

# 金属燃料电池\*

唐有根<sup>1 †</sup> 黄伯云<sup>2</sup> 卢凌彬<sup>1</sup> 刘东任<sup>1</sup>

(1 中南大学化学化工学院 长沙 410083)

(2 中南大学粉末冶金研究院 长沙 410083)

**摘要** 金属燃料电池(MFC)是一类特殊的燃料电池,具有成本低、无毒、无污染、比功率高、比能量高等优点.文章讨论了金属燃料电池的基本特性、结构和原理,综述了Al、Zn、Mg、Ca、Fe和Li燃料电池的研究进展,总结了它们各自存在的问题和今后进一步发展的研究方向.

**关键词** 金属燃料电池,铝,锌,铁,钙,镁,锂

## Metal fuel cells

TANG You-Gen<sup>1 †</sup> HUANG Bo-Yun<sup>2</sup> LU Ling-Bin<sup>1</sup> LIU Dong-Ren<sup>1</sup>

(1 Chemistry and Chemical Engineering School of Central South University, Changsha 410083, China)

(2 Powder Metallurgy Research Institute of Central South University, Changsha 410083, China)

**Abstract** Metal fuel cells are a particular type of fuel cell which is cheap, non-toxic, non-polluting and efficient in energy and power output. We discuss the characteristics, configurations and mechanism of metal fuel cells, review the development of aluminium, zinc, magnesium, iron, calcium and lithium cells, and summarize the current problems and future research directions.

**Key words** metal fuel cell, aluminium, zinc, iron, calcium, magnesium, lithium

### 1 金属燃料电池的基本特性

燃料电池一般是指将氢或者富氢燃料(如天然气、汽油、甲醇等)的化学能直接以电化学反应方式转换为电能的装置,作为燃料的氢气和作为氧化剂的氧气(或空气中的氧)源源不断输送到燃料电池的两个电极表面,发生电化学反应输出电能.金属燃料电池(metal fuel cell, MFC)也称金属空气电池,是用金属燃料代替氢而形成的一种新概念的燃料电池.将锌、铝等金属像燃料氢一样提供到电池中的反应位置,它们与氧一起构成一个连续的电产生装置.金属燃料电池具有低成本、无毒、无污染、放电电压平稳、高比能量和高比功率等优点,又有丰富的资源,还能再生利用,而且比氢燃料电池结构简单,是很有发展和应用前景的新能源<sup>[1]</sup>.

表1列举了可以作为金属/空气燃料电池的金属和它们的电化学性质.在这些金属中,锌是电正性最大的金属,商业化的一次锌/空气电池的应用已有多年.一次锌/空气电池主要应用于铁路信号、远距

离通讯和航海等需要长时期、低速率放电的装置和辅助听力器、寻呼机等装置.可再充锌/空气电池的循环寿命进一步提高后,有望成为一种高容量的电源,应用于许多手提装置(如电脑、通讯设备等)以及电动车动力电源<sup>[3]</sup>.

表1 金属燃料电池的特性<sup>[2]</sup>

金属 阳极	电化学当量 (Ah/g)	理论电压* (V)	原子价 态变化	理论比能量 (kWh/kg)	实际电压 (V)
Li	3.86	3.4	1	13.0	2.4
Ca	1.34	3.4	2	4.6	2.0
Mg	2.20	3.1	2	6.8	1.2—1.4
Al	2.98	2.7	3	8.1	1.1—1.4
Zn	0.82	1.6	2	1.3	1.0—1.2
Fe	0.96	1.3	2	1.2	1.0

\* 相对于氧电极的电池电压

\* 2003-06-05收到初稿 2003-07-04修回

† 通讯联系人, E-mail: ygtang@263.net

铝燃料电池可以提供比镍-镉电池大十倍的电力,并极大地减少了充电所耗时间.与目前所使用的锂电池相比,它具有更大的能量密度和更低的循环寿命消耗;与内燃机和普通的电池相比,它具有更高的能量效率<sup>[4]</sup>.由于铝/空气电池的充电电压太高,在水溶液体系中先发生水的电解而不可再充电.因此,人们致力于研究储备电池和机械可再充铝电池.对于电动车而言,可以像传统的汽油加油一样,通过补充铝“燃料”使汽车持续行驶<sup>[5]</sup>.

其他金属也可用于金属燃料电池,例如锂/空气电池<sup>[6]</sup>、镁/空气电池<sup>[7]</sup>、钙/空气电池<sup>[8]</sup>都已有研究,但是成本和诸如阳极极化、不稳定性、腐蚀、溶解的不均一、安全性及实际加工处理等难题,阻碍了商业化产品的发展.铁/空气电池的电压和能量密度较低,相比其他金属/空气电池,它的成本较高,铁/空气电池的发展主要集中在可再充电<sup>[9]</sup>.

## 2 金属燃料电池的结构和原理

按照电解质的不同,燃料电池通常分为碱性燃料电池、磷酸燃料电池、熔融碳酸盐燃料电池、固体氧化物燃料电池、质子交换膜燃料电池五大类.它们通常都是采用气相燃料为燃料来源(如碳氢化合物、氢气、碳氧化物等),主要区别在于电解质的不同.而金属燃料电池与普通的燃料电池不同,它是以活泼固体金属(如铝、锌、铁、钙、镁等)为燃料源,以碱性溶液或中性盐溶液为电解液.根据燃料源的不同,金属燃料电池分为铝、锌、镁、铁、钙和锂等金属燃料电池.金属燃料电池的结构如图1所示.

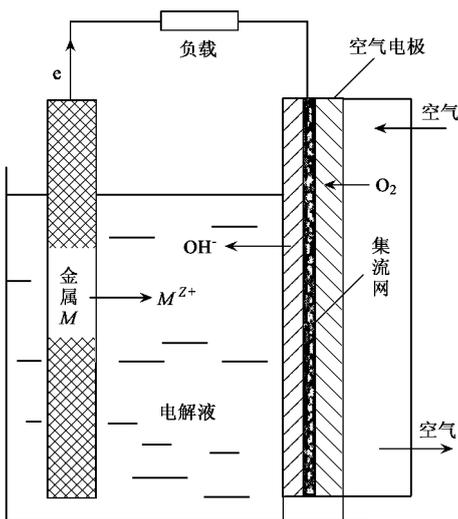


图1 金属燃料电池的结构示意图

电池中阳极为活泼金属消耗电极,阴极为空气扩散电极,电解质为中性盐溶液或碱性溶液.阴极反应,即氧气还原的电极反应如下:

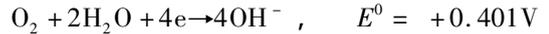
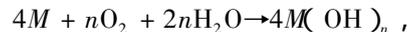


表1中给出了当氧电极与各种金属阳极匹配时的理论电压,金属的电化学当量,理论比能量及电池的工作电压.金属空气燃料电池的理论能量密度只决定于负极,即燃料电极,这是电池中传递的唯一的活性物质,氧气则在放电过程中从空气中引入.

金属电极上的放电反应取决于所使用的金属、电解质和其他因素,放电反应的一般通式为: $M \rightarrow M^{n+} + ne^-$ ,电池放电总反应为:



$M$ 是金属, $n$ 是金属氧化过程中的价态变化值,如表1所示.大多数金属在电解质溶液中是不稳定的,发生腐蚀或氧化,生成 $\text{H}_2$ :



腐蚀反应或者说是自放电,使得阳极的库仑效率下降,电池容量损失.

金属燃料电池中正极活性物质是来自于空气中的氧,只要空气电极工作正常,电池容量仅取决于金属的量,因而它的容量可以达到很大.金属阳极通常都要根据具体的金属性质进行金属成分或形态的加工处理,以满足电池要求.空气扩散电极包括活性层、扩散层、集流网.气体穿过扩散层在活性层的三相区被还原,电子通过集流网导出.扩散层是由碳黑和聚四氟乙烯(PTFE)组成的透气疏水膜,可以防止电解液渗漏.活性层由活性碳黑、聚四氟乙烯乳液(PTFE)和催化剂构成,催化剂具有还原氧气的性能,对于再充电式金属电池,催化剂还须具有氧化氧离子的性能.

## 3 金属燃料电池的研究

### 3.1 铝燃料电池

铝在地壳中的含量居金属元素之首,全球铝的工业储量超过250亿吨.由于铝的外层电子结构极具特色, $\text{Al}(\text{III})$ 离子有3个共价键,3个配位键,既溶于酸又溶于碱,具有多种形态,其电阻率低( $2.76\mu\Omega \cdot \text{cm}^{-1}$ ),电化当量高( $2.98\text{Ah/g}$ ),电极电位负( $-1.66\text{V}$ )<sup>[10]</sup>.因而在电化学能源中铝是一种很有吸引力的燃料,成为最初发展金属燃料电池的首选材料.

但铝在空气和水中,表面形成一层氧化膜,使其

稳定电位比平衡电位正移约 1 V,处于钝化状态.在铝中添加 Ga、In、Tl、Zn、Sn、Mg 等元素制成的铝合金电极,电极表面氧化膜易于破坏,电位可大幅度负移.但一旦铝表面氧化膜被破坏,就会提高水还原反应的速度,导致大量析氢,中途难以停止其溶解.这些问题的存在限制了铝燃料电池的发展.

寻找能减少腐蚀、增加电池电压和电流密度的新合金是研究的热点.在铝合金中通常加入能降低氧化膜电阻,形成低共熔体合金,并且具有高氢超电位的金属元素.到目前为止基本上形成以 Al-Ga、Al-In、Al-Ga-In 合金为基质,再辅以铅、铋、锡、锌、镁、镉、锰等元素形成的阳极材料系列.加拿大铝业公司 ELTECH 已研制出了几种不同组分的具有高功率密度和高能量产出的铝合金<sup>[11]</sup>.另外,铝阳极的形状(如平面形<sup>[12]</sup>、楔形<sup>[13]</sup>、圆柱形<sup>[14]</sup>)对电池性能也有一定影响,适合的电池形状可以减小铝电极的腐蚀率,增大电池功率和放电密度.为降低空气扩散电极的成本,寻找替代贵金属铂的还原氧催化剂也是研究的重要方向之一. Al/Air 燃料电池的电解液可以是中性溶液,也可以是碱性溶液.由于在盐溶液中电池放电产物会成凝胶状,增大电池电阻,降低电池效率,而在碱液中则不会出现这种情况,所以从电池效率上来讲,使用碱溶液要比使用盐溶液好.但对于海底用电池和小功率电器用电池来说,使用中性盐溶液作为电解液也是可行的.电解液除支持电池反应外,还有一个重要的作用:溶解电极上的电解产物,使电解产物能随电解液移出电池.如果电极上附着电解产物,会增大电池内阻,降低电池效率.研究发现在碱性电解液中加入柠檬酸盐<sup>[15]</sup>、锡酸盐<sup>[16]</sup>、高锰酸钾<sup>[17]</sup>或是过氧化氢<sup>[18]</sup>等添加剂可获得较好的效果.

加拿大 Alcan 公司于 1993 年推出了电动车用 Al/Air 电池,将 Al/Air 电池与铅酸电池配合使用,并已投入 4000 部电动车试运行.美国 1994 年研制出的电动车用 Al/Air 电池,比能量已达到 300 Wh/kg 以上,且电池可做到集成化,容量可达到 5000 Ah 以上,已达到了工业化生产水平.同时,美国推出了海底无人驾驶作业车和鱼雷推进用铝/氧电池,其比能量已达到 440 Wh/kg<sup>[19]</sup>.

铝空气电池是一种很有前景的电动车用电池.铝在电极中的成本为 1.1 \$/kg 且可重复使用.现阶段的燃料效率可达到 15%,高于内燃车的 13%,远期更可达到 20%.目前设计能量密度可达 1300 Wh/kg,远期为 2000 Wh/kg,与铅酸、镍氢及锂离子

电池相比具有很强的竞争能力<sup>[20]</sup>.

### 3.2 锌燃料电池

锌燃料电池主要指 Zn/Air 电池.由于具有高比能量、较好的环境适应性和相对简单的工艺技术以及低成本,锌空气燃料电池被认为是极具潜力的电动车动力电源.

Zn/Air 电池中央是一个可替换阳极锌,电解液为碱液,阴极是空气还原电极.电池放电期间,阳极锌被转化为氧化锌,阴极上,空气中的氧气被还原为氢氧根离子.电池反应的标准电压为 1.65 V,理论比能量达到 1350 Wh/kg,实际的比能量为 200 Wh/kg. Zn/Air 电池的放电容量受温度波动较小,但环境湿度对其影响较大,是 Zn/Air 电池开发应用需解决的关键问题之一.

实现可充电 Zn/Air 电池的关键是高效率、长寿命的双功能氧气扩散电极的研制,以及在循环期间不会出现明显形变和形成任何枝晶的锌电极的开发.双功能气体扩散电极必须能有效地进行氧的氧化还原,所以其关键是选取最佳的双功能电催化剂.研究发现金属氧化物,如  $\text{La}_{0.6}\text{Ca}_{0.4}\text{CoO}_3$ <sup>[21]</sup>、 $\text{MnO}_2$ <sup>[22]</sup>和  $\text{MnO}_x$ <sup>[23]</sup>,非贵金属金属大环化合物<sup>[24]</sup>以及  $\text{LaNiO}_3$  等可替代 Pt 作为气体扩散电极的电催化剂.颗粒状和膏状的锌在一定程度上都能解决锌电极的形变问题,提高锌电极的性能.

自 20 世纪 90 年代开始, Zn/Air 电池的主要研究目标就是优化电池结构、再生处理,特别是为锌电沉积电池以达到为高效率连续放电不断提供新的阳极锌.以色列的 Electric Fuel 公司对 Zn/Air 电池的结构优化以及在动力车、手机、滑行车等实际应用方面进行了许多卓有成效的工作.该公司发明的一种用于金属/空气电池组的电池<sup>[25]</sup>,武汉大学三元科技有限责任公司的内氧式圆柱形 Zn/Air 电池<sup>[26]</sup>,深圳核电实业开发有限公司的金属/空气电池灯<sup>[27]</sup>,以及珠海至力电池有限公司的高比特性实用化 Zn/Air 电池<sup>[28]</sup>都具有一定的商业化可能.日前,较为理想的更新换代产品——圆柱形“锌空气电池”已由广东省惠州市德赛集团承担完成.

### 3.3 镁燃料电池

镁燃料电池的阴极不是采用空气扩散电极,而是碳棒,电解液为阴极电解液,所以也称其为半燃料电池(Mg-SFC).镁与铝一样,具有较高的法拉第效率,密度小,标准电位高,特别是镁也可以使用中性电解液,在海底动力源方面有着广阔的应用前景,因而受到人们的重视.为了降低成本而且保证一定的

比能量,必须研究高效的镁燃料电池体系。

镁/空气电池放电反应的理论电势为 3.1V,其实际开路电压约为 1.6V。镁电极易于与电解质直接反应,生成  $Mg(OH)_2$ ,并放出氢气。生成的  $Mg(OH)_2$  覆盖在电极表面,形成不溶层,从而阻止腐蚀反应进一步进行,同时  $Mg(OH)_2$  膜覆盖在镁电极上导致的严重的电极反应延迟、失效。由于“纯”镁电极往往没有良好的电池性能,人们已经研究了多种镁合金作为能提供所需性能的电极。镁/空气电池尚未商业化。

目前,人们正朝着水下装置的方面发展,使用溶解在海水里的氧气作为反应物。这种电池使用镁合金阳极和催化膜负极,它通过海水活化,这种体系的主要优点在于除了镁之外,所有的反应物都由海水提供,此种电池的能量密度达到了  $700Wh/kg^{[29,30]}$ 。

$Mg-H_2O_2^{[31]}$  电池体系的理论电压为 4.14V,比目前常用电源、Al-AgO<sup>[32]</sup> 或 Al-H<sub>2</sub>O<sub>2</sub><sup>[33]</sup> 都要高。另外, Mg-H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> 体系更轻,工作环境更友善,成本更低。但是在电池反应过程中会发生副反应生成 O<sub>2</sub>、Mg(OH)<sub>2</sub> 沉淀和 MgCO<sub>3</sub> 沉淀,使电池效率降低。对于镁,发展可负载的、持久性的半燃料电池技术以满足无人水底交通工具(UUVs)的要求是未来发展的方向<sup>[34]</sup>。

### 3.4 钙燃料电池

虽然 Zn/Air 碱液电池体系性能优越,得到了人们的普遍认同,而在理论上,钙无论在电压还是能量密度方面都要优于锌,只是因为钙的腐蚀问题限制了它只能用于非水溶液,而空气电极上氧气的还原要求使用水溶液介质。为了解决腐蚀问题,Charkey 和 Dalin 提出使用含部分水溶液的电解液,即两份甲醇加一份水。但是这种电池总能量密度相对较低,此外还要使用相对较贵的电解质甲醇<sup>[8]</sup>。

钙用作电化学燃料的优势在于它在矿石中含量极大,同时由于存在着一个巨大的石灰市场,避免了循环使用燃料电池反应物经济上的必要。钙阳极也可与水阴极一起用于 Ca-H<sub>2</sub>O 电池。无论是 Ca/Air 电池还是 Ca-H<sub>2</sub>O 电池都可进行机械再充电。Ca-H<sub>2</sub>O 电池在能源备用电力系统和船舶应用方面有着潜在的应用价值<sup>[35]</sup>。

### 3.5 铁燃料电池

Fe/Air 电池是大规模应用于牵引力最有可能的电化学动力源之一。Fe/Air 电池采用廉价的电极材料,在进行加工、使用和回收过程中不会对环境造成危害。与其他金属燃料电池最大的不同是 Fe/Air 电

池可以不采用贵金属铂作催化剂,而采用少量的镍、钴、银作催化剂,这一点就比其他金属燃料电池要经济得多。早在金属/空气燃料电池发展初期,在 ASEA 的燃料电池计划中就包含了发展电动汽车用 Fe/Air 电池的计划,从而出现了第一代 Fe/Air 电池,成本的降低促使了第二代 Fe/Air 电池的出现。制作高能量密度和好的机械性能的铁电极当然是可能的,例如在 Swedish 的专利 No. 360952 中所描述的制作方法。然而这样的铁电极也存在着自放电趋势和容量衰减的问题。因而,关于 Fe/Air 电极的研究只在 80 年代较多,而此后就逐渐不再受到人们的关注了<sup>[36,37]</sup>。

### 3.6 锂燃料电池

锂在金属电极中具有最高的理论电压(3.35V)和电化学当量(3.86Ah/g)。在放电过程中,金属锂、空气中的氧和水被消耗,同时生成 LiOH。在开路 and 低消耗的放电过程中,因为发生腐蚀反应,使阳极的库仑效率下降,锂的自放电很快。锂空气燃料电池的理论开路电势为 3.35V,但实际上,由于锂阳极和空气阴极表现出混合电势,电池实际开路电压接近 2.85V,大部分的电势损失在阴极极化。高于 2.2V 时,电池不能有效放电。锂/空气燃料电池的主要优点在于其有较高的电池电势,这可以转化成较高的功率和能量密度<sup>[4]</sup>。

锂具有很高的能量密度,通过与水反应,作为储备电池,应用于水下装置。锂-水电池的放电总反应式为:  $Li + H_2O \rightarrow LiOH + \frac{1}{2}H_2$ ,总的电化学反应电势为 2.21V,理论比能量为 8530Wh/kg,锂是提供给电池的惟一反应物<sup>[38]</sup>。典型的锂/水电池为直径 30cm,厚度 30cm 的固体圆柱阳极,重量为 11.5kg。这种电池在 2V 电压下可输送 2W 的功率一年左右,比能量为 1800—2400Wh/kg<sup>[39]</sup>。

## 4 金属燃料电池的发展趋势

作为一种很有应用前景的新型化学电源,金属燃料电池的研究受到了高度重视,尤其是在 Al/Air、Zn/Air 燃料电池方面取得了很大进展,它们的优异性能受到广泛关注。但要想真正使其具有实用意义,就必须进一步发展相应的商业化产品,进一步提高其电化学性能和环境适应性,使金属燃料电池不仅仅具有理论上的优势,而是真正具有可行性。由于技术不够成熟,成本较高,目前金属燃料电池的研究应用主要在国防、航海、发电站、动力电源及电信系统

备用电源等方面,在民用方面的应用较少.降低金属燃料电池成本,完善电池构造技术,开发实用型金属燃料电池,解决金属燃料电池在推广应用上存在的实际问题,进一步扩展金属燃料电池的应用领域,是今后这方面研究工作的重点和方向.

### 参 考 文 献

- [ 1 ] Blurton K F, Sammells A F. *J. Power Sources*, 1979, 4: 263
- [ 2 ] Linden D. *Handbook of Batteries*, 2nd ed. New York: McGRAW-HILL, INC. 1995. 38. 1
- [ 3 ] Yang C C, Lin S J. *J. Power Sources*, 2002, 112: 497
- [ 4 ] Hasvold Q, Johansen K H, Mollestad O *et al.* *J. Power Sources*, 1999, 80: 254
- [ 5 ] Homa A S, Rudd E J. *Proc. 24th IECEC*, 1989, 3: 1331
- [ 6 ] Moyer W P, Adams G B. *Proc. IECEC*, Seattle, Wash., 1980
- [ 7 ] Hamlen R P, Jerabek E C, Ruzzo J C *et al.* *J. Electrochem. Soc.*, 1969, 116: 1588
- [ 8 ] Charkey A, Dalin G A. *Metal - Air Systems. Proc. 20th Annual Power Sources conf.*, Red Bank, New Jersey, 1966
- [ 9 ] Lindstrom O. *Electro-chemical Society Extended Abstracts*, 1985, 85(2): 25
- [ 10 ] 任学佑. 电池, 1997, 27(2): 85. [ Ren X Y. *Battery Bimonthly*, 1997, 27(2): 85 (in Chinese)]
- [ 11 ] 王剑. 铝加工, 1998, 21(5): 56 [ Wang J. *Alloy Machining*, 1998, 21(5): 56 (in Chinese)]
- [ 12 ] Rota M, Comminellis C H. *J. Appl. Electrochem.*, 1995, 25: 114
- [ 13 ] 汪振道, 王晓黎, 田芸. 电源技术, 1997, 21(3): 106 [ Wang Z D, Wang X L, Tian Y. *Chinese Journal of Power Sources*, 1997, 21(3): 106 (in Chinese)]
- [ 14 ] Kshen P, Tseung A. *J. Appl. Electrochem.*, 1994, 24: 145
- [ 15 ] Venkat K S, Iyer A, Balaramachandran V *et al.* *J. Power Sources*, 1992, 39: 263
- [ 16 ] 张曦, 顾志忙, 陶映初. 现代化工, 1998, 10: 9 [ Zhang X, Gu Z M, Tao Y C. *Modern Chemical Industry*, 1998, 10: 9 (in Chinese)]
- [ 17 ] Licht S, Novel A. *Electrochem. Commun.*, 1999, 1: 33
- [ 18 ] Hasvold Q, Johansen K H, Mollestad O *et al.* *J. Power Sources*, 1999, 80: 254
- [ 19 ] 任学佑. 电池, 1995, 25(2): 38 [ Ren X Y. *Battery*, 1995, 25(2): 38 (in Chinese)]
- [ 20 ] Yang S H, Knickle H. *J. Power Sources*, 2002, 112: 162
- [ 21 ] Muller S, Striebel K, Haas O. *Electrochimica Acta*, 1994, 39: 1661
- [ 22 ] Wei Z D, Huang W Z, Zhang S T *et al.* *J. Power Sources*, 2000, 91: 82
- [ 23 ] Mao L Q, Zhang D, Sotomura T. *Electrochimica Acta*, 2003, 48: 1015
- [ 24 ] Goldstein J, Brown I, Koretz B. *J. Power Sources*, 1999, 80: 171
- [ 25 ] 瑟盖·金伯格. 中国专利: 98107340, 1998-04 [ Sergey Kimberg. CN98107340, 1998-04 (in Chinese)]
- [ 26 ] 甘复兴. 中国专利: 96239541, 1996-09 [ Gan F X. CN96239541, 1996-09 (in Chinese)]
- [ 27 ] 林心耿. 中国专利: 90206944, 1990-05 [ Lin X G. CN90206944, 1990-05 (in Chinese)]
- [ 28 ] 孙法炯. 电源技术, 2000, 24(2): 63 [ Sun F J. *Chinese Journal of Power Sources*, 2000, 24(2): 63 (in Chinese)]
- [ 29 ] Hasvold O, Henriksen H, Melvaer E *et al.* *J. Power Sources*, 1997, 16: 39
- [ 30 ] Hasvold O, Battaia C, Johansen B. *J. Power Sources*, 1998, 38: 358
- [ 31 ] Maria G M, Eric G D. *J. Power Sources*, 1999, 80: 78
- [ 32 ] Medeiros M G, Bessette R, Dischert D *et al.* *Navy Patent*: 78609, 1998-09
- [ 33 ] Dow E G, Bessette R, Medeiros M G *et al.* *J. Power Sources*, 1997, 65: 207
- [ 34 ] Medeiros M G, Bessette R R, Deschenes C M *et al.* *J. Power Sources* 2001, 96: 236
- [ 35 ] Cooper J F, Hosmer P K, Kelly B E. *US Pat.* 4154903, 1979-05
- [ 36 ] Tomantschger K, Mcclusky F, Oporto L *et al.* *Electro-chemical Society Extended Abstracts*, 1985, 85(2): 98
- [ 37 ] Brown J T. *US Pat.* 4745038, 1988-05
- [ 38 ] Littauer E L, Tsai K C. *J. Electrochem. Soc.*, 1978, 125: 845
- [ 39 ] Shuster N. *Proc. 35th Power Sources Symp.*, IEEE, 1992

· 读者和编者 ·

## 欢迎订阅《物理》

《物理》1972年创刊,中国物理学会主办,国内外公开发行.其宗旨是传播与普及当代物理学各分支学科及其交叉领域的前沿新进展、新动向和新思想,集知识传播与信息服务为一体,兼具科学性和可读性,在国内物理学期刊中独树一帜.读者为具有大学水平的全体物理学及其相关学科工作者,包括从事研究、教学、技术开发、科研管理的研究人员、大学和中学物理教师、工程技术人员、科研管理人员、研究生和大学生,以及物理学爱好者等.

从2004年起,正文页码增加到78页,采用无光铜版纸精美印刷,年底送当年数据光盘一张,每月12日发行,各地邮局均可订阅(邮发代号2-805),订价15元/月,全年订价180元(含邮费),大学生和研究生优惠订价为130元/年(含邮费,凭学生证直接向编辑部订阅),中国物理学会交纳会费的个人会员订价100元/年(含邮费,限向编辑部订阅).

编辑部订阅方式(随时欢迎订阅):1、邮局汇款(北京603信箱《物理》编辑部收,邮编100080)2、银行电汇:户名:中国科学院物理研究所,开户行:农行海东支行营业室,帐号:30948821-250101040005699(汇款时请注明“物理D07-3”).