

废旧车用锂电池运输包装箱温度场仿真分析与优化设计

马先润¹, 张连春², 王晓萌², 刘光发¹, 王立军^{1*}, 宋海燕^{1*}

(1.天津科技大学 轻工科学与工程学院, 天津 300457; 2.诚通物流包装有限公司, 天津 300000)

摘要: **目的** 研究废旧车用锂电池运输包装箱的热安全性和优化措施。**方法** 以15组1.6 kW·h方形锂电池模组为研究对象, 按照P911、LP906规范设计运输包装箱, 并建立废旧车用锂电池运输包装箱模型, 实验验证模型后进行温度场仿真分析, 对包装箱集液槽、箱壁壁厚、隔热材料进行优化设计。**结果** 集液槽底部添加阻燃棉可解决温度超过100 °C问题, 且箱体阻燃棉厚度为15 mm和集液槽底部阻燃棉厚度为40 mm优化效果最佳, 改用纳米二氧化硅纤维棉后隔热效果能提高了16.0%。最终实现箱体阻燃棉用料节约了68.75%, 集液槽隔热效果提升了41.5%, 包装箱整体皆满足P911及LP906要求。**结论** 研究结果可为废旧车用锂电池危险品包装研究提供重要参考。

关键词: 运输包装; 废旧车用锂电池; 仿真模拟; 危险品包装

中图分类号: TB485.3 **文献标志码:** A **文章编号:** 1001-3563(2024)13-0300-08

DOI: 10.19554/j.cnki.1001-3563.2024.13.035

Simulation Analysis and Optimization Design of Temperature Field of Used Lithium Battery Transport Packaging Boxes for Vehicles

MA Xianrun¹, ZHANG Lianchun², WANG Xiaomeng², LIU Guangfa¹,
WANG Lijun^{1*}, SONG Haiyan^{1*}

(1. College of Light Industry Science and Engineering, Tianjin University of Science and Technology, Tianjin 300457, China; 2. Cheng Tong Physical Packaging Co., Ltd., Tianjin 300000, China)

ABSTRACT: The work aims to study the thermal safety and optimization measures of used lithium battery transport packaging boxes for vehicles. With 15 groups of square lithium battery modules weighing 1.3 kWh as the study subjects, transport packing boxes were designed according to the P911 and LP906 standards. A model for used vehicle lithium battery transport packaging boxes was produced. After the model was experimentally validated, a temperature field simulation analysis was performed, and the liquid collecting tank, wall thickness, and thermal insulation material of packaging boxes were optimized. The issue of temperature above 100 °C could be resolved by adding flame-retardant cotton to the bottom of the liquid collecting tank. The optimal results were achieved with 15 mm flame-retardant cotton in the box and 40 mm flame-retardant cotton at the bottom of the liquid collecting tank. Cotton with nano-silica fiber could boost its heat-insulating performance by 16.0%. Finally, the entire packing box satisfied the standards of P911 and LP906, saving 68.75% of the flame-retardant cotton material and increasing the heat-insulating effect of the liquid collecting tank by 41.5%. The study's findings can be a valuable resource for future research on the packing of used lithium batteries for vehicles that are classified as hazardous products.

KEY WORDS: transport packaging; used lithium batteries for vehicles; simulation; dangerous goods packaging

车用锂电池的平均寿命只有 3~5 年^[1], 为安全起见, 达到报废条件的车用锂电池需进入梯次利用或回收再生环节^[2]。当前, 废旧车用锂电池的回收与再利用已成为实现储能碳中和目标的迫切需求, 市场即将迎来动力电池退役浪潮^[3-4]。为应对废旧车用锂电池全程运输安全问题, 要求废旧车用锂电池危险品包装应具备更高的热安全防护性能^[5]。

为延长废旧、破损类锂电池二次生命周期, 实现安全储运, 联合国及国际海运、路运等组织严格要求, 其包装需达 II 类包装性能水平甚至以上^[6-7]。针对正常运输条件下可能发生热危害的损坏或残次品电池和电池组, 联合国《关于危险货物运输的建议书规章范本》(TDG)、《国际海运危险货物规则》(IMDG CODE)、《危险货物国际道路运输欧洲公约》(ADR) 等现行版本规定该类电池危险品包装需满足 P911、LP906 要求, 即在满足 I 类包装要求基础上, 包装件外表面温度不得超过 100 °C, 温度瞬间上升达到 200 °C 属可接受范围, 且包装件外不会起火、无渗出物等要求^[8-9]。基于 P911 及 LP906 有关规定, 针对废旧车用锂电池运输包装箱进行温度场仿真分析和优化设计尤为重要, 可以为废旧、破损锂电池等危险品包装的热安全性设计提供参考。

1 废旧车用锂电池运输包装箱温度场模型建立

1.1 电池信息

研究用电池为力神电池提供的 15 组长安汽车系列 3P4S NCM/石墨电池模组 (180 个锂电池芯), 额定容量为 111 A·h, 额定能量为 1.6 kW·h (图 1)。

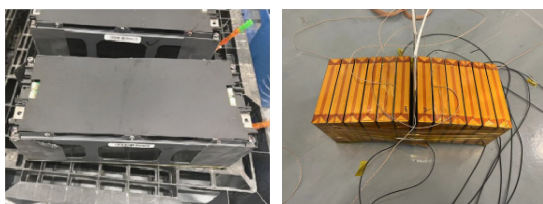


图 1 电池模组
Fig.1 Battery pack

1.2 包装箱几何模型的建立

目前, 性能完好、无损的锂电池包装主要采用纸塑木类材料^[10-11], 根据实际情况优先选择箱类包装、胶合板和纤维板材质^[7,12], 但大都难以有效阻止锂电池热失控危害蔓延。本文按照 P911、LP906 规范设计的废旧车用锂电池运输包装箱如图 2 所示, 主要包括外包装 (隔热箱体、通风孔、粉尘过滤、集液槽、堆码结构) 和内包装两部分。包装箱体 (正面、背面、左侧面、右侧面及箱盖) 选用 304 不锈钢和无机耐火

阻燃棉组成, 结构为 304 不锈钢—阻燃棉—304 不锈钢构成的 3 层夹芯结构, 用来隔热抗爆, 实现包装箱外侧温度低于 100 °C 效果; 集液槽为收集废液的双层 304 不锈钢板结构, 夹层间为空气, 无阻燃棉隔热; 内包装是废旧车用锂电池 (组) 热安全事故发生的第一场所, 具有防振、缓冲、防止电池短路等作用。

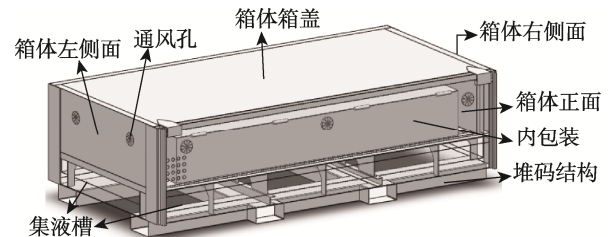


图 2 废旧车用锂电池运输包装箱结构
Fig.2 Structure diagram of used lithium battery transport packaging box for vehicles

1.3 传热模型

在废旧车用锂电池回收、储运过程中, 模型总热量主要由传热 $\nabla \cdot (\kappa \nabla T)$ 、外界热源 Q_{heat} 、电热 Q_{ele} 、电池热失控副反应产热 Q_{rec} 及散热 Q_{dis} 五部分组成 (式 (1))。当锂电池因热滥用发生大规模热蔓延危害时, 不考虑电池工作产热, 模型主要由副反应产热、传热、散热组成。其中, 电池-包装箱-外界环境间的热交换 Q_{dis} 为热传导 (式 (2))、热对流 (式 (3))、热辐射 (式 (4)) 导致的热量损失之和^[13]。

$$\rho C_p \frac{\partial T}{\partial t} = \nabla \cdot (\kappa \nabla T) + Q_{\text{heat}} + Q_{\text{ele}} + Q_{\text{rec}} + Q_{\text{dis}} \quad (1)$$

$$Q_{\text{cod}} = -A\kappa \frac{dT_s}{dn} \quad (2)$$

$$Q_{\text{cov}} = -Ah(T_s - T_a) \quad (3)$$

$$Q_{\text{rad}} = -A\epsilon\sigma(T_s^4 - T_a^4) \quad (4)$$

式中: “-”代表热量从高温向低温区域热量传递; ρ 为密度, kg/m^3 ; C_p 为比热容, $\text{J}/(\text{kg} \cdot \text{K})$; A 为面积, m^2 ; κ 为导热系数, $\text{W}/(\text{m} \cdot \text{K})$; h 为对流换热系数, $\text{W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$; ϵ 为辐射率, 无量纲 1; σ 为斯蒂芬-玻尔兹曼常数, 值为 $5.76 \times 10^{-8} \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K}^4)$; T_s 为较高温度值, K; T_a 为较低温度值, K。

1.4 运输包装箱有限元模型的建立

利用 COMSOL 6.0 软件建立包装箱的三维模型并进行适当简化, 保留隔热箱体、通风孔、内包装及集液槽等主要部分。将箱内代表热源的 15 组方形锂电池模组简化为 $972 \text{ mm} \times 740 \text{ mm} \times 87 \text{ mm}$ 的电池包, 通过对称边界条件指定包装箱切面创建如图 3a 所示的 1/4 简化模型。 T_1 、 T_2 、 T_6 、 T_7 、 T_{10} 为包装箱外表面域点探针测试点, 用以测试包装箱外表面温度随时间的变化。简化模型经由自由四面体网格划分, 网格数为 587 827, 求解自由度数为 797 246 (图 3b)。

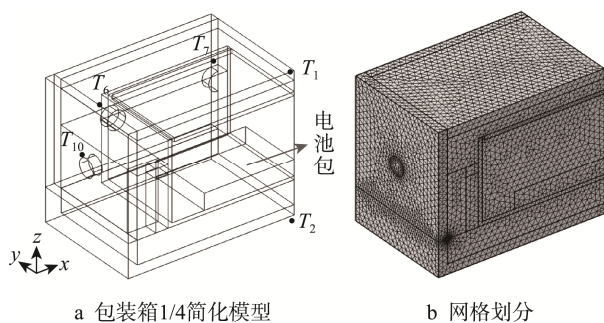


图 3 废旧车用锂电池运输包装箱有限元模型
Fig.3 Finite element model of used lithium battery transport packaging box for vehicles

1.5 边界条件设置

研究发现锂电池热失控、起火燃烧可形成 700~1 100 °C 高温^[14-15], 且热失控阶段的瞬间升温会带来

模型极度不收敛。为保证模型收敛, 本文通过设置电池包初始值温度为 900 °C 热源代替电池热失控副反应产热及电池间漫长的热蔓延过程, 电池外壳和箱体 304 不锈钢薄板被设为薄层。经验证辐射传热对包装箱温度场影响较少, 忽略不计。模型相关热物理数参见表 1, 模拟时长为 2 000 s, 步长为 10 s, 热通量为 10 W/(m²·K), 外界环境温度为 25 °C。

2 废旧车用锂电池运输包装箱温度场仿真与验证

2.1 废旧车用锂电池运输包装箱温度场仿真分析

箱内 900 °C 高温条件下, 包装箱温度场仿真结果如图 4 所示, 除集液槽外箱体外表面温度主要为

表 1 废旧车用锂电池运输包装箱有关热物理参数

Tab.1 Thermal physical parameters of used lithium battery transport packaging box for vehicles

组件	几何参数/mm	密度/(kg·m ⁻³)	比热容/(J·kg ⁻¹ ·K ⁻¹)	导热系数/(W·m ⁻¹ ·K ⁻¹)
电池包	972×740×87	2 276	1 090.4	$k_x=15$ 、 $k_y=0.8$ 、 $k_z=10$
电池壳	$d=1$	2 700	900	160
阻燃棉	$d=48$	127.115	3.14	0.04
304 不锈钢薄层	$d=1$ 、2、3、4、6	6 750.307	0.001 7	0.112
空气域	27×148×10	0.3~1	1	3~8

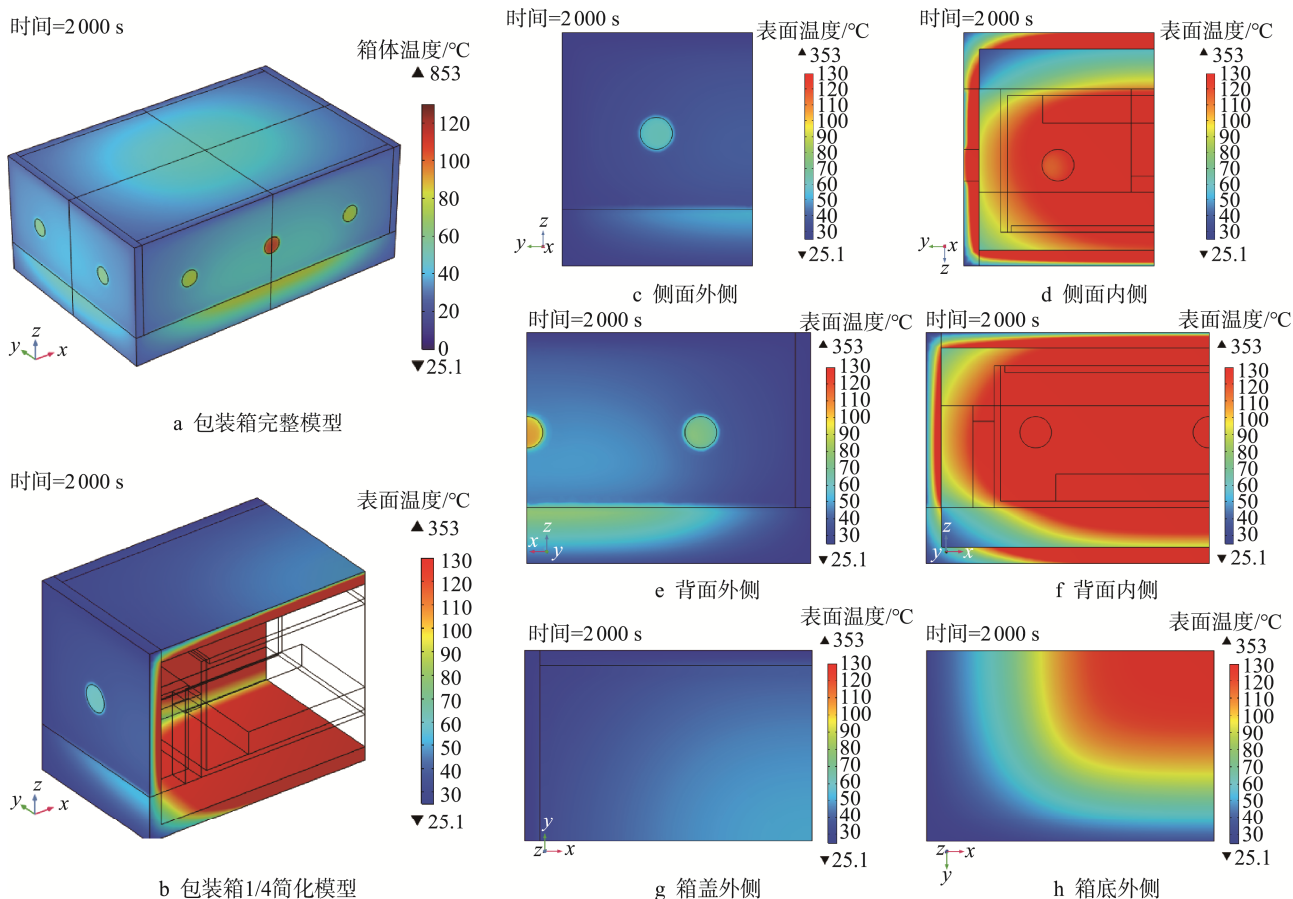


图 4 包装箱温度分布云图
Fig.4 Packaging box temperature distribution pattern

30~55℃,各端面中心处温度相对较高。包装箱正面和背面中心通风孔因模型简化缺少阻燃棉,隔热保护温度超过100℃,其余通风孔温度皆为60~80℃。集液槽结构因缺少隔热材料保护整体温度相对较高,其底部外表面温度最高可达134.6℃,集液槽与箱体连接处温度大概为80~100℃,较为危险,后续必须针对集液槽结构进行优化改良。

仿真结果表明箱体阻燃棉可很好地隔绝箱内高温,将箱外热量控制在安全范围内。但集液槽及结构间的连接处温度接近或超出100℃,存在较大的热安全隐患,需进行针对性的优化研究,保证包装箱整体都能满足P911、LP906要求。

2.2 实验验证

在(25±2)℃环境下,参照GB/T 38031—2020对15组方形锂电池模组进行预处理,确保电池SOC达到95%~100%。预处理好的实验电池模组按5行3列被放在内包装托盘上,并在电池包中心位置(两单电池正面之间)插入800W加热片单点触发电池热蔓延,温度传感器监测箱内中心电池模组温度变化。确定电池未发生短路前提下关闭箱盖,在包装箱底部中心位置增设温度传感器,监测集液槽底部温度变化状况,红外热成像仪记录包装箱实验温度变化状况。结果显示,800W热源单点加热下实验电池全部发生了热失控爆炸,箱内实验温度高达884.3~912.5℃,集液槽底部中心点实验温度最高达117℃。电池燃爆冲击下,包装箱箱盖被冲击变形,密封性变差,高温热浪从箱盖薄弱处及各通风孔处冒出,温度分别高达75.1℃及60~75.1℃。包装箱其余位置外表面温

度为30~50℃,且包装箱外侧无明显火冒出、无喷射物喷溅(图5b)。对比包装箱温度场仿真与实验验证数据发现(表2),模型误差为-1.4%~15.0%,属可接受范围,创建的废旧车用锂电池运输包装箱模型较为可靠。

3 废旧车用锂电池运输包装箱优化设计

3.1 集液槽设计优化

针对集液槽结构特点将集液槽底部夹层厚度为98mm的空气域分别调整为厚度为98、40mm的阻燃棉,不改变外形尺寸条件下多出的收集空间可盛装更多的废液。首先,由如图6所示的集液槽底部阻燃棉在厚度98mm条件下的包装箱温度分布云图可知,模型箱体外侧温度无明显变化,集液槽与箱体连接处温度明显低于原始模型的(图4),底部虽仍高温聚集,但最高温度降至80℃左右,满足预期目标。

不同集液槽优化方案下包装箱各监测点温度时间数据如图7变化,集液槽底部中心点T₂峰值温度从134.6℃分别下降至69.1、78.8℃,集液槽隔热初步优化效果较无任何隔热措施的原始模型分别增强了48.7%、41.5%。并且从图7可知,是否将底部夹层空气域替换成阻燃棉对箱体部分的监测点温度影响均不显著,该部分主要影响包装箱集液槽部分的温度分布状况。综合考虑成本及集液槽的废液收集作用,集液槽底部阻燃棉厚度40mm为当下更优选择。

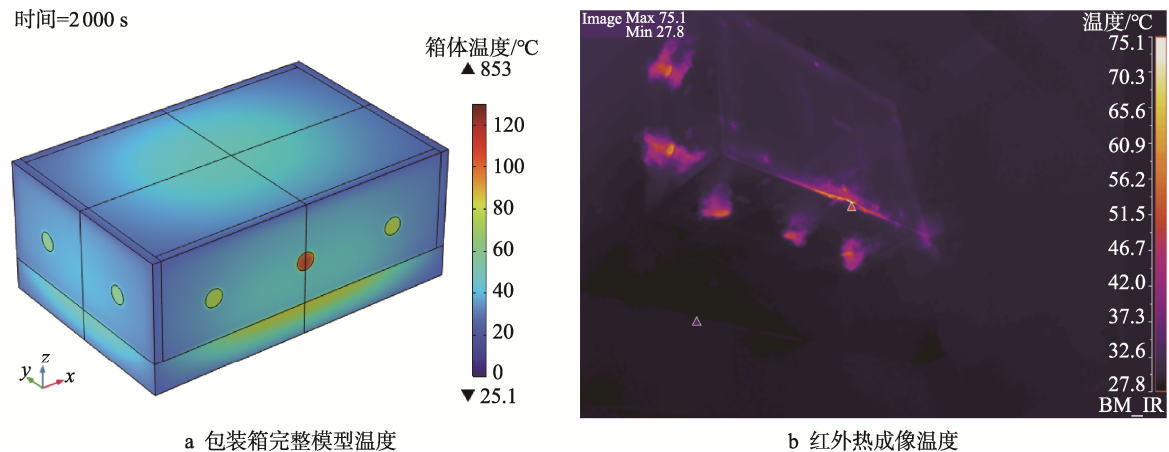


图 5 包装箱温度场模拟与实验验证温度
Fig.5 Temperature field simulation and experimental verification temperature diagram of packaging box

表 2 废旧车用锂电池运输包装箱温度场仿真与实验验证数据对比
Tab.2 Temperature field simulation and experimental verification data comparison of waste vehicle lithium battery transport packaging box

组别	箱内热源温度/℃	通风孔温度/℃	箱体温度/℃	集液槽底部温度/℃
实验	884.3~912.5	60~75.1	30~50	117.0
模拟	900	60~80	30~55	134.6
误差	1.8%~-1.4%	0~6.5%	0~10.0%	15.0%

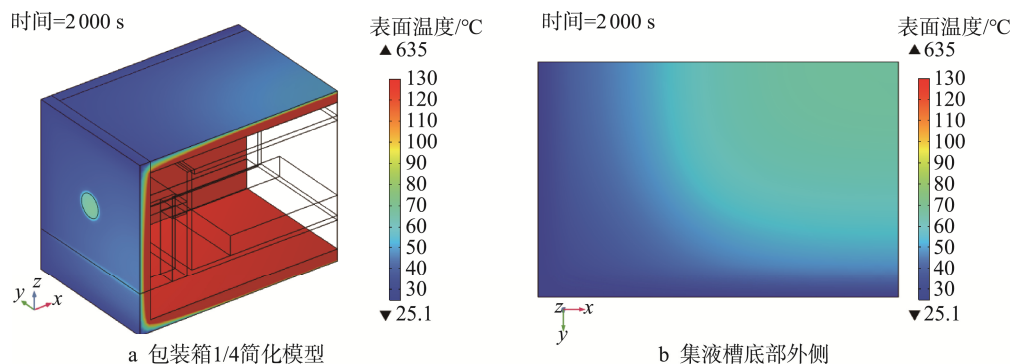


图6 集液槽底部阻燃棉厚度为98 mm条件下的包装箱温度云图

Fig.6 Temperature pattern of packaging box under the condition of 98 mm flame retardant cotton at the bottom of liquid collecting tank

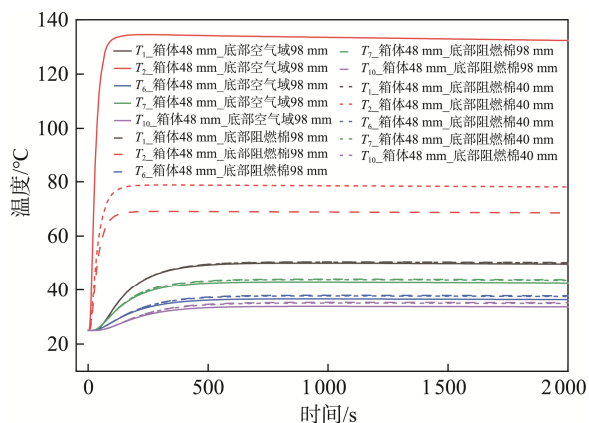


图7 不同集液槽优化方案下包装箱各监测点温度时间数据

Fig.7 Temperature and time data of each monitoring point of packaging box under different optimization schemes of liquid collecting tanks

3.2 箱壁壁厚优化

在集液槽底部空气域更改为40 mm厚阻燃棉的基础上,将箱体阻燃棉厚度从原始的48 mm分别被调整为30、25、20、15及10 mm。箱体阻燃棉优化效果如图8所示, T_1 、 T_6 、 T_7 、 T_{10} 监测点温度随箱体阻燃棉厚度的减小而上升,但都满足P911、LP906温度规定。将图8中关键数据进一步处理并记录于表3,对比发现在箱体阻燃棉厚度为10 mm方案下箱盖顶面温度升高最多,15 mm次之。实际条件下阻燃棉导热系数会随温度的升高而升高,在厚度为10 mm方案下,箱盖顶面处温度有更大的可能超过100 °C,因此选择箱体阻燃棉厚度15 mm和集液槽底部阻燃棉厚度40 mm为此阶段的最优方案。这不仅能大幅减少箱体阻燃棉用量,还可以增大包装箱内部空间。

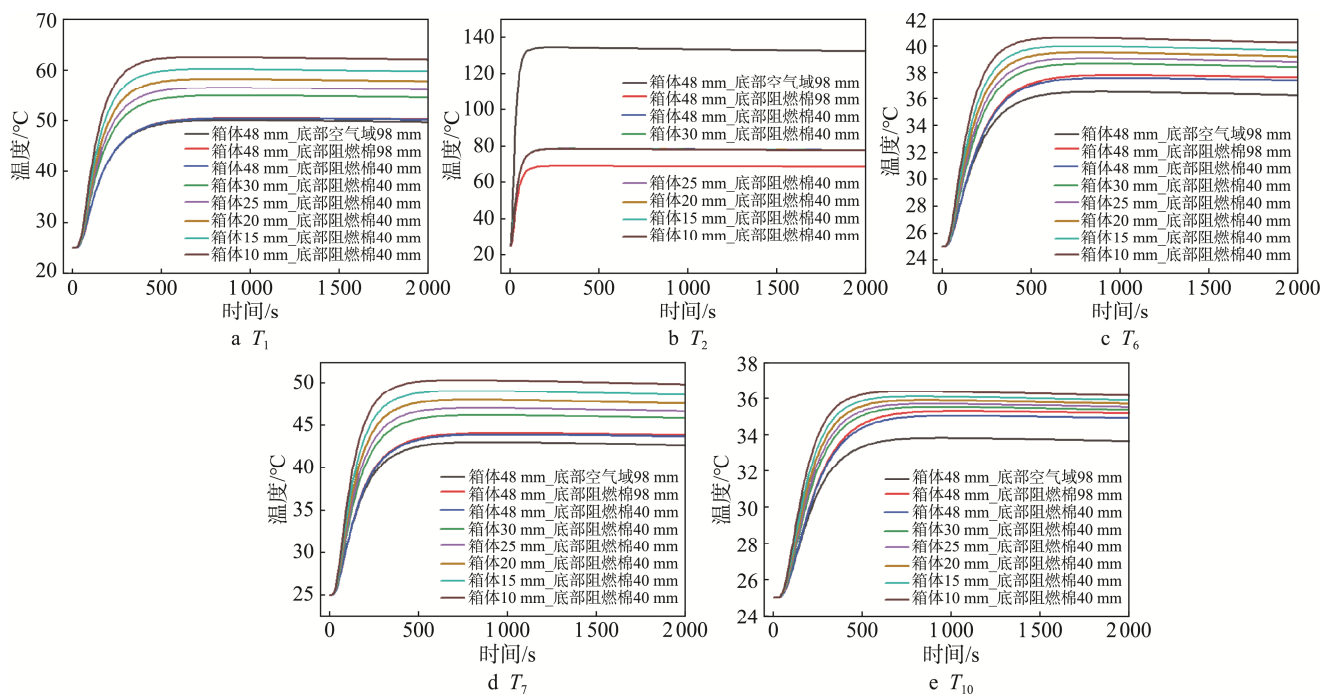


图8 不同箱体阻燃棉厚度优化方案下包装箱各监测点温度时间数据

Fig.8 Temperature and time data of each monitoring point of packaging box under different thickness optimization schemes of flame retardant cotton

在箱体阻燃棉厚 15 mm、集液槽底部阻燃棉厚 40 mm 优化方案基础上, 对集液槽底部阻燃棉厚度进行再次优化, 二次优化厚度分别降低为 36、30、25 mm。结果如图 9 所示的包装箱各监测点温度时间数据, T_2 最高温度随集液槽底部阻燃棉厚度的降低而升高。对图 9 关键数据进一步处理并记录于表 4 发现, 当集液槽底部从原始的 98 mm 厚空气域调整为不同厚度的阻燃棉时, 在厚度为 36、30、25 mm 条件下 T_2 的最

表 3 不同箱体阻燃棉厚度优化关键数据统计表
Tab.3 Statistical table of key data for thickness optimization of flame retardant cotton in different boxes

壁厚	T_1		T_2		T_6		T_7		T_{10}	
	温度/°C	优化率/%	温度/°C	优化率/%	温度/°C	优化率/%	温度/°C	优化率/%	温度/°C	优化率/%
箱体为 48 mm、底部空气域为 98 mm	50.0	—	134.6	—	36.5	—	43.0	—	33.8	—
箱体为 48 mm、底部阻燃棉为 98 mm	50.5	1.0	69.1	-48.7	37.8	3.56	44.1	2.5	35.3	4.44
箱体为 48 mm、底部阻燃棉为 40 mm	50.4	0.8	78.8	-41.5	37.6	3.0	43.9	2.1	35.0	3.6
箱体为 30 mm、底部阻燃棉为 40 mm	54.9	9.8	78.8	-41.6	38.7	6.03	46.2	7.44	35.5	5.03
箱体为 25 mm、底部阻燃棉为 40 mm	56.4	12.8	78.8	-41.6	39.1	7.12	47.0	9.30	35.7	5.62
箱体为 20 mm、底部阻燃棉为 40 mm	58.1	16.2	78.8	-41.6	39.5	8.22	48.0	11.63	35.8	5.92
箱体为 15 mm、底部阻燃棉为 40 mm	60.1	20.2	78.8	-41.6	40.0	9.59	49.0	13.95	36.1	6.80
箱体为 10 mm、底部阻燃棉为 40 mm	62.5	25.0	78.8	-41.6	40.6	11.2	50.3	14.6	36.3	7.39

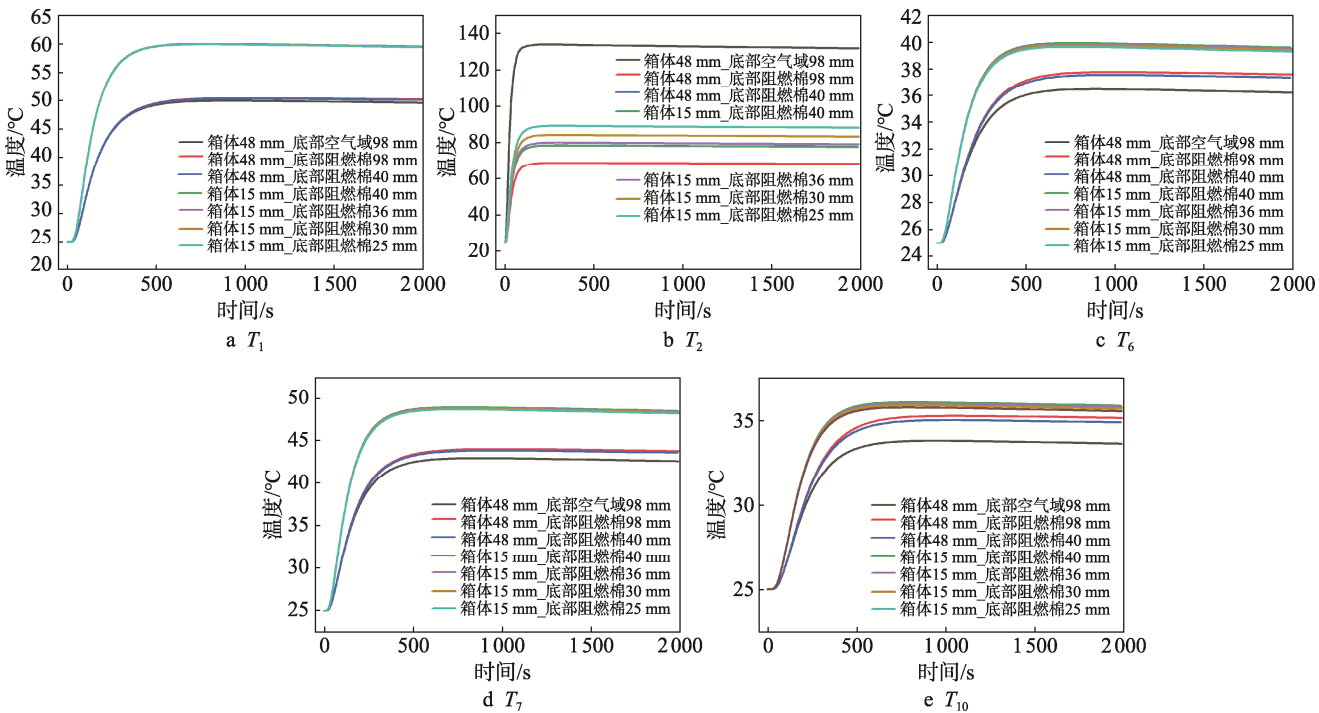


图 9 不同集液槽阻燃棉厚度优化方案下包装箱各监测点温度时间数据
Fig.9 Temperature and time data of each monitoring point of packaging box under different thickness optimization schemes of flame retardant cotton in liquid collecting tank

表 4 不同集液槽阻燃棉厚度优化关键数据统计表

Tab.4 Statistical table of key data for thickness optimization of flame retardant cotton in different liquid collecting tanks

壁厚	T_1		T_2		T_6		T_7		T_{10}	
	温度/°C	优化率/%	温度/°C	优化率/%	温度/°C	优化率/%	温度/°C	优化率/%	温度/°C	优化率/%
箱体为 48 mm、底部空气域为 98 mm	50.0	—	134.6	—	36.5	—	43.0	—	33.8	—
箱体为 48 mm、底部阻燃棉为 98 mm	50.5	1.0	69.1	-48.7	37.8	3.56	44.1	2.5	35.3	4.44
箱体为 48 mm、底部阻燃棉为 40 mm	50.4	0.8	78.8	-41.5	37.6	3.0	43.9	2.1	35.0	3.6
箱体为 15 mm、底部阻燃棉为 40 mm	60.1	20.2	78.8	-41.5	40	9.6	49	14.0	36.1	6.8
箱体为 15 mm、底部阻燃棉为 36 mm	60.1	20.2	80.3	-40.3	39.9	9.3	49	14.0	36	6.5
箱体为 15 mm、底部阻燃棉为 30 mm	60.1	20.2	84.6	-37.1	39.9	9.3	48.9	13.7	35.9	6.2
箱体为 15 mm、底部阻燃棉为 25 mm	60.1	20.2	89.6	-33.4	39.7	8.8	48.8	13.5	35.8	5.9

高温分别为 80.3、84.6、89.6 °C，逐渐接近 100 °C，隔热效果并不理想。集液槽十分靠近电池包热源， T_2 温度超过 80 °C 时集液槽底部厚度优化方案在实际使用时超过 100 °C 的可能性较大，违背优化初衷。在满足 P911、LP906 温度要求前提下，箱体阻燃棉厚度为 15 mm 与集液槽底部阻燃棉厚度为 40 mm 仍是更优选择，最终集液槽部分隔热效果可提升 41.5%，箱体阻燃棉材料可节约 68.75%。

3.3 隔热材料优化

如表 5 所示，选用市面上已有的另外 2 种无机耐火纤维棉（硅酸铝、纳米二氧化硅）隔热材料，在原始模型基础上进行相同热源条件下的温度场优化仿真。不同隔热材料优化方案下，包装箱各监测点温度时间数据与关键数据统计对比分别如图 10 和表 6 所示，硅酸铝纤维棉的热物理参数接近模型原始阻燃棉参

数，优化效果并不理想。选用导热系数明显更低的纳米二氧化硅纤维棉时，箱盖顶面隔热效果明显提高了 16.0%，除 T_2 外的其余监测点位置的隔热效果也得到了大幅提升，隔热效果好于阻燃棉材料。然而，市面上纳米二氧化硅耐火材料的价格相对较贵，是否最终选用还需对包装箱进行纳米二氧化硅隔热材料二次优化和成本核算。

表 5 包装箱隔热材料热物理参数

Tab.5 Thermal physical parameters of packaging box insulation material

隔热材料	密度/ ($\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$)	导热系数/ ($\text{W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$)	比热容/ ($\text{J}\cdot\text{kg}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$)
阻燃棉	127.115	0.040	3.145
硅酸铝纤维棉	113.944	0.045	4.380
纳米二氧化硅纤维棉	171.895	0.020	2.895

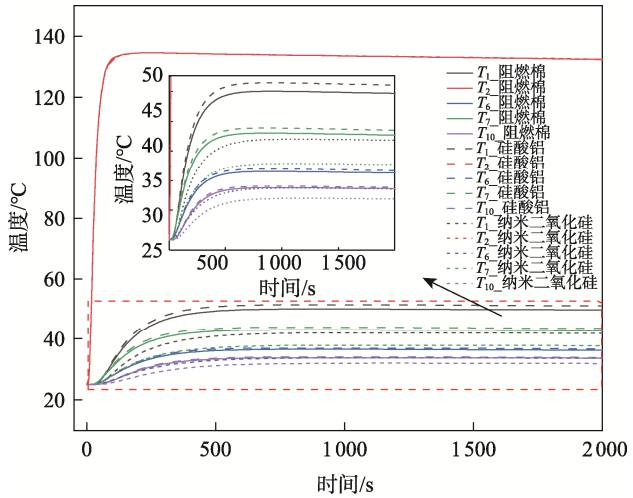


图 10 不同隔热材料优化方案下包装箱各监测点温度时间数据
Fig.10 Temperature and time data of each monitoring point of packaging box under different optimization schemes of thermal insulation materials

表 6 不同包装箱隔热材料优化关键数据统计表
Tab.6 Statistical table of key data for optimization of thermal insulation materials of different packaging boxes

材料	T ₁		T ₂		T ₆		T ₇		T ₁₀	
	温度/℃	优化率/%	温度/℃	优化率/%	温度/℃	优化率/%	温度/℃	优化率/%	温度/℃	优化率/%
阻燃棉	50	—	134.6	—	36.5	—	43	—	33.8	—
硅酸铝	51.4	2.8	134.5	-0.1	37.0	1.4	43.9	2.1	34.1	0.9
纳米二氧化硅	42.0	-16.0	134.6	0.0	33.7	-7.7	37.9	-11.9	32.0	-5.3

4 结语

本文依据 P911、LP906 规定, 以 15 组方形锂电池模组为研究对象, 设计并建立了废旧车用锂电池运输包装箱模型, 验证模型可靠后对包装箱进行温度场仿真模拟, 并在此基础上对包装箱集液槽、箱壁壁厚、隔热材料进行了优化设计。结果显示在集液槽底部夹层添加阻燃棉能解决温度超过 100 ℃的问题, 且箱体阻燃棉厚度为 15 mm 和集液槽底部阻燃棉厚度为 40 mm 的优化方案整体隔热效果最好。选用纳米二氧化硅纤维棉可大幅提升包装箱隔热效果。最终实现箱体阻燃棉用料节约了 68.75%, 集液槽隔热效果提升了 41.5%, 包装箱整体皆满足 P911 及 LP906 要求, 降本增效的同时为废旧锂电池危险品包装热安全防护提供了重要参考。

参考文献:

[1] ZHAO Q, HU L, LI W J, et al. Recovery and Regeneration of Spent Lithium-Ion Batteries from New Energy Vehicles[J]. *Frontiers in Chemistry*, 2020, 8: 807.

[2] SAXENA S, LE FLOCH C, MACDONALD J, et al. Quantifying EV Battery End-of-Life through Analysis of Travel Needs with Vehicle Powertrain Models[J]. *Journal of Power Sources*, 2015, 282: 265-276.

[3] LIU Z H, ZHOU T, YANG H R, et al. A Review of the Resourceful Utilization Status for Decommissioned Power Batteries[J]. *Energies*, 2023, 16(23): 7869.

[4] LI P W, LUO S H, ZHANG L, et al. Progress, Challenges, and Prospects of Spent Lithium-Ion Batteries Recycling: A Review[J]. *Journal of Energy Chemistry*, 2024, 89: 144-171.

[5] FARRINGTON M D. Safety of Lithium Batteries in Transportation[J]. *Journal of Power Sources*, 2001, 96(1): 260-265.

[6] SLATTERY M, DUNN J, KENDALL A. Transportation of Electric Vehicle Lithium-Ion Batteries at End-of-Life: A Literature Review[J]. *Resources, Conservation and Recycling*, 2021, 174: 105755.

[7] 潘生林, 童捷, 翟苏婉, 等. 出口锂电池危险品运输包装的安全设计与防护[J]. *包装工程*, 2015, 36(3): 27-30.

PAN S L, TONG J, ZHAI S W, et al. Safety Design and Protection of Transport Packaging for Exporting Li-

thium Batteries as Dangerous Goods[J]. *Packaging Engineering*, 2015, 36(3): 27-30.

[8] 张铜柱, 李明, 高翔, 等. 破损动力电池运输包装的探讨[J]. *电池*, 2021, 51(1): 78-82.

ZHANG T Z, LI M, GAO X, et al. Discussion on the Transport Packaging of Damaged Power Battery[J]. *Battery Bimonthly*, 2021, 51(1): 78-82.

[9] 何杨华, 王文杰, 郝皓, 等. 退役动力电池回收模式及转运包装探讨[J]. *时代汽车*, 2023(22): 132-134.

HE Y H, WANG W J, HAO H, et al. Discussion on Recycling Mode and Transshipment Packaging of Retired Power Batteries[J]. *Auto Time*, 2023(22): 132-134.

[10] 巩桂芬, 何兴娟, 周健民, 等. 某型号锂电池全纸化包装件跌落仿真分析[J]. *包装工程*, 2023, 44(13): 277-284.

GONG G F, HE X J, ZHOU J M, et al. Simulation Analysis on Fall of a Type of Lithium Battery Fully Paper-Based Packaging Parts[J]. *Packaging Engineering*, 2023, 44(13): 277-284.

[11] 陈满儒, 李璐. 电池片的运输包装设计及其数值模拟[J]. *包装工程*, 2012, 33(13): 75-79.

CHEN M R, LI L. Transport Packaging Design and Numerical Simulation of Solar Cell[J]. *Packaging Engineering*, 2012, 33(13): 75-79.

[12] 李志强, 田洋洋, 刘随强. 锂电池运输包装设计与跌落仿真分析[J]. *包装工程*, 2022, 43(21): 137-143.

LI Z Q, TIAN Y Y, LIU S Q. Transport Packaging Design and Drop Simulation Analysis of Lithium Battery[J]. *Packaging Engineering*, 2022, 43(21): 137-143.

[13] 王功全, 孔得朋, 平平, 等. 锂离子电池热失控模型综述[J]. *电气工程学报*, 2022, 17(4): 61-71.

WANG G Q, KONG D P, PING P, et al. Thermal Runaway Modeling of Lithium-Ion Batteries: A Review[J]. *Journal of Electrical Engineering*, 2022, 17(4): 61-71.

[14] 陈明毅, 周德闯, 丁超, 等. 锂电池燃烧热释放速率实验研究[EB/OL]. (2013-09-02)[2024-04-27]. <http://www.paper.edu.cn/releasepaper/content/201309-12>.

ZHANG M Y, ZHOU D C, DING C, et al. Experimental Study on Heat Release Rate of Lithium Battery Fire[EB/OL]. (2013-09-02)[2024-04-27]. <http://www.paper.edu.cn/releasepaper/content/201309-12>.

[15] WANG S L, WANG Q Z, XU L J, et al. A Review on Mechanisms, Characteristics and Relating Hazards of Vent Gases from Thermally Abused Li-Ion Batteries[J]. *Journal of Energy Storage*, 2024, 84: 110892.