

Doi:10.3969/j.issn.1672-0105.2023.03.014

# MIM用金属粉末的主要制备技术及其原理综述

徐杰<sup>1</sup>, 宋仁金<sup>2</sup>, 王发鹏<sup>1</sup>, 李朋欢<sup>2\*</sup>, 张峰<sup>1</sup>

(1.杭州钢铁集团公司, 浙江 杭州 310022; 2.杭州屹通新材料股份有限公司, 浙江 杭州 310000)

**摘要:** 金属粉末作为MIM技术的关键原料, 其品质很大程度上决定了产品的最终质量。水气联合雾化制粉具有椭圆微观形貌、比表面积大等优异的理化性能, 成为MIM制造高性能制品的主要原材料之一。但羰基法、气雾化法、气流磨粉碎法和等离子体雾化法制粉技术所制备的粉末各有其优势, 也是MIM制品广泛应用的原材料。本文综述了MIM用金属粉末的主要几种制备技术原理, 总结其存在问题, 并对MIM用金属粉末制备技术提出新的展望。

**关键词:** MIM; 金属粉末; 粒度; 技术原理

中图分类号: TF123.1

文献标志码: A

文章编号: 1672-0105(2023)03-0062-05

## Review of Main Preparation Technology and Principle of Metal Powder for MIM

XU Jie<sup>1</sup>, SONG Renjin<sup>2</sup>, WANG Fapeng<sup>1</sup>, LI Penghuan<sup>2</sup>, ZHANG Feng<sup>1</sup>

(1.Hangzhou Tion & Steel Group Co., Ltd., Hangzhou 310022, China;

2.Hangzhou Yitong New Materials Co., Ltd., Hangzhou 310000, China)

**Abstract:** As the key raw material of MIM technology, the quality of metal powder largely determines the final quality of products. Water air combined atomization powder production has excellent physical and chemical properties such as elliptical microstructure and large specific surface area, and has become one of the main raw materials for MIM manufacturing high-performance products. However, the powders prepared by carbonyl method, gas atomization method, airflow grinding method and plasma atomization method have their own advantages and are also widely used as raw materials for MIM products. In this paper, the main preparation technology principles of metal powder for MIM are reviewed, and the existing problems are summarized, and the new development direction of metal powder preparation technology for MIM is put forward.

**Keywords:** MIM; metal powder; granularity; technical principle

金属粉末注射成形 (Metal Powder Injection Molding Technology, 简称MIM), 是金属粉末冶金技术细分领域及传统塑料注射成形技术有机结合的一项新工艺方法, 通过将胶黏剂与金属固态粉末共混造粒, 一定温度下注塑成型后除去成型坯中的胶黏剂, 经烧结致密化后所得到的产品具有高精度、粒径组织均匀、理化性能优异、成本低等优点<sup>[1-5]</sup>。由于该项技术对产品使用的金属粉末的理化性能要求比较严格, 通常使用的原材料选取粒径分布为2~15 $\mu\text{m}$ 的金属粉末, 但目前市场上原材料粒径以6~10 $\mu\text{m}$ 居多, 某些微注射工艺对粉末粒度的要求更细。本论述介绍了基于注射成形用金属粉末主要

常用的制备技术。

### 1 水气联合雾化法

#### 1.1 技术原理

水气联合雾化制取MIM用金属粉末是在高压水雾化法基础上发展起来的, 其原理是: 在惰性气体的保护氛围下, 熔融态金属粉末通过高温高压雾化产生的水流强冲击下使其破碎致粒径较小的均匀液滴, 经快速冷凝成型制的微细金属粉末<sup>[6]</sup>。所制备的金属粉末其形貌、微观粒径、粒度的比表面积等微观性能受水气联合雾化所使用的喷嘴影响较大。目前, 各课题组及生产方采用V型、铅笔形及圆锥形喷嘴等三种居多。通常相比较看来V型喷嘴

收稿日期: 2023-08-12

作者简介: 徐杰 (1974—), 男, 汉族, 江西九江人, 在职研究生, 工程师, 从事金属材料等技术研究。

\*通信作者: 李朋欢 (1986—), 男, 浙江杭州人, 工学博士, 高级工程师, 从事金属材料等技术研究。

较其它两种喷嘴具有较大冲击水流,是制造微细金属粉末生产及研发过程中常用的雾化装置。

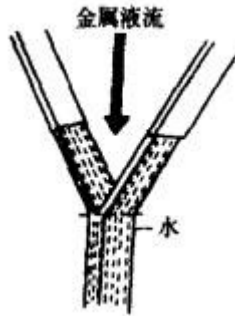


图1 V型喷嘴示意图<sup>[7]</sup>

水气联合雾化的过程十分复杂,目前学术界对其机理研究还不深入,但公认其雾化过程大致包含三个主要阶段<sup>[8]</sup>,即:熔融金属原始液滴的形成、破碎成粒、部分颗粒发生碰撞产生团聚形成形状复杂粒径较粗的粉末。根据上述过程,针对原来使用的V形喷嘴制备粉末粒度较粗、现状不规则问题,可以将V形喷嘴的雾化焦点由一个改变为多个,目前工业上大多采用主副V形喷嘴,即2个雾化焦点喷嘴复合使用,增加了二次破碎道次,使颗粒受击打概率增加提高雾化效率,最终所制的金属粉末其形貌、粒径、均匀度相较以往采用一个雾化焦点喷嘴所制备的性能更优。

## 1.2 存在的问题

水气联合雾化制备的MIM用金属粉末,粒度细,形貌为近球形。后续需要通过对粉末进行表面改性处理进一步提高粉末的振实密度和加入缓蚀剂改善粉末增氧问题。目前水气联合雾化主要集中在改善粉末球形度<sup>[9]</sup>和优化工艺参数上,例如提高冲击雾化水的压力、降低出钢前熔融金属液滴温度、使用高效的复合造渣剂及脱氧剂,以及优化制备过程中中间包温度等技术工艺,从而降低杂质含量及金属粉末氧含量<sup>[10,11]</sup>。

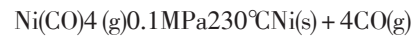
国内的水气联合雾化工艺与国外通用的水气联合雾化还是有区别的,国内的水气联合雾化中,气体并没有直接参与打击熔融金属液流,而国外的水气联合雾化中第一次由气体打击金属液流、第二次由水参与打击。但两种工艺生产出来的MIM用金属粉末性能十分接近,也为我国的MIM产业的发展奠定了一定的基础。但国内的水气联合雾化制粉技术与国外先进水平相比,还有一定的提升空间,

例如粉末的产品成品率、粉末形貌的可控性、粉末氧含量的改善等方面需要进一步提高<sup>[12]</sup>。

## 2 羰基法

### 2.1 技术原理

羰基法<sup>[13-15]</sup>是利用一氧化碳与铁、镍等金属发生化学反应形成具有易挥发性的羰基化合物,经高温后分解再次形成一氧化碳和金属的特点,制备金属粉末。如羰基镍粉的制备方法,其制备原理如下式:



通过以上技术工艺,将含镍材料在一定的压力及温度条件下,所生产的镍粉,其粉末粒度分布在1~10 $\mu\text{m}$ ,具有粒径小、烧结密度高等优异理化性能,该工艺方法同样的适合羰基铁粉的制备。

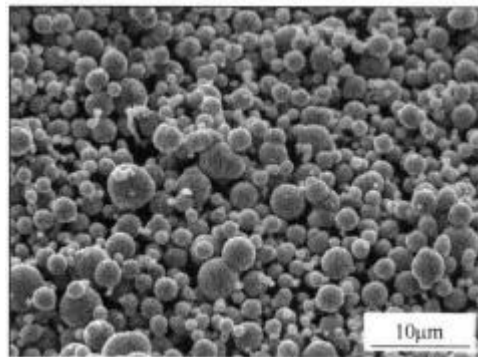


图2 羰基铁粉的微观形貌及粒径分布的SEM图像<sup>[16]</sup>

如图所示,可清晰看到所制备的羰基铁粉颗粒尺寸小(约1~5 $\mu\text{m}$ ),颗粒球形度较好,表面光滑。此外,大多MIM合金采用含镍基原料或含铁基原料,将合金元素及羰基粉末与其他金属粉末共混制备所需化学成分的合金材料或产品。

### 2.2 存在的问题

羰基法目前工业上能生产的产品为羰基钴粉、羰基镍粉及羰基铁粉等,其产品种类有限,且制备成本高,对其产业化大规模生产及技术推广带来了不便因素,制约其生产规模扩大。目前许多高校科研院所及企业研究学者也致力于研究及发展羰基钼粉及钨粉的工业化研究<sup>[15,17]</sup>。

## 3 气雾化法

### 3.1 技术原理

气雾化是用一高速气流将熔融液态金属流粉碎成小金属液滴并球形凝固成粉末的过程,技术工艺

类似水雾化技术工艺,其核心是熔融液态金属液滴流作用过程中对气流的控制;该技术原理关键在于喷嘴作用产生的流速及方向,是粉末颗粒表面与气体动能之间能量转换中枢纽带<sup>[18]</sup>。其雾化过程一般包含:气流与熔融态金属液流相互作用、气流分布状态、金属熔融态液滴飞行方向及角度、金属液滴球形化、金属液滴凝固固化等过程<sup>[19-21]</sup>。气流经雾化喷嘴使气体动能最大限度地转化为金属液滴的表面能,形成粒径均匀且细小金属液滴,最终在高速气流强制冷却作用下急速凝固固化制备成球状超细金属粉末粒子<sup>[22-24]</sup>。

气雾化法使用的喷嘴通常有非限制式和限制式两种,见图3中(a)、(b)。由于“非限制式”喷嘴不能得到较好的雾化效果,一般用于粒度在 $50\mu\text{m}$ 以上的粉末生产;Miller及其团队在“限制式”喷嘴基础上设计出限制式紧耦合喷嘴,其原理图如图4所示,熔融态金属液流在雾化气体出口位置由于与气流发生紧密耦合作用,有利于金属液流成膜和初始的破碎<sup>[25]</sup>,喷嘴结构紧凑,雾化效率高,但设计复杂,存在反喷和导流管堵塞等问题,工艺过程难于控制,且制备MIM用的金属粉末产品的成品率不高,一般仅有30%~35%。随着行业发展和市场需求,对粉末粒度的需求在 $10\sim 15\mu\text{m}$ 分布范围、球形度高、产品成品率高的MIM用金属粉末,随之而开发出超声紧耦合雾化技术和热气体雾化技术。Strauss及其团队<sup>[26]</sup>在前期学者研究的限制式紧耦合气雾化技术工艺方案的基础上,采用 $PV=nRT$ (气体状态方程)的原理,改进开发一种热气体雾化技术工艺方法,该方法可进一步减小粉末的平均粒度、增加比表面积、提高其粉末性能。

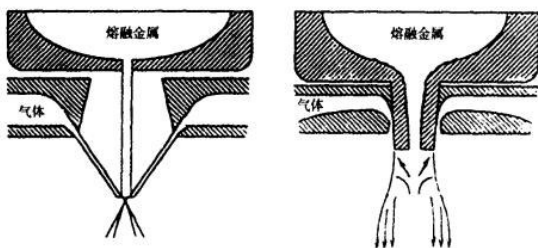


图3 (a) 非限制式喷嘴和 (b) 限制式喷嘴<sup>[7]</sup>

### 3.2 存在的问题

气雾化机理仍需进一步深化研究及阐明,其制备工艺技术存有过程复杂、成本高、无统一设计标准、迭代性差、连续生产、质量稳定性仍需提

高和系统理论指导知识欠缺等不利因素,导致喷嘴发展跟不上粉末冶金行业发展<sup>[21]</sup>。

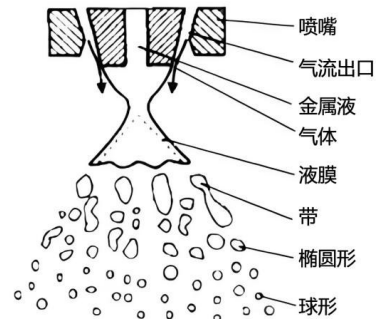


图4 限制式紧耦合喷嘴及原理示意图

## 4 气流磨粉碎法<sup>[28-29]</sup>

### 4.1 技术原理

气流磨粉碎法的工艺原理:经过特殊设计的喷嘴后,压缩气体被加速为超音速气流,喷射到研磨机的中心研磨区,从而带动研磨区内的物料互相碰撞,使粉末粉碎变细;气流膨胀后随物料上升进入分级区,由涡轮式分级器分选出达到粒度的物料,其余的粗粉返回研磨区继续研磨,直至达到要求的粒度被分出为止。整个生产过程可以连续自动运行,并通过分级轮转速的调节来控制粉末粒径大小(平均粒度在 $10\sim 15\mu\text{m}$ )。其优点为可连续自动进行,通过调节分级轮转速可控制粉末粒径大小,工艺成熟,适于批量工业化生产。

### 4.2 存在的问题

气流磨粉碎法是目前制备磁性材料粉末应用最为广泛的方法。其缺点是制取金属粉末时,必须使用连续不断地压缩气源(惰性气体或氮气),耗气量较大,并且该方法仅适合脆性金属及合金的破碎制粉。

## 5 等离子体雾化法<sup>[15,30,31]</sup>

### 5.1 技术原理

等离子体雾化法采用钛金属线材为原料,采用等离子喷嘴射出的高速的高温等离子气体作为雾化介质。由于采用金属线材为原料,并且采用同轴向成 $20^\circ\sim 40^\circ$ 的3个等离子喷嘴,使得金属原料的喂入和熔化、雾化在同一步骤完成,保证了粉末的球形度,并且避免了熔融钛水包的操作困难。该方法所生产的粉末流动性能好,填充密度高,也是目前批量生产细小球形高活性金属粉末的唯一方法。

## 5.2 存在的问题

等离子体雾化法主要生产各种用于MIM的钛及其他各种高活性粉末;除了生产MIM用钛粉外,还生产Ti-6Al-4V、Cu、Al、Mo、Ni-Cu、Ni粉等。但是由于采用金属线材为原料,导致生产率较低,粉末成本较高。

## 6 结语

目前,国内大规模批量化生产MIM用金属粉末的主要制粉技术是水气联合雾化法和羰基法。水气联合雾化制粉具有椭圆微观形貌、比表面积大等优异的理化性能,但生产的粉末成产率、形貌可控性、氧含量控制等方面还需进一步提高。羰基法制粉具有球形形貌、粒度分布单一、孔隙度低、纯度及烧结活性高的特点,不足之处在于生产品种有

限,而且成本相对较高,目前在工业上仅有羰基铁、镍、钴粉的生产。气雾化法与其他制粉技术相比,适合用于高品质高性能的高端MIM金属结构零部件的制造,粉末用量相对较少,但产生的附加值高,故也是MIM技术领域制粉常用的粉末制备技术。气流磨粉碎法工艺成熟,可连续自动进行,适于批量工业化生产;但是耗气量较大,仅适合脆性金属及合金的破碎制粉。目前,等离子体雾化法在部分发达国家已投入工业生产,我国此项技术研究尚处于起步阶段,仍处于不断研究及探索过程中,与欧美发达国家技术工艺还存有一定的差距。近年来,MIM技术得到了快速发展,对使用原料粉末的特性、质量和成本控制也提出更高要求,因此需要对现有制粉技术不断进行改进,以进一步提高MIM技术的竞争力,促进MIM技术的发展和应

## 参考文献:

- [1] 曲选辉,温宏宇. 粉末注射成形技术及其应用[C]. 2000年材料科学与工程新进展(上)——2000年中国材料研讨会论文集, 2000.
- [2] 高建祥,曲选辉,赵赛. 金属粉末注射成形技术的最新研究动态与发展趋势[J]. 硬质合金,2003,20(01):56-60.
- [3] 师平. 微小齿轮的金属粉末注射成型(MIM)技术[J]. 铸造设备研究,2006(03):25-28.
- [4] 何新波,曲选辉,黄祖尧,等. 金属粉末注射成形技术及其在数控机床功能部件中的应用[J]. 2007(08):136-139.
- [5] 李流军,李益民,邓忠勇,等. 金属粉末注射成形生产设备现状及其发展趋势[J]. 粉末冶金工业,2004,14(06):24-29.
- [6] 刘文胜,彭芬,马运柱,等. 气雾化法制备金属粉末的研究进展[J]. 材料导报,2009,23(03):53-57.
- [7] 陈振华. 多层喷射沉积技术及应用[M]. 长沙:湖南大学出版社,2003:131.
- [8] 赵同春,麻洪秋,金成海,等. 金属注射成形用水雾化不锈钢粉末的制备与应用[J]. 粉末冶金工业,2013,23(03):26-31.
- [9] 王建军. 中国雾化制粉技术现状简介[J]. 粉末冶金工业,2016,26(05):1.
- [10] 冷丹,曾克里,王志勇. 高压水雾化法制备MIM不锈钢粉末工艺研究[J]. 粉末冶金工业,2015,25(02):8.
- [11] 张新涛,张科翠,张东,等. 注射成形用金属粉末的制备技术及性能研究进展[J]. 粉末冶金工业,2019,29(02):55-59.
- [12] Yule A J, Dunkley J J. Atomization of melts: for powder production and spray deposition[M]. Atomization of Melts for Powder Production and Spray Deposition. Oxford: Clarendon Press, 1994.
- [13] 王炳根. 在生产工艺过程中控制羰基铁粉性能[J]. 粉末冶金工业,1996,6(02):32-35.
- [14] riederang A W, Schlegel R. BASF Continues to Evolve Carbonyl Iron Powders [J]. Metal Powder Report, 1999, 54(03): 18-20.
- [15] 段柏华,曲选辉,林冰涛,等. MIM用金属粉末的现状与发展[J]. 粉末冶金工业,2008,18(04):31-35.
- [16] 曲选辉. 粉末冶金原理与工艺[M]. 北京:冶金工业出版社,2013:72.
- [17] 林小芹,贺跃辉,王政伟. 钨粉的制备技术及其发展[J]. 粉末冶金材料科学与工程,2003,8(02):128-133.
- [18] 欧阳鸿武,陈欣,余文焘,等. 气雾化制粉技术发展历程及展望[J]. 粉末冶金技术,2007(01):53.
- [19] Kaiser R, Li C G, Yang S S, et al. A numerical simulation study of the path-resolved breakup behaviors of molten metal in high-pressure gas atomization; With emphasis on the role of shock waves in the gas/molten metal interaction[J]. Advanced Powder Technology, 2018, 29(03): 623-630.
- [20] Arachchilage K H, Haghshenas M, Park S, et al. Numerical simulation of high-pressure gas atomization of two-phase flow; effect of gas pressure on droplet size distribution[J]. Advanced Powder Technology, 2019, 30(11): 2726-2732.
- [21] 王利卿,赵少阳,谈萍,等. 气雾化球形金属粉末形成机理的研究进展[J]. 钛工业进展,2020,37(05):36-42.
- [22] Lampa A, Fritsching U. Large eddy simulation of the spray formation in confinements[J]. International Journal of Heat and Fluid

Flow, 2013, 43:26-34.

- [23] Antipas G S E. Review of gas atomization and spray forming phenomenology[J]. Powder Metallurgy, 2013, 56(04): 317-330.
- [24] Mi J. Grant P S, Fritsching U, et al. Multiphysics modelling of the spray forming process[J]. Materials Science and Engineering A, 2008, 477(1/2): 2-8.
- [25] 余勇, 曾归余, 肖明清, 等. 不同工艺对真空气雾化Ni粉粒度的影响研究[J]. 粉末冶金工业, 2015, 25(01): 8.
- [26] Strauss J T. Hotter gas increases atomization efficiency[J]. Metal Powder Report, 1999, 54(11): 24-28.
- [27] Jason Ting, Jeffery Connor, Stephen Ridder. High-speed cinematography of gas-metal atomization[J]. Mater Sci Eng A, 2005, 390: 452.
- [28] 尚峰, 乔斌, 李化强. MIM用粉末制备技术的研究[J]. 煤矿机械, 2007, 28(08): 116-118.
- [29] 刘宜汉, 杨洪波. 金属陶瓷材料制备与应用[M]. 沈阳: 东北大学出版社, 2012: 46.
- [30] Grenier S. LENS Moves beyond RP to Direct Fabrication[J]. Metal Powder Report, 1998, 53(11): 26-28.
- [31] Grenier S, Allaire F. Plasma Atomization Gives Unique Spherical Powders[J]. Metal Powder Report, 1997, 52(11): 34-37.

(责任编辑: 李勇)

(上接 第58页)

$p = 101.325 \times 10^3$  (表3 模型中的参数入口载气温度对应的蒸气压力  $a$  (Pa), 本文通过查表得出。备注

水的汽化潜热  $\gamma_w$  kJ/kg 2282 0.06MPa, 90°C

3 结束语 热容  $c_w$  kJ/(kg·°C) 4.187 -

空气的比热容  $c_a$  kJ/(kg·°C) 1.02

绝干料浆的比热容  $c_s$  kJ/(kg·°C) 1.3 常温条件下

体化技术所消耗的能量进行了研究, 建立了废渣脱水干化耗能评估模型, 把该模型应用于上海竹园污

泥干化焚烧工程进行了稳健性分析, 相对误差

非常小。使用该模型以我国某煤化工集团气化分厂

的固废(料浆)脱水干化项目为例进行分析, 获得

了该项目所耗能量, 为该项目的可行性论证提供了参考依据。

### 参考文献:

- [1] 张庆金, 曹真真, 李红明. 板框压滤机在气化煤灰脱水上的应用研究[J]. 氮肥与合成气, 2019, 47(05): 13-16.
- [2] 罗文保, 张保钢, 范为鹏. 气化滤饼脱水改造技术方案比选应用及资源化利用[J]. 山东化工, 2020, 49(24): 112-116.
- [3] 杜建鹏, 郭伟, 卢宇飞. 煤化工带液废固低温真空脱水干化一体化技术研究及应用分析[J]. 广东化工, 2021, 48(13): 305-307.
- [4] 黄申斌, 曲献伟, 匡毅, 等. 污泥低温真空脱水干化一体化技术装备大型城市污水处理厂的应用[J]. 中国市政工程, 2020(04): 131-132.
- [5] 赵旭远, 张露, 冒小丹. 堆存污泥深度脱水及其干化泥饼焚烧特性研究[J]. 环境科学研究, 2021, 34(04): 1015-1022.
- [6] 李亮, 史慧婷. 污泥低温真空脱水干化工艺的工程应用[J]. 中国给水排水, 2017, 33(12): 71-74.
- [7] 徐佳媚, 黄瑛, 姚一思, 等. 南京市污泥深度脱水-干化-焚烧处置规划研究[J]. 环境工程, 2015(S1): 515-519.
- [8] 许天明, 孙洪娟, 曲献伟, 等. 污泥低温真空脱水干化成套技术[J]. 中国给水排水, 2013, 29(02): 106-108.
- [9] 朱小玲. 竹园污泥干化焚烧厂运行技术优化研究[D]. 浙江大学, 2013.
- [10] 程晓波, 李博, 王飞, 等. 上海市竹园污泥干化焚烧系统的能量平衡分析[J]. 节能, 2011, 30(10): 15-18.
- [11] 韩吉兵, 田贯三, 王德林, 等. 市政污泥干燥焚烧联合运行分析[J]. 可再生能源, 2006(06): 63-66.
- [12] 王彬全, 麻红磊, 金余其, 等. 污泥干化焚烧过程中的能量平衡及经济性分析[J]. 热力发电, 2010, 39(07): 14-17.
- [13] 赵伟杰, 王勤辉, 张文震, 等. 循环流化床锅炉控制系统的设计和应用[M]. 中国电力出版社, 2009.

(责任编辑: 郭培俊)