

1997-11-28

## Molten Carbonate Fuel Cell Materials and Technology

Naichao Li

Baolian Yi

---

### Recommended Citation

Naichao Li, Baolian Yi. Molten Carbonate Fuel Cell Materials and Technology[J]. *Journal of Electrochemistry*, 1997 , 3(4): Article 5.

DOI: 10.61558/2993-074X.2657

Available at: <https://jelectrochem.xmu.edu.cn/journal/vol3/iss4/5>

This Review is brought to you for free and open access by Journal of Electrochemistry. It has been accepted for inclusion in Journal of Electrochemistry by an authorized editor of Journal of Electrochemistry.

# 熔盐燃料电池材料与技术

李乃朝\* 衣宝廉

(中科院大连化学物理研究所 大连 116011)

**摘要** 综述了国外熔盐燃料电池材料与技术,探讨了熔盐燃料电池的发展前景

**关键词** 熔盐燃料电池, 材料, 技术

熔融碳酸盐燃料电池(MCFC)是一种高温电池,工作温度600~700℃,它主要由阳极、阴极、隔膜和导电双极板四部分组成。电解质是熔融碳酸盐,一般为 $(Li_{0.62}K_{0.38})_2CO_3$ (熔点490℃),氧化剂为氧气或空气与二氧化碳的混合气,燃料气为氢气、煤气或天然气。按电池气体进出共用管道类型划分,MCFC可分为外共用管道型和内共用管道型;按燃料气重整方式划分,MCFC可分为外重整式(ER)和内重整式(IR),其中内重整式又分为直接内重整(DIR)和间接内重整式(IRR)。国外MCFC技术发展很快,已进入MW级电厂试运行阶段。表1为1994年美国能量研究公司(ERC),熔融碳酸盐动力公司(MCP),日本日立公司(Hitachi),石川岛播重工业(IHD),三菱重工(MELCO);荷兰能量研究基金会(ECN);意大利Ansaldo公司试验运行的MCFC电池组性能,由表1可知当电池的工作电流密度在1.5~1.6 kA/m<sup>2</sup>时,电池功率密度在1.0~1.3 kW/m<sup>2</sup>之间。

表1 1994年国外试验运行的MCFC电池组性能<sup>[1]</sup>

Tab 1 Performance of MCFC stacks being operated abroad in 1994

	输出功率 kW	电池面积 m <sup>2</sup>	电池数目	电流密度 kA/m <sup>2</sup>	功率密度 kW/m <sup>2</sup>	气体压力 atm	工作时间 x0.001 hr
ERC (IRR)	2	0.37	5	1.60	1.13	1.0	10.0
(IRR)	70	0.37	234	1.20	0.93	1.0	2.0
(IRR)	120	0.60	246	1.25	1.00	1.0	1.8
MCP(ER)	20	0.93	20	1.60	1.09	1.0	2.5
Hitachi(ER)	100	1.20	88	1.50	1.07	7.0	1.7
MELCO (DIR)	30	0.50	62	1.50	1.06	1.0	13.4
(IRR)	100	0.50	192	1.50	1.14	1.0	2.3
IHI (ER)	3	1.40	2	1.75	1.21	1.0	2.1
(ER)	100	1.00	102	1.50	1.26	7.0	5.1
ECN (ER)	10	0.36	33	1.50	1.25	4.0	2.1
(DIR)	1	0.10	10	1.50	1.09	1.0	0.7
Ansaldo(ER)	2.5	0.10	25				

本文 1996-09-18 收到, 1997-01-07 收到修改稿

表2为目前国外普遍采用的MCFC材料及其特性,由表2可知MCFC隔膜的平均孔径小于 $1\mu$ ,远远低于阳极和阴极平均孔径,根据毛细管原理,只有这样,电解液才能优先浸满隔膜,从而有效防止了隔膜两侧气体互串

表2 MCFC材料及其特性

Tab. 2 Materials and characteristics of MCFC

部件	材料	厚度	平均孔径	孔隙率	制备方法
		mm	$\mu$	%	
阳极	Ni-Cr, Ni-Al	0.5~0.8	5.0	55~70	带铸
阴极	NiO	0.5	10.0	55	带铸
隔膜	LiAlO <sub>2</sub>	0.5~2.0	0.1	55~60	带铸
双极板	镀镍 310S 或 316L 不锈钢				

阴极平均孔径 $10\mu$ ,孔隙率55%,作为多孔气体扩散电极,阴极上存在着气、固、液三个传质通道。一个是由阴极大孔组成,用来输送反应气体的气体通道,一个是由阴极小孔组成,靠毛细力浸满了电解液,用来进行液相传质的液体通道。还有一个是由阴极骨架组成的电子传递通道。为减少阴极极化,阴极的孔隙率和平均孔径必须适当。孔隙率过高,平均孔径过低,阴极浸含电解液过多,导致阴极“淹死”;孔隙率过低,平均孔径过高,导致电极浸含电解液过少而“干死”。另外为减小阴极传质阻力,降低阴极极化,阴极厚度不可过高,一般为 $0.5\text{mm}$ 。

与阴极电化学还原反应相比,阳极电化学氧化速度较快,极化较小,因而阳极可以较厚( $0.5\sim 0.8\text{mm}$ ),平均孔径可以较小,孔隙率可以较大,电极浸含电解液也较多,这部分增加的电解液可用来补充电池隔膜中电解液的流失,而又不致于因为“被淹”而引起过高的阳极极化。

## 1 MCFC材料

### 1.2 阳极

MCFC阳极材料最早采用Ag和Pt,之后又以成本较低,且导电性和催化活性良好的Ni用作MCFC阳极。根据国外试验结果,以Ni作阳极,当工作电流密度为 $160\text{mA}/\text{cm}^2$ 时,阳极极化不超过 $30\text{mV}$ <sup>[2]</sup>。然而MCFC是在 $600\sim 700^\circ\text{C}$ 且维持一定的组装压力下工作,在这样的环境中,Ni阳极工作几天就会由于蠕变和烧结而变形,厚度变薄,变形量甚至能超过50%。这种变形容易在阳极和隔膜接触面上产生一定的应力,导致膜变形、断裂。为提高Ni阳极强度,增强阳极抵抗高温蠕变的能力,国外采取的方法有<sup>[3,4]</sup>

1) 向Ni阳极中加入高温下不易变形的氧化物微粒,如 $\text{Al}_2\text{O}_3$ 、 $\text{LiAlO}_2$

2) 在 $\text{Al}_2\text{O}_3$ 、 $\text{SrTiO}_3$ 和 $\text{LiAlO}_2$ 微粒表面上化学镀Ni,以这种材料作成阳极,由于“陶瓷核”的存在,阳极不易变形

3) 向Ni中加入第二种金属元素,如Cr、Al,利用氧化物的弥散强化作用,形成高温下不易变形的Ni-Cr、Ni-Al合金

目前第一种和第二种方法还处于试验阶段, 国外普遍采用的MCFC 阳极为Ni-Cr-NiAl 合金, 这种电极工作 7 000~ 10 000 h, 阳极变形极小。Ni-Cr-NiAl 合金阳极当前存在的问题是成本偏高, 据 ERC 估计这种阳极的成本占电池总成本的 30%。为降低阳极成本, 早日实现商业化, 必须进一步减少材料用量, 改进阳极制造方法, 并寻找更廉价的阳极材料。国外曾尝试在Ni 中掺杂MnO<sub>2</sub>、CeO<sub>2</sub> 和LiFeO<sub>2</sub>, 然而这些掺杂物质活性和稳定性较差; Cu-NiAl 合金催化活性和抗蠕变性能好, 但为防止Cu、Ni 之间的快速扩散渗透, 阳极一侧的镀Ni 保护层要改为镀Cu 层。一旦Cu 在MCFC 中采用, 电池成本将显著下降。

## 1.2 阴极

从 70 年代起, NiO 就被用作为MCFC 阴极, 它是将多孔Ni 于电池升温过程中, 高温氧化而成。NiO 作电池阴极所面临的最大问题是, 随电极长期工作运行, 阴极在熔盐电解质中将发生溶解, 产生的Ni<sup>2+</sup> 扩散进入到电池隔膜中, 被隔膜阳极一侧渗透过来的H<sub>2</sub> 还原成金属Ni 而沉积在隔膜中, 导致电池短路, 其阴极溶解短路机理如下所示:

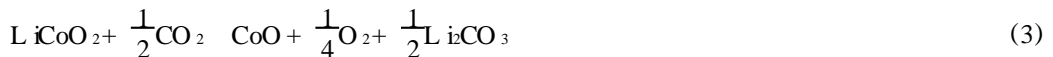


研究表明, 以NiO 作电池阴极, 电池每工作 1 000 h, 阴极的重量和厚度损失将达 3%, 当气体工作压力为  $1 \times 10^5$  Pa 时, 阴极寿命为 25 000 h, 当气体工作压力为  $7 \times 10^5$  Pa 时, 阴极寿命仅 3 500 h<sup>[5]</sup>。

为提高阴极抗熔盐电解质腐蚀能力, 国外普遍采取的方法有<sup>[6-10]</sup>:

- 1) 向电解质盐中加入碱土类金属盐, 如BaCO<sub>3</sub>、SrCO<sub>3</sub>, 以抑止NiO 的溶解
- 2) 向阴极中加入Co、Ag 或LaO 等稀土氧化物
- 3) 以LiFeO<sub>2</sub>、LMnO<sub>3</sub> 和LiCoO<sub>2</sub> 等作电池阴极材料
- 4) 以SnO<sub>2</sub>、Sb<sub>2</sub>O<sub>3</sub>、CeO<sub>2</sub>、CuO 和NiO 等材料作电池阴极
- 5) 改变熔盐电解质的组分配比, 以减缓NiO 溶解
- 6) 降低气体工作压力, 以降低阴极溶解速度

在以上几种方法中, 比较成功的方法是以LiCoO<sub>2</sub> 作电池阴极以代替NiO。以LiCoO<sub>2</sub> 作电池阴极, 其阴极溶解机理为:



比较反应式(1)和式(3)可知, 若以P<sub>O<sub>2</sub></sub>和P<sub>CO<sub>2</sub></sub>分别代表阴极O<sub>2</sub>和CO<sub>2</sub>气体分压, 则以NiO 作阴极, 其溶解速度和P<sub>O<sub>2</sub></sub>成正比; 而以LiCoO<sub>2</sub>作阴极, 阴极溶解速度和P<sub>CO<sub>2</sub></sub><sup>1/2</sup>、P<sub>O<sub>2</sub></sub><sup>-1/4</sup>成正比。显然后者的溶解速度低于前者。

据估计LiCoO<sub>2</sub> 阴极在气体工作压力为  $1 \times 10^5$  Pa 和  $7 \times 10^5$  Pa 时, 其寿命分别为 150 000 h 和 90 000 h, 显然MCFC 要进入工业化生产, 阴极最好采用LiCoO<sub>2</sub>。

NiO 阴极面临的另外一个问题是阴极极化较大, 对表 1 中各种MCFC 电池的电压损失进行分析, 结果见表 3。当电池工作电流密度为 165 mA/cm<sup>2</sup> 时, 阴极极化近 100 mV 左右, 远远高于阳极极化。显然要想提高电池功率密度, 必须要降低阴极极化, 其最有效的方法就是优化阴极结构, 使阴极中的双孔结构和电解液分布更趋合理, 传质阻力和阴极极化降低到最低程

度, 国外的研究单位正在进行这方面的工作

表 3 MCFC 单电池电压损失分析<sup>[1]</sup>

Tab 3 Voltage loss of single MCFC cells

	电压损失 (mV)	
	目前状况	将来状况
欧姆极化	50~ 55	25~ 40
阴极极化	80~ 120	55~ 60
阳极极化	10~ 60	10~ 50
Nernst 电压损失	65~ 145	65~ 145
总计	290~ 295	200~ 250

工作电流密度  $1.65 \text{ KA}/\text{m}^2$ , 气体工作压力  $1 \times 10^5 \text{ Pa}$ , 电池工作温度  $650$

### 1.3 隔膜

MCFC 由阴极、阳极和隔膜构成, 其中隔膜是电池的核心部件, 它必须强度高, 能耐高温熔盐腐蚀, 浸入熔盐电解质后阻气, 它的好坏直接影响着电池的成败。MCFC 隔膜材料最早采用  $\text{MgO}$ , 然而  $\text{MgO}$  在高温熔盐中发生溶解。研究结果表明  $\text{La}_2\text{O}_3$  具有很强的抗碳酸熔盐腐蚀能力, 因而目前国外普遍采用  $\text{La}_2\text{O}_3$  作电池隔膜材料。

$\text{La}_2\text{O}_3$  有  $\alpha$ 、 $\beta$  和  $\gamma$  三种晶形, 分别属于六方、单斜和四方晶系, 它们的密度分别为  $3.400$ ,  $2.610$  和  $2.615 \text{ g}/\text{cm}^3$ , 外形分别为球状、针状和片状。根据毛细管公式, 气体进入半径为  $r$  的亲液毛细管的临界压力  $P_{\text{ex}}$  为:

$$P_{\text{ex}} = 2\sigma \cos \omega / r \quad (4)$$

$\alpha \omega$  即固液相之间的界面张力和接触角

已知电解质盐  $62 \text{ mol}\% \text{ Li}_2\text{CO}_3 + 38 \text{ mol}\% \text{ K}_2\text{CO}_3$  (熔点  $490$ ) 在  $\text{La}_2\text{O}_3$  上完全润湿, 且  $\omega = 0$ ,  $\sigma = 0.198 \text{ N}/\text{m}$ <sup>[11]</sup>。显然由等式(4)计算得,  $\text{La}_2\text{O}_3$  隔膜要耐一个大气压 ( $0.1 \text{ MPa}$ ) 的压差, 隔膜孔半径不得超过  $3.96 \mu$ 。由于在电池工作温度  $650$ ,  $\text{La}_2\text{O}_3$  粉体不发生烧结, 隔膜是由  $\text{La}_2\text{O}_3$  粉体堆积而成, 因此要保证隔膜孔径不超过  $3.96 \mu$ ,  $\text{La}_2\text{O}_3$  粉体的粒度应尽量小, 须严格控制在一定的范围以内。而且, 为实现粉体紧密堆积, 一般要求  $\text{La}_2\text{O}_3$  粉体中既要含有一部分直径小于  $1 \mu$  的细料, 也要有一部分直径大于  $1 \mu$  的粗料, 其重量比大致为  $75:25$ <sup>[12]</sup>。

当电池工作时, 由于隔膜在电池密封区域和工作区域所受的压力不同, 隔膜将产生机械应力; 当电池经由低温至高温, 再由高温至低温一个热循环, 因各部分所处温度不同, 隔膜将产生热应力; 另外在热循环过程中, 电解质形态将在液态和固态之间不断变化, 导致电解质体积随之变化, 从而对膜造成一定的附加压力, 若隔膜强度不够, 无法抵抗以上三种应力, 则膜将发生断裂, 导致电池串气。为提高膜强度, 国外采取的方法有:

- 1) 在隔膜中加一张康钛线网 (Kanthal A-1)。
- 2) 向隔膜中加入增强固体颗粒如  $\text{NiAl}_2\text{O}_3$ 、316L 不锈钢 (直径  $\sim 40 \mu$ )。
- 3) 向隔膜中加入增强纤维如  $\text{Al}_2\text{O}_3$ 、 $\text{ZrO}_2$ 、 $\text{SiC}$ 、 $\text{La}_2\text{O}_3$  和 304 不锈钢。

据认为纤维增强效果最佳, 目前普遍采用的增强纤维为:  $LiAlO_2, Al_2O_3$

现今国外大规模生产中采用的隔膜制备方法为带铸法<sup>[14]</sup>。其带铸  $LiAlO_2$  膜的宽度已经达到 1 m, 年产隔膜总量可用来组装几个兆瓦的电池<sup>[12]</sup>。

### 1.4 双极板

双极板兼作电池集流板与间隔板, 由于电池工作温度高, 熔盐电解质腐蚀性强, 双极板将会发生腐蚀, 其中阳极一侧腐蚀现象最为严重。可以被用来作双极板的材料有 Ni, Co, Fe 基 Cr 合金或 Al 合金<sup>[15, 16]</sup>。

高 Cr 含量 ( $Cr > 18\%$ ) 的 Fe-Cr 不锈钢造价低, 但抗腐蚀性不好; Ni 含量少于 50% 的高温 Ni 基合金如 (RA 333, Incoloy 800 或 8257) 在阴极一侧的抗腐蚀性稍好于不锈钢, 但在阳极一侧腐蚀比较严重。由于许多 Ni 基合金添加了不耐高温腐蚀的 Mo, W, Nb 和 Ti 等元素, 因而这些合金不适合作双极板。高 Ni 含量 Ni 基合金如 Inconel 600 (Ni 含量 75%) 阳极一侧耐腐蚀性好, 但阴极一侧较差。

目前国外普遍采用的双极板材料为 310S 和 316L Fe-Ni-Cr 奥氏体不锈钢。这两种材料阴极一侧抗腐蚀性好, 但阳极一侧抗腐蚀性较差, 为此需在阳极一侧加保护性镀层如镀 Ni 层, 采用的方法有化学镀、电镀和涂覆方法。化学镀层厚度均匀, 但因含磷量高而影响了抗腐蚀性。电镀层厚度不均, 致密性差。涂覆层因厚度均匀, 致密而被采用, 试验结果表明涂覆后双极板经 10 000 h 工作阳极一侧无腐蚀, 据估计涂层厚  $50 \mu$ , 双极板可以使用 40 000 h。

以 316L 不锈钢作电池双极板, 电池经 40 000 h 工作, 其阴极一侧的耐腐蚀性仍可以接受。电池开始工作时, 极板的欧姆电压降为 10 mV, 电池工作 40 000 h 后, 欧姆电压降也只有 100 mV。

### 1.5 电池密封面抗腐蚀材料

MCFC 密封面处于还原性和氧化

性双性气氛之中, 在这样的环境中, 铬基合金不耐腐蚀, 只有铝基合金才具有抗腐蚀性, 由于在不锈钢中加 Al 较困难, 成本高, 因而为增强抗腐蚀性, 一般是在密封面上加一层镀 Al 层<sup>[17]</sup>, 其方法有喷涂、热喷涂、真空沉积-热处理扩散和闭箱渗 Al。喷涂层与基体结合力不好, 而真空沉积和闭箱渗 Al 处理温度高, 易造成极板变形。采用闭箱渗 Al 方法, Al 可以扩散进入密封面板板内部, 形成很厚的扩散层, 使极板至少可以使用 20 000 h, 而且 20 000 h 后, 扩散层中 Al 含量仍较高 (30 mol%)。

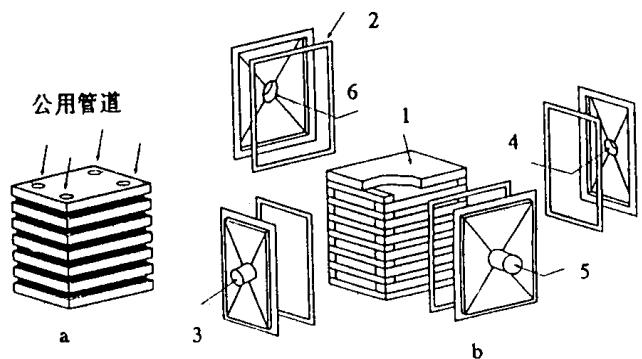


图 1 MCFC 气体进出共用管道

Fig 1 Manifolding concepts of MCFC

(a) 内共用管道型 MCFC

(b) 外共用管道型 MCFC

1 电池组 2 密封垫 3 燃料气进口 4 燃料气出口

5 氧化剂进口 6 氧化剂出口

## 2 熔盐燃料电池技术

### 2.1 MCFC 气体进出共用管道

MCFC 气体进出共用管道可以在电池外部也可以在电池内部, 如图 1 所示<sup>[18]</sup>, 早期 MCFC 普遍采用外共用管道, 外共用管道型 MCFC (EM-MCFC) 的优点是, 系统简单, 制作成本低, 气体分布均匀, 操作管理容易, 其缺点是反应气体易外漏, 电解质通过共用管道密封垫发生流失, 为克服 EM-MCFC 的缺点, 国外发展了内共用管道型 MCFC (M-MCFC). M-MCFC 的优点是结构紧凑, 气体不易外漏, 无共用管道密封垫电解质流失问题, 缺点是结构复杂, 成本高, 操作管理要求严格

### 2.2 电池内气体流动方式

MCFC 内部气体流动方式可以是并流、对流和错流式<sup>[19]</sup>. EM-MCFC 普遍采用错流式, M-MCFC 可以采用任何方式. 气体采用错流方式, 即氧化剂和燃料气流动方向互相垂直, 电池结构简单, 但电池内部温度和电流密度分布复杂, 不易控制. 气体采用并流方式, 即氧化剂和燃料气流动方向互相平行, 则沿气体流动方向将产生一个温度梯度; 气体采用对流方式, 即氧化剂和燃料气相对流动, 电池内部电流和温度分布最为均匀. 图 2 为国外 M-MCFC 采用的三种气体流动方式<sup>[5]</sup>. 图 a 中, 电池有四个共用管道, 且共用管道较粗, 支管较细, 气体流动在中间区域为并流式, 在共用管道周围为错流式, 这种方式被美国 MCP 所采用, 图 b 中电池有 8 个共用管道, 共用管道较细, 气体流动方式为错流, 这种方式被日本日立公司所采用. 图 c 中, 电池有 10 个共用管道, 且氧化剂管道粗, 燃料气管道细, 气体流动为并流, 这种方式被日本 IHI 和荷兰 ECN 所采用

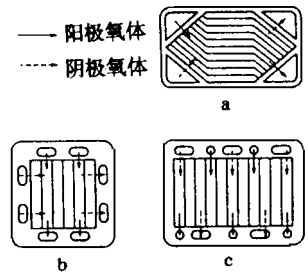


图 2 国外 M-MCFC 气体流动方式

a) 美国 MCP 型, b) 日本日立型, c) 日本 IHI 和荷兰 ECN 型

Fig 2 Types of gas flow configuration in M-MCFC

### 2.3 燃料气重整

由于 MCFC 阳极发生的是  $H_2$  的氧化反应, 因而若以天然气作 MCFC 燃料, 天然气必须重整制  $H_2$ . 重整型 MCFC 有三种, 即外重整型 (EF-MCFC) 和内重整型 (IR-MCFC)<sup>[20, 21]</sup>, 其中内重整型又分直接内重整 (DIR-MCFC) 和间接内重整型 (IIR-MCFC), 如图 3 所示. ER-MCFC 就是在 MCFC 电池外部有一个外重整反应器, 天然气在进入电池之前, 首先必须通过外重整反应器重整制氢. DIR-MCFC 就是将天然气重整催化剂直接放置在电池阳极气室, 这样电池高温工作时, 进入电池内的天然气被现场重整制成氢气. IIR-MCFC 就是在电池阳极一侧增加一个重整反应室, 天然气先进入这个重整反应室重整制氢, 然后制成的氢气再进入到阳极气室参加反应. ER-MCFC 不影响电池原有结构, 但这一额外增加的重整反应器使电池系统成本大为增加. DIR-MCFC 克服了 ER-MCFC 的缺点, 但高温下电解质蒸发, 易污染重整催化剂. IIR-MCFC 弥补了 DIR-MCFC 的不足, 但增加的重整反应室使电池结构变得复杂. 早期 MCFC 重整方式为外重整, 为降低电池系统成本, 与火力发电竞争, 早日实现商业化, DIR-MCFC 和 IIR-MCFC 已成为国外研究的重点.

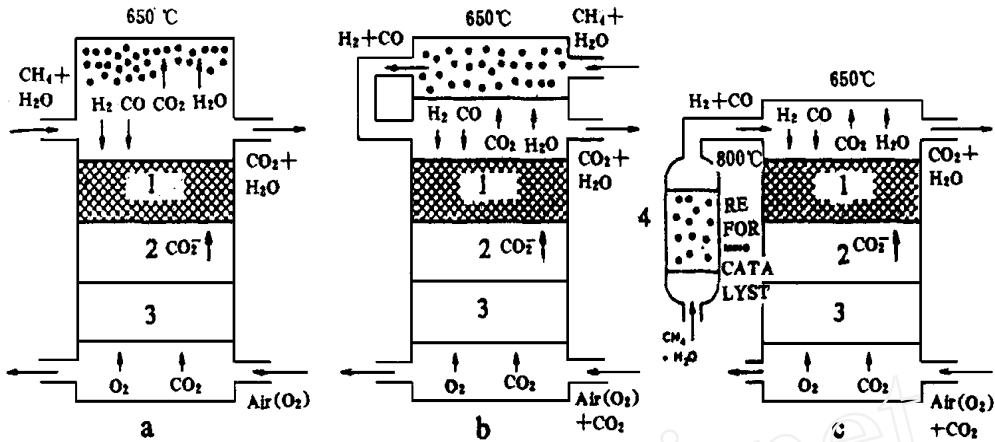


图 3 燃料气重整方式

1 阳极 2 隔膜 3 阴极 4 外重整反应器

(a) 直接内重整 (b) 间接内重整 (c) 外重整

Fig 3 Types of fuel gas reformation

### 2 4 电解液流失问题

随MFCF 运转工作时间加长, 熔盐电解质将按以下几种路径发生流失<sup>[22]</sup>:

- 1) 阴极溶解 阴极在电解质中溶解将导致熔盐电解质中一部分锂盐流失
- 2) 阳极腐蚀 Ni-Cr 阳极中的Cr 将在熔盐电解质中发生一定的腐蚀, 生成LiCrO<sub>2</sub>, 从而导致一部分Li 盐损失
- 3) 双极板腐蚀 双极板腐蚀将导致一部分熔盐电解质中的锂盐损失
- 4) 熔盐电解质蒸发损失 熔盐电解质中的钾盐蒸汽压低, 易蒸发掉发生流失, 导致电池运转过程中电解质逐渐减少。
- 5) 由于电池共用管道电解造成电池内部电解质迁移(爬盐), 导致电解质流失, 一般来讲, 对于外共用管道型MFCF, 盐流失比较严重; 而内共用管道型MFCF, 盐流失极少。

为防止盐流失, 国外在电池结构设计上, 都增加了补盐设计, 如在电极或极板上加工制成一部分沟槽, 用在沟槽中贮存电解质的方法进行补盐, 以使盐流失的影响降低到最低程度

### 3 结 论

国外MFCF 技术发展很快, 已进入工程化和商业化开发阶段, 估计下世纪初可望商品化 我国是燃煤大国, 每年火电用煤近亿吨, 由于火电能效低, 每年浪费了数千万吨煤的能量, 同时大量SO<sub>2</sub>、CO<sub>2</sub> 排空, 造成酸雨等危害农业, 若能于下世纪初逐步推广MFCF 技术, 节约的煤相当于少建十几座大型煤矿, 环境亦大为改善 因而我国应紧跟国外MFCF 技术发展趋势, 在开展MFCF 应用基础研究的同时, 大力开发MFCF 工程、材料技术, 尽早走入实用化阶段



# Molten Carbonate Fuel Cell Materials and Technology

Li Naichao Yi Baolian

(Dalian Insti of Chem. Physics, Academia Sinica, Dalian 116011)

**Abstract** Molten Carbonate Fuel Cell materials are reviewed, and the technology of Molten Carbonate Fuel Cell are discussed

**Key words** Molten Carbonate Fuel Cell, Materials, Technology

## References

- 1 Selman J R. MCFC electrode design and materials corrosion in high-current-density operation. *Technical Session 3*, 3-00, 2nd IFCC, Japan, 1996
- 2 Yun C Y, Johnsen R, Farooque M, Maru H. Status of carbonate fuel cell materials. *J. Power Sources*, 1995, 56(1): 1
- 3 Iacovangelo C D. Metal plated ceramics A novel electrode material. *J. Electrochem. Soc.*, 1986, 133(7): 1359
- 4 Chun H S, Park J H, Chung H C. NiAl anode for molten carbonate fuel cell. *Technical Session*, P3-02, 2nd IFCC, Japan 1996
- 5 Plomp L, Veldhuis J B J, Sitters E F et al. Improvement of molten-carbonate fuel cell lifetime. *J. Power Sources*, 1992, 39(3): 369
- 6 Tanimoto K, Miyazaki Y, Yanagida. Cell performance of molten carbonate fuel cell with alkali and alkaline-earth carbonate mixtures. *J. Power Sources*, 1992, 39(3): 285
- 7 Plomp L, Sitters E F, Vessies C. Polarization characteristics of novel molten carbonate fuel cell cathodes. *J. Electrochem. Soc.*, 1991, 138(2): 629
- 8 Giorgi L, Carewska K, Scaccia S. Investigation of LiCoO<sub>2</sub> materials for MCFC alternative cathodes. *Technical Session*, P3-03, 2nd IFCC, Japan 1996
- 9 Smith J L, Kucera G H, Brown A P. Development of cathode materials and structures for the molten carbonate fuel cell. *Proc. Electrochem. Soc.*, 1990, 90-16: 226
- 10 Donado R A, Ong E T, Sishla C I. High performance MCFC using LiNa electrolyte. *Proceedings of the Fuel Cells 95 Review Meeting*. Morgantown, WV, U. S. A. 1995: 7
- 11 Maru H C, Paetsch L, Pigeaud A. Review of molten carbonate fuel cell matrix technology. *Proc. of the Symposium on Molten Carbonate Fuel Cell Technology* (Selman J R ED). Electrochemical Society, Pennington, NJ, U. S. A. 1982

- 12 Iacovangelo C D, Pasco W D. Hot-rolled electrolyte structures for molten carbonate fuel cells. *J. Electrochem. Soc.*, 1988, 135(1): 221
- 13 Yun C Y, Huang C M, Johnsen R. Carbonate fuel cell matrix strengthening. *Proceedings of the Fuel Cells 95 Review Meeting*. Morgantown, WV, U. S. A. 1995: 5
- 14 Bohme O, Leidich F U, Salge H J, Wendt H. Development of materials and production technologies for molten carbonate fuel cells. *Int. J. Hydrogen Energy*, 1994, 19(4): 349
- 15 Nishina T, Arai M, Inomata H. Development on corrosion resistant alloys and conductivity measurements of corroded scale on molten carbonate fuel cell components. *Technical Session 3*, 3-19, 2nd IFCC, Japan 1996
- 16 Ota K, Kim B, Motohira N et al. High temperature corrosion of metals with molten carbonate. *Technical Session*, P3-07, 2nd IFCC, Japan 1996
- 17 Yamamoto M, Fujimoto N, Uemastu Y et al. Development of separator materials for MCFC. *Technical Session*, P3-06, 2nd IFCC, Japan 1996
- 18 Sato S. Development of internal manifold stack. *Proc. Electrochem. Soc.*, 1990, 90-16: 121
- 19 Selman J R. Research, Development, and Demonstration of Carbonate Fuel Cell Systems. *Fuel Cell Systems* (Blomen J M J, Mugerwa M N. ED.), Plenum Press, New York, 1993
- 20 Kishida K. The state of MCFC technology development. *Ber. Bunsenges. Phys. Chem.*, 1990, 94: 941
- 21 Murahashi T. Internal reforming—An overview. *Proc. Electrochem. Soc.*, 1990, 90-16: 100
- 22 Iacovangelo C D, Jerabek E C. Electrolyte loss and performance decay of molten carbonate fuel cells. *J. Electrochem. Soc.*, 1986, 133(2): 280