

直接碳燃料电池技术研究进展分析

李 晨, 史翊翔, 蔡宁生

(清华大学热科学与动力工程教育部重点实验室, 北京 100084)

摘 要: 直接碳燃料电池(Direct Carbon Fuel Cell, DCFC)能够直接将固体碳燃料中的化学能高效、清洁地转化为电能,对煤炭的合理利用、污染物控制以及 CO₂ 减排具有重要意义。目前已开发出以熔融碳酸盐、熔融氢氧化物和固体氧化物作为电解质的多种 DCFC,但与其它燃料电池技术相比,研究尚处于起步阶段。本文综述了 DCFC 技术的发展历程及研发现状,对现有 DCFC 加以分类,分析比较了其各自工作机理、性能特点以及在 CO₂ 减排方面的特性。在总结各类 DCFC 所面临的技术难题基础上,展望了直接碳燃料电池技术今后可能的发展方向。

关键词: 直接碳燃料电池; 熔融碳酸盐; 熔融氢氧化物; 固体氧化物

中图分类号: TM911.4

文献标识码: A

引 言

燃料电池是将燃料与氧化剂中的化学能直接转化为电能的装置,近年来成为国内外研究热点之一。随着研究的深入,燃料电池的种类也日趋广泛,发展出碱性燃料电池(AFC)、磷酸燃料电池(PAFC)、熔融碳酸盐燃料电池(MCFC)、质子交换膜燃料电池(PEMFC)、固体氧化物燃料电池(SOFC)、直接甲醇燃料电池(DMFC)等多种类型。与这些使用气

体或液体燃料的燃料电池相比,直接碳燃料电池(Direct Carbon Fuel Cell, DCFC)以固体碳作为燃料,而固体碳燃料有望通过对储量丰富的煤炭进行简单加工处理而得到。

早在 19 世纪末,人们就尝试通过直接氧化煤来发电^[1],但在电极材料、电解质污染等方面遇到了难题,并且由于当时火力发电效率的提高而终止了研究。近年来对使用煤作为燃料的燃料电池研究开始复苏并活跃起来,这主要是因为:(1)从世界范围来看,煤炭储量丰富,价格便宜,采储比是石油的 5 倍^[2],是当今世界主要的能源支柱之一;(2)使用燃料电池将煤直接转化为电能要比常见的燃烧方式更高效清洁。我国是燃煤大国,煤炭是我国的主要能源,研究意义更为显著;(3)电极、电解质材料取得一定进展。

DCFC 具有其自身的优点:可以直接、高效地实现 C 到 CO₂ 的转换,有利于 CO₂ 的富集与减排;固体燃料不易发生泄漏、爆炸,降低了对电池密封,特别是高温密封的要求;同时热值高、体积小,运输与储藏方便。尽管直接碳燃料电池优点显著,但与其它燃料电池发展相比,仍处于起步阶段,距商业化应用还有很大差距。

1 DCFC 的分类

目前已有的 DCFC 在电池材料、结构和燃料供给等方面差异较大,甚至工作原理也完全不同。电解质是电池的核心部件,不同电解质材料能够传导的导电离子可能不同,下面根据电解质材料的不同对 DCFC 进行分类比较。

1.1 熔融碳酸盐电解质 DCFC

1975 年,Weaver 首次以熔融碳酸盐为电解质材料,研制了工作温度 750 °C 的直接碳燃料电池^[3]。20 世纪 90 年代,熔融碳酸盐 DCFC 研究增多,具有代表性的是 Hemmes 和 Cooper^[3]与碳酸盐性质相似的硼酸盐和硅酸盐也曾用作电解质材料,但其熔点温度太高,性能不如碳酸盐材料。到目前为止,熔融碳酸盐型 DCFC 的研究最为广泛,下面以熔融 Na₂CO₃ 电解质为例简要介绍其工作原理(见图 1)。

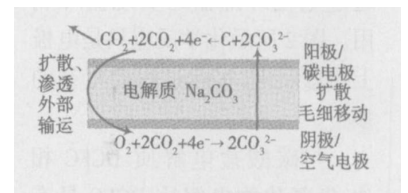


图 1 熔融碳酸盐电解质 DCFC

收稿日期: 2006-04-18; 修订日期: 2006-07-17

作者简介: 李 晨(1983-),男,山西长治人,清华大学博士研究生。

当电池外接负载时, CO₂ 与 O₂ 在阴极得到电子形成 CO₃²⁻, CO₃²⁻ 在电解质内部通过扩散和毛细作用传导至阳极, 并且与碳发生反应放出电子。反应中 CO₂ 主要通过电池外部输运实现部分循环利用。总反应方程为:



碳酸盐电解质的优点是材料成本低, 性能上 CO₂ 与 CO₃²⁻ 的相互转化相对容易, 且不会被产物 CO₂ 污染, 但是熔点较高, 腐蚀性增强, 对电池材料提出更高要求。

1.2 熔融氢氧化物电解质 DCFC

1896 年, Jacques 等人使用熔融氢氧化物电解质, 研制了世界上第一个直接碳燃料电池^[4]。现以熔融 NaOH 电解质为例简要介绍其工作原理, 如图 2 所示。

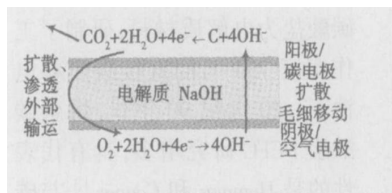


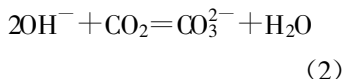
图 2 熔融氢氧化物电解质 DCFC

当电池外接负载时, H₂O 与 O₂ 在阴极得到电子形成 OH⁻, OH⁻ 在电解质内部通过扩散和毛细作用传导至阳极, 并且与碳发生反应放出电子。反应中 H₂O 通过电池外部输运实现循环利用。图 2 所示化学反应只是电极上的总反应, 实际过程要复杂的多^[4]。

与碳酸盐电解质 DCFC 相比, 氢氧化物电解质 DCFC 具有其特有优势^[3-5]。(1) 熔融氢氧化物比熔融碳酸盐具有更高的电子/离子传导率, 450 °C 下熔融氢氧化物的导电率是 650 °C 下熔融碳酸盐的 1.5 倍; (2) 与碳发生

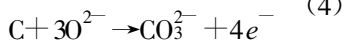
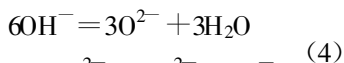
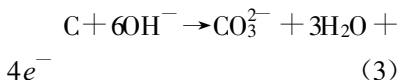
电化学反应时, 熔融氢氧化物的化学反应活性更高, 有利于增大阳极电流密度、降低过电位; (3) 氢氧化物熔点更低, 降低了电池运行温度和材料要求; (4) 阴极气体不需掺入 CO₂, 有利于 CO₂ 的减排。

但是氢氧化物易与 CO₂ 产物发生反应而导致电解质失效:



1995 年, 美国科学应用与研究协会 (Scientific Applications & Research Associates, SARA) 开始研究氢氧化物电解质 DCFC, 目前在避免或减少电解质材料失效的问题上取得了一定进展^[3-5]。

SARA 认为实际发生的 CO₃²⁻ 生成反应为式(3)和式(4), 电池运行时, 电解质由氢氧化物和碳酸盐混合物组成, 所占比例根据熔融电解质中水和 CO₂ 的分压决定。通过加大水的浓度, 可以促进反应反向进行, 降低 O²⁻ 浓度, 进而降低 CO₃²⁻ 浓度; 同时, 加大水的浓度还能够显著提高熔融态离子传导率, 降低腐蚀作用。该方法比较容易实现, 它建立在电解质内部化学平衡基础上, Henmes 曾使用线性几何方法对电解质中的物质平衡和电池优化进行了分析研究^[6]。此外, SARA 指出加入金属氧化物和焦磷酸盐也可以很好地抑制氢氧化物电解质失效^[4]:



1.3 固体氧化物电解质 DCFC

1988 年 Nakagawa 和 Ishida 提出了使用固体氧化物电解质的 DCFC^[7], 其基本工作原理如图 3 所示。

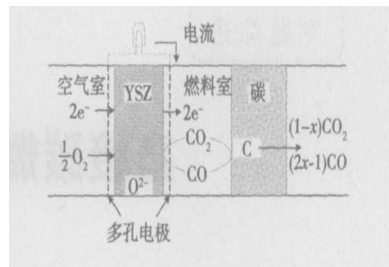
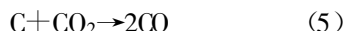


图 3 固体氧化物电解质 DCFC

电池使用氧化钇稳定的氧化锆 (YSZ) 作为电解质, 也被称为内部直接碳燃料电池 (Internal Direct Carbon Fuel Cell, In-DCFC)。根据化学平衡, 燃料 C 与 CO₂ 发生化学反应:



在理想情况下, 当电化学反应发生时, 1 mol C 与 CO₂ 发生反应生成 2 mol CO, 其中一半 CO 在固体氧化物电解质三相界面发生电化学反应生成 CO₂, 另一半 CO 提供给外电路, 可用于水气变换反应生成 H₂ 或燃烧, 这样形成了整个系统的循环工作, 在发电的同时产生燃料气体。整个反应过程中 C 没有直接与阳极接触传递电子, 也有人称其为电化学气化^[7]。总电化学反应为:



Stanford 大学 Gur 对固体氧化物电解质 DCFC 进行了试验研究^[8]。研究发现在温度较高时 (700 °C 以上), 试验测得氧分压与化学平衡理论计算值相同, 但是温度较低时 (700 °C 以下), 氧分压有明显的升高, Gur 认为该过程不能简单地看作气化过程, C 表面发生反应式(7)而不是反应式(5)。反应机理还有待进一步研究。



1.4 DCFC 与 CO₂ 减排

随着温室效应的日趋严重,

CO₂ 减排呼声越来越高, 而燃料电池是 CO₂ 减排最有希望的技术之一。

碳酸盐 DCFC 阳极产物为单一的 CO₂ 气体, 实现了 CO₂ 的富集与分离。理想情况下 1 mol C 被氧化需要阴极提供 2 mol CO₂, 产物中 2/3 的 CO₂ 需要与阴极气体进行预混。但实际运行中阴极氧化剂需要预混过量的 CO₂, 造成减排效率下降, 甚至无法减排。

氢氧化物 DCFC 氧化剂不需要预混 CO₂, 阳极产物是 H₂O 和 CO₂ 的混合气体, 通过分离产物中的 H₂O 可以实现 CO₂ 的富集。

固体氧化物电解质 DCFC 理论上实现了 CO₂ 的内部循环, 但是实际过程中排气是 CO 和 CO₂ 的混合气体, 可通过燃烧生成高纯 CO₂ 进行减排。如果混合排气经过水气变换反应生成 H₂ 和 CO₂ 混合气体, CO₂ 的减排较为困难。

2 DCFC 技术研究现状

最早直接碳燃料电池距今已有 110 多年历史^[3], 但近年来技术才有了较为快速的进步, 目前 DCFC 的电流密度达到 50 ~ 500 mA/cm², 功率密度最高达到 4.5 kW/m²^[9]。相比其它类型燃料电池, DCFC 本体研究尚处于起步阶段。此外, 以煤作为 DCFC 的燃料, 面临两个问题, 一是固体燃料给料问题; 二是煤中含有的污染物将导致电极失效^[9]。

目前 DCFC 技术的研究主要集中在两个方面: 一是碳燃料的处理; 二是电池本体与结构的设计研究。研究工作主要集中在美国、日本等发达国家。

2.1 碳燃料的处理

煤中含有大量的灰分、硫分

和挥发分等杂质, 灰分会污染电解质, 硫分会降低电极活性。需要对煤进行一定的加工处理, 减少煤中的灰分、硫含量和挥发分, 同时改善煤的微观结构, 便于阳极电化学反应的发生。熔融电解质 DCFC 需要纯度很高的 C 作燃料, YSZ 电解质 DCFC 对燃料纯度要求要低一些, 目前实验室研究中通常使用石墨作为燃料。石墨价格是煤炭的十几倍, 且产量有限, 无法普及使用。如何将煤, 甚至炼油残渣、生物质、城市垃圾等廉价地转化为可供 DCFC 使用的碳燃料, 是国内外学者与各公司的研究热点。

美国布鲁克海文国家实验室 (Brookhaven National Laboratory, BNL) 提出一种 Plasma Black 的方法^[10], 通过加入氢的等离子体将化石能源或生物质连续地热解为炭黑和 H₂。这种技术最早应用在以天然气和石油为原料的炭黑商业生产上。H₂ 等离子化温度可达 1 500 °C, 碳氢化合物热解生成碳和 H₂。目前已经建立了使用天然气和石油作为燃料的年产 20 000 t 炭黑和 25 亿立方米 H₂ 的化工厂^[10]。以煤为原料的 Plasma Blank 研究尚处于实验阶段。

该技术的关键在于能否以煤为原料实现炭黑与 H₂ 的联产和耗电对经济性能的影响。油气采储比低于煤炭, 从长远来看, 煤炭是最好的原料。此外 Plasma Blank 过程大量耗电, 提高了生产成本。BNL 提出希望通过联合循环进一步提高整体效率, 但是相应的投资成本会增加, 系统更加复杂, 发电系统与化工系统联合, 对发电的调峰和化工过程的稳定性冲突提出了更高的要求。

美国西弗吉尼亚大学 (West

Virginia University, WVU) Zondlo 等人提出溶剂萃取降低煤中杂质的方法^[9]。通过有机溶剂萃取, 可以提高燃料热值、去除煤中有机灰分和有机硫分, 只留少量矿物质和无机硫。处理前后煤热值约有 17% 提升, 灰含量降至 1% 以下, 硫含量也从 4% 下降到 1% 左右。同时可以结合热解和煅烧过程, 去除煤中挥发分, 改善碳的内部微观结构, 有利于阳极电化学反应的发生。萃取技术的核心是萃取剂的选取, 萃取剂应该具备去除杂质, 残余萃取剂对 DCFC 无害, 价格便宜, 适应大规模生产使用等功能。整个萃取、热解、煅烧过程耗时、耗能, 对经济性带来一定影响。

同样采用溶剂萃取方法, 美国肯塔基大学 (U. Kentucky) Berkovich 提出了一种在较低温度和常压下^[9], 不需要催化剂和加 H₂ 气化的萃取技术, 其技术路线如图 4 所示。

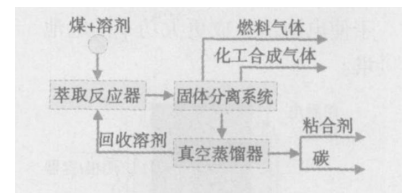


图 4 UK 萃取技术路线

与溶剂萃取方法不同, Cooper 提出了一种水力清洗生产碳燃料的方法^[8]。首先将煤进行粉碎, 然后通过水力清洗的方法将碳与灰分等杂质分离, 烘干后作为 DCFC 的燃料。水力清洗之后, 煤中灰和硫含量均低于 1%, 灰含量与萃取法相比偏高, 需要进一步的清洁或定期更换电解质, 但煤的加工过程成本较低。由于 DCFC 的电解质材料成本较低, 在一定时间内更换电解质材料是可以的, 所以几种方法应当

综合考虑成本问题(见表1)。

表1 不同燃料碳制备方法综合评价^[9]

制备方法	效率 / %	产出率 / %	灰 / %	硫 / %	成本 / \$·t ⁻¹
水力清洗法	98	100	0.5~1	1~2	60
UK 溶剂萃取法	—	40~70	0.05	0.5	200
WVU 溶剂萃取法	—	40~50	0.05	0.5~1	78~140

2.2 电池本体研究

目前对 DCFC 电池本体的研究重点放在两个方面:一是电池结构与运行特性的研究;二是电池材料的开发。

SARA 采用非常规方法设计了一种 DCFC^[3~9],目前已开发到第三代。如图5所示,电池采用筒形几何结构,致密的(非多孔)Fe₂Ti 金属材料作阴极,石墨作阳极和燃料,电解质使用熔融氢氧化物,可以提高表面接触反应活性,特别是把圆筒形阴极作为熔融电解质容器,大大简化了电池的结构,同时考虑了集成特性,便于使电池组合成更大功率的电池堆。

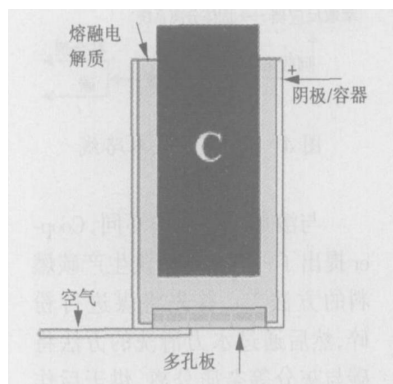


图5 SARA 直接碳燃料电池

美国劳伦斯利物莫国家实验室(Lawrence Livermore National Laboratory, LLNL)开发的 DCFC 基本结构如图6所示^[9],电解质材料采用熔融碳酸盐,饱和熔融电解质的陶瓷夹在多孔阳极、阴极

连接器的两侧构成基本单元,将这样的基本单元层层叠加并倾斜一定角度可以构成电池组。倾斜角度主要是为了使多余熔融电解质流出电池,否则容易在电池低压区聚集,阻碍空气的进入,同时便于在运行时更换电解质。

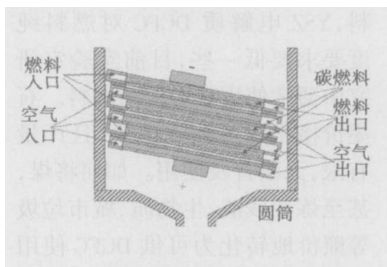


图6 LINL 直接碳燃料电池

CellTech Power 公司自行研制开发了一种 DCFC^[11],基本结构如图7所示。它采用圆柱形设计,与管式 SOFC 十分类似,有利于电池之间的串并联,以构成更大规模的电池组。

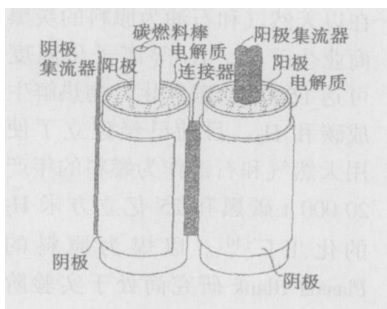


图7 CellTech Power 直接碳燃料电池

对 DCFC 的研究,目前仍以探索为主,各研究机构主要在工作机理、电解质材料、电池结构等方面进行探索,期望找到电化学特性更理想、制作工艺简单、集成度高、成本低的 DCFC。作者在下一步工作中将在已有的固体氧化物燃料电池研究基础上,建立固体氧化物电解质直接碳燃料原形电池,对该类型 DCFC 进行实验研究、热力学分析和机理分

析,以期达到优化电池性能的目的。

3 发展展望

DCFC 尚处于研究阶段,进行经济性评价还为时过早,而且目前实验室阶段的成本不具备代表性,未来影响其发电成本的重要因素可能是燃料制备成本和大规模电池堆的集成成本;从技术发展角度看,DCFC 目前仍有很长的路要走:

(1) 定位问题。DCFC 属于高温燃料电池,有望用于大规模发电设备、中小型分布式发电系统甚至燃料电池汽车等设备用电装置。而最为合适的应用领域则与 DCFC 技术的发展程度有关,应慎重选取,随着技术的发展,相关结论会日趋明显。

(2) 燃料问题。由于现有多种类型的 DCFC 对碳的纯度要求非常严格,碳制备工艺成为限制 DCFC 技术发展的重要因素。研究新型碳转化技术,同时提高电池对燃料的适应能力是未来 DCFC 研究的重点方向之一。

(3) 给料问题。DCFC 使用固体燃料,体积相对较小,运输、储存较为方便,但电池中的燃料供给将面临如何连续、平稳给料的难题,有待进一步探索。

(4) 材料问题。研究、开发高性能电解质、电极材料,以提高 DCFC 的工作性能,延长电池寿命。

(5) CO₂ 减排问题。结合 DCFC 特色,发展相应 CO₂ 减排技术,减少温室气体 CO₂ 的排放。

DCFC 技术有其自身优势,通过积极发展,有望攻克相关技术难题,使其成为 21 世纪重要的燃料电池发电技术之一。

参考文献:

- [1] WEIBEL D B, BOULATOV R, LEE A, et al. Modeling the anodic half-cell of a low-temperature coal fuel cell [J]. *Angew Chem Int Ed*, 2005, 44: 5682—5686.
- [2] 姚 强. 洁净煤技术 [M]. 北京, 化学工业出版社, 2005.
- [3] ZECEVIC S, PATTON E M, PARHAMI P. Direct carbon fuel cell with hydroxide electrolyte-cell performance during initial stage of a long term operation // SHAH R K, UBONG E U, SAMUELSEN S. 2005 Proceedings of the 3rd International Conference of Fuel Cell Science, Engineering and Technology [C]. New York; American Society of Mechanical Engineers, 2005. 507—514.
- [4] ZECEVIC S, PATTON E M, PARHAMI P. Carbon-air fuel cell without a reforming process [J]. *Carbon*, 2004, 42: 1983—1993.
- [5] ZECEVIC S, PATTON E M, PARHAMI P. Direct carbon fuel cell with molten hydroxide electrolyte // SHAH R K, KANDLIKAR S G. *Fuel Cell Science Engineering and Technology-2004* [C]. New York; American Society of Mechanical Engineers, 2004. 387—394.
- [6] HEMMES K. A theoretical study of the carbon/carbonate/hydroxide (electro-) chemical system in a direct carbon // SHAH R K, KANDLIKAR S G. *Fuel Cell Science Engineering and Technology-2004* [C]. New York; American Society of Mechanical Engineers, 2004. 395—400.
- [7] HEMMES K. Fuel cells, what's up next // SHAH R K, KANDLIKAR S G. *Fuel Cell Science Engineering and Technology-2003* [C]. New York; American Society of Mechanical Engineers, 2003. 9—19.
- [8] GUR T M. Direct electrochemical conversion of carbon to electrical energy in a high temperature fuel cell [J]. *Journal of the Electrochemical Society*, 1992, 139: 95—97.
- [9] COOPER J F. Direct conversion of coal and coal-derived carbon in fuel cells // SHAH R K, KANDLIKAR S G. *Fuel Cell Science Engineering and Technology-2004* [C]. New York; American Society of Mechanical Engineers, 2004. 375—385.
- [10] STEINBERG M. A highly efficient combined cycle fossil and biomass fuel power generation and hydrogen production plant with zero CO₂ emission // SHAH R K, KANDLIKAR S G. *Fuel Cell Science Engineering and Technology-2004* [C]. New York; American Society of Mechanical Engineers, 2004. 401—408.
- [11] TAO THOMAS. Direct carbon conversion. DOE direct carbon fuel cell workshop, NETL [EB/OL] Pittsburgh, PA, 2003; proceedings on line, <http://www.netl.doe.gov>.

(渠 源 编 辑)

运行保障

高热应力及腐蚀将导致燃气轮机叶片的质量损失

据《Тяжелое машиностроение》2005年6月号报道,燃气轮机内的燃气流温度场通常具有径向和周向的不均匀性,并且与高压涡轮前的平均值比较,温度还可以提高60~80℃。

在燃气不包含腐蚀性杂质的良好条件下,提高燃气温度首先影响到在起动、停机和其动态过程中在导向器内产生热应力的的大小上。存在腐蚀性杂质引起叶片材料的腐蚀,并且温度越高,破坏强度就越大。即材料温度提高50℃,将导致叶片质量损失的速度增加到2.5~3倍。

除叶片表面破坏、气动力损失增加以外,腐蚀还造成材料持久强度的降低。文中列出了有关各种合金持久强度降低的试验数据。

为了保证燃气轮机运行的可靠性并保持其寿命,在设计和调整阶段要合理地保证在通流部分内燃气流最大均匀的温度场,并利用文章中介绍的方法估计各种运行条件不良的影响,以便更好地选择相应的材料并提出对空气和燃料清洁度的要求。

(吉桂明 供稿)

直接碳燃料电池技术研究进展分析= **An Analysis of Technical Research Advances in Direct Carbon Fuel Cell Technology**[刊, 汉]/ LI Chen, SHI Yi-xiang, CAI Ning-sheng (Education Ministry Key Laboratory on Thermodynamic Sciences and Power Engineering under the Tsinghua University, Beijing, China, Post Code: 100084)// Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. — 2007, 22 (1). — 1~5

Direct carbon fuel cells (DCFC) can directly transform the chemical energy inside a solid carbon fuel to electrical energy cleanly and efficiently. They are of major significance for rational utilization of coal, control of pollutants and reduction of CO₂ emissions. To date, several kinds of DCFC have been developed with fusible carbonate, fusible hydrate and solid oxide serving as an electrolyte. However, compared with other fuel cell technologies, the research on DCFC technology is still in its infancy. A survey of the development course of the DCFC technology and status quo of its research are given along with a classification of the DCFC now available. Analyzed and compared also are their working mechanism and performance features as well as CO₂ emissions reduction characteristics. Moreover, on the basis of summarizing various technically intractable problems, a forecast of the possible future development trend of the DCFC technology is also given. **Key words:** direct carbon fuel cell, fusible carbonate, fusible hydrate, solid oxide

基于 ARMA 及神经网络的汽轮机振动故障诊断研究= **A Study of Turbine Vibration-fault Diagnosis Based on an ARMA and a Neural Network**[刊, 汉]/ LIANG Ping, WU Geng-shen (College of Electric Power under the South China University of Science and Technology, Guangzhou, China, Post Code: 510640), LONG Xin-feng (College of Chemical Industry and Energy Sources under the South China University of Science and Technology, Guangzhou, China, Post Code: 510640)// Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. — 2007, 22(1). — 6~10

Based on an ARMA (auto-regression moving average) model for turbine rotor vibration-fault series, the authors have calculated the self-spectral functional values through the use of ARMA model parameters and established a self-spectral function atlas for turbine rotor vibration-fault time series. The model has been established by using the data of four typical turbine rotor vibration faults all acquired on a Bently test rig in both horizontal and vertical directions, namely, rubbing, loosening, misalignment and unbalance. An analysis of the above atlas of the ARMA model set up for different kinds of faults shows that the information featuring fault symptoms is relatively clear, displaying a comparatively good division between various fault zones. Moreover, as the eigenvectors of the ARMA model have concentrated all the information of the original time series signals, a non-linear mapping for the eigenvector parameters of the ARMA model from a p-dimensional Euclidean space to a two-dimensional one has been performed by using a multi-node input dual hidden-layer BP neural network in order to conduct a diagnosis of the status of a turbine rotor vibration fault. The diagnosis result indicates that the specimens of the ARMA model for a corresponding type of faults can relatively well classify the faults in a two-dimensional Euclidean space through the use of a neural network which has undergone a training. The inspection specimen for the same type of faults have kept a minimal distance from the target functional value in a Euclidean space. The foregoing shows that the ARMA model-based fault diagnostic method of a two-dimensional Euclidean space and dual hidden-layer neural network has a comparatively high ability to discriminate faults. **Key words:** turbine rotor vibration, fault diagnosis, time series, self-spectral function, neural network

汽轮机转子对中调整参数的数值分析方法= **A Numerical Analysis Method for Parameter Adjustment in the Alignment of Steam Turbine Rotors**[刊, 汉]/ RUI Xiao-ming, LI Lin, SUN Wei-guo (Education Ministry Key Laboratory on Condition Monitoring and Control of Power Plant Equipment, College of Energy and Power Engineering under the North China University of Electric Power, Beijing, China, Post Code: 102206)// Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. — 2007, 22(1). — 11~14, 20

Concerning the calculation of parameters involved in the alignment of a shafting in a rotor system during the overhaul and installation of a steam turbine, the authors have presented an optimized adjustment scheme to minimize both the number of bearing bushes to be aligned and the adjustment work load and have also established a model for analyzing relevant regulation relations. A numerical analysis method has been put forward based on a genetic algorithm and penalty function one, thus eliminating some limitations present when penalty-function optimum-seeking algorithm and genetic algorithm are