

# 超声波气雾化法制取金属或合金粉末的原理和技术

刘红琳\*

(泰兴合金粉末厂)

**[摘要]** 描述了超声波气体射流的形成机理及超声波气雾化的原理; 讨论了超声波气雾化过程中雾化气体压力对雾化气体的超声波频率和速度的影响; 简述了设计制造Hartmann冲击波管和超声波气雾化器的技术关键; 综合评价了几种典型的超声波气雾化器的结构、特征及其适用范围。并对该技术的应用作出了展望。

超声波气雾化作为一种大量生产快速冷凝金属和合金粉末的高效技术已引起人们的很大关注。超声波气雾化法(USGA)是在几十年之前由瑞典的Kohlswa公司发明的, 当初只用于低熔点金属和合金的雾化<sup>[1]</sup>。直到美国麻省理工学院的N.J.Grant教授做了大量的发展研究工作, 才利用Hartmann冲击波管产生20—100kHz的脉冲超声氩气或氮气直接冲击金属熔液流。它的冷却速度极高( $10^5^{\circ}\text{C/s}$ ), 颗粒直径很小, 如铝合金粉末颗粒44μm以下的可达50%, 颗粒形状为球形。目前用该法已成功地制备了急冷铝合金、铜合金、不锈钢、高温合金及其它一些特殊的合金<sup>[2]</sup>。

## 二、超声波气雾化原理

### 1. 超声波发生原理

超声波气雾化(USGA)是一种借助Hartmann冲击波管装置使气体速度成为2—2.5 Mach(马赫)、100kHz脉冲的射流<sup>[3]</sup>, 利用高频(100kHz)并具有高振幅(主、次)冲

击波的脉冲气流使熔融金属或合金高效雾化。图1是一种Hartmann发生器示意图。Hartmann发生器气流路径与声传播方向

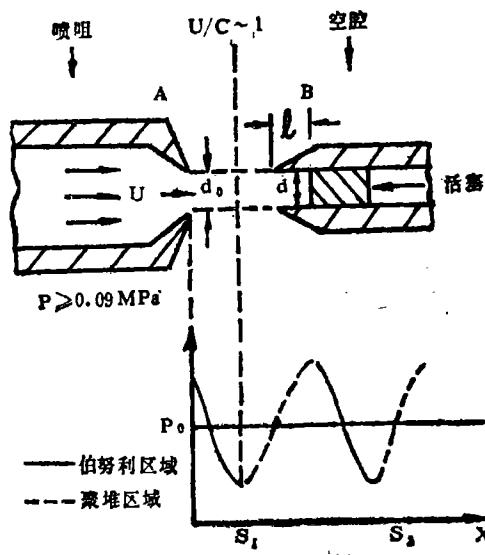


图1 Hartmann发生器示意图

U—气体射流速度; C—雾化气体中的声速;  
l—空腔深度; d—空腔直径;  $d_0$ —喷嘴出口直径;  
A、B—喷嘴与空腔位置; P—气体射流压力;  
 $P_0$ —平均气体压力;  $S_1$ 、 $S_2$ —超声波波谷

\*原在上海材料研究所工作, 现调至泰兴合金粉末厂

示于图 2(4)。

图 1 中, 发生器由一个输气喷嘴和一个可调节的共振腔组成。当气体从喷嘴 A 中以 0.09 MPa 的压力流出时气流引起伯努利 (Bernoulli) 效应, 达到超声流动速度。图 1 给出了自由流中的最终压力分布。点 S<sub>1</sub> 处压力降至最低, 在该点以外处形成不稳定的气体堆聚, 而成为冲击波前沿 (虚线所示)。这一效应自身重复出现在等间距的 S<sub>1</sub>、S<sub>2</sub> 等处。气体堆聚区域是不稳定的, 且能用来形成在 B 点塞有活塞的共振腔内的振荡, 共振腔与喷嘴相对, 且 S 点间的距离很小, 因此共振腔中的气体就会以下式给出的频率脉动 (1):

$$f = C \lambda \frac{C}{4(1+0.3d)} \quad (1)$$

式中 C—雾化气体中的声速;

1、d—共振腔的长度和直径

从图 2 可以看出, 气体中的超声波主要是从输气喷嘴出口处以与出口平面切线呈 5~10° 的角度向外传播。

## 2. 超声波气雾化原理

在常规气雾化中, 气体射流在压力下离开喷嘴腔射向熔融金属流, 并与之发生物理碰撞, 进行动量传递和热交换, 将金属熔液流粉碎成金属熔滴, 随后被冷却凝固成粉末, 见图 3(5)。

在 USGA 过程中, 获得高频、高速脉动的气体射流同时具有线性运动动能和机械振动动能, 在与金属或合金熔流发生碰撞时, 两种能量同时传递给熔融金属或合金流, 使后者获得更大的能量, 从而增加了雾化粉碎能力, 增加了熔滴的弥散度。

方程 (2) 给出机械谐波的能量表达式:

$$W \propto \frac{1}{2} A^2 \omega^2 \sin^2 \omega \left( t - \frac{x}{u} \right) \quad (2)$$

式中 A—振幅;

ω—频率;

t—时间;

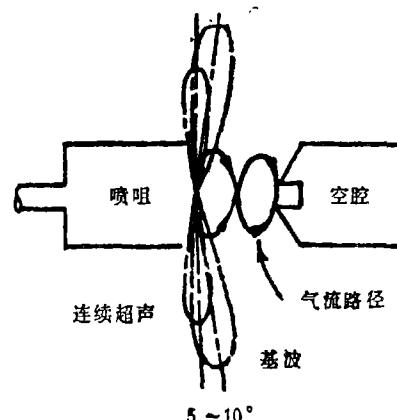


图 2 Hartmann 波管气流路径与声传播图

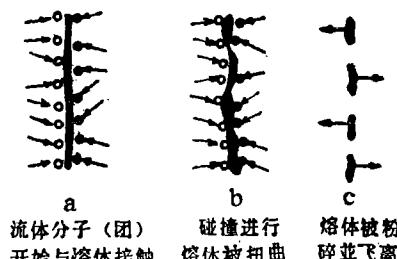


图 3 常规雾化法的粉碎机理

$$\omega(t - \frac{x}{u}) \text{ —— 位相。}$$

从方程 (2) 中可见, 频率增加, 气体射流的振动能量增加, 传递给熔流的相应能量也就增加, 形成的液滴就小。所以频率越高, 液滴越小。

金属液滴凝固成颗粒所需的时间, 根据赖和怡等 (6) 提出的数学模型, 由方程 (3) 描述:

$$t = \frac{L}{2H(U_m - U_b)} d + \frac{L}{8k(U_m - U_b)} d^2 \quad (3)$$

式中 L—金属的单位熔化潜热;

H—液滴与周围介质间的传热系数;

U<sub>m</sub>—熔融温度;

k—金属的导热系数;

d—金属液滴的直径

从方程(3)可见, 液滴的直径越小, 其凝固时间越短, 平均冷却速度  $\bar{V} = \frac{U_m - U_b}{t}$  也就

越大。这就是USGA能够快速冷凝金属或合金熔滴的原理。

### 三、超声波气雾化技术

#### 1. 雾化气体压力对超声波频率和速度的影响

在USGA技术中, 雾化气体的工作压力是一项很重要的工艺参数, 对给定的USGA喷嘴结构, 它直接影响气体射流的超声频率和速度。图4和图5<sup>[7]</sup>分别给出雾化气体压力与超声频率和速度之间的关系。从图4和图5可以看出, 随压力增加, 速度和频率也增加。正如前述, 速度和频率增加, 气体

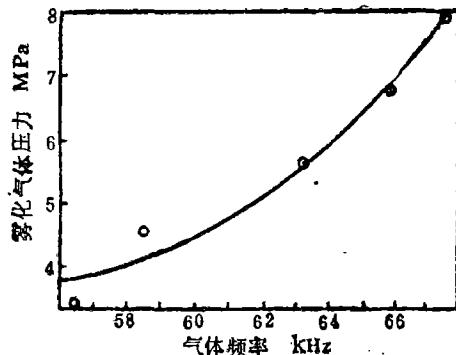


图4 雾化气体压力与USGA气射流频率计算值之间的关系

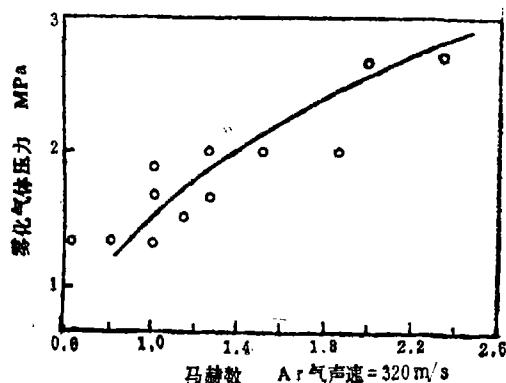


图5 雾化气体压力与USGA气体射流出口速度计算值之间的关系

射流的雾化能力增加, 粉末的平均粒度也就减小, (图6<sup>[7]</sup>)。

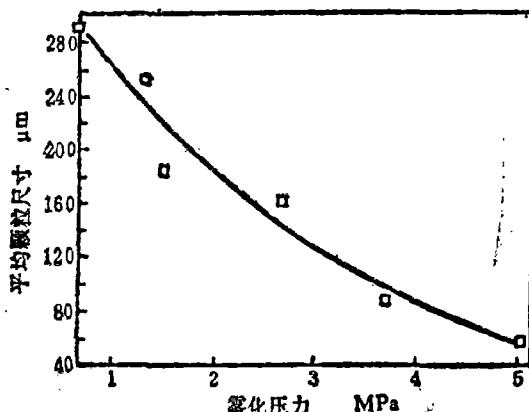


图6 雾化USGA铝合金粉末时雾化压力与平均颗粒尺寸的关系

#### 2. Hartmann冲击波管的设计与制造

从方程(1)中可以清楚地发现, 共振腔尺寸的任一变动都会导致雾化气体射流的频率变化, J. Hartmann<sup>[4]</sup>指出,  $d = d_0 = 1$  (见图1)代表了最高效率的情况。声的强度在稳定间隔前达到最大值(在前约为间隔长度60%的地方)。共振腔直径对喷嘴直径的比很重要, 在比例为1.27时获得最大强度。较大的比例数值并不能激使空腔共振<sup>[8]</sup>。

图7<sup>[9]</sup>示出以空气为媒质的Hartmann波管共振腔深度同频率之间的关系。可见声

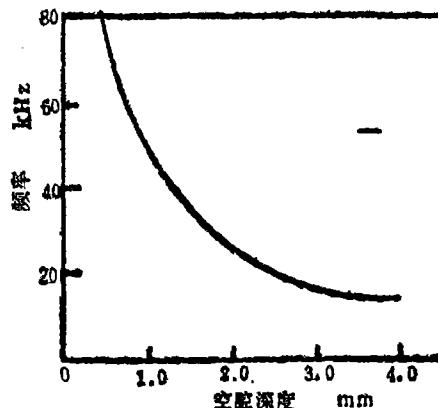


图7 Hartmann波管腔深度与频率之间的关系 (空腔直径1.57mm)

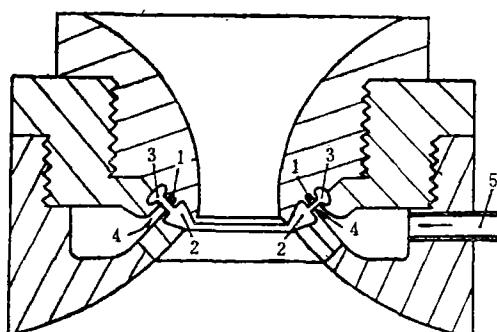
频率随腔深从0.5mm开始的30kHz迅速降到2.5mm处的20kHz。

在制造Hartmann波管时，腔唇的形状极为重要，不应完全削尖，太尖的边缘会产生巨大的无规则噪声，类似风琴管里产生的泛音。一个在0.013mm到0.04mm之间的方形边缘，足以把无规则噪音减到最小，但角必须尖锐。喷嘴和空腔都用硬化钢制造，因为高速气流里的微尘和湿气会引起强烈的

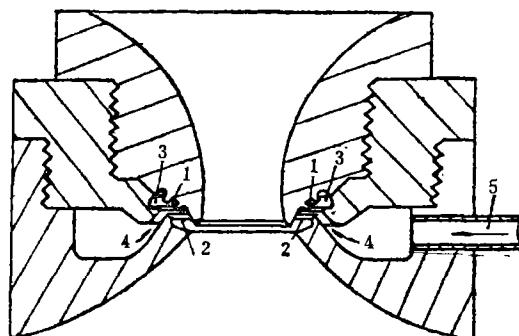
磨蚀。一个实用的喷嘴，其直径对空腔直径的比是1:1.25，在此情况下要产生频率范围为14—60kHz的超声波是不困难的。

### 3. USGA喷嘴

为了能有效地产生超声波气流并有效地把射流能量传递给熔融金属或合金液流，发展了多种类型的USGA喷嘴并得到了应用。图8—11<sup>[10—12]</sup>是其中的代表。



a. 环孔式



b. 环缝式

图8 两种形式的冲击超声雾化器

1.共振腔；2.发射腔；3.反射腔；4.喷射腔；5.气体进腔管路。图中箭头表示气体流动方向

图8a所示的超声波雾化器是一种由多个Hartmann冲击波管组合而成的喷嘴。雾化气体由管路5进入腔4后喷向腔1形成了主次冲击波，并由腔3反射传向熔流。腔4的特征尺寸大于腔1的特征尺寸。当气体压力为2.0—4.0MPa时，可获得20kHz的冲击波。这种喷咀在熔流周围形成了断续的锥形射流，亦即环孔式喷嘴。

图8b是另一种类似图8a所示结构的环缝式冲击超声雾化喷嘴，在熔流周围形成了连续的锥形射流。雾化机理与图8a所示的相同。

在图9中，气体由2进入1，通过3再进入5到雾化带。4在外力驱动下作旋转运动，从而在5、3之间形成气流脉冲，获得超声波，腔5的特征尺寸小于3的。这个装置能获得40kHz到100kHz的冲击波。当气压为3MPa时，冲击波管的频率达到80kHz。

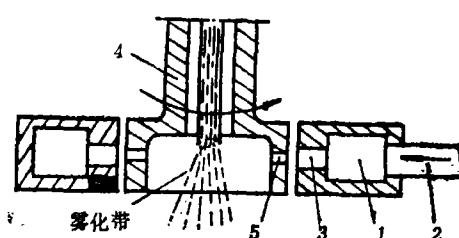


图9 超声波雾化器

1.喷射前缓冲腔；2.气体进腔管路；3.喷射腔；4.共振腔旋转体；5.共振腔。图中箭头表示气体流动方向

在锌和铅的熔体雾化中获得了应用。

图10所示又是另一种形式的喷嘴。气体经过文丘里(Venturi)收敛散形的喉腔后获得了超声速。这种喷嘴能平稳地加速气体，气体在到达喉部时，达到假设1 Mach的速度后，再沿着逐渐扩展的孔加速到5 Mach的速度；离开喷嘴出口，气体速度降低，但仍保持一个长达76mm或更长的超

声前沿，因此在气体射流中有足够长度的超声层芯，这就克服了气体射流离开喷嘴进入大气后速度衰减过快的缺点。敛—散式喷嘴在出口处的气体射流速度可达到1.7—3.4 Mach。

这种喷嘴的两个最重要的结构尺寸是喉部直径和锥形部份的长度。基面应尽可能光滑，在横断面方向上不应有凹凸突变。适宜的喷嘴设计和尺寸见图10及表1。

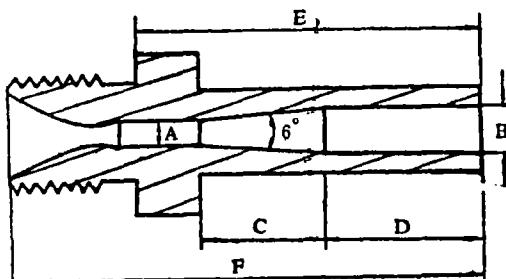


图10 收敛—扩散型超声波雾化喷嘴

表1 (图10结构) 喷嘴型号及其尺寸(mm)

喷嘴型号	A	AA	B	BB	C	CC
A(喉径)	3.96	3.96	3.58	3.58	3.58	3.58
B(出口径)	5.38	5.38	5.21	5.21	5.76	5.76
C(锥长)	13.54	13.54	15.52	15.52	20.85	20.85
D(出口长)	18.21	30.91	16.23	28.93	10.90	23.60
E(外长)	38.1	50.8	38.1	50.8	38.1	50.8
F(总长)	50.8	63.5	50.8	63.5	50.8	63.5

这种喷嘴适用于各种雾化气体介质，甚至是水。可用于各种金属或合金熔体的超声雾化，尤其可用于雾化诸如IN-738和IN792，René合金41和95，合金718、Waspaloy、

Astroloy，Mar-M合金200和246，合金713、500和700等超合金。

图11是图10改进后的结构，它克服了超声波发生器伸出雾化分散区以外过远的缺点。将气流分成两部份的弹性中间喷嘴1的端面是超声波发生器。当来自弹性中间喷嘴两侧的气流在端面上形成环流时，出现了真空区3，真空区形成后又被破坏，从而产生轴向高频脉冲。端面一超声波发生器安置在预雾化区2和终雾化区4前。

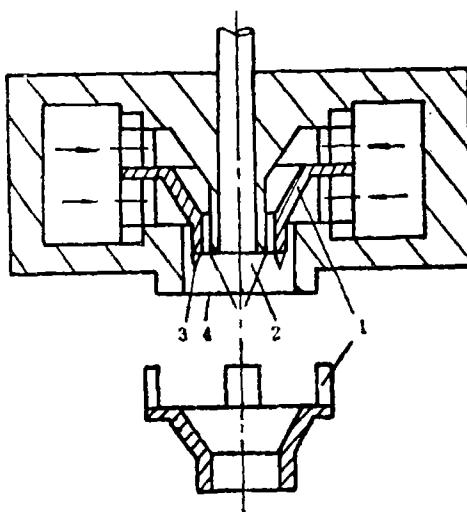


图11 经改进的超声波雾化器

1—喷嘴；2—预雾化区；3—真空区；  
4—终雾化区

#### 四、超声波气雾化技术展望

USGA技术能够使得颗粒的冷却速度增加，其冷却速度可达 $10^5$ — $10^6$ °C/s，因此在快速凝固技术中得到了广泛应用。这样的冷却速度对组织结构的控制(尤其是对高合金材料)很重要。有人论述过<sup>[13—18]</sup>，应用USGA技术对成份偏析、晶粒尺寸、合金

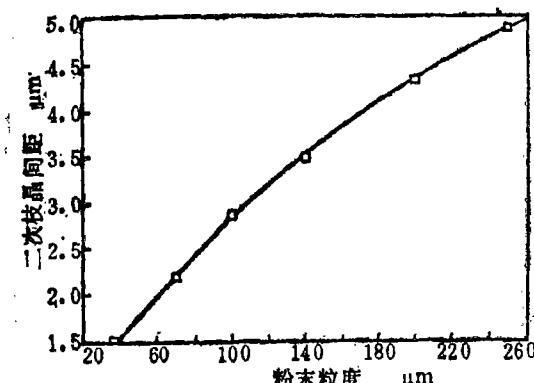


图12 Al合金粉末粒度与二次枝晶间距的关系

元素过饱和度、组成相及其尺寸、形貌和分布各方面的改善有很大的好处。图12给出了USGA铝合金粉末粒度与二次枝晶间距的关系曲线[6]。显然，粉末粒度越小，枝晶间距越小。用快速凝固金属或合金粉末，借助其它先进的粉末冶金技术，可以制成许多性能优异的工程结构材料。快速凝固金属或合金磁粉的磁性能尤为理想，为功能材料的发展及应用提供了良好前景。发展USGA技术，将使新型的非晶或微晶材料得以迅速发展。

#### 参考文献

- [1] G. Ray, Metal Powder Report, 41(4), 255, 1986.
- [2] 张永昌, 自然杂志, No. 6, 406, 1985
- [3] Steven J. Savage, J. of Metals, 36(4), 32, 1984
- [4] 克洛福德著, 杜连耀译, 超声工程, 科学出版社, 104, 1959。
- [5] 刘红琳, 雾化原理及技术, 上海材料研究所青年科协第一届学术交流会论文集(待出版)。
- [6] 赖和怡, 张树格, 粉末冶金, 冶金部钢铁研究总院编辑出版, No. 1, 1—7, 1985
- [7] G. Rai, Proceeding of 85' Annual Powder Metallurgy Meeting (AMPI, MPIF), Vol. 41, 55—65, 1985
- [8] 同[4], 105
- [9] 同[4], 106
- [10] U.S. Patent 2 997245
- [11] U.S. Patent 4 272463
- [12] 高一平, 第四届全国金属粉末学术会议论文集, p211, 1985
- [13] N. J. Grant, J. of Metals, Vol. 35, Jan., 20, 1983
- [14] P. K. Domalavage, et al., Met. Trans. A, Vol. 14A, 1599—1606, 1983
- [15] R. Ray, et al., J. of Metals, Vol. 35, Jun., 30—36, 1983
- [16] F. H. Froes, J. of Metals, Vol. 36, Jan, 14—27, 1984
- [17] D. H. Ro, et al., J. of Metals, Vol. 35, Jan. 34—39, 1983
- [18] S. L. SaVage, et al, Proceedings of Fourth International conference on Rapidly Quenched Metals, T. Masumoto et al, eds., Japan Institute of Metals sendai, Vol. 1, 159—163, 1982

#### MECHANISM AND TECHNOLOGY OF PRODUCING METAL OR ALLOY POWDER BY ULTRASONIC GAS ATOMIZATION(USGA)

Liu Honglin

(Taixing Alloy Powder Factory)

**ABSTRACT** The present paper has described the mechanism of the generation of ultrasonic gas jet and the principles of ultrasonic gas atomization(USGA) discussed the influences of gas pressure on the ultrasonic frequency and velocity of atomizing gas during USGA briefly outlined the technical key points to the design and manufacture Hartmann shock tube and USGA nozzle compared the structure, characteristics and application range between several typical ultrasonic gas atomizers and given prospects for the applications of this techniques.