

引用格式: 峰山, 张浩. 电极感应熔化气雾化制备高速钢粉末雾化模拟[J]. 中国材料进展, 2025, 44(11): 1061-1068.

FENG S, ZHANG H. Simulation of Atomization of High-Speed Steel Powder Prepared by Electrode Induction Melting and Aeroatomization[J]. Materials China, 2025, 44(11): 1061-1068.

电极感应熔化气雾化制备高速钢粉末雾化模拟

峰山, 张浩

(内蒙古工业大学材料科学与工程学院, 内蒙古 呼和浩特 010051)

摘要: 电极感应熔化气雾化(EIGA)是制备超洁净无夹杂物粉末的先进技术。雾化制粉过程涉及多物理场耦合, 机理复杂, 难以实现精准调控, 而数值模拟可以进行可视化呈现。根据拉瓦尔喷管结构原理, 运用 SolidWorks 建模软件构建非限制式喷嘴结构模型, 并导入流体力学 Fluent 软件进行两相流模拟。高速钢液流的雾化过程分为一次雾化与二次雾化, 采用精度更高的大涡模拟法(LES)结合自适应网格方法, 对不同直径(3, 4 和 5 mm)的液流进行雾化模拟。当出口质量流量趋于稳定, 视为完成一次雾化模拟过程。二次雾化是在一次雾化的基础上建立子模型, 并提取粒径为 0.5 mm 的单液滴进行模拟。结果表明, 超音速气体射流对高速钢液流进行冲击雾化, 在一次雾化过程中, 随着高速钢液流直径的增大, 其破碎成液滴群的平均粒径也变大。二次雾化采用更加精密的网格以捕捉破碎雾化后更加细小的液滴, 模拟液滴粒径主要分布在 50~250 μm 。

关键词: 数值模拟; 一次雾化; 二次雾化; 高速钢液流; 粒径分布; 拉瓦尔喷管

中图分类号: TF123 文献标识码: A 文章编号: 1674-3962(2025)11-1061-08

Simulation of Atomization of High-Speed Steel Powder Prepared by Electrode Induction Melting and Aeroatomization

FENG Shan, ZHANG Hao

(School of Materials Science and Engineering, Inner Mongolia University of Technology, Hohhot 010051, China)

Abstract: Electrode induction melting gas atomization (EIGA) is an advanced powder preparation technology for producing ultra-clean, inclusion-free powders. The atomization powder preparation process involves multi-physical fields coupling, complex mechanisms make atomization difficult to achieve precise control, while numerical simulation can intuitively represent this intricate and hard-to-master process. Based on the structural principle of the Laval nozzle, a supersonic nozzle model was constructed using the SolidWorks modeling software and imported into the computational fluid dynamics software Fluent for two-phase flow simulation. The atomization process of high-speed steel molten flow is divided into primary atomization and secondary atomization. A more accurate large eddy simulation (LES) method combined with adaptive mesh method was used to simulate the molten flow with different diameters (3, 4 and 5 mm). The primary atomization simulation was considered complete when the outlet mass flow rate tended to stabilize. For secondary atomization, a sub-model was established based on the primary atomization, and a single droplet with a particle size of 0.5 mm was extracted for simulation. The results show that the supersonic gas jet impacts and atomizes the high-speed steel molten flow. During the primary atomization process, as the diameter of the high-speed steel molten flow increases, the average particle size of the droplet group formed by its fragmentation also increases. The secondary atomization adopts a more precise mesh to capture the finer droplets generated by fragmentation and atomization. The simulation results indicate that the particle size of the droplet group is mainly distributed in the range of 50~250 μm .

Key words: numerical simulation; primary atomization; secondary atomization; high-speed steel molten flow; particle size distribution; Laval nozzle

收稿日期: 2024-01-12 修回日期: 2024-08-02

基金项目: 2023 自治区高校基本科研业务费项目(JY20230046)

第一作者: 峰山, 男, 1983 年生, 讲师, 硕士生导师,

Email: summitpeak@163.com

DOI: 10.7502/j.issn.1674-3962.202401016

1 前言

粉末高速钢(high speed steel, HSS), 因具有强度高和韧性好等优势, 广泛应用于航空航天、现代机械加工、

模具制造、精密刀具等行业。随着制造领域的快速发展,粉末高速钢材料的生产越来越追求精度高、稳定性强、效率高、绿色可持续。目前,传统铸造工艺和电渣重熔法只能生产普通低合金高速钢^[1]。高合金含量的高速钢材料使用上述方法很难生产制造,主要限制原因是高合金元素含量的高速钢液流冷却后,合金元素占比提升,导致组织偏析,影响高速钢内部组织的均匀性,给后续锻造、轧制或切削加工埋下隐患。原因有两点:一次共晶碳化物在凝固过程中直接形成,合金元素含量越高,共晶碳化物分布越不均匀;网状二次碳化物在高速钢溶液或热处理过程中从奥氏体晶界析出并形成网状结构。此外,偏析会影响力学性能,严重时会引起锻件过热、过烧与开裂。高速钢自身较高的合金含量是阻碍高速钢发展的主要原因之一。

粉末冶金技术可以使材料晶粒细化,均匀组织结构。相比于常规工艺制备高速钢时主要解决碳化物不均匀和颗粒粗大等固有缺陷,粉末冶金技术能极大程度地改善甚至接近解决高速钢的偏析难题。同时在不损伤韧性和强度的情况下,生产出高合金含量的高速钢,使钢硬度均匀,韧性和耐磨性提升。粉末高速钢生产工艺在国外已经相对成熟,但由于国外对我国一直实行技术封锁,我国很多粉末高速钢产品及原材料需要进口。虽然我国一直致力于粉末高速钢的技术突破,但是目前尚处于研究与调试阶段。基于此,对原料粉末的系统性研究,将是未来粉末高速钢领域的重点研究方向^[2]。

金属粉末的制备方法主要有机械合金化法和雾化法。按照雾化法介质的不同可以将该方法分为气雾化法与水雾化法两种。水雾化法制粉优点为成本低、生产规模大、粉末粒径细,缺点是粉末中氧含量高,不适用于高性能工业零部件及航天航空 3D 打印领域。气雾化的介质主要分为惰性气体和反应性气体两大类,其中惰性气雾化法的技术特点是粉末氧含量低、粉末球形度高、生产规模大,但生产成本较水雾化法高。在大部分气雾化过程中,金属液流会直接接触陶瓷坩埚、导流管等耐火材料。气雾化法制得的金属粉末中存在非金属夹杂物,这将为后续加工的高性能部件埋下严重质量隐患。

电极感应熔化气雾化(electrode induction melting gas atomization, EIGA)^[3,4]制粉工艺是近十几年发展起来的超纯净制粉技术。该技术的设备主要由磁感应线圈和非限制式喷嘴组成,工作原理是通过磁感应线圈加热金属棒材,使其温度逐渐上升,当达到液相线温度时,慢慢开始熔化,并在重力的作用下进入雾化室进行破碎雾化。由于制粉过程不接触坩埚和导流管,故该方法可以制备超洁净的粉体。在雾化室内,高速气体射流与高速钢液

流处于不同物理状态,二者会在极短时间内发生复杂的相互作用。因此通过常规实验手段难以再现湍流涡流、高速钢液滴的变形和多尺度破裂过程。运用商业计算流体力学(computational fluid dynamics, CFD)软件 Fluent^[5]模拟雾化过程能进行可视化的呈现。

气液两相流雾化过程有许多研究成果。气体雾化过程的数值模拟主要采用欧拉-欧拉模型的流体体积(volume of fluid, VOF)法与欧拉-拉格朗日的离散相模型(discrete phase model, DPM)法。气雾化法制得的金属粉末粒径偏小,若直接采用网格方法对雾化后的液滴进行捕捉,将导致两方面问题:一是会占用巨额计算机内存,二是计算求解过程需消耗大量时间,最终大幅降低整体研究效率。因此,目前大部分研究将气雾化过程分为一次雾化和二次雾化^[6],如图 1 所示。Wang 等^[7]研究发现,金属液流进入雾化室后,被高速气体射流冲击,首先破碎成毫米级大小的液膜、液丝或液滴,称为一次雾化。对于二次雾化,利用液流破碎不稳定性分解泰勒类比破碎模型(Taylor analogy breakup, TAB)对一次雾化基础上的再次破碎进行预测,完成气雾化全过程模拟。杨国华等^[8]在 Gerris 基础上使用自适应网格方法模拟液膜雾化,运用 Matlab 编程测量破碎的液滴,既可保证计算精度,又不会占用大量的计算机内存。目前,关于高速钢液流雾化模拟的研究较少,本文以高速钢 EIGA 制粉时液流雾化动力学为模拟研究对象,帮助制备高洁净度、高球形度、细粒径的优质高速钢粉末。通过建立喷嘴模型对高速钢液流进行雾化模拟,雾化过程中,一次雾化通过 VOF 模型对不同直径(3, 4 和 5 mm)的高速钢液流进行模拟来预测液流破碎过程,研究不同高速钢液流流量变化对雾化破碎的影响。在一次雾化基础上提取单个液滴作为子模型来模拟变形破碎,通过计算精度更高的大涡模拟法(large eddy simulation, LES)结合自适应加密网格算法进行单个液滴的二次雾化模拟,实现对单液滴的雾化全过程精确模拟,为企业的高效生产和后续实验工作的进行提供理论基础。

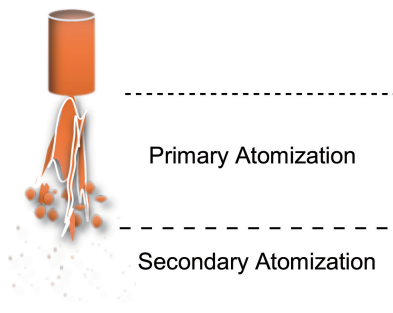


图 1 雾化过程示意图

Fig. 1 Schematic of atomization process

2 模拟方法及过程

2.1 模型的建立

在气雾化过程中，喷嘴出口处气体流速越高，产生的剪切力越强，该剪切力更有助于克服高速钢液流的自身张力，从而更高效地实现钢液流的破碎与雾化。故采用拉瓦尔喷管结构使气体达到超音速状态。拉瓦尔喷管的外形轮廓整体呈先收缩后扩张的形态，渐缩段与渐扩段之间有过渡段^[9]，如图 2 所示，气体流动参数与流通截面的关系如式(1)所示：

$$\frac{A}{A_0} = \frac{1}{Ma} \left[\left(1 + \frac{k-1}{2} Ma^2 \right) \frac{2}{k+1} \right]^{\frac{k+1}{2(k-1)}} \quad (1)$$

式中， A 为拉瓦尔喷管曲线中任意一个截面的截面积； A_0 为最小临界面积； k 为比热容比(与气体种类和温度相关)； Ma 为马赫数，计算见式(2)：

$$Ma = \frac{v}{a} \quad (2)$$

式中， v 为扰动源运动的速度， a 为当地音速。

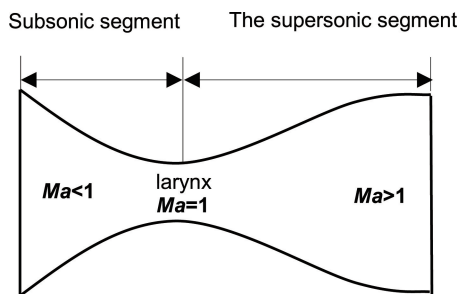


图 2 拉瓦尔喷管不同位置气体的马赫数

Fig. 2 Mach number of the different region of Laval nozzle

当气体是氩气时，在常温情况下， $k \approx 1.4$ 。由 A/A_0 随着 Ma 的变化曲线(图 3)可知，当 A/A_0 确定后， Ma 也随之确定，它们分别对应着拉瓦尔喷管中的流动状态^[10]。

基于拉瓦尔喷管的原理，通过 SolidWorks 软件建立非限制式喷嘴结构的三维模型(图 4)。气体从四周进入，从环缝出口喷出；高速钢液流从上方进入，然后，超音速氩气射流在喷嘴下方交互并开始雾化。

流体仿真只需计算流体区域即可，为了提高计算效率，使用二维轴对称模型，将模型分为两部分，即非限制式喷嘴与高速钢液流入口，如图 5 所示。

2.2 边界条件设置

首先进行单相氩气模拟，观察气体流场的变化。将气体入口设置为压力进口 (pressure inlet)，结合实际设备对气压的承受能力，设置喷嘴入口压力为 4 MPa。非限制式喷嘴壁面视为壁 (wall)，模型的左边界与下边界设置为压力出口 (pressure outlet)，高速钢液流进口与喷嘴

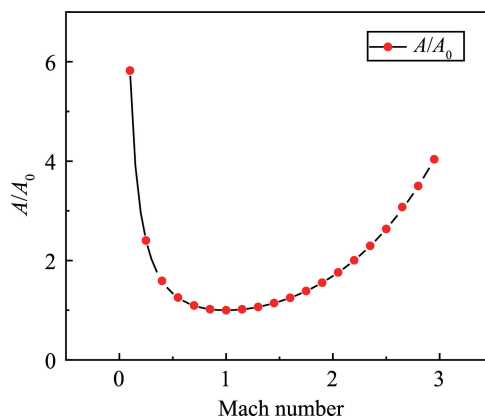


图 3 马赫数与喷管横截面面积之间的关系

Fig. 3 Relationship between Ma and the nozzle cross-sectional area

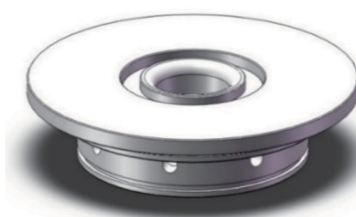


图 4 三维非限制式喷嘴结构模型

Fig. 4 Three-dimensional unrestricted nozzle structure model

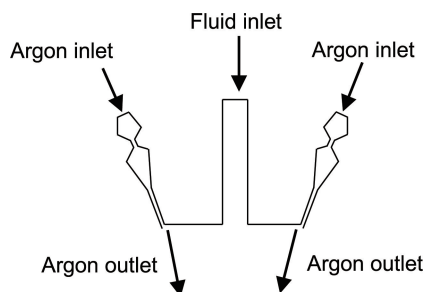


图 5 氩气与高速钢液流的流动示意图

Fig. 5 Flow diagram of argon and high-speed steel molten flow

出口之间的边界也设置为压力出口边界。高速钢液流入口设置为压力出口边界，温度设置为 300 K，实际雾化时雾化室(70 mm × 30 mm)内压力为 101 325 Pa。Fluent 软件要求以 X 轴作为轴对称模型的旋转轴，故选择几何模型 X 轴位置为旋转轴边界 (axis)，重力设置 X 方向为 -9.81 。单相氩气模拟边界条件与网格设置如图 6 所示。单相流场网格设定时，启动 Mesh 来对模型进行网格划分，设置单元尺寸为 0.1 mm，最终网格数目为 433 439。当 Element Quality 的值大于 0.7 时，说明网格质量符合标准，本文的网格质量达到了 0.99，模型选用 Realizable $\kappa-\epsilon$ 进行模拟，采用二阶时间瞬态公式求解，时间步长为 1×10^{-5} 。

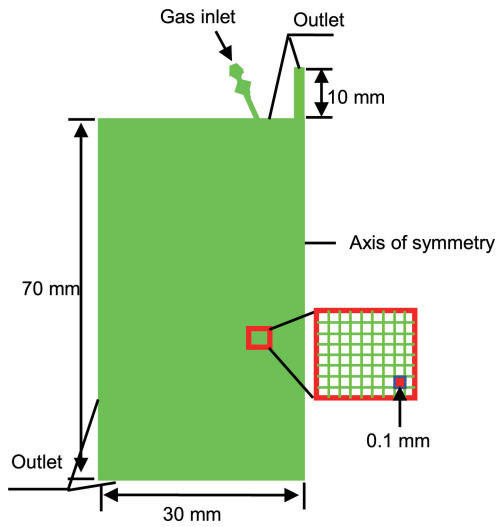


图 6 单相氩气模拟边界条件与网格设置

Fig. 6 Boundary conditions and grid settings for single-phase argon simulation

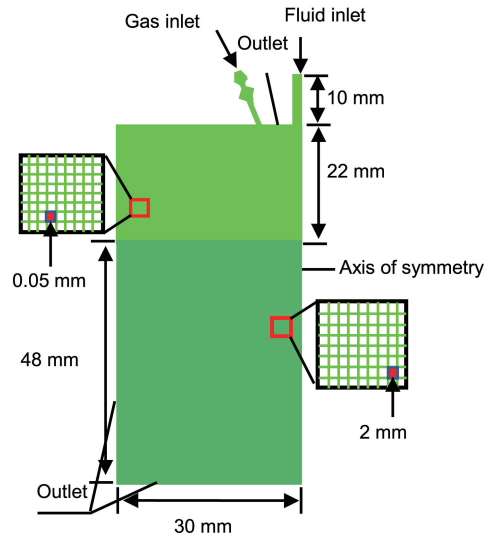


图 7 气液两相模拟边界条件与网格设置

Fig. 7 Boundary conditions and grid settings for gas-liquid two-phase simulation

然后进行气液两相流的模拟, 高速钢液流模拟采用局部加密方法结合大涡模拟法对细小冷却液滴进行可视化捕捉。将关注的区域网格尺度设置为 0.05 mm, 其他区域(48 mm×30 mm)网格尺度设置为 2 mm。网格类型采用平面四边形网格, 网格质量达到 0.971。同时, 开启自适应网格加密方法, 该方法可以对网格进行自动细化或粗化, 动态自适应细化级别设置为 4 级, 级别越高, 网格细化程度越高, 网格数量也相应增加, 在更精确模拟破碎现象的同时, 也增加了计算量和计算时间。细化后的最小网格尺寸约为 12.5 μm, 满足计算精度要求。边界条件设置大多同单相氩气模拟, 唯一区别是将高速钢液流入口设置为速度入口(velocity inlet), 下落速度为 2 m/s, 如图 7 所示。

同时启动 VOF 模型对连续的气液相界面的变化进行追踪。流体的体积分数(α)定义为高速钢液流的体积与所在计算单元的总体的比值, 该法通过标量场函数 α 表达, 代表第二相体积分数在网格中的变化程度。若 $\alpha=0$, 则计算单元网格内全是氩气(无高速钢液流); 当 $\alpha=1$ 时, 计算单元网格中充满高速钢液流(无氩气); 当 $0<\alpha<1$ 时, 计算单元网格中为氩气与高速钢液流的混合共存状态^[6]。氩气和高速钢的物理参数分别如表 1 和表 2^[11]所示。模拟过程中采用压力-速度耦合方案, 体积分数使用压缩方案提高计算收敛性, VOF 稳定性控制采用压缩方法。采用一阶时间瞬态公式求解, 该公式的本质是基于泰勒展开的一阶近似, 忽略高阶小项, 时间步长为 2×10^{-6} 。

表 1 氩气的物理参数

Table 1 Physical parameters of argon

Argument	Numerical value
Density/(kg/m^3)	Ideal-gas
Specific heat capacity/($\text{J}/(\text{kg}\cdot\text{K})$)	520.64
Heat conduction/($\text{W}/(\text{m}\cdot\text{K})$)	0.0158
Viscosity/($\text{kg}/\text{m}\cdot\text{s}$)	$2.125\text{e}-05$
Molecular weight/(kg/kmol)	39.948

表 2 高速钢的物理参数^[11]Table 2 Physical parameters of high speed steel^[11]

Argument	Numerical value
Density/(kg/m^3)	7700
Specific heat capacity/($\text{J}/(\text{kg}\cdot\text{K})$)	500
Heat conduction/($\text{W}/(\text{m}\cdot\text{K})$)	25.5
Dynamic viscosity/($\text{Pa}\cdot\text{s}$)	0.0092
Liquidus temperature/K	1695

3 非限制式喷嘴的一次雾化模拟

喷嘴喷射角度为 40° , 喷嘴入口压力设置为 4 MPa 时, 在压力作用下, 惰性气体氩气进入喷嘴腔体。流经收缩管段后, 气体受管道截面收缩影响, 密度被进一步压缩, 同时流速沿流动方向逐渐提升, 此过程中气流因压力梯度和截面变化出现无序的紊流, 此时气流马赫数小于 1, 气流未达到音速状态。气流将在一段直管内均匀

流动, 在收缩管段中继续将亚音速气体压缩提速并往喷嘴出口方向移动, 喷出形成超音速气体射流。如图 8 所示, 雾化室内气体流场均为一系列 Prandtl-Meyer 膨胀波和再压缩波形成的“项链状”射流结构。气体射流进入雾化室后, 逐步汇聚且相互交叉, 在此过程中射流边缘的自由边界层的厚度逐渐增加, 并随射流汇聚推进, 汇聚位置处湍动涡流明显加强, 一部分高速气体向下流动, 而另一部分高速气体受影响偏离原传播方向, 发生偏转向上攀升至特定高度后转向径向流动, 形成回流气场。整个气体流场最大速度为 552 m/s, 而回流气场从中心到边缘其速度依次递减, 中心位置处速度最大。回流区下方存在一个滞点, 该处特点为气体速度比较低, 但是压强为雾化室内最大值。如果进入回流区的气流流量越多, 则滞点的气体分子密度越大, 该处的压强也越大。气体回流气场如果太靠近喷嘴中心孔(金属液流下落通道), 则会导致金属液流雾化过程中粘附喷嘴中心孔(金属液流下落通道)的垂直壁面, 造成高温金属液流下落不顺利, 影响机器设备使用寿命。随着高温液流粘附的加剧, 出现反喷现象, 这将造成重大的安全隐患。上述过程也会严重影响制粉过程, 导致出现球形率低、粒径大的粉末。

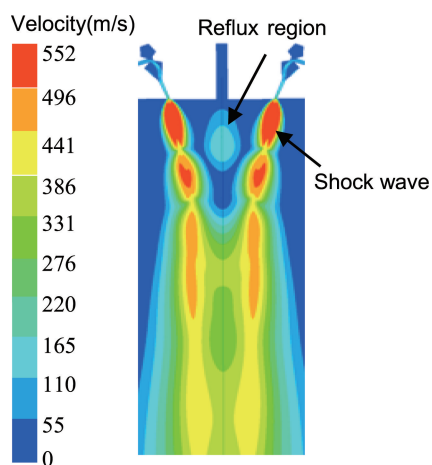


图 8 喷嘴入口压力为 4 MPa 时雾化室内气体速度云图

Fig. 8 Cloud map of gas velocity in the atomization chamber at nozzle inlet pressure of 4 MPa

计算模拟过程中, 收敛曲线呈先倾斜向下后水平运动且有周期性微小振动的趋势, 其中倾斜向下代表逐步收敛。雾化室内气体流场速度随计算步长变化的相对波动幅值小于等于 1%~5%, 说明计算过程收敛并稳定。

3.1 主雾化过程理论分析

通过高速钢液流不同入口直径(3, 4 和 5 mm)来研究不同液体流量对雾化结果的影响^[11]。通过 Nano Measure 软件对液流破碎粒径进行统计。采用索特平均直径(Sauter mean diameter, SMD)方法进行统计粒径, 记为 D_{32} 。

3.2 不同液流直径对雾化结果的影响

气体压力(F_p)的主要作用是控制回流区的强度, 如前所述, 气体会传播开并聚集成回流区。气体回流区主要产生气体曳力(F_D)和气体再循环区的浮力(F_f)并收缩至固定范围, 且越靠近回流区中心位置, 受到气体向上的浮力越大, 同时雾化过程也要考虑重力(F_g)的影响。氩气在喷嘴入口压力作用下, 从喷嘴出口倾斜喷出, 雾化室内形成超音速气流。若 $F_p + F_g + F_D > F_f$, 高速钢液流则可以正常破碎雾化; 而 $F_p + F_g + F_D < F_f$ 使高速钢液流出现反喷现象, 这种情况的主要原因是回流区位置过于靠近高速钢液流入口。

当气体流场在雾化室内达到稳定收敛状态后, 引入高速钢液流。如图 9 所示, 当高速钢液流直径为 3 mm 时^[12], 高速钢液流在 F_g 的作用下进入雾化室, 其下落流动速度随时间在 F_f 的作用下逐渐减速, 直至在某一瞬间停止。由于气流不断剪切, 当突破液体表面张力后, 液膜表面震颤成波形, 液流前端发生不稳定的分离, 使高速钢液流前端向两侧径向方向分离并扩展, 形成伞状液膜。液膜表面长度随时间推移逐渐增加, 边缘处随着波动变得越来越薄, 液膜与氩气的碰撞运动也越来越剧烈, 使液流雾化分离及破碎的倾向加大, 最终失稳, 使液流破碎成丝状、带状或毫米级大液体颗粒, 为一次雾化阶段。模拟过程稳定并收敛, 且出口流量稳定在 0.375~0.675 kg/s 范围, 通过对液流破碎粒径进行统计, 得出平均粒径为 0.5 mm。

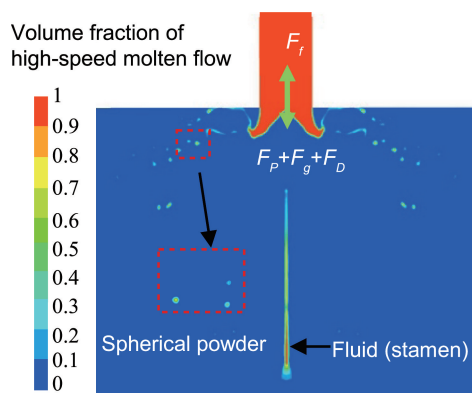


图 9 高速钢液流直径为 3 mm 时雾化室内液流破碎云图

Fig. 9 Atomization cloud map of the liquid broke in the chamber when the diameter of high-speed steel molten flow is 3 mm

如图 10 所示, 当高速钢液流直径为 4 mm 时, 高速气流射流冲击高速钢液流表面进行破碎分解, 液流分解成液膜与轴线平行的液丝, 液流体积相比于高速钢液流直径为 3 mm 时增多。随着液膜的剥离, 在下降过程中出现片状小液膜和毫米级大液滴颗粒, 同时液流(液丝)也会在高速气体作用下, 打破液流表面张力继续破碎。在

下落过程中，高速钢液流自身温度会逐渐降低，黏性增大，当剪切力小于黏性力时将不会发生破碎，最终冷却形成粉末。检测表明，质量流量稳定在 0.61~0.8 kg/s 范围内，平均粒径为 0.54 mm。

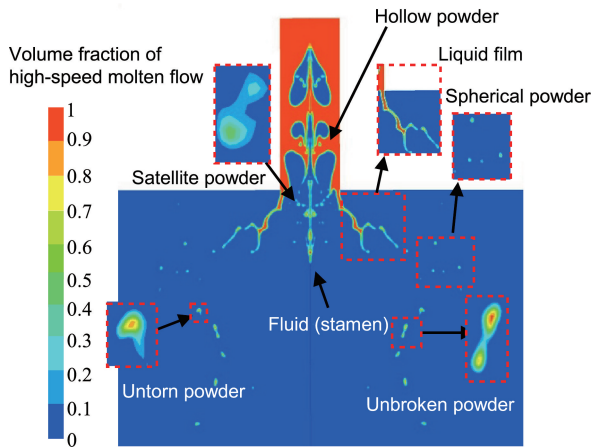


图 10 高速钢液流直径为 4 mm 时雾化室内液流破碎云图

Fig. 10 Atomization cloud map of the liquid broke in the chamber when the diameter of high-speed steel molten flow is 4 mm

如图 11 所示，当高速钢液流直径为 5 mm 时，高速气体射流冲击高速钢液流表面进行破碎，分解成液膜与轴线平行的液流（液丝），其液膜前端会越来越薄并出现褶皱，褶皱边缘形状类似锯齿状。液流（液丝）呈间断式下降时，也会被高速气体剥离分解。随着液流直径的增大，液膜与轴线平行的液流（液丝）体积也会增多，液流在持续下落过程中，受气动力作用，直至突破表面张力束缚，最终破裂为不规则大液滴与细小球形液滴。质量流量稳定在 0.72~0.91 kg/s 范围，平均粒径为 0.58 mm。

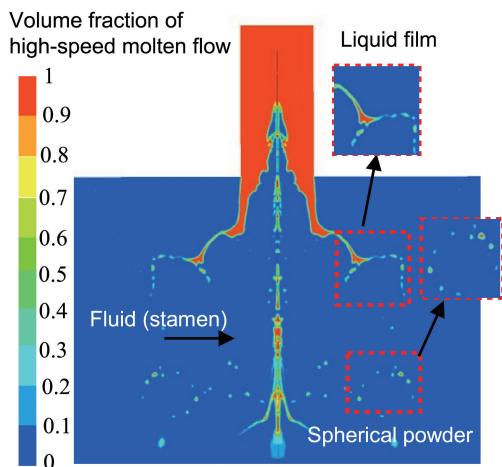


图 11 高速钢液流直径为 5 mm 时雾化室内液流破碎云图

Fig. 11 Atomization cloud map of the liquid broke in the chamber when the diameter of high-speed steel molten flow is 5 mm

通过对一次雾化后的粉末粒径进行统计(图 12)，发现当液流直径为 3 mm 时，粒径为 400~500 μm 的粉末在粉末群分布中占比最高，约为 31.58%。当液流直径为 4 mm 时，粒径为 400~500 μm 的粉末占比最高，约为 26%。当液流直径为 5 mm 时，粒径为 600~700 μm 的粉末占比最高，约为 28%。随着高速钢液流直径的增加，高速钢粉末粒径的平均尺寸增大。

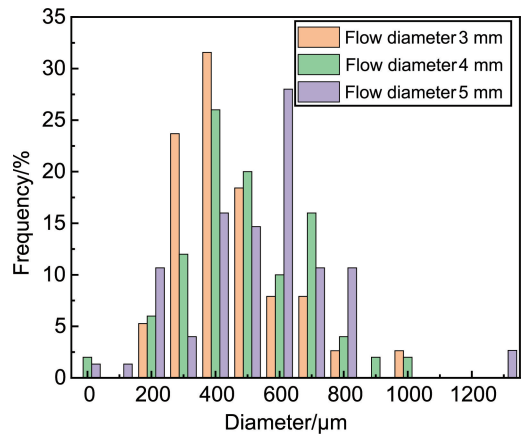


图 12 不同液流直径时一次雾化液滴直径分布

Fig. 12 Distribution of primary atomization droplet diameters under different liquid flow diameters

4 非限制式喷嘴二次雾化模拟

4.1 二次雾化过程理论分析

一次雾化成的液滴颗粒平均尺寸最小为 0.5 mm。接下来对尺寸为 0.5 mm 的液滴进行二次雾化分析，二次雾化模型尺寸设计为 2 mm×10 mm，在该矩形区域模拟单液滴下落时的破碎过程。使用 Mesh 划分网格，网格数量为 312 500，最小网格尺寸为 8 μm，Element Quality 为 0.997 42。模型的右边界定义为速度入口边界，速度设置为 560 m/s，左边界定义为压力出口边界，其他求解器参数和模型选择与一次雾化边界条件设置相同，如图 13 所示。

在气流阻力作用下，初始破碎后的液滴会逐渐调整运动方向，最终平行于激波方向，并随高速气流向下运动，此过程中液滴会先发生汇聚。随后，汇聚的液滴群

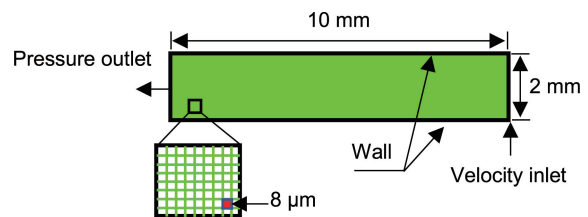


图 13 二次雾化模型及参数设置

Fig. 13 Secondary atomization model and parameter setting

进入二次雾化阶段, 该阶段全程依次经历汇聚、离散、变形、破碎、凝固 5 个过程。一次雾化与二次雾化这两个进程中, 液滴之间也会出现碰撞, 若液滴表面温度很高, 则将继续破碎分离。如果下落过程中液滴表面温度散失过多, 则会冷却成粉末。液滴何时能再次破碎是一个值得探讨的话题。空气动力韦伯数 We 与 Ohnesorge 数 (Oh) 是雾化过程中的重要参数。 We 定义为:

$$We = \frac{\rho_g U_r^2 d}{\sigma_L} \quad (3)$$

式中, ρ_g 代表气体介质密度, U_r 表示气液两相速度之间的相对速度, d 代表喷嘴出口直径, σ_L 代表表层张力。 We 的物理意义在于气体的湍动能与液相表面张力之间的比值, 其数值越大, 表示液流发生破裂的可能性越高。 Oh 为黏滞力与表面张力的比值, 该值越大表示破碎的可能性越低:

$$Oh = \frac{\mu_d}{\sqrt{\rho_d d_d \sigma}} \quad (4)$$

式中, μ_d 代表液流黏度, ρ_d 代表液流密度, σ 代表液流表面张力, d_d 为初次破碎液滴直径。

气相的湍动能强度在液流的破裂中起关键作用。气相介质打破液体本身的表面张力时, 液流发生破裂, 生成的微小液团大小由气体对液流的作用力和液流表面张力之间的比值决定。在二次雾化过程中, 有 3 种较为典型的破碎方式^[11]。① 袋式破碎分解 ($6 \leq We \leq 25$), 该过程中薄的空心液流从中心往四周破裂分离, 最后破碎为众多小颗粒。② 袋式与蕊心式分解 ($25 \leq We \leq 50$), 该模式中袋式结构与流动下降轴线平行, 形成一系列液流 (液丝)。这时袋式液流会首先破裂, 其次边缘与液流 (液丝) 开始分解。③ 片式剥离式破裂分解 ($50 \leq We \leq 175$), 该模型中没有形成袋式结构, 而是形成了薄片。分裂形式是持续从薄片周围剥离成细小颗粒^[12]。

4.2 二次雾化过程分析

如图 14 所示, 随着时间的推移, 高速钢液滴会被高速气体冲击表面发生颤动, 产生微型液膜, 其液流表面会延展并使表面积变大。在气体剪切力的作用下, 打破液膜的表面张力, 使液膜发生雾化。二次雾化后颗粒的平均粒径为 0.17 mm。

对雾化液滴进行尺寸统计, 如图 15 所示, 可以看出粒径为 50~100 μm 的粉末占比约为 28.3%, 粒径为 150~200 μm 的粉末占比约为 30.2%, 粒径为 200~250 μm 的粉末占比约为 20.8%。综上, 粉末粒径主要分布在 50~250 μm 。

4.3 粉末的类型

一般来说气雾化制粉大致归类为 5 种类型的粉末,

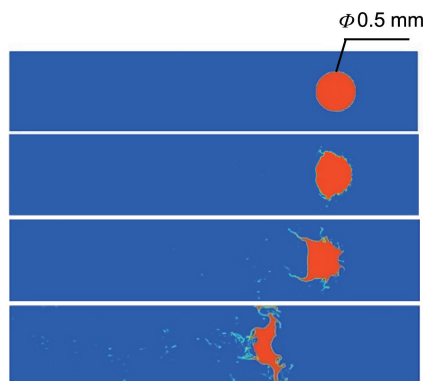


图 14 液滴随时间的二次雾化过程

Fig. 14 Process of secondary atomization of droplets with time

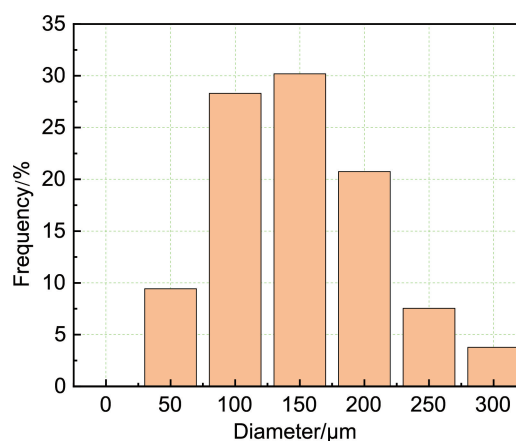


图 15 单液滴尺寸分布

Fig. 15 Diameter distribution of single droplet

其中球形粉末和卫星粉末最为常见, 而未破碎粉末、撕裂表面粉末和空心粉末较为少见。未破碎粉末的形成原因是在一次雾化或者二次雾化的初始阶段, 液滴粘附在一起, 由于气动力不足, 未能使连接的粉末再次雾化分开, 进而冷却形成 (图 16a)。雾化过程中也会产生不同尺度的液滴相互碰撞的情况, 在超音速气体射流影响下, 相比于大液滴, 小液滴自身冷却速度快, 微小尺度的液滴往往先凝固成形, 并粘附在大液滴表面同时下落, 待大液滴冷却凝固时, 形成卫星粉 (图 16b)。下落过程中弧形的液膜与椭圆形液滴在气体剪切力作用下进一步变形和破碎, 撕裂表面粉末的成因是破碎形成的球形液滴与一次雾化后形成的液线碰撞在一起, 将球形液滴包裹, 下落冷却形成 (图 16c)。球形粉末的产生主要有两种方式, 一种是在一次雾化后直接凝固形成, 另一种是在二次雾化阶段破碎冷却形成 (图 16d)。空心粉末是指内部含有包裹气体的粉末, 高速气体吹绕下落高速钢液流表面, 使得中心轴线的高速钢液流下落速度慢, 高速钢液流发生径向流动, 而边缘位置的高速钢液流下落速度快。下落过程中, 高速钢液流边缘位置由于流量增加发生聚合,

将少量气体包裹在液流中, 后在高速气流吹绕下破碎雾化, 冷却形成空心粉末(图 16e)。图 16f 是所制备高速钢粉末的 SEM 照片, 可以看出球形粉末、卫星粉末、未破碎粉末和规则粉末的分布情况。

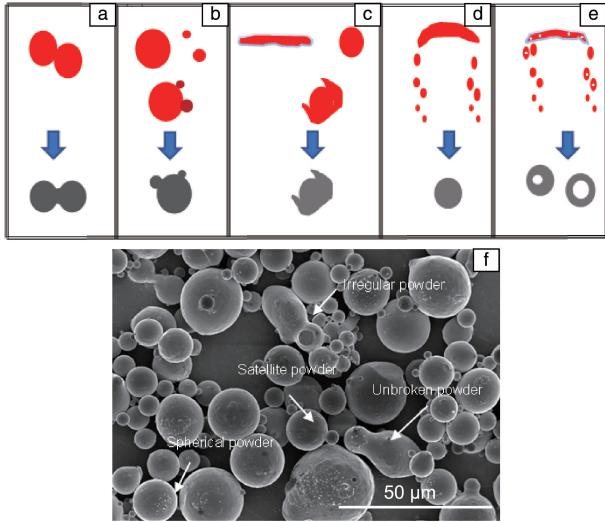


图 16 液流下落形态示意图: (a)未破碎粉末, (b)卫星粉, (c)撕裂表面粉末, (d)球形粉末, (e)空心粉末; (f) 所制备粉末的 SEM 照片

Fig. 16 Schematic diagram of liquid flow falling morphology: (a) unbroken powder, (b) satellite powder, (c) torn surface powder, (d) spherical powder, (e) hollow powder; (f) SEM image of the prepared powder

5 结 论

本文对电极感应熔化气雾化中非限制式喷嘴进行建模, 运用计算流体力学数值模拟方法对高速钢液流雾化过程进行模拟。通过非限制式喷嘴喷出高速气体射流形成回流气场, 待雾化室内气场流动趋于稳定时, 引入高速钢液流进行气液两相流雾化模拟, 高速钢液流雾化过程分为一次雾化和二次雾化。

在一次雾化过程, 通过对比不同液流直径(3, 4 和 5 mm)时破碎液滴群的尺寸分布, 发现随着高速钢液流直径的增大, 粉末平均粒径逐渐增大。提取一次雾化过程中直径为 0.5 mm 的单液滴进行二次雾化模拟, 计算模型选用精度较高的大涡模拟法结合自适应加密网格算法, 高速气体射流作用在液滴表面, 在气体剪切力的作用下, 打破液膜的表面张力, 进行破碎雾化, 下落过程中会进

一步破碎为更加细小的液滴, 二次雾化后的液滴粒径主要分布在 50~250 μm 。

参考文献 References

- [1] 徐桂丽, 黄鹏, 孙溪, 等. 中国材料进展[J], 2020, 39(1): 70-77.
XU G L, HUANG P, SUN X, *et al.* Materials China[J], 2020, 39(1): 70-77.
- [2] 秦乾, 杨芳, 陈存广, 等. 粉末冶金工业[J], 2022, 32(4): 67-75.
QIN Q, YANG F, CHEN C G, *et al.* Powder Metallurgy Industry[J], 2022, 32(4): 67-75.
- [3] 杨军, 王晓峰, 葛正浩. 粉末冶金工业[J], 2022, 32(1): 69-77.
YANG J, WANG X F, GE Z H. Powder Metallurgy Industry [J], 2022, 32(1): 69-77.
- [4] 夏敏, 汪鹏, 张晓虎, 等. 物理学报[J], 2018, 67(17): 41-51.
XIA M, WANG P, ZHANG X H, *et al.* Acta Physica Sinica [J], 2018, 67(17): 41-51.
- [5] 张学良, 陶宇, 贾建, 等. 粉末冶金工业[J], 2022, 32(4): 8-16.
ZHANG X L, TAO Y, JIA J, *et al.* Powder Metallurgy Industry[J], 2022, 32(4): 8-16.
- [6] 赵向锋, 陈绍杰. 华北科技学院学报[J], 2019, 16(5): 6-10.
ZHAO X F, CHEN S J. Journal of North China Institute of Science and Technology[J], 2019, 16(5): 6-10.
- [7] WANG P, LI J, LIU H S, *et al.* Chinese Physics B[J], 2021, 30(2): 563-578.
- [8] 杨国华, 王凯, 张民庆, 等. 推进技术[J], 2018, 39(3): 556-564.
YANG G H, WANG K, ZHANG M Q, *et al.* Journal of Propulsion Technology[J], 2018, 39(3): 556-564.
- [9] 杨超, 陈波, 姜万录, 等. 农业工程学报[J], 2016, 32(19): 57-64.
YANG C, CHEN B, JIANG W L, *et al.* Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering[J], 2016, 32(19): 57-64.
- [10] 王松岭, 甄猛, 吴正人, 等. 机械设计与制造[J], 2020(3): 51-54.
WANG S L, ZHEN M, WU Z R, *et al.* Machinery Design & Manufacture[J], 2020(3): 51-54.
- [11] WANG P, LI J, LIU H S, *et al.* Chinese Physics B[J], 2021, 30(5): 628-640.
- [12] 李淑江, 吴明, 窦如宏. 轻工机械[J], 2018, 36(1): 84-87.
LI S J, WU M, DOU R H. Machinery Design and Manufacture Engineering[J], 2018, 36(1): 84-87.