

# 金属和合金的雾化制粉

王 洪 海

(冶金部钢铁研究总院)

## 一、概述

雾化法制取金属粉末早在二次世界大战期间便已采用。当时德国用铁粉制造弹带解决铜的短缺，开始采用雾化法大量生产铁粉。随后，各国也用雾化法生产铜合金及不锈钢粉。随着工程技术对金属粉末的品种、质量和数量的需求日益增长，雾化制粉工艺技术取得了巨大发展。特别是七十年代以来，由于高性能粉末冶金材料，如高速钢、不锈钢和高温合金等的需要，各种雾化制粉技术发展更为迅速。除了通常的双流体（金属流和惰性气流或水流）雾化法技术得到改善和提高之外，还出现了许多特殊的单流体（金属流）雾化技术，如旋转电极法、真空雾化法、离心雾化法和超声雾化法等等。

在工程技术应用面较广并且具有实用价值的是多元合金粉末，而雾化法是生产化学成份极为均匀、晶体结构特别细小的所谓“预合金粉末”的最为有效的方法。这些粉末大多是用热压实成材的高纯净度（氧含量 $<100\text{ppm}$ ）球形粉末。T15高速钢氮气雾化粉末的主要成份钨、铬、钒、钴，对于同炉的各种粒度（20~200目）的粉末，其含量的偏差分别不超过 $\pm 0.06\%$ 、 $\pm 0.03\%$ 、 $\pm 0.04\%$ 、 $\pm 0.03\%$ 。

在雾化法中，应用最为广泛的是惰性气体雾化和水雾化。水雾化的建设投资少，生产成本低，急冷能力大，因而可得到更细小的结晶结构；但其产品的含氧量高，颗粒形状不规则，难于满足高性能粉末的要求。惰性气体（氮或氩）雾化能生产不经处理（干燥或退火还原）便可直接应用的纯净（氧含量为40~100ppm）球形粉末。它极广泛地应用于生产活性金属和高性能合金粉末。氩气虽不溶于金属，但残留的氩会形成气泡而损害材料成品的强度，而且其成本高。所以工业上广泛采用的是氮气雾化制粉。

本文将重点结合氮气雾化制取高速钢、不

锈钢及其它合金粉，介绍一些雾化制取粉末的基本知识。

## 二、原理

雾化法通常包括把金属熔融为液体、分散金属液为液滴和液滴冷凝成固体粉末颗粒三个阶段。氮气雾化法一般采用感应炉熔炼合金，通过特殊的喷嘴结构引入高速喷射的氮气流，冲击并剪切金属流，使之破碎成细小的金属液滴，继之，液滴在充满氮气保护的高大容器内被急冷而凝固成粉末颗粒（图1）。

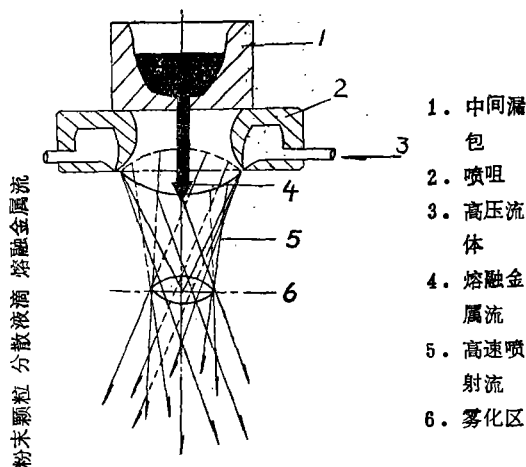


图1 雾化制粉原理

适当调整和严格控制雾化制粉的三个阶段，就能改善粉末制品的性能和质量，以满足各项工程技术的要求。换言之，通过改变雾化过程中的各个可变工艺参数，例如熔融液流的化学成份、粘度、表面张力、过热度、流量和流速，喷嘴的结构型式（包括喷嘴几何形状、喷射角度及其在系统中所处的位置），喷射流体的种类、纯度、压力和流速等，就可以得到所要求特性的粉末。在实践中，上述工艺参数的影响往往是彼此相互制约而综合发挥作用的。简而言之，当熔融金属的粘度和表面张力小、金属流质量流动速率低、喷嘴喷射角度大、喷

射流体压力高、喷射速度快时,能获得较细的粉末。金属液表面张力小和易氧化、喷射流的冷却作用大和氧化性强时,则易得不规则形状粉末。与此相反时,由金属流分散成的多边形液滴,在表面张力的充分作用下将会倾向于在凝固之前变成球体而得到球形粉末。

### 三、设备简介

氮气雾化制粉装置如图2所示。中频感应炉熔炼温度可达1700~1800℃(雾化时,熔融金属的过热度一般控制在100~200℃范围内),中间漏包可换装不同直径的漏眼,其直径控制在5~10毫米范围内。漏包须预热至800~900℃,以免金属流温度过份降低。

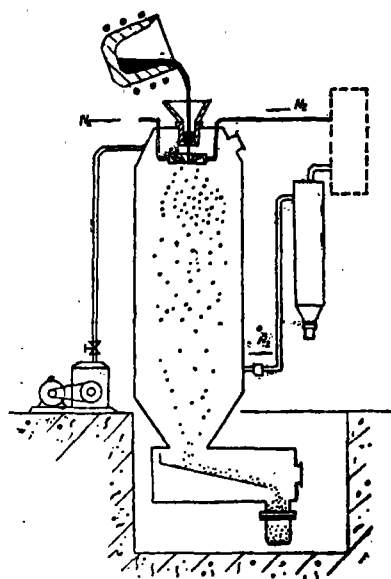


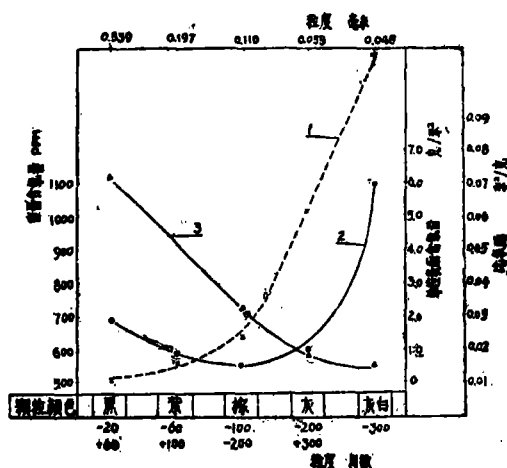
图2 氮气雾化制粉设备

图中喷咀为环缝式,其缝隙尺寸为0.5~1.0毫米,喷射角为30~60°。不锈钢集粉筒直径2米,高9米。用机械泵预先抽真空排除系统中的空气,然后充入氮气。采用瓶装纯氮(99.9%,露点-35℃),雾化压力18~20大气压。凝固的粉末颗粒收集于贮粉罐中,过筛后便得雾化粉末成品。

### 四、粉末的质量控制

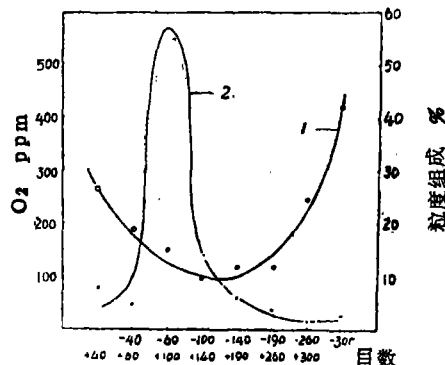
雾化粉末最为重要的质量指标之一是含氧量。它主要以颗粒表面在雾化过程中形成的氧化物形式存在。含氧量过高不仅会阻碍粉末的

热压实性,而且还会严重损害成材的热塑性和机械性能,特别是韧性。国际上六十年代末公布的情性气体雾化预合金粉末的含氧量水平为100~300ppm,而八十年代初发表的资料说明,现在对粉末的要求更为严格,含氧量须降至40~200ppm。



1. 比表面 2. 重量含氧量 3. 单位表面含氧量

图3 氮气雾化316L不锈钢粉末的含氧量



1. 氧含量 2. 粒度组成

图4 氮气雾化T15高速钢粉末的含氧量  
粒度-60目,平均氧含量150ppm

粉末颗粒的含氧量取决于颗粒表面状态,与颗粒大小和形状密切相关。氮雾化316L不锈钢粉末的含氧量分析结果是具有典型意义的(图3)。将粉末筛分为5个粒度级,含氧量以细粉为最高,这显然是由细粉的比表面大造成的,但粉末的表观颜色却明显随粒度增大而由浅变深。如果以粉末颗粒表面每单位面积的含氧量来比较(图3中曲线3),则粉末颗粒的颜色变化就可解释了。雾化316L不锈钢粉末的表面氧化物主要为四氧化三铁,随着粒

度增大, 颗粒表面层中四氧化三铁含量增加, 且晶粒度变大。粗颗粒质量大, 不能较快的被冷却至氧化温度以下, 致使颗粒表面层氧化严重, 其含氧量, 特别是单位表面含氧量较高。在给定的雾化条件下, 雾化粉末存在一个含氧量最低的粒度范围, 这个粒度范围可以称作“最佳颗粒范围”。图4所示的数据对雾化生产低含氧量的优质粉末具有实用意义。粉末最佳粒度范围可以通过改变雾化工艺参数来获得。

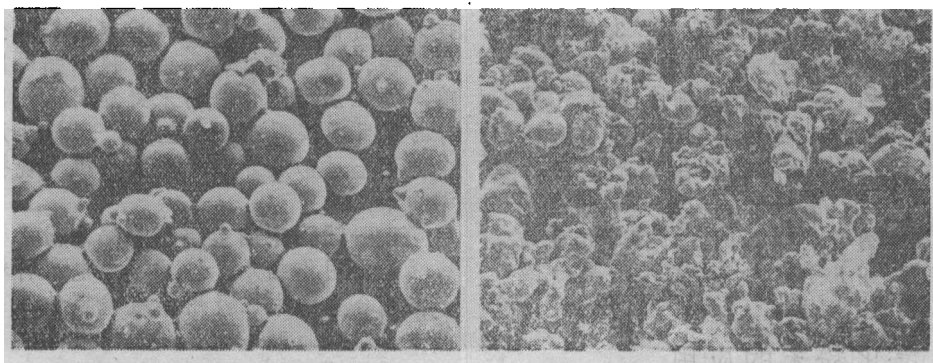
## 五、粉末的表面形态及内部结构

雾化制取金属粉末的表面形态, 主要取决于其化学成份, 并与雾化介质有关。水雾化T15高速钢粉末, 由于水及其蒸气的氧化作用, 在雾化过程中使金属液滴迅速产生氧化物膜而降低了表面张力, 特别是由于水的冷却作用大, 使液滴在表面张力作用下来不及表面收缩球化便凝固了, 因而, 粉末保持分散液滴初始的多

边形状状态(图5b)。这种粉末的含氧量高, 流动性差, 松装密度低; 与此相反, 惰性气雾化金属和合金时, 通常均能得到球形或近球形粉末(图5a、图6a、图7a)。但是, 也存在大球粘小球的颗粒聚结现象。

在雾化过程中, 所产生的液滴和颗粒彼此交织在一起, 以很高的速度运动, 它们之间不可避免要发生碰撞。在一般情况下, 细液滴先冷凝成固体小球体。在其飞行中, 如果与后生的液滴或尚未完全凝固或凝固后尚处高温而有较高塑性的颗粒相遇时, 二者就会发生颗粒聚结。采用高纯氩(99.999%)雾化制取高温合金粉末, 由于表面氧化轻微, 雾化时间长而颗粒聚结现象严重(图7a)。颗粒聚结会使球体变形而有损于粉末流动性。

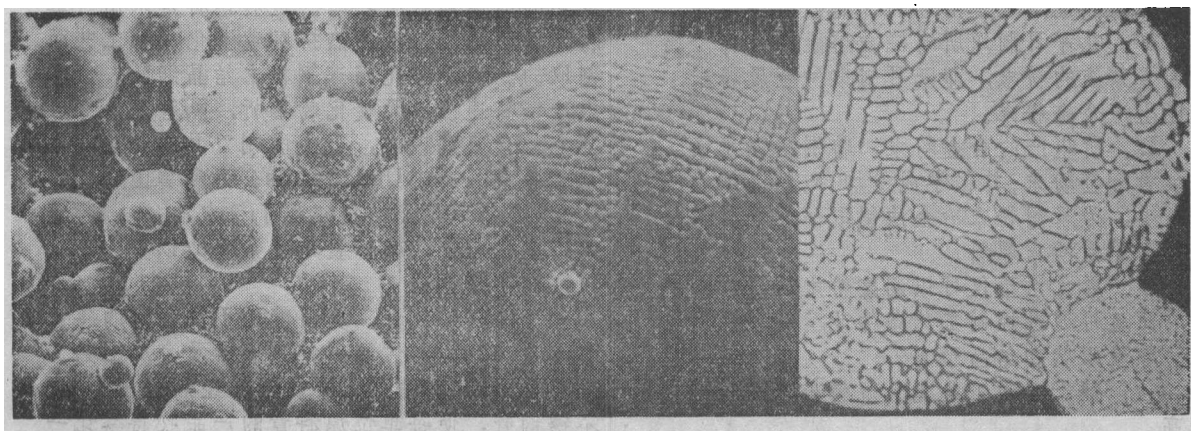
此外, 气雾化制取粉末有时也产生空心颗粒而影响了粉末的密度。这也是一个值得注意的问题。



a 氮气雾化 氧含量150ppm

b 水雾化 氧含量2500ppm

图5 雾化T15高速钢粉末的表面形态 粒度-100+140目  $\times 100$

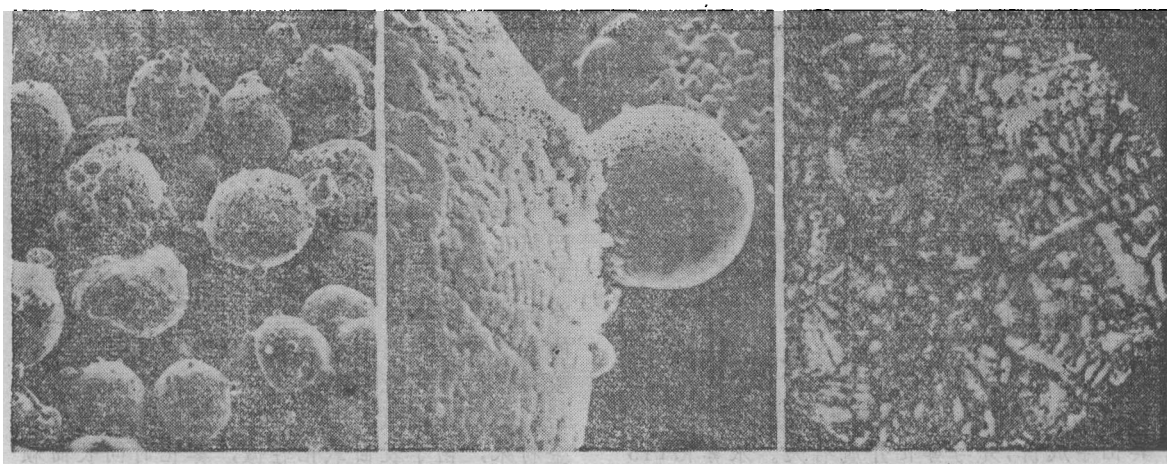


6a. 颗粒形状  $\times 200$

6b. 颗粒表面形态  $\times 1000$

6c. 颗粒内部结构 王水腐蚀  $\times 800$

图6 氮雾化316L不锈钢粉末, 粒度-100+140目 氧含量650ppm



7a. 颗粒形状 ×200

7b. 颗粒表面形态 ×1000

7c. 颗粒内部结构 ×800

图7 氩雾化In100高温合金粉末 粒度-100+140目 氧含量100ppm

雾化合金粉末，实质上也是铸态产物，它具有一般铸造合金的树枝状晶结构，结晶随颗粒尺寸减小、冷却速度加快而变细。350微米以下的氮气雾化高速钢粉末，其冷却速度可高达 $10^4 \sim 10^5$ 度/秒，其结晶非常细小，用之成材为高速钢便可消除碳化物偏析。图6b和图7b分别示出雾化不锈钢和高温合金粉末的表面树枝状结晶形态，其枝晶臂距受冷却速度影响而与颗粒直径有关。这些颗粒的内部结晶结构（图6c和图7c）与其表面结晶形态是一致的。

## 六、雾化粉末的应用

雾化制取粉末，在粉末冶金技术中占有极为重要的地位，这是由它的优越性所决定的：

1、几乎可制取所有能被熔融的任何金属和合金系统的粉末，即既可制取纯金属粉末，又能生产合金粉末。

2、所生产的合金粉末，特别是多元素、高含量合金粉末，其化学成份均匀，结晶细微，偏析小，为采用粉末冶金法制取高性能材料提供了高质量粉末原料。

3、雾化法不仅可以调整粉末的化学成份，而且可通过控制工艺条件改变粉末的粒度、颗粒形状和结晶形态。

4、便于实现工业化大规模生产，生产效率高。

5、可利用废旧金属或合金（包括粉末）为熔炼原料，材料利用率高。

从民用到军工，从一般工业到尖端科学，雾化制粉的应用极为广泛，除了制取各项工程技术中所需的各种纯金属粉末，例如金、银、铜、铁、锡、铅、锌、钴、镍、铝等以外，目前，雾化法生产合金粉末更加引人注目，其中有的项目已实现工业化生产，产量达几千吨，在世界上已形成专业化跨国公司。现择重点列举如下：

### 1. 一般粉末冶金烧结制品用粉

包括用作轴承、过滤器、电工材料的各种雾化铜合金粉末以及用作机械零件的雾化铁粉。

### 2. 高速钢粉

粉末冶金高速钢是近代用粉末冶金法研制成功的高性能材料之一。这种钢材是采用气雾化制粉，热等静压或热挤压致密化成材工艺而制取的。由于雾化高速钢粉末结晶细微，使粉末冶金高速钢中无碳化物偏析，可磨削性好，其它性能得到改善，致使所制刀具的切削寿命成倍提高。瑞典Uddeholms公司和美国Crucible公司七十年代初便实现了粉末冶金高速钢的工业化生产，年产量均达数千吨以上。

### 3. 不锈钢粉

据1979年统计，美国雾化不锈钢粉的年销售量达2600吨，主要用作过滤器及金属器具。瑞典采用Nyby法雾化不锈钢粉经热挤压制成不锈钢管，使每单位原料量的产品收得率比一般方法提高20%以上，有效地降低了材料消耗，年产量达几千吨。英国Davy公司也大量

生产水雾化不锈钢粉，用作烧结不锈钢零件。

#### 4. 高温合金粉

目前，粉末冶金高温合金的兴起促进了雾化制粉技术的发展。高温合金粉末除用氩雾化制取外，还可采用旋转电极雾化、旋转坩埚雾化以及真空雾化等方法生产。粉末冶金高温合金采用雾化制粉，热等静压致密化成材，已成功地用作航空发动机的涡轮盘和叶片等关键零件。

#### 5. 热喷涂（焊）合金粉

热喷涂是一种新兴的表面强化和保护技术，利用火焰或等离子焰喷枪将合金粉末喷涂（焊）于工件表面，以提高表面的耐磨、耐蚀和耐热性。所用粉末主要是所谓“自熔性合金粉末”，它是在钴基、镍基、铁基合金中添加

适量的硼和硅元素构成的，其熔点低、液态流动性好并且在熔融时能自行成渣。最通用的是Ni-Cr-B-Si合金粉末。由雾化制取这种粉末，在国内年产量已达60多吨。美国Metco公司和瑞士Castolin公司是世界上生产使用这种粉末的最为著名的厂家。日本住友和福田公司也大量生产这种粉末。

#### 6. 磁粉

这是一种具有高磁饱和强度、低矫顽力的软磁性合金粉末，例如Fe-Co-Ni, Fe-Cr-Al等，用于磁粉离合器和制动器中作为传递力矩的介质。技术上要求这种粉末化学成份均匀，颗粒形状规则，流动性好，松装密度大，一般采用氩雾化制取。磁粉离合器和制动器已广泛应用于航空、印刷、纺织和机械工业。

### • 学会简讯 •

## 黑龙江省粉末冶金学会成立

1982年10月6日至8日，黑龙江省机械工程学会在哈尔滨市召开了黑龙江省粉末冶金学会成立暨学术交流会，辽宁和吉林省粉末冶金学会派代表参加了这次活动。会议推举十九名代表组成黑龙江省粉末冶金学会的组织机构。宣读和交流了学术论文，对评选出的5篇

优秀论文，向中国机械工程学会粉末冶金学会20周年年会作了推荐。会议还对今后工作进行了规划；预定在1983年召开全省粉末冶金质量座谈会并成立粉末冶金咨询小组；计划在1984年或1985年召开第二届全省粉末冶金年会。

（李育东）

## 第一期《热等静压技术讲座》

### 在石嘴山市举行

由中国金属学会粉末冶金学术委员会和宁夏金属学会联合主办的第一期《热等静压技术讲座》于1982年10月13~19日在宁夏石嘴山市宁夏有色金属冶炼厂举行。参加本次活动的有冶金、航空、航天、机械、核工业等部的30多个单位，80余名代表。本期技术讲座共提出报告17篇，主要由主讲单位宣讲。此外，宁夏有色金属研究所副总工程师聂大钧和钢铁研究总院高级工程师周仲甫在会上介绍了第二次热等静压国际会议概况和热等静压技术的应用、工

艺和设备的发展方向，中国金属学会粉末冶金学术委员会主任委员黄培云教授也在会上宣读了《粉体压制功与r函数的关系》的学术论文，与会代表还参观了905厂从瑞典ASEA引进的QICH80/63冷热等静压机和QIH-16热等静压机的压制操作演示。在召开的座谈会中，代表们对发展我国热等静压技术充分发表了意见，并初步定于1984年在北京或上海举办第二期讲座。

（阎复原）