

doi: 10.12068/j.issn.1005-3026.2020.06.008

# 数值模拟雾化气压对 GH4169 合金粉末粒径的影响

郭快快<sup>1,2</sup>, 商 硕<sup>1</sup>, 陈 进<sup>1</sup>, 刘常升<sup>1</sup>

(1. 东北大学 材料科学与工程学院, 辽宁 沈阳 110819; 2. 辽宁增材制造产业技术研究院有限公司, 辽宁 沈阳 110200)

**摘 要:** 针对工艺参数与高温合金雾化粉末粒径间的复杂联系,采用 ANSYS-Fluent 数值模拟 GH4169 高温合金真空感应气雾化(VIGA)制粉过程中液滴的破碎行为,分析了雾化气压对金属熔体雾化过程和粉末粒度分布的影响.结果表明:一次雾化过程的带状液膜厚度和液滴面积逐渐减小;二次雾化对熔体的破碎作用逐渐增强,雾化所得粉末粒径越来越细小,中位径从 81.10 μm 减小到 69.80,64.77,52.30,41.80 μm;细粉收得率逐渐提高,由 1.72% 提高到 12.62%,18.89%,56.50%,71.54%.

**关 键 词:** 真空感应熔化;高温合金;气雾化;雾化气压;粒径分布

**中图分类号:** TB 126      **文献标志码:** A      **文章编号:** 1005-3026(2020)06-0807-05

## Numerical Simulation of Influence of Atomization Pressure on Particle Size of GH4169 Alloy Powders

GUO Kuai-kui<sup>1,2</sup>, SHANG Shuo<sup>1</sup>, CHEN Jin<sup>1</sup>, LIU Chang-sheng<sup>1</sup>

(1. School of Materials Science & Engineering, Northeastern University, Shenyang 110819, China; 2. Liaoning Additive Manufacturing Industry Technology Research Institute Co., Ltd., Shenyang 110200, China. Corresponding author: LIU Chang-sheng, E-mail: csliu@mail.neu.edu.cn)

**Abstract:** Aiming at exploring the complex relationship between vacuum induction gas atomization (VIGA) process parameters and particle sizes of superalloy powders, the ANSYS-Fluent software was used to simulate the breaking behavior of droplets during the GH4169 superalloy VIGA process. The influence of atomization pressure on the atomization process and particle size distributions of the melt metal was analyzed. The results showed that the thickness of the strip-shaped liquid film and the droplet area in the first atomization process gradually decreased, while the crushing effect of the secondary atomization on the melt was gradually enhanced. The particle size of the atomized powders was reduced from 81.10 to 69.80, 64.77, 52.30 and finally to 41.80 μm. Correspondingly, the yield of fine powders was gradually improved from 1.72% to 12.62%, 18.89%, 56.50%, and finally to 71.54%.

**Key words:** vacuum induction melting; superalloy; gas atomization; atomization pressure; particle size distribution

VIGA 制备金属粉末的雾化过程的影响因素复杂<sup>[1-2]</sup>,超音速气流将金属熔体雾化破碎成大量细小的熔融金属液滴在表面张力的作用下成球并凝固,雾化介质的动能转化为破碎金属液滴的表面能<sup>[3]</sup>,金属熔体的破碎过程是一个多相流相互耦合的过程,包括一次雾化和二次雾化,难以用常规实验手段进行表征<sup>[4-5]</sup>.另外,合理的喷嘴结构和良好的雾化工艺是确保雾化过程稳定并获得高产率和高质量粉末的必须条件.

计算流体力学(computational fluid dynamics,

CFD)可以更好地解决复杂流动问题,越来越受到重视<sup>[6-8]</sup>. 国内外学者采用 CFD 对气雾化过程进行了数值模拟. 赵新明等<sup>[9]</sup>利用 CFD 软件 Fluent 模拟了超音速气雾化喷嘴气体单相流场,研究雾化气压对气体单相流场及雾化室中心线上静压强、速度等的影响,结果表明,随雾化气压(1.5 ~ 5.0 MPa)的逐渐增大,中心线上气流的最大速度逐渐增加,抽吸压力先减小后增大,导流管底端径向分布的压强梯度逐渐增大. Aydin 等<sup>[10]</sup>使用 CFD 软件 Fluent 6.3 模拟研究了紧耦合气雾化中雾化气压对熔体导流管出口压力状态和气流分离过程的影响. 使用 1.0,1.3,1.7,2.2 和 2.7 MPa 的雾化气压初始化进气口中压力,并将模拟结果与实验数据进行了对比,结果表明,CFD 模型可以用于估算喷嘴的导流管熔体出口处的压力,气流分离的形成在很大程度上取决于雾化气体的压力. 目前,较高气压对雾化过程和颗粒尺寸的影响尚不明朗,为了减少实验量和对工艺优化提供支持,本文模拟 VIGA 制备 GH4169 高温合金的一次雾化和二次雾化过程,以及雾化气压对流场结构和雾化粉末粒度分布的影响,对气雾化实验提供理论指导.

## 1 研究方法及过程

采用 ANSYS Fluent 商用软件 CFD 数值计算方法,模拟雾化压力 3 ~ 7 MPa 条件下两相流破碎过程,采用不可压缩状态模拟. 一次雾化过程采用

的物理模型为VOF多相流模型和大涡模型. 二次雾化过程采用的物理模型为 DPM 离散相模型. 破碎过程采用 TAB 破碎模型. 求解器采用压力基的瞬态法模拟计算真空感应气雾化制粉熔体雾化过程.

选取雾化室二维轴对称几何体的 1/2 模型为计算域,利用 Gambit 软件对喷嘴及其后端的流场区域进行网格划分,采用非结构网格,如图 1 所示. 将几何模型的对称轴边界作为 X 轴,设置为旋转轴边界;实验所使用雾化气体为氩气,选择压力入口边界作为气体入口,速度入口作为合金高温熔体入口;选用喷嘴下方 138 mm × 50 mm 为计算域,其上边界和左边界设置为压力出口;将气室周围和雾化室顶部的金属壁面设置为壁面. 氩气物性参数如表 1 所示. GH4169 镍基合金的物性参数如表 2 所示.

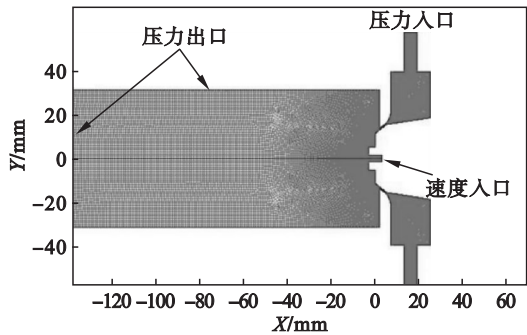


图 1 气雾化设备二维轴对称模型  
Fig. 1 Two-dimensional axial symmetric model of gas atomization equipment

表 1 氩气物性参数  
Table 1 Argon physical parameters

比热容 $J \cdot (kg \cdot K)^{-1}$	热导率 $W \cdot (m \cdot K)^{-1}$	黏度 $Pa \cdot s$	体积质量 $kg \cdot m^{-3}$
520.64	0.0158	$224.42 \times 10^{-7}$	1.654

表 2 GH4169 镍基合金物性参数  
Table 2 Physical parameters of GH4169 Ni-based superalloy

比热容 $J \cdot (kg \cdot K)^{-1}$	热导率 $W \cdot (m \cdot K)^{-1}$	黏度 $Pa \cdot s$	表面张力 $N \cdot m^{-1}$	体积质量 $kg \cdot m^{-3}$
732	25.8	0.02	1.588	7 750

## 2 模拟结果与讨论

### 2.1 雾化气压对一次雾化的影响

不同雾化气压下,同一时刻,一次雾化高温熔体云图如图 2 所示,图中红色部分代表高温合金熔体. 由图 2a ~ 2c 可以看出,雾化气压从 3 MPa

增加到 4,5 MPa 时,高温熔体流入雾化室内的量逐渐减少,熔体向两侧延展得更宽,熔体液柱被剥离后呈现的带状液膜厚度逐渐减小,破碎的金属液滴面积也逐渐减小;这是因为雾化气压从 3 MPa 增加到 4,5 MPa 时,导流管底端抽吸压力值逐渐增大,气体对熔体的抽吸作用逐渐减小,相同时间内高温熔体流入雾化室内的量逐渐减小,

又因回流区内气流量和气流速度逐渐增大,故气液质量流率比和气液相对速度增大,气体对熔体的雾化作用增强,雾化后呈现的液膜厚度和破碎液滴减小。

由图 2c~2e 可以看出,随雾化气压从 5 MPa 增加到 6,7 MPa 时,流入雾化室内的高温合金熔体的量没有明显变化,这与雾化气压为 5,6,

7 MPa 时抽吸压力变化不明显有关;由图 2c~2e 还可以看出,一次雾化过程带状液膜的厚度和破碎的液滴面积逐渐减小。随雾化气压的增大,一方面,回流区内气流速度逐渐减小,使气体对液体的破碎作用强度减弱;另一方面,滞止压强的增大会使进入回流区的气体流量增加,气液质量比的增大会使气体对熔体的破碎作用增强。

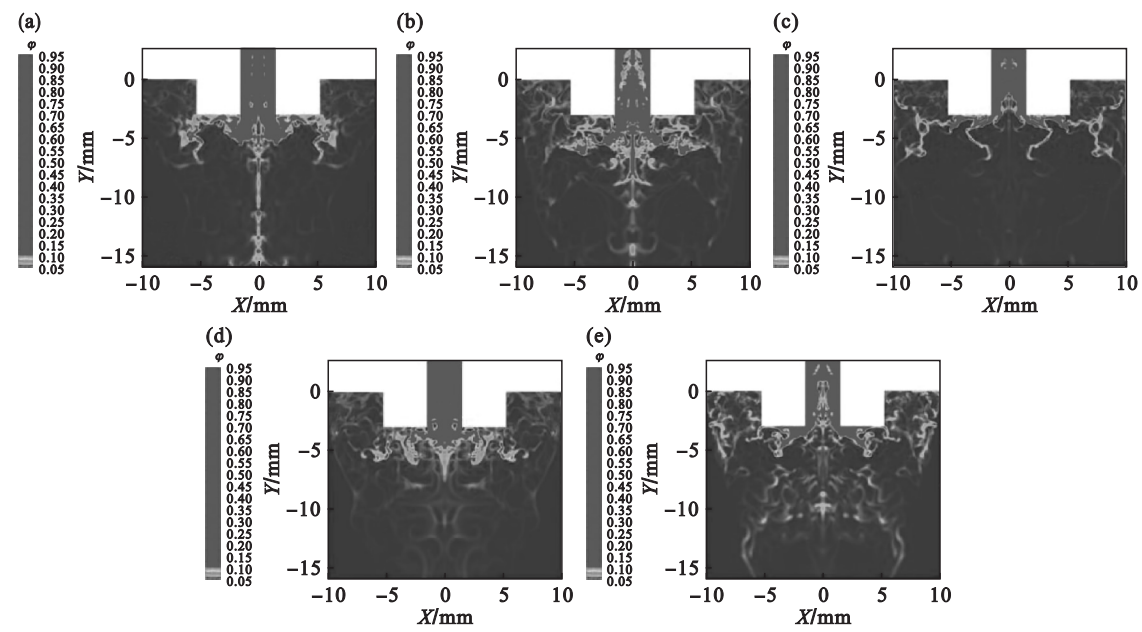


图 2 不同雾化气压条件下一次雾化高温熔体云图  
Fig.2 Melt flow pattern in primary atomization with different atomization pressures  
(a)—3 MPa; (b)—4 MPa; (c)—5 MPa; (d)—6 MPa; (e)—7 MPa.

2.2 雾化气压对二次雾化粉末粒径分布的影响

保持几何模型、熔体属性、网格结构不变,采取 3 个注射液流构成的组注射的模式,每组 3 个初始液滴的直径分别设置为 0.7,0.6,0.5 mm,温度均设置为 1 863 K. 利用 Fluent 软件中的粒子示踪功能,得到二次雾化液滴破碎及流动轨迹图;通过捕捉模型出口边界处逃逸粒子,统计得到二次雾化后粉末粒径分布情况。

通过统计雾化室出口边界处逃逸粒子信息,得到了不同雾化气压条件下液滴二次雾化后粉末粒度分布,如图 3 所示. 随雾化气压的增大,粉末粒径分布范围逐渐变窄,粉末粒径分布柱状图最高峰粒径逐渐向左移动,即粉末平均粒径逐渐减小. 雾化气压为 3 MPa 时,粉末粒径分布范围较宽,分布在 50~80  $\mu\text{m}$  范围的最多,但有少量粒径为 100~180  $\mu\text{m}$  的粉末存在,如图 3a 所示. 当雾化气压为 4 MPa 时,粉末粒径分布范围与气压为 3 MPa 时相同,但粒径为 100~180  $\mu\text{m}$  的粉末含量明显减少,粉末粒径主要分布在 30~80  $\mu\text{m}$  之间,如图 3b 所示. 当雾化气体压力为 5 MPa 时,

粉末粒径分布范围较气压为 4 MPa 时明显变窄,主要分布在 40~60  $\mu\text{m}$  之间,如图 3c 所示. 当雾化气体压力从 5 MPa 逐渐增加到 6,7 MPa 时,粉末粒径分布柱状图最高峰粒径从 50  $\mu\text{m}$  左右向左移动到约 40,30  $\mu\text{m}$ ,这意味着随雾化气体压力的逐渐增加,二次雾化粉末平均粒径逐渐减小,如图 3d,3e 所示。

不同雾化气压条件下二次雾化统计所得粉末粒径累积分布曲线如图 4 所示. 当雾化气体压力由 3 MPa 逐渐增加到 4,5 MPa 时,不同雾化气压下的粒径累积分布曲线逐渐向左移动,同时粒径分布宽度变小,由此可知,二次雾化所得合金粉末粒径的中位径逐渐变小,粒径分布范围随着雾化气压的增大逐渐减小. 当雾化气体压力从 5 MPa 增加到 6,7 MPa 时,粉末粒径累积分布曲线相对于 5 MPa 时的粒径累积分布曲线逐渐向左移动,粒径分布宽度变化不大,由此可得二次雾化所得合金粉末粒径的中位径逐渐减小,但减小的幅度不如气压从 4 MPa 增大到 5 MPa 时粉末粒径中位径减小的幅度大。

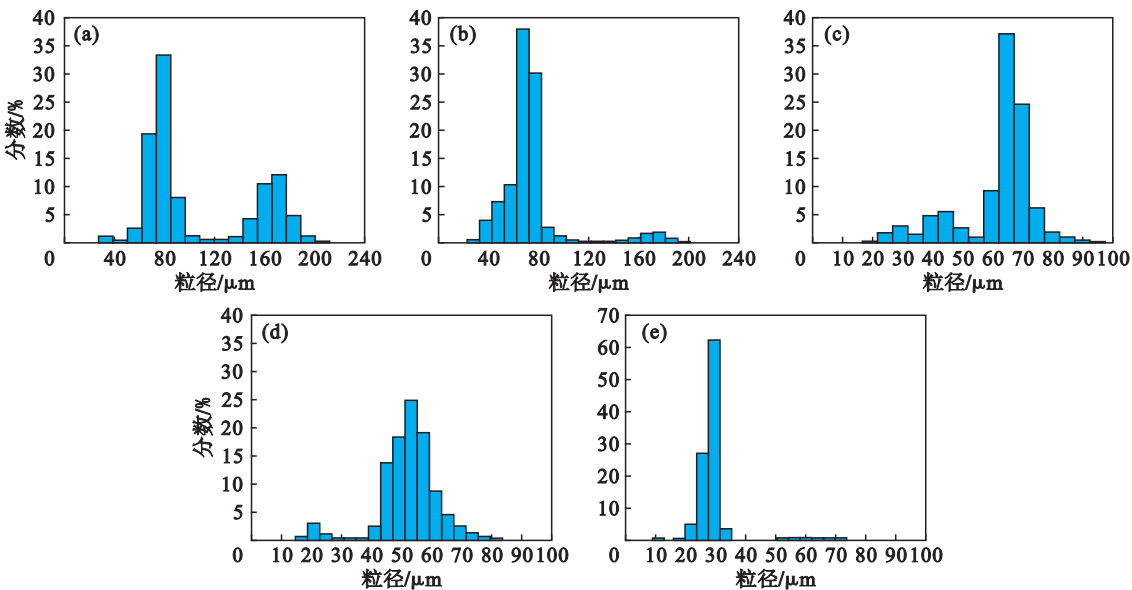


图 3 不同雾化压力条件下粉末粒径分布图  
Fig.3 Particle size distribution with different atomization pressures  
(a)—3 MPa; (b)—4 MPa; (c)—5 MPa; (d)—6 MPa; (e)—7 MPa.

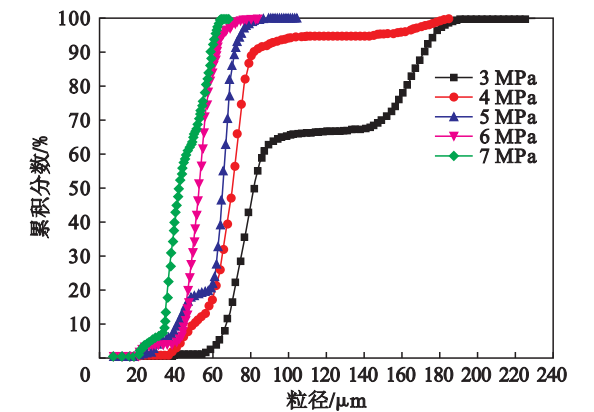


图 4 不同雾化气压条件下粉末粒径累积分布曲线  
Fig.4 Cumulative distribution curves of powder particle size under different atomization pressures

不同雾化气压条件下,初始液滴二次雾化数值模拟统计所得粉末粒径数据如表 3 所示. 可知,当雾化气压由 3 MPa 逐渐增加到 4,5,6,7 MPa 时,粉末平均粒径从 106.54  $\mu\text{m}$  减小到 73.69, 61.83, 52.11, 44.67  $\mu\text{m}$ , 粉末中位径  $D_{50}$  从 81.10  $\mu\text{m}$  减小到 69.80, 64.77, 52.30, 41.80  $\mu\text{m}$ . 随雾化气压由 3 MPa 逐渐增大到 7 MPa,气雾化粉末越来越细,小于 53  $\mu\text{m}$  的细粉收得率由 1.72% 逐渐提高到 12.62%,18.89%, 56.50%,71.54%.

由图 3、图 4 及表 3 可知,随雾化气压的增大,二次雾化数值模拟统计所得的合金粉末平均粒径逐渐减小,中位径 $D_{50}$ 逐渐减小,细粉收得率

表 3 不同雾化气压条件下二次雾化统计粉末粒径  
Table 3 Powder particle size of secondary atomization with different atomization pressures

雾化气压 MPa	平均粒径 $\mu\text{m}$	中位径 $D_{50}$ $\mu\text{m}$	比例最大粒径 $\mu\text{m}$	细粉 ( $\leq 53 \mu\text{m}$ ) 收得率/%
3	106.54	81.10	79.49	1.72
4	73.69	69.80	67.84	12.62
5	61.83	64.77	64.67	18.89
6	52.11	52.30	52.82	56.50
7	44.67	41.80	36.15	71.54

逐渐增加. 当雾化气压为 7 MPa 时,二次雾化金属液滴破碎最充分,统计所得粉末平均粒径最小为 44.67  $\mu\text{m}$ , $D_{50}$  最小为 41.80  $\mu\text{m}$ ,粒径  $\leq 53 \mu\text{m}$  的细粉收得率最大. 这主要是因为喷嘴结构保持一定的情况下,增大气体入口处雾化气体压力,会

使喷管喷射而出的超音速气流速度增大,气体对熔体的冲击破碎作用强度增加,故在一次雾化后得到的初始液滴的数量和尺寸相同的情况下,二次雾化后所得粉末粒径逐渐减小.

气雾化数值模拟结果表明,当雾化气压为

7 MPa 时,所得粉末非常细小,粉末平均粒径从 6 MPa 时的 52. 11  $\mu\text{m}$  减小到 44. 67  $\mu\text{m}$ ,中位径从 6 MPa 时的 52. 30  $\mu\text{m}$  减小到 41. 80  $\mu\text{m}$ ,粒径减小的幅度为 20% . 因此,VIGA 气雾化制粉时,若想获得超细粉末,提高细粉收得率,在设备安全性和生产成本允许的情况下,可以考虑增大雾化气体压力.

### 3 结 论

随雾化气压的增加,一次雾化过程带状液膜的厚度和破碎的液滴面积逐渐减小;二次雾化对熔体的破碎作用逐渐增强,雾化所得粉末粒径越来越细小,中位径从 81. 10  $\mu\text{m}$  减小到 69. 80, 64. 77,52. 30,41. 80  $\mu\text{m}$ ;细粉收得率逐渐提高,由 1. 72% 提高 到 12. 62% , 18. 89% , 56. 50% , 71. 54% .

#### 参考文献:

[ 1 ] 乐国敏,李强,董鲜峰,等. 适用于金属增材制造的球形粉体制备技术[J]. 稀有金属材料与工程,2017,46(4):298 – 304.  
( Le Guo-min, Li Qiang, Dong Xian-feng, et al. Fabrication techniques of spherical-shaped metal powders suitable for additive manufacturing [ J ]. *Rare Metal Materials and Engineering*,2017,46(4):298 – 304. )

[ 2 ] Dawes J, Bowerman R, Trepleton R. Introduction to the additive manufacturing powder metallurgy supply chain[J].

*Johnson Matthey Technology Review*, 2015, 59 ( 3 ) : 243 – 256.

[ 3 ] Ting J, Peretti M W, Eisen W B. The effect of wake-closure phenomenon on gas atomization performance [ J ]. *Materials Science & Engineering A*, 2002, 326( 1 ) : 110 – 121.

[ 4 ] 夏敏,汪鹏,张晓虎,等. 电极感应熔化气雾化制粉技术中非限制式喷嘴雾化过程模拟[J]. 物理学报,2018,67(17): 41 – 51.  
( Xia Min, Wang Peng, Zhang Xiao-hu, et al. Computational fluid dynamic investigation of the primary and secondary atomization of the free-fall atomizer in electrode induction melting gas atomization process [ J ]. *Acta Physica Sinica*, 2018, 67( 17 ) : 41 – 51. )

[ 5 ] Li X G, Fritsching U. Process modeling pressure-swirl-gas-atomization for metal powder production [ J ]. *Journal of Materials Processing Technology*, 2016, 239: 1 – 17.

[ 6 ] Samstag R W, Ducoste J J, Griborio A, et al. CFD for wastewater treatment: an overview [ J ]. *Water Science and Technology*, 2016, 74( 3 ) : 549 – 563.

[ 7 ] Zhu D, Song Y. The numerical simulation on the atomization process of fluid movement in the jet exhausting atomization nozzle [ J ]. *Applied Mechanics and Materials*, 2012, 182: 1408 – 1412.

[ 8 ] Verdin P G, Thompson C P, Brown L D. CFD modeling of stratified/atomization gas-liquid flow in large diameter pipes [ J ]. *International Journal of Multiphase Flow*, 2014, 67: 135 – 143.

[ 9 ] Zhao X M, Xu J, Zhu X X, et al. Effect of atomization gas pressure variation on gas flow field in supersonic gas atomization [ J ]. *Science in China Series E: Technological Sciences*, 2009, 52( 10 ) : 3046 – 3053.

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