

文章编号: 1000-324X(2006)02-0284-07

固体氧化物燃料电池密封材料的研究现状与发展趋势

朱庆山, 彭 练, 黄文来, 谢朝晖

(中国科学院过程工程研究所多相反应实验室, 北京 100080)

摘 要: 密封是影响板式固体氧化物燃料电池 (SOFC) 产业化的主要障碍之一, 受到广泛的重视. 本文阐述了密封的功能及其对材料的要求, 论述了国内外密封材料的研究现状, 综述了密封玻璃的研究进展. 对 SOFC 密封存在的问题进行了探讨, 并展望了 SOFC 密封研究的发展趋势.

关 键 词: 固体氧化物燃料电池; 密封材料; 密封玻璃

中图分类号: TM 911 **文献标识码:** A

1 引言

固体氧化物燃料电池 (SOFC) 具有能量转换效率高、环境友好 (SO_x 、 NO_x 排放低、无噪音污染)、燃料适应性广 (可通过内部重整直接使用包括天然气、汽油、石油液化气等各种燃料) 等突出优点, 是公认的高效绿色能源转换技术, 在大型电站、分布式供电系统、军事等领域具有广阔的应用前景, 成为各国竞相研究的热点^[1~3]. SOFC 有管式、平板式等结构, 平板式 SOFC 具有电流采集流程短、功率密度高、制备工艺简单、制备成本低等优点, 一直是国内外 SOFC 研发的焦点. 虽然平板式 SOFC 已成功地解决了很多技术挑战, 但是密封问题至今尚未解决^[4~7], 成为制约平板式 SOFC 发展的主要技术难点, 也被认为是先进 SOFC 发展面临的最艰难的技术挑战^[8]. 因此, 平板式 SOFC 的密封问题近年来广受关注^[7~10].

本文系统地总结了板式 SOFC 密封研究的现状, 重点论述了密封玻璃及玻璃陶瓷的研究进展, 并展望了 SOFC 密封材料研究的发展趋势.

2 SOFC 密封材料研究现状

2.1 SOFC 密封简介

图 1 是 SOFC 密封的结构示意图. 密封材料主要的功能是: (1) 防止燃料 (如 H_2 , CH_4) 与氧化剂 (如空气) 在 SOFC 内混合, 保持良好的气密性; (2) 将“阳极 / 电解质 / 阴极 / 连接极”电池单元结合在一起构成电池堆; (3) 将连接极边缘绝缘地分开, 防止形成连接极电流短路^[7].

中温 SOFC 密封材料需在 $600\sim 800^\circ\text{C}$ 的氧化及还原气氛下长期工作, 且需承受电池堆启动 / 停止过程的热应力, 要求密封材料满足^[5,11]: (1) 与各被封接材料的热膨胀系数 (CTE)

收稿日期: 2005-02-17, 收到修改稿日期: 2005-04-28

基金项目: 国家自然科学基金 (20406023)

作者简介: 朱庆山 (1969-), 男, 博士, 研究员. E-mail: qszhu@home.ipe.ac.cn

尽可能匹配,以缓解热应力;(2)具有合适的粘度,以确保运行温度下密封结构的稳定,并同时保证具有合适的封接温度;(3)与被封接材料具有较好的浸润性和较强的结合力;(4)在 SOFC 运行气氛下(空气、湿燃料气)具有较好的化学稳定性;(5)与被封接材料具有良好的化学相容性,不发生化学反应。

国内外对板式 SOFC 密封材料及密封方法进行过很多研究,提出了硬密封、压密封和自适应密封等三种密封概念,并开发了相应的密封材料。

(1) **硬密封 (Rigid Sealing):** 硬密封是指密封材料与 SOFC 组件间进行硬连接、封接后密封材料不能产生塑性变形的密封方式,是国内外广泛采用的 SOFC 封接方法。

封接时,先将密封材料做成所需的形状(参见图 1),然后置于电极之间,将温度缓慢升至一定温度并保温特定的时间,即可完成封接。硬密封采用的材料主要有金属材料(如铜焊、银浆、合金等)^[12,13]、玻璃、玻璃陶瓷等。其中金属材料具有韧性好、封接强度高以及热循环性能好等优点,但也存在需做绝缘处理(本身导电)、易高温氧化等缺点,作为 SOFC 密封材料研究的较少。玻璃及玻璃陶瓷因具有易于大规模制备、封接

简单、成本低廉等优点,是研究最广泛的 SOFC 密封材料^[5,6,10,14~19],其研究现状将在后文中详述。

(2) **压密封 (Compressive Sealing):** 压密封采用“密封圈”的概念实现 SOFC 密封,只不过“密封圈”采用的是耐高温材料,如云母、银线等。通过压实填充于 SOFC 组件间的密封圈达到密封的目的。目前该种密封方法尚处于探索阶段,只有少数研究报告,也都存在不少问题,如云母在室温至 800°C 的热膨胀系数仅为 $6.9 \times 10^{-6} \text{K}^{-1}$ ^[20],远低于 SOFC 电极材料(一般 $>10.0 \times 10^{-6} \text{K}^{-1}$),温度升降产生的热应力通过层间断裂予以消除,与此同时未发生断裂的部分可提供密封^[21];再如金属密封圈易氧化、且导电,需做绝缘处理等。总之,云母及银线单独使用时密封效果都不够理想,需与其他材料配合才能达到较好的密封效果^[22]。

(3) **自适应密封 (Compliant Sealing):** 自适应密封是从硬密封延伸而来,即允许密封材料在使用温度下能产生一定的塑性变形,以消除因温度变化产生的热应力^[11]。对于采用硬密封封接的 SOFC 电池堆,研究发现,热应力造成的断裂是失效的主要原因^[10,23],这是因为密封材料与 SOFC 其他组件的热膨胀特性总是存在差异,热应力在所难免,但如果产生的热应力可因密封材料的塑性变形而耗散掉,则可大大提高 SOFC 电池堆运行的可靠性。理论分析表明,当材料的粘度低于 $10^{12} \text{Pa}\cdot\text{s}$ 时,即可通过塑性变形耗散热应力。Bloom 等人^[11]的研究发现,当密封材料的粘度在 $10^4 \sim 10^6 \text{Pa}\cdot\text{s}$ 时,能够耗散掉 CTE 相差 20% 所产生的热应力。自适应密封是最为先进的 SOFC 密封概念,但是自适应密封对密封材料提出

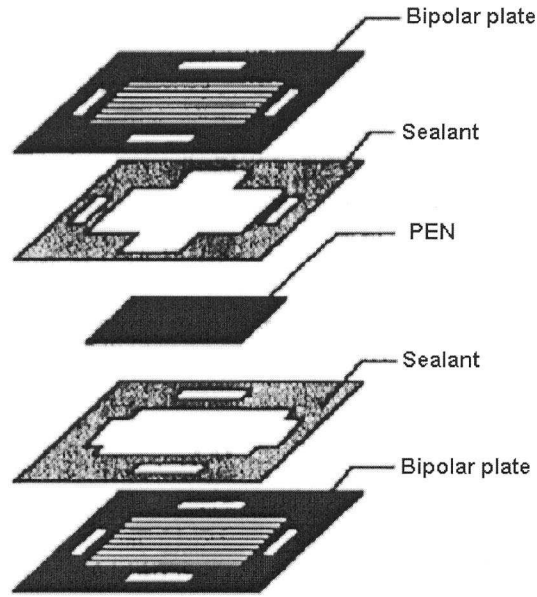


图 1 固体氧化物燃料电池密封示意图

Fig. 1 Schematic illustration for SOFC seals

了更高的要求,包括:(1)粘度:对密封材料粘度控制要求大大提高,因为如果粘度太低,密封材料有可能渗入电极材料的孔隙中,如果太高,又不能有效地消除热应力;(2)化学相容性:因为粘度低,密封材料与 SOFC 其他材料间的反应与扩散更加容易,如果它们之间的化学相容性不好,则密封材料与其他材料间的反应会更快,因此,自适应密封对密封材料与其他材料的化学相容性也提出了更高的要求.当前自适应密封主要采用玻璃及玻璃陶瓷材料^[10,11],通过玻璃的粘度来耗散热应力.但总的来说,相关研究还很不充分,尚处于探索阶段.

2.2 玻璃及玻璃陶瓷密封材料研究现状

玻璃及玻璃陶瓷(以下简称密封玻璃)是板式 SOFC 普遍采用的密封材料,受到广泛的重视,已经开发了多种密封玻璃.这方面的研究主要集中在密封玻璃的化学稳定性、热膨胀系数的匹配性及热稳定性等方面,并在这几方面取得了显著进展.

(1) **化学稳定性:** 氧化硼系、五氧化二磷系及氧化硅系玻璃都被尝试用作 SOFC 密封玻璃,人们发现网络形成体对燃料电池气氛下玻璃的化学稳定性影响很大,五氧化二磷系玻璃容易挥发、易与阳极材料反应生成磷酸镍和磷酸锆、也易结晶生成偏磷酸盐,而偏磷酸盐在湿的燃料气氛下稳定性比较差^[5,24],虽然加入少量的氧化硅能够提高磷酸盐玻璃的化学稳定性,但其化学稳定性比氧化硅系玻璃要差三个数量级以上,不适合作 SOFC 密封材料^[25].氧化硼系玻璃也容易与 SOFC 其他材料反应^[26,27],虽然氧化硼玻璃在干空气中的化学稳定性尚可,但是在湿 H₂ 气氛下^[26,27],氧化硼会与气相反应生成 B₂(OH)₂、B(OH)₂ 等挥发性产物,造成密封玻璃的损失.研究表明单独以氧化硼为玻璃形成体时,密封玻璃在湿 H₂ 气氛中的失重率甚至能达到 20%^[24].硅系玻璃的化学稳定性普遍好于磷酸盐及硼酸盐玻璃,当前密封玻璃的研发主要都集中在氧化硅系玻璃上,即使是氧化硅系玻璃,其化学稳定性也受玻璃组成影响很大,如研究发现玻璃中碱金属离子很容易通过扩散而进入 SOFC 其他材料中^[11,27],影响玻璃的化学稳定性及 SOFC 的稳定运行.因此,从化学稳定性的角度考虑,密封玻璃中 Li₂O、Na₂O、K₂O、B₂O₃、P₂O₅ 等的含量应尽可能地低.

(2) **热膨胀系数的匹配性:** 因为材料间的 CTE 差异是热应力产生的根源,所以人们非常重视密封玻璃热膨胀系数设计,希望开发玻璃的 CTE 尽可能地与被封接材料匹配.为了与 SOFC 材料配合好,密封玻璃的 CTE 一般要求 $> 10^{-5} \text{K}^{-1}$.玻璃的 CTE 与其组成满足加和关系^[28],单独设计 CTE 相对较容易,但若同时考虑 SOFC 对密封玻璃高软化点、高化学稳定性的要求时,高热膨胀系数就不易满足^[25].磷酸盐玻璃的热膨胀系数较高,但化学稳定性较差.硅酸盐玻璃在碱金属氧化物含量较高时,CTE 也很容易满足要求^[29],但这类玻璃的软化点一般较低,化学稳定性也较差.为了在不含碱金属氧化物时能够获得高 CTE、高软化点的密封玻璃,添加 BaO 成为人们的首选,因为 BaO 在碱土金属氧化物中对玻璃热膨胀系数提高的贡献最大,因此很多氧化硅系密封玻璃都是基于 SiO₂-B₂O₃-Al₂O₃-BaO 体系^[5,9,16,30~32],这些玻璃的 CTE 多数在 $8.5 \sim 12.8 \times 10^{-6} \text{K}^{-1}$ 间,能够与不同的 SOFC 材料(氧化锆、氧化铈、金属连接极材料等)实现很好的匹配.另外,通过热处理控制晶相生成也可调节密封玻璃的 CTE^[5,14,31].

(3) **热稳定性:** 由于认识上的局限,密封玻璃的热稳定性一直未受到足够的重视,国内外以往发表的文章^[10,13,16,23~25]及申请的专利^[5,11,15,17~19]基本都未涉及密封玻璃的热稳定性问题,最近人们才开始关注密封玻璃的高温热稳定性问题.玻璃是热力学非稳相,在高

温下 (600~800°) 有从非稳相向稳定的晶相转变的趋势, 研究表明“现有的密封玻璃在高温下的最初几小时内就开始析晶, 使 CTE 发生显著的变化”^[4], 导致密封玻璃与被封接材料产生显著的 CTE 失配. Sohn^[33] 等人最先研究密封玻璃 CTE 随热处理时间的变化, 在 800° 下, 对其开发的 SiO₂-B₂O₃-BaO-Al₂O₃ 系密封玻璃进行热处理 100h 后, 其热稳定性最好玻璃的 CTE 便从起始的 11.2×10⁻⁶K⁻¹ 降至 10.8×10⁻⁶K⁻¹, 热处理 500h 后, CTE 进一步降低到 9.9×10⁻⁶K⁻¹, 变化超过 10%; 而对热稳定性差的密封玻璃, 其 CTE 的变化幅度甚至超过 35% (见图 2). 造成 CTE 变化的原因是热处理使玻璃中析出了 Celsian 和 Hexacelsian 两种钡长石晶相, 它们的热膨胀系数分别为 2×10⁻⁶K⁻¹ 和 8×10⁻⁶K⁻¹, 并且随着热处理时间的延长, 亚稳的 Hexacelsian 相会最终转变成稳定的 Celsian 相, 使玻璃的 CTE 数随着时间的延长持续降低. 作者所在的课题组从 2002 年开始对密封玻璃进行研究, 尤其关注密封玻璃的高温热稳定性.

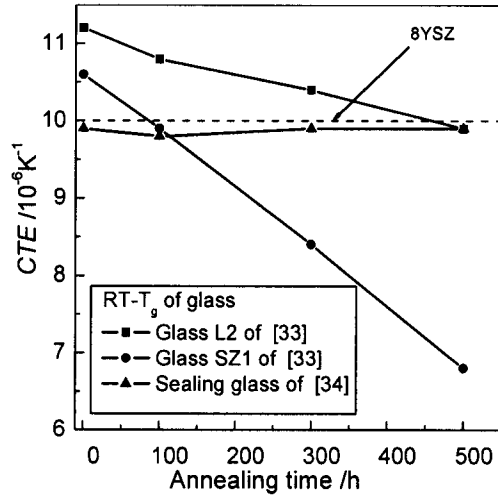


图 2 密封玻璃 CTE 随热处理时间的变化

Fig. 2 Variation of CTE of sealing glasses with annealing time

通过大规模热力学模拟及实验研究, 系统地分析了 SiO₂-B₂O₃-BaO-La₂O₃-ZrO₂-Y₂O₃ 系玻璃的高温热稳定性, 发现只要玻璃中不含 Al₂O₃, 就可避免形成低 CTE 的钡长石相, 提高玻璃的高温热稳定性. 据此开发的密封玻璃对 8YSZ (8mol% 氧化钇稳定的氧化锆) 具有很好的 CTE 匹配性及粘接性能, 并具有非常好的热稳定性^[34]. 如图 2 所示, 在 700°C 热处理 500h 后, 新开发密封玻璃的 CTE 几乎未变, 仍为 9.9×10⁻⁶K⁻¹, 而在 800°C 热处理 300h 后, 其 CTE 的变化不到 1% (图 2 中未显示), 远远好于 Sohn 等人的研究结果, 是迄今公开文献中高温热稳定性最好的密封玻璃, 目前正在研究该密封玻璃更长时间的热稳定性, 并对密封玻璃的其他相关性质进行表征.

3 SOFC 密封材料存在的问题

密封是板式 SOFC 面临的主要难点之一. 为促进密封问题的解决, 美国能源部于 2003 年 11 月 7 日在其官方网站上向全美征集 SOFC 密封材料研究项目, 在该项目征集说明中, 美国能源部阐述“工业界认识到密封是 SOFC 商业化最主要的技术障碍”^[6]. 同时密封也被认为是“先进 SOFC 发展面临的最艰难的技术挑战之一”^[8], 可见密封材料在板式 SOFC 发展中的重要地位. 当前密封的主要问题是“封接”的长期稳定性差, 只适合短期及次数很少热循环 (启动 / 停止) 运行, 无法满足长期 (如 40000h)、多次热循环 (如 3000 次) 稳定运行的要求^[6]. 造成现有“封接”长期稳定性差的最主要原因有二: 一是密封玻璃的热稳定性差 (目前已建的电池堆几乎都采用玻璃及玻璃陶瓷作为密封材料), 正如前文所述, 现有的密封玻璃在高温下的最初几小时内就开始析晶, 随着时间的延长, CTE 可能发生显著的变化, 最终会因热应力过大使密封失效. 二是密封材料与 SOFC 其他材料间的高温化学相容

性差,会发生各种高温化学反应.这些化学反应一方面会影响密封界面结构的稳定性,正如 Yang 等人^[9]的研究所示,密封玻璃与金属连接极在高温下很短时间内(850°C 1h、750°C 4h),就会使密封界面结构发生显著的变化,或发生界面分离、或沿界面产生很多孔洞,有的孔洞尺寸甚至达到几百微米(见文献[9]的图5),从而显著地降低了密封材料与其他材料间的结合强度,导致“封接”易于断裂.另一方面,高温反应也可能显著地改变界面处材料的相结构.作者曾经对文献[5,11]中两种典型的密封玻璃与立方相 8YSZ 的高温化学相容性进行了初步研究,即将密封玻璃粉与立方相 8YSZ 混合、压片后于空气中 1000°C 下热处理 100h,通过 XRD 分析热处理后的相组成,发现热处理后密封玻璃与 8YSZ 发生了反应,使部分氧化锆从立方相转变为单斜相,相变造成的体积变化会导致微裂纹的产生.另外这种材料结构变化,不仅会影响界面的力学性能,还可能影响界面处材料的电化学性能,对 SOFC 的长期稳定运行非常有害.

因此,要实现 SOFC 密封的长期稳定,不仅要提高密封材料的热稳定性,还必须解决密封材料与其他材料间的高温反应问题.

4 SOFC 密封材料的发展趋势

板式 SOFC 经过最近十几年的发展,已经解决了许多技术难题,处在产业化应用的前夜.过去成本一直被认为是 SOFC 产业化的最主要的障碍,为此,美国能源部与产业界共同发起成立了固态能量转换联盟(SECA),共同投入 5 亿美元,解决 SOFC 的成本问题,目标是在 2010 年左右使 SOFC 的建造成本降至 400 美元/kW.然而随着研究的深入,工业界发现密封也是 SOFC 产业化的主要障碍之一.由于密封材料需要承受高温(600~800°C)、氧化及还原气氛以及与不同材料间化学相容等苛刻要求,板式 SOFC 的密封尚面临许多挑战.最近美国能源部的西北太平洋国家实验室与美国 NASA 的格伦研究中心已组成联合攻关组,以期解决 SOFC 所面临的密封难题^[8].从 SOFC 密封材料的发展历史及研究现状来看,必须在以下几方面取得突破,才有可能满足 SOFC 长期稳定运行对密封材料的要求.

(1) **探索新型结构**:一方面将探索 SOFC 电池堆结构新型设计,以减少需要密封的面积,另一方面人们将探索密封的新型结构,如通过梯度、复合等结构设计来缓解热应力、进一步发展自适应密封等^[35].

(2) **开发新材料**:当前用于密封的玻璃、玻璃陶瓷、金属、层状云母等都存在各自的不足,因此研究界将会不断探索可用于 SOFC 密封的新材料体系,比如尝试将更多的材料用于 SOFC 密封,寻找性能更好的层状无机化合物,将玻璃、玻璃陶瓷、金属、金属氧化物进行复合形成复合密封材料等^[6,36,37].

(3) **关注化学相容性及高温热稳定性**:由于已经认识到热稳定性差及高温反应对 SOFC 长期稳定的危害,密封材料的高温热稳定性及其与其他材料的化学相容性将会受到普遍关注.对于金属材料需要研究湿氢气气氛下的氧化机理,找到抑制办法^[4],而对于玻璃及玻璃陶瓷则需要设计及寻找高温热稳定性好、与其他材料高温化学相容性好的组成^[6].

(4) **密封玻璃的定量设计**:玻璃及玻璃陶瓷廉价易得,仍将是 SOFC 密封的主要材料.由于密封玻璃需满足化学相容性、热膨胀系数、粘度、热稳定性等多个目标,因而密封玻璃组成一般较为复杂,加之玻璃组成对上述性质的影响往往呈现相反的趋势,采用以往基于经验的设计方法不但进程缓慢,也很难兼顾上述个目标,必须发展密封玻璃的定量设计方

法^[38], 才有可能获得最佳组成.

5 结束语

SOFC 是公认的高效绿色能源转换技术, 具有广阔的应用前景, 密封是先进 SOFC 产业化的主要难点之一. 本文综述了密封材料的研究现状和存在的问题, 阐述了 SOFC 密封材料研究的发展方向, 认为在新结构、新材料、化学相容性、高温热稳定性以及密封玻璃定量设计等方面的突破是解决当前密封长期稳定性差的关键.

参考文献

- [1] Yamamoto O. *Electrochimica Acta*, 2000, **45**: 2423-2435.
- [2] Murray E P, Tsai T, Barnett A. *Nature*, 1999, **400**: 649-651.
- [3] Singhal S C. *Solid State Ionics*, 2002, **152-153**: 405-410.
- [4] Weil K S, Coyle C A, Hardy J S, et al. *Fuel Cell Bulletin*, 2004, **5**: 11-16.
- [5] Meinhardt K D, Vienna J D, Armstrong T R, et al. Glass-ceramic Material and Method of Making. US Patent No. 6430966, August 13, 2002.
- [6] Solid Oxide Fuel Cells (SOFC) Sealing Systems, <http://doe-iips.pr.doe.gov/iips/faopor.nsf/0/ead671b7ed5e35d585256dd200249017?OpenDocument>.
- [7] Stevenson J W. SOFC Seals: Materials Status, SECA Core Technology Program-SOFC Seal Meeting. Sandia National Laboratory, Albuquerque, NM, USA, July 8-9, 2003.
- [8] Singh P, Misra A. *Fuel Cells Bulletin*, 2004, **2004 (2)**: 6.
- [9] Yang Z, Stevenson J W, Meinhardt K D. *Solid State Ionics*, 2003, **160**: 213-225.
- [10] Zheng R, Wang S R, Nie H W, et al. *Journal of Power Sources*, 2004, **128**: 165-172.
- [11] Bloom I D, Ley K L. Compliant Sealants for Solid Oxide Fuel Cells and Other Ceramics. US Patent No. 5453331, Sept. 26, 1995.
- [12] Duquette J, Petric A. *Journal of Power Sources*, 2004, **137**: 71-75.
- [13] Wilkenhoener R, Buchkremer H P, Stoeber D, et al. *Journal of Materials Science*, 2001, **36**: 1775-1782.
- [14] Xue L A, Piascik J, Yamanis J. Composite Sealant Materials Based on Reacting Fillers for Solid Oxide Fuel Cells. US Patent No. 6541146, April 1, 2003.
- [15] Kohli J T, Morena R. Sealing Frits. US Patent No. 6291092, Sept. 18, 2001.
- [16] Sohn S, Choi S, Kim G, et al. *Journal of Non-crystalline Solids*, 2002, **297**: 103-112.
- [17] 吕 喆, 苏文辉, 刘 江, 等. 固体氧化物燃料电池的高温封接材料和封接技术. 中国发明专利, 99104482.7, 1999.4.23.
- [18] 韩敏芳, 彭苏萍. 一种固体氧化物燃料电池用高温封接材料和封接方法. 中国发明专利, 02147179.7, 2002.10.25.
- [19] 董永来, 程谟杰, 周 利. 一种固体氧化物燃料电池的密封材料及制备. 中国发明专利, 02124834.6, 2002.6.20.
- [20] Chou Y, Stevenson J W. *Journal of Power Sources*, 2002, **112**: 376-383.
- [21] Chou Y, Stevenson J W, Chick L A. *Journal of the American Ceramic Society*, 2003, **86**: 1003-1007.
- [22] Chou Y, Stevenson J W. *Journal of Materials Research*, 2003, **18**: 2243-2250.
- [23] Taniguchi S, Kadowaki M, Yasuo T, et al. *Journal of Power Sources*, 2000, **90**: 163-169.
- [24] Larsen P H, Bagger C, Mogensen M, et al. In: Dokiya M, Yamamoto O, Tagawa H, Singhal S C Eds. Proceedings of 4th International Symposium on Solid Oxide Fuel Cells. The Electrochemical Society, Pennington, NJ, 1995, **V95-1**: 69-78.
- [25] Larsen P H, Poulsen F W, Berg R W. *Journal of Non-Crystalline Solids*, 1999, **244**: 16-24.
- [26] Cunther C, Hofer G, Kleinlein W. In: Stimming U, Singhal S, Tagawa H, Lehnert W Eds. Proceeding of 5th International Symposium on Solid Oxide Fuel Cells. The Electrochemical Society, Pennington, NJ, 1997, **V97-18**: 746-756.
- [27] Ley K, Krumpelt M, Kumar R, et al. *Journal of Materials Research*, 1996, **11**: 1489-1493.

- [28] Cable M. Classical Glass Technology. In: Cahn R W, Haasen P, Kramer E J eds. *Materials Science and Technology*, Vol. 9: Glasses and Amorphous Materials. VCH, Weinheim, Germany, 1991. 30–31.
- [29] Donald I W. *Journal of Materials Sciences*, 1993, **28**: 2841–2886.
- [30] Eichler K, Solow G, Otschik P, *et al.* *Journal of the European Ceramic Society*, 1999, **19**: 1101–1104.
- [31] Budd M. Method of Forming a Glass Ceramic Material. US Patent 6475938, Nov. 5, 2002.
- [32] 郑 锐, 聂怀文, 王大千, 等 (ZENG Rui, *et al.*). 无机材料学报 (*Journal of Inorganic Materials*), 2004, **19** (1): 37–42.
- [33] Sohn S, Choi S, Kim G, *et al.* *Journal of the American Ceramic Society*, 2004, **87**: 254–260.
- [34] 朱庆山, 彭练, 黄文来, 谢朝晖, 一种密封玻璃及其用于固体氧化物燃料电池密封的方法, 中国发明专利, 200510011284.5, 2005.1.28.
- [35] Stevenson J. SOFC Seals: Requirements, Issues, Advanced Concepts, SECA Core Technology Program- SOFC Seal Meeting July 8, 2003.
- [36] Bram M, Reckers S, Drinovac P, *et al.* *Journal of Power Sources*, 2004, **138**: 111–119.
- [37] Chou Y, Stevenson J W. *Journal of Power Sources*, 2005, **140**: 340–345.
- [38] 张会刚, 朱庆山. 计算机与应用化学, 2003, **20**: 335–339.

Present Status and Development Trends of Sealing Materials for Solid Oxide Fuel Cells

ZHU Qing-Shan, PENG Lian, HUANG Wen-Lai, XIE Zhao-Hui

(Multiphase Reaction Lab, Institute of Process Engineering, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100080, China)

Abstract: Sealing was identified as one of main technical barriers in the commercialization of advanced planar solid oxide fuel cells(SOFCs). Much attention has therefore been paid to SOFC sealing. In the present paper, current status of SOFC sealing, including the functions of sealing, sealing strategy, types of sealing, sealing materials (metal alloys, braze, mica, glass, glass ceramics, etc.), was reviewed. Future trends about SOFC sealing were discussed.

Key words solid oxide fuel cells; sealing materials; glass and glass ceramic seals