

ISSN 1004-0609

中国有色金属学报

THE CHINESE JOURNAL OF NONFERROUS METALS

Vol.8 Suppl.2

Sep.1998

中国有色金属学会 第3届青年学术会议论文集

中国有色金属工业总公司 主办
中国有色金属学会

中国有色金属学会

第3届青年学术会议论文集

主 编：胡筱敏

副主编：张延安 吴家泉

中国有色金属学会青年工作委员会

东北大学

《中国有色金属学报》编辑部

1998年9月·沈阳

中国有色金属学报 (季刊)
(ZHONGGUO YOUSE JINSHU XUEBAO)

第 8 卷增刊 2
1998 年 9 月出版

**THE CHINESE JOURNAL OF
NONFERROUS METALS**

(Quarterly)
Vol. 8 Suppl. 2 Sep. 1998

主办单位: 中国有色金属学会
承办单位: 中南工业大学
主编: 何继善; 副主编: 黄伯云, 邱冠周, 杨焕文
编辑出版: 《中国有色金属学报》编辑部
印刷: 中南工业大学出版社印刷厂
国内发行: 《中国有色金属学报》编辑部
(湖南省长沙市中南工业大学内, 邮码: 410083)
国外总发行: 中国国际图书贸易总公司
(北京 399 信箱)
国外发行代号: 4642Q
E-mail: f-yxsb@csut.edu.cn

Sponsored by The Nonferrous Metals Society of China
Managed by Central South University of Technology
Chief Editor He Jishan
Deputy Editor Huang Baiyun, Qiu Guanzhou and
Yang Huanwen
Edited & Published by Editorial Office of The Chinese
Journal of Nonferrous Metals
Address Central South University of Technology,
Changsha, Hunan 410083, P.R. China
Distributed abroad by
China International Book Trading Corporation
(P.O. Box 399, Beijing, China)

公开发行
每册定价: 30 元

湖南省期刊增刊许可证(1998)第 56 号

ISSN 1004 - 0609
CN43 - 1238/TG

中国有色金属学会第3届青年学术会议

指导委员会

主 席：何伯泉 教授

副主席：赫冀成 教授

王淀佐 两院院士

马福康 教授

委 员：	古德生	院士	邱竹贤	院士	周 廉	院士	胡壮麒	院士
	陈家镛	院士	何继善	院士	黄培云	院士	钟 掘	院士
	孙传尧	教授	陈革涛	教授	梁志德	教授	魏绪钧	教授
	徐小荷	教授	才庆魁	教授	左 良	教授	陈宝智	教授
	隋智通	教授	翟玉春	教授	崔建中	教授	毕诗文	教授
	杨焕文	教授	袁 巍	副教授				

组织委员会

主 席：钟 宏

副主席：张延安 敖 宏 谢 刚

委 员：	杨志强	李 凯	胡筱敏	孙 康
	于相杰	何鸣鸿	肖亚庆	奚正平
	周爱民	郑海霞	杨志安	吴爱祥
	孙德刚			

工作委员会

主 席：张延安

副主席：胡筱敏

委 员：孙旭东

秘书长：路贵民

秘 书：杨 欢

孙 康

高 航

高福祥

徐竹云

邢鹏飞

编辑委员会

主 编：胡筱敏

副主编：张延安

编 委：高 航

路贵民

袁赛前

责 编：何学锋

吴家泉

高福祥

杨 欢

黄劲松

孙 康

朱忠国

孙旭东

彭超群

《中国有色金属学报》投稿须知

1、稿件内容要新颖,文字应精练,并注意保守机密(稿件保密审查由作者单位负责,本刊只要求出示证明)。由各类科学基金资助的研究论文,请在来稿首页末行注明项目名称及编号,并附寄项目批准意见表复印件。

2、来稿需一式两份,并于首页末行附第一作者简介(性别、年龄、职称和学位)。

凡投英文刊的稿件应附全文对照的中文稿,且两种文字稿均要求一式两份。文稿打印时,以16开或A4版面为1面,正文字号为5号,行间距为1;其参考文献中著录的中文文献一律译成英文(作者姓名用汉语拼音),并在英刊名后括号注明原文文种。

投中文刊的稿件,对参考文献中的中(日)文文献,除附中(日)文的姓名及刊名外还须附原作者姓名的汉语拼音(日文附罗马拼音)及该刊的英译名,文题名、关键词、摘要、通讯地址及图名、表名需附中、英文,图注、表栏、表注用英文,请附中国法分类号。

对易混淆的外文字母、符号必须以铅笔注明文种、正斜体和大、小写;位于上下角的字母、数码和符号其位置高低应明显区别。包括图、表及参考文献在内,文稿以不超过6000字为宜。稿件经评审录用后,请作者在返寄修改稿的同时附寄磁盘。磁盘内的文件除华光或方正排版系统生成的格式文件外,其他文字处理系统如WPS、WORD、X、WORDPERFECT等,尤其是各种外挂中文平台生成的格式文件,请作者务必转换成纯文本文件。

3、论文摘要应包括下列信息:目的、过程及方法、结果和讨论。内容要求具体化,量化,长度一般为250~300个字(中文)或100~150个单词(英文)。稿件中标题不宜超过四级,分别用1 2 3...;1.1 1.2 1.3...;1.1.1 1.1.2 1.1.3...顶格排序。中文稿前言部分不编序号。量、单位和符号一律按中华人民共和国国家标准(GB 3100~3102-93)规定书写,物理量符号一律用斜体,单位和词头用正体。图中物理量名称与单位之间用斜杠隔开,如 p/kPa , $t/^{\circ}\text{C}$ 。

4、曲线图用白纸黑线精绘,图和照片的宽度(包括数字和坐标名称)宜控制在7.4cm以下,高度和宽度保持比例协调,排通栏者最宽不超过15cm,图上的文字可用打字或模版描写,图表均随文走,不要集中附于文末,图贴在稿中相应处所留出的同该图大小一致的空白位置上。

5、对参考文献须侧重引用知名刊物上的论文,且数量不少于8条,内部资料,私人通信一般不引用。已录用待发表的文章需引用时,必须注明刊物名称。期刊、图书、论文集和专利引用格式如下:

a: 期刊

顺序为: 序号 著者(中西文均姓在前名在后). 刊名(西文可用缩写), 出版年, 卷(期): 页码.

例: $\frac{1}{\text{序号}}$ Eckert J, Schultz L, Urban K. Acta Metall Mater. 1991, 39 (7): 1497.
著者(中西文均姓在前名在后) 刊名 出版年 卷 期 页

b: 图书

顺序为: 序号 著者. 书名. 版本(第一版不著录), 出版地: 出版者, 出版年: 页次.

例: $\frac{1}{\text{序号}}$ Johnson W, Hudo H. The Mechanics of Metal Extrusion. Manchester: Manchester University Press, 1962: 56-57.
著者 书名 出版地 出版者 出版年 页次

c: 论文集

会议论文顺序为: 序号 著者. In(见): 编者 ed. 文集名. 出版地: 出版者, 出版年: 页次.

例: $\frac{1}{\text{序号}}$ Ma Tingxi, Lu Xueshu. In: Zhang Wei, Guo Peiyu, Zhang Senwen eds. Agricultural Engineering and Rural Development: Vol I.
著者. In: 编者 文集名

Beijing:
出版地

International Academic Publishers, 1992. 157-160.
出版者 出版年 页次

博士论文顺序为: 序号 著者. 学位论文. 出版单位, 出版年: 页次.

例: $\frac{1}{\text{序号}}$ Zhao Jiuzhou. PhD thesis. (in Chinese), Harbin Institute of Technology, 1994: 55.
著者 学位论文 出版单位 出版年 页次

d: 专利

顺序为: 序号 专利发明人姓名. 专利国别, 专利号、公布日期

例: $\frac{1}{\text{序号}}$ 程自强. CN1030796A. 1989.
发明人 专利国别, 专利号 日期

6、切勿一稿两投,若被发现,除停止发表外,点名批评,文章一经发表,即按规定付稿酬,未采用稿件一般不退稿。

7、稿件处理程序

来稿如符合要求,编辑部即登记编号,并通知作者稿号,从收稿到确定是否录用,一般为三个月。作者接到编辑部录用和交论文发表费通知后,应根据通知单提出的意见修改,并在编辑部要求的时间内连原稿一并寄回编辑部,同时汇来发表费。未收到发表费前,将不安排编排。

《中国有色金属学报》编辑部

1998年9月

《中国有色金属学报》文摘/检索情况简介

《中国有色金属学报》是由中国有色金属学会主办的,以有色金属领域科研成果为主要报道内容的综合性高级学术刊物。自1991年10月创刊以来,本刊始终坚持开展国内外学术交流、繁荣科学技术,促进有色金属工业发展的办刊宗旨,鼓励不同学术观点的交流与争鸣,鼓励学术上的大胆探索与创新。

《中国有色金属学报》中、英文版为姊妹刊物,报道范围相同,发表内容不同;英文版偏重理论研究,而中文版则兼顾理论研究和实用技术。两种版本均为季刊,每年3、6、9、12月出刊,向国内外公开发刊,每年刊载论文数均在145篇以上,在国内外学术界已有一定的影响。

广大科技工作者对《中国有色金属学报》的成长和发展给予了巨大的关怀和支持,提供了许多有益的建议和重要信息,为了表示我们的感谢,也为了让更多的读者、作者及评审专家了解本刊的发展现状,我们特地列表将大家关心的国内外文摘/检索系统收录本刊的情况作全面而简要的介绍,以便大家在阅读、投稿及审稿时作参考。

收录《中国有色金属学报》中、英文版的文摘/检索系统一览表

中文版	ISSN 1004 - 0609 CODEN ZYJXFK	英文版	ISSN 1003 - 6326 CPDEN TNMCEW
美国《工程索引论文题录》(Ei Page One)		美国《科学引文索引》(SCI Search)	
英国《科学文摘》(INSPEC)		美国《工程索引论文摘要》(Ei Compendex Plus)	
美国《化学文摘》(CA)		英国《科学文摘》(INSPEC)	
美国《金属文摘》(METADEx)		美国《化学文摘》(CA)	
俄罗斯《文摘杂志》(SIAS)		美国《金属文摘》(METADEx)	
日本《科学技术文献速报》(JST)		俄罗斯《文摘杂志》(SIAS)	
美国《工程材料文摘》(Eng Materials Abs)		日本《科学技术文献速报》(JST)	
美国《铝工业文摘》(Aluminum Industry Abs)		美国《研究快报》(RA)	
《中国学术期刊文摘》		美国《工程材料文摘》(Eng Materials Abs)	
《中国物理文摘》		美国《铝工业文摘》(Aluminum Industry Abs)	
《中国冶金文摘》		《中国学术期刊文摘》	
《中国化工文摘》		《中国物理文摘》	
《中国地质文摘》		《中国冶金文摘》	
《有色金属文摘》		《中国化工文摘》	
中国科学引文数据库		《有色金属文摘》	
中国有色金属文献数据库		中国有色金属文献数据库	
中国材料科技信息网		中国材料科技信息网	
《中国学术期刊(光盘版)》		《中国学术期刊(光盘版)》	
入编期刊题录摘要网络数据库		入编期刊题录摘要网络数据库	

目次

材料科学与工程

固体氧化物燃料电池材料的发展前景	戴学刚(1)
相转移分离法制备 YSZ 和 YSCe 固体电解质超细粉末	尧巍华 戴学刚(5)
结合剂中金刚石固位机理及提高固位能力的技术	徐西鹏 吴 健 沈剑云等(8)
CuO-Al 系的机械驱动还原反应	吴进明 吴年强 郑史烈等(11)
反应自生 Cu-TiB ₂ -TiC 复合材料	周 芸 朱心昆 苏云生等(15)
发泡金属的开发、性质及应用(I)—发泡金属的制备方法	李保山 牛玉舒 翟秀静等(18)
化学法制备 PLZT 纳米粉工艺	英 宏 修稚萌 李锦红等(23)
硅胶负载型聚烯烃催化剂(I)—不同类型硅胶载体热活化颗粒的 TEM 和 SAED 研究	刘柏平 任晓红 阳永荣等(26)
硅胶负载型聚烯烃催化剂(II)—热活化硅胶载体及催化剂颗粒的 TEM 和 SAED 研究	刘柏平 任晓红 阳永荣等(30)
不锈钢纤维增强的不锈钢多孔材料的制备和力学性能	贾英全 曲凤泽 史学娟等(33)
锂离子电池正极材料 LiNiO ₂ 的合成	高 虹 翟秀静 翟玉春等(36)
纳米 Ni-Co 合金粉末的溶液还原法制备与表征	张 楠 翟秀静 翟玉春(39)
Sol-Gel 法块状透明 Al ₂ O ₃ 陶瓷的制备及结构	王 晶 英 宏 翟玉春等(43)
Al ₂ O ₃ /TiC 复合陶瓷热震压痕裂纹扩展规律	赵 康 陈宇航 鄢君辉等(46)
新型金基触点材料的研制	马蕊侠 李明利 陈利荣等(49)
高强度 NiPdCrSiB 钎料	柏文超 毛忠汉 陈 靖等(52)
定膨胀合金 Ni ₂₉ Co ₁₈ 的工艺	张丽君 周广智 赵福佳(54)
新型弹性材料—QSn _{4-1-0.04} 锡铁磷青铜	张丽君 钟相文(58)
溶胶-凝胶法合成 La _{1-x} Sr _x CoO ₃ 粉末	耿树江 邵忠宝 牛 盾等(61)
碳酸铝铵热分解制取 α -Al ₂ O ₃ 微粉	付高峰 毕诗文 杨毅宏等(64)
石墨化度对自焙炭块性能的影响	胡晓军 薛向欣 段培宁(67)
电镀锌镍合金的盐腐蚀行为	孔 纲 卢锦堂 陈锦虹等(73)
Ti811 合金在不同温度和时间下的蠕变性能	朱康英 赵永庆 李佐臣等(76)
常压烧结制备 ZrO ₂ 和原位 TiN 复相 O'-Sialon	谢 朋 薛向欣 翟玉春等(80)
薄膜材料结构信息测试方法比较	刘震云 王永瑞 黄伯云等(84)
SiC _p /2024Al 复合材料超塑变形过程中微观结构的变化及变形机理	颜 莹 刘渤然 张彩碚(88)
钇系、铋系高温超导体的研究及潜在应用展望	钱九红 袁冠森(93)
彩色镀锌钢板的生产与研究	乐启炽 崔建忠(98)
翡翠的宝石特征及鉴别	罗莹华 张乐凯(103)
YBaCuO 超导体的腐蚀与防护研究	杜金红 蔡亚明 单玉桥等(106)
籽晶诱导法制备 YBaCuO 超导圆环	蔡亚明 杜金红 单玉桥等(110)
纳米 Al-Fe-V-Si-Nd 合金的合成与结构分析	林锦新 庞 华 邓江宁等(114)
应用 LMTO-CPA 方法对 Ti-Al 合金热力学性质的研究	程 维 聂惠权 周瑛玮等(117)
钹铁硼永磁材料及其应用前景	李 飞(120)
纳米陶瓷复合材料的制备及特性	金正爱 邱向东(124)
高纯 CoO 的制备研究	谢 朋 翟玉春 赵彦军等(129)
自反应合成 AlN 热力学研究	金海波 王文忠 邹宗树(133)

高孔率金属材料延伸率的估算方法	刘培生 李铁藩 付超等(138)
Ni-Al 合金的偏析现象的研究	周瑛玮 聂惠权 程维等(141)
Al ₂ O ₃ /Ni(Ti)复合材料的热震稳定性	李继光 李义尧 茹红强等(145)
自蔓延高温合成过程中自组织现象的非平衡热力学分析	邹正光 付正义 袁润章(147)
金属-陶瓷复合材料自蔓延高温合成的燃烧动力学特征	邹正光 柳贵平 付正义等(151)
中铬抗磨白口铸铁变质剂的研究	张义顺 李锋 王青澄(155)
碳热法稀土硅铁合金的显微组织	涂赣峰 任存治 李春材等(159)
稀土硅铁合金在铸铁液中的溶解模型	涂赣峰 任存治 李春材等(163)
一种高强度变形高温合金成分的设计	谢世殊 王志兴 杨洪才等(167)
Fe-C 及 Fe-B 母合金粉末在 Fe-Mo-B-C 系统烧结钢液相烧结中的作用	修稚萌 何凤鸣 英宏等(171)
热浸镀锌板界面 Fe-Al 层的透射电镜直接观察分析	马伟民 岳晓宁 赵秉军等(175)
α 型钛合金中 Ti ₃ X 有序相的析出	张钧 田红花 李景波(178)
复合稀土银合金的组织与性能	石路 李晋霞 王佳夫等(181)
高水充填材料的胶凝、浆体结构和稳定性	张文生 李北星 周明凯等(185)
针状 α_2 相对 Ti-24Al-14Nb-3V-0.5Mo 合金拉伸断裂机制的影响	武英 杨德庄(189)
AuAg8/Ag 的滚焊复合	吕保国 江轩 杨素媛等(194)
近 α 高温钛合金 600℃ 蠕变变形机制的 TEM 研究	崔文芳 洪权 汪进等(198)
定向凝固镍基高温合金的高温恒载拉伸蠕变行为	袁超 郭建亭 杨洪才(202)
氧化锌薄膜掺杂研究的新进展	赵谢群 邱向东(206)
燃烧合成法制备原位内生复合材料 NiAl-Al ₂ O ₃ -TiC	姜东涛 郭建亭 周兰章等(210)
机械化学反应法制备纳米 W ₂ C 粉体	谭国龙 周宇松 吴希俊(214)
X 射线荧光光谱加入法测定钛合金中的钨	李晴宇 李燕(217)
合金元素对 Pb-Cd 合金性能的影响	张蔚(219)
Ni-Au-Pd 基高温钎料研制	杜平 马蕊侠 李明利等(222)
高弹钛合金箔材的组织与织构	赵永庆 赵香苗 朱康英等(224)
热处理工艺对一种阻燃钛合金显微组织的影响	赵永庆 赵香苗 朱康英(227)
气体雾化法制取 NiPdCrBSi 钎料粉末的工艺	陈靖 毛忠汉 祖国兴等(230)
Cu-Cr 合金的制造与研究	杨欢 张廷安 王延玲等(234)
电磁波屏蔽涂料	武宏让 杜继红(238)
稀土熔盐电解中新型阳极的研制及耐蚀性能	杜继红 奚正平 武宏让等(240)
双氧水还原制备超细银粉	宋建恒 郑学军(242)
爆炸复合电阻系列热双金属的工艺与性能	周金波 马东康 裴大荣等(244)
钛-不锈钢爆炸复合棒结合界面人工缺陷的超声控伤	郭悦霞 裴大荣 马东康等(247)
氢气净化用 PdY 合金的热处理工艺及其透氢性能	李银娥 李土江 田广民等(250)
硫氰酸盐光度法测定稀土金属中的微量钼	牛金龙(253)
Ti-230 合金碱洗吸氢的影响因素	曹风华 王廷询 李长亮等(255)
钛薄壁球体的化学铣加工	戚运莲 邓炬 洪权等(259)
钛及钛合金表面沉积 TiCN 膜层的工艺	李争显 于振涛 周颖刚等(263)
钛金属强化的生物材料	刘素英 武宏让(266)
合金元素对彩金颜色及加工性能的影响	骆瑞雪 黄拔帆(269)
自蔓延高温合成研究动态	张廷安 赫冀成(272)
镍包覆型粉末的制备方法与应用	邵忠财 李保山 郭亚萍等(277)
微米级硫钨酸铵在氢气中的分解过程	邢鹏飞 翟玉春 田彦文等(280)
化学气相法低温合成纳米 WC-Co-VC 粉体	谭国龙 吴希俊 甘波(283)
机械合金化 La-Ni-Al 粉的相转变	刘常升 张滨 陈岁元等(286)

化铪对 TA2 和 TC4 薄板性能的影响	曾立英 邓 炬 洪 权等(289)
钛对银铜合金性能的影响	周世平 王海燕 杨富陶等(292)
温度对轧制复合变形量的影响	周世平 杨富陶 王海燕等(295)
热电偶丝材拉伸模具的失效分析	靳湘云 黄韶华 吴江春(298)
半导体芯片粘接用耐热型金导电胶	李世鸿(301)
机械合金化铜稀土氧化物合金	谢 明 刘建良 邬明金等(306)
TiB ₂ -BN 复合材料的制备及显微结构	王为民 傅正义 王 皓(310)
TiB ₂ -Ni 金属陶瓷的热压烧结与性能	王 皓 傅正义 王为民等(313)
球磨条件对机械合金化制备 W-Cu 合金的影响	王 皓 傅正义 袁润章(316)
基于自蔓延高温合成技术制备 Al ₂ O ₃ -TiB ₂ 复相陶瓷	王月花 李 琳 傅正义等(320)
基于自蔓延高温合成技术制备 TiB ₂ -TiC 复相陶瓷	王月花 李 琳 傅正义等(324)
β 稳定元素对钛合金在 3.5% NaCl 溶液中电化学特性的影响	陈 军 胡耀君 刘果宗等(328)
铝锂合金的晶界结构及织构与超塑性	张宝金 曹梅光 牛学军等(333)
铁锌和铁镍尖晶石材料的高温导电性	于亚鑫 杨宝刚 于先进等(336)
铝合金表面等离子喷涂镍层的显微分析	龚晓辉 肖作江 初本利等(338)
氢对 Ti ₃ Al 基合金组织和超塑性能的影响	丁 桦 杜云惠 路贵民等(341)
新型高压辊磨机磨辊表面耐磨堆焊材料的性能	郭立新 张舒庆 翟 云(345)
激光等离子体气相合成纳米 SiC 陶瓷粉末	马连喜 周 怡 付广生(349)

化学·选矿·冶金

铌钽硫酸—氢氟酸溶液总酸度的测定	刘小珍 伍长英 钟淑梅等(351)
硫脲在铜电极表面的吸附及对电结晶结构的影响	董云会 许珂敏(354)
全湿法从黄金矿山氰化金泥中直接提取分离纯金	贺小塘 余见民 王卫亭等(357)
采用生物技术提高铝土矿质量	李聆值(361)
难浸金矿石的预处理法	刘小珍 钟淑梅 巫庆中等(365)
诺兰达炉渣火法贫化机理的探讨	李春旺 张传福(368)
微波炉溶样 N ₂ O-AAS 法测定金锗和金锗锡合金中的锗	杨 萍 李勇军 周 岭(372)
钯银铜金铂铑六元合金分离提纯工艺	吴 贤(374)
一种新型有机硼酸酯润滑油添加剂	杨晓霞 董 蔚 李明利(377)
载体粒度分布对负载型 Pt-Pd/C 催化剂性能的影响	费 超 余建强 陈 重等(380)
Pt-Pd/C 催化剂的金属分散度	余建强 费 超 曹峻清(383)
提高回转窑窑衬寿命的筑炉技术改进	李 兵(387)
预氧化钛铁矿的还原反应历程	孙 康 马跃宇 白魁昌等(390)
提高沸腾炉生产能力的措施与实践	黄宗海(394)
锌精矿沸腾焙烧系统设计与生产实践	陈军辉(397)
铝电解烟道灰的沸腾焙烧处理及其在铝电解上的应用	衣庆波 王 兰(400)
11-钨锌合铝杂多酸的合成、表征及性能研究	于 波 翟玉春 吴庆银等(403)
银钯合金化机理研究	韩维儒 朱 晋(406)
氧化锌烟尘脱氯研究	李 岚 徐家振 贺家齐等(409)
从钯含量低的失效催化剂中回收钯	张 钰 徐家振 贺家齐等(412)
添加剂强化拜耳法铝酸钠溶液分解	薛 红 毕诗文 谢雁丽等(415)
山西铝厂高压溶出料浆系统磨损规律及对策	李光柱(418)
降低锌精矿中磁黄铁矿含量的原理及方法	蔡从光 邬武进(421)

利用俄罗斯技术建设我国的电热铝硅合金工厂	张万福(424)
氧化铝浓相输送系统的试生产和国产设备的性能概况	鞠秀海 郭桂桐(428)
滑台式振动成型机	刘桂琴(431)
Cu-Al 爆炸焊“T”形支架在侧插自焙槽上的应用	鞠秀海(435)
采用现代化综合节能技术改造我国中小铝厂	李旺兴(438)
高铜氧化铋渣火法炼铋的研究与实践	王崇刚 李成军 郑成江(440)
铜密闭鼓风炉处理高锌难熔物料的理论与实践	郑海霞 张 力(445)
改变补碱途径对混联法氧化铝生产工艺和技术指标的影响	杨志伟(448)
高砷物料的 NaOH 焙烧脱砷工艺	吴国元(451)
一种电解制备过硫酸铵用的节能阴极材料	韦群燕 陈 景(454)
火法预富集测定电子废料中的钨	管有祥(456)
NaF-AlF ₃ -CaF ₂ -LiF-Al ₂ O ₃ 系电导率的研究	于亚鑫 邱竹贤 杨宝刚等(458)
电位扫描法在 Ni-Fe 电解中的应用	李金丽 张明杰(461)
1500℃恒氧位下炉渣中 TiO ₂ 与 Ti ₂ O ₃ 的反应过程	薛向欣 段培宁 周 敏等(464)
水口吹氩对结晶器弯月面波动的影响	雷 洪 朱苗勇 汪温泉等(468)
处理高钨白钨精矿生产 APT 的新工艺	张贵清 张启修 肖连生等(472)
含砷难处理金精矿提金新工艺	温建康 阮仁满(475)
高温氯化物熔体石墨阳极析氯过程动力学研究	谢 中 刘业翔(479)
流动控制结晶器内钢液流场特性的实验研究(Ⅰ)	徐广僂 于光伟 赫冀成等(484)
流动控制结晶器内钢液流场特性的实验研究(Ⅱ)	徐广僂 于光伟 赫冀成等(489)
CaO-SiO ₂ -Al ₂ O ₃ -MgO-V ₂ O ₅ 炉渣中非化学计量物 VO _x 的热力学	周剑波 薛向欣 段培宁(492)
一种用于高效毛细管电泳电导检测的电导池	宋 鸽 任凤莲 刘向荣(495)
改性金属膜萃取技术处理低浓度含铜料液	罗爱平 张启修(497)
冰晶石-氧化铝熔体中断电流法测量阳极过电位的改进	杨建红 赖延清 肖 劲等(501)
预焙铝电解槽智能模糊控制系统监控软件	李民军 李 劼 李欣峰等(506)
铝电槽槽电阻的智能控制方法	李 劼 李民军 肖 劲等(510)
焊缝金属溶质原子浓度分布与其阳极行为的关系	韩 忠 姜玉山 陈晓风(515)
水溶性无机防腐涂料	俞肇元(518)
弱智儿童头发微量元素的测试与研究	孙宝莲 张小燕(520)
壳聚糖膜的性能研究与比较	关志新 翟秀静 于亚鑫等(522)
氧化亚铁硫杆菌的催化氧化作用及其在冶金和材料领域的应用	王文生 魏德洲 郑龙熙(524)
一种新型锆英石超细粉漂白剂的除杂工艺研究	张 芹 王国生(527)
酱油曲霉絮凝特性的研究	胡筱敏 邓述波 罗 茜(529)
含稳定氮氧自由基结构的铂配合物的合成和结构及体外抗癌活性的初步研究	何 键 杨一昆 熊惠周等(533)
轻质碳酸钙喷射碳化新工艺	余嘉耕 章万友(535)
粉体物料干式分级设备	叶红齐 秦明礼(538)
造块粘结剂的分子设计原理	钟 宏 李海普(542)
由铜镍硫酸盐渣料制取工业纯铜镍硫酸盐	符 岩 宋庆双 王德全等(546)
活性污泥中微生物的絮凝性研究	邓述波 赵玉敏 胡筱敏(548)
电镀废水的综合处理系统	李庆伦 陈淑华 王晓鹏(551)
联合絮凝的物理模型	徐继润 黄 静 詹世平等(554)
一种硅化抑尘材料的抑尘机理及性能	周 勃 吴 超(557)
表面活性剂在胶体制备过程中的作用	许珂敬 杨新春 孔凡胜等(560)
应用改性絮凝剂加速镍铜精矿矿浆沉降及过滤速度的试验	宋永胜(564)

用沉降槽二次沉降澄清进行粗液精制试验研究	黄振彬 刘保伟(568)
外电场下硫化矿捕收剂的电化学处理	俞 瑞(571)
硫化矿有机抑制剂结构与性能的研究	陈建华 卢毅屏 冯其明(575)
细砂锡精矿精选和制粒工艺的试验与生产实践	梁炳玉(580)
岩金富硫化矿石无捕收剂浮选试验研究	张淑敏 刘建业 周世杰等(583)
浅谈机械球磨在难处理金矿浸出中的应用	闵小波 柴立元 钟海云(587)
高砷微细粒金矿石浮选新工艺研究	阮仁满 温建康 马秀盘等(591)
难浸金矿石的矿物学特征	王丹丽 王恩德(595)
浮选金精矿氰化浸出液的处理方法	林国梁 周世杰(599)

机电工程与自动化

卡玛兹 55111 载重车发动机的国产化与改造	尚崇广(603)
旋转闪蒸干燥的机理	张振伟 邓永胜 陆 颖等(608)
微粉干燥系统的参数选择	张振伟 陆 颖 邓永胜等(611)
工程曲面近似展开及精度分析方法的研究	毛 昕(614)
竖井提升钢丝绳容器系统在提升过程中的动力学仿真	严世榕 闻邦椿(618)
高压辊磨技术的发展及其在选矿业的应用前景	高 航 方存光 杨晓明等(623)
简单断面孔型的参数化设计	刘世伟 王希哲 吴 迪(627)
用设备作业量表示设备状态的马尔可夫维修优化模型的可行性	胡小荣(631)
辊压碎石机液压系统设计和动态分析	宋锦春 陆 颖 武学义等(634)
直径 1150 mm 初轧机压下系统的润滑剂	张凤和 夏延秋 丁津原等(637)
XPD 型数控旋压机床控制系统的研制	夏琴香(641)
液压抓斗优化设计与仿真	宋桂秋 李奎贤 林业发等(644)
我国井下铲运机使用与维修存在的问题与对策研究	古双林 卜英勇 张怀亮(648)
STD 总线工控机在配料系统中的应用	章浙根 陈善富 周克良(652)
微机配料系统配料模块软件设计	章浙根 周克良(655)
STD 总线工业控制机中的结构化高级语言及其固化运行	张 兵 姜在东(657)
露天矿铁路运输实时调度监控专家系统	黄国君 吴铁英 孙春山等(660)
露天矿铁路运输调度专家系统推理机制	黄绍君 黄国君(663)
硬盘分区表的恢复和硬盘自举失败及其对策	陈振远(665)
蒸发过程计算机实时监测与智能控制系统	陈晓波 余 强 冯 钦(670)
地下金属矿山采矿方法的智能选择	周科平(673)
重油含水率测量系统的研究	孙克辉 杨欣荣 凌玉华等(677)
用神经网络方法估计大气折光系数	李 泽 胡晓荣(681)
大功率回转变的动态模拟	黄心渊 戈建涛 古 梅(683)
材料 SHS 技术中燃烧模式的稳定性	柳贵平 傅正义 张清杰(687)
露天矿铁路运输调度专家系统的知识库结构	黄国君(691)
双辊式薄带连续铸轧凝固终结点位置控制数学模型	金珠梅 赫冀成(694)
旋转式结晶辊内交变热应力场的数值解析	金珠梅 赫冀成 孙雪坤(696)
用模糊聚类法作井塔变形分析研究	李沛鸿 曾宪珪(698)
对正规溶液模型的修正及其在相图提取热力学性质中的应用	刘国华 谢 刚 侯怀宇等(703)
用 NRTL 方程关联二元合金溶液的热力学数据	侯怀宇 谢 刚 刘国华等(707)
加热炉控制中炉温模糊决策	张卫军 聂宇宏 赫冀成(712)

加热炉炉温制度的多目标模糊优化方法·····	张卫军 聂宇宏 卜庆才等(715)
设备维修管理信息系统开发与应用·····	彭立志(718)

采矿工程

含水层参数识别的唯一性和稳定性问题·····	李守巨 刘迎曦 周承芳等(722)
岩土渗流问题反分析的非线性最小二乘法·····	李守巨 刘迎曦 周承芳等(726)
混凝土帷幕法施工接头管的提拔阻力·····	上官子昌 徐凯昌(730)
矿山测量信息系统的功能设计与数据组织·····	兰小机 骆永正(734)
平果铝矿矿仓格筛技改方案的理论分析·····	谭俊材(738)
平果铝土矿的生产勘探·····	卢文华 黎乾汉(741)
注浆工艺在不良岩层巷道掘进支护与巷道维护中的应用·····	李翥然 彭加斌(746)
基于声发射参数的采场安全等级划分·····	唐绍辉 唐海燕(749)
基于岩体声发射参数的竖井围岩稳定性分析·····	李庶林 毛建华 唐绍辉等(753)
岩体声波监测与声发射技术的现场应用研究·····	毛建华 李庶林 王 宁等(758)
矿山溜井出矿新工艺的探讨·····	吴爱祥(763)
论凡口铅锌矿井下无轨设备的现状与发展·····	吴 景(767)
地下矿溜井系统设计中结构参数的选定与实践体会·····	殷永家 张丰田(771)
拉格朗日元法及其在冻结法凿井数值模拟中的应用·····	周 辉 谭云亮 李庶林等(776)
矿石损失与贫化参数模型·····	李 泽 董 光(780)
大洋采矿集矿机的研究·····	简 曲(783)
灰色系统理论在爆炸作用下岩石动态力学流场中的应用·····	乔 河 刘殿书 侯公羽等(787)
刘秀沟金矿成矿规律及其深部预测·····	孙丽娜 关子川 李天智(790)
采场锚索预加固设计方法·····	姚振巩 王洪江(793)
尾砂胶结充填体力学作用机理与应用·····	王 劼(797)
工矿区控制网平差与优化设计系统的研究·····	刘小生(802)

管理工程

论有色企业亏损要因及走出困境之途径·····	韦元基(806)
建立企业管理人员培训新机制·····	田尚琴(809)
遵循经济规律,促进土地市场发育·····	骆永正 兰小机(813)
《稀有金属材料与工程》的办刊思想与编辑部文化建设·····	石应江 殷为宏 孙洪志(816)
论科技成果价值评估·····	易 凌 林多贤(820)
车河选矿厂借技改提高经济效益的探索实践·····	苏思平(824)
大学学院一级科研管理工作的探讨·····	范柏祥(827)
设备维修体制改革的尝试·····	彭立志(830)
国际直接投资风险分析定量模型·····	王国顺 潘金城(833)
人工智能在材料设计中的应用·····	邱冠周 王海东 黄圣生(836)
中国传统的价值导向与当代大学生集体主义价值观的确立·····	李 东(841)

责任编辑:何学锋 黄劲松

固体氧化物燃料电池材料的发展前景

戴学刚

(中国科学院化工冶金研究所, 北京 100080)

摘 要 简要评述了固体氧化物燃料电池(SOFC)材料体系, 以及研究开发这一材料体系需要注意的一些关键技术问题。我国丰富的稀土资源可用于开发固体氧化物燃料电池材料, 同时具有较好的工业基础和研究实力, 这类材料在我国将具有广阔的市场。

关键词 发展 固体氧化物燃料电池 材料

固体氧化物燃料电池(SOFC)是以可传导氧离子的致密固体氧化物电解质薄膜两面涂以多孔的空气极(阴极)和燃料极(阳极)为基本结构的电化学连续发电装置, 工作温度一般为800~1 000℃。所用燃料为H₂和CO或可转化为H₂和CO的各种物质如天然气、煤气化气、沼气等, 氧化剂为空气。电池自身发电效率可达60%。由电池排出的高温废气可为燃气轮机所采用, 预计联合发电效率可达70%, 热力发电效率最高^[1]。如将燃料电池和燃气轮机及蒸汽轮机组成“三合一”发电形式, 发电效率会更高。加之其气体排放和噪音污染较低, 是高效、清洁的新型发电技术。

固体氧化物燃料电池发电技术未来可用于靠近用户的分散配置的热电联供电站和远离用户的大中型中心电站, 也可用于驱动车船的移动式电源。该技术还可应用于氧泵和氧传感器等产品的开发, 因此, 应用潜力巨大。

由于此技术具有广阔的应用前景以及环保和能源短缺的压力, 世界各国一直致力于此技术的研究与开发, 进入90年代研究工作出现了规模扩大、发展加快的趋势。处于技术领先地位的国家有美、德、日等国, 特别是美国的西屋电气公司(Westinghouse Electric Corporation)已在美国和荷兰分别建立了100 kW级示范电站, 其单电池寿命已达60 000 h。现该公司在美国政府支持下正联合美国数家公司及研究单位斥资2亿美元在美国建造一座商用概念

SOFC电站。与此同时也寻求在中国合作建立示范电站。以上这些成就显示SOFC技术即将进入实用化阶段。

固体燃料电池(包括其它种类的燃料电池)技术的快速发展刺激了我国燃料电池的研究, 目前涉足这一领域的研究所、大学及公司近百家, 而数年前则屈指可数。国家正在有计划、大规模地组织此方面的研究与开发工作。作为燃料电池的基础, 相关材料的研究与开发处于滞后状态, 要改变这种状况需要国家和产业部门共同努力。本文在评述固体氧化物燃料电池材料的基础上, 建议我国相关的研究机构和工业界共同开发这一重要领域。

1 材料体系

以SOFC技术要求为基础而形成相应的材料体系, SOFC材料体系以氧离子导体电解质为核心, 其它的材料与之匹配。对电解质的基本要求是: 高氧离子电导率, 很低的电子电导率; 高温下的相稳定性和化学稳定性; 与电极材料及联接材料热膨胀系数相近。对电极材料的基本要求是: 高电化学活性、高电导率, 与电解质界面反应小, 热膨胀性能匹配等。表1概括了目前研究较多的SOFC材料的组成、特点和尚存在的问题, 此表主要参考了Sakai的分析^[2]。事实上, 这一材料领域远大于表中所涉及的范围。

表 1 固体氧化物燃料电池材料

材料	基本组成	特点	存在问题
电解质	8% Y_2O_3 - ZrO_2 (YSZ)	常用的氧化物离子导体稳定, 高强度; 市售产品	
	7.5% Sc_2O_3 - ZrO_2	离子电导率比 YSZ 更高	高价格
	M_2O_3 - CeO_2 (M = Gd, Sm, Y)	离子电导率比 YSZ 更高, 适用中温 (<850 °C)	高温下电子导电致使性能下降
	$\text{La}_{0.8}\text{Sr}_{0.2}\text{Ga}_{0.8}\text{Mg}_{0.2}\text{O}_3$	离子电导率比 YSZ 更高, 中高温均适用	稳定性有待检验
燃料极	Ni-YSZ	常用的燃料极材料, 高催化活性, 低价格	
	Ru-YSZ	高催化活性, 高价格	高价格
空气极	(La, Sr) MnO_3	常用的空气极材料	高温下与 YSZ 长期接触有反应而引起性能下降
	(La, Sr) $_{1-x}\text{MnO}_3$	难以与 YSZ 反应	长期稳定性问题需检验
	(La, Sr)(M, Co) $_3$	混合导体; 高催化活性	与 YSZ 有一定反应
	(M = Fe, Mn)		
联接材料	Ni-Cr 系	易加工; 机械强度高, 低价格	膨胀系数较大; 不适合高温
	Fe-Cr 系		
	La(Cr, Mg) O_3	适合高温; 性能较合金为好	价格较合金高得多
	(La, M) CrO_3		
	(M = Sr, Ca)	适合高温; 性能较合金为好	价格较合金高得多
	(La, Sr)(Cr, M) O_3		
	(M = Sr, Ca)		

作为 SOFC 材料核心的固体电解质, 最为人们所关心的是其氧离子电导率。因为, 这一性质关系到电池的功率密度。图 1 显示了一些电解质的氧离子电导率与温度的关系^[3, 4]。由图可见, 各电解质的氧离子电导率随温度变化的趋势有所不同, 因此决定了电池的适宜温度区间。目前最为成熟且性能价格比最佳的体系是氧化钇稳定的氧化锆 (YSZ) 为基的电解质, 相匹配的阴极材料为铈掺杂的锰酸镧 (LSM), 阳极为 Ni-YSZ 金属陶瓷, 联接材料为铈掺杂的铬酸镧。这一体系更适合高温 (950 ~ 1000 °C)。在 1000 °C 下, 所制电池功率密度一般为 0.15 ~ 0.20 W/cm²^[5], 最高达到 0.60 W/cm²^[6]。 M_2O_3 - CeO_2 (M = Gd, Sm, Y) 电解质

虽具有较高的氧离子电导率, 但由于 Ce 的价态变化引起电子导电, 因而使其氧离子电导率大打折扣。如在 700 °C 下, 由 15% mol Y_2O_3 - CeO_2 的电解质所制电池功率密度仅为 19 mW/cm²^[7]。由于降低 SOFC 操作温度可降低对材料的要求, 并减少制作成本, 因此, 中温 SOFC (600 ~ 800 °C) 正成为各国 SOFC 研究的一个特点, 特别是 CeO_2 基电解质。另外两种高性能 SOFC 电解质材料特别引人注目: Sc_2O_3 - ZrO_2 基和 LaGaO_3 基电解质。在 1000 °C 下, 由 11% mol Sc_2O_3 - ZrO_2 所制电池的功率密度达到了 1.61 W/cm² 的极高值^[8]; 在 880 °C 下, 也达到了 1.00 W/cm² 的高值^[9]。由 LaGaO_3 基电解质所制电池的功率密度, 在

1000℃下, 达到了 1.00 W/cm^2 的高值, 在 800℃下达到了 0.44 W/cm^2 [10]。这两个体系的缺点是材料价格较贵(由 Sc_2O_3 和 Ga_2O_3 引起)。相比较而言, LaGaO_3 基电解质价格介于 $\text{Sc}_2\text{O}_3\text{-ZrO}_2$ 基和 YSZ 之间, 但性能又接近 $\text{Sc}_2\text{O}_3\text{-ZrO}_2$ 基电解质, 甚至在低温下还优于 $\text{Sc}_2\text{O}_3\text{-ZrO}_2$ 基电解质, 是有良好发展前景的材料。

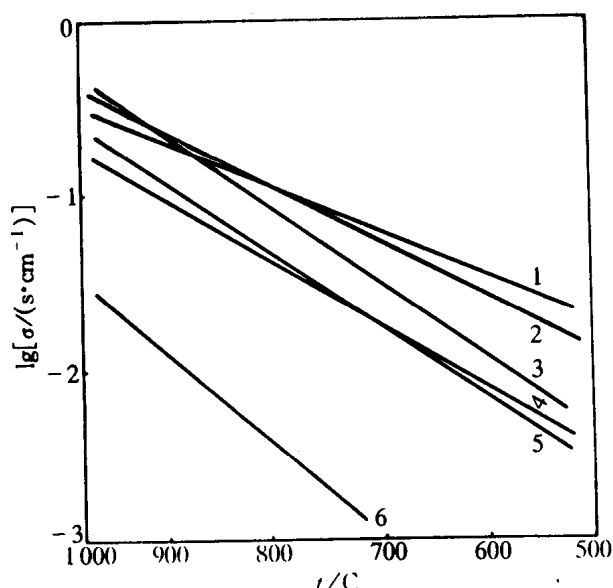


图1 固体氧化物电解质氧离子电导率与温度的关系

1—20.0mol $\text{Gd}_2\text{O}_3\text{-CeO}_2$; 2— $\text{La}_{0.9}\text{Sr}_{0.1}\text{Ga}_{0.8}\text{Mg}_{0.2}\text{O}_3$;
3—7.5mol $\text{Sc}_2\text{O}_3\text{-ZrO}_2$; 4—8.0mol $\text{Y}_2\text{O}_3\text{-ZrO}_2$;
5—9.0mol $\text{Yb}_2\text{O}_3\text{-ZrO}_2$; 6—15.0mol CaO-ZrO_2

2 有关的关键技术问题

发展固体氧化物燃料电池材料需要解决的一些关键技术问题有:

(1) 材料性能匹配;

(2) 基本原料(主要为粉体)性状, 如电解质与阴阳极“三明治”共烧结或分别烧结对原料粉体粒度及纯度的要求, 添加组分的影响;

(3) 烧结性能: 电解质膜层的致密度和电极层的孔隙度;

(4) 长期工作的稳定性和频繁升降温的影响。

响。

此外, 由所选目标产品不同和经济性角度考虑所引出的材料研究问题。

3 未来市场前景展望

固体氧化物燃料电池材料既可用于固体氧化物燃料电池, 也可用于氧传感器和氧泵(基于燃料电池的相反过程, 在电的作用下将水蒸汽分解为 O_2 和 H_2), 甚至可用于汽车废气净化器等高新技术产品, 市场潜力巨大, 因而未来对材料的需求是巨大的。技术经济分析表明, 如果 SOFC 以工业规模大批量生产, 其制作成本接近于工业往复式引擎发电机组的制作成本^[11]。因此, 未来 SOFC 发电技术在经济上可以与火电技术进行竞争。

我国有丰富的稀土资源可用于发展 SOFC 材料, 如果我国在这一重要的材料领域在资源优势的基础上, 也形成技术优势, 则会在未来的国际市场竞争中居于有利地位。

4 结束语

固体氧化物燃料电池是高效、清洁的电化学连续发电装置, 未来可用于大中小型电站和驱动车船的移动式电源, 市场潜力巨大。目前我国在这一领域尚待发展, 需要研究机构和产业部门共同努力。我国地域辽阔, 具有丰富的煤、天然气和沼气资源以及稀土资源, 电力需求大, 而在电力中占主要地位的火力发电, 其发电效率低、能源浪费大、环境污染严重。这些为固体氧化物燃料电池技术的发展提供了需求基础。

固体氧化物燃料电池材料的主要组分为稀土氧化物, 是稀土潜在的、具有发展前景的重要应用领域。与燃料电池相关的产品如氧泵和氧传感器及汽车废气净化器等也需要此类材料。我国现有较好的稀土工业基础和研究开发实力, 如今后能在这一重要的领域逐步形成技

术优势,则会对国经济持续稳定发展作出很大的贡献。

参考文献

- 1 Williams M C. In: Stimming U *et al* eds. Proc 5th Intern Symp Solid Oxide Fuel Cells(SOFC-V), 1997, 3.
- 2 Sakai N. *Ceramics*, 1995, 30(4):329.
- 3 Yamamoto O, Takeda Y, Imanishi N *et al*. In: Recent Advances in Fast Ion Conducting Materials and Devices, World Science Publishing Company, Singapore, 1990:117.
- 4 Furutani Y, Ishihara T, Nishiguchi H *et al*. In: Stimming U *et al* eds. Proc SOFC-V, 1997, 1086.
- 5 Bessette N F, George R A, *Denki Kagaku, Electrochemistry*, 1996, 6:602.
- 6 Drenckhahn W, Greiner H and Ivers-Tiffée E. *Siemens Power Journal*, 1994, 4:36.
- 7 Yahiro H, Baba Y, Eguchi Koichi *et al*. *J Electrochem Soc*, 1988, 135(8):2077.
- 8 Mizutani Y, Tamura M and Kawai M: *Solid State Ionics*, 1994, 72:271-275.
- 9 Ishi T and Tajima Y. *J Electrochem Soc*, 1994, 141(12):3450.
- 10 Ishihara T, Honda M, Nishiguchi H *et al*. In: Stimming U *et al* eds. Proc SOFC-V, 1997, 301.
- 11 Itoh H, Mori M, Mori N *et al*. *Power Sources*, 1994, 49:315.

(编辑 黄劲松)