

电气自动化技术专业教师岗试讲具体内容



储能科学与工程新兴领域
“十四五”高等教育教材

储能与 综合能源系统

黄震 王丽伟 主编
韩东 沈水云 杨立 编写

非
外
借



扫书中二维码
获取更多资源



中国电力出版社
CHINA ELECTRIC POWER PRESS

目录

前言 符号说明

1 第1章 储能与综合能源系统概述及分析方法

- 1 1.1 综合能源系统的发展
- 3 1.2 能源系统分类
- 6 1.3 综合能源系统举例
- 9 1.4 储能技术在综合能源系统中的应用
- 11 1.5 储能与能源利用系统相结合的分析方法
- 15 思考题与习题

17 第2章 物理储能技术

- 17 2.1 抽水蓄能技术
- 20 2.2 压缩空气储能技术
- 23 2.3 飞轮储能技术
- 25 2.4 超导储能技术
- 29 2.5 显热储能技术
- 33 2.6 相变储能技术
- 36 2.7 物理储能与综合能源系统
- 39 思考题与习题

41 第3章 电化学储能技术

- 41 3.1 电池基础
- 44 3.2 铅蓄电池储能系统
- 47 3.3 钠硫电池储能系统
- 48 3.4 氧化还原液流电池储能系统
- 51 3.5 锂离子电池储能系统
- 58 3.6 电池能源系统综合分析
- 59 思考题与习题

于动力学的范畴。为了提高输入输出特性，如何降低电池的内阻是需要始终关注的课题。

3. 电池的循环特性

电池的放电反应为自发反应，但是充电反应，就需要外部给电池提供能量，几乎100%恢复至原来的活性物质。对于一般的化学反应，99%的回收率是非常高的值，但是对于二次电池而言，如果回收率是99%的话，则为劣化大的二次电池。如果每次充电后，99%的活性物质恢复原来的状态，则100次充电后

$$(0.99)^{100}=0.37$$

因此，为了实现500次，1000次的充电，起码要有99.95%的效率，此时

$$(0.9995)^{500}=0.78$$

$$(0.9995)^{1000}=0.61$$

劣化主要与活性物质种类、工作温度、充放电的截止电压等因素有关。

3.2 铅蓄电池储能系统

1. 铅蓄电池的原理和特点



数字资源
3.2.1 示范案例：
典型的铅炭电池
储能电站

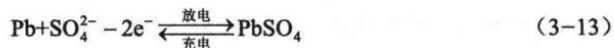
作为最早使用的电池，经过百余年的发展与完善，铅酸蓄电池已经成为世界上最广泛使用的化学电源之一，其具有可逆性良好、电压特性平稳、适用范围广、循环寿命长、造价低廉等优点，已经应用于交通运输、通信、电力、矿山、港口、国防等各个领域，是社会生产经营活动中不可或缺的重要产品。

铅酸电池的化学表达式为

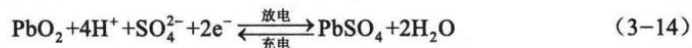


其正极活性物质是 PbO_2 ，负极的主要活性物质是海绵状的金属 Pb ，电解质是稀 H_2SO_4 水溶液。

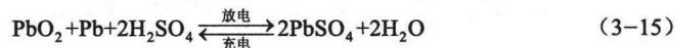
在工作时，负极反应的化学方程式为



正极反应化学方程式为



总电池反应化学方程式为



铅蓄电池由正极板群、负极板群、电解液和容器等组成。极板是蓄电池的核心部

件,由耐腐蚀且有一定强度的材料制成,呈栅格网状。充电后的正极为棕褐色的二氧化铅(PbO_2),负极为灰色的绒状铅(Pb),电解质为浓度为27%~37%的硫酸(H_2SO_4)水溶液。隔板是用来防止正负极短路的,具有耐酸特性,多细孔,便于电解液渗透。外部壳体用以盛放电解液和极板组,壳体多采用聚丙烯塑料制成。

由于正负电荷的引力,铅正离子聚集在负极板的周围,而正极板在电解液中水分子作用下有少量的 PbO_2 渗入电解液,其中两价的氧离子和水化合,使二氧化铅分子变成可离解的不稳定的氢氧化铅 $[\text{Pb}(\text{OH})_4]$ 。四价的铅正离子(Pb^{4+})留在正极板上,使正极板带正电。由于负极板带负电,两极板间就产生了一定的电位差。在放电过程中,外电路接通,电流由正极流向负极,负极板上的电子不断经外电路流向正极板,这时在电解液内部因硫酸分子电离成氢正离子(H^+)和硫酸根负离子(SO_4^{2-}),两种离子分别向正负极移动,硫酸根负离子到达负极板后与铅正离子结合成硫酸铅(PbSO_4)。在正极板上,由于电子自外电路流入,与4价的 Pb^{4+} 反应生成2价的铅正离子(Pb^{2+}),并立即与正极板附近的硫酸根负离子结合成 PbSO_4 附着在正极上。简而言之,放电过程中 Pb^{2+} 转移到电解液中,在负极板上留下两个电子($2e^-$)。

从化学反应方程式中可以看出,铅酸蓄电池在放电时,正极的活性物质 PbO_2 和负极的活性物质 Pb 都与硫酸电解液反应,生成 PbSO_4 ,在电化学上将这种反应称为“双硫酸盐化反应”。在蓄电池刚放电结束时,正、负极活性物质转化成的硫酸铅是一种结构疏松、晶体细密的物质,活性程度非常高。充电时,正、负极形成的疏松细密的硫酸铅在外界充电电流的作用下会重新变成二氧化铅和铅,蓄电池又处于充足电的状态。

铅蓄电池是能反复充放电的二次电池,它的工作电压是2V。在实际应用中,通常把三个铅蓄电池串联起来使用,组成电压为6V的电池组。例如,汽车上用的启动电源通常是6个铅蓄电池串联成12V的电池组。铅蓄电池的使用需要维护。根据反应机理,在放电时电解液的浓度不断降低,两个极板上的硫酸铅越来越多,过度放电则会在极板上形成“硫酸铅的结晶”,失去反应活性,因此在使用时需要在电量剩下20%~30%及时充电,防止亏电行驶。此外,由于铅蓄电池内部一直存在微弱的自放电,长期不用会使电量严重亏损直至电池报废。而在充电时,电解液的浓度不断升高,水含量越来越少,极板的温度也在升高。过分充电容易造成电解液中“水被电解”,产生气体,电池鼓包,电极上的活性物质会脱落,降低电池的使用寿命。此外,铅酸电池的平均寿命在三年左右,需要定期进行更换。由于铅酸电池中含有大量的铅,会对环境产生较大的负面影响,因此,废旧的铅酸电池应当送至专业回收处,避免随意丢弃造成污染。

2. 铅蓄电池技术动向

除传统的铅蓄电池外,铅炭电池等新型铅酸电池技术正在研发中。该技术尝试通过改

变电极材料和反应机制，提高铅酸电池的性能和循环寿命，为储能领域提供更多选择。

铅炭电池是一种融合了传统铅酸电池和超级电容器特征的混合储能装置，将活性炭材料添加到负极铅材料中，部分或全部替代传统铅酸电池负极中的活性物质，或使用泡沫碳作为负极集流体代替传统铅或铅合金集流体。电池的循环寿命取决于其电化学反应的可逆程度，而负极材料的储能能力限制了电池整体的循环寿命。在高倍率部分荷电状态下， PbSO_4 化合物的溶解和沉积过程中存在可逆与不可逆两种过程。由于微小的 PbSO_4 颗粒易发生溶解，电极活性物质微孔结构中的 Pb 离子浓度升高。部分 Pb^{2+} 离子形成大颗粒的 PbSO_4 ，而大粒径的 PbSO_4 颗粒不易发生溶解并还原成 Pb 单质（该过程为不可逆过程）。这两种反应的占比影响了铅酸电池在高倍率部分荷电状态下的循环寿命。活性炭颗粒的加入促进了负极中活性物质充放电中可逆反应的进行，有效增加了电池的循环寿命。

与传统铅酸电池相比，铅炭电池具有以下特点：

- (1) 充电速度约为传统铅酸电池的 10 倍左右。
- (2) 循环寿命相比较于传统铅酸电池可延长 4~8 倍。
- (3) 铅炭电池通常具有更高的能量密度，可以在相同体积下存储更多的电能。
- (4) 自放电率相对较低，这意味着铅炭电池可以更长时间地保持充电状态而不会快速失去电能。
- (5) 铅炭电池使用的材料更可持续，同时在生产和处置阶段对环境的影响更小。
- (6) 能够在更广泛的温度范围内工作，具有更好的适用性。

然而，铅炭电池也有一些局限性和劣势，比如其制造成本通常较高，重量较大，深度放电能力仍相对有限，因此不适用于大功率或需要频繁快速充放电的应用场景（如调频等）。铅炭电池能量密度较低，主要适用于对储能体积、重量要求不高的场合。综上所述，铅炭电池的使用还取决于具体应用的需求和成本效益。

3. 储能用长寿命铅蓄电池

虽然铅蓄电池在比能量方面不占有优势，但其安全、价格低、使用温度范围宽、具有很好的性价比，因此铅蓄电池被认为是短期内能够满足储能需求的重要方案，其远期目标为达到 2000 次长循环。

为了选出合适的铅蓄电池，需要全面分析铅蓄电池充电和放电的需求，包括负载、输出、能源类型、操作温度以及其他系统组件的效率等。采用碳阳极替代传统铅阳极的方式延长铅蓄电池的寿命，但此方法需要将阴极中铅的含量增加数倍，因此大幅增加了电池的成本和重量。目前已经商品化的铅炭电池（100Ah）不需要维护操作，其月自放电率小于 5%，在 8h 内可充满电，并且在 80% 放电深度条件下可循环 1000~2000 次。