

# 直流电弧热等离子体制备纳米镍粉过程的数值模拟

陈文波<sup>1</sup>, 李自军<sup>1</sup>, 陈伦江<sup>3</sup>, 冯军<sup>2</sup>, 阳璞琼<sup>1</sup>

(1. 南华大学 电气工程学院, 湖南 衡阳 421001)

(2. 南华大学 机械工程学院, 湖南 衡阳 421001)

(3. 核工业西南物理研究院, 四川 成都 610041)

**摘要:** 研究镍粉颗粒在直流电弧热等离子体中的汽化过程可以为优化热等离子体纳米镍粉的制备工艺提供参考。本工作通过对磁流体学方程和颗粒热动力学方程的耦合求解, 研究了原料粒径、工作气流量及送粉速率等参数对镍粉颗粒在直流热等离子体中的运动行为及加热过程的影响效应。研究表明, 粒径较小的颗粒在高温区内停留的时间更长, 从等离子体中吸收到的热量更多, 因此能够在更短的时间内被加热到完全汽化; 降低工作气流量及送粉速率均可以增加镍粉颗粒从热等离子体中获得的能量, 这对于提升颗粒的汽化率, 改善最终制备的纳米镍粉品质是有益的。

**关键词:** 直流电弧热等离子体; 纳米镍粉; 汽化过程; 数值模拟

中图分类号: TG146.1<sup>+</sup>5; TB383

文献标识码: A

文章编号: 1002-185X(2024)07-1999-07

纳米级金属镍粉因其结构特殊, 有着极大的体积效应和表面效应, 能够表现出优异的磁性、导电性、化学活性及耐热耐腐蚀性能, 使其在航空航天、粉末冶金、电子材料制备等领域有着广阔的应用前景。尤其是纳米级镍粉在高容量多层陶瓷电容器 (multi-layer ceramic capacitor, MLCCs) 制造领域的应用研究, 对于提高 MLCCs 内部电极的性能、降低 MLCCs 的生产成本至关重要<sup>[1]</sup>。因此, 纳米级镍粉的制备也成为当前材料领域的研究热点。目前, 人们已陆续开发出了水热法<sup>[2]</sup>、液相还原法<sup>[3-4]</sup>、超声波喷雾热解<sup>[5]</sup>等多种纳米金属镍粉的合成方法。但这些方法存在着诸如制备条件苛刻, 制备过程复杂, 成本高, 产量低且易对环境造成污染等缺点。

直流 (direct current, DC) 电弧等离子体法是一种新型的高纯度纳米材料制备方法<sup>[6-7]</sup>。近年来, 国内外的研究团队已经开展了与电弧等离子体法制备纳米级金属镍粉相关的研究<sup>[8-11]</sup>。研究表明, 与传统制备方法相比, 电弧等离子体法的制备过程对环境友好, 所制备的粉末产品纯度高、平均粒径小、形状与尺寸可控, 是一种极具应用潜力的纳米材料制备方法。但同时也指出, 在采用热等离子体法制备纳米材料时, 原料颗粒在热等离子体内要经历熔融、汽化等阶段, 因此工作气体流量、送粉速率甚至固相原料粒径等参数都将对等离子体法的具体制备过程以及最终产物的

品质产生较大的影响。上述参数的调控规律若通过实验方式来确定, 不仅耗时长、成本高, 而且也未必能得到最优的结果。所以, 数值模拟也就成为研究等离子体纳米材料制备过程最为经济有效的手段<sup>[12]</sup>。

目前, 研究者们已经利用数值模拟方法对多种不同结构的直流电弧等离子体炬内的温度及流场分布规律进行了研究<sup>[13-15]</sup>。Shao<sup>[16]</sup>和 Xiong<sup>[17-18]</sup>等人建立了模拟颗粒与等离子体双向耦合的欧拉-拉格朗日模型, 研究了等离子喷涂过程中原料尺寸、入射角度和速度等参数对等离子体流场特性及纳米 ZrO<sub>2</sub> 颗粒生长行为的影响。Bobzin 研究组<sup>[19-20]</sup>建立了三阴极等离子体炬的理论模型, 计算了铝粉颗粒在等离子体射流中的运动轨迹, 其计算结果与实验数据吻合较好。Elaissi 等人<sup>[21]</sup>利用多物理仿真软件 COMSOL 理论研究了载气流量、颗粒尺寸和数量等工艺参数对硅粉颗粒在热等离子体中汽化过程的影响效应。这些研究结果均证明, 用数值模拟的方法来研究粉末颗粒在热等离子体中的汽化过程是可行的。

本工作以核工业西南物理研究院自行设计的空心阴极电弧等离子体炬装置为研究对象, 利用数值模拟的方法计算并分析原料粒径、工作气流量、送粉速率等工作参数的改变对镍粉颗粒在热等离子体中运动行为、熔融及汽化过程的影响效应, 从而为优化直流电弧等离子体制备纳米镍粉的工艺提供依据。

收稿日期: 2023-07-30

基金项目: 国家磁约束核聚变能发展研究专项 (2019YFE03070000); 国家自然科学基金 (12275121)

作者简介: 陈文波, 男, 1983 年生, 博士, 讲师, 南华大学电气工程学院, 湖南 衡阳 421001, E-mail: 201000214@usc.edu.cn

# 1 理论模型

## 1.1 基本假设及控制方程组

为简化计算模型，在模拟直流电弧热等离子体流场时，可以做如下假设：（1）直流热等离子体装置为二维轴对称模型；（2）等离子体为光学薄的；（3）等离子体处于定常、层流流动状态；（4）等离子体处于局域热力学平衡态；（5）忽略其中的位移电流项。因此，可以得到描述直流电弧热等离子体物理行为的二维控制方程组为<sup>[22]</sup>：

连续性方程：

$$\frac{\partial(\rho u)}{\partial z} + \frac{1}{r} \cdot \frac{\partial(\rho r v)}{\partial r} = 0 \quad (1)$$

动量方程：

$$\rho u \frac{\partial u}{\partial z} + \rho v \frac{\partial u}{\partial r} = 2 \frac{\partial}{\partial z} (\mu \frac{\partial u}{\partial z}) + \frac{1}{r} \cdot \frac{\partial}{\partial r} [\mu r (\frac{\partial u}{\partial r} + \frac{\partial v}{\partial z})] - \frac{\partial p}{\partial z} + j_r B_\theta + \rho g \quad (2)$$

$$\rho u \frac{\partial v}{\partial z} + \rho v \frac{\partial v}{\partial r} = \frac{2}{r} \cdot \frac{\partial}{\partial r} (\mu r \frac{\partial v}{\partial r}) + \frac{\partial}{\partial z} [\mu (\frac{\partial u}{\partial r} + \frac{\partial v}{\partial z})] - \frac{\partial p}{\partial r} - j_z B_\theta - \mu \frac{2v}{r^2} \quad (3)$$

能量方程：

$$\rho c_p (u \frac{\partial T}{\partial z} + v \frac{\partial T}{\partial r}) = \frac{\partial}{\partial z} (\lambda \frac{\partial T}{\partial z}) + \frac{1}{r} \cdot \frac{\partial}{\partial r} (r \lambda \frac{\partial T}{\partial r}) + \frac{5}{2} \cdot \frac{k_B}{e} (j_z \frac{\partial T}{\partial z} + j_r \frac{\partial T}{\partial r}) + \frac{j_r^2 + j_z^2}{\sigma} - Q_R \quad (4)$$

电流连续性方程：

$$\frac{1}{r} \cdot \frac{\partial}{\partial r} (r \sigma \frac{\partial \phi}{\partial r}) + \frac{\partial}{\partial z} (\sigma \frac{\partial \phi}{\partial z}) = 0 \quad (5)$$

在上述方程组中， $z$  和  $r$  分别表示轴向和径向， $e$  表示自由空间中的电荷量。 $g$  表示重力加速度， $p$  表示压力， $u$  是轴向的速度分量， $v$  是径向的速度分量， $T$  是温度， $\rho$ 、 $\mu$ 、 $c_p$  和  $\lambda$  分别是流体密度、流体粘度、比热和热导率。 $Q_R$  是辐射损耗， $k_B$  是玻尔兹曼常数， $\phi$  为电标量势， $\sigma$  是电导率， $j = -\sigma \nabla \phi$  为电流密度， $j_z$  和  $j_r$  分别是电流密度的轴向分量和径向分量。 $B_\theta$  是磁场分量，可以通过以下公式进行计算：

$$\nabla^2 A = -\mu_0 j \quad (6)$$

$$B_\theta = \nabla \times A \quad (7)$$

上式中的  $A$  是磁矢量势， $\mu_0$  为磁导率。

## 1.2 颗粒运动及受热模型

对镍粉颗粒在等离子体中的运动轨迹和加热历程进行模拟时，作以下假设：（1）颗粒的运动轨迹只受流体阻力和自身重力的影响；（2）忽略颗粒间的相互

作用；（3）忽略颗粒蒸发对流体输运特性的影响；（4）不考虑颗粒内部温度梯度的影响；（5）忽略颗粒的热辐射。基于上述假设，镍粉颗粒的运动方程及能量平衡方程如下：

$$m_p \frac{du_p}{dt} = \frac{\pi}{8} d_p^2 \rho C_D (u - u_p) |u - u_p| + g(\rho_p - \rho) + F_R \quad (8)$$

$$C_p m_p \frac{dT_p}{dt} = \alpha \pi d_p^2 \rho C_D (T - T_p) - \varepsilon \sigma_{SB} \pi d_p^2 T_p^4 \quad (9)$$

上式中的  $\rho$  和  $u$  分别为等离子体密度和等离子体速度， $d_p$  为镍粉颗粒的粒径， $\alpha$  为传热参数， $m_p$  为颗粒的质量， $t$  为时间， $u_p$  为颗粒的运动速度； $C_D$  为阻力系数， $g$  为重力加速度； $F_R$  为热泳力； $C_p$  为颗粒的比热， $T$  为流体（等离子体）温度， $T_p$  为颗粒温度； $\varepsilon$  是颗粒发射率， $\sigma_{SB}$  是 Stefan-Boltzmann 常数。

## 1.3 工作条件、边界条件及数值计算方法

本研究利用 FLUENT 软件来模拟直流电弧热等离子体的流场分布及镍粉颗粒在等离子体中的运动及受热过程。模拟时所采用的电弧等离子体发生器装置结构示意图如图 1 所示。作为工质气体的氩气从工作气入口处（图 1 中的 Particle/gas inlet 位置）注入直流等离子体发生器中，工作气入口采用质量流量进口边界条件。外部区域的边界被设定为压力出口边界，其压强值为默认值 1.01 kPa。阴极弧尖的温度被设定为 3500 K，等离子体炬的内壁面温度设置为 300 K。阴极表面电流密度  $j = I/(\pi r^2)$ ，其中的  $r$  为阴极表面半径。阳极表面的电势  $\phi$  为 0。镍粉颗粒同样从反应气入口处送入，其初速与反应气流速相同。颗粒表面的初始温度设置为 300 K。镍金属材料的物理性质如表 1 所示。

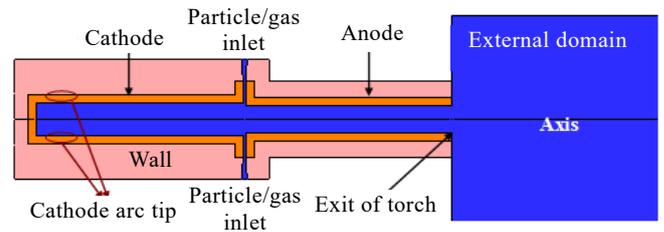


图 1 直流电弧等离子体炬装置的结构示意图

Fig.1 Structure diagram of DC arc plasma torch device

表 1 镍金属材料的物理性质

Table 1 Physical properties of nickel powder

Density/ kg·m <sup>-3</sup>	Specific heat/ J·kg <sup>-1</sup> ·K <sup>-1</sup>	Melting point/ K	Fusion enthalpy/ ×10 <sup>5</sup> J·kg <sup>-1</sup>	Boiling point/ K	Vaporization enthalpy/×10 <sup>5</sup> J·kg <sup>-1</sup>
890.2	734	1726	2.98	3187	6.20

控制方程组中的电标量势  $\phi$ , 磁矢量势  $A$  对应的标量方程可通过 FLUENT 中的 UDS 功能进行添加。采用 PISO 算法计算直流电弧热等离子体装置内部的温度及速度空间分布, 同时利用 FLUENT 中的离散相 (DPM) 模型对镍粉在等离子体中运动时, 颗粒温度、速度及粒径的变化规律进行计算和分析。

## 2 结果与讨论

### 2.1 直流电弧热等离子体的流场特性

图 2~图 4 依次给出了弧电流  $I=100\text{ A}$ , 工作气质量流量为  $V_{in}=4\text{ g/s}$  的情形下, 直流电弧等离子体温度、速度及流场空间分布的计算结果。

从图 2 中可以看出, 阴极弧尖及反应气入口位置处的等离子体温度较高, 其最高温度可达  $12800\text{ K}$ , 远超过镍金属材料的汽化点。此外, 当等离子体气体或粉末颗粒从反应气入口处注入热等离子体时, 反应

气入口周围的等离子体温度会突然收缩, 并在阳极的下游区域逐渐形成一个近似火焰状的温度分布。从图 3 可以看出, 阳极下游区域内速度的分布与温度的分布相似, 这意味着等离子体的速度与温度有关联: 受气体入口处气流作用的影响 (见图 4), 轴向速度最高值出现在气体入口下方的阳极区域到等离子体炬出口的中心线附近, 最大速度达到  $260\text{ m/s}$ 。然而, 在等离子体炬的阴极区域内, 其轴向速度并没有明显增加。

### 2.2 原料粉体粒径对镍粉颗粒加热过程的影响效应

原料粉体的初始粒径是影响镍粉颗粒在热等离子体中行为的重要参数之一。因此, 本研究将首先分析具有不同初始粒径 ( $d_{pi}$  在  $10\sim 30\text{ }\mu\text{m}$  之间) 的镍粉颗粒在直流电弧等离子体射流中的运动轨迹和加热过程。此处的工作条件与 2.1 节相同, 送粉速率为  $6\text{ g/min}$ 。

图 5 给出的镍粉颗粒运动轨迹计算结果表明, 初始粒径较小的颗粒沿径向进入等离子体炬内部后, 受等离子体流场的影响更大, 其运动轨迹将在流场拖曳力的作用下发生较大偏转, 最终沿着等离子体炬轴线附近的高温高速区域运动。因此, 粒径较小的颗粒能够从等离子体中吸收足够多的热量, 从而在更短的时间内被加热至完全熔融甚至蒸发。而初始粒径较大的颗粒的轨迹受流场作用的影响较小, 在惯性力的作用下, 大颗粒会在等离子体炬内沿径向运动了更远的距离后, 经阳极壁面附近的低温区域飞出等离子体炬, 从等离子体中吸收到的热量相对较少。因此, 在当前工作条件下, 尽量选初始粒径在  $20\text{ }\mu\text{m}$  以下的颗粒作为原料来进行纳米镍粉的制备。

图 6a 给出的颗粒温度随时间变化的计算结果也印证了上述观点: 在相同的条件下, 镍粉颗粒的初始粒径越小, 颗粒被加热至蒸发 (即颗粒温度达到镍金属材料沸点) 所需的时间也越短。此外, 图 6b 中的颗

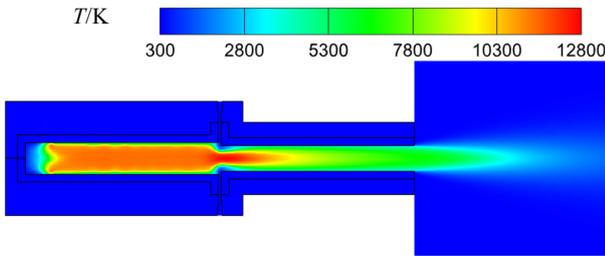


图 2 直流电弧等离子体的温度分布

Fig.2 Temperature distribution in DC plasma torch

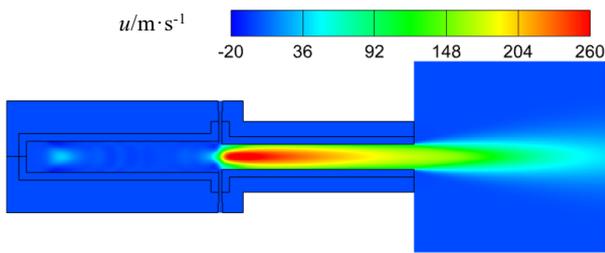


图 3 直流电弧等离子体的速度分布

Fig.3 Velocity distribution in DC plasma torch

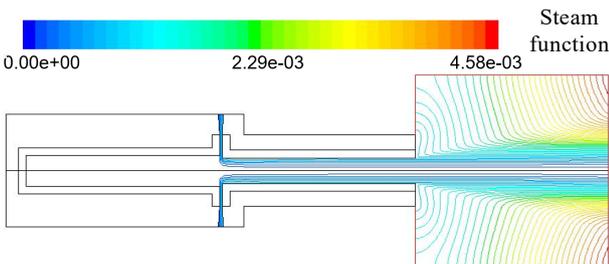


图 4 直流电弧等离子体炬内的流场分布

Fig.4 Flow field distribution in DC plasma torch

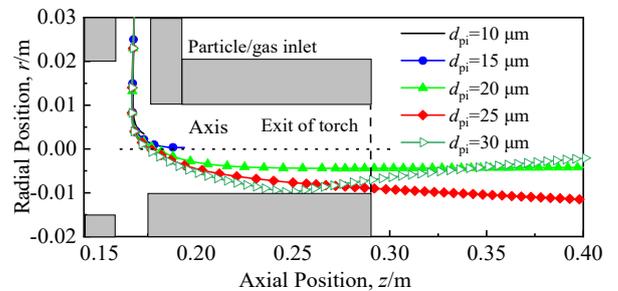


图 5 具有不同初始粒径的镍粉颗粒在空间中的运动轨迹

Fig.5 Trajectory of nickel powder particles with different initial particle sizes

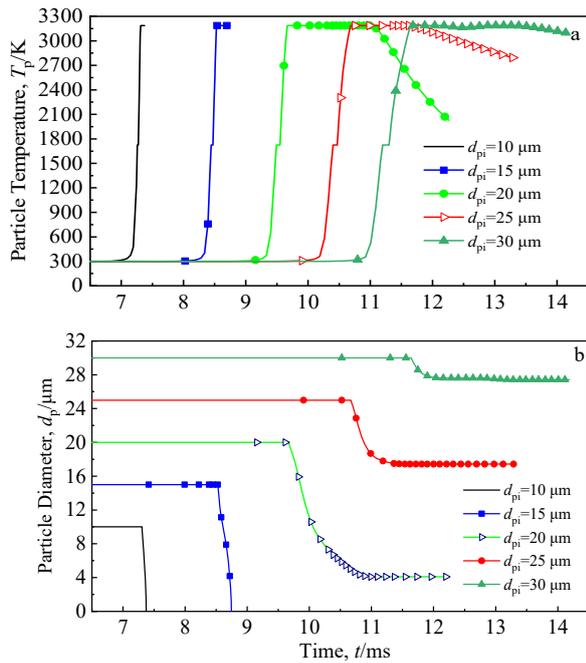


图 6 具有不同初始粒径的镍粉颗粒的颗粒温度  $T_p$  及粒径  $d_p$  随时间变化的曲线

Fig.6 Curves of particle temperature  $T_p$  (a) and diameter  $d_p$  (b) of nickel powder with different initial particle sizes as a function of time

粒粒径随时间变化的曲线则表明，由于颗粒在热等离子体内运动时发生了强烈蒸发的现象，其粒径会随着时间的推移而急剧减小，但只有初始粒径小于  $15 \mu\text{m}$  的颗粒粒径最终减小至  $0 \mu\text{m}$ 。这意味着在当前工作条件下，仅有粒径为  $15 \mu\text{m}$  以下的镍粉颗粒才能够被加热至完全蒸发。

### 2.3 工作气质量流量对镍粉颗粒加热过程的影响效应

工作气流量是影响直流电弧热等离子体制备纳米镍粉效果的重要工艺参数之一。下面将对工作气质量流量  $V_{in}$  在  $3\sim 5 \text{ g/s}$  范围内变化时，初始粒径分别为  $15$  和  $20 \mu\text{m}$  的镍粉颗粒在进入热等离子体后，直流电弧等离子体温度的空间分布及颗粒的加热过程进行模拟。

从图 7 中颗粒温度及粒径随时间变化的计算结果可以看出，当工作气体质量流量为  $3 \text{ g/s}$  时，所有初始粒径小于  $20 \mu\text{m}$  的镍粉颗粒均能够被加热至完全蒸发；而将工作气体质量流量提升至  $5 \text{ g/s}$  后，初始粒径为  $20 \mu\text{m}$  的镍粉颗粒在到达等离子体炬出口处时，其粒径仅下降至  $8 \mu\text{m}$  左右，这说明只有部分颗粒被加热至蒸发。

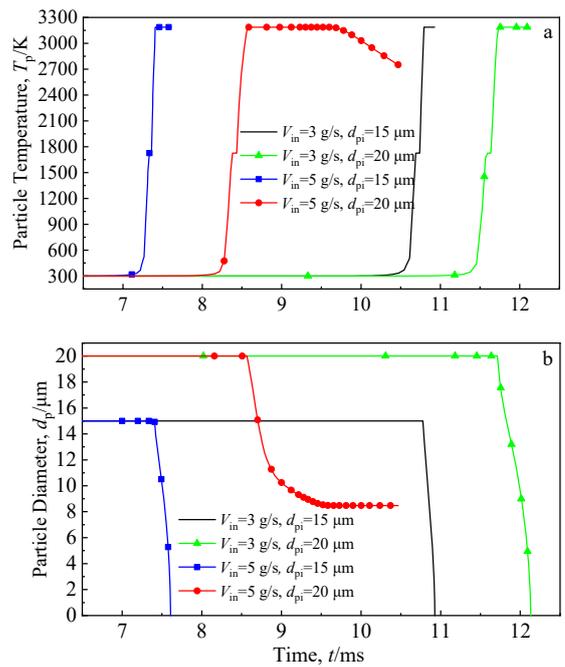


图 7 不同工作气体质量流量下初始粒径  $d_{pi}$  分别为  $15$  和  $20 \mu\text{m}$  时镍粉温度  $T_p$  及粒径  $d_p$  随时间变化曲线

Fig.7 Curves of particle temperature  $T_p$  (a) and diameter  $d_p$  (b) of nickel powder with initial particle size  $d_{pi}$  of  $15$  and  $20 \mu\text{m}$  as a function of time at different working gas mass flow rates

为了说明产生上述现象的原因，此处对工作气体质量流量发生改变时，直流电弧等离子体温度及流场速度的空间分布进行了计算。从图 8、图 9 给出的计算结果可以看出：当工作气体流量增加后，装置内部的等离子体温度会有所下降，同时装置轴线附近的流场速度最大值也从  $180 \text{ m/s}$  提升至  $270 \text{ m/s}$  左右。这意味着增加工作气体质量流量会减少镍粉颗粒在热等离子体内部停留时间，降低其从等离子体中获得的热量，从而使初始粒径较大的颗粒难以被加热至完全蒸发。因此，适当降低工作气流量对于提高镍粉的汽化率是有利的。

### 2.4 送粉速率对镍粉颗粒加热过程的影响效应

送粉速度是优化纳米材料制备过程的另一重要工艺参数。因此，接下来将重点研究不同的送粉速率 (FR 分别为  $3$  和  $9 \text{ g/min}$ ) 对镍粉颗粒在直流电弧等离子体中加热过程的影响效应。

从图 10 给出的粒径为  $15 \mu\text{m}$  的镍粉颗粒以不同的送粉速率进入装置后，等离子体温度沿轴向及径向分布的计算结果可以看出，当送粉速率增加时，出现

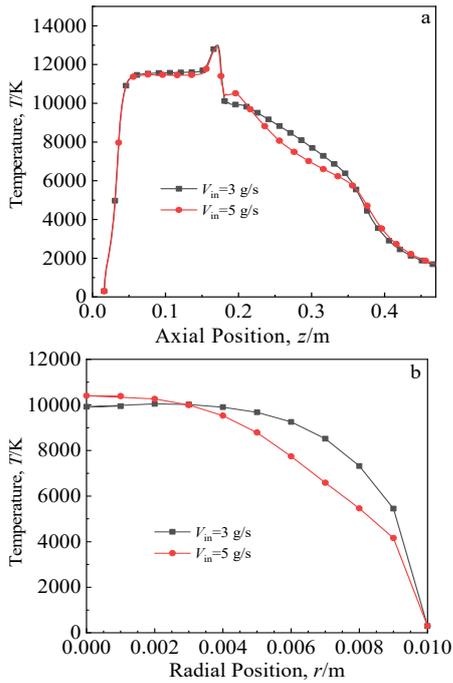


图 8 不同工作气体质量流量下等离子体温度沿轴向及径向  $r=0.19$  m 位置处分布的曲线图

Fig.8 Curves of plasma temperature distribution along the axial direction (a) and radial direction at  $r=0.19$  m (b) at different working gas mass flow rates

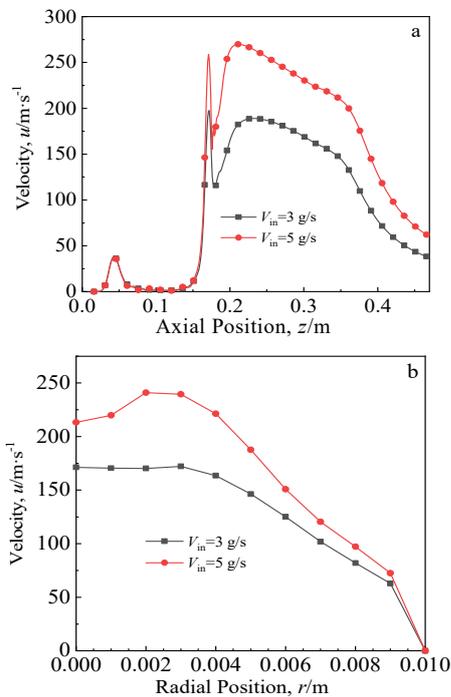


图 9 不同工作气体质量流量下等离子体速度沿轴向及径向  $r=0.19$  m 位置处分布的曲线图

Fig.9 Curves of plasma velocity distribution along the axial direction (a) and radial direction at  $r=0.19$  m (b) at different working gas mass flow rates

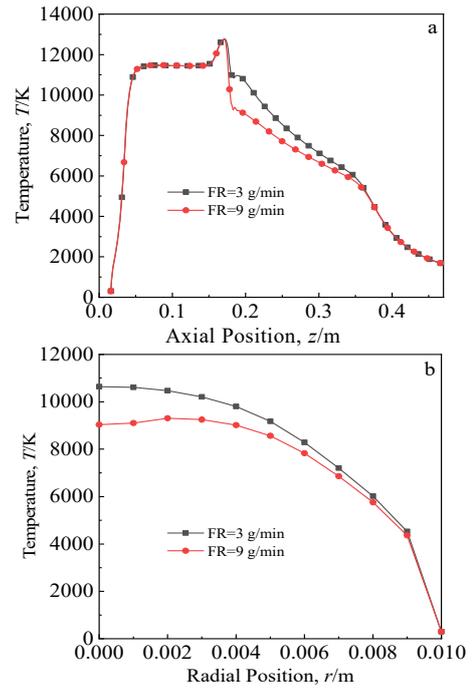


图 10 粒径为  $15 \mu\text{m}$  的镍粉颗粒以不同送粉速率进入等离子体炬后等离子体温度沿轴向及径向  $r=0.19$  m 位置处分布的曲线图

Fig.10 Curves of plasma temperature distribution along the axial direction (a) and radial direction at  $r=0.19$  m (b) after the nickel powder with particle size of  $15 \mu\text{m}$  entering the plasma torch at different feeding rates

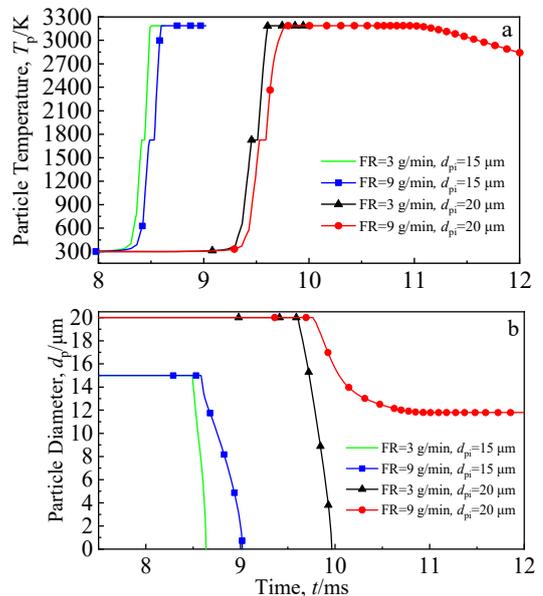


图 11 不同送粉速率下初始粒径  $d_{pi}$  分别为  $15$  和  $20 \mu\text{m}$  时镍粉颗粒温度  $T_p$  及粒径  $d_p$  随时间变化的曲线

Fig.11 Curves of particle temperature  $T_p$  (a) and diameter  $d_p$  (b) with initial particle size  $d_{pi}$  of  $15$  and  $20 \mu\text{m}$  as a function of time at different feeding rates

了文献[23]中所提到的等离子体冷却效应,即颗粒运动轨迹附近的等离子体温度显著下降。图 11 中的镍粉颗粒温度及粒径随时间变化的计算结果则表明,正是由于这种冷却效应的存在,当送粉速度从 3 g/min 增加到 9 g/min 时,初始粒径为 20  $\mu\text{m}$  的镍粉颗粒直至飞出等离子体炬,都未能被加热至完全汽化。镍粉颗粒的汽化率会随着送粉速度的增加而急剧下降,因此在利用直流电弧等离子体制备纳米材料实验过程中,需要通过合理地调整送粉速率来确保大部分的原料颗粒能够被加热到完全汽化。

### 3 结 论

1) 初始粒径较小的颗粒受等离子体流场的影响更大,会在流场拖曳力的作用下沿等离子体炬轴线附近的高温区域运动,从而能够从等离子体中获得更多的能量,从而在更短的时间内被加热至完全汽化。因此,在当前工作条件下,尽量选择初始粒径在 20  $\mu\text{m}$  以下的颗粒作为原料来进行纳米镍粉的制备。

2) 当工作气质量流量为 5 g/s 时,初始粒径在 20  $\mu\text{m}$  以上的镍粉颗粒仅能部分蒸发。这是由于增加工作气流量不仅会降低直流电弧等离子体的温度,而且还能大幅提升流场速度,这将使进入装置内的镍粉颗粒在高温区内停留的时间减少。因此,适当降低工作气流量对于提高镍粉的汽化率是有利的。

3) 镍粉颗粒的汽化率会随着送粉速度的增加而急剧下降,因此在利用直流电弧等离子体制备纳米材料实验过程中,需要通过合理的调整送粉速率来确保大部分的原料颗粒能够被加热到完全汽化,从而提高最终产物中纳米镍粉的含量,保障纳米产品的品质。

#### 参考文献 References

- [1] Liu Yifan, Zhu Kunlun, Li Xianglong *et al.* *Advanced Powder Technology*[J], 2018, 29(4): 863
- [2] Guo Chunxia, Chen Weidong, Yan Shufang *et al.* *Rare Metal Materials and Engineering*[J], 2023, 52(4): 1283
- [3] Zhao Meili, Gan Guoyou, Leng Chongyan *et al.* *Rare Metal Materials and Engineering*[J], 2023, 52(1): 6
- [4] Zhang Tao(张涛), Liu Yang(刘洋), Zhao Kai(赵凯) *et al.* *Materials Science & Technology*(材料科学与工艺)[J], 2018, 26(6): 51
- [5] Lv Li, Wang Yinglin, Cheng Pengfei *et al.* *Journal of Alloys and Compounds*[J], 2022, 904: 164054
- [6] Ye Kai(叶凯), Liang Feng(梁风), Yao Yaochun(姚耀春) *et al.* *Chemical Industry and Engineering Progress*(化工进展)[J], 2019, 38(5): 2252
- [7] Song Meihui(宋美慧), Li Yan(李岩), Zhang Yu(张煜) *et al.* *Rare Metal Materials and Engineering*(稀有金属材料与工程)[J], 2023, 52(2): 617
- [8] Park Si Taek, Kim Tae Hee, Park Dong Wha. *Applied Surface Science* [J], 2016, 374: 257
- [9] Ren Yangbin(任杨斌), Fan Yanping(范燕平), Liu Xianyun(刘宪云) *et al.* *Materials China*(中国材料进展)[J], 2022, 41(4): 288
- [10] Ghodke N P, Rayaprol S, Bhoraskar S V *et al.* *International Journal of Hydrogen Energy*[J], 2020, 45(33): 16591
- [11] Sivakumar S, Kumaresan L, Maria Sherin Bertilla D *et al.* *Applied Physics A*[J], 2021, 5: 128
- [12] Chen Xi(陈熙). *Heat Transfer and Flow of Thermal Plasma* (热等离子体传热与流动)[M]. Beijing: Science Press, 2009: 551
- [13] Kim Keun Su, Park Jin Myung, Choi Sooseok *et al.* *Physics of Plasmas*[J], 2008, 15(2): 023501
- [14] Oh Jeong Hwan, Lee Yong Hee, Kim Tae Hee *et al.* *International Journal of Plasma Environmental Science and Technology*[J], 2021, 15: 01002
- [15] Bykov Nikolay Y , Obraztsov Nikita V , Kobelev Anton A *et al.* *IEEE Transactions on Plasma Science*[J], 2021, 49(3): 1023
- [16] Shao Xueming, Zhang Kai, Xiong Hongbing. *Journal of Thermal Spray Technology*[J], 2015, 24, 309
- [17] Xiong Hongbing, Zhang Chengyu, Zhang Kai *et al.* *Nanomaterials*[J], 2016, 6(5): 94
- [18] Xiong Hongbing, Sun Weiqi. *Coatings*[J], 2017, 7(11): 207
- [19] Bobzin K, Öte M, Knoch M A *et al.* *Surface & Coatings Technology*[J], 2019, 364: 449
- [20] Bobzin K, Heinemann H, O'Brien A. *Journal of Thermal Spray Technology*[J], 2022, 31: 59
- [21] Elaissi Samira, Trabelsi Amira Ben Gouider, Alkallas Fatemah H *et al.* *Nanomaterials*[J], 2022, 12(10): 1763
- [22] Chen Lunjiang(陈伦江), Tang Deli(唐德礼), Cheng Changming(程昌明) *et al.* *High Voltage Engineering*(高电压技术)[J], 2013, 39(7): 1724
- [23] Zhu Langping(朱郎平), Lu Xin(路新), Liu Chengcheng(刘程程) *et al.* *Journal of Aeronautical Materials*(航空材料学报)[J], 2017, 37(3): 16

## Numerical Simulation of Nickel Nano-powder Preparing Process by DC Arc Thermal Plasma

Chen Wenbo<sup>1</sup>, Li Zijun<sup>1</sup>, Chen Lunjiang<sup>3</sup>, Feng Jun<sup>2</sup>, Yang Puqiong<sup>1</sup>

(1. College of Electrical Engineering, University of South China, Hengyang 421001, China)

(2. College of Mechanical Engineering, University of South China, Hengyang 421001, China)

(3. Southwestern Institute of Physics, Chengdu 610041, China)

**Abstract:** Study on vaporization process of nickel powder particles inside direct current thermal plasma can provide theoretical guidelines for improving preparation process of nickel nanopowder. In this research, the effects of particle size, working gas flow rate and powder feeding rate on the motion behavior and heating process of nickel particles in DC thermal plasma were investigated by coupled solution of the magnetohydrodynamic equations and particle thermodynamic equations. The results show that smaller particles can be heated to complete vaporization in a shorter time owing to longer residence time in the high temperature region and absorbing more heat from the plasma. Decrease in working gas flow rate and powder feeding rate can increase the energy of nickel particle obtained from plasma, which is beneficial to the increase in the vaporization rate of the particles and the quality improvement of the final prepared nickel nano-powder.

**Key words:** direct current thermal plasma; nickel nano-powder; vaporization process; numerical simulation

---

Corresponding author: Yang Puqiong, Ph. D., Professor, College of Electrical Engineering, University of South China, Hengyang 421001, P. R. China, E-mail: yangpuqiong@usc.edu.cn