

锂电池灭火剂耐低温型研究与实践

黄 健

宁波市平安消防设备制造有限公司 浙江 宁波 315430

摘 要：随着锂离子电池在交通、储能等领域的广泛应用，其热失控引发的火灾问题日益突出。由于锂电池火灾具有高温、复燃及释放有毒气体的特点，传统灭火剂往往难以有效应对。特别是低温环境下的灭火需求，对灭火剂的耐低温性能提出了更高要求。本文综述了当前锂电池火灾的特点及热失控机理，分析了现有灭火剂的局限性，并在此基础上探讨了耐低温型锂电池灭火剂的研究进展与未来发展方向。

关键词：锂电池；火灾特点；热失控机理；低温型灭火剂

引言

锂离子电池以其高能量密度、长循环寿命等优点，成为电化学储能的主要载体之一。然而，由于制造缺陷或安全规范外使用，锂电池易触发热失控并引发火灾和爆炸等安全事故。尤其是低温环境下，锂电池的火灾风险增加，灭火难度也随之加大。因此，开发一种耐低温型锂电池灭火剂，对保障锂电池的安全使用具有重要意义。

1 锂电池火灾特点及热失控机理

1.1 锂电池火灾的独特性质

锂电池在发生火灾时，展现出一系列独特且危险的性质。首先，其火灾往往伴随着极高的温度，这是由于电池内部存储的化学能迅速释放所致。此外，锂电池火灾具有易复燃的特性，即便在初步扑灭后，由于内部热量和化学反应的持续，火势仍有可能重新燃起。更为严重的是，火灾过程中会释放出包括氟化氢（HF）、三氟化磷（PF₃）等在内的有毒气体，这些气体不仅对环境造成污染，还对人体健康构成严重威胁，如刺激呼吸道、损害神经系统等。锂电池火灾的另一特点是其内部的烷烃类和二氧化碳气体会在热失控状态下迅速膨胀并释放，导致电池外壳承压极限，安全阀被迫打开，从而喷射出高压气体和热量，进一步加剧火势的蔓延和危害程度。

1.2 热失控的深层机制

锂电池的热失控是一个复杂的物理化学过程，其触发因素多样，包括但不限于内部短路、外部短路、过度充电以及过度放电等。这些外部条件会破坏电池内部的电化学平衡，引发一系列连锁反应。具体来说，当电池遭受上述不当条件时，其内部会产生大量的热量，导致电池温度迅速攀升^[1]。随着温度的升高，电解液开始分解，产生更多的热量和可燃气体，同时隔膜也会因高温而熔化，进一步加剧了电池内部的混乱状态。这一系列反应形成了一个正反馈循环，即温度越高，反应越剧

烈，产生的热量和可燃物质越多，从而推动火势不断升级，直至电池发生爆炸或引发大规模火灾。

2 当前锂电池灭火技术的局限性分析

当前市场上针对锂电池火灾的灭火剂特别是低温型的，几乎是空白。常规的包括气体灭火剂、水基灭火剂以及干粉灭火剂等。都不能在低温或者常温下对锂电池进行有效灭火，难以满足锂电池火灾的灭火需求。在锂电池热失控的初期，由于电池内部温度急剧上升并伴随大量热量的释放，气体灭火剂往往难以迅速降低电池温度，从而无法有效阻断热失控的连锁反应。此外，部分气体灭火剂在灭火过程中可能会与锂电池内部的化学物质发生反应，产生有毒气体，进一步加剧火灾的复杂性。其次，水基灭火剂在常温下具有较好的灭火效果，但在低温环境下，其流动性会显著下降，甚至可能出现结冰现象，导致灭火剂无法顺利喷射到火源处。同时，水基灭火剂中的水分在接触锂电池时，可能因电解作用而产生氢气等可燃气体，反而加剧火势。此外，水分还可能渗透进电池内部，造成电池短路或损坏，增加火灾处理后的电池处置难度。因此，鉴于现有灭火剂在低温环境下对锂电池火灾的灭火效果有限，开发具有耐低温特性、能够迅速降低电池温度并有效阻断热失控连锁反应的锂电池灭火剂显得尤为重要。这不仅需深入研究锂电池火灾的燃烧机理和热失控过程，还需要结合实际应用场景，研发出更加高效、安全的灭火技术和产品，以应对日益严峻的锂电池火灾挑战。

3 耐低温型锂电池灭火剂研究进展

3.1 新型灭火剂研发

鉴于锂电池火灾的独特性质以及现有灭火剂在应对此类火灾时存在的局限性，国内外的研究人员正积极投身于新型锂电池灭火剂的开发工作之中。其中，一种颇具创新性的锂电池灭火剂已初步崭露头角。这种新型灭

火剂是由多种功能性组分精心配比而成,包括高效阻燃剂、强力吸附剂、碳酸氢钠(用于增强灭火效果)、起泡剂(以形成覆盖火源的泡沫层)、泡沫稳定剂(确保泡沫层的持久性和稳定性)以及适量的水分。这些组分的协同作用,使得该灭火剂在应对锂电池火灾时展现出卓越的性能。首先,灭火剂中的阻燃剂采用了高性能的磷系或氮系化合物,这些化合物能够在高温下分解产生自由基捕捉剂,有效中断燃烧过程中的链式反应,从而迅速降低火焰的蔓延速度。这一特性对于锂电池火灾初期的快速控制至关重要。其次,吸附剂的选择考虑了其有毒气体的高效吸附能力。研究团队选用了具有特殊孔道结构的活性炭或分子筛材料,这些材料能够大量吸附锂电池燃烧时释放的氟化氢、三氟化磷等有毒气体,并将其固定在灭火剂的泡沫结构中,避免其扩散到环境中造成二次污染。碳酸氢钠的加入则是为了增强灭火剂的灭火效果^[2]。在高温下,碳酸氢钠会分解产生二氧化碳气体,这不仅能够进一步降低火源周围的氧气浓度,还能通过物理作用扑灭火焰。起泡剂和泡沫稳定剂的组合则确保了灭火剂在喷射后能迅速形成一层均匀、致密的泡沫层,覆盖在锂电池表面。这层泡沫层不仅能够有效隔绝空气,阻止燃烧的进行,还能通过其良好的保温性能,持续降低电池温度,防止热失控的进一步发展。

3.2 协同灭火策略

为了更精准、高效地应对锂电池火灾,研究者们深入探索了协同灭火策略,其中全氟己酮与细水雾的结合使用展现出了非凡的灭火效果。这一策略不仅融合了两种灭火剂的优势,还通过精细的配合和时序控制,实现了灭火效率的最大化。全氟己酮,作为一种高效、清洁的灭火剂,其灭火机制主要依赖于两个方面。一方面,全氟己酮在高温下能够迅速汽化,吸收大量的热量,从而降低火焰和周围环境的温度,实现物理冷却效果。另一方面,全氟己酮的分子结构使其能够与燃烧过程中的自由基发生反应,中断燃烧链式反应,从而达到化学抑制的效果。在锂电池火灾中,全氟己酮能够迅速扑灭明火,为后续的细水雾冷却创造有利条件。细水雾作为辅助灭火剂,其独特之处在于其微小的水滴颗粒。这些水滴能够渗透到锂电池的微小缝隙和内部,实现更深层次的冷却。同时,细水雾还能形成一层水膜,覆盖在锂电池表面,有效隔绝空气,降低火源周围的氧气浓度,从而进一步增强灭火效果。此外,细水雾还能带走锂电池表面的热量,防止热失控的进一步蔓延。在协同灭火策略中,全氟己酮与细水雾的配合至关重要。首先,全氟己酮通过其快速的灭火能力,迅速扑灭锂电池表面的明

火,降低火势的蔓延速度。随后,细水雾立即跟进,利用其深层冷却和隔绝空气的能力,确保锂电池得到充分的冷却和灭火。这种时序控制不仅提高了灭火效率,还减少了灭火剂的使用量,降低了对环境的潜在影响。

3.3 耐低温性能优化

针对低温环境下锂电池火灾扑救的严峻挑战,研究者们对灭火剂的耐低温性能展开了深入且细致的优化工作。他们不仅关注灭火剂在低温下的物理状态稳定性,还着重提升其灭火效率和环境适应性,以确保在极端寒冷条件下也能迅速、有效地扑灭锂电池火灾。在耐低温性能优化过程中,十二氟-2-甲基-3-戊酮(以下简称“DFMP”)作为一种高性能的吸热气化物质,发挥了关键作用。DFMP具有极低的冰点,即使在极寒的-50°C环境下也能保持液态,不会结冰或凝固。研究者们通过精确计算DFMP的添加量,并将其巧妙地融入灭火剂配方中,成功地将灭火剂的冰点大幅降低,从而确保了灭火剂在低温环境下的顺畅喷射和稳定灭火效果^[3]。此外,研究者们还考虑了灭火剂的环境适应性和安全性。他们确保优化后的灭火剂在低温下不会释放有害气体或对环境造成污染,同时也不会对锂电池本身造成额外的损害。这些考虑使得优化后的灭火剂更加符合实际应用的需求,为低温环境下锂电池火灾的扑救提供了更加可靠和环保的解决方案。

3.4 低温环境测试与验证

为了确保耐低温型锂电池灭火剂在实际应用中的可靠性和稳定性,研究者们进行了严格的低温环境测试。测试环境模拟了极端寒冷的条件,将灭火剂置于-20°C的低温环境中,持续测试时间长达72小时。在这一过程中,研究者们密切监测灭火剂的物理状态、流动性、灭火效率以及环境适应性等关键指标。测试结果显示,耐低温型锂电池灭火剂在低温环境下表现出了卓越的稳定性。即使在-20°C的极端低温下,灭火剂仍然保持液态,没有结冰或凝固现象发生,确保了其在低温环境下的顺畅喷射。同时,灭火剂的流动性也得到了有效保障,能够迅速覆盖火源,实现高效灭火。此外,经过72小时的持续测试,灭火剂的灭火效率并未受到低温环境的影响,仍然能够迅速扑灭锂电池火灾,并有效抑制火势的复燃。这一测试结果不仅验证了耐低温型锂电池灭火剂在低温环境下的可靠性和稳定性,也为其在更多场景下的应用提供了有力支持。无论是寒冷的北方地区,还是高海拔、低气温的特殊环境,耐低温型锂电池灭火剂都能够发挥出其独特的优势,为锂电池的安全使用提供有力保障。

4 耐低温型锂电池灭火剂的实践应用

4.1 电动汽车领域的深度整合

在电动汽车领域，耐低温型锂电池灭火剂的应用展现出了其独特的优势。研究者们巧妙地将这种灭火剂整合到电动汽车的电池包内部，或者作为车辆消防系统的重要组成部分。当电池包因过热、短路或其他原因引发火灾时，灭火剂能够立即响应，迅速扑灭火焰，有效防止火势的进一步蔓延。这种设计不仅提高了电动汽车的安全性，还为乘客和驾驶员提供了更长的逃生时间，大大降低了火灾造成的损害和风险。具体来说，耐低温型锂电池灭火剂在电动汽车中的应用，通常是通过一系列精密的传感器和控制系统来实现的。这些系统能够实时监测电池包的状态，一旦检测到异常温度或烟雾等火灾征兆，就会立即触发灭火剂的释放。灭火剂通过特设的喷嘴或管路系统，迅速而均匀地覆盖在电池包表面，利用其高效的灭火能力和耐低温特性，迅速扑灭火焰，确保电动汽车的安全。

4.2 储能系统领域的精准应用

在储能系统领域，耐低温型锂电池灭火剂同样展现出了其广泛的应用前景。特别是在大型电池预制舱或电池组模组内部，这种灭火剂通过管线连入锂电池簇内，由内置的高效驱动装置提供动力，实现灭火剂的精准喷放。这种设计不仅确保了灭火剂能够迅速到达火灾现场，还通过精确的控制，避免了灭火剂的浪费和对周围环境的污染。在实际应用中，储能系统的火灾防控通常涉及到多个层面的保护措施^[4]。耐低温型锂电池灭火剂作为其中的关键一环，与其他火灾预警、隔离和散热系统紧密配合，共同构成了一个全面而高效的火灾防控体系。当火灾发生时，灭火剂能够迅速响应，与其他系统协同工作，确保火灾得到及时有效的控制，从而保护储能系统的安全和稳定运行。

5 未来发展方向

5.1 高导热性灭火剂的创新研发

未来的灭火剂研发将聚焦于提升灭火剂的导热性能，以更有效地应对锂电池等高热源火灾。通过采用先进

的纳米材料技术，如嵌入高导热性的石墨烯或碳纳米管，可以显著增强灭火剂的导热系数。这样，灭火剂在接触火源时能更迅速地将热量传导并分散，从而大幅降低电池温度，有效遏制火势的蔓延，并显著提升灭火效率。

5.2 高绝缘性灭火剂的研发突破

针对锂电池等电气设备火灾，开发具有高绝缘性能的灭火剂将成为关键。这要求灭火剂在灭火过程中不仅能迅速扑灭火源，还能有效隔绝电流，防止因灭火剂导电而引发的电池短路或电击风险。研究者将探索使用非导电的高分子材料或特殊添加剂，以确保灭火剂在保持高效灭火能力的同时，具备出色的电气绝缘性能，从而保障灭火作业的安全性。

5.3 环保型灭火剂的持续推进

随着环保意识的日益增强，未来灭火剂的研发将更加注重环境保护。这包括减少灭火过程中产生的有毒气体和温室气体排放，以及开发可生物降解或无害化处理的灭火剂。研究者将致力于探索新型环保材料，如天然植物提取物、生物基聚合物等，以替代传统的化学灭火剂，实现灭火过程的高效与环保双重目标。

结语

耐低温型锂电池灭火剂的研究对于保障锂电池的安全使用具有重要意义。通过研发新型灭火剂、优化灭火策略、提高灭火剂的耐低温性能等手段，可以有效应对锂电池火灾的挑战。未来，随着科技的不断进步和研究的深入，耐低温型锂电池灭火剂的性能将得到进一步提升，为锂电池的安全使用提供更加有力的保障。

参考文献

- [1]程怡玮,郎需庆,焦金庆,等.锂电池灭火剂研究进展[J].安全、健康和环境,2023,23(08):1-9.
- [2]阮辉.储能用磷酸铁锂电池(组)热失控特性及低温液氮抑灭效果研究[D].中国矿业大学,2023.
- [3]李晨尧,李孝斌,武军利,等.灭火剂抑制锂电池火灾研究现状分析[J].安全,2023,44(01):54-59.
- [4]陈永利.锂电池火灾灭火剂文献综述[J].消防界(电子版),2024,10(08):37-39.