

粉末冶金 工艺

新技术及其分析

〔美〕H.A.库恩

A.劳利 编著

任崇信 译 赖和怡 校

冶金工业出版社

粉末冶金 工 艺

新技术及其分析

〔美〕H.A.库恩

A.劳利 编著

任崇信 译 赖和怡 校

冶金工业出版社

粉末冶金工艺

新技术及其分析

(美) H.A.库恩 A.劳利 编著

任崇信 译 赖和怡 校

冶金工业出版社出版

(北京灯市口74号)

新华书店北京发行所发行

冶金工业出版社印刷厂印刷

850×1168 1/32 印张 7 1/4 字数 189 千字

1982年3月第一版 1982年3月第一次印刷

印数00,001~2,600册

统一书号: 15062·3785 定价0.93元

译 者 的 话

粉末冶金这门科学技术，近十年来得到了迅速发展。它已成为制造高性能材料和制品以及特殊性能材料的生产工艺。

粉末冶金的发展与其本身工艺的改进及粉末冶金理论的研究密切相关。H.A.库恩和A.劳利所编著的《Powder Metallurgy Processing New Techniques and Analyses》一书是美国大学材料科学工程专业研究生的教科书，较为集中地反映了国外七十年代粉末冶金工艺理论的研究。书中着重从冶金学、力学等方面讨论了粉末冶金新生产工艺的基本原理。应用书中所介绍的最新分析技术将有助于解决粉末冶金生产中所存在的一些问题，而且，这些分析技术也为进一步发展粉末冶金工艺提供了理论根据。特别值得指出的是，本书不但从科学技术上对粉末冶金新工艺进行了讨论，而且从经济学的观点运用可行性研究这一方法对较为典型的粉末冶金工艺进行了分析。

我们相信，本书对我国从事材料科学工作的科学技术人员、研究人员以及高等院校金属材料及其加工专业的教师和学生是颇有参考价值的。

本书第六章特请计晋仁审校，在此深表谢意。

由于校译者的水平所限，书中错误和不妥之处在所难免，恳请读者批评指正。

一九八〇年十一月

前 言

近十年来，粉末冶金和粉末技术已经取得了引人注目的进展。现在，粉末冶金工艺已日益为人们所认识和受到重视，因为它已成为可以取代铸造或传统的金属成形工艺并可与之相竞争的技术。它的优越性还表现在能生产新的和特殊的材料和零件，以及一些只能用粉末冶金方法制造的部件。

粉末冶金的进展反映在两个方面：

1. 传统工艺方面：其中最重要的工序是粉末成形和烧结；
2. 高性能粉末冶金材料的较新领域：松散的粉末通过热等静压或粉末预成形坯经过加工以达到完全致密化。

根据上述工艺最近期的发展，可以认为粉末冶金确实已经成熟了。高性能粉末冶金产品具有完善的显微结构和均匀的成分，而且机械性能已达到（常常是超过）铸造和锻造材料的水平。

在此期间，德雷克塞尔（Drexel）大学由国防部在“西密斯女神”（Themis）工程名下得到一笔巨大的拨款，来进行粉末冶金方面的研究和发展工作。由于认识到粉末冶金技术用于生产金属和合金的半致密成品或完全致密结构零件的优越性，所以该计划的主要目标是加快发展所必需的科学和工程技术基础，即使粉末冶金工艺成为在技术上和经济上均是可行的材料生产手段。因此，出现了对粉末冶金工艺内部及外部有关的各个方面的一系列研究，而每一项研究都被认为对于用粉末冶金工艺来加工和制造材料的全部成就是关键的。选定研究的领域是雾化粉末的生产、三轴向应力状态下的粉末成形、金属粉末合金的均匀化、金属多孔预成形坯的变形和致密化、高密度粉末冶金材料的机械性能以及工业规模的典型粉末冶金生产工艺流程的经济分析。上述每一

项研究都依照有关粉末冶金制造工艺正发展着的基本知识，使用了冶金学、力学和经济学方面的新分析方法。所进行的研究不包括传统的成形和烧结工艺，因为这些工艺方法已有其它研究者做了大量的工作。但是，有关革新这些工艺过程的分析和应用还是进行了研究，并反映在均匀化和三轴向压制成形这些课题里。

“西密斯女神”工程的重要性后来博得国家科学基金委员会和工业界的重视和财政上的支持。这就使得一些单位可以进一步发展和应用这些分析技术，来解决现今粉末冶金工艺中存在的十分广泛的问题。这些单位是美国铝业公司、福特汽车公司、格利森（Gleason）工厂和霍根纳斯联合公司以及国际镍公司。

本书总结了上述研究的成果。六个主要的研究项目中的每一项均作为本书独立的一章。由于本书原定作为材料加工专业一年级研究生的教科书或作为了解现代粉末冶金的自学课本，因此保留了指导学习的风格。书中所包括的材料对于从事粉末冶金工业生产的工程师也是有所帮助的。本书重点讨论了所涉及到的基本现象、分析技术和它们的应用。

目前，所有的粉末冶金教科书都没有脱离泛泛地介绍粉末冶金工艺的框框。作者希望，本书多少能填补这一空白，使读者超越对各种粉末冶金工艺的定性的和概括的了解。总之，本书企图论证冶金学、力学和经济学方面的先进分析技术在粉末冶金生产工艺基本原理方面的应用。

目 录

前言

第一章 用气体或水雾化液体金属制粉

一、引言	1
A. 雾化法概述	2
B. 粉末特性参数	3
C. 工艺参数	4
二、喷射雾化的典型结果	5
A. 实验装置和工艺过程	5
B. 结果	5
三、金属液滴形成机理	12
A. 气体雾化	12
B. 水雾化	15
四、理论研究	16
A. 气体雾化的流体力学	17
B. 气体雾化的热传导	19
C. 水雾化的流体力学	20
五、实验结果	22
A. 水雾化	22
B. 气体雾化	29
六、提要和结论	34
参考文献	35

第二章 粉末的三轴向应力状态成形

一、引言	36
----------------	----

二、粉末成形时的应力状态.	37
A. 单轴向压制成形	37
B. 等静压制成形	38
C. 三轴向压制成形	39
三、三轴向压制成形特性.	44
A. 密度	44
B. 密度梯度	46
C. 强度	50
四、提要 and 结论.	51
参考文献.	55

第三章 混合粉末压坯的扩散均匀化

一、引言.	56
二、均匀化可变参数.	58
A. 粉末参数	59
B. 工艺参数	60
C. 合金系统的参数	62
三、可变参数的分析.	63
A. 显微结构	63
B. 动力学模型	69
四、各种模型的实验评价.	86
A. 实验技术	86
B. 热加工模型的评价	88
五、均匀化过程设计.	100
六、提要 and 结论.	105
参考文献.	106

第四章 粉末冶金材料的变形过程

一、引言.	107
二、粉末冶金金属材料的塑性变形.	108

A. 致密化	108
B. 塑性流动	114
C. 断裂	124
三、应用	128
A. 压缩	128
B. 挤压锻造	137
C. 实验模型零件	142
D. 产品零件	145
四、提要 and 结论	149
参考文献	150

第五章 粉末锻件的机械性能与组织结构关系的分析

一、引言	151
二、致密化和孔隙闭合形式	152
A. 复压	152
B. 锻粗锻造	154
C. 裂纹扩展的各向异性和阻力	154
三、孔隙度和机械性能	155
A. 静态性能	155
B. 动态性能	157
四、完全致密时的机械性能	162
A. 静态性能	162
B. 动态性能	164
五、提要 and 结论	183
参考文献	184

第六章 用粉末生产带钢的小型工厂的经济风险分析

一、一般介绍	186
二、风险分析的理论和原则	187
A. 在不稳定情况下的投资决策	187

B.工程模型的构成原则	189
C.财务模型	190
D.不稳定因素的根源	192
E.风险分析	194
三、粉末带钢生产.	200
A.过程概要	200
B.工艺细节	200
C.基本的财务模型	206
四、小型粉末冶金带钢厂的风险分析.	211
A.概率分布的构成	211
B.补充说明	215
C.结果	216
D.风险分析与粉末冶金带钢生产的未来展 望	220
参考文献.	221

第一章

用气体或水雾化液体金属制粉

德雷克塞尔大学化学工程系 J. A. 塔尔梅奇

一、引言

制造粉末冶金材料的程序是从考虑粉末的性质和特征,例如,尺寸、形状、成分和结构开始的。这些粉末特征影响以后的成形、烧结和致密化过程。粉末的性质和特征取决于粉末的生产方法和生产条件。大量的研究工作正是为了加深对生产过程的了解,以便于获得所要求的粉末性能。

制取粉末的方法可以分为以下几种:

1. 雾化法 此法用于能熔化的任何金属或合金系统;
2. 化学还原法 例如从氧化铁鳞或铁的氧化物生产海绵铁;
3. 机械粉碎法 此法用于脆性材料,像铍和锑;
4. 电解法 此法用于沉积高纯金属。

雾化法和化学还原法广泛用于大批量生产,而机械粉碎法和电解法基本上用于小批量生产特殊材料。适应性最强的方法是雾化法,因为它能生产合金粉末,而且能很好地控制粉末性能。

A. 雾化法概述

通常，雾化过程包括由熔化的金属形成金属液滴和随后（或同时）凝固成粉末颗粒这两个过程。雾化法中的一种是用一个旋转圆盘或心轴把液流击碎成为液滴，随之在惰性气氛中冷却成粉末颗粒。

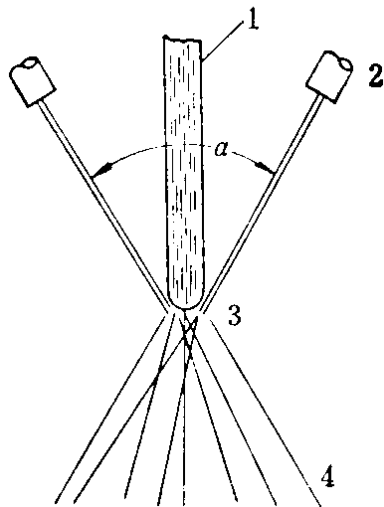


图 1-1 雾化几何条件示意图

1—熔融金属液流；2—喷射流体；3—喷射顶角；4—金属颗粒

最广泛应用的雾化法是借助于另一高速喷射的流体冲击熔化金属液流形成固体金属颗粒(Gummeson, 1972)。图 1-1 是典型雾化法几何条件示意图。喷射流的主要作用是：

1. 把熔融液流击碎成小的颗粒；

2. 通过急冷使颗粒凝固。

这种急冷雾化法需要控制两种流体的流动；它规定了研究雾化过程的分析机构。

其它类型材料的雾化方法包括：

(a) 气体（空气）吸出法，用于制造香料、烟雾剂、有机物和其它溶液的小滴；

(b) 旋转圆盘法，用于牛奶和咖啡的蒸发喷雾干燥；

(c) 单一流体喷射法，又称为压力雾化，用于形成水滴。

比较起来，金属粉末的急冷雾化包含熔化潜热；蒸发干燥(b)包含蒸发潜热；而(a)和(c)几乎是等温。如果把双流雾化与旋转圆盘法和压力喷雾法进行比较，就会发现双流急冷雾化法需要控制另一股流体的流动，而旋转圆盘法和压力喷雾法仅仅是控制一股流体的流动。各种不同方法包含有不同的几何条件和流动形式，这样就导致具有不同的流体动力学和热传导。因此，双流液体雾化的机理不同于其它类型的雾化。

喷射到熔融金属流体上的高速流体可以是水或气体。水比气体有更高的粘度、密度和急冷能力。但是，在雾化活性金属时，它也具有氧化的倾向。与水雾化相比，使用惰性气体能避免氧化。水雾化没有气体雾化那么复杂，而且雾化车间所需的投资比较低。因此，水雾化主要用于大批量生产不规则形状的铁基合金粉末，而惰性气体雾化则用于生产活性金属和特殊合金的粉末以及要求得到近于球形粉末的场合。

B. 粉末特性参数

评价工艺过程变化对粉末特性的影响需要测定颗粒参数的工艺技术。金属粉末的主要特性包括以下几个参数：

1. 粒度：如平均粒度、粒度分布和实收率；
2. 颗粒形状：包括与其相关的性质，如松装密度、流动速度和表面积；
3. 颗粒结构：包括密度、化学性质和晶粒度。

用筛分析很容易得到粒度的定量描述。根据筛分析结果能很方便地计算出粉末的平均粒度、粒度分布和实收率。由于大多数粒度分布对粉末累积重量百分率是对数正态分布，所以它们可以用两个参数来表征，即：

1. 中点值 d_m ，即平均颗粒尺寸。
2. 直径比或分散范围（即标准偏差 σ ）。后者可用两个累积质量百分率下的尺寸来计算：

$$\sigma = d(0.841)/d(0.5) = d(0.5)/d(0.159) \quad (1-1)$$

式中 $d(x)$ 中的 d 是累积重量百分率为 x 时的颗粒尺寸。

简单地、一般地定量测量单个颗粒形状的方法是不适用的。因为所得到的粉末形状是各种各样的，因此，通常应用如球形和不规则形状来对粉末进行定性的描述，但也都不足以充分描述粉末形状。采用标准试验可以有效地测定一堆粉末的性质，如松装

密度、流动性和B.E.T. 表面积^①。这些实验的应用是有限的，因为它们不是直接测量形状，而且受到除形状以外的很多其它参数的影响。

出现的各种各样的结构也使其组织结构特性复杂化。经常应用显微照相的方法，把经过镶嵌和抛光的粉末颗粒进行显微照相。实用的定量检验项目是颗粒密度、成分和氢损。

C. 工艺参数

熟练地设计和控制雾化过程的可变参数可以得到所需要的粉末特性。这些参数包括：

1. 熔融金属的性质，如粘度、表面张力、成分和过热状态；
2. 熔融金属液流的几何条件，如金属的流动速度、液流的长度、液流流动路线、集流腔的几何形状；
3. 喷射的几何条件，如喷射顶角、喷嘴数量、喷嘴的位置；
4. 喷射流体的性能，如压力、质量流动速率、粘度、密度。

在制取金属粉末过程中，粉末性质和雾化参数的相互关系特别重要。这些可变参数中的许多参数对粉末粒度的定性影响已被Gummesson (1972) 指出，但是，对于大部分参数的定量影响发表的资料很少。

本章集中讨论急冷雾化过程和所得粉末的特性。利用流体力学和热传导原理所进行的实验和理论研究，阐明了液滴形成和凝固机理，并且对粉末特性参数与工艺参数的关系提供了一些说明。气体和水两者均可作为辅助喷射流体。

^① B.E.T.法是以勃鲁纳尔 (Brunauer)、爱曼特(Emmett)和泰勒 (Teller) 提出的著名的理论原理为基础的一种测量表面积的气体吸附技术。

二、喷射雾化的典型结果

在讨论雾化机理之前，了解雾化过程中每个可变参数的相对重要性是很有用的。这一点已由一些初步的实验研究完成了。

A. 实验装置和工艺过程

为这一研究建造的实验性雾化装置示于图1-2。整个系统设计适合铁基合金的需要，可进行温度高达到 1760°C (3200°F) 的操作。急冷室备有一个观察口，以便对过程进行照相观察。控制金属流速的漏嘴长26毫米（1英寸），内径为4.8、6.4和8.0毫米（0.19、0.25和0.31英寸）。气流或水流的喷嘴穿过一个焊成的四方形集流腔。每一组喷嘴形成不同的固定喷射顶角 α （见图1-1）。大多数情况采用双喷嘴雾化结构。它易于进行照相记录和数学模拟计算。有关气体雾化和水雾化实验室用设备结构和实验结果的详细情况已于1973年由Rao和Grandzol分别报导过了。

金属以5至20公斤为一批量分批熔化，然后迅速注入能测量温度的中间漏包中。金属液流通过位于中间漏包底部的漏嘴，被来自集流腔的高压流体雾化、急冷、而后收集在雾化室底部的水池中。每一次循环之后，湿粉末用丙酮进行干燥并用美国标准筛（-40目）进行清理和测定实收率。整个操作系统具有良好的再现性。

B. 结果

雾化的结果主要以雾化粉末颗粒大小与累计重量百分率的关系曲线表示。粒度分布为对数正态分布。在对数—对数坐标上，粒度与累积重量为线性关系。用水和气体进行雾化时均发现，这个特性具有很宽的范围，而且以前的研究者已经报导过（Klar和Shafer, 1972）。因此，适合用平均粒度大小 d_m 和直径比（分散

范围) σ 表示其结果, 见前面公式 (1-1)。

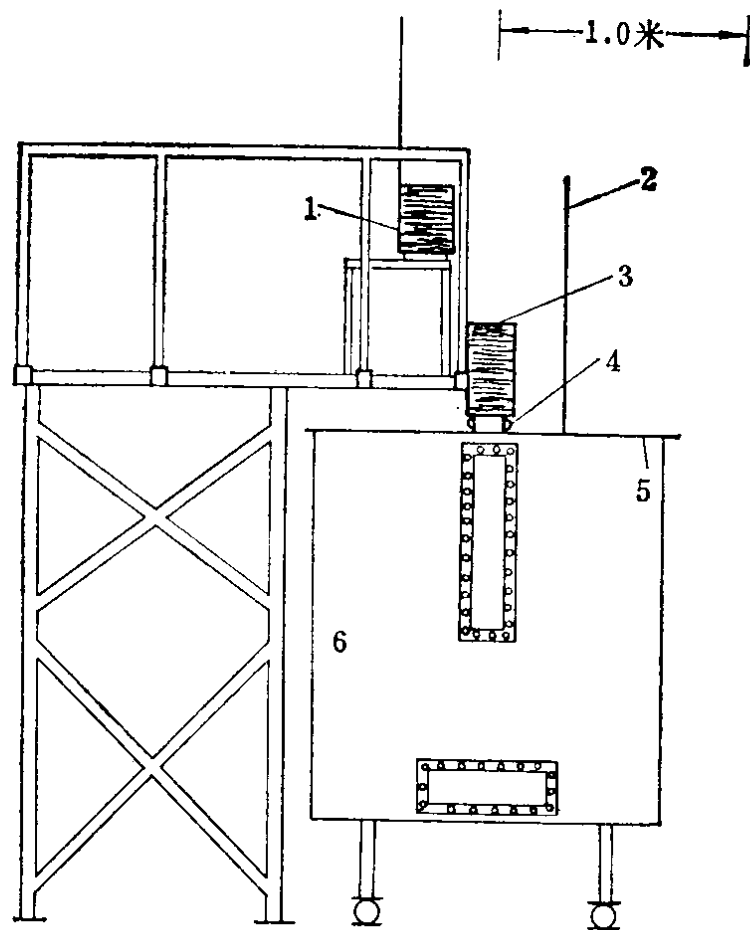


图 1-2 实验室用雾化装置

1—炉子; 2—安全屏蔽; 3—中间漏包; 4—集流腔和喷嘴;
5—防爆装置; 6—急冷室

1. 气体喷射雾化

氮被作为雾化流体是由于它的化学惰性比较好和成本低。使用了标准的槽形喷嘴, 其尺寸为 1.16×7.8 毫米 (0.046×0.307 英寸) (喷雾系统TTU模型)。气体压力和喷射距离 (从喷嘴到顶角) 对雾化铸铁粉末某些性能的影响示于图1-3 和图 1-4 及表 1-1和表1-2中。

用气体雾化时, 气流以高速度离开喷嘴, 但是当气流喷射到金属接触点 (顶点) 时, 速度减慢了。这一衰减量随着喷射距离的增加而增加。例如, 喷嘴出口速度为308米/秒(1000英尺/秒)和喷射距离为73毫米 (2.9英寸) 时, 用分散方程式 (Elrod.1954)

算出气体在顶角的速度是62米/秒(203英尺/秒)。这一衰减降低了喷射气流击碎熔融液流的有效动量。因此,随着气体压力增加(增加喷嘴出口速度,因而增加了喷射顶角的喷射速度),粒度要减小,如图1-3所示。同样,随着喷射距离的降低(降低了衰减量,因而增加了顶角的喷射速度),粒度也要减小,如图1-4所示。

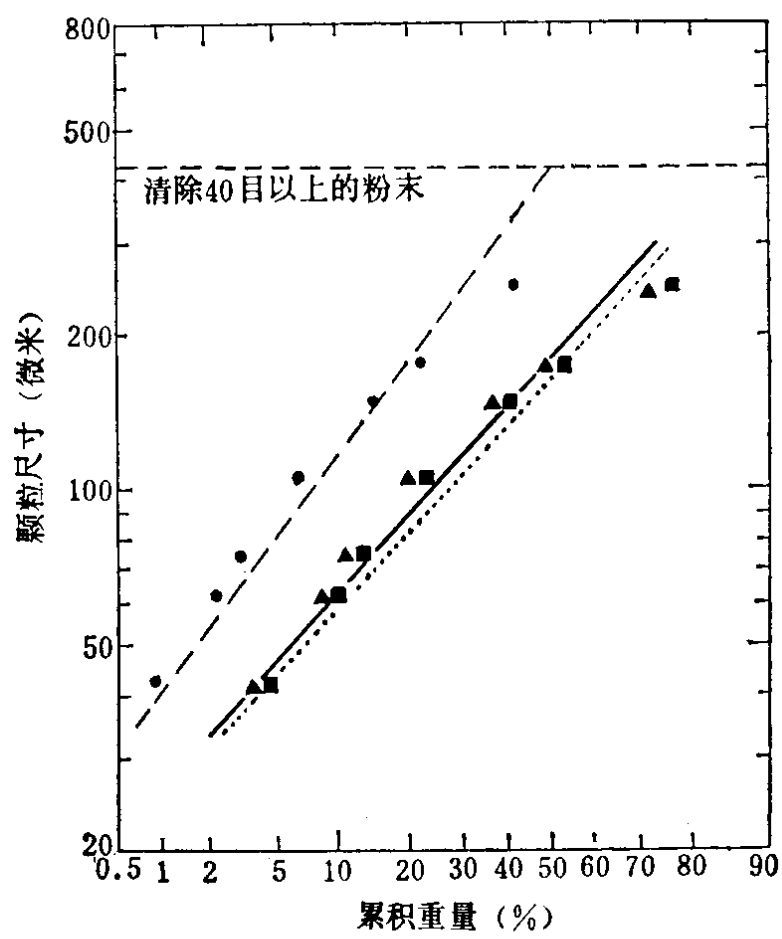


图 1-3 喷射压力对氮气雾化铸铁粉末粒度分布的影响 (Rao.1973)

	压力 (公斤/米 ²)	批号	实收率 (重量%)	平均粒度 (微米)	σ
▲.....	1383	C92	20.2	413	2.76
■——	2760	C93	79.1	177	2.33
●——	4140	C94	84.4	164	2.24

用气体雾化时,对大多数金属来说均形成球形颗粒。但是,对于现在研究的铸铁,则形成具有长径比 (L/D) 很大的像雪茄烟形状的颗粒。 L 与 D 的比值系用100/140目粒级的粉末试样