



華夏英才基金學術文庫

张济山 熊柏青 崔 华 著

喷射成形快速凝固技术 ——原理与应用

Spray Forming Rapid Solidification Technology:
Principles and Applications



科学出版社

www.sciencep.com



华夏英才基金学术文库

喷射成形快速凝固技术 ——原理与应用

Spray Forming Rapid Solidification Technology:
Principles and Applications

张济山 熊柏青 崔 华 著

科学出版社

北 京

内 容 简 介

喷射成形是近年来发展迅速的一项快速凝固材料制备新技术。本书结合作者近年来在该领域的研究成果和国内外相关主要研究进展,系统阐述了喷射成形技术的基本原理及其应用。主要内容包括:金属雾化过程、金属熔滴的热力学与动力学行为、金属熔滴的沉积与凝固、喷射成形过程的优化控制、喷射成形材料的组织与性能以及工业化应用现状与分析等。

本书内容翔实,深入浅出,适合从事金属材料研究的相关院校师生、研究人员以及工程技术人员参阅。

图书在版编目(CIP)数据

喷射成形快速凝固技术:原理与应用=Spray Forming Rapid Solidification Technology; Principles and Applications / 张济山,熊柏青,崔华著.

—北京:科学出版社,2008.1

(华夏英才基金学术文库)

ISBN 978-7-03-020759-3

I. 喷… II. ①张…②熊…③崔… III. 粉末成形-技术 IV. TF124

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2007)第 197355 号

责任编辑:耿建业 田士勇 / 责任校对:曾 茹

责任印制:刘士平 / 封面设计:陈 敬

科学出版社出版

北京东黄城根北街16号

邮政编码:100717

<http://www.sciencep.com>

新蕾印刷厂印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

2008年1月第 一 版 开本: B5(720×1000)

2008年1月第一次印刷 印张: 22 1/2

印数: 1—3 000 字数: 440 000

定价: 64.00 元

(如有印装质量问题,我社负责调换〈明辉〉)

前 言

喷射成形是 20 世纪 60 年代末由英国学者 Singer 提出学术思想,经过多年的发展于 80 年代逐渐成熟的一项快速凝固新技术,在高技术新材料领域已得到广泛应用。这是一项涉及液态金属雾化、快速冷却、非平衡凝固和粉末冶金等多领域新型近终形坯件制备技术。传统的快速凝固技术往往需要首先将材料制成粉末或薄带等,然后采用粉末冶金等技术将其制成可供实际应用的体材料。在这样的多步骤制备过程中,材料很容易受到中间污染,使用性能降低,同时也提高了制造成本,所以人们一直在探索快速凝固一步成形的技术途径。喷射成形技术就是在这样的背景条件下发展起来的,其主要特点之一就是将经气体雾化的液态金属熔滴沉积到一定形状的吸收器上,直接制成一定形状的具有快速凝固特点的半成品。

目前,该技术已经开始进入工业化应用阶段。由于它具有快速凝固一次成形的优点,为新材料的研究与发展提供了有力的工具,因而受到世界各国的重视。目前主要的喷射成形技术包括 Osprey 和 LDC 两大流派,但就工艺成熟程度和市场占有率来看,Osprey 技术已经居于明显的领先地位。喷射成形技术是一项灵活的柔性制造系统,具有通用性和产品的多样性,适用于多种金属材料(如高低合金钢、铝合金、高温合金、镁和铜合金及金属间化合物等),有些是用其他方法难以制造的,应用范围涉及汽车、石油化工、电子和普通工程等领域。经喷射成形的材料一般具有优异的快速凝固显微组织特征,包括细小的等轴晶组织、较低的溶质偏析、材料受污染较少以及析出相的粗化受阻等,经密实化处理易于达到全致密。喷射成形合金一般表现出高于普通铸造合金的性能,并接近或超过粉末冶金(PM)合金的性能水平。

目前,Osprey 的实验和制造设备可用于制造不锈钢管或涂层管、轧辊环、涂层辊、镍基高温合金涡轮环毛坯、特殊钢锻坯、铜挤压坯和铝挤压坯等。新建的大型钢管制造厂的生产能力已达到一次处理 4.5t 钢水,管材最大直径可达 800mm,沉积速率达到 200kg/min。所开发的新成分大型高速钢轧辊的寿命比一般粉末冶金和铸造高速钢轧辊分别延长 1.6~3 倍和 3.6~100 倍。另外,喷射成形工序的减少可提供一种低成本的制备技术。

从以上情况来看,喷射沉积成形技术已经取得了巨大的技术成就和经济效益,也是这一技术近年来备受重视的主要原因。但是,总体说来,这一技术仍处于产业化的初级阶段。对于大规模生产来说,不仅要求材料冶金质量好,还要能精确控制产品的规格与尺寸。此外,仍然存在喷射成形技术商业化的严重经济障碍,包括雾

化气体的高成本、过喷造成的明显损失、工艺重复性差和难以进行冶金质量的在线控制等。广泛的模型实验研究和数值模拟已经被用来了解过程的物理行为和坯件形状以及显微组织的变化,以便进行整个过程的控制,减少损失。但是,目前有关喷射成形技术理论基础的研究还相当分散,缺乏系统性,未能形成完整的理论体系,所以在制备过程的优化控制方面无法真正发挥理论的指导作用。针对以上情况,本书将综合作者在该领域近年来的研究成果,以及国内外学者发表的相关文献,建立系统的喷射成形技术的理论体系,以提供可用于指导喷射成形技术应用的实用工具。

喷射沉积是一个多参数共同作用的复杂过程。为了有效地控制沉积成形材料的显微组织结构,获得最佳的性能,必须充分了解各个工艺参数的作用,并对喷射沉积过程有一个全面透彻的了解。为了达到这一目的,把数学模型同实验分析结合起来是一种有效和必须的研究方法。研究涉及流体力学多相流理论、工程热物理传热传质理论和材料科学凝固结晶理论等多学科的广泛交叉。

根据系统分析,可以将喷射沉积过程分解为一系列基本过程。这些基本过程各自受不同影响因素的控制,但又相互关联,产生一定的耦合效应。前一过程的结果往往作为下一过程的初始条件或边界条件,对沉积材料的最终组织和性能有直接或间接的影响。所以,为了优化喷射沉积过程,获得高性能新材料,必须对整个过程作整体把握。理论处理过程中必须仔细考虑各个子过程之间的相互关联或耦合,不可孤立地研究单一的子过程。国内外近年来对喷射沉积成形过程涉及的基本问题虽有一定的研究,但往往侧重于某些子过程,如熔滴在空中飞行过程中的冷却与凝固,沉积后的冷却与凝固等。从整体角度考虑这些子过程之间的相互关系,以及如何应用分析结果进行优化控制喷射沉积过程的研究仍很少见,或者是作为技术秘密未予披露。但是,其处理各个子过程的基本思路大多是多年来研究雾化过程积累下来的较为成熟的理论方法,具有较高的参考价值。本书的目的就是在已有工作的基础之上,对喷射沉积成形的整体过程(由液态金属直到最终沉积体的形成)所涉及的基本问题及其相互关系进行深入研究,最终提出一个完整的理论模型统一考虑整个过程,可用于指导优化过程控制参数,获得所需的组织结构和各种特定性能的金属材料(包括各种不同形状和尺寸的坯件)。

本书共包括7章,其中第1~4、6章由张济山执笔,第5章由崔华执笔,第7章由熊柏青执笔,张济山负责全书的校订。首先以主要篇幅(第2~4章)系统分析喷射成型的基本过程及其相关的理论分析模型和处理方法,主要包括喷射成形雾化过程、雾化气体的流动及熔滴的动力学、热力学和凝固行为以及沉积过程与沉积坯的凝固和显微组织演化,涉及金属雾滴与高速气体射流(可达到超音速水平)之间的动量和热量传输、金属雾滴的冷却与快速凝固形核与长大、金属雾滴与沉积基板之间的交互作用及凝固行为等,并尝试在此基础上建立统一的理论体系。但是由

于目前的研究仍存在诸多不完善之处,所以理论上仍有许多不尽如人意的地方。对这些存在的问题,作者在书中尽量加以指出,以期引起读者的共鸣,推动该领域的研究发展。第5章将以上理论分析结果用于处理喷射成形金属基复合材料的制备过程分析,由于外加质点或反应过程的引入,使过程更加复杂。第6章系统分析喷射成形过程的优化控制理论和方法,并介绍喷射成形智能控制系统的发展现状及各种传感器技术,这对该技术的实际应用有重要意义。第7章简要介绍喷射成形技术的工业化应用现状。

多年来,我们在喷射成形及相关领域的研究工作得到了国家自然科学基金和国家“973”计划项目的大力支持,对此作者表示衷心地感谢,以这些研究的成果为基础发表的一系列论文以及积累的大量研究资料构成了本书的主要部分。在广泛的学术交流过程中,得到国内外许多学者和研究人员颇有启示的建议,在此一并致以感谢。另外,许多同事和同学直接参与了这些研究工作并作出了重要的贡献,著者对他们表示深深的谢意。

由于作者水平有限,书中难免存在不妥之处,敬请读者批评指正。

著 者

2007年9月

目 录

前言

第 1 章 喷射成形技术发展概况	1
1.1 喷射成形技术的起源与发展	1
1.1.1 Osprey 工艺技术	1
1.1.2 超声雾化喷射成形技术(LDC)	2
1.2 喷射成形工艺的基本特点	3
1.2.1 优点	3
1.2.2 缺点	4
参考文献	4
第 2 章 喷射成形的雾化过程	6
2.1 主要雾化技术	6
2.1.1 气体雾化	6
2.1.2 均匀熔滴喷射成形技术	9
2.1.3 离心雾化	11
2.2 气体雾化的基本过程分析	12
2.2.1 雾化区的压力分布特征	12
2.2.2 金属液在导流管中的热行为分析	23
2.2.3 金属流率的控制	29
2.2.4 破碎机理	39
2.2.5 雾化熔滴的尺寸分布	42
参考文献	48
第 3 章 雾化气体的流动及熔滴的动力学、热力学和凝固行为	52
3.1 单相(气体)流动	52
3.1.1 单相气流场的测定	52
3.1.2 单相气流场的模拟	57
3.1.3 雾化室内的气流分布	62
3.2 两相流动	66
3.2.1 两相流特性的实验测量	66
3.2.2 两相流的模拟	71
3.3 熔滴的行为	83

3.3.1 熔滴的热行为	83
3.3.2 熔滴的凝固行为	88
3.3.3 熔滴的显微组织	101
3.4 雾化锥的热行为	103
参考文献	115
第4章 沉积过程与沉积坯的凝固和显微组织演化	119
4.1 熔滴的沉积	119
4.1.1 熔滴与沉积基板或沉积表面的交互作用	119
4.1.2 熔滴的沉积效率	141
4.2 坯件的外形	143
4.3 坯件的热流和凝固	149
4.3.1 实验研究	149
4.3.2 数值模拟	156
4.3.3 解析分析	185
4.4 显微组织演化	200
4.4.1 晶粒组织的形成	200
4.4.2 疏松的形成	220
4.4.3 残余应力的形成	222
参考文献	227
第5章 非连续金属基复合材料的喷射成形	231
5.1 非连续增强金属基复合材料制备技术简介	232
5.1.1 液相合成	233
5.1.2 固相合成	235
5.1.3 两相合成	236
5.2 增强相对喷射成形过程的影响	236
5.2.1 同金属熔滴的交互作用	236
5.2.2 增强相对传热与凝固行为的影响	245
5.2.3 反应喷射成形	250
参考文献	271
第6章 喷射成形过程的优化控制	273
6.1 沉积坯件几何形状的控制(近终形成形)	274
6.1.1 沉积速率的基本表达式(单喷嘴)	274
6.1.2 圆形坯段	276
6.1.3 板坯	285
6.1.4 复杂形状的坯件	294

6.2 智能控制系统	296
6.2.1 喷射成形过程的传感器技术	296
6.2.2 智能控制系统的开发	321
参考文献	330
第7章 喷射成形技术的工业化应用现状	333
7.1 喷射成形铝合金	333
7.1.1 喷射成形过共晶铝硅合金	333
7.1.2 喷射成形 Al-Zn 系(7000 系)超高强铝合金	337
7.2 喷射成形高温合金	339
7.2.1 涡轮环	340
7.2.2 涡轮盘	341
7.2.3 高温合金管	342
7.3 喷射成形钢铁合金	343
7.3.1 轧辊	343
7.3.2 高合金钢	344
7.3.3 钢板	344
7.4 喷射成形铜合金	345
7.5 喷射成形硅铝合金	346
参考文献	348

第 1 章 喷射成形技术发展概况

喷射成形(spray forming)是 20 世纪 60 年代末提出的学术思想,经过多年的发展于 80 年代逐渐成熟的一种快速凝固新技术,在高新技术新材料领域已广泛应用。它是一项涉及粉末冶金、液态金属雾化、快速冷却和非平衡凝固等多领域的新型材料制备技术。喷射成形是将液态金属用惰性气体雾化成不同尺寸的熔滴,然后被快速流动的雾化气体带出雾化区,熔滴在飞行过程中被一基板截断,并在基板上聚集和凝固成结合良好的接近完全致密的坯件,如图 1.1 所示^[1]。通过基板相对于喷嘴的移动,可以制成各种形状的大坯件,包括坯段、管和板等(图 1.1)。也可以将金属液浇铸在高速旋转的盘表面实现雾化喷射成形,此时雾化在离心力的作用下在盘的边缘形成。熔滴在一个大尺寸的圆筒内表面沉积,形成环状坯件。

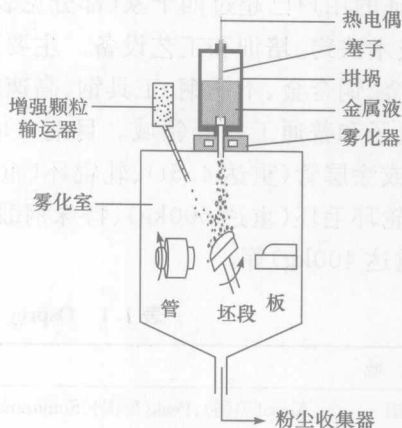


图 1.1 喷射成形示意图

喷射成形技术可以在一道工序中制造近终形和复合产品,产品形状包括坯段、管、板等。工艺过程包括:①提供液态金属;②将金属液转变为熔滴;③在基板上沉积形成高密度的半成品(坯件)。沉积坯件既可以在沉积态使用,也可以经过普通冷热加工后使用。

1.1 喷射成形技术的起源与发展

1.1.1 Osprey 工艺技术

20 世纪 60 年代末英国斯旺西大学的 Singer 教授提出了喷射成形技术的学术思想,并于 70 年代初在 Swansea 大学开创了喷射成形技术课程,当时称为喷雾轧制工艺^[2,3]。他还开创了 Spray Forming Developments Ltd. 公司,向市场提供喷射成形设备。70 年代中期开始,由三位年轻的创始人 Gwyn Brooks, Jeff Coombs 和 Alan Leatham 创建的英国 Osprey Metals Ltd. 公司迅速崛起,成为目前世界上实力最强的喷射成形公司^[4],已经把实验室技术发展到了生产技术水平,占领了大部

分国际市场。该公司目标是开发具有革命性的先进的喷射成形金属成形技术,已经取得了大量的专利,并在世界范围内转让许可证。该项技术以该公司的名字命名为 Osprey Process。除转让使用许可证外,该公司还制造各种喷射成形产品,主要为高性能合金。

目前主要的喷射成形技术包括 Osprey 和 LDC 两大流派。但就工艺成熟程度和市场占有率来看,Osprey 技术已经居于明显的领先地位,可大批量制备各种合金的半成品(如管、坯段和涂层产品等)。目前,申请获得 Osprey 公司使用许可证的用户已超过四十家(部分见表 1.1)^[5]。Osprey 技术许可证包括各种专利、技术诀窍、培训和工艺设备。主要用于研究开发各种高性能合金产品,包括铝合金、铜合金、不锈钢、工具钢、高速钢和轧辊合金,应用范围涉及汽车、石油化工、电子和普通工程等领域。目前,Osprey 的实验和制造工厂可用于制造不锈钢管或涂层管(重达 4.5t)、轧辊环(重达 1t)、涂层辊(重达 500kg)、镍基高温合金涡轮环毛坯(重达 500kg)、特殊钢锻坯(重达 1t)、铜挤压坯(重达 2t)和铝挤压坯(重达 400kg)等。

表 1.1 Osprey 技术开发应用的情况

领 域	公 司
铝	Alcoa(美国)、Peak(德国)、Sumitomo Light Metals(日本)、Pechiney(法国)、Alusuisse(瑞士)
铜	Olin(美国)、Wieland(德国)、Boillat(瑞士)
特殊钢	Sandvik(瑞典)、Babcock & Wilcox(美国)、Kobe Steel(日本)、Special Melted Products(英国)、Danish Steel(丹麦)、Rautaruukki(芬兰)
高温合金	General Electric(美国)、General Electric(美国)、Howmet(美国)
轧辊	SHIFF(日本)、CRM(比利时)、Forged Rolls(英国)、British Rollmakers(英国)
研究与发展	US Navy(美国)、Drexel University(美国)、Rist(韩国)、Penn State(美国)、IPEN(巴西)
制造工厂	Mannesmann Demag(德国)、Sumitomo Heavy Industries(日本)

1.1.2 超声雾化喷射成形技术(LDC)

1984 年以来,美国麻省理工学院(MIT)的 Grant 教授主持开发了类似的 LDC (liquid dynamic compaction) 工艺^[6],创立了喷射成形的另一大学派,并开发成功了著名的超声雾化喷嘴。该技术同 Osprey 技术的不同点主要是更强调提高冷却速度。LDC 工艺虽然在冷却速度方面略胜一筹,但同时也带来了一些问题,例如,由于过分强调提高冷却速度,使沉积坯件中的显微疏松明显增加(产品必须经过冷热加工才能使用)。这在一定程度上阻碍了喷射成形技术近终形特性的发挥,影响了其工业化进程。因此,到目前为止还没有建立起一家 LDC 生产型工厂。

1.2 喷射成形工艺的基本特点

在空气或惰性气体环境中,金属在坩埚中加热到合金液相线温度以上。一只塞子通过坯料的中心堵在坩埚中心的导流管的上部,如图 1.1 所示。塞子中间的热电偶可连续测量坯料的温度。当达到预定温度时,一般高于合金液相线的 $50\sim 200^{\circ}\text{C}$,接通雾化器的高压惰性气体,提起塞子使金属液流过导流管。此外,也可以将一块坯料堵在导流管的上部,直到其熔化使金属液流出为止,或用可旋转的坩埚将金属液倒入雾化器上部的加热的漏包中。对用于飞机涡轮盘的镍基锻造坯件,采用电渣重熔和冷室感应加热坩埚^[5]。对铝合金还采用了陶瓷过滤器。金属导流管一般为陶瓷,如石墨、 ZrO_2 、 Al_2O_3 ,或耐热金属如 W。液态金属流进入雾化室,被高速气流雾化成不同尺寸的熔滴。为补偿液体流出造成的水静压力的降低,以及相应的金属质量流速的降低,有时采用逐渐增加熔炼室的气压。

雾化熔滴在基板上沉积,基板可发生转动或平动,见图 1.1。过喷的颗粒不断被分离器由雾化室排出。由于过喷颗粒的表面积较高,对某些金属,如铝或钛会发生强烈的放热反应,必须避免粉末的聚集和点火或快速氧化,需采用奥氏体(抗火花)钢容器。必须小心处理过喷粉末以避免粉末同呼吸道、皮肤或眼睛接触。

1.2.1 优点

(1) 高致密度:直接沉积后的密度一般可达理论值的 95% 以上,如果工艺控制合理,则可达 99% 以上,经冷加工或热加工后很容易达到完全致密。

(2) 低含氧量:由于沉积过程的时间很短(约 10^{-3}s)且受到惰性气体的保护,沉积体内的氧含量一般远低于同类粉末合金的水平,而与同类铸造合金相近。

(3) 快速凝固的显微组织特征:包括形成细小的等轴晶组织($10\sim 100\mu\text{m}$),宏观偏析的消除,显微偏析和偏析相的生成受到抑制,一次相的析出均匀细小($0.5\sim 15\mu\text{m}$),二次析出和共晶相细化,合金成分更趋均匀和可形成亚稳过饱和固溶体等^[7,8]。

(4) 合金性能提高:喷射沉积材料的性能(如耐蚀、耐磨、磁性及强度和韧性等理化和力学性能)比常规铸锻材料有较大的提高,与粉末材料相当。此外,合金的热加工性能大大改善,使通常不能变形加工的铸造材料可以热加工成形,甚至可以获得超塑性。

(5) 工艺流程短,成本降低:这是目前从熔炼到最终产品最短的工艺路线之一,可降低能耗,提高经济效益。特别是可以避免粉末冶金中间工序造成污染的可能性,增加了产品的可靠性,比粉末冶金产品具有更强的竞争力;同时具有明

显的节能与环境保护功效。日本住友轻金属制造的直径 350mm, 长 1.2m 的 Al-17Si-6Fe-4.5Cu-0.5Mg(at%^①)喷射沉积成形挤压坯的成本比粉末冶金产品降低约 22%。

(6) 高沉积效率: Osprey 和 MIT 雾化器的生产率分别达到 25~200kg/min 和 100t/h。单个产品的质量可达 1t 以上, 显然有利于实现工业化生产。

(7) 灵活的柔性制造系统: 具有通用性和产品的多样性, 适用于多种金属材料(如高低合金钢、铝合金、高温合金、镁和铜合金及金属间化合物等), 有些是用其他方法难以制造的。

(8) 近终形成形: 可以直接形成多种接近零件实际形状的大截面尺寸的挤压、锻造或轧制坯件(如盘、饼、管、环、棒、板和带等), 有些可直接使用。

(9) 可制备高性能金属基复合材料: 这是近年来开发成功的喷射沉积成形技术的重要应用领域, 可以在很大程度上解决其他复合材料制备技术所遇到的各种问题, 制造出成本较低而性能较高的非连续增强金属基复合材料, 具有很强的竞争力, 近年来发展很快^[9,10]。

正是由于喷射沉积成形技术具有以上突出的优点, 近年来受到了国内外学术界及工业界的高度重视, 世界各国竞相参与该技术的开发应用, 各方面的发展很快, 被人们形象地誉为“冶金工业的未来之星”。

1.2.2 缺点

沉积态坯件中总是含有一定量的疏松, 但通常经过挤压、热/冷轧或热等静压(HIPing)可达到完全密实。采用进一步热处理和/或锻造可优化显微组织和力学性能, 在这些过程中, 通常会发生一些显微组织粗化和形成组织。

达到最终产品的效率一般明显低于 100%。材料的损失来源于: ①熔滴的过喷, 即不与坯件表面相碰撞; ②熔滴或颗粒从坯件表面弹开; ③检测报废或加工损耗以及坯件基体和顶部的去除; ④由于冶金质量问题的报废。

参考文献

- 1 Singer A R E. Metal Materials, 1974, 32(9-10): 5~8.
- 2 Singer A R E, Alexander J M. STCF, 1983, 145~149.
- 3 Singer A R E. USA: Iron & Steel Soc of AIME, 1985: 173~183.
- 4 Leatham A G, Ogilvy A, Elias L. USA: Metal Powder Industries Federation, 1993: 165~175.

① at%表示元素的原子数百分比。

第 2 章 喷射成形的雾化过程

雾化过程是整个喷射成形技术的关键之一,直接决定所形成的雾化锥的形状及熔滴的行为,包括熔滴的形貌、尺寸分布、飞行速度和冷却速度等。这些参数对后续过程及沉积坯件中显微组织的形成有重要影响。本章将介绍目前喷射沉积成形技术采用的主要雾化技术及其主要特点,重点讨论气体雾化过程,包括:雾化区的压力分布特点、金属液在导流管中的热行为、金属流率的控制、金属液流的破碎以及雾化熔滴的尺寸分布等。

2.1 主要雾化技术

由于粉末冶金的应用使雾化技术有很大的发展,这里仅加以简单叙述,除了那些主要为喷射成形发展的雾化过程外,有许多不同的雾化技术,但只有离心雾化和实际上更常用的气体雾化技术广泛用于喷射成形,因为可雾化一定质量的合金液流(1~20kg/min)。

2.1.1 气体雾化

在气体雾化中,高速气体射流的动能将连续金属液流分散成熔滴。空气或水也可用作雾化介质,但因过度的氧化,在喷射成形技术中很少采用。雾化介质的选择主要考虑以下因素:

- (1) 金属粉末成分(是否发生不良反应);
- (2) 所需的冷却速度(同最终坯件的显微组织密切相关);
- (3) 成本。

雾化喷射成形工艺一般采用惰性气体(N_2 , Ar, He)作为雾化介质,主要物理参数见表 2.1。由于氮气成本低于其他惰性气体,一般情况下多采用氮气作为喷射成形的介质。一般采用高压气瓶或液氮蒸发供气。对大型制造工厂一般安装有氮气回收和再利用设备,可循环使用,以降低成本,保护环境。

表 2.1 常用喷射成形雾化介质的主要物理参数^[1]

介质	分子量	热传导系数 $W/(m \cdot K)$	比热(C_p)/($kJ/(kg \cdot K)$)	密度/(g/cm^3)
Ar	39.95	0.018	0.54	1.78
He	4.00	0.157	5.23	0.1785
N_2	28.01	0.025	1.05	1.25

目前用于喷射成型的气体雾化方法主要包括:

(1) 亚音速气体雾化:这是通常采用的气体雾化方法,大部分 Osprey 工艺采用此方法。典型的气体出口速度约为 $0.3 \sim 0.6\text{M}$ (马赫)。在足够高的过热度 and 适当气体流动设计的条件下,雾化熔滴为球形。在亚音速气体雾化条件下,雾化熔滴的分布较宽($1\mu\text{m} \sim 0.5\text{mm}$),主要原因是气体射流与液流的撞击点到熔滴形成区无法控制,亚音速气体雾化一般采用较低的气压($0.6 \sim 1.8\text{MPa}$)和较大的气体流量进行雾化。

(2) 超声气体雾化(USGA):以 MIT 为代表的 LDC 喷射成形工艺采用此类雾化方式。超声气体雾化是在喷嘴附加一个超声波发生装置,使喷出的气体射流具有一定频率(10^5Hz)的超声波,气体的典型出口速度为 2.5M ,典型的雾化压力为 8.3MPa 。超声能量作用于液流,可获得平均尺寸为 $20\mu\text{m}$ 左右的熔滴。与亚音速气体雾化相比较,可获得较大的熔滴冷却速度及更加细小的沉积组织。但目前还没有见到利用此类技术工业化生产的报道。

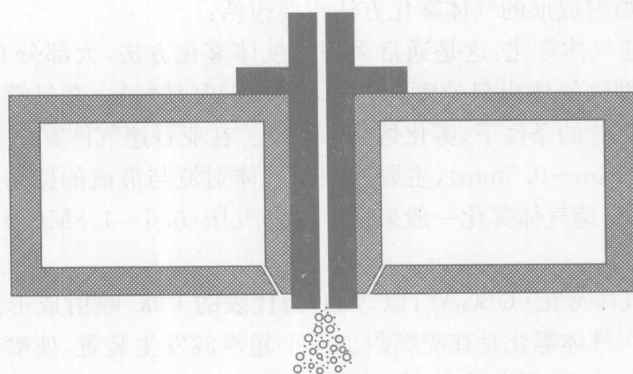
有两种基本的雾化器结构(见图 2.1):

(1) 限制性(闭)雾化器(图 2.1(a)):气体出口接近液流出口,气体直接在导流管边缘处雾化金属液,可以使最大的能量聚集于相对较小的液态金属,只有很少一部分能量损失在气流出口至液流之间的紊流中。同时气体可以较大的角度作用于液流,减少动能损失。气体喷口多采用拉瓦尔型,即先收缩后扩张。在临界截面处气体速度已经达到音速;通过临界截面后,气体继续作绝热膨胀,从而使气体出口速度超过音速。限制性雾化器中气体的动能高于自由降落雾化器,结果可获得中值较小的熔滴^[2,3]。但是,由于导流管的前端受到雾化气体的冷却,金属液在发生雾化前可能凝固,所以限制性喷嘴一般用于低熔点合金,此时金属液和气体的温差较小。

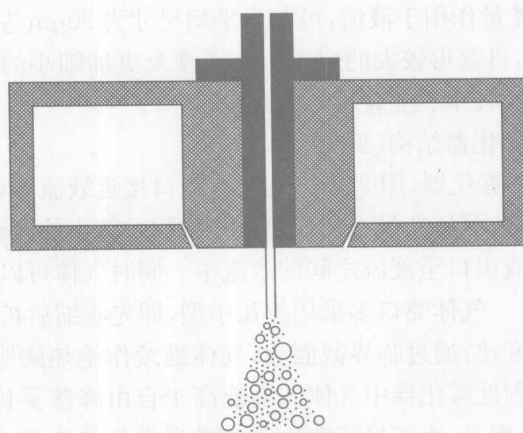
(2) 自由降落(开)雾化器(图 2.1(b)):金属液在无约束条件下进入发生雾化的区域。

雾化器是获得理想沉积坯件显微组织的关键。由于雾化过程的复杂性,雾化器的设计方案层出不穷,不同的研究者采用的喷嘴设计实际上均有一定差别。喷嘴设计需要考虑的因素主要包括^[4]:①雾化介质能够获得尽可能大的出口散射束和能量;②雾化介质与金属液流之间能形成合理的喷射角度;③金属液流能产生最大的紊流;④工作稳定性好,不被阻塞;⑤加工制造简单;⑥装卸安装方便。

雾化器可进一步分为圆形(气体由连续的圆孔释放,图 2.2(a)),环孔型喷嘴(气孔非连续分布在圆周上,图 2.2(b)),以及线性雾化器(圆形排气孔分布在导流管两侧,图 2.2(c))。一些线性雾化器可用于制造宽板。气体雾化粉末的典型质量中值直径为 $20 \sim 200\mu\text{m}$ ^[1]。



(a) 限制性喷嘴



(b) 自由降落喷嘴

图 2.1 典型雾化器示意图

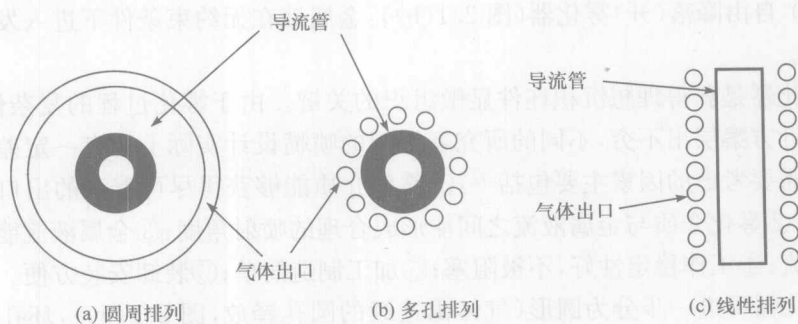


图 2.2 雾化器气孔分布