

'94 秋季中国材料研讨会 IV

材料加工和研究新技术

中国材料研究学会

C-MRS

1

化学工业出版社

'94 秋季中国材料研讨会会议论文集

'94 C-MRS Materials Conference Proceedings

第Ⅳ卷

材料加工和研究新技术

Vol. IV New Techniques for Materials
Processing and Research

第一分册 超塑性及超塑成形、反应加工新技术、
异材连接与封装技术

海锦涛 张少卿 马莒生

中国材料研究学会 (C-MRS) 编

化学工业出版社

· 北 京 ·

(京)新登字039号

图书在版编目(CIP)数据

材料加工和研究新技术: 94'中国材料研讨会论文集/
中国材料研究学会组织编写. -北京: 化学工业出版社,
1995.8

ISBN 7-5025-1513-5

I. 材… II. 中… III. ①工程材料-制造-学术会议-文集
②材料科学, 新技术-科学研究-文集 IV. TB39-53

中国版本图书馆CIP数据核字(95)第09243号

出版发行: 化学工业出版社(北京市朝阳区惠新里3号)

社长: 俸培宗 总编辑: 蔡剑秋

经 销: 新华书店北京发行所
印 刷: 有色金属研究总院印刷厂
装 订: 有色金属研究总院印刷厂
版 次: 1995年6月第1版
印 次: 1995年6月第1次印刷
开 本: 787×1092 ¹/₁₆
印 张: 32 ³/₄
字 数: 838千字
印 数: 1-600
定 价: 135元

(1分册65元; 2分册70元)

'94 秋季中国材料研讨会论文集

编辑委员会

顾问：师昌绪 严东生

主任：李恒德

副主任：韩雅芳 吴伯群

委员：（按姓氏笔划排列）

马莒生	甘子剑	刘伯操	刘家浚	李诗卓
朱鹤孙	阮雪榆	邹广田	吴人洁	吴伯群
周 廉	周本濂	陆盘金	姚 熹	姜德生
张兴栋	张允什	张传厉	张荟星	张少卿
张锐生	俞耀庭	侯静泳	柳襄怀	闻立时
胡壮麒	胡黎明	柯 伟	钟家湘	袁润章
徐 僖	徐 懋	海锦涛	章靖国	屠海令
韩雅芳	熊炳昆			

统编人员：侯静泳 韩雅芳

责任编辑：徐 蔓 夏叶清 管德存

前 言

本书是中国材料研究学会 (C-MRS) 组织编写的《'94秋季中国材料研讨会会议论文集》之一。“'94秋季中国材料研究会”于1994年11月至15日在北京召开。这是我国材料界最盛大的一次跨学科的学术交流会,参加会议的有来自国内102所高等院校、75个科研院所、15个工矿企业及有关领导机关的材料科学家、企业家共1000余人。中国科协主席、中国工程院院长朱光亚到会作了重要讲话,我国材料界的著名科学家师昌绪、严东生、林兰英、钱人元、葛庭燧等应邀在大会上作了学术报告。日本、韩国、美国、法国、英国、澳大利亚等国家的材料科学家也应邀出席了大会并作了学术报告。会议共收到论文1500余篇,除26位在大会上作综合性报告外,另分23个分会进行了学术交流。23个分会分别为:

- | | |
|-----------------------|---------------------|
| 1. 智能(机敏)材料 | 13. 超塑性与超塑成形 |
| 2. 梯度材料 | 14. 喷射成形(工艺)技术 |
| 3. 新型工程塑料 | 15. 反应加工新技术 |
| 4. 超导(高、低 T_c)材料 | 16. 摩擦学材料 |
| 5. 生物医用材料 | 17. 材料的腐蚀与防护 |
| 6. 超硬材料 | 18. 异材连接与封装技术 |
| 7. 薄膜材料与薄膜技术 | 19. 稀土元素在材料中的应用 |
| 8. 储氢材料 | 20. 计算机在材料研究与工程中的应用 |
| 9. 非晶态、急冷与快速凝固材料 | 21. 材料研究新技术 |
| 10. 新型轻金属材料 | 22. 超细材料与技术 |
| 11. 富勒烯球(C_{60} 等) | 23. 材料科学前沿 |
| 12. 束流表面改性 | |

本次大会的论文涉及面广,学术水平较高,反映了在上述领域内我国材料研究的最新成就。所有论文均按照规定的评审程序和正式的出版要求进行了审查,最终收集在本论文集的论文共1012篇,分四卷,10分册。

第一卷为新型功能材料(含三个分册);第二卷为低维材料(含二个分册);第三卷为新型材料与表面技术(含三个分册);第四卷为材料加工和研究新技术(含二个分册)。

本书对从事材料开发和研究的科学家、工程技术人员、大专院校师生以及有关领导机关的人员均有重要的参考价值。

全书四卷论文集,作者几千人,汇编成书正式出版尚属首次,缺乏经验,且成书时间甚为紧迫,诸多作者联系不便,不足之处在所难免,祈请各界同仁鉴谅并予以指正。考虑到材料科学和应用技术发展日新月异,拟在日后每召开一次研讨会,即将会议交流论文汇集成册,正式出版,此举还望材料界有关人士予以大力支持。

责任编辑：徐 蔓 夏叶清 管德存

《材料加工和研究新技术》卷包含的内容主要有：超塑性及超塑成形、反应合成与加工技术、异材连接与封装技术、计算机在材料研究与工程中的应用、材料研究新技术及材料科学前沿。其中讨论了超塑性机理、力学特征及其应用；自蔓延合成理论；工艺发展现状、应用及展望；异材连接技术、界面分析技术和高密度封装；新型微观分析方法、材料仿生设计与实践；材料评价新方法及材料中的现代物理问题；材料研究领域中有综合性的展望等。

194 秋季中国材料研讨会会议论文集 分卷及各分册名称

第Ⅰ卷 新型功能材料

- 第一分册 智能(机敏)、梯度和储氢材料
- 第二分册 新型工程塑料及生物医用材料
- 第三分册 超导材料及富勒烯球

第Ⅱ卷 低维材料

- 第一分册 薄膜材料与薄膜技术
- 第二分册 非晶态、快凝材料与超细材料及其技术

第Ⅲ卷 新型材料及表面技术

- 第一分册 新型轻金属材料及稀土元素的应用
- 第二分册 金属材料的表面改性及腐蚀、防护
- 第三分册 超硬材料与摩擦学材料

第Ⅳ卷 材料加工和研究新技术

- 第一分册 超塑成形、反应合成与加工及异材连接
- 第二分册 材料研究新技术及材料科学前沿

ISBN 7-5025-1513-5



9 787502 515133 >

ISBN7-5025-1513-5/Z · 56

定价：135 元

(1 分册 65 元；2 分册 70 元)

责任编辑：徐 蔓 夏叶清 管德存

《材料加工和研究新技术》卷包含的内容主要有：超塑性及超塑成形、反应合成与加工技术、异材连接与封装技术、计算机在材料研究与工程中的应用、材料研究新技术及材料科学前沿。其中讨论了超塑性机理、力学特征及其应用；自蔓延合成理论；工艺发展现状、应用及展望；异材连接技术、界面分析技术和高密度封装；新型微观分析方法、材料仿生设计与实践；材料评价新方法及材料中的现代物理问题；材料研究领域中有综合性的展望等。

194 秋季中国材料研讨会会议论文集 分卷及各分册名称

第Ⅰ卷 新型功能材料

- 第一分册 智能(机敏)、梯度和储氢材料
- 第二分册 新型工程塑料及生物医用材料
- 第三分册 超导材料及富勒烯球

第Ⅱ卷 低维材料

- 第一分册 薄膜材料与薄膜技术
- 第二分册 非晶态、快凝材料与超细材料及其技术

第Ⅲ卷 新型材料及表面技术

- 第一分册 新型轻金属材料及稀土元素的应用
- 第二分册 金属材料的表面改性及腐蚀、防护
- 第三分册 超硬材料与摩擦学材料

第Ⅳ卷 材料加工和研究新技术

- 第一分册 超塑成形、反应合成与加工及异材连接
- 第二分册 材料研究新技术及材料科学前沿

ISBN 7-5025-1513-5



9 787502 515133 >

ISBN7-5025-1513-5/Z · 56

定价：135 元

(1 分册 65 元；2 分册 70 元)

目 录

超塑性及超塑成形

世界超塑性及超塑成形研究的新动向

-----海锦涛 白秉哲 张立斌 王 勇 陆 辛 王燕文 闵乃燕 (1)

谈超塑与常规塑性理论与应用的接轨-----海锦涛 白秉哲 (6)

金属间化合物合金超塑性及其应用研究的进展-----王 斌 贾天聪 白秉哲 (11)

α -Ti 金属间化合物双相 Ti-(Co, Ni)-Al 合金的超塑性行为

-----杨王珏 刘 庆 陈国良 (17)

热等静压态 P/M Rene'95 合金等温变形研究----崔 健 刘建宇 李成功 颜鸣皋 (23)

高应变速率下 α -钛的一种特殊超塑变形行为

-----杨 扬 张新明 李正华 李青云 (29)

Ti-24Al-14Nb-3V-0.5Mo 合金超塑性的研究----王 斌 贾天聪 邹敦叙 仲增墉 (34)

SiCp/LY12 复合材料超塑变形时的最佳条件

-----李森泉 李泽林 唐才荣 杨孟洲 汪大成 (39)

Y-TZP 陶瓷超塑性变形-----林兆荣 徐 洁 张中元 童国权 丘 泰 (43)

机械合金化 LY12 合金的高应变速率超塑性行为

-----王尔德 李志超 李志民 陈 宇 梁国宪 (47)

稀土元素对 8091 铝锂合金超塑性变形特性的影响-----王富耻 吴 兵 (52)

碳化硅颗粒增强 2618 铝基复合材料的超塑性-----张保良 魏 铮 孙尚臣 (57)

Fe₃Al 基合金的超塑性变形能力及特征

-----单爱党 陈明伟 郇定强 林栋梁 (61)

FeAl 合金超塑性现象的研究-----郇定强 单爱党 刘 毅 林栋梁 (65)

钢的恒温超塑性焊接-----杨蕴林 李 志 席聚奎 (71)

制造和塑性加工方法对金属基复合材料性能的影响及其超塑成形

-----张立斌 海锦涛 王燕文 张 雷 张宝良 魏 征 卜庆新 (76)

国产细晶 7475 板材超塑性工艺性能试验研究-----朱义元 毛文锋 宋飞灵 (80)

金属超塑性锻粗变形力的工程计算-----胡士廉 (85)

倾斜面间超塑性锻压变形力的计算-----胡士廉 (91)

超塑胀形壁厚均匀性实验研究-----王长文 吴德忠 曲世彤 王仲仁 (97)

超塑性单向位伸的广义本构方程-----宋玉泉 钟凤兰 (102)

超塑变形的特征及其本构关系-----金泉林 (106)

恒温相变超塑性现象与模型-----阳永春 (114)

用不等厚板超塑胀形壁厚均匀半球件有限元分析

-----王长文 赵庆云 张凯锋 王仲仁 (121)

铸态 TC11 合金等温压缩变形中显微组织变化-----白秉哲 杨鲁义 张柏清 (123)

反应加工新技术

自蔓延高温合成与制备技术研究进展-----袁润章 傅正义 (130)

自蔓延高温合成法 (SHS) 基础理论研究进展-----赖和怡 唐 清 殷 声 (136)

SHS 技术的发展和粉末冶金-----殷 声 (144)

自蔓延高温合成的应用和问题-----张树格 (149)

自蔓延高温合成 Si_3N_4 研究的新进展-----	葛昌纯	李江涛	夏元洛	陈利民	(155)
金属液相在SHS过程中的作用机理----	傅正义	王为民	王浩	梅炳初	袁润章 (160)
TiC-xFe系SHS燃烧波速率模型研究---	郭志猛	贾成厂	蔡静	魏延平	钟吉华 (166)
SHS螺旋式燃烧的计算机模拟					
-----	贾成厂	郭志猛	张召伟	钟吉华	殷声 赖和怡 (170)
燃烧合成一致密化技术的研究与发展-----	唐清	殷声	赖和怡		(174)
自反应——熔铸技术制备金属基复合材料----	梅炳初	禹元蔚	王为民	袁润章	(181)
H_2SO_4 -GIC的电化学合成及其应用研究					
-----	康飞宇	冷扬	张统一	沈万慈	刘英杰 刘秀瀛 (187)
XD法Al/TiB ₂ 原位自生复合材料反应合成及显微组织的研究					
-----	李邦盛	郭景杰	李庆春	董宏伟	(193)
XD合成TiB ₂ /NiAl复合材料的研究-----	陶春虎	王守凯	张少卿	顾鸣皋	(198)
NiAl及NiAl-TiB ₂ 复合材料的热压放热反应合成及致密化研究					
-----	邢占平	郭建亭	李谷松	胡壮麒	安阁英 (204)
自蔓延高温合成TiAl和TiAl-TiB ₂ 材料的研究					
-----	唐清	殷声	叶宏煜	赖和怡	(210)
加热速度对Ni ₃ Al/TiC复合材料燃烧合成的影响					
-----	梅炳初	禹元蔚	傅正义	袁润章	(216)
Ni ₃ Al电热爆合成及与Ti、NiCr合金的原位焊接-----	果世驹	党紫久	赖和怡		(223)
金属间化合物基过滤器的自蔓延高温合成-----	果世驹	罗晨波	赖和怡		(231)
TiB ₂ -TiC-Al ₂ O ₃ -Fe复合材料的自蔓延高温合成-----	马晓蓉	张树格			(237)
氮化钛和镍金属陶瓷复合材料的烧结					
-----	李树杰	李雨平	J.H.Maas	J.Boeijssma	B.H.Kolster (242)
B、Ti对Ni ₃ Si基金属间化合物燃烧合成过程及组织结构的影响					
-----	严新炎	张树格	孙国雄		(248)
自蔓延高温合成AlN+ZrN+Al ₃ Zr复合材料-----	李江涛	夏元洛	葛昌纯		(254)
自蔓延高温合成氮化铝的研究-----	陈克新	夏元洛	葛昌纯		(257)
自蔓延高温合成Mg ₃ N ₂ -----	李江涛	夏元洛	葛昌纯		(261)
自蔓延高温合成Si ₃ N ₄ -MgSiN ₂ -----	李江涛	夏元洛	葛昌纯		(265)
SHS反应在金刚石工具材料中的应用-----	殷声	宋月清	秦喜杰	赖和怡	(268)
超硬材料的超高压反应烧结-----	殷声	郭志猛	文涛	赖和怡	(273)
TiC基钢结硬质合金的反应烧结-----	郭志猛	黄俾	张召伟	魏延平	(278)
自蔓延高温合成(SHS)TiC-Al ₂ O ₃ 陶瓷的显微结构与力学性能					
-----	唐清	殷声	赖和怡		(282)
TiC-TiB ₂ -Al ₂ O ₃ 复相陶瓷的燃烧合成					
-----	钟吉华	殷声	魏延平	段辉平	郭志猛 赖和怡 (288)
WC-Al ₂ O ₃ 复合陶瓷材料的燃烧合成研究-----	李李泉	张树格			(293)
以Ti为添加剂的Cu-Ti-B复合材料的自蔓延高温合成					
-----	郭丽斌	李江涛	陈利民	葛昌纯	(299)
自蔓延高温合成(SHS)TiCN粉末-----	任伟	王声宏	张荣生	郭莹辉	(304)
C-T复合钢管研究-----	黄铁枢	黄腾政	崔玉梅	步丰满	(310)
SHS铝热—离心法制备内衬陶瓷复合钢管过程中的燃烧特性					

-----柳牧殷声郭志猛赖和怡	(313)
SHS—离心法制备不锈钢内衬复合钢管-----段辉平殷声柳牧赖和怡	(319)
SHS铝热离心法制备内衬金属陶瓷的复合管-----柳牧殷声赖和怡	(324)
SiO ₂ 添加剂对SHS铝热—离心法制备的复合钢管的陶瓷层组织和耐蚀性能的影响	
-----柳牧殷声郭志猛赖和怡	(328)
钢表面梯度碳化铬SHS熔覆层的研究-----林立薛群基	(334)
用非金属还原法在钢件表面制取钒碳表层合金的研究-----王飙张自华	(340)
机械合金化中TiC的自维持反应生成研究-----刘志光郭建亭胡壮麒	(346)
微波合成BaTiO ₃ 陶瓷粉料的研究---李永伟叶能刘韩星张立龙欧阳世翥	(351)
爆炸压实+SHS制备Ti/Al ₂ O ₃ 梯度功能材料反应过程和机理研究	
-----李益民郑子樵	(357)
SiCp/2024复合材料粉末爆炸喷涂组织结构研究-----车成卫杨让解子章	(361)
作为热源的Ti-B、Ti-C反应热力学	
-----吴丰李磊徐荣栏张志广林德春肖海文	(367)
粉末爆炸烧结材料参数效应数值研究-----张德良王晓林	(371)
红外光纤用高纯氯化物的制备研究-----于泉春马燕萍	(376)
离心SHS陶瓷衬管涂层中Al ₂ O ₃ 与ZrO ₂ 初晶形貌的理论探讨	
-----王克智李俊张曙光	(381)
异材连接与封装技术	
Ti/Al ₂ O ₃ 界面反应的俄歇电子能谱研究-----王佑祥崔玉德顾詮陈新	(385)
用MCS ⁺ 技术研究Ti/Al ₂ O ₃ 界面的组分分布-----陈新王佑祥	(391)
Ti/ α -Al ₂ O ₃ 界面反应的研究-----顾詮王佑祥崔玉德陈新陶琨	(397)
AlN陶瓷衬底的SIMS和XRD测量-----陈新陈春华王佑祥	(405)
铜(Cu)-氮化铝(AlN)双晶体的本征界面(111) _{Cu} /(0001) _{AlN} ---杜军S. Hagege	(410)
微波管用BN输能窗的封接研究-----张美玲胡美华鲁燕萍	(415)
大气中的双金属扩散焊接新工艺的研究-----宋金山袁廷钟陈洪冰杨佳荣	(420)
半导体芯片载体的换热中心的研究	
-----苗庆海张德骏史威王家俭张兴华冯彩虹	(426)
AlN陶瓷与玻璃的相互作用-----王荣山孙文珍王英华李恒德	(431)
AlN陶瓷多层基板的研究----梁彤翔田民波王英华李恒德武庆兰阎允杰	(434)
Cr/SiO ₂ 薄膜界面扩散反应研究-----朱永法苗冬曹立礼阎允杰武庆兰	(439)
金属离子注入的氧化铝的表面金属化	
-----张济忠马子龙常军陶琨张孝吉林耀军张荟星	(444)
FeNi42合金引线框架蚀刻成型工艺研究-----马莒生安白	(448)
金属与玻璃气密性封接的工艺问题-----黄乐马莒生唐祥云张百林	(457)
铅基快淬焊料与电子焊膏的比较-----黄乐唐祥云马莒生张五信	(460)
彩色显像管用销钉与玻屏封接界面研究-----汪刚强唐祥云马莒生	(465)
彩色显像管中金属与玻璃封接的氧化膜质量控制	
-----汪刚强安白马莒生唐祥云尤良	(470)
SMT铜—可伐连接焊点热变形的云纹干涉法研究	
-----傅承诵吕建刚唐祥云李云卿	(474)

Si的金属化及金属化层的结合强度-----	何建宏	安 白	马莒生	唐祥云	(479)
玻封合金板材的表面偏聚-----	齐芸馨	曹立礼	朱永法	马莒生	(482)
钢—铝模型凝固焊焊接冶金学研究					
-----	周世权	丁振兵	陈光南	陈士民	郑芳伟
倒装焊芯片的发展及焊接技术-----	况延香	刘 玲	范继长	曹 译	(486)
ALN瓷的制备方法-----	杜 帅	高陇桥	刘 征	范继长	(490)
非氧化物陶瓷—金属接合及其机理-----	高陇桥	刘 征	范继长	曹 译	(496)
PGA257金属化研究-----	孟庆林	周世平	曹 译	范继长	(500)
封装技术的发展状况及对支撑条件的要求-----	孟庆林	周世平	曹 译	范继长	(508)

世界超塑性及超塑成形研究的新动向

——'94 先进材料超塑性国际会议简介

海锦涛 张立斌 白秉哲

王勇 陆辛 王燕文 闵乃燕

超塑性学术委员会

摘 要 本文简要介绍 1994 年莫斯科第五届国际超塑性学术会议情况,以及当前世界超塑性及超塑成形研究的动向。

关键词 超塑性 综述

国际超塑性学术会议 (ICSAM) 始于 1982 年,每 3 年召开一次。第 5 届国际超塑性学术会议——'94 先进材料超塑性国际会议于 1994 年 5 月 24 日至 26 日在莫斯科召开。世界上有 16 国家及地区 150 多人参加了此次超塑盛会,其中有美国、俄罗斯、日本、中国、印度、英国、法国、德国、韩国、波兰、台湾等,会议共收到论文摘要 158 篇,有近 140 篇学术论文在会议期间进行了交流。我国交寄论文 22 篇,十位学者参加了会议,海锦涛同志作为本届国际会议组织委员会委员参加了会议筹备工作。会议决定下一届 (1997 年) 世界超塑会议在印度召开。

这次大会共分 8 个专题,即超塑性基础理论,毫微细晶 (纳米) 材料超塑性,陶瓷材料超塑性,金属间化合物的超塑性,金属基复合材料超塑性,金属超塑性,超塑性应用,超塑成形工艺、流变学、力学基础进行了研讨,表 1 是第 4 和 5 届国际超塑性学术会议各国发表的论文情况,表 2 是 1~5 届国际超塑性学术会议论文统计。从表 1、2 可以看到,目前超塑性研究的格局仍与第 4 届大致相同,先进材料的超塑性的研究仍是方兴未艾,另外毫微细晶粒 (纳米) 材料的超塑性论文数量增加,但金属材料的超塑性研究仍为主流。美国、俄罗斯、日本仍是超塑性研究的大国,我国在世界上也有相当的地位。

表 1 ICSAM-91 和 ICSAM-94 各国发表论文情况

ICSAM		日本	美国	前苏联	中国	英国	德国	印度	其它
第四届 大阪 (135)	各国论文数	54	25	17	13	7	5	4	10
	占总论文的 百分比	40%	18.5%	12.6%	9.6%	5.2%	3.7%	3%	7.4%
第五届 莫斯科 (158)	各国论文数	17	26	67	22	6	2	5	13
	占总论文的 百分比	10.7%	16.5%	42.4%	13.9%	3.8%	1.3%	3.2%	8.2%

表2 各届国际超塑性学术会议论文分类统计

届数/论文总数	金属及其复合材料	陶瓷及其复合材料	金属间化合物
1/77	77 (100%)	0	0
2/17	16 (94%)	1 (6%)	0
3/95	90 (94.7%)	5 (5.3%)	0
4/135	111 (82.2%)	18 (13.3%)	6 (4.4%)
5/158	131 (82.9%)	19 (12.0%)	8 (5.1%)

超塑性研究总体上分为理论研究与应用研究两个方面。理论研究包括变形机理、材料、力学、计算机模拟等分支，应用研究主要是超塑性成形的工艺与设备的研究。

经过各国学者三十几年来的工作，机理与力学的研究似乎到达了这样的水平——现有的理论已基本发展完备，例如在变形机理方面，晶界滑动是主要机制似乎已为大多数研究者所接受，并用来合理地解释了大部份超塑性现象，再进一步研究界面的结构、晶界位错的运动规律等受到了当前实验手段的限制，而且这些内容也进入了超塑性研究的一个小的分支。

继六十、七十年代锌合金、铝合金、钛合金超塑性研究高潮之后，超塑性的研究重点转向了新的领域。超塑性研究的几个重点发展方向：

1. 陶瓷、金属基复合材料、金属间化合物等先进材料的超塑性研究。这是因为这些材料具有若干特殊的优越性能及特殊的应用价值，但是其共同的特点是加工性能差，开发其超塑性显然可以提供一条方便、有效、经济的成形加工途径。许多种金属间化合物、金属基复合材料和陶瓷已被证明可以具有超塑性，并且得到了不亚于金属的拉伸变形，这次第5届国际超塑性学术会议上有关这方面的论文近40篇，占总论文数的四分之一。特别是近年来陶瓷材料超塑性研究获得了突破性进展，美国著名的超塑性学者 Langdon 博士称“陶瓷材料超塑性的获得，似乎标志着新石器时代的到来。”在金属材料中存在的组织超塑性和相变超塑性，在陶瓷材料中也已经被证明存在，但从工艺角度来看，研究的着重点是组织超塑性。同金属材料组织超塑性不同，陶瓷材料除了具备经典超塑性条件之外，其没有晶间脆性是很重要的，这直接影响其超塑性行为。陶瓷材料的晶粒尺寸要比金属材料的晶粒尺寸小得多，主要是因为其制造工艺方法以及其晶界迁移率低，这表明了陶瓷材料的超塑变形的潜力，表3是近年来部分陶瓷材料超塑性研究成果。从表3可以看到陶瓷材料的晶粒尺寸都很细小，一般 $\leq 0.5\mu\text{m}$ ，最大也不超过 $3\mu\text{m}$ ，这与超塑性金属材料中晶粒尺寸形成对照。按金属材料超塑性理论，晶粒尺寸减小将导致最佳超塑应变速率提高，那么晶粒尺寸非常细小的陶瓷材料将呈现最佳超塑性的应变速率可能相当的高。但事实上，表3中的最佳应变速率通常不高于 $10^{-1}/\text{s}$ ，个别为 $10^{-3}/\text{s}$ 。但是超塑性陶瓷材料的应变速率敏感性指数(m 值)较高，一般在0.5~1范围内。陶瓷材料超塑性的获得，还拓宽了超塑性的研究范围，即从金属材料扩展到非金属材料。金属间化合物的超塑性列于表4。根据金属间化合物的原始显微组织，其超塑性可分为两种不同类型，(1)单相超塑性，如 $\text{Fe}_3(\text{Al}, \text{Si})$ 。(2)双相超塑性，如 $\text{Ni}_3\text{Al}+\text{Cu}+\text{Zr}$ 合金等。金属间化合物的单相超塑性与金属、陶瓷材

料的组织超塑性相比, 有两点重要区别, 一是在金属间化合物中, 甚至在原始晶粒尺寸很大的情况下也可得到超塑性, 其二是在单相超塑性起重要作用的是晶内位错运动。金属基复合材料的超塑性列于表 5。

表 3 晶间无明显非晶相的陶瓷的组织超塑性

材料	原始晶粒尺寸 (μm)	温度 ($^{\circ}\text{C}$)	试验状态	m 值	应变速率 (1/S)	延伸率% 或最大应变
UO_2	2	1350	压缩	~ 1	$\sim 10^{-3}$	58.6
MGO	0.1~0.4	1054	压缩	~ 0.83	$\sim 10^{-2}$	>80
Al_2O_3 (+0.05%MGO)	0.75	1450	压缩	~ 0.75	$\sim 10^{-6}$	>39
δ -sic (+1.5%Al)	1.5~2.8	1900	压缩	~ 1	$\sim 10^{-4}$	>40
Al_2O_3 (-0.25%MGO)	1.0	1420	压缩	—	$\sim 10^{-4}$	>45
Y-TZP *	0.3~2.2	1450	压缩	~ 0.5	$\sim 10^{-4}$	>78
Y-TZP	0.3	1450	拉伸	~ 0.5	$\sim 10^{-4}$	>120
Y-TZP/20% Al_2O_3	0.9	1499	压缩	~ 0.53	$\sim 10^{-4}$	>84
BaTiO_3	0.45	1150	压缩	0.5	$\sim 10^{-4}$	>39
Y-TZP	0.5	1297	压缩	—	10^{-5}	39
Y-TZP/20% Al_2O_3	~ 1	1450	压缩	0.5~1.0	10^{-4}	39
Y-TZP/20% Al_2O_3	~ 0.5	1450	拉伸	~ 0.5	10^{-4}	>200
Y-TZP/20% Al_2O_3	0.5	1650	拉伸	~ 0.5	10^{-3}	500

* 3mol% Y_2O_3 +稳定的正方 ZrO_2

现代先进材料的超塑性及超塑成形技术的开发、研究是世界瞩目的研究课题, 在这方面我国起步较晚, 90 年以前各届全国超塑学术会议等全国性会议上尚未见到关于此类材料超塑性方面的论文或报导。91 年第 5 届全国锻压年会和 92 年第 5 届全国超塑性学术会议上首次有金属基复合材料和金属间化合物等方面的超塑性研究论文。我国 86 年开始 (863 计划) 进行高技术材料超塑性的研究, 已研究了 Ni_3Al 金属间化合物、Y-TZP 陶瓷、Y-TZP/ Al_{12}O_3 陶瓷复合材料、金属基复合材料等方面的超塑性, 并取得了一定的成果。

表 4 金属间化合物的组织超塑性

材料	晶粒尺寸 (μm)	温度 ($^{\circ}\text{C}$)	试验状态	m 值	应变速度 (1/S)	最大应变 (%)
Fe_3 (Al, Si)	100	850	拉伸	—	10^{-4}	100
$\text{Ni}_3\text{Al}/\text{Y}$	10	1100	拉伸	—	$\sim 10^{-3}$	638
Ni_3Al	1.6	700	拉伸	>0.4	10^{-4}	160
$\text{Ni}_3\text{Al} + \text{Cr}$	10	1000	拉伸	~ 0.5	$\sim 10^{-3}$	100
$\text{Ni}_3\text{Al} + \text{Cr} + \text{Zr}$	10	1000	拉伸	~ 0.5	$\sim 10^{-3}$	280
TiAl	60	1100	拉伸	0.2~0.3	10^{-3}	>100
$\text{Ni}_3\text{Si}/\phi$	15	1080	拉伸	0.5	$\sim 10^{-3}$	650

2. 材料超塑性变形速率的提高, 变形温度的降低。超塑性变形一般是在较高的温度及较低的速率下进行的, 若能降低温度、提高变形速率, 可以在超塑性成形中节约能源、提高生产效率, 从而增加其经济效益。虽然人们更希望得到这样的材料, 即在较低的温度和较高的变形速率下成形之后, 经过处理消除超塑性组织, 从而提高该材料的使用性能 (如: 高强度、抗蠕变性能等)。

表5 金属复合材料的超塑性

材料	温度 (°C)	延伸率%	应变速率 1/s	m 值
SiCw/2124 20%vol	475~550	~300	3.3×10^{-3}	~0.33
SiCw/2024 20%vol	100~450	~300	5×10^{-4}	1.0
SiCw/6061 20%vol	100~450	1400	1.7×10^{-4}	1.0
SiCw/7475 12~15%vol	~520	350	2×10^{-4}	>0.5
Si ₃ N ₄ w/6061 20%vol	545	600	2×10^{-1}	0.6
βSi ₃ N ₄ w/7064 20%vol	545	300	2×10^{-1}	0.4
Si ₃ N ₄ w/6061	565	620	—	—
SiCp/2014 15vol	480	349	4×10^{-4}	0.4
SiCp/7475 15vol	515	310	2×10^{-4}	0.38
Si ₃ N ₄ p/6061 20%vol	545	450	$10^{-1} \sim 10$	—
SiCp/PM64 10~15%	516	450	2×10^{-4}	>0.5
βSi ₃ N ₄ w/Zn-22AL 13%	250	80	5×10^{-1}	0.24
βSi ₃ N ₄ w/Zn-22AL 0.5~8%	200	200~30	2×10^{-1}	—
SiCw/2124 20%vol	525	240	2×10^{-1}	0.5

对于金属材料来说,提高超塑变形速率和降低变形温度的有效措施是细化晶粒,当晶粒尺寸减小后,超塑流动速度就可以增加,具有纳米级晶粒材料的超塑性变形速率可以比一般细晶材料(若干微米)高3至4个数量级。关于这方面的研究已取得了相当进展。最初是在SiCw/Al复合材料,后来又在机械合金化铝合金中发现高应变速率超塑性。例如,在 3×10^{-1} 1/s条件下, SiCw/Al 2124、(含SiCw 20vol%)复合材料可获得300%的延伸率;在0.1—1 1/s条件下, βSi₃N₄/Al 2124、αSi₃N₄/Al 7064、βSi₃N₄/Al 6061等复合材料也可呈现超塑性;具有极细晶粒的机械合金化Al 9021(晶粒尺寸 $\sim 0.5 \mu\text{m}$),在高达20 1/s的应变速率条件下,可以实现超塑性;机械合金化铝合金Al 9021在50 1/s和100 1/s的高应变速率条件下,可以分别获得1000%和700%的高延伸率。在本次会议上有关纳米细晶材料超塑性论文8篇。在以上两个方面的研究中,美,俄,日具有显著的优势,在五十篇总数中,有三十五篇文章出自美、日、俄等国的作者。我国在以上两个方面的发展,从整体上看是比较落后的,但在个别材料,个别问题上有一些独到之处。我国的基本研究条件还比较落后,例如在实现晶粒细化的设施方面。近几年来以上方面的研究普遍得到重视,确实给超塑性研究带来了生机。

3. 把超塑性原理应用于现有的热塑性加工工艺,即非最佳超塑状态的应用,这将大大地扩展超塑性的应用领域。

虽然我国在上述两个方面的研究尚落后于先进工业国家,但并不表明先进国家的研究工作完美无缺、我国的超塑性研究全盘落后。总的来说,国际上超塑性研究的目标并不十分明确。例如,本来为了提高生产效率,降低生产成本而提倡提高超塑性成形的速率,然而目前似乎高速度成为一种追求的指标。原来需用几个小时完成的超塑成形只用几秒完成仍不满足,还要争取用几分之一、几十分之一、甚至几百分之一的时间来完成。然而为了达到这样的目标,就要将材料的晶粒处理得很细(几个纳米),在材料处理中要花费大量的能源及人力,不仅不能降低成本,反而大大地增加了开支。当然作为理论问题仍然需要花

费一定的精力去研究这方面的现象规律及机理，但是超塑性是一种具有很强应用性的科学技术，面向生产应用应当是其主要的发展方向。

除了速率、温度因素之外，超塑变形对材料显微组织的苛刻要求也是对超塑性技术推广应用的一个大障碍。几十年来，人们一直把超塑性视为一种“特殊的性能”，因此要采用特殊的材料，即材料具有严格的“均匀等轴细晶”组织，几乎整套超塑性理论——包括材料、机理、力学等，都是建立在这样一种材料的基础之上的，在超塑性整套理论上表现出与常规塑性理论的严重脱节。

早在八十年代末，我国学者就提出并着手进行探索采用供货态工业合金进行超塑成形，即“吃粗粮、干细活”的指导思想。因为按经典超塑性理论的要求，我们从工厂或市场上得到的材料往往不符合超塑变形的组织条件，为了达到这一条件，就往往需要对材料进行繁杂的处理，这些处理中的耗费往往抵消了超塑成形的优越之处，从而对超塑性技术的推广应用起着阻碍作用。我国学者已经注意到，许多种供应态的工业合金就可以具有良好的超塑性，已有不少成功地利用这些合金直接进行超塑成形的例子。然而供货态工业合金（或从广义上讲，具有非典型超塑性材料显微组织的材料）在超塑变形中常表现出与等轴细晶材料完全不同的规律，如果不掌握这些规律，采用与等轴细晶材料同样的参数进行超塑成形，很容易造成成形件带有缺陷，甚至报废。我国的学者，对非典型超塑材料的超塑变形规律进行了系列的研究，其中包括对变形各向异性、不均匀性的发生、发展及控制，对其超塑变形中显微组织动态变化（包括晶粒细化、均匀化、等轴化）规律的研究。这些研究工作已经取得了初步的成效，这方面的工作已发表了多篇论文，而且研究结果已在一些零件超塑成形中应用，消除了缺陷，提高了质量。

前面已经讲到，目前国际上超塑性的研究主要分为理论及应用两大类，两类研究之间存在着相当程度的脱节。我国目前发展经济增强力是先于一切的，而现在国家经济实力还很有限。在这样的形势下，研究工作的重点应主要放在推动技术的应用上。这种研究不应仅限于工艺及装备的研究，而应包括若干对于推广应用超塑性技术至关重要的理论及技术问题，如上面所列举的非典型等轴细晶材料超塑变形的规律等。这是区别与以往的专门对工艺、装备纯技术问题的“开发研究”，这类研究可称为“应用的基础研究”，其中包含了大量的理论及实验研究。之所以称之为“应用的基础”的研究，是因为这些研究工作的目的很明确，是为了超塑技术能更好地在工业实际中应用。我们认为，明确地提出这样的研究目标是符合中国国情的，即超塑性研究也应具有中国特色。对供货态工业合金（即非典型超塑材料）的超塑变形规律我国已进行了一系列的研究，已取得了初步的成果，并且得到了世界上一些著名专家的认同。

谈超塑与常规塑性理论与应用的接轨

海锦涛 白秉哲

北京机电研究所

(北京海淀区学清路 18 号 邮编 100083)

摘 要 本文表达了作者对我国超塑性理论与应用发展方向的一些看法。文中指出:过分地强调超塑的“特殊”性限制了超塑理论及应用的发展,常规塑性理论与应用“接轨”是超塑性学术和技术发展的重要方向,也是适应我国国情的。

主题词 超塑性,塑性

1 引 言

世界上对于超塑性现象的系统性研究始于 Underwood⁽¹⁾ 及 Backofen⁽²⁾ 等人六十年代初发表的工作,三十年来已经形成了一个较为完整的超塑性理论体系,其中包括超塑性机理、材料、力学及成形工艺等分支。超塑性理论(主要指组织超塑性)自其诞生之日起,就建立在一种分立于常规塑性理论之外的“特殊”基础之上。超塑理论的“特殊”性首先决定于超塑变形被规定了若干严格的条件,除了特定的变形温度及变形速率之外,其对于变形材料更有苛刻的要求:必须具有稳定、均匀的等轴细晶粒显微组织。描述这种特殊条件下变形的理论自然会具有一系列的特殊性——1. 特殊的变形机理,晶界滑动是超塑变形的的主要微观机制,其它机制(扩散、位错)起到协调作用;2. 变形中特殊的显微组织变化,或是等轴细晶组织维持稳定,或是只发生晶粒长大;3. 变形是各向同性、均匀的;4. 超塑性优劣的唯一重要标准为延伸率,而应变速率敏感性指数(m 值)是决定超塑性的最重要的力学参数;……这种“特殊”的超塑理论与一般塑性变形理论很少有“接口”之处,它已发展成为一个较为完整的体系,尽管许多人认为目前超塑理论仍大有发展的必要,然而难以找出获得重大进展的方向。严格的“特殊”条件对于超塑性的应用也是极大的障碍,尤其是为获得超塑成形材料应具备的显微组织条件所付出的代价,往往抵消了超塑成形所带来的效益,因此超塑性成形应用受到很大局限。

然而,近年来超塑性的研究与应用中许多事实表明,在严格的“特殊”条件之外仍可得到可观的超塑变形——速率可以升高,温度可以降低,尤其是许多具有非等轴,非细晶,非均匀晶粒组织的供货态工业合金可以得到很大的超塑变形,甚至超塑成形出复杂的零件。对于在非典型“超塑”条件下的超塑变形中的许多现象,现有超塑理论无法进行解释,更不能对超塑