

锂电池系统热管理技术研究进展

朱信龙, 王敏俊, 徐鑫甜, 张倩维, 王均毅, 施红
江苏科技大学能源与动力学院

摘要: 近年来, 电动汽车技术和新能源电站储能技术发展迅猛, 这些技术对所使用的电池要求越来越高。锂电池因其转换效率高、能量密度大、环境友好等优点, 具有较好的应用前景。但锂电池的使用寿命、安全性等特性受温度的影响较大, 需要对其进行有效的热管理研究。针对此问题, 本文主要分析了锂电池的温度特性, 总结了锂电池在电动汽车和储能电站中的应用情况以及热释放特点, 比较了目前已有的锂电池热管理技术。最后指出了动力锂电池热管理系统轻量化、经济化的发展方向。

关键词: 锂电池系统; 热管理技术; 储能; 热特性

doi: 10.19799/j.cnki.2095-4239.2021.0046

中图分类号: TB 21

文献标志码: A

文章编号: 2095-4239 (XXXX) XX-1-08

Research progress of thermal management technology for lithium battery systems

Abstract: In recent years, electric vehicle technology and energy storage technology for new energy power plants have developed rapidly, and these technologies have increasingly high requirements for the batteries in operation within a narrow optimal temperature range. Lithium batteries are commonly employed because of their high conversion efficiency, high energy density and environmental friendliness. Particularly, the service life, safety and other characteristics of lithium batteries are greatly affected by temperature, which requires effective thermal management. In this paper, the thermal performance of lithium batteries is analyzed, and the application of lithium batteries in electric vehicles and energy storage power stations are investigated. Also, the existing thermal management technologies for lithium batteries are compared. Finally, the development direction of lightweight and economical thermal management system for power lithium battery is pointed out.

Key words: Lithium battery system; Thermal management technology; Energy storage; Thermal performance

电池是一种用于实现化学能和电能相互转换过程的载体, 它能够直接代替燃料, 如汽油、天然气等能源驱动电力设备; 也可以用于储存风能、水能、太阳能等洁净能源生产的电能。在众多电池种类中, 锂电池由于具有能量密度大、放电平台高、无环境污染等优点, 已在众多技术领域, 尤其是电动汽车和新能源电站技术中得到广泛应用^[1]。锂电

池于 1990 年由索尼公司研发成功, 1991 年开始商业化生产, 截止 2016 年, 全世界锂电池出货总量达 90GWh; 其中动力型锂电池约占 44.8%, 储能和工业型锂电池约占 10.5%, 与此同时, 动力锂离子电池出货量从 2013 年的 13.8GWh 上升至 2019 年的 116.6GWh, 上升了近 7.5 倍^[2]。近年来, 市场对锂电池容量的需求越来越大, 但其应用空间有限, 这就促使了锂电池容量向高单位发展, 布置也向紧凑化发展。而高容量的锂电池在使用过程中会

产生大量的热, 这些热量长时间积聚, 会导致锂电池内部温度升高, 从而加快电池容量的衰减, 降低电池的使用寿命。如果温度继续升高到一定程度, 甚至会导致电池内部产生分解反应, 从而可能产生爆炸和火灾^[9]。2019年4月21日, 一辆特斯拉电动汽车发生自燃现象, 引起了车库内多辆汽车串联爆炸, 造成了极大的经济损失; 2020年一辆奇瑞艾瑞泽深夜充电时自燃, 索性未造成人员伤亡。中国科学院院士欧阳明高对于国内频繁发生的电动汽车起火事故明确指出“电池热失控是事故的主因”。此外, 当电池组的温度低于安全工作温度极限时, 电池的反应效率降低, 功率随之下降, 进而会达不到目标的电压使用要求。当电池处于0至25℃范围内, 电池温度每下降一度, 电容量就会下降1%。而当电池所在环境温度处于0℃以下, 温度每下降一度, 电容量下降会超过1%。因此, 在充分认识锂电池的温度特性和热释放特点的基础上, 研究及开发安全高效的电池热管理技术, 对锂电池的广泛应用具有重要意义。本文从锂电池的温度特性、锂电池在电动汽车和储能电站中的热释放特点, 目前已有的锂电池热管理技术三个方面展开综述, 以期对锂电池系统的综合热管理技术研究提供指导。

1 锂电池的温度特性

为了充分掌握锂电池性能变化以及发生着火或爆炸的原因, 研究人员对锂电池的温度特性进行了大量的研究, 主要有以下两个方面。

1.1 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着温度的变化会产生较大的改变, 其主要原因是由于温度变化会导致电池的内阻、电压的改变^[4-6]。Zhao^[7]等人研究发现温度每升高1℃, 电池寿命则减少约60天。Feng^[8]等发现高温环境会使电池容量降低, 并指出降低的主要原因是高温会导致电池内阻增加、活性材料和有效锂离子流失。至于内阻增加的原因, 有研究认为这是由于高温条件下, 正极中的金属离子会发生溶解并进入电解液, 进而穿过隔膜在负极沉积, 从而导致负极的内阻变大^[9-12]。与高温环境类似, 低温环境也会导致锂电池容量降低, 如磷酸铁锂电池的容量保持率在0℃下为60%-70%, 而在-20℃时则降低到20%-40%, 这主要是由于电解质

在低温条件下传输性能发生显著降低^[13]。

1.2 温度对锂电池热稳定性的影响

温度对锂电池稳定性影响主要表现在高温下, 电池的内部材料会发生分解反应。Spotnit^[14]和Dahn^[15]等人研究发现, 持续的高温环境下, 锂电池内部的SEI膜首先分解, 随后负极材料会与电解液产生反应、隔膜熔融, 最后正极材料和电解液发生分解。其中SEI膜的分解温度区间一般在80℃-120℃。电池的这些变化会导致锂离子通道发生闭塞, 引起正负极直接接触、短路, 从而放出大量热。此外, 这些材料分解的过程中还会产生大量气体和热量, 电池内部压力迅速增加, 从而发生如电池鼓包、破裂、泄压阀破裂、铝箔熔化等热失控现象。热失控一旦发生, 电池内部温差可达520℃^[16]。显然, 这将对电池使用的安全性带来重大危害。此外, 当电池长时间处于极端低温工况下, 会使得电池负极析锂, 形成锂枝晶, 严重时可能会刺穿SEI膜, 导致电池无法工作的现象。

综合考虑锂电池的高效性和安全性, 目前普遍认为锂电池可承受的温度区间分别为-40℃~60℃, 过低的温度会导致电解液凝固, 阻抗增加, 过高的温度则电池的容量、寿命以及安全性将大大降低。最佳温度区间则为10℃~35℃^[17]。

10℃ 最佳温度区间 35℃

-20℃ 工作温度区间 45℃

-40℃ 可承受温度区间 60℃

图1 锂电池工作的各种温度区间

Fig.1 Distribution of energy storage batteries inside the container

1.3 电池模组的温度均一性要求

锂电池模组在实际的使用过程中, 尤其在电动汽车应用领域, 由于汽车速度有加速、减速以及怠速状态会表现出电流波动起伏状态。电流的波动会引起电池组生热的不均匀现象。在电池组往复的使用过程后, 各单体电池的老化程度不同, 易产生电池的过充和过放, 造成电池性能下降的情况, 甚至会产生安全问题。此外, 单体电池间的不均匀性会导致整个电池模组在工作时产生木桶短板效应, 即电池组的性能由最差的单体电池性能所决定。Dickinson 和 Swan^[18]的研究表明模块间的温度梯度减少了整体电池模组的容量和寿命, 他们推荐保持电池组内各单体电池之间的温度均匀性。因此,

锂电池在使用过程中不仅要给单体电池足够的舒适性, 还要保证电池模组中各单体电池均一性, 才能提高电池组的整体寿命, 一般要求各单体电池之间的温差不超过 5°C ^[17]。

2 锂电池在电动汽车和储能电站中的应用

2.1 锂电池在电动汽车技术中应用

与传统汽车使用化石燃料不同, 电动汽车使用高能量密度的电池作为驱动源, 具有节能环保的优点。因而受到了普遍关注^[19]。2020年中国市场新能源乘用车装机量约为48.02GWh, 较2019年增长了13.8%, 考虑到2020年年初疫情影响, 仍可以看出新能源电动汽车市场保持较高增长势头。电动汽车近年来呈现了蓬勃发展的趋势, 但是其所使用电池的寿命和在四季下的续航能力仍不如传统的燃油汽车, 因此, 电池的效率、安全性以及生产成本是电动汽车普及的瓶颈^[20]。锂离子电池以其诸多优点逐渐超越铅酸电池、镍氢电池, 成为研究和使用的热点^[21]。在电动汽车中, 锂电池组通常由上百个单体电池串/并联组成。在充电和放电过程中, 锂电池化学反应热和电阻发热会引起温度升高, 热流密度达到 $103\sim 104\text{W}/\text{m}^2$, 当超过耐受温度极限时, 电池可能引发热失控。此外单体电池之间的辐射换热以及复杂的电路也是电池热失控的另一个诱因^[22]。发生热失控的电池会产生失效、着火甚至剧烈燃烧和爆炸, 进而造成人身和财产损失。因此亟需高效的热管理技术对动力电池进行温度控制。

2.2 锂电池在电站储能技术中应用

近年来, 太阳能、风能等新能源发电技术以其清洁无污染、可再生等优点发展迅猛, 但这些发电技术最大问题在于能源的不稳定性。引入储能电池系统则能够削峰填谷, 平衡负荷波动, 降低不稳定发电对电网的冲击, 从而解决上述问题^[23]。如前文所述, 锂电池具有诸多优点, 这些优点是目前铅酸电池、钠硫电池、液流电池等难以达到的。因此, 锂电池在储能系统中应用最为广泛。如美国于2009年开发并使用的2 MW集装箱式磷酸铁锂电池储能系统、2011年西佛吉尼州的32MW 储能系统、我国张北风光的20MW 储能电池系统、深圳宝清储能电站10 MW、2020年于镇江建立的国内首个客户侧储能自动需求响应储能项目等^[24-25]。2020

年的5月, 《储能产业研究白皮书2020》指出全球已投运的锂离子电池储能累计装机量为8453.9MW。与电动汽车中的动力电池相比, 储能电池系统中电池数量更多, 电池的总容量和功率也更大。这些电池紧密分布在一个空间内, 会由于运行工况的复杂多变而产生温度不均匀、温度过高等问题, 从而影响整个电池系统的性能, 甚至引发热失控的安全事故^[26]。因此, 对这种储能电池系统进行热管理设计也是至关重要的。目前, 对于集装箱储能电池系统的温度控制均较为粗放的考虑集装箱内的平均温度, 未能精细化的考虑电池组各自的温度分布情况, 这对于电池组的高效利用是极为不利的。同时, 这种粗放式的环境控制系统应对环境的适应能力较差, 调节品质欠佳。

3 现有锂电池热管理技术

由以上论述可以看出, 无论是电动汽车中的动力电池, 还是电站中的储能电池, 采用一种或多种热管理技术来控制电池的内外温度, 使电池处于安全、高效的运行状态, 对锂电池的发展具有重要作用。目前, 锂电池热管理技术主要有以下几种。

3.1 空气冷却技术

以空气为传热介质的热管理技术简称空气冷却技术或空冷。该技术利用空气介质, 通过热对流和热传导将热量从电池表面带走, 从而实现冷却电池的目的。空冷技术以其系统简单、成本低、易于维护等优点, 得到了广泛应用^[27]。目前, 锂电池空冷技术的主要研究方向是空气流量、电池布局和风道布置的优化等方面^[28-30]。李淼林^[31]等人通过实验和仿真等手段研究了进风角度、出风角度、电池间距等因素对电池散热效果的影响, 得出了优化的空冷模型。王晓松^[32]等人通过在风道内增设导流板, 使得储能电池集装箱中流场和温度场更加均匀。杨凯杰^[33]等进一步研究了导流板的尺寸和布置角度对气体流动和传热特性的影响, 结果表明合理布置导流板可以使电池表面温度降至 60°C 以下。FAN^[34]等人研究发现增大电池间隙, 会导致电池的最高温升增大; 若间隙不变, 增大风机风量, 最大温升会降低, 但整体温度均匀性减小。邹焱涛^[35]等设计的“主风道+立管”形式(如图2所示)送风方案能够获得均匀性良好的出风效果。尽管已有的研究成果大大促进了空气技术的发展, 但是由于空气的比热

容低，导热系数也较低，这使得空冷目前主要应用于产热率比较低的情况，在产热高的环境中应用还有待进一步研究。

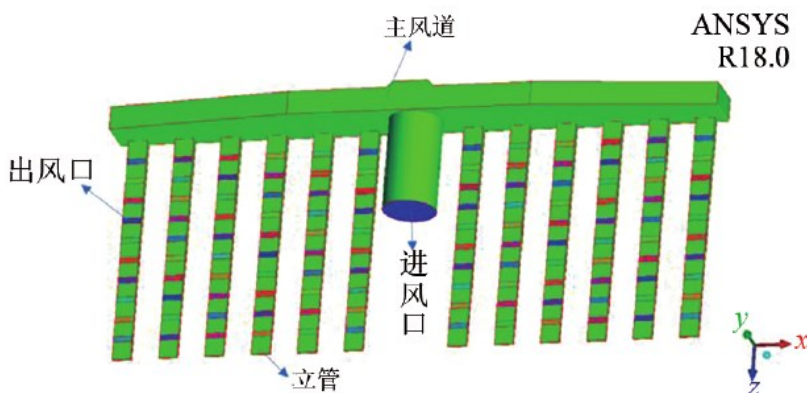


图2 “主风道+立管”风道模型

Fig.2 Air duct model with main air duct and vertical duct

3.2 液体冷却技术

以液体为传热介质的热管理技术简称液体冷却技术或液冷。该技术一般是以换热系数高、比热容大的液体通过管道或者将热源浸没其中的方式将热量传递出去。冷却液的种类通常有水、硅油、乙二醇、丙二醇、空调制冷剂。相比于空冷，液冷的冷却介质换热系数更高、比热容更大、冷却速度也更快，可更加有效地降低电池温度并提高温度分布均匀性，此外，液冷系统也更加紧凑。目前，锂电池液冷技术的主要研究方向是冷却介质的研发、流道和流速的优化以及热电耦合模型的构建与优化等^[36-37]。Huo^[38]等研究发现液体介质的流量存在最优值，过高或过低均会降低系统效率。张上安^[39]等设计并比较了多种流道布置对冷却系统的影响，其中分流S形流道具有更好的冷却效果。裴波^[40]等采用高导热油进口温度应对寒冷气候下的热管理系统预热过程，降低了能耗，并且研究表明导热油的进口温度对电池组热阻的影响较弱。Zhou等^[41]设计了一种半螺旋管式液冷方法，如图3所示。该方法降低了流体体积、消除了滞留区，并使流体方向变化多样，这都有利于降低最大温度和温差。Wei^[42]等针对水冷系统构建了热-电化学耦合的数学模型，通过数值模拟发现，增大冷却液流速和冷却板厚度能够有效降低电池组的平均温度，增加温度分布的均匀性。尽管液冷相对于空冷具有更多的优势，但液冷也有其自身的缺点，如间接式的液冷须使用水冷套等换热器件，结构复杂，存在漏液可能，系统

的维护成本也会增加；直接式的液冷有可能发生冷却介质腐蚀电池的情况。液冷技术进一步广泛应用必须通过研发克服这些问题。

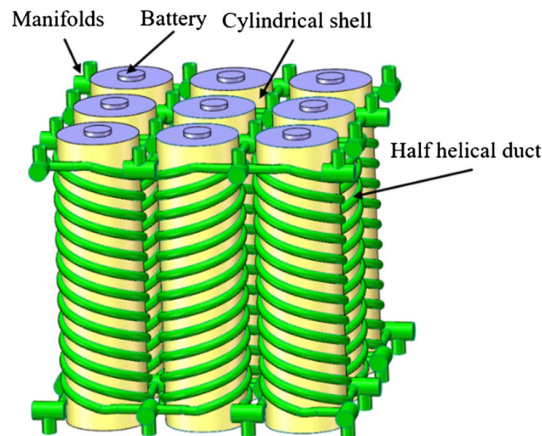


图3 半螺旋导管式电池模块

Fig.3 Semi-helical tube battery module

3.3 热管冷却技术

热管冷却技术就是利用工质在管壳内的吸热端蒸发，放热端冷凝，通过管芯完成循环，从而实现冷却电池的目的。相比于空冷和液冷，热管技术在导热性、恒温性等方面更具突出优势，此外其热流密度和方向还具有可变性，因此在核电、航天、精密电子器件等领域应用较为广泛，在电池系统中的研究也有所报道，主要研究方向是热管冷却性能评估、与其他冷却方式耦合、构建热-电化学模型并优化分析。Wu等^[43]采用带铝肋片的热管对锂电池

进行散热, 结果显示电池温度和表面温差均显著降低。Jang^[44]和 TRAN^[45]等实验发现使用热管和空冷系统结合对大功率电池进行散热, 可以显著降低电池温度, 最多可降低至 45℃ -50℃ 以下。Swanepoel 等^[46]使用以水为工质的脉动热管对电池进行热管理, 结果表明当热管宽度 $d < 2.5 \text{ mm}$ 时具有较好的散热效率。陈萌等^[47]则采用以 TiO_2 纳米流体为工质的脉动热管对锂电池进行散热实验, 结果显示电池表面温度被控制在 35℃ 以下, 最大温差控制在 2.25℃ 以内, 有效改善了电池表面温度高且不均匀的问题。目前, 热管冷却技术在大容量电池系统中的应用主要还集中在实验室研究阶段, 实际应用较少, 有待进一步发展。

3.4 相变材料冷却技术

相变材料冷却技术是利用材料(phase change material, PCM)相态转换过程中吸收电池箱内热量, 以达到冷却目的。该技术具有系统简单、可靠性高等优点, 近年来成为研究热点之一, 主要研究方向是相变材料的选择和优化, 相变材料冷却与其他冷却系统耦合等。Selman 等^[48]首先提出相变材料冷却系统, 并认为该系统相比去对流换热冷却系统, 体积更加紧凑, 散热效果也更显著。Siddique^[49]和 WANG 等^[50]等设计了以石蜡/泡沫铝为相变材料的热管理系统, 分析结果表明该材料导热系数比纯石蜡材料高出 218 倍, 系统能够使锂电池

的温度降低约 25℃。其他诸如石蜡/泡沫铜^[51]、石蜡/膨胀石墨^[52-53]、石蜡/碳纤维^[54]等相变材料也表现出优异的导热性能, 能够有效降低电池温度, 最大可至 45%。

上述相变材料虽然导热系数很大, 但相变材料本身的散热能力较为一般, 因此单一的相变材料冷却难以满足大容量锂电池的散热要求。通常将相变材料冷却与其他冷却方式相结合, 以提高系统整体效率^[55-56]。FATHABADI 等^[57]设计了一种主被动混合式热管理系统, 其中主动式部分采用空气冷却, 被动式部分采用相变冷却。研究结果显示电池组温度能够保持在合理范围, 温度分布也较均匀。BAI 等^[58]提出了一种相变材料冷却与液冷相结合的分层散热结构, 结果表明电池的热量大部分能够被系统中水冷板带走。冷却板和电池布置、冷却液的流量等因素对散热效果有很大影响。ZHAO 等^[59]则是将相变材料冷却和热管冷却耦合, 设计出的设计的热管理系统如图 4 所示。研究结果显示, 与单纯的相变材料冷却相比, 这种耦合的系统可使电池的温度差降低 28.9%, 电池表面温度更加均匀。已有研究成果在一定程度上改善了相变材料冷却技术中存在的导热率低、价格昂贵、易泄漏、多次相变不稳定等问题, 但这些研究也还处于实验室研究阶段, 距商业化应用还有一段距离。

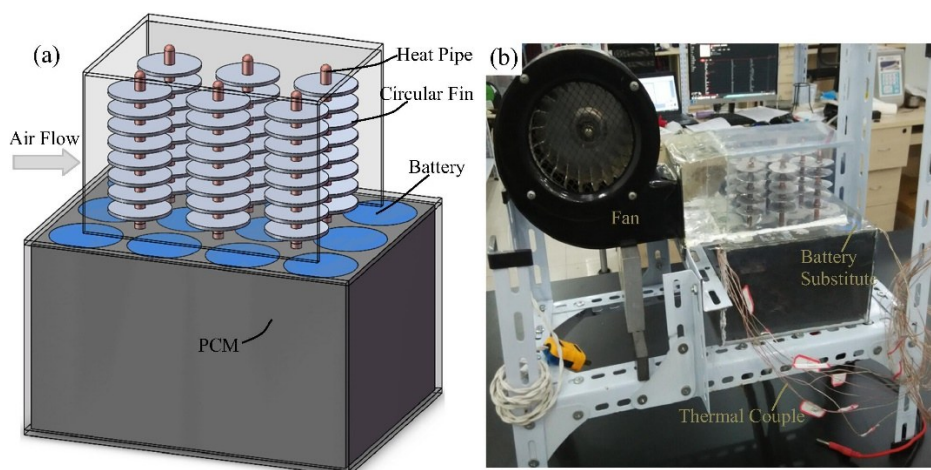


图 4 热管冷却与相变材料冷却耦合系统

Fig.4 Coupling system of heat pipe cooling and phase change material cooling

4 结语与展望

相比于其他电池, 锂电池具有能量密度高、循

环寿命长、无环境污染等优点, 但同时也存在对工作温度要求苛刻的问题。在电动汽车中, 动力锂电

池长时间中小倍率放电, 或者在启动时以及不良路况时大倍率放电过程会产生大量的热。这些热量如果没有被及时带走, 就会导致电池性能降低, 甚至产生安全事故。而在电站储能系统中, 储能锂电池通常数量特别多, 电池的总容量和功率也特别大, 存放在有限空间中, 非常容易出现电池箱内温度过高, 温度分布不均匀等问题。严重危害储能电池的安全、高效使用。现有的热管理技术如空冷、液冷、热管冷却相变材料冷却在一定程度改善了锂电池的散热问题, 但其自身也存在着如系统复杂、体积庞大、冷却介质易泄露、价格昂贵等挑战。根据目前热管理技术的研究现状, 未来的研究可重点在以下几个方面开展。

(1) 针对电动汽车使用的动力型锂电池, 重点开发体积更小, 结构更加紧凑的热管理系统, 便于汽车整体设计和安装。大力开发紧凑型热管冷却技术; 研发新型相变材料, 通过骨架负载、添加改性元素等方法提高材料的导热性、循环稳定性; 设计和优化更合理的热管冷却与相变冷却耦合系统。

(2) 针对电站储能所使用的储能型锂电池, 重点开发更加经济高效的热管理系统。继续加大空气冷却技术的优化力度, 除了已有的流道、流量等方面的研究, 还可以通过增加额外装置来提高温度的均匀性; 开发新型的液冷介质, 提高介质的电绝缘性、导热性, 降低介质黏度, 解决介质泄露等问题; 研发更加经济的热管, 以克服目前热管冷却技术应用于大容量储能电池系统中成本过高的问题。

参考文献

- [1] 张子峰, 王林, 陈东红. 集装箱储能系统散热及抗震性研究[J]. 储能科学与技术, 2013, 2(6): 642-648.
Zhang ZF, Wang L, Chen DH. Research on heat dissipation and seismic resistance of containerized energy storage system[J]. Energy Storage Science and Technology, 2013, 2(6): 642-648.
- [2] 赛迪智库电子信息产业研究所. «锂离子电池产业发展白皮书(2017)»发布[J].
Institute of Electronic Information Industry, Saedi Intelligence. White Paper on Lithium-ion Battery Industry Development (2017) [J].
- [3] 谢满怡, 王莉, 何向明, 等. 锂离子动力电池安全性问题影响因素[J]. 储能科学与技术, 2017, 6(1): 43-51.
XIE X Y, WANG L, HE X M, et al. Factors influencing the safety issues of lithium-ion power batteries[J]. Energy Storage Science and Technology, 2017, 6(1): 43-51.
- [4] WANG S Q, LU L G, REN D S, et al. Experimental investigation on the feasibility of heat pipe-based thermal management system to prevent thermal runaway propagation [J]. Electrochem Energy Convers Storage, 2019, 16: 031006.
- [5] WANG K, GAO F, ZHU Y L, et al. Internal resistance and heat generation of soft package Li4Ti5O12 battery during charge and discharge [J]. Energy, 2018, 149: 364-374.
- [6] 马勇, 张量, 王亦伟, 蒋方明. 储能用 LiFePO4 锂离子电池的热安全性电池: 1-5 [2021-01-30].
Ma Y, Zhang Q, Wang YW, Jiang FM. Thermal safety characteristics of LiFePO4 lithium-ion batteries for energy storage Cell: 1-5 [2021-01-30].
- [7] Rui Zhao, Junjie Gu, Jie Liu. An experimental study of heat pipe thermal management system with wet cooling method for lithium ion batteries. 2015, 273: 1089-1097.
- [8] Feng X, Sun J, Ouyang M, et al. Characterization of large format lithium ion battery exposed to extremely high temperature[J]. Journal of Power Sources, 2014, 272 (Dec. 25): 457-467.
- [9] Li D, Danilov DL, Gao L, et al. Degradation Mechanisms of C6/LiFePO4 Batteries: experimental analyses of cycling-induced aging[J]. Electrochimica Acta, 2016, 210: 445-445.
- [10] Amine K, Liu J, Belharouak I. High-temperature storage and cycling of C-LiFePO4/graphite Li-ion cells. 2005, 7(7): 669-673.
- [11] Amine K, Liu J, Kang S, et al. Improved lithium manganese oxide spinel/graphite Li-ion cells for high-power applications. 2003, 129 (1): 14-19.
- [12] Zheng H, Sun Q, Liu G, et al. Correlation between dissolution behavior and electrochemical cycling performance for LiNi1/3Co1/3Mn1/3O2-based cells[J]. Journal of Power Sources, 2012, 207 (Jun. 1): 134-140.
- [13] 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(1): 19-28.
ZHAO SX, GUO S, ZHAO JW et al. Development on low-temperature performance of lithium-ion batteries[J]. Journal of the Chinese Ceramic Society, 2016, 44(1): 19-28.
- [14] Spotnitz R, Franklin J. Abuse behavior of high-power, lithium-ion cells. 2003, 113(1): 81-100.
- [15] Larcher D, MacNeil D, Dahn J. Comparison of the reactivity of various carbon electrode materials with electrolyte at elevated temperature[J]. Journal of the Electrochemical Society, 1999, 146 (10): 3596-3602.
- [16] Feng X, Fang M, He X, et al. Thermal runaway features of large format prismatic lithium ion battery using extended volume accelerating rate calorimetry. 2014, 255: 294-301.
- [17] WARNER J. The handbook of lithium-ion battery pack design[J]. Journal of Rare Earths, 2015, 32(2): 217-222.
- [18] Dickinson B E, Swan D H. EV Battery Pack Life: Pack Degradation and Solutions[C]// Future Transportation Technology Conference & Exposition. 1995.
- [19] 邹政耀, 王若平. 新能源汽车技术[M]. 北京: 国防工业出版社, 2012.
Zou ZY, Wang RP. New energy vehicle technology [M]. Beijing: National Defense Industry Press, 2012.
- [20] 陈雪莲, 张存善, 安然. 电池热管理及电池安全技术[J]. 电源技术,

- 2020,44 (8):1177-1181.
- Chen X, Zhang C, An R. Battery thermal management and battery safety technology[J]. Power Technology,2020,44(8):1177-1181.
- [21] Wada M. Research and development of electric vehicles for clean transportation[J]. Journal of Environmental Sciences-China, 2009,21(6):745-749.
- [22] Park C W, Jaura A K, Dynamic thermal model of Li-ion battery for predictive behavior in hybrid and fuel cell vehicles[J]. Society of Automotive Engineers,2003,01:2286.
- [23] 白雪平. 磷酸铁锂电池储能系统的应用[J]. 高科技与产业化, 2016, 4: 71-73.
- BAI X. Application of lithium-ion battery energy storage system[J]. High-Technology and Industrialization, 2016, 4: 71-73.
- [24] 曾乐才. 储能锂离子电池产业化发展趋势[J]. 上海电气技术, 2012, 5 (1): 43-48.
- ZENG L. Research and analysis of Li-ion battery industry development for energy storage[J]. Journal of Shanghai Electric Technology, 2012, 5(1): 43-48
- [25] 陆志刚, 王科, 刘怡, 等. 深圳宝清锂电池储能电站关键技术及系统成套设计方法[J]. 电力系统自动化, 2013, 37(1): 65-69.
- LU Zhigang, WANG Ke, LIU Yi, et al. Research and application of megawatt scale lithium-ion battery energy storage station and key technology[J]. Automation of Electric Power System, 2013, 37 (1): 65-69.
- [26] 罗军, 田刚领, 张柳丽, 等. 集装箱式储能系统温度特性研究[J]. 电器与能效管理技术, 2019(9): 48-52.
- LUO J, TIAN G, ZHANG L, et al. Research on temperature characteristics of container energy storage system[J]. Electrical Appliances and Energy Efficiency Management Technology, 2019 (9): 48-52.
- [27] 逯彦红, 段国林. 车用锂电池散热方法研究[J]. 电源技术, 2016, 40 (12):2476-2478.
- Lu Yanhong, Duan G. Research on heat dissipation methods for automotive lithium batteries[J]. Power Technology, 2016, 40(12): 2476-2478.
- [28] FAN L, KHODADADI J M, PESARAN A A. A parametric study on thermal management of an air-cooled lithium-ion battery module for plug-in hybrid electric vehicles[J]. Journal of Power Sources, 2013, 238: 301-312.
- [29] YU K, YANG X, CHENG Y, et al. Thermal analysis and two-directional air flow thermal management for lithium-ion battery pack[J]. Journal of Power Sources, 2014, 270(4): 193-200.
- [30] 李金芳, 叶琪超, 应光耀, 等. 基于 CFD 的储能集装箱散热系统流场优化[J]. 浙江电力, 2020, 39(6):94-98.
- Li JF, Ye QC, Ying GY, et al. CFD-based flow field optimization of energy storage container heat dissipation system[J]. Zhejiang Electric Power, 2020, 39(6):94-98.
- [31] 李森林, 臧孟炎, 谢金红, 李长玉, 程清伟. 锂离子电池组风冷散热仿真与优化[J]. 电源技术, 2019, 43(11):1805-1809.
- Li M, Zang M, Xie J, Li C, Cheng Q. Simulation and optimization of air-cooled heat dissipation in lithium-ion battery packs[J]. Power Technology, 2019, 43(11):1805-1809.
- [32] 王晓松, 游峰, 张敏吉, 孙洋洲. 集装箱式储能系统数值仿真模拟与优化[J]. 储能科学与技术, 2016, 5(04):577-582.
- Wang X, You F, Zhang M, Sun Ocean. Numerical simulation simulation and optimization of containerized energy storage system[J]. Energy Storage Science and Technology, 2016, 5(04): 577-582.
- [33] 杨凯杰, 裴后举, 朱信龙, 等. 某型集装箱储能电池模块的热设计研究及优化[J]. 储能科学与技术, 2020, 9(6):1858-1863.
- YANG Kaijie, PUI Houju, ZHU Xinlong, et al. Thermal design research and optimization of a certain type of container energy storage battery module[J]. Energy Storage Science and Technology, 2020, 9(6):1858-1863.
- [34] Fan L W, Khodadadi J M, Pesaran A A. A parametric study on thermal management of an air-cooled lithium-ion battery module for plug-in hybrid electric vehicles[J]. Journal of Power Sources, 2013, 238: 301-312.
- [35] 邹懿涛, 裴后举, 施红, 等. 某型集装箱储能电池组冷却风道设计及优化[J]. 储能科学与技术, 2020, 9(6):1864-1871.
- Zou Xiaotao, Pei Houju, Shi Hong, et al. Design and optimization of cooling ducts for a certain type of containerized energy storage battery pack[J]. Energy Storage Science and Technology, 2020, 9 (6):1864-1871.
- [36] HUO Y, RAO Z, LIU X, et al. Investigation of power battery thermal management by using mini-channel cold plate[J]. Energy Conversion & Management, 2015, 89: 387-395.
- [37] PANCHAL S, DINCER I, AGELIN-CHAAB M, et al. Experimental and theoretical investigation of temperature distributions in a prismatic lithium-ion battery[J]. International Journal of Thermal Sciences, 2016, 99: 204-212.
- [38] HUO Y, RAO Z, LIU X, et al. Investigation of power battery thermal management by using mini-channel cold plate [J]. Energy Conversion & Management, 2015, 89: 387-395.
- [39] 张上安. 混合动力车用锂电池组液体冷却散热机理研究[D]. 湖南大学, 2013.
- Zhang Shangan. Research on liquid cooling and heat dissipation mechanism of lithium battery pack for hybrid vehicles[D]. Hunan University, 2013.
- [40] 裴波, 王磊, 杨栋梁, 等. 基于浸没式液冷冷却的锂电池热管理系统数值计算研究[J]. 船电技术, 2020, 40(11):1-5.
- Pei Bo, Wang Lei, Yang Dongliang, et al. Numerical calculation of thermal management system for lithium batteries based on submerged liquid-cooled cooling[J]. Marine Electric Technology, 2020, 40(11):1-5.
- [41] Zhou, Haobing, Zhou, Fei, Zhang, Qian, et al. Thermal management of cylindrical lithium-ion battery based on a liquid cooling method with half-helical duct[J]. Applied thermal engineering: Design, processes, equipment, economics, 2019, 162.
- [42] WEI T, SOMASUNDARAM K, BIRGERSSON E, et al. Numerical investigation of water cooling for a lithium-ion bipolar battery pack [J]. International Journal of Thermal Sciences, 2015, 94: 259-269.

- [43] Mao-Sung Wua K H L, Yung-Yun Wangb, Chi-Chao Wanb. Heat dissipation design for lithium-ion batteries [J]. *Journal of Power Sources*, 2002, 109(1): 160-166.
- [44] Jang J C, Rhi S H. Battery thermal management system of future electric vehicles with loop thermosyphon[C]//US-Korea Conference on Science, Technology, and Entrepreneurship (UKC). 2010.
- [45] TRAN T H, HARMAND S, SAHUT B. Experimental investigation on heat pipe cooling for hybrid electric vehicle and electric vehicle lithium-ion battery [J]. *Journal of Power Sources*, 2014, 265(11): 262-272.
- [46] Swanepoel G. Thermal management of hybrid electrical vehicles using heat pipes[D]. Stellenbosch: Department of Mechanical Engineering University of Stellenbosch, 2001.
- [47] 陈萌, 李静静. 脉动热管用于电动汽车锂电池散热性能试验[J/OL]. *化工进展*: 1-11 [2021-01-30].
Chen M, Li JJ. Pulsating heat pipe for electric vehicle lithium battery heat dissipation performance test [J/OL]. *Chemical Progress*: 1-11 [2021-01-30].
- [48] Khateeb Siddique A, Farid Mohammed M, Selman J Robert, et al. Design and simulation of a lithium-ion battery with a phase change material thermal management system for an electric scooter[J]. *Journal of Power Sources*, 2004, 128: 292-307.
- [49] Khateeb Siddique A, Amiruddin Shabab, Selman J Robert, et al. Thermal management of Li-ion battery with phase change material for electric scooters: Experimental validation[J]. *Journal of Power Sources*, 2005, 142: 345-353.
- [50] WANG Z, ZHANG Z, JIA L, et al. Paraffin and paraffin/aluminum foam composite phase change material heat storage experimental study based on thermal management of Li-ion battery[J]. *Applied Thermal Engineering*, 2015, 78: 428-436.
- [51] LI W Q, QU Z G, HE Y L, et al. Experimental study of a passive thermal management system for high-powered lithium-ion batteries using porous metal foam saturated with phase change materials[J]. *Journal of Power Sources*, 2014, 255(6): 9-15.
- [52] MILLS A, AL-HALLAJ S. Simulation of passive thermal management system for lithium-ion battery packs[J]. *Journal of Power Sources*, 2005, 141(2): 307-315.
- [53] GOLİ P, LEGEDZA S, DHAR A, et al. Graphene-enhanced hybrid phase change materials for thermal management of Li-ion batteries[J]. *Journal of Power Sources*, 2014, 248(7): 37-43.
- [54] BABAPOOR A, AZIZI M, KARIMI G. Thermal management of a Li-ion battery using carbon fiber-PCM composites[J]. *Applied Thermal Engineering*, 2015, 82(2): 281-290.
- [55] BIBIN C, VIJAYARAM M, SURIYA V, et al. A review on thermal issues in Li-ion battery and recent advancements in battery thermal management system[J]. *Materials today: proceedings*, 2020. DOI: 10.1016/j.matpr.2020.03.317.
- [56] 朱波, 杜如海, 姚明亮, 赵媛媛, 张毅. 基于相变材料的纯电动汽车电池热管理研究. *电源技术*, 2020, 1666-1670.
Zhu Bo, Du Ruhai, Yao Mingyao, Zhao Yuanyuan, Zhang Yi. Thermal management of pure electric vehicle batteries based on phase change materials. *Power Technology*, 2020, 1666-1670.
- [57] FATHABADI H. High thermal performance lithium-ion battery pack including hybrid active-passive thermal management system for using in hybrid/electric vehicles[J]. *Energy*, 2014, 70: 529-538.
- [58] BAI F F, CHEN MB, SONG W J, et al. Thermal management performances of PCM/water cooling-plate using for lithium-ion battery module based on non-uniform internal heat source[J]. *Applied thermal engineering*, 2017, 126: 17-27.
- [59] Zhao J T, LV P Z, RAO Z H. Experimental study on the thermal management performance of phase change material coupled with heat pipe for cylindrical power battery pack[J]. *Experimental Thermal and Fluid Science: International Journal of Experimental Heat Transfer, Thermodynamics, and Fluid Mechanics*, 2017, 82: 182-188.