

基于气液相变冷却技术的电化学储能温控系统研究

李程

(中国大唐集团科学技术研究总院有限公司华北电力试验研究院, 北京 100040)

摘要: 高效的冷却系统对电化学储能系统安全稳定运行起着关键的作用。随着未来大规模高能量的电化学储能电站的建设, 浸没式相变冷却技术较传统冷却技术在温度控制和温度均一性等方面有着明显的优势。本文首先以气液相变冷却技术为主要研究对象, 从浸没式相变冷却技术原理入手, 详细分析了气液相变冷却的作用效果。其次从不同的理化特性角度, 比较了不同介电流体的优缺点。再次提出了一种基于气液相变冷却技术的电化学储能冷却系统, 通过对比实验验证了气液相变冷却技术应用于电化学储能冷却系统的效果。最后对基于气液相变冷却技术的电化学储能冷却系统进行总结和展望, 为未来电化学储能热管理系统发展提供研究方向与指导。

关键词: 气液相变冷却; 电化学储能系统; 锂离子电池; 电池热管理

中图分类号: TM91

文献标识码: A

DOI: 10.12230/j.issn.2095-6657.2024.02.023

储能技术因其覆盖面广、对新能源发展支撑性强的特点, 正在逐步引领全球能源格局框架的革命性调整。电化学储能系统以其具备大规模和长周期运行的优点, 广泛应用于储能电站。其中, 锂离子电池因其自身理化特性, 如能量高、经济性良好、环境污染小等优点, 被广泛应用于电化学储能系统中。但随着未来大规模高电池能量密度的储能设计目标, 电池的安全性问题亟待解决。基于上述, 为更好的迎合电池技术的发展, 研发高效、长效的电池热管理系统尤为重要^[1]。

气液相变冷却, 近年来在电池浸没式冷却的研究领域内呈现快速增长趋势。鉴于此, 本文首先介绍了浸没式相变冷却的原理, 其次比较了几种常用的介电流体, 然后通过对比实验提出了一种基于气液相变冷却技术的电化学储能冷却系统, 最后对基于气液相变冷却技术的电化学储能冷却系统进行总结和展望, 供学者和相关行业工程师参考。

1 浸没式相变冷却

依据冷却液相态的种类, 浸没式相变冷却分为单相浸没式冷却和两相浸没式冷却。如果在散热过程中冷却液没有发生相变, 只是通过冷却液的显热将热量吸收, 即单相浸没式冷却。反之, 如果在散热过程中冷却液发生了相变, 也就是利用了冷却剂的相变潜热法将热量吸收, 即两相浸没式冷却^[2]。

1.1 单相浸没式冷却

目前大部分的研究和实验主要集中在单相浸没式冷却技术中, 相比于两相气液冷却, 单相液体冷却的适用范围更广, 实验条件相对简单, 冷却剂筛选的条件更少。特别在可移动平台上更加适用, 如汽车、船舶等, 单相浸没式冷却不涉及气体的

变化, 安全性更佳。

1.2 气液相变冷却

两相浸没式冷却技术, 即气液相变冷却, 原理是当冷却剂遇热时沸腾发生相变, 利用冷却剂的相变潜热从而吸收热量。在电化学储能领域, 相比于非常成熟的间接式液体冷却, 气液相变冷却在大容量高充放电倍率的电池系统中冷却效果要明显优于间接式液体冷却, 表现出了优秀的温控能力, 提升了系统的热管理技术水平。气液相变冷却因其出色的换热能力, 即使使用更少的冷却剂的情况下, 也可实现与单相浸没式冷却相同的温控效果, 为未来的大容量、高倍率的电化学储能电站轻量化提供了解决思路。

2 介电流体

气液相变冷却系统的运行效率取决于冷却液的热物理性质, 所以冷却液作为浸没式相变冷却系统的核心, 本文将目前常用的两类冷却液进行了总结。冷却液应具备以下特点, 一是良好的绝缘性, 即低介电常数; 二是导热性优良, 即高比热容和高导热系数; 三是电池在工作温度范围内不凝固或燃烧, 即低凝固点、高闪点; 四是对锂电池表面材料无腐蚀; 五是环保性。在考虑上述特点后, 接下来本文从三个指标(导热性、密度、安全性)进行对比, 结果如表1所示。

2.1 电子氟化液

目前电子氟化液在电力电子领域应用较多, 其主要成分包括氢氟醚(HFE)和氢氟烯烃(HFO), 具有高环境友好性, 即高零臭氧消耗潜能值(ODP)和低风险全球变暖潜能值(GWP)的绿色属性, 其是常用的冷却液。因其优秀的绝缘性、材料兼

表1 浸没式冷却液热物理性质参数

种类	材料	20℃密度 (kg/m ³)	导热系数 (W/mK)	比热容 (J/kgK)	介电常数	凝固点 (℃)	沸点 (℃)	汽化潜热 (kJ/kg)	闪点 (℃)	安全性
电子氟化液	Novec7000	1400	0.075	1300	7.4	-122	34	142	无	不易燃
	SF33	1383.5	0.077	1200	32	-107	33.4	166	无	不易燃
	Novec 649	1600	0.059	1103	1.8	-108	49	88	无	不易燃
	HFE-6512	1600	0.23	1170	5.8	-120	135		无	不燃
碳氢化合物	矿物油	924.1	0.13	1900	2.1		>218		>115	易燃
	AmpCool AC-110	820	0.1403	2212.1	2.08	-57			193	易燃

容性和高安全性，近年来在电化学储能热管理行业备受关注。

根据表1的对比结果来看，SF33在20℃密度最低，其次是Novec7000，较低的密度意味着较小的质量，减轻模组整装的质量，更少的运输成本。Novec7000以最高的比热容和较高的汽化潜热表现出了优秀的导热性能，同样值得关注的是以HFO组成的电子氟化液SF33，虽然比热容低于Novec7000，但更低的沸点以及更高的汽化潜热，也说明了其不错的导热性能。

通过查阅各产品的说明书，Novec7000和Novec649均可与常见的金属、塑料和橡胶相容，具有良好的材料兼容性，非常适合应用于储能热管理系统中，但对于电动汽车等采用特殊材料的行业，其材料兼容性还有待验证。Novec7000被认为是最常用的HFE类电子氟化液，因其优秀的导热性能、绝缘性、安全性，多位研究者对其进行了实验。

2.2 碳氢化合物

碳氢化合物主要分成矿物油和合成碳氢化合物油两种。其中，矿物油由石油分馏提炼制成，是环烷烃、链烷烃和芳香烃的混合物，因其良好的绝缘性、导热性，广泛应用于电力变压器领域，是应用最为广泛、时间最为长久的介电流体^[3]。从表1中参数可以看出，碳氢化合物的介电常数要低于电子氟化液，比热容也要高于电子氟化液，说明其绝缘性和导热性要优于电子氟化液。但是矿物油因其中存在0.001%-0.5%的腐蚀性硫，易与铜线等发生反应，产生硫化沉积物，其应用于电池热管理系统的可靠性还有待认证，而且由于矿物油的生物降解性较低，一旦发生泄漏，会给环境造成一定的影响。因此，矿物油的环境友好性也较差。

相较于矿物油，AmpCool AC-110的绝缘性、导热性几乎一致，但因其不含硫和其他杂质，具有较好的环境友好性，于是Sundin实验了以AmpCool AC-100为冷却液的电池浸没式冷却效果，实验结果显示，在经历4个充放电循环过程中，电池温度始终保持在23±3℃，而空冷的条件下，电池温度在

20℃~37℃之间，验证了AmpCool AC-110作为冷却剂在单相浸没式冷却技术中应用的可能性^[4]。

3 基于气液相变冷却技术的电化学储能温控系统

3.1 系统设计

此系统基于气液相变冷却技术为原理，设计了一套电化学储能冷却系统，机械结构图如图1所示。系统由电池模组箱体冷却系统和外冷水循环系统组成。电池模组箱体冷却系统由电池模组系统和相变冷却管组成，电池模组系统是由两块190Ah的磷酸铁锂单体电池并联组成，同时为了监测各电池的温度变化，在两块单体电池表面放置了温度传感器。电池模组箱体冷却系统箱体的上方布置了温度、压力传感器各一个。系统选取了气液相变冷却应用较为普遍的Novec7000作为实验冷却剂，将冷却剂倒入电池箱体中直至将所有电池完全浸没。外冷水循环系统由CS190齿轮磁力泵及冷水箱组成，为保证冷凝效果，冷水箱内放置了足量的冰块。

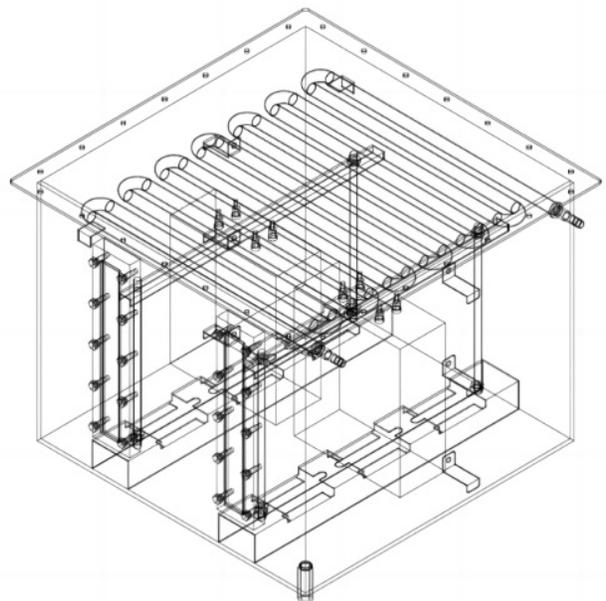


图1 箱体机械结构图

3.2 实验参数

实验采用恒功率的方式进行充电，恒流的方式进行放电。共进行了五组实验，分别为单体电池采用空冷、半浸没式液冷、全浸没式液冷，以及并联模组采用空冷、全浸没式液冷的温度变化。单体电池实验组采用 1C 的充放电倍率，并联模组实验组采用 0.5C 的充放电倍率，具体参数见表 2。

表 2 充放电实验参数

	单体电池充放电实验参数	并联模组充放电实验参数
充电功率	608Wh	304Wh
充电截止电压	3.65V	3.65V
放电电流	190A	95A
放电截止电压	2.5V	2.5V

3.3 实验结果与分析

(1) 单体电池温控实验

本次实验对单体电池共进行了两次充放电循环，因考虑到初始电池温度较低，会对实验结果比较产生影响，因此只分析第二次充放电循环电池温度的变化。结果显示单体电池在一次充放电循环中，采用空冷为冷却方式的电池单体温度在 40℃左右变化，最高温度为 42.37℃。而采用半浸没式液冷和全浸没式液冷为冷却方式的电池单体温度始终低于 31℃，最高温度分别为 30.25℃、30.3℃。因此，浸没式液体冷却的效果要明显优于空气冷却，采用半浸没式液体冷却的温控效果与全浸没式液体冷却的温控效果几乎相同。

(2) 模组电池温控实验

并联模组实验结果显示，采用全浸没式液体冷却的温控系统整体温度要明显低于空气冷却。在空气冷却系统中，随着充放电循环过程，两块电池的温差一直在变化，最高温差可达 4.9℃，然而对于采用气液相变冷却技术的温控系统，最高温差仅为 1.1℃。因此，对于模组而言，气液相变冷却技术可以很好控制单体间的温差，从而提高锂离子电池的寿命。

4 结论

本文总结了浸没式相变冷却的原理，对比了单相及两相浸没式冷却技术的优缺点。相较于单相浸没式冷却技术，气液两相相变冷却技术在未来大容量高倍率的电化学储能电站热管理

系统中应用前景更广，不仅可以实现优秀的温控能力，还在整站轻量化建设水平上提供了有力的支撑。

介电流体作为浸没式相变冷却的技术核心，本文重点对比了两类主要应用于浸没式相变冷却的介电流体：电子氟化液和碳氢化合物。从导热性、绝缘性、密度、安全性、环保性五个指标对两类介电流体进行了评价，电子氟化液作为气液相变冷却的核心，具有良好的绝缘性、导热性。合成碳氢化合物作为单相浸没式冷却的核心，具有更佳的绝缘性和导热性，但其可靠性还有待考察，环保性的问题也较为突出。

通过对比实验，对比了空冷与气液相变冷却技术的温控效果，实验证明了气液相变冷却出色的温控能力。两相浸没式冷却技术作为一种新兴的电池热管理技术，本文设计的基于气液相变冷却技术的电化学储能冷却系统，为未来大规模高能量倍率的电化学储能热管理系统的发展提供研究方向与指导。

参考文献：

- [1]MA S, JIANG M, TAO P, et al. Temperature effect and thermal impact in lithium-ion batteries: A review[J]. Progress in Natural Science: Materials International, 2018, 28 (06): 653-666.
- [2]韩冰冰. 数据中心液冷技术发展现状[J]. 智能建筑, 2020, (08): 73-76.
- [3]VAN GILS R W, DANILOV D, NOTTEN P H L, et al. Battery thermal management by boiling heat-transfer[J]. Energy Conversion and Management, 2014, (79): 9-17.
- [4]SUNDIN D W, SPONHOLTZ S. Thermal Management of Li-Ion Batteries With Single-Phase Liquid Immersion Cooling[J]. IEEE Open Journal of Vehicular Technology, 2020, (01): 82-92.

作者简介：李程（1996-），男，吉林长春人，工程师，博士研究生，主要从事电化学储能研究。

基金项目：中国大唐集团科学技术研究总院有限公司华北电力试验研究院科技项目“化学储能先进冷却及安全防护技术研究”（项目编号：2022HBY-ZHNY002）。