

锂电池的原理与应用

栗宇深 汤敏贤 刘熠元 黄庆泉

摘 要:锂电池已广泛用于各种电子产品中,在未来的电动汽车也有着很好的应用前景,必将对未来人们的生活产生深刻的影响。本文将分别从发展过程、正负极及电解质材料的原理、应用及最新发展状况对锂电池进行综述。

关键词：锂离子电池 聚合物锂电池 阳极材料 阴极材料 电解质

人类对锂电池最初的开发是在上世纪六十年代。由于在金属中，锂元素有着最小的密度和最大的电负性，故而应当具有最高的比能量。但由于其抗腐蚀性及安全性不易控制，并没有得到商业化。七十年代，松下电器研制出 $\text{Li}/(\text{CF}_x)_n$ 电池，解决了上述不足，三洋公司推出 Li/MnO_2 电池，并在计算器领域得到普及。以上所提均为一次性锂电池，最早开发成功的是加拿大 Moli 公司在八十年代推出的 Li/S_2 电池，同样由于安全性因素，它并未普及。1990 年 SONY 公司成功研制出二次锂离子电池，它终于以自身的诸多优点在商业上得到广泛应用。

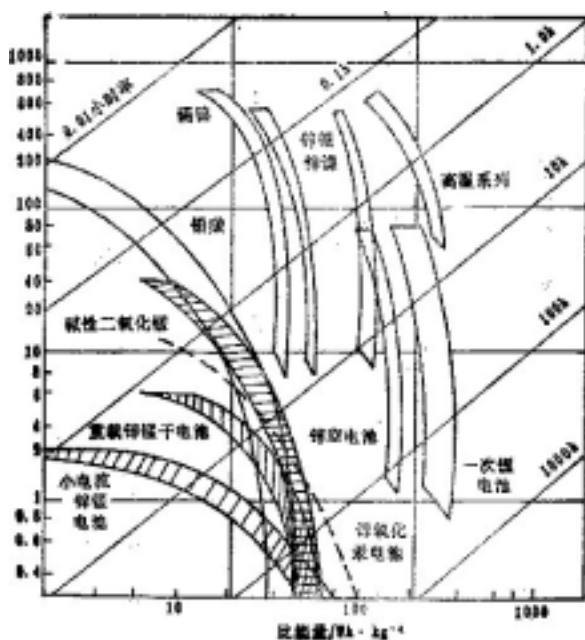
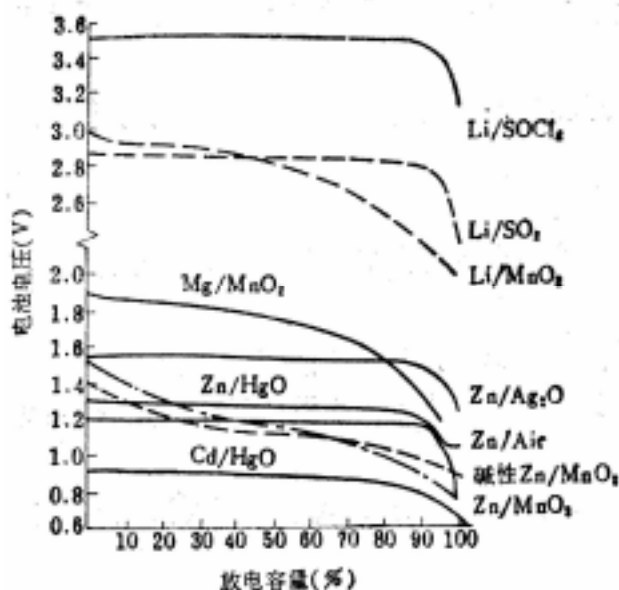


图 1. 几种常见电池的比能量与比功率曲线^[1]

图 2. 几种常见电池的放电电压曲线^[2]

锂电池作为一种新兴技术，与传统电池相比有着诸多优势（详见附表一）：

1. 比能量高: 描述电池性能的指标各种各样, 其中用户最关心的是它的比能量的高低, 即在放出尽可能多的能量的同时有着尽可能少的自身消耗。如前所述, 锂元素有着最小的密度和最大的电负性, 如图 1, 消耗相同质量的电池材料, 锂电池放出的能量明显高于同类传统电池的值。
2. 放电电压稳定: 许多电子线路要求电池提供相对稳定的放电电压, 在图 2 中可以看到, 锂电池(特别是一次锂电池)就具备这种特性。例如 Li/SO_2 电池的放电曲线就十分平坦, 特别是 Li/SOCl_2 电池, 它在电量用尽前的电压可接近稳压电源的水平。
3. 没有记忆效应, 可随时补充充电。这样就使锂离子电池效能得到充分发挥, 而镉镍电池、镍氢电池会有电量使用不完全时需要先放电后才能充电的缺点。
4. 锂离子电池不含汞、镉、铅等有毒元素, 是绿色环保电池。

当然，锂电池也有着较明显的劣势。一是安全性，目前来看，传统锂电池发生短路甚至爆炸的机率远高于其它传统电池，锂离子电池虽有改善，但安全系数仍然较低。二是比功率的问题，在承担高负荷的情况下，锂电池的性能尚不及镉镍电池及锌银电池。三是由于锂电池的金属稀有及结构复杂而导致的成本问题。这些都是科学家目前致力解决的问题。

早期的锂电池的负极材料是单质锂，由于锂相当活泼，遇水会剧烈反应生成 LiOH ，甚至燃烧或爆炸，所以一般采用非水电解液，如无机的 SOCl_2 及有机的四氢呋喃等。虽然如此，由于锂的强活性，安全问题仍然很难解决，尤其是到了二次锂电池时期，反复的充放电使得高活性的粉状锂单质积累得越来越多；在充电过程中形成的锂晶体可能结成枝状，引起短路等严重问题^[4]，对此人们采取的措施一般是使用锂合金或采用尽可能小孔径的隔膜等。

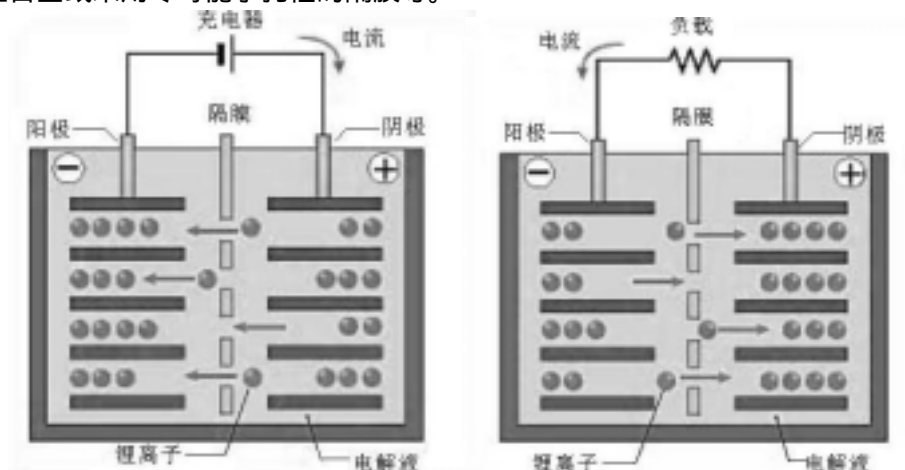
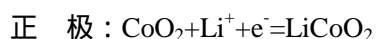


图 3．摇椅式锂离子电池的充放电原理

今天我们所见到的锂离子电池（简称锂电池，下同）采取了更根本的解决方案，不再使用单质锂，电池的核心部分变为锂离子及锂嵌入物。锂电池主要由阴极、阳极、能传导锂离子的电解质以及把阴阳极隔开的隔膜组成。锂电池的实质是一种浓差电池，其正负电极材料由两种不同的锂离子嵌入化合物组成，正极为不同类型的含锂化合物，负极则由石墨一类的物质形成层状结构， Li^+ 可填充于其中。如图 3，在充电时，阴极部分的锂离子脱嵌，离开含锂化合物，透过隔膜向阳极移动，并嵌入到阳极的层状结构中；反之在放电时，锂离子在负极脱嵌，移向正极并结合于正极的化合物之中。与传统锂电池不同的是，被氧化还原的物质不再是 Li 和 Li^+ ， Li^+ 只是伴随着两极材料本身发生放电而产生的氧化态的变化而反复脱嵌与嵌入，往返于两极之间，所以锂电池又被称作摇椅电池(Rocking chair battery)。

此种电池的一个典型放电原理为：



早期的负极材料直接使用锂单质，这样的结果是在充电时，生成的锂很可能会形成枝状晶体，从而刺穿隔膜而导致短路、漏电甚至爆炸。随后采用的锂合金（如 LiAl 等）克服了晶枝的问题，但它在反复充电的过程中，由于晶格的不紧密性会逐渐膨胀并粉末化，使得放电能力逐渐丧失。随后又出现了改进的氧化物型负极，但仍有缺陷。1980 年以后，在摇椅电池的理论，人们发现，锂在碳材料中的嵌入过程的电位接近锂金属本身的电位，且不易与有机电解质反应，循环性更佳。1990 年，锂离子电池投入生产，目前，锂电池的负极材料主要采用碳材料。^[5]

锂离子二次电池的蓄电能力在很大程度上取决于负极材料的选取，优秀的负极材料应该具有以下特性：

Li⁺在脱嵌过程中电极电位变化较小，且接近金属锂的电位
 与 Li⁺的插入过程吉布斯自由能变化小，保证过程的高度可逆性
 在电极结构的表面与内部 Li⁺都有较高的扩散速率，以提高电极的电导率
 有较高的热稳定性及对电解质的相容性
 价格低廉，易于制备

下面就以上内容及其发展过程对几种常见的锂电池负极材料做一介绍：

1. 金属合金负极：

为解决金属锂负极较差的安全性和循环利用性的问题，各种常见的锂合金纷纷被用来尝试，如 LiAlFe、LiPb、LiAl、LiSi 等。锂合金负极可以有效的避免枝状晶体的生长，提高了电池的安全性。合金具有很高的可逆容量，但是在充放电过程中，容易极化，稳定性较差，并且会出现体积膨胀，电极的材料逐渐粉化失效，使合金的结构遭到破坏。目前兴起的解决手段是采用复合体系的金属合金贮锂材料作负极，如 Cu₆Sn₅、Li₂ZnSi、Mg₂Sn 等，它能够解决传统锂合金电极充电时的膨胀问题且具有更高的容量。

2. 金属氧化物负极：

为了解决金属粉末化问题，人们开始使用金属氧化物而非纯粹的金属作负极材料。这类负极材料以 SnO 为代表，简单原理如下：首先是置换反应， $2\text{Li} + \text{SnO} = \text{Sn} + \text{Li}_2\text{O}$ ，生成的 Sn 为纳米微粒，分散在 Li₂O 体系中，其次是可逆的合金化反应 $\text{Sn} + x\text{Li}^+ + e^- = \text{Li}_x\text{Sn} (x < 4.4)$ ，即锂离子在锂锡合金中可逆地嵌入与脱嵌。其它类似的氧化物还有 WO₂、Fe₂O₃、Nb₂O₅ 等。这里还要特别介绍一下 Li₄Ti₅O₁₂，它的嵌入反应中 ($3\text{Li} + \text{Li}_4\text{Ti}_5\text{O}_{12} = \text{Li}_7\text{Ti}_5\text{O}_{12}$)，晶格体积基本没有变化，故拥有很好的循环寿命。^[6]

3. 碳负极材料：

锂离子在碳中有较高的插入性，由此可推论以碳为负极的锂电池将有较高的能量密度。早在 1973 年就有人提出碳做嵌入式负极材料，但其真正的广泛应用是在摇椅式电池原理产生之后： $x\text{Li}^+ + 6\text{C} + xe^- = \text{Li}_x\text{C}_6$ 。碳类负极材料主要分石墨与非石墨两大类：

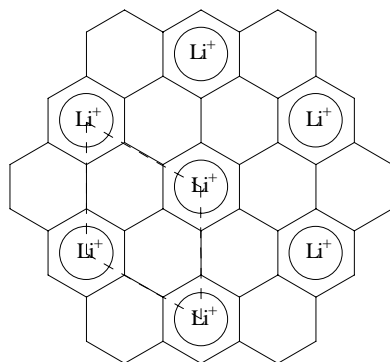


图 4.石墨锂离子嵌合物示意图

石墨具有良好的层状结构，碳原子呈六角形排列，层间距为 0.1335 nm。如图 4，锂嵌入石墨的层间形成 Li_xC₆ 层间化合物，当 $x = 1$ 时，即石墨插入锂的理论值：6 个 C 对应一个 Li⁺，由此计算出其理论能量密度为 372mAh/g。但石墨的结晶度高，具有高度各向异性的层状结构，锂离子嵌入的方向性强，使得石墨的大电流充放电能力低，导致动力性能较差。同时，由于石墨层间距小于锂嵌入石墨层后形成的石墨层间化合物 Li_xC₆ 的晶面层间距(0.137nm)，在充放电循环过程中，石墨层间距变化较大，而且还会发生锂与有机溶剂共同插入石墨层间的情况，容易造成石墨层逐步剥落、石墨颗粒发生崩裂和粉化，从而影响电池的循环性能。为了扬长避短，可以使用改性石墨：用酚醛树脂等高聚物包裹石墨微粒的表面，得到无定形炭的核-壳结构，后者可阻止石墨开裂崩塌，提高了体系的稳定性。用该种材料做负极，可减少电解质中有机溶剂与石墨的反应，降低锂离子插入石墨层的方向性，提高石墨材料的大电流充放电能力，使其可逆容量可达 370mAh/g，充放电效率可达 90% 以上。

非石墨类负极材料分为易石墨化碳（软碳）及难石墨化碳（硬碳）两类。松下、三洋等公司主要生产的软碳材料以中间相炭微球(MCMB)为代表,它的表面光滑,比表面积较小,可以减少充放电过程中电极边界反应的发生,从而降低第一次充电过程中的容量损失。另外,小球具有片层状的结构,有利于锂离子在球的各个方向嵌入和脱嵌,解决了石墨类材料由于各向异性过高引起的石墨片溶胀、塌陷和不能快速大电流放电的问题。Sony 公司主要使用的硬碳材料是指高温下也不会形成石墨化结构的碳,主要成份为纤维素、酚醛树脂、呋喃树脂等,该类碳质材料大多具有很高的嵌锂容量,最高能量密度可达 975mAh/g,但这类技术尚未成熟。^[3]

4. 其它常见的负极材料还有过渡金属氮化物(如 $\text{Li}_{2.6}\text{Co}_{0.4}\text{N}$ 能量密度可高达 900mAh/g)以及纳米硅材料(利用化学蒸气沉积法在碳材料中复合进去一些纳米硅,能量密度可达 1200mAh/g)等。^[6]

锂电池的发展虽然只有短短几十年,但在这几十年中,其正极材料的选用发生了很多的变迁,由最初所采用的溶于有机电解液的 SO_2 ,到硫酰氯(SO_2Cl_2)和亚硫酰氯(SOCl_2)两种既做溶剂又做正极活性物质的无机物,到后来的固体正极材料,如 MnO_2 , $(\text{CF}_x)_n$, CuS , CuO , I_2 , FeS 和 FeS_2 等等(详见附表二),但以这些正极材料制造的锂电池都是一次电池,不能循环使用,浪费了大量资源,其本身的安全性也令人担忧,对环境的伤害也比较大。而现代社会需要的是可以循环使用(二次电池),安全,对环境影响小的新型锂离子电池,因而新的正极材料的研究就显得十分迫切,目前这方面的研究已有不少成果,这里简要的介绍一下锂离子二次电池的主要的正极材料。

目前锂二次电池的正极材料主要分为五类,锂钴氧化物(LiCoO_2),锂镍氧化物(LiNiO_2),锂钒氧化物,锂铁氧化物(LiFePO_4),锂锰氧化物(LiMnO_2)。

1. 锂钴氧化物的优点: LiCoO_2 是现阶段商品化锂离子电池中应最成功的正极材料。目前,相比其他正极材料, LiCoO_2 在可逆性、放电容量、充电效率和电压稳定性等方面综合性能最佳
锂钴氧化物的不足:钴属于战备物资,资源有限,价格较贵,且对环境有污染。

改进方法:

加入 Al , Ni , Mn , Sn 等元素,改善其稳定性,延长循环寿命。

在电极材料中加入 Ca^{2+} , H^+ , 提高电极的电导性,活性物质利用率和快速充放电性能。

引入过量的锂,增加电极的可逆容量。

在 LiCoO_2 的表面覆盖 MgO , SnO 或 Al_2O_3 , 经表面改性的 LiCoO_2 的充放电容量有所降低,但材料的容量衰减明显减少。(在锂离子大量失去后有利于保持原晶体的稳定性,而且避免了材料与电解液的接触,减少了容量的损失)^[3]

2. 锂镍氧化物的优点: $\text{Li}_{1-x}\text{Ni}_{1+x}\text{O}_2$ 锂镍化合物的性能较锂钴化合物类似,但由于其价格便宜,故有利于大量推广。

锂镍氧化物的不足:合成条件苛刻,合成条件的细微变化会导致非化学计量锂镍氧化物的生成,其结构中锂离子和镍离子的无序分布,使电化学性能恶化,能量密度下降。另外由于其脱锂后的产物分解温度太低,分解产生大量的热量和氧气,容易造成锂电池过充电时的燃烧和爆炸。

事实上,以锂镍氧化物为正极材料的锂离子电池目前还没有真正地实际应用。

3. 锂钒氧化物的优点:高容量特别是近几年又开发出 V_2O_5 凝胶,它的能量密度远远超过其它材料,在大幅的提高锂离子电池的使用时间的同时由于其成本低(钒的价格较钴低)又便于大量的推广、且对环境无污染。

原理: $\text{Li}/\text{V}_2\text{O}_5$ 的电池反应为:

正极: $\text{V}_2\text{O}_5 + x\text{e}^- + x\text{Li}^+ \rightarrow \text{Li}_x\text{V}_2\text{O}_5$

负极: $x\text{Li} \rightarrow x\text{Li}^+ + x\text{e}^-$

总反应为: $\text{V}_2\text{O}_5 + x\text{Li} \rightarrow \text{Li}_x\text{V}_2\text{O}_5$

4. 锂铁氧化物的优点:价格低廉,热稳定性好,对环境无污染,是目前最具潜力的正极材料之一。且经过研究,比 LiCoO_2 具有更好的热稳定性,对于非常规条件下的使用有更强的忍耐力。

锂铁氧化物的不足： LiFePO_4 橄榄石结构作为正极材料还存在着一定技术瓶颈,尤其是其导电率的提高与安全性能的表现还没有充分展开。

改进方法：调节控制合成反应进行的温度以制得电化学性能较为出色的正极；镀碳，加碳支撑复合材料；掺杂 Cr 以提高其电导率。^{[3] [7]}

5. 锂锰氧化物的优点：锰储量丰富（我国的锰资源排世界首位），价格便宜，无毒且污染小，对环境保护有利。

锂锰氧化物的不足：由于电解液自身所含部分物质（主要是 LiPF_6 ）与水共同作用以及尖晶石的催化作用引起电解液的分解（ LiPF_6 在高温下分解出 PF_5 ， PF_5 再水解产生 HF ，即 $\text{LiPF}_6 + \text{H}_2\text{O} = \text{POF}_3 + 2\text{HF} + \text{LiF}$ ），而高温下电解液中微量水和痕量酸又造成锰的溶解使该材料在高温下循环容量迅速衰减。^[3]

改进方法：优化合成方法以制得具有尖晶石相的电化学性能较佳的 LiMn_2O_4 ；掺杂以提高其电化学性能、结构稳定性和循环性能；进行表面改性，类似于 LiCoO_2 材料的表面改性，在正极材料表面包裹一层阻隔物，使得正极材料和电解液的接触面积变小，从而减少锰的溶解和电解液的分解；优化电解液以减少电解液中的微量水和痕量酸以降低锰的溶解（采用分子筛和添加路易斯碱）^[8]

电解质是锂离子电池的重要组成部分，对电池的性能有很大的影响，因而电池电解质体系的选择是电池设计的一个重要方面。锂离子电池用电解质，从相态上分，可分为液体电解质和固体电解质。由于锂的活泼决定了液体电解质不能以水为介质，目前大量使用的液体电解质体系主要是在有机溶剂中溶解含工作离子的电解质构成的有机电解液体系。一般情况下，作为锂离子电池的电解液有以下要求：

锂离子的电导率尽可能高。

电化学性质稳定的电化学窗口尽可能宽。

具有良好的热稳定性，可使用的温度范围尽可能宽。

良好的化学稳定性，和电池内的集流体的活性物质不发生化学反应。

安全性高，毒性小，最好能生物降解。

价格低。

在有机电解液溶剂的选择上，为了增强电解液的电导率，应选择锂盐在其中溶解度较大的有机溶剂，要求溶剂有较大的比介电常数，同时又要考虑溶剂的黏度尽量小，由于比介电常数和黏度是一对矛盾体，两者必须综合考虑。同时溶剂必须是非质子的极性溶剂，以保证锂盐的溶解和不与锂发生反应。还有溶剂要有较低的熔点和较高的沸点，使电解液有尽可能宽的温度范围。（详见附表三）

一般常用的有机溶剂有碳酸酯，羧酸酯和醚类，都有链状和环状之分。碳酸酯类溶剂由于单一溶剂性能缺陷大，常制成线性碳酸酯和环状碳酸酯的混合溶剂，并且已经在实际应用中得到了应用。羧酸酯在性能上不如碳酸酯全面，存在不少缺陷，但将其与其他有机溶剂组合可以改善电解液的性能，醚类也有不少缺点，一般不直接使用，而是用以改善电解液的性能。

在电解质盐方面，一般选择 LiClO_4 、 LiBF_4 、 LiPF_6 和 LiAsF_6 ；为了提高热稳定性、化学稳定性又研制了有机阴离子锂盐，如 LiCF_3SO_3 、 $\text{Li}(\text{CF}_3\text{SO}_2)_2\text{N}$ 等。有机阴离子锂盐稳定性好，但价格较高且在充电时对正极集流体有腐蚀。

固体电解质主要分为聚合物电解质和无机电解质，就目前的研究情况，聚合物电解质在离子电导率，电化学窗口宽度，机械加工性能方面都较无机电解质有一定的优势，所以近些年来，聚合物电解质的研究相当活跃，已有商品化的二次电池问世。另外聚合物锂电池与液态锂离子电池相比，也具有以下优点：

电解质与电极反应的活性降低，提高了电池的循环性能，减少了容量的衰减。

安全性大大提高，没有电解质的渗漏问题，更重要的是没有燃烧爆炸的危险。

固体电解质易于加工成型，电池形状可以任意改变。

聚合物电解质按状态主要分为纯固态聚合物电解质，凝胶聚合物电解质和多孔聚合物电解质，

纯固体电解质中不含任何低分子液体，是研究得最早的一类聚合物电解质，以聚氧乙烯（PEO）为代表。凝胶电解质实际上一种增塑体系，与软聚氯乙烯相仿，是目前研究最为广泛的一类聚合物电解质，应用前景被看好。多孔型聚合电解质在电导率方面与液体电解质十分接近，在膜片强度方面又与聚合物多孔膜相当，很受开发商的重视。^[9]

锂离子电池应用的领域主要在通信通讯、便携式电器以及电动汽车方面。手机，笔记本电脑等都要轻质量，高容量的二次电池，有着最高能量密度的锂离子电池正好满足了上述需求，故在这些方面得到了广泛的应用。目前手机，笔记本电脑大量使用的是以 LiCoO_2 为正极材料的锂离子电池。电动汽车方面由于需要尽量减少车身重量以减少能耗和提高时速、增大电池容量以延长单次行车路程，这也使锂电池有了用武之地。

目前，锂电池还在军事、医疗等方面有着广泛的应用，其中一个典型的例子就是心脏起搏器：心脏起搏器对电池的要求相当苛刻，其寿命、抗腐蚀性都必需有极高品质，一般由锂碘一次电池来担负这个艰巨的任务。首先，它有着极长的使用寿命，一般可达七至十年。其次，由于它使用纯固体电解质，产品的可靠性相当高。还有另外一点，因起搏器的工作频率由电源电压决定，前文已述，一般的锂电池放电电压平稳，由图 2 可以看出，它们只在快用尽时电压才会有较大幅度的下降，这不利于病人了解起搏器的工作状态，在电量用尽时容易出现危险，而锂碘电池的放电电压曲线随使用变化比较明显，弥补了其它锂电池的不足。

电子信息时代使对移动电源的需求快速增长，锂离子电池经过近二十年的发展，已经成为一种相对成熟的技术，由于它具有体积小、重量轻、高储能、循环寿命长等特点，在便携式电子设备、电动汽车、空间技术、国防工业等多方面具有广阔的应用前景。但是目前的锂离子电池仍然有着一些明显的缺陷：如目前的正极材料在循环使用中都会有不可逆的电容量损失；而负极材料除此之外还存在电压滞后的问题。关于前者，有研究者提出添加其它组分来克服，目前正极材料的能量密度以每年 $30\sim 50\text{mAh/g}$ 的速度增长着^[1]，并且材料微观结构尺度越来越小，正向着纳米级尺度发展。至于负极，作为嵌锂材料，碳纳米管及 C_{60} 因其特殊的结构将成为高密度嵌锂材料的最佳选择，纳米结构可以提供更高的嵌锂容量，但其制备方法以及如何堆积尚不明确，仍是相关研究的重要方向。另外，凝胶聚合物锂电池已率先商品化，并具有超薄、轻便、高能量密度等优点，固体聚合物电解质的研究也取得了许多进展，室温离子导电率以及机械加工性能有了很大的改进。固体锂离子电池因具有更高的安全性能，在未来的电动汽车上有很好的应用前景，许多国家和一些大的企业集团都在加大这方面的研发力度。

总之，从仅有的三十余年的历史上来看，锂电池化学还是一个年轻的学科，还有很大的发展潜力。它是一门复杂的科学，还需要靠无机化学、有机化学、物理化学、固体与表面化学等多方面的配合来取得更大的发展。锂电池在我们未来的生活中必将起到越来越举足轻重的作用。

参考文献：

- [1]李国欣等，新型化学电源导论（第一版），复旦大学出版社，1992.12
- [2]张文保，倪生麟，化学电源导论（第一版），上海交通大学出版社，1992.8
- [3]翟秀静，高虹等，新型二次电池材料（第一版），东北大学出版社，2003.12
- [4]高海春，锂离子电池，盐湖研究，1994，4(2)，54-58
- [5]闫俊美，杨金贤，贾永忠，锂电池的发展与前景，盐湖研究，2001，9(4)，58-63
- [6]郑子山，张中太，唐子龙，沈万慈，锂离子二次电池最新进展及评述，化学世界，2004，5，270-273
- [7]黄学杰，锂离子电池正极材料磷酸铁锂研究进展，电池工业，2004，8(4)，176-180
- [8]王双才，李元坤，刘述平，锂离子电池正极材料研究动态，中国锰业，2004，22(3)，31-34
- [9]肖立新，郭炳，李新海，聚合物锂离子电池，电池，2003，33(2)，110-113

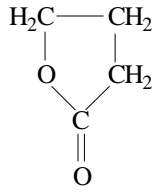
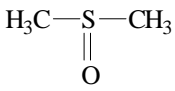
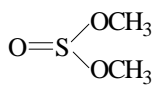
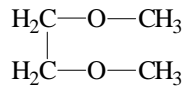
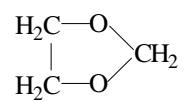
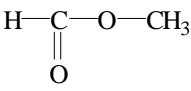
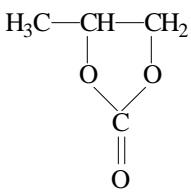
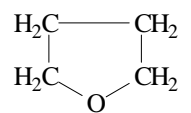
附表一：锂电池与其它传统电池的性能比较^[3]

电池种类		镉镍电池	金属氢镍电池	锂离子电池
体积能量密度 (W·h/L)	现状	160	200	240
	将来	240	360	425
质量能量密度 (W·h/kg)	现状	70	80	100
	将来	80	110	160
平均输出电压/V		1.2	1.2	3.6
使用电压范围/V		1.4~1.0	1.4~1.0	4.2~2.5
循环寿命	现状	500	500	500
	将来	1000	1000	1000
使用温度范围/	充电	0~45	0~45	0~45
	放电	-20~65	-20~65	-20~60
	长期存放	-20~45	-20~45	-20~45
月自放电率/%		15~20	25~30	6~12

附表二：主要传统锂一次电池的理论工作特性^[2]

正极材料	分子量	化合价的变化	密度 g/cm ₃	理论电量(正极)			电池反应与锂负极	单体电池的理论值	
				A·h/g	A·h/cm ³	g/A·h		电压 V	比能量 W·h/kg
SO ₂	64	1	1.37	0.419		2.39	2Li+2 SO ₂ 2Li ₂ S ₂ O ₂	3.1	1170
SOCl ₂	119	2	1.63	0.450		2.22	4Li+2 SOCl ₂ 4LiCl+S+ SO ₂	3.65	1470
SO ₂ Cl ₂	135	2	1.66	0.397		2.52	2Li+ SO ₂ Cl ₂ 2LiCl+ SO ₂	3.91	1405
Bi ₂ O ₃	466	6	8.5	0.35	2.97	2.86	6Li+ Bi ₂ O ₃ 3Li ₂ O+2Bi	2.0	640
Pb ₂ Bi ₂ O ₅	912	10	9.0	0.29	2.64	3.41	10Li+ Pb ₂ Bi ₂ O ₅ 5 Li ₂ O+2Bi+2Pb	2.0	544
(CF) _n	(31) _n	1	2.7	0.86	2.32	1.16	nLi+(CF) _n nLiF+nC	3.1	2180
CuCl ₂	134.5	2	3.1	0.4	1.22	2.50	2Li+ CuCl ₂ 2LiCl+Cu	3.1	1125
CuF ₂	101.6	2	2.9	0.53	1.52	1.87	2Li+ CuF ₂ 2LiF+Cu	3.54	1650
CuO	79.6	2	6.4	0.67	4.26	1.49	2Li+CuO Li ₂ O+Cu	2.24	1280
CuS	95.6	2	4.6	0.56	2.57	1.79	2Li+CuS Li ₂ S+Cu	2.15	1050
FeS	87.9	2	4.8	0.61	2.95	1.64	2Li+FeS Li ₂ S+Fe	1.75	920
FeS ₂	119.9	4	4.9	0.89	4.35	1.12	4Li+ FeS ₂ 2 Li ₂ S+Fe	1.8	1304
MnO ₂	86.9	1	5.0	0.31	1.54	3.22	Li+ Mn()O ₂ Mn()O ₂ (Li ⁺)	3.5	1005
MoO ₃	143	1	4.5	0.19	0.84	5.26	2Li+ MoO ₃ Li ₂ O+Mo ₂ O ₃	2.9	525
Ni ₃ S ₂	240	4		0.47		2.12	4Li+ Ni ₃ S ₂ 2 Li ₂ S+3Ni	1.8	755
AgCl	143.3	1	5.6	0.19	1.04	5.26	Li+AgCl LiCl+Ag	2.85	515
Ag ₂ CrO ₄	331.8	2	5.6	0.16	0.90	6.25	2Li+ Ag ₂ CrO ₄ Li ₂ CrO ₄ +2Ag	3.35	515
V ₂ O ₅	181.9	1	3.6	0.15	0.53	6.66	Li+ V ₂ O ₅ LiV ₂ O ₅	3.4	490

附表三：锂一次电池有机电解液溶剂的性能^[1]

溶剂	结构式	沸点 (1atm)()	熔点 ()	闪点()	密度(25) (g/cm ³)	电导率*100 (⁻¹ · cm ⁻¹)
乙腈(AN)	$\text{H}_3\text{C}-\text{C}\equiv\text{N}$	81	-45	5	0.78	3.6
- 丁内酯(BL)		204	-44	99	1.1	1.1
二甲亚砜(DMSO)		189	18.5	95	1.1	1.4
亚硫酸二甲酯(DMSI)		126	-141		1.2	
1,2 - 二甲氧基乙烷(DME)		83	-60	1	0.87	
二氧戊环(1,3 - D)		75	-26	2	1.07	
甲酸甲酯(MF)		32	-100	-19	0.98	3.2
硝基甲烷(NM)	$\text{H}_3\text{C}-\text{NO}_2$	101	-29	35	1.13	1
碳酸丙烯酯(PC)		242	-49	135	1.2	7.3
四氢呋喃(THF)		65	-109	-15	0.89	