

燃料电池双极板材料及其流场研究进展*

冷巧辉, 马 利, 文东辉*, 鲁聪达, 潘国庆

(浙江工业大学 特种装备制造与先进加工技术教育部/浙江育重点实验室, 浙江 杭州 310014)

摘要: 燃料电池因其具有效率高、操作温度低、功率密度高并且启动速度快等优点,使其成为在移动和静置电源中很有前途的零排放动力源;双极板是燃料电池的关键部件之一,不但影响电池的性能,也是影响电池制作成本的关键因素;而高成本正是影响燃料电池走向实用化的一大障碍。针对如何降低燃料电池的生产成本,减少电池堆的重量和体积及将流道设计最佳化的问题,综述了双极板的具体材料,并对这些材料的特点进行了分析;同时,论述了双极板的流场形式,在此基础上对其不同流场形式的优缺点进行了比较,并对一些改进流场和新型流场做了介绍,这将对燃料电池的研究设计工作提供一定的参考。

关键词: 双极板; 燃料电池; 材料; 流场; 研究进展

中图分类号: TM911.4; TH14

文献标识码: A

文章编号: 1001-4551(2013)05-0513-05

Research progress of bipolar plate materials and flow field for fuel cells

LENG Qiao-hui, MA Li, WEN Dong-hui, LU Cong-da, PAN Guo-qing

(Key Laboratory of Mechanical Manufacture and Automation, Ministry of Education,
Zhejiang University of Technology, Hangzhou 310014, China)

Abstract: The fuel cells are a promising candidate as a zero-emission power source for transport and stationary concentration applications due to its high efficiency, low-temperature operation, high power density and fast start-up. Bipolar plate is the vital component of fuel cells, which not only influences the performance of fuel cells, but also affect the cost of fuel cells. However, high cost is one of the biggest obstacle to validate fuel cell technology. Aiming at how to reduce the cost of production, weight and volume of the fuel cell stack and design optimal flow channel, materials of bipolar plate were reviewed, and the features of materials were analyzed. Meanwhile, flow-field forms of bipolar plate were discussed and their advantages and disadvantages were also compared. In addition, some modified and new-type flow fields were also introduced, which provided a reference for research and design of the fuel cells.

Key words: bipolar plate; fuel cells; materials; flow field; research progress

0 引 言

由于能源短缺及大量化石能源的消耗而导致的全球环境恶化已成为影响当今世界发展的重大问题,提高能源利用率和寻求洁净高效的新能源成为21世纪的主要议题。在这样的背景下,燃料电池受到人们的普遍关注。燃料电池是一种电化学发电装置,不同于常规意义上的电池。它等温地按电化学方式直接将化学能转化为电能,不经过热机的过程,因此不受卡诺

循环的限制,能量转化效率高,达到了40%~60%;同时,环境友好,几乎不排放氮氧化物或硫氧化物等有害气体;二氧化碳的排放量也比常规发电厂减少40%以上^[1-2],对比于常规化学电源,燃料电池的燃料可以不断地由外部供给,因此燃料电池可以持续地提供能量。而常规电源所能提供的能量完全由内部存储的化学反应物的数量决定,且反应物耗尽后废弃电池造成的环境污染也不能忽视。正是由于这些突出的优点,燃料电池的研究和开发备受各国政府和企业的青

收稿日期: 2012-12-20

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51175472);浙江省杰出青年科学基金资助项目(R1111149)

作者简介: 冷巧辉(1988-),男,江西高安人,主要从事精密与超精密加工技术方面的研究。E-mail: lengqiaohui@126.com

通信联系人: 文东辉,男,教授,博士生导师。E-mail: wendh@zjut.edu.cn

睐,被认为是21世纪首选的高效、洁净的发电装置。

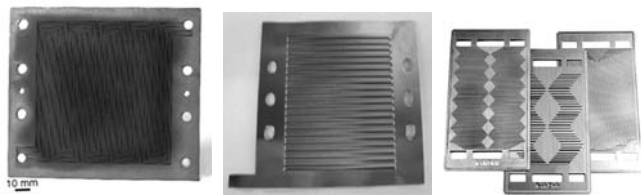
燃料电池的双极板具有多种功能,它的主要作用是分隔反应气体,并通过流场将反应气体导入到燃料电池中,收集并传导电流,支撑膜电极以及承担整个燃料电池的散热和排水功能。它是燃料电池堆中体积最大(90%以上)、重量最大(80%以上)、成本最大(45%以上)的部件^[3],而高成本正是影响燃料电池走向实用化的一大障碍。另外,双极板上的流道决定了其反应剂与生成物在流场内的流动方向、电池的散热能力及电池长期运行的稳定性^[4]。目前,用于燃料电池双极板的流道结构生产成本高、效率低。

为此,如何降低双极板的生产成本,减少电池堆的重量和体积以及将流道设计最佳化已成为亟待解决的世界前沿科学与技术难题。

1 燃料电池双极板材料

双极板又称集流板,是燃料电池的核心部件之一,不但影响电池的性能,也是影响电池制作成本的关键因素。

目前,制造双极板的材料^[5]主要有:石墨材料、金属材料以及复合材料。这些材料都具有导电、散热、阻气及抗腐蚀等性能。



(a) 石墨双极板

(b) 金属双极板

(c) 复合材料双极板

图1 双极板

1.1 石墨

石墨材料具有低密度、高导电性和良好的耐腐蚀性,使它成为被较早开发并投入应用的双极板材料。传统双极板主要是无孔石墨板,其制备方法主要是将石墨粉与可石墨化的树脂,经捏合、模压后再碳化、石墨化成为薄板,再通过数控加工在其表面加工出所需要的流道^[6-7]。

然而石墨材料双极板也有其自身的问题:石墨的机械强度较低,使得制作过程十分复杂;石墨化温度高达2 500 ℃,大大增加了制造成本;且石墨的脆性使得石墨双极板需要制成足够的厚度才能满足双极板的机械强度,这就限制了石墨双极板的商业使用范围。尽管如此,石墨双极板还是得到了广泛的认可。

为了避免机加工流道带来的成本高、加工周期长等的缺点,一些学者研制了先成型再石墨化的碳/碳复合材料双极板。黄明宇等^[8]采用中间相碳微球/石墨

复合材料,在常温下模压成型,再通过1 000 ℃埋碳碳化烧结工艺制备双极板。通过按不同的比例将中间相碳微球与石墨配成原料,来对比双极板的性能,得出采用90%的中间相碳微球和10%的石墨会取得较佳的综合性能,同时制造成本低、生产效率高。但是由于热处理的温度高达1 000 ℃,使得制成的双极板的表面仍存在一些微裂纹,而且也使双极板的制造周期变长。

为了改善在双极板制造过程中不可避免的产生小孔的问题,王明华等^[9]采用真空加压的方法将石墨双极板浸渍在硅酸钠浓溶液中,再加酸加热使之转变成SiO₂,使石墨板气孔率由18.2%降低到3.3%以下,保证在0.3 MPa H₂压力下不透气,且浸渍后的石墨板电阻也不增加,有效改善了双极板性能。

但是,这种方法使得制造双极板的周期变长,生产效率低。同时,真空度为-0.1 MPa,压力为0.6 MPa的实验条件能否保证所生产的双极板的性能还有待探究。Nannan Guo等^[10]采用选择性激光烧结工艺来制作复合石墨双极板,与传统的制作方法(如压缩铸造和喷射铸造等)相比,该方法能显著地缩短制作周期并降低生产成本,而且可供选择的原材料非常广泛,包括天然石墨、合成石墨、碳纤维和炭黑等不同的石墨材料都可用来制作双极板。

1.2 金属

石墨材料以其良好的耐腐蚀性能和较低的表面接触电阻成为制作双极板的主要材料,但它的可制造性、阻气性和耐久性等均不如金属材料^[11],而且金属材料优于石墨材料的方面还有:更好的导电性和更高的机械性,加工方便且成本也相对较低。铝、钛、镍以及不锈钢都是制作金属双极板的常用材料,其中不锈钢双极板的应用更为广泛,这主要是由于不锈钢是低成本材料,且具有适宜的强度和化学稳定性。

但是,金属材料的耐腐蚀问题是亟需解决的关键问题之一^[12]。虽然金属双极板的表面会形成氧化膜或钝化膜,可以提高耐腐蚀性能,但随之而来的是它会引起接触电阻的增加。对金属双极板进行表面改性处理,使之在提高金属板耐腐蚀性能和化学稳定性的同时,又能降低接触电阻,成为当前金属双极板研究的主要方向。付宇等^[13]在316L不锈钢表面上沉淀致密的铬的氮化物梯度薄膜,使得表面改性后的不锈钢双极板界面的导电性、耐腐蚀性等相较于未处理的316L不锈钢基体有显著地提高。刘晶等^[14]也提出一种利用等离子体渗氮技术对质子交换膜燃料电池钛基金属双极板表面改性的方法,并从理论上分析了该方法的可行性。

金属双极板的材料主要有3类:①铁基合金,主要包括不同材质的不锈钢,如310、316等;②轻金属,如Al、Ti、Ni等;③以轻金属或不锈钢作为基体并具有表面涂层的材料,其中研究较多的涂层有金属的碳化物、氮化物、贵金属等,不同形式的碳粒子也可以成为涂层材料的一部分。

Hornung等^[15]对多种铁基合金双极板进行研究,并与镀金镍基金属板进行了对比,得出的结论是:理论上,铁基合金可以作为制作固体氧化物燃料电池双极板的材料。黄乃宝等^[16]指出导电化合物和电化学方法对薄层不锈钢的改性将成为今后薄层金属双极板研究的主要方向。Davies等^[17]认为双极板与MEA之间的界面接触电阻能够极大地降低燃料电池的输出功率,并通过评估和测试不同的燃料电池双极板材料,指出不同类型的不锈钢双极板的界面接触电阻与燃料电池的工作过程中双极板表面形成的氧化层的厚度有直接的关系。

1.3 复合材料

复合双极板是以薄层金属板或其他高强度导电板作为分隔板,以注塑或焙烧法制备的有孔薄碳板或石墨板作为流场板。复合双极板结合了石墨双极板和金属双极板的双重优点,具有价格便宜、体积小、强度高、抗腐蚀性能好等优点,能显著提高燃料电池组的体积比功率和质量比功率,是双极板的发展趋势之一,但也存在如导电性和机械性能较差的缺点。

石墨双极板存在的机械加工性能差、流道加工困难、制备成本高等问题。为解决这些问题,目前主要采用在石墨中加入树脂、聚乙烯、聚丙烯等有机聚合物以降低石墨板脆性的方法。加入纤维的方法用以改善其机械性能,加入金属颗粒的方法用以增强其导电性;而且石墨复合双极板的流场可经压模来获得,流场加工的费用也比石墨板或金属板的低;并采用浸渍的方法来减少石墨的透气性和降低流场板的加工厚度。但是复合材料也仍然存在一些缺点:由于树脂不具有导电性,会增大极板的电阻,导致极板的导电性能下降^[18]。

Zhang Jie等^[19]研究了石墨颗粒的尺寸和形状对双极板导电性、承载强度等特性的影响,试验结果表明,对于鳞片状石墨或者球形石墨,双极板的导电性和导热性均随石墨颗粒尺寸的减小和尺寸分布范围的扩大而降低。如果都采用球形石墨颗粒,那么复合双极板的导电性及弯曲强度均会提高,但是垂直于受力方向的导电性能将会明显降低。

天津大学潘朝光等^[20]突破了传统的以鳞片状石墨为主要的复合板材料,将膨胀石墨作为基材来制备复合板,得到了阻气性能稍优于柔性石墨板,导电性能高于

柔性石墨板的复合材料,而且成本远低于硬质石墨板。这将成为燃料电池双极板的材料研究的新的思路。

陈惠等^[21]在研究膨胀石墨/酚醛树脂复合材料双极板中,以膨胀石墨为导电材料,炭黑为添加剂,酚醛树脂为黏结剂,采用模压成型的方法制备复合双极板,并通过实验考察了树脂的含量、成形的压力、添加剂的用量和添加剂的加入方式对复合双极板性能的影响。结果表明:这些因素均能对复合双极板性能产生较大的影响。树脂的加入量的最佳范围为20%~30%,合适的成形压力为10 MPa~12 MPa,炭黑的合适范围为5%左右。

杨涛等^[22]以热塑性树脂聚苯硫醚和中间相碳微球为主要原料,利用模压工艺来制作燃料电池复合双极板,并通过实验研究了树脂的含量、成型时间以及碳纤维对双极板性能的影响。实验结果表明:树脂质量分数为20%的双极板的综合性能达到最佳,双极板成型时间不应少于30 min,碳纤维的添加有利于提高双极板的各项性能。由于流场道双极板的成型过程中可以直接获得,这样就极大地节约了制造双极板的成本。

杜超等^[23]选取乙烯基酯树脂、膨胀石墨板为材料,采用真空浸渍并结合模压的方法来制备复合双极板,并通过实验考察了微观结构和成型压力对双极板材料的导电性、密封性、机械性及表面亲/憎水性的影响。实验结果表明:随着成形压力的增加,双极板的电阻下降,导电性能上升;双极板的渗透性将降低,密封性增强。乙烯基酯树脂和膨胀石墨复合材料被认为是一种很有前景的双极板材料。

寻找性能优良并且成本低廉的双极板材料和制造方法已成为燃料电池商业化技术研究中的重要课题。西格里技术股份有限公司的Muller A等^[24]通过利用注塑机测试热塑性和热固性材料的成型情况并得出结论,采用模块化模具技术可以注射成型石墨复合材料双极板。该技术通过更换不同镶块便可生产出满足客户特殊要求的流场形状,大大降低了双极板制造成本。

曾宪林等^[25]选取聚乙烯耐温树脂,用注塑机一次成型再利用高压挤压制成高强度、抗腐蚀、耐工作温度的塑料双极板,并在其表面镀覆一层起导电作用的耐腐蚀合金。用该方法制作双极板既简单又廉价,还可降低燃料电池成本,并保证运行过程的稳定性。

上海交通大学的骆兵等^[26]采用低温催化石墨化的方法来制备双极板,也就是将中间相炭微球和催化剂溶液混合后球磨,再加热,再采用模压成型的方法得到含完整流道的双极板素坯,并将之低温石墨化处理再自然冷却至室温,最后进行清洗处理和干燥处理,便制成了所需的双极板。该方法可满足燃料电池

双极板高性能及低成本的要求,为制备高性能及低成本的双极板提出了新的路径。

2 燃料电池双极板表面的流场形式

2.1 常规流场形式

流场的基本功能是引导反应剂流动方向,确保反应剂均匀分配到电极各处,同时能及时排出电池运行过程中的生成物。而双极板表面流场形式决定了反应气与生成物在流场内的流动状况,因此双极板表面流场形式对燃料电池性能及运行效率均有重大影响,合适的流场设计能使燃料电池功率密度提高50%左右^[27]。

常规流场形式主要有:点状流场、平行直流场、蛇形流场、交指形流场、网状流场、螺旋流场等^[28],但各种流场形式均有不足之处,其主要优、缺点如表1所示。

对于平行直流场而言,可以通过改变沟与脊的宽度比和通道的长度来改变流经沟槽的反应气的线速度,来排出液态水。变截面直通道流场是平行直流场的一种改进流场。由于流场截面的变化,气体沿流动方向的速度和浓度均会发生变化,从而提高了反应气的利用率。Johnson M C等^[29]设计了一种斜流道流场,

表1 基本流场的主要优缺点

流场形式	优 点	缺 点
点状流场	结构简单,适于气态排水	易发生短路,使流体分布不均匀;反应气线速度不高,难以排出液态水
平行直流场	可实现各流道流量相等,电流密度分布较均匀	流道数目过多和气流流速不大导致水不易排出,造成部分水淹
单通道蛇形流场	气体流速大,反应速率快,能迅速排出反应生成的水	气体压降较大,流道过长和大量转折导致气体传输中消耗过多的功
多通道蛇形流场	涵盖了蛇形流道和平行直流通道的特点,可以灵活设计出适合不同需要的流道形式	相邻流道由于气流方向相反而具有一定的压力差,易导致气体在部分流道内短路或走旁路
交指形流场	由于流道不连续,气体被强迫流经扩散层,强化了扩散层的传质能,从而提高了气体利用率	扩散层阻力较大,使气体压力降很大,易破坏催化层而影响电池性能,导致反应物和电极的利用率降低
螺旋流场	排水能力强,靠近进出口的流道交错安排,使得反应气与水浓度的分布更均匀	易产生二次流,流道数目较少,而造成流道间产生较大的压力差
网状流场	设计形式灵活;流体分配均匀,有利于反应气传质,另外保湿能力较强	流速较低,排水能力较差,且金属网的防腐工艺很难,流场与分隔板之间的阻力降较高

变截面直通道流场如图3所示。它是平行直流场的一种改进形式,这种流场的流道尺寸沿流动方向逐渐变大或缩小,且相邻两个流道的进出口尺寸也不一样,使在相邻的流道之间形成压力差,使反应气能更好地

扩散到岸的下面,有效促进了气体在扩散层的流动;但是变截面流场给制造带来较大难度。

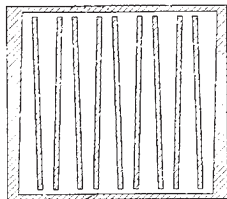


图3 变截面直通道流场

对于蛇形流场而言,则可通过改变沟与脊的宽度比、通道的数目和沟槽的总长度来调整反应气流动的线速度,来排出液态水。渐变式蛇形流场结构在蛇形流场中的应用较为普遍,它除了具有蛇形流场的优点外,对它固有的缺点也进行了改进。Dingrong Bai等^[30]发表的渐变式蛇形流场如图4所示。反应气进入流场中,进口流道有13条,出口有5条,这种渐变式蛇形流场可以维持充足的气体流量和流速,确保多余的水能顺利的排出。

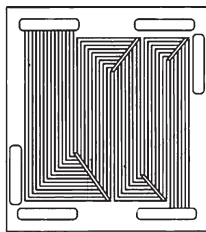


图4 渐变式蛇形流场

Gurau等^[31]针对在交指形流场中,因气体消耗使浓度沿气流方向降低而造成电流密度分布不均的问题,设计了一种改进的交指形流场,示意图如图5所示。它呈扇形结构,出口处岸的宽度小于进口处岸的宽度,这样可以使各处的浓度分布比较均匀。但是其设计和加工较为复杂。

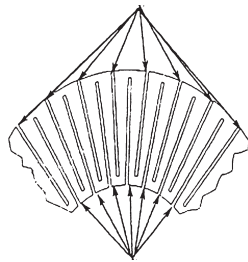
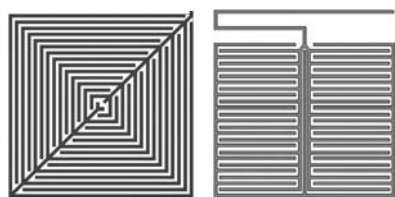


图5 改进交指形流场示意图

2.2 其他形式的流场

为了提高流场中流体分布的均匀性,Jason P. Kloess等^[32]提出了两种分别以动物肺部组织结构及植物叶脉组织结构为原型的仿生型分形流场(如图6所示),并指出这两种流场的压降均小于常规的蛇形或交指型流场,流体分布也更均匀。实验测试结果表明,在相同条件下,两种流场的最大功率密度均比常

规流场高出30%左右。



(a) 叶脉型分形流场 (b) 肺型分形流场

图6 原型的仿生型分形流场图

K.Tüber等^[33]设计了一种用于质子交换膜燃料电池双极板的多支路网络状分形流场(如图7所示),以达到在提高流体分布均匀性的同时试图最大程度地降低进出口压降的目的。但由于没有优化该种流场的几何参数,实际试验结果表明,这种流场的性能与传统直型流场相差不大。

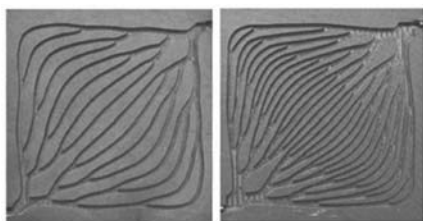


图7 多支路网状流场

Chin-Tsan Wang等^[34]根据血管的网状组织结构设计了一种仿生型流场(如图8所示),并在此基础上对常规的直型流道进行了改进(如图9所示),且通过试验证明,相对于常规流场,该种流场在气体分布均匀性以及排水性能方面更具有优越性。

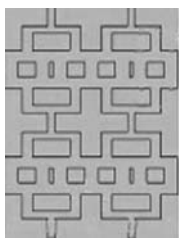


图8 血管网络型流场

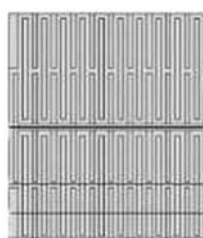


图9 复合仿生型流场

3 结束语

燃料电池作为新一代的发电装置(技术),以其独特的高效率和环保性引起了全世界的关注,具有广阔的应用前景。目前,在保证性能的条件下,进一步降低成本是促进燃料电池推广应用的关键问题。

石墨由于其质量轻、耐腐蚀和导热导电性良好等优点,仍然是目前最常用的双极板材料,但也存在机加工带来的成本过高的问题;以金属化合物为主要原料制作的双极板,使用性能令人满意,但其制作成本仍然较高,而且其长期耐腐蚀性能仍有待改善;复合双极板结合了石墨板和金属板的优点,具有耐腐蚀、

体积小、质量轻及强度高等特点,是未来双极板材料发展的趋势。

流场结构设计是否合理直接关系到燃料电池的物料运输和输出性能,各类常规流场结构均不能同时兼顾到燃料分配均匀、传质和扩散充分和消耗外部功耗小等方面,因此,燃料电池新型结构的流场仍有待于进一步研究。

参考文献(Refernces):

- [1] 衣宝廉. 燃料电池—原理·技术·应用[M]. 北京:化学工业出版社,2003.
- [2] 赵群,张翔,李辉. 基于燃料电池技术的新能源发展论述[J]. 机械,2007,34(7):1-5.
- [3] HONG S T. Effect of annealing on two different niobium-clad stainless steel PEMFC bipolar plate materials[J]. *Transactions of Nonferrous Metals Society of China*, 2009(19):56-60.
- [4] 王红星,王宇新. PEMFC流场的数学模拟[J]. 天津大学学报:自然科学版,2007,40(11):1313-1318.
- [5] KOC M, MAHABUNPHACHAI S. Feasibility investigations on a novel micro-manufacturing process for fabrication of fuel cell bipolar plates: Internal pressure-assisted embossing of micro-channels with in-die mechanical bonding[J]. *Journal of Power Sources*, 2007, 17(2):725-733.
- [6] 熊麟,秦少雄,颜学敏. 质子交换膜燃料电池双极板材料研究进展[J]. 能源研究与信息,2010,26(1):1-6.
- [7] 杨丽军,尉海军,朱磊. 质子交换膜燃料电池双极板的研究现状及展望[J]. 金属功能材料,2009,16(5):50-55.
- [8] 黄明宇,倪红军,朱昱. 中间相碳微球/石墨材料燃料电池双极板的研究[J]. 武汉理工大学学报,2006,28(2):484-488.
- [9] 王明华,曹广益,朱新坚. 一种浸渍燃料电池用石墨双极板的新方法[J]. 电源技术,2003,27(6):492-493.
- [10] GUO Nan-nan, LEU M C. Effect of different graphite materials on the electrical conductivity and flexural strength of bipolar plates fabricated using selective laser sintering[J]. *International Journal of Hydrogen Energy*, 2012, 37(4):3558-3566.
- [11] TAWFIK H, HUNG Y, MAHAJAN D. Metal bipolar plates for PEM fuel cell—A review[J]. *Journal of Power Sources*, 2007, 163(1):755-767.
- [12] ANTUNES A, OLIVEIRA L, GERHARD E. Corrosion of metal bipolar plates for PEM fuel cells: a review[J]. *International Journal of Hydrogen Energy*, 2010, 35(8):3632-3647.
- [13] 付宇,侯明,林国强. 质子交换膜燃料电池双极板用金属改性的研究[J]. 西安交通大学学报:自然科学版,2008,42(3):364-367.

(下转第523页)

经系统实验性能测试,结果表明,本研究所设计的辅助电源具有结构简单、性能良好的技术优势,实现了在输入电压宽范围变化时系统多路电压的稳定输出;所采用的RCD电路既能保护开关管又能保证系统的效率,同时,还通过一、二次侧间加合适的Y电容抑制了共模噪声。目前,该方案可以直接应用于电动汽车的电驱动系统。

参考文献(References):

- [1] 甘久超,谢运祥,颜凌峰. DC/DC变换器的多路输出技术综述[J]. 电工技术杂志,2002(4):1-3.
- [2] 吴冬梅,蔡丽娟. 开关电源的多路输出技术发展综述[J]. 电气传动,2006,36(4):8-11.
- [3] 蒋伟,喻浩. DC/DC变换器在新能源汽车上的应用[J]. 机电工程技术,2011,40(8):143-144.
- [4] 张占松,蔡宣三. 开关电源的原理与设计[M]. 北京:电子

工业出版社,2004.

- [5] 陈坚. 电力电子学[M].2版.北京:高等教育出版社,2004.
- [6] 刘俊,楚君,王玲. 一种基于UC3844的多路输出电源设计[J]. 电子工程师,2007,3(9):49-52.
- [7] 张兰红,陈道炼. 反激变换器开关应力抑制技术研究[J]. 电力电子技术,2002,36(2):29-31.
- [8] 邹华昌,乔江,宋浩谊. 开关电源的缓冲电路设计[J]. 微电子学,2008,38(1):141-144.
- [9] 刘国伟,董纪清. 反激变换器中RCD箝位电路的研究[J]. 电工电气,2011(1):21-23.
- [10] 夏亮. 电动汽车驱动器用开关电源的设计研究[D]. 上海:同济大学电子与信息工程学院,2008.
- [11] 赵志英,龚春英,秦海鸿. 高频变压器分布电容的影响因素分析[J]. 中国电机工程学报,2008,28(9):55-60.

[编辑:罗向阳]

(上接第517页)

- [14] 刘晶. 等离子体渗氮钛基金属双极板的制备及其性能研究[D]. 武汉:武汉理工大学材料科学与工程学院,2009.
- [15] HORNING R, KAPPELT G. Bipolar plate materials development using Fe-based alloys for solid polymer fuel cells[J]. **Journal of Power Sources**,1998,72(1):20-21.
- [16] 黄乃宝,衣宝廉,侯明. PEMFC薄层金属双极板研究进展[J]. 化学进展,2005,17(16):963-969.
- [17] DAVIES D P, ADCOCK P L, TURPIN M. Bipolar plate material for polymer fuel cells[J]. **Journal of Applied Electrochemistry**,2000,30(1):101-105.
- [18] 马小杰,方为民. 质子交换膜燃料电池双极板研究进展[J]. 材料导报,2006,20(1):26-30.
- [19] ZHANG Jie, ZOU Yan-wen, HE Jun. Influence of graphite particle size and its shape on performance[J]. **Journal of Zhejiang University: Science A**,2005,6(10):1080-1083.
- [20] 潘朝光. PEM燃料电池蠕虫石墨/树脂复合双极板的研究[D]. 天津:天津大学化工学院,2003.
- [21] 陈惠,刘洪波,涂文懋. 膨胀石墨/酚醛树脂复合材料双极板研究[J]. 中南大学学报:自然科学版,2011,42(11):3326-3330.
- [22] 杨涛,史鹏飞. 质子交换膜燃料电池复合双极板材料研究[J]. 电源技术,2008,32(5):306-309.
- [23] 杜超,明平文,侯明. 乙烯基树脂/膨胀石墨燃料电池复合双极板[J]. 电源技术,2010,34(7):667-671.
- [24] MULLER A, K AURANEN P, VON G A. Injection moulding of graphite composite bipolar platers[J]. **Journal of Power Sources**,2006,154(2):467-471.
- [25] 曾宪林,毛宗强,王利生. 质子交换膜燃料电池双极板制

作方法[P]. 中国:CN01118343.8,2003-01-01.

- [26] 骆兵,胡鸣若,李飞. 低温催化石墨化质子交换膜燃料电池双极板的制备方法[P]. 中国:CN200910050738.8,2009-10-07.
- [27] LI Xian-guo, IMRAN S. Review of bipolar plates in PEM fuel cells: Flow-field design[J]. **International Journal of Hydrogen Energy**,2005,30(4):359-371.
- [28] 王科. 质子交换膜燃料电池双极板流场的研究[D]. 南京:南京航空航天大学航空宇航学院,2007.
- [29] JOHNSON M C, WILKINSON D P, KENNA J. Differential Pressure Fluid Flow Fields for Fuel Cells[P]. US Patent, NO.6,586,128,2003.
- [30] BAI Ding-rong. Flow Field Plate for Use in Fuel Cells[P]. US Patent, NO.7,524,575,2009.
- [31] GURAU. Fuel Cell Collector Plates with Improved Mass Transfer Channels[P]. US Patent, NO.6,551,736,2003.
- [32] KLOESS J P, WANG Xia, LIU Joan. Investigation of bio-inspired flow channel design for bipolar plates in proton exchange membrane fuel cells[J]. **Journal of Power Sources**,2009,188(1):132-140.
- [33] TUBER K, OEDEGAARD A. Investigation of fractal flow-fields in portable proton exchange membrane and direct methanol fuel cells[J]. **Journal of Power Sources**,2004,13(1):175-181.
- [34] WANG Chin-Tsan, HU Yuh-Chung, ZHENG Pei-Lun. Novel biometric flow slab design for improvement of PEMFC performance[J]. **Applied Energy**,2010,87(4):1366-1375.

[编辑:罗向阳]