集装箱储能系统热管理系统的现状及发展

王安国

（珠海科创储能科技有限公司，广东 珠海 519000）

摘　要　集装箱式储能系统的优点是安装和运输方便，建设周期短，环境适应性好，发展前景广阔。储能集装箱内部通常布置有核心散热的热管理系统，传统技术是在底部放置水冷板进行核心散热的方法。然而，随着整体能量密度的增加和生产成本的降低，以热泄漏为特征的事故经常发生，对电气安全和相关人员的生命构成严重威胁。本文从储能安全的角度，特别是温度和湿度对电池的影响，总结了近年来热管理的研究成果，综述了提高集装箱储能系统安全性和可靠性的方法，并理性地预测了当前储能系统热管理技术的发展趋势，旨在为促进储能系统安全管理方法与策略的发展提供借鉴，从而提高储能系统的安全性。

关键词　集装箱储能系统；环境监控系统；电池管理系统；热管理

中图分类号：U169　　**文献标识码**：A　　**文章编号**：2097-3365(2023)10-0085-03

在新能源装机容量不断增加的同时，电力系统中出现的间歇性、波动等问题也日益突出。储能系统能够有效抑制新能源装机容量的波动，是保障微网安全稳定运行的关键因素之一[1-3]。同时，通过对电力系统进行频率调节和电力系统的消纳，可以大大提升电力系统的可靠性、稳定性和经济性[4]。

储能主要分为电化学储能、机械储能等，电化学储能又以锂电池储能为主。锂电池因其能源效率高、使用寿命长、额定电压高、功率容限大、重量轻、运行环保、生产中不用水等特点，逐渐成为储能的主要产品。以锂电池储能为主的电力系统构建模式，其构建费用较低，寿命较长，部署灵活等特点。机械储能由于其占地面积大，建设周期长，投资大，不足之处也越来越明显。

1 集装箱储能系统热管理系统的现状

电化学储能是一种将锂电池、变流器、测温系统和监测系统整合到一个标准的集装箱内的一种新型的储能建设模式，它的建设周期短，安全性高，模块化程度高，运输安装便利[5]。然而，集装箱内的储能暴露在室外条件和恶劣的天气条件下，这就需要更好的环保和电池的管理。随着集装箱式储能系统的尺寸和强度不断增大，对它的安全性提出了更高的要求。近年来，集装箱式储能系统的火灾频繁发生，结果表明，引起火灾的主要原因为蓄电池保护装置失效，尤其当蓄电池工作异常时，蓄电池的温度管理装置失效。操作上的问题包括：电路故障，过载，颗粒或水蒸气污染，开始是一个元件的电解质分解，蒸汽压力上升导致单体热故障，然后扩散到存储模块的其他元件，最终表现为普遍的热失控。封闭的设计和开放的操作环境给集装箱式储能系统带来了巨大的热传导问题。由于外界的太阳辐射、电子设备自身的热量、蓄电池的充放电等因素，使集装箱内部的温度超出了电器和蓄电池的容许工作极限。在较高的温度下，长时间的工作，将会加快电子器件的老化速度，严重时可能造成器件的损伤，尤其是对温度十分敏感的蓄电池；温度升高会加快蓄电池的老化速度，使它的容量急剧降低。

随着存储系统容量的增加和电池密度的提高，目前，单一的热管理技术已无法满足不断提高的高热通量密度需求。其次，“不匹配”与“短板效应”是制约热处理批量化技术发展的主要原因，因此先进热处理技术成为需要解决的重要内容。

2 集装箱储能电池的温湿度特性

在储运过程中，锂电池是一种重要的能源。在对集装箱型蓄热装置的热传导进行探讨与分析前，有必要对锂电池的温、湿性能进行研究。

2.1 温度对锂电池容量和寿命的影响

研究表明，锂电池的容量和寿命随温度的变化而变化，主要是由于温度变化导致内阻的增加以及活性材料和有效锂离子的损失。内阻的增加被认为是由于金属离子在高温下从正极溶解到电解质中，然后通过隔膜扩散并沉积在负极上，导致负极的内阻增加[6]。跟高温环境相似，在低温下，锂电池的容量也会降低。例如，磷酸铁锂在0℃时的容量保持率为60%~70%，而在-20℃时，其容量将下降至20%~40%，这是由于在较

低的温度下，电解液的传输能力将会大幅度下降。

2.2 温度对锂电池热稳定性的影响

温度是影响锂电池稳定性的一个重要因素，其原因是在较高的温度下，会引起电池内部物质的分解。在锂电池中，SEI薄膜先被破坏，随后与电解质发生反应，再被溶解，最终在高温条件下，正极与电解质发生裂解。一般情况下，SEI薄膜在80℃~120℃的高温下分解。这些变化导致锂离子通道关闭，导致正负电极之间的直接接触而短路，释放大量的热量。此外，锂离子电池中在发生爆炸的同时，还会释放出大量的气体和热能，引起电池内压急剧升高，引起电池膨胀、爆裂、泄压阀爆裂、铝箔融化等热失控现象。在出现热失控时，其内部温度差可达520℃。很明显，这会对电池的安全性构成很大的威胁。再者，长期在低温下，也会导致电池负极的锂沉淀，严重穿透SEI膜，使电池无法使用。

2.3 电池模块的温度均匀性要求

在实际应用过程中，由于负荷的变化，可能会产生较大的电流，造成电池组件发热不均匀。在重复使用的过程中，每一个单元的老化都是不一样的，这就会造成电池组的过充电、过放电，进而影响到电池的性能，严重时还会产生一些安全问题。另外，由于各单元电池之间的不均匀性，会使整个电池组在工作时出现“木桶短板”效应，也就是说，电池组的性能是被那些表现最差的单元电池所决定的。模块之间的温度差异会降低电池组的整体性能和寿命，因此，在锂离子电池的使用过程中，必须确保各个电池有足够的舒适度，并确保电池组各个单元之间的均匀性，以提高电池组的整体寿命。

2.4 湿度对电池性能的影响

相关标准中已经规定了电池制造和储存过程中环境温度和湿度的相关规格和要求。但是，目前对于不同湿度条件下锂离子电池的热退化机理还缺乏系统深入的认识。有报道指出，当空气中的水分含量较高时，锂离子电池会发生更多的内化学反应，引起锂离子电池的体积膨胀、壳体破碎等问题，从而引起电解质的失稳。在一定范围内，当空气中的水分含量越高，其热分解临界点所需的时间越短。湿度为100%时的临界时间比湿度为50%时早7.2%，表明在一定范围内，湿度会加速热分解过程。过高的湿度会导致电池电解液的降解，从而导致氢氟酸的降解，导致腐蚀和金属部件的泄漏。然而，由于氢氟酸的存在，会对电极表面的SEI膜造成一定的损伤，从而引起锂离子在电极表面的不可逆反应，使电池的能量下降。因此，在设计电池的热管理解决方案时，不应忽视湿度控制，特别是当储能系统在高温和高湿度环境中使用时。

3 集装箱热管理设计

集装箱储能系统包括两类对温度和发热敏感度不同的设备：电池、PCS和隔离变压器。磷酸铁锂凝胶电池通常要求的工作温度在20℃~30℃之间，而PCS和绝缘变压器的工作温度通常高于50℃，能够在0℃之下工作。

将蓄电池、PCS、绝缘变压器等设置于不同的隔室内，针对其温度适应性，分别采取相应的热管理措施，实现了系统的最优管理与节能效果。在PCS隔间中，设置了PCS隔离变压器、壁挂式配电箱及与之相匹配的消防设备，电池隔间中设置了电池柜、管理系统、本地监控系统、环境监控系统以及与之相匹配的消防设备。

3.1 电池隔间热设计

为了确保电池隔间的正确工作温度，电池隔间的所有六个侧面都覆盖了一层50~80毫米厚的双层钢岩棉。由于空调器的高效冷却特性和暖气的高效加热特性，根据集装箱的地理位置，电池隔间可以通过空调和加热相结合的方式进行控制，在温度较低的地区，也有必要增加热水器的配置功率。在每一块磷酸锂铁电池模块的各个小室中，都有一个温度感应点，它能够对电池的温度进行全方位的监控，这样热管理系统就能够对其进行合理的调节。

3.1.1 制冷量和制热量的计算

设计电池隔间的热管理，最重要的是根据集装箱的导热性计算所需的冷却和加热能力，计算方法如下。

1. 制冷量计算。集装箱电池隔间内外的导热系数计算公式如下：

$P1=\gamma\cdot A(Th-Tc)/\delta$

其中：P1为导热系数，kW；γ为石棉的热阻系数，$\gamma=0.04W/m\cdot℃$；A为导热表面积；Th、Tc为高温和低温表面温度，即集装箱的内部和外部温度，℃；δ为集装箱两个表面之间的距离。

考虑到门或其他缝隙的导热性，计算需要考虑修正系数。

假设电池产生的热量为P2，则空调的所需冷却能力为：P=P1’+P2。

2. 制热量的计算。假设集装箱外的最低温度为T，集装箱内所需的控制温度为Th，加热器的制热量P3应大于环境的导热系数P1和设备的热负荷之和，计算假

设设备（包括电池）的热负荷之和为0。考虑到门或其他间隙的导热系数的修正系数，加热器的热输出如下：

$P3=\gamma A(Th-T)c/\delta$

3. 空调和加热器功率的计算。以工业3千瓦空调和4千瓦加热器的组合为例进行温度控制。按照常规3.4倍的能效比，3千瓦空调的制冷量为3×3.4=10.2千瓦，有效制冷量为：Pe=10.2×0.9=9.18千瓦。有效制冷量Pe高于空调制冷量P，则所选空调容量符合要求。如果加热效率为0.9，4千瓦的加热器的有效加热能力为：Pe'=4×0.9=3.6千瓦，有效加热能力Pe'高于加热器的加热能力P3'，则所选加热器能力符合要求。

3.1.2 温度控制策略

1. 待机状态起机模式。在集装箱中的温度降到0℃以下时，空调机就会启动升温，直到蓄电池进入其正常工作状态（也就是充电和放电的状态）为止，再升温到10℃。

2. 正常运行状态模式。如果集装箱内的温度低于5℃，空调器开始加热；如果集装箱内的温度高于40℃，空调器开始冷却。温度控制系统应将集装箱内的温度保持在5℃~40℃之间。

3.2 PCS间热设计

PCS室用于安装 PCS，绝缘变压器和配电箱，工作在-20℃~65℃的环境中。所以，只需要在这个隔间的顶棚上加岩棉保温隔热层。热量要从与PCS及绝缘变压器柜顶端相连的管子中排出，用装置自身的顶端排气扇把热排出集装箱外。

4 集装箱储能电池热管理系统发展趋势

4.1 精准化送风

由于锂电池对温度非常敏感，电池的最佳工作温度范围通常在10℃~35℃之间。但是，目前的储能体系中，锂离子电池一般采用串联或并联的方式，导致各单元间的阻抗增大，从而导致动力负荷不均。这样，由于在电池组件中的布置，电池的热产生的程度是不一致的，由于在充放电期间的电阻，蓄电池的温度也是不一致的。为了解决这些问题，在开发储能系统的热管理解决方案时，对单个电池进行单独的热处理是至关重要的。

4.2 混合热管理技术

风冷技术因其生产成本低、简单和可靠，是目前成本最优的热管理技术之一。然而，它受到使用环境和单个元件的热释放率的限制。由于环境温度高，电池的充放电率高，空气的传热系数低，使得传统的风冷技术不适合用于储能系统的热管理。初步研究表明，金属泡沫热交换器、翅片热交换器和冷却板等技术都能很好地改善空气之间的换热强化特性。然而，这些方法通常会增加系统的尺寸和重量。此外，新的热管理技术，如热管技术和液冷技术已经成功地利用了现有的电池热传导解决方案。重量、气密性和紧凑性仍然是需要克服的障碍。结合传统的热管理技术以弥补单个热管理技术的缺陷，是未来储能系统热管理的一个重要研究领域。

4.3 电－热－流一体化的环境控制策略

传统的热管理系统是基于粗放式的批量热处理，但储能设备的实际性能取决于其运行参数，而同一状态下的电池散热是非常不均匀的。因此，必须根据每个电池模块在不同工作条件下的热负荷要求来设计电池冷却系统。解决以上问题的一个行之有效的办法就是采用电、热、流体的集成仿真，也就是将电池的动力特性与流体的流动、传热机理相结合，从而为集装箱储能系统提供一种全面的环境控制策略。

5 结论

在集装箱型储能技术向大功率、小型化发展的同时，其热安全性与稳定性也是当前集装箱型储能技术的热点与难点。对集装箱电池的温度和湿度适应性有科学的认识，对现有集装箱电池系统的热处理方法有一定的认识，并克服现有控制方法的局限性。了解热管理的发展趋势，以制定储能系统在完整工作条件下的环境控制策略是非常必要的。尽管在电池热管理方面，已取得了大量的理论与试验结果，但是对储能系统的热管理的研究仍然处在一个持续发展与完善的过程中，储能系统的安全防护与热传递安全管理仍然面临着很多挑战。

参考文献：

[1] 丁明，陈忠，苏建徽，等．可再生能源发电中的电池储能系统综述 [J]. 电力系统制动化，2013,37(01):19-25.
[2] 吴战宇，顾立贞，朱明海，等．蓄电池在电网储能系统中的应用 [J]. 电池工业，2012,17(04):234-243.
[3] 张志杰，李茂德．锂离子电池内阻变化对电池温升影响分析 [J]. 电源技术，2014,38(02):128-130.
[4] 严晓辉，陈海生．国际储能产业政策及我国储能产业发展分析 [J]. 中国能源，2011,33(11):28-33.
[5] 储能技术专业学科发展行动计划 [J]. 电力设备管理，2020(02):18-19.
[6] 赵世玺，郭双桃，赵建伟，等．锂离子电池低温特性研究进展 [J]. 硅酸盐学报，2016,44(01):19-28.