

铝镁合金半固态成形 理论与工艺技术

LVMEI HEJIN
BANGUTAI CHENGXING
LILUN YU GONGYI JISHU

王开坤 编著



 机械工业出版社
CHINA MACHINE PRESS

铝镁合金半固态成形 理论与工艺技术

王开坤 编著



机械工业出版社

金属材料半固态成形技术是一种在介于普通铸造（纯液态）和锻造（纯固态）之间的短流程近净成形工艺。针对节能减排对汽车轻量化加工的迫切需求，结合作者多年来在承担国家“863”、“973”、德意志科研联合会重大基础研究项目（DFG-SFB289）和北京市自然科学基金等所取得的部分研究成果，以典型轻质金属材料——铝合金和镁合金为研究对象，论述了半固态成形技术基本工艺、常用半固态金属及复合材料组织性能、金属材料在半固态下的本构模型。重点阐述了基于半固态成形理论开发的A356铝合金复杂零件半固态感应加热和触变锻造成形工艺以及模拟技术；详细介绍了铝镁合金双层复合管半固态多坯料挤压成形工艺，包括不同形状半固态坯料制备、半固态加热及组织性能分析、双层管半固态共挤压成形数值模拟等。另外，还介绍了第11届合金及复合材料半固态加工国际学术会议展品情况。

本书可为高等院校师生、科研院所研究人员，以及从事有色金属及复合材料加工的企事业单位工程技术人员在材料制备、成形加工等方面提供阅读参考。

图书在版编目（CIP）数据

铝镁合金半固态成形理论与工艺技术/王开坤编著. —北京：机械工业出版社，2010.12

ISBN 978-7-111-32534-5

I. ①铝… II. ①王… III. ①铝镁合金—半固态成形—研究 IV. ①TG146.2

中国版本图书馆CIP数据核字（2010）第226636号

机械工业出版社（北京市百万庄大街22号 邮政编码100037）

策划编辑：何月秋 责任编辑：何月秋 季顺利

版式设计：张世琴 责任校对：李秋荣

封面设计：马精明 责任印制：乔宇

北京机工印刷厂印刷（兴文装订厂装订）

2011年1月第1版第1次印刷

148mm×210mm·8印张·233千字

0 001—3 000册

标准书号：ISBN 978-7-111-32534-5

定价：28.00元

凡购本书，如有缺页、倒页、脱页，由本社发行部调换

电话服务

策划编辑：(010)88379732

社服务中心：(010)88361066

网络服务

销售一部：(010)68326294

门户网：<http://www.cmpbook.com>

销售二部：(010)88379649

教材网：<http://www.cmpedu.com>

读者服务部：(010)68993821

封面防伪标均为盗版

前 言

半固态加工是对具有一定液相组分的固液混合浆料进行压铸、挤压或模锻成形，是一种介于普通铸造（纯液态）和锻造（纯固态）之间的成形方法。与普通的加工方法相比，半固态金属加工具有如下优点：可一次精确成形复杂形状零件，实现近净成形；凝固收缩小，成形件尺寸精度高；成形件力学和组织性能好；可实现对难加工材料的成形加工；且成形压力低，模具使用寿命高等。20世纪70年代以来，该技术得到了美国、德国、意大利和日本等发达国家的普遍重视，已先后对铝、镁、铜、钢铁等合金和复合材料在半固态工艺试验和理论等方面开展了广泛的研究。广大科技工作者在半固态合金的浆料制备（如电磁搅拌法制备半固态铝合金、钢铁浆料和坯料、斜槽法制备合金浆料、半固态镁合金双螺旋流变制备装置）、合金的半固态触变和流变成形、半固态组织的形成机制、触变成形过程的数值模拟等基础理论和试验研究方面开展了大量卓有成效的研究工作。

近些年来，随着对半固态成形技术研究工作的不断深入和对轻质合金半固态成形技术的成熟掌握，研究重点已逐步从以半固态组织研究为主的理论研究向以半固态成形实用复杂结构零件加工和复合材料制备加工的方向迈进。

作者在师从 R. Kopp 教授于德国亚琛工业大学金属成形所攻读博士期间，有幸负责了 Kopp 教授主持的德意志科研联合会（DFG—Deutsche Forschungsgemeinschaft）特殊领域研究项目 SFB289（Sonderforschungsbereich）（也称为重大基础研究项目）课题：“金属材料半固态成形技术及其性能”中的子项目——有色金属及其复合材料的半固态锻造技术及其模拟。该 SFB289 项目从 1996 年起分 4 期共连续 12 年从德国政府获得资金支持（总项目于 2007 年结束），是公认的水平很高的半固态研究项目，先后共有 12 个研究所和 3 个公司

参与合作，涉及研究领域包括冶金、材料学、表面工程、摩擦技术、陶瓷、自动化控制、热能控制技术、成形技术、模拟技术等，对半固态成形技术进行了全面、深入和系统的基础研究和工业开发。在研究过程中，作者独立设计了一复杂标准零件成形的整套模具，对A356铝合金及其颗粒增强复合材料从半固态坯料制备、感应加热到半固态锻造成形从理论和试验上进行了系统的研究，在试验中实现了半固态锻造成形中等规模的生产。此外，使用有限元软件(Larstran/Shape)对锻造成形过程成功进行模拟。首次提出半固态浆料流动前沿等体积流量概念，在试验中成功得到验证。对半固态复合连接成形技术进行了系统研究，成功实现半固态铝合金与黄铜、纯铜、普通碳素钢和不锈钢的无缺陷连接。

双层复合管的加工制造是近几年发展起来的一种先进成形工艺，主要应用于汽车、建材、石油化工、暖通以及航空航天等领域。用常规方法生产的双层管，其内层管与外层管之间的连接有缝隙，在对强度和连接有极高要求的领域如航空航天领域，这些缝隙会对飞行器安全构成致命威胁，因为在高温下缝隙中的空气会受热膨胀使复合管变形而损害。此外，生产复合管通常至少需要两个工步：第一步是分别生产出同质材料的单层管；第二步是采用包覆或焊接的方法将第一步生产出的单层管进行复合连接。该工艺生产周期长、能耗高、不能实现一次成形。针对上述问题，作者提出了用半固态成形技术与多坯料挤压成形相结合的新方法来制备加工双层复合管，使双层管制备过程与连接过程同时完成。该技术是一项高度集成的原创性技术，不但可以实现双层管生产过程短流程、近终形的成形制造，而且可以降低能源消耗，提高产品质量。

作者多年以来一直从事半固态成形技术方面的研究工作，为了促进该项技术的发展和應用，在对金属材料半固态成形技术理论分析总结的基础上，将作者近些年所从事半固态研究的部分成果进行了总结，并作为本书的主要内容。全书共分8章：第1章绪论；第2章半固态成形用铝镁合金及颗粒增强复合材料；第3章金属材料在半固态下的本构模型；第4章A356铝合金半固态感应加热及复杂零件触变锻造成形；第5章复杂零件触变锻造成形的有限元模拟；第6

章铝镁合金双层复合管半固态多坯料挤压成形；第7章双层复合管半固态多坯料挤压成形有限元模拟；第8章等体积流量法在触变锻造成形流动前沿中的应用。附录介绍了第11届合金及复合材料半固态加工国际学术会议展品情况。

本书第3章中的3.2节单相模型和3.3节双相模型主要根据 Helen V. Atkinson 编写的《Modelling of Semi-solid Processing》书中第3章和第4章翻译而来；第6章、第7章主要内容选自课题组毕业研究生张鹏和杜艳梅硕士学位论文。其他章节由作者撰写。在此对所采用文献的作者表示衷心感谢。

衷心感谢德意志科研联合会 (DFG)、德意志政府学术中心 (DAAD)、国家“863”计划和北京市自然科学基金多年来为作者提供了研究经费，使作者有精力专注于半固态成形技术的研究开发。

由于作者水平有限和时间仓促，不足之处在所难免，虚心接受广大读者的批评指正。

作 者

目 录

前言

第 1 章 绪论	1
1.1 轻金属在汽车工业中的应用	1
1.2 半固态成形技术及其成形方法	3
1.2.1 半固态成形技术	3
1.2.2 半固态成形方法	6
1.3 半固态浆料的制备方法及组织形成机理	13
1.3.1 半固态浆料的制备方法	13
1.3.2 半固态组织形成机理	18
1.4 半固态加工技术的国内外研究进展	19
参考文献	21
第 2 章 半固态成形用铝镁合金及颗粒增强复合材料	25
2.1 半固态成形铝合金的材料及性能	25
2.1.1 半固态成形铝合金的材料及力学性能	25
2.1.2 半固态成形 A356 铝合金的组织性能	27
2.2 半固态成形镁合金的材料及性能	30
2.2.1 半固态成形镁合金的材料及力学性能	31
2.2.2 半固态成形镁合金的组织性能	33
2.3 颗粒增强金属基复合材料及其半固态成形	38
2.3.1 有色金属合金的强化方法	38
2.3.2 SiC_p/Al 复合材料的制备方法	39
2.3.3 SiC 增强 A356 铝合金复合材料的半固态加工	43
参考文献	46
第 3 章 金属材料在半固态状态下的本构模型	49
3.1 半固态金属材料的物理参数	49
3.2 金属材料在半固态状态下的单相模型	55

3.2.1	数值模拟中的数学模型	56
3.2.2	触变性对 T 形模具充型的影响	61
3.2.3	单相模拟的局限性	64
3.3	半固态加工建模的双相法	66
3.3.1	用两相模型建模	66
3.3.2	数学模型	69
	参考文献	77
第 4 章	A356 铝合金半固态感应加热及复杂零件触变 锻造成形	80
4.1	感应加热的原理	80
4.2	感应加热中功率选择的准则和坯料加热方式	82
4.2.1	感应加热中功率选择的准则	82
4.2.2	加热坯料的放置方式	84
4.3	A356 铝合金的感应加热及分析	84
4.3.1	控制程序	85
4.3.2	A356 铝合金感应加热结果	88
4.3.3	半固态感应加热热能参数分析	91
4.4	A356 铝合金的触变锻造	92
4.4.1	触变锻造设备及其控制程序	93
4.4.2	A356 铝合金的触变锻造过程	97
4.5	复杂零件触变锻造成形中的液固相分离	98
4.5.1	零件下双杯和法兰连接处的偏析状况	98
4.5.2	法兰中的液固相偏析	100
4.6	断口分析	102
4.6.1	断口试样的制备	103
4.6.2	断口扫描电镜分析	104
4.6.3	半固态金属断裂的力学模型研究	108
4.6.4	液相体积分数对断裂机理的影响	109
	参考文献	111
第 5 章	复杂零件触变锻造成形的有限元模拟	114
5.1	有限元模拟技术在半固态成形中的应用	114
5.2	金属塑性成形专用商业有限元软件 Larstran / Shape 简介	115

5.3	用 Larstran /Shape 软件建立触变锻造模拟的模型	116
5.3.1	基本假设	116
5.3.2	边界条件	116
5.3.3	提高计算效率的策略	118
5.4	两种不同触变锻造成形工艺中的金属流动行为	119
5.4.1	墩粗 + 复合挤压的有限元模拟	120
5.4.2	墩粗 + 挤压的有限元模拟	128
5.4.3	两种不同触变锻造成形工艺中浆料流动的比较	131
5.5	A356 铝合金零件的触变锻造与其模拟结果比较	133
5.5.1	标准零件的触变锻造结果及其与模拟结果的比较	133
5.5.2	非标准零件的触变锻造结果及其与模拟结果的比较	136
	参考文献	140
第 6 章	铝镁合金双层复合管半固态多坯料挤压成形 ...	142
6.1	双层复合管的应用及制备技术概述	142
6.1.1	双层复合管的应用现状	142
6.1.2	双层复合管常用制备技术	144
6.2	铝镁合金棒状和环状半固态坯料的制备	147
6.2.1	A356 铝合金半固态坯料的制备	147
6.2.2	AZ91 镁合金半固态坯料的制备	158
6.3	棒状和环状坯料半固态的二次加热与微观组织	164
6.3.1	A356 铝合金坯料的二次加热	164
6.3.2	AZ91 镁合金坯料的二次加热	175
6.4	双层复合管半固态多坯料挤压成形模具设计	177
6.4.1	制坯模的设计与优化	177
6.4.2	双层复合管半固态共挤压成形模具的设计	178
6.5	双层复合管半固态多坯料挤压成形界面的结合原理	180
	参考文献	185
第 7 章	双层复合管半固态多坯料挤压成形有限元	
	模拟	188
7.1	有限元仿真软件 ABAQUS 简介	188
7.2	双层复合管有限元模拟模型的建立	189
7.2.1	双层复合管多坯料挤压成形有限元模型化	189

7.2.2 加载方式、边界条件和接触关系的建立	192
7.3 双层复合管不同挤压成形方式的有限元模拟及分析	194
7.3.1 双层复合管正挤压成形方式的模拟及分析	194
7.3.2 双层复合管反挤压成形方式的模拟及分析	204
7.3.3 双层复合管带芯轴挤压成形方式的模拟及分析	215
7.4 三种挤压成形方式的比较	220
参考文献	223
第8章 等体积流量法在触变锻造成形流动前沿中的 应用	224
8.1 流动前沿的设计	225
8.2 使用平锻模和带有 16°角的锻模进行工步挤压	226
8.2.1 使用平锻模进行工步挤压	226
8.2.2 使用带有 16°角的锻模进行工步挤压	228
8.3 使用平锻模和带有 16°角的锻模进行镦粗	229
8.3.1 使用平锻模镦粗	229
8.3.2 使用带有 16°角的锻模进行镦粗	230
8.4 触变锻造流动前沿研究结果讨论	232
参考文献	233
附录 第11届合金及复合材料半固态加工国际学术会 议展品介绍	235

第 1 章 绪 论

1.1 轻金属在汽车工业中的应用

近些年来，随着对新材料及其加工技术研究的不断发展，在汽车工业零件设计和加工中对材料的选择标准变得越来越复杂。一方面，新材料的使用必须与传统的材料相匹配；另一方面，对新材料的选择必须符合设计者、造型专家、生产工程师、产品规划部门和零件供应商等提出的各种要求^[1-5]。然而，目前一个共同的认识是汽车质量的轻量化是未来汽车零件制造材料选择的重要准则，因为轻量化可以降低发动机对汽油的消耗，从而减轻对环境造成的污染。因而寻找和研究用于替代钢铁零件的新材料及其创造性的加工方法是材料科学工作者一项永无止境的任务和研究的动力。目前，对铝镁合金的研究及其在汽车工业中的应用已取得了较大的进展。在世界著名的德国宝马公司已开始试用高强铝合金制造的汽车发动机，由于价格昂贵目前还无法普及。表 1-1 所示为金属材料轻量化与工业要求的定性关系。

表 1-1 金属材料轻量化与工业要求的定性关系^[6-8]

工业选材依据	金属材料轻量化要求
<ul style="list-style-type: none">● 韧性● 使用寿命以及可回收性● 价格● 质量● 设计的灵活性● 安全性	<ul style="list-style-type: none">● 易于成形加工● 高的比强度● 吸收能量● 绝热能力● 相对较低的价格（Ti 除外）● 耐久性和可回收性

事实上，在世界不同区域，对汽车工业中零件的轻量化和燃油消耗的经济性有不同的评定标准。例如，在美国，对铝合金的使用，政府制定了一套强制性的 CAFE 标准，用每加仑燃油行驶公里数来

衡量汽车制造商生产汽车的水平。而在欧洲，对汽车使用性能的要求更为重要，其评定标准重点放在对汽车零件的回收和环保等指标上，强调人与自然的和谐性，更强调汽车的人性化设计。因而质量的减轻是通过性能的提高来实现，并确定了共同接受的 3L 车辆标准（每行驶 100km 的汽油消耗量为 3L）。在日本，汽车的轻量化是通过逐步使用铝合金压铸件代替钢铁材料来实现的，如车内的空调系统、驾驶系统和刹车片外壳等。表 1-2 给出了钢铁、铝合金、镁合金和塑料之间的常用性能比较。

表 1-2 钢铁、铝合金、镁合金和工程塑料之间的常用性能比较^[9-11]

材料	ρ / (g · cm ⁻³)	E /GPa	E/ρ	σ /MPa	σ/ρ	α_i / (W · m ⁻¹ · K ⁻¹)
铸件	7.15	180	24.3	200 ~ 400	27 ~ 54	80
钢铁	7.8	210	27	200 ~ 500	27 ~ 64	46
铝合金	2.7	70	25.9	200 ~ 350	73 ~ 128	247
工程塑料	1.13 ~ 2	15 ~ 25	10 ~ 12.5	100 ~ 250	50 ~ 167	20 ~ 50
镁合金	1.74 ~ 1.90	45	24 ~ 26	180 ~ 300	118 ~ 172	157

为了减小在大气污染问题上意见的分歧，20 世纪 90 年代，欧洲和北美汽车生产商共同制定了一个减少汽车尾气排放量的目标：在 2010 年底减少燃油消耗 25%，从而达到降低 CO₂ 排放量 30% 的目标^[12]。从经济性上分析，质量的减轻对汽油的消耗有直接的影响。据计算，汽车质量每减轻 100kg，则每行驶 100km 的路程可节约燃油约 0.5L^[13,14]。

随着铝合金压铸件在汽车工业应用范围的不断扩大，对汽车零件进一步轻量化和设计制造具有更高可靠性零件的要求也越来越迫切。铝合金压铸件在汽车工业的应用给汽车制造商带来了丰厚的利润，现在汽车制造工程师们瞄准了生产具有更高使用性能要求的零部件，例如发动机零部件（见图 1-1，图 1-2）、悬架装置零件和密封装置零件（见图 1-2）等。降低这些零件的质量和制造成本，生产近净薄壁结构零件，使之同时具有优越的力学性能和使用性能，并使

用短流程加工技术是解决上述问题的关键技术之一^[16,17]。

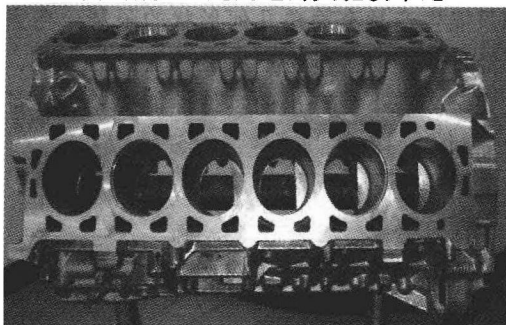


图 1-1 通过低压铸造生产的 12 缸铝合金曲轴箱

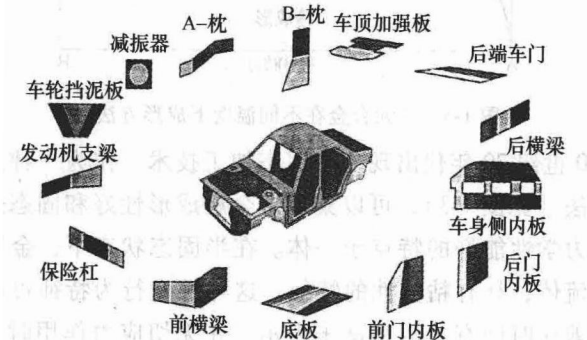


图 1-2 汽车上可以使用 Mg 合金代替钢铁材料的部件^[15]

另一方面，材料科学家和工程师们也在努力寻找可用于制造领域的新的加工技术。20 世纪 70 年代在 MIT（麻省理工学院）由 David Spencer 发现的金属材料在半固态状态下特殊的触变和流变性能给实现近净成形薄壁零件生产带来了希望^[18]。

1.2 半固态成形技术及其成形方法

1.2.1 半固态成形技术

通常情况下，金属成形完全在固态下进行（如锻造）或完全在液态下进行（如铸造）。在完全固态下生产出的零件通常具有较好的

使用性能（力学性能），但它通常要经过比较长的生产工步，受到高的能量消耗和只能生产具有简单几何形状的限制。在完全液态下进行铸造时，可经过较少的工步生产出形状复杂的零件，但所生产零件性能要比在完全固态下生产出的零件性能要差，并且常常伴随有铸造缺陷。

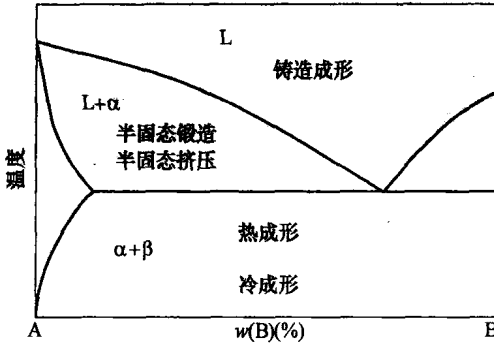


图 1-3 二元合金在不同温度下成形方法

在 20 世纪 70 年代出现的半固态加工技术，作为一种先进的金属加工方法（见图 1-3），可以集液态金属成形性好和固态金属加工成形零件力学性能好的特点于一体。在半固态状态下，金属材料就像触变的流体，具有粘塑性的特征。这种触变行为特征可以使用与切应力和剪切时间有关的粘度来表示。在无切应力作用时，半固态金属的特征就近似在固体状态时的特征；但在切应力作用下，粘度就开始降低，金属材料具有流动特性。因而制备半固态浆料的关键技术是生产具有细小近球形、均匀分布于液相中的固相颗粒的坯料组织。半固态金属最重要的特征是其粘度可以控制，并可以实现无湍流的模具充填。这种形式的模具充填过程可以降低或避免常规铸造中出现的气体夹入，从而生产出具有优良力学性能的零件。因而在理论上半固态金属的充填过程是层流，并且具有封闭的流动前沿，这种流动前沿可大幅度地降低缩孔的出现和氧化夹杂物的进入。与传统铸造生产的零件相比，用半固态技术生产出的零件具有焊接性，并可进行热处理，以提高其力学性能。此外，模具充填温度低，金属所含热量低，从而降低对模具的热冲击。图 1-4 显示了 A356 铝合

金在铸态（见图 1-4a）和半固态（见图 1-4b）状态下的微观组织。

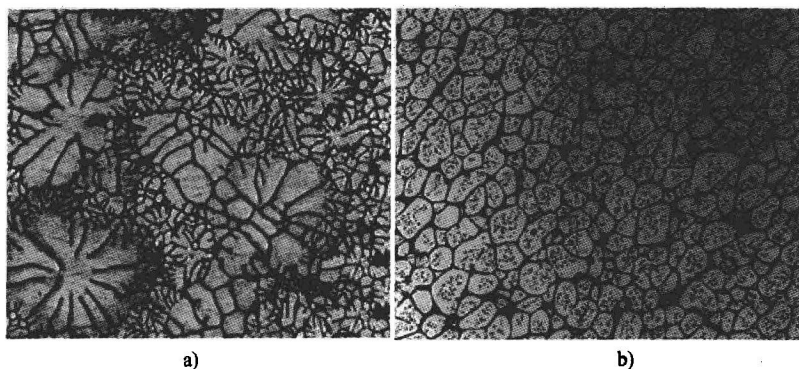


图 1-4 A356 铝合金的微观组织 (250 ×)

a) 铸态 b) 半固态

表 1-3 半固态成形技术与普通压铸和锻造工艺的比较

序号	比 较
1	半固态金属浆料在凝固过程中的收缩量减小，从而大大降低了零件的缩孔、缩松等缺陷
2	半固态金属成形时成形周期短，因而生产效率高
3	半固态金属在成形过程中充型平稳，无湍流和喷溅，从而减轻了金属的吸气和氧化，使得成形零件可以通过热处理来进行强化，强度比液态金属的压铸件更高
4	半固体成形过程中可实现等体积流量的变形，坯料材料的利用率可达 95% 以上，因此材料损耗和浪费少，是真正的绿色加工技术
5	由于半固态金属充型时的温度低于液态金属成形，因此大大减轻了模具的热冲击，提高了模具的寿命
6	半固态金属成形车间不需要处理液态金属，操作安全，工作环境优良
7	半固态金属的粘度较高，可以方便地加入增强材料（颗粒或纤维）而制备复合材料，同时还可改善制备复合材料中非金属材料漂浮、偏析以及金属基体不润滑的技术难题

(续)

序号	比 较
8	与固态成形相比,半固态金属的成形应力显著降低,因此成形设备吨位要求低,同时可以成形很复杂的零件,缩短加工工序,降低成本,而性能则与固态金属模锻相当

在半固态金属成形研究过程中,还发现了其他一些优点,如可以实现近净成形,可成形薄壁零件,具有低的表面粗糙度和尺寸公差等^[19]。另外,使用半固态方法生产的零件比挤压铸造生产的零件质量要好。表 1-3 给出了半固态成形技术与普通压铸工艺和锻造工艺的比较^[20,21]。

1.2.2 半固态成形方法

根据半固态浆料的制备路线,半固态成形方法可以分为触变成形和流变成形,其工艺路线如图 1-5 所示。在当今可见的半固态技术工业化应用中,主要使用触变成形。其大致步骤包括制备具有所需组织的半固态坯料,再进行感应加热和加压成形。

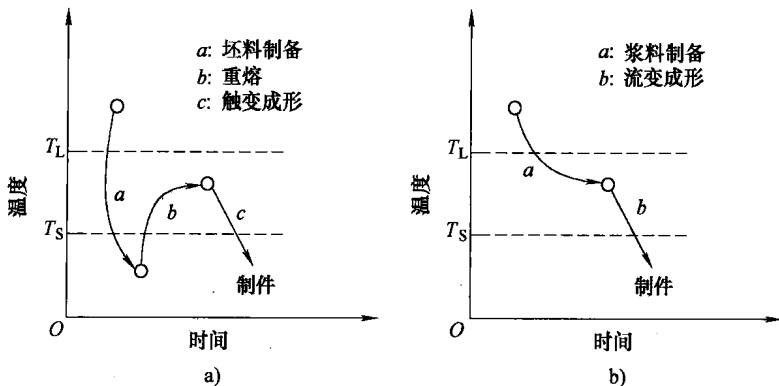


图 1-5 两种半固态成形的工艺路线

a) 触变成形 b) 流变成形

半固态触变成形最显著的优点是成形过程与液态金属完全分开,因而半固态触变成形过程可以像锻造和冲压生产过程那样实现完全自动化生产。正是由于这种优点才使半固态技术在工业中得到规模

性的使用。在美国等国家的工业企业已开发出了数条生产线。半固态触变成形最突出的缺点是在半固态坯料的再加热过程中，坯料会发生显微组织和化学成分的不均匀分布，从而对加工零件的性能有直接影响。图 1-6 所示为金属材料在半固态成形中的不同状态。

表 1-4 所示为半固态金属触变成形和流变成形特点的比较。

表 1-4 半固态金属触变成形和流变成形的特点^[22, 23]

序号	特点分类	触变成形工艺	流变成形工艺
1	半固态浆料来源	液态或固态	液态
2	固相体积分数	40% ~ 60%	小于 30%
3	加工流程	加工流程较长， 需要二次加热	加工流程较短， 不需二次加热
4	废料回收	需要专门设备回收	可直接回收
5	成形方法	压铸、模锻、挤压等	压铸
6	工艺控制	较容易	较难
7	适用范围	铝、镁、铜、钢、 复合材料等	镁、铝等熔点较低的 合金及其复合材料
8	应用现状	已工业化应用	试验研究阶段

1. 触变成形

由半固态浆料制成半固态坯料后，在加热前先根据计算切割成一定的长度，再使用垂直或水平感应加热系统把坯料加热到半固态状态。在加热时必须根据液 / 固相比例和坯料中温度均匀分布的要求对加热过程实行精确的控制，包括对加热过程中的功率、时间、温度、电压、频率等进行控制。加热完成后，把半固态坯料放入到压铸机的压铸室中或压力机的下模膛中进行压力成形，图 1-7 给出了不同半固态触变成形方法——触变锻造和触变挤压。成形过程中主要控制参数包括成形速度、成形压力、模具润滑状态和模具预热温度等。

(1) 半固态触变锻造 半固态触变锻造是将加热到半固态的坯料在锻模中进行以压缩变形为主的小飞边模锻，以获得所需形状、性能制品的加工方法。与流变铸造、触变铸造工艺相比，半固态触变锻造可以成形变形抗力较大的高固相率的半固态材料，并可以成形一般锻造难以成形的许多超合金。到现在为止，利用半固态触变锻造已经进行了各种铝合金、铜合金、铸铁、高碳钢，甚至高速钢等材料的锻造加工试验，进行了联轴器、齿轮等机械零件的研究。