

[综述·专论]

DOI:10.3969/j.issn.1005-2895.2016.06.023

质子交换膜燃料电池金属双极板 制备工艺研究进展

张嘉波¹, 唐普洪¹, 许来涛¹, 丰崇友¹, 张智明^{2*}

(1. 嘉兴职业技术学院 机械设计研究所, 浙江 嘉兴 314036;
2. 同济大学 新能源汽车工程中心, 上海 201804)

摘 要:双极板是质子交换膜燃料电池的核心部件,需求量巨大,金属双极板是新兴的双极板形式。为了初步探寻商品化制备金属双极板工艺的方向,文章综述了近年来质子交换膜燃料电池金属双极板的制造工艺。将金属双极板制造工艺分类为减材、增材以及等材3个方面,并对各类工艺优劣进行对比研究;同时从燃料电池金属双极板的商品化角度对各类制造工艺进行详细分析。提出了硬模和软模冲压工艺是商品化制备金属双极板的可行工艺方法。

关 键 词:质子交换膜燃料电池;金属双极板;硬模冲压工艺;软模冲压工艺

中图分类号:TM911.4 文献标志码:A 文章编号:1005-2895(2016)06-0102-05

Research Progress in Metallic Bipolar Plate Preparation of Proton Exchange Membrane Fuel Cell

ZHANG Jiabo¹, TANG Puhong¹, XU Laitao¹, FENG Chongyou¹, ZHANG Zhiming^{2*}

(1. Institute of Mechanical Design, Jiaxing Vocational Technical College, Jiaxing, Zhejiang 314036, China;
2. Clean Energy Automotive Engineering Center (CEAEC), Tongji University, Shanghai 201804, China)

Abstract: In order to find an effective method of mass-produced metallic bipolar plate, the forming process of metallic bipolar plate is used in proton exchange membrane fuel cell in recent years. The processes were classified as additive manufacturing, subtractive manufacturing and equivalent manufacturing based on the forming methods, and the similarities and differences of all kinds of forming process were investigated. The forming process of metallic bipolar plate was analyzed intensively from the points of commercialization. The conclusion is that both hard and soft moulds are the effective way of mass-produced metallic bipolar plate.

Key words: proton exchange membrane fuel cell (PEMFC); metallic bipolar plate; stamping forming technology of hard mould; stamping forming technology of soft mould

质子交换膜燃料电池 (proton exchange membrane fuel cell, PEMFC) 是一种新的能源形式,它具有高效率、高功率密度、安装启动方便及模块化结构等优点,广泛运用于汽车、发电装置、便携设备、光电系统和生物发电系统等^[1-3]。金属双极板由于其强度高,体积小,广泛应用于 PEMFC。PEMFC 产品一般由上百块电池单元组合而成,而每一个电池单元都由双极板、气体扩散层、催化层和质子交换膜层组成。一个 PEMFC

产品中金属双极板占质量的 60% ~ 80%, 占成本的 30% ~ 45%^[4-5]。因此为了降低 PEMFC 的制造成本和推动 PEMFC 的商业化,国内外学者对金属双极板的材料和制备工艺进行了深入的研究。关于制备金属双极板的材料,当前主要有铁基合金、轻金属和表面涂层改性材料 3 种类型。近年来对金属板的表面涂层改性研究相对集中,对基体材料的研究,也主要集中在双极板的导电率、电阻、抗腐蚀性等物性参数上,对金属板

收稿日期:2016-05-25;修回日期:2016-06-27

基金项目:国家自然科学基金(51405344);中央高校博士点基金(20130072120041)。

作者简介:张嘉波(1985),浙江嘉兴人,硕士,主要研究方向为表面织构设计与微制造。通信作者:张智明。E-mail: zhangzm@tongji.edu.cn

成型工艺的研究报道不多^[6]。然而金属板的制备工艺直接影响了金属板的制备成本和效率,是金属板商品化的主要影响因素。因此本文主要论述金属板的各种制备工艺及各自的优劣。

1 金属双极板制备典型工艺

从金属板工艺的角度进行分类,当前金属双极板制备工艺分为增材制备、减材制备和等材制备3大类。

1.1 减材与增材制备工艺

车铣等减材机械加工工艺可以制备金属双极板。机加工产品具有良好的力学性能,但是机加工工艺制备金属双极板有2大缺陷:其一,切削产生的材料浪费,在金属板需求量大的背景下,浪费量更大,成本偏高;其二,单件加工时间长,在大批量制造时明显效率低下。制造成本高、效率低阻碍了机械加工制备金属双极板的商业化,一般来说机加工的方式只用于产品试制和中试阶段。另外,研究表明流道尺度在亚毫米级时燃料电池表现良好^[7-11]。减材制备工艺在面对亚毫米级复杂微流道结构的双极板的时候会显得能力不足。图1为减材工艺制备蛇形微流道(槽宽0.5 mm)双极板铜模时产生的材料挤出问题。

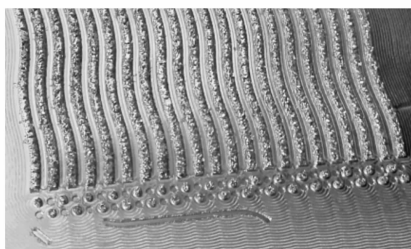


图1 蛇形流道双极板微沟槽

Figure 1 Bipolar plate micro-slot of snake shape

增材工艺比较适合结构复杂,不需要改变工艺装备就可以制备出不同流道结构的双极板。其成形速度快,但成本较高,在首板制作阶段具备优势。Dawson等^[12]采用选择性激光融化(selective laser melting, SLM)技术成功制备出蛇形流道双极板,如图2所示。经过组装实测,其接触电阻和电池性能与机械加工出的双极板相当,研究表明SLM技术可以应用于双极板的制备。吴俊峰等^[13]提出了微积累成形方法,利用数值模拟分析了垂直下压量对板料厚度变化、流道成形深度的影响规律。在双极板流道成形方面是一个全新的尝试。图3描述了微积累成形方法的工艺装备。

1.2 等材制备工艺

相比于减材和增材工艺,等材制备工艺以其节省材料,制备速度高等特点更具有工艺与成本优势。在



图2 选择性激光融化(SLM)技术

Figure 2 Selective laser melting technic

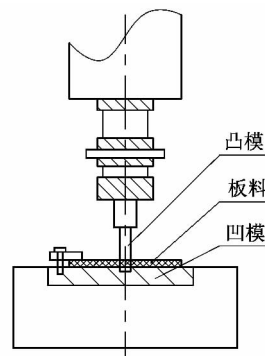


图3 微积累成形工装

Figure 3 Micro accumulative forming method

等材制备工艺中,根据驱动力、成形温度的不同可以分为冲压、压印、压铸、触变等工艺。

1.2.1 冲压制备工艺

为了节省金属双极板的制造成本和提高金属双极板的制造效率,用冲压模具的方法进行金属双极板的制备是一种高效工艺。图4是硬模冲压的典型工艺装备。工作时,将毛坯板放在上下硬模之间,由曲柄压力机或油压机作为动力使上模压向下模,在毛坯板上压制出流道。为了进一步提高效率,可以将冲压工艺设计成级进模形式^{[14]18}。

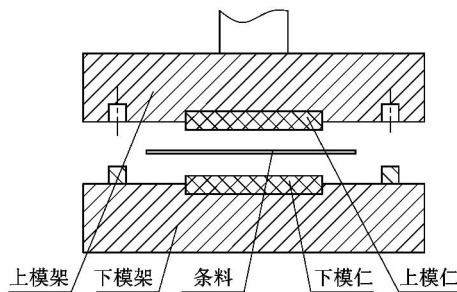


图4 典型硬模冲压工装

Figure 4 Classical hard mould method

硬模冲压工艺由于其成本低廉,已经应用于大规模双极板制造中。但是这种工艺存在限制,比如冲压出的形状不够精确,尺寸回弹和在压制薄板时容易产生翘曲。针对这些问题国内外学者进行了大量的研究,Kwon等^[15]以冲压力、冲压速度、冲压温度和冲头圆角为研究对象,研究在两步冲压工艺下产品的成形

质量。研究表明毛坯可冲性能与冲压力、冲压温度成正比,在 250 °C 时达到最佳冲压条件;两步冲压工艺下,流道成形深度更佳;同时在高温条件下,壁厚缩减更小。张金营等^[14]¹⁹将级进模冲压成形工艺应用与双极板的制造,提出增加压边圈在毛坯上压制拉延筋防止变形。Kim 等^[16]对冲压力进行研究,比较动态冲压力与静态冲压力下产品的质量区别。研究表明采用动态冲压力更有利于成形。瑞典 Cell Impact 公司将冲压速度提高,在极短时间内将冲头的动能转化为几个吉帕的压强,金属板料在高压强下以近液态形式填充模腔,成形金属双极板。该瞬时冲压方法比较好地解决了翘曲问题,但是成形设备过于昂贵。

与硬模冲压相比,软模冲压有很多的优点。软模冲压工艺中下模为橡胶板,向双极板提供均匀的压力时,由于橡胶的弹性质地会使板材和模具完全贴合,如图 5 所示。该工艺系统只需要精确地设计制造一块上硬模板即可,从而节省模具制造费用和时间^[17],降低了双极板成本^[18]⁴⁹²⁵,有利于工装设备的市场化^[19]。Lim 等^[20]已经应用软模冲压工艺成功在 0.2 mm 铝板上制备出槽宽 0.8 mm,间距 1.2 mm,槽深 0.3 mm 的流道。

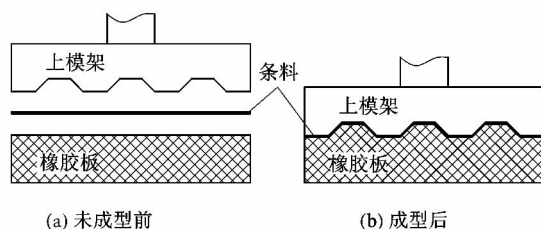


图 5 典型软模冲压工装

Figure 5 Classical semi-soft mould method

但是受到软模材料的影响,软模成形存在极限;同时在生产过程中,软模与产品之间存在的摩擦力易使软模老化,相对来说寿命较短^[21]。针对软模硬度对成形极限的影响,Jeong 等^[22]对软模成形工艺中,软模的硬度与硬模角度进行了研究,研究表明软模的硬度和成形能力成反比。Ramezani 等^[18]⁴⁹²⁶利用计算机辅助技术研究了软模成形过程中摩擦力在各个部件之间的分布以及对成形效果的影响。

1.2.2 压印制备工艺

液压压印成形工艺中,毛坯板一面是传统模具,另一面与液压油接触,如图 6 所示。工作时液压油将高压传递到毛坯板上,迫使毛坯板沿着模具的形状变形,最终成形工件。与冲压成形工艺相比较,液压成形工

艺具有良好的拉延比、更好的表面质量和较少的回弹,更适合制备复杂图案的双极板^[23-25]。但是液压设备昂贵,保养与维护费用高,制约了液压成形工艺的实际应用。液压成形可以制备深宽比较大的流道,但受限于双极板材料本身的金属延伸性能,Monhammadtabar 等^[26]采用两步液压成形的方式获得了比一步液压成形更深的凹槽。Palumbo 等^[27]在液压成形过程中尝试加温,试验表明在 220 °C 时成形效果最贴近模具,沟槽深宽比增大。

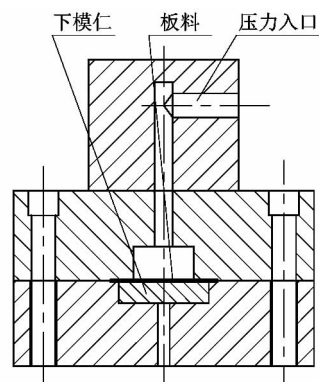


图 6 典型液压成形工装

Figure 6 Classical hydroforming process

1.2.3 电磁制备工艺

在微型双极板制造领域,Shyu 等^[28]用电磁成形技术成功制备了 0.5 mm 宽,0.3 mm 深的流道,如图 7 所示。电磁微成形零件具有质量好、精度高等特点,并且高速率成形可以抑制由于尺寸减小造成的摩擦尺寸效应,金属在成形过程中变形均匀;同时电磁微成形设备具有结构简单,易于控制的特点。虽然电磁微成形领域的研究才刚起步,但近些年来电磁微成形领域的研究成果显示,采用电磁成形技术进行微型零部件的加工和制造可以获得较高的成形质量,是一种能够实现微型零件的低成本、高效率的批量化生产的微塑性加工方法,将在微制造领域将得到广泛的应用。

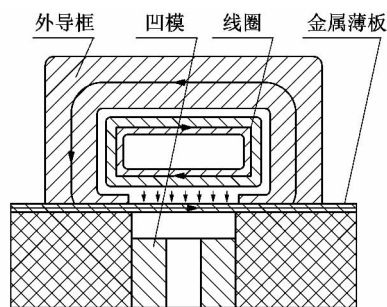


图 7 电磁成形工艺

Figure 7 Electromagnetic micro-forming process

1.2.4 铸造制备工艺

铸造成形的典型工艺装备如图8所示。Chul Kyu Jin等^[29]应用真空铸造的方式制备双极板。制造过程如下:将融化金属倒入熔池;在上压柱的作用下熔池中的熔融金属被挤入模具上的流道;冷却后通过顶针将成品顶出。真空铸造方式^{[30]363}可以非常精确地根据模具制造出相应的双极板,但是在铸造厚度小于1.0 mm的双极板时显示出能力不足^[31]。

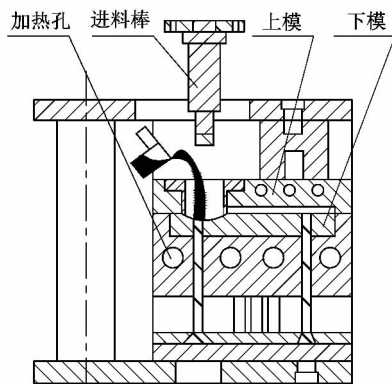


图8 铸造工艺设备

Figure 8 Die casing process equipment

Bolouri等^{[30]364}提出了触变成形铸造技术,采用A356铝分别在585,590和595℃条件下进行铸造试验,铸造出70 mm×70 mm的金属双极板。

2 结语

1) 金属具备良好的加工性能,金属双极板在试制阶段采用减材加工方式较适合。减材加工方式不需要事先制备模具,并且修改方便,可以低成本地快速出样。但是金属双极板趋向于超薄化(小与0.5 mm),流道复杂化(蛇形纹等),流道微型化(槽宽槽深为亚毫米级)时,即便是单件的试制加工,减材方式也不适用。需要增材加工方式进行制备。

2) 金属双极板是质子交换膜燃料电池的核心部件,需求量巨大。商品化制备金属双极板,需保证生产效率和生产稳定性,而减材和增材制备方法效率低下,都不适用于商品化制备金属双极板。电磁成型研究刚起步,技术不够成熟。压铸和触变成形属于热加工成形,都存在着升温或重熔过程,虽然克服了金属板翘曲问题,但在薄窄的空间内金属流动性差,容易产生缺陷。在板材薄至0.1 mm时不能成形。且2种工艺复杂,效率低,虽然可以采用一模多腔,但仍不能有效控制成本,很难被工业界接受。压印成形载荷驱动力为液压,较冲压驱动成形效率低下不具备量产优势。

3) 对于制备亚毫米尺寸且复杂流道的金属双极

板,冲压工艺是双极板微流道成形商品化制备的主要研究方向。当前,金属板冲压硬模软模成形时,凸凹模圆角半径在0.1~0.3 mm之间时,不锈钢双极板微流道成形尺寸精确无裂纹瑕疵。但在不锈钢材厚度尺寸减小过程中,金属板翘曲程度增加,变形不易控制。虽然在后期装配过程中可以通过工装压紧,但是由于翘曲造成的接触电阻增加,气密性减小等瑕疵会影响燃料电池的工作性能。

4) 燃料电池向着小型化,高性能化发展。这就要求金属双极板相应地减小尺寸。其中厚度对电池整体小型化影响最大,但是会对制备带来变形翘曲等问题。超薄(小于0.5 mm)金属双极板冲压过程的变形机理与冲压后翘曲控制是双极板商业化的难点,也是今后的研究方向。可以从材料本征尺度效应和制备工艺条件微尺度效应两方面进行研究。针对金属双极板的微流道成形,微尺度效应方向的研究是重点方向。

参考文献:

- [1] BAR-ON I, KIRCHAIN R, ROTH R. Technical cost analysis for PEM fuel cells[J]. Journal of power sources, 2002, 109(1): 71-75.
- [2] COSTAMAGNA P, SRINIVASAN S. Quantum jumps in the PEMFC science and technology from the 1960s to the year 2000: Part II engineering, technology development and application aspects [J]. Journal of power sources, 2001, 102(Sup. 1/2): 253-269.
- [3] TAWFIK H, HUNG Y, MAHAJAN D. Metal bipolar plates for PEM fuel cell: a review[J]. Journal of power sources, 2007, 163(2): 755-767.
- [4] SOPIAN K, DAUD W R W. Challenges and future developments in proton exchange membrane fuel cells[J]. Renewable energy, 2006, 31(5): 719-727.
- [5] MATSUURA T, KATO M, HORI M. Study on metallic bipolar plate for proton exchange membrane fuel cell[J]. Journal of power sources, 2006, 161(1): 74-78.
- [6] CHO Hyum, YUN Young-hoon. Stainless steel bipolar deposited with multilayer films for PEMFC applications [J]. Journal of materials engineering and performance, 2013, 22(8): 2411-2417.
- [7] 吴孟飞, 鲁聪达, 吴明格, 等. 多蛇形流道几何特征的数值研究[J]. 电池工业, 2012, 17(4): 221-226.
- [8] 李茂春, 刘铁根, 赵劼, 等. 质子交换膜燃料电池薄金属双极板性能优化与设计[J]. 天津大学学报, 2006, 39(10): 1252-1257.
- [9] 兰箭, 魏曦, 刘艳雄, 等. 燃料电池金属极板成形规律[J]. 塑性工程学报, 2010, 17(3): 103-107.
- [10] 冷巧辉, 马利, 文东辉, 等. 燃料电池双极板材料及其流场研究进展[J]. 机电工程, 2013, 30(5): 513-517.
- [11] 王山领, 隋升, 陈守超, 等. 不锈钢冲压双极板及其试验验证和仿真[J]. 电源技术, 2013, 37(10): 1760-1763.
- [12] DAWSON R J, PATEL A J, RENNIE A E W, et al. An investigation in the use of additive manufacture for the production of metallic bipolar plates for polymer electrolyte fuel cell stacks[J]. Journal of

- applied electrochemistry, 2015, 45(7): 637-645.
- [13] 吴俊峰, 王匀, 朱凯, 等. 微型燃料电池 304 不锈钢双极板累积成形研究[J]. 锻压技术, 2014, 39(4): 47-50.
- [14] 张金营, 宋满仓, 吕晶, 等. PEMFC 金属双极板成形工艺分析及数值模拟[J]. 模具工业, 2010, 36(12): 18-21.
- [15] KIM Min-june, JIN Chul-kyu, KANG Chung-gil. Comparison of formabilities of stainless steel 316L bipolar plates using static and dynamic load stamping [J]. International journal of advanced manufacturing technology, 2014, 75(5): 651-657.
- [16] KWON Hae-june, JEON Yong-phil, KANG Chung-gil. Effect of progressive forming process and processing variables on the formability of aluminum bipolar plate with microchannel [J]. International journal of advanced manufacturing technology, 2013, 64(5): 681-694.
- [17] PENG Linfa, HU Peng, LAI Xinmin, et al. Investigation of micro/meso sheet soft punch stamping process-simulation and experiments [J]. Materials & design, 2009, 30(3): 783-790.
- [18] RAMEZANI M, RIPIN Z M, AHMAD R. Computer aided modelling of friction in rubber-pad forming process [J]. Journal of materials processing technology, 2009, 209(10): 4925-4934.
- [19] 刘艳雄. 燃料电池金属双极板软模成形研究[D]. 武汉: 武汉理工大学, 2010: 1-7.
- [20] LIM S S, KIM Y T, KANG C G. Fabrication of aluminum 1050 micro-channel proton exchange membrane fuel cell bipolar plate using rubber-pad-forming process [J]. International journal of advanced manufacturing technology, 2013, 65(1): 231-238.
- [21] 吴海华, 刘富林, 李厅, 等. 质子交换膜燃料电池金属双极板制造方法综述[J]. 电源技术, 2014, 38(8): 1583-1585.
- [22] JEONG Min-geun, JIN Chui-kyu, HWANG Gyu-wan, et al. Formability evaluation of stainless steel bipolar plate considering draft angle of die and process parameters by rubber forming [J]. International journal of precision engineering and manufacturing, 2014, 15(5): 913-919.
- [23] ZHANG S H, WANG Z R, WANG Z T, et al. Some new features in the development of metal forming technology [J]. Journal of materials processing technology, 2004, 151(1/2/3): 39-47.
- [24] HAMA T, ASAKAWA M, MAKINOCHI A. Investigation of factors which cause breakage during the hydroforming of an automotive part [J]. Journal materials processing technology, 2004, 150(Sup. 1/2): 10-17.
- [25] LANG L H, WANG Z R, KANG D C, et al. Hydroforming highlights: sheet hydroforming and tube hydroforming [J]. Journal materials processing technology, 2004, 151(1/2/3): 165-177.
- [26] MOHAMMADTABAR N, BAKHSHI-JOOYBARI M, HOSSEINIPOUR S J, et al. Feasibility study of a double-step hydroforming process for fabrication of fuel cell bipolar plates with slotted interdigitated serpentine flow field [J]. International journal of advanced manufacturing technology, 2015, 88(5): 1-13.
- [27] PALUMBO G, PICCININNI A. Numerical-experimental investigation on the manufacturing of an aluminium bipolar plate for proton exchange membrane fuel cells y warm hydroforming [J]. International journal of advanced manufacturing technology, 2013, 69(1): 731-742.
- [28] SHYU Rueyfang, YANG Hsihamg, LEE Junhan. Micron-electroforming metallic bipolar electrodes for mini-DMFC stacks [J]. Microsystem technology, 2009, 15(8): 1265-1271.
- [29] JIN Chul-kyu, JANG Chan-hyun, KANG Chung-gil. Die design optimization of die casting for fabrication of fuel cell aluminum bipolar plate with micro-channel through casting simulation and experimental investigation [J]. Journal of mechanical science and technology, 2013, 27(10): 2997-3003.
- [30] BOLOURI A, JANG Chang-hyun, KANG Chung-gil. Thixoforming A356 aluminum bipolar plate at high solid fractions [J]. Metallurgical & materials transactions B, 2014, 45(2): 363-371.
- [31] JIN Chul-kyu, KANG Chung-gil. A comparative study on the formability of aluminum bipolar plate with channels using indirect squeeze casting and stamping [J]. International journal of precision engineering and manufacturing, 2015, 16(7): 1233-1238.

[信息·简讯]

· 产品介绍 ·

● Sinamics DCP 双向直流变换器

Sinamics DCP 是西门子最新一代双向直流变换器, 拓展其功率范围, 通过并联实现最高 480 kW 的输出功率。Sinamics DCP 更高的开关频率为采用较小的电抗器创造了条件, 让装置尺寸更小, 更省空间; 集成电压控制功能使得该 DC/DC 电源变换器可被用于高功率的 0~800 V 直流电压源; Sinamics DCP 不仅适合于工业应用, 同时适合再生能源领域中集中式和分布式多种发电类型; 作为一种功率灵活扩展的升降压型电源转换器, 它既可以工作在电动模式也可以工作在发电模式; 其高性能的电压控制器可监控直流母线, 并且在电力电子系统发生故

障的情况下, 在一段时间内保持所需的电压; 装置采用 Profibus 作为标准通信接口, 此外还可选用 Profinet 或以太网/IP 接口连接工业网络, 提供 BOP20 操作面板, 用于调试和本地操作控制。

Sinamics DCP 双向直流变换器应用广泛, 尤其适合包括在光伏系统和风电与储能相结合的系统应用场合, 或用于需要调节峰值负荷, 以及结合柴油机供电系统、门式起重机还有存储和分拣系统, 此外, 它还可被用于电动汽车快速充电站, 并可用于电动汽车试验系统的仿真电源。

(供稿: 张欣)