

金属支撑型固体氧化物燃料电池研究进展

周永川, 宋世栋, 韩敏芳

(中国矿业大学(北京)化学与环境工程学院, 煤气化燃料电池联合研究中心, 北京 100083)

[摘要] 随着固体氧化物燃料电池(SOFC)向中低温发展,使得金属材料用于SOFC的关键组件成为可能。金属支撑型SOFC(MS-SOFC)是以金属或合金作为燃料电池支撑体的结构。相对于其他支撑型SOFC,MS-SOFC具有更好的导电能力和导热能力、较高的机械强度以及较低的成本,所以引起了研究人员的广泛关注。目前,MS-SOFC的结构呈多样化发展,支撑体、电极和电解质的材料及其制备工艺也不尽相同。本文介绍了不同结构的MS-SOFC的研究现状,评述了它们各自的制备工艺和存在的问题,并提出了目前MS-SOFC亟需解决的问题。

[关键词] 固体氧化物燃料电池;金属支撑型SOFC;薄膜电解质;热循环;快速启动

[中图分类号] TQ517.3 **[文献标识码]** A **[文章编号]** 1009-1742(2013)03-0027-06

1 前言

经过多年的发展,固体氧化物燃料电池的材料、电池设计及其制备工艺等相关技术都取得了很大进步^[1]。然而,传统SOFC材料的高成本和电池封接的不可靠等问题严重阻碍了SOFC的商业化进程。SOFC向中低温发展是解决这些问题的重要方向,当操作温度降至中温(600~800℃)或低温(450~600℃)时,价格低廉的不锈钢材料就可以用于支撑体和电池堆的连接体,而且在较低的操作温度下电池堆的密封比较容易实现,从而降低电池堆的复杂程度,这就使SOFC的快速启动和热循环成为可能^[2]。近年来,金属支撑的电池构型,以其独特的设计理念,且可以同时满足高输出性能和低成本的优越性,越来越受人关注^[3]。低温化发展趋势驱动SOFC从传统的陶瓷支撑结构,即阳极支撑、阴极支撑和电解质支撑,逐渐向金属支撑结构转变。

传统的SOFC,一般都是采用稳定的陶瓷材料或者是金属陶瓷复合材料作为其支撑体。这种支撑体的缺点是:陶瓷材料不易加工,其抗热冲击性和焊接性都比较差,不利于电池堆的组装,导致

SOFC的制备成本居高不下。随着科技的发展,各国对SOFC的研究也在不断深入,特别是随着SOFC的制备技术及工艺日趋成熟,改进了电解质的成膜技术,开发了新型低温电解质材料。从而使电池能够在600~800℃的中低温范围内工作。而且,电极材料的选择范围也得到了扩大,金属材料在SOFC中已实现越来越重要的应用。因此,以金属材料作为SOFC的支撑体制备金属支撑型SOFC(MS-SOFC)成为当前SOFC研究的热点。

相比于传统陶瓷支撑结构,金属支撑SOFC具有如下优势^[4]:a. 成本低。金属材料的价格远低于阳极、阴极、电解质所用的陶瓷材料。b. 快速启动。金属良好的导热性,能保证金属支撑SOFC快速启动性能,使之可以应用于移动领域。c. 可加工性。金属不锈钢材料具有良好的延展性,这将使SOFC加工的难度大大降低。d. 便于密封。利用金属材料成熟的密封技术,可能避免传统SOFC的难于封接的问题。

正是由于金属材料具有上述其他材料所不具备的优点,金属支撑SOFC被视为第三代SOFC,有望替代传统的电极或电解质支撑型SOFC。

[收稿日期] 2012-11-10

[基金项目] 国家重点基础研究发展计划“973计划”资助项目(2012CB215404,2012CB215406);国家自然科学基金资助项目(511110463)

[作者简介] 韩敏芳(1967—),女,河北藁城市人,长江学者特聘教授,研究方向为固体氧化物燃料电池及煤基新型高效发电系统;

E-mail: hanminfang@sina.com



图1 金属支撑型SOFC结构示意图

Fig.1 Schematic diagram of metal-supported SOFC

虽然金属支撑型SOFC相比于传统的陶瓷支撑型SOFC具有较多的优点,但金属支撑型SOFC的制备工艺一直是研究人员所面临的最大挑战之一。若用传统的湿化学法制备电解质,则需要还原气氛下煅烧,以防止金属支撑体在高温下被氧化。但是,还原气氛下煅烧将会导致Ni晶粒粗化以及Ni-Fe-Cr体系相互扩散等问题,从而降低材料的稳定性,并且使电池的性能衰减。致密电解质的制备工艺是当前研究的重点,也是制备金属支撑型SOFC所面临的最关键的问题之一。随着薄膜成型技术的发展,脉冲激光沉积(PLD)^[5]、真空等离子喷涂(PS)^[6]、大气等离子喷涂(APS)^[7]等技术在金属支撑型SOFC的制备中得到了较为广泛的应用,因为这些工艺无需高温烧结,且制得的电解质一般具有较高的致密度,这在很大程度上解决了电解质致密化的难题。但是,这些制备技术的高成本和复杂的工艺,不能满足规模化生产和商业化发展的要求。目前,探索低成本的制备工艺仍是现阶段MS-SOFC研究的重要方向。

2 金属支撑型SOFC的研究进展

早在20世纪60年代,金属支撑SOFC的优势就得到认可。Keith R Williams等人^[8]用火焰喷涂法,将ZrO₂基电解质沉积在奥氏体不锈钢基底上,电池操作范围温度为700~800℃,得到不错的性能,分别将氢气、甲醇和煤油作为燃料时,所得的结果相差无几,但由于制备较为困难,在当时没有受到广泛重视。在20世纪90年代,德国航空航天中心(DLR)通过等离子喷涂法在预先制好的平板式CrFe₃Y₂O₃支撑体上涂上ZrO₂电解质^[9],900℃下其功率密度达到1 W/cm²。目前,德国DLR和Jülich研究中心,丹麦的Risø可持续能源国家实验室,英国的Ceres Power公司和帝国理工大学,美国劳伦斯伯克利国家实验室等在此研究领域都取得了不俗的成就。此外,加拿大、韩国和中国的一些研究机构也对MS-SOFC进行了大量的相关研究。

金属支撑型SOFC单电池一般由支撑体、阳极、

电解质和阴极组成,与之相关的研究工作主要集中在材料的选择和制备工艺上。对支撑体材料而言,金属支撑型SOFC主要分为Fe基支撑体和Ni基支撑体两类。

2.1 Fe基支撑型SOFC

Fe基支撑型SOFC比较常见,而Fe基合金作为支撑体,将面临两个问题:首先,长期在中高温、潮湿气氛下工作很容易导致金属材料的氧化;其次,金属与电解质材料热膨胀系数的不匹配,易造成薄膜电解质层开裂、剥离等问题,这些问题在很大程度上限制了Fe基合金材料用作SOFC的支撑体。国内外很多研究员都着力于开发支撑体材料,目前能够用作SOFC支撑体的有Fe-30Cr^[10]、STS430^[11]、Crofer22 APU^[12]等少数Fe基合金,这些价格低廉的Fe基不锈钢材料已得到了广泛的研究和使用。大多数研究者倾向于将铁素体不锈钢用作金属支撑体。铁素体不锈钢是体心立方结构,铁铬合金主要由铁、铬以及少量碳构成。铁素体不锈钢中Cr的含量一般控制在10.5 wt.%~26 wt.%之内,为了提高合金的物理性能,人们常在合金中添加Ni、Mo、Si、Ti、Al等元素。由于铁素体不锈钢便宜、寿命长,而且其热膨胀系数(约为10~12 ppm/K)(1 ppm=10⁻⁶)与YSZ和GDC等电解质材料相匹配,适合用作SOFC的支撑体。Ceres Power、Jülich研究中心以及中国科学技术大学等研究机构所采用的支撑体的材料均为铁素体不锈钢。

帝国理工大学经过十多年的基础研究,掌握了比较成熟的MS-SOFC的制造技术,并在此基础上于2001年创建了Ceres Power公司。该公司将200~300 μm厚的压延不锈钢箔用作电池的支撑体,采用了激光钻孔的方式在不锈钢支撑体的中央区域加工出气体通道,四周留出焊接区域。随后,在支撑体上用丝网印刷的方法制备一层厚为15 μm左右的Ni-GDC阳极,接着通过电泳沉积法在阳极上制备10~15 μm厚的致密GDC电解质薄膜。阴极材料采用LSCF/GDC,阴极接触层为比阴极略厚的LSCF层。在600℃下,潮湿的氢气气氛中,得到的开路电压为0.91 V,最大功率密度为310 mW/cm²,对于MS-SOFC来说,在较低温度下取得这样的性能是非常突出的^[13,14]。与通过粉末冶金法制备出的支撑体相比,这种支撑体较便宜,更易于封接,而且在高温下有更佳的抗氧化能力。Ceres Power公司使用GDC作为电解质材料,将工作温度降低到500~600℃范围,这就允许用廉价的铁素体不锈钢来替代SOFC中的一

些组件。另外, Ceres Power公司自主研发的GDC低温烧结工艺能在1 000 ℃以下使GDC烧结致密,这使得在空气气氛中的共烧结成为可能,降低了金属支撑型SOFC的制备难度^[15]。而且由于铁素体不锈钢的使用,可以用传统的金属连接技术来实现电池堆的封装,这在一定程度上解决了SOFC电池堆的封装难题。近几年, Ceres Power公司着力于将金属支撑型SOFC从实验室转向工业规模发展,组装出了能实现多次热循环启动而不影响发电性能的千瓦级电池堆。

Risø实验室目前研究的是多层结构的金属支撑型SOFC,通过金属粉末流延,共烧和浸渍等廉价的陶瓷制备工艺来制备^[2]。在工作温度下, Ni-Fe-Cr体系中的迁移和Ni晶粒的粗化问题将会严重影响电池性能, Risø实验室通过浸渍阳极的方法来提高电池的性能。首先采用流延的方式分别流延出金属支撑体(含Cr的不锈钢),金属陶瓷骨架(混合了金属的YSZ)和电解质(ScYSZ)3种材料的坯体,将这3种坯体层压、共烧后,向金属支撑体和金属陶瓷骨架中浸渍Ni-GDC,从而得到具有活性的阳极^[16]。采用丝网印刷的方式制备LSCF/GDC阴极和LSM阴极接触层。然而在高温下阴极材料会与ZrO₂反应生成导电性较差的SrZrO₃,为了避免这个反应的发生,他们用物理气相沉积的方式在电解质和阴极之间制备了一层GDC。面积为0.5 cm²的纽扣电池,在750 ℃下得到了高达1.14 W/cm²的功率密度。Risø实验室制备的金属支撑型SOFC在经历100次热循环后,性能没有明显的衰减。采用浸渍的方法制备阳极,在一定程度上缓解了Ni团聚对电池性能的影响。

早在20世纪90年代,德国DLR就引进金属支撑型SOFC的概念,设计出NiO+YSZ/YSZ/LSM结构的电池,得到150 mW/cm²的功率密度。随后在与BMW公司的共同合作下,将电池的功率密度提高到320 mW/cm²。目前,DLR正在对此进行深入研究,希望能将金属支撑型SOFC用作辅助动力装置(APU)。DLR使用粉末冶金工艺制备多孔的Fe-Cr合金作为支撑体,在此基础上制备电极和电解质等^[17]。首先,通过空气等离子喷涂(APS)在支撑体上制备一层致密的迁移阻挡层,以此阻碍电池工作时基底和阳极之间Cr、Fe和Ni的相互迁移。然后再采用真空喷涂,低压喷涂等工艺制备电极和电解质。得到结构为NiO-YSZ/YSZ/LSCF的电池,800 ℃下开路电压为1.09 V,功率密度峰值为609 mW/cm²。另

外,DLR用10个尺寸为10 cm×10 cm的单电池组装了电池堆,其最高功率密度为306 mW/cm²,最大功率为250 W。电池堆采用的封接材料仍然是传统的玻璃和陶瓷材料,为了提高电池堆性能,目前DLR正在研究用铜焊封接的方法,以期提高电池堆的韧性和启动时的升温速率^[18]。

此外,奥地利Plansee公司和德国Jülich研究中心等机构在具备成熟的阳极支撑型电池薄膜制备和烧结工艺的基础上,合作研究了高性能的金属支撑型SOFC。与其他研究机构不同的是,他们着力于发展高温(>700 ℃)金属支撑型SOFC,因为在较低温度下,碳基燃料会对传统的Ni基阳极带来诸如积碳问题等致命的影响。利用阳极支撑型电池的丝网印刷、烧结和薄膜制备等技术,制出金属支撑型电池。他们将Fe-Cr合金作为支撑体,并用物理气相沉积的方法在支撑体上制备了一层GDC,以此来防止支撑体与阳极之间Fe-Cr-Ni的迁移。然后以此在上面制备Ni/YSZ阳极和YSZ电解质,经煅烧后得到半电池,最后通过丝网印刷的方式制备LSCF阴极。在830 ℃下,10 cm×10 cm的单电池得到的最高功率密度为530 mW/cm²,开路电压为0.93 V,性能略低于有相同材料制备的阳极支撑型电池。目前,Plansee及其合作伙伴正致力于组装1 kW的金属支撑型SOFC电池堆,希望它在工作条件下具有足够的稳定性,以满足重型卡车辅助动力装置(APU)的需要^[19]。

中国科技大学的夏长荣等人^[20]也对金属支撑SOFC进行了较深入的研究,他们将430合金粉末和YSZ粉末按比例混合作为支撑体材料,通过共压的方式制备了由多孔SS430合金支撑体和致密YSZ电解质组成的双层结构坯体,在还原气氛中1 400 ℃下共烧后向多孔支撑体中浸渍催化剂Ni-SDC,得到半电池,最后用丝网印刷的方式在电解质上沉积LSM阴极。在700 ℃下开路电压约为1.03 V,最大功率密度为264 mW/cm²。夏长荣等人简化了常规的四层结构,直接在混合了少量YSZ的多孔SS430合金上制备电解质,通过浸渍的方式将支撑体与阳极层合并为一层,在保持其强度的同时增强了支撑体与电解质的化学兼容性。

虽然大多数金属支撑SOFC选择平板式结构,管式金属支撑型电池也越来越受到重视^[21]。美国劳伦斯伯克利国家实验室(LBNL)在多孔铁素体不锈钢管上沉积YSZ薄膜,在多孔YSZ中分别浸渍阳极

Ni和阴极LSM,制备出多孔不锈钢支撑体/多孔Ni-YSZ/致密YSZ薄膜/多孔LSM-YSZ/多孔不锈钢接触层这种具有五层结构的管式金属支撑型电池^[22]。在700℃下,使用空气和纯氧作氧化剂时得到的功率密度分别为332 mW/cm²和993 mW/cm²。此外,西班牙伊克兰研究中心制备出长为5~10 cm,有效面积为4~16 cm²的管式电池。在800℃下得到150~450 mW/cm²的功率密度。金属支撑体在水蒸气气氛中具有良好的抗氧化性能,经历450次剧烈的热循环后,电池的连接部位保持稳定^[23]。

2.2 Ni基支撑型SOFC

金属Ni在较高温度下(可高达1 200℃)仍能保持较高的强度,且它对阳极的反应具有较高的催化活性,因此与其他金属支撑型SOFC相比,Ni基支撑型SOFC将具有更为卓越的电性能^[24]。由于Ni的热膨胀系数与传统使用的电解质材料(如YSZ、GDC等)相差较大,因而支撑体与电池其他组件的界面处很容易出现裂纹,甚至在长期的运行中造成电解质层的开裂。

起初,有人用多孔的金属镍作为支撑材料,但由于Ni的高成本,热膨胀系数与电解质不匹配,对氧化还原的承受能力较差,且Ni对积炭和硫所导致的衰减极为敏感,使Ni这种材料的发展受到限制。后来,台湾核能研究所在纯Ni管上制备了微小的电池^[7]。通过氧化/还原的方法,制得了直径为1 mm的Ni管,管上分布着0.5~2.5 μm大小的孔。然后通过EDV将YSZ电解质沉积到Ni上。这样Ni管既作为支撑体,又具有阳极的功能。通过等离子喷涂在多孔Ni微管上面制备Ni-YSZ/LSGM/LSCF电池,然后在1 000℃下共烧,在这个温度下,LSGM与Ni不会有明显反应,并且能得到致密的电解质层,制得的电池的功率密度在800℃时为440 mW/cm²。

华中科技大学^[25]率先采用流延的方式制备出NiO支撑体,然后通过丝网印刷的方式依次制备NiO-YSZ阳极、YSZ电解质和阴极,阴极材料为添加了少量贵金属的YSZ。在800℃下,电池的开路电压在1.0 V以上,其功率密度达到800 mW/cm²。但是将金属Ni作为支撑材料存在一系列潜在问题,比如氧化还原性能较差、Ni支撑体较低的强度以及微观结构的不稳定,这些问题都有可能导导致性能衰减或电池寿命缩短。

韩国燃料电池研究中心研究了以Ni^[26]和Ni-Fe^[27]为支撑体的SOFC电池。在1 400℃还原气氛下共

烧,制备出Ni支撑体/Ni-YSZ/YSZ电解质三层结构半电池,虽然烧结过程中,阳极Ni晶粒变大,800℃下所制得电池的功率密度仍有470 mW/cm²。Ni支撑体与电池其他组件热膨胀不匹配的问题难以解决,该研究中心向Ni支撑体中加入Fe,从而调整支撑体的热膨胀系数。以NiO和Fe₂O₃为支撑体的原料,流延出NiO-Fe₂O₃,NiO-GDC和GDC坯体,然后经层压、共烧等工艺得到半电池,最后将BSCF阴极通过丝网印刷的方式沉积到电解质上,制得电池。

Fe的加入,使得造价变低,还在一定程度上缓和了纯Ni与电解质热膨胀不匹配的问题,但积碳问题以及硫对电池性能的影响问题仍然没有得到解决。Ni-Fe合金强度较大,相对来说容易制得。支撑体的材料一般用Fe₂O₃和NiO,并烧结得比较致密。在电池启动时,燃料气能将Ni-Fe基底还原成Ni-Fe合金。还原时基底的收缩能得到足够大的孔隙率,从而满足电池燃料气的传输。

3 金属支撑型SOFC的热循环性能

由于金属具有良好的导热性能,在升降温时材料内部不会有太大的温度梯度。若将金属作为支撑体材料,在快速升降温时,则可以避免因温度分布不均而造成的电池开裂等问题。因此,金属支撑型SOFC可以实现快速启动和多次热循环。

韩国燃料电池研究中心^[28]研究了以Ni和Ni-Fe合金为支撑体的MS-SOFC的热循环性能,以20℃/min的升降温速率进行10次快速热循环后,在800℃下其功率密度分别保持在1.3 W/cm²和0.9 W/cm²。西班牙伊克兰研究中心^[29]研究了管式金属支撑SOFC的热循环性能,以10℃/min的升降温速率经历超过200次热循环后,电池性能仍保持稳定。德国宇航中心^[30]研究了尺寸为10 cm×10 cm的金属支撑型SOFC的循环性能,经历15次热循环后,电池的功率密度稍有下降。

4 MS-SOFC亟需解决的问题

相比于传统的陶瓷支撑型SOFC,金属支撑型SOFC具有明显的优势。最近金属支撑型SOFC发展迅速,也取得了许多进展,但大多还停留在探索阶段,仍然存在着诸多问题有待探索和解决。

首先,材料固有特性、电解质薄膜沉积工艺、电池界面微观结构、电池极化特性等相互之间的内在关系及它们对电池性能的影响有待研究。

其次,Fe、Cr、Ni在金属支撑体与阳极间的相互扩散会导致金属支撑 SOFC 性能的迅速衰减。Fe-Cr-Ni元素的相互扩散会促进支撑体中奥氏体的形成,引起支撑体的热膨胀系数变化,使之不能跟其他组件的热膨胀性能相匹配,在快速热循环的冲击下将导致电池开裂或界面分层。另外,Cr元素向阳极方向扩散,会在Ni颗粒表面形成氧化物,最终导致电池性能迅速衰减。

另外,阴极薄膜的制备工艺还有待改良。对于用Fe基不锈钢为支撑体的金属支撑型 SOFC 电池,其制备多采用还原或惰性气氛下共烧,以避免支撑体的过度氧化。但传统的钙钛矿阴极材料在此条件下不能保持足够的稳定性,严重时阴极材料甚至会分解。

总之,选择合适的金属支撑体材料,开发新型的电解质与电极材料,探寻工艺简单、低成本的电解质成型工艺及降低电解质烧结温度仍将是金属支撑型 SOFC 的主要研究方向。

参考文献

- [1] 韩敏芳,彭苏萍. 固体氧化物燃料电池材料与制备[M]. 北京: 科技出版社,2004:2-8.
- [2] 黄秋安,汪秉文,徐玲芳,等. 金属支撑固体氧化物燃料电池阻抗谱动态分析[J]. 华中科技大学学报,2009,37(5):38-41.
- [3] Peter Blennow, Johan Hjelm, Trine Klemensø, et al. Manufacturing and characterization of metal supported SOFCs [J]. Journal of Power Sources,2011,196:7117-7125.
- [4] Michael C Tucker, Grace Y Lau, Craig P Jacobson, et al. Performance of metal-supported SOFCs with infiltrated electrodes [J]. Journal of Power Sources,2007,171:477-482.
- [5] Hui Shiqiang, Yang Dongfang, Wang Zhenwei, et al. Metal-supported solid oxide fuel cell operated at 400-600 °C[J]. Journal of Power Sources,2007,167:336-339.
- [6] Marco Brandner, Martin Bram, Jan Froitzheim, et al. Electrically conductive diffusion barrier layers for metal-supported SOFC [J]. Solid State Ionics,2008,179:1501-1504.
- [7] Hwang Changsing, Tsai ChunHuang, Lo ChihHung, et al. Plasma sprayed metal supported YSZ/Ni-LSGM-LSCF IT-SOFC with nanostructured anode [J]. Journal of Power Sources,2008,180:132-142.
- [8] Keith R Williams, Little Sutton, Wirral. Fuel Cell with Solid State Electrolytes [P]. US3,464,861.1969.
- [9] Günter Schiller, Rudolf H Henne, Michael Lang, et al. Development of vacuum Plasma sprayed thin film SOFC for reduced operating temperature [J]. Fuel Cell Bulletin,2000,21:7-12.
- [10] Detlev Stöver, Dag Hathiramani, Robert Vaßen, et al. Plasma sprayed components for SOFC applications [J]. Surf Coat Technol,2006,201:2002-2005.
- [11] Changbo Lee, Joongmyeon Bae. Fabrication and characterization of metal-supported solid oxide fuel cells [J]. J Power Sources,2008,176:62-69.
- [12] Montero X, Tieta F, Stover D, et al. Evaluation of commercial alloys as cathode current collector for metal-supported tubular solid oxide fuel cells [J]. Corrosion Science,2009,51:110-118.
- [13] Leah R T, BrTandon N P, Aguiar P. Modelling of cells, stacks and sustems based around metal-supported planar IT-SOFC cells with CGO eletrolytes operating at 500-600 °C[J]. Journal of Power Sources,2004,131:86-90.
- [14] Leah R, Selcuk A, Corcoran D. Development of highly robust, volume manufacturable metal-supported sofcs for operation below 600 °C [J]. ESC Transactions,2011,35(1):351-367.
- [15] Bance P, Brandon N P, Girvan B. Spinning-out a fuel cell company from UK University—2 years of progress at Ceres Power [J]. Journal of Power Sources,2004,131:86-90.
- [16] Trine Klemensø, Jimmi Nielsen, Peter Blennow, et al. High performance metal-supported solid oxide fuel cells with Gd-doped ceria barrier layers [J]. Journal of Power Sources,2011,196:9459-9466.
- [17] Soysal D, Ansar A, Ilhan Z, et al. Nanostructured composite cathodes by suspension plasma spraying for SOFC applications [J]. ESC Transactions,2011,35(1):2233-2241.
- [18] Ansar A, Szabo P, Arnold J, et al. Metal supported solid oxide fuel cells and stacks for auxiliary power units-progress, challenges and lessons learned [J]. ESC transactions,2011,35(1):147-155.
- [19] Rüttinger M, Mücke R, Thomas Franco, et al. Metal-supported cells with comparable performance to anode-supported cells in short-term stack environment [J]. ESC transactions,2011,35(1):259-268.
- [20] Liu Zhangbo, Liu Beibei, Ding Dong, et al. Development of three-layer intermediate temperature solid oxide fuel cells with direct stainless steel based anodes [J]. International Journal of Hydrogen Energy,2012,37:4401-4405.
- [21] Michael C Tucker, Grace Y Lau, Craig P Jacobson, et al. Stability and robustness of metal-supported SOFCs [J]. Journal of Power Sources,2008,175:447-451.
- [22] Michael C Tucker, Grace Y Lau, Craig P Jacobson. Performance of metal-supported SOFCs with infiltrated electrodes [J]. Journal of Power Sources,2007,171:477-482.
- [23] Rodriguez-Martinez, M Rivas, L Otaegi et al. Tubular Metal Supported Solid Oxide Fuel Cell Manufacturing and Characterization [J]. ESC Transactions,2011,35(1):445-450.
- [24] Huang Qiuan, Jörg Oberste-Berghaus, Yang Dongfang, et al. Polarization analysis for metal-supported SOFCs from different fabrication processes [J]. Journal of Power Sources,2008,177:339-347.
- [25] Kong Yonghong, Hua Bin, Pu Jian, et al. A cost-effective process for fabrication of metal-supported solid oxide fuel cells [J]. International Journal of Hydrogen Energy,2010,35(10):4592-4596.
- [26] Hyoup Je Cho, Gyeong Man Choi. Fabrication and characterization of Ni-supported solid oxide fuel cell [J]. Solid State Ionics,

- 2009, 180: 792–795.
- [27] Young Jin Kang, Gyeong Man Choi. Fabrication of NiFe-supported SOFC Using Gd-doped ceria electrolyte [C]// 9th European Fuel Cell Forum. Switzerland: Lucerne, 2010.
- [28] Hyoup Je Cho, Gyeong Man Choi. Electrochemical performance and thermal cycling ability of thin metal-supported SOFC [C]// Proc 9th Eur Solid Oxide Fuel Cell Forum. 2010.
- [29] Lide M Rodriguez-Martinez, Laida Otaegi, Elixabet Sarasketa, et al. Influence of interconnects in long term stability of tubular metal supported SOFCs [C]// Proc 9th Eur Solid Oxide Fuel Cell Forum. 2010.
- [30] Patric Szabo, Asif Ansar, Thomas Franco et al. Dynamic Electrochemical behaviour of metal-supported plasma-sprayed SOFC [C]// Proc 9th Eur Solid Oxide Fuel Cell Forum. 2010.

Development of metal-supported SOFC

Zhou Yongchuan, Song Shidong, Han Minfang

(Union Research Center of Fuel Cell, School of Chemical and Environmental Engineering,
China University of Mining & Technology, Beijing 100083, China)

[Abstract] Developing of intermediate temperature (IT) and low temperature (LT) solid oxide fuel cell (SOFC) allows metal to be used as an appropriate material for SOFC. In consistant to other types of SOFCs, metal-supported SOFC (MS-SOFC) exhibits higher electrical and thermal conductivity, better mechanical strength and lower cost, and thereby has attracted more and more attentions. Recently, MS-SOFC has developed various structures and fabrication process of supporter, electrolyte and as well as the electrodes. In this paper, the state of the art of MS-SOFC and their fabrication process are reviewed and the key concerns on MS-SOFC are also put forward.

[Key words] solid oxide fuel cell; metal-supported SOFC; thin-film electrolyte; thermal cycle; fast start-up