

特约专栏

电动工具用锂离子电池正极材料的研究进展

冯 力, 沈晓彦, 黄金健, 张正淳

(江苏海四达电源股份有限公司, 江苏 启东 226200)

摘 要: 中国是世界上最重要的电动工具制造基地之一, 也是主要的动力电池研发和生产国家。锂离子电池具有充放电倍率高、温度适应性宽、循环寿命长、无记忆效应、比功率/比能量高和性价比高等优点, 正在全面取代 NiCd、NiH 等传统电池, 成为非插电式电动工具的新型动力。介绍了电动工具用锂离子电池的电化学性能和发展现状, 比较了不同正极材料 (三元 NMC, 磷酸铁锂 LFP 以及锰酸锂 LMO 等) 对锂离子电池充放电性能的影响, 讨论了电动工具用锂离子电池在不同温度下的倍率充放电、大功率和高倍率下的脉冲放电、快速充放电循环寿命、高温自放电稳定性以及电池在短路滥用条件下的安全性。

关键词: 锂离子动力电池; 电动工具; 放电容量; 倍率循环性能; 三元 NMC; 磷酸铁锂 LFP; 锰酸锂 LMO

中图分类号: TM912 文献标识码: A 文章编号: 1674-3962(2016)07-0537-07

Advances in Cathode Materials of Lithium-Ion Battery for Electric Vehicles

FENG Li, SHEN Xiaoyan, HUANG Jinjian, ZHANG Zhengchun

(Jiangsu Highstar Battery Manufactory Co., Ltd., Qidong 226200, China)

Abstract: China is one of the most important manufacturing bases for electric vehicles around the world, as well as the main country of research and production of rechargeable batteries. Lithium-ion battery has a high charge/discharge rate, wide temperature adaptability, long cycle life, no memory effect, high power/energy density, as well as cost advantages. Instead of traditional batteries (NiCd, NiH), Lithium-ion battery is becoming the new power for non-plug-in electric vehicles. The electrochemical performances and developments of lithium-ion batteries are discussed, and influences of different cathode materials (NMC, LiFePO₄ and LiMn₂O₄) on the charge/discharge performances of lithium-ion batteries are compared. Electrochemical performances of lithium-ion batteries under different temperatures are discussed, including discharge capability, high-power pulse discharge performance under high magnification, fast charge/discharge cycles life, high temperature stability of self-discharge, as well as safety of the battery under short-circuit conditions.

Key words : Lithium-ion battery; electric vehicles; discharge capacity; cycle performances; NMC; LFP; LMO

1 前 言

中国是世界电动工具最重要的制造基地 (便携式

电动工具、园林工具和吸尘器等), 全球 80% 以上的充电式电动工具由中国制造并销往全球^[1-4]。为电动工具提供电源的动力电池主要有镍镉、镍氢和锂离子电池。随着人们对环境保护的日益重视, 带来重金属污染镍镉电池受到越来越多的限制。我国要求到 2015 年电池行业耗镉量下降 70%, 鼓励发展镍氢电池和锂离子电池^[5]。锂离子电池性能优异, 不仅高倍率放电循环寿命长、无记忆效应、无污染、比功率/能量

收稿日期: 2015-10-22

第一作者: 冯 力, 男, 1961 年生, 副总工程师, Email: fengl@highstar.net.cn

DOI: 10.7502/j.issn.1674-3962.2016.07.08

高,还具有优越的性价比,在电动工具行业具有广阔的应用前景^[6]。

电动工具用锂离子电池的基本要求主要有如下几点^[1,5]:一是安全可靠,误用时不发生着火爆炸;二电池内阻应尽量小,在很宽的环境温度范围内,能在高倍率(5C 以上)放出足够的能量或功率;三是有较高的能量密度和可接受的使用寿命;四是与其他类型二次电池相比具有较好的性价比。锂离子电池(三元材料正极)标准电压在 3.6~3.7 V,是镍镉、镍氢电池的 3 倍,同体积的锂离子电池明显更轻,重量和体积比能量至少高于其它电池 3 倍以上。

目前一些著名电动工具制造商主要采用日系(三洋、索尼等)或韩系(三星、LG 等)动力锂离子电池作为配套电源。国内电动工具用锂离子主要生产厂家包括新能源、力神、比克、海四达以及天鹏等。预计未来 5 年电动工具用锂离子电池的年需求增长率将达到 10~15%^[2,4]。

同其它用途的锂离子电池一样,动力电池的负极普遍采用比较成熟的改性石墨碳材料(人造、天然和复合型等)。随着使用目的不同,材料粉末的加工改性、晶粒粒度大小、粒径分布等性质也有所不同。正极材料主要有层状结构的三元镍钴锰酸锂(NMC)($\text{Li}(\text{Ni}_x\text{Co}_y\text{Mn}_z)\text{O}_2$)、橄榄石结构的磷酸亚铁锂(LFP)(LiFePO_4),以及尖晶石结构的锰酸锂(LiMn_2O_4)(LMO)^[6-7]。从性能上看,三元 NMC 材料比容量最高,倍率放电以及循环性能不错,电池安全性和成本较其他两者差一点。LFP 安全性最好,循环寿命特别长(尤其常温),环境非常友好;缺点是导电性差和锂离子扩散慢导致电池低温性能不如意,电压平台低引起比能量低。LMO 安全性好、电压平台高、放电倍率和低温性能都不错;但高温结构稳定性较差,特别是在 LiPF_6 电解液环境条件下,电池的自放电或循环寿命不如其它两者好。目前,电动工具用锂离子电池一般采用圆柱型尺寸 14500、18650、22430、22650、26650 和 26700,其中 18650 型使用非常广泛,显示出较好的性能一致性、较高的能量密度等综合应用特性。目前市场上电池的正极材料主要以三元 NMC 材料为主。分隔正负极的隔膜基本上使用常用的三层 PP/PE/PP 或单层 PP 聚合物薄膜,具有较低的 Li^+ 离子传输阻力,较好的热稳定和机械强度等。此外,电池中使用的有机溶剂电解液必须具有较好的导电率和高热稳定性。电动工具用圆柱形锂离子电池的盖帽兼有安全保护功能

装置。特别是电池内部温度增加产生高压时,保护系统(CID)会断开盖帽正极,达到阻止电池继续充电或放电行为^[7]。

江苏海四达电源股份有限公司早在 2001 年就开始了电动工具用锂离子动力电池的研究和开发^[1-2]。针对各种充电式电动工具对电池性能的特殊要求,先后成功地开发出不同电池容量和形状的圆柱型锂离子动力电池。特别是圆柱型 18650 型 1300 mAh、1500 mAh、2000 mAh、2200 mAh 以及 2500 mAh 等锂离子动力电池,已广泛应用在电动工具、园林工具和真空吸尘器上。最近 2000~2500 mAh 大容量电池的开发应用已迅速拓展了电动工具市场。

2 电动工具用锂离子动力电池的电化学性能

2.1 室温倍率放电

动力电池一般要求至少 5C 的倍率放电,电动工具启动或持续工作时常需要更大的倍率放电或输入功率。图 1 是圆柱型 18650 型动力电池的倍率放电曲线。图 1a 中可看出三元 NMC 1500 mAh 电池放电电流从 1.5 A (1C)增加到 20 A(约 13C)时,电池的放电容量相差不大(<4%),显示出典型的大倍率放电特性。这与电池的内阻低、电压降小有关,同时温度适当增加也有利于改善电池整体阻抗。30 A 电流(15C 倍率)下放出的容量可达到 85%。显示出很好的电动工具用锂离子电池的大电流放电行为^[7]。大容量三元 NMC 2 000 mAh 电池倍率放电曲线见图 1b, 10C (20 A)倍率基本上可放出 100%的容量^[8]。非常适合作为高功率、高容量的电动工具用电池。不同正极活性材料电池的放电电压示于图 1c,混合(50% LMO + 50% NMC)正极比纯 NMC 正极材料显示稍微高一点的工作电压平台。LFP 正极活性材料具有最低的电池工作电压,只有 3.25 V 左右。相应能量也比前者低。目前,较高容量或能量的动力锂离子电池基本上采用三元 NMC、NCA($\text{Li}(\text{Ni}_x\text{Co}_y\text{Al}_z)\text{O}_2$)和加入少量尖晶石 LMO 的混合正极材料。

2.2 高温和低温倍率放电

图 2a 显示了正极材料为 NMC 的锂离子电池(电池额定容量是 1 500 mAh)在 15 A、不同温度环境下的放电电压与容量关系,以及 -40 °C 下的 5 A 放电曲线。高温下(以 55 °C 为例),由于电池导电性改善,阻抗降低,15 A(即 10C)下电池放出的容量与常温(23 °C)

下的 15 A (即 10C) 放电容量相比无明显差异。相反低温 -30 °C 时, 15 A 放电容量相对减少, 为 92% 左右。低温 -40 °C 时, 5 A 放电容量也可达额定容量的 70% 以上, 体现出较宽温度范围的放电能力。图 2b 为 LFP 电池(电池额定容量为 1 500 mAh)在不同温度条件下

的 10 A 放电曲线。-20 °C 的 10 A 放电电压拐点已在 2.2 V, 相应容量只有 70% 左右, 温度适应性较 NMC 锂离子电池(图 2a 中)要明显更差, 这主要与 LFP 材料固有的高电阻性有关。但在高温(55 °C)时两种正极材料电池受到的影响, 差别相对较小。

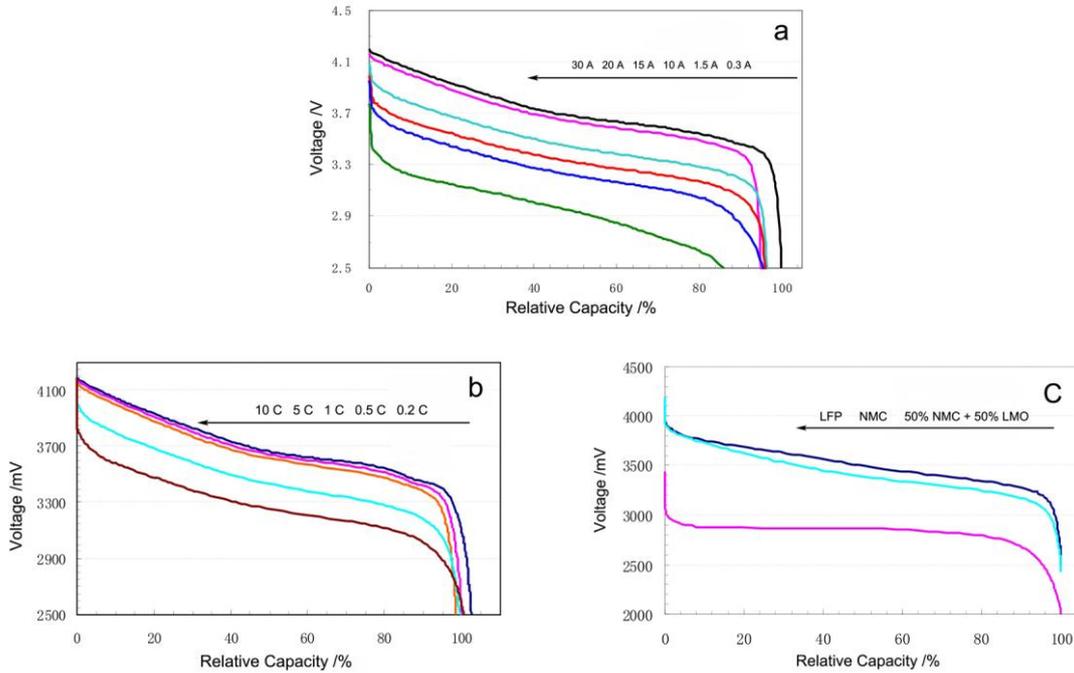


图 1 常温下, (a) 三元 NMC 18650 型 1500 mAh^[7]和 (b) 2 000 mAh 锂离子电池^[8]的倍率放电曲线, (c) 不同正极材料电池在 10 A 的放电曲线^[8]
 Fig. 1 Discharge curves at different current rates of (a)NMC 18650 type 1 500 mAh^[7] and (b)2 000 mAh cells^[8], as well as (c) discharge curves of three different cathodes at 10 A at room temperature^[8]

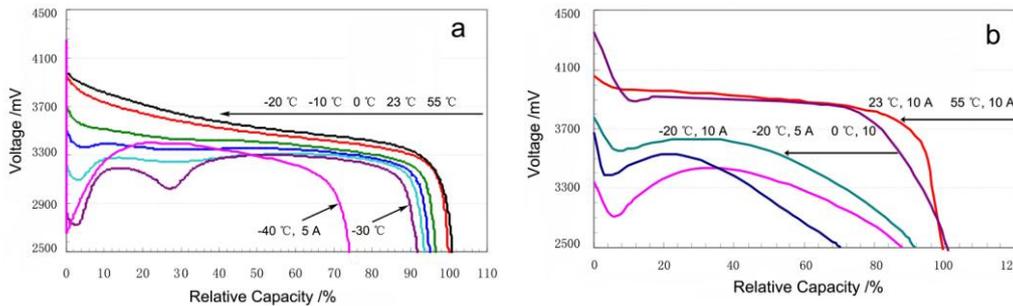


图 2 锂离子电池不同温度下放电特性, (a) 三元 NMC 18650 型 1 500 mAh 电池在 15 A 下放电, (b) 以及 LFP 18650 型 1 500 mAh 电池在 10 A/5 A 下的放电曲线
 Fig. 2 Discharge curves at different temperatures for (a) 18650 type 1 500 mAh with NMC cathode at 15 A, and (b) 18650 type 1 500 mAh with LFP cathode at 10 A/5 A

2.3 倍率循环性能

随着电动工具应用市场的拓展, 电池的能量和功

率需要不断增加。目前较广泛使用的 18650 型锂离子电池的容量主要有 1 500 mAh 和 2 000 mAh 两种类型,

部分 2 200~2 500 mAh 电池已在大功率高容量电动工具、吸尘器和园林工具中使用。2 500 mAh 电池的生产受到正极材料——高比容量 $\text{LiNi}_x\text{Co}_y\text{Al}_z\text{O}_2$ (NCA) 的量产限制, 这一现象在国内尤为突出。图 3a 为三元 NMC 锂离子电池 2 000 mAh 在高温 55 °C、低温 0 °C 以及常温 23 °C 条件下, 大电流 10 A 和 20 A 下的充放电的循环容量曲线^[9]。低温下, 电池阻抗增加、充电速率变慢、电极表面析出金属锂的可能性增加, 严重影响了电池的循环寿命。相反, 高温对电池性能的影响相对较小。常温下电池的循环寿命最好, 20 A 循环 300 次后剩余容量保持在 80% 左右, 满足国内外著名电动工具厂商的要求。图 3b 为高容量、中倍率 18650 型 2 500 mAh 动力锂离子电池的不同放电循环寿命特性。正极采用高比容量 NCA 材料的电池, 在 15 A 充放电循环 300 次后, 电池剩余能量还保持在 85% 以上; 与 15 A 的性能相比, 10 A 下的放电循环容量衰减更慢。

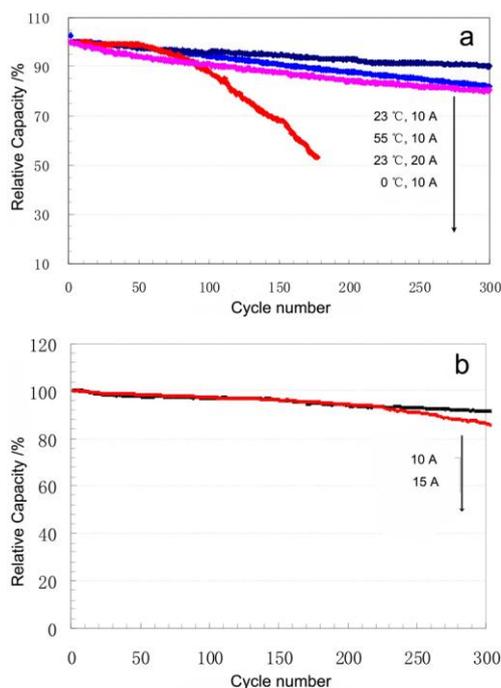


图 3 (a) 三元 NMC 18650 型 2 000 mAh 和 (b) NCA 18650 型 2 500 mAh 锂离子电池在不同温度和放电电流下的循环曲线

Fig. 3 Cycling performances at different discharge currents and temperatures of (a) NMC 18650 type 2 000 mAh and (b) NCA 18650 type 2 500 mAh cells

2.4 过充放电循环及其直流阻抗

锂离子电池(如三元正极)的工作电压一般在

2.0~4.2 V 时, 电池正负极材料显示出较稳定的化学和电化学氧化还原可逆行为。然而, 在放电状态过低(例如 0.5 V)时, 负极的铜箔基片容易被氧化而溶解, 并且电极上可能发生一些其它副反应; 充电状态过高时, 有可能引起正极活性材料的分解。以上两种情况都会不同程度地导致电池充放电效率降低, 循环寿命缩短^[10]。特别是电动工具用电池常常进行大电流放电, 在接近完全放电时, 电池电压下降得非常快, 不可避免地会引起电池偶然过放电。

图 4a 为三元 NMC 18650 型 1 500 mAh 电池在不同低电压和高电压的截止条件下, 1C 充电、10 A 放电的循环性能。与截止电压在 0.5 V 相比, 截止电压在 2.0 V/2.5 V 时, 电池的放电容量衰减明显更小。在过低的电压下(0.5 V)循环 200 次后, 电池的容量保持率为 80% 左右。当电池过度充电到 4.3 V 时, 有可能因加快了 NMC 正极的氧化速度, 导致电池容量在循环到一定程度后明显下降^[10]。

图 4b 揭示了电池在不同截止电压下循环时, 直流阻抗的变化。随着充放电循环次数增加, 直流阻抗相应增大。循环 250 次后, 在 2.0 V 截止放电的满荷电池, 其阻抗只增加了 3 mΩ 左右, 在 0.5 V 截止放电的直流阻抗却增大了约 11 mΩ。在低截止电压进行循环, 确实严重影响了充放电过程中电极表面的稳定性。此外, 电池处于满荷电状态时的阻抗比处在半电态时的阻抗大。

2.5 大电流脉冲放电

动力电池也常以脉冲放电形式的向电动工具提供动力, 而脉冲电流的变化有时高达 100 倍, 图 5a 为三元 NMC 18650 型 1 500 mAh 动力电池脉冲放电至 2.0 V 时的容量和相应脉冲电压。每次脉冲放电功率、脉冲持续时间以及时间间隔为 75 W/2 s + 60 W/20 s + 5 s。尽管每次脉冲功率和时间不变, 但脉冲电流不同, 相同时间下每次脉冲放出的容量不等。在放电电压 3.0 V 附近, 单一脉冲容量变化最大^[10]。整个脉冲容量曲线与时间不呈线性关系。

模拟实际情况的大电流强力脉冲放电行为见图 5b。电流变化从 2.5 A/3 s 逐步增至 100 A/5 s, 截止电压为 0.5 V。电池为 NMC 正极材料的圆柱形 18650 型 1 500 mAh。可以看出设计的这种结构电池基本上能承受 100 A 脉冲放电电流(约 67C 倍率), 很好地满足多数电动工具瞬间功率的要求。

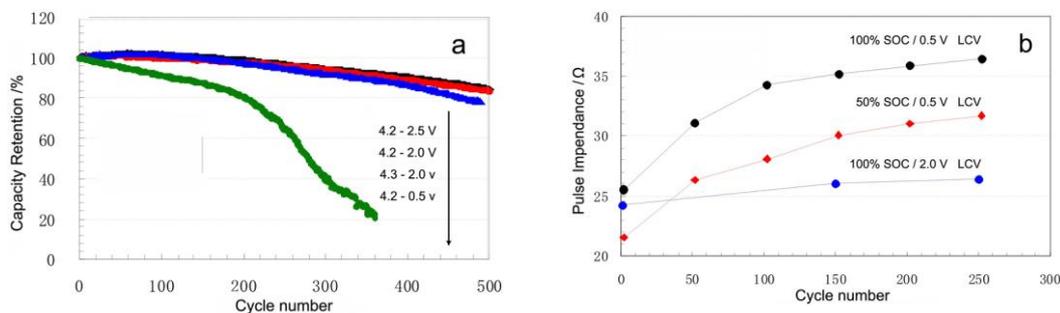


图 4 常温下 (a) 三元 NMC 18650 型 1 500 mAh 锂离子电池在不同充放电截止电压、10 A 下的放电循环特性, (b) 及其过程中的直流阻抗变化

Fig. 4 Cycling performances of (a) NMC 18650 type 1 500 cell at over charge/discharge conditions, as well as (b) DC impedance during cycling at room temperature at 10 A

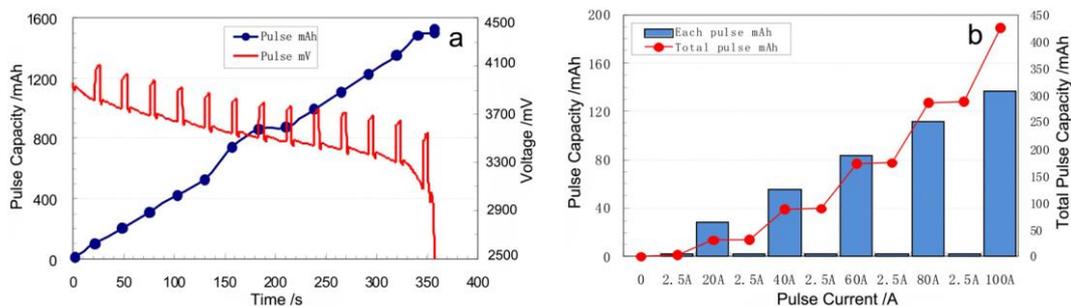


图 5 常温下 (a) 三元 NMC 18650 型 1 500mAh 锂离子电池的功率放电曲线 (75 W/2 s+60 W/20 s+5 s), (b) 大电流脉冲放电曲线 (2.5 A/3 s+20 A/5 s+2.5 A/3 s+40 A/5 s+2.5 A/3 s+60 A/5 s+2.5 A/3 s+80 A/5 s+100 A/5 s)

Fig. 4 Pulse discharge curves of NMC 18650 type 1 500 mAh cells at room temperature, (a) multistep power discharge (75 W/2 s+60 W/20 s+5 s) at 4.2~2.0 V and (b) stress current discharge ((2.5 A/3 s+20 A/5 s+2.5 A/3 s+40 A/5 s+2.5 A/3 s+60 A/5 s+2.5 A/3 s+80 A/5 s+100 A/5 s) at 4.2~0.5 V)

2.6 快速充电

较容量型或一般动力电池, 电动工具用锂离子电池的充电速度快。这与锂离子电池设计、内阻以及电极材料的组成配方等有关。图 6a 显示了三元 NMC 18650 型 1 500 mAh 电池不同倍率下充电电压与容量的关系。恒定 1C、2C 和 4C 充电到 4.2 V, 所需时间和相应充电容量分别为 56 min 和 94.2%; 27 min 和 90.5%; 13 min 和 85.5%。大倍率 4C 的恒流充电到 4.2 V 的充电容量 (额定容量为 100%) 比 1C 的恒流充电到 4.2 V 的充电容量要低约 5~10%, 保持了 85% 以上的充电容量。

图 6b 比较了三元 NMC 18650 型 2 000 mAh 和 NCA 18650 型 2 500 mAh 电池的 2C 倍率充电电压和容量变化。随着电池充电容量的增加, 充电达到 90% 额定容量所需的时间分别为 27.1 和 27.4 min, 体现了较好倍率充电性能。这种较小的充电时间差别除了与电极材料本身性质有关外, 也与电池的合理电极设计有一定关系, 特别是合理的电极设计有利于减小电极阻抗。

2.7 高温存储及其自放电

大电流放电时, 电池内阻会产生较高的温度, 容易引起电解液分解或与电极材料发生化学反应等, 最

终影响电池容量和循环寿命。因此动力电池, 尤其是作为电动工具类的动力电源, 必须具有很好的抗高温老化或自放电性质。目前动力锂离子电池使用的正极材料中, 三元正极材料和 LFP 比尖晶石 LMO 材料的高温热稳定性明显更好^[18]。

三元 NMC 18650 型 1 500 mAh 锂离子动力电池在 40 或 60 °C 烘箱里搁置 1 或 3 个月后, 电压变化、电阻变化、容量保持率和容量恢复率总结于表 1 中。电池额定容量测试为常温下 1C 放电至 2.0 V 时的容量。可看出高温 60 °C 储存 1 个月后, 电池的电压下降、电阻增加, 电压变化、电阻变化、容量保持率以及恢复率分别为 2.9%、18%、88% 和 98%, 3 个月后分别改变为 4.6%、27.4%、76% 和 93%, 第一个月电池的高温自放电速率明显较快。电池在 40 °C 运输状态 (即 41% 容量, 100% 的容量为电池的额定容量即 1C 放电至 2.0 V 时的容量) 搁置 1 到 6 个月的自放电行为比在 60 °C 的行为要好得多。这种电池具有相当好的抗高温老化特征。

有时也采用热循环试验来揭示锂离子电池抗环境温度变化能力。表 2 指出以上电池在 -4 °C 和 90 °C 之间

经过 82 h 循环后,电压、电阻以及重量的变化。每次循环电池在高温一般停留 1~4 h,升降速度在 1~2 h。循环

结束后电池常温下的电阻增量在 20% 以内,热失重小于 0.1%,电压降在 20% 左右。表现了较好的耐热循环性能。

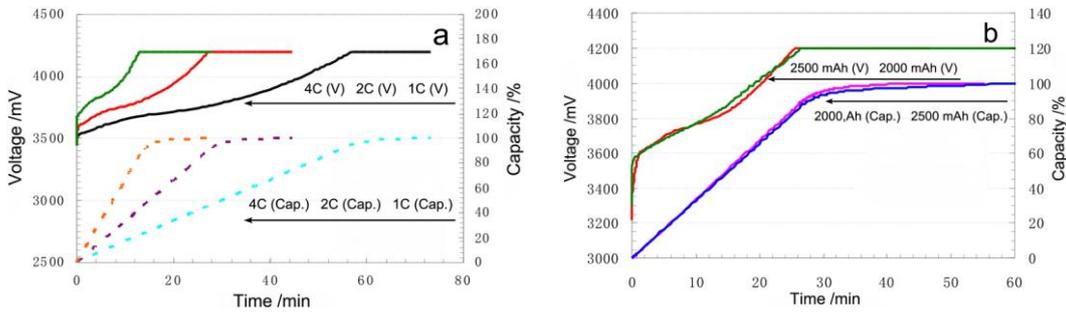


图 6 常温下 18650 型锂离子动力电池的倍率充电特性, (a)NMC 1 500 mAh 电池在 1C、2C 和 4C 倍率下的充电曲线, (b)NMC 2 000 mAh 和 NCA 2 500 mAh 电池的 2C 倍率充电曲线

Fig. 6 Charge performances of 18650 type cells at room temperature, (a) NMC 1 500 mAh cell at 1C, 2C and 4C, (b) NMC 2 000 mAh and NCA 2 500 mAh cells at 2C

表 1 不同温度和时间储存后, 18650 型 1 500 mAh 锂离子电池的电压、电阻以及容量变化

Table 1 Change of voltage, resistance and capacity of 18650 type 1 500 mAh Li-ion cells after storage at different temperatures and months

Test conditions	Before storage			After storage			
	OCV (mV)	ACZ (mΩ)	SOC (%)	Voltage (%)	AC Z growth (%)	Cap. Retention (%)	Cap. Recovery (%)
1-mon at 40 °C	3666	14.4	41	0.3	2.3	39	100
6-mon at 40 °C	3665	14.6	41	4.4	23.0	16	94
1-mon at 60 °C	4184	13.7	100	2.9	18.0	88	98
3-mon at 60 °C	4182	14.1	100	4.6	27.4	76	93

表 2 三元 NMC 1 500 mAh 锂离子电池的热循环变化

Table 2 Thermal cycle behaviors of MNC 1 500 mAh Li-ion cell

Before thermal cycle			After thermal cycle		
OCV (mV)	AC Z (mΩ)	Weight (g)	OCV drop (%)	AC Z Growth (%)	Weight loss (g)
4184	13.7	41.9	2.9	19.4	0.01

*OCV 表示电压, ACZ 表示电阻, SOC 表示荷电量

3 安全短路测试

国际上圆柱型锂离子动力电池的安全评估标准主要有 UL1642 (美国)、IEC62133(欧洲)、PSE(日本)以及运输安全标准 UN38.3。尽管使用不同的版本,绝大部分测试项目还是相同的,主要包括电池过充、短路、重物冲击、挤压、高温热循环、抗负压、针刺以及高频振动等。18650 圆柱型动力电池的安全性不仅与电池电极材料、电解液和隔膜性质有关,电池外壳和盖帽的结构设计也非常的重要。通过这些非正常工作条件试验,电池不会起火爆炸或发生明显的液体泄

漏事故。

常温下 18650 型 2 200 mAh 单支电池 (5 mΩ) 和 5 个串联电池组 (80 mΩ) 的外短路试验结果总结于表 3 中。电池正极为活性三元 NMC 材料。从表中电池最大电流、表面温度和随后的解剖结果可知,单支电池 (5 mΩ) 的安全短路机理是短路产生的大电流熔断正极极耳;而电池组 (80 mΩ) 的短路机理是电池内部电解液热分解或汽化产生的高压冲开盖帽安全阀,阻止了电池继续短路放电。对于电池组安全短路机理,两种试验都是通过各自的保护机制进行保护,阻止了电池进一步短路放电。电池组的电压较高,短路时流

过电池的电流较大, 正极极耳容易过热而被溶化。不同的电池结构设计, 会带来不同的安全短路机理。

表 3 18650 型 1 500 mAh 锂离子动力电池单只电池和电池组的短路试验
Table 3 Short circuit (SC) tests of 18650 type1 500 mAh Li-ion cell and battery

	SC resistance (mΩ)	Max. SC Current (A)	Max. Temperature (°C)	Tab melted	Header CID broken
Cell	5	115	48	√	
	80	35	105		√
Battery (5s)	5	127	32	√	
	80	90	80	√	

4 结 语

中国是世界制造电动工具及其充放动力电池的主要基地。目前, 圆柱型锂离子电池已广泛应用在各种便携式电动工具、园林工具以及家用吸尘器中。这种电池不同于一般的锂离子动力电池, 最显著的电化学性能特征在于可进行高倍率(5 C 以上)放电和循环, 产生足够的输出功率和相当的能量, 体现出较宽温度适应能力。因此, 电池的设计必须考虑到整个电池内部阻抗应尽量小, 使用的材料应耐受大电流放电所产生的高温。

动力电池的正极材料主要采用三元 NMC (少部分 NCA)、尖晶石 LMO 以及磷酸亚铁 LFP, 负极活性材料通常为改性石墨。与一般动力电池使用的材料不同, 这些粉末材料的粒度大小、粒度分布以及比表面积应有利于减小电池阻抗, 改善倍率充放电特性和电极制备过程等。使用 LFP 正极材料的锂离子动力电池容量(18650 型为例)一般在 1 000~1 200 mAh, LMO 锂离子电池在 1 200~1 500 mAh, 高容量(1 500 mAh 以上)的锂离子电池主要采用三元 NMC(或少量 NCA)正极材料, 这与电池的理论比容量等有关。电解液选型方面适合采用导电性高、热稳定性好的非水有机溶剂体系。为了降低阻抗, 电池隔膜应具有锂离子传输阻力小、锂离子容纳量较多的电解液, 以及很好的抗拉强度和热稳定性等特点。

最后, 电动工具用锂离子动力电池必须有较好的安全性。大电流放电容易引起电池内部过热, 会产生不必要的副反应以及短路现象, 盖帽安全阀的设计对电池的电性能、机械性能以及热循环安全性能也起着非常重要的作用。

参考文献 References

[1] 江苏海司达电源股份有限公司. 多功能有机电解液对动力

型锂离子电池高低温性能显著改善的研究成果鉴定报告. 南京(Nanjing): 南通科技局(Nantong Science and Technology Bureau), 2013.

[2] 江苏海司达电源股份有限公司. 宽温幅高容量 18650 型 3000mAh 车用锂离子动力电池研制工作报告鉴定成果. 南京(Nanjing): 南通科技局(Nantong Science and Technology Bureau), 2014.

[3] Meng Xin (孟蕊), Qiu Reizheng (邱瑞珍), Gao Junkuai (高俊奎). *Chinese Journal of Power Sources* (电源技术)[J], 2007, 31(1): 30-33.

[4] Cao Guoqingeng (曹国庆). 国内电动工具用锂离子电池正努力追赶国外先进水平 [EB/OL]. (2010-12-27)[2016-01-18]. <http://wenku.baidu.com/view/1493d4c258f5f61fb736667b.html>.

[5] Wang Xinwei (王兴威), Tang ChenMing (唐琛明), Huang Zhongqi (黄钟琪). *China Power Tools* (电动工具) [J], 2011, 31(6):143-149.

[6] Peng Lei (彭磊), Zhu Yaoling (朱瑶玲). *China Power Tools* (电动工具) [J], 2013(6):167-172

[7] Wang Rong (王荣). *Chinese Journal of Power Sources* (电源技术) [J], 2013, 37(7): 1126-1128.

[8] Wu Yuping (吴宇平), Dai Xiaobin (戴小兵). *Applications and Practices of Lithium Ion Battery* (锂离子电池的应用与实践), Beijing: Chemical Industry Press: 2004: 211-216

[9] 江苏海司达电源股份有限公司. 抗老化耐高温动力型锂离子电池技术研究报告成果鉴定. 南京(Nanjing): 南通科技局(Nantong Science and Technology Bureau), 2013

[10] 江苏海司达电源股份有限公司. 耐过放电动工具用动力型锂离子电池研制成果鉴定报告. 南京(Nanjing): 南通科技局(Nantong Science and Technology Bureau), 2013

(编辑 吴琛)



特约撰稿人 杨 军



特约撰稿人 安仲勋



特约撰稿人 冯 力



特约撰稿人 李春忠



特约撰稿人 霍开富

杨 军: 男, 1959 年生, 教授, 博士生导师。1995 年德国明斯特大学博士毕业, 1999 年入选中科院“百人计划”, 2004 年入选教育部首届“新世纪优秀人才支持计划”。2000 年起任中国科学院上海微系统与信息技术研究所能源室担任研究员。2003 年任上海交通大学化学化工学院教授, 中国电池工业协会理事以及中国硅酸盐学会固态离子学分会理事, 国际中文刊物《物理化学进展》副主编。主要研究锂离子电池, 高能锂金属二次电池和可充镁电池。主持了国家“863”和“973”计划课题、国家自然科学基金课题、上海市科委课题, 并与多家国内外知名企业开展合作研究。在 *Adv Mater*, *Energy & Enviro Sci* 等发表论文约 160 篇, SCI 他引 5000 余次, H-因子 45; 主编《化学电源测试原理与技术》, 参编 Elsevier 出版的 *Encyclopedia of Electrochemical Power Sources* 和 Nova Science 出版的 *Polymer Electrolyte Membrane Fuel Cells and*

Electrocatalysts; 获得国内外发明专利 31 项。

安仲勋: 男, 1977 年生, 高级工程师, 在读博士, 国家车用超级电容器系统工程技术研究中心主任, 上海奥威科技开发有限公司副总工程师。攻克了有机双电层超级电容器电极国产涂布的难题。主持研制出高能量超级电容器, 其成果“车用高能量电容系统”被认定为上海市高新技术成果转化项目, 项目等级为 A 级, 排名第一。主持国家级项目两项, 上海市超级电容器工程技术中心能力二次提升一项, 参与省部级 3 项, 顺利结题上海市科委项目 2 项。申请发明专利 20 项, 授权 6 项。其中 PCT 专利 2 项。近五年以通讯作者身份发表学术论文 3 篇。分别获得 2007 年上海市科技进步三等奖、2010 年上海市“讲理想, 比贡献”科技标兵、2011 年浦东新区科技创新英才二等奖。

冯 力: 男, 1961 年生, 加拿大 Simon Fraser 大学化学系固体化学博士, 美国 New Orleans 大学物理系工程物理硕士, 中国

科学院长春应用化学研究所化学硕士。2013 年江苏省创新创业(双创人才)引进人才。主要从事锂离子电池及其材料的研究和开发, 磁电晶体介电材料的合成, 结构表征及其性能, 稀土金属材料及其合金融盐化学和电化学等。参加了国家自然科学基金、国家“863”高科技和中科院科技攻关项目, 以及 Ford 基金资助项目等重大项目。分别获得国家科技进步二等奖(1985 年)、中科院科技进步一等奖(1991 年)。2000 年起作为电池资深化学家和研究科学家在著名的美国 Eagle Picher 能源公司研究并开发出医用和宇航所用的锂离子能量型电池; 在台湾 E-One Moli 能源公司, 主要研发了锂离子动力电池及其材料, 以及有机溶剂电解液。发表文章 35 篇。主要研究方向: 电动工具和车用锂离子动力电池产品开发; 医用和太空特殊锂离子电池的; 锂离子电极材料和电解液的研究。

李春忠: 男, 1967 年, 教授, 博士生导师。2003 年受聘为“长江学

者特聘教授”。2002~2015 年任超细材料制备与应用教育部重点实验室主任。现任材料科学与工程学院院长, 中国颗粒学会常务理事, 上海市颗粒学会副理事长, 中国颗粒学会制备与处理专业委员会副主任委员。2015 年入选英国皇家化学会会士(Fellow of the Royal Society of Chemistry, FRSC)。主要从事纳米材料及材料化学工程领域的研究。研究方向包括: 纳米材料制备化工基础与结构调控、限域反应构建新能源材料与应用性能、聚合物基纳米复合材料制备与加工、纳米材料合成反应器设计与过程放大等。主持承担国家自然科学基金重点、国家杰出青年科学基金、国家国际科技合作专项、“863”、“973”项目前期研究专项等重要项目。申请中国发明专利 101 项, 授权 70 项; 在 *Energy Environ Sci*、*Adv Mater* 等期刊发表 SCI 论文 370 余篇, 影响因子大于 6.0 期刊论文 90 余篇, *Ind Eng Chem Res.* 和 *Chem Eng J* 等 25 篇, ESI 高被引论文 26

篇。发表论文总被引用 12 000 余次(Google Scholar), 其中 SCI 他引 9 200 余次, H 因子为 48。获吴蕴初化学化工科学技术进步奖, 上海市自然科学牡丹奖和全国优秀科技工作者, 入选国家百千万人才工程并被授予“有突出贡献中青年专家”荣誉称号, 国务院政府特殊津贴和国家杰出青年科学基金获得者。

霍开富: 男, 1974 年生, 华中科技大学教授, 博士生导师。2004 年南京大学博士毕业, 2004~2006 年在南京大学从事博士后研究工作, 2006~2010 年香港城市大学 Research Fellow, 2011~2012 年在美国斯坦福大学做访问教授。主要从事纳米储能材料、纳米生物材料的研究与教学工作。主持国家自然科学基金项目、“863”项目等重要课题 12 项; 发表 SCI 论文 100 多篇, 他引 3 000 多次; H-index 为 29。主要研究方向: 纳米储能材料; 纳米陶瓷材料; 生物传感和生物界面材料。