

磷酸铁锂电池在石化电源装置中的应用研究

周 宁, 张嘉嘉

(中国石化工程建设有限公司, 北京 100101)

摘要: 随着石油化工装置规模日趋增大, 大型的220 kV、110 kV总变电站及35 kV区域变电站大量出现。因石油化工装置规模大, 需设置能够满足石油化工装置需求的电源装置。目前在石油化工电源装置中常用的电池类型为阀控式密封铅酸蓄电池, 与该类电池相关的国家标准、行业标准的要求较为严苛。磷酸铁锂电池近些年技术发展较为成熟, 其应用发展在国家新能源战略中占有重要地位。通过对两类电池在安全、环保、记忆效应、放电性能和经济性等方面的分析和对比, 详述磷酸铁锂电池在石油化工装置中的应用前景研究。

关键词: 石油化工; 新能源; 电源装置; 锂电池

Application of lithium iron phosphate battery in petrochemical power supply equipment

ZHOU Ning, ZHANG Jiajia

(Sinopec Engineering Incorporation, Beijing 100101, China)

Abstract: With the increasing scale of petrochemical plants, a large number of 220 kV, 110 kV main substations and 35 kV regional substations appear. Due to the large scale of petrochemical plants, it is necessary to set up power supply devices that can meet the needs of petrochemical plants. At present, the battery type commonly used in petrochemical power supply device is valve-regulated sealed lead-acid battery, and the requirements of national and industrial standards related to this type of battery are more stringent. In recent years, the technology development of lithium iron phosphate battery is relatively mature, and its application development plays an important role in the national new energy strategy. In this paper, through the analysis and comparison of the two types of batteries in safety, environmental protection, memory effect, discharge performance, economy, etc., the application prospect of lithium iron phosphate battery in petrochemical plant is described in detail.

key words: petrochemical industry; new energy; power supply unit; lithium battery

0 引言

随着石油化工装置规模日趋增大, 大型的220 kV、110 kV总变电站和35 kV区域变电站大量出现。随之而来的是对直流电源、UPS和EPS容量需求的增加。上述设备共同的特征是设备中均包含电池。目前常用的电池类型为阀控式密封铅酸蓄电池, 其特点是与之相关的国家标准、行业标准要求较为严苛, 工程设计略显复杂。若找

寻一种在安全、环保等方面较为有优势又兼顾简化工程设计的电池类型, 将会在石油化工电源装置中有较广阔的应用前景。

1 阀控式铅酸蓄电池的原理和特性研究

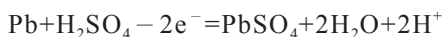
阀控式铅酸蓄电池的正极材料为铅-锑-钙合金栏板, 其中含氧化铅为活性物质; 负极材料为铅-锑-钙合金栏板, 其中含海绵状纤维活性

物质；隔板材质是无纺超细玻璃纤维，电解液是硫酸，外壳和盖材质是ABS树脂。

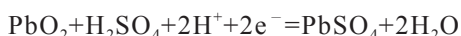
阀控式铅酸蓄电池放电的总反应式为



阀控式铅酸蓄电池的正负极反应是分开的，但同时进行。在接通外电路放电时，负极上的铅失去电子氧化成二价铅（ Pb^{2+} ），反应式为



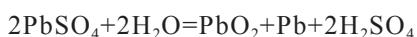
正极放电时，四价铅（ Pb^{4+} ）得到电子，还原成二价铅（ Pb^{2+} ），反应式为



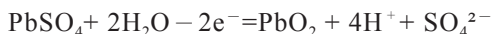
正负极上的铅离子是微量的，它与硫酸根离子形成硫酸铅（ PbSO_4 ）。随着反应的进行，电解液中的硫酸与正负极板中的二价铅（ Pb^{2+} ）不断形成 PbSO_4 ，结晶在极板上，电解液中的硫酸浓度逐渐降低。

阀控式铅酸蓄电池在连接上直流电源充电时，负极上的硫酸铅中的二价铅（ Pb^{2+} ）被还原成铅（ Pb ），硫酸析出，进入电解液，该反应是负极放电反应的逆反应。正极上硫酸铅中的二价铅（ Pb^{2+} ），氧化成四价铅（ Pb^{4+} ），形成二氧化铅（ PbO_2 ），硫酸析出，进入电解液，该反应是正极放电反应的逆反应。

阀控式铅酸蓄电池充电的总反应式为

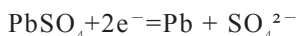


阀控式铅酸蓄电池充电的正极反应式为



由此可看出，当阀控式铅酸蓄电池充电时，正极板发生水解反应，引起氧气析出，产生氢离子。氧气和氢离子通过隔板中的气体通道和液体通道扩散至负极板。到达负极板之后，氧气发生还原反应，与氢离子反应生成水。生成的水通过隔板扩散到正极板，正极板电解的水得以恢复。

阀控式铅酸蓄电池的负极反应式为

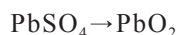


充电期间，第一个电池运行体系是在电池荷电状态达到70%之前，负极板只发生充电反应，

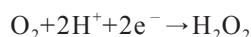
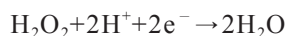
反应式为



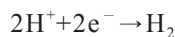
第二个电池运行体系是在电池荷电状态达到70%时，正极板开始发生水分解反应，并伴随着氧气析出，同时发生基本的充电反应



析出的 O_2 经过隔板气体通道，到达负极板之后，通过以下两个反应被还原



第三个电池运行体系是在电池荷电状态达到92%~95%时，负极板铅表面开始发生氢析出反应，即



当极板完全充电后，第一个电池体系停止运行，氧还原反应和氢析出反应开始以不同速率进行。 H_2 在正极板的氧化是一个缓慢反应。析出的 H_2 存在于电池中，引起极群上方的气体压力增大，阻碍了氧化还原反应。当气体压力超过临界值时，安全阀开启，氢氧混合气体排放至周围大气中，引起电池失水。

由上述反应式可以看出，阀控式铅酸蓄电池在第一个电池体系停止运行后，将会有氢气析出。根据GB/T 19638.1—2014《固定型阀控式铅酸蓄电池 第1部分：技术条件》^[1]第5.2.1条中叙述，单体蓄电池平均每安时对外释放出的气体量 G_e 、 G_e' 在标准状态下应符合下述规定值：①在20℃及单体蓄电池电压为 U_{no} （V）浮充条件下 $G_e \leq 0.04 \text{ mL}$ ；②在20℃及单体蓄电池电压为2.4 V浮充条件下 $G_e' \leq 1.70 \text{ mL}$ 。

2 国内外规范对阀控式铅酸蓄电池的要求

2.1 与爆炸危险区域划分相关的规范要求

根据国家标准GB 50058—2014《爆炸危险环境电力装置设计规范》附录B第23条规定：

1) 蓄电池应属于IIC级的分类。

2) 当含有可充电镍—镉或镍—氢蓄电池的封闭区域具备蓄电池无通气口，其总体积小于该封

闭区域容积的1%，并在1 h放电率下蓄电池的容量小于1.5 A·h等条件时，可按照非危险区域考虑。

3) 当含有除本款第2项之外的其他蓄电池的封闭区域具备蓄电池无通气口，其总体积小于该封闭区域容积的1%或蓄电池的充电系统的额定输出不大于200 W并采取了防止不适当过充电的措施等条件时，可按照非危险区域考虑。

4) 含有可充电蓄电池的非封闭区域，通风良好，该区域可划为非危险区域。

5) 当所有的蓄电池都能直接或者间接地向封闭区域的外部排气时，该区域可划为非危险区域。

6) 当配有蓄电池、通风较差的封闭区域具备至少能保证该区域的通风情况不低于满足通风良好条件的25%及蓄电池的充电系统有防止过充电的设计时，可划为2区；当不满足此条件时，可划为1区。

经对比可以看出API RP 505与GB 50058的内容完全相同，但API RP 505在8.2.6.3中有1条说明：“阀控式铅酸蓄电池的释放阀也被认定为电池通气孔。”这在GB 50058中是没有的，因此当采用阀控式铅酸蓄电池时，其释放阀应作为通气孔考虑。

由国内外权威规范相关条文可以看出，蓄电池应作为释放源，进行爆炸危险区域的划分。阀控式铅酸蓄电池的阀作为通气孔考虑，因此，电源装置如果配置了阀控式铅酸蓄电池，除非处于满足通风良好的非封闭区域的条件可以视为正常环境外，其他都应按爆炸危险环境考虑。

2.2 与蓄电池室相关的规范要求

DL/T 5044—2014《电力工程直流电源系统设计技术规程》第7.2.1条中规定，“阀控式密封铅酸蓄电池容量在300 A·h及以上时，应设专用的蓄电池室。专用蓄电池室宜布置在0 m层。”

GB 50172—2012《电气装置安装工程蓄电池施工及验收规范》第3.0.7条为强制性条文，其内容为“蓄电池室应采用防爆型灯具、通风电动机，室内照明线应采用穿管暗敷，室内不得装设

开关和插座。”

GB 50059—2011《35kV~110kV变电站设计规范》第4.5.4条规定：“免维护式蓄电池的通风空调系统设计，应设置换气次数不少于3次/h的事故排风装置，事故排风装置可兼作通风用。免维护蓄电池室的排风机及其电动机应为防爆型。”

GB 50229—2019《火力发电厂与变电站设计防火标准》第8.3.4条规定：“设置在蓄电池室内的通风机及其电动机应为防爆型，并应直接连接；当蓄电池室内未设置氢气浓度检测仪时，排风机应连续运行；当蓄电池室内设有带报警功能的氢气浓度检测仪时，排风机应与氢气浓度检测仪联锁自动运行。”

2.3 小结

通过与爆炸危险区域划分相关的规范要求和与蓄电池室相关的规范要求可以看出，当石油化工电源装置容量较大时，阀控式铅酸蓄电池的容量可能会超过300 A·h，如果考虑设置专用的电池室，可以遵守上述标准规范的要求，设置事故排风，采用联锁设施和防爆灯具等。但GB 50058对蓄电池的划分完全以通风条件、电池种类、通气孔和体积比等因素决定，与电池容量无关，因此如果符合GB 50058规定，就得采用通风良好的措施及联锁备用措施等。目前的设计对标准的理解各不相同，做法也多种多样，但至少应满足1 h换气6次，当风机故障时，启动备用风机。这样才能符合规范要求。如此一来，对电源装置室（如AC UPS等）的排风做法局限性很大，风机的故障率要求很低，爆炸危险环境完全取决于风机，造成相关专业设计的压力很大，不易执行。如何从本质安全角度来满足标准规范的要求成为主要因素，采用不含通气孔，充电时不产生危险气体的电池，则上述问题迎刃而解。寻找合适的电池成为关键。

3 磷酸铁锂电池的原理和特性研究

磷酸铁锂电池属于锂电池的一种，是国家新

能源战略中的重要组成部分,在电动汽车、通信等领域已经有较为广泛的应用。在电动汽车中,磷酸铁锂电池能满足各种严苛环境和各种气候温度,同时有很高的安全性,通过火烧、穿刺等试验,已经被证明是很可靠的储能电池。

磷酸铁锂电池的正极材料为磷酸铁锂,负极材料为石墨,隔膜材质是聚合物隔膜,电解质是六氟磷酸锂(LiPF_6),外包装材料是金属外壳或铝塑复合膜。

磷酸铁锂电池内部结构如图1所示,图面左侧是橄榄石结构的 LiFePO_4 作为电池的正极材料,由铝箔与电池正极连接,中间是聚合物的隔膜,它把正极与负极隔开,锂离子 Li^+ 可以通过而电子 e^- 不能通过;图面右侧是由碳(石墨)组成的电池负极材料,由铜箔与电池的负极连接。电池的上下端之间是电解质,电池由金属外壳或铝塑复合膜密封封装。

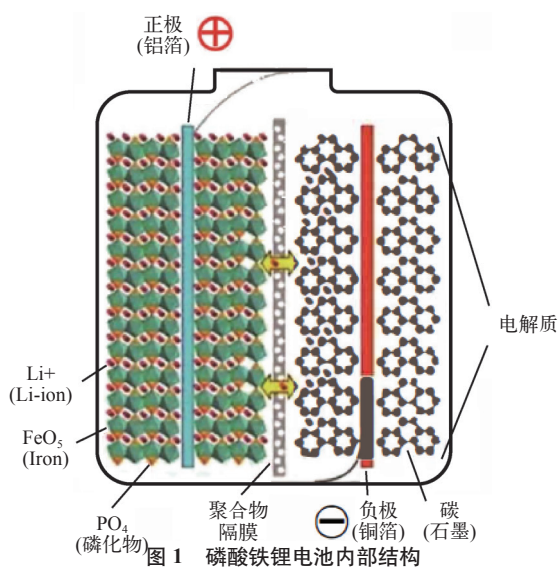


图1 磷酸铁锂电池内部结构

充电时,锂离子从正极脱出,嵌入负极;放电时,锂离子则从负极脱出,嵌入正极。即在充放电过程中,锂离子在正、负极间嵌入、脱出,往复运动。在正常充放电情况下,锂离子在层状结构的碳材料和氧化物晶体间或片层间嵌入和脱出,一般只引起层间距的变化,而不会引起晶体结构的破坏。充放电的过程中,正、负极材料的

化学结构基本不发生变化,因此从充放电反应的可逆性来讲,锂离子电池材料中的嵌入和脱出是一个理想的反应过程。正是基于以上特点,锂离子电池在性能上比铅酸蓄电池更为优越。

通过分析阀控式铅酸蓄电池和磷酸铁锂电池的原理和特性,可以看出磷酸铁锂电池在多方面性能均优于阀控式铅酸蓄电池。下面从能量密度、比能量和放电倍率等角度对两类电池进行分析与对比,如表1、表2所示。

表1 磷酸铁锂电池与阀控式铅酸蓄电池技术参数对比

Tab. 1 Technical parameters comparison of between LiFePO_4 battery and VRLA battery

	阀控式铅酸蓄电池	磷酸铁锂电池
能量密度/(W·h/L)	70	210
比能量/(W·h/kg)	30~45	120~165
放电倍率	一般为0.1~0.2倍	一般为2~5倍放电速率,最高可达10倍
循环次数	300~400次	2000次以上
工作温度/℃	-20~50(正常使用温度为20~25℃,温度每升高10℃,寿命降低一半;温度每降低1℃,容量下降1%)	-40~60(-40℃时,放电容量大于90%,55℃时仍可满容量放电且不影响使用寿命)
温度补偿	不同温度下化学反应程度差别大,需进行温度补偿	受温度影响不大,无须进行温度补偿
均衡功能	无	有

4 磷酸铁锂电池在石化电源装置中的应用前景

阀控式铅酸蓄电池含铅、镉等重金属,电解液为浓酸,对人体危害较大;废旧电池拆解回收的过程也对环境有污染。且由于作为氢气释放源,在设计过程中需考虑是否设置蓄电池室。当设置专用的蓄电池时,也需满足国家标准中的相应技术要求,这使石油化工电源装置的设计过程变得烦琐。

通过表1和表2的分析可以看出,磷酸铁锂电池在能量密度和比能量的数值上均优于阀控式铅酸蓄电池,当采用相同容量的蓄电池时,磷酸铁锂电池的重量和体积仅约为阀控式铅酸蓄电池的1/3,且其支持快速充电和放电的能力,并且使用寿命也更长。磷酸铁锂电池还拥有温度特性优异、适应环境的能力强、安全环保和免维护等

表2 磷酸铁锂电池与阀控式铅酸蓄电池技术性能对比

Tab. 2 Technical performance comparison between LiFePO_4 battery and VRLA battery

	阀控式铅酸蓄电池	磷酸铁锂电池
安全性	差 (充电过程有氢气析出, 易燃易爆; 电解液为浓酸, 漏液会造成短路起火)	好 (充放电过程中无气体和液体溢出, 经高温、过电充、跌落、针刺和挤压等安全试验不起火不爆炸)
环保方面	有毒、有污染 (含铅、镉等重金属, 电解液为浓酸, 对人体危害较大; 废旧电池拆解回收的过程对环境污染严重)	无毒、无污染 (磷酸铁锂电池不含有任何污染物, 符合欧盟 RoHS 规定, 对环境没有危害)
记忆效应	有 (阀控式铅酸蓄电池长期处于浮充电状态, 极板会产生硫化现象, 紧急情况下可能发生无法放电的情况)	无 (磷酸铁锂电池没有记忆效应, 可以随时充电、放电, 且放电充分)
放电性能	阀控式铅酸蓄电池放电深度一般为 70 ~ 80%, 超过 80% 会对蓄电池造成损伤	磷酸铁锂电池可全容量放电, 而不影响电池寿命
维护	定期核对性充放电 (每季度或半年需对蓄电池组进行核对性充放电)	免维护 (磷酸铁锂电池无须定期核对性充放电, 免维护)
智能化	本身不具备智能化, 需要外配蓄电池测试装置和充放电管理系统才能完成电池系统的管控	自身配置电池管理系统, 可完成电池单体监测、均衡等管控功能

优点, 不需要考虑氢气释放源等问题。

磷酸铁锂电池组的容量可根据具体需求灵活配置, 其容量为 10 ~ 600 A·h。其可通过单体并联的形式实现容量的叠加, 通过串联的形式实现电压平台的提升, 最终形成高电压大容量的电池组。如图2所示, 大容量磷酸铁锂电池组主要由电芯、电池管理系统(BMS)和保护电路等组成。电池管理系统(BMS)由主控单元(CMU)、数据采集单元(BMU)及界面通信单元(ICU)等组成。

BMS中的数据采集单元负责采集电池组的各电芯的电压、充放电电流和温度等数据, 并对电芯进行均衡管理和充放电保护。保护功能主要包含过充电保护、过放电保护、短路保护、过载保护和过温保护。BMS中的主控单元手机数据采集单元的数据, 对电池组数据进行集中分析和处理, 根据电池组的运行状况进行报警和控制。

主控单元(CMU)主要完成以下功能: SOC精确动态估算; 对电池组充放电过程中的

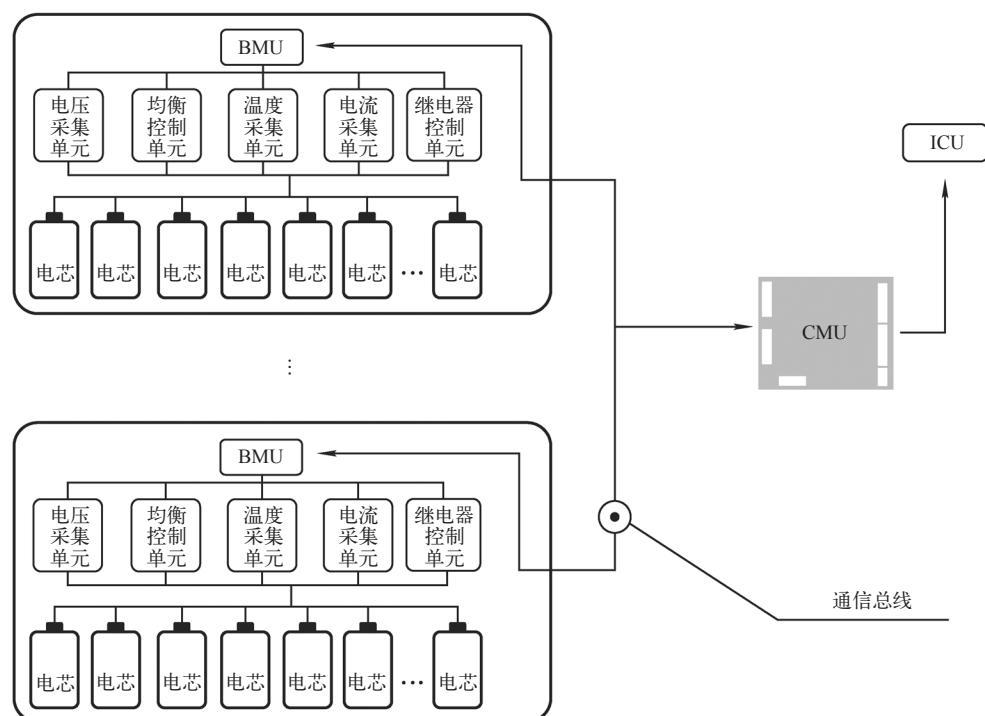


图2 磷酸铁锂电池组构架

Fig. 2 Structure of LiFePO_4 battery pack

电流进行实时监测；实时显示电池组的各种信息（电压、电流、温度、SOC和充放电状态等）；当出现故障时，蜂鸣器发出报警提示，显示具体故障类型，通过控制单元实现相应的保护。

数据采集单元（BMU）可完成8~24节电芯的数据采集、电压均衡以及充放电保护功能，以保持并联电芯充电电源的一致性，从而保护所有电芯在充电过程中的安全稳定。数据采集单元将采集到的电芯电压、温度等信息通过总线传输到主控单元。

界面通信单元（ICU）是电池管理系统的人机交互界面，通过RS 485\RS 422总线进行通信，可以显示系统的各种运行参数及故障情况，且具备多个外部通信接口，可与包括直流电源、UPS、EPS、保护继电器、SCADA系统和DCS等系统和设备接口。同时具有适合电力系统的常用电力规约，包括Modbus-RTU、CDT、IEC 101、IEC 103、IEC 104和IEC 61850等。

磷酸铁锂电池与阀控式铅酸蓄电池相比，除了同容量体积更小、重量更轻和安全性更好外，磷酸铁锂电池还可以高倍率放电，更适合后备时间较短、电流较大的直流电源、UPS和EPS。由于其电池组组合的灵活性，可以根据直流电源、UPS、EPS母线电压和所需容量，配置不同电压等级、不同容量的磷酸铁锂电池组。

5 结束语

目前磷酸铁锂电池的单位容量价格由于其市

场广泛应用已愈发低廉，虽然相对于铅酸蓄电池的成本稍高，但具备高可靠性、日常维护、设计简单、本质安全、电池循环次数高、放电深度大和无记忆效应等优势。

综上所述，在石油化工装置的电源装置中采用磷酸铁锂电池组取代现有的阀控式铅酸蓄电池完全满足工程设计和建设单位的需要，符合科技发展的方向。

参考文献

- [1] 中国国家标准化管理委员会. 固定型阀控式铅酸蓄电池 第1部分：技术条件：GB/T 19638.1—2014[S]. 北京：中国标准出版社，2014.
- [2] 中华人民共和国住房和城乡建设部. 爆炸危险环境电力装置设计规范：GB/T 50058—2014[S]. 北京：中国计划出版社，2014.
- [3] 电力设计规划总院. 电力工程直流电源系统设计技术规程：DL/T 5044—2014[S]. 北京：中国计划出版社，2014.

作者简介



周 宁

周宁（1974），高级工程师，主要从事石油化工行业电气设计工作。

（收稿日期：2020-6-14）**EA**