

储能与液流电池技术

张华民

(中国科学院大连化学物理研究所, 辽宁 大连 116023)

摘要: 大规模高效储能技术是解决可再生能源发电不连续、不稳定、不可控特性的重要途径,也是构建坚强智能电网的核心技术。本文对各种储能技术进行了综合分析,并对适用于大规模储能的抽水储能、压缩空气储能、钠硫电池、锂离子电池、铅酸电池和液流电池的技术特点、优劣势、发展前景进行了深入阐述;最后,对储能技术的发展思路进行了探讨,认为坚持技术开发与应用示范并重,进一步降低储能设备成本,提高其可靠性和稳定性并辅以一定的鼓励政策,是推进储能技术的产业化和实用化的重要途径。

关键词: 抽水储能; 压缩空气储能; 钠硫电池; 锂离子电池; 液流电池

中图分类号: TK 02

文献标志码: A

文章编号: 2095-4239 (2012) 01-058-06

Development and application status of energy storage technologies

ZHANG Huamin

(Dalian Institute of Chemical Physics, Chinese Academy of Sciences, Dalian 116023, Liaoning, China)

Abstract: The application and development of energy storage technologies has gotten an increased attention as an essential device of future power system that use large amount of variable renewable resources. Energy storage enables to smooth the variation and uncertainty. In this paper, the existing energy storage technologies are evaluated. The technologies for large scale electricity storage, such as pumped hydro, compressed air energy storage, sodium sulfur battery, lithium battery, lead acid battery and flow battery are analyzed in detail. The success of these applications of energy storage will depend on the cost and the performance. It is believed that reducing the cost, improving the durability and reliability and assisting with incentive policies are the key issues to achieve the commercialization of energy storage.

Key words: pumped hydro; compressed air energy storage; sodium sulfur battery; lithium battery; flow battery

1 储能技术开发背景

能源是国民经济可持续发展和国家安全的重要基础。随着社会和经济的发展,对能源需求日益增加,化石能源的大量消耗所造成的环境压力日益突出。因此,节约化石能源,提高化石能源利用效率,实现节能减排以及大规模利用可再生能源,实现能源多样化成为世界各国能源安全和经济可持续发展的重要战略。德国政府决定,到2020年,可再生能源在整个能源消费中占到35%,到2030年达到

50%,到2050年将达到80%^[1];美国能源信息署推测,到2030年,美国电力供应量约有40%来自于可再生能源发电;到2020年,日本可再生能源消费将占到总电力消费的20%,2030年将达到34%;我国的规划是到2020年,可再生能源在全部能源消费中将达到15%。由此可见,可再生能源正在由辅助能源逐渐转为主导能源。

风能、太阳能等可再生能源发电受时间、昼夜、季节等因素影响,具有明显的不连续、不稳定及不可控的非稳态特性,不仅进一步加重了电网系统调峰难度,还会对电网的电压、频率、谐波等电能质量造成不良影响,严重时危害电网负荷的安全稳定运行。

大规模高效储能技术是解决可再生能源发电非稳态特性的重要途径，也是构建坚强的智能电网的核心技术。推进太阳能、风能等可再生能源发电技术的普及应用，建立包括高效储能技术在内的智能电网，提高对可再生能源发电的兼容性和能源利用效率是解决我国能源安全、实现节能减排目标的重要途径，是国民经济可持续发展的重大需求。

发展储能技术已成为世界各国关注和支持的焦点。许多国家都将大规模储能技术定位为支撑新能源发展的战略性技术。美国布什总统签署的“2007年能源自主与安全法案”中明确规定：为支持美国在储能技术方面的全球竞争力，要求能源部成立1个储能技术咨询委员会，负责咨询制定储能技术研究计划^[2]。2009年10月，美国总统奥巴马宣布政府将出资34亿美元启动美国“智能电网”项目建设^[3]，旨在提高能源利用效率，同时为将来更多可再生能源的大规模推广应用创造条件。2011年2月美国能源部发布的“美国2011—2015年储能规划”^[4]中明确对液流电池、钠基电池、锂离子电池、先进铅碳电池等储能技术的近期和远期发展目标。2012年2月，美国能源部宣布投资1.2亿美元建设先进电池储能创新中心^[5]，加快用于交通和电网的电池储能技术的研究开发，希望通过这个能源创新中心的跨学科研究和发展，促进先进储能电池技术的发展，提高电网的可靠性和效率，更好地集成清洁可再生能源技术作为电力系统的一部分，同时电动汽车和混合动力汽车的使用可以减少国家对进口石油的依赖。2011年5月，德国经济技术部牵头联合推出了2亿欧元储能技术研究开发计划，液流电池和压缩空气储能是支持的重点^[6]。

我国政府高度重视储能技术的研究开发与实际应用，2009年12月，第十一届全国人大常委会第

十二次会议表决通过了关于修改《中华人民共和国可再生能源法》的决定，该法案规定，电网企业应当按照可再生能源开发利用规划建设，依法取得行政许可或者与报送备案的可再生能源发电企业签订并网协议，全额收购其电网覆盖范围内符合并网技术标准的可再生能源并网发电项目的上网电量，发电企业有义务配合电网企业保障电网安全。法律还规定，电网企业应当加强电网建设，扩大可再生能源电力配置范围，发展和应用智能电网、储能等技术，完善电网运行管理，提高吸纳可再生能源电力的能力，为可再生能源发电提供上网服务。

国家发展与改革委员会在《产业结构调整指导目录（2011年本）》中已将“大容量电能储存技术开发与应用”列为重点支持对象[鼓励类（四）电力第20条]，并在其联合科技部、工信部、商务部、知识产权局发布的《当前优先发展的高技术产业化重点领域指南（2011年度）》公告中明确将动力电池及储能电池技术开发列为当前优先发展的高技术产业化项目。作为能源行业主管部门的国家能源局在《国家能源科技“十二五”规划（2011—2015）》（国能科技[2011]395号）中也明确了储能技术的发展目标。另外，国家科技部在智能电网重大科技产业化工程“十二五”专项规划中明确提出大规模储能技术在风力发电中的应用示范要求，并在国家高技术研究发展计划（863）项目和国家重点基础研究发展计划（973）项目立项支持储能基础理论研究和应用技术开发。

2 储能技术的种类

到目前为止，已经开发了多种形式的电能储存技术^[7-9]，主要可分为物理储能和化学储能两大类。表1给出了几种主要的储能技术及其特点。已经实

表 1 各种储能技术及其特点
Table 1 The different energy storage technologies and their features

分 类	种 类	特 点
化学储能	铅酸电池	初次投资成本低，寿命短，污染大，回收成本高 规模大，功率和容量独立，寿命长，能量密度低 能量密度及功率密度高，成本高，安全性差 能量密度非常高，充放电性能不佳 能量密度、功率密度高，安全隐患大
	液流电池	
	钠硫电池	
	金属空气电池	
	锂离子电池	
物理储能	抽水储能	容量大，技术成熟，受地理环境限制 容量大，受地理环境限制 功率高，能量密度低，成本高，技术需要完善 功率高，能量密度低，成本昂贵 效率高，寿命长，能量密度低，放电时间短
	压缩空气储能	
	飞轮储能	
	超导磁储能	
	超级电容器	

现商业化或达到示范应用水平的物理储能技术主要有抽水储能、压缩空气储能、飞轮储能、超导储能及超级电容器,化学储能技术主要有铅酸电池、液流电池、钠硫电池、金属空气电池及先进二次电池,如镍氢电池、锂离子电池。

根据各种应用领域对储能功率和储能容量要求的不同,各种储能技术都有其适宜的应用领域。其中,可用于大规模储能的主要有液流电池、钠硫电池、锂离子电池、抽水储能和压缩空气储能等。对于大规模储能而言,除了在技术上满足应用要求外,安全性、生命周期性价比、使用寿命和生命周期内的环境负荷是四项关键衡量指标。由于大规模储能技术输出功率和储能容量大,发生安全事故的危害和损失会很大,因此发展相应储能技术的首要条件是安全可靠。近年,兆瓦级钠硫储能电池和锂离子电池应用示范出现了重大的安全事故,解决其安全性是当务之急。下文就几种已进入商业化应用示范的大规模储能技术加以论述。

2.1 抽水储能

抽水储能是目前技术上较为完善的大规模储能方式,对于平衡负载、削峰填谷起着十分重要的作用。抽水储能系统有传统的江河大坝高低位储水池方式和新型海水抽水储能、地下储水抽水储能方式,前者受设置条件、地形及环境的制约较大,后者受环境及地形的制约较小,建设成本相对较低,近年来受到了高度重视。

在江河上建设的抽水储能电站需要设置“高位储水库”和“低位储水库”两个调整地,在夜间或假日电网用电负荷低谷时,使用抽水设备利用电网中的电能把“低位储水库”的水抽到“高位储水库”中,以势能方式蓄存起来,在电网用电高峰时,再放水至“低位储水库”发电。它可将电网负荷低时的多余电能转变为势能的形式储存,在用电高峰时再转变为电能,在电力系统中具有调峰填谷、事故备用、调频、调幅等多种功能,是最成熟的大规模电能储存技术,储存能量的释放时间可以从几小时到几天,综合能量效率在70%左右。海水抽水储能发电系统的“低位储水库”是大海,将海水抽水到高位储水池储存即可。与淡水抽水发电相比,海水抽水发电不需要建设“低位储水库”,节省建设费用,但由于使用海水,所以对水管及抽水设备的耐蚀性和防止海生物附着方面有特殊要求^[10]。

抽水蓄能电站的建设受到地形、生态环境等条

件的限制。例如,在站址的选择上需要有水平距离小、高低位储水池高度差大的地形条件,岩石强度高、防渗性能好的地质条件以及充足的水源保证储能用水的需求;如果建设地远离负荷中心地点,输电线路的投资大、线损大、总投资也高;另外还有高、低位储水池的库区淹没问题,水质的变化以及库区土壤盐碱化等一系列环保问题需要考虑。

2.2 压缩空气储能

燃气轮机发电时,发电机与同轴的空气压缩机同时转动,产生压缩空气,利用此压缩空气使燃料燃烧发电,而空气压缩过程需要消耗大量的电能。如果通过其它途径提供发电时所需的压缩空气,燃气轮机的全部输出都用于发电,同样大小的燃气轮机可提供更多的电能。利用用电低谷时的电力把空气压缩并储存,用电高峰时通过气体涡轮机发电,这样不用增加涡轮机设备就可以增加高峰时的发电量,起到削峰填谷、平衡负载的作用^[11-12]。

现在运行及开发的压缩空气储能系统从运行效率着眼,压缩空气的压力为3~8 MPa,压力越高空气的储存量越多。压缩空气储槽的建设方式主要有地下岩洞储槽和海底储槽两种方式。地下岩洞储槽是在坚实的岩石中挖掘出空洞,岩洞周围岩石的耐压性和气密性要好,海底储槽是将气密性好、耐压性高的储槽沉在海底,通过海水的压力提高储槽的耐压性。

压缩空气储能技术在欧美已经达到商业化运行水平,1979年德国建成了输出功率290 MW的压缩空气储能发电厂,1991年美国建成了输出功率110 MW的压缩空气储能发电厂并开始商业运行^[12]。这两个发电厂都以地下岩层中挖掘出的岩洞作为压缩空气的储槽。德国发电厂的岩洞在地下720 m处,是由两个直径约60 m,高70 m,容积约15万 m³的岩洞组成,空气压力为4.8~6.8 MPa。美国发电厂压缩空气储洞深度约790 m,由两个直径61 m,高度335 m,容积约54万m³的岩洞组成,空气压力为4.4~7.3 MPa。

压缩空气储能通常是与燃气或燃油调峰电站匹配,我国天然气和石油价格很高,燃气及燃油调峰电站经济性很差,在我国的应用前景不乐观。

2.3 钠硫电池

钠硫电池是美国福特(Ford)公司于1967年首先发明的,至今已有40多年的历史。钠硫电池主要是由正极、负极、电解质、隔膜和外壳等组成。负极的活性物质是熔融金属钠,正极的活性物质是硫

和钠硫化物熔盐, 由于硫是绝缘体, 所以一般是将其填充在导电多孔的炭或石墨毡里, 具有良好钠离子传导性能的 $\beta\text{-Al}_2\text{O}_3$ 同时起到固体电解质兼隔膜的双重作用, 固体电解质只传导 Na^+ , 而对电子是绝缘体, 外壳则一般用不锈钢等金属材料。钠硫电池工作原理示意图如图1所示。

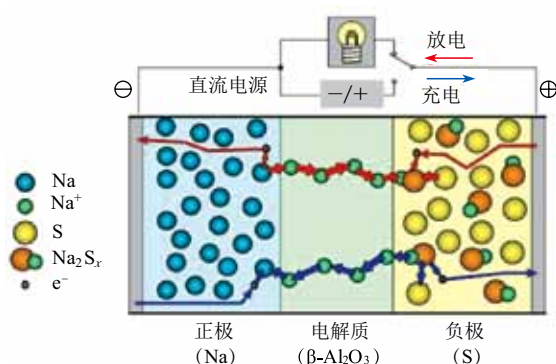


图1 钠硫电池工作原理示意图

Fig. 1 Schematic diagram of sodium sulfur battery

钠硫电池充放电过程中电化学反应式如下

负极: $2\text{Na} \rightarrow 2\text{Na}^+ + 2\text{e}^-$

正极: $x\text{S} + 2\text{e}^- \rightarrow \text{S}_x^{2-}$

电池总反应式: $2\text{Na} + x\text{S} \xrightleftharpoons[\text{放电}]{\text{充电}} \text{Na}_2\text{S}_x$

如图1所示电池放电过程中, 负极不断产生钠离子并放出电子, 电子通过外电路移向正极, 同时钠离子经过 $\beta\text{-Al}_2\text{O}_3$ 电解质移至正极与正极的反应物质反应生成钠硫化物。电池充电过程中, 钠硫化物在正极分解, Na^+ 返回负极并与电子重新结合, 从而实现电池的充放电过程。

钠硫电池比能量高, 可高功率放电。它的储能密度是铅酸电池的3~5倍, 能量效率可达80%, 充放电循环寿命也可达4000次。但钠硫电池的充电状态(SOC)不能直接检测, 只能用平均值计量, 所以需要周期性的离线度量, 过度充电时很危险。钠硫电池的电解质是固态的, 高温时固态的电解液融化才能使得离子通过。钠硫电池的工作温度高达350℃, 因此需要附加供热设备来维持温度, 增加了运行成本。

日本东京电力公司(TEPCO)和京瓷公司(NGK)合作开发出钠硫电池并掌握了批量化生产技术, 将其应用于电网的平衡负荷、削峰填谷及应急电源等, 并于2002年开始进入商品化实施阶段, 到2007年统计, 日本年产钠硫电池量已超过100 MW。

钠硫电池储能系统在350℃高温下运行, 从室温升温到350℃通常需要近100 h以上, 如果升温不

均匀会造成陶瓷隔膜破裂, 进而会造成整个储能电站燃烧。钠硫电池储能系统停止、启动会使电池性能衰减, 因此, 不能适应风能发电储能系统频繁开停的要求。另外, 钠硫电池存在着严重的安全隐患。日本在示范应用过程中发生过几次钠硫电池储能电站火灾事故。2011年发生的兆瓦级钠硫电池储能电站火灾事件^[13], 整整燃烧了15天才灭火, 使人们进一步认识到其危害性, 许多国家已禁止使用钠硫电池。

在我国, 从2006年起, 中国科学院上海硅酸盐研究所通过与上海市电力公司及上海电气公司合作, 研究开发钠硫电池技术并取得科技部科技支撑项目及科学院知识创新等项目的支持, 在关键材料、电池技术系统等方面取得了一定进步, 但最近两年没有新的进展报道。

2.4 锂离子电池

锂离子电池分为液态锂离子电池(LIB)和聚合物锂离子电池(PLB)两类。其中, 液态锂离子电池是指 Li^+ 嵌入化合物为正、负极的二次电池。锂电池根据正极材料分类主要有钴酸锂、锰酸锂、磷酸铁锂等。锂离子电池负极材料主要有石墨、软炭、硬炭等。在石墨中有天然石墨、人造石墨、石墨碳纤维。在软炭中常见的有石油焦、针状焦、碳纤维、中间相炭微球等。硬炭是指高分子聚合物的热解炭, 常见的有树脂炭、有机聚合物热解炭、炭黑等。

锂离子电池具有高储能密度, 可达到100 Wh/kg, 是铅酸电池的3~5倍; 输出电压高(单体工作电压在3.2 V以上), 约等于3只镍镉或镍氢充电电池的串联电压, 能量效率可以达到90%以上, 高低温适应性强, 可以在-20~60℃的环境下使用。自1991年索尼公司成功实现锂离子电池商业化后, 锂离子电池在电子产品领域得到了广泛的应用。但锂离子电池均一性、安全性差, 具有发生起火爆炸的潜在危险, 而且锂离子电池耐过充/放电性能差, 组合及保护电路复杂, 这些因素制约了锂离子电池在动力电池和大规模储能领域的应用。

尽管多年来在国家的集中支持下, 我国锂离子电池产业链已基本形成, 产业基础好, 但在大规模储能领域应用时, 产品的安全性、一致性、可靠性、电池充放电状态监测技术等尚有待突破, 大规模应用的可行性、耐久性也有待通过应用示范加以验证。

2.5 铅酸电池

铅酸电池具有技术成熟, 价格便宜, 安全性能

相对可靠的优点,但其循环寿命较短,不可深度放电,运行和维护费用高,而且制造过程中和废弃处理时存在严重的环境污染。针对提高铅酸电池比功率和深放电时循环寿命,开展新型铅酸电池和应用研究是铅酸电池技术发展的重要方向。例如,新型铅碳超级电池,是使用少量铅的铅酸电池技术,由一个不平衡的超级电容器和一个铅酸电池在其内部组成的单体电池,与传统的铅酸电池相比,具有更短的充电时间和更长的使用寿命。

2.6 液流电池

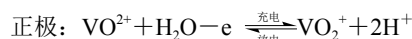
液流电池是由Thaller (NASA Lewis Research Center, Cleveland, United States) 于1974年提出的一种电化学储能技术。液流储能电池系统由电堆单元、电解质溶液及电解质溶液储供单元、控制管理单元等部分组成。液流电池系统的核心是由电堆和(电堆是由数十节进行氧化-还原反应)和实现充、放电过程的单电池按特定要求串联而成的,结构与燃料电池电堆相似。

图2是液流电池的原理图,正极和负极电解液分别装在两个储罐中,利用送液泵使电解液通过电堆循环。在电堆内部,正、负极电解液用离子交换膜(或离子隔膜)分隔开,电池外接负载和电源。电堆和电解液储罐可以分别放置,因此可因地制宜放置。

从理论上讲,离子价态变化的离子对可以组成多种氧化还原液流电池。其中锌-溴电池(ZBB)、多硫化钠-溴电池(PSB)和全钒(VFB)液流电池最受关注。锌-溴液流电池具有较高的能量密度(可以达到70 W·h/kg),且材料成本较低,ZBB能源公

司是锌-溴液流电池的主要生产厂商。由于锌电极在充电过程中易形成树状结晶,导致其储能容量衰减快、使用寿命短,通常,锌-溴电池的额定工作电流密度为40 mA/cm²;且溴的强腐蚀性也使该型电池的设计难度较大。多硫化钠-溴液流电池也具有材料成本低的优点,但由于长期使用正、负极电解液互串引起的容量和性能衰减问题难以解决,目前国内外多硫化钠-溴液流电池的研究开发处于停滞状态。从目前发展看,全钒液流电池被认为是最具产业化前景的液流电池技术。

全钒液流电池(VFB)正极电对为VO²⁺/VO₂⁺,负极为V²⁺/V³⁺。电解质在电池中循环。全钒液流电池充放电时,电极发生如下反应



与其它储能电池相比,全钒液流电池有以下特点:①电池的输出功率取决于电堆的大小和数量,储能容量取决于电解液容量和浓度,因此它的设计非常灵活,要增加输出功率,只要增加电堆的面积和电堆的数量,要增加储能容量,只要增加电解液的体积;②全钒液流电池的活性物质为溶解于水溶液的不同价态的钒离子,在全钒液流电池充、放电过程中,仅离子价态发生变化,不发生相变化反应,充放电应答速度快;③电解质金属离子只有钒离子一种,不会发生正、负电解液活性物质相互交叉污染的问题,电池使用寿命长,电解质溶液容易再生循环使用;④充、放电性能好,可深度放电而不损坏电池,自放电低。在系统处于关闭模式时,储罐中的电解液无自放电现象;⑤液流电池选址自由度大,系统可全自动封闭运行,无污染,维护简单,操作成本低。⑥电解质溶液为水溶液,电池系统无潜在的爆炸或着火危险,安全性高;⑦电池部件多为廉价的炭材料、工程塑料,材料来源丰富,且在回收过程中不会产生污染,环境友好;⑧能量效率高,可达70%,性价比好;⑨启动速度快,如果电堆里充满电解液可在2 min内启动,在运行过程中充放电状态切换只需要0.02 s;⑩可实时、准确监控电池系统荷电状态(SOC),有利于电网进行管理、调度。

全钒液流电池适用于调峰电源系统、大规模光伏电源系统、风能发电系统的储能以及不间断电源或应急电源系统。目前国内外全钒液流电池的主要生产企业有大连融科储能公司(Rongke Power)、日本住友电气工业公司(Sumitomo Electric Industries)和北京普能公司。

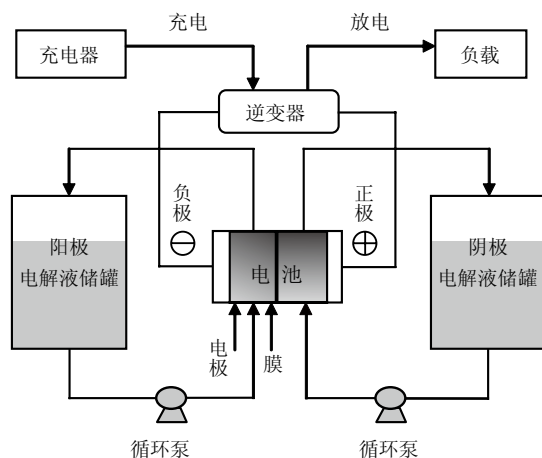


图2 液流电池流程示意图

Fig. 2 Flow chart of flow battery

由于全钒液流电池的开发时间比较短, 技术上还没有完全成熟, 如使用的离子交换膜是质子交换膜燃料电池的全氟磺酸膜, 膜的选择性比较差, 正、负极电解质之间的离子相互渗透降低了液流电池的能量效率并缩短了电池的寿命, 需要研究开发高选择性、高导电性的液流电池用离子交换膜^[14]; 另一方面, 高浓度和高稳定性的电解液制备技术也是全钒液流电池产业化急需解决的瓶颈技术。多年来大连融科储能公司与中国科学院大连化学物理研究所坚持产学研密切合作, 在液流电池关键材料、核心部件、电堆及电池系统设计集成等方面都取得了重大突破, 掌握了高性能电解质溶液、高性能双极板的制造技术并形成了批量化生产能力, 同时成功地开发出液流电池用高选择性、低成本的非氟离子交换膜(隔膜)合成及制造技术^[15-16], 得到了国内外同行的高度认可。

与其它电池技术相比, 全钒液流电池能量密度偏低、体积较大, 另外, 电池系统需要配置大量的管路、阀件、电解液循环泵、换热器等辅助部件, 使液流电池更为复杂, 对电池系统的可靠性提出了更高的要求。

总之, 全钒液流电池在输出功率为数千瓦至数十兆瓦, 储能容量数小时以上级的规模化固定储能场合具有明显的优势, 是大规模高效储能的首选技术之一, 降低成本、提高市场竞争力是该技术面临的挑战。

3 展 望

目前, 除了抽水储能外, 其它储能技术正处于工程转化和应用示范的关键时期, 进一步降低成本、提高其可靠性和稳定性是储能技术真正进入市场应用的重中之重。这不仅需要储能电池研究开发单位和生产企业在电池材料、电池结构、系统集成方面持续地技术创新, 也需要政府在技术创新项目、储能示范工程等方面予以资金支持, 并辅以一定的倾斜政策, 促进储能技术的产业化和实用化进程, 推进风能、太阳能等可再生能源的普及应用。

参 考 文 献

[1] Federal Ministry of Economics and Technology. Federal Ministry for the Environment Nature Conservation and Nuclear Safety. Energy concept[R/OL]. Berlin: BMWi, 2010. http://www.bmu.de/files/english/pdf/application/pdf/energiekonzept_bundesregierung_en.pdf.

- [2] Energy independence and security act-2007[EB/OL]. [2008-03-29]. <http://www.acuitybrandslighting.com/sustainability/Documents/Downloads/EPAAct/ABL%20EISA%202007%20Summary.pdf>.
- [3] President Obama announces \$3.4 billion investment to spur transition to smart energy grid [EB/OL]. [2009-10-27]. <http://www.whitehouse.gov/the-press-office/president-obama-announces-34-billion-investment-spur-transition-smart-energy-grid>.
- [4] US Department of Energy office of Electricity Delivery & Energy Reliability. Energy storage[R/OL]. [2011-05-27]. <http://www.doc88.com/p-23445692680.html>.
- [5] Energy department to launch new energy innovation hub focused on advanced batteries and energy storage[EB/OL]. [2012-02-07]. <http://energy.gov/articles/energy-department-launch-new-energy-innovation-hub-focused-advanced-batteries-and-energy>.
- [6] Federal Ministry of Economics and Technology. Federal Ministry for the Environment Nature Conservation and Nuclear Safety. Förderinitiative Energiespeicher - 200 Mio. Euro für die Speicherforschung[EB/OL]. [2011-05-18]. http://www.bmu.de/pressemitteilungen/aktuelle_pressemitteilungen/pm/47403.php.
- [7] Dunn B, Kamath H, Tarascon J M. Electrical energy storage for the grid: A battery of choices[J]. *Science*, 2011, 334: 928-935.
- [8] Yang Zhenguo, Zhang Jianlu, et al. Electrochemical energy storage for green grid[J]. *Chemical Reviews*, 2011, 111 (5): 3577-3613.
- [9] Denholm P, Elia E, Kirby B, et al. Role of energy storage with renewable electricity generation[R]. Colorado: National Renewable Energy Laboratory, 2010.
- [10] 吉村丰, 左藤敏之. 冲绳海水扬水发电技术实证试验样机的水路结构[R]. 水门铁管试验, 样机的水路结构, No. 99/1999 (2).
- [11] 日比野, 等. 压缩空气-燃气轮机发电基磐的开发技术[R]. 日本电力中央研究所, 1994.
- [12] Ibrahim H, Lcinca A, Perron J. Energy storage systems—Characteristics and comparisons[J]. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2008, 12 (5): 1221-1250.
- [13] NGK Insulators. Notification of NAS battery fire and apology[R/OL]. [2011-09-22]. <http://www.ngk.co.jp/english/news/2011/0922.html>.
- [14] Skyllas-Kazacos M, et al. Progress in flow battery research and development[J]. *Journal of the Electrochemical Society*, 2011, 158 (8): 55-79.
- [15] Zhang Hongzhang, Zhang Huamin, Li Xianfeng, et al. Nanofiltration (NF) membranes: The next generation separators for all vanadium redox flow batteries (VRBs)[J]. *Energy & Environmental Science*, 2011, 4 (5): 1676-1679.
- [16] Zhang Hongzhang, Zhang Huamin, Li Xianfeng, et al. Silica modified nanofiltration membranes with improved selectivity for redox flow battery application[J]. *Energy & Environmental Science*, 2012, 5 (4): 6299-6303.



张华民

作者简介: 张华民(1955—), 男, 研究员, 研究方向为燃料电池与新型储能电池。
E-mail: zhanghm@dicp.ac.cn.