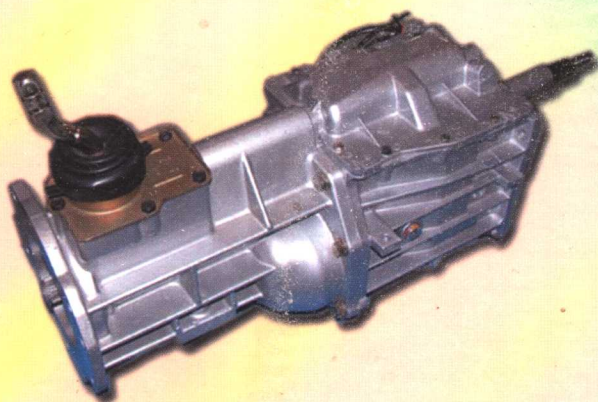


21 世纪新材料科学与技术丛书

金属半固态成形 理论与技术

管仁国 马伟民 等编著



9

冶金工业出版社

21 世纪新材料科学与技术丛书

金属半固态成形 理论与技术

管仁国 马伟民 等编著

北 京
冶金工业出版社
2005

内 容 提 要

金属半固态成形技术被誉为“21 世纪最有发展前景的绿色工业技术”,标志着人类对金属材料行为的认识发展到了一个新的阶段。它具有流程短、近终形生产、产品组织性能优良、工模具寿命明显延长等特点,受到世界各国的高度重视。

本书针对金属半固态成形技术的发展历史与现状,较全面地总结与评述了国内外该技术的理论研究与工业应用进展状况,重点介绍了金属半固态成型的基础理论、制备原理与工艺、组织形成机理、过程数值模拟与前景展望等内容。

本书可供从事金属材料加工领域工作的科研人员以及相关工程技术人员阅读,也可作为大专院校及研究机构的研究生和高年级学生的教学参考书。

图书在版编目(CIP)数据

金属半固态成形理论与技术/管仁国,马伟民
等编著. —北京:冶金工业出版社,2005. 8

ISBN 7-5024-3771-1

I. 金… II. ①管… ②马… III. 金属加工
IV. TG

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2005)第 063451 号

出版人 曹胜利(北京沙滩嵩祝院北巷 39 号,邮编 100009)

责任编辑 刘小峰(010-64027931;forrest_liuxf@sohu.com)

美术编辑 李 心 责任校对 卿文春 李文彦 责任印制 牛晓波

北京兴华印刷厂印刷;冶金工业出版社发行;各地新华书店经销

2005 年 8 月第 1 版,2005 年 8 月第 1 次印刷

850mm × 1168mm 1/32; 9.75 印张; 261 千字; 297 页; 1-3000 册

29.00 元

冶金工业出版社发行部 电话:(010)64044283 传真:(010)64027893

冶金书店 地址:北京东四西大街 46 号(100711) 电话:(010)65289081

(本社图书如有印装质量问题,本社发行部负责退换)

编者的话

材料是人类物质生活和人类文明进步的基础,新材料是支撑现代文明社会的基石和高新技术发展的先导。

在刚刚过去的 20 世纪,科学技术迅猛发展,各学科交叉融合。随着科学的发展与工业技术的进步,传统的金属材料、无机非金属材料和高分子材料越来越不能满足现代科技应用的需要,科技工作者不断研制出新材料,特别是新型功能材料,如超导材料、智能材料、纳米材料、生物医用材料、储能材料、环境材料、薄膜材料、先进陶瓷材料等等。正是这些新材料所具有的特殊性能,使其他高新技术及产业得以高速发展,同时材料科学与技术本身相关产业也将快速发展。如纳米材料和技术为功能器件的小型化、多功能化和智能化展示了其诱人的发展前景;又如光电子材料的研究与开发为信息技术及产品不断满足人们的要求提供了保障。

21 世纪,材料科学与技术将与信息技术、生物技术等其他科学技术一同为人类的

进步做出贡献。然而,目前有些具有良好发展前景的新型材料的研究与开发,还处于基础阶段,还需要材料工作者做大量理论研究与技术开发工作,并不断总结提高。基于此,我社将有重点、有系统地组织国内从事新材料基础研究、材料制备工艺与先进测试分析技术研制以及产品应用开发的科技工作者,将其取得的最新科技成果及时归纳总结,撰写成著作,编入《21 世纪新材料科学与技术丛书》陆续出版,以推进我国材料科学与技术及其产业化的进程,满足其他高新技术产业发展对新材料提出的更高要求;同时,让更多的科技工作者同享这些研究成果,记录我国在 21 世纪中材料科学与技术的发展历程。

欢迎承担国家“863”项目、国家自然科学基金资助项目、国家“973”项目以及省、部重点研究课题的材料研究学者踊跃参与此项工作,欢迎广大科技工作者和读者提供建议和意见。

2001 年 6 月

前言

从人类发现并利用金属器具开始,就一直在对金属材料进行不断的探索,并创造了灿烂的文明。在人类漫长的历史长河中,金属材料在社会发展与进步中始终处于重要的基础地位。但是金属成形一直是在固态区或者液态区进行的,而人们对许多合金凝固过程中半固态区,尤其是金属的动态凝固过程的半固态区并没有给予足够的重视。因此,金属固态类与液体类成形几乎贯穿了人类社会发展的整个历史。

20 世纪 70 年代初,美国麻省理工学院(MIT)的 Flemings 研究小组在实验时偶然发现了机械搅拌条件下半固态金属的特殊的组织与流变行为,并在研究生的博士论文中报道了这种金属在特定条件下的优良组织与性能。Flemings 等人首先提出了金属半固态成形(Semi-Solid Metal Forming/Processing,简称 SSF 或 SSP)的构想,并进行了大量的系统研究。金属只能在固相区或液相区进行成形的传统格局被打破,为传统冶

金技术的革新带来了生机。金属半固态成形技术具有短流程、近终形(Near Net Shape)生产的特点,并且成形产品的组织性能优良,工模具寿命明显延长,因此得到了世界各国的高度重视。金属半固态成形技术打破了传统的金属成形技术的框架,标志着人类对金属材料行为的认识发展到了一个新的阶段,是一种实现材料加工过程优化改性的新途径,更是一种节能环保的新理念。

从20世纪70年代开始,世界上许多国家对半固态成形技术相继投资并开展了大量的研究工作,半固态成形技术也得到了飞速发展。1990~2004年,先后召开了8届金属与复合材料半固态成形的国际学术会议。美国、意大利、法国、日本、德国等许多国家已经取得了大量的研究成果,许多成果已经成功应用于工业化生产。目前钢铁材料的半固态成形技术还不成熟,许多国家正致力于这方面的研究。应用于商业化生产的技术主要集中于低熔点轻合金上,如铝合金与镁合金。生产的产品已成功应用于汽车、轮船、航空航天、电器、通信和医疗器械等诸多领域。近年来,尤其是轻质的镁合金与铝镁合金半固态成形的产品不但强度高、重量轻,而且具有回收再生的优点,受到投资者的格外青睐。随着笔记本电脑、手机、家用电器等电子产品的快速发展,这类合金的半固态成形技术更具有广阔的应用前景与市场潜力。因此,半固态成形技术被许多专家誉为21世纪最有发展前景的“绿色工业技术”。

我国从20世纪80年代开始对半固态成形技术开展了大量研究工作。多项半固态成形技术的研究项目得到国家自然科学基金的资助,如电磁搅拌技术、单辊剪切冷

却技术、流变学理论研究等。同时,在国家科技部与国家计委(现国家发改委)的支持下,也开展了大量的研究工作。目前,我国的半固态成形技术虽然已经取得了大量研究成果,并初步向生产力转化,但是距离国外先进水平还有一定差距。

对新的技术、理论与工艺进行及时总结,对促进我国科学技术进步具有重要意义。同时,由于半固态成形技术尚不完全成熟,从事相关工作的工程技术人员缺少必要的技术参考资料;并且大专院校高年级学生及研究生在学习时缺少必要的辅助教学参考书。因此,从这两个角度出发,编写《金属半固态成形理论与技术》一书对教学与实践具有重要的参考价值。

作者结合国家自然科学基金项目,以及多年来对半固态成形技术的研究与研究生教学,参考了大量国内外有价值的学术著作与文献,对金属半固态成形技术进行了较全面系统的总结,编写成本书。全书共分9章,分别为:概述、金属半固态成形基础、半固态金属材料的制备原理与方法、半固态金属组织的形成机理、半固态金属的性能、半固态金属坯料的二次加热、金属半固态成形工艺、金属半固态成形过程的数值模拟和金属半固态成形技术的应用现状与前景展望等。

参加本书的编写人员有:东北大学管仁国博士(第1~4章)、沈阳大学马伟民博士(第5、6章)、郑州大学李永刚(第7章)、郑州大学赵红亮博士(第8章)、东北大学王顺成博士(第9章)。全书由管仁国统稿。

在编写过程中,东北大学温景林教授给予了许多宝贵的指导性意见,同时得到了东北大学徐永昌教授的大

力帮助,并得到了许多专家学者的指导和研究生的帮助,在此一并表示感谢!

由于金属半固态成形技术是一门新的交叉性的科学技术,发展迅速,学术思想不统一,加之作者水平所限,编写中难免存在不妥之处,欢迎批评指正。

作 者

2005 年 7 月于沈阳

目 录

1 概述	(1)
1.1 金属半固态成形的概念	(1)
1.2 金属半固态成型的基本工艺路线 ...	(2)
1.2.1 流变成形	(2)
1.2.2 触变成形	(3)
1.3 金属半固态成形的优缺点	(4)
1.4 金属半固态成型技术的发展历史 ...	(8)
1.5 金属半固态成型对金属成形 技术进步的意义	(11)
1.6 金属半固态成型技术的适用范围 ...	(14)
2 金属半固态成型基础	(15)
2.1 液态金属的结构与性质	(15)
2.1.1 液态金属的结构理论	(15)
2.1.2 液态金属的结构特点	(17)
2.1.3 液态金属的性质	(19)
2.2 液态金属的凝固	(30)
2.2.1 液态金属凝固的热力学条件 ...	(30)
2.2.2 液态金属凝固的动力学条件 ...	(31)
2.2.3 液—固界面的结构与行为	(36)
2.2.4 液—固界面前沿液体中的 温度梯度与晶体形态	(38)

2.2.5	凝固过程中液—固界面形态的稳定性判据	··· (39)
2.3	半固态区金属的行为	····· (43)
2.3.1	基本概念	····· (43)
2.3.2	金属凝固过程中半固态区的行为	····· (44)
2.3.3	搅拌、振动、剪切作用下半固态区 金属的凝固行为	····· (51)
2.4	半固态金属固相率的测算	····· (57)
3	半固态金属材料的制备原理与方法	····· (65)
3.1	外场作用下枝晶破碎球化技术	····· (65)
3.1.1	单辊剪切冷却技术	····· (66)
3.1.2	倾斜式冷却剪切技术	····· (83)
3.1.3	机械搅拌技术	····· (96)
3.1.4	电磁搅拌技术	····· (100)
3.1.5	喷射沉积技术	····· (116)
3.1.6	紊流效应技术	····· (120)
3.1.7	超声波振动技术	····· (120)
3.1.8	应变诱导熔体活化技术	····· (121)
3.1.9	其他技术	····· (122)
3.2	合金内部物理化学作用下的枝晶抑制生长技术	····· (123)
3.2.1	细化剂技术	····· (123)
3.2.2	等温处理技术	····· (124)
3.2.3	低温液相线铸造技术	····· (125)
3.2.4	粉末冶金技术	····· (125)
4	半固态金属组织的形成机理	····· (126)
4.1	经典的半固态组织形成机理: 枝晶破碎→磨圆、 熟化→球化机制	····· (126)
4.1.1	枝晶臂机械剪切断裂机制	····· (127)
4.1.2	枝晶臂塑性弯曲诱导晶界上的液相浸润机制	··· (128)

4.1.3 枝晶生长熟化过程引起的枝晶根部熔断机制	(132)
4.2 熔体整体爆发形核与枝晶抑制生长机制	(134)
4.3 半固态温度条件下热作用球化机制	(138)
4.4 单辊剪切冷却技术条件下的组织形成机理	(139)
4.4.1 形核与凝固过程	(144)
4.4.2 自由晶形成机理	(145)
4.4.3 自由晶球化机理	(147)
5 半固态金属的性能	(150)
5.1 半固态金属的流变性能	(150)
5.1.1 半固态金属流变性能的研究方法	(151)
5.1.2 半固态金属的流变行为	(157)
5.2 半固态金属的塑性	(172)
5.2.1 半固态铝合金的塑性	(173)
5.2.2 半固态二元铝合金的塑性	(178)
5.2.3 半固态三元铝合金的塑性	(179)
6 半固态金属坯料的二次加热	(183)
6.1 二次加热的工艺特点	(183)
6.2 二次加热装置	(183)
6.3 二次加热控制技术	(186)
6.3.1 分步控制法	(187)
6.3.2 感应线圈输入能量控制法	(188)
6.3.3 感应线圈涡电流法	(188)
6.4 二次加热实例	(189)
6.5 二次加热应注意的问题	(195)
6.6 二次加热过程的模拟	(197)
7 金属半固态成形工艺	(200)
7.1 触变成形	(200)

7.1.1	触变压铸成形	(200)
7.1.2	触变锻造成形	(213)
7.1.3	触变射铸成形	(215)
7.2	流变成形	(217)
7.2.1	单螺旋机械搅拌式流变成形	(217)
7.2.2	双螺旋机械搅拌式流变成形	(221)
7.2.3	低过热度倾斜板浇注式流变成形	(223)
7.2.4	低过热度浇注和弱机械搅拌式流变成形	(225)
7.2.5	流变轧制成形	(227)
7.2.6	半固态连续挤压扩展成形	(232)
8	金属半固态成形过程的数值模拟	(238)
8.1	金属半固态成形行为的数学模型	(239)
8.1.1	稳态流变行为的数学模型	(239)
8.1.2	非稳态流变行为的数学模型	(242)
8.1.3	触变行为的数学模型	(243)
8.2	金属半固态成形过程的数值模拟方法	(246)
8.2.1	有限差分法	(246)
8.2.2	有限元法	(246)
8.2.3	拉格朗日法	(247)
8.2.4	欧拉法	(247)
8.3	金属半固态成形过程数值模拟实例	(248)
8.3.1	半固态金属浆料制备过程的模拟实例	(248)
8.3.2	坯料二次加热过程的数值模拟实例	(251)
8.3.3	半固态金属成形过程的数值模拟实例	(254)
9	金属半固态成形技术的应用现状与前景展望	(264)
9.1	应用现状	(264)
9.2	问题与对策	(266)
9.2.1	半固态材料的制备与成形过程的理论模型	(267)

9.2.2 低能耗、低成本的近终形成形新技术	(268)
9.2.3 制备高熔点半固态材料的新技术	(270)
9.2.4 适于半固态成形的新型合金与成分设计	(272)
9.3 应用前景展望	(279)
参考文献	(283)

1 概 述

1.1 金属半固态成形的概念

金属半固态成形 (Semi-Solid Metal Forming/Processing, 简称 SSF 或 SSP) 是指利用金属从固态向液态或者从液态向固态两相转变过程中的半固态区的金属具有良好的流变特性而进行的金属成形^[1~6]。该技术的主要技术核心是使固—液混合浆料或坯料获得非枝晶组织, 固相必须球化和细化, 合金组织一般包含有 10 ~ 100 μm 的球形晶、近球形晶或者等轴晶, 半固态材料制备过程中需要将合金树枝晶转化为球形晶或近球形晶, 如图 1-1 所示。这种组织的合金表现出非常小的流动阻力和良好的成形性能。

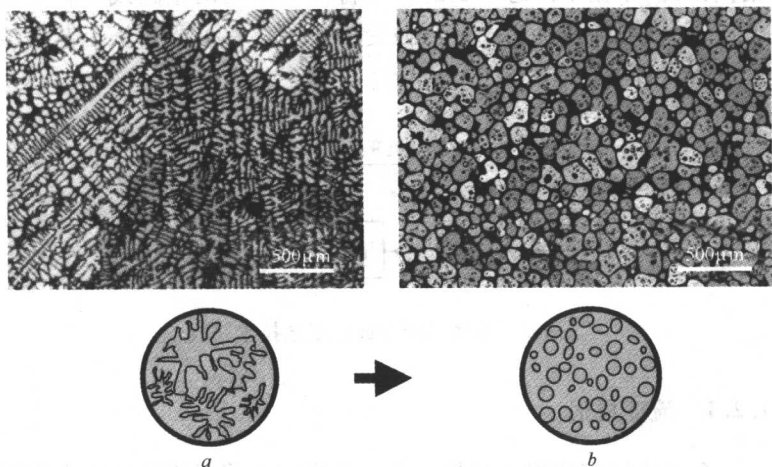


图 1-1 合金由枝晶组织向球形晶的半固态组织转化

a—树枝晶组织; b—球形晶组织

有的学者为了将金属半固态成形与金属半熔融成形进行区分,将金属半固态成形的概念区分为广义和狭义两种概念。狭义金属半固态成形是指首先通过外场或内部物理化学作用制备半固态金属浆料或非枝晶坯料,然后将预先制备好的金属浆料或非枝晶坯料冷却或加热至半固态区进行成形;而将常规铸造得到的固态金属坯料直接加热到半固态区所进行的成形称为半熔融成形。因此,狭义上的金属半固态成形与金属半熔融成形的主要区别,就是狭义金属半固态成形所指的对象是通过外场或内部物理化学作用预先制备的半固态金属浆料或非枝晶坯料。在本书中所提到的金属半固态成形是指广义的金属半固态成形,包括狭义金属半固态成形与金属半熔融成形两种含义。

1.2 金属半固态成形的基本工艺路线

由于半固态金属浆料具有流变与触变性能(将在第4章中介绍),因此,根据半固态金属的这种特性可采用两条路线进行半固态成形,分别称为流变成形与触变成形。二者主要是从工艺路线上进行区分的,如图1-2所示。

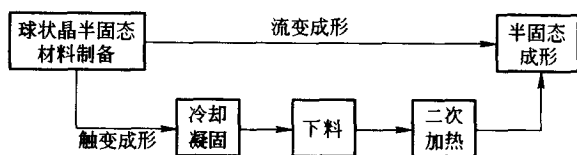


图 1-2 金属半固态成形工艺技术路线

1.2.1 流变成形

金属半固态成形一条技术路线是半固态浆料直接在压力作用下流变成形(Rheoforming),通常称之为流变铸造。流变铸造必须将浆料的制备与压力作用下的成形过程紧密结合,如果浆料制备与浆料压力成形过程之间的距离太长,将会由于半固态浆料的储

存和输送带来实际困难,从而在生产中难以实现。因此,目前成功的流变成形技术大都是将两个工序紧密结合成一体。例如,使制备好的半固态金属浆料直接进入压射室进行的压射成形称为射铸(Injection Molding 或 Thixomolding),它是流变成形中的一种。该技术是将液态金属送入多区段加热与螺旋式剪切的圆桶中,在特殊的加热与螺旋推进搅拌系统中,通过对合金料的加热剪切,并直接射入压射室进行成形^[5-8]。目前进行工业化生产的典型流变成形技术就是射铸技术。它起源于塑料工艺中的注塑技术,已经成功应用于工业化铝合金的半固态成形。

如前所述,由于直接制备的半固态金属浆料的保存和输送很不方便,生产中往往存在很多技术难题,因而流变成形技术发展缓慢,成熟的应用技术报道不多。虽然金属半固态流变技术的应用较少,但是流变成形与触变成形相比,前者具有短流程、节能、节材等特点,因此开发适于进行半固态流变成形的专用设备仍然是一个重要研究方向。近年来东北大学经过大量的努力,结合国家自然科学基金项目,在连续铸挤与单辊剪切冷却制备半固态合金材料的学术思想基础上,提出了半固态连续扩展成形机制,经过多年努力,终于实现了二者的有机结合,设计制造了 A2017 合金的半固态连续扩展挤压成形实验机,得到了组织性能良好的成形材,该技术也是流变成形中的一种。

1.2.2 触变成形

金属半固态成形的另一条工艺路线是将半固态合金浆料铸造成锭坯,根据产品尺寸需要进行下料,经二次加热(也叫重熔加热)后,在半固态温度下进行压力加工成形,通常称之为触变成形(Thixoforming)。由于半固态坯料的二次加热、输送比较方便,并容易实现自动化控制,因此,实际工业生产中主要采用触变成形的方法。

镁合金屑料或颗粒料的射铸技术是触变成形技术的成功范例,首先由道(Dow)化学公司受塑料成形技术的启发而改进的,用来生产镁合金材料。