

电动汽车锂离子动力电池加热技术研究进展

唐德钱^{1,2} 汪颖² 向静²

1. 北京理工大学材料学院; 2. 重庆长安汽车股份有限公司新动力工厂

摘要: 本文阐述了低温对锂离子动力电池的影响,并综述了PTC加热、加热膜加热、液体加热及脉冲加热方法的工作原理、优缺点和运用实例。分析结果表明,脉冲加热法相比于其他方法更具优势。本文的研究可为后续电动汽车动力电池低温热管理系统设计提供参考。

关键词: 电动汽车; 锂离子动力电池; 低温加热; 脉冲加热

0 前言

锂离子动力电池凭借独特的优势广泛应用在电动汽车中。然而,锂离子动力电池在低温时功率衰减严重、充电时间长,且长时间在低温环境下使用,容易出现析锂的问题,严重影响电池的寿命,甚至会诱发电池热失控,降低电动汽车的安全性。因此,开发满足车用需求的动力电池低温加热技术得到了广泛关注和应用。

为解决动力电池低温加热问题,一般采用外部加热法和内部加热法。外部加热法是指加热热源位于电池外部,热量通过电池外部向电池内部传递。这种方法实现较为容易,但是存在加热速率慢、热量利用率不高等缺点。相比于外部加热法,内部加热避免了热传导产生的热量损失,具有加热速度快、温度分布均匀的优势。但是,内部加热法使用工况更为严苛,相关电流参数对动力电池寿命、容量和内阻的影响仍待进一步研究和优化。

1 锂离子动力电池低温性能衰退机理

1.1 锂离子动力电池工作原理

锂离子动力电池是一种能量存储装置,由正/负电极、电解液和隔膜基本功能单元组成。电解液作为电池中离子传输的载体,是电池充放电的关键物质。隔膜隔断电池内电子的移动,可让离子自由通过。

当正、负极之间连接有负载时,动力电池提供电能,

为外部用电设备供电;当正、负极之间连接有外部电源时,外部电源能够给动力电池充电。

1.2 锂离子动力电池在低温下性能衰退的原因

锂离子动力电池在低温下性能衰退的原因主要有四个。

(1) 低温下,电解液黏度变大,离子移动速度变慢。

(2) 电极材料活性降低,使得锂离子的嵌入和脱出反应速率减慢。

(3) 电解液与负极、隔膜之间相容性变差。

(4) 严重情况下,电池负极析锂,直接导致固态电解质界面(SEI)厚度增加。

电解液对锂离子动力电池低温放电性能的影响最为显著,低温条件下,电解液导电能力下降的主要原因是部分溶剂会变得粘稠甚至凝结,离子扩散速率减慢。这导致锂离子在电解液中的传输受到限制,减少了锂离子的储存和释放速率,从而导致锂离子迁移困难。低温充电过程及常温25℃下锂离子迁移如图1、图2所示。

低温下,正/负极材料晶格收缩,电荷转移与固相

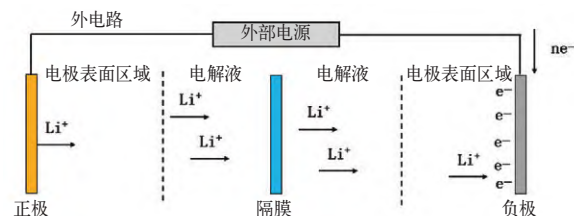


图1 低温充电过程锂离子迁移示意

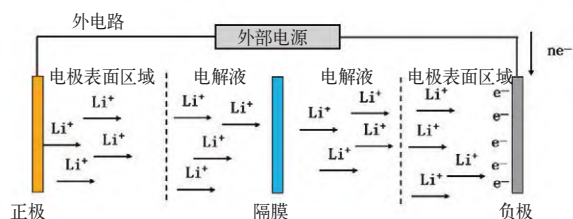


图2 25℃下锂离子迁移示意

扩散变得更慢,锂离子更难脱嵌与嵌入,同时在电解液中的扩散变难,这就导致电极表面区域以及电解液中的锂离子变少,使得电极的极化变得更大。

锂离子动力电池负极材料的锂化电位常常低于有机电解液的还原分解点位,因此会形成一层钝化膜,即SEI膜,如图3所示。SEI膜的形成贯穿电池使用的始终。在低温下,SEI膜的阻力变大,导致负极电位向低电位偏移,产生了更大的极化,使得锂更容易析出,而析出锂金属又会使得电极表面电位维持在一个较低的水平,让有机电解液继续分解形成SEI膜,析锂与电解液的分解形成了恶性循环,使得电池中活性锂离子越来越少。

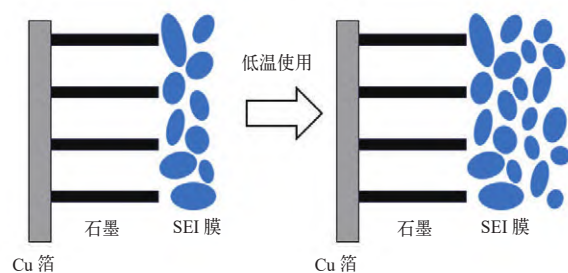


图3 低温SEI膜变厚原理

在低温环境下,电池内部离子迁移速率减慢,导致离子在负极表面或界面上的沉积过程变得不均匀,这种不均匀的沉积会促使锂金属以枝晶的形式生长。电池锂枝晶形成机理如图4所示。

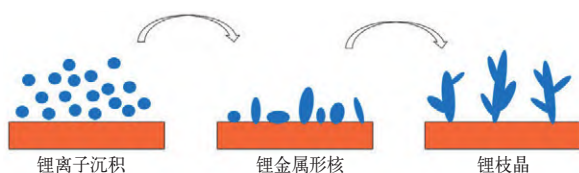


图4 锂枝晶形成机理示意

电池锂枝晶形成大致可分为三个阶段。

(1) 初始阶段。锂金属与电解液发生化学、电化学反应,在金属电极表面形成一层致密的钝化膜,Li+可以穿过钝化膜在电极表面沉积。

(2) 锂金属形核阶段。在这个阶段,锂金属的形核需要电位比锂还原电位更负,过电位越大,锂形核数越多。

(3) 沉积锂核生长阶段。此阶段,晶粒向外延伸,最终形成枝晶形貌。

锂金属枝晶的生长会导致锂离子在电池中的不可逆损失,使电解液中的锂离子耗尽。这将导致电池容量衰减、循环寿命降低,进而影响电池的可靠性和使用寿命。同时,锂金属枝晶的生长会导致负极与正极之间的直接短路,进而损害电池的正常工作。这种短路会导致电池发热、容量损失甚至发生燃烧、爆炸等严重安全问题。

1.3 锂离子动力电池低温环境下的常见问题

锂离子动力电池在低温下使用存在着诸多问题,如:电池充放电功率下降、加速时间变长、析锂现象明显及安全性能变差等。

以某款电动车(磷酸铁锂电池)为例,测试其在不同温度下的充、放电功率,见表1。

表1 动力电池充电功率随温度变化而变化的情况

温度 功率/kW SOC(%)	环境温度 (-20℃)	环境温度 (-10℃)	环境温 度(0℃)	环境温 度(10℃)	环境温度 (20℃)
10	24	43	48	72	72
20	24	34	48	72	72
30	14	24	48	72	72
40	14	19	48	72	72
50	10	14	48	67	72
60	10	10	48	48	67
70	5	10	34	48	65
80	0	4	14	24	43
90	0	2	6	6	19
100	0	0	0	0	0

可以看出,电池在相同SOC条件下,温度越低,动力电池充电功率越小,在10%的SOC条件下,-20℃时充电功率仅为常温20℃充电功率的1/3,即-20℃条件下整车的充电时间约比常温20℃多2倍。

动力电池放电功率随温度变化而变化的情况见表2,在相同SOC条件下,温度越低,动力电池放电功率越小,在50%的SOC条件下,-20℃时放电功率仅为常温20℃放电功率的40%。例如,常温20℃续航里程250 km的整车,在-20℃温度条件下,续航里程不超过100 km。

电池管理系统主动限制低温放电功率,动力系统效率也会降低,直接影响整车动力经济性;主动限制低

表 2 动力电池放电功率随温度变化而变化的情况

温度 功率/kW SOC(%)	环境温度 (-20℃)	环境温度 (-10℃)	环境温度 (0℃)	环境温度 (10℃)	环境温度 (20℃)
10	8	19	24	29	60
20	19	36	43	60	77
30	29	55	60	62	115
40	43	55	62	62	120
50	48	72	86	86	120
60	48	72	86	86	120
70	48	72	86	86	120
80	48	72	86	86	120
90	48	72	86	86	120
100	48	72	86	86	120

温充电功率，直接影响整车快充时间。因此，研究低温下动力电池的快速加热方法，保证动力电池的温度显得极为重要。

2 电池加热技术综述

目前解决低温对锂离子动力电池影响的核心思想就是通过外界系统对电池进行加热，使其快速升温到适宜温度，通常分为外部加热和内部加热两种形式。外部加热常用到正温度系数（PTC）材料，通过传热实现电池升温；内部加热直接在电池内部产生热量，效率更高。

2.1 外部加热

外部加热技术目前相对成熟，通常可以与冷却系统进行集成，已大量应用在实际整车中，主要有 PTC 加热、加热膜加热和液体加热等方法。

2.1.1 PTC 加热技术

PTC 材料是一种电阻随温度升高而显著增大的材料，通常由钛酸钡等陶瓷材料制成，掺杂少量稀土元素以调节其电学性能。低温时，PTC 材料的晶格结构稳定，电阻较低，导电性良好；高温时，材料发生相变，晶格结构变化导致电阻急剧上升，导电性下降。PTC 加热方案，如图 5 所示。发热源为电阻元件，内置于 PTC 板内部，使用时，PTC 板贴于电池模组表面直接加热。但是不同散热条件使得 PTC 加热片的发热功率差别很大，同一 PTC 加热器，使用条件不同，功率可能相差几倍。

PTC 加热的微观工作机制可分为三种状态。

（1）低温状态（低电阻）。当温度较低时，PTC 材料中的载流子（电子或空穴）可以自由移动，电阻较小。通电后，电流通过 PTC 材料，产生焦耳热，材料开始

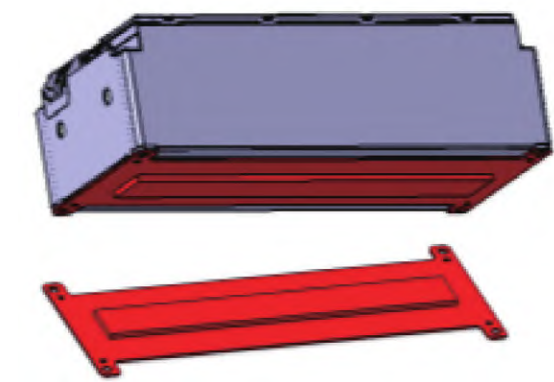


图 5 PTC 加热方案示意

发热。

（2）温度升高至临界点（电阻急剧上升）。当温度达到 PTC 材料的居里温度时，材料发生相变，晶格结构从铁电相转变为顺电相。这种相变导致载流子的迁移率大幅下降，电阻急剧上升。电阻增大后，电流减小，加热功率降低，从而实现自动控温。

（3）高温状态（高电阻）。当温度超过居里温度后，PTC 材料的电阻维持在较高水平，电流显著减小，加热功率降低，避免过热。

相关研究将 PTC 内置在铝合金板中，低温下热量从 PTC 传递到铝合金再传递到电池，通过改变 PTC 的位置实现所需加热效果；还有将 PTC 布置在底部，最大温差达到 7℃；另外一种采用直流电源加热 PTC，在低温 -40℃ 下约半小时，电池可升温至 0℃；姚宏义等研究了 PTC 加热对上汽某插电式混合动力车（PHEV）性能的影响，综合考虑能耗与加热效果，指出 PTC 最佳加热功率为 630W；张明等以奥迪 TFSI e 车系为例，阐述了 PTC 加热如何在汽车温度管理系统中工作；李豪等以 PTC 加热器为基础，设计了一套智能化热管理系统，该系统可充分利用系统余热，减少不必要的能源浪费；何煜等在基于 800 V 高电压平台成为电动汽车发展趋势的大环境下，指出在高压下，PTC 电加热器存在电压击穿的潜在风险。

PTC 加热的微观工作原理基于材料的电阻—温度特性，通过相变实现电阻的自动调节，从而达到加热和控温的目的。这种特性使其在电池加热系统中得到广泛应用。

PTC 加热具有以下优点：

（1）自调节性。电阻随温度变化自动调节加热功率，无需额外控制电路。

（2）安全性。温度过高时电阻增大，限制电流，

防止过热。

(3) 可靠性好。结构简单, 寿命长。但是其能耗较大, 是目前限制其进一步应用的条件之一。

2.1.2 膜加热技术

膜加热是以恒电阻金属丝为发热源, 涂敷由硅橡胶、玻璃纤维布等组成的绝缘层, 内置于加热膜中, 加热膜贴于电池模组表面直接加热, 其工作原理主要基于电热效应, 即通过电流在电阻材料中产生焦耳热来实现加热。膜加热的方案, 如图 6 所示。

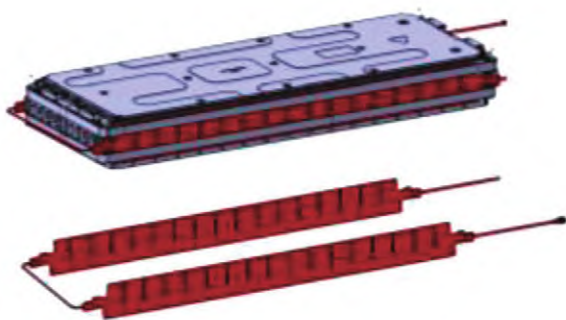


图 6 膜加热方案示意

可以看出, 电池加热膜通常由以下几层组成:

(1) 基材层。通常为柔性绝缘材料 (如聚酰亚胺), 用于支撑和绝缘。

(2) 发热层。由导电材料 (如碳基材料、金属合金或导电聚合物) 制成, 通电后产生热量。

(3) 保护层。覆盖在发热层表面, 起到绝缘和保护作用。

加热膜的微观加热过程可分为三步: 通电初期。电流通过发热层, 电子开始定向移动, 电子与晶格原子碰撞, 产生热量; 温度上升期, 热量通过热传导传递到电池表面, 电池温度逐渐升高; 温度稳定期, 当加热功率与电池散热达到平衡时, 温度稳定在设定范围内。

相关研究选用宽线加热膜进行实验, 结果表明, 该种材料可降低低温对电池放电性能的影响; 还有研究学者将加热带和液冷板充分融合, 该方式能在 10 min 内将电池温度从 -20°C 升高至 20°C , 实现对电池的高效加热; 其他方法有直接将加热膜贴于电池上进行加热, 研究了加热膜功率和不同布置方式对电池温升的影响, 得出加热功率越大, 加热时间越短、温差越大的结论; 黄恒等研究了加热膜的排布方式对电池包加热效果的影响, 探索一种最优的排布方式以优化加热膜的温度均匀性; 张祚铭等建立了动力电池低温加热仿真模型, 指出当加热膜在动力电池的侧面和底面同时布

置时, 其温度一致性和安全性效果最佳; 赵立禹等以方形磷酸铁锂电池组为研究对象, 设计了一套石墨烯加热膜控制系统, 该系统比传统 PTC 加热系统能耗降低了 30%; 还有学者建立了一套电池放电预测模型, 可实现加热效率最大化。

电池加热膜的微观工作原理基于电热效应, 通过电流在导电材料中产生焦耳热, 实现快速、均匀的加热。其柔性设计和高效加热特性使其在动力电池加热领域得到广泛应用。

膜加热具有以下优点:

(1) 高效加热。电能直接转化为热能, 效率高。

(2) 安全性高。加热膜温度分布均匀, 避免局部过热。

(3) 结构简单。易于集成到电池系统中。但是长期使用, 加热膜会面临老化, 成为其大规模应用的主要问题之一。

2.1.3 液体加热技术

液体加热技术属于对流加热技术的一种, 即借助于传热介质, 通常有空气和液体。空气加热技术指的是电热元件先加热空气, 再由空气与电池进行热交换, 将低温电池升温至所需温度。空气加热技术原理简单, 实现较容易, 但是能耗较大, 控制精度不高, 在极端环境中不适用。

相比于空气加热, 液体加热具有更好的热传导性能, 常以水或者冷却液作为传热介质。液体加热技术传热效率高、温度均匀性好, 实际应用范围更广。它的发热源为电池包外部 PTC (或电机余热、热泵等), 先由外部热源对循环液体加热, 再由循环液体将热量带至电池包内部, 通过水冷板对电池模组加热。其原理如图 7 所示。

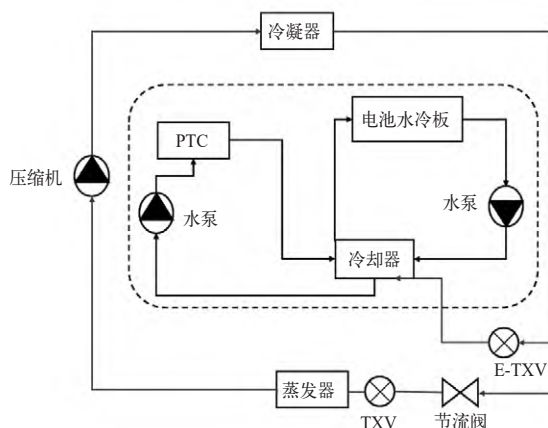


图 7 液体加热方案示意

液体加热的微观过程可分为四步：

(1) 液体加热。加热器对冷却液加热，液体分子动能增加，温度升高。

(2) 液体流动。循环泵驱动高温液体流向电池表面。

(3) 热量传递。高温液体与电池表面接触，热量通过热传导传递到电池，电池内部的热量通过热传导均匀分布。

(4) 液体冷却。液体释放热量后温度降低，流动回加热器重新加热。

霍宇涛等介绍了液体加热应用在动力电池低温加热技术的研究进展，并指出了液体加热存在的一些问题；陈萌等研究了不用液体介质对动力电池加热效果的影响，指出当以乙醇为基液一定浓度的纳米二氧化钛液体为介质时，加热性能显著提高；颜艺等利用有限元软件，模拟仿真不同的“U”形流道对加热效果的影响，结果表明，高低交错式“U”形流道效果更佳；崔巍等建立电池模组液体循环加热有限元模型，实验结果表明，采用蛇形加热板输入液体温度为 40℃、流速为 1 m/s 时，加热效果最好；李罡等设计了一种加热装置，电池在低温环境下可快速升温，升温速率最快可达到 0.57℃/min。

液体加热的微观工作机制基于液体的热传导和对流换热，通过液体的流动和热交换实现高效、均匀地加热。其高效加热和精确控温的特性使其在动力电池热管理中具有重要应用价值，主要有以下优点：(1) 加热效率高；(2) 由于液体具有较高比热容，保温效果较好；(3) 电池包温度一致性较好；(4) 适用于各种类型的电池。但是，液体加热也具有以下挑战：(1) 系统复杂，需要泵、管路、加热器等多个组件，增加了系统复杂性；(2) 能耗较高，液体循环和加热需要消耗能量；(3) 维护成本高，液体泄漏和管路堵塞可能增加维护成本。

2.2 内部加热

2.2.1 脉冲加热技术

脉冲加热是在低温条件下，系统产生脉冲电流流过电池内阻产生焦耳热，实现电池的快速升温。脉冲加热的原理如图 8 所示。在电驱动系统中，利用电机定子的电感特性，当电机定子有电流通过时，控制模块关断绝缘栅双极型晶体管 (IGBT)，电路回路中产生脉冲电流，该脉冲电流流过电池内阻时，产生焦耳热，从而实现低温下对电池的加热。

脉冲加热的微观加热过程可分为四步：

(1) 脉冲电流施加热。高频脉冲电流通过电池，电子和离子在电池内部快速移动，与晶格原子碰撞，

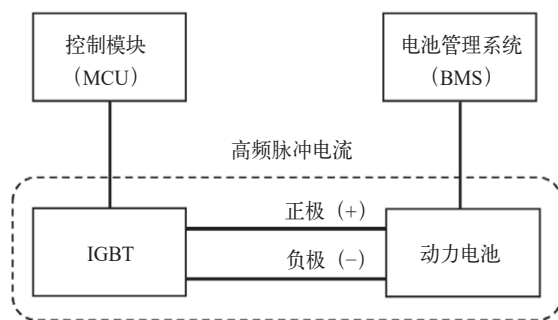


图 8 脉冲加热方案示意

产生热量。

(2) 内阻发热。电子与晶格原子碰撞，产生欧姆热；离子与溶剂分子碰撞，产生极化热；界面处的电荷转移阻抗产生界面热。

(3) 热量积累。热量在电池内部积累，温度逐渐升高。

(4) 温度均匀化。热量通过热传导在电池内部均匀分布，避免局部过热。

学者对脉冲加热方案、脉冲加热参数展开了相关研究。廉玉波等介绍了现有脉冲方案的优缺点以及不同脉冲参数对动力电池的影响；张冬冬等建立了三元锂电池的电化学热耦合模型，仿真分析脉冲加热下动力电池的电化学特性，指出低温下脉冲加热可以使动力电池达到较好的温度均匀性；有学者研究结果表明，脉冲电流频率越低，幅值越大，电池加热速率越快；另外一些学者提出利用电机定子的电感特性和电机控制器的开关特性，在动力电池中形成脉冲电流，该方法可使电池平均温升速率达到 2.88℃/min；吴晓刚等通过改变脉冲频率，可在 3 min 内将电池从 -25℃ 加热到 5℃，加热速度大为提高；另外还有学者提出一种交互脉冲加热策略，采用先对内测脉冲加热再对外侧脉冲加热的方法，可实现温度和 SOC 的一致性。

电池脉冲加热的微观工作原理基于脉冲电流在电池内阻中产生的焦耳热效应，通过欧姆内阻、极化内阻和界面阻抗的共同作用实现快速、均匀的加热。其高效、灵活的特点使其在低温环境下具有重要应用价值，具有以下优点：(1) 加热速度快，适用于低温环境下快速提升电池温度；(2) 控制灵活，通过调节脉冲参数（如频率、幅值和占空比）实现精确控温；(3) 安全性高，加热时间短，避免电池过充或过放。但是，脉冲加热也具有以下挑战：(1) 电池寿命影响；(2) 控制复杂度，需要精确控制脉冲参数以避免电池损伤；(3) 成本较高，需要高功率脉冲电源和复杂的控制电路。该技术处于

起步阶段,2022年长安、比亚迪等主流车企已开展脉冲加热技术相关的研究。目前搭载该技术的车型在市场中的占比还比较小,电池若长期处于脉冲加热情况下,面临电池的容量和内阻衰减的挑战,开展这方面的研究有助于该技术进一步应用。

3 电动汽车中的加热技术应用实例

3.1 不同加热技术的应用

得益于近几年电动汽车的高速发展,电池加热技术的应用得到快速发展。电池脉冲加热技术、PTC加热技术、液体加热技术等被各大汽车公司实际应用于汽车动力电池中。深蓝汽车为应对低温环境下的动力电池充放电效率,研发了应对全天气候的微核高频脉冲加热技术,该技术可以在-30℃超低温环境下,动力性能提升50%以上,低温充电时间缩短15%以上;比亚迪汽车在低温预热技术方面,通过脉冲加热来提高动力电池温度,实现了-30℃的极寒条件下,让电池加热速率较传统方案提升230%,电池充满时间降低30%;特斯拉在Model S、Model 3和Model Y等车型上广泛使用PTC电池加热技术,以提升动力电池在超低温环境下的充/放电性能;长城汽车、吉利汽车和宁德时代等均在动力电池领域使了PTC加热、脉冲加热等电池加热技术。

某PHEV车型动力电池采用液冷加热技术和PTC加热技术进行对比应用研究,结果见表3,从电池温升和充放电功率的提升来看,使用液体加热技术要优于PTC加热技术,见表4。

表3 两种加热的电池温升效果对比

目标温度/℃	液体加热		PTC加热	
	发动机冷却液温升所用时间/min	630W温升所用时间/min	发动机冷却液温升所用时间/min	630W温升所用时间/min
-5	17	20	27	32
0	15	17	22	39
5	18	22	26	49
10	22	28	30	无法达到
15	26	35	34	无法达到

3.2 不同加热技术与电池尺寸类型的适配

电池的尺寸和外型对加热方案的选择有重要影响,不同形状和尺寸的电池需要适配不同的加热方式,以确保加热效率、均匀性和安全性。以下是针对不同电池尺寸和外型的加热方案推荐。

表4 两种加热充电功率提升限制

目标功率/kW	液体加热		PTC加热	
	发动机冷却液温升所用时间/min	630W温升所用时间/min	发动机冷却液温升所用时间/min	630W温升所用时间/min
10	14	16	12	19
20	21	23	19	49
30	25	29	22	无法达到
50	31	40	31	无法达到

(1) 圆柱形电池

圆柱形电池的特点是单体尺寸较小,通常成组使用,表面积相对较小,热传导路径较短。这种电池一般可选用加热膜技术和液体加热技术。加热膜技术在电池组外围包裹加热膜,利用其柔性特点贴合圆柱形表面,其加热均匀,安装方便;液体加热是在电池组外围设计液体流道,通过冷却液循环加热,其加热效率高。

(2) 方形电池

方形电池的特点是单体尺寸较大,表面积较大,热传导路径较长,需要均匀加热。这种电池一般可选用PTC加热技术、加热膜技术和液体加热技术。PTC加热技术是在电池组内部或表面安装PTC加热片,利用其自调节特性加热,其安全性高,控温精确;加热膜技术是在电池表面贴附加热膜,覆盖大面积区域,其加热均匀,响应速度快;液体加热技术是在电池组内部设计液体流道,通过冷却液循环加热,其适合大容量电池组,加热效率高。

(3) 软包电池

软包电池的特点是厚度较薄,表面积大,热传导路径短,但对加热均匀性要求高。这种电池一般可选用加热膜技术和液体加热技术。加热膜技术是在软包电池表面贴附柔性加热膜,确保加热均匀,其贴合性好,加热均匀;液体加热技术是在软包电池组之间设计液体流道,通过冷却液循环加热,其适合大规模电池组,加热效率高。

(4) 大尺寸电池

大尺寸电池的特点是单体尺寸大,热容量大,需要高效、均匀的加热方案。这种电池一般可选用PTC加热技术和液体加热技术。PTC加热技术是在电池内部或表面安装PTC加热片,利用其自调节特性加热,其安全性高,控温精确;液体加热技术是在大尺寸电池内部设计液体流道,通过冷却液循环加热,其加热效率高,适合大容量电池。

(5) 异形电池

异形电池的特点是形状不规则,热传导路径复杂,

需要定制化加热方案。这种电池一般可选用加热膜加热技术和液体加热技术。加热膜加热技术可以根据电池形状定制柔性加热膜，确保贴合表面，其适应性强，加热均匀；液体加热技术可以根据电池形状设计定制化液体流道，通过冷却液循环加热，其加热效率高，适合复杂形状。

综上所述，在实际应用中，选择加热方案时，需要综合考虑电池的尺寸和外形，同时还需要考虑加热效率、加热均匀性和成本等因素。

4 结语

本文探究了在低温环境下锂离子动力电池的低温特性以及电池的低温保护策略。通过对比 PTC 加热、加热膜加热、液体加热和脉冲加热四种常见的电池加热方案，脉冲加热以其加热速率高、温均性好和系统结构简单等优势，更适用解决锂离子动力电池在低温环境下的性能衰减问题。

对于电动汽车应用而言，低温快速加热方法的研究仍处于初级阶段。低温环境下如何高效、安全地加热电池仍充满挑战。

新能源汽车动力电池低温加热技术未来在以下方面需进一步探索：

(1) 多种低温加热技术的集成运用。目前常用的低温加热均为单一方式，未来可以将多种加热技术集成运用，提高动力电池的综合加热性能。

(2) 开发新型加热材料。现有的加热材料在一定程度上限制了动力电池的加热速率和能量转换效率。开发、研究传热效率更好、更耐高压的材料，是突破动力电池低温加热技术瓶颈方向之一。

(3) 延长锂离子动力电池的使用寿命。锂离子动力电池在长时间循环使用后性能会衰减，如何延长锂离子动力电池的使用寿命，降低低温加热的成本，是未来技术探索的另一个方向。

(4) 智能化控温。随着大数据、人工智能的快速发展，实现精确、快速、智能控温是动力电池低温加热技术的必然方向发展。

(5) 环境友好型。锂离子动力电池生命周期结束后，如何高效回收和利用其中的贵金属，最大限度地减少环境污染，是绿色生态发展的必然要求。

参考文献

[1] 马广青，熊飞，朱林培. 低温加热策略对动力电池

快充时间影响分析[J]. 汽车实用技术，2020(12): 1-3, 6.

[2] 杨俊源，宋伟，叶进，等. 低温对纯电动汽车动力电池系统性能的影响分析[J]. 上海汽车，2020, 354(2): 7-9.

[3] JIN X, LI J, ZHANG C, et al. Researches on modeling and experiment of Li-ion battery PTC self-heating in electric vehicles[J]. Energy Procedia, 2016(104): 62-67.

[4] ZHANG J, SUN F, WANG Z. Heating character of a LiMn₂O₄ battery pack at low temperature based on PTC and metallic resistance material[J]. Energy Procedia, 2017, (105): 2131-2138.

[5] JUNQIU LI, PUEN WU, HELEI TIAN. Researches on heating low-temperature lithium-ion power battery in electric vehicles [J]. 2014 IEEE Conference and Expo Transportation Electrification Asia-Pacific (ITEC Asia-Pacific), 2014:1-6.

[6] 姚宏义，陈娅琪，李杨，等. 某 PHEV 动力电池的行车加热特性研究[J]. 公路交通科技，2023: 218-226.

[7] 张明. 奥迪 TFSI e 车系空调和温度管理系统技术剖析（上）[J]. 汽车维修技师，2024(13): 24-29.

[8] 李豪. 基于热泵空调的增程式汽车集成式热管理系统研究[D]. 重庆理工大学，2024.

[9] 何煜，张薇，汪琳琳. 电车电加热技术路线综述及潜力分析[J]. 汽车实用技术，2023, 48(12): 35-38.

[10] LEI Z, ZHANG C, LI J, et al. Preheating method of lithium-ion batteries in an electric vehicle[J]. Journal of Modern Power Systems and Clean Energy, 2015(3): 289-296.

[11] XIE J, LUO Y, ZHANG G, et al. Compact design of integrated battery thermal management systems enabled by bi-functional heating-cooling plates and temperature-equalizing strategy[J]. Renewable Energy, 2024(222): 119909.

[12] YANG W, ZHOU F, LIU Y, et al. Preheating performance by heating film for the safe application of cylindrical lithium-ion battery at low temperature[J]. Fire Technology, 2023, 59(3): 1115-1135.

[13] 黄恒，李洋，黄正，等. 基于双向加热膜的软包电池低温热管理研究[J]. 工程热物理学报，2023,

- 44(12): 3332-3340.
- [14] 张祚铭, 李强伟, 张正杰, 等. 电动汽车用锂离子动力电池模组低温加热仿真研究[J]. 计算机仿真, 2021, 38(5): 85-89.
- [15] 赵立禹, 孙桓五, 刘世闯, 等. 重卡辅助动力电池加热系统能耗对比及优化[J]. 储能科学与技术, 2023, 12(4): 1139.
- [16] HUANG D, CHEN Z, ZHOU S. Model prediction-based battery-powered heating method for series-connected lithium-ion battery pack working at extremely cold temperatures[J]. Energy, 2021, 216: 119236.
- [17] 霍宇涛, 饶中浩, 刘新健, 等. 基于液体介质的电动汽车动力电池热管理研究进展[J]. 新能源进展, 2014, 2(2): 135-140.
- [18] 陈萌, 罗鑫浩. 纯电动汽车动力电池脉动热管加热技术的试验[J]. 江苏大学学报: 自然科学版, 2023, 44(3): 276-282.
- [19] 颜艺, 罗玉涛. 液体接触式电池热管理系统流道设计流速优化[J]. 电源技术, 2019, 43(11): 5.
- [20] 崔巍, 崔瑞军, 李渊, 等. 基于液体循环的动力电池低温加热方法研究[J]. 当代化工研究, 2024(10).
- [21] 李罡, 黄向东. 液冷动力电池低温加热系统设计研究[J]. 湖南大学学报(自然科学版), 2017, 44(2): 26-33.
- [22] 廉玉波, 凌和平, 马晴婵, 等. 电动汽车锂离子动力电池脉冲加热技术研究进展[J]. 汽车工程, 2023, 45(2): 169-174.
- [23] 张冬冬, 文华, 欧阳宏伟. 基于电化学-热耦合模型的电池低温脉冲加热[J]. 储能科学与技术, 2022, 11(12): 3957-3964.
- [24] QIN Y D, XU Z C, WU Y Q, et al. Temperature distribution of lithium ion battery module with inconsistent cells under pulsed heating method [J]. Applied Thermal Engineering, 2022(212): 118529.
- [25] DU C H, PENG Q L, CHEN F, et al. Investigation on the method of battery self-heating using motor pulse current [J]. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part D: Journal of Automobile Engineering, 2022, 236 (10-11): 2399-2409.
- [26] 吴晓刚, 李凌任, 高鑫家, 等. 锂离子动力电池脉冲频率优化的低温预热[J]. 电机与控制学报, 2021, 25 (11): 57-65.
- [27] VU H, SHIN D H, et al. Scheduled preheating of Li-ion battery packs for balanced temperature and state-of-charge distribution [J]. Energies, 2020, 13 (9): 2212.