

文章编号: 1007-8827(2011)04-0246-09

炭材料在能量储存与转化中的应用

康飞宇, 贺艳兵, 李宝华, 杜鸿达

(清华大学深圳研究生院 热管理工程与材料重点实验室, 广东 深圳 518055)

摘要: 通过评述炭材料在能量储存和转化领域的研究和发展现状,如:炭材料是燃料电池重要的催化剂载体、双极板和气体扩散层材料,也是太阳能电池构建碳-硅PN结、全碳PN结以及透明导电膜的核心材料,锂离子电池和超级电容器的关键电极材料。另外,炭材料在气体存储、蓄能蓄热、核能、风能等领域也具有重要的作用。认为:炭材料形态结构多样性及其所具有的诸多优异物理和化学特性,是其在能量储存和转化领域中广泛应用的根本。提出:炭材料必须向纳米化、有序化、复合化方向发展,实现功能炭材料的可控制备、纳米结构调控、复合材料的优化设计与制备对能量转化和存储器件升级,炭材料必将获得更加广阔的发展和应用空间。

关键词: 炭材料;能量储存;能量转化

中图分类号: TQ 127.1⁺1

文献标识码: A

1 前言

随着化石能源日渐短缺,环境污染日益严峻,发展可再生能源和清洁能源是未来解决全球气候变暖和能源环境危机的核心所在,也是各国实现节能减排和低碳发展的重要手段。炭材料结构形态多样,具有储能、传热、导电、催化等物理化学特性,且耐腐蚀、耐高温、资源丰富,使其在新型能源转化和储运领域得到了广泛应用。

炭石墨及其他纳米炭材料作为能量转化和储存材料主要应用在以下几个方面:1)能源转化,如太阳能电池、燃料电池和锂离子电池等;2)能量储存,包括超级电容器、气体存储、相变储能等;3)其他方面,包括核能、风能等;国内外研究者对炭材料在上述领域进行了大量的研究,使得炭材料的功能不断升级,本文试图对炭材料在能量储存和转化领域的研究和应用进行较全面的分析和展望。

2 能源转化

2.1 燃料电池

2.1.1 催化剂载体

纳米炭常被用作燃料电池催化剂载体,多种形态炭材料如炭黑、活性炭、多孔炭、炭气凝胶、碳纳米管、石墨烯等均可作为燃料电池催化剂载体,其负载

Pt、Pt-Ru等金属粒子可形成质子交换膜燃料电池(PEMFC)和直接醇类燃料电池(DMFC)的阴极和阳极催化剂,催化剂的催化效率取决于载体的粒子大小、导电性高低、耐腐蚀性以及Pt、Pt-Ru等金属粒子在载体上的分散性、结合性和粒径大小。

炭黑为最常用的燃料电池催化剂载体。干林等^[1]将不同粒径的Pt催化剂粒子负载于VulcanXC-72导电炭黑中,发现尺寸较小的Pt颗粒被嵌入到载体表面的微孔中,而尺寸较大的Pt颗粒则暴露于炭黑表面,Pt平均粒径为3.0 nm的Pt/C复合材料作为DMFC催化剂的性能最好。研究发现炭黑的耐腐蚀性对PEMFC催化剂Pt/C的耐用性具有重要的影响^[2]。

活性碳纳米管和活性纳米碳纤维作为燃料电池催化剂载体也显示了较好的性能。如活性碳纳米管负载Pd-Ag粒子作为DMFC催化剂的催化活性高于炭黑负载Pd-Ag催化剂的催化活性^[3]。Huang等^[4]将Pt催化剂粒子均匀负载于活性炭纤维上,Pt粒子平均粒径为2.4 nm,其对甲醇、乙醇和异丙醇的催化氧化活性和稳定性很好。Gan等^[5-6]发现经热处理后的纳米碳纤维,其表面的石墨边缘重构形成单壁纳米回路能保持Pt纳米颗粒的均匀分散,可提高Pt对氧还原反应的催化性能。

多孔炭具有丰富的孔结构,Zhang等^[7]通过原

收稿日期:2011-06-27; 修回日期:2011-08-13

基金项目:国家自然科学基金(50632040,50802049,50972065,50902079),广东省创新团队和深圳市科技计划项目(JP200806230010A,SG200810150054A)。

作者简介:康飞宇(1962-),男,内蒙古卓资人,博士,教授,博导,主要从事新型炭材料、新能源器件及关键材料的研究。

E-mail: fykang@mail.tsinghua.edu.cn

位自组装聚合物胶体、炭化、去除模板得到了具有部分石墨化特性的层次孔炭,大孔和中孔内部连通,是一种很好的 Pt-Ru 合金催化剂载体。多孔炭官能团的引入对催化剂催化活性的提高也具有重要的意义,如 Lee 等^[8] 在多孔炭中引入 $-SO_3H$ 官能团,将 Pt-Ru 纳米粒子负载于所制备的多孔炭中,所得催化剂的离子电导率更高,比商用 60% Pt-Ru/Vulcan XC-72 催化性能更好。

炭气凝胶(CAs)是一种具有可控孔结构的新型炭材料,炭气凝胶的孔结构对催化剂的活性具有重要的影响^[9]。Du 等^[10] 以炭气凝胶作为载体采用乙二醇还原法制备得到 Pt/CAs 阴极催化剂,发现炭气凝胶孔径小于 25nm 时,孔径越大对氧的扩散阻力越小,催化剂的活性越高。Pt-Ru/CAs 作为 DMFC 阳极催化剂同样显示了良好的性能^[11]。Smirnova 等^[12] 在超临界条件下将有机金属前躯体引入不同孔径的炭气凝胶上,经过热处理得到负载不同 Pt 粒子含量的催化剂,发现炭气凝胶的孔径和 Pt 的负载量对 PEMFC 催化剂的催化活性具有重要的影响。

碳纳米管也是一种重要的燃料电池催化剂载体,康飞宇等报道了掺杂五元环缺陷的竹节状碳纳米管(BCNTs)在 DMFC 催化剂载体中的应用,发现五元环缺陷能在较温和的氧化条件下形成丰富的表面含氧官能团,增强了载体与金属颗粒的作用,将 Pt 纳米颗粒均匀分散于 BCNTs 载体上,作为 DMFC 阴极催化剂在 30℃ 下显示出较好的性能^[13]。制备的高金属含量(质量分数为 60%)Pt-Ru/BCNT 阳极催化剂,可显著提高 DMFC 性能^[14]。

石墨烯作为燃料电池催化剂载体近年来成为研究热点,用 $NaBH_4$ 同步还原 H_2PtCl_6 和氧化石墨烯,可将 Pt 粒子均匀沉积于石墨烯片层上,所制 Pt/石墨烯作为 DMFC 催化剂显示较好的催化活性^[15]。使用石墨烯作为 PEMFC 催化剂载体,负载 Pt_3M ($M=Co$ 和 Cr) 比只负载 Pt 对氧还原反应的活性更好^[16]。

2.1.2 双极板

由于石墨具有高导电性和密度低的特点,可以用作燃料电池双极板。清华大学采用增强膨胀石墨块体,湖南大学采用粘接天然石墨,均取得了很好的效果。柔性石墨材料具有很小的相对透气系数,阻气性能稳定,是制造 PEMFC 双极板较为理想的材料^[17]。如将压缩膨胀石墨(CEG)与环氧树脂形成的复合材料用于 PEMFC 双极板,复合材料的机械

性能和透气性可随着树脂含量发生显著变化,而导电性保持不变,因为 CEG 片层内可形成连续的膨胀石墨导电网络,其中以环氧树脂(质量分数为 30%)/CEG 复合材料性能最优^[18]。

使用粘接天然石墨也可制得效果良好的石墨电极双极板,如湖南大学刘洪波等以天然石墨为导电骨料,树脂为黏结剂,炭黑为导电添加剂,通过模压成型得到了性能良好的 PEMFC 双极板^[19-20]。炭黑的加入可使双极板强度有所减小,而增大成型压力和延长保压时间则可提高双极板的导电性和强度。邹彦文等^[21] 发现使用人造石墨和天然石墨复合材料作为导电骨料的双极板,性能明显优于使用单一石墨组分样品的性能。天然石墨/苯酚甲醛树脂复合双极板通过膨胀石墨薄层表面修饰能够降低极板和气体扩散层之间的接触电阻^[22]。

2.1.3 气体扩散层

气体扩散层对质子交换膜燃料电池的性能具有重要的影响。燃料电池催化剂通常为厚度小于 10 μm 的薄层材料,气体扩散层一方面对催化剂起支撑作用,另一方面气体扩散层要为参加反应的气体和生成的水提供传质通道,因此气体扩散层必须是一种多孔材料,并且具有较高的电子电导率和憎水性。碳纤维纸和碳纤维布是重要的气体扩散层基底材料,在基底表面喷涂一层由炭黑和聚四氟乙烯均匀混合而成的涂料作为憎水层,再经烧结可制得气体扩散层。

基底的石墨化可提高扩散层的电导率,如将聚丙烯腈碳纤维布石墨化可制得电阻较小的气体扩散层^[23],中南大学黄启忠等用气相沉积方法制备了高温炭包覆碳纤维纸,发现高温炭能够均匀地沉积于碳纤维纸的表面,加强碳纤维之间的连接,比传统方法制备的扩散层的导电性和透气性明显增强^[24]。另外,气体扩散层的压实密度对扩散层的接触内阻、透气性具有重要的影响,随着压实密度的增加,燃料电池的性能变差,扩散层在平面方向的透气性明显好于在垂直方向的透气性^[25-26]。

2.2 锂离子电池

2.2.1 负极材料

锂离子电池中,炭材料是最常用的负极材料。1989 年 SONY 公司首先把沥青焦用作锂离子电池负极材料^[27],实现了锂离子电池的商业化。随后炭负极材料迅速得到发展,其中包括中间相炭微球(MCMB)、硬炭、人造石墨、天然石墨等。焦炭比容量低,基本不被用作负极材料。高度石墨化的 MC-

MB 具有优良的循环特性,但其成本高昂,后来 MC-MB 逐渐被石墨材料取代。硬炭材料存在较多的微孔贮锂空间,比容量一般高于石墨^[28]。硬炭具有乱层结构,同时碳原子层之间距离比石墨大,因此大电流充放电能力比石墨好。硬炭负极材料的缺点在于首次效率低,在硬炭表面包覆一层由煤焦油沥青热解产生的软炭可提高其的库仑效率和比容量^[29]。

人造石墨具有高纯度、高石墨化度以及低比表面积等特点,由于人造石墨结构上的高度一致性及优秀的电化学性能,目前高端锂离子电池均采用人造石墨负极材料。人造石墨的特点在于其颗粒内部为多孔结构,因此提高了比容量及大电流性能,并具有良好的低温充放电特性^[29]。人造石墨性能优异,但因为成本较高,在中低端锂离子电池市场已基本被天然石墨取代。

天然石墨可分为鳞片石墨和微晶石墨,具有不同的结构和电化学特性。目前应用较多的为鳞片石墨,采用球化整形和无定形碳包覆等方法进行处理,比容量可达 $340 \text{ mAh} \cdot \text{g}^{-1}$ 以上,首次效率 90% 以上。但是鳞片石墨由于在充放电过程中体积膨胀,颗粒容易崩裂,导致其循环性能较差^[30]。鳞片石墨通过微膨改性,可得到具有多孔结构的微膨石墨,其孔结构可以缓冲循环过程中石墨的体积变化,改善循环稳定性;同时提供更多的贮锂空间,提高比容量^[31]。与鳞片石墨相比,微晶石墨具有成本更低、电化学循环更稳定等优势,然而微晶石墨首次充放电效率较低,将微晶石墨提纯、整形、分级、表面包覆热解炭可得到性能较好的改性微晶石墨负极材料^[32]。

随着纳米科学的进步和发展,碳纳米管、纳米碳纤维等纳米材料作为锂离子电池负极材料得到大量研究,目的是提高负极材料的比容量和功率充放电性能。碳纳米管虽然具有较高的比容量和较好的循环特性^[33],但碳纳米管的分散和电极膜片的制备都比较困难,阻碍了其实际应用。通过碳纳米管直接成膜或直接在导电基体上生长,可以解决碳纳米管在制备负极膜片时需添加大量黏结剂的问题。

放射形截面的碳纤维为类石墨结构,具有较好的循环性能和快速充放电能力,但碳纤维高昂的成本使其缺乏实用价值。近年来,研究者开始探索采用电纺丝制备纳米碳纤维用于负极材料^[34-35]。电纺丝制备得到的纳米碳纤维以无规则纺织的形式形成一张膜,在炭化之后可以直接用作电极。如在聚丙烯腈中加入聚乳酸,炭化后可以得到多孔碳纤维负极材料^[35]。

炭材料与 Sn 或 Si 复合可制备高比容量负极材料。如 Zou 等^[36]通过冰冻造孔的方法,设计并制备了多孔 Sn/C 纳米纤维膜(TEPC),纳米级圆孔均匀分散在碳纤维基体中,孔中填充粒径较小的 Sn/SnO₂ 纳米颗粒,为循环过程中 Sn 的体积变化预置了缓冲空间,有可能解决这类材料的循环寿命问题,TEPC 在循环 40 次后比容量达 $510 \text{ mAh} \cdot \text{g}^{-1}$ 。Fuchsbichler 等^[37]将凝胶态的硅前躯体沉积到天然石墨中,然后经 550°C 热处理 2 h,制备得到 $\text{C}_{2/3}\text{Si}_{1/3}$,复合材料经 100 次循环后比容量仍然为 $850 \text{ mAh} \cdot \text{g}^{-1}$,且充放电效率达到 99% 以上,显示了较好的电化学性能。

2.2.2 正极材料的导电添加剂

商用锂离子电池正极材料大多为氧化物,导电性较差,炭材料作为导电添加剂对正极材料容量的发挥和倍率性能的提高具有重要的作用。目前最常用的正极导电添加剂为导电石墨、Super-P 炭黑、乙炔黑等。另外随着碳纳米管、石墨烯、纳米碳纤维制造成本的降低,上述材料也逐渐作为导电添加剂应用于锂离子电池中,并能形成良好的导电网络极大改善了锂离子电池的大倍率放电性能。如将多壁碳纳米管、石墨烯、纳米碳纤维添加到电极材料(如 LiFePO_4 、 $\text{LiNi}_{0.7}\text{Co}_{0.3}\text{O}_2$ 、 $\text{Li}_4\text{Ti}_5\text{O}_{12}$) 中,可形成三维导电网络,在添加量较少的情况下可明显提高电极材料的倍率充放电性能与比容量^[38-41]。另外在电极材料的制备过程中,通过原位复合的方法在颗粒表面包覆一层炭膜也是提高材料电导率的一种常用方法^[42-44]。

2.3 太阳能电池

2.3.1 碳-硅 PN 结和全碳 PN 结

碳质材料在太阳能电池中的应用主要围绕构筑碳-硅 PN 结和全碳 PN 结,以及石墨烯透明导电膜。碳纳米管和石墨烯为代表的新型碳质纳米材料为薄膜光伏电池的发展注入了活力。碳纳米管作为一维碳纳米材料具有诸多适于光伏应用的特性。半导体型碳纳米管是良好的电子受体,具有良好的光导特性、高载流子迁移率^[45-46]。因此将碳纳米管与电子施体结合起来能够达到光电转换的目的^[47]。碳纳米管薄膜同单晶硅可形成异质结,由此组装的光伏电池的转换效率达到 10%^[48]。

石墨烯是具有理想二维结构和奇特电子性质的另一种碳质纳米材料,其理论比表面积高达 $2600 \text{ m}^2 \cdot \text{g}^{-1}$,室温下具有高速的载流子迁移率 ($15000 \text{ cm}^2 / (\text{V} \cdot \text{s})$)。石墨烯是一种没有能隙的半

导体,室温下通常呈金属性。但形成一维的石墨烯纳米带后,表现出完全的半导体性,因此石墨烯应用于纳米半导体器件领域具有更大的优势。石墨烯和单晶硅构成的肖特基结太阳能电池具有良好的光伏性能^[49-50],经优化后,电池转换效率已达到5.5%。

另外,基于石墨烯具有较高的载流子迁移率和良好的柔韧度,若通过掺杂将其改性为n型半导体,就可与多壁碳纳米管膜构成体相p-n同质结,这种全碳p-n结的构建有望促进太阳能电池在柔性基底领域的应用。

2.3.2 透明导电膜

碳纳米管和石墨烯同样可应用于太阳能电池透明导电膜电极的制备,如将单壁碳纳米管、薄层多壁碳纳米管和多壁碳纳米管经酸处理后分散于聚乙烯二氧噻吩去离子水溶液中,然后涂敷于聚对苯二甲酸乙二醇酯薄膜基底上,所制备的导电透明膜的片层电阻为 $247\ \Omega\cdot\text{sq}^{-1}$,透光率为84.7%^[51]。以柔性的聚对苯二甲酸乙二醇酯为基底所制备的半导体单壁碳纳米管薄层透明导电膜电阻为 $59\ \Omega\cdot\text{sq}^{-1}$,透光率可达80%^[52]。

用石墨烯制备透明导电膜近年来也成为一个研究热点,如通过剪应力得到的大片氧化石墨烯制备成缺陷极少的还原氧化石墨烯,无需后续退火处理,还原氧化石墨烯薄膜的电阻率为 $2.2\ \text{k}\Omega\cdot\text{sq}^{-1}$,透光率可达80%^[53]。将用快速电化学方法从石墨上剥离的石墨烯片溶解于二甲基甲酰胺中,添加水后在空气和二甲基甲酰胺界面处形成连续膜,该膜的透光率可达95%,硝酸处理后,膜电阻小于 $1\ \text{k}\Omega\cdot\text{sq}^{-1}$ ^[54]。另外,用碳纳米管作网络,石墨烯作为补孔材料所制备的碳基复合薄膜材料的表面电阻为 $735\ \Omega\cdot\text{sq}^{-1}$,透光率高达90%^[55],碳纳米管和石墨烯的协同作用使透明导电膜的透光率较高。

3 能量储存

3.1 超级电容器

3.1.1 炭电极材料

通常对称型超级电容器中电极材料为多孔炭,高比表面活性炭是最常用的超级电容器电极材料。近年来,层次孔炭^[56]、有序中孔炭^[57]、蠕虫孔炭材料^[58]、炭气凝胶^[59]等电极材料得到了发展,由此组装的超级电容器具有更加优异的高倍率性能。成会明等采用液相无机模板和反应性模板合成方法组装和制备了局域石墨化三维层次多孔结构(HPGC结

构)^[60],HPGC材料比商用活性炭和有序介孔炭材料具有更加优异的高倍率电化学能量储存与转换能力,大孔-中孔协同作用可实现电解液离子在多孔炭电极中的快速扩散行为,微孔的高静电吸附容量赋予该材料优异的电化学储能活性。

另外,对超级电容器用炭材料而言,其官能团的设计、引入和控制对提高炭材料的比容量具有重要意义,在定制合适的中孔结构并在骨架上引入具有赝电容效应的含氮官能团,可以在保证炭材料传质性能的条件下,大幅度提高其能量密度。如采用具有三维网络结构的硅凝胶作为模板,以富含氮元素的工业化聚丙烯腈树脂(PAN)为前驱体,制备出富氮三维中孔炭材料,该材料具有高的能量密度。亦即,炭材料含氮量对赝电容效应具有重要的影响^[61];在中孔炭材料中掺杂少量的硼,也可使中孔炭材料的界面电容提高1.5倍~1.6倍^[62]。

3.1.2 炭与氧化物复合材料

为了使超级电容器的能量密度实现大幅度的提高,使炭材料与金属氧化物复合增加赝电容成为近年来的研究热点。Lv等^[63]利用液相共沉淀法可将无定形 $\alpha\text{-MnO}_2$ 成功地负载在炭气凝胶上,经热处理后,无定形 $\alpha\text{-MnO}_2$ 以纳米纤维状形式均匀地锚固在相邻炭气凝胶网络骨架上,极大地提高了 MnO_2 的有效储能面积和电导性能,所合成的 MnO_2 掺杂炭气凝胶复合材料的比电容高达 $219\ \text{F}\cdot\text{g}^{-1}$ 。Yan等^[64]报道 MnO_2 和石墨烯复合材料(含质量分数78%的 MnO_2),在 $500\ \text{mV}\cdot\text{s}^{-1}$ 的扫描速度下比电容可达 $228\ \text{F}\cdot\text{g}^{-1}$ 。层次孔 MnO_2 与碳纳米管和导电聚合物所形成的三元复合材料也显示了较好的比电容和循环性能^[65]。碳纳米管也可与零维多孔氧化镍复合,其比电容达到了 $1329\ \text{F}\cdot\text{g}^{-1}$,并且在 $84\ \text{A}\cdot\text{g}^{-1}$ 的电流密度下循环性能良好^[66]。

3.1.3 非对称超级电容器

金属氧化物也可与炭材料组成非对称超级电容器以提高超级电容器的能量密度。如Xu等^[67]将 MnO_2 和活性炭组成非对称超级电容器,以 $0.1\ \text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$ 的 $\text{Mg}(\text{NO}_3)_2$ 为电解液,在 $2\ \text{mV}\cdot\text{s}^{-1}$ 的扫速下,比容量可达 $325\ \text{F}\cdot\text{g}^{-1}$,非对称超级电容器在 $\text{Ca}(\text{NO}_3)_2$ 电解质溶液中能量密度达到 $21\ \text{Wh}\cdot\text{Kg}^{-1}$ 。活性炭与 V_2O_5 组成的非对称超级电容器在 $0.5\ \text{mol}\cdot\text{L}^{-1}\ \text{K}_2\text{SO}_4$ 电解液中能量密度达到 $29.0\ \text{Wh}\cdot\text{Kg}^{-1}$,并显示了良好的循环性能。

活性炭还可与 $\text{Li}_4\text{Ti}_5\text{O}_{12}$ ^[68]、 NaMnO_2 ^[69]、

$\text{LiNi}_{1/3}\text{Co}_{1/3}\text{Mn}_{1/3}\text{O}_2$ ^[70] 等化合物组成非对称超级电容器,并具有较高的能量密度和功率密度。如 Pasquier 等^[68]研制的 500 F 活性炭/ $\text{Li}_4\text{Ti}_5\text{O}_{12}$ 超级电容器在 $800 \text{ W} \cdot \text{kg}^{-1}$ 的比功率下,比能量可达 $11 \text{ Wh} \cdot \text{kg}^{-1}$,充放电效率可达 95%;Qu 等^[69]开发的活性炭/ NaMnO_2 非对称超级电容器在 $130 \text{ W} \cdot \text{kg}^{-1}$ 的比功率下,比能量达到了 $19.5 \text{ Wh} \cdot \text{kg}^{-1}$ 。Zhao 等^[70]报道活性炭/ $\text{LiNi}_{1/3}\text{Co}_{1/3}\text{Mn}_{1/3}\text{O}_2$ 非对称超级电容器,在 $1 \text{ mol} \cdot \text{L}^{-1}$ 的 Li_2SO_4 溶液中 $\text{LiNi}_{1/3}\text{Co}_{1/3}\text{Mn}_{1/3}\text{O}_2$ 的比电容可达 $198 \text{ F} \cdot \text{g}^{-1}$ 。

3.2 气体储存

近年来研究者们对甲烷在碳纳米管和多孔炭中的储存特性和储存量进行了深入的研究。对单壁碳纳米管储存甲烷的研究发现,单壁碳纳米管阵列的范德华间隙对甲烷的储存具有重要的作用^[71]。多孔炭具有丰富的孔结构,也是气体储存较为理想的材料。Zhou 等^[72]利用模板法制备了六边形的介孔炭材料,材料比表面积为 $950 \text{ m}^2 \cdot \text{g}^{-1}$,孔径为 3.90 nm ,在温度为 298 K ,压力 $35 \text{ kg} \cdot \text{cm}^{-2}$ 下,对甲烷的吸附量达到 $81.35 \text{ mg} \cdot \text{g}^{-1}$ 。Liu 等^[73]也用模板法合成了有序的介孔炭材料,材料比表面积为 $1100 \text{ m}^2 \cdot \text{g}^{-1} \sim 1200 \text{ m}^2 \cdot \text{g}^{-1}$,比孔体积为 $1.24 \text{ cm}^3 \cdot \text{g}^{-1} \sim 1.30 \text{ cm}^3 \cdot \text{g}^{-1}$,孔径分布为 $2 \text{ nm} \sim 5 \text{ nm}$,在有水存在,温度为 275 K ,压力小于 7 MPa 的情况下,甲烷的吸附量可达 41.2% (质量分数),比含水活性炭的吸附量大 31.0%,因为水与甲烷在介孔炭材料内部形成甲烷氢氧化物。

碳纳米管储氢首先由 Dillon 等^[74]人研究,发现对于纯单壁碳纳米管,室温储氢容量可达 5% ~ 10% (质量分数)。然而近年来研究发现,碳纳米管的储氢能力有限,关于碳纳米管储氢充满了争议,目前储氢机理尚不清楚。成会明等制备了多种碳纳米管,并且研究了储氢性能,发现在常温压力为 12 MPa 下,储氢量低于 1.7%,表明用纯碳纳米管储氢研究价值不大^[75]。但是碳纳米管可以作为一种有效的添加剂改善其他储氢材料的储氢量^[76-77]。

多孔碳的储氢特性也有不少研究报道,如 Wang 等^[78]用二氧化碳和氢氧化钾作为活化剂处理活性炭可得到比表面高达 $3190 \text{ m}^2 \cdot \text{g}^{-1}$ 的多孔炭,在 77 K 和 20 个大气压下,氢气储存量可达 7.08%,多孔炭储氢具有较好的应用前景。

3.3 相变蓄能

相变储能材料近年来在太阳能、能量回收、热能管理等领域逐渐引起了人们的重视,而固体石蜡被

认为是最具前景的相变储能材料,由于石蜡有较大的潜热、低价格、高稳定性、无毒、无腐蚀性等特性^[79],固体石蜡已经在相变储能领域得到广泛研究和应用。然而固体石蜡存在的主要缺点是导热系数较低 ($0.24 \text{ W} \cdot (\text{m} \cdot \text{K})^{-1}$),且在融化状态下石蜡容易渗漏^[80-81]。研究表明一些炭材料与固体石蜡复合可显著提高固体石蜡相变材料的导热系数,如 Sari 等^[80]在固体石蜡中添加 10% 的膨胀石墨,可使石蜡/膨胀石墨的热导率提高到 $0.82 \text{ W} \cdot (\text{m} \cdot \text{K})^{-1}$,并且由于膨胀石墨表面张力的作用使得溶液状态的石蜡不渗漏。郭全贵等^[82]将石墨泡沫和固体石蜡复合,发现使用不同热特性和孔径的石墨泡沫可使固体石蜡的扩散系数显著提高,石墨泡沫的孔径和壁厚对热扩散和潜伏热具有重要的影响。

4 其他新能源

4.1 核能用炭-石墨材料

炭材料具有热膨胀系数低、热冲击性能好、中子活化性能低,是核反应堆重要的慢化材料。石墨虽然有良好的核反应性能,但是,理想的石墨晶体表现出明显的各向异性。核石墨必须具有各向同性,使其在高中子辐射条件下,在三维空间上具有稳定性。因此通过制造各向同性石墨或通过复合材料的方法,可以调整材料性能的方向性。原料的选择是制造核石墨的关键,人造石墨、微晶石墨和中间相炭微球将成为重要的核石墨生产原料^[83-85]。

近年来炭-石墨材料在核能方面的应用主要是为了满足高温气冷堆的发展,重点是提高核级石墨的辐照稳定性和降低核石墨的生产成本。核石墨和碳纤维复合材料将是下一代高温核反应堆的首选材料,美国橡树岭国家实验室制备了高性能核石墨和碳纤维复合材料,并且研究了其在高温 ($850 \text{ }^\circ\text{C} \sim 1475 \text{ }^\circ\text{C}$) 照射下的尺寸热稳定性,石墨化温度越高抗辐照性能越好,三维复合材料尺寸稳定性与样品的尺寸有关^[86]。基于沥青基碳纤维的炭/炭复合材料辐照性能好于 PAN 基碳纤维。此外,三维编制炭/炭复合材料的各向同性程度也较好。

4.2 风能增强碳纤维风机叶片

近年来风能逐渐成为一种重要的新型清洁能源得到规模化开发和应用,随着大功率风力发电机的开发,风机叶片长度不断增加,对增强材料的强度和刚度等性能提出了新的要求。在大型风机叶片制造中,玻璃纤维的韧性、耐冲击性和抗疲劳性明显体现出性能方面的不足。为了保证在极端风载下叶片的

耐冲击性,叶片必须具有足够的刚度。在发展更大功率风力发电装置和更长转子叶片时,减轻叶片的重量,又要满足强度与刚度要求,必须采用性能更好的碳纤维复合材料^[87]。

Samborsky 等^[88]对 E-玻璃纤维、WindStrand 玻璃纤维、碳纤维以及全环氧树脂风力发电机叶片进行耐疲劳测试,发现碳纤维显示了超强的耐疲劳性、静态强度、刚度。随着超大风力发电机叶片的开发,碳纤维增强复合材料的使用将逐渐增加,在未来 10 至 15 年,风力机额定输出功率在 8 MW ~ 10 MW,叶片长度将在 170 m ~ 180 m,使用增强碳纤维将成为必然^[89]。

5 结语

炭材料已经在锂离子电池、超级电容器、燃料电池、太阳能电池、核能、风能等领域得到广泛研究和应用,然而随着新能源、核能、电动汽车、电子信息等产业的快速发展,对能量储存和转化炭材料提出了更高的要求。需要研究和开发能够快速充放电且循环性能更好的炭及其复合负极材料,才能解决电动汽车动力电池使用寿命和快速充放电问题;只有开发能量密度更高的炭及其复合材料,超级电容器能量密度才会大幅度提高,实用价值才会更大;燃料电池需要开发更高效、性能更稳定的催化剂载体,电导率更高、透气性更小的双极板以及透光率更高、电阻更小的透明导电膜;太阳能电池需要构建光电转换效率更高的碳-硅和全碳 P-N 结;风能的大规模利用需要开发强度和刚度更好的增强碳纤维材料风机叶片;核能的利用需要开发高辐照稳定性的各向同性核石墨;固体石蜡作为良好的蓄能蓄热材料,需要与其他形态炭材料复合以进一步提高其热导率;多孔炭材料作为气体储存材料需要进一步优化其孔径分布和比表面积。

为了使炭功能材料能够满足能量储存和转化产业发展的需求,炭材料必须进一步向纳米化、有序化、复合化方向发展,功能炭材料的可控制备、纳米结构调控、复合材料的优化设计与制备对能量转化和储存器件的升级具有重要的意义,炭材料必将具有更加广阔的发展和应用空间。

参考文献

[1] Gan L, Du H D, Li B H, et al. The effect of particle size on the interaction of Pt catalyst particles with a carbon black support [J]. *New Carbon Materials*, 2010, 25(1): 53-59.

(干林, 杜鸿达, 李宝华, 等. 载体炭与 Pt 催化剂之间的相互作用及其引起的尺寸效应[J]. *新型炭材料*, 2010, 25(1): 53-59.

[2] Wang J J, Yin G P, Shao Y Y, et al. Effect of carbon black support corrosion on the durability of Pt/C catalyst [J]. *J Power Sources*, 2007, 171: 331-339.

[3] Wang Y, Sheng Z M, Yang H B, et al. Electrocatalysis of carbon black- or activated carbon nanotubes-supported Pd-Ag towards methanol oxidation in alkaline media [J]. *Int J Hydrogen Energy*, 2010, 35: 10087-10093.

[4] Huang H X, Chen S X, Yuan C. Platinum nanoparticles supported on activated carbon fiber as catalyst for methanol oxidation [J]. *J Power Sources*, 2008, 175: 166-174.

[5] Gan L, Du H D, Li B H, et al. Enhanced oxygen reduction performance of Pt catalysts by nano-loops formed on the surface of carbon nanofiber support [J]. *Carbon*, 2008, 46: 2140-2143.

[6] Gan L, Du H D, Li B H, et al. Surface-reconstructed graphite nanofibers as a support for cathode catalysts of fuel cells [J]. *Chem Commun*, 2011, 47: 3900-3902.

[7] Zhang S L, Chen L, Zhou S X, et al. Facile synthesis of hierarchically ordered porous carbon via in situ self-assembly of colloidal polymer and silica spheres and its use as a catalyst support [J]. *Chem Mater*, 2010, 22: 3433-3440.

[8] Lee J B, Park Y K, Yang O B, et al. Synthesis of porous carbons having surface functional groups and their application to direct-methanol fuel cells [J]. *J Power Sources*, 2006, 158: 1251-1255.

[9] 杜鸿达, 李宝华, 干林, 等. 炭气凝胶负载 PtRu 纳米颗粒用作甲醇氧化催化剂 [J]. *新型炭材料*, 2008, 23: 58-62.
(DU Hong-da, LI Bao-hua, HUANG Zheng-hong, et al. PtRu nanoparticles loaded on a series of carbon aerogels as catalysts for methanol oxidation [J]. *New Carbon Materials*, 2008, 23: 58-62.)

[10] Du H D, Gan L, Li B H, et al. Influences of mesopore size on oxygen reduction reaction catalysis of Pt/carbon aerogels [J]. *J Phys Chem C*, 2007, 111: 2040-2043.

[11] Du H D, Li B H, Kang F Y, et al. Carbon aerogel supported Pt-Ru catalysts for using as the anode of direct methanol fuel cells [J]. *Carbon*, 2007, 45: 429-435.

[12] Smirnova A, Dong X, Hara H, et al. Novel carbon aerogel-supported catalysts for PEM fuel cell application [J]. *Int J Hydrogen Energy*, 2005, 30: 149-158.

[13] Gan L, Lv R, Du H D, et al. Highly dispersed Pt nanoparticles by pentagon defects introduced in bamboo-shaped carbon nanotube support and their enhanced catalytic activity on methanol oxidation [J]. *Carbon*, 2009, 47: 1833-1840.

[14] Gan L, Lv R T, Du H D, et al. High loading of Pt-Ru nanocatalysts by pentagon defects introduced in a bamboo-shaped carbon nanotube support for high performance anode of direct methanol fuel cells [J]. *Electrochem Commun*, 2009, 11: 355-358.

[15] Xin Y C, Liu J G, Zhou Y, et al. Preparation and characteriza-

- tion of Pt supported on graphene with enhanced electrocatalytic activity in fuel cell [J]. *J Power Sources*, 2011, 196: 1012-1018.
- [16] Rao C V, Reddy A L M, Ishikawa Y, et al. Synthesis and electrocatalytic oxygen reduction activity of graphene-supported Pt₃Co and Pt₃Cr alloy nanoparticles [J]. *Carbon*, 2011, 49: 931-936.
- [17] 武 涛,郑永平,黄正宏,等. 柔性石墨双极板透气性的研究 [J]. *材料科学与工程学报*, 2005, 23: 197-199.
(WU Tao, ZHENG Yong-ping, HUANG Zheng-hong, et al. Study on the Permeability of Bipolar Plates Prepared by Flexible Graphite [J]. *Journal of Materials Science & Engineering*, 2005, 23: 197-199.)
- [18] Du C, Ming P W, Hou M, et al. Preparation and properties of thin epoxy/compressed expanded graphite composite bipolar plates for proton exchange membrane fuel cells [J]. *J Power Sources*, 2010, 195: 794-800.
- [19] 陈 惠,李建新,刘洪波,等. 石墨/聚合物复合双极板的制备与性能表征[J]. *炭素技术*, 2008, 27: 16-20.
(CHEN Hui, LI Jian-xin, LIU Hong-bo, et al. Preparation and characteristics of graphite/polymer composite bipolar plates [J]. *Carbon Techniques*, 2008, 27: 16-20.)
- [20] Chen H, Liu H B, Yang L, et al. Study on the preparation and properties of novolac epoxy/graphite composite bipolar plate for PEMFC [J]. *Int J Hydrogen Energy*, 2010, 35: 3105-3109.
- [21] 邹彦文,张 杰,贺 俊,等. 质子交换膜燃料电池复合材料双极板的研究[J]. *新型炭材料*, 2004, 19: 303-308.
(ZOU Yan-wen, ZHANG Jie, HE Jun, et al. A study of composite bipolar plate for PEMFC [J]. *New Carbon Materials*, 2004, 19: 303-308.)
- [22] Li D J, Wang Y X, Xu L, et al. Surface modification of a natural graphite/phenol formaldehyde composite plate with expanded graphite [J]. *J Power Sources*, 2008, 183: 571-575.
- [23] Ko T H, Liao Y K, Liu C H. Effects of graphitization of PAN-based carbon fiber cloth on its use as gas diffusion layers in proton exchange membrane fuel cells [J]. *New Carbon Materials*, 2007, 22: 97-101.
- [24] Xie Z Y, Jin G Y, Zhang M, et al. Improved properties of carbon fiber paper as electrode for fuel cell by coating pyrocarbon via CVD method [J]. *Transactions of Nonferrous Metals Society of China*, 2010, 20: 1412-1417.
- [25] Ge J B, Higier A, Liu H T. Effect of gas diffusion layer compression on PEM fuel cell performance [J]. *J Power Sources*, 2006, 159: 922-927.
- [26] Gostick J T, Fowler M W, Pritzker M D, et al. In-plane and through-plane gas permeability of carbon fiber electrode backing layers [J]. *J Power Sources*, 2006, 162: 228-238.
- [27] Corporation S. Non-aqueous electrolyte secondary cell; EP, 0391281 [P]. 1990.
- [28] Zheng T, Liu Y H, Fuller E W, et al. Lithium insertion in high-capacity carbonaceous materials [J]. *J Electrochem Soc*, 1995, 142: 2581-2590.
- [29] Lee J H, Lee H Y, Oh S M, et al. Effect of carbon coating on electrochemical performance of hard carbons as anode materials for lithium-ion batteries [J]. *J Power Sources*, 2007, 166: 250-254.
- [30] Zou L, Kang F Y, Li X H, et al. Investigations on the modified natural graphite as anode materials in lithium ion battery [J]. *J Phys Chem Solids*, 2008, 69: 1265-1271.
- [31] Zou L, Kang F Y, Zheng Y P, et al. Modified natural flake graphite with high cycle performance as anode material in lithium ion batteries [J]. *Electrochim Acta*, 2009, 54: 3930-3934.
- [32] Wang X, Gai G S, Yang Y F, et al. Preparation of natural microcrystalline graphite with high sphericity and narrow size distribution [J]. *Powder Technol*, 2008, 181: 51-56.
- [33] Leroux F, Metenier K, Gautier S, et al. Electrochemical insertion of lithium in catalytic multi-walled carbon nanotubes [J]. *J Power Sources*, 1999, 82: 317-322.
- [34] Kim C, Yang K S, Kojima M, et al. Fabrication of electrospinning-derived carbon nanofiber webs for the anode material of lithium-ion secondary batteries [J]. *Adv Funct Mater*, 2006, 16: 2393-2397.
- [35] Ji L W, Zhang X W. Fabrication of porous carbon nanofibers and their application as anode materials for rechargeable lithium-ion batteries [J]. *Nanotechnology*, 2009, 20(15): 155705.
- [36] Zou L, Gan L, Lv R T, et al. A film of porous carbon nanofibers that contain Sn/SnO_x nanoparticles in the pores and its electrochemical performance as an anode material for lithium ion batteries [J]. *Carbon*, 2011, 49: 89-95.
- [37] Fuchsichler B, Stangl C, Kren H, et al. High capacity graphite-silicon composite anode material for lithium-ion batteries [J]. *J Power Sources*, 2011, 196: 2889-2892.
- [38] Li X L, Kang F Y, Shen W C. Multiwalled carbon nanotubes as a conducting additive in a LiNi_{0.7}Co_{0.3}O₂ cathode for rechargeable lithium batteries [J]. *Carbon*, 2006, 44: 1334-1336.
- [39] Li X L, Kang F Y, Bai X D, et al. A novel network composite cathode of LiFePO₄/multiwalled carbon nanotubes with high rate capability for lithium ion batteries [J]. *Electrochem Commun*, 2007, 9: 663-666.
- [40] Su F-Y, You C, He Y-B, et al. Flexible and planar graphene conductive additives for lithium-ion batteries [J]. *J Mater Chem.*, 2010, 20: 9644-9650.
- [41] 张 标,杜鸿达,李宝华,等. 不同维度炭材料对 Li₄Ti₅O₁₂/C 阳极电化学性能的影响[J]. *电源技术*, 2010, 34: 226-229.
(ZHANG Biao, DU Hong-da, LI Bao-hua, et al. Dimension effect of conducting carbon additives on the electrochemical properties of Li₄Ti₅O₁₂ anode in lithium-ion battery [J]. *Chinese Journal of Power Sources*, 2010, 34: 226-229.)
- [42] Spong A D, Vitins G, Owenz J R. A solution - precursor synthesis of carbon-coated LiFePO₄ for Li-ion cells [J]. *J Electrochem Soc*, 2005, 152: A2376-A2382.
- [43] Belharouak I, Johnson C, Amine K. Synthesis and electrochemical analysis of vapor-deposited carbon-coated LiFePO₄

- [J]. *Electrochem Commun*, 2005, 7: 983-988.
- [44] Yuan T, Yu X, Cai R, et al. Synthesis of pristine and carbon-coated $\text{Li}_4\text{Ti}_5\text{O}_{12}$ and their low-temperature electrochemical performance [J]. *J Power Sources*, 2010, 195: 4997-5004.
- [45] Li J Q, Zhang Q, Chan-Park M B. Simulation of carbon nanotube based p-n junction diodes [J]. *Carbon*, 2006, 44: 3087-3090.
- [46] Liao L, Liu K H, Wang W L, et al. Multiwall boron carbonitride/carbon nanotube junction and its rectification behavior [J]. *J Am Chem Soc*, 2007, 129: 9562-9563.
- [47] Arico A S, Bruce P, Scrosati B, et al. Nanostructured materials for advanced energy conversion and storage devices [J]. *Nature Materials*, 2005, 4: 366-377.
- [48] Jia Y, Li P X, Gui X C, et al. Encapsulated carbon nanotube-oxide-silicon solar cells with stable 10% efficiency [J]. *Appl Phys Lett*, 2011, 98: 133115-133118.
- [49] Li X M, Zhu H W, Wang K L, et al. Graphene-on-silicon schottky junction solar cells [J]. *Adv Mater*, 2010, 22: 2743-2748.
- [50] Li Z, Zhu H W, Xie D, et al. Flame synthesis of few-layered graphene/graphite films [J]. *Chem Commun*, 2011, 47: 3520-3522.
- [51] Moon J S, Park J H, Lee T Y, et al. Transparent conductive film based on carbon nanotubes and PEDOT composites [J]. *Diamond Relat Mater*, 2005, 14: 1882-1887.
- [52] Paul S, Kang Y S, Sun Y K, et al. Highly conductive and transparent thin films fabricated with predominantly semiconducting single-walled carbon nanotubes [J]. *Carbon*, 2010, 48: 2646-2649.
- [53] Jeong S Y, Kim S H, Han J T, et al. High-performance transparent conductive films using rheologically derived reduced graphene oxide [J]. *ACS Nano*, 2011, 5: 870-878.
- [54] Su C Y, Lu A Y, Xu Y P, et al. High-quality thin graphene films from fast electrochemical exfoliation [J]. *ACS Nano*, 2011, 5: 2332-2339.
- [55] Li C Y, Li Z, Zhu H W, et al. Graphene nano-"patches" on a carbon nanotube network for highly transparent/conductive thin film applications [J]. *J Phys Chem C*, 2010, 114: 14008-14012.
- [56] Xu F, Cai R J, Zeng Q C, et al. Fast ion transport and high capacitance of polystyrene-based hierarchical porous carbon electrode material for supercapacitors [J]. *J Mater Chem*, 2011, 21: 1970-1976.
- [57] Wu D C, Chen X, Lu S H, et al. Study on synergistic effect of ordered mesoporous carbon and carbon aerogel during electrochemical charge-discharge process [J]. *Microporous Mesoporous Mater.*, 2010, 131: 261-264.
- [58] Liang Y R, Liang F X, Li Z H, et al. The role of mass transport pathway in wormholelike mesoporous carbon for supercapacitors [J]. *PCCP*, 2010, 12: 10842-10845.
- [59] Zeng X H, Wu D C, Fu R W, et al. Structure and EDLC characteristics of pitch-based carbon aerogels [J]. *Mater Chem Phys*, 2008, 112: 1074-1077.
- [60] Wang D W, Li F, Liu M, et al. 3D aperiodic hierarchical porous graphitic carbon material for high-rate electrochemical capacitive energy storage [J]. *Angew Chem Int Edit*, 2008, 47: 373-376.
- [61] Yang X Q, Wu D C, Chen X M, et al. Nitrogen-enriched nanocarbons with a 3-D continuous mesopore structure from polyacrylonitrile for supercapacitor application [J]. *J Phys Chem C*, 2010, 114: 8581-8586.
- [62] Wang D W, Li F, Chen Z G, et al. Synthesis and electrochemical property of boron-doped mesoporous carbon in supercapacitor [J]. *Chem Mater*, 2008, 20: 7195-7200.
- [63] Lv G, Wu D C, Fu R W. Preparation and electrochemical characterizations of MnO_2 -dispersed carbon aerogel as supercapacitor electrode material [J]. *J Non-Cryst Solids*, 2009, 355: 2461-2465.
- [64] Yan J, Fan Z J, Wei T, et al. Fast and reversible surface redox reaction of graphene- MnO_2 composites as supercapacitor electrodes [J]. *Carbon*, 2010, 48: 3825-3833.
- [65] Hou Y, Cheng Y W, Hobson T, et al. Design and synthesis of hierarchical MnO_2 nanospheres/carbon nanotubes/conducting polymer ternary composite for high performance electrochemical electrodes [J]. *Nano Lett*, 2010, 10: 2727-2733.
- [66] Lin P, She Q J, Hong B L, et al. The nickel oxide/CNT composites with high capacitance for supercapacitor [J]. *J Electrochem Soc*, 2010, 157: A818-A823.
- [67] Xu C J, Du H D, Li B H, et al. Asymmetric activated carbon-manganese dioxide capacitors in mild aqueous electrolytes containing alkaline-earth cations [J]. *J Electrochem Soc*, 2009, 156: A435-A441.
- [68] Du Pasquier A, Plitz I, Gural J, et al. Characteristics and performance of 500 F asymmetric hybrid advanced supercapacitor prototypes [J]. *J Power Sources*, 2003, 113: 62-71.
- [69] Qu Q T, Shi Y, Tian S, et al. A new cheap asymmetric aqueous supercapacitor: Activated carbon// NaMnO_2 [J]. *J Power Sources*, 2009, 194: 1222-1225.
- [70] Zhao Y, Wang Y Y, Lai Q Y, et al. Pseudocapacitance properties of $\text{AC/LiNi}_{1/3}\text{Co}_{1/3}\text{Mn}_{1/3}\text{O}_2$ asymmetric supercapacitor in aqueous electrolyte [J]. *Synth Met*, 2009, 159: 331-337.
- [71] Cao D P, Zhang X R, Chen J F, et al. Optimization of single-walled carbon nanotube arrays for methane storage at room temperature [J]. *J Phys Chem B*, 2003, 107: 13286-13292.
- [72] Zhou H S, Zhu S M, Honma I, et al. Methane gas storage in self-ordered mesoporous carbon (CMK-3) [J]. *Chem Phys Lett*, 2004, 396: 252-255.
- [73] Liu X W, Zhou L, Li J W, et al. Methane sorption on ordered mesoporous carbon in the presence of water [J]. *Carbon*, 2006, 44: 1386-1392.
- [74] Dillion A C, Jones K M, Kiang T A, et al. Storage of hydrogen in single-walled carbon nanotubes [J]. *Nature*, 1997, 386: 377-379.
- [75] Liu C, Chen Y, Wu C Z, et al. Hydrogen storage in carbon

- nanotubes revisited [J]. Carbon, 2010, 48: 452-455.
- [76] Wu C Z, Wang P, Yao X, et al. Hydrogen storage properties of MgH_2 /SWNT composite prepared by ball milling [J]. J Alloys Compd, 2006, 420: 278-282.
- [77] Wu C Z, Wang P, Yao X, et al. Effect of carbon/noncarbon addition on hydrogen storage behaviors of magnesium hydride [J]. J Alloys Compd, 2006, 414: 259-264.
- [78] Wang H L, Gao Q M, Hu J. High Hydrogen storage capacity of porous carbons prepared by using activated carbon [J]. J Am Chem Soc, 2009, 131: 7016-7022.
- [79] He B, Setterwall F. Technical grade paraffin waxes as phase change materials for cool storage systems capital cost estimation [J]. Energy Convers Manage, 2002, 43: 1709-1723.
- [80] Sari A, Karapekli A. Thermal conductivity and latent heat thermal energy storage characteristics of paraffin/expanded graphite composite as phase change material [J]. Appl Therm Eng, 2007, 27: 1271-1277.
- [81] Zhang Z G, Fang X M. Study on paraffin/expanded graphite composite phase change thermal energy storage material [J]. Energy Convers Manage, 2006, 47: 303-310.
- [82] Zhong Y J, Guo Q G, Li S Z, et al. Heat transfer enhancement of paraffin wax using graphite foam for thermal energy storage [J]. Sol Energy Mater Sol Cells, 2010, 94: 1011-1014.
- [83] 徐世江, 康飞宇. 核工程中的炭和石墨材料[M]. 北京: 清华大学出版社, 2010.
(XU Shi-jing, KANG Fei-yu. Carbon and Graphite Materials in Nuclear Engineering [M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2010.)
- [84] 王 宁, 申 克, 郑永平, 等. 微晶石墨制备各向同性石墨的研究[J]. 中国非金属矿工业导刊, 2011, 88: 11-13.
(WANG Ning, SHEN Ke, ZHENG Yong-ping, et al. Study on preparation of isotropic graphite with natural amorphous graphite [J]. China Non-metallic Minerals Industry, 2011, 88: 11-13.)
- [85] Shen K, Huang Z-H, Yang J, et al. Effect of oxidative stabilization on the sintering of mesocarbon microbeads and a study of their carbonization [J]. Carbon, 2011, 49: 3200-3211.
- [86] Snead L L, Burchell T D, Katoh Y. Swelling of nuclear graphite and high quality carbon fiber composite under very high irradiation temperature [J]. J Nucl Mater, 2008, 381: 55-61.
- [87] 罗永康, 李 炜, 胡 红, 等. 碳纤维复合材料在风力发电机叶片中的应用 [J]. 电网与清洁能源, 2008, 24: 53-57.
(LUO Yong-kang, LI Wei, HU Hong, et al. Application of carbon fiber reinforced composites in wind turbine blade [J]. Power System and Clean Energy, 2008, 24: 53-57.)
- [88] Samborsky D D, Wilson T J, Mandell J F. Comparison of tensile fatigue resistance and constant life diagrams for several potential wind turbine blade laminates [J]. Journal of Solar Energy Engineering, 2009, 131: 011006.
- [89] Thomsen O T. Sandwich materials for wind turbine blades - present and future [J]. J Sandw Struct Mater, 2009, 11: 7-26.

Carbon for energy storage and conversion

KANG Fei-yu, HE Yan-bing, LI Bao-hua, DU Hong-da

(Key Laboratory of Thermal Management Engineering and Materials, Graduate School at Shenzhen, Tsinghua University, Shenzhen 518055, China)

Abstract: The current research status of carbon material and the future development tendency in the energy storage and conversion fields are reviewed. Carbon demonstrates many excellent physical and chemical properties owing to its unique structures and morphology. It has been widely used in energy storage and conversion devices. Carbon is a key material of catalyst supports, bipolar plates and gas diffusion layers in fuel cells, transparent conductive films and as a core material to form the carbon-silicon or all carbon p-n heterojunctions in solar cells. Carbon is also a significantly important electrode material in lithium ion batteries and supercapacitors. Moreover, Carbon has wide applications in the fields of heat storage, gas storage, nuclear energy, wind energy, and so on. It is suggested that carbon might be developed to be nano-structured and ordered in composites so that its performance in energy storage and conversion can be improved by functionalization and controlled synthesis.

Keywords: Carbon; Energy storage; Energy conversion

Foundation item: National Natural Science Foundation of China (50632040, 50802049, 50972065 and 50902079), Guangdong Province Innovation R & D Team Plan and Shenzhen Technical Plan Project (JP200806230010A, SG200810150054A).

Author introduction: KANG Fei-yu (1962-), male, Professor, engaged in the research of new carbon materials, new energy devices and key materials. E-mail: fykang@mail.tsinghua.edu.cn