

基于钛丝高频感应熔化气雾化制粉工艺的 熔化数值模拟及实验研究

郑明月^{1,2}, 张少明¹, 胡强¹, 徐骏¹, 毛卫民²,
贺会军³, 刘英杰³, 盛艳伟³, 赵文东³

(1. 北京有色金属研究总院, 北京 100088)

(2. 北京科技大学, 北京 100083)

(3. 北京康普锡威科技有限公司, 北京 101407)

摘要: 采用数值模拟和实验验证相结合的方法研究了增材制造用钛粉的新型制备工艺——钛丝高频感应熔化气雾化技术 (wire induction heating gas atomization, WIGA) 的钛丝感应熔化部分。数值模拟得到了钛丝感应熔化模型的最优参数: 感应线圈的夹角为 90°; 电源输出频率为 450 kHz; 线圈最优单匝直径为 8 mm。钛丝直径选定为 4 mm, 形成长度为 15 mm 金属液流的临界送丝速度为 45 mm/s。在此条件下, 金属液产生 350±50 °C 过热度时电源的临界输出功率为 34 kW。建立氩气保护氛围的钛丝感应熔化实验装置, 通过实验研究得到 TC4 钛丝形成长度为 15 mm 液流的临界送丝速度为 50 mm/s, 实验值与模拟值误差为 10.0%。在此条件下, 熔体产生 350±50 °C 过热度时, 电源的临界输出功率为 38 kW, 实验值与模拟值误差为 10.5%。实验结果与模拟结果相互验证, 得到了钛丝熔化的工程应用数据。

关键词: 增材制造; 钛丝高频感应熔化气雾化; 熔化模型; 数值模拟与实验研究

中图分类号: TG146.23

文献标识码: A

文章编号: 1002-185X(2019)06-1819-10

增材制造(additive manufacturing)是指通过连续的物理层叠加, 逐层增加材料来生成三维实体的先进制造新技术^[1]。以数字化、网络化、个性化、定制化为特点的增材制造技术将推动第三次工业革命。钛合金的增材制造技术广泛应用于航空航天、生物医疗和高端工业制造领域。钛合金粉是钛合金增材制造的基础, 也是产业链最重要的组成部分^[2]。基于钛合金的化学性质极其活泼的特性, 在高温时其与绝大多数单质及化合物均发生反应, 因此钛合金在熔炼时极易受到污染^[3]。高纯钛合金粉难制备, 其主要原因在于钛合金的熔炼技术, 因此严重制约着钛合金在增材制造领域的应用。适于增材制造的高品质钛合金粉应具有氧含量低, 无杂质污染的特性, 因此, 基于气雾化的钛合金熔炼要求为非接触式熔炼技术。

目前增材制造用球形钛及钛合金粉的主要制备方法为惰性气体雾化法、等离子雾化法和电极感应熔化气雾化法等^[4,5]。惰性气体雾化法(inert-gas atomization, IGA)是采用 He、Ar 等惰性气体作为雾化介质的制粉方法。1970 年代中期惰性气体雾化工艺产生^[6]。主要是借助高速气流对熔融金属液流进行冲击, 熔融金属

液流被破碎快冷形成金属粉末^[7]。钛及钛合金的化学活性很高, 很容易与氧、氢、氮等元素结合, 因此气体雾化所用的雾化介质是惰性气体氩气^[8]。1985 年美国的 Crucible Materials Corporation 发表了用水冷铜坩埚熔炼-Ar 气雾化钛及钛合金的第 1 项专利^[9]。等离子惰性气体雾化(plasma inert gas atomization, PIGA)是一种无陶瓷(ceramic-free)制备金属粉末的雾化法, 1990 年由德国 GKSS Research Center 发明^[10], 主要用于 Ti 粉生产。等离子旋转电极法(plasma rotating electrode process)由美国 Nuclear 公司于 20 世纪 70 年代发明。阳极金属棒放置于高速旋转(转速 15 000 r/min 以上)的旋转轴上, 在等离子热弧作用下熔化, 熔融金属液滴在离心力的作用下沿切线方向发散成小液滴, 最终凝固球化成粉。电极感应熔化气雾化法(electrode induction melting gas atomization, EIGA)技术是在 PIGA 的基础上发展而来的, 其特点是采用无坩埚技术, 原料 Ti 被加工成棒状直接放置于感应线圈中加热熔化, 这种设计避免了熔化过程中 Ti 与坩埚和导流管的接触^[11], 避免了污染, 保持粉末的纯净度^[12]。1990 年, 德国 Leybold AG 公司^[13]发表了无坩埚熔炼雾化

收稿日期: 2018-06-28

基金项目: 国家高技术研究发展计划(“863”计划)(2015AA042501)

作者简介: 郑明月, 男, 1985 年生, 博士, 北京有色金属研究总院, 北京 100088, 电话: 010-62058558, E-mail: zhengming1234567@163.com

Ti 及 Ti 合金粉末的专利。

本研究采用自主设计研发的钛丝高频感应熔雾化工艺 (wire induction heating gas atomization, WIGA), 实现钛丝无污染稳定熔化、形成稳定液流, 并具有高的熔体过热度。运用数值模拟与实验验证相结合的方法对钛丝熔化过程进行研究。基于钛丝熔化实际工况, 应用 COMSOL Multiphysics 5.0 有限元软件建立钛丝高频感应熔雾化三维模型, 设定边界条件, 得到直径 4 mm 钛丝形成长度为 15 mm 液流的最小送丝速度及最小电源输出功率。基于数值模拟结果进行工程实验, 验证模拟的可靠性并采集实验数据, 实现钛丝的连续稳定高过热度 ($\geq 350\text{ }^\circ\text{C}$) 熔化。

1 物理模型

1.1 钛丝高频感应熔雾化装备的建立

钛具有极活泼的化学特性, 极易与氧、氮等分子结合生成化合物, 因此在熔炼过程中极易被污染。高性能钛粉要求具有较高的纯净度, 杂质含量少、低含氧量, 因此不能采用传统坩埚熔炼金属钛。目前增材制造用球形钛粉的主要制备方法为惰性气体雾化法、等离子雾化法和电极感应熔雾化法等^[4,5,14], 以上工艺的优缺点如表 1 所示。每种工艺都无法同时实现钛粉生产的高纯度、连续性、高细粉收得率 ($D_{50} \leq 40\text{ }\mu\text{m}$) 和设备的低成本。

吸取国内外技术的优点 (非接触、无污染电极感

应熔炼、原料设计为丝材, 连续送料、紧耦合惰性气体雾化)、克服其缺点, 本课题组提出了钛丝高频感应熔雾化技术 (WIGA)。WIGA 技术采用送丝机实时送丝、无坩埚电极感应熔雾化与紧耦合惰性气体雾化相结合的工艺思路, 制备高品质超细钛合金金属粉末, 并且已经建立了实验室原型装置, 装备示意图如图 1 所示。

WIGA 工艺组合的优点为: (1) 电极感应熔雾化, 钛及钛合金粉的高生产效率、无污染熔雾化; (2) 采用熔雾化装置与雾化装置紧耦合布置, 液流产生后即被雾化气流限制并且雾化, 实现了钛及钛合金金属液的熔雾化位置与雾化位置的基本重合^[19], 最大限度地减少了钛金属液从熔雾化位置到雾化位置的热量损失, 保证了钛液雾化的过热度, 实现钛及钛合金的雾化的高细粉收得率; (3) 本工艺可实现密闭、高真空及连续工业条件下生产, 避免旋转电极雾化中高速动密封问题造成的钛及钛合金粉末的污染; (4) 可实现钛及钛合金丝材的工业化快速、连续送料, 避免了等离子火炬雾化的较低的生产效率问题^[20]; (5) 采用辅助保护气流设计, 辅助保护气流喷口喷射出的高速气流起到防止金属熔滴污染高频感应线圈的作用, 实现增材制造用钛及钛合金粉末的纯净制备; (6) 可通过调节钛及钛合金丝材的直径与送料速度、高频感应线圈的功率与频率、雾化气体的压强等变量获得不同粒度分布的钛及钛合金粉末, 钛及钛合金粉末的高球形度、窄粒度

表 1 不同雾化工艺的优缺点对比

Table 1 Comparison of advantages and disadvantages of different atomization processes

Atomization process	Inert-gas Atomization	Electrode induction melting gas atomization	Plasma rotating electrode process	Plasma inert gas atomization
Advantage	Avoid metal contamination during smelting	Non-polluting powder and low energy consumption in production	High powder purity and smooth surface	High fine powder yields
Disadvantage	Fine powder yield is low ^[15]	Fine powder yield is low, $\leq 45\mu\text{m}$ about 20% ^[16]	Fine powder yield is low and cannot be continuously produced ^[17]	The draft tube is easily corroded and the powder is easily contaminated ^[18]

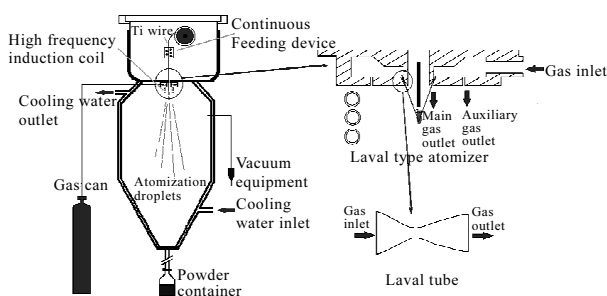


图 1 实验装置原理图

Fig.1 Schematic diagram of the experimental device

分布、低氧含量、低杂质含量、高松装密度和高流动性性能, 满足 3D 打印产业对高品质钛及钛合金粉末的要求。

钛丝高频感应熔化为本工艺的核心^[21], 因此对此进行系统的模拟与实验研究。感应加热过程主要涉及两个不同的物理量即电磁感应和热传导^[22,23], 因此完整的感应加热过程数值分析模型需包含电磁场和温度场方程。基础物理量的设置如表 2 所示。

1.2 电磁场微分方程的建立

麦克斯韦方程微分形式为^[24]:

$$\nabla \times H = J \quad (1)$$

表 2 基础物理量的设置

Table 2 Nomenclature of physical symbols

Nomenclature	Physical meaning	Unit
H	Magnetic field intensity	$A \cdot m^{-1}$
J	Current density	$A \cdot m^{-2}$
B	Magnetic flux density	T
A	Magnetic potential vector	$Wb \cdot m^{-1}$
E	Electric field intensity	$N \cdot C^{-1}$
Q_e	Heat power by eddy currents	$W \cdot m^{-3}$
n	normal direction	
C_p	Heat capacity at constant pressure	$J \cdot kg^{-1} \cdot K^{-1}$
k	Thermal conductivity	$W \cdot m^{-1} \cdot K^{-1}$
L	Latent heat	$kJ \cdot kg^{-1}$
q_r	Energy losses by radiation	W
T_{amb}	Temperature of ambient	K
v	Velocity	$m \cdot s^{-1}$
g	Gravity vector	$m \cdot s^{-2}$
F_{st}	Surface tension	N
t	Time	s
d	Diameter	m
r	Radius	m
P	Power	kW
m	Mass	kg
Q	Energy	J
h	Height	m
Greek letters		
α	The angle between the coil and the horizontal plane	(°)
ω	Angular frequency	$rad \cdot s^{-1}$
ε	Dielectric constant	$C^2 \cdot N^{-1} \cdot m^{-2}$
μ	Magnetic permeability	$H \cdot m^{-1}$
μ'	Air viscosity	$Ns \cdot m^{-2}$
ρ	Workpiece density	$kg \cdot m^{-3}$
γ	Viscosity	$mPa \cdot s$
σ	Conductivity	$\Omega^{-1} \cdot m$
δ	Penetration depth	m
η	Effectiveness	%
Subscripts		
e	Vortex	
p	Pressure	
r	Radiation	
amb	Around	
st	Surface tension	
wo	Jobs	
do	Drop	
ne	Necking	
he	Heating	
ou	Output	
so	Solid state	
li	Liquid state	
ss	Semi-solid	

$$B = \nabla \times A \quad (2)$$

$$J = \sigma E + j\omega D \quad (3)$$

$$E = -j\omega A \quad (4)$$

其中， ∇ —哈密顿算子， $\nabla = i \frac{d}{dx} + j \frac{d}{dy} + k \frac{d}{dz}$ ，其中

$\nabla \times A$ 为旋度算符， j —复数， $j^2 = -1$ 。

电磁场的本构方程为：

$$D = \varepsilon E \quad (5)$$

$$B = \mu H \quad (6)$$

其中 $\varepsilon = \varepsilon_r \varepsilon_0$ —介电常数 ($C^2 \cdot N^{-1} \cdot m^{-2}$)， ε_r —相对介电常数， $\varepsilon_0 = 8.854 \times 10^{-12}$ —真空介电常数 ($C^2 \cdot N^{-1} \cdot m^{-2}$)； $\mu = \mu_r \mu_0$ —磁导率 (H/m)， μ_r —相对磁导率， $\mu_0 = 4\pi \times 10^{-7}$ —真空磁导率 ($H \cdot m^{-1}$)。

从以上方程中可以得出控制方程如下：

$$Q_e = \frac{1}{2} R_e (JE^*) \quad (7)$$

电磁热源 Q_e 是由涡流效应产生。

熔化模型的边界条件如图 2b 所示。工件和线圈被包围在球形计算域 1 的氩气氛围中，其边界上施加有磁绝缘条件，这使得磁场的法向分量为零^[25,26]，这时将磁势的切向分量设置为零的边界条件为 $nA = 0$ 。

通量平行条件：

$$A = 0 \quad (8)$$

通量标准情况：

$$\frac{\partial A}{\partial n} = 0 \quad (9)$$

其中 n 为边界的标准单位。在与对称轴平行的计算域 2 的边界上，设置通量平行条件（在 $r=0$ 处 $A=0$ ）。

1.3 温度场微分方程的建立

电磁感应的热功率由涡流效应产生，其根据集肤效应规律分布在工件上。钛丝由固态熔化为液态的过程有熔化潜热产生^[25]。根据经典热方程，该过程为：

$$\rho C_p \frac{\partial T}{\partial t} - \nabla \cdot (k \nabla T) = Q_e \quad (10)$$

$$\rho = \theta \rho_{\text{phase 1}} + (1 + \theta) \rho_{\text{phase 2}} \quad (11)$$

$$C_p = \frac{1}{\rho} (\theta \rho_{\text{phase 1}} + (1 + \theta) \rho_{\text{phase 2}}) + L \frac{\partial \alpha_m}{\partial T} \quad (12)$$

$$k = \theta \rho k_{\text{phase 1}} + (1 - \theta) k_{\text{phase 2}} \quad (13)$$

$$\alpha_m = \frac{1 (1 - \theta) \rho_{\text{phase 2}} - \theta \rho_{\text{phase 2}}}{2 \theta \rho_{\text{phase 1}} + (1 - \theta) \rho_{\text{phase 2}}} \quad (14)$$

其中 θ 为相的相对含量， L 是由相 1 转化为相 2 的潜热 ($kJ \cdot kg^{-1}$)。

热传导模型（图 2b）的边界条件为：

$$q = 0 \quad (15)$$

$$T = T_0 \quad (16)$$

式 (15) 为沿着 z 轴的绝热条件，式 (16) 表示围绕整个数值模型的计算域 2 的其余边缘上的温度变

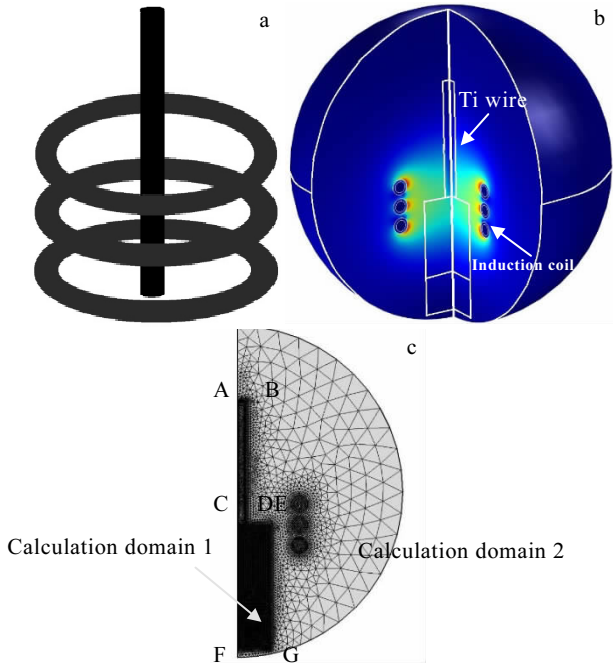


图 2 加热模型

Fig.2 Induction heating model: (a) three-dimensional model geometry, (b) two-dimensional axisymmetric boundary conditions and calculation domains, (c) meshing of the induction heating computation model

化。工件和空气之间的辐射为热损耗的边界条件：

$$q_r = \varepsilon \sigma_s (T_{amb}^4 - T^4) \quad (17)$$

其中 ε 为发射率 ($\varepsilon=0.3$), σ_s 为斯蒂芬-玻尔兹曼常数 ($\text{W}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{K}^{-4}$) [25,26]。

1.4 边界条件划与网格划分

钛丝感应熔化计算域的划分如图 2b 所示, 边界条件设定如表 3 所示。计算域 1 为氩气氛围。钛丝沿中心线 AC 为轴线呈中心对称布置。设定 DE 和 EG 为无速度线。CD 线为质量入口, 钛丝给进速率即为流入速率 v_0 , 计算域 1 的初始温度为 T_0 。计算域 2 对钛丝给进速率 v_0 , 熔化温度 T 进行求解。

由于三维模型计算量大, 为满足计算精度并保证计算的顺利进行, 对钛丝所在的 ABCD 区域和计算域 2 进行加密剖分, 越靠近工件和计算域 2 表面的网格划分越密。为降低计算量, 对钛丝和计算域 2 之外的其他部分网格密度适当降低, 如图 2c 所示。

2 模拟研究

钛丝感应熔化会形成连续液滴, 当送丝速度达到一定的值时则会形成一段连续液流^[27]。对于气-液两相流的雾化过程, 要求液流稳定进入雾化区, 最优状态是以连续液流的形式进入, 本研究要求液流以连续状态进入雾化区的最短液流长度 h 为 15 mm, 如图 3 所示。

表 3 边界条件设定

Table 3 Boundary conditions

Boundary conditions	AC	CF	AB	BD	CD	DE	EG	FG
$v/\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$	$\frac{\partial v}{\partial r} = 0$	$v=0$	v_0	$n\cdot v=0$	v_0	$n\cdot v=0$	$n\cdot v=0$	$v=0$
P/Pa	0	0	0	0	0	0	0	0
$\mu'/\text{N}\cdot\text{s}\cdot\text{m}^{-2}$	$\frac{\partial \mu'}{\partial r} = 0$	$\mu'=0$	$\frac{\partial \rho \mu'}{\partial r} = 0$	$\mu'=0$	$\frac{\partial \rho \mu'}{\partial r} = 0$	$\mu'=0$	$\mu'=0$	$\mu=0$

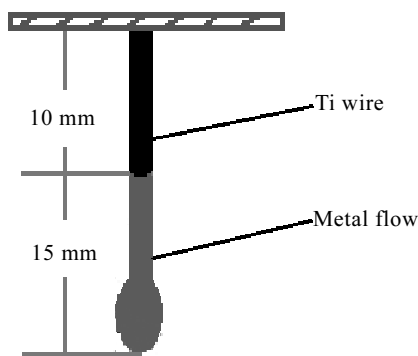


图 3 模拟模型几何参数

Fig.3 Geometric parameters of the simulation model

基于 WIGA 装备的设计特点, 要求雾化区在感应线圈内部, 因此对线圈直径有严格的限制, 根据实际工况并综合表 4, 本研究设定线圈最小内直径 d_2 为 24 mm。

每个感应线圈的长度主要是根据所用电源功率和每个线圈铜管所允许的最大长度来确定。对大多数有色金属来说, 每个加热装置只有一个感应线圈, 沿它

表 4 穿透-加热感应线圈的空气间隙

Table 4 Air-through gap of the through-heating induction coil^[28]

Frequency/kHz	1	3	10	450
Metal workpiece temperature/ $^{\circ}\text{C}$	1250	1250	1250	≥ 1250
Air gap distance/mm	50	62	62	6~25
Workpiece diameter/mm	0~10			

的长度方向没有间隙。对于电气计算来说，采用工件最小长度加上 25~75 mm 来作为感应线圈的长度就足够了，因此本研究采用三匝线圈。选择夹角 α 为 90° 的线圈进行研究，如图 4 所示。

采用 COMSOL 有限元模拟软件，以实际工况为基础，对电磁感应熔化钛丝进行模拟。模拟研究的二维和三维轴对称几何图如图 2 所示。钛丝直径为 4 mm，放置在三匝对称感应加热线圈的中心，模拟研究的所有物理参数如表 5 所示。根据特征尺寸进行三维模型的建立，以三角形进行网格划分，网格由 153 587 个单元组成，如图 2c 所示。

在进行熔化数值模拟时，为了便于计算并获得好的模拟结果，采用如下准则：(1) 钛丝的感应熔化为完全轴对称形式；(2) 熔化过程发生在纯氩气氛围内；(3) 感应线圈铜管为中心水冷结构；(4) 钛丝给进部分与熔化部分质量相等，物料守恒；(5) 模拟中忽略辐射热，计算中对其进行补偿；(6) 钛丝给进速度即为其模拟时的初速度。

通过熔化模拟研究确定电源的最优输出频率 f_{ou} ；形成 15 mm 连续液流所需的最小送丝速度 v_0 和实现 350±50 °C 过热度的最小电源输出功率 P_{ou} 。

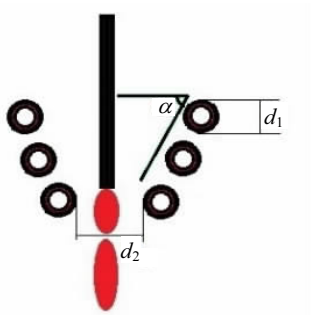


图 4 线圈布置图

Fig.4 Schematic of coil heating

表 5 物理参数

Table 5 Physical parameters of the calculation model	
Physical parameter	Value
Workpiece material	Titanium
Workpiece size (Ti wire), d /mm	4
Workpiece shape	Cylinder
Coil material	Copper
Number of coil turns	3
Single coil spacing/mm	1
Inside diameter of the coil, d_2 /mm	24
Single coil copper coil diameter, d_1 /mm	8
The initial temperature, T_0 /K	300
Calculation domain 1, $W \times H$ /mm	40×40
Calculation domain 2, $W \times H$ /mm	5×15

2.1 最优电源输出频率

对于低电阻率的有色金属，其最佳频率 f 的设定应满足： d_0/δ 的范围为 4~4.5（其中 d_0 为加热工件直径， δ 为熔深）^[28]。表 6 给出了一些典型的频率。

根据式 (17)，电极感应穿透深度与电源频率的关系，如图 5 所示。

为了准确确定高频电源频率的最优值，采用电源 P_{ou} 为 40 kW， v_0 为 50 mm/s，不同频率 (f_{ou} =300, 350, 400, 450, 500 kHz) 进行模拟计算，电源输出频率与钛金属熔体过热度的关系如图 6 所示。

分析图 6 可知，频率从 300 kHz 到 450 kHz，随频率的增加熔体过热度不断增加，并且增加的速率逐

表 6 用于有色金属的典型频率

Table 6 Typical frequencies for non-ferrous metals	
d_0 /mm	f
0~12	500~10 kHz
12~25	10~3 kHz
25~75	1 kHz
>75	50 Hz

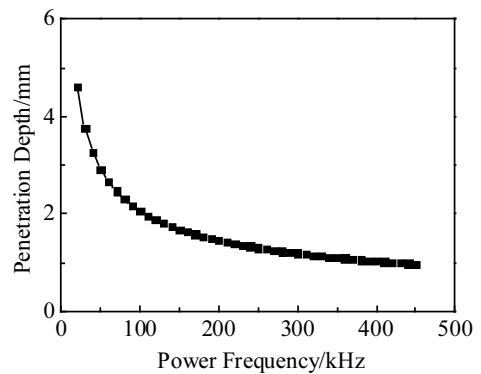


图 5 电源频率与熔透深度的关系

Fig.5 Relationship between power frequency and penetration depth

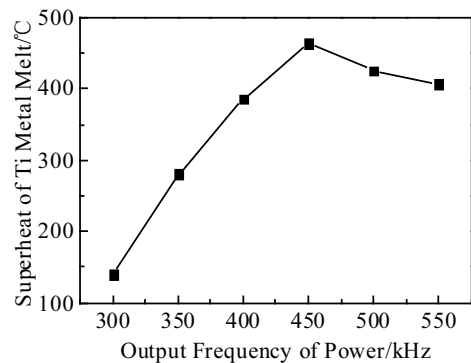


图 6 电源输出频率与钛金属熔体过热度关系

Fig.6 Relationship between output frequency of power supply and degree of superheat of titanium metal melt

渐减慢。当频率超过 450 kHz 继续增加，钛熔体过热度反而下降。分析原因为频率大于 450 kHz 后，熔深 δ 过小，造成加热效率降低^[24]，溶体过热度下降。因此频率 450 kHz 为本研究工况下的最优频率。

2.2 形成液流临界送丝速度

雾化过程的稳定进行是基于雾化气流和金属液流的稳定供给。要求金属液以液流的形式连续流入雾化区。根据平衡液滴的滴重法理论，钛液流前部某点形成颈缩断裂点，断裂点以下的部分会以液滴的形式滴落^[29,30]。经历颈缩阶段，颈缩半径 r_{ne} 会变得很小，在重力作用下会很快断裂，形成液滴：

$$m_{do}g = 2\pi r_{ne}\gamma f_D \tag{18}$$

$$f_D = m / \rho r_{do}^3 \tag{19}$$

$$h = h_1 + h_2 \tag{20}$$

其中： m_{do} 为液滴质量 (kg)， r_{ne} 为颈缩半径 (m)， γ 为钛液粘度 (mPa·s)， f_D 为过渡函数， r_{do} 为液滴的等效半径 (m)， ρ 为钛金属液的密度 (kg/m^3)， h 为液流总长度， h_1 为颈缩液滴长度， h_2 为颈缩液流长度。

根据式 (18)，颈缩液滴的重力与颈缩界面的表面张力相等时即为液流稳定的临界条件。液流进一步流入颈缩液滴，其重力将大于颈缩面的表面张力，此时会形成高度为 h_1 的颈缩液滴，液流出现扰动。本研究要求在颈缩液滴产生的临界条件时刻能形成 $h=15\text{ mm}$ 的稳定液流，如图 7 所示。

模拟条件为 d_1 为 8 mm， P_{ou} 为 40 kW， f_{ou} 为 450 kHz，调节钛丝给进速度，得到 $h=15\text{ mm}$ 的稳定液流。图 8 为不同钛丝给进速度条件下，熔体的连续情况。从图中可以看出， v_0 从 30 mm/s 增加为 50 mm/s 的过程中，金属钛的溶体由液滴变为连续液流。当送丝速度为 45 mm/s 时，能形成 15 mm 连续液流，满足研究要求。

2.3 实现过热度的临界功率

对于高频感应电源，其热效率为工件获得的热功率 P_{he} 与电源的输出功率 P_{ou} 的比值，如式 (21) 所示。根据钢棒材感应加热^[22]及有色金属感应加热^[31]的经验，本研究取热效率 η 为 20%。图 9 为一定质量的钛丝被加热熔化并形成一定过热度所需要的总热量 Q_{sum} ，其由 3 部分组成，即固态金属升温吸收的热 Q_1 ；金属晶体熔化过程中吸收的相变潜热 Q_2 和液态金属形成一定过热度所吸收的热 Q_3 (要求溶体过热度 ΔT_{su} 为 $350\pm 50\text{ }^\circ\text{C}$)。式 (22)、(23) 和 (24) 为 Q 的求解方法。式 (25) 为钛丝质量的求解方法。对于直径为 4 mm 实验钛丝，熔化时间 $t_0=60\text{ s}$ ，钛丝给进速度 $v_0=45\text{ mm/s}$ 。

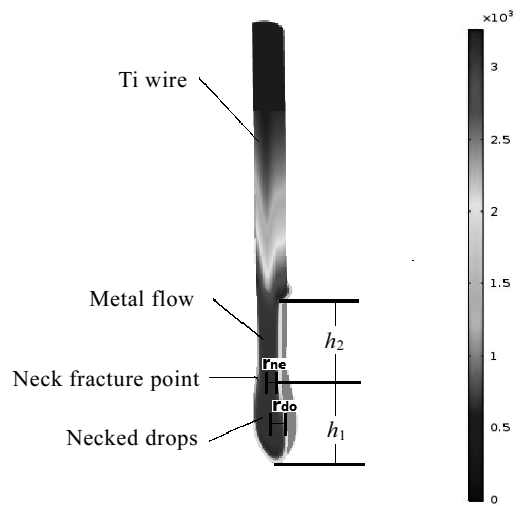


图 7 滴重法示意图

Fig.7 Schematic diagram of droplet gravity method

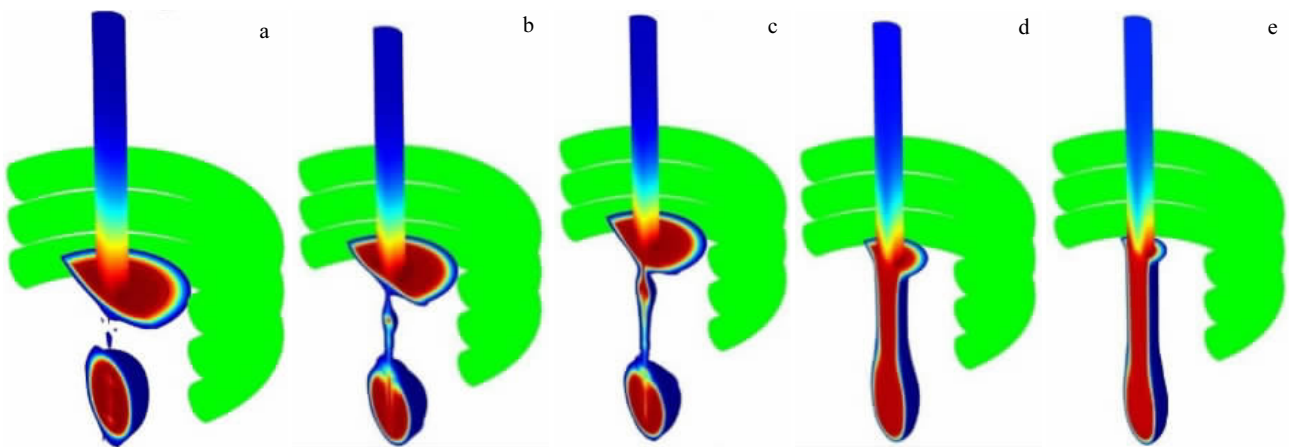


图 8 形成液流的最小给进速度

Fig.8 Minimum feed rate that can form the flow: (a) 30 mm/s, (b) 35 mm/s, (c) 40 mm/s, (d) 45 mm/s, and (e) 50 mm/s

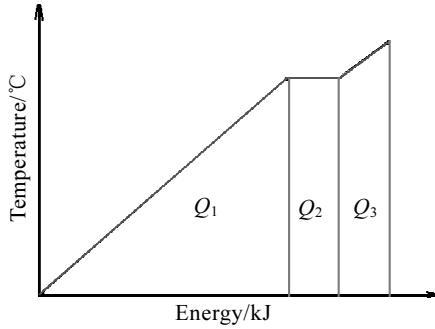


图 9 总热量的组成

Fig.9 Several components of Q

$$\eta = \frac{P_{he}}{P_{ou}} \quad (21)$$

$$P_{he} = \frac{Q_{sum}}{t_0} \quad (22)$$

$$Q_{sum} = Q_1 + Q_2 + Q_3 \quad (23)$$

$$Q_{sum} = c_{so}m\Delta T_1 + m\Delta h_{ss} + c_{li}m\Delta T_{su} \quad (24)$$

$$m = \rho_{so}\pi\left(\frac{d_0}{2}\right)^2 v_0 t_0 \quad (25)$$

其中： ΔT_1 为固态金属到熔点的温度变化（ $^{\circ}\text{C}$ ）， ΔT_{su} 为液态金属的过热度（ $^{\circ}\text{C}$ ）， m 为熔化工件的质量（ g ）， c_{so} 为固态金属比热容（ $\text{J}\cdot\text{kg}^{-1}\cdot^{\circ}\text{C}^{-1}$ ）， c_{li} 为液态金属比热容（ $\text{J}\cdot\text{kg}^{-1}\cdot^{\circ}\text{C}^{-1}$ ）， ρ_{so} 为钛丝密度（ kg/m^3 ）， Δh_{ss} 为钛的熔化潜热（ kJ/kg ）。

钛丝在 $t_0=60\text{ s}$ 时间内，送丝长度为 $v_0 t_0=2700\text{ mm}$ ，由式（25）可得熔化钛丝的质量 m 为 166.8 g ，将其代入式（24）可得 $Q_{sum}=420.6\text{ kJ}$ ，将 Q_{sum} 代入式（22）可得 $P_{he}=7\text{ kW}$ ，将 P_{he} 代入式（21）可以得到 $P_{ou}=35\text{ kW}$ 。

基于此前研究结果，设计感应线圈，调节电源频率和钛丝给进速度，以 P_{ou} 的结果为参考值，设定电源输出功率，进行模拟研究。模拟结果如图 10 所示，钛丝熔化形成过热度 ΔT_{su} 为 $350\pm 50\text{ }^{\circ}\text{C}$ 的熔体的临界输出功率 P_{ou} 为 34 kW 。

3 实验研究

基于钛丝高频感应熔化模拟研究的结果，展开钛丝熔化实验研究。熔化设备主要有高频感应电源、感应线圈系统、原料钛丝、连续送丝系统、氩气供应系统、冷却水系统和观察系统组成。

高频感应电源：采用中国某厂生产的 SPG400K-100 分体电源，额定功率 90 kW ；感应线圈系统：为钛丝感应熔化的主要工作部件，为钛丝熔化提供热源，线圈为三匝中空水冷铜管， d_1 为 8 mm ， α 为 90° ，线

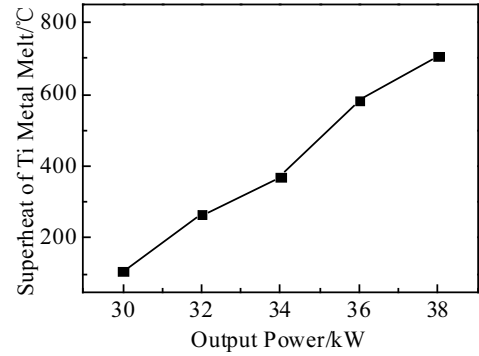


图 10 不同电源输出功率的钛金属熔体过热度

Fig.10 Superheat of Ti melt at different output power

圈布置情况如图 11 所示；原料钛为 $d_0=4\text{ mm}$ 的 TC4 丝材，氧含量 $\leq 500\text{ }\mu\text{g}/\text{g}$ ；连续送丝系统：由矫直系统、电机机头和自动化控制系统组成，起矫直钛丝和控制送丝速度作用；氩气供应系统：氩气从导管流出，建立氩气熔化氛围；冷却水系统：为高频感应线圈提供冷却水；观察系统：用来观察熔体的熔化的稳定情况，架设热像仪测定熔体实际温度。

根据高频感应钛丝熔化模拟结果，进行钛丝感应熔化实验。首先要确定钛丝形成 15 mm 连续液流的临界送丝速度 v 。

钛丝熔化实验，首先开启设备的冷却水系统，对感应线圈和熔化罐进行冷却；开启氩气供给系统，使熔化区充满氩气氛围；开启高频感应电源（输出功率设定为 40 kW ）同时开启钛丝连续送丝系统，原料钛丝在线圈内部连续熔化；开启热像仪，实时监测钛熔体表面温度。调节钛丝给进速率 v ，使钛金属熔体形成长度为 15 mm 液流，得到此时的 v 。

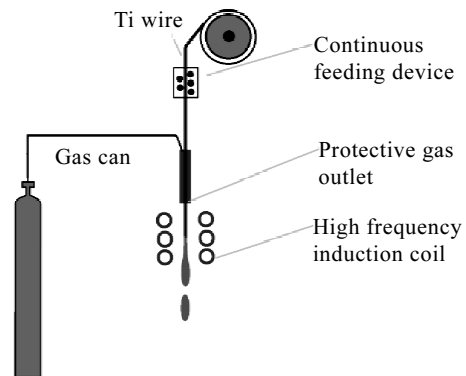


图 11 钛丝熔化装备原理图

Fig.11 Schematic of Titanium wire melting experimental equipment



图 12 钛丝熔化实验

Fig.12 Titanium wire melting experiments at different feed rates: (a) 20 mm/s, (b) 30 mm/s, (c) 40 mm/s, (d) 50 mm/s, and (e) 60 mm/s

图 12 为不同钛丝给进速度下的熔化情况。如图 12a、12b 和 12c, v_0 为 20~40 mm/s 时, 熔体为间断的连续液滴, 随速度增加, 液滴下落的频率增加。如图

12d 和 12e 所示, 当 v_0 为 50 mm/s 时, 熔体会产生 10~15 mm 长的金属液流, 并保持稳定存在。 v_0 继续增大到 60 mm/s, 形成熔体 > 15 mm 的金属液流。钛丝熔化实验值与模拟值误差为 10.0%, 实验结果对模拟研究结果进行了验证。



图 13 钛丝熔化实验测温结果

Fig.13 Temperature measurement results of titanium wire melting experiment

对钛丝进行熔化实验研究, 采用 FLIR-T620 高清热成像测温仪对电磁感应熔化钛金属液滴的整体进行测定。测温范围为 -40 °C 至 +2500 °C, 误差范围为 ±2%。设定 v_0 为 50 mm/s, f_{ou} 为 450 kHz, 调节电源输出功率 P_{ou} 得到熔体过热度 ΔT_{su} 为 350 ± 50 °C。通过实验研究, 得到钛丝实现熔体过热度 ΔT_{su} 为 350 ± 50 °C 的临界 P_{ou} 为 38 kW, 测温结果如图 13 所示。

在钛丝熔体过热度 ΔT_{su} 为 350 ± 50 °C 时, 所得临界功率实验值与模拟值对比, 平均误差为 10.5%, 误差较小, 实验和模拟相互验证。

4 结 论

1) 模拟研究得到了钛丝感应熔化模型的最优参

数: 电源输出频率为 450 kHz。

2) 模拟研究得到了钛丝形成长度 15 mm 液流的临界送丝速度为 45 mm/s。在此条件下熔体产生过热度为 350 ± 50 °C 时, 电源的临界输出功率为 34 kW。

3) 实验研究得到了 TC4 钛丝形成长度 15 mm 液流的临界送丝速度为 50 mm/s, 实验值与模拟值误差为 10.0%。在此条件下熔体产生过热度为 350 ± 50 °C 液流时, 电源的临界输出功率为 38 kW, 实验值与模拟值误差为 10.5%。实验结果与模拟结果相互印证, 得到了钛丝熔化的工程应用依据。

参考文献 References

- [1] Zhao Xiaohao(赵霄昊), Zuo Zhenbo(左振博), Han Zhiyu(韩志宇) et al. *Materials Review*(材料导报)[J], 2016, 30(23): 120
- [2] Kima Y, Kima E P, Song Y B et al. *Journal of Alloys and Compounds*[J], 2014, 603: 207
- [3] Zhang Baicheng, Liao Hanlin, Coddet C. *Applied Surface Science*[J], 2013, 279(8): 310
- [4] Antony L V M, Reddy R G. *JOM*[J], 2003, 55(3): 14
- [5] Moll J H. *JOM*[J], 2000, 52(5): 32
- [6] Mais B, Mowbray G A. *Metal Powder Report*[J], 1998, 53(11): 30
- [7] Liang Yongren(梁永仁), Wu Yinjiang(吴引江). *World Non-ferrous Metals*(世界有色金属)[J], 2016(12): 150
- [8] Heidloff A J, Rieken J R, Anderson I E et al. *JOM*[J], 2010, 62(5): 35
- [9] Charles F Y, John H M. *US Patent*, 4544404[P], 1985
- [10] Leybold A. *EP Patent*, 0451552 A1[P], 1991
- [11] Mangabhai D, Araci K, Akhtar M K et al. *Key Engineering Materials*[J], 2013, 551: 57
- [12] Franz H, Plöchl L, Schimansky F P. *Titanium Org*[J], 2008(9): 1
- [13] Hohmann M, Pleier S. *Acta Metallurgica Sinica*[J], 2005, 18(1): 15
- [14] Zheng Mingyue, Zhang Shaoming, Xu Jun et al. *Chinese Materials Conference*[C]. Singapore: Springer, 2017: 35
- [15] Yolton F, Froes F H. *Titanium Powder Metallurgy*[M]. Waltham: Butterworth-Heinemann, 2015: 21
- [16] Wei Mingwei(魏明炜), Chen Suiyuan(陈岁元), Guo Kuai-kuai(郭快快) et al. *Materials Review*(材料导报)[J], 2017, 31(12): 64
- [17] Lu Lingliang(陆亮亮), Zhang Shaoming(张少明), Xu Jun(徐骏) et al. *Rare Metals*(稀有金属)[J], 2017(1): 94
- [18] Kroeger J, Marion F, Kroeger J et al. *Powder Injection Moulding International*[J], 2011, 5(4): 55
- [19] Zhang Shaoming(张少明), He Huijun(贺会军), Hu Qiang(胡强) et al. *CN Patent*(中国专利), 201711450429.0[P], 2017
- [20] Zhang Shaoming(张少明), He Huijun(贺会军), Zhao Xinming(赵新明) et al. *CN Patent*(中国专利), 201711450429.0 [P], 2017
- [21] Bojarevics V, Roy A, Pericleous K. *Compel International Journal for Computation & Mathematics in Electrical & Electronic Engineering*[J], 2011, 30(5): 1455
- [22] Kranjc M, Zupanic A, Miklavcic D et al. *International Journal of Heat & Mass Transfer*[J], 2010, 53(17): 3585
- [23] Bui H T, Hwang S J. *International Journal of Heat & Mass Transfer*[J], 2015, 86(3): 16
- [24] Zhao Qianzhe(赵前哲). *Numerical Simulation and Experimental Research for the Induction Heating Process of Steel Bar Production Line*(棒材生产线感应加热过程的数值模拟及实验研究)[D]. Beijing: North China Electric Power University, 2013
- [25] Lu Liangliang, Zhang Shaoming, Xu Jun et al. *International Journal of Heat & Mass Transfer*[J], 2017, 108: 2021
- [26] Gu Yujiang(顾煜炯), Yao Jian(姚健), Zhou Zhaoying(周兆英) et al. *Acta Metallurgica Sinica*(金属学报)[J], 1994, 30(12): 543
- [27] Dai Yu(戴煜). *Study on Super High Temperature Atomizing Process and Mechanism for Spherical Tungsten Carbide Powder*(球形碳化钨粉末的超高温雾化制备技术及机理研究)[D]. Changsha: Central South University, 2008
- [28] Davies J, Simpson P (translated by Zhang Shufang(张淑芳), Liu Xiangxun(柳祥训), Cai Weiwang(蔡慰望)). *Induction Heating Handbook*(感应加热手册)[M]. Beijing: National Defense Industry Press, 1979: 30
- [29] Liu Huamin(刘华敏), Liu Zhaomiao(刘赵淼). *The 13th Conference of Beijing Society of Theoretical and Applied Mechanics Beijing*(2007 第十三届北京力学学会学术年会)[C]. Beijing: China Academic Journal Publishing House, 2007: 40
- [30] Volkov R S, Vysokomornaya O V, Kuznetsov G V et al. *Technical Physics Letters*[J], 2015, 41(2): 128
- [31] Лозинский М Г. Translated by Wang Dongsheng(王东昇), Yang Jibao(杨季豹). *Induction Heating Industrial Applications*(感应加热的工业应用)[M]. Shanghai: Shanghai Scientific & Technical Publishers, 1962: 42

Numerical Simulation and Experimental Research on the Melting of Titanium Wire Based on Induction Heating Gas Atomization

Zheng Mingyue^{1,2}, Zhang Shaoming¹, Hu Qiang¹, Xu Jun¹, Mao Weimin², He Huijun³,
Liu Yingjie³, Sheng Yanwei³, Zhao Wendong³

(1. Beijing General Research Institute for Nonferrous Metals, Beijing 100088, China)

(2. University of Science and Technology Beijing, Beijing 100083, China)

(3. Beijing COMPO Advanced Technology Co., Ltd, Beijing 101407, China)

Abstract: A new preparation process for titanium powder for additive manufacturing, wire induction heating gas atomization (WIGA) was developed. The combination of numerical simulations and experimental investigations was used to investigate the high frequency induction melting of titanium wire. The numerical simulations obtained the optimal parameters of the titanium wire induction melting model, i.e. the angle of the induction coil 90° , the power output frequency f 450 kHz, the diameter of the titanium wire 4 mm, and the minimum wire feed speed 45 mm/s when forming a 15 mm length of metal flow. Under this condition, the critical output power is 34 kW when the molten metal generates 350 ± 50 °C of superheat. An argon atmosphere protective titanium melting experimental device was established. Through experimental investigations, the minimum TC4 wire feed speed is found to be 50 mm/s when forming a 15 mm length of metal flow, and the error between the experimental and the numerical simulation is 10.0%. Under this condition, the minimum output power of the power supply is 38 kW when generating a molten metal with a superheat of 350 ± 50 °C, and the experimental and numerical simulation error is 10.5%. The experimental and numerical simulation results prove each other, and the engineering application basis of high frequency induction melting of titanium wire is obtained.

Key words: additive manufacturing; wire induction heating gas atomization; melting model; numerical simulation and experimental investigation

Corresponding author: Zhang Shaoming, Ph. D., Professor, Beijing General Research Institute for Nonferrous Metals, Beijing 100088, P. R. China, Tel: 0086-10-62058558, E-mail: 13051509028@163.com