

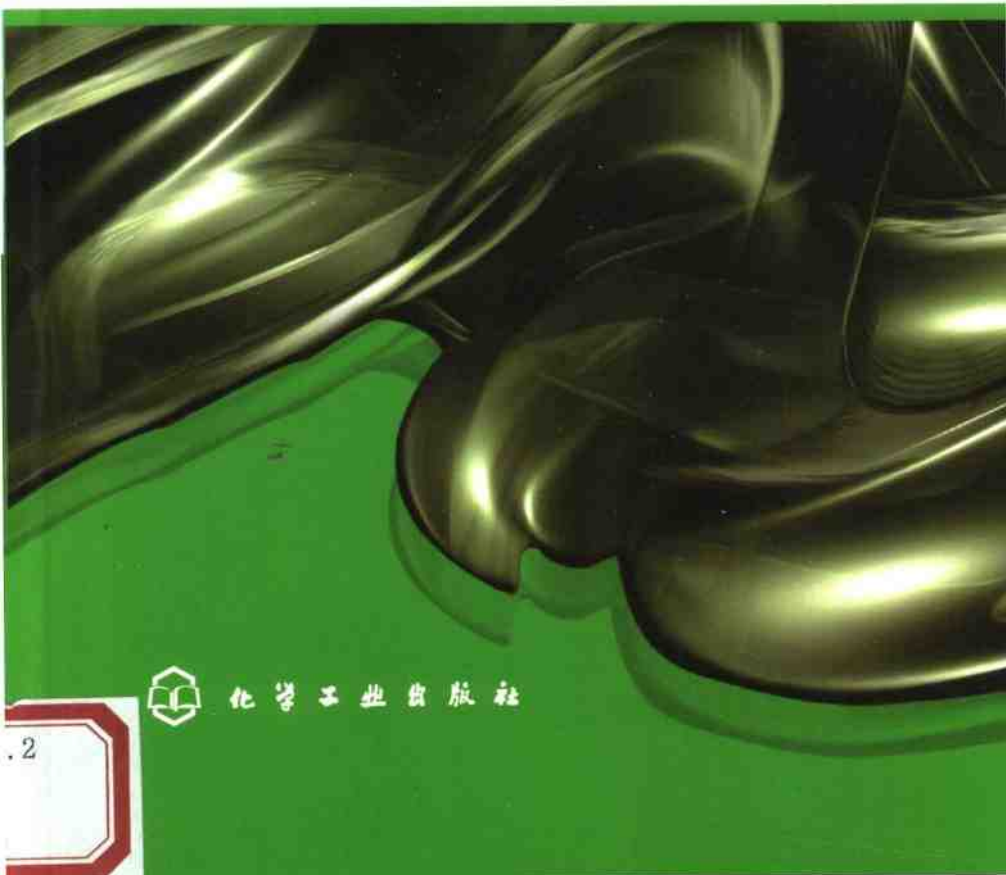
赵祖德 罗守靖 编著

QINGHEJIN
BANGUTAI CHENGXING JISHU

轻合金



半固态成形技术



化学工业出版社

赵祖德 罗守靖 编著

BANGUTAI CHENGXING JISHU

轻合金



半固态成形技术



化学工业出版社

· 北京 ·

本书是在作者多年的研究基础上,同时汲取了国内外学者的研究成果编著而成。其中基础理论部分涉及半固态成形金属浆液的流变充填行为,填充结束后的高压凝固-塑性变形的复合成形过程,揭示了半固态成形过程的物理、化学和力学本质;系统介绍了半固态成形的工艺过程,包括材料和制备方法的选用、二次重熔、半固态压铸、半固态模锻和触变注射等;最后给出了组织性能控制及铝、镁合金应用实例。

本书可供从事半固态金属成形的人员和工程技术人员阅读,也可供大专院校有关师生参考。

图书在版编目(CIP)数据

轻合金半固态成形技术/赵祖德,罗守靖编著. —北京:
化学工业出版社, 2007. 6
ISBN 978-7-122-00812-1

I. 轻… II. ①赵…②罗… III. 轻金属合金-成型-工
艺 IV. TG146. 2

中国版本图书馆CIP数据核字(2007)第103021号

责任编辑:陶艳玲

文字编辑:李玉峰

责任校对:郑捷

装帧设计:韩飞

出版发行:化学工业出版社(北京市东城区青年湖南街13号 邮政编码100011)

印装:北京市彩桥印刷有限责任公司

850mm×1168mm 1/32 印张9 1/2 字数254千字

2007年9月北京第1版第1次印刷

购书咨询:010-64518888(传真:010-64519686) 售后服务:010-64518899

网 址: <http://www.cip.com.cn>

凡购买本书,如有缺损质量问题,本社销售中心负责调换。

定 价:25.00元

版权所有 违者必究

前言

半固态金属 (SSM) 加工技术是 20 世纪 70 年代, 由美国麻省理工学院 Flemings 教授领导的研究组发现的, 其原理是在金属凝固过程中进行强力搅拌, 使枝晶破碎, 得到一种液态金属母液中均匀地悬浮着一定固相组分的固-液混合浆料 (固相组分甚至可高达 60%), 具有很好的流动性, 利用普通的加工方法便可制成产品, 并冠以半固态金属加工。随后, 半固态加工技术研究、开发和应用获得迅速发展, 经历从基础研究、技术开发、设备研制、商业化生产等阶段, 开创了金属材料成形技术的新领域。

半固态金属加工与液态模锻和压力铸造一起构成了一个各有所长、互相补充的加工体系, 能充分利用外在压力的优势, 完成凝固补缩, 消除各种缺陷, 获得形状尺寸各一、性能要求各异的制件。特别是半固态金属加工, 从工艺看, 成形温度低, 模具寿命长 (与压力铸造和液态模锻相比), 变形阻力小 (与液态模锻相比), 以实现精密成形; 从适应性看, 它适用于各种薄壁、厚壁制件, 而液态模锻不适用薄壁制件, 压力铸造不适用厚壁制件。与之相比, 半固态金属加工不足之处在于增加了一道制坯工序, 但却保证了组织的等轴细晶和均匀化。因此, 半固态加工技术受到世界各地锻造加工和铸造加工的密切关注。为了促进半固态金属加工发展, 从 1990 年开始, 每两

年召开一次“半固态合金及复合材料加工”的国际学术会议 (International Conference on Semi-Solid Processing of Alloys and Composites), 至今已召开 9 次, 第 10 届由德国和比利时联合举办, 第 11 届由中国举办。

展望未来, 任重而道远。问题在于半固态加工技术毕竟是一门融液态加工和固态加工的新技术。从理论上讲, 半固态组织、属性及在压力作用下的物理化学和力学行为还不十分清楚; 从应用上看, 制浆 (坯) 技术还有待再研究或完善, 还寄希望开发一种过程简单、质量稳定和成本低廉的新制浆技术, 为企业获得丰厚利润提供保障。基于这一理由, 作者根据自己多年的研究, 特别汲取了由 Anacleto de Figueredo 主编的“半固态金属加工科学与技术” (Science and Technology of Semi-Solid Metal Processing) 中的有关内容编著而成。全书由中国兵器工业第五九研究所赵祖德研究员和哈尔滨工业大学罗守靖教授共同编著, 由哈尔滨工业大学霍文灿教授主审。

最后, 作者还要感谢程远胜、单巍巍、康凤、胡传凯、王艳彬、张晓华和陈强在编写过程中给予的大力帮助, 没有他们的帮助, 本书是不能如期付印的。

由于作者的水平有限, 书中不妥之处望读者批评指正。

作 者
2006 年 4 月

目 录

第 1 章 半固态金属加工概述	1
1.1 应用现状	1
1.2 应用前景	5
1.3 半固态成形技术在我国发展的预测	7
参考文献	7
第 2 章 半固态成型的基本理论	8
2.1 流变充填理论	8
2.1.1 流体的流动类型	9
2.1.2 半固态金属浆料 (slurry) 流变行为	16
2.1.3 具有连续固相半固态糊 (mushy) 的研究	22
2.1.4 固相分数为 0.5 左右的部分重熔半固态金属	23
2.2 高压下凝固理论	23
2.3 半固态模锻下塑性变形理论	27
参考文献	34
第 3 章 半固态加工用材料及其制备方法	36
3.1 半固态加工用材料	36
3.1.1 A356 和 A357	37
3.1.2 A319 和 A355 合金	38
3.1.3 液相铸造比较困难的合金	39
3.2 半固态加工用材料的制备方法	43
3.2.1 液相法	44
3.2.2 固相法	61

3.2.3 控制凝固法	78
3.2.4 半固态合金浆料生产的发展前景	86
3.3 半固态金属坯料二次加热(重熔)	86
3.3.1 坯料二次加热方法	87
3.3.2 坯料二次加热组织演变	91
参考文献	93
第4章 半固态成形工艺	98
4.1 半固态压铸	98
4.1.1 半固态压铸过程	99
4.1.2 半固态压铸模具设计	101
4.1.3 半固态压铸设备	105
4.1.4 半固态压铸工艺	109
4.1.5 半固态压铸实例	116
4.2 半固态模锻	126
4.2.1 半固态模锻用模具	127
4.2.2 半固态模锻设备	141
4.2.3 工艺参数的选取	143
4.2.4 工艺应用实例	145
4.3 触变注射成形	172
4.3.1 成形原理及工艺	172
4.3.2 力学性能	175
4.3.3 触变注射成形的工艺特点	181
4.4 成形件热处理工艺	183
4.5 半固态加工技术的缺陷分析	185
4.6 结束语	186
参考文献	187
第5章 半固态组织性能与质量控制	191
5.1 组织与性能	191
5.1.1 A356 合金	191
5.1.2 A357 半固态铸造合金的性能和微观结构	197
5.2 质量控制	203

5.3 半固态成形数值模拟	215
5.3.1 引言	215
5.3.2 数值计算方法与计算格式	218
5.3.3 模拟计算实例	220
参考文献	252
第6章 半固态金属成形工业应用、新发展及趋势	255
6.1 半固态金属成形工业应用	255
6.1.1 半固态金属成形潜在的应用背景分析	255
6.1.2 工业应用实例分析	256
6.2 半固态金属成形的新发展	274
6.2.1 伪半固态成形工艺	274
6.2.2 双控成形	282
6.3 半固态金属发展趋势	288
参考文献	292

第1章 半固态金属加工概述

1.1 应用现状

半固态成形 (Semi-Solid Forming) 是 1971 年由 David Spencer 在其博士论文中首次提出的, 依据其实验发现: 凝固中的金属材料经强力搅拌, 将生成近球形或棒状晶组织, 在半固态温度下, 该组织具有很好的成形性, 与全液态压铸相比, 实现无湍流充填, 降低了气体卷入的概率; 型腔充填温度低, 导致热冲击减弱和更短的加工周期; 内部缺陷少, 可随后进行热处理, 导致制件后继性能的提高。与固态模锻相比, 成形力较小, 耗能小, 以较少的工序实现较复杂结构件的成形, 且力学性能接近锻件水平^[1]。

最近十几年来, 促使半固态成形技术发展的驱动力是节能汽车的出现, 其表现形式是汽车轻量化的社会需要, 愈来愈受到人们的关注。因而铝镁合金在汽车应用的份额与日俱增。尤其实现轻量化的同时不放低对材料强度和可靠性的要求, 迫使设计者选用高强度铝合金, 而放弃工艺性好的铸造铝合金。这样一来, 半固态成形技术的发展就势在必行了。

半固态成形分触变成形、流变成形和注射成形三种。触变成形

和流变成形主要区别在于：前者把制坯与成形结合在一起，而后者则把制浆与成形结合在一起，如图 1-1 所示。



图 1-1 触变与流变工艺流程

显然，触变成形工艺流程长，但它可以组织专业化生产，质量便于控制，因此成为半固态成形应用于生产的主要工艺之一。而流变成形涉及生产节拍及过程稳定、质量控制等问题，应用还有限。但由于其工艺流程短，有显著节能效益，成为当前研究的热点^[1]，并期望有新的突破。目前应用生产领域的主要有铝合金触变压铸、铝合金触变模锻和镁合金注射成形三种，现分别给予介绍。

(1) 铝合金触变压铸

① 触变压铸的特征 全液态压铸的主要特征是液态金属在高压和高速下充填型腔。其压射比压为几个兆帕、几十个兆帕，甚至高达 500MPa；充填速度约为 5~70m/s，有的还高达 120m/s；充填时间为 0.01~0.2s，最短时可达万分之几秒。而半固态压铸充型时，其表观黏度比液态金属高得多，因而其流动阻力较大。为了满足触变性需要，应具有较高压射压力和增压压力，而压射速度相对全液态压铸可降低。

② 压铸前坯料准备 半固态铝合金坯料，主要是由电磁搅拌



图 1-2 半固态铝合金坯料水平连续生产线

连续生产的 A356、A357。图 1-2 为美国阿卢马克斯工程金属工艺公司位于华盛顿州 Ferndale 的 Intalco 生产厂水平连续生产线^[2]。

③ 坯料重熔 对半固态棒坯，根据制件大小，进行切割分离，然后进入成形前的加热，一般采用多工位的独立控制的电磁感应加热方式，如图 1-3 所示，每分钟可提供一块合格的 A357 坯料。



图 1-3 八工位立式电磁感应半固态重熔加热系统

④ 压铸成形 其中设备选用最为重要。一般采用具有实时控制性能和能够实现复杂压射曲线的压铸机，如图 1-4 所示为瑞士 Buhler 公司研制的 H-630SC 型压铸机。该设备设有 14 个工位，其中 2 个清理工位、3 个投放坯料工位和 9 个加热工位。



图 1-4 H-630SC 型压铸机

⑤ 应用实例 铝合金半固态触变压铸件在汽车轻量化的进程

中，发挥着愈来愈重要的作用。图 1-5、图 1-6 所示为轿车典型半固态触变成形件，主要有汽车悬挂架的支撑件和转向节等。



图 1-5 半固态触变成形轿车后
悬挂架的支撑件



图 1-6 半固态触变成形轿
车驾驶转向节

(2) 铝合金触变模锻

触变模锻比触变压铸有更大的灵活性。从批量讲，没有触变压铸严格，中、小批次即可采用；对设备要求比较低，一般万能油压机即可，只要压力足够；金属充填流程短，偏析低。

触变模锻工艺流程，与触变压铸相似，包括坯料准备、加热和成形。图 1-7 为汽车空调压缩机壳体。

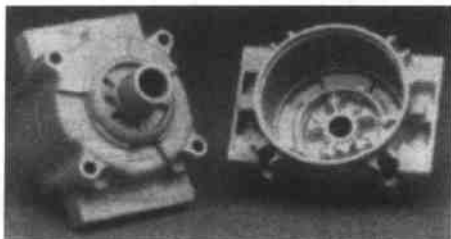


图 1-7 半固态铝合金触变模锻汽车空调压缩机壳体

(3) 镁合金注射成形

美国 DOW 化学公司在塑料注射基础上，于 1989 年发明了一

种镁合金触变注射技术，生产镁合金压铸件。图 1-8 为半固态镁合金触变压铸机。我国上海紫芝合金应用科技有限公司和长春华禹镁业有限公司均从日本引进了 JSW 镁合金半固态注射成形机各 8 台，用于电子产品壳体成形。



图 1-8 半固态镁合金触变压铸机

(4) 半固态成形技术应用水平的分析

总的来说，半固态成形技术应用水平还有限，还在渐进式发展。对于我国来说，基本还处于初始应用阶段。究其原因是多方面的，但最主要的是制坯技术还未达到高效、优质和低成本水平。因为成形技术，包括压铸和模锻，没有什么问题。如果半固态坯料像冶金厂供应热挤压棒那样，从市场随便可以买到，其成本与铸坯相当，而工艺性能和力学性能能保证制件成形和使用，那么半固态成形技术的应用，肯定会有一个突破性进展。

1.2 应用前景

(1) 潜在利益

半固态成形的潜在利益如表 1-1 所示。

很显然，半固态成形潜在利益空间很大，应该予以开拓，推动其在金属加工领域中应用。

(2) 应用领域

表 1-1 半固态成形的潜在利益

特 征	潜在利益或应用
较之液态金属有较低的热容量	更高速的制件成形 更高速的连铸 较低的型腔腐蚀 钢铁制件的成形 其他高熔点材料成形 活化性金属成形
充满型腔时有固体参与	较少的疏松缩孔 较少的喂入原材料(节约原料) 较少的微观偏析 微细晶粒的结构
较之液态金属有较高的黏度且可控制	较少的气体卷入型腔 减少氧化物,改善机械加工性能 较少的冲击塌腔 高速制件成形 完善的终极表面 自动化 新工艺
较之固态金属有较低的流动应力	精细复杂制件成形 高速制件成形 连续外形制件的高速成形(如挤压) 新工艺
与别的材料相合成的能力	复合材料
分离固态和液态的能力	提纯

半固态成形的应用市场将是铝、镁轻合金和少许轻合金基的复合材料,开发产品将是高档轿车零件和电子零件^[1]。

(3) 应用研究方向

① 浆料或坯料制备方法研究,包括流变组织结构形成机制的确切描述。

② 成形过程的数学描述。

③ 合金设计,使其在半固态温度区间下,温度变动不致影响其工艺性和力学性能,以适应更高的固相体分率和更快速的制件成形。

1.3 半固态成形技术在我国发展的预测

我国半固态成形技术的研究和应用达到了一定水平，其标志是：政府支持，如“863”、“973”、重点和一般国家基金支持；有一个组织各种活动的学术组织；有一个由学校、研究机构和企业参加的研究队伍。因此，2004年在塞浦路斯第八届国际半固态加工学术年会上，英国华人学者 Hdset 工程公司朱强先生发出感言，“半固态加工发展寄希望于中国”。为了我国向着从制造业大国到制造业强国的跨越，成形工艺必须有一个大发展、大进步，来推动半固态加工的研究及其应用，这也是同行们实现朱强先生感言的职责所在。

参考文献

- [1] Anacleto de Figueredo. Science and technology of semi-solid metal processing. Worcester Polytechnic Institute Worcester, MA, 2004.
- [2] 毛卫民. 半固态金属成形技术. 北京：机械工业出版社，2004：16.

第2章 半固态成型的基本理论

在加工过程中,半固态金属是一种混合物 (mixture),由球形的(或类似玫瑰状)固体与液体组成,在半固态温度下,保持黏稠状。它既表现出类似固体性质,又表现出类似液体性质。作为“固体”,材料保持其结构完整,在加工前,可以像固体一样搬运。在加工过程中,由于其类似固体性质,可以以一种连续均匀的层流方式填充型腔,避免了全是液体时,由于紊流干扰,而引起制件内部气孔或孔洞的产生。然而,作为固液两相混合物在加工过程的流动行为,是通过两相相互作用和组织熔化方式来实现的,显然,流动过程极其复杂。从某种意义上讲,加工变量和加工条件是不断变化的,这与液态铸造、液态模锻和固态锻造截然不同。因此,浆料的填充、工艺参数的选取及优化、模具设计的最优均需要一个理论指导,这就是编写本章的宗旨所在。

2.1 流变充填理论

流变学是物理力学中的一个分支学科。流变学专门研究固体、液体、液固(固液)混合物(如悬浮物、乳浊液、膏状物)、液气、固气混合物的流动和变形规律,并且特别强调时间的因素。在流变



学中物体的流变性能可用三种基本模型描述：弹性体（又称虎克体，Hooke body）、黏性体（又称牛顿体，Newton body）和塑性体（又称圣维南体，Saint Venant body）。在自然材料和工程材料中，物体的流变性能往往是很复杂的。对于材料的复杂流变性能，可用虎克弹性体、牛顿黏性体和圣维南塑性体的串联、并联等不同形式的组合来表示。比如开尔芬体（Kelvin body），其流变性能可以用虎克体和牛顿体的机械模型并联以后所出现的流变性能来表示，在流动过程中表现有弹性前效和弹性后效；麦克斯韦体（Maxwell body）的流变性能可用由虎克体和牛顿体的机械模型串联以后所出现的流变性能来表示，在流动过程中表现有应力松弛的特征；施韦道夫体（Schwedoff body）的流变性能可以用虎克体串联一组由圣维南体与另一虎克体和牛顿体的串联所组成的并联模式来表示，在流动过程中表现有蠕变的特征，同时也有应力松弛的流变行为；宾汉体（Bingham body）的流变性能是施韦道夫体的一种特殊情况，同时表现出蠕变和应力松弛的流变行为。

金属由液态向固态转变的过程中，随着温度的下降，由全液态变为液固态（固态质点较少，晶粒尚未连成骨架，为液态合金所包围）、固液态（固态晶粒连成骨架，在骨架之间有液态合金），最后成为全固态，其流变模型从牛顿流体变为伪塑性体、宾汉体，最后为弹塑性体。

2.1.1 流体的流动类型

(1) 两种流动状态

流体运动存在两种不同的流动状态：层流和湍流。但可以由下式进行判断

$$Re = \frac{vd\rho}{\eta} \quad (2-1)$$

式中 Re ——雷诺数；

v ——流体在管内的平均流速， $m^2 \cdot s^{-1}$ ；

d ——管道直径， m ；