

# 快速凝固法制取金属粉末技术的发展状况

向青春\* 周彼德

(哈尔滨工业大学材料学院, 哈尔滨 150001)

李荣德

(沈阳工业大学材料学院, 沈阳 110023)

**摘要:** 分别从工艺原理、工艺过程和工艺适用范围等方面对国内外采用快速凝固技术制取金属粉末的方法进行了分析,并着重比较了不同方法间的技术特点和所获得粉末的特性。

**关键词:** 快速凝固;金属粉末;方法;进展

## 1 前言

制取金属粉末的方法大体可以分为物理化学法和机械法两大类,其中机械法主要是机械粉碎法和金属熔体直接雾化法,前者采用机械研磨、旋涡研磨、冷气流粉碎和离心粉碎等技术,后者又分为普通雾化法和快速凝固雾化法两种,其中采用快速凝固工艺从金属熔体直接雾化获得金属粉末的方法,在粉末冶金和材料科学领域已引起人们极大的兴趣。因此,本文着重就快速凝固技术制取金属粉末的工艺方法及其发展状况进行分析。同时对我国快速凝固雾化制粉的状况进行概述。

## 2 双流雾化法

双流雾化法主要是用具有较高速度的流体介质快速撞击熔融金属液流,从而引起液流破碎,形成金属小液滴,在冷却后获得微细金属粉末。双流雾化法是目前工业生产金属粉末的主要方法。

### 2.1 高压水雾化和高压气体雾化法

这两种雾化方法分别利用高压水流和高压气体作为雾化介质来破碎连续的熔融金属细流,其基本原理示意如图1。它们是生产金属粉末的最主要方法。雾化机理包括流体薄层的形成,薄层破碎成金属液流丝线和金属液流丝线收缩形成微液滴三个阶段。高压气体雾化获得直径 $50\sim 100\mu\text{m}$ 的金属粉末,高压水雾化粉末粒径在 $75\sim 200\mu\text{m}$ 之间;气体雾化粉末为光滑圆球形,冷却速度约为 $10^2\sim 10^3\text{ }^\circ\text{C/s}$ ,水雾化粉末常具有不规则形态和表面,冷却速度为 $10^2\sim 10^4\text{ }^\circ\text{C/s}$ 。高压气体雾化和水雾化被广泛用来大吨位生产铝、工具钢、超合金、铜、铁、锡和低合金粉末<sup>[1,2]</sup>。

高压水雾化法用水作雾化介质,价格低廉,淬冷效果好,但所得成品粉末的含氧量高达 $(1000\sim 4000)\times 10^{-6}$ ,而且高压水雾化法能量的有效利用率低。通过采用惰性气体保护,水中加添加剂(如酒精),或用去离子水雾化,粉末产品含氧量可降低至 $50\times 10^{-6}$ <sup>[3]</sup>。

\* 向青春,沈阳工业大学材料学院讲师,现在职攻读哈尔滨工业大学博士研究生,目前从事快速凝固制取金属粉末技术的研究工作。

收稿日期:1999-08-11

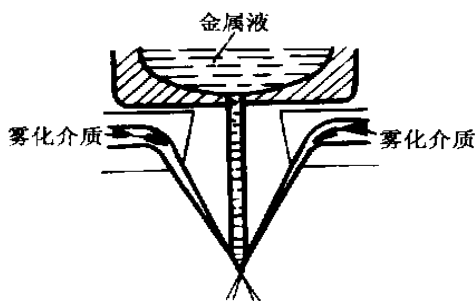


图1 高压水雾化和高压气体雾化基本原理图

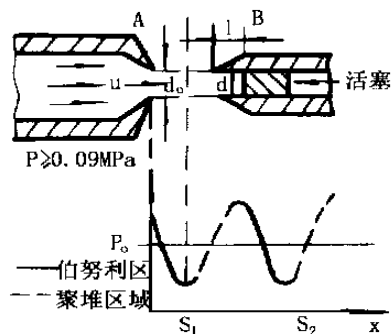
现在还可以用油来代替水制造较纯净的粉末<sup>[4]</sup>。70年代以来,发展最快、最活跃的是高压气体雾化法,它是大批量生产快速凝固粉末最有前途的工艺之一。气体雾化喷嘴在不断改进<sup>[5~7]</sup>,常用紧耦合环缝式对称气体喷嘴,还可用非对称式气体喷嘴,以提高粉末的收得率,现已成功应用于生产镍基超合金粉末<sup>[8]</sup>。

在雾化过程中,能应用实时图象技术(如暗线摄影、全息摄影、高速摄影)、激光散射、激光衍射及激光多普勒技术等对雾化区温度分布、金属粉末粒度及速度分布进行在线测量,从而控制成品粉末的粒度、形状和组织<sup>[9,10]</sup>。对于金属液流在雾化过程中的破碎机理研究现有四种方法:微扰法、似有理法、量纲分析法和能量法<sup>[11,12]</sup>。

## 2.2 超声气体雾化法

超声气体雾化法是高速气流以 80~100kHz 的频率和 2~2.5 马赫的高速度冲击液态金属流,使其雾化成小液滴,随后凝固成粉末。高速气流冲击由多个哈曼振动波管产生,哈曼管同心分布在金属液流的四周。每个哈曼管(见图2)由一个可调节的共振腔组成,当气体通过喷管 A 流出时,气流能引起伯努利(Bernoulli)效应,达到超音速度,并具有超声频率<sup>[13]</sup>。另外,超声驻波雾化法也可以产生超声雾化<sup>[14,15]</sup>。跟普通高压气体雾化和水雾化的三阶段过程相比,超声气体雾化金属液在一个阶段就被多个细小射流冲击

剪碎成金属雾滴,所得粉末粒度比较集中,平均粒度小于 20 $\mu\text{m}$ ,粉末收得率超过 90%,由枝晶臂间距估算冷却速度超过 10<sup>6</sup>℃/s。超声气体雾化能量消耗低,比普通气体雾化节能约 1/4。目前生产铝、纯钴、镍和铁、镍基和钴基合金等已达工业生产规模,而对于钛等高熔点合金仍在进一步实验研究之中。已有报导采用超声速层状气流由 2000℃ 的金属和陶瓷熔液制粉获得成功<sup>[16]</sup>。



A—喷管位置 B—共振腔位置 u—气体射流速度  
l—共振腔深度 d—共振腔直径  $P_0$ —气体平均压力  
P—气体压力  $s_1, s_2$ —超声波波谷  $d_0$ —喷管出口直径

图2 哈曼管示意图

## 2.3 快速旋转杯法

快速旋转杯法也称为旋转杯法,其雾化工艺如图3示。金属液在氩气加压下挤入旋转杯的淬火介质(可以是水溶液、碳氢化合物、低温流体等)中,金属液流被破碎、淬冷,在离心力作用下快速穿过淬火介质到达旋转杯杯壁,最后获得粉末<sup>[17]</sup>。分析表明,增加旋转杯转速,减小金属液喷嘴尺寸,提高金属液的过热度均可以细化粉末粒度;增大气体喷射压力能减小金属液在淬火介质液面上的喷溅,进而提高粉末的收得率<sup>[18]</sup>。金属熔液可以先由气体雾化、离心雾化和冲击雾化,然后再进入旋转杯的淬火介质中,这可以避免坍塌喷嘴的堵塞和腐蚀,还可提高雾化效率<sup>[19]</sup>。采用旋转杯法可生产各种钢、高温合金、铝、铜、镍和其他合金系的金属粉末,粉末呈球形或不规则形状。对于铁基合金,直径

小于  $50\mu\text{m}$  的粉末粒子其冷却速度至少为  $10^6\text{°C/s}$ <sup>[20]</sup>。与其他快速凝固及普通雾化粉末相比,用快速旋转杯法生产的粉末粒度分布狭窄,细粉的收得率高,但快速旋转杯法目前仍处于实验室研究阶段。

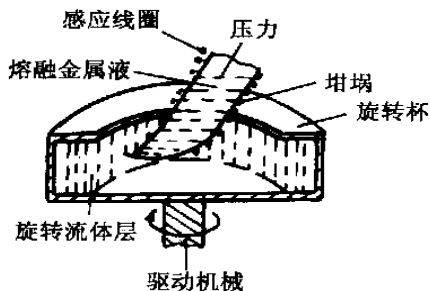


图3 快速旋转杯工艺示意图

### 3 离心雾化法

离心雾化法是把熔融金属液从坩埚或浇包浇注到旋转的圆盘或杯中,或者直接熔化旋转金属棒料的一端,在旋转离心力的作用下金属液被破碎成小液滴,随后凝固成金属粉末。

#### 3.1 旋转电极雾化法

图4为旋转电极雾化装置示意图。消耗电极圆形原料棒沿其长轴方向高速旋转,末端伸入雾化室,被钨电极的电弧熔化。由于旋转,熔融金属液流在切线方向上发散成小液滴。液滴在凝固前有足够的时间球化,从而获得光滑的球形粉末。旋转电极雾化冷却速度相对较低,约为  $10^3\text{°C/s}$ ,粉末的粒度范围为  $50\sim 400\mu\text{m}$ ,平均直径约  $200\mu\text{m}$ <sup>[21,22]</sup>。棒料还可以采用等离子弧、激光或电子束熔化,以减少钨电极的污染。旋转电极法由于熔化不在坩埚内进行,熔液十分清洁,因此常用来生产活性金属的高纯粉末,如钛、铌、钽、钒和其它金属粉末<sup>[23,24]</sup>。在等离子旋转电极法中,将等离子炬配置在稍微偏离电极表面和熔体中心线的位置,偏离量决定于电极材料和电极直径,使金属溶液在旋转电极的光滑表面上运动,这样通过熔体偏离可获得

良好的球形粉末<sup>[25]</sup>。旋转电极雾化法已应用于工业生产,但此工艺的工艺参数不易控制,因此所生产的粉末粒度分布难以符合预定要求。

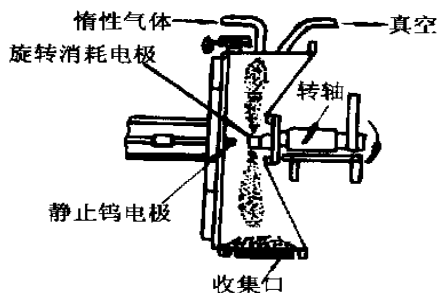


图4 旋转电极雾化装置示意图

#### 3.2 旋转盘雾化法

旋转盘雾化法,其工艺原理如图5示。金属熔液用底注式坩埚浇注到旋转的凹形圆盘雾化器中,圆盘转速达到  $35000\text{r/min}$ ,在离心力作用下,金属熔液沿切线方向喷射出来形成微滴,受到高速氦气流的强制对流冷却,液滴快速凝固成粉末。所得粉末为球形,冷却速度估计达  $10^5\text{°C/s}$ <sup>[26,27]</sup>。与快凝固速度相关的还有两个工艺:离心射铸法(CSC)和电子束旋转圆盘法(EBRD),它们分别通过电弧和电子束熔化自消耗电极<sup>[28,29]</sup>。目前,美国普拉特·惠特尼公司用快凝固速度法制取金属粉末已进入稳定的大工业生产阶段,用来生产铝、镍、钢、镍铝钼合金等多种金属粉末,现已生产了200多种快速凝固高温合金粉末<sup>[30]</sup>。快凝固速度法容易引起的问题有坩埚漏嘴的侵蚀和旋转圆盘的变形,尤其是在生产高温或活性合金粉末时问题更加突出。

#### 3.3 旋转带孔杯法

旋转带孔杯法是把熔融金属液浇注到快速旋转的钢杯中,在钢杯的杯壁上钻有许多小孔,在离心力作用下,金属液从小孔中挤出,在空气中飞行冷却,形成针状粉末颗粒,其尺寸为长  $1000\sim 5000\mu\text{m}$ ,直径  $1000\mu\text{m}$ 。粉

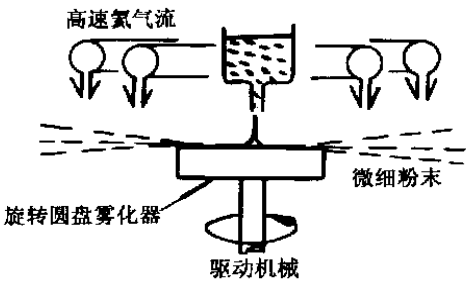


图 5 旋转盘雾化法工艺原理图

末颗粒由于尺寸相对较大,飞行速度低,因此冷却速度较小,约为  $10^{\circ}\text{C}/\text{s}$ 。旋转带孔杯法仅应用于低熔点金属,如铝、铅、锌等<sup>[31,32]</sup>。

3.4 熔液提取法

熔液提取法原理示意于图 6。金属或合金在电加热槽中熔化后,通过提升装置使液面与上部的旋转轮轮缘稳定接触,轮缘上有许多缺口,粘附于轮缘的熔液停留一定时间后被离心力甩出,冷却凝固成条状、丝状或纤维状粉末。所得粉末的纵横比取决于轮缘缺口的距离。粉末的直径约  $10\sim60\mu\text{m}$ ,长  $3\sim6\text{mm}$ ,冷却速度  $10^5\sim10^6^{\circ}\text{C}/\text{s}$ <sup>[33,34]</sup>。熔液提取工艺已达到工业生产规模,可用来生产特定形状的钛、碳钢、不锈钢和高速钢粉末,此工艺不存在喷嘴堵塞的问题,而且也可用于生产活性金属粉末。

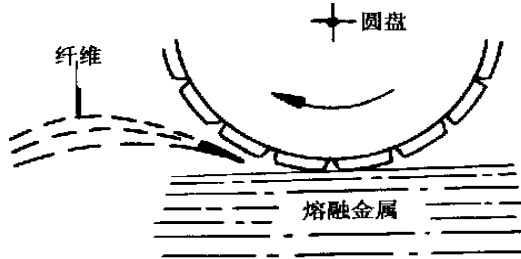


图 6 熔液提取法示意图

4 机械法

机械雾化法是用纯粹机械方法把金属液破碎成小液滴,然后快速凝固成金属粉末。

4.1 双辊雾化法

图 7 为双辊雾化工艺原理示意图。用高频加热使坩埚内的合金熔化,待达到预定温度后通入氩气,在氩气压力下,熔融合金液经喷嘴喷射到高速反向旋转的双辊辊缝中,熔液通过辊缝时形成平板液流,随后雾化成液滴,进入快冷熔池凝固成粉末<sup>[35,36]</sup>。金属液流雾化成液滴被认为是由于形成气穴的缘故<sup>[37]</sup>。为了防止金属液在辊缝中预先发生凝固,必须严格控制辊轮的热扩散条件,一般辊面采用耐热材料或在金属辊面涂一层碳,使辊面的导热系数大大减小。所形成的粉末颗粒的形状可以是片状、针状、不规则形状或球形状,对于  $200\mu\text{m}$  厚的长片状粉末其冷却速度估计达  $10^5\sim10^6^{\circ}\text{C}/\text{s}$ 。双辊雾化工艺可以用来生产 Al、Pb、Sn 等金属粉末,还可以用来生产非晶粉末,如  $\text{Ni}_{75}\text{Si}_{18}\text{B}_{17}$ 、 $\text{Co}_{72.5}\text{Si}_{12.5}\text{B}_{15}$  等<sup>[38,39]</sup>。双辊法现主要用于工业大规模制取非晶态合金薄带,而用于雾化制粉尚处于试验研究阶段。

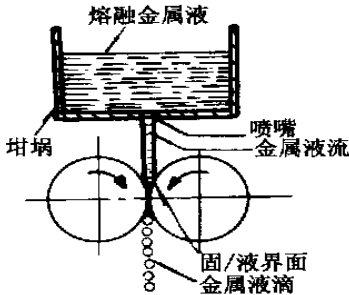


图 7 双辊雾化工艺原理示意图

4.2 振动电极雾化法

振动电极雾化法是在真空或惰性气体保护室中,一端自由的原料棒电极不断向另一固定的水冷电极移动,原料棒的自由端由电弧熔化,熔化的金属液由于电极的振动产生液滴,原料棒电极的振动由一共振器产生。由于液滴飞行速度慢,可以获得球形粉末,但冷却速度很小,估计小于  $10^{\circ}\text{C}/\text{s}$ <sup>[40,21]</sup>。这种雾化方法可以用来生产高纯度或者高活性金

属粉末,但没有得到广泛应用,也不具备进行工业大规模生产的潜力。

### 4.3 Duwez 枪法

Duwez 枪法如图 8 所示。较少的合金料(常小于 500mg)在坩埚中感应熔化,由 2~3MPa 或更高的高压气体作用,振动管中的振动膜片,产生振击波,使熔融金属液破碎雾化。液滴的速度可达几百米/秒,在与静止基体撞击后,冷却成很薄的片状粉末,片状粉末厚度不均匀,在 0.1~10 $\mu\text{m}$  范围内变化。由于较大的冲击速度和小的液滴尺寸, Duwez 枪法工艺可获得很高的冷却速度,达 10<sup>9</sup>°C/s<sup>[41,42]</sup>。此法可应用于许多金属和合金系统,但仅限于实验室研究。

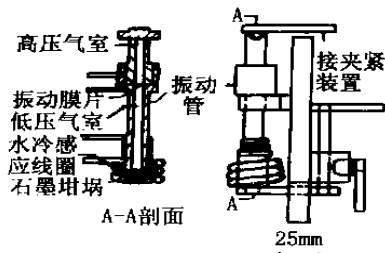


图 8 Duwez 枪法示意图

### 4.4 锤砧法

锤砧法是把金属料放置在砧座的水平面上,用电弧、等离子束或电子束进行熔化后,将重锤直接砸在砧座上,从而获得圆形片状粉末,粉末尺寸为直径 25mm,厚约 5~300 $\mu\text{m}$ 。冷却速度取决于片状粉末的厚度,在 10<sup>4</sup>~10<sup>6</sup>°C/s 的范围内<sup>[43,44]</sup>。与锤砧法原理相似的还有活塞砧座工艺和双活塞工艺,它们分别是在运动的活塞和砧座之间,及两个相向运动的活塞之间挤压金属液滴,从而获得片状粉末<sup>[45]</sup>。锤砧法被广泛用于实验室制取薄片状粉末试样,也适用于各种金属和合金粉末。

## 5 其他雾化方法

### 5.1 电流体动力雾化法

电流体动力雾化法的雾化原理是将几千伏的额定电压施加到发射极毛细管内金属液流的表面上,建立强电场。强电场在熔液表面产生强大的力,足以克服表面张力,使液流发射成小液滴。带电的小液滴加速飞向收集器,若在凝固前撞击到一冷却基体上,就可以获得片状颗粒或形成涂层;若在飞行过程中充分凝固则可获得球形粉末。所得粉末的尺寸可通过调节施加的电场强度、发射极的几何形状和熔液的温度等加以控制,范围为 100nm~100 $\mu\text{m}$ ,当粒度为 0.01 $\mu\text{m}$  时,冷却速度达 10<sup>7</sup>°C/s<sup>[46]</sup>。已用这种方法生产出 Cu、Si、Al、Fe 和 Pb 等金属粉末<sup>[47]</sup>。电流体动力雾化法特别适用于制取粒度和粒度分布必须严格控制的非晶或微晶粉末,主要用于快速凝固技术的基础理论研究。

### 5.2 可溶性气体雾化法

可溶性气体雾化法也称为真空雾化法。其原理是在压力下,将被气体(可以是氮气、氢气、氩气)过饱和的金属熔液,经过输送管送入真空室中,由于气压差作用气体突然从熔液中逸出,膨胀,引起金属液破碎成液滴,随后凝固成高纯、无氧化、洁净的金属粉末。所获得的粉末尺寸分布较为分散,约 20~100 $\mu\text{m}$ 。由于冷却主要是在真空中通过辐射进行,因此冷却速度较低,为 10<sup>1</sup>~10<sup>2</sup>°C/s。用这种方法已成功地生产了镍基、钴基、铜基和铝基合金粉末<sup>[48]</sup>。

### 5.3 电火花刻蚀工艺

图 9 为电火花刻蚀工艺示意图。两块相距很近的电极由要被雾化的金属材料做成,浸在电介质中。对电极施加电压,当电场足够大时,引起阴极发射,不断产生电火花。每次电火花熔化微量的金属,熔化后的金属液立即在电介质中冷却,凝固成球形粉末粒子。电火花刻蚀工艺冷却速度可达 10<sup>5</sup>~10<sup>6</sup>°C/s,用来制取各种细颗粒非晶和微晶粉末<sup>[49,50]</sup>。此工艺工艺参数易控制,细粉的收得率高,但生产率太低,每秒钟仅生产几毫

克。

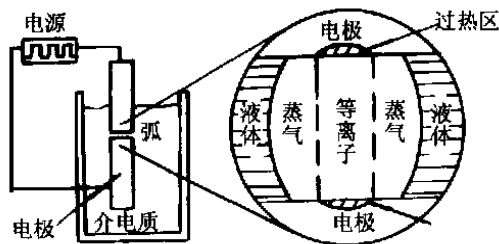


图 9 电火花刻蚀工艺示意图

#### 5.4 等离子雾化法

图 10 为等离子雾化系统示意图,其中最重要的部分是等离子枪。在枪体内由带电弧的离子化气体构成等离子体。气体可以是 Ar 或 N<sub>2</sub>,并混有 He 或 H<sub>2</sub>。由于等离子体的温度非常高,而引起枪体内气体体积急剧膨胀,使等离子气体冲出枪口,进入低压室,液滴速度高达 3 马赫。等离子雾化法可以用来雾化预合金粉末,如 Ni、Al、Mg 等,冷却速度在  $10^3 \sim 10^6$  °C/s 的范围内,还可以用来在一冷却基体上形成亚稳表面层<sup>[51,52]</sup>。

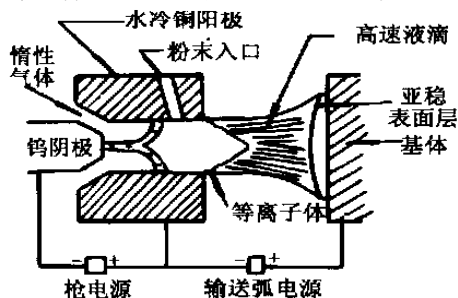


图 10 等离子喷雾系统示意图

此外,蒸发冷凝法、乳化法、滴管法也都可以用来快速凝固制取金属粉末<sup>[30]</sup>,但使用均不广泛。

## 6 国内快速凝固制取金属粉末的发展状况

60 年代末,国内成功地用高压水雾化法制取了镍基高温钎焊合金粉末,70 年代中

期,用水雾化预合金钢粉技术的研究获得成功<sup>[53]</sup>,这些都是敞开式水雾化法。到 80 年代,相继出现正压式和负压式密封型高压水雾化制取低含氧量金属粉末的装置,并正式投入生产使用,能制得含氧量较低的高速钢、不锈钢、喷焊用 Co 基、Ni 基、Fe 基金属粉末<sup>[54]</sup>。近十年来,国内研究重点逐渐转向高压气雾化<sup>[55,56]</sup>,对环缝式和环孔式气体雾化喷嘴进行了设计和研究<sup>[57,58]</sup>,建立了气雾化制铜粉生产线,年生产能力达 800~1000 吨<sup>[59]</sup>。对于水雾化和气雾化粉碎过程机理的研究也一些工作<sup>[60,61]</sup>。

中科院金属所、中南工业大学等单位对超声气体雾化进行了研究<sup>[62]</sup>。国内还开发研制了气体雾化和高速旋转圆盘快凝相结合的快速制粉方法,旋转圆盘用来加快冷却速度,起进一步离心雾化和冷凝作用<sup>[63~65]</sup>。另外,还报导了用旋转叶片急冷装置制取粉末的方法,即通过高速旋转的叶片将液流打击粉碎,凝固成合金粉粒,冷却速度达  $10^4$  °C/s 以上<sup>[66]</sup>。

作者认为,我国快速凝固制粉有以下特点:

(1) 制粉方法发展速度较慢,种类少,所制取的粉末品种也很少,所生产的金属粉末的质量差且不稳定。现有的粉末生产厂家基本上是采用传统的物理化学制粉方法和普通雾化制粉方法。

(2) 多数快速凝固雾化制粉方法还停留在实验室试验研究水平,离真正投入工业生产形成产业还有相当差距。

(3) 近年来,随着喷雾沉积理论的发展,快速凝固雾化理论和金属液滴的凝固理论取得了长足进展,但跟国际水平相比还有大的差距。

## 7 结束语

在本世纪七、八十年代快速凝固雾化制粉工艺发展迅速,各种方法纷纷涌现,其中有

些工艺方法到九十年代得到了较大完善,并投入大规模工业生产,如高压气体雾化方法、快凝固速度法等。而超声气体雾化法、熔液提取法等也达到了工业生产规模。这些快速凝固雾化制粉工艺方法各具特色、各有自己的适用范围。随着粉末冶金工业的发展,这些工艺方法必将获得更为广泛的应用。

我国必须高度重视快速凝固雾化制粉方法的开发、研究,一方面要促进高压气体雾化法、快凝固速度法等能进行工业化生产的快速凝固雾化制粉技术在我国粉末生产领域的普及,另一方面要开发研究新的快速凝固雾化工艺,以使我国在国际快速凝固制粉技术领域能占有一席之地。

### 参考文献

- 1 Dunkley J. J. The Production of Metal Powders by Water Atomization. *Wire Industry*, 1978, 45; 365~371.
- 2 Lawley A. An Overview of Powder Atomization Process and Fundamentals. *Int. J. Powder Met. Powder Technol.*, 1977, 13; 169~188.
- 3 金大康. 80年代末期国外金属粉末的研究与生产动态. *粉末冶金技术*, 1990, 8; 251~253.
- 4 Dunkley J. J. An Assessment of Atomization with Hydrocarbons. *Met. Powd. Rep.*, 1992, 47(2); 20~23.
- 5 Stone I. C. and Tsakiroopoulos P. Cooling Rates in Gas Atomized Al-4wt%Cu Alloy Powders. *Int. J. Rapid Solidification*, 1992, 7; 177~190.
- 6 Shao G., Tsakiroopoulos P. and Miodownik A. P. The Microstructure of Rapidly Solidified Al-8Fe-4Ni-1Mo Alloy Powders. *Int. J. Rapid Solidification*, 1993, 8; 41~64.
- 7 Le T. and Henein H. Effect of Nozzle Geometry and Position on Gas Atomization. *Int. J. Powd. Metall.*, 1996, 32(4); 353~364.
- 8 Miller S. A., Miller R. S., Mourer D. P. et al. High Yield, Nonaxisymmetric Atomization of Nickel Base Superalloys. *Int. J. Powd. Metall.*, 1997, 33(7); 37~50.
- 9 Riddle S. D., Osella S. A., Espina P. I., et al. Intelligent Control of Particle Size Distribution During Gas Atomization. *Int. J. Powd. Metall.*, 1992, 28(2); 133~147.
- 10 蒋光明. 金属雾化过程参数的在线测量技术. *粉末冶金技术*, 1994, 12; 43~49. Hespel J. M., Brunet Y. and Dymant A. Liquid Sheet and Film Atomization; a Comparative Experimental Study. *Exp. Fluids*, 1995, 19; 388~396.
- 12 陈振华. 金属液体的雾化问题. *粉末冶金技术*, 1998, 16; 282~289.
- 13 Grant N. J. Rapid Solidification of Metallic Particulates. *J. Metals*, 1983, 35; 20~27. Bauckhage K., Anderson O. and Schreckenber P. Production of Fine Powders by Ultrasonic Standing Wave Atomization. *Powder Technol.*, 1996, 86(1); 77~86.
- 15 Heister S. D. Effect of Acoustic Perturbations on Liquid Jet Atomization. *J. Propul. Power*, 1997, 13(1); 82~88.
- 16 Gerking L. Powder from Metal and Ceramic Melts by Laminar Gas Streams at Supersonic Speeds. *Powd. Metall. Intern.*, 1993, 25(2); 59~65.
- 17 Masumoto T., Ohnaka I., Inoue A. et al. Production of Pd-Cu-Si Amorphous Wires by Melt Spinning Method Using Rotating Water. *Scripta Met.*, 1981, 15; 293~296.
- 18 Cooper K. P. and Whitman C. I. Melt Atomization; Multiple Regression Analysis. *Int. J. Powd. Metall.*, 1997, 33(7); 51~63.
- 19 Cooper K. P. and Ayers J. D. Evaluation of Atomization by the Rapidly Spinning Cup Process. *Int. J. Powd. Metall.*, 1994, 30(1); 77~89.
- 20 Raman R. V., Patel A. N. and Carbonara R. S. Rapidly Solidified Powder Produced by a New Atomization Process. *Progress in Powder Metallurgy*, 1982, 38; 99~106.
- 21 Savage S. J. and Froes F. H. Production of Rapidly Solidified Metals and Alloys. *J. Metals*, 1984, 36; 20~33.
- 22 Champagne B. and Anyers R. Fabrication of Powders by the Rotating Electrode Process. *Int. J. Powd. Metall. Powd. Tech.*, 1980, 16(4); 359~367.
- 23 Peng T. C., Sastry S. M. L. and O'Neal J. E. Laser Melting/Spin Atomization Method for the Production of Titanium Alloy Powders. *Metall. Trans. A*, 1985, 16A; 1897~1900.
- 24 Steen W. M. Surface Engineering with a Laser. *Metals and Materials*, 1985, 1; 730~736.
- 25 Kumagae R. New Technology for Spherical Powder. *Met. Powd. Rep.*, 1993, 48(3); 28~30.
- 26 Lawley A. Preparation of Metal Powders. *Ann. Rev. Mater. Sci.*, 1978, 8; 49~71.
- 27 Ziani A. and Michot G. Preparation and Characterization of Centrifugally Atomized Al-Cr-Fe Alloy Powders. *Int. J. Rapid Solidification*, 1996, 9; 305~321.
- 28 Kosky P. G. Rapidly Solidified Powders; Their Production, Properties, and Applications. *Lett. Heat Mass Transfer*,

- 1975, 2; 339~345.
- 29 King J. A. US Patents. 4025249 and 4053246. 1977.
- 30 李月珠. 快速凝固技术和材料. 北京: 国防工业出版社, 1993.
- 31 Daugherty T. S. Aluminum Sheet from Finely Divided Particles. *J. Metals*, 1964, 16; 827~830.
- 32 Daugherty T. S. Fabrication of Commercial Sheet from Finely Divided Particles by the Compacted Shot Process. *Prog. Powder Met.*, 1963, 19; 146~151.
- 33 Maringer R. E. and Mobley C. E. Casting of Metallic Filament and Fibers. *J. Vac. Sci. Technology*, 1974, 11; 1067~1071.
- 34 Katuya A., Inoue A. and Amiya K. Production of Ni—Si—B Amorphous Alloy Wires by Melt Extraction and Their Thermal and Mechanical Properties. *Int. J. Rapid Solidification*, 1996, 9; 137~158.
- 35 Durand J. P. A., Pelloux R. M. and Grant N. J. Properties of Splat—Quenched 7075 Aluminum Type Alloys. *Mater. Sci. Eng.*, 1976, 23; 247~256.
- 36 Murty Y. V. and Adler R. P. I. High Speed Casting of Metallic Foils by the Double—Roller Quenching Technique. *J. Mater. Sci.*, 1982, 17; 1945~1954.
- 37 Singer A. R. E., Roche A. D. and Day L. Atomization of Liquid Metals Using Twin Roller Technique. *Powder Met.*, 1980, 23; 81~85.
- 38 Lakshmikumara S. T. Roller Atomization of Molten Metals for the Production of Powder. *Bull. Mater. Sci.*, 1980, 2; 233~237.
- 39 Lawley A. Atomization of Speciality Alloy Powders. *J. Metals*, 1981, 33(1); 13~18.
- 40 Matei G., Bicsak E., Huppmann W. J., et al. Atomization of Metal Powders Using the Vibrating Electrode Techniques, in *Modern Developments in Powder Metallurgy*, edited by Hausner H. H. and Taubenblat P. V., Proceedings of 5th International PM Conference, Chicago, Illinois, 1976, MPIF, New Jersey, 1977; 153~159.
- 41 Duwez P., Willens R. H. and Klement W. Continuous Series of Metastable Solid Solutions in Silver—Copper Alloys. *J. Applied Physics*, 1960, 31; 1136~1137.
- 42 Duwez P. and Willens R. H. Rapid Quenching of Liquid Alloys. *Trans. Met. Soc. AIME*, 1963, 227; 262~265.
- 43 Pietrokowsky P. Novel Mechanical Device for Producing Rapidly Cooled Metals and Alloys of Uniform Thickness. *Rev. Sci. Instrum.*, 1963, 34; 445~446.
- 44 Cahn R. W., Krishnanand K. D., Laridjani M., et al. Novel Splat Quenching Techniques and Methods for Assessing Their Performance. *Mater. Sci. Eng.*, 1976, 23; 83~86.
- 45 Ohring M. and Haldipur A. A Versatile Arc Melting Apparatus for Quenching Molten Metals and Ceramics. *Rev. Sci. Instrum.*, 1971, 42; 530~531.
- 46 Day S. K., Cheng L., Xiang L. Et al. Field Strength Effect on Powder Emisivity and Powder Size in EHD Atomization. *Powd. Metall. Int.*, 1993, 25; 224~225.
- 47 Ayers J. D. and Anderson I. E. Very Fine Metal Powders. *J. Metals*, 1985, 37; 16~21.
- 48 Wentzell J. M. Metal Powder Production by Vacuum Atomization. *J. Vac. Sci. Technology*, 1974, 11; 169~171.
- 49 Yamaguchi T. and Narita K. Magnetothermal Characteristics of Amorphous Fe—Si—B Powder Produced by Spark Erosion. *IEEE Trans. Mag.*, 1977, MAG13; 1621~1623.
- 50 Cogan S. F., Rockwell J. E., Cocks F. H., et al. Preparation of Metallic and Intermetallic Powders by Spark Erosion. *J. Phys. E; Sci. Instrum.*, 1978, 11; 174~176.
- 51 Jackson M. R., Rairden J. R., Smith J. S., et al. Production of Metallurgical Structures by Rapid Solidification Plasma Deposition. *J. Metals*, 1981, 33; 23~27.
- 52 Entezarian M., Allaire F., Tsantrizos P., et al. Plasma Atomization; a New Process for the Production of Fine, Spherical Powders. *JOM*, 1996, 48(6); 53~55.
- 53 袁孟铿等. 水雾化纯铁粉及其性能. 粉末冶金技术, 1989, 7; 27~34.
- 54 袁维焯. 高压水雾化生产低含氧量金属粉末装置及其工艺特征. 粉末冶金技术, 1987, 5; 6~10.
- 55 周玉林, 张春友. 镍基钎料粉末的研制及其应用. 粉末冶金技术, 1987, 5; 210~214.
- 56 李清泉. 气雾化微细金属粉末的生产工艺研究. 粉末冶金技术, 1996, 14; 181~188.
- 57 赛兴鹏, 姜希孝. 60Sn40Pb 等合金气体雾化喷嘴设计参数的探讨与分析. 粉末冶金技术, 1993, 11; 78~79.
- 58 赵麦群, 王迪功. 新型环孔雾化喷嘴. 粉末冶金技术, 1996, 14; 272~275.
- 59 鲍新国. 气雾化制青铜粉生产线的改进. 粉末冶金技术, 1993, 11; 189~192.
- 60 顾小民, 孙松年, 李亚平等. 高速摄影在研究金属雾化制粉中的应用. 粉末冶金技术, 1983, 1(2); 9~14.
- 61 张树格, 赖和怡. 水雾化金属粉末的形状与粒度间的关系. 粉末冶金技术, 1983, 1(6); 1~5.
- 62 陈桂云, 谢赞华, 藏志新等. 快速凝固粉末冶金 Al—Si—Cu—Mg 合金的组织 and 性能. 粉末冶金技术, 1994, 12; 3~7.
- 63 黄培云. 制造微细金属粉末的方法和装置. 中国专利 1051002A, 1991.



64

陈振华, 王云, 周多三等. Al-Fe-V-Si 系快速凝固粉末耐热铝合金的制备和研究. 粉末冶金技术, 1991, 9: 194~199.

66

汤亚力, 沈宁福, 邵国胜等. 快速凝固粉末 Al-Fe-Ce-Ti-(Si)耐热合金. 粉末冶金技术, 1992, 10: 115~118.

65

杨贤金, 李国俊, 姚家鑫等. 离心雾化法制取快速凝固 Al-Si 合金粉末的研究. 粉末冶金技术, 1990, 8: 206~211.

DEVELOPMENTS OF RAPID SOLIDIFICATION TECHNIQUES  
FOR METAL POWDER PRODUCTION

Xiang Qingchun    Zhou Bide

(Harbin Institute of Technology, Harbin 150001)

Li Rongde

(Shenyang Polytechnic University, Shenyang 110023)

**Abstract:** A comprehensive review concerning with rapid solidification techniques and their developments for metal powder production was made in the paper including the technique principles, processes and applications. Technical characteristics of various techniques were compared with emphasis, and some features of powders obtained were compared.

**Key words:** Rapid solidification; Metal powder; Technique; Development

《粉末冶金零件设计与应用必备》  
将于 20 世纪最后一个月出版

这本书是由我国第一部粉末冶金专著——《粉末冶金学普通教程》(1955 年 11 月, 机械工业出版社出版)的译者韩凤麟编著的。

这本专著是以美国金属粉末工业联合会(MPIF)近年来发布的“粉末冶金结构零件材料标准”、“粉末冶金自润滑材料标准”、“粉末锻造钢零件材料标准”、“金属注射成形零件材料标准”, 美国国家标准 6008-A98“粉末冶金齿轮规范”, ISO5755, 1996“烧结金属材料—规范”, ISO3252, 1996《粉末冶金术语》为基础编写的, 是粉末冶金机械零件生产者与使用者案首必备的一本最新、最不可少的参考书。

本书将由中国机械通用零部件工业协会粉末冶金分会以内部资料, 于 2000 年 12 月出版。欢迎需要本书者与本刊编辑部联系邮购。

联系电话: (010)67621317

联系地址: 北京永定门外宋庄路 11 号《粉末冶金技术》编辑部 100078