

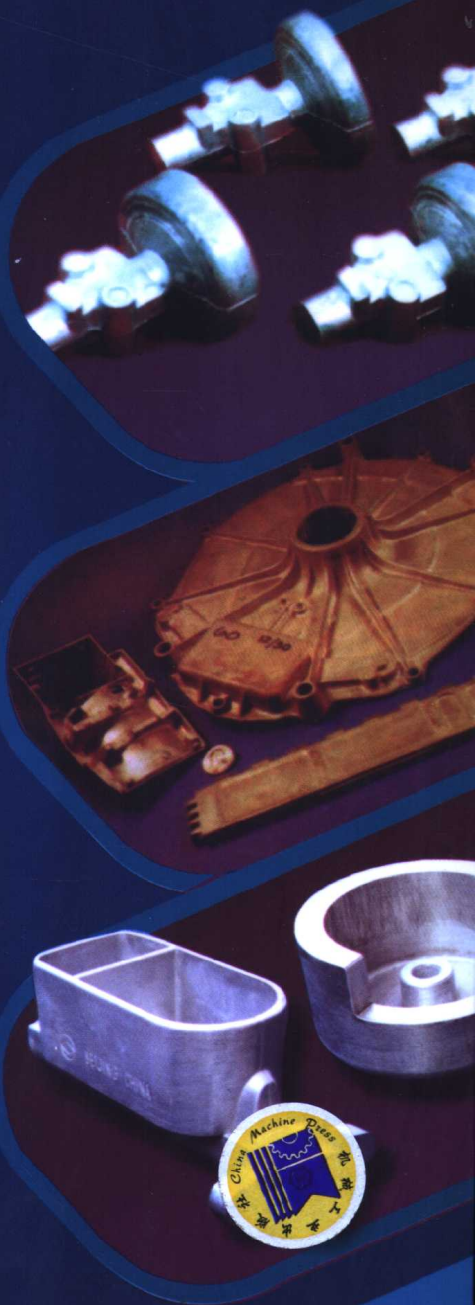
机械工业出版社高水平著作出版基金资助项目

先 / 进 / 铸 / 造 / 技 / 术 / 丛 / 书

丛书主编 张武城

半固态金属 成形技术

毛卫民 编 著
钟雪友 主 审



 **机械工业出版社**
CHINA MACHINE PRESS

机械工业出版社高水平著作出版基金资助项目

先进铸造技术丛书

丛书主编 张武城

半固态金属 成形技术

毛卫民 编著

钟雪友 主审



机械工业出版社

本书对半固态金属成形技术进行了系统总结,主要包括:绪论、半固态金属浆料和坯料的制备技术、半固态金属的搅拌组织形成机理及影响因素、半固态金属流变成形技术、半固态金属坯料的重熔加热技术、半固态金属触变成形技术、半固态成形合金的力学性能和化学成分、半固态金属的流变性能、半固态金属成形过程的数值模拟技术和半固态金属成形技术的应用与发展趋势。

本书适合材料加工和铸造领域的科学研究人员、博士研究生、硕士研究生阅读,也可供从事材料加工和铸造工作的工程技术人员及大专院校相关专业的师生参考。

图书在版编目(CIP)数据

半固态金属成形技术/毛卫民编著. —北京:机械工业出版社, 2004.6

ISBN 7-111-14153-9

I. 半... II. 毛... III. 金属加工 IV. TG

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2004)第 019327 号

机械工业出版社(北京市百万庄大街 22 号 邮政编码 100037)

责任编辑: 邝 鸥 版式设计: 冉晓华 责任校对: 李秋荣

封面设计: 鞠 杨 责任印制: 李 妍

北京机工印刷厂印刷·新华书店北京发行所发行

2004 年 5 月第 1 版第 1 次印刷

890mm×1240mm A5·12.25 印张·362 千字

定价: 25.00 元

凡购本书,如有缺页、倒页、脱页,由本社发行部调换

本社购书热线电话(010) 68993821、88379646

封面无防伪标均为盗版

丛书编委会

丛书主编	张武城			
丛书副主编	李传祚			
丛书顾问	柳百成	陈蕴博		
丛书编委	黄天佑	姜不居	李传祚	毛卫民
	谢成木	熊守美	颜永年	张伯明
	张武城	张乃蕴		
丛书策划	卞 鸥			

序

铸造是机械工业重要的基础工艺与技术，广泛地应用于机械制造、航空航天、能源、交通、化工、建筑以及社会生活的各个领域，并随着各相关技术领域的发展自身不断更新、发展和完善，是我们生产和生活中时时不可或缺的一项重要工艺技术。

今天，铸造作为一种传统工艺与技术又面临着新的挑战。高速发展的社会，对铸造的精密性、质量与可靠性、经济、环保等要求越来越高。铸造已从单一的加工工艺发展成为新兴的综合性的先进工艺技术。它涉及到工艺方法、设备及工装、成型、生产过程的自动化与机械化、材料、环保等众多领域。不同学科之间的交叉、渗透及融合，高新技术对传统技术的不断影响，是当代科技发展的重要趋势。

为了解决广大铸造科技人员迫切需要了解和掌握铸造领域各学科的国内外先进技术及发展趋势的要求，以便指导他们的生产、科研及教学工作，北京机械工程学会组织了铸造行业有较快进步和较新发展的数个重要领域中有突出贡献的著名专家、学者编写、出版了这套先进铸造技术丛书。同时，邀请我国铸造、材料业界德高望重的著名专家柳百成院士、陈蕴博院士作为丛书的编写顾问。

本丛书旨在全面、系统地介绍国内外先进铸造技术的发展趋势，对我国铸造技术的发展起指导作用。本丛书是高层次的普及型丛书，深层次地介绍铸造相关领域的高新技术和基本规律，并兼顾知识性和实用性，面向广大铸造工作者、研究人员、高等院校师生及相关领域技术人员等。

本丛书的特点是突出“高、新”二字，有较宽的知识覆盖面，注意相关学科的相互渗透，博采国际、国内最新研究和发展成果。

本丛书愿为广大铸造技术人员适应国际大环境、大市场的要求，使我国铸造界迅速加入国际经济市场，从铸造大国向铸造强国迈进

的过程中作出重要贡献。

北京市发展和改革委员会及机械工业出版社高水平著作出版基金资助项目对本丛书的出版提供了经济支持，中国机械工程学会副理事长宋天虎对丛书的出版给予了关心和支持，在此一并表示衷心的感谢。

丛书主编 张武城

前 言

20 世纪 70 年代初, 以 Flemings 教授为首的美国麻省理工学院的研究小组偶然发现了机械搅拌下的半固态金属组织和流变性特点。随后, Flemings 教授及助手对此方面进行了深入、系统的基础和技术研究, 提出了半固态金属成形或加工技术 (Semi - solid forming or processing of metals, 简称 SSF 或 SSP) 的新概念, 开创了金属材料成形加工技术的新领域。

与过热液态金属铸造相比, 半固态金属 (Semi - solid metal) 含有一定体积分数的球状初生固相, 半固态金属成形零件致密、力学性能高、机械加工量少、模具寿命长; 与固态金属锻造相比, 半固态金属含有一定体积分数的液相, 半固态金属成形零件复杂、易于近终化成形 (Net - shape)、机械加工量少, 因此, 半固态金属成形技术研究及应用引起世界各国的高度重视。为了促进半固态金属成形技术的研究和应用, 自 1990 年开始, 每两年召开一次“半固态合金及复合材料加工技术”的国际学术会议 (International Conference on Semi - Solid Processing of Alloys and Composites), 至今已经召开了 7 次。

从 20 世纪 90 年代开始, 半固态金属成形技术逐步在发达国家得到商业应用, 如美国、意大利、法国和日本等。目前, 主要采用半固态成形技术生产高质量的铝合金、镁合金汽车零件, 也逐步生产通信、电器、航空航天和医疗器械等零件, 如汽车制动总泵体、连杆端头、发动机油道、支撑件、转向齿杆壳件、轮毂等, 还有航天飞行器的电器接头、笔记本电脑外壳、手机外壳、自行车零件等。半固态金属成形技术正在不断扩大其应用范围和生产规模, 将会取得越来越重要的地位, 许多学者将半固态金属成形技术称为 21 世纪最有前途的金属材料成形加工技术之一。

近年来, 半固态金属成形技术受到了我国制造业、金属材料行业的广泛关注, 在国家自然科学基金、国家“863”高技术和国家

“973”重大基础研究规划等项目的支持下,我国在半固态金属成形领域的基础研究、应用基础研究和应用研究等方面均取得了较大进展并获得了一大批研究成果,并逐步向商业应用推进。我国的国民经济正处于高速发展阶段,汽车、电子信息等行业均是我国的支柱产业,这些行业的技术水平和竞争能力将会不断提高,对高质量零件的需求将会越来越多,所以,半固态金属成形技术在我国这些行业的应用前景非常光明。

虽然半固态金属成形技术已经步入商业应用,但半固态金属成形毕竟是一门新兴的技术,无论在理论上还是在技术上,它都需要进一步的完善与发展,需要工业界和专家学者们的共同努力,不断地从理论基础、应用技术和产品工艺开发等方面给以大力支持,才能使这一技术真正成为一项重大的金属加工技术,并发挥其巨大的作用。为了推动半固态金属成形技术在我国的应用和进一步研究,需要对30余年来半固态金属成形技术的成果加以总结。

作者与合作者在多年从事半固态金属成形技术研究的基础上,参考了大量的有关研究文献,对半固态金属成形技术进行了系统总结,构成了本书的主要内容。本书共分11章:第1章绪论;第2章半固态金属浆料或坯料的电磁搅拌制备技术;第3章半固态金属浆料或坯料的其他制备技术;第4章半固态金属的搅拌组织形成机理及影响因素;第5章半固态金属流变成形技术;第6章半固态金属坯料的重熔加热技术;第7章半固态金属触变成形技术;第8章半固态成形合金的力学性能和化学成分;第9章半固态金属的流变性能;第10章半固态金属成形过程的数值模拟技术;第11章半固态金属成形技术的应用与发展趋势。本书第1~9章、第11章由毛卫民教授编写,第10章由白月龙博士编写,全书由钟雪友教授主审。

在本书的编写过程中得到了北京市机电研究院荣誉院长、本丛书主编、教授级高工张武城,中国铸造协会顾问、本丛书副主编、教授级高工李传斌,机械工业出版社责任编辑邝鸥的热情指导、支持和帮助;得到北京科技大学钟雪友教授的热情指导、支持和帮助;得到北京市机械工程学会秘书长张乃蕴的热情支持和帮助;还得到其他有关专家的热情指导,同时也得到机械工业出版社出版基金的

资助；得到国家自然科学基金、国家“863”高技术和国家“973”重大基础研究规划等项目的支持，在此一并表示衷心的感谢。

在世界各国教授、专家和工程技术人员的不努力下，半固态成形技术的发展日新月异，因此，本书难免存在不当之处，欢迎广大读者批评指正。

作 者

2004 年 5 月于北京

目 录

序

前言

第 1 章 绪论	1
1.1 半固态金属成形技术的诞生	1
1.2 半固态金属成形技术的分类	2
1.3 半固态金属成形技术的特点	4
参考文献	6
第 2 章 半固态金属浆料或坯料的电磁搅拌制备技术	8
2.1 交流感应旋转电磁场搅拌制备半固态金属浆料或坯料	8
2.1.1 交流感应旋转电磁场搅拌工作原理	8
2.1.2 低熔点半固态金属浆料或坯料的制备	13
2.1.3 高熔点半固态金属浆料或坯料的制备	27
2.2 交流感应行波电磁场搅拌制备半固态金属浆料或坯料	31
2.3 永久磁铁旋转法搅拌制备半固态金属浆料或坯料	34
2.4 交流无芯感应器法搅拌制备半固态金属浆料或坯料	37
参考文献	39
第 3 章 半固态金属浆料或坯料的其他制备技术	43
3.1 机械搅拌方法制备半固态金属浆料或坯料	43
3.1.1 非连续机械搅拌法	43
3.1.2 连续机械搅拌法	45
3.2 变形诱导激活方法制备半固态金属坯料	49
3.3 超声振动方法制备半固态金属浆料或坯料	51
3.4 单辊旋转方法制备半固态金属浆料或坯料	54
3.5 晶粒细化及半固态重熔方法制备半固态金属坯料	57

3.5.1	ZA12 锌合金的晶粒细化及半固态重熔组织变化	57
3.5.2	AlSi7Mg 合金的晶粒细化及半固态重熔组织变化	58
3.6	喷射沉积方法制备半固态金属坯料	63
3.7	粉末冶金方法制备半固态金属坯料	68
3.8	低过热度浇注方法制备半固态金属浆料或坯料	72
3.8.1	低过热度浇注制备 AlSi7Mg 合金半固态浆料或坯料	72
3.8.2	低过热度浇注制备变形铝合金半固态坯料	79
3.9	紊流效应方法制备半固态金属浆料或坯料	81
3.10	金属熔体混合方法制备半固态浆料或坯料	82
	参考文献	83
第 4 章	半固态金属的搅拌组织形成机理及影响因素	89
4.1	金属凝固组织的形成机制	89
4.1.1	金属的传统枝晶凝固组织与形成机制	89
4.1.2	金属的半固态非枝晶凝固组织与形成机制	93
4.2	铝合金的半固态凝固组织及影响因素	106
4.2.1	机械搅拌的半固态铝合金凝固组织	106
4.2.2	电磁搅拌的半固态铝合金凝固组织	109
4.3	镁合金的半固态凝固组织及影响因素	114
4.3.1	机械搅拌的半固态镁合金凝固组织	114
4.3.2	电磁搅拌的半固态镁合金凝固组织	116
4.4	高熔点金属或合金的半固态凝固组织及影响因素	119
4.4.1	半固态铸铁的凝固组织	119
4.4.2	钢或高温合金的半固态凝固组织	121
4.4.3	铜合金的半固态凝固组织	125
4.5	其他低熔点合金的半固态凝固组织及影响因素	127
4.5.1	锡铅合金的半固态凝固组织	127
4.5.2	金属基复合材料的半固态凝固组织	127
	参考文献	130
第 5 章	半固态金属流变成形技术	137
5.1	传统机械搅拌式流变成形	137
5.2	压射室制备浆料式流变成形	140
5.3	单螺旋机械搅拌式流变成形	145

5.4 双螺旋机械搅拌式流变成形	150
5.5 低过热度倾斜板浇注式流变成形	155
5.6 低过热度浇注和弱机械搅拌式流变成形	158
5.7 低过热度浇注和弱电磁搅拌式流变成形	161
5.8 流变轧制成形	163
参考文献	170
第 6 章 半固态金属坯料的重熔加热技术	175
6.1 金属坯料的半固态重熔加热方法	175
6.1.1 金属坯料的电磁感应半固态重熔加热	176
6.1.2 金属坯料的其他半固态重熔加热方法	189
6.2 半固态重熔加热坯料的组织演变	192
6.2.1 半固态重熔加热枝晶坯料的组织演变	192
6.2.2 半固态重熔加热球状晶坯料的组织演变	198
6.3 半固态重熔加热时液相分数的测控	207
参考文献	215
第 7 章 半固态金属触变成形技术	220
7.1 半固态金属的触变压铸成形	220
7.1.1 半固态金属触变压铸工艺与设备	220
7.1.2 半固态金属触变压铸工艺参数的控制规律	231
7.2 半固态金属的触变锻造成形	245
7.2.1 半固态铝合金的触变锻造	246
7.2.2 半固态高熔点合金的触变锻造	249
7.3 半固态镁合金的触变射铸成形	250
参考文献	253
第 8 章 半固态成形合金的力学性能和化学成分	259
8.1 低熔点半固态合金的力学性能	259
8.2 高熔点半固态合金的力学性能	271
8.3 半固态金属基复合材料的力学性能	274
8.4 半固态成形合金的化学成分	277
参考文献	282

第 9 章 半固态金属的流变性能	287
9.1 半固态金属流变性能的测试技术	287
9.2 半固态金属流变性能的实验规律	294
9.2.1 半固态金属的稳态流变性能.....	294
9.2.2 半固态金属的非稳态流变性能.....	298
9.2.3 半固态金属的触变性能.....	307
9.3 半固态金属流变性能的模型化	315
参考文献	325
第 10 章 半固态金属充型过程的数值模拟技术	328
10.1 半固态金属充型过程的数值模拟	328
10.1.1 半固态金属充型过程中浆料的充填行为及表观粘度	329
10.1.2 半固态金属充型过程数值模拟方法	330
10.1.3 半固态金属充型过程数值模拟	332
10.2 半固态金属充型温度场的数值模拟	348
10.2.1 半固态金属充型过程温度场数值模拟方法	348
10.2.2 半固态金属充型过程温度场的数值模拟	349
参考文献	353
第 11 章 半固态金属成形技术的应用与发展趋势	357
11.1 半固态铝合金成形技术的应用	357
11.2 半固态镁合金成形技术的应用	366
11.3 半固态金属成形技术的研究和应用发展趋势	369
参考文献	371
附录 国外部分牌号合金对应的化学成分	376

第1章 绪 论

1.1 半固态金属成形技术的诞生

从发展历程看,半固态金属成形技术是在很偶然的实验中被发明的。1971年,美国麻省理工学院(MIT)的博士研究生 D.B. Spencer 研究半固态 SnPb15 合金高温撕裂的力学特性,将其作为博士论文的主要内容。当时,他使用的实验装置是内壁刻有沟槽的双桶粘度计。在正常的实验中,先让过热的 SnPb15 合金液在粘度计中冷却到液相线温度以下的预定温度,即预定的固相分数 f_s ,然后

开始旋转粘度计的外桶,剪切处于半固态状态的 SnPb15 合金,同时检测剪切应力。在剪切过程中,切应力随外桶偏转角度的增加而增加,如图 1-1 所示;当切应力达到最大值时,切应力随外桶偏转角度的进一步增加而下降到较低值,比如,当固相分数 f_s 为 0.41 时,最大切应力为 200kPa;在剪切时,半固态金属的固相分数 f_s 越高,其切应力越大。后来, D.B. Spencer 偶然从高于 SnPb15 合金液相线温度下开始旋转粘度计的外桶,同时使 SnPb15 合金液缓慢冷却凝固,这时出现了奇特的力学现象。与过去的实验结果相比,此时的切应力下降了约三个数量级,比如,当固相分数 f_s 为 0.41 时,最大切应力为

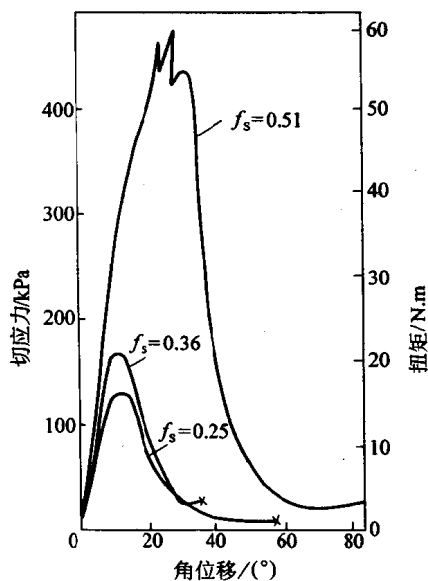


图 1-1 半固态 Sn15Pb 合金
切应力与角位移的关系^[7]

同时使 SnPb15 合金液缓慢冷却凝固,这时出现了奇特的力学现象。与过去的实验结果相比,此时的切应力下降了约三个数量级,比如,当固相分数 f_s 为 0.41 时,最大切应力为

0.2kPa; 经过显微组织检查, 发现 SnPb15 合金的初生固相都呈球形, 如图 1-2 所示。D.B·Spencer 的实验现象引起导师 Flemings 教授的高度重视, 于是, 在 Flemings 教授的领导下, 投入了大量的人力和物力, 对具有球状初生固相的半固态合金组织形成机制、半固态浆料的力学行为和成形特点进行了深入研究, 创立了金属半固态成形的概念、理论和技术^[1-7]。

所谓金属半固态成形 (Semi - Solid Forming of Metals) 或半固态加工 (Semi - Solid Processing of Metals), 就是在金属凝固过程中, 对其施以剧烈的搅拌或扰动、或改变金属的热状态、或加入晶粒细化剂、或进行快速凝固, 即改变初生固相的形核和长大过程, 得到一种液态金属母液中均匀地悬浮着一定球状初生固相的

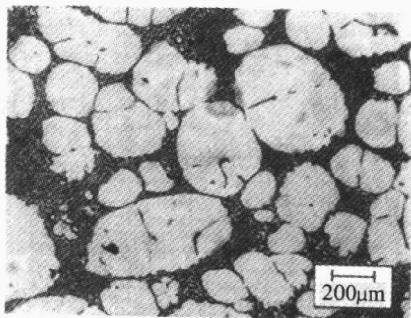


图 1-2 半固态 SnPb15 合金的显微组织^[7]

剪切速率 230s^{-1} 固相分数 45 %

等温剪切时间 40min

固—液混合浆料, 利用这种固—液混合浆料直接进行成形加工, 或先将这种固—液混合浆料完全凝固成坯料, 根据需要将坯料切分, 再将切分的坯料重新加热至固液两相区, 利用这种半固态坯料进行成形加工, 这两种方法均称之为金属的半固态加工。相反, 在金属凝固过程中, 若不对其施以强烈的搅拌或扰动, 此时析出的初生固相将是树枝状晶体, 它们互相搭接, 形变阻力很大, 在半固态下加压成形时固液相容易分离, 造成严重的宏观偏析, 成形件也容易开裂。

1.2 半固态金属成形技术的分类

目前, 半固态金属成形的工艺方法主要分两大类: 流变成形和触变成形。

1. 半固态金属的流变成形 利用剧烈搅拌等方法制备出预定固

相分数的半固态金属浆料，并对半固态金属浆料进行保温，将该半固态金属浆料直接送往成形设备进行铸造或锻造成形，这种成形过程称为半固态金属的流变成形。根据成形设备的种类，半固态金属流变成形又可分为流变压铸（如图 1-3 所示^[7]，采用压铸机成形）、流变锻造（采用锻造机成形）、流变轧制（采用轧机成形）、流变挤压（采用挤压机成形）等。

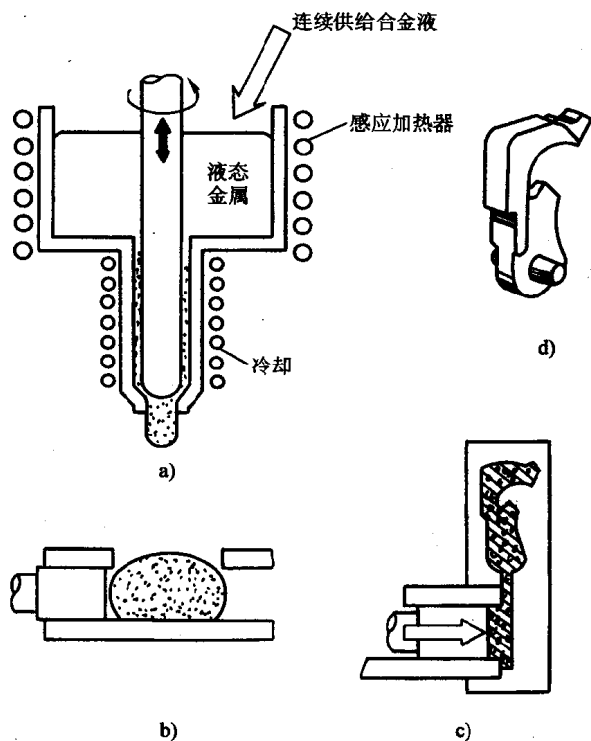


图 1-3 半固态金属流变压铸示意图

a) 连续流变器 b) 半固态金属浆料放入压铸机压射室 c) 压射成形 d) 半固态压铸件

2. 半固态金属的触变成形 利用剧烈搅拌等方法制备出球状晶的半固态金属浆料，将该半固态金属浆料进一步凝固成锭坯或坯料，再按需要将金属坯料分切成一定大小，把这种切分的固态坯料重新加热至固液两相区，然后利用机械搬运将该半固态坯料送往成形设备（如压铸机、锻造机等）进行铸造或锻造成形，这种成形过程称

为半固态金属的触变成形，如图 1-4 所示^[7,11]。根据成形设备的种类，半固态金属触变成形也可分为触变压铸、触变锻造、触变轧制、触变挤压等。

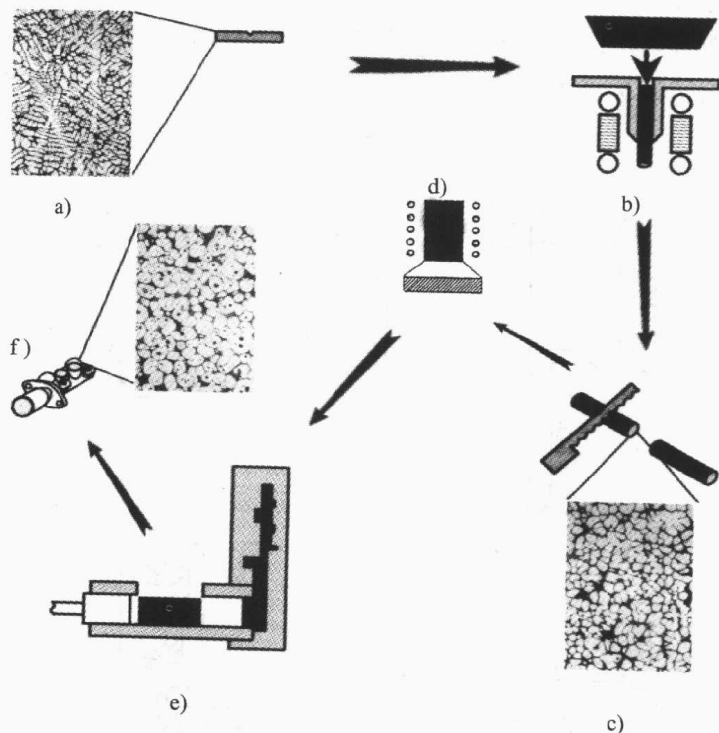


图 1-4 半固态金属触变压铸示意图

- a) 合金原料及显微组织 b) 电磁搅拌连铸制备半固态合金坯料
c) 坯料切分及显微组织 d) 坯料的感应半固态重熔加热
e) 触变压铸 f) 触变压铸件及显微组织

1.3 半固态金属成形技术的特点

半固态金属浆料或坯料与传统过热的液态金属相比，具有一半左右的初生固相，而与固态金属相比，又含有一半左右的液相，且固相为非枝晶态，所以，金属半固态成形技术具有一系列的优点^[5-10]：