

金属半固态加工技术

JINSHU BANGUTAI JIAGONG JISHU

谢水生 李兴刚 王浩 张莹 编著



冶金工业出版社
Metallurgical Industry Press

金属半固态加工技术

谢水生 李兴刚 王 浩 张 莹 编著

北 京
冶金工业出版社
2012

前 言

金属半固态加工 (Semi - Solid Metal Process or Semi - Solid Metal Forming, 简称为 SSM) 具有一系列突出特点, 尤其是金属半固态加工成形的零件精度高、质量好, 能实现净近成形 (Near - net - shape)。因此, 近年来成为金属加工成形技术的研究热点之一。

金属半固态加工技术的发展应追溯到 20 世纪 70 年代初。在美国麻省理工学院 (MIT) 学者发现金属半固态的触变性能后, 半固态技术的研究和应用得到迅速发展, 经历了基础研究、技术开发、设备研制、商业化生产等不同阶段。自 1990 年起, 国际上每两年召开一次“合金和复合材料半固态加工”国际学术会议 (International Conference on Semi - Solid Processing of Alloys and Composites), 至今已召开了 11 届, 第 12 届“合金和复合材料半固态加工”国际学术会议计划于 2012 年 10 月在南非 Cape Town 召开。目前, 金属半固态加工成形技术已在汽车工业得到一定程度的应用。

金属半固态加工技术不同于传统的加工成形技术。它是在金属凝固过程中, 进行剧烈搅拌或处理, 将凝固过程中形成的枝晶打碎或完全抑制枝晶的生长, 然后直接进行流变铸造或制备具有非枝晶组织的坯锭后, 再进行分割、二次重熔和触变成形。采用这种方法制备的产品其一次相组织结构为均匀、细小、近球形颗粒, 因此材料的各项性能优良。

金属半固态加工技术的工艺路线主要有两条: 一条是金属从液态冷却到半固态温度, 然后对所得到的半固态浆料直接成形, 通常被称为流变铸造 (成形) (Rheocasting 或 Rheoforming); 另一条是将半固态浆料冷却凝固, 制备成坯料, 然后根据产品尺寸下料, 再重新加热到半固态温度 (二次加热 Reheating) 成形, 通常称为触变成形 (Thixo-forming)。

自 1996 年开始, 作者一直在国家自然科学基金的连续资助下, 较

系统地开展了金属半固态加工技术的应用基础研究,分别进行了:Al基复合材料金属半固态成形技术及机理的研究(项目号:59575046)、半固态铝合金触变成形特性及数学模型的研究(项目号:59975011)、半固态镁合金流变特性及连续射铸成形的研究(项目号:50175006)、阻尼冷管法制备半固态镁合金浆料的研究(项目号:50374014)、镁合金半固态铸轧的组织演变及变形特性研究(项目号:50674017)。同时,于1999年撰写了《半固态金属加工技术及其应用》一书,由冶金工业出版社出版发行,获得了广大读者的认可,起到了“抛砖引玉”的作用。目前,金属半固态加工技术发展迅速,出现了大量新的研究成果。为了促进这项技术的进一步发展和应用,我们较详细地总结了近年来国内外有关金属半固态加工成形技术的新成果、新工艺、新技术和新装备等,编写了本书。希望本书能给读者提供更多的帮助。

本书共分10章。第1章为概论,介绍了金属半固态加工技术的特点、发展和应用;第2章为半固态合金浆料(坯料)制备,较详细地介绍了各种半固态合金浆料的制备方法及生产线;第3章流变学,讨论了半固态金属浆料的流变特性和影响流变特性的因素;第4章非枝晶组织及其凝固过程,详细分析了非枝晶组织的形成与演化规律;第5章流变成形,介绍了流变成形工艺、设备及相关问题;第6章触变成形,介绍了二次加热及触变成形工艺与设备;第7章半固态注射成形,介绍了注射成形工艺路线及特点;第8章半固态加工用合金的设计及热力学计算,从热力学出发,介绍了设计半固态新合金的基本原理与方法;第9章非枝晶组织坯料的塑性变形,阐述了半固态金属变形机制;第10章数值模拟在金属半固态加工中的应用,重点介绍了模拟技术在半固态加工中的应用和主要模型等。

本书第1、2、3、9章由谢水生教授撰写;第4、5、6、7、10章由李兴刚博士撰写;第8章由徐骏教授撰写;王浩教授和张莹博士对全书做了进一步补充、整理和加工,最后全书由谢水生教授调整、修改并定稿。

在本书编写过程中,得到了一起参与相关项目研究工作的同事以及参与项目研究的硕士、博士和博士后的支持,其中郭钧硕士、潘洪平博士、丁志勇博士、江运喜博士、黄国杰博士、李兴刚博士、李雷

博士、杨浩强博士、张小立博士、张颂扬博士、张莹博士、马强博士、杜之明教授为该书的编写提供了许多有益的研究成果和相关资料。同时本书的编写参考或引用了国内外有关专家、学者的一些珍贵资料、研究成果和著作，并且我们的相关研究项目得到了国家自然科学基金委员会的支持，在此一并表示衷心的感谢！

由于时间仓促，加之编者水平所限，书中不妥之处，恳请广大读者批评指正，并提出宝贵意见。

作 者

2012年3月

目 录

1 概论	1
1.1 引言	1
1.2 金属半固态加工技术及发展历程	1
1.3 金属半固态加工的特点	4
1.4 金属半固态加工成型的主要工艺流程	4
1.4.1 流变成形	7
1.4.2 触变成形	7
1.4.3 注射成形	8
1.5 金属半固态加工的力学性能	9
1.5.1 铝合金半固态加工的力学性能	9
1.5.2 镁合金半固态加工的力学性能	13
1.5.3 高熔点合金半固态加工的力学性能	14
1.6 金属半固态加工技术的应用	16
1.6.1 在铝合金零件制备中的应用	16
1.6.2 在镁合金零件制备中的应用	16
1.6.3 在其他合金材料中的应用	19
1.6.4 在复合材料制备中的应用	19
1.6.5 在梯度材料中的应用	21
1.6.6 在金属连接中的应用	21
1.6.7 金属半固态加工方法的一些其他应用	23
1.7 金属半固态技术的经济分析	24
2 半固态合金浆料（坯料）制备	26
2.1 引言	26
2.2 半固态浆料（坯料）制备方法的分类及常用相图	26
2.2.1 半固态浆料（坯料）制备方法的分类	26
2.2.2 几种常用合金相图	28
2.3 搅拌法制备半固态浆料	30
2.3.1 机械搅拌法	30

2.3.2	剪切 - 冷却 - 轧制法	31
2.3.3	双螺旋搅拌法	33
2.3.4	电磁搅拌法	35
2.3.5	超声波处理法	45
2.3.6	冷却斜槽法	46
2.3.7	阻尼冷管法	47
2.3.8	蛇形管法	48
2.3.9	斜管法	49
2.3.10	剪切低温浇注法	49
2.3.11	锥桶式剪切流变成形法	50
2.4	非搅拌法制备半固态浆料	51
2.4.1	化学晶粒细化法	51
2.4.2	流变铸造法 (新 MIT 法)	52
2.4.3	NRC 工艺	53
2.4.4	不同液体混合法制备半固态浆料	54
2.4.5	连续流变转换法	55
2.4.6	浇注温度控制法	56
2.4.7	流变容器制浆法	58
2.4.8	自孕育半固态制浆法	58
2.4.9	旋转热焓平衡装置法	59
2.4.10	喷射沉积法	60
2.4.11	紊流效应法	61
2.5	固相法	61
2.5.1	应力诱发熔体激活法	61
2.5.2	新 SIMA 方法 (ECAE 工艺)	63
2.5.3	半固态等温热处理法	64
2.5.4	粉末法	65
2.6	连续制备非枝晶组织坯料的方法及生产线	65
2.6.1	机械搅拌立式连续铸造法	65
2.6.2	机械搅拌水平式连续铸造法	66
2.6.3	电磁搅拌水平式连续铸造法 (EMS - DC)	67
2.6.4	电磁搅拌立式半连续铸造法	70
2.6.5	双螺旋搅拌立式半连续铸造	73
2.6.6	冷却斜槽水平连续铸造法	74
2.7	半固态浆料制备技术的发展趋势	74

3 流变学	76
3.1 金属流变学	76
3.1.1 简单流体的流变性能	77
3.1.2 复杂流体流变性能	79
3.1.3 金属的流变性能	80
3.2 表观黏度	83
3.2.1 表观黏度的概念及测量方法	83
3.2.2 表观黏度的计算	84
3.3 几种状态下的流变学规律	89
3.3.1 等温稳态流变行为	91
3.3.2 连续冷却流变行为 (变温非稳态)	93
3.3.3 等温瞬态流变行为	94
3.4 影响流变性的因素	97
3.4.1 固相体积分对表观黏度的影响	97
3.4.2 剪切速率对表观黏度的影响	98
3.4.3 冷却速率对表观黏度的影响	99
3.4.4 流变制度对表观黏度的影响	99
3.4.5 合金成分对表观黏度的影响	101
3.4.6 固相颗粒形貌对表观黏度的影响	101
3.5 各种因素与凝固组织的关系	102
3.5.1 固相分数	102
3.5.2 搅拌温度	102
3.5.3 搅拌强度	103
3.5.4 冷却速度	106
3.5.5 合金成分	107
4 非枝晶组织及其凝固过程	109
4.1 引言	109
4.2 常规铸造枝晶组织的微观结构和性能	109
4.3 非枝晶组织的微观描述	111
4.3.1 固相体积分	111
4.3.2 粒子形貌	112
4.3.3 粒子分布	115
4.4 非枝晶组织的形成与演化规律	116

4.4.1 常规铸造组织及其形成机理	117
4.4.2 搅拌过程中微观组织的形成与演化	118
4.4.3 金属在半固态等温热处理过程中的组织演化	128
4.4.4 近液相线法组织的形成与演化	128
4.5 半固态组织颗粒簇	134
4.6 半固态合金的金相组织	135
4.6.1 搅拌方法生产的半固态合金金相组织	135
4.6.2 其他方法生产的半固态合金金相组织	137
5 流变成形	140
5.1 引言	140
5.2 流变成形工艺及装备	140
5.2.1 流变铸造	140
5.2.2 流变锻造	150
5.2.3 连续流变铸造	150
5.2.4 连续流变铸轧	150
5.2.5 流变挤压	155
5.3 流变成形的几个问题	157
5.3.1 流变成形的技术要求	157
5.3.2 浆料的定量输送装置	158
5.3.3 流变成形离型剂的要求	159
5.4 流变成形的发展趋势	160
6 触变成形	161
6.1 半固态金属的触变性	162
6.1.1 半固态金属触变性的概念	162
6.1.2 半固态金属触变性的物理解释	162
6.1.3 半固态触变成形合金	163
6.1.4 半固态金属触变性的测定及表示方法	163
6.2 二次加热	165
6.2.1 二次加热的目的	165
6.2.2 二次加热工艺的特点和种类	165
6.2.3 重熔程度的测量与控制	173
6.2.4 重熔加热时的组织演化举例	175
6.2.5 二次加热的装置	182

6.2.6 二次加热应注意的问题	184
6.3 触变成形工艺	185
6.3.1 触变成形的特点	185
6.3.2 影响触变成形的因素	185
6.3.3 几种触变成形工艺	186
6.4 触变成形设备	191
6.4.1 触变成形压力机	191
6.4.2 触变成形用润滑剂添加设备	192
6.4.3 机械手	193
6.4.4 触变成形用模具	193
6.4.5 触变成形零件脱模装置	194
6.5 触变成形生产的自动化	195
6.6 触变成形的零件	196
6.7 触变成形零件的力学性能	201
6.8 触变成形工艺特点及举例	203
6.8.1 半固态触变成形工艺的特点	203
6.8.2 半固态触变成形工艺举例	204
7 半固态注射成形	209
7.1 引言	209
7.2 注射成形工艺路线及特点	209
7.2.1 注射成形工艺过程	209
7.2.2 注射成形工艺特点	211
7.3 注射成形设备	212
7.3.1 立式注射成形设备	212
7.3.2 几种注射成形机组	213
7.4 注射成形零件及其性能	221
7.4.1 注射成形的零件	221
7.4.2 注射成形工艺对成形零件性能的影响	222
7.5 注射成形技术的发展趋势	223
8 半固态加工用合金的设计及热力学计算	225
8.1 引言	225
8.2 半固态加工用铝合金的研究进展	226
8.3 热力学设计半固态新合金的基本原理与方法	229

8.3.1	计算相图与热力学模型	229
8.3.2	Thermo - Calc 软件	230
8.3.3	半固态新合金热力学计算依据	231
8.3.4	半固态新合金成分范围选择	233
8.4	半固态 Al - Si - Mg 新合金的热力学分析	234
8.4.1	合金成分对液相线温度的影响	234
8.4.2	合金成分对凝固温度区间的影响	235
8.4.3	合金成分对固相分数敏感性的影响	236
8.4.4	合金成分对初生相种类和数量的影响	238
8.4.5	合金元素对脱溶强化能力的影响	240
8.5	Al - Si - Mg 系半固态合金成分的确定	242
8.6	小结	243
9	非枝晶组织坯料的塑性变形	244
9.1	半固态金属变形机制	244
9.1.1	半固态金属变形机理描述	244
9.1.2	半固态金属塑性加工力学的物理描述	245
9.1.3	非枝晶合金坯料在半固态温度下塑性变形试验研究	248
9.2	半固态金属塑性加工的力学模型	257
9.3	非枝晶组织金属的塑性变形试验研究	259
9.3.1	压痕试验	259
9.3.2	单向 (平板) 压缩试验	261
9.3.3	挤压试验	263
9.3.4	拉伸强度试验	265
9.3.5	影响塑性变形的主要因素	267
9.4	半固态金属塑性加工力学的发展趋势	270
10	数值模拟在金属半固态加工中的应用	272
10.1	引言	272
10.2	半固态合金的特性及数学描述	273
10.2.1	等温稳态流变模型的数学模型	273
10.2.2	连续冷却流变模型	277
10.2.3	瞬态流变模型	279
10.3	流变成形过程的数值模拟	282
10.3.1	流变成形数值模拟的理论基础	282

10.3.2 应用实例	287
10.4 触变成形过程的数值模拟	291
10.4.1 触变成形数值模拟的理论基础	291
10.4.2 触变成形过程分析	293
10.4.3 触变成形过程模拟实例	299
10.5 二次加热过程的数值模拟	303
10.5.1 二次加热过程模拟的主要公式	303
10.5.2 二次加热过程的模拟	306
10.6 数值模拟商用软件简介	307
参考文献	310

1 概 论

1.1 引言

凝固不仅伴随着铸件的生产过程，一切金属材料在进行其他成形（如轧制、锻造）之前都会经历从液态到固态的凝固过程。凝固过程对产品的影响，即使经过凝固后的大变形（如轧制、挤压）仍然很难完全消除。因而，凝固过程的研究受到材料、冶金及铸造工作者们的广泛关注。

近年来，凝固过程的研究与凝固技术的进展不仅促进了铸造工艺的发展和铸件质量的提高，而且在冶金过程、材质控制中发挥着越来越大的作用。同时，也促进了各种新型材料及其成形工艺的诞生和发展^[1~23]。

1.2 金属半固态加工技术及发展历程

20 世纪 70 年代初，美国麻省理工学院的 D. B. Spencer 在其导师 M. C. Flemings 教授指导下进行钢铁铸造“热裂”现象的研究时，在自制的高温黏度计中测量 Sn - 15% Pb 合金高温黏度，实验结果表明在搅拌中合金的枝晶结构遭到破坏，从而使金属在凝固过程中产生特殊的力学行为^[3]。如金属在凝固过程中进行强烈搅拌，即使在较高固相体积分数时，半固态金属仍具有相当低的剪切应力。这种特殊性能应当缘于基体中分布着独特的球状颗粒结构。麻省理工学院的研究人员很快意识到金属凝固的这一特殊行为将具有许多潜在的利用价值，随即他们对此进行了广泛深入的研究并将其发展成为金属半固态加工技术（Semi - Solid Metal Forming Processes，简称 SSM 或 Semi Solid Processing，SSP）。金属半固态加工技术，就是在金属凝固过程中，通过剧烈搅拌或凝固过程的控制，得到一种液态金属母液中均匀地悬浮着近球形固相组分的固液混合浆料（固相组分甚至可高达 60%）。这种半固态金属浆料具有流变和触变特性，即半固态金属浆料具有很好的流动性，易于通过普通加工方法成形形状比较复杂的产品。制备这种既非完全液态，又非完全固态的金属浆料，并将之加工成型的方法，就称为金属半固态加工技术。图 1 - 1 是几种早期的获得半固态金属浆料的方法。图 1 - 2 是一种半固态成形工艺。

半固态加工技术从发现到现在虽然只有短短的四十年历史，但由于其具有独特的技术优势和广阔的应用前景，而备受瞩目并得到迅猛发展。从最初的实验研究发展到应用研究和工程化生产，半固态加工技术的发展大致可分为：基础研

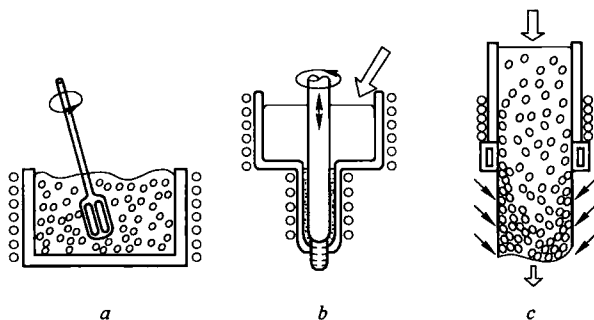


图 1-1 几种较早采用获得半固态金属浆料的方法

a—机械搅拌法；b—机械搅拌连续制备法；c—电磁搅拌连续制备法

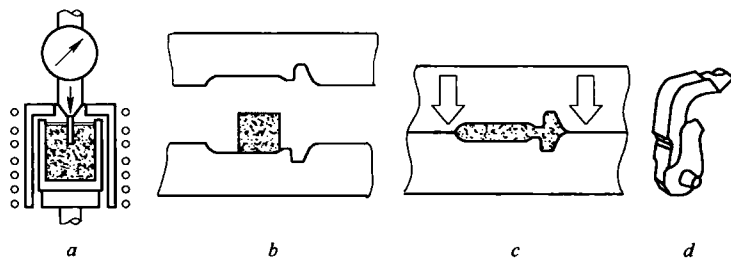


图 1-2 半固态成形工艺简图

a—二次加热；b—半固态充填；c—半固态压制；d—成品

究、技术开发和设备研制、深入研究和商业化应用三个阶段^[24~27,498~500]。

基础研究阶段是从 20 世纪 70 年代初开始，大约延续了 15 年。主要的研究集中于半固态合金流变性和触变性的物理本质及其数学模型；具有流变性和触变性的材料组织特点和制备方法；枝晶组织向非枝晶组织转变的物理模型，非枝晶组织合金的触变性与流动机制；工艺参数对非枝晶化过程的影响，包括搅拌过程中速度、强度、温度等工艺参数对非枝晶化过程的影响规律；半固态微观组织与流变性能的关系；半固态合金浆料非枝晶组织内在变量（固相分数、固相颗粒尺寸、形状、聚集状态和黏度）在外界变量（温度、剪切速率）影响下的变化规律；半固态合金在不同状态下的本构关系及其相关的数学模型。在此基础上，人们对相关应用技术和设备进行研究，并探索金属半固态加工技术在工业中的应用。其间开发了多种半固态坯料的制备技术，包括坯料的连铸技术和设备，以及半固态成形技术。计算机数值模拟技术也在半固态加工过程中得到应用，主要用于揭示各种工艺参数对半固态加工过程和产品性能的影响。这一期间的研究工作为金属半固态加工技术的大范围工业化应用打下了基础。

20 世纪 80 年代末至 90 年代中期是半固态加工技术的应用研究迅速发展的阶段。包括电磁搅拌在内的多种半固态制坯技术与连铸设备得到进一步的开发；半固态成形技术如流变成形、触变成形和注射成形开始不断成熟；计算机模拟技术开始用于揭示半固态合金的充型过程；人们细致地研究了成形工艺和成形工艺对半固态组织性能的影响规律。同时，开始将半固态加工技术从有色合金扩展到高熔点的黑色金属，以及复合材料。这一阶段的研究工作遍及世界许多国家。美国、意大利、瑞士、德国、日本和中国都先后投入大量人力和物力对半固态加工技术进行了广泛深入的研究，并取得了丰富的研究成果，为进一步的工业化应用奠定了基础。

进入 20 世纪 90 年代后期，半固态加工技术进入了商业化应用阶段。规模较大的有法国 Pechiney，可以生产不同直径的铝合金、镁合金半固态棒坯料；美国 Alamax 和意大利 Stampal 的半固态部件生产；瑞士 Buhler 的半固态压铸机和美国 Thixomat 半固态注射成形机的生产。在国外，这些技术已经获得较为广泛的应用，特别是在汽车工业和 3C 产业。相对而言，国内在半固态加工技术上还处于实验室向中试生产过渡的阶段，尚未实现大规模的工业化生产。

在研究方面，目前世界范围内的热点是：进一步研究半固态金属的流变学基础理论；研究开发适合半固态成形的新合金；研究开发高效率、低成本的半固态金属浆料制备技术；完善触变成形工艺，积极开发流变成形技术；降低半固态加工成形的生产成本；研究开发半固态金属成形的相关设备；扩大半固态加工技术在工业中的应用范围等。自 1990 年起，国际上每两年召开一次“合金和复合材料的半固态加工”国际学术会议（International Conference on Semi-Solid Processing of Alloys and Composites），至今已经召开了 11 届。最近的一届是 2010 年在中国北京召开的，详见表 1-1。

表 1-1 半固态国际学术会议

会 议	时 间	地 点	国 家
第一届	1990 年	Sophia - Antipolis	法国
第二届	1992 年	MIT, Cambrige	美国
第三届	1994 年	Tokyo	日本
第四届	1996 年	Sheffield	英国
第五届	1998 年	Golden, Colorado	美国
第六届	2000 年	Turin	意大利
第七届	2002 年	Tsukuba	日本
第八届	2004 年	Limassol	塞浦路斯
第九届	2006 年	Busan	韩国
第十届	2008 年	Aachen	德国
第十一届	2010 年	Beijing	中国

1.3 金属半固态加工的特点

金属半固态加工利用金属从固态向液态、或从液态向固态转变过程中的半固态温度区间实现金属的成形加工。金属半固态加工与常规的金属成形工艺相比,具有许多优点^[9~14,21~27,30,31],而且应用范围广泛,凡具有固液两相区的合金均可实现半固态加工。并且半固态金属加工可结合多种现有的加工工艺,如铸造、挤压、锻压以及铸轧。

(1) 与液态金属成形工艺(如铸造)相比,金属半固态加工具有如下特点:

1) 充型平稳,无湍流和喷溅,因而,铸件内部组织致密,内部气孔、偏析等缺陷少;

2) 制品组织具有非枝晶结构,同时组织致密,制品的力学性能高,能接近或达到锻压件的性能;

3) 由于金属坯料已部分凝固,因而凝固收缩小,成形零件尺寸精度高,表面平整光洁,能实现近终成形。半固态成形的零件机械加工量小,可做到少或无切削加工;

4) 成形温度低。半固态合金成形时,已经释放了部分结晶潜热,因而减轻了对模具的热冲击,使模具寿命大幅度提高;

5) 凝固时间缩短,能缩短产品的生产周期,有利于提高生产效率。

(2) 与固态金属成形工艺(如锻压)相比,金属半固态加工具有如下特点:

1) 半固态金属具有很好的触变性,在一定的压力下具有很好的流动性,因而可成形更为复杂的零件,并且成形速度也能提高;

2) 成形力显著降低,因此对成形机械及模具的要求有所降低。

金属半固态加工还可应用于复合材料加工,彻底解决复合材料制备过程中异相材料的漂浮、偏析以及与基体金属的润湿性差等问题,这为复合材料的制备和成形提供了有利的条件。

1.4 金属半固态加工成形的主要工艺流程

金属半固态加工的成形工艺路线主要有两条^[27~35]:一条是金属从液态冷却到半固态温度,然后对所得到的半固态浆料直接成形,通常被称为流变成形(Rheoforming);另一条是将半固态浆料完全凝固,先制备成坯料,然后根据产品尺寸下料,再重新加热到半固态温度成形,通常被称为触变成形(Thixoforming),如图1-3所示。对触变成形,由于半固态坯料便于输送,易于实现自动化,因而在工业中较早得到了广泛应用。对于流变成形,由于将部分凝固的半固态浆料直接成形,具有高效、节能、短流程的特点,近年来发展得很快。

在金属半固态成形技术出现之前,一般的金属加工成形温度范围或者在液相线

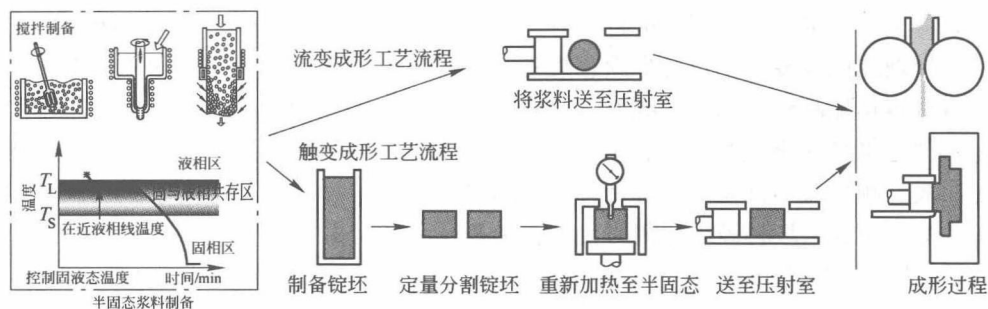


图 1-3 金属半固态加工的两条工艺流程

以上，或者在固相线以下。在加工成形中涉及液相线与固相线之间液固两相区的只有液态模锻和压力铸造。液态模锻仅仅是通过提高模锻材料的锻造温度，降低材料的变形抗力，使之容易成形。压力铸造是在金属凝固过程中施加压力，提高铸件的材料密度（致密度）和力学性能。而半固态加工技术则是一种全新的金属加工工艺，它首先要制备初生相颗粒近球形的半固态浆料，然后对半固态浆料进行成形。半固态加工技术获得的制品显微结构呈非枝晶结构，组织致密，力学性能较高。

从温度范围上来看，半固态成形可以说是固相线和液相线之间成形的一种非常有效的加工方法。虽然，金属半固态加工的成形工艺路线主要有流变成形和触变成形两种，但以这两种成形方式为基础派生出多种成形方式，如流变铸造、流变锻造、触变铸造、触变锻造、触变注射。图 1-4 所示为两条工艺流程的温度变化特点。图 1-4a 是典型的流变成形温度变化曲线，如采用机械搅拌或电磁搅

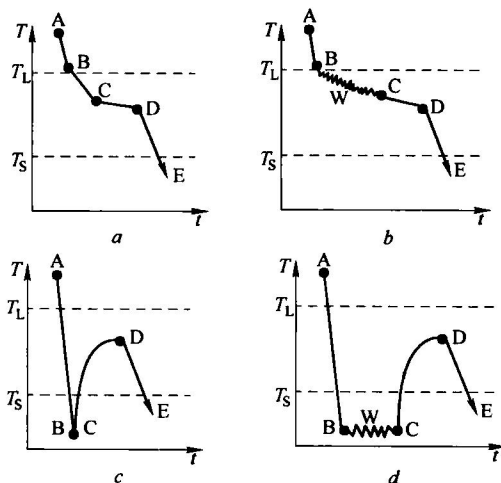


图 1-4 两条工艺流程的温度变化特点

a, b—流变成形；c, d—触变成形