# 电动拖拉机动力电池包热失控特性与需求分析

王丹丹

华北水利水电大学 河南 郑州 450000

**【摘　要】：**随着国家对电动拖拉机发展的大力支持，电动拖拉机产销量快速增长，产业化步伐不断加快。动力电池作为电动拖拉机主要的动力源，其决定着电动拖拉机的动力性、安全性和使用寿命。动力电池系统一般主要由电池模组、电池管理系统、热管理系统以及一些电气和机械系统等构成，动力电池模组由几颗到数百颗电芯经由并联及串联所组成。高温工作环境和激烈碰撞是破坏动力电池、引起电池燃烧、甚至爆炸的主要元凶。拖拉机在田间行驶时，单体电芯由于自身电阻在输出电能的同时会产生热量，使自身温度变高，当某电池单体触发热失控时，产热量骤增，热量向周围电池传递，会迅速引发周边电池大规模热失控，产生火灾甚至爆炸，进而影响到车辆和人员安全[1]。

**【关键词】：**电动拖拉机；电池；分析

**DOI:10.12417/3041-0630.26.13.012**

## 1 动力电池热失控传播抑制技术研究现状

由上可知，对电动拖拉机动力电池的隔热阻燃进行研究显得极为迫切，但目前对于电池模组的高效隔热阻燃和热失控防护关注较少。因此研究动力电池热失控抑制技术成为当前电池安全研究的热点之一。当前在研究动力电池热失控传播方面主要从热失控触发机理、传播路径阻断、热管理系统优化等方面进行分析。根据抑制热失控传播的不同手段，现有的对动力电池热失控传播抑制技术主要从从以下几个方面进行介绍：热管理系统的散热技术、电芯间隔热阻燃技术、电池包的结构防护与安全预警装置等。

### 1.1 热管理系统的散热技术

电池热管理系统的主要作用是在车辆正常工作时将动力电池包温度控制在适宜的范围内。在改善车辆低温续航能力的同时，当电池进行快充或大倍率放电时避免电池温度过高、防止热失控的同时延长电池的循环寿命。当前常见的热管理方式包括风冷、液冷、相变材料（PCM）冷却三种。当前在热管理方面大部分车辆主要采用的是复合热管理技术，即液冷+PCM 耦合技术，即 PCM 负责吸收瞬时峰值产热，液冷负责持续散热。

### 1.2 电芯间隔热阻燃技术

在电芯之间、模组之间设置隔热阻燃层，阻断热失控热量向相邻电芯传递，是目前公认最直接有效的热失控传播抑制手段。隔热层的作用是在热失控发生时形成热阻隔屏障，将高温限制在失控电芯局部范围内，延缓或阻止热量向周围传播。目前常用的隔热材料包括泡棉、泡沫塑料、超细玻璃棉、高硅氧棉、真空隔热板、气凝胶等。

### 1.3 结构防护与预警技术

结构防护技术主要通过增强电池包箱体强度、优化模组结构布局、设置泄压通道等方式，提高电池包抵抗机械滥用和热失控冲击的能力。Tesla 公司在其电池组专利中设计了一种由隔热材料和弹性材料复合制成的隔离板，放置于电池模块不同列单体之间，以此阻断相邻单体间的热失控传播。此外，电池管理系统（BMS）通过实时监测电压、电流、温度等参数，可在热失控早期发出预警信号，为人员逃生和消防处置争取时间。

### 1.4 复合协同抑制技术

单一抑制技术往往难以同时满足散热、隔热、阻燃、减振等多重要求，因此近年来研究者开始关注多种技术复合协同的抑制方案。例如，将气凝胶隔热层与水冷板复合，正常工况下水冷板负责散热，热失控时气凝胶层阻断热量传播；将相变材料与隔热层交替布置，利用 PCM 吸热延缓温升，隔热层阻断热蔓延。

## 2 电动拖拉机动力电池包热失控诱因分析

电动拖拉机与乘用车的工作环境和作业工况存在本质区别。乘用车日常主要行驶在正常路面上，同时具有相对稳定的负载，而电动拖拉机日常主要在农田、不同的土壤条件和环境中完成犁耕、旋耕和运输等工况。因此这种差异性决定了电动拖拉机动力电池包的安全设计不能简单沿用乘用车的技术方案，同时其热失控的诱因也和乘用车有较大区别，总体来说主要包括以下三个方面：

（1）持续大电流放电：电动拖拉机作业工况主要分为犁耕深松等重载牵引、旋耕施肥等中载作业、播种植保等轻载作业；整体来说，电动拖拉机作业时具有低速大扭矩、负载波动大、频繁启停等特点，这些对电池热管理与能量管理系统提出较高要求。中载及重载下电动拖拉机的大电流持续放电会导致

电池内部热量的持续产生，若散热不及时，电池温度将持续升高，最终可能引起热失控。

（2）高频振动导致连接松动：拖拉机在田间工作时，经常处于强振动工况，高频振动可能会引起动力电池包内部的连接件出现松动甚至断裂。连接件之间的松动会导致接触电阻增大，从而使电池内部产生大量的热，热量可能进一步导致电池包内部正负极板之间的隔板收缩或熔化，从而引发电池内部出现短路，电路的短路故障可在短时间内将局部温度上升至热失控触发温度。

（3）粉尘堆积导致散热不良：电动拖拉机在田间工作时，由于田间尘土较多，可能会引起粉尘沉淀在电池包表面或电池散热器中，从而影响电池本身的散热，严重降低电池包的散热效率。散热不良会导致电池包整体温度升高。当某个电芯因内短路或过充触发局部高温时，由于散热通道被粉尘堵塞，热量无法及时散出，局部高温迅速向周围扩散，加速热失控传播。

在拖拉机的实际工作中，这三种因素往往不是独立存在的，而是相互作用。从而使热失控加剧。

## 3 电动拖拉机动力电池包热失控需求分析

电动拖拉机动力电池包热失控需求分析与影响热失控的因素分析，是进行电动拖拉机动力电池包结构设计关键环节。因此本文从隔热阻燃性能、减振缓冲性能、轻量化设计等三个方面提出动力电池包一体化结构设计的设计需求。

### 3.1 隔热阻燃性能需求

隔热阻燃性能是动力电池包一体化结构的核心功能需求。根据电动拖拉机的实际使用场景，田间作业地点通常远离村庄和消防设施，从热失控发生到人员撤离、消防处置所需时间明显长于乘用车。参照乘用车电池包热安全设计经验，结合电动拖拉机的特殊工况，同时参照国家标准我们提出隔热阻燃层的阻燃等级应达到 $V_0$ 级，同时隔热阻燃层应能够将热失控在电池模组内的传播时间延长至 300 s 以上，为驾乘人员提供至少 300s 的逃生时间。

### 3.2 减振缓冲性能需求

电动拖拉机在田间作业时，电池包持续承受低频大振幅振动、高频小振幅振动和随机冲击载荷。长期振动可能导致电芯连接件松动、隔热层结构损伤、粘接界面脱粘，进而引发电气短路或热失控传播。因此，隔热阻燃一体化结构在满足隔热阻燃性能的同时，还应具备良好的减振缓冲性能，以适应拖拉机强振动工况。本文参照国家标准中的环境试验部分同时结合电动拖拉机田间作业振动实测数据，提出以下性能指标：（1）振动传递率：在 5~200 Hz 频率范围内，隔热阻燃层的振动传递率应小于 0.7；（2）共振放大倍数：在系统共振频率处，隔热阻燃层的共振放大倍数应小于 3，避免因共振导致电芯承受过大加速度。（3）振动疲劳寿命：在 5~200 Hz、加速度 5g 的随机振动条件下，隔热阻燃层应能够承受至少 $10^6$次循环而不发生结构失效。

### 3.3 轻量化与空间布局需求

轻量化与空间布局是隔热阻燃一体化结构设计的重要约束条件。电动拖拉机对整机质量和空间布局有严格要求，隔热阻燃层的引入不应显著增加电池包质量，也不应过多占用电池包内部空间。

因此本文参照乘用车动力电池包轻量化设计经验，结合电动拖拉机整机质量提出电动拖拉机动力电池包设计中应满足的轻量化指标：1)所使用的隔热阻燃层材料的表面密度应不大于 3.0 kg/m² 。2)隔热阻燃一体化结构设计时的附加件的质量应不超过电池包总质量的 5%。同时由于电池包本身的体积和质量条件，隔热阻燃层在设计时不能显著增加电池包外形尺寸，同时隔热阻燃层的布置也不能减少电池模组的本身的设计数量，同时隔热阻燃层的结构设计应便于安装和更换，不影响电池包的正常装配和维护。

## 4 总结

本章围绕电动拖拉机动力电池包隔热阻燃一体化结构的设计需求，从工况分析、环境分析和性能指标三个方面开展了系统研究，分析了电动拖拉机典型作业工况的负载特性，揭示了田间环境对电池包热安全的影响机理，归纳了电动拖拉机电池包热失控的三类主要诱因提出了隔热阻燃一体化结构的设计需求与性能指标。

## 参考文献：

[1] 赵岩岩,刘定宏等.新能源汽车锂离子动力电池安全性分析[J].汽车与新动力,2023(6):43-45.

[2] Zhang Y,Lu Z,Yang Z,et al.Resilient carbon fiber network materials under cyclic compression[J].Carbon,2019,155:344-352.

[3] 冯坚,冯军宗等.碳气凝胶的传热规律及其在防隔热中的应用[J].宇航材料工艺,2012,42(2):1-6.

[4] 李敬会.电池热管理系统分析与应用研究[D].南昌:南昌大学,2018:15-20.