

# 质子交换膜燃料电池车辆安全分析

谢先树

(贵州电子科技职业学院, 贵阳 550023)

**摘要:**为解决质子交换膜燃料电池车辆的安全问题,运用故障树方法,分析了质子交换膜燃料电池车辆安全影响要素及燃料电池系统、动力电池、高压电气线路安全隐患,阐述了当前国内外质子交换膜燃料电池车辆储氢罐、氢气泄漏、动力电池、电气安全方面的防控策略及方法。研究发现,当前质子交换膜燃料电池车辆安全措施能够防控可预见的安全风险。

**关键词:**质子交换膜 燃料电池 车辆安全 安全分析

中图分类号:U469.72 文献标志码:B DOI: 10.19710/J.cnki.1003-8817.20240113

## Safety Analysis of Proton Exchange Membrane Fuel Cell Vehicle

Xie Xianshu

(Guizhou College of Electronic Science and Technology, Guiyang 550023)

**Abstract:** To address the safety concerns of Proton Exchange Membrane Fuel Cell Electric Vehicles (PEMFCEV), this paper uses the fault tree method to explore the factors affecting the safety of PEMFCEV, analyzes the potential safety hazards of proton exchange membrane fuel cell systems, power batteries and high-voltage electrical circuits, and elaborates the current domestic and foreign PEMFCEV manufacturers' safety prevention and control strategies adopted for hydrogen leakage, power battery, and electrical safety. The results show that the current safety measures for PEMFCEV can prevent and control foreseeable safety risks.

**Key words:** Proton exchange membrane, Fuel cell, Vehicle safety, Safety analysis

### 1 前言

相较于纯电动车辆,质子交换膜燃料电池车辆增加了燃料电池系统,其安全控制更为复杂,存在氢气泄漏、动力电池热失控等风险。

李雪芳等<sup>[1]</sup>针对氢气意外泄漏展开了系列研究,建立了高压氢气泄漏的计算模型。何静等<sup>[2]</sup>研究了燃料电池汽车在车库内氢气意外泄漏后的浓度分布情况和不同通风方式对氢气意外泄漏扩散的影响。张磊等<sup>[3]</sup>研究了燃料电池汽车氢气泄漏燃烧爆炸的危险性,发现燃料电池汽车氢系统氢气泄漏危险极大,严重威胁乘员生命安全。董文妍等<sup>[4]</sup>分析了燃料电池汽车氢系统失效的潜在模

式及原因。针对燃料电池汽车安全问题,国家标准化管理委员会出台了《燃料电池电动汽车燃料电池堆安全要求》。

质子交换膜燃料电池车辆结构复杂、运行环境振动大,存在部件失效、碰撞、氢气泄漏等安全风险。开展车用质子交换膜燃料电池系统安全防控分析,探索质子交换膜燃料电池车辆的安全特性,分析车用质子交换膜燃料电池系统隐患,探索其安全控制策略,有助于推动质子交换膜燃料电池车辆安全防控设计。

### 2 质子交换膜燃料电池系统安全要素

质子交换膜燃料电池系统通常由燃料电池

作者简介:谢先树(1978—),男,讲师,硕士学位,研究方向为质子交换膜燃料电池车辆。

参考文献引用格式:

谢先树. 质子交换膜燃料电池车辆安全分析[J]. 汽车工艺与材料, 2025(2): 11-18.

XIE X S. Safety Analysis of Proton Exchange Membrane Fuel Cell Vehicle[J]. Automobile Technology & Material, 2025(2): 11-18.

堆、氢气供给系统、空气供给系统、热管理系统、动力电池系统等组成,其中,对车辆安全性影响较大的系统主要是氢气供给系统和动力电池系统。

### 2.1 氢气对质子交换膜燃料电池车辆安全的影响

氢气在常温常压条件下无色无味无毒,密度为0.089 g/L。当空气中的氢气浓度为4%~70%时,遇到火源易燃易爆,当空气中氢气浓度小于4%或大于75%时,即使遇到火源,也不会爆炸<sup>[5]</sup>。由于氢分子直径小且质量轻,易发生泄漏,与其他气体和液体燃料相比,氢气易扩散<sup>[6]</sup>,从高压储氢罐泄漏的氢气会形成射流,其扩散长度及可燃范围是安全距离和危险区范围的重要影响因素<sup>[7]</sup>,氢气在车库、厂房等通风不良空间中泄漏后易发生积聚,形成爆炸混合物。另外,金属材料与氢长期接触后,通常会出现氢渗透现象,严重影响其机械性能,进而易出现脆断。

氢气储存于高压储氢罐中,施加一定压力后经氢气供给系统输送至燃料电池堆参加化学反应。在质子交换膜燃料电池系统中,由于氢气的易泄性、易爆性和车辆的密闭性,一旦氢气泄漏进入车内,氢气浓度极易达到4%。另外,当室内停车场的燃料电池车辆氢气泄漏时,氢气较难扩散,易发生爆炸。因此,氢气是质子交换膜燃料电池车辆内部最大的危险源,质子交换膜燃料电池车辆氢气供给系统须具有较高的密封性。

氢气泄漏率模型是储氢罐压缩存储氢气的函数,氢气的泄漏质量可由氢气泄漏速度计算获得,氢气泄漏速度取决于储氢罐内压力与环境压力之差和氢气特性。氢气流量与湍流和等熵流出口速度计算如下<sup>[8]</sup>:

$$V_s = \sqrt{\frac{\gamma^p}{\rho} \left(1 + \frac{\gamma - 1}{2}\right)^{-0.5}} \quad (1)$$

$$G = V_s A_{\text{leak}p} \quad (2)$$

式中: $V_s$ 为泄漏出口速度, $\gamma$ 为绝热膨胀系数, $P$ 为储氢罐压力, $\rho$ 为压力为20 MPa、温度为298 K时的氢气密度, $G$ 为氢气质量流率, $A_{\text{leak}p}$ 为泄漏面积。

### 2.2 燃料电池堆退化的安全影响

典型的质子交换膜燃料电池系统通常使用磺化四氟乙烯聚合物作为质子传导膜,杜邦公司Nafion质子交换膜应用较为广泛。在使用过程中,

质子交换膜存在明显的机械性能退化、化学性能退化、热退化。化学性能退化是因燃料电池在高温下运行所致,当燃料电池工作温度高于15 °C时,质子交换膜因干燥出现热退化,由于过氧化物自由基腐蚀,聚合物链出现分解。热退化会导致质子交换膜出现气孔和机械性能退化(膜破裂)<sup>[9]</sup>,一旦破裂,其隔离氢气和氧气的功能失效,氢气将直接与氧气接触并发生爆炸<sup>[10]</sup>。

目前,多数质子交换膜燃料电池衰减电压为1~2  $\mu\text{V/h}$ ,其工作温度不高于75 °C,进入燃料电池堆的空气相对湿度接近100%,进入燃料电池堆的氢气压力、氢气与氧气的比例均须满足技术要求,基于对当前质子交换膜燃料电池的设计经验和工作条件,应用半经验模型关系,构建质子交换膜退化模型表征质子交换膜退化关系。

基于设计和运行条件变化的膜厚度退化比例计算如下<sup>[9]</sup>:

$$R_a = \frac{a_0 + a_1 T + a_2 RH + a_3 P + a_4 / \ln(L_0)}{a_0 + a_1 T^{\text{ref}} + a_2 RH^{\text{ref}} + a_3 p^{\text{ref}} + a_4 / \ln(L_0^{\text{ref}})} \quad (3)$$

式中: $R_a$ 为当前条件与运行条件下膜厚度退化比例; $a_0$ 、 $a_1$ 、 $a_2$ 、 $a_3$ 、 $a_4$ 分别为膜退化比例经验系数,取值分别为-2.649 2、0.018、0.036、0.599 2、10.84; $T$ 为系统运行温度; $P$ 为系统运行压力; $RH$ 为系统进气相对湿度; $L_0$ 为膜初始厚度; $T^{\text{ref}}$ 为膜退化率半经验方程的参考温度; $RH^{\text{ref}}$ 为膜退化率半经验方程的参考相对湿度; $p^{\text{ref}}$ 为膜退化率半经验方程的参考相对压力; $L_0^{\text{ref}}=23 \mu\text{m}$ 为膜退化率半经验方程的参考厚度。

膜厚度相对减少速率计算如下<sup>[9]</sup>:

$$r_L^{\text{curr}} = r_L^{\text{ref}} R_a \quad (4)$$

式中: $r_L^{\text{curr}}$ 为当前条件下膜厚度的相对减少速率, $r_L^{\text{ref}}=3.72 \times 10^{-4} \text{h}^{-1}$ 为基准条件下膜厚度相对减少速率。

质子交换膜瞬时导电性计算如下:

$$\sigma_t = \sigma_0 (1 - t r_\sigma^{\text{curr}}) \quad (5)$$

式中: $\sigma_t$ 为质子交换膜瞬时导电性, $\sigma_0$ 为质子交换膜初始导电性, $t$ 为瞬时刻,  $r_\sigma^{\text{curr}}$ 为当前条件下膜导电性退化比率。

半经验方程式各参数取值为<sup>[9]</sup>  
 $r_L^{\text{ref}} = 3.72 \times 10^{-4} \text{h}^{-1}$ ,  $T^{\text{ref}} = 343 \text{K}$ ,  $p^{\text{ref}} = 1 \text{atm}$ ,  $RH^{\text{ref}}$ 。

参照质子交换膜燃料电池设计运行的过往参

数和当前参数,同时利用半经验方程式有助于估算当前质子交换膜退化<sup>[11]</sup>。质子交换膜是燃料电池的核心部件,其技术性能退化不仅影响燃料电池功率输出,还影响燃料电池车辆安全。另外,质子交换膜与双极板之间利用密封胶密封,密封面存在氢气泄漏风险<sup>[12]</sup>,导致燃料电池堆产生一定安全隐患。

### 2.3 储氢罐的安全影响

储氢罐是质子交换膜燃料电池车辆必不可少的燃料存储器,可储存 70 MPa 高压氢气。储氢罐上通常配装有压力传感器、温度传感器、单向阀、高压阀等部件,任一部件性能退化或与储氢罐密封不严,均会导致氢气泄漏,氢气泄漏的概率与储氢罐的故障概率成正比<sup>[13]</sup>,储氢罐的故障概率取决于储氢罐及其附件的故障概率,储氢罐及附件的故障均影响燃料电池车辆安全。

当车辆发生碰撞、翻车等事故时,储氢罐的泄漏风险难以避免,当高压储氢罐内的氢气泄漏到大气中时,可视为不受约束的自由膨胀,会对车辆及人身安全构成严重威胁。另外,当储氢罐温度过高时有爆炸风险。

### 2.4 氢气供给系统部件失效的影响

氢气供给系统通常包括截止阀、调压器、压力传感器、氢气喷射器及氢气管。在车辆运行过程中,由于车辆振动和可能出现的外力破坏(如发生车辆碰撞),氢气管、调压器等部件有性能退化和功能失效的风险。另外,在振动影响下,管道接头也可能出现密封不良,氢气供给系统存在氢气泄漏风险。

### 2.5 动力电池对安全的影响

当前质子交换膜燃料电池汽车通常使用动力电池作为辅助能源,主要为锂电池,锂离子电池热稳定性差,温度达到 70 ~ 120 °C 会出现鼓胀,释放易燃有毒气体。当温度达到 150 ~ 200 °C 时,锂电池进入发热加速阶段,可能出现热失控。若单体电池出现热失控,会造成电池箱破损、燃烧或爆炸等<sup>[14]</sup>。动力电池在充放电过程中会产生热量,电解液存在泄漏风险,当车辆发生碰撞或翻车事故时,若动力电池受到碰撞、挤压,则可能会产生严重变形、破裂、漏液,甚至爆炸。另外,部分制造商使用水冷方式对动力电池进行冷却,当冷却系统部件失效或电

动汽车发生激烈碰撞时,冷却液易出现泄漏从而导致动力电池短路起火<sup>[15]</sup>。动力电池是决定电动汽车安全性的关键部件,电动汽车的安全性在很大程度上取决于动力电池的安全性<sup>[16]</sup>。

## 3 质子交换膜燃料电池车辆工作安全隐患分析

车辆安全分析应贯穿系统整个生命周期<sup>[17]</sup>。基于之前对质子交换膜燃料电池系统车辆各系统的功能分析,可初步推断出质子交换膜燃料电池车辆在运行过程中主要存在 3 类安全隐患,如图 1 所示:系统氢气泄漏、车辆因发生碰撞或发生翻车事故致氢气泄漏导致燃烧爆炸的隐患;动力电池受挤压变形爆炸、动力电池热失控导致燃烧爆炸的隐患;高压电气部分绝缘层被破坏的触电隐患。

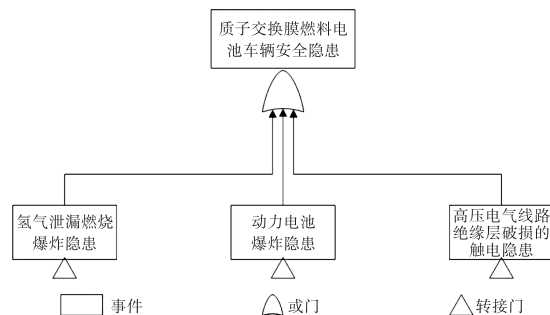


图1 质子交换膜燃料电池车辆安全隐患故障树

### 3.1 质子交换膜燃料电池系统安全隐患分析

运用故障树原理分析氢气燃烧爆炸原因,如图 2 所示。氢气泄漏燃料爆炸的主要原因是氢气泄漏,且氢气泄漏监控系统失效。引起氢气泄漏的原因是氢气供给系统、储氢罐、燃料电池堆退化失效。氢气供给系统泄漏点主要在氢气管、接头、部件;造成氢气泄漏监控系统失效的原因主要是系统传感器、执行器、电控单元或控制电路故障。

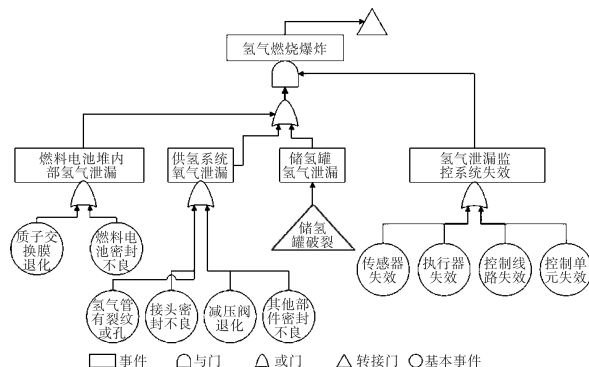


图2 氢气燃烧爆炸故障树

储氢罐破裂原因分析如图 3 所示,储氢罐遭受外力撞击、性能退化、内部压力过高均可能会导致储氢罐破裂出现氢气泄漏,储氢罐内部压力过高因为安全阀失效,储氢罐周围存在燃烧会使储氢罐压力上升,燃烧物主要是氢气供给系统和燃料电池堆泄漏的氢气。氢气供给系统出现氢气泄漏可能的原因是氢气管破裂、接头密封不良、减压阀退化或其他部件故障;燃料电池堆氢气泄漏的原因是质子交换膜性能退化和电堆密封不良。

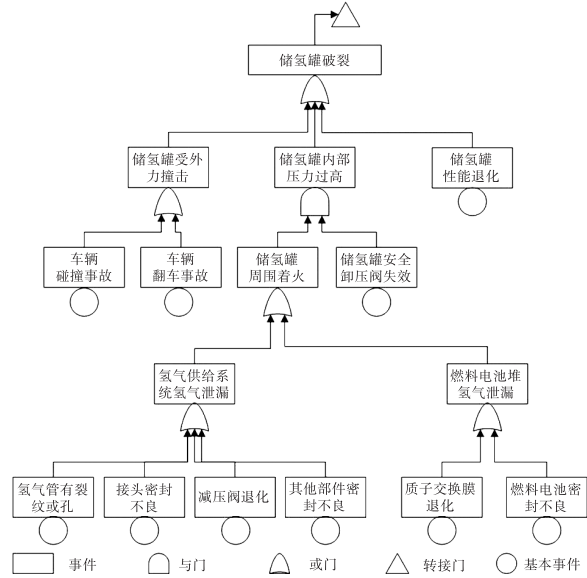


图 3 储氢罐破裂故障树

### 3.2 动力电池安全隐患分析

动力电池是质子交换膜燃料电池车辆的重要组成部分,研究分析动力电池安全特性对提升质子交换膜燃料电池车辆整体安全性非常重要。当前,质子交换膜燃料电池车辆通常选用锂离子电池作为动力电池。据不完全统计,2019年1月至7月底,国内外媒体报道的与动力电池相关的安全事故达 40 起<sup>[18]</sup>,事故中的锂离子电池存在物理损坏<sup>[19]</sup>,其最大的安全隐患是电池随机发生的内短路,产生现场失效,引发热失控<sup>[20]</sup>。尽管已经制定多个锂离子电池的安全性标准,但通过安全标准检验的锂离子电池仍存在安全隐患<sup>[20]</sup>,标准规定的相关测试均不能完全反映动力电池存在的安全隐患。

引起锂离子电池热失控的原因很多,主要分为机械类、电池类、高温类,如图 4 所示:机械类包括碰撞造成的锂离子电池变形、针刺等;电池类

损坏原因包括电池内部短路、外部短路、过充等;高温类故障原因包括电池温度过高、散热系统失效等。

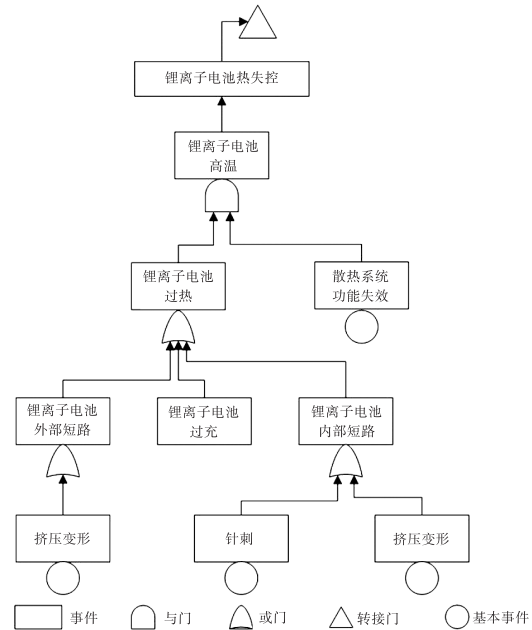


图 4 锂离子电池热失控故障树

### 3.3 高压电气线路绝缘层破损安全隐患分析

高压电气线路绝缘层破损触电的安全隐患原因分析如图 5 所示,其主要原因是当车辆发生事故时,因碰撞导致高压电气线路绝缘层破损,且高压互锁系统失效。另外,检修过程中作业不规范、高压线安装不当也会导致高压电气线路绝缘层破损。

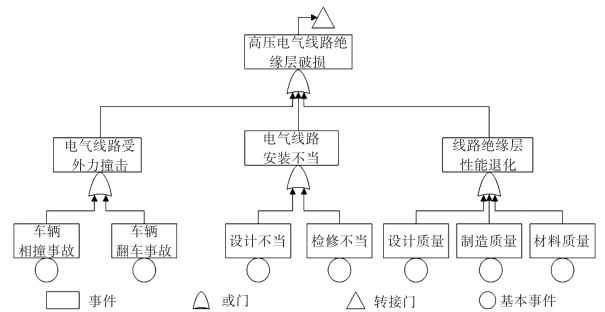


图 5 高压电气线路绝缘层破损故障树

## 4 质子交换膜燃料电池车辆安全防控策略

质子交换膜燃料电池车辆安全是不可忽视的问题,相关标准规定了燃料电池车辆相应的安全要求,如 ISO 23273: 2013 Fuel cell road vehicles — Safety specifications — Protection against hydrogen hazards for vehicles fuelled with compressed hydro-

gen、SAE J2875-201408 Recommended Practice for General Fuel Cell Vehicle Safety、UN GTR No.13《燃料电池电动汽车安全全球技术法规》,燃料电池车辆安全性能提升策略如下。

#### 4.1 储氢罐安全防控策略

储氢罐存储高压氢气,具有较高的安全隐患,储氢罐破裂概率控制目标为0.003 5%,计算如下<sup>[17]</sup>:

$$\lambda_{\text{Target}} = \frac{\left[ \ln \left( 1 - P_{\text{Target}} \right) \right]^{\frac{1}{\beta}}}{t_0 \gamma \left( 1 + \frac{1}{\beta} \right)} \quad (6)$$

式中: $\lambda_{\text{Target}}$ 为被优化系统部件故障率, $P_{\text{Target}}$ 为储气罐设计压力, $t_0$ 为初始压力持续时间, $\beta = 1.5$ 为威布尔分布概率密度的函数参考值。

为提高储氢罐的安全可靠性,主机厂从材料、结构、安装、检测等方面强化储氢罐的安全性,如丰田 Mirai 车型的高压氢气罐采用迭片结构,最内层为塑料,可提高密封性,包围层为碳纤维复合材料,提升储氢罐高压承载能力,最外层为玻璃纤维增强塑料,使储氢罐具有高抗冲击性能。相关安全标准提出将储氢罐布置在车辆底盘中部或车顶,可降低储氢罐受到外力撞击风险。

由于铝合金和不锈钢材料对氢脆敏感性较低,在高压氢气环境下仍具有较好的韧性、塑性和强度<sup>[21]</sup>,因此,为防止出现氢脆,储氢罐中与氢接触的高压部件采用铝合金或不锈钢材料;为预防碰撞对储氢罐造成损伤,采用高强度的专用储氢罐固定支架将氢气罐组、温控安全阀和高压管路集成在一起,并用钢带稳固,以降低储氢罐在碰撞过程中的动态位移,降低连接管路的断裂和变形导致氢气大量泄漏的风险。

为避免质子交换膜燃料电池车辆发生碰撞事故时储氢罐爆炸造成二次伤害,在质子交换膜燃料电池车辆前保险杠和底板后部配置碰撞传感器,当车辆发生碰撞事故时,碰撞传感器将信号发送给管理系统,管理系统发出泄压指令,电磁阀开始泄压,将储氢罐内的氢气快速排放到大气中。另外,储氢罐配置温控安全阀、电磁阀、截止阀、压力传感器,在罐内安装温度传感器,利用管理系统对储氢罐的压力、温度实施监测,当压力或温度过高时,管理系统执行相应的保护策略,温控安全阀自动打开,按预定措施释放氢气,避免储氢罐爆炸。

#### 4.2 氢气泄漏安全防控策略

氢气泄漏是质子交换膜燃料电池车辆最大的安全隐患,对氢气泄漏的监测和氢气泄漏的处理非常重要,质子交换膜燃料电池车辆均设计有氢安全管理系统,如图6所示,氢安全管理系统主要包括氢安全控制单元、温度传感器、压力传感器、电磁阀、压力调节器、氢气浓度传感器、温控安全阀、排气通风装置等,当氢气泄漏、氢气压力异常或发生车辆碰撞时,氢安全控制单元会根据危险级别发出警报并启动排气通风系统降低氢气浓度、自动关闭阀门停止输出氢气、自动排放氢气。

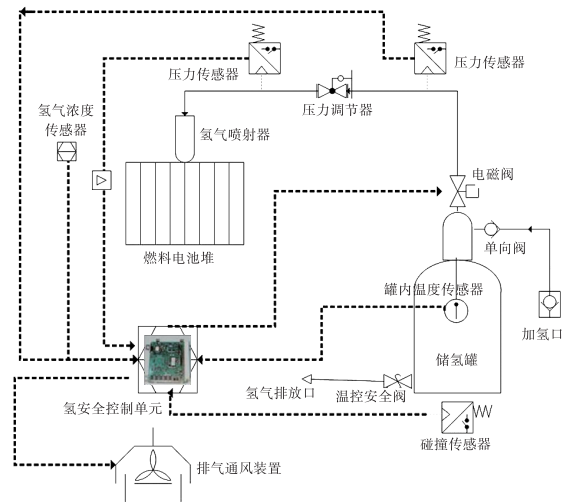


图6 氢安全管理系统示意

氢气泄漏位置主要为储氢罐和氢气供给系统的管道、阀门、接头位置,因此,燃料电池车辆安全相关标准要求对可能泄漏氢气的储氢罐、温控安全阀、截止阀、管道接头、燃料电池堆、氢气管进行严格的气密性测试和可靠性测试,在储氢罐、氢气供应系统、燃料电池堆和乘员舱空间安装氢气浓度传感器,利用氢气泄漏监控控制系统实时监测氢气浓度,当氢气浓度达到一定限值时,启动排气通风系统,加强通风以降低氢气浓度,控制系统警报并自动关闭氢气输出,隔离氢气源与电源。当氢气浓度传感器出现故障时,控制系统发出故障报警信号<sup>[22]</sup>。

由于车辆事故形式多样,零部件在事故中损坏的概率较大,为防止零部件在事故中泄漏氢气,须在车身设置惯性开关,当发生碰撞时惯性开关被激活,将信号传输至电子控制单元(Electronic Control Unit, ECU), ECU发出指令关闭储氢罐阀

门,断开氢气供应,降低氢气的泄漏程度<sup>[23]</sup>。

另外,燃料电池车辆还配置有烟雾探测报警系统,实时采集空气中的烟雾颗粒浓度,分析氮氧化合物等特殊气体成分,实时监测车舱内的烟雾和气体浓度,一旦烟雾和气体浓度达到限值,系统发出警报<sup>[24]</sup>。

### 4.3 动力电池安全防控策略

锂离子电池具有高功率、高能量密度等优点,广泛用作燃料电池车辆能源存储装置,锂离子电池故障原因主要有制造缺陷、过热、过充和机械损伤<sup>[25]</sup>,最大的安全隐患为热失控,热失控会产生易燃气体,导致火灾和爆炸。主机厂通常采取防热失控设计,改进电池内部材料,使用高稳定性的电极材料,优化动力电池布置,提高抗碰撞机械性能,强化热管理,配置电池管理系统等措施提高其安全可靠性能。

#### 4.3.1 提高电池内部关键性材料安全性

锂离子电池主要由正极片、负极片、隔膜和电解液组成,其材料性质决定了锂离子安全性。电解液在锂离子电池中作为离子传输的载体,对锂离子电池的容量、工作温度、使用寿命及安全性能有重要影响。传统的电解液高度易燃,燃烧反应强烈且难以抑制<sup>[26]</sup>。可通过降低电解液可燃性来提高锂离子电池的安全性<sup>[27]</sup>,添加阻燃剂形成性能优良的固体电解质界面膜,改进电解质的配方,进而提升其热稳定性<sup>[14]</sup>。

锂离子电池热失控开始于正极材料与电解液结合面,同时,锂离子电池温度迅速升高,正极材料与电解液发生分解反应,并产生氧气,会导致燃烧和爆炸。因此,可在正极材料上涂覆一层热稳定好的Li<sup>+</sup>良导体保护层(如碳层、Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>等无机保护层,聚二烯丙基二甲基氯化铵、多组分添加剂等形成的有机保护层),防止正极材料与电解液直接接触,从而减少副反应和热量的产生<sup>[28]</sup>,同时提高正极材料的热稳定性。另外,锂离子电池负极材料在充放电过程中会产生锂枝晶及固-液相界面膜的热分解副反应,会影响锂离子电池的安全性,对此,研究者提出制备保护膜包覆负极<sup>[29]</sup>,从而提高锂离子电池性能。

隔膜是锂离子电池的主要组成部分,功能是

隔离正、负极,防止极片直接接触发生短路,因此,隔膜对锂离子电池的安全性影响较大。目前常用的隔膜主要有陶瓷涂层隔膜、聚丙烯膜(Propathene, PP)、复合隔膜等,不同的隔膜材质具有不同的物理性能,对锂离子电池安全的影响程度也不相同,经研究,采用PP+陶瓷涂层隔膜制备电池可提高电池的安全性能<sup>[30]</sup>。

#### 4.3.2 强化电池管理系统安全防控功能

动力电池容量大,串环节数多,受温度、电压限制,对安全性影响较大,对此,主机厂采用电池管理系统(Battery Management System, BMS)对动力电池进行参数监测、热管理、充电控制、故障诊断、安全控制与报警等,电池管理系统运用传感器采集动力电池的总电压、单体电池电压、温度、绝缘性等,估算电池健康状态,通过执行器实施有效控制和管理,充分保证动力电池的安全性和可靠性。当出现危险时,电池管理系统能保护动力电池系统和单体电池<sup>[31]</sup>。现有的锂离子动力电池均经过安全性标准测试,同时配合电池管理系统中的安全措施,动力电池系统的安全性已有很大提高<sup>[32]</sup>。

### 4.4 电气安全防控策略

汽车的行驶时会产生振动,还可能会发生碰撞、翻车等事故,可能导致高压电气线路和部件绝缘层被破坏,引起电气火灾或触电事故,因此,电气安全防控是燃料电池汽车安全防控的重要方面。针对燃料电池车辆的电气系统安全问题,除采用常见的自动断开装置进行过压保护、过电流保护外,还采取以下安全防控策略:

- a. 高压线用橙色覆盖材料,便于识别;
- b. 设计高压触电保护系统;
- c. 在燃料电池车辆中,直流电(Direct Current, DC)高电压总线配备车载绝缘监测系统<sup>[33]</sup>,当绝缘电阻下降到一定限值时,系统发出警报并切断高压电源;
- d. 为避免高压设备对人员造成直接或间接伤害,对安全隐患较大的设备实施加强绝缘或双重绝缘<sup>[34]</sup>;
- e. 当车辆发生碰撞事故时,控制器收到碰撞传感器信号后,切断动力电路,或碰撞传感器信号

直接接触高压电气系统断路器切断高压电源<sup>[34]</sup>;

f. 采用高压互锁防护设计,当高压互锁防护系统识别出高压回路存在异常断开或破损时,系统会及时断开高压电<sup>[35]</sup>,达到安全防护的目的。

## 5 结束语

质子交换膜燃料电池车辆安全影响要素主要包括氢气泄漏、储氢罐安全性、氢气供给系统部件可靠性、动力电池安全性等,相关标准对质子交换膜燃料电池车辆作了部分规范性要求。为确保质子交换膜燃料电池车辆的安全,主机厂以防止氢气泄漏燃烧爆炸为主要预防控制目标,从结构、材料、控制系统等方面不断优化,对储氢罐、供气系统、动力电池、控制系统等影响安全的对象采取了相应的防控策略,有效提高了质子交换膜燃料电池车辆安全性。未来建议从设计之初,系统提升部件及整车安全可靠,设置失效监测防控系统。

### 参考文献:

- [1] 李雪芳. 储氢系统意外氢气泄漏和扩散研究[D]. 北京:清华大学, 2015.
- [2] 何静, 刘宏波, 魏列, 等. 车载储氢瓶泄漏及车库内通风方式研究[J]. 中国安全生产科学技术, 2022, 18(9): 181-188.
- [3] 张磊, 马秋菊, 黄昊, 等. 氢燃料电池汽车氢系统氢气泄漏的燃爆危险性研究[J]. 消防科学与技术, 2024, 43(5): 693-698.
- [4] 董文妍, 陈向阳, 杨子荣, 等. 燃料电池汽车车载氢系统潜在失效模式及原因分析[J]. 消防科学与技术, 2024, 43(5): 716-721.
- [5] 刘艳秋, 张志芸, 张晓瑞, 等. 氢燃料电池汽车氢系统安全防控分析[J]. 客车技术与研究, 2017, 39(6): 13-16.
- [6] 黄兴, 丁天威, 赵洪辉, 等. 车用燃料电池系统氢安全控制综述[J]. 汽车文摘, 2019(4): 6-10.
- [7] 郑津洋, 张俊峰, 陈霖新, 等. 氢安全研究现状[J]. 安全与环境学报, 2016, 16(6): 144-152.
- [8] SALVA J A, TAPIA E, IRANZO A, et al. Safety Study of a Hydrogen Leak in a Fuel Cell Vehicle Using Computational Fluid Dynamics[J]. International Journal of Hydrogen Energy, 2012, 37(6): 5299-5306.
- [9] KARPENKO-JEREB L, STERNIG C, FINK C, et al. Membrane Degradation Model for 3D CFD Analysis of Fuel Cell Performance as a Function of Time[J]. International Journal of Hydrogen Energy, 2016, 41(31): 13644-13656.
- [10] SULAIMAN N, HANNAN M A, MOHAMED A, et al. Optimization of Energy Management System for Fuel-Cell Hybrid Electric Vehicles: Issues and Recommendations[J]. Applied Energy, 2018, 228: 2061-2079.
- [11] ADE N, WILHITE B, GOYETTE H, et al. Intensifying Vehicular Proton Exchange Membrane Fuel Cells for Safer and Durable, Design and Operation[J]. International Journal of Hydrogen Energy, 2020, 45(7): 5039-5054.
- [12] 周崇波, 周宇昊. 汽车用质子交换膜燃料电池氢系统的安全性分析[J]. 能源与环境, 2019(4): 32-34.
- [13] UTGIKAR V P, THIESEN T. Safety of Compressed Hydrogen Fuel Tanks: Leakage from Stationary Vehicles[J]. Technology in Society, 2005, 27(3): 315-320.
- [14] 温泉, 盛苗苗, 董天哥. 论新能源汽车锂离子电池的安全问题[J]. 机械制造, 2019, 57(1): 55-56.
- [15] 宁水根, 张庆永, 黄经元, 等. 电动汽车电池系统安全设计与制造的思考[J]. 电源技术, 2019, 43(5): 896-899.
- [16] 谢庆喜, 张维刚, 钟志华. 电动汽车安全性隐患及其对策[J]. 客车技术与研究, 2005(2): 8-11.
- [17] COLLONG S, KOUTA R. Fault Tree Analysis of Proton Exchange Membrane Fuel Cell System Safety[J]. International Journal of Hydrogen Energy, 2015, 40(25): 8248-8260.
- [18] 盖世汽车. 《2019年动力电池安全性研究报告》首发, 电动汽车故障竟集中在出厂第二年夏季! [EB/OL]. 2018-08-20[2024-03-22]. <https://auto.sina.com.cn/news/hy/2019-08-20/detail-ihytcitn0471441.shtml>.
- [19] SIMEONE A, LÜ D, LIU X Y, et al. Collision Damage Assessment in Lithium-Ion Battery Cells Via Sensor Monitoring and Ensemble Learning[J]. Procedia CIRP, 2018, 78: 273-278.
- [20] 李建军, 王莉, 高剑, 等. 动力锂离子电池的安全性控制策略及其试验验证[J]. 汽车安全与节能学报, 2012(2): 151-157.
- [21] 郑津洋, 崔天成, 顾超华, 等. 高压氢气对6061铝合金力学性能的影响[J]. 高压物理学报, 2017, 31(5): 505-510.
- [22] 中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局, 中国国

- 家标准委员会. 燃料电池电动汽车车载氢系统技术条件: GB/T 26990—2011[S]. 北京: 中国标准出版社, 2011.
- [23] 蒋燕青, 王鸿鹄, 李亚超, 等. 燃料电池车高压储氢系统碰撞安全设计与分析[J]. 上海汽车, 2011(12): 11-14.
- [24] 陈笃廉. 燃料电池客车氢系统与动力电池安全防护设计[J]. 机电技术, 2017(2): 59-62.
- [25] BAIRD A R, ARCHIBALD E J, MARR K C, et al. Explosion Hazards from Lithium-Ion Battery Vent Gas[J]. Journal of Power Sources, 2020, 446.
- [26] WANG Q, JIANG L, YU Y, et al. Progress of Enhancing the Safety of Lithium Ion Battery from the Electrolyte Aspect[J]. Nano Energy, 2019, 55: 93-114.
- [27] VON ASPERN N, RÖSER S, REZAEI RAD B, et al. Phosphorus Additives for Improving High Voltage Stability and Safety of Lithium Ion Batteries[J]. Journal of Fluorine Chemistry, 2017, 198: 24-33.
- [28] 邵丹, 骆相宜, 钟灿鸣, 等. 动力锂离子电池安全性研究的进展[J]. 电池, 2020, 50(1): 83-86.
- [29] 李宇杰, 刘勇, 赵奇志, 等. 石墨负极表面聚合物功能保护膜对锂离子电池存储寿命的提升[J]. 高等学校化学学报, 2019, 40(12): 2542-2548.
- [30] 徐慧铭. 隔膜对锂离子电池安全性的影响[J]. 电源技术, 2019, 43(11): 1767-1770.
- [31] HAUSER A, KUHN R. High-Voltage Battery Management Systems (BMS) for Electric Vehicles[J]. Advances in Battery Technologies for Electric Vehicles, 2015: 265-282.
- [32] 何向明, 冯旭宁, 欧阳明高. 车用锂离子动力电池系统的安全性[J]. 科技导报, 2016, 34(6): 32-38.
- [33] 赵志成, 王微, 王仁广, 等. GTR 13 和 ECE R134 的主要内容简析[J]. 汽车零部件, 2018(6): 73-79.
- [34] 戴海峰, 张晓龙, 魏学哲, 等. 电动汽车高压电安全分析及防护设计[J]. 机电一体化, 2013, 19(1): 53-59.
- [35] 余小芬. 纯电动汽车高压互锁及失效问题分析[J]. 内燃机与配件, 2019(8): 53-54.