

半固态金属 加工技术 及其应用

谢水生 黄声宏 编著

BANGUTAJI JINSHU

JIA GONG JI JISHU

JIQI YINGYONG

冶金工业出版社

749

7G
X54

半固态金属加工技术 及其应用

谢水生 黄声宏 编著

北 京
冶金工业出版社

1999

国家自然科学基金资助项目

内 容 简 介

本书共分10章,包括:概论、半固态金属坯料的制备、电磁搅拌在流变铸造中的应用、部分凝固合金的流变性、半固态金属的微观组织结构与特性、局部重熔(二次加热)、流变铸造锭坯的变形性、触变成形、数值模拟技术在半固态金属加工中的应用、半固态金属加工技术的现状与发展趋势等。

本书可供冶金、铸造、加工及材料等方面的研究人员和工程技术人员阅读,也可供大专院校的有关师生参考。

图书在版编目(CIP)数据

半固态金属加工技术及其应用/谢水生,黄声宏编著.
北京:冶金工业出版社,1999.9
ISBN 7-5024-2376-1

I. 半… II. ①谢…②黄… III. 金属加工,半固态 IV. T6

中国版本图书馆CIP数据核字(1999)第14566号

出版人 卿启云(北京沙滩嵩祝院北巷39号,邮编100009)

责任编辑 张登科 美术编辑 李 心 责任校对 符燕蓉

北京源海印刷厂印刷;冶金工业出版社发行;各地新华书店经销

1999年9月第1版, 1999年9月第1次印刷

850mm×1168mm 1/32; 5.75印张; 154千字; 174页; 1-2000册
15.00元

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

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)

前 言

半固态金属加工技术 (Semi-Solid Metal Process or Semi-Solid Metal Forming), 简称 SSM, 是近年来金属加工技术研究的热点, 因为半固态技术有一系列特点, 最突出的是半固态材料的触变性, 成形的零件精度高、质量好, 能与近终成形 (Near-net-shape) 接轨。

半固态技术的发展应追溯到 20 世纪 70 年代初, 自从美国麻省理工学院 MIT 学者发现半固态金属的触变性能后, 半固态技术的研究和应用得到迅速发展, 经历了从基础研究、技术开发、设备研制、商业化生产等不同阶段, 国际上也已召开了五次专门国际会议, 目前已在汽车工业得到一定程度的应用。

虽然, 半固态加工技术、压力铸造和液态模锻三种方法的共同目的都是为了获得高质量、高强度、高精度金属零件毛坯。但是, 半固态加工技术不同于压力铸造, 也不同于液态模锻, 半固态金属加工技术是在金属凝固过程中, 进行剧烈搅拌, 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半固态坯锭后, 再局部重熔和触变成形, 这样得到的产品组织结构具有一次相为球形颗粒的组织。半固态金属加工一般包括三道工序: 流变铸造 (Rheocasting)、局部重熔 (二次加热) (Reheating) 和触变成形 (Thixoforming) 三个阶段。

近年来作者在国家自然科学基金的资助下开展了半固态金属加工技术的研究, 也取得了一些可喜的收获。因此, 为了促进这项技术的发展和在我国的应用, 我们萌发了编写这本书的想法, 其指导思想是起到“抛砖引玉”的作用。

本书共分 10 章。第 1 章为概论, 简要介绍了半固态金属加工的发展和特点; 第 2 章为半固态金属坯料的制备和流变铸造工艺; 第 3 章介绍了电磁搅拌的原理和在流变铸造中的应用情况; 第 4 章较详细地分析了部分凝固合金的特性; 第 5 章介绍了半固态金

属的微观组织结构和特点与影响它的因素；第6章介绍局部重熔的工艺特点和应用实例；第7章阐述了流变铸造锭坯变形时的特性；第8章介绍了半固态加工的最后道工序，触变成形工艺及设备；第9章阐述了模拟技术在半固态加工中的应用现状和主要模型；第10章介绍了半固态加工技术的现状和展望了未来的应用前景。其中第1、2、3、6、7、8、9章由谢水生博士撰写，第4、5、10章由黄声宏硕士撰写。全书最后由谢水生博士审阅、定稿。

在本书即将出版之际，非常荣幸的得到了中国工程院常务副院长、中国工程院及中国科学院院士王淀佐教授的支持，并为本书作序，在此表示衷心的感谢。同时，再次感谢国家自然科学基金会对本书的支持。

由于半固态加工技术发展很快，加之作者对之认识还非常有限，书中难免会有不当之处，请广大读者批评指正。

作 者

1999年3月于北京

的应用, 已经开展了一些研究工作, 并取得一定的成效。

1.6.3 在复合材料制备方面的应用

金属基复合材料是近年来迅速发展的新材料。以前的制备方法多为常规铸造法、粉末烧结法、浸透等方法。这些方法制备复合材料存在的主要问题是非金属与金属之间浸润难、成本高, 而且质量不稳定。这些问题的存在阻碍了金属基复合材料的推广应用^[35]。

半固态金属在液固两相区有很好的粘性和流动性, 可以比较容易地加入非金属填料, 而且只要选择好适当的加入温度和搅拌工艺, 就有利于提高非金属填料和半固态金属之间的界面结合强度^[26,45]。非金属填料的加入可有效地阻止球形微粒的簇集 (如图 1-9 所示), 并对后续的部分重熔和触变成形非常有利。目前, 在金属基复合材料中应用 SSM 技术也是一个研究热点。

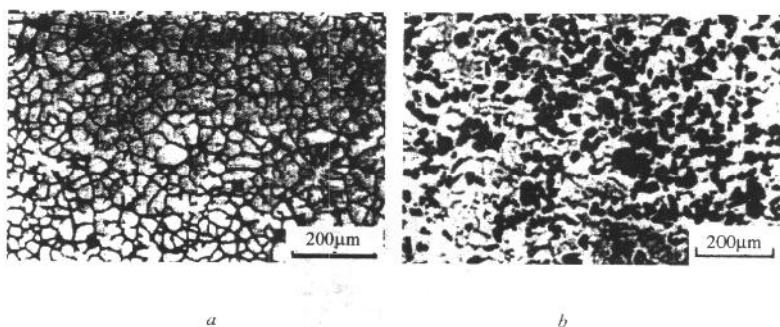


图 1-9 在 Al-Si 半固态材料中加入 SiC 颗粒前后的组织比较

a—加入前; *b*—加入后

1.6.4 半固态金属加工方法的一些其他应用^[74]

SSM 加工技术也可以应用在板带和线材的连铸连轧中, 图 1-10 是 SSM 连铸连轧的一个示意图。在连铸连轧中加入搅拌后, 产生的效果不仅仅是使成分均匀, 而且能提高产品的整体质量。

SSM 加工技术的另一个应用领域是材料的提纯。半固态加工技术在金属提纯上具有两方面的应用。其一, 当金属浆料中颗粒大小不同, 在后续过程中极易形成偏析时, 采用雾化方法, 从而

用这种既非完全液态,又非完全固态的金属浆料加工成形的方法,就称为半固态金属加工技术。图 1-1 是几种获得半固态金属浆料的方法。图 1-2 是一种半固态金属加工工艺。

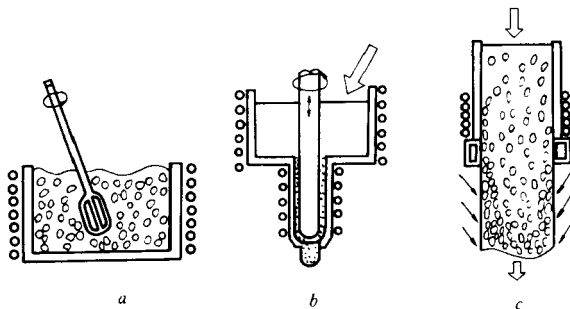


图 1-1 几种获得半固态金属浆料的方法
a—机械搅拌机；b—机械搅拌连续制备；c—电磁搅拌连续制备

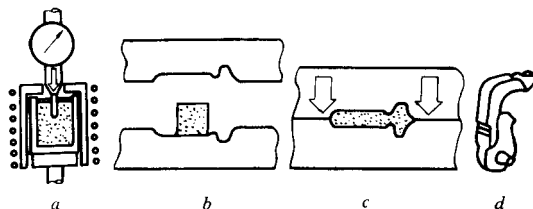


图 1-2 半固态金属加工工艺简图
a—二次加热；b—半固态充填；c—半固态压制；d—成品

1.3 半固态金属加工的特点^[9~14,44]

与普通的加工方法相比,半固态金属加工具有许多优点:

(1) 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。可适用于多种加工工艺,如铸造、挤压、锻压和焊接等。

(2) SSM 充形平稳,无湍流和喷溅,加工温度低,凝固收缩小,因而铸件尺寸精度高。SSM 成形件尺寸与成品零件几乎相同,极大地减少了机械加工量,可以做到少或无切屑加工,从而节约

了资源。同时 SSM 凝固时间短，有利于提高生产率。

(3) 半固态合金已释放了部分结晶潜热，因而减轻了对成形装置，尤其是模具的热冲击，使其寿命大幅度提高。

(4) SSM 成形件表面平整光滑，铸件内部组织致密，内部气孔，偏析等缺陷少，晶粒细小，力学性能高，可接近或达到变形材料的力学性能。

(5) 应用半固态加工工艺可改善制备复合材料中非金属材料的飘浮、偏析以及金属基体不润湿的技术难题，这为复合材料的制备和成形提供了有利条件。

(6) 与固态金属模锻相比，SSM 的流动应力显著降低，因此 SSM 模锻成形速度更高，而且可以成形十分复杂的零件。

(7) 节约能源。以生产单位质量零件为例，半固态加工与普通铝合金铸造相比，节能 35% 左右。

1.4 半固态金属加工的主要工艺过程

由图 1-3 可以看出，半固态金属加工的工艺路线有两条：一条是将经搅拌获得的半固态金属浆料在保持其半固态温度的条件下直接进行半固态加工，通常被称为流变铸造 (Rheocasting)。另一条是将半固态浆料冷却凝固成坯料后，根据产品尺寸下料，再重新加热到半固态温度，然后进行成形加工，通常被称为触变成形 (Thixoforming)。在实际工业生产中，主要采用后一种工艺。

通常，半固态金属加工技术包括流变铸造、局部重熔（二次加热）和触变成形。所谓流变性，就是在搅拌过程中当固态组分不断增加（甚至达到 60%）时，虽然金属浆料的粘性提高，但仍然保持良好的流动性。图 1-4 为半固态金属直接铸成锭坯的流变铸造工艺流程图。图 1-5 为把流变铸造的锭料先按铸件质量大小分割，然后根据不同的成形工艺要求，重新将每块锭料加热到不同程度的局部重熔，然后对这种流变铸锭进行压铸或挤压成形的触变成形工艺流程图。

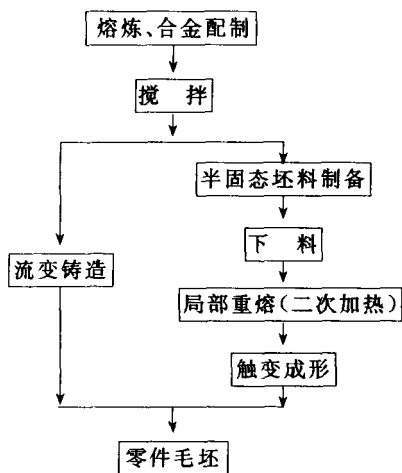


图 1-3 半固态金属加工的工艺过程

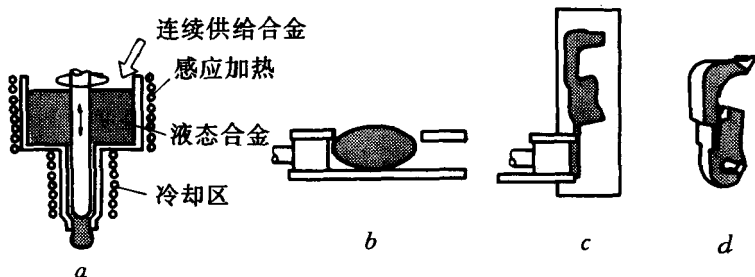


图 1-4 流变铸造工艺流程示意图

a—连续制备半固态浆料；b—将浆料送至压射室；c—成形过程；d—制品

1.5 半固态金属加工后的力学性能

半固态金属加工主要是采用流变铸造的铸锭重新加热到液固两相之间的温度，再挤压或锻造零件。实践证明，由于半固态金属具有触变性，所以铸坯在成形中具有明显的超塑性效应和充填性能，而且变形抗力也小，可在较高速度下变形。从变形机理分析，其变形过程是一个从塑性变形到超塑性变形的过程。表 1-

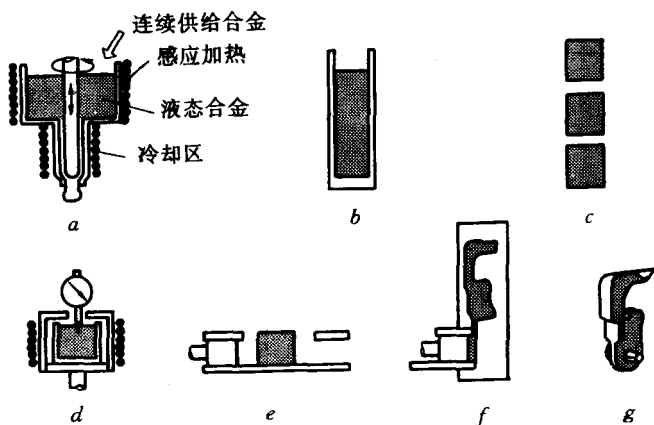


图 1-5 触变成形工艺流程图^[19]

a—连续制备半固态浆料；b—制备半固态锭坯；c—定量分割锭坯；
d—重新加热至半固态；e—送至压射室；f—成形过程；g—成品

1 所示为铝合金在不同的加工方法与热处理状态下的力学性能。从表中可以清晰地看出，半固态金属加工技术的优越性。譬如，经过触变成形的 A356 合金在 T6 热处理状态下，比经过普通砂型铸造所得的铝合金具有更优良的力学性能，并且与锻件的性能相近。

表 1-1 不同加工方法所获得铝合金的力学性能比较^[93]

合 金	加工方法	热处理 状态	屈服应力 /MPa	抗拉强度 /MPa	伸长率 /%	硬度 HB
铸造合金 A356 (Al7Si0.3Mg)	SSM	铸造	110	220	14	60
	SSM	T4	130	250	20	70
	SSM	T5	180	255	5~10	80
	SSM	T6	240	320	12	105
	SSM	T7	260	310	9	100
	PM	T6	186	262	5	80
	PM	T51	138	186	2	
	CDF	T6	280	340	9	
A357 (Al7Si0.6Mg)	SSM	铸造	115	220	7	75
	SSM	T4	150	275	15	85

续表 1-1

合 金	加工方法	热处理 状态	屈服应力 /MPa	抗拉强度 /MPa	伸长率 /%	硬度 HB
A357 (Al7Si0.6Mg)	SSM	T5	200	285	5~10	90
	SSM	T6	260	330	9	115
	SSM	T7	290	330	7	110
	PM	T6	296	359	5	100
	PM	T51	145	200	4	
锻造合金						
2017 (Al4CuMg)	SSM	T4	276	386	8.8	89
	W	T4	275	427	22	105
2024 (Al4Cu1Mg)	SSM	T6	277	366	9.2	
	CDF	T6	230	420	8	
	W	T6	393	476	10	
	W	T4	324	469	19	120
2219 (Al6Cu)	SSM	T8	310	352	5	89
	W	T6	260	400	8	
6061 (Al1MgSi)	SSM	T6	290	330	8.2	104
	W	T6	275	310	12	95
7075 (Al6ZnMgCu)	SSM	T6	361	405	6.6	
	CDF	T6	420	560	6	
	W	T6	505	570	11	150

注：CDF 为闭模锻造；PM 为金属模铸造；SSM 为半固态加工；W 为锻造加工。

试验还得到了不同加工方法获得的铝合金和 AZ91D 镁合金的力学性能，如表 1-2 和表 1-3 所示。

表 1-2 不同铸造方法获得的 AZ91D 镁合金的力学性能^[94]

合金及状态	屈服应力/MPa	抗拉强度/MPa	伸长率/%
AZ91D SSM 铸造合金（铸态）	120.8±5.1	231.4±13.4	6.2±0.9
AZ91D SSM 铸造合金（T4 热处理）	87	239	11

续表 1-2

合金及状态	屈服应力/MPa	抗拉强度/MPa	伸长率/%
AZ91D 模铸	154±2	253±12	7±0.8
AZ91C 砂型铸造 (铸态)	95	165	2
AZ91C 砂型铸造 (T4 热处理)	85	275	12
AZ91C 砂型铸造 (T6 热处理)	130	275	5
AZ91C 金属模铸造 (T4 热处理)	70	175	1.8
AZ91D 金属铸造 (T6 热处理)	100	175	0.8

表 1-3 不同加工方法下材料的力学性能

合金及状态	屈服应力/MPa	抗拉强度/MPa	伸长率/%
6061 铝合金 (T6 态)			
流变铸造锭	207	165	4
触变成形 (模温 450℃)	214	152	7
触变成形 (模温 500℃)	252	172	18.5
压力铸造	252	200	9
2024 铝合金			
触变成形	464	347	11.2
压力铸造	483	362	13.4
锻造	485	400	10

不少学者还研究了一些高熔点合金材料经过半固态加工后的力学性能, 如表 1-4 和表 1-5 所示。

表 1-4 钛合金的力学性能

合金及状态	屈服应力 (0.1%) /MPa	抗拉强度/MPa	伸长率/%	硬度 VPn
Ti-20Co 模铸	139	454	1.4	474
Ti-20Co 触变铸造	168	486	7.4	480
Ti-20Cu 模铸	121	162	1.9	350
Ti-20Cu 触变铸造	126	170	9.5	375
Ti-17Cu-8Co 模铸	183	367	1.2	390
Ti-17Cu-8Co 触变铸造	212	388	8.8	408

表 1-5 一些高熔点合金在不同条件下力学性能的比较^[96]

合金及状态	屈服应力/MPa	抗拉强度/MPa	伸长率/%
铜 CDA905			
流变铸造状	131	324	30
流变铸造+均匀化	155	305	23
触变成形	155	281	7
砂型铸造	152	310	25
不锈钢 AISI304			
触变铸造	276	660	19
蜡模铸造	274	516	30
不锈钢 AISI304L			
应变诱发熔化激活		596	>30
锻件		483	57
不锈钢 440C			
流变铸造状	1030		压缩实验
流变铸造+均匀化	1650		压缩实验
锻件	1860		
M2 工具钢 (回火)			
触变铸造		2370	弯曲实验
锻件 (轴向)		2440	弯曲实验
(横向)		1230	
钴合金			
钨钴合金 21			
触变成形		2050	弯曲实验
标准值		2400	弯曲实验
触变成形		924	8
锻件		1550	28
铸造		700	6
X-40			
流变铸造	531	662	3
蜡模铸造	524	745	7
钛合金			
Ti-20Co			
流变铸造	168	486	7.4
模铸	139	454	1.4
Ti-2-Cu			
流变铸造	126	170	9.5
模铸	121	162	1.9
Ti-17Cu-8Cu			
流变铸造	212	388	8.8
模铸	183	367	1.2

1.6 半固态金属加工技术的应用

半固态金属加工技术适用于有较宽液固共存区的合金体系。研究和生产证明,适用于半固态加工的金属有:铝合金、镁合金、锌合金、镍合金、铜合金以及钢铁合金等,其中铝镁合金已用于工业生产。此外,SSM 技术还被应用在其他的一些领域里。

1.6.1 在铝合金制备中的应用

目前半固态金属加工应用最成功和最广泛的是在铝合金的制备中。其原因不仅是因铝合金的熔点较低和使用范围广泛,而且铝合金是具有较宽液固共存区的合金体系。为此,它成为人们首先深入研究的对象,至今为止,有关研究半固态加工技术的论文至少 60% 都与铝合金有关。包括 Al-Cu 合金、Al-Si 合金、Al-Pb 合金和 Al-Ni 合金等,特别值得一提的是半固态加工技术已开始应用于制备铝合金制品。图 1-6 是半固态加工的铝合金零件^[10]。目前,半固态加工的铝合金零件质量可达 7kg 以上。有关这方面的工业应用将在第 10 章中详细介绍。

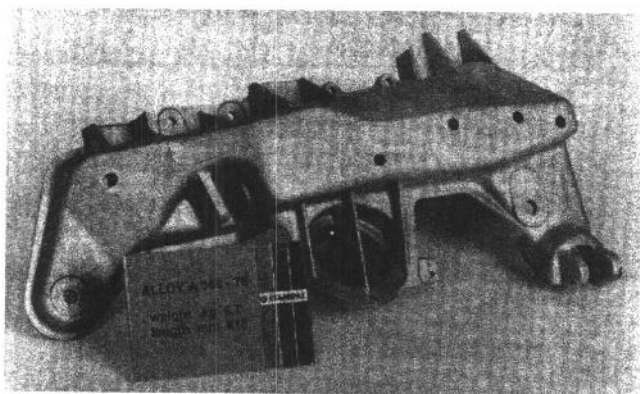


图 1-6 半固态加工的铝合金零件

1.6.2 在其他材料中的应用

对于镁合金和铜合金,也可以应用 SSM 技术,并且已经取得了一些成果,可以用这种方法制造出质量优良的零件。图 1-7 是半

固态加工的镁合金零件^[94]。图 1-8 所示是 AlSi7Mg 合金半固态坯锭的金相照片^[21]。

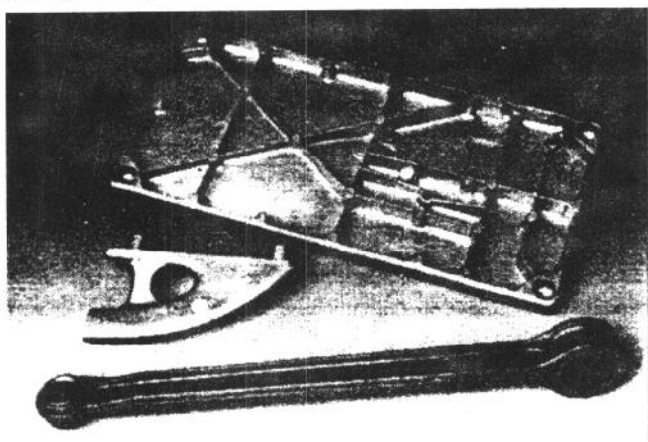


图 1-7 半固态加工的镁合金零件

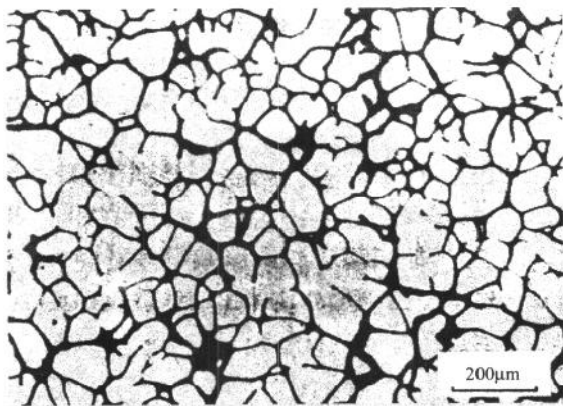


图 1-8 AlSi7Mg 合金半固态坯锭的金相组织

对于钢铁工业，SSM 加工技术也有着重要的意义。采用这种方法制造机械零件，可以大幅度降低能源消耗，提高压铸铸型寿命。

目前，SSM 加工技术在某些不锈钢、镍基合金以及低合金钢

的应用，已经开展了一些研究工作，并取得一定的成效。

1.6.3 在复合材料制备方面的应用

金属基复合材料是近年来迅速发展的新材料。以前的制备方法多为常规铸造法、粉末烧结法、浸透等方法。这些方法制备复合材料存在的主要问题是非金属与金属之间浸润难、成本高，而且质量不稳定。这些问题的存在阻碍了金属基复合材料的推广应用^[35]。

半固态金属在液固两相区有很好的粘性和流动性，可以比较容易地加入非金属填料，而且只要选择好适当的加入温度和搅拌工艺，就有利于提高非金属填料和半固态金属之间的界面结合强度^[26,45]。非金属填料的加入可有效地阻止球形微粒的簇集（如图1-9所示），并对后续的部分重熔和触变成形非常有利。目前，在金属基复合材料中应用SSM技术也是一个研究热点。

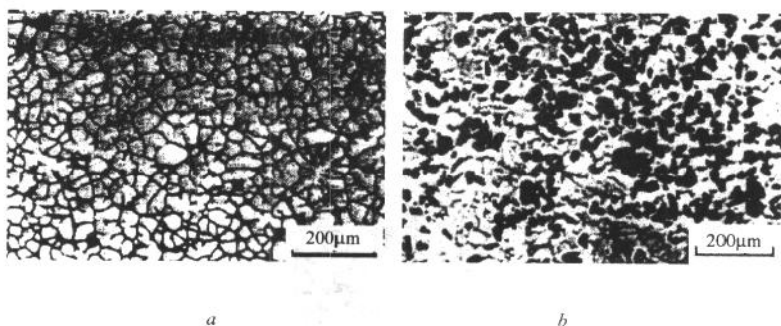


图1-9 在Al-Si半固态材料中加入SiC颗粒前后的组织比较

a—加入前；*b*—加入后

1.6.4 半固态金属加工方法的一些其他应用^[74]

SSM加工技术也可以应用在板带和线材的连铸连轧中，图1-10是SSM连铸连轧的一个示意图。在连铸连轧中加入搅拌后，产生的效果不仅仅是使成分均匀，而且能提高产品的整体质量。

SSM加工技术的另一个应用领域是材料的提纯。半固态加工技术在金属提纯上具有两方面的应用。其一，当金属浆料中颗粒大小不同，在后续过程中极易形成偏析时，采用雾化方法，从而

使得金属基体性能趋于均匀。其二，由于在液固两相区，初生相微粒的成分与液相成分有较大的差别，只要采用某种方法将液相和固相分离开，就可以达到提纯材料的目的。比如，利用具有一定粗糙度的滤纸就可以将液体从金属浆料中排除，如图 1-11 所示。

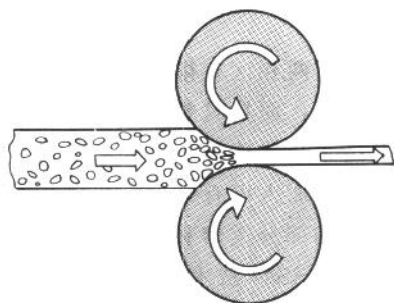


图 1-10 半固态金属的连铸连轧示意图

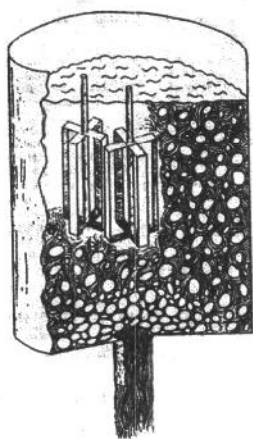


图 1-11 材料提纯装置示意图