

喷射成形技术

中国博士后科学基金资助项目
中南大学博士后基金资助项目

Spray Forming Technology

S

pray

Forming Technology

彭超群 著/中南大学出版社



喷射成形技术

Spray Forming Technology

中国博士后科学基金资助项目
中南大学博士后基金资助项目

彭超群 著/中南大学出版社

Spray
Forming Technology

TF114
P1

图书在版编目(CIP)数据

喷射成形技术/彭超群著. —长沙:中南大学出版社,
2004.8

ISBN 7-81061-958-6

I. 喷... II. 彭... III. 粉末成型—工艺
IV. TF124.39

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2004)第 086076 号

喷射成形技术

彭超群 著

☐责任编辑 李昌佳

☐出版发行 中南大学出版社

社址:长沙市麓山南路 邮编:410083

发行科电话:0731-8876770

传真:0731-8710482

☐经 销 湖南省新华书店

☐印 装 中南大学湘雅印刷厂

☐开 本 880×1230 1/32 ☐印张 10.5 ☐字数 260 千字

☐版 次 2004 年 8 月第 1 版 ☐2004 年 8 月第 1 次印刷

☐书 号 ISBN 7-81061-958-6/TB·029

☐定 价 28.00 元

图书出现印装问题,请与经销商调换

序

喷射沉积成形，简称喷射成形，又称喷射铸造或喷射沉积，是20世纪60年代产生并经过几十年的发展而逐渐成熟起来的一种快速凝固技术。它把液态金属的雾化和雾化熔滴的沉积自然地结合起来，在一步冶金操作中完成，以较少工序直接从液态金属（合金）制取整体致密、组织细化、成分均匀、结构完整并接近零件实际形状的材料和坯件。在21世纪冶金三大前沿技术——熔融还原、近净形成形和半固态加工技术中，喷射成形作为一种半固态近净形加工技术，备受国内外广大研究者的青睐。

1968年，英国Swansea大学的A. Singer教授最早提出喷射成形的原理和概念。1974年，英国Osprey Metals公司取得喷射成形技术专利，标志着这一技术的工业化进程的开始。迄今为止，已用喷射成形技术研究了铝合金、铜合金、特殊钢与超合金、贵金属、镁合金、金属间化合物等，并已进入产业化应用生产的阶段。在工业发达国家，喷射成形技术已用于制造高性能零部件，取得了可观的经济与社会效益，并有望形成一个立足于高新技术的强大支柱产业。随着喷射成形技术的进一步研究与开发，它将成为一种主要的金属材料成形技术，挑战铸造、铸锭冶金以及其他传统工艺，并与它们竞争技术市场。

我国的喷射沉积技术研究始于20世纪80年代中后期，国内已有多家著名大学和研究所投入大量人力、物力、财力，从事喷射成形技术研究和喷射成形产品开发，并取得较大进展，但与国际先进水平相比，我国喷射成形技术的理论与实际研究工作仍然

存在较大差距,尤其是在喷射成形过程的实时监测与智能化控制以及产业化技术应用方面,亟待进行大量细致的研究工作。

彭超群博士一直关注喷射成形技术的研究与开发进展,并且多年从事快速凝固技术方面的研究工作,因此,他在喷射成形技术这一领域积累了相当的知识。此次,他在中南大学博士后基金和中国博士后科学基金的资助下,比较全面地搜集、整理了国内外有关喷射成形技术方面的研究成果,经过两年多的悉心研究与思考,撰写成《喷射成形技术》一书。该书选题新颖,内容丰富,结构严谨,数据翔实,文笔流畅,可读性强,充分反映出作者对材料科学新技术发展的高度关注、严密的逻辑思维和扎实的专业功底。

我相信,《喷射成形技术》一书的出版,将对国内广大材料科技工作者深入了解喷射成形技术的发展、研究、开发与应用,并利用该技术研制新材料或改善传统材料的性能起到积极的促进作用。

黄伯雪

2004年7月28日

(序作者为中国工程院院士、国家“八六三”高技术新材料领域专家委员会主任、中南大学校长)

目 录

第1章 喷射成形技术研究与发展概况	(1)
1.1 绪 论	(1)
1.1.1 喷射成形的定义	(1)
1.1.2 喷射成形的研究与开发进展	(1)
1.1.3 喷射成形技术的优势与不足	(8)
1.2 喷射成形技术的原理、设备及工艺	(12)
1.2.1 基本原理	(12)
1.2.2 喷射成形的几何学分析	(13)
1.2.3 雾化沉积装置与工艺技术	(19)
1.2.4 喷射成形-半固态加工工艺	(32)
1.3 喷射成形材料研究与产品开发	(37)
1.3.1 喷射成形材料研究	(37)
1.3.2 喷射成形产品开发	(52)
1.4 综合评价与展望	(61)
1.4.1 近年来的重要突破	(61)
1.4.2 存在的主要问题	(62)
1.4.3 发展趋势与展望	(63)
1.4.4 结语	(66)
参考文献	(66)
第2章 喷射成形工艺的主要影响因素	(70)
2.1 喷射成形的基本过程及主要影响因素	(70)

2.2 雾化过程	(74)
2.2.1 喷射成形中的喷射雾化机理	(75)
2.2.2 雾化过程的动力学	(83)
2.2.3 气体流场动力学	(85)
2.2.4 工艺参数对雾化效果的影响	(97)
2.3 沉积与凝固过程	(101)
2.3.1 临界沉积条件	(101)
2.3.2 粘附过程和粘附效率	(102)
2.3.3 喷射沉积过程中球状晶粒的形成机制	(104)
2.3.4 沉积坯致密度与气体含量	(109)
参考文献	(116)
第3章 喷射成形过程的数值模拟与智能监控 ...	(118)
3.1 喷射成形过程的数值模拟	(118)
3.1.1 喷射成形过程数值模拟的主要方法	(118)
3.1.2 喷射成形过程数值模拟的主要内容	(125)
3.1.3 值得研究的若干问题	(145)
3.2 喷射成形过程的实时监测与智能控制技术	(147)
3.2.1 实时监测技术	(147)
3.2.2 智能控制技术	(150)
参考文献	(154)
第4章 喷射成形合金与金属间化合物	(156)
4.1 喷射成形铝基合金	(156)
4.1.1 Al-Si 合金	(156)
4.1.2 Al-Li 合金	(163)
4.1.3 Al-Cu 合金	(166)
4.1.4 Al-Zn 合金	(171)

4.1.5 耐热铝合金	(174)
4.1.6 Al - Pb 合金	(176)
4.2 喷射成形钢基合金	(177)
4.2.1 Fe - Si 合金	(177)
4.2.2 Cr12MoV 钢	(178)
4.3 喷射成形锌基合金	(180)
4.4 喷射成形铜基合金	(182)
4.5 喷射成形高温合金与金属间化合物	(184)
4.5.1 镍基高温合金	(184)
4.5.2 TiAl 基金属间化合物	(188)
4.5.3 Ni ₃ Al 基金属间化合物	(194)
参考文献	(196)

第5章 喷射成形金属基复合材料 (200)

5.1 金属基复合材料制备方法概况	(200)
5.1.1 引言	(200)
5.1.2 金属基复合材料的制备方法	(201)
5.2 喷射共沉积法制备金属基复合材料	(212)
5.2.1 喷射共沉积法的原理与工艺	(212)
5.2.2 喷射共沉积金属基复合材料	(220)
5.3 反应喷射成形法制备金属基复合材料	(250)
5.3.1 反应喷射成形技术的原理与工艺	(250)
5.3.2 反应喷射成形金属基复合材料	(257)
参考文献	(265)

第6章 多层喷射沉积技术原理、工艺与应用 (269)

6.1 多层喷射沉积技术的提出与研究思路	(269)
6.1.1 问题的提出	(269)

6.1.2 问题的深入	(270)
6.2 多层喷射沉积技术原理、装置及特点	(271)
6.2.1 多层喷射沉积技术原理及装置	(271)
6.2.2 多层喷射沉积技术的特点	(276)
6.2.3 多层喷射沉积的智能控制	(276)
6.3 多层喷射沉积技术的工艺过程	(281)
6.3.1 金属液滴喷射沉积的运动轨迹	(281)
6.3.2 运动轨迹的数学表达	(283)
6.3.3 多层喷射沉积板坯的运动参数优化	(288)
6.3.4 沉积物/基底热应力分析与沉积物缺陷	(293)
6.3.5 传热特征及最佳沉积条件	(298)
6.4 多层喷射沉积技术在材料制备中的应用	(303)
6.4.1 耐热铝合金材料	(303)
6.4.2 SiC 颗粒增强型铝基复合材料及其半固态加工	(304)
6.4.3 其他材料	(307)
6.5 多层喷射沉积技术制备大尺寸耐热铝合金管坯	(308)
6.5.1 制备原理	(308)
6.5.2 制备规律	(310)
6.5.3 大尺寸耐热铝合金管坯的制备过程与力学性能	(319)
参考文献	(323)
后 记	(325)

第1章 喷射成形技术 研究与开发概况

1.1 绪论

1.1.1 喷射成形的定义

喷射沉积成形(spray forming deposition),简称喷射成形(spray forming),又称喷射铸造(spray casting)或喷射沉积(spray deposition),是利用快速凝固方法获得金属坯件的一种先进特种铸造技术。它把液态金属的雾化和雾化熔滴的沉积自然地结合起来,在一步冶金操作中完成,以较少工序直接从液态金属(合金)制取整体致密、组织细化、成分均匀、结构完整并接近零件实际形状的材料和坯件。^[1]

该工艺的基本过程是:金属液流先经高压惰性气体雾化成弥散的液滴,再被高速气体喷射到收集器上形成连续致密、具有一定形状(如锭、管、板等)的近终形坯,见图1-1。^[2]

喷射成形也可以通过离心雾化来实现,并制得大型的环形件,见图1-2。

1.1.2 喷射成形的研究与开发进展

金属喷射成形技术是20世纪60年代产生并经过几十年的发展而逐渐成熟起来的一种快速凝固技术。在21世纪冶金三大前沿技术——熔融还原、近终形加工和半固态加工技术中,喷射成形作为一种半固态近终形加工技术,备受国内外广大研究者的青睐。^[3]

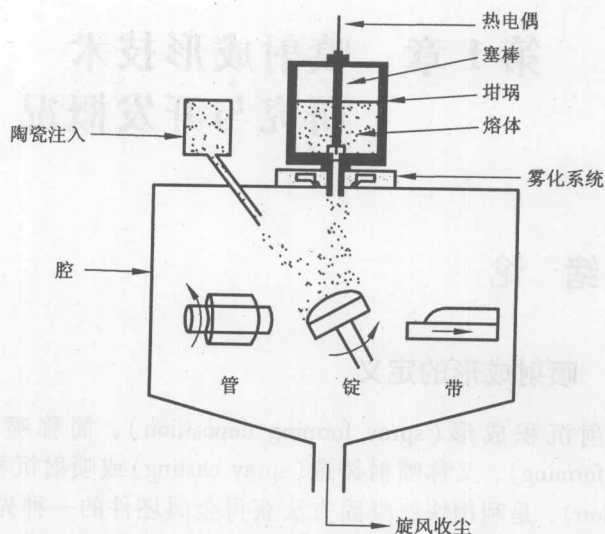


图 1-1 喷射成形 Osprey 工艺示意图

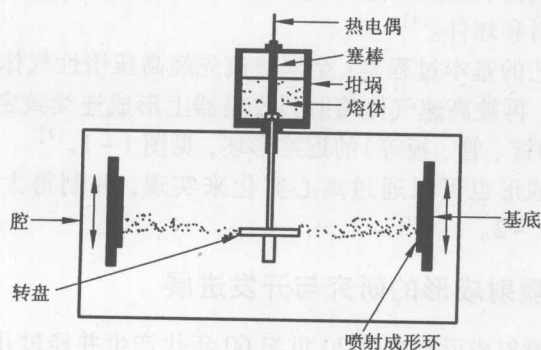


图 1-2 离心喷射成形制备大直径环形件工艺示意图

1.1.2.1 国外研究与开发进展

喷射沉积最早的概念和原理是由英国 Swansea 大学的 A. Singer 教授于 1968 年提出来的。当时 Singer 等把熔融金属离心雾化,雾化液滴喷在一个旋转的沉积载体上,形成沉积坯料,并直接轧制得到坯料。这种方法得到的沉积坯密度较低,厚度不均,并且坯料的冷却速度完全依赖于基体。1974 年 R. Brooks 等成功地将喷射沉积原理应用于锻造坯的生产,发展了著名的 Osprey 工艺。Brooks 等不断地对 Osprey 工艺进行深入研究,开发了适合于喷射沉积的合金系列,设计和制造了多种 Osprey 成套设备,生产了传统方法难于加工得到的高合金和超合金管、环、筒、棒和坯材,并取得了两项专利。从此,Osprey 工艺蜚声于世,成为喷射沉积的代名词^[4]。

20 世纪 70 年代末,美国麻省理工大学的 N. J. Grant 提出以超声气体雾化制备细粒度、高速度的雾化液滴为特征的液体动压成形工艺(LDC)。这类工艺的冷却速度约为 $10^3 \sim 10^4$ K/s,组织细小,是典型的快速凝固材料。由于超声雾化难以连续获得,冷却过快导致材料收率降低、孔隙度较高,因此,难以实现工业应用。^[5]

1988 年,美国加州大学 Irvine 分校的 Lavernia 等在金属喷射沉积技术基础上开发出制备金属基复合材料的“雾化共沉积技术(spray co-deposition)”。随后 Lawley 等率先提出了“反应雾化成形技术(reactive spray forming)”,该技术将雾化成形工艺和化学反应法制备复合材料技术结合在一起,用以生产性能更好的金属基自生复合材料。与此同时,一些大学和研究所在喷射沉积的机制与模型化以及计算机控制方面做了许多卓有成效的工作,如美国 MIT System Corporation 用计算机控制基板的多维移动制得复杂不对称形状的工件。

由于金属喷射沉积具有明显的优点,在工业上已展现出良好的应用前景,受到工业界的广泛关注,随后,特别是进入 20 世纪 80 年代以来,许多国家投入大量人力、物力进行金属喷射产品的

开发与生产,取得了较好的效果。1980年,英国 Aurora 钢铁公司又将金属喷射沉积原理应用到高合金工具钢和高速钢,发展了一种受控金属喷射沉积(controlled spray deposition)工艺,由金属熔体的雾化和高速金属液滴撞击冷却板所组成,它是以 Osprey 工艺为基础,采用较大金属液滴(液滴直径为 0.5 ~ 1.5 mm),由于撞击作用,仍可以获得 10^3 K/s 的冷却速度^[3]。

自 1974 年 Osprey Metals 公司取得喷射沉积技术的专利后,这一技术的工业化进程便开始了。截至 1993 年,世界上拥有 Osprey 许可证的公司和开展喷射成形研究工作的大学及研究机构见表 1-1 和表 1-2。^[6]

表 1-1 Osprey 许可生产商

生产领域	生产单位
铝	Alcan, Sumitomo Light Metals Peak, Pechiney, Alusuisse
铜	Olin, Wielan, Boillet
特殊钢	Sandvik, SHIFF, Chaparral Steel, Kobe Steel, CRM, Rautaruukki
高温合金	GE, Howmet, Rolls, Royce, US Navy, Drexel University, Billiton
机械制造	MDH, SHI

表 1-2 喷射成形技术研究机构

欧 洲	美 国	远东地区
Bremen 大学	Dresel 大学	中国的一些大学与研究所
Achen 大学	U. S. Navy	韩国第二研究所
SDL	MIT	日本的一些大学
Oxford 大学	California 大学	Malayan 研究所
Sheffield 大学	(Irvine)	
Birmingham 大学	Washington	
Surrey 大学	(at Louis)	
Osprey(5 个单位)	INEL	

各研究机构和生产商利用 Osprey Metals 公司的专利生产许可证, 制造出了一批大规格的产品: 如内径为 d 100 ~ 400 mm、壁厚 40 mm、长 8 000 mm 不锈钢管(瑞典 Sandvick Steel); 宽 1 200 mm、长 4 000 mm、厚 10 mm 板材(西德 Mannesmann Demark); d 250 mm 盘坯和 d 150 mm $\times$ 1 000 mm 棒坯(英国 Osprey Metals); 日本住友重工生产大型冷轧辊; Alcan International 喷射沉积 d 150 mm $\times$ 1 000 mm Al - SiC 棒坯。此外一些高温合金生产、使用厂家如美国 GE、Howmet、Cabot 等也建立了生产或实验型装置。表 1-3 列出了利用喷射成形技术生产的接近最终尺寸的产品种类及其所用材料。

表 1-3 喷射成形技术生产的接近最终成形尺寸的产品

产 品		金 属 材 料
管 状	圆管	不锈钢及高温合金
	轧辊	铸铁及高合金钢
	圆筒内衬	铝合金
	透平环	高温合金
	轴承套	高速钢
棒 锭 坯	挤压坯	铝合金及复合材料
	锻坯	高温合金
	圆棒	高合金钢
带 材	带钢	低合金及硅钢
	有色金属带	铜及铝合金
	装甲板	钢、铝及复合材料
涂 镀 层	涂层管	锅炉钢
	镀层棒钢	不锈钢及工具钢
	涂层带钢及涂层板钢	耐磨板及轴承合金

1.1.2.2 国内研究与开发进展

我国的喷射沉积技术研究始于 20 世纪 80 年代中后期,主要的研究单位有中国科学院金属研究所、中南大学、哈尔滨工业大学、西北工业大学、北京科技大学、北京有色金属研究总院、北京航空材料研究院和上海钢铁研究所等,其中中国科学院金属所研究了 LDC 工艺,其余大多数沿用 Osprey 模式。

在我国有关喷射成形技术的最早报道可以追溯到 1987 年。在第六届国际快冷金属会议上(1987 年 8 月),中国科学院金属研究所张永昌教授等宣读了有关 Al-Pb-Cu 合金的喷射成形研究,随后中国科学院金属研究所承担国家“八六三”高技术项目,1987~2000 年先后研究了 Al-Li 合金板材的喷射成形,Al-Si 棒材喷射成形(做录像机磁鼓),以及高硅(4.5% Si)钢片的喷射成形等,1999 年建成了国内目前最大的喷射成形设备(雾化室体积 $3.2\text{ m} \times 1\text{ m} \times 2\text{ m}$),熔炼炉一次可熔炼 200 kg 以上,成形的管材可达 $d 400\text{ mm} \times 1\,000\text{ mm}$ 以上,板材 $500\text{ mm} \times 1\,000\text{ mm} \times 30\text{ mm}$,棒材 $d 200\text{ mm} \times 1\,000\text{ mm}$ 。北京有色金属研究总院石力开教授等在喷射成形技术制备铝合金方面进行了大量的研制和开发,由于该院在“九五”期间建成了大型的喷射成形设备,可在该设备上制造最大尺寸 $d(150 \sim 250)\text{ mm} \times (500 \sim 1\,000)\text{ mm}$ 的圆锭、 $d 300\text{ mm} \times 30\text{ mm} \times 500\text{ mm}$ 的管坯等,其主要的研究项目为 Al-Si 合金汽车缸内衬套和 7000 系超高强度铝合金。北京航空材料研究院田世藩教授等自 1988 年以来自行设计和研制了 50 kg 多功能喷射成形设备,以及压气机盘、轴、承力环等零件。哈尔滨工业大学李庆春教授等于同期建成了喷射成形设备,主要开展了 7000 和 2000 系高强铝合金、高强耐温铝合金以及 Al-Si 系耐磨低膨胀合金等材料的喷射成形。北京科技大学张济山教授等在引进英国 Singer 教授的专利和喷嘴的基础上建成一台小型设备,开展了 Al-Pb 和原位反应喷射成形的研究。上海宝钢章靖国教

授等研究了用喷射成形技术制造高铬钢-钢复合轧辊。^[7]

原中南工业大学陈振华教授、黄培云教授发明了一项专利——多层喷射沉积技术,改变了传统喷射沉积工艺中雾化锥/基底的单向直线运动模式,利用往复沉积强化冷却效果,从而解决了在制备厚度很大的坯件时易恶化铸态组织的问题,并能优化复合材料中增强相的分布及其与基体的结合状态。这一技术已被成功应用于制备对冷速敏感的 Al-Fe-V-Si 合金和 6013、6061、6066 铝合金及 SiC 颗粒增强复合材料。大型多层喷射沉积装置能制备单件质量达 100 kg 的锭坯和管坯。^[5]

1.1.2.3 国内外产业化水平差距^[8]

目前,国内喷射成形技术的产业化发展水平与工业发达国家的差距主要表现在以下四个方面。

(1) 对喷射成形工艺过程的控制技术研究还停留在十分原始的阶段。目前国内大多数研究单位还未解决基本形状的沉积坯件(棒坯、板坯、管坯)的成形问题,对提高沉积坯件的致密度、实收率的研究也开展得较少,这种状况从技术软件方面严重制约了喷射成形技术在国内走向实用化的速度。

(2) 一些关键的硬件技术,如适合于喷射成形工艺过程使用的雾化器结构、合金液体导出系统结构的研究刚刚取得突破,还未来得及推广,更谈不上成套设备的开发;而国内各研究单位的财力限制使得全套喷射成形设备引进又十分困难,这种状况从设备硬件方面制约了喷射成形技术在国内实用化发展的速度。

(3) 在市场方面,国内与工业发达国家相比所进行的市场研究相对较少,目前仅能够追踪世界上工业发达国家的应用发展趋势,较少针对国内的具体情况提出一些独具特色的应用开发方向,而国内目前的市场环境 with 工业发达国家相比仍存在一定区别,这种状况从市场方面制约了喷射成形技术在国内实用化发展的速度。

(4) 资金投入较少且分散,使得国内任何一家研究单位要想

在喷射成形技术研究及产业化应用方面取得全面突破十分困难,这种状况从资金上制约了国内喷射成形技术的实用化发展速度。

上述这些差距所造成的后果直接表现在国内喷射成形技术产业的发展方面。到目前为止,国内尚未形成一条完善的、可进行大批量生产的喷射成形专业技术产品生产线,也没有形成一种可大量创造经济效益的喷射成形专业技术产品。国内要想在喷射成形技术领域赶上工业发达国家的发展水平,需要采取有效手段弥补,至少是缩小上述差距。

1.1.3 喷射成形技术的优势与不足

就目前来讲,金属材料的常规制造多采用铸锭冶金法与粉末冶金法,特别是前者。但是,由于其工艺本身的特点,采用前一种工艺很难获得高性能的特殊合金材料;而采用粉末冶金法虽可以获得高成分、高性能的合金材料,如 Al-Si 合金,并且已经实际应用到很多方面。然而,由于粉末冶金工艺所需的工序多,如需要经过制粉、筛分、压实、脱气、固结等多道工序方能成形,由此造成粉末冶金装备复杂、成本高,同时轻金属是活性金属,粉末表面有一层薄的氧化膜,由此引起诸多的技术问题。^[9]

综合近几年的研究结果,喷射沉积成形技术的主要优点和特点可概括如下^[10, 11]。

(1) 致密度高。喷射沉积后的密度一般可达理论值的 95% 以上,经冷热加工后很容易达到完全致密,即理论密度。

(2) 形成合金的氧含量低。金属液流的雾化和沉积过程均在惰性气体保护下进行,其沉积体的氧含量(小于 25×10^{-6})一般低于同类粉末合金水平,而与同类铸造合金相近。

(3) 具有快速凝固的显微组织特征。形成细小的等轴晶组织(15~25 μm),可以消除宏观偏析。显微偏析相的生成受到抑制,一次相的析出均匀细小(0.5~15 μm),二次析出和共晶相细化。