

文章编号: 1007-4627(2006)03-0353-06

# 核电池材料及核电池的应用\*

郝少昌, 卢振明, 符晓铭, 梁彤祥

(清华大学核能与新能源技术研究院, 北京 102201)

**摘要:** 核电池具有体积小、寿命长、不受外界环境影响等优点, 因而在航空航天、深海、极地、心脏起搏器、微型电机等领域得到广泛地应用。核电池的发展与所用材料的发展互相促进。从同位素放射源、电能转换、密封保护的角度介绍了核电池所用材料的发展和最新研究进展, 同时也介绍了核电池现有和潜在的应用领域。

**关键词:** 核电池; 同位素; 能源

**中图分类号:** TL99      **文献标识码:** A

## 1 引言

核电池, 又称同位素电池, 它是利用放射性同位素衰变放出载能粒子(如  $\alpha$  粒子、 $\beta$  粒子和  $\gamma$  射线)并将其能量转换为电能的装置。按提供的电压的高低, 核电池可分为高压型(几百至几千 V)和低压型(几十 mV—1 V 左右)两类。按能量转换机制, 它可分为直接转换式和间接转换式。更具体地讲, 包括直接充电式核电池、气体电离式核电池、辐射伏特效应能量转换核电池、荧光体光电式核电池、热致光电式核电池、温差式核电池、热离子发射式核电池、电磁辐射能量转换核电池和热机转换核电池等<sup>[1, 2]</sup>, 其中直接充电式核电池、气体电离式核电池属于直接转换式, 应用较少。目前应用最广泛的是温差式核电池和热机转换核电池。

核电池取得实质性进展始于 20 世纪 50 年代, 由于其具有体积小、重量轻和寿命长的特点, 而且其能量大小、速度不受外界环境的温度、化学反应、压力、电磁场等影响, 因此, 它可以在很大的温度范围和恶劣的环境中工作。目前已经在航天、极地、心脏起搏器等领域成功应用。随着太空探索的深入和对新能源的追求, 人类对核电池也提出更高的要求。而核电池所用各种材料则与之相辅相成地发展。本文将从材料和应用方面对核电池作详细介绍。

## 2 核电池所用材料

一般来说, 核电池结构最里边是其心脏部分, 为放射性同位素, 它不断地发生衰变并放出热量; 同位素的外层为换能材料, 在这里热能被转换成电能; 接着是辐射屏蔽层, 防止辐射线泄漏出来; 最外边一般由合金制成, 起保护电池内部结构和散热的作用。可见核电池所用材料涉及同位素放射源、能量转换材料、防辐射材料、散热材料等。由于其特殊的用途决定了所选用材料的特殊性。

### 2.1 同位素放射源

同位素放射源在不同类型的核电池中所起的作用也不尽相同。直接充电式核电池是利用放射源发射的带电粒子来产生电势差; 气体电离式核电池和辐射伏特效应能量转换核电池是利用其发射的粒子束对介质的电离作用来产生电势; 荧光体光电式核电池是利用其发射射线诱发荧光物质发光后通过光电转换成电能; 而热致光电式核电池、温差式核电池和热机转换电池则利用放射源产生的热能来实现能量转换。作为核电池的能量来源, 同位素放射源都必须满足以下条件: 半衰期长(以保证电池的长寿命)、功率密度高、放射性危险性小、容易加工、经济和易于屏蔽等。

\* 收稿日期: 2006-01-24; 修改日期: 2006-06-29

作者简介: 郝少昌(1982-), 男(汉族), 河南偃师人, 硕士研究生, 从事溶胶-凝胶法制备陶瓷微球的研究;

E-mail: haosc04@mails.tsinghua.edu.cn

根据放射性同位素放出的射线不同,可以将其分为 $\alpha$ 源、 $\beta$ 源、 $\gamma$ 源3类,其中适合作为核电池放射源的有近10种。包括 $\gamma$ 源 $^{60}\text{Co}$ ;  $\beta$ 源 $^{90}\text{Sr}$ ,  $^{137}\text{Cs}$ ,  $^{144}\text{Ce}$ 和 $^{147}\text{Pm}$ ;  $\alpha$ 源 $^{210}\text{Po}$ ,  $^{238}\text{Pu}$ ,  $^{241}\text{Am}$ ,  $^{242}\text{Cm}$ 和 $^{244}\text{Cm}$ 等<sup>[3]</sup>。表1列出了核电池常用放射性同位素的一些参数。表2则给出了各种核电池目前所使用放射源的状况。

表1 不同放射性同位素的参数比较<sup>[4]</sup>

| 放射源核素             | 半衰期/a | 射线种类            | 比功率/(W/g) |
|-------------------|-------|-----------------|-----------|
| $^{60}\text{Co}$  | 5.26  | $\beta, \gamma$ | 5.54      |
| $^{90}\text{Sr}$  | 28.5  | $\beta$         | 0.223     |
| $^{137}\text{Cs}$ | 30    | $\beta, \gamma$ | 0.12      |
| $^{144}\text{Ce}$ | 0.78  | $\beta, \gamma$ | 0.284     |
| $^{210}\text{Po}$ | 0.38  | $\alpha$        | 144.8     |
| $^{238}\text{Pu}$ | 87.7  | $\alpha$        | 0.45      |

表2 各种核电池所使用的放射源<sup>[1]</sup>

| 种 类           | 同位素源            | 实 例   |
|---------------|-----------------|---|
| 直接充电式核电池      | $\alpha, \beta$ | $^{90}\text{Sr}, ^{85}\text{Kr}, ^{210}\text{Po}, ^3\text{H}$ |
| 气体电离式核电池      | $\beta$         | $^3\text{H}, ^{85}\text{Kr}$                                  |
| 辐射伏特效应能量转换核电池 | $\beta$         | $^{90}\text{Sr}-^{90}\text{Y}$                                |
| 荧光体光电式核电池     | $\beta$         | $^{147}\text{Pm}$   |
| 热致光电式核电池      | $\beta$         | $^{90}\text{Sr}$  |
| 温差式核电池        | $\alpha, \beta$ | $^{238}\text{Pu}, ^{210}\text{Po}$                            |
| 热离子发射式核电池     | $\alpha$        | $^{144}\text{Ce}$   |
| 电磁辐射能量转换核电池   | $\beta$         | $^{90}\text{Sr}-^{90}\text{Y}$                                |
| 热机转换核电池       | $\alpha, \beta$ | $^{235}\text{U}$  |

这些同位素单质或化合物通常用耐高温材料做成的外壳密封,一起构成核电池的能量核心。在空间应用中最为合适的放射性同位素的是 $\alpha$ 热源,如 $^{238}\text{Pu}$ 和 $^{210}\text{Po}$ ,它们的外照射剂量低,所需屏蔽重量小,可以大大节省火箭发射费用。 $^{238}\text{Pu}$ 的寿命长,半衰期为87.7 a,衰变时释放的能量为5.48 MeV。美国在空间飞行器上均使用 $^{238}\text{Pu}$ 热源<sup>[5]</sup>。就 $^{238}\text{Pu}$ 热源的燃料形式而言,早期曾使用过金属铀(如SNAP-3B和SNAP-9A),之后使用了氧化铀微球(如SNAP-19B和SNAP-27)、氧化铀-钼陶瓷(如SNAP-19和百瓦级RTG),现今已发展为热压氧化铀( $^{238}\text{PuO}_2$ )块(如通用型RTG)<sup>[6]</sup>。

$^{210}\text{Po}$ 的寿命短,半衰期仅为0.38 a,衰变时释

放的能量为5.35 MeV,目前 $^{210}\text{Po}$ 主要是用于制作原型核电池。美国早期的原型温差式核电池使用的就是 $^{210}\text{Po}$ ,前苏联早期在核电池上也使用过 $^{210}\text{Po}$ ,而后着重用于发展反应堆动力。我国于1971年研制的原型核电池采用的也是 $^{210}\text{Po}$ 放射源,总活度为1110 Ci,产生热能35.5 W,输出功率1.4 W<sup>[7]</sup>。

$^{90}\text{Sr}-^{90}\text{Y}$ 衰变过程发射的 $\beta$ 粒子在辐射伏特效应能量转换电池和电磁辐射能量转换核电池中应用较多<sup>[8]</sup>。因此,在偏僻地区使用的核电池,可以选用 $^{90}\text{Sr}$ 作为放射源。 $^{90}\text{Sr}$ 本身是裂变堆的主要放射性废物之一,可以从核电站的放射性废物中提取。所以,用 $^{90}\text{Sr}$ 来发电也是对废物的一种综合利用。

氡作为能量来源的状态有气体和固体,可以用于气体电离式核电池及温差式核电池。氡仅仅释放出低能量的 $\beta$ 粒子,可以用非常薄的材料来遮挡,是一种较安全且易于密封的放射源。

## 2.2 电能转换材料

核电池的发电机制各有不同,所用能量转换材料也不同。

直接充电式核电池的两个电极都选用金属,发射电子的一端为正极,接收电子的一端为负极。美国康奈尔大学科学家利用铜板和同位素 $^{63}\text{Ni}$ 板作为新型电池,在衰变时 $^{63}\text{Ni}$ 会释放 $\beta$ 粒子,失去电子获得正电荷,铜板接收 $\beta$ 粒子带负电;外接负载构成回路时,镍铜电池便会开始工作,源源不断地产生电流,为负载提供电能。 $^{63}\text{Ni}$ 半衰期达100 a,按半衰期来算,该电池至少工作50 a。

气体电离式核电池的能量转换靠溢出功有差异的材料实现,一般高溢出功的材料有铂、氧化铅、钼和金等;低溢出功的材料有镁和铝等;放射性气体电介质通常为氡或 $^{85}\text{Kr}$ 。若用二氧化铅(高逸出功)和镁(低逸出功)作为电极,开路电压可达1.5 V左右<sup>[9]</sup>。

辐射伏特效应能量转换核电池、荧光体光电式核电池、热致光电式核电池和温差式核电池的发展都与半导体技术密切相关<sup>[10]</sup>。随着半导体材料制造技术的提高,使得这些电池的实际应用成为可能。例如,美国能源部提出的先进放射性同位素发电体系(ARPS)的开发计划中就包括热致光电式核

电池,使用的半导体为 Ga-Sb 元件,另外,Ge 和 Ga-As 元件可较好地满足要求。采用这种材料制造的核电池的能量转换效率比目前使用温差式核电池高出 2—3 倍,这一计划的实施意味着未来空间能源在输出同样的功率时,可以使用较少的放射性同位素原料,并大大减少电池的重量和成本。

温差式核电池作为一种成熟的核电池,所用的能量转换材料为热电材料,是核电池的重要部件,其功能是将放射性同位素衰变时产生的热能转变为电能。温差热电转换部分是由一些性能优异的半导体材料组成,如碲化铋、碲化铅、锗硅合金和硒族化合物等,把这些材料串联起来,P 型半导体元件和 N 型半导体元件就作为电池的两极。它与周围介质之间的温差通过半导体温差热电元件转变为电势差,源源不断地发出电来。如将一个包含约 11 mg 的  $^{210}\text{Po}$  放射源密封在直径约 10 mm 的小球里,再与 7 个铬镍康铜温差电偶组成的核电池,其温差为  $78\text{ }^{\circ}\text{C}$ ,开路电压为 42 mV。迄今为止,美国空间领域应用的温差式核电池总共使用了 3 种类型的热电材料。早期均采用 PbTe 作热电材料。后来研制了 TAGS(Te, Ag, Ge 和 Si)合金作 P 型元件,N 型元件仍为 PbTe,热接点温度可达  $500\text{—}610\text{ }^{\circ}\text{C}$ 。近年来,在百瓦级温差式核电池和通用型温差核电池中又使用了新的热电材料 SiGe,使热接点温度提高到  $1\ 000\text{ }^{\circ}\text{C}$ <sup>[7, 11, 12]</sup>。

### 2.3 密封保护材料

由于核电池的应用环境一般较恶劣,可能要经受住外部高温及低温的考验,而且为保障其安全使用,必须做到万无一失,否则就有可能发生泄漏,出现大的核污染事故。核电池的密封保护包括同位素放射源的包覆、能量转换层外的防辐射层和外壳。目前的密封保护材料主要包括金属合金、碳素材料及陶瓷材料。

1989 年美国发射的“伽利略号”木星探测器、1990 年“尤里西斯号”太阳极区探测器以及 1997 年克西尼号土星登陆器所用核电池的同位素放射源都是包覆后的燃料颗粒,它也可以用于空间放射性同位素加热单元。如图 1 为  $^{238}\text{PuO}_2$  包覆颗粒,它是在  $^{238}\text{PuO}_2$  核芯外包覆厚度为  $5\ \mu\text{m}$  的裂解碳层和厚度大于  $10\ \mu\text{m}$  的 ZrC 层。然后将包覆颗粒分散在石

墨基体中进行压制,由于石墨基体有良好的导热性能,在压制过程中包覆颗粒分布不均匀不会影响热转换,通过每颗燃料颗粒的温降也仅仅  $0.01\text{ }^{\circ}\text{C}$ 。压块中的燃料核芯可以有两种尺寸(300 和  $1\ 200\ \mu\text{m}$ ),分别占颗粒体积的 62.5% 和 72%(如图 2 所示)。裂解碳层采用 CVD 工艺,以烃类气体(如乙炔、乙烯和丙烯等)为前驱体在流化床中进行包覆,为疏松结构,能储存  $^{238}\text{Pu}$  放射时产生的 He 气,也能起到应力缓冲的作用。包覆的 ZrC 则是通过锆的有机化合物为前驱体热解而成,ZrC 层可以耐高温,也可以作为燃料释放 He 气的容器,有效防止了燃料的泄漏,提高了空间核电池的安全性<sup>[6]</sup>。

图 1 包覆核燃料颗粒的剖面图

图 2 含两种粒径包覆颗粒的燃料压块

Mohamed 等<sup>[13]</sup>设计的温差式核电池中,同样采用了热解石墨和 ZrC 包覆过的  $\text{PuO}_2$  颗粒燃料压块作为热源。该压制块用 Pt-30%Rh 合金箔包覆。合金外部则为热解石墨层,作为绝热材料;热源最外部为缓冲层,所用材料为具有精细编织结构的碳-碳复合材料。外壳所用材料是铝合金,在外壳和热源之间填充多层绝热材料和温差转换材料。

图 3 给出了 Schock 等<sup>[14]</sup>设计的热光电转换核电池的结构,每个通用热源模块包括 4 个 62.5 W 的  $\text{PuO}_2$  燃料团,密封在铱合金衬里中。其它的模块单元为石墨,其作用是为了在空间探测器发射前后及过程中发生事故时保护铱衬里的完整。其中包括两层致密碳层和一层缓冲碳层,它们用精细编织体制作,是一种非常坚韧的耐高温三维碳-碳复合材料。缓冲层作为返回进入大气层发生意外时的烧蚀体,致密层是为了防止着陆时衬里破裂。在致密层和缓冲层之间的高温绝热材料是碳纤维增强碳复合材料,它可以防止返回过程中骤热骤冷对衬里的影响以及着陆前次声波气流引起的衬里碎裂。

图 3 热光电转换核电池的密封结构示意图

热源密封在密封罐里以防止污染物泄漏而影响半导体的性能。密封罐材料为 Mo-50%Re,因为该



合金具有很好的低温延性。密封罐外包覆了一层钨，以减少升华，而且钨包覆层经过粗糙处理，能提高电池的转换效率。密封罐内部与缓冲层相连，衬有一层铍以防止石墨和钨反应。该核电池的外壳为铝合金，电池外壳与密封罐之间通过  $ZrO_2$  陶瓷球支撑，以减少热损失。在铝壳和密封罐之间的空隙中，密封罐的两头及其中的两个侧面填充了绝热材料，由 60 层 0.008 mm 厚的钨薄片组成，层间分布  $ZrO_2$  颗粒。同时在密封罐两侧面则放置着热光电转换材料。这种结构能使 90% 的热能为热光电转换材料所利用。

在医学领域，如作为人工心脏和心脏起搏器电源时，外壳则采用惰性金属合金，如铂、钽、金及其合金等。

### 3 核电池的应用

#### 3.1 航天领域的应用<sup>[15, 16]</sup>

宇宙航行对电源的要求非常高，除了功率必须满足要求外，不仅要求体积小、重量轻和寿命长，还要能经受宇航中各种苛刻条件的考验。太阳能电池广泛应用在人造地球卫星上，但是当进行远离太阳的深空航行时，太阳能电池就显得力不从心，除了因光线太弱导致能量不足外，还有可能因受到强烈的宇宙射线的照射而使能量转换元件失效。而核电池可以满足各种航天器对电源的长期、安全、可靠供电的要求，被航天界普遍看好并广泛应用。

20 世纪，美国发射的地球卫星、登月飞船、空间探测器都使用核电池作为动力，且多为温差式核电池。例如，1961 年发射的“探险者 1 号”导航卫星，使用核电池作电源，到了 1972 年还能清晰地接收到它发出的讯号。1969 年 7 月 21 日，美国宇航员乘阿波罗 11 号飞船成功登上月球。在阿波罗 11 号飞船上，安装了两个放射性同位素装置，其热功率为 15 W，用的燃料为  $^{238}\text{Pu}$ 。在月球严酷的自然环境下，同位素电池仍能正常稳定工作。后来发射的阿波罗 12, 14, 15, 16 及 17 号相继安装了 SNAP-27A 核电池，它用的燃料也是  $^{238}\text{Pu}$ ，设计输出功率为 63.5 W，整个装置重量为 31 kg，设计寿命为 1 年，但实际上，其寿命远远超过设计时的 1 年，并能连续供给 70 W 以上的电力。1997 年 10 月“卡西尼号”宇宙飞船沿着金星-金星-地球-木星的借

力飞行路线于 2001 年 5 月 18 日正式进入土星系，并获得了清晰的土卫九照片。它的核电池所用核材料为  $^{238}\text{PuO}_2$  陶瓷压块，可提供 750 W 的总功率，到探测器 11 年的飞行任务结束时仍能发出 628 W 的电力。

随着人类航天活动的日益拓展，必然对空间电源提出新的需求，同位素电池成为航天技术进步的更重要工具。

#### 3.2 航海、航空导航等领域的应用<sup>[1, 17]</sup>

处于深海、远海、急流险滩处的灯塔和导航浮标等需要的能源必须保证寿命长，通常的太阳能电池、燃料电池和其他化学电池很难胜任，而采用核电池，能保证光源几十年内不换电池，不用为经常更换电池和维修发电机而烦恼。

军事上，还将核电池用作水下监听器的电源，用来监听敌方潜水艇的活动。它的工作时间可长达十几年，而且可以长期不用人去看管和维修。它们就像机智勇敢的侦察兵，十几年如一日地在水下执行着警戒任务。还有一些海底设施，如海下声纳、各种海下科学仪器与军事设施、海底油井阀门的开关和海底电缆中继器等，所用核电池既能耐 5—6 km 深海的高压，安全可靠地工作，花费成本又少，令人十分称心。

地面上有许多终年积雪冻冰的高山地区、遥远荒凉的孤岛、荒无人烟的沙漠，还有南极、北极等，也需要建立气象站和导航站。如果用其它电源，更换和维修是极其困难的。若用核电池，可以建成自动气象站或自动导航站，实现自动记录和自动控制，常年无须更换和维修电源。

#### 3.3 在医学领域的应用

在医学上，这种体积小重量轻的长寿命的核电池已经广泛应用于心脏起搏器，全世界已经有成千上万的心脏病患者植入了核电池驱动的心脏起搏器，挽救了他们的生命，使他们能够重新享受人生的幸福。

心脏起搏器的电源体积非常小，比 1 节 2 号电池还小，重量仅 100 多克，若用放射源为  $^{238}\text{Pu}$ ，150 mg 即可保证心脏起搏器在体内连续工作 10 年以上。如换用产生同样功率的化学电池，要保证同样

的使用寿命,其重量几乎与成人的体重一样。核电池保证患者不必再为更换埋在体内已经不能再工作的化学电池而冒着生命危险,忍受极大痛苦,反复进行开胸手术。

### 3.4 在微型电动机械中的应用<sup>[18]</sup>

微型电动机械(MEMS)是一个飞速发展的领域,从汽车安全气囊的触发感应器到环境监控系统的药品释放,微型电动机械已经应用到了人们的日常生活中,并有希望生产大量不同的具有创新意义的设备。但这些设备受到缺乏随机电源的限制,目前正在研究的解决方法包括燃料电池、矿物燃料以及化学电池都有其局限性,最大的问题就是体积太大。Cornell 大学和 Wisconsin-Madison 大学在早期研发的核电池装置基本上就是由一小量<sup>63</sup>Ni 放置在一个普通的 PN 结所组成。<sup>63</sup>Ni 所放射出来的  $\beta$  粒子把二极管的原子电离,得到分离的空穴和电子对而产生电流。在此基础上,又研发了改进的核电池能作为小型机械发电机的电源。

### 3.5 在手机等电子产品上的应用

最近,微型核电池技术已经被成功地引入到手机电池领域,并准备投产<sup>[19]</sup>。微型核电池虽然只有钮扣般大小,主要成分是<sup>235</sup>U,但却拥有在手机第一次使用后能够连续提供 1 年以上待机时间的电量,从而使厂商节省了生产充电器的成本。

另外,在手机中,射频滤波器占用了相当多空间,且这些微型电动机械滤波器需要相对较高的直流电压。一个微型核电池可以用以产生 10—100 V 的电压,直接对滤波器进行有效的供电。虽然还存在一些技术、成本和安全等方面的问题,但可以预

见,等这些问题得到有效解决,微型核电池很有希望安装在各种手提设备上。

### 3.6 在电动汽车上的应用

电动汽车是环保型汽车发展的一个方向,目前电动汽车所用的电池多为化学电池,体积庞大,增加了自身的负载,且也同样存在充电后使用时间短和寿命短的问题。当前,世界上有部分科学家大胆地提出在电动汽车上使用核电池的设想<sup>[20]</sup>。随着航天、航空、深海等领域用核电池的成熟,核电池必将在汽车这一能源大户中得到应用。因此,可以预计在 21 世纪科学家们将会在电动汽车上应用一种长期工作不需维修、高效大功率、小体积、低成本的核电池。

## 4 总结

本文对核电池所用材料以及核电池的应用领域进行了综述。从中不难看出,核电池从产生到现在一直充当着一些特殊领域的关键角色。核电池的发展与新材料的发展互促互进,核电池的发展方向对材料提出了更高的要求,特别是能量转换材料和密封材料。核电池材料科研的突破,同时也会带动相关领域的进展。

鉴于近几年来国际上对能源环境的关注,各国也在能源领域积极开展研究。未来核电池朝着更安全可靠、寿命更长、重量更轻、成本降低、能量转换效率更高和功率范围更大的方向发展。相应地,随着核电池安全、效能和成本等问题的解决,其应用领域也会更广。

## 参 考 文 献:

- [1] 王铁山,张保国. 同位素, 1996, **9**(1): 41.
- [2] Golder R, Loenhardt W, Radmanche R, *et al.* Isotopenpraxis, 1978, **14**(11): 361.
- [3] 蔡善钰. 核科学与工程, 1994, **14**(4): 373.
- [4] 孙树正. 放射源的制备与应用. 北京: 原子能出版社, 1992, 338—345.
- [5] Rinehart G H. Progress in Nuclear Energy, 2001, **39**(3—4): 305.
- [6] El-Genk M S, Tournier J M. Progress in Nuclear Energy, 2004, **44**(3): 215.
- [7] 蔡善钰,何舜尧. 核科学与工程, 2004, **24**(2): 97.
- [8] 王铁山,张保国. 核技术, 1994, **17**(9): 548.
- [9] Schalch D, Scharmann A. Kerntechnik, 1975, **17**: 23.
- [10] Gusev V V, Kodyukov V M, Pochtakov A A, *et al.* Radiological Technology, 1975, **5**: 61.
- [11] Greatbatch W. IEEE Transformed Engineering, 1973, **20**

- (5): 332.
- [12] 黄志勇, 吴知非, 周世新等. 原子能科学技术, 2004, **38**: 42.
- [13] Mohamed S, El-Genk M S, Tournier J M. Nuclear Engineering and Design, 2001, **208**: 29.
- [14] Schock A, Or C, Kumar V. Acta Astronautica, 1997, **41** (12): 801.
- [15] Rinehart G H. Progress in Nuclear Energy, 2001, **39**(3—4): 305.
- [16] Leslie J D, Chris S. Acta Astronautica, 2000, **46**(2—6): 229.
- [17] Brown P. Raum & Zeit Magazine, 1989, **1**(2): 33.
- [18] Shi F, Ramesh P, Mukherjee S. Computers & Structures, 1995, **56**(5): 769.
- [19] Walters L C, Porter D L, Crawford D C. Progress in Nuclear Energy, 2002, **40**(2—3): 513.
- [20] 邓隐北, 蔡 桓. 江苏机械制造与自动化, 2000, 2: 33.

## Nuclear Battery Materials and Application of Nuclear Batteries

HAO Shao-chang, LU Zhen-ming, FU Xiao-ming, LIANG Tong-xiang

(*Institute of Nuclear and New Energy Technology, Tsinghua University, Beijing 102201, China*)

**Abstract:** Nuclear battery has lots of advantages such as small volume, longevity, environal stability and so on, therefore, it was widely used in aerospace, deep-sea , polar region, heart pacemaker, micro-electromotor and other fields etc. The application of nuclear battery and the development of its materials promote each other. In this paper the development and the latest research progress of nuclear battery materials has been introduced from the view of radioisotope, electric energy conversion and encapsulation. And the current and potential applications of the nuclear battery are also summarized.

**Key words:** nuclear battery; isotope; energy source