

中国科学技术大学  
火灾科学国家重点实验室开放课题

# 计 划 书

课 题 编 号：HZ2024-KF06

课 题 名 称：多孔骨架微胶囊灭火剂制备及其抑制锂电池复燃研究

课 题 负 责 人：薛洪来

课 题 承 担 单 位：(公章)

联 系 电 话：13196707221

电 子 信 箱：xuehonglai@cczu.edu.cn

填 写 日 期：2024 年 04 月 08 日

二〇二四年 四 月

## 填 报 说 明

1、《中国科学技术大学火灾科学国家重点实验室开放课题计划书》经中国科学技术大学火灾科学国家重点实验室开放课题评审委员会审核批准后，将作为课题计划执行和检查、验收的重要依据。

2、课题计划书各项内容，要实事求是、逐条认真填写。表达要明确、严谨、清楚，外来语同时用原文和中文表达，第一次出现的缩写词要注明全称。

3、课题组中具有高级专业技术职务的主要成员，未经开放课题评审委员会批准，不得自行调整。

4、《开放课题计划书》中内容填写不下时，请自行加页。《开放课题计划书》规格统一使用 A4 纸，打印文字采用 4 号宋体字，要求字迹清晰，页面整洁，于左侧（纵向）装订成册，经课题承担单位签署意见并盖章后，一式三份报送中国科学技术大学火灾科学国家重点实验室，同时 email 发送电子文档。

通讯地址：安徽省合肥市金寨路 96 号中国科学技术大学火灾科学国家重点实验室

邮政编码：230026

联系电话：0551-3601667 13856990458

联 系 人：杨萍玥

电子信箱：[yangpy@ustc.edu.cn](mailto:yangpy@ustc.edu.cn)



一、项目简表

课题负责人		姓名：薛洪来		政治面貌：中共党员		民族：汉族		
		职称/职务：系副主任		学历：博士研究生		学位：工学博士		
课题经费		总经费 7 万元						
起止年限		2024 年 1 月 至 2025 年 12 月						
课题 组	总人数	高级	中级	初级	博士后	博士生	硕士生	参加单位数
	5	1	2	0	0	0	2	1
课题 组 主 要 成 员	姓名	性别	出生 年月	学历 学位	职称 /职务	项目的分工		现工作单位
	薛洪来	男	1988.02	博士	讲师/系 副主任	总负责人		常州大学
	欧红香	女	1976.10	博士	教授/副 院长	灭火剂制备		常州大学
	温哲	女	1989.11	博士	讲师	灭火剂制备		常州大学
	李明	女	1998.05	在读硕 士	/	实验测试		常州大学
	陈合敏	女	1999.10	在读硕 士	/	实验测试		常州大学
主要研究内容和目标(500 字以内)								
<p>针对锂离子电池热失控存在灭火后易复燃难题，本课题拟通过理论分析、实验测试和数值模拟开展以下研究：测定锂离子电池电极材料粒内、粒间孔隙结构，确立孔隙扩散系数、渗透性系数、迂曲度与孔隙结构关系，探究锂离子电池双重孔隙结构扩散-渗流相互作用机制，揭示锂离子电池热失控可燃物质运移机理；测定多孔 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 粒内、粒间孔隙结构，确立多孔 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 双重孔隙结构装载、释放和吸附过程中流体流动模式，探究流动速率与孔隙结构的关系，揭示多孔 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 吸附、装载和释放流体运移机理；构建多孔 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 缓释灭火剂抑制锂离子电池热失控复燃理论模型，数值模拟多孔 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 最佳抑制复燃孔隙结构，研究模板法制备多孔 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 成孔机制和凝胶法制备微胶囊封孔机制，考察多孔骨架微胶囊灭火剂抑制锂离子电池热失控复燃效果，优化多孔骨架微胶囊灭火剂制备工艺。研究成果将为锂离子电池复燃控制提供理论指导和技术支撑。</p> <p>可考察指标：拟发表 2 篇 SCI/EI 论文，申请 1 项发明专利，培养 2 名硕士研究生。</p>								



**二、研究计划**（课题总体目标，研究内容，关键技术和主要创新点，研究方案、实施的技术工艺路线，拟解决的关键科学问题等。请在原《申请书》和《可行性研究报告》的基础上进行编制，请勿自行更改或降低研究目标、缩减研究内容。）

### **1.总体目标**

本项目总体目标为精准构建多孔骨架微胶囊灭火剂，实现缓释控制锂离子电池热失控复燃。为此，综合采用理论分析、实验研究和数值模拟方法，基于对锂离子电池热失控可燃物质运移规律和多孔  $\text{Al}_2\text{O}_3$  流体运移及吸附规律的深入研究，实现包括多孔  $\text{Al}_2\text{O}_3$  骨架制备、灭火剂装载和微胶囊封装等工艺在内的多孔骨架微胶囊灭火剂的精准构建，最终达到多孔骨架微胶囊连续、持久、高效释放灭火剂抑制锂离子电池热失控复燃之目的。

### **2.研究内容**

#### **（1）锂离子电池热失控可燃物质运移规律研究**

一般认为，孔隙气体流动模式以直径 100 nm 为界，较大孔隙以渗流为主，较小孔隙以扩散为主。考察电极材料颗粒内部孔隙结构，探讨孔隙扩散系数、迂曲度与孔径的关系，探讨有效扩散系数与颗粒内部孔隙结构的关系，探究电极材料颗粒内部孔隙结构气体扩散运移规律。考察电极材料粒间孔隙结构，探讨孔隙结构与粒度、压实密度的关系，研究粒间孔隙渗透性系数与孔隙度、迂曲度与连通性的关系，研究有效渗透性系数与粒间孔隙结构的关系，探究电极材料粒间孔隙气体渗流运移规律。考察电极材料双重孔隙结构，研究电极材料颗粒内部、粒间孔隙气体运移相互作用机制，探究电极材料双重孔隙结构气体运移规律。研究锂离子电池热失控过程中温度变化规律，探讨扩散系数、气体压力与温度的关系，探究锂离子电池热失控可燃气体释放运移规律。

#### **（2）多孔氧化铝流体运移及吸附规律研究**

多孔  $\text{Al}_2\text{O}_3$  装载和释放灭火剂流动形式不同，前者属于液体渗流，后者属于气-液两相流。考察多孔  $\text{Al}_2\text{O}_3$  孔隙结构，研究压力、孔径和表面张力对孔隙液体渗流的综合作用机制，探讨多孔介质渗流模型，探究多孔  $\text{Al}_2\text{O}_3$  灭火剂装载流动规律。研究温度、孔径和气液比例对多孔介质气液两相流型的综合作用规律，探讨多孔介质受热气液两相流动模型，考察多孔  $\text{Al}_2\text{O}_3$  受热灭火剂释放温度、压力和速率动态演化过程，探究多孔  $\text{Al}_2\text{O}_3$  灭火剂释放运移规律。研究多孔  $\text{Al}_2\text{O}_3$  对锂离子电池热失控可燃物质吸附选择性，考察温度、气体性质对多孔  $\text{Al}_2\text{O}_3$  吸附速率影响规律，探究灭火剂释放过程中多孔  $\text{Al}_2\text{O}_3$  对可燃物质的吸附规律。

#### **（3）多孔骨架微胶囊灭火剂精准构建研究**



综合分析锂离子电池热失控过程中可燃物质释放速率、多孔  $\text{Al}_2\text{O}_3$  吸附速率和灭火剂释放速率，开展多孔介质缓释灭火剂控制复燃数值模拟研究，探究多孔  $\text{Al}_2\text{O}_3$  目标孔隙结构。研究煅烧温度、煅烧时间和造孔模板对多孔  $\text{Al}_2\text{O}_3$  孔隙度、连通性、吸附性和机械强度的影响规律，探究多孔  $\text{Al}_2\text{O}_3$  多孔结构烧制工艺。研究凝胶类型、芯壳比对微胶囊装载量、热稳定性、储存稳定性和灭火性的影响，研究微胶囊壁材精准构建技术，探究多孔骨架微胶囊灭火剂封装工艺。研究锂离子电池热失控火灾过程中多孔骨架微胶囊灭火剂释放速率及其对温度、可燃物质浓度的影响规律，探讨多孔骨架微胶囊灭火剂释放速率与温度的关系，探究锂离子电池复燃控制技术。

### 3 关键技术和主要创新点

#### 3.1 关键技术

##### (1) 双重孔隙结构流体流动特性测试技术

锂离子电池和多孔骨架微胶囊灭火剂都具有双重孔隙结构，多孔骨架微胶囊灭火剂的释放速率与锂离子电池可燃物质释放速率匹配度是衡量能否有效控制复燃的关键指标。采用扩散实验系统测试多孔材料粒内孔隙扩散特性，利用渗流实验系统测试多孔材料粒间孔隙渗流特性，利用加载系统压缩多孔材料测试双重孔隙结构扩散、渗流特性，研究多孔介质流体运移规律，为揭示多孔骨架微胶囊灭火剂缓释抑制锂离子电池热失控复燃机理提供基本依据。

##### (2) 多孔 $\text{Al}_2\text{O}_3$ 孔隙结构的精准构建技术

多孔骨架微胶囊灭火剂能够实现连续、持久、高效控制锂离子电池复燃，关键在于多孔材料孔隙结构特性。利用煅烧技术测试煅烧温度、煅烧时间和原料配比对多孔  $\text{Al}_2\text{O}_3$  成孔特性的影响规律，持续优化煅烧工艺，制备出孔隙率、连通性和孔径分布等最佳的孔隙结构，确保装载量、装载速率和释放速率满足控制复燃技术要求。

#### 3.2 主要创新点

本课题研究方向瞄准锂离子电池灭火技术最新进展，以抑制锂离子电池热失控复燃为研究目标；研究内容注重基础理论，通过研究双重孔隙结构流体流动模式及运移机制，揭示多孔骨架微胶囊灭火剂缓释抑制锂离子热失控复燃机理；研究成果注重实践应用，研究多孔  $\text{Al}_2\text{O}_3$  孔隙结构成孔机制，优化微胶囊制备工艺，形成多孔骨架微胶囊灭火剂产品。

创新之处具体如下：

(1) 锂离子电池双重孔隙结构可燃物质运移释放规律有待深入研究。本课题拟通过构建锂离子电池双重孔隙结构三维模型，探究粒内、粒间孔隙



流体运动模式及其相互作用机制，揭示锂离子电池可燃物质运移规律及机理，完善锂离子电池热失控灭火理论。

(2) 多孔材料缓释灭火剂抑制锂离子电池复燃机理鲜有系统研究。本课题拟通过构建多孔  $\text{Al}_2\text{O}_3$  双重孔隙结构，研究多孔  $\text{Al}_2\text{O}_3$  吸附和流体运移规律，探究多孔材料孔隙结构煅烧成孔机制，优化多孔骨架微胶囊灭火剂制备工艺，提升锂离子电池热失控复燃抑制效果。

#### 4. 研究方案、实施的技术工艺路线

本课题拟采用理论分析、实验测试和数值模拟方法综合研究多孔介质缓释灭火剂抑制锂离子电池热失控复燃机理及多孔骨架微胶囊灭火剂精准构建技术，项目总体技术路线如图 1 所示，详细研究方案如下所述。

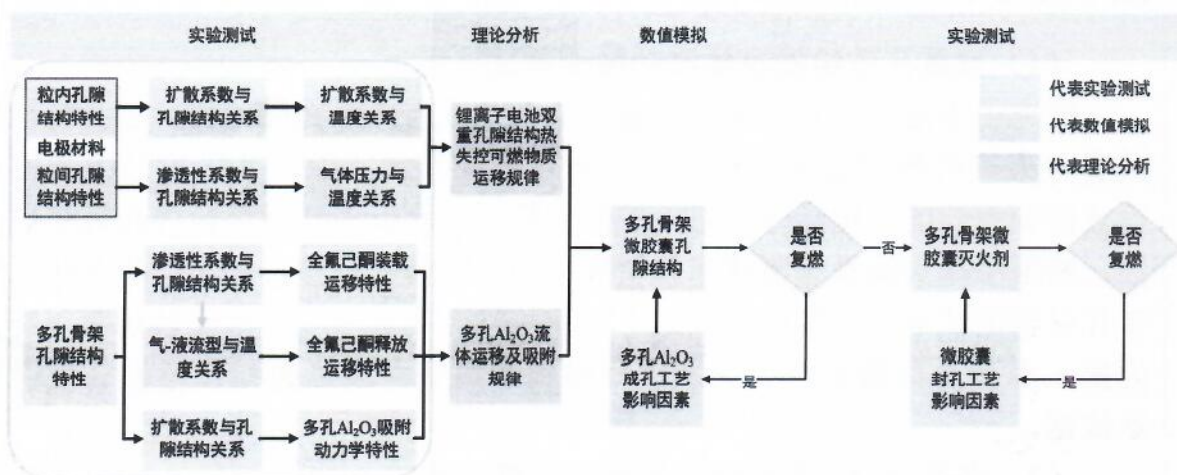


图 1 项目总体技术路线

##### (1) 锂离子电池双重孔隙结构热失控可燃物质运移规律研究

测定电极材料颗粒孔隙形态、孔径分布、比表面积和孔容，观察孔隙形态与孔径的对应关系，确立多尺度孔隙几何模型，根据比表面积、孔容统计孔径数量分布，确定孔径分布统计学规律，构建粒内孔隙结构三维模型，表征粒内孔隙大小、形态、分布和连通性。根据多孔介质扩散理论，确立孔隙扩散系数与孔径的关系，确立分子扩散路径与孔径的关系，建立多尺度孔隙扩散系数模型。测试电极材料颗粒内部气体扩散特性，简化电极材料粒内孔隙结构，确立电极材料颗粒有效扩散系数与孔隙结构的关系。考察扩散系数与温度的关系，揭示电极材料颗粒受热有效扩散系数动态变化规律。



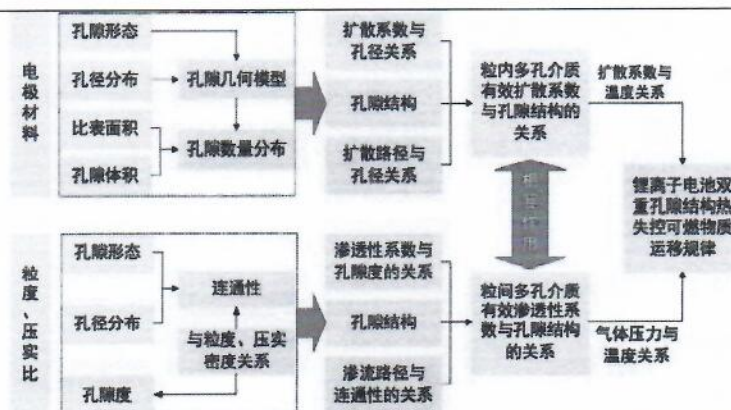


图2 锂离子电池双重孔隙结构热失控可燃物质运移规律研究路线

将电极材料压制成片，测定压片孔隙形态、孔径分布和孔隙度，观察孔隙、颗粒的形态特征，确定粒间孔隙结构模型。分析孔隙度与孔径分布、孔隙形态的关系，确定孔隙度几何模型。观察孔隙、颗粒空间相对关系，确立孔隙连通性统计学模型。总结孔隙形态、孔径分布随粒度、压实密度变化规律，统计孔隙度、孔隙连通性与粒度、压缩密度的关系，构建粒间孔隙结构空间网络，表征粒间孔隙大小、形态、分布和连通性。根据多孔介质渗流理论确立孔隙渗透性系数与孔隙度的关系，确立分子渗流路径与连通性的关系，建立多尺度孔隙渗透性系数模型。测试电极材料粒间孔隙渗流特性，简化电极材料粒间孔隙结构，建立电极材料粒间有效渗透性系数与孔隙结构的关系。考察多孔介质气体压力与温度的关系，揭示电池材料粒间孔隙气体受热动态变化规律。

最后，根据电极材料粒内孔隙和粒间孔隙的空间相对关系，结合粒内孔隙气体扩散和粒间孔隙气体渗流相互作用机制，建立锂离子电池双重孔隙结构扩散-渗流模型，实验获取锂离子电池热失控温度、压力和可燃物质释放速率等动态过程，揭示锂离子电池热失控可燃物质运移规律。

## (2) 多孔 $\text{Al}_2\text{O}_3$ 双重孔隙结构灭火剂运移及可燃物质吸附规律研究

参照锂离子电池双重孔隙结构研究路线构建多孔  $\text{Al}_2\text{O}_3$  孔隙结构。测试  $\text{Al}_2\text{O}_3$  与液体的接触角，对比粒间孔隙和粒内孔隙液体渗流速率与接触角的关系，建立多孔  $\text{Al}_2\text{O}_3$  孔隙渗透性系数与表面张力、孔径的关系。根据多孔介质渗流力学理论，确立多孔  $\text{Al}_2\text{O}_3$  有效渗透性系数与孔隙结构的关系，对比分析压力对多孔  $\text{Al}_2\text{O}_3$  全氟己酮渗流影响规律，确立渗流速率与压力、表面张力和孔隙结构的关系，揭示多孔  $\text{Al}_2\text{O}_3$  全氟己酮装载运移规律。测试温度对多孔  $\text{Al}_2\text{O}_3$  全氟己酮气、液两相渗流影响，分析气-液两相流型随温度的动态变化规律，对比粒内孔隙和粒间孔隙气-液两相流型，确立多孔  $\text{Al}_2\text{O}_3$  多孔介质气液两相流动速率与温度、孔隙结构的关系，揭示多孔  $\text{Al}_2\text{O}_3$  全氟己酮释放运移规律。测试温度、气体性质对多孔  $\text{Al}_2\text{O}_3$  吸附速率影响规律，分



析多孔  $\text{Al}_2\text{O}_3$  对锂离子电池热失控可燃物质吸附选择性，确定多孔  $\text{Al}_2\text{O}_3$  吸附速率与孔隙结构的关系，建立多孔  $\text{Al}_2\text{O}_3$  吸附速率与温度、气体性质和覆盖厚度的关系，揭示多孔  $\text{Al}_2\text{O}_3$  可燃物质吸附规律。

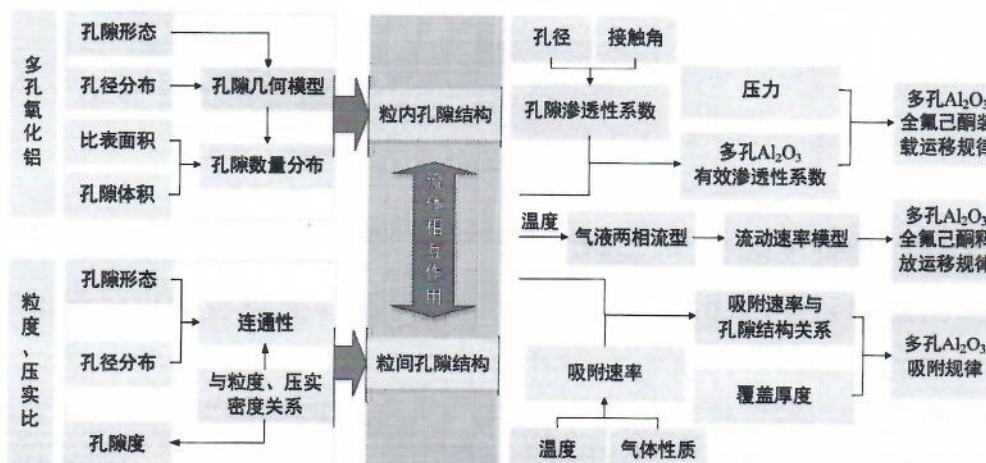


图3 多孔  $\text{Al}_2\text{O}_3$  双重孔隙结构灭火剂运移及可燃物质吸附规律研究路线

### (3) 多孔骨架微胶囊灭火剂的精准构建

测试锂离子电池热失控过程中温度、热重、燃烧程度和喷口压力等动态过程，观察热失控前后锂离子电池孔隙结构，分析热重、燃烧强度与温度的关系，分析热重、燃烧强度与喷口压力的关系，结合图2研究结果揭示锂离子电池热失控可燃物质释放规律。实验模拟锂离子电池热失控温度、可燃物质释放过程，测试多孔  $\text{Al}_2\text{O}_3$  灭火剂释放速率、可燃物质吸附速率和温度等动态过程，分析灭火剂释放速率、可燃物质吸附速率与温度的关系，结合图3研究结果揭示锂离子电池热失控过程中多孔  $\text{Al}_2\text{O}_3$  灭火剂释放和吸附规律。进而，确定可燃物质与灭火剂混合浓度，并以灭火剂最佳灭火浓度为评价指标，通过数值模拟计算确定多孔  $\text{Al}_2\text{O}_3$  目标孔隙结构。

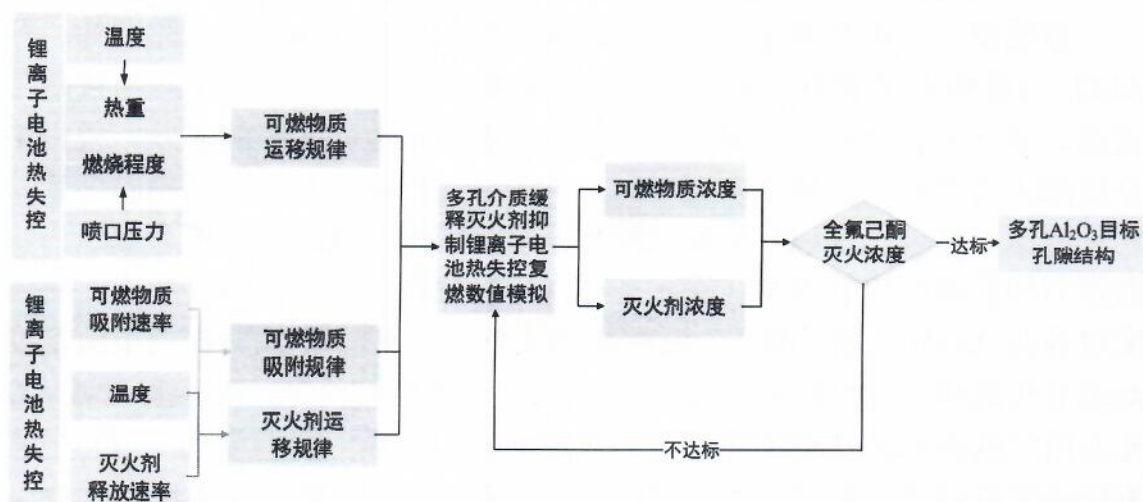


图4 多孔  $\text{Al}_2\text{O}_3$  孔隙结构优化路线



以聚苯乙烯胶晶为模板，将  $\text{Al}(\text{NO}_3)_3 \cdot 9\text{H}_2\text{O}$  和柠檬酸调配成柠檬酸铝，充分渗透进胶晶微球间隙，焙烧得到具有一定孔隙结构的多孔  $\text{Al}_2\text{O}_3$ ，采用正交试验测试煅烧温度、煅烧时间和原料对比对孔隙度、孔隙形态、孔径分布、孔隙连通性和机械强度的影响，以抑制锂离子电池热失控复燃的孔隙结构。以明胶（GE）、阿拉伯胶（GA）、乳清分离蛋白（WPI）等为壁材原料，采用单凝聚法和复凝聚法测试原料浓度、配比、pH 值、芯壳比和乳化速度等因素对微胶囊装载量、存储稳定性和热重的影响规律，通过观测锂离子电池热失控过程中微胶囊灭火剂释放速率、温度下降速率和可燃物质释放速率等指标，持续优化微胶囊封装制备工艺，最终制备出连续、持久和高效释放灭火剂的多孔骨架微胶囊。

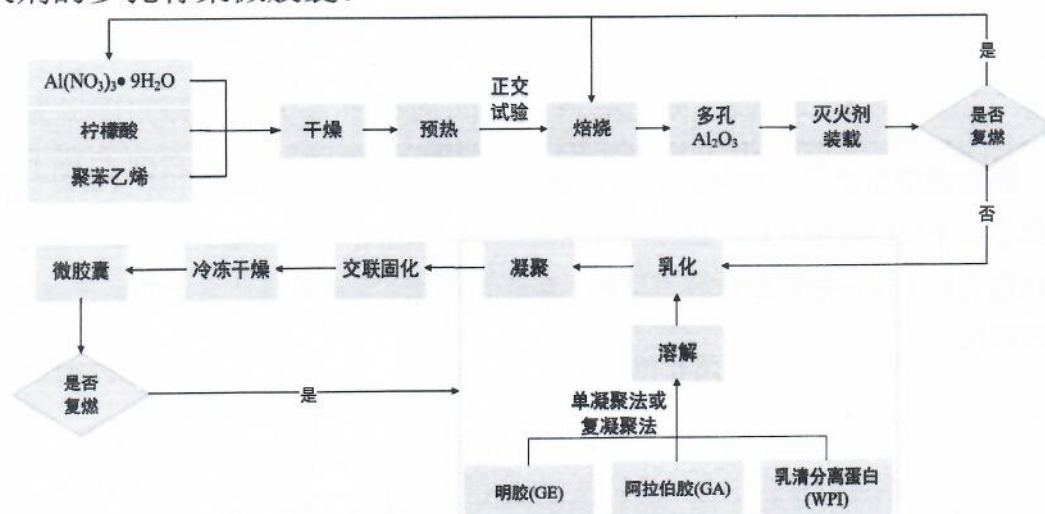


图 5 多孔骨架微胶囊灭火剂制备工艺优化技术路线图

## 5.拟解决的关键科学问题

### （1）双重孔隙结构流体流动模式及其运移机理研究

电池电极和多孔  $\text{Al}_2\text{O}_3$  均为双重孔隙结构材料，可燃物质由电极孔隙内部运移至外部，释放速率决定着火灾的形成；灭火剂通过微胶囊孔隙结构由内而外释放，释放速率控制着灭火的效果。构建双重孔隙结构模型，确定双重孔隙结构气体、液体及其两相流体流动模式，建立运移速率与孔隙结构关系，揭示双重孔隙结构流体运移规律，为优化多孔材料抑制复燃孔隙结构提供理论指导。

### （2）模板法制备多孔 $\text{Al}_2\text{O}_3$ 孔隙结构成孔机制研究

多孔  $\text{Al}_2\text{O}_3$  孔隙结构决定着多孔骨架微胶囊灭火剂释放速率，是控制锂离子电池复燃的关键要素。揭示煅烧温度、煅烧时间和造孔剂对制备多孔  $\text{Al}_2\text{O}_3$  孔隙形态、孔径分布、孔隙连通性和孔隙率等影响规律，确定多孔  $\text{Al}_2\text{O}_3$  孔隙结构与制备工艺的关系，阐明模板法制备多孔材料孔隙形成机制，为构建具备连续、持久、高效释放灭火剂的孔隙结构提供科学理论支撑。

## 6.可检查指标

- (1) 提出多孔骨架微胶囊灭火剂抑制锂离子电池热失控复燃机理。
- (2) 提出多孔骨架微胶囊灭火剂精准构建技术及工艺。
- (3) 成果提交形式：拟发表 2 篇 SCI/EI 论文，申请 1 项发明专利，培养 2 名硕士研究生。

我与课题组成员将严格遵守中国科学技术大学火灾国家重点实验室开放课题评审委员会关于资助课题管理、财务等各项规定，切实保证研究开发工作时间，按计划及进度认真开展工作，按时报送有关材料，对资助课题发表的论著和取得的研究成果按规定进行标注。

课题负责人（签字）：

薛洪来

2024 年 4 月 9 日



### 三、年度计划内容和目标（主要研究内容、工作进度、年度量化目标、负责人等）

#### 二〇二四年：

##### 2024 年 1 月至 2024 年 8 月，完成双重孔隙结构流体运移规律研究

- ①测试锂离子电池电极材料粒内、粒间结构特性；
- ②测试粒内孔隙扩散特性、粒间孔隙渗流特性和双重孔隙结构流体运移特性；
- ③分析实验数据，揭示锂离子电池双重孔隙结构气体运移规律；
- ④测试多孔  $\text{Al}_2\text{O}_3$  粒内、粒间孔隙结构特性；
- ⑤测试多孔  $\text{Al}_2\text{O}_3$  双重孔隙结构渗流特性、气液两相流特性和吸附特性；
- ⑥分析实验数据，揭示多孔  $\text{Al}_2\text{O}_3$  灭火剂装载、释放和吸附规律。

##### 2024 年 9 月至 2024 年 12 月，完成多孔骨架微胶囊灭火剂的制备

- ①构建双重孔隙结构流体运移模型及数值模拟程序；
- ②测试锂离子电池热失控温度、热重、燃烧和喷口压力特性；
- ③数值模拟确定多孔  $\text{Al}_2\text{O}_3$  最优孔隙结构；
- ④煅烧制备多孔  $\text{Al}_2\text{O}_3$ ，分析孔隙结构主控因素，优化成孔工艺；
- ⑤制备微胶囊灭火剂，分析装载、储存和热稳定性的主控因素，优化封装工艺；
- ⑥测试微胶囊灭火剂抑制锂离子电池火灾效果，持续优化多孔骨架微胶囊灭火剂的制备工艺。

#### 年度量化目标（负责人）

发明专利申请 1 项（薛洪来、温哲）

学术论文投稿 1 篇（薛洪来、欧红香、温哲、李明、陈合敏）

#### 二〇二五年：

##### 2025 年 1 月至 2025 年 12 月，完成总结工作

- ①对比分析理论模型、实验测试和数值模拟结果，揭示多孔骨架微胶囊灭火剂缓释抑制锂离子电池复燃机理及数学模型；
- ②整理、归纳材料，对研究成果及应用深入挖掘，为下一步研究做准备；
- ③提交结题报告。

#### 年度量化目标（负责人）：

在 SCI/EI 期刊发表学术论文 2 篇（薛洪来、欧红香、温哲、李明、陈合敏）

#### 四、年度经费预算(万元)

支出科目	金额 (万元)	计算根据及理由
设备购置费	/	/
能源材料费	2.2	锂离子电池 0.5 万元, 三元锂电池正负极材料 0.5 万元, 聚苯乙烯胶晶、柠檬、氧化铝、明胶、阿拉伯胶和乳清分离蛋白等 0.5 万元, 全氟己酮 0.4 万元, 压力传感器、热电偶等易损耗配件 0.3 万元。
测试化验加工费	3.0	SEM 测试费 0.5 万元, TG 测试费 0.5 万元, NMR 测试费 0.5 万元, MIP 测试费 0.5 万元, DSC 测试费 0.5 万元, FT-IR 测试费 0.3 万元、XRD 测试费 0.2 万元。
出版、信息传播费等	1.0	期刊版面费、发明专利申请费共 1.0 万元
会议费	0.5	参加一次学术会议, 会费、住宿、车票等共计 0.5 万元。
差旅费	/	
其它费用	0.3	管理费
合计	7.0	



**五、课题承担单位审查意见：**

我单位同意承担上述中国科学技术大学火灾科学国家重点实验室开放课题，并将其列入本单位的科研计划，将保证课题研究队伍的稳定及计划实施所需的研究时间和条件，严格遵守课题评审委员会有关资助课题管理、财务等各项规定，并督促实施。

单位负责人（签章）：

陳海祥

单位（公章）

2024年4月9日



**六、开放课题评审委员会审查意见：**

评委会负责人（签章）：

刘/安

2024年4月15日



**七、学校核准意见**

本开放课题依据《国家重点实验室建设与运行管理办法》有关规定设立，经火灾科学国家重点实验室学术委员会评审并通过论证。

同意组织实施。



（公章）

2024年4月24日

