

DOI:10.19853/j.zgjsps.1000-4602.2025.06.010

# 新能源汽车库高压细水雾灭火系统设计

周 建

(中铁成都规划设计院有限责任公司, 四川 成都 610031)

**摘 要:** 随着我国新能源汽车保有量逐年上升,动力电池汽车起火事件也随之增多,原有自动喷水灭火系统对此灭火效果不佳。选取高压细水雾作为动力电池汽车灭火剂进行研究,对高压细水雾自身特性及灭火特点进行概述,并详细探讨了如何在室内外充电停车库中设计高压细水雾系统。由于现行规范的限制,将开式系统与局部应用系统相结合,控制干式管网的长度在300 m内,则整个地下车库可仅设置一套泵组;在局部应用系统中,通过加大喷雾强度至 $3.04 \text{ L}/(\text{min}\cdot\text{m}^2)$ 以保证灭火效果;为提升系统应急响应速度,采用新型红外温度传感器、车辆自带电池组温控系统联动启动高压细水雾系统。该系统灭火效果较好,可以为类似项目提供参考。

**关键词:** 高压细水雾; 车库灭火系统; 新能源汽车; 动力电池

**中图分类号:** TU992 **文献标识码:** B **文章编号:** 1000-4602(2025)06-0064-05

## Design of a High-pressure Water Mist Fire Extinguishing System for New Energy Garage

ZHOU Jian

(China Railway Chengdu Planning & Design Institute Co. Ltd., Chengdu 610031, China)

**Abstract:** With the annual increase in the number of new energy vehicles in China, fire incidents involving power battery vehicles continues to rise. The existing automatic sprinkler system demonstrates inadequate firefighting effectiveness. In view of this, high-pressure water mist was selected as the fire extinguishing medium for power battery vehicles. This paper summarized the characteristics and fire extinguishing capability of high-pressure water mist, and provided an in-depth discussion on the design for implementing high-pressure water mist systems in both indoor and outdoor electric vehicle charging parking garages. Given the constraints imposed by the current code, the open system was integrated with the localized application system, and the length of the dry pipe network was restricted to within 300 m. Consequently, only a single set of pumps was installed throughout the entire underground garage. In the localized application system, the efficacy of fire extinguishing was ensured by augmenting the spray intensity to  $3.04 \text{ L}/(\text{min}\cdot\text{m}^2)$ . To enhance the system's emergency response speed, the new infrared temperature sensors and the vehicle battery pack's temperature control system were employed to activate the high-pressure water mist fire extinguishing system. The system has a good fire extinguishing effect, and can provide reference for similar projects.

**Key words:** high-pressure water mist; garage fire extinguishing system; new energy vehicle; power battery

随着能源危机和气候变暖问题的逐渐加剧,国内外都在减少对化石能源的依赖,新能源汽车作为

绿色经济的重要组成部分,近年来得到了大力推广。根据工信部在2023年1月18日新闻发布会上提供的消息,2022年我国新能源汽车产销量分别为705.8万辆和688.7万辆,同比分别增长了96.9%和93.4%,连续8年保持全球第一。此外,公安部2023年10月10日发布的最新统计显示,我国新能源汽车保有量已超过1800万辆,其驱动能源包括动力电池、燃料电池等,前者占据其中绝大部分。锂电池凭借高能量密度、无记忆效应、自放电率低和生命周期长等特点成为主要的动力电池产品<sup>[1]</sup>。然而,锂电池热失控导致电动汽车的起火爆炸事件频发,事故严重时甚至导致人员伤亡。高压细水雾技术由于其出色的窒息效应及热辐射阻断效果,能够显著降低锂电池的热失控危害。对于锂电池组起火,在高压细水雾应用期间,最大冷却速率超过100℃/s,热失控电池表面温度在5s内可下降至100℃,其邻近电池未出现热失控现象<sup>[2]</sup>。该研究主要探讨室内外充电汽车库的高压细水雾灭火系统设计,以期类似项目提供参考。

## 1 锂电池起火原理及特点

锂电池起火及爆炸的主要原因在于热失控,而热失控多由于过充、短路、受热等因素<sup>[3]</sup>。过充可能会导致电极分解、负极形成枝晶、隔膜熔化、电解液气化等情况,进而发生剧烈反应放热;短路可分为外部短路及内部短路,短路发生后,电池内正极 $\text{Li}_{0.5}\text{CoO}_2$ 分解析出氧气,使得电解液发生氧化反应并释放大量的气体,短时间内会积聚较多热能,从而导致起火爆炸,引发短路的原因主要包括针刺、撞击、高温环境、IC失效等;在受热高温条件下,由于电解液温度升高,电池内固体电解质界面(SEI)膜可能被熔化,SEI膜一旦被熔穿,电池则会出现短路现象。

锂电池起火后火灾蔓延速度非常迅速,燃烧过程中的温度较高,其火焰峰值温度最高可达1000℃以上,同时会伴随产生大量的有毒烟气。此外,由于锂电池外壳的存在,明火扑灭后,其内部热失控进程难以观察及控制,导致锂电池的二次复燃风险较大。

## 2 锂电池灭火技术

### 2.1 主要灭火技术

当前锂电池灭火剂主要分为固体、气体、液体

灭火剂。

固体灭火剂(干粉灭火剂、气溶胶灭火剂等)主要通过隔离、化学抑制作用进行灭火,对扑灭明火效果明显,但是由于其缺乏降温效果,对电池内部热失控难以起效,导致电池组很快复燃。

气体灭火剂( $\text{CO}_2$ 、七氟丙烷、全氟己酮等)以隔离、降温、抑制作用为主,但其冷却能力不足,不能完全阻止热失控在电池模组内的传播。

液体灭火剂主要包括泡沫、细水雾、液氮等,泡沫灭火剂扑灭火灾能力较强,然而冷却能力较弱;液氮具有良好的灭火及降温效果,但其成本较高、危险性大,现阶段不适合大规模应用。

### 2.2 高压细水雾技术

高压细水雾灭火技术将水雾化形成细水雾,其表面积相较于同体积水出现较大增长,在吸收热量后,其体积迅速膨胀,通常可达到1600倍,从而降低氧气浓度,抑制氧化反应的进行,同时对电动汽车形成包裹,具有出色的热辐射阻断效果。有研究<sup>[4]</sup>表明,细水雾技术可大幅延迟热失控的发生,即使在200℃的电池温度下,启动细水雾系统,仍可将锂电池热失控延迟最多10s,显著提升了事故发生时人员逃生概率。

高压细水雾的雾滴直径一般小于200 $\mu\text{m}$ <sup>[5]</sup>,电气绝缘性好。根据相关试验<sup>[6]</sup>,将细水雾喷头喷射的雾束在220、110、35kV三个不同电压等级下进行交流电耐压性能研究,结果均表明高压细水雾具有良好的电气绝缘性能。

高压细水雾技术由于其较好的隔离窒息、隔热、冷却效果以及出色的电气绝缘性,在动力电池汽车灭火措施中具有良好的应用前景。

## 3 当下车库灭火技术

根据《汽车库、修车库、停车场设计防火规范》(GB 50067—2014)、《建筑防火通用规范》(GB 55037—2022),在车库内设置消火栓、灭火器、自动喷水灭火系统。消火栓及自动喷水灭火系统均采用普通液体灭火剂,其对锂电池热失控及起火仅能起到一定的冷却作用,效果较弱。车库内配置的灭火器一般为磷酸铵盐干粉灭火器,其缺乏降温效果,对锂电池内部热失控难以抑制。以上分析表明,当下普通汽车库内灭火设备缺乏对锂电池热失控、起火的应对手段。

## 4 高压细水雾灭火设计

### 4.1 室外充电桩灭火系统

室外充电桩普遍设置于有人监视区域,故考虑设置移动式高压细水雾灭火系统,并培训管理人员使用该设备。国内已有成熟产品,设备工作压力普遍为10~12 MPa,喷射额定流量为20~40 L/min,水滴粒径主要在400 μm左右,可根据实际需求选用电动机、柴油机或汽油机作为加压设备。

### 4.2 地下车库灭火系统

#### 4.2.1 防护区设计

根据《细水雾灭火系统技术规范》(GB 50898—2013,以下简称《细水规》)相关规定,采用全淹没应用的开式系统,防护区数量不应大于3个,当其采用泵组系统时,每个防护区体积不宜超过3 000 m<sup>3</sup>。地下车库层高普遍在3.7~3.9 m之间,按4 m考虑,则单个防护区面积不宜超过750 m<sup>2</sup>,单套泵组系统的应用面积不宜超过2 250 m<sup>2</sup>。由于应用面积较小,在进行地下车库灭火系统设计时需设置多套泵组系统,使车库消防系统投资大幅增加,不符合经济适用的原则。

由于《细水规》出版时尚未出现如此高的新能源汽车销售量及保有量,未考虑在车库内设置高压细水雾灭火系统的设计参数,故该次设计除参考规范中部分内容外,另有部分参数按照相关论文试验结果选取,并结合个人设计经验确定。

高压细水雾主要应用于新能源车辆冷却、灭火,此外考虑细水雾喷放时,疏散通道需有足够能见度以保证人员逃生顺利,故该设计仅考虑在车位上方设置喷头,将系统调整为局部应用系统,并按照车位布置情况设置防护区。

#### 4.2.2 喷头选用及安装

陈雅惠<sup>[7]</sup>的试验结果表明,当系统工作压力为10 MPa、流量系数K=1.7时,雾滴的雾动量更大,表面积相对适中,具有较强的火焰穿透能力及出色的冷却效果,从而具有更快的灭火速度;当喷头安装高度为3.0 m时,灭火效率最高。故该次设计喷头安装高度为3.0 m,采用流量系数K=1.7的开式喷头。

参考《细水规》中相关数据、厂家产品样本以及相关试验布置,喷头的最大布置间距按2.5 m考虑。

喷头及设备布置如图1所示。

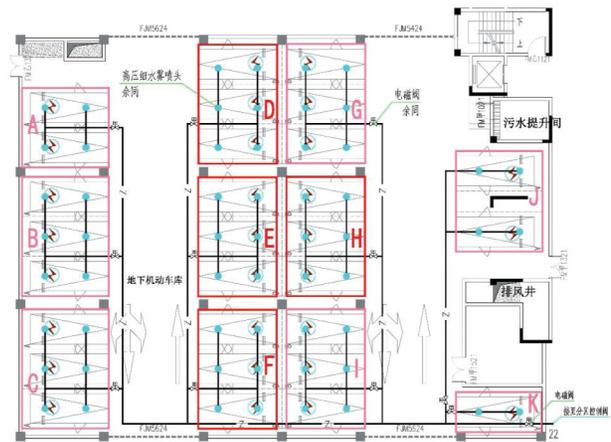


图1 喷头及设备布置

Fig.1 Layout of sprinklers and equipments

#### 4.2.3 水力计算

由图1可知,地下车库某充电防火单元通过电磁阀分为多个防护区,防火单元内设置细水雾泵组及水箱。假设防护区交界处车辆起火,考虑最多启动4个防护区,即同时开启24个开式细水雾喷头。喷头设计流量如下式所示:

$$q = K \cdot \sqrt{10P} \quad (1)$$

式中: $q$ 为喷头的设计流量,L/min; $K$ 为喷头的流量系数,L/(min·MPa<sup>0.5</sup>); $P$ 为喷头的设计工作压力,MPa。

取 $K=1.7$ , $P=10$  MPa,则最不利喷头设计流量 $q=17$  L/min。

参考《细水规》3.4条,计算得出最不利防护区D、E、F、H的设计流量 $q=420.7$  L/min,设计流速5.5~9 m/s。按喷放时间30 min计算,单次灭火用水量 $Q=12.62$  m<sup>3</sup>、系统设计供水压力 $P_1=13.76$  MPa,高压柱塞泵组参数 $Q=448$  L/min、 $H=14$  MPa、 $N=120$  kW。

根据《细水规》要求,开式全淹没系统标准(喷头安装高度为3 m)的设计喷雾强度需大于1 L/(min·m<sup>2</sup>)。同时,根据陈雅惠<sup>[7]</sup>的试验结果,当 $K=1.7$ 、安装高度为4 m、喷雾强度为1.06 L/(min·m<sup>2</sup>)时,细水雾喷放160 s后,距火焰中心0.5 m左右位置的温度从784 °C降至55 °C,具有良好的火灾扑救效果。

该次设计喷雾强度为3.04 L/(min·m<sup>2</sup>),由于为局部应用系统,考虑60%水雾外溢后,实际喷雾强度仍超出规范要求及相关试验数据,因此该设计能

够满足火灾扑救要求。

#### 4.2.4 管网系统设计

根据《细水规》3.4.8条,开式系统的设计响应时间不应大于30s,按设计平均流速不低于5m/s且不大于10m/s计算,防火分区控制阀(分区控制阀前管网由稳压泵保持湿式系统,阀后为干式系统)距离最末端喷头的管网长度不应大于300m。按建筑相关规范,在设有自动灭火系统的地下车库中,单个防火分区面积不超过4000m<sup>2</sup>,同时结合笔者经验,设计单个防火分区内管网长度一般不大于150m,可以满足开式系统响应时间要求,则整个地下车库仅设置一套泵组即可。地下车库高压细水雾系统设计原理如图2所示。

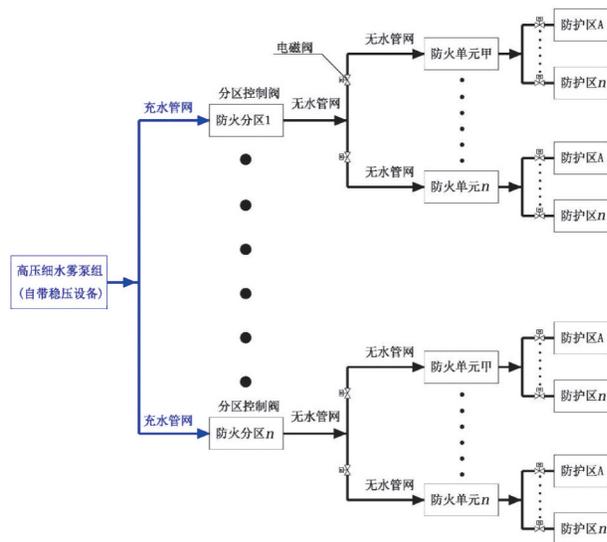


图2 地下车库高压细水雾系统设计原理

Fig.2 Design principle of high-pressure water mist system for underground garage

#### 4.2.5 控制系统设计

根据《细水规》3.6.2条,开式系统需接收到2个独立的火灾报警信号后启动。由于锂电池组起火迅速,若需要接收到2个独立信号(一般为1个温感信号、1个烟感信号),则会导致系统启动滞后,无法在前期对锂电池起到降温效果、阻断锂电池热失控,造成财产损失。传统的烟感及温感报警均存在滞后效应,故考虑使用新型红外温度传感器联动启动高压细水雾系统。同时,现有的新能源汽车多具备完善的电池组温度监控系统,并且可以与充电系统联动,高温自动切断充电过程,故在控制系统中增加车辆温感系统联动启动高压细水雾系统的

功能。

地下车库高压细水雾系统控制原理如图3所示。

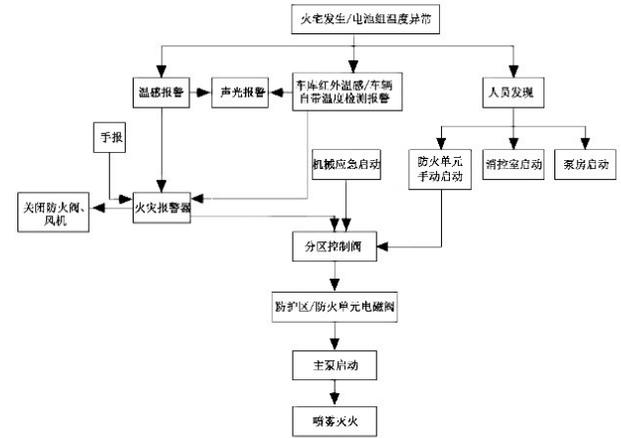


图3 地下车库高压细水雾系统控制原理

Fig.3 Control principle of high-pressure water mist system for underground garage

#### 4.2.6 经济性分析

对于一个约5×10<sup>4</sup>m<sup>2</sup>的地下车库项目,其主要工程材料造价如表1所示。

表1 主要工程材料造价

Tab.1 Cost of main engineering materials

项目	单价	数量	总价/万元
喷头	150 元/个	3 500 个	52.5
管道及附件	136.04 元/kg	50 009.5 kg	680.33
泵组	50 万元/套	1 套	50
合计			782.83

地下室传统湿式自动喷淋系统材料造价为45元/m<sup>2</sup>,则5×10<sup>4</sup>m<sup>2</sup>的地下车库主要工程材料造价约225万元;高压细水雾主要工程材料造价约为782.83万元。由于高压细水雾系统采用的奥氏体管材为特种钢,市场需求较低,单价高,导致材料造价超过传统湿式产品。

### 5 结论及展望

① 为保证高压细水雾系统的冷却降温效果,将喷头安装高度定为3.0m,喷头流量系数K=1.7,喷头工作压力P=10MPa。仅在车位上方布置喷头,系统形式为开式局部应用系统。

② 通过电磁阀将地下车库划分为多个防护区,普通地下车库设置1套高压细水雾泵组即可满足需求,高压柱塞泵组设计参数为Q=448L/min、H=14MPa、N=120kW。

③ 通过红外温感探测器、车辆温度监控系统联动启动高压细水雾系统,开启相应防火分区、防护区电磁阀,开启声光报警,关闭防火阀、风机,从而快速阻断锂电池热失控,避免财产损失。

④ 研究了室内外充电汽车库中的高压细水雾系统设计,但对于该系统如何替代现有车库自动喷水灭火系统未进行进一步探讨。此外,现行《细水规》对高压细水雾系统的实际应用存在掣肘,随着动力电池汽车保有量的逐年上升,规范亟待更新,从而大范围应用推广高压细水雾系统并降低系统造价。

#### 参考文献:

- [ 1 ] BLOMCREN G E. The development and future of lithium ion batteries[J]. Journal of the Electrochemical Society, 2017, 164(1): A5019-A5025.
- [ 2 ] 张乃平, 马永飞, 杨孟霖, 等. 锂电池火灾灭火技术研究综述[J]. 中国安全生产科学技术, 2022, 18(7): 47-53.
- ZHANG Naiping, MA Yongfei, YANG Menglin, *et al.* Review on fire extinguishing technology research of lithium battery [J]. Journal of Safety Science and Technology, 2022, 18(7): 47-53(in Chinese).
- [ 3 ] 吕浩天. 锂电池火灾爆炸原因分析与控制措施研究[D]. 广州:华南理工大学,2016:15-25.
- LÜ Haotian. The Causes and Control Measures of Fire and Explosion of Lithium Battery [D]. Guangzhou: South China University of Technology, 2016: 15-25 (in Chinese).
- [ 4 ] LIU T, LIU Y P, WANG X S, *et al.* Cooling control of thermally-induced thermal runaway in 18, 650 lithium ion battery with water mist [J]. Energy Conversion and Management, 2019, 199: 111969.
- [ 5 ] 周强. 全淹没细水雾灭火试验与数值仿真[D]. 哈尔滨:哈尔滨工程大学,2013:7-15.
- ZHOU Qiang. Total Flooding Water Mist Fire Suppression Test and Numerical Simulation [D]. Harbin: Harbin Engineering University, 2013 : 7-15 (in Chinese).
- [ 6 ] 粟庄宇. 地下车库高压细水雾灭火系统模拟研究[D]. 成都:西华大学,2018:14-15.
- SU Zhuangyu. Numerical Simulation of High-pressure Water Mist Fire Extinguishing System in Underground Garage [D]. Chengdu: Xihua University, 2018: 14-15 (in Chinese).
- [ 7 ] 陈雅惠. 地下停车库细水雾灭火实验与喷头参数优化研究[D]. 成都:西华大学,2020:37-48.
- CHEN Yahui. Study on Water Mist Fire Extinguishing Experiment and Nozzle Parameter Optimization of Underground Parking Garage [D]. Chengdu: Xihua University, 2020:37-48 (in Chinese).

作者简介:周建(1992- ),男,四川宜宾人,学士,工程师,注册公用设备工程师(给水排水),主要从事民用、工业建筑给排水消防设计工作。

E-mail:854673737@qq.com

收稿日期:2024-01-03

修回日期:2024-02-01

(编辑:沈靖怡)

用生命之水 筑美丽中国