其局部升温效应更强。

（5）电解液电导率是影响电弧触发条件的重要因素。在本文样品体系和实验范围内，电弧临界触发电压随电解液电导率升高呈非线性下降趋势。当电导率由0.17 mS/cm升高至13.45 mS/cm时，铝-铝电极组合在1~9 mm间距下的临界触发电压下降185~385 V，降幅约为48.7%~57.9%；铜-铝电极组合的临界触发电压下降145~245 V，降幅约为42.6%~48.5%。而纯溶剂和纯$LiPF_6$在实验条件下未能诱发电弧，说明电解液诱发电弧依赖于溶剂和锂盐共同形成的离子导电体系。综合来看，电解液泄漏后的导电性、润湿性及其对绝缘表面的污染作用，是高压电池系统热失控后二次电弧形成的重要原因。

参 考 文 献

[1] LIU S Z, NIE Y W, TANG A H, et al. Online health prognosis for lithium-ion batteries under dynamic discharge conditions over wide temperature range[J]. eTransportation, 2023, 18: 100296.

[2] ZHANG Z H, LI Y L, WANG H W, et al. A comparative study of the $LiFePO_4$ battery voltage models under grid energy storage operation[J]. Journal of Energy Storage, 2024, 75: 109696.

[3] SHANG Z, YU W H, ZHOU J H, et al. Recycling of spent lithium-ion batteries in view of graphite recovery: A review[J]. eTransportation, 2024, 20: 100320.

[4] LI Y L, WEI Y F, ZHU F Q, et al. The path enabling storage of renewable energy toward carbon neutralization in China[J]. eTransportation, 2023, 16: 100226.

[5] LIU P J, LIU C Q, YANG K, et al. Thermal runaway and fire behaviors of lithium iron phosphate battery induced by over heating[J]. Journal of Energy Storage, 2020, 31: 101714.

[6] HELD M, TUCHSCHMID M, ZENNEGG M, et al. Thermal runaway and fire of electric vehicle lithium-ion battery and contamination of infrastructure facility[J]. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2022, 165: 112474.

[7] XU C S, ZHANG F S, CHEN J Y, et al. Safety Assessment of $LiNi_{0.9}Mn_{0.05}Co_{0.05}O_2$ and High-Voltage $LiNi_{0.6}Mn_{0.2}Co_{0.2}O_2$ Cathode Lithium-Ion Batteries with Similar Energy Density[J]. Automotive Innovation, 2026: 1-13.

[8] KNEUPER F, NEUMANN S, SCHULZE A, et al. Mechanically

joined extrusion profiles for battery trays[J]. Automotive Innovation, 2024, 7(1): 182-193.

[9] LIAN Y B, LING H P, SONG G, et al. Investigation on high-temperature-uniformity direct cooling performance of battery pack with large-format blade battery[J]. Automotive Innovation, 2025, 8 (3): 769-785.

[10] MAO B B, FEAR C, CHEN H D, et al. Experimental and modeling investigation on the gas generation dynamics of lithium-ion batteries during thermal runaway[J]. eTransportation, 2023, 15: 100212.

[11] SCHÖBERL J, ANK M, SCHREIBER M, et al. Thermal runaway propagation in automotive lithium-ion batteries with NMC-811 and LFP cathodes: Safety requirements and impact on system integration[J]. eTransportation, 2024, 19: 100305.

[12] LI Y L, FENG X N, REN D S, et al. Thermal runaway triggered by plated lithium on the anode after fast charging[J]. ACS Applied Materials & Interfaces, 2019, 11(50): 46839-46850.

[13] MENG J K, QU G, HUANG Y H. Stabilization strategies for high-capacity NCM materials targeting for safety and durability improvements[J]. eTransportation, 2023, 16: 100233.

[14] KONG D P, WANG G Q, PING P, et al. Numerical investigation of thermal runaway behavior of lithium-ion batteries with different battery materials and heating conditions[J]. Applied Thermal Engineering, 2021, 189: 116661.

[15] WANG Y J, ZHANG X C, LI K Q, et al. Perspectives and challenges for future lithium-ion battery control and management [J]. eTransportation, 2023, 18.

[16] HONG J, SONG J, HAN U, et al. Performance investigation of electric vehicle thermal management system with thermal energy storage and waste heat recovery systems[J]. eTransportation, 2024, 20: 100317.

[17] LIU H R, YANG C, WANG R Z. Passive thermal management of electronic devices[J]. Device, 2025, 3(3): 100684.

[18] YANG W S, LI C B, LI X X, et al. High flame retardant composite phase change materials with triphenyl phosphate for thermal safety system of power battery module[J]. eTransportation, 2024, 20: 100325.

[19] VASHISHT S, RAJAT, RAKSHIT D. Recent advances and perspectives in enhancing thermal state of lithium-ion batteries with phase change materials: Internal and external heat transfer enhancement factors[J]. eTransportation, 2024, 22: 100381.

[20] CHE Y H, VILSEN S B, MENG J H, et al. Battery health prognostic with sensor-free differential temperature voltammetry reconstruction and capacity estimation based on multi-domain adaptation[J]. eTransportation, 2023, 17: 100245.

[21] MAO S Y, WANG Y, LU Y, et al. Toward electrode-level management of lithium-ion batteries enabled by long-life potential sensing[J]. Energy Storage Materials, 2026, 84: 104773.

[22] HAN X B, MAO S Y, WANG Y, et al. Manipulation of lithium dendrites based on electric field relaxation enabling safe and long-life lithium-ion batteries[J]. Nature Communications, 2025, 16(1): 3699.

[23] WANG B, DEHGHANIAN P, WANG S, et al. Electrical safety considerations in large-scale electric vehicle charging stations[J]. IEEE Transactions on Industry Applications, 2019, 55(6): 6603-6612.

[24] XU W Q, WU X G, LI Y L, et al. A comprehensive review of DC arc faults and their mechanisms, detection, early warning strategies, and protection in battery systems[J]. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2023, 186: 113674.

[25] 徐成善, 孙烨, 杨智凯, 等. 储能锂离子电池系统热失控诱发电弧研究进展[J]. 储能科学与技术, 2025, 14(8): 3037-3050.
XU C S, SUN Y, YANG Z K, et al. Research progress on arc induced by thermal runaway in lithium-ion battery systems for energy storage[J]. Energy Storage Science and Technology, 2025, 14(8): 3037-3050.

[26] 王贺武, 张亚军, 李成, 等. 锂离子动力电池中等荷电状态下热失控产物喷发过程[J]. 储能科学与技术, 2019, 8(6): 1076-1081.
WANG H W, ZHANG Y J, LI C, et al. Venting process of lithium-ion power battery during thermal runaway under medium state of charge[J]. Energy Storage Science and Technology, 2019, 8(6): 1076-1081.

[27] 韩登超, 裴苑翔, 刘朝阳, 等. 受限空间NCM811锂离子电池热失控蔓延及痕迹特征研究[J]. 储能科学与技术, 2024, 13(11): 4133-4142.
HAN D C, PEI Y X, LIU Z Y, et al. Thermal runaway propagation characteristics and residue analysis of NCM811 lithium-ion batteries in confined spaces[J]. Energy Storage Science and Technology, 2024, 13(11): 4133-4142.

[28] LI C, WANG H W, LI Y L, et al. Venting particle-induced arc of lithium-ion batteries during the thermal runaway[J]. eTransportation, 2024, 22: 100350.

[29] XU W Q, ZHOU K, WANG H W, et al. Series arc-induced internal short circuit leading to thermal runaway in lithium-ion battery[J]. Energy, 2024, 308: 132999.

[30] ZHANG Y, PING P, REN X T, et al. Characteristics and generation mechanism of ejecta-induced arc for lithium-ion battery during thermal runaway[J]. eTransportation, 2025, 24: 100429.

[31] XU W Q, ZHOU K, WANG H W, et al. Experimental and modeling study of arc fault induced thermal runaway in prismatic lithium-ion batteries[J]. Batteries, 2024, 10(8): 269.

[32] XU W Q, LI Y L, WANG H W, et al. Study of the arc generation mechanism induced by liquid electrolyte in battery energy storage systems[J]. eTransportation, 2026, 27: 100533.

[33] XU W Q, ZHOU K, LI Y L, et al. Study on the evolution laws and induced failure of series arcs in cylindrical lithium-ion batteries[J]. Applied Energy, 2025, 377: 124562.