

中国科学技术前沿

**SCIENCE AND TECHNOLOGY
AT THE FRONTIER IN CHINA**

中国工程院版

第8卷

高等教育出版社

图书在版编目 (CIP) 数据

中国科学技术前沿. 第8卷/中国工程院版. —北京:
高等教育出版社, 2005.10
ISBN 7-04-018307-2

I. 中... II. 中... III. 科学技术—动态—中国—
文集 IV. N120.1-53

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2005) 第 116161 号

出版发行	高等教育出版社	购书热线	010-58581118
社 址	北京市西城区德外大街 4 号	免费咨询	800-810-0598
邮政编码	100011	网 址	http://www.hep.edu.cn
总 机	010-58581000		http://www.hep.com.cn
经 销	北京蓝色畅想图书发行有限公司	网上订购	http://www.landaco.com
印 刷	北京外文印刷厂		http://www.landaco.com.cn
开 本	889×1194 1/32	版 次	2005 年 10 月第 1 版
印 张	17.125	印 次	2005 年 10 月第 1 次印刷
字 数	440 000	定 价	55.00 元

本书如有缺页、倒页、脱页等质量问题, 请到所购图书销售部门联系调换。

版权所有 侵权必究

物料号 18307-00

编辑委员会

顾问：宋 健 侯云德

主 编：徐匡迪

副主编：刘德培 金国藩 柳百成

委 员：（以姓氏笔画为序）

王正国 石玉林 刘德培 何继善

陈毓川 沈德忠 金国藩 柳百成

徐匡迪 梁应辰 梁骏吾

编辑部

董庆九 刘 静 王国祥 王振德

责任编辑

刘 英

目 录

材 料 科 学

- 微滴凝固的若干科学问题 徐匡迪 翟启杰 3
高能量密度材料的发展及对策 董海山 33

医 药 科 学

- SARS 疫情对我国科技和政府工作的启示 钟南山 65
我国颅内动脉瘤性蛛网膜下腔出血的诊治现状与前景
..... 马廉亭 77
自体骨髓干细胞移植研究进展
..... 李连达 吴理茂 刘 红 宁可永 李贻奎 103
蓬勃发展的烧伤专业 盛志勇 郭振荣 115
中药的药代动力学研究的难点和热点问题 刘昌孝 137
方兴未艾蓬勃发展的耳鼻咽喉头颈外科
..... 韩德民 张 罗 周 兵 161

生 物 与 农 业

- 城市林业的可持续经营——城镇化和生态化的关系
..... 白嘉雨 217
农作物遥感估产 杨小唤 王乃斌 江 东 239
山东新型日光温室蔬菜系统技术与推广
..... 何启伟 卢育华 陈运起 于淑芳
李 林 周绪元 焦自高 王克安 王晓群 261

目 录

制 造 技 术

我国机器人的回顾与展望	蔡鹤皋 姜 力	297
我国制浆造纸业中的科技问题及解决的措施	陈克复	339

土 木 建 筑

大型复杂结构工程应用基础研究的新进展	项海帆 楼梦麟	381
三峡工程建设中重大技术问题的研究和突破	张超然	425
面向“西北大开发”的水资源合理配置	陈志恺 王 浩 汪党献 马 静	447
我国建筑耗能状况及有效的节能途径	江 亿	461

航 天 工 程

载人航天气象水文保障	潘剑翔	499
------------------	-----	-----

CONTENTS

Materials Science

Science Issues on Solidification of Microdroplets Xu Kuangdi, Zhai Qijie	3
The Development and Countermeasure of High Energy Density Materials	Dong Haishan 33

Medical Science

Lessons to be learned from SARS epidemic for China's scientific workers and government officials ... Zhong Nanshan	65
Present Condition and Future of Diagnosis and Treatment of Subarachnoid Hemorrhage caused by Intracranial Aneurysm in China	Ma Lianting 77
Advances in Autologous Bone Marrow Stem Cell Transplantation ... Li Lianda, Wu Limao, Liu Hong, Ning Keyong, Li Yikui	103
Flourishing Burn Surgery	Sheng Zhiyong, Guo Zhenrong 115
Difficulty and Hot - Points on Pharmacokinetics Studies of Traditional Chinese Medicine	Liu Changxiao 137
The Development of Otorhinolaryngology Head and Neck Surgery	Han Demin, Zhang Luo, Zhou Bing 161

Biology and Agriculture

Developing Urban Forestry in a Sustainable Way——Relation Between Urbanization and Ecologynization	Bai Jiayu 217
--	---------------

CONTENTS

Crop Yield Estimation Using Remote Sensing Technique	
..... Yang Xiaohuan, Wang Naibin, Jiang Dong	239
Research and Popularization of Vegetable Systemic Technique	
of Shandong New Types Solar Greenhouse	
..... He Qiwei, Lu Yuhua, Chen Yunqi, Yu Shufang, Li Lin	
Zhou Xuyuan, Jiao Zigao, Wang Kean, Wang Xiaoqun	261

Manufacture Technology

Review and Prospect of Robot Field in China	297
Scientific and Technological Issues and Solving Measure	
of Pulp and Paper Industry in China	Chen Kefu 339

Architecture & Civil Engineering

New Developments in Application and Theory Study of	
Complicated Large - Scale Structures	
..... Xiang Haifan, Lou Menglin	381
Research and Breakthrough on Major Technical Issues in	
Three Gorges Project Construction	Zhang Chaoran 425
Water Rational Allocation towards Northwest Development	
..... Chen Zhikai, Wang Hao, Wang Dangxian, Ma Jing	447
Current Building Energy Efficiency in China and the	
Possible Solutions	Jiang Yi 461

Spaceflight Engineering

The Meteo - Hydrological Support for Manned Space Flight	
..... Pan Jianxiang	449



微滴凝固的若干科学问题

徐匡迪 翟启杰

引 言

金属在制备过程中都要经历凝固过程,包括连铸坯和铸件、制粉和喷涂等。金属的凝固过程对其组织和性能有十分重要的影响,特别是在这一过程中形成的宏观偏析、裂纹等缺陷,往往在后续加工中难以彻底消除。

对于合金而言,由于选分结晶,凝固组织中必然会存在微观成分偏析。对于厚大断面的铸件或铸锭,选分结晶会伴随未凝固金属液的流动和已析出晶体的移动形成宏观偏析。当外部冷却较强时,常常会形成全柱状晶铸坯,此时在铸坯芯部产生严重的宏观偏析和轴线疏松,这是冶金生产中经常遇到而又十分棘手的问题。这些情况的存在,限制了连铸技术在高碳钢及一些高合金钢上的应用。

金属凝固过程中经常遇到的另一个问题是热裂。研究表明,热裂是在金属凝固后期晶粒间液膜被拉断形成的。裂纹(特别是内部裂纹)的存在不仅给金属制备过程带来许多麻烦,而且给金属制品的使用留下难以估量的隐患。

金属凝固过程中由于收缩还会出现体积亏损缺陷——缩孔和缩松。在铸造生产中,缩孔通常用设置冒口来解决。但是,对于枝晶间出现的缩松,目前还没有十分有效的解决方法。

气孔也是金属凝固过程中经常出现的缺陷。一般认为,析出

性气孔是金属中气体含量高于其凝固温度时的溶解度所致。值得注意的是,当金属凝固过程中枝晶发达时,由于气体元素在固液界面前沿偏聚,以及发达枝晶间隙内压力较小,为气体的析出和气泡的形成提供了很好的热力学条件。

研究和生产实践表明,上述凝固缺陷都与凝固组织有直接关系,细化凝固组织是解决上述缺陷的有效手段。材料工作者在这方面已经取得共识,从添加生核剂、微合金化,到电磁搅拌、电流及磁场处理、超声处理,各种凝固细晶技术争芳斗艳,为材料科学和材料工业的发展做出了重要贡献。

值得注意的是,在传统生产条件下,金属液体积大、散热慢,凝固组织粗大是一个很难避免的问题,细晶技术很难达到理想的效果。美国 INLAND 钢研究开发实验室在研究钢的半固态加工中获得了晶粒尺寸 $80\text{ }\mu\text{m}$ 的凝固组织^[1],北京科技大学邢书明和胡汉起等人也得到了晶粒尺寸 $70\text{ }\mu\text{m}$ 的高锰钢坯^[2]。这些工作告诉我们,在大体积凝固的条件下,可以得到的最小晶粒尺寸可能就是几十个 μm 这样的水平上。

我们同时注意到,当金属液凝固速度很快时,不但可以得到十分细小的结晶组织(微晶)、无限固溶的连续固溶体组织,甚至可以得到非晶组织^[3]。这给材料工作者提出一个课题:是否可以将大体积金属熔体分散为微细颗粒,从而改变其散热条件,获得超细凝固组织?

微滴凝固技术就是将金属液弥散为极小尺寸的液滴,利用金属微滴的尺寸效应,实现大过冷下的快速凝固,从而获得超细结晶组织,然后采用热等静压等方法将金属细粉制备成金属制品。

微滴凝固技术既不同于粉末冶金技术,也不同于喷射沉积技术。微滴凝固技术对液滴尺寸有很高的要求,旨在利用液滴的尺寸效应获得大过冷,从而实现快速凝固,得到极细凝固组织。从材料工程学的角度看,微滴凝固技术是一种形成“微细组织”的材料制备技术。

微滴凝固技术可望具有以下优点:

(1) 高冷却速度: 10^6 K/s 以上。

(2) 高过冷度: $0.2 T_m$ 以上。

(3) 超细结晶组织: 晶粒尺寸 $\leq 1 \mu\text{m}$ 。

(4) 高固溶度: 可获得过饱和组织, 提高材料固溶强化效果。

(5) 少无铸造缺陷: 完全消除宏观偏析, 基本消除缩松和热裂。

(6) 短流程: 介于铸造和粉末冶金的一种短流程金属成形技术。与计算机仿真与控制系统配合, 还可用于新产品快速制造。

(7) 应用范围广: 既可生产铸件, 也可生产铸坯, 还可用于生产复合材料。

一、相关技术基础及其研究概况

1. 金属液雾化工艺技术

将金属分散为小液滴然后凝固的工艺技术可以追溯到粉末冶金。表 1^[4] 给出了现有金属液雾化后凝固的主要工艺。

表 1 金属雾化凝固的主要工艺

工艺方法	液滴形状	液滴尺寸 / μm	冷却速度 / $\text{K} \cdot \text{s}^{-1}$	备 注
高压水雾化法	不规则	75 ~ 200	$10^2 \sim 10^4$	价廉
高压气体雾化	球形	50 ~ 100	$10^2 \sim 10^3$	
超声气体雾化	光滑圆球形	10 ~ 50	$10^3 \sim 10^6$	粒度均匀
快速旋转杯法	类球形 + 不规则	< 50	10^6	
旋转电极雾化	光滑球形	50 ~ 400	10^3	
旋转盘雾化法	光滑球形	25 ~ 80	10^5	
旋转带孔杯法	针状	1000 ~ 5000	10	经济
等离子雾化法	球形 + 不规则形	10 ~ 60	$10^3 \sim 10^6$	
电流体动力雾化法	片状颗粒或球形	0.01 ~ 100	10^7	精确控制 粒度。纯净

以高压水雾化和高压气雾化为代表的传统金属雾化技术虽然成本低廉、使用方便,但是雾化质量较差。这主要表现在两个方面,一是雾化液滴较大,最好的情况也仅能达到 $50\text{ }\mu\text{m}$,而且粒度分布不均匀。二是纯度低。以水雾化为例,氧含量高达 $100\sim 400\text{ ppm}$ 。因此传统的金属雾化工艺不能满足金属微滴凝固技术的要求。

近代物理手段的应用极大地提高了金属雾化技术水平。在超声雾化技术中,气流以 $80\sim 100\text{ kHz}$ 的频率和 $2\sim 2.5$ 马赫的速度冲击金属液流,不仅可以大幅度减小液滴尺寸,而且液滴尺寸分布集中,能量消耗也仅为普通气体雾化的 $1/4$ 。而等离子雾化技术可使气流速度达到 3 马赫,液滴尺寸小到 $10\text{ }\mu\text{m}$ 。电流体动力雾化技术甚至可获得 $0.01\text{ }\mu\text{m}$ 微细液滴,几乎达到纳米水平^[4]。可以预计,随着近代物理手段在金属雾化中应用研究的深入,人类将完全可能经济方便地获得均匀洁净的微细金属液滴。

2. 金属液滴雾化成形技术

1968 年英国 Swansea 大学的 A. R. E. Singer 教授将金属液雾化技术与铸件及铸锭生产联系起来,提出将金属液雾化后直接沉积冷凝生产金属制品的技术思想。Singer 教授应用雾化气体得到了 $100\sim 150\text{ }\mu\text{m}$ 的铝液滴,并将这些液滴沉积冷凝后得到了喷射沉积坯料^[5]。

1974 年 R. Brooks 等人成功地将这一技术应用于锻造坯料的生产,开发了著名的 Osprey 工艺(见图 1),并用这一技术生产了普通方法难以生产的高合金及超合金管、环、棒和坯材^[6]。

20 世纪 70 年代末,麻省理工学院的 N. J. Grant 等人提出以超声气体雾化为特征的液体动压成形工艺(LDC),液滴的凝固速率达到 $10^3\sim 10^4\text{ K/s}$,形成了典型的快速凝固工艺^[7]。

到 80 年代,不少国家建设了工业或半工业生产装置,制造了一批大规格产品。瑞典的 Sandvik 工厂在世界上首先应用金属喷射成形技术生产不锈钢管和复合钢管,其生产的不锈钢管尺寸达

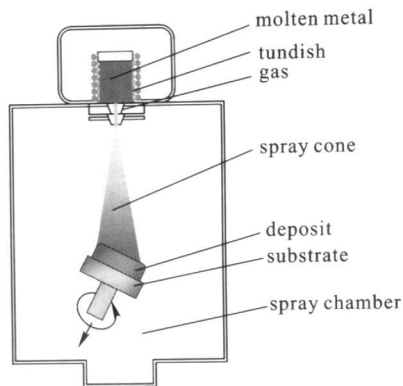


图1 喷射沉积工艺示意图

$\phi 400 \times 8000$ (mm), 重量达 1 t。美国海军在俄亥俄州的 Barberton 已经安装了 4.5 t 的钢管生产设备, 金属喷射沉积速度可达 200 kg/min。日本住友重工轻金属公司已经生产出 $\phi 250 \times 14000$ (mm) 过共晶铝硅合金坯, 用于制造汽车零件。英国与丹麦合作应用水平金属喷射沉积设备试制出直径 $\phi 200 \sim 325$ mm, 长 1300 mm 的圆钢坯^[6]。

围绕喷射成形这一新技术, 世界各国的材料工作者开展了大量基础研究工作。其中不仅包括工艺装备的不断完善, 工艺参数的优化, 也包括液滴的形成和沉积凝固等过程的基础研究。比较有代表性的工作有: 美国 University of Illinois 的 C. G. Levi 等人及台湾成功大学 Keh - Chin Chang 等人关于液滴热量传递方面的研究^[8,9], 德国 Bremen University 的 Dirk Bergmann 等人、我国台湾成功大学 Y. H. Su 等人关于液滴凝固过程的研究^[10,11], 美国 Carnegie Mellon University 的 C. H. Amon 等人、美国 University of Illinois at Chicago 的 D. Poulikakos 等人、美国 MIT 的 G. Trapaga 等人关于液滴与基底相互作用及热量传递和凝固方面的研究^[13~17], 美国 Iowa State University 的 R. Trivedi 等人关于液滴凝

固组织的研究^[18]。受液滴尺寸的限制,这方面实验难度很大,其中相当一部分工作是采用数值模拟方法完成的,对于单个液滴行为的实验研究很少,而研究液滴的尺度范围也在 $15\text{ }\mu\text{m}$ 以上,基本上没有考虑液滴尺寸效应的作用。

3. 微铸造 (microcasting) 技术

微铸造技术是值得一提的液滴成形技术。这个技术不仅具有金属雾化成形的许多优点,而且可以方便地实现复杂零件的快速制造。如图 2 所示^[12],该工艺分别用两只焊枪提供消失材料和铸造金属。两只焊枪在计算机控制下在底板上分别逐层滴下消失材料和铸造金属液滴。使用消失材料的目的是便于铸造金属液滴成形。为保证金属制品的致密性,使用 CNC (computer - numerically - controlled) 设备夯实金属。该设备能实现三维运动,在工作时铸造一层压实一层,并可以通过气压装置提升其高度,从而实现了自动生产。当所需要的金属制品完全成形后,采用特定的溶剂将消失材料溶蚀掉。图 3 为使用该技术生产的金属部件^[19]。

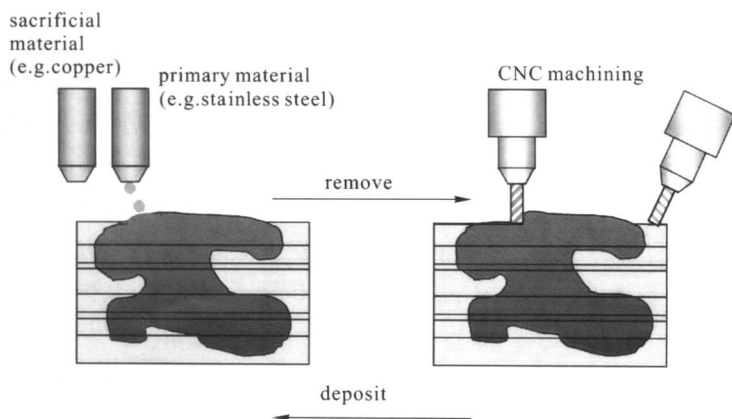


图 2 Microcasting 工艺示意图

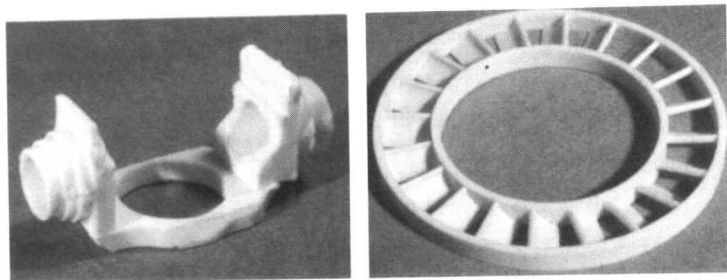


图3 应用 Microcasting 技术生产的零部件

该技术与喷射沉积技术相比,其特点是可以生产具有复杂内腔的铸件,其不足是液滴尺寸较大,冷却速度低,组织也不及喷射沉积细。此外由于是单个液滴沉积,沉积速率较低。

二、微滴凝固技术引发的科学问题及研究现状

(一) 微滴凝固中的几个科学问题

金属液被雾化为极小液滴后,将会出现以下现象:

- (1) 液滴的曲率趋于无穷大。
- (2) 表面原子比率大幅度提高。
- (3) 金属液内原子的有序度提高。
- (4) 冷却速率极大提高,热冲击效应对凝固过程的影响更为显著,其导致的极端非平衡效应将更加明显。

我们把这种由于尺寸极大减小产生的现象称为尺寸效应。尺寸效应引发了以下科学问题:

(1) 微小液滴冷却凝固时其内部是否存在传热过程。如果有,显然不能用传统的傅里叶导热方程描述。

(2) 微小液滴冷却凝固时其内部是否存在传质过程,它是否仍可以用传统的菲克扩散定律描述。

(3) 根据热力学理论,曲率增大会降低结晶温度。如何利用微小液滴的曲率效应实现大过冷下的凝固,从而得到超细结晶