

## 超音速气雾化喷嘴的水流模拟实验研究

祁航<sup>1</sup>, 周香林<sup>1\*</sup>, 徐良辉<sup>1</sup>, 胡云飞<sup>1</sup>, 温薇<sup>2</sup>, 李景昊<sup>3</sup>, 杜开平<sup>4</sup>, 马尧<sup>4</sup>, 于月光<sup>4</sup>

- (1. 北京科技大学 新金属材料国家重点实验室, 北京 100083;
2. 北京科技大学 机械工程学院, 北京 100083;
3. 加拿大麦吉尔大学 机械工程系, 蒙特利尔 QCH2A0C3;
4. 矿冶科技集团有限公司, 北京 100160)

**摘要:** 本文设计了一种超音速气雾化喷嘴, 采用水代替金属熔体进行雾化模拟实验, 使用高速摄影机拍摄所获得的雾化流场并进行分析。结果表明, 水的雾化破碎过程遵循二次破碎理论, 水流先产生扰动, 发展为波状并破碎成条带, 最后发生二次破碎形成细小的液滴。在流场的形状、结构上, 水的雾化与使用 Fluent 软件模拟的结果一致, 不同参数下的实验结果也与计算机模拟的结果相似, 验证了计算机模拟结果的可靠性, 计算机模拟的结果在一定程度上可以作为工业设计的参考。

**关键词:** 超音速气雾化; Fluent; 高速摄影

中图分类号: TG174.4 文献标识码: A 文章编号: 1674-7127(2020)09-0006-06

DOI 10.3969/j.issn.1674-7127.2020.03.006

## Study on Water Flow Simulation Experimental with Supersonic Gas Atomizing Nozzle

Hang Qi<sup>1</sup>, Xianglin Zhou<sup>1\*</sup>, Lianghai Xu<sup>1</sup>, Yunfei Hu<sup>1</sup>,  
Wei Wen<sup>2</sup>, Jinghao Li<sup>3</sup>, Kaiping Du<sup>4</sup>, Yao Ma<sup>4</sup>, Yueguang Yu<sup>4</sup>

- (1.State Key Laboratory for Advanced Metals and Materials, University of Science and Technology Beijing, Beijing 100083;
- 2.School of Mechanical Engineering, University of Science and Technology Beijing, Beijing 100083;
- 3.Department of Mechanical Engineering, McGill University, Montreal, QCH2A0C3;
- 4.BGRIMM Technology Group, Beijing 100160)

**Abstract:** In this paper, a supersonic gas atomizing nozzle is designed. Water is used instead of a metal melt to perform an atomization simulation experiment. A high-speed camera is used to capture the atomized flow field and analyze the images. The results show that the atomization and crushing process of water follows the secondary crushing theory. The water flow first generates disturbances, develops into waves and breaks into ligaments, and finally forms tiny droplets when secondary crushing occurs. In the shape and structure of the flow field, the atomization of water is consistent with the simulation results using Fluent; the experimental results under different parameters are similar to the results of computer simulation. The reliability of the computer simulation results is verified. To some extent, the computer simulation results can be used as a reference for industrial design.

**Keywords:** Supersonic gas atomization; Fluent; High-speed photography

第一作者: 祁航 (1996-), 男, 硕士研究生, E-mail: zmdqh123@126.com.

通讯作者: 周香林 (1965-), 男, 教授, E-mail: bkdxl@ustb.edu.cn.

基金项目: 国家重点研发计划 (2017YFB0306100) 和国家自然科学基金项目 (51271034).

## 0 引言

随着金属注射成型、金属 3D 打印、粉末冶金等增材制造技术的发展和應用，高质量粉末的需求量越来越大。用气雾化方法制备金属粉末是目前使用最广泛的手段之一，采用气雾化法制备的金属粉末具有球形度好、粒径较小、粒径分布较集中、方便控制等优点。气雾化制粉的基本原理是：熔融的金属液通过导管落下后受到高速气流的冲击作用，熔体表面出现扰动，继而发展为波状并破碎，形成条带，随后条带再次受到气体的作用，发生二次破碎形成细小的液滴，由于表面张力，液滴保持球形，凝固形成粉末。气雾化法首次使用至今已有 90 余年<sup>[1]</sup>，但人们对于雾化过程中的破碎机理尚不十分明确，其主要原因是气雾化过程的流场速度快、温度高、气相与液相相互耦合，且缺乏有效的观测手段，导致研究起来相对复杂、困难。目前多常采用计算机模拟的方法研究气雾化过程中与流场相关的问题。计算机可以模拟计算出流场中的速度场、温度场、粒度分布等信息，对流场分析和工艺参数优化具有指导意义。近年来，一些光学测量手段的发展、应用，为气雾化过程中流场的测量提供了可能。高速摄影、粒子成像技术、相位多普勒粒子分析仪 (PDPA) 等手段可以测量高速状态下的流场数据，使得直接测量气雾化过程中的流场得以实现。顾小民等<sup>[2]</sup>较早采用高速摄影的方法拍摄了气雾化和水雾化的过程，分析了雾化过程中的不同阶段。康灿等<sup>[3]</sup>使用 PDPA 方法研究了一种扇形水射流的流场，其流场具有与雾化流场相似的多相耦合、速度快等特点。王伟东等<sup>[4]</sup>曾使用一套 PIV 测量系统研究了一个超声速自由射流的流场，得到了详细的流场速度场数据。刘静等<sup>[5]</sup>用纹影法研究了一个在超声速气流中的横向射流雾化流场，并对流场进行了定性分析。这些方法对于雾化流场的研究能起到很大的帮助作用。A.M.Mullis<sup>[6]</sup>曾利用高速摄影的手段研究了喷嘴的几何形状对金属熔体的影响，找到了一种较好的喷嘴形状。Stevano Wahono<sup>[7]</sup>等曾利用高速摄影的方法研究了一种特殊结构的雾化喷嘴的雾化过程，分析了液流的振动情况及其影响因素。近年

来的研究常用 ANSYS Fluent 流体动力学软件对雾化喷嘴的流场结构进行计算模拟，通过求解控制方程和湍流模型来获得雾化流场的结构等信息。Aydin 和 Unal 等人<sup>[8]</sup>利用计算机模拟研究了气雾化压力和喷嘴几何形状对气体出口速度的影响，发现气体速度与压力之间并非正比例关系，相同压力差下气体速度的增幅并不相同。在 2.7 MPa 的气体压力下，气体速度最大值为 663 m/s，气压 1.0 MPa 得到气体速度最小值为 631 m/s。合理的几何形状可以在相同的气体质量流量比下得到最大的气体速度，从而提高雾化效率。由此，Fluent 软件经常用来指导新型雾化喷嘴的结构设计，以节约成本，缩短研发周期。目前国内外的研究较多只注重计算机模拟或实验，而未把两者有效地结合。故本文在以获得一些计算机模拟结果的前提下，用常温液体代替高温金属熔体，在常温条件下模拟实际气雾化过程，并采用一些流场测量技术研究气雾化过程中的流场情况，比如破碎过程、液滴分布等。这样可以比较直观地观测气雾化过程中的流场且可以对计算机模拟的结果加以验证。

## 1 研究方法

### 1.1 计算机模拟方法

使用 Fluent 软件，载入雾化喷嘴的模型并划分网格，设置能量方程、金属溶体的各项参数、雾化气体的相关参数、雾化气氛、边界条件和计算步长等参数后，进行计算。计算结果可以显示雾化过程中的速度场和温度场等。

### 1.2 实验方法

本文设计了一种结构简单的雾化喷嘴，喷嘴轮廓采用典型的拉瓦尔曲线，可以在气体压力较低的情况下获得超音速气流。通过计算模拟<sup>[9]</sup>，调节至最佳的结构参数，采用有机玻璃作为主体材料，考虑到经济性和加工方便，采用环缝型的拉瓦尔喷嘴，喷嘴的结构如图 1 所示。采用水代替金属熔体，氮气作为雾化气体，在常温条件下模拟真实情况下的气雾化过程。通过 Fluent 软件的计算模拟，可以得到最佳结构参数下，雾化过程中流场、温度场等的分布情况，如图 2 所示。通过模拟实验的方法，可以验证模拟结果的合理性。

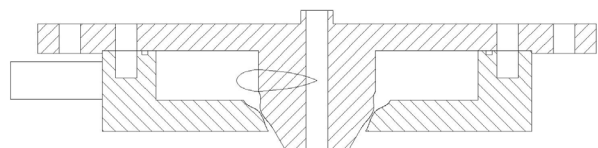


图 1 雾化器剖面图

Fig. 1 Plane drawing of atomizer

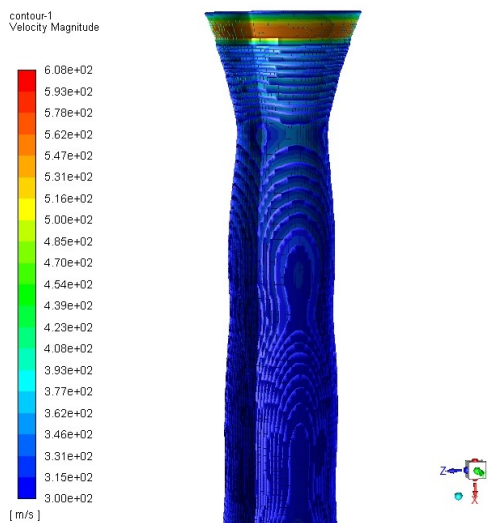


图 2 Fluent 计算模拟的雾化流场结果 (速度场)

Fig. 2 The simulated atomized flow field results with Fluent (velocity field)

### 1.3 实验设置

由于实际雾化过程是一个多相耦合，变化速度极快的过程，常规的方法难以测量和评价。目前常用的手段包括高速摄影、PIV 方法、PDPA 以及纹影法等。本文采用其中较为常见的高速摄影对实际雾化过程进行拍摄，通过雾化过程的图片对雾化过程进行的分析。本实验使用的高速摄影设备是 Photron FASTCAM Mini AX 系列高速摄影机。

在实际生产过程中，雾化喷嘴结构确定之后，可控制的变量一般包括金属熔体的过热度、雾化气体压力和温度、雾化气体的种类等参数。在本文中，出于简化和贴近实际生产的原则，将液体流量和温度固定，流量采用 60L/h，温度采用 20，气体压力通过减压阀控制，根据计算机模拟的结果，如图 3 所示，在其他条件不变的情况

下，仅改变雾化压力的大小，在 1.7MPa、2.2MPa 和 2.7MPa 三个不同的压力下制得的粉末平均粒径更小且粒径分布较窄；故设置实验压力为 1.7MPa、2.2MPa 和 2.7MPa。同时，在压力为 2.2MPa 时，添加一组液体流量为 120L/h 的实验，对比分析液体流量对雾化过程的影响。

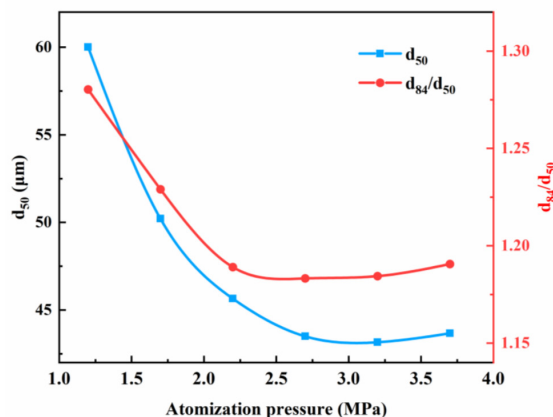


图 3 不同雾化压力下粉末的粒径分布和标准差分布

Fig. 3 Particle size distribution and standard deviation distribution of powders under different atomizing pressures

## 2 研究结果及讨论

### 2.1 可行性分析

Lubanska<sup>[10]</sup> 研究了一种低熔点铁合金的雾化工艺参数与粉末粒度之间的关系后总结出一个经验公式：

$$d_m = k_d d_0 \left[ \frac{\mu_m \sigma_m}{\mu_g V_{gi}^2 \rho_m} \left( 1 + \frac{J_m}{J_g} \right) \right]^{1/2} \quad (3)$$

其中， $d_m$  为粉末平均粒度， $k_d$  为常数，一般为 40-50， $d_0$  为导流管直径， $J_m$  为液态金属流量， $J_g$  为气体流量， $\mu_m$  和  $\mu_g$  分别为液态金属和气体的动力黏性系数， $V_{gi}$  为雾化气流场的初始流速， $\sigma_m$  为液态金属表面张力， $\rho_m$  和  $\rho_g$  分别为液态金属的流体密度和气体的密度。

由公式可以看出，在雾化器结构和工艺参数确定地情况下，粉末的粒度只与金属熔体的动力黏性系数  $\mu_m$ 、金属熔体的表面张力  $\sigma_m$  以及金属熔体的密度  $\rho_m$  有关。

由于金属熔体和常温下水的性质比较接近,采用水在常温下模拟雾化过程中的流场,能在一定程度上反应真实流场的情况。在之前的一些研究中,也有用水代替金属熔体的模拟实验。I. N. McCarthy<sup>[11]</sup>在研究中添加了一组用水代替金属熔体的实验,作为普通实验的对照和补充,在两组实验中观察到了相同的流体不规则脉动,两者可能具有相同的破碎机理。

## 2.2 误差分析

本文以一种激光熔覆涂层用 FeNiCrSiMoMnC 合金为对象,采用水代替该种金属熔体后进行模拟实验势必会产生一定的误差。与实际生产过程相比,计算机模拟和实验模拟都有一定的差别。在计算机模拟中,主要过程为:(1)建立物理模型,划分网格;(2)选择合适的湍流模型,设置边界条件;(3)选择合适的求解器,计算结果并分析。误差主要出现在湍流模型和计算求解的过程中,通过设置合理的模型和步长,可以提高计算的精度,使结果更贴近实际。

模拟实验是在计算机模拟结果的基础上,模仿实际生产过程设计的,由于实验条件的限制,模拟实验与设计生产过程有以下几点差别:

(1)使用水代替金属熔体,根据雾化破碎相关理论,水的液滴粒径将小于金属熔体的液滴,且水的液滴在雾化流场中的飞行中,其加速度也与金属熔体的液滴不同,但两者的破碎机理是相似的。

(2)实际生产中,雾化过程是在一个限制体积,且雾化区域的气氛与雾化气体相同的环境中。模拟实验是在开放的环境下,且雾化区域的气氛是空气。这可能会导致气流场的速度和方向产生一定的差别。

(3)实际生产中的金属熔体是块体材料熔炼后,从坩埚中自由落下,由于坩埚中液体液面高度降低,液体流量并不是定值,本实验采用其平均流量并加以控制,模拟雾化过程中比较稳定的阶段。

(4)由于雾化过程在一封闭环境中,雾化后的气体通过容器底部反弹,会对雾化流场产生影响。喷嘴与底面距离不同,其影响不同。但本实验主

要关注距离喷嘴较近距离内的雾化情况,故将此差别忽略不计。

## 2.3 高速摄影结果

高速摄影拍摄的结果可保存为视频文件,利用 Adobe Premiere Pro 软件,可将视频中每一帧图像提取出来,选择其中典型的雾化图像可以对雾化过程进行分析。以气体压力为 1.7MPa,液体流量为 60L/h 为例,提取出一系列图片,如图 4 所示。

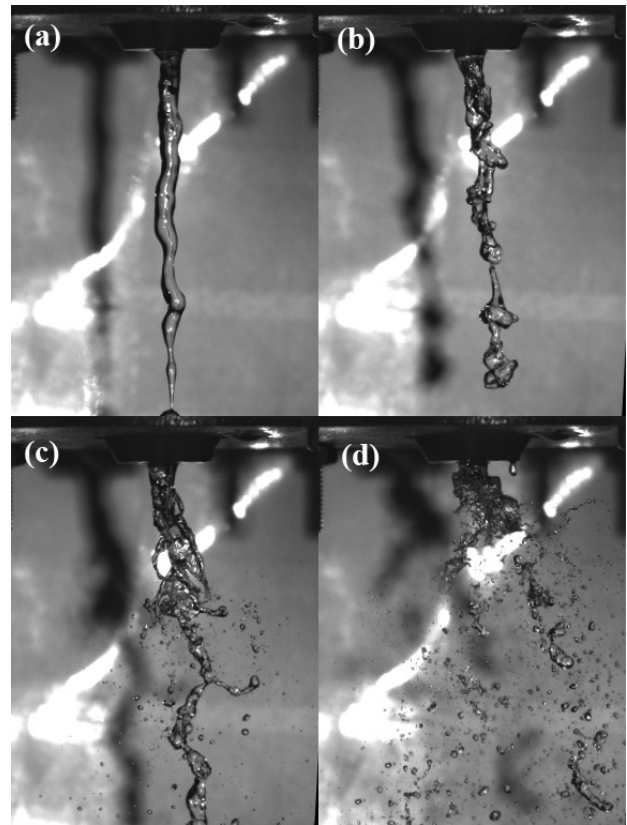


图 4 1.7MPa 雾化图像:(a)  $t=0\text{ms}$ ; (b)  $t=273\text{ms}$ ;  
(c)  $t=373\text{ms}$ ; (d)  $t=473\text{ms}$

Fig. 4 Atomization image at 1.7MPa: (a)  $t=0\text{ms}$ ;  
(b)  $t=273\text{ms}$ ; (c)  $t=373\text{ms}$ ; (d)  $t=473\text{ms}$

图 4 为雾化过程的几个阶段,(a)中为气体接通之前,液体自由落下;(b)为气体刚刚接通,气流还未达到稳定的状态,此时液体表面已经由于气体的作用产生扰动,部分液流已经出现断裂的现象;(c)中的液流已经形成明显的条带,部分条带发生二次破碎,产生更为细小的液滴;(d)中条带基本完全破碎,细小液滴在此阶段后会在气流

的影响下继续加速、破碎、碰撞，产生稳定的锥形雾化流场。

在雾化气体压力达到预定值并稳定后，形成的雾化流场也会变得稳定，液体破碎的机理和程

度都不随时间改变。如图 5 所示，为不同雾化气体压力下，雾化流场稳定后的图像。图 5 中的 (a)、(b)、(c) 分别为雾化气体压力为 1.7MPa、2.2MPa、2.7MPa 时的雾化流场图像。

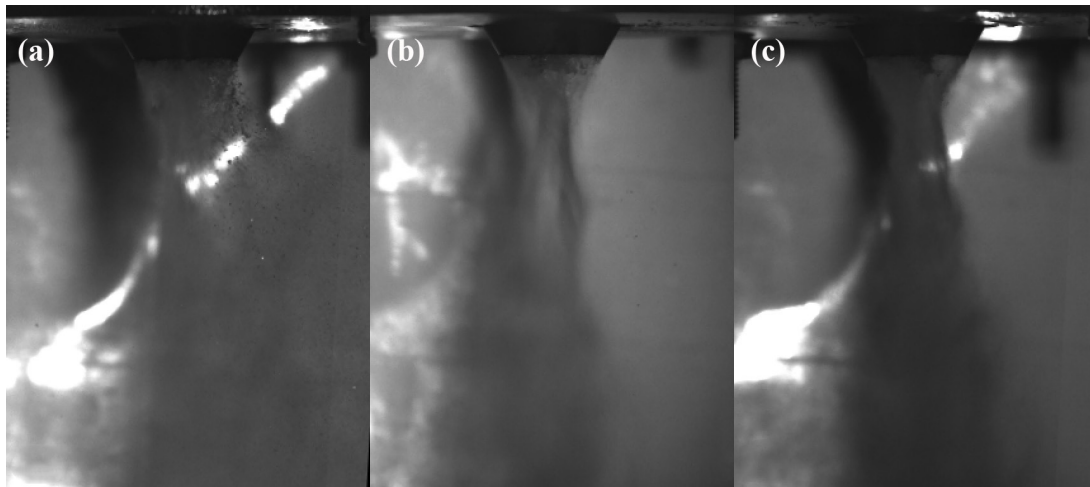


图 5 不同压力时的雾化流场图像：(a) P=1.7MPa; (b) P=2.2MPa; (c) P=2.7MPa

Fig. 5 Images of atomization flow field at different pressures: (a) P=1.7MPa; (b) P=2.2MPa; (c) P=2.7MPa

通过分析不同雾化气体压力下流场图像，稳定的雾化流场大致为两个锥形相接的形状；在导液管出口下方都存在一块收束区域，收束区之下，流场继续扩大变得分散；在最接近导液管出口处，液滴存在的区域直径大于导液管的直径；随着雾化气体压力增大，流场的膨胀程度减小，压力增大到一定程度后，膨胀程度几乎不变。

对比计算机模拟结果，可以很好得解释上述现象的产生。图 6 是计算机模拟的流场回流区速度矢量图。在导液管出口附近存在一个锥形的回流区，其中气体的速度方向与整体的气体速度方向相反，且速度最大处高达 250m/s，在实际生产中可能产生负压，导致反冒现象。由于回流区的存在，部分液滴也会在回流区运动，使液滴存在的区域直径大于导液管的直径。在回流区尖端存在一个滞点，该点雾化气体的速度为零。降低回流区的气体压力将有利于生产过程中液体顺利流下。经过滞点后，高速气流相互碰撞、反弹，流场逐渐扩大，又形成与回流区相反的锥形结构，与模拟实验的结果一致。

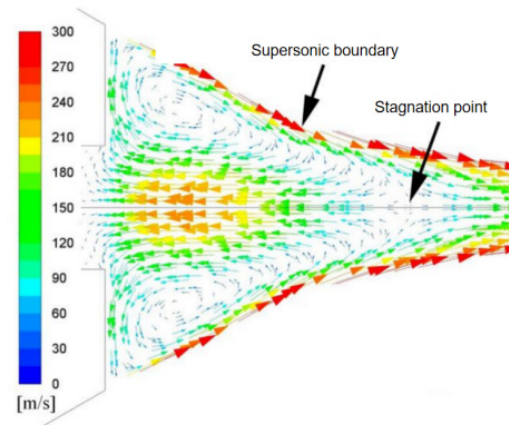


图 6 回流区速度矢量图

Fig. 6 Backflow zone speed vector

如图 7 所示，图 7(a)、(b) 分别为液体流量为 60L/h、120L/h 时的雾化流场图像。在相同的雾化气体压力下，液体的流量不同，对雾化流场的形状影响不大，但出现了一些粒径较大的液滴，存在液体破碎不完全的现象。根据相关理论及公式 (1)，增大液体流量会导致粉末平均粒径增大，计算机模拟的结果<sup>[12]</sup> (如图 8 所示) 也显示，在其他条件不变，仅改变气液比 (GMR) 的情况下，粉末平均粒径随着气液比的增大逐渐降低，即雾

化气体不变的情况下，液体流量越小，粉末的平均粒径就越小。这是因为气雾化过程的实质就是雾化气体的动能转变为金属熔体的表面能的过程，气液比增大，相同转化率的情况下，可转化的气体动能就越多，金属液滴的表面能越大，体现为液滴的粒径减小。但增大气液比并不能使粉末平均粒径无限减小，在破碎机理不变的情况下，液滴完全破碎后不能继续破碎，体现为图 8 中曲线的后半段逐渐趋于平缓。

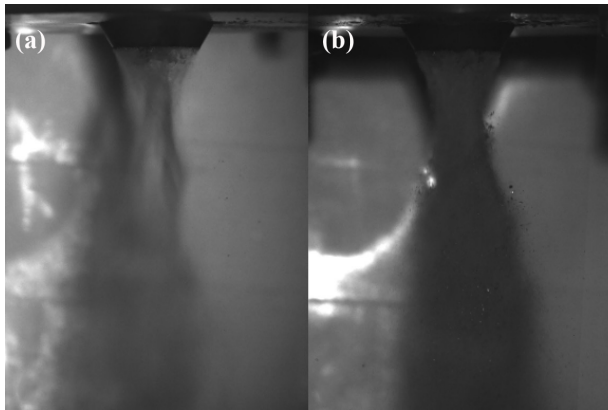


图 7 不同液体流量时的雾化流场图像：(a)  $Q=60\text{L/h}$ ；(b)  $Q=120\text{L/h}$

Fig. 7 Images of atomization flow field at different liquid flows: (a)  $Q=60\text{L/h}$ ; (b)  $Q=120\text{L/h}$

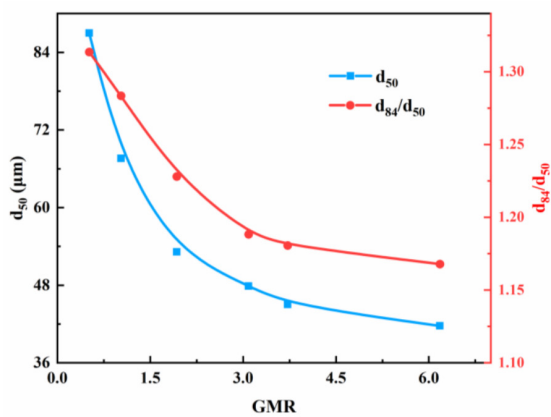


图 8 不同 GMR 条件下液滴的平均粒度分布和标准差分布

Fig. 8 Average particle size distribution and standard deviation distribution of droplets under different GMR conditions

### 3 结论

本文通过模拟实验的方法，获得了与实际生产过程类似的气雾化流场，使用高速摄影拍摄了流场的典型图像，分析可得到以下结论：

(1) 高速摄影图像可以清楚地观察到液体破碎的几个过程，与目前普遍认同的二次破碎理论相符，同时也证明了水的雾化机理与金属熔体的雾化机理没有本质上的区别，都表现为液体在导液管出口下方受到高速气流的作用，在表面出现轻微扰动，扰动逐渐剧烈继而发展为波状，并破碎形成条带，之后条带再次受到高速气流的作用，发生二次破碎现象并形成细小的液滴，在表面张力的作用下形成球形。故采用水代替金属熔体进行模拟实验有一定的合理性。

(2) 通过不同雾化压力下的流场图像，与计算机模拟的结果相比较，二者在流场结构上几乎相同，说明计算机模拟的结果在一定程度上是科学且合理的。计算机模拟的结果对实际生产具有指导意义。

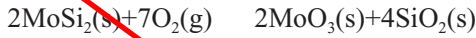
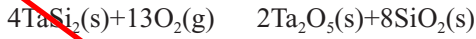
(3) 改变参数后的雾化流场结构并无太大区别，说明其雾化破碎机理没有改变，仅液滴的破碎程度发生变化，其变化趋势与破碎理论和计算机模拟的结果都相符。通过计算机模拟寻找最佳工艺参数的方法是可行的。

气雾化过程由于其特殊性，研究手段相对较少，这对计算机模拟的研究方法提供了很大的空间。随着计算机模拟研究的不断深入，其对实际生产的指导作用也会越来越大。同时，采用水代替金属熔体仍存在一定的偏差，主要是由于液滴粒径不同，导致液滴在飞行过程中的运动状况出现差异，通过改进实验方法，可以进一步提高实验的准确性。实际生产中的气雾化过程也十分复杂，影响雾化过程的因素还有很多，如果可以将本文设计的雾化喷嘴实际应用于生产中，就能更好地支持本文中的结论。

### 参考文献

[1]Hall E J.Metal-disintegrating apparatus:US, US1501449[P]. 1924.

如下化学反应：



SiO<sub>2</sub> 在 1650 呈熔融的玻璃态，具有良好的封孔作用，并因其极低的氧扩散系数，阻止氧向基体扩散；Ta<sub>2</sub>O<sub>5</sub> 熔点较高(1800 )，在 1650 呈固相，对高温时熔融玻璃态 SiO<sub>2</sub> 的自愈合流动起到很好的“骨架”支撑作用。MoO<sub>3</sub> 熔点 795 ，沸点 1155 ，在 1650 高温下 ,MoO<sub>3</sub> 挥发速度很快，所以在涂层表面未观察到 MoO<sub>3</sub> 的存在。

3 结论

(1) 采用低压等离子喷涂技术制备了 TaSi<sub>2</sub>/MoSi<sub>2</sub> 涂层，涂层呈现典型的层状结构，组织结构均匀致密，孔隙率为 3.1%。

(2) TaSi<sub>2</sub>/MoSi<sub>2</sub> 粉末与涂层均由 TaSi<sub>2</sub> 和 MoSi<sub>2</sub> 两相组成，喷涂过程中未发生相结构转变。

(3) 空气中 1650 氧化 30min 后，TaSi<sub>2</sub>/MoSi<sub>2</sub> 涂层表面生成致密和玻璃态 SiO<sub>2</sub> 保护膜，能够有效地阻挡氧的进一步扩散，涂层具有良好的自愈合能力，表现出良好的高温抗氧化性能。



(上接 59 页)

[2] 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 [J]. 粉末冶金技术, 1982(02):9-14.

[3] 康灿, 王蔚峰, 张峰, 等. 扇形自由水射流流场的 PDPA 实验研究 [J]. 水动力学研究与进展 A 辑, 2010, 25(06): 822-829.

[4] 王伟东, 文明, 王殿恺, 等. 基于快速多帧 PIV 方法的超声速自由射流流动结构研究 [J]. 机电产品开发与创新, 2018, 31(01): 4-6+15.

[5] 刘静, 王辽, 张佳, 等. 超声速气流中横向射流雾化实验和数值模拟 [J]. 航空动力学报, 2008(04): 724-729.

[6] Mullis A M, McCarthy I N, Cochrane R F. High speed imaging of the flow during close-coupled gas atomisation: effect of melt delivery nozzle geometry[J]. Journal of Materials Processing Technology, 2011(211): 1471-1477.

[7] Stevano W, Damon H, Julio S. High-speed visualisation of primary break-up of an annular liquid sheet[J]. Exp Fluids,

参考文献

[1] Lohfeld S., Schütze M, Böhm A, et al. Oxidation behaviour of particle reinforced MoSi<sub>2</sub> composites at temperatures up to 1700 [J]. Materials and Corrosion, 2005, 56(4): 250-258.

[2] Schultes G, Schmitt M, Goettel D, et al. Strain sensitivity of TiB<sub>2</sub>, TiSi<sub>2</sub>, TaSi<sub>2</sub> and WSi<sub>2</sub> thin films as possible candidates for high temperature strain gauges[J]. Sensors and Actuators, 2006, A126: 287-291.

[3] Chou L J, Chueh Y L, Ko M T. Interconnect and contact for nanoelectronics: metallic TaSi<sub>2</sub> nanowires[J]. Thin Solid Films, 2007, 515(22): 8109-8112.

[4] Shon I J, Ko I Y, Chae S M, et al. Rapid consolidation of nanostructured TaSi<sub>2</sub> from mechanochemically synthesized powder by high frequency induction heated sintering[J]. Ceramics International, 2011, 37 (2): 679-682.

[5] 侯党社, 李克智, 李贺军, 等. C/C 复合材料 SiC-TaSi<sub>2</sub>/MoSi<sub>2</sub> 抗氧化复合涂层研究 [J]. 金属学报, 2008, 44(3): 331-335.

[6] Niu Y R, Huang L P, Zhai C H, et al. Microstructure and thermal stability of TaSi<sub>2</sub> coating fabricated by vacuum plasma spray[J]. Surface and Coatings Technology, 2015, 279:1-8.

2008(44): 451-459.

[8] Aydin O, Unal R. Experimental and numerical modeling of the gas atomization nozzle for gas flow behavior[J]. Computers & Fluids, 2011, 42(1):37-43.

[9] 徐良辉, 周香林, 李景昊, 等. 基于回流区特性的气雾化喷嘴设计及流场结构模拟 [J]. 热喷涂技术, 2019, 11(3), 30-37.

[10] Lubanska H. Correlation of Spray Ring Data for Gas Atomization of Liquid Metals[J]. The Journal of The Minerals, Metals & Materials Society, 1970, 22(2): 45-49.

[11] McCarthy I N, Adkins N J, Aslam Z. High speed imaging and Fourier analysis of the melt plume during close coupled gas atomisation. [J] Powder Metallurgy, 52 (3): 205-212.

[12] 徐良辉. 超声速雾化气体流场及熔体破碎机理的模拟研究 [D]. 北京: 北京科技大学, 2019.