

[文章编号] 1004-0609(2002)05-0883-08

等离子旋转电极雾化熔滴的热量传输与凝固行为^①

陈焕铭^{1, 2}, 胡本芙¹, 余泉茂¹, 张义文³

(1. 北京科技大学 材料科学与工程学院, 北京 100083; 2. 宁夏大学 物理与电气信息工程学院, 银川 750021;

3. 钢铁研究总院, 北京 100081)

[摘 要] 建立了在等离子旋转电极雾化(PREP)制取合金粉末的过程中雾化熔滴的轨道运动方程, 讨论了雾化熔滴在凝固过程中的热量传输与凝固行为, 并确定了定量计算换热系数所需的雾化熔滴初始速度。用数值求解方法计算了 FGH95 高温合金雾化熔滴在 PREP 过程中的速度及其在凝固过程中的温度、固相分数、冷却速率等凝固参数。结果表明: 在作者提出的工艺参数下, FGH95 合金熔滴的冷却速率达 10^4 K/s 量级以上, 合金过热度对冷却速率的影响主要在全液态阶段, 而冷却速率和固相分数对氩氢气体的混合比例极其敏感。

[关键词] 等离子旋转电极法; 快速凝固; FGH95 合金粉末; 数值计算

[中图分类号] TF 125.212

[文献标识码] A

涡轮盘是飞机发动机的重要部件之一, 要求材料具有优良的力学性能和理化性能, 尤其是高温下的低周循环疲劳和热疲劳性能。由于粉末高温合金具有与变形高温合金相当或略高的性能, 同时成本相对降低, 因此应用范围逐渐扩大。其制造的关键在于能够制造出低碳、低氧、晶粒细小、无粗大偏析的原始粉末颗粒^[1~3], 目前只有美国、俄罗斯、中国等少数几个国家掌握了等离子旋转电极雾化制取粉末的方法。这种方法避免了在雾化过程中熔体和坩埚之间的接触, 从而减少了非金属杂质的混入, 成为制造推重比更大的航空发动机涡轮盘的重要方法之一。深入分析和讨论雾化熔滴的凝固过程及其传热行为, 对优化制粉工艺及后续热加工工艺都有重要意义。

1 轨道方程

等离子旋转电极雾化(PREP)法制取粉末的基本原理为^[4]: 母合金自耗电极端部在等离子电弧作用下形成熔池, 继而在旋转离心力的作用下, 熔池内部的液膜态熔体流至熔池边缘雾化成熔滴, 然后熔滴在飞行过程中被气体介质冷却凝固。

熔滴自熔池边缘雾化后, 在飞行过程中受到 3 种力的影响: 重力 F_g 、拖曳力 F_d 和浮力 F_f , 如图 2 所示。因而由牛顿第二定律可得熔滴运动的动力学方程为

$$F_g + F_d + F_f = m \frac{dv_m}{dt} \quad (1)$$

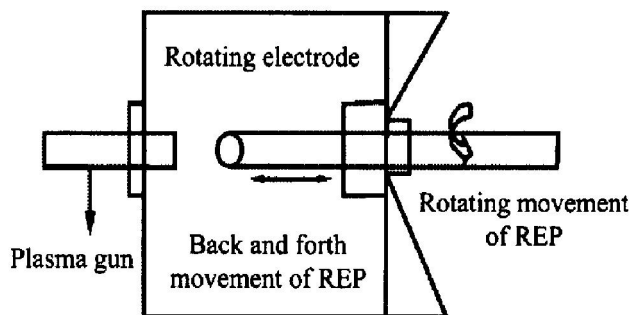


图 1 PREP 离心雾化装置简图
Fig. 1 Schematic of PREP centrifugal atomization

式中

$$m = \frac{\pi d^3}{6} \rho_m \quad (2)$$

$$F_g = mg = \frac{\pi d^3}{6} \rho_m g \quad (3)$$

$$F_d = -\frac{1}{8} \pi d^2 C_{drag} \rho_g |\mathbf{v}_m - \mathbf{v}_g| \cdot (\mathbf{v}_m - \mathbf{v}_g) \quad (4)$$

$$F_f = -\frac{\pi d^3}{6} \rho_g g \quad (5)$$

式中未作说明的符号意义见本文最后的符号说明

将式(2)~(5)代入式(1)并化简后得

$$\frac{dv_m}{dt} = \left(1 - \frac{\rho_g}{\rho_m}\right)g - \frac{3C_{drag}\rho_g}{4d\rho_m} |\mathbf{v}_m - \mathbf{v}_g| \cdot (\mathbf{v}_m - \mathbf{v}_g) \quad (6)$$

式中 C_{drag} 为拖曳系数^[5],

$$C_{drag} = 0.28 + \frac{6\sqrt{Re+21}}{Re} \quad (7)$$

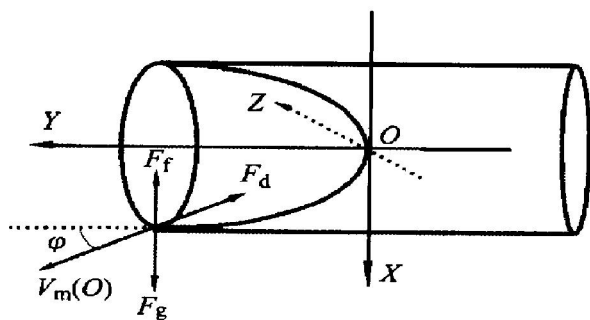


图 2 PREP 雾化熔滴受力分析

Fig. 2 Mechanical analysis of PREP droplets

Re 为雷诺数^[6],

$$Re = \frac{d \rho_g \cdot |\mathbf{v}_m - \mathbf{v}_g|}{\mu_g} \quad (8)$$

式(6)为矢量微分方程, 将此微分方程进行投影得 3 个标量微分方程:

$$\frac{dv_{mx}}{dt} = \left(1 - \frac{\rho_g}{\rho_m}\right)g - \frac{3C_{drag}\rho_g}{4d\rho_m} \cdot |\mathbf{v}_m - \mathbf{v}_g| \cdot (v_{mx} - v_{gx}) \quad (9)$$

$$\frac{dv_{my}}{dt} = -\frac{3C_{drag}\rho_g}{4d\rho_m} |\mathbf{v}_m - \mathbf{v}_g| \cdot (v_{my} - v_{gy}) \quad (10)$$

$$\frac{dv_{mz}}{dt} = -\frac{3C_{drag}\rho_g}{4d\rho_m} |\mathbf{v}_m - \mathbf{v}_g| \cdot (v_{mz} - v_{gz}) \quad (11)$$

式中

$$|\mathbf{v}_m - \mathbf{v}_g| = \sqrt{(v_{mx} - v_{gx})^2 + (v_{my} - v_{gy})^2 + (v_{mz} - v_{gz})^2} \quad (12)$$

由于电极棒平置, 从熔池边缘不同位置飞出的熔滴具有不同的初始速度, 考虑到电极棒直径及熔池深度远远小于雾化室, 因此可以假设所有熔滴均从坐标原点飞出, 所以不同位置熔滴的初始速度在 3 个坐标轴上的分量分别为

$$v_{mx}(0) = |\mathbf{v}_m(0)| \cdot \sin \phi \cdot \cos \varphi \quad (13)$$

$$v_{my}(0) = |\mathbf{v}_m(0)| \cdot \cos \phi \cdot \cos \varphi \quad (14)$$

$$v_{mz}(0) = |\mathbf{v}_m(0)| \cdot \sin \varphi \quad (15)$$

式中 $\mathbf{v}_m(0)$ 为雾化熔滴初始速度矢量, 其大小和方向见第 3 小节。 ϕ 为任意边缘处熔滴的初始速度与 Y 轴之间的夹角, 通过对电极棒料头观察与实际测量可知, 熔池为旋转抛物面, 因而 ϕ 可由抛物线方程在边缘处的斜率求得。 φ 为控制参数, 考虑到问题的对称性, 其取值范围为 0 到 π 对应于从边缘不同位置处飞出的熔滴。这样, 轨道方程就由式(9)、(10)和(11)所组成的变系数非奇次非线性微分方程组在约束条件式(12)和初始条件式(13)、(14)和(15)下的解所确定。一般来讲, 对于这样的微分方程组很难给出解析解, 只能用数值计算方法

求解。

2 雾化熔滴的热量传输与凝固过程

雾化熔滴与环境之间的热量传输主要包括熔滴与冷却气体的对流换热和熔滴的辐射散热。由于熔滴的 Biot 数小于 0.1, 故忽略熔滴内部的温度梯度, 可以采用牛顿传热模型来分析熔滴与冷却气体之间的热量传输问题。由牛顿冷却定律可以给出熔滴飞行过程中温度分布的总方程式为

$$\frac{dT_d}{dt} = \left[\frac{\Delta H_d}{C_{pd}} \right] \frac{df_s}{dt} - \frac{6h}{\rho_m d C_{pd}} (T_d - T_g) - \frac{6\varepsilon\sigma}{\rho_m d C_{pd}} (T_d^4 - T_g^4) \quad (16)$$

式中 h 为对流换热系数, 是熔滴运动速率的函数^[7], 为

$$h = \frac{k_g}{d} (2.0 + 0.19 Re^{2/3} Pr^{1/3}) \quad (17)$$

式中 Pr 为普朗特数。

多数研究者认为^[5, 6~8]: 为了准确预测熔滴温度分布, 应考虑熔滴的过冷和生核效应, 并认为熔滴雾化过程中的生核方式主要是异质形核, 其形核率由下式给出

$$I = 10^{40} \exp \left[-\frac{16\pi T_L^2 \gamma_{SL} f(\theta)}{3k_B T_d \rho_m^2 \Delta H_f^2 \Delta T^2} \right] \quad (18)$$

熔滴形核开始的临界条件假设为

$$\frac{\pi d^3}{6} \int_{T_N}^{T_L} \frac{I}{|\dot{T}|} dT = 1 \quad (19)$$

式中 $\dot{T}$ 为冷却速率。描述形核能力的接触角系数与熔滴直径有关, 有关文献将其表示为^[9]

$$f(\theta) = \frac{1}{4} (2 + \cos \theta) (1 - \cos \theta)^2 = -5.025 \times 10^{-3} + \frac{1.005 \times 10^{-6}}{d} \quad (20)$$

对于用等离子旋转电极法制取的镍基高温合金粉末, 其冷却过程可以分为 4 个阶段, 即液态冷却、生核和再辉、偏析凝固、固态冷却。由式(16)可以得到各阶段的表达式:

1) 液态冷却

$$\frac{dT_d}{dt} = -\frac{6h}{\rho_m d C_L} (T_d - T_g) - \frac{6\varepsilon\sigma}{\rho_m d C_L} (T_d^4 - T_g^4) \quad (21)$$

2) 生核与再辉

$$\frac{dT_d}{dt} = \frac{\Delta H_d}{C_{pd}} R_i (T_L - T_d) - \frac{6h}{\rho_m d C_{pd}} (T_d - T_g) - \frac{6\varepsilon\sigma}{\rho_m d C_L} (T_d^4 - T_g^4) \quad (22)$$

3) 偏析凝固

$$\frac{dT_d}{dt} = \left[\frac{\Delta H_d}{C_{pd}} \right] \frac{df_s}{dT_d} \frac{df_s}{dt} - \frac{6h}{\rho_m d C_{pd}} (T_d - T_g) - \frac{6\sigma}{\rho_m d C_{pd}} (T_d^4 - T_g^4) \quad (23)$$

4) 固态冷却

$$\frac{dT_d}{dt} = - \frac{6h}{\rho_m d C_s} (T_d - T_g) - \frac{6\sigma}{\rho_m d C_s} (T_d^4 - T_g^4) \quad (24)$$

3 雾化熔滴初始速度的确定

假设熔体在离开熔池的一瞬间即被雾化, 熔滴的初始速度即为熔池内液膜在熔池边缘的速度。电极端部一方面由于等离子体电弧的加热作用发生着熔化过程; 另一方面电极端部熔池内的熔体在离心力的作用下, 沿着熔池壁离心甩出。当熔化量与甩出量相等时, 熔池内的熔体将呈稳态流动, 此时熔池内的熔体将呈现如图 3 所示的液膜流动。该液膜中的任一熔体质点运动可分解为绕棒轴的旋转运动 (转速 ω) 和与之正交的近似正切于熔池壁面的运动 (运动速率 u)。

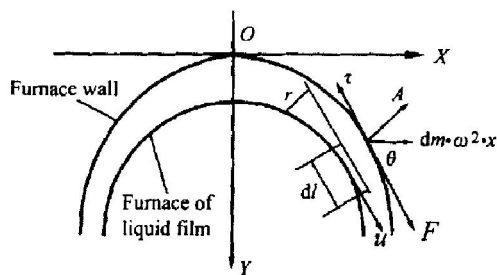


图 3 稳态层流时熔池内液膜流场结构及液膜微元受力分析

Fig. 3 Flow field structure and mechanical analysis of differential element during steady laminar flow in furnace

假定熔池壁面由 $y = f(x)$ 绕电极中心轴旋转得到, 取如图 3 所示的微元, 该微元的体积

$$dv = \{ [2\pi x + 2\pi(x + dx)] / 2 \} r dl \quad (25)$$

式中 r 为微元内侧距液膜自由表面的距离。忽略二阶小量, 式(25)变为:

$$dv = 2\pi x r dl \quad (26)$$

由于高速旋转的熔池内的液膜厚度极薄, 可认为液膜内微元相对于电极的速度 u 方向与壁面 x 点处的切线方向一致, 且可认为该运动流型为层流方式。当达到稳态流动时, 可认为 dv 微元沿着 x 点壁面的切线方向受力平衡。对于流体微元, 其所受到的力不外乎彻体力—重力、离心力, 这种力与

微元的体积成正比; 另一种力为表面力—压力、剪切力, 这种力与作用的微元的面积成正比。这样在图 3 所示的固体壁面 x 处可进行液膜流体微元的受力分析。由于旋转电极水平放置, 重力作用在微元旋转电极水平中轴面之上与之下的效果正好抵消; 又根据液膜流动的特点, 可以假设液膜中的静压力 p 为常数; 同时忽略掉液膜微元自由表面与气体之间由相对运动而产生的切应力, 这样, 液膜微元 dv 所受到的力仅为离心力以及流体微元之间的粘滞力。沿着壁面 x 点的切线方向, 微元所受到的这两个力平衡, 离心力沿着壁面 x 点的切线方向的分力为

$$F = dv \rho \omega^2 x \cos \theta \quad (27)$$

由 $\tan \theta = f'(x)$ 得

$$\cos \theta = [1 + f'^2(x)]^{-1/2} \quad (28)$$

将式(26)、(28)代入式(27)得

$$F = 2\pi x r dl \rho \omega^2 x [1 + f'^2(x)]^{-1/2} \quad (29)$$

粘滞力 τ 为

$$\tau = -2\pi x dl \mu \frac{du}{dr} \quad (30)$$

式中 μ —流体粘度。负号表示在图 3 所示之下速度梯度 du/dr 为负, 取正前加一负号二力平衡, 联立式(29)、(30)得

$$\rho \omega^2 x [1 + f'^2(x)]^{-1/2} r dr = -\mu du$$

解此微分方程得

$$\rho \omega^2 x [1 + f'^2(x)]^{-1/2} (r^2/2) = -\mu u + C \quad (31)$$

式中 C —待定常数项, 边界条件为粘性流动时, 固体界面处即 $r = H$ 时 $u = 0$, 代入式(31)解得

$$C = \rho \omega^2 x [1 + f'^2(x)]^{-1/2} (H^2/2)$$

于是

$$u = \frac{\rho \omega^2 x (H^2 - r^2)}{2\mu} \cdot [1 + f'^2(x)]^{-1/2} \quad (32)$$

由液膜厚度内平均流速 U 与各点实际流速 u 的关系

$$U = \frac{1}{H} \int_0^H u dr \quad (33)$$

将式(32)代入得

$$U = \frac{\rho \omega^2 x H^2}{3\mu} \cdot [1 + f'^2(x)]^{-1/2} \quad (34)$$

如果体积流量 Q 已知, 由平均流速与流量、液膜厚度的关系 $U = Q/2\pi x H$, 将式(34)代入解得液膜厚度

$$H = \{ 3\mu Q [1 + f'^2(x)]^{1/2} / (2\pi \rho \omega^2 x^2) \}^{1/3} \quad (35)$$

当 $x = D/2$, 由式(32)、(35)就可以得到 PREP 熔池最顶端的液膜流速 $u|_{x=D/2}$, 即 $v_m(0)$, 其方向

近似为沿抛物面切线方向 τ_0 。

4 计算与分析

基于 Matlab 平台利用计算精度较高的四阶一步 Runge-Kuta 方法^[10], 对 FGH95 高温合金在 PREP 过程中熔滴的运动参数、在凝固过程中熔滴的温度、固相分数、冷却速率等凝固参数进行数值计算并分析了, 熔滴过热度 and 冷却气体组成比例对熔滴凝固行为的影响。

由于等离子旋转电极雾化法本身的特点, 可以认为冷却气体的初始速度为零, 当 $\frac{\pi d^3}{6} \int_{T_N}^{T_L} \frac{1}{T} dT = 1$ 成立时, 认为形核和再辉开始, 固相分数取为^[6]

$$f_s = \frac{3}{2} \left(\frac{x}{d} \right)^2 - \frac{1}{2} \left(\frac{x}{d} \right)^3 \quad (36)$$

式中 x 为固液界面移动距离, d 为液滴直径。当温度的一阶导数为零时, 认为再辉结束, 开始偏析凝固, 固相分数取为^[5]

$$f_s = 1 - (1 - f_R) \left[\frac{T_M - T_R}{T_M - T_d} \right]^{1/(1-k_0)} \quad (37)$$

并且

$$\frac{df_s}{dT_d} = - \frac{(1 - f_R)}{(1 - k_0)(T_M - T_R)} \cdot \left[\frac{T_M - T_R}{T_M - T_d} \right]^{2-k_0/(1-k_0)} \quad (38)$$

式中 f_R 为再辉结束时的固相分数, T_R 为再辉结束温度, T_M 为纯合金溶剂的熔点, k_0 为平衡溶质分配系数。当 f_s 等于 1 时, 认为偏析凝固结束, 开始固态冷却到环境温度。

计算过程中的物性参数和制粉工艺参数如下^[11-13]:

熔滴密度 ρ_m	$7.45 \times 10^3 \text{ kg/m}^3$;
混合气体密度 ρ_g	0.508346 kg/m^3 ;
动力学粘度 μ_g	$2.05 \times 10^{-3} \text{ Pa}\cdot\text{s}$;
液态雾滴比热 C_L	$187.5 \text{ J/(kg}\cdot\text{K)}$;
固态雾滴比热 C_S	$208.3 \text{ J/(kg}\cdot\text{K)}$;
固液界面移动速率 R_i	$0.02 \text{ m/(s}\cdot\text{K)}$;
液相线温度 T_L	1643 K ;
辐射率 ϵ	0.6;
Stefan 常数 σ	$5.6032 \times 10^{-8} \text{ W/(m}^2\cdot\text{K}^4)$;
气体温度 T_g	298 K ;

固液界面能 γ_{SL}	0.43 J/m^2 ;
凝固潜热 ΔH_f	303880 J/kg ;
气体导热率 k_g	$0.12354 \text{ J/(m}\cdot\text{K)}$;
气体定压比热 C_{pg}	$4255.8 \text{ J/(kg}\cdot\text{K)}$;
玻尔兹曼常数 k_B	$1.3087 \times 10^{-23} \text{ J/(kg}\cdot\text{K}\cdot\text{mol)}$;
平衡溶质分配系数 k_0	0.81;
过热度 T_i	150 K ;
纯镍熔点 T_M	1616 K ;
熔滴初始速率 v_m	1.15517 m/s ;
等离子电弧功率 W	58500 W ;
电极棒直径 D	0.05 m ;
混合气体压力 p	0.113 MPa ;
电极棒转速 ω	1465 rad/s

根据最后的计算结果绘制了图 4~12, 并对雾化熔滴参数之间的关系进行了详细分析。

图 4 所示为不同颗粒尺寸雾化熔滴的运动速率随飞行时间的变化关系(角度参数 φ 取 0, 下同)。由图可见, 所有颗粒熔滴在飞行一段时间后, 由于所受合外力为零, 速率均趋于恒定值且大颗粒熔滴速率大于小颗粒熔滴速率。在离开熔池边缘的极短时间内, 由于所受重力的大小不同, $80 \mu\text{m}$ 以上熔滴速率呈增大趋势, 而小颗粒熔滴的飞行速率则在拖曳力的作用下迅速下降至一恒定值或降至最低值然后有所回升并趋于一定值(如 $80 \mu\text{m}$ 液滴), 颗粒越小降幅越大。

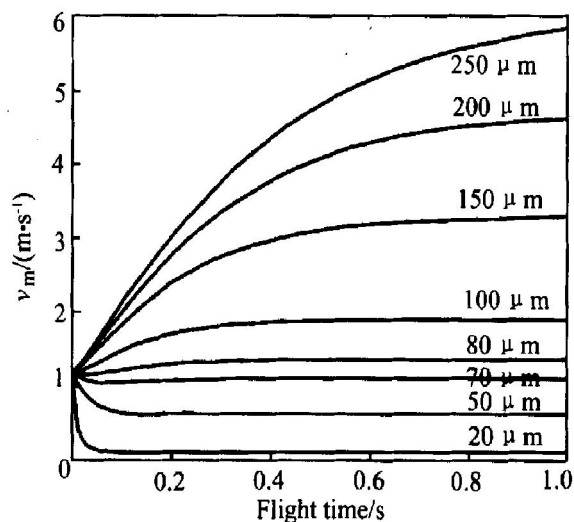


图 4 不同尺寸熔滴运动速率
随飞行时间的变化关系

Fig. 4 Curves of velocities vs flight
time for different droplet sizes

图 5 所示为 $80 \mu\text{m}$ 尺寸熔滴从熔池不同角度边缘飞出时的熔滴运动速率随飞行时间的变化关系。

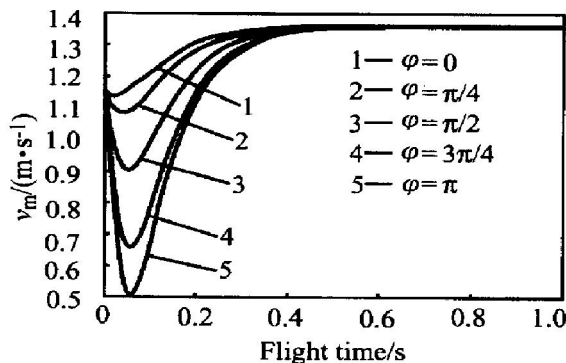


图 5 熔池不同边缘熔滴运动速率
随飞行时间的变化关系(80 μm)

Fig. 5 Curves of velocities vs flight time from different angles with droplet size of 80 μm

由图可见, 由于初始速度的方向不同, 从而使熔滴所受的合外力有所不同。在离开熔池边缘的极短时间内, 随角度的增加, 熔滴速率的下降趋势增大, 之后, 随飞行时间的增加, 熔滴速率迅速回升并趋于与角度无关的恒定速率。

图 6 所示为不同尺寸熔滴对流换热系数随飞行时间的变化关系。由图可见, 当熔滴的相对飞行速率在极短时间内趋于恒定值时, 熔滴的对流换热系数在大部分飞行时间内变化不大, 不同尺寸熔滴的对流换热系数随熔滴尺寸的减小而迅速增大; 在熔滴飞离熔池边缘的极短时间内, 对流换热系数有所变化, 其变化趋势同熔滴速率的变化趋势一致。

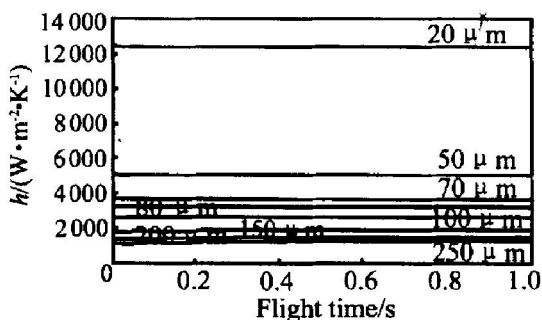


图 6 不同尺寸熔滴对流换热系数
随飞行时间的变化关系

Fig. 6 Curves of convective heat transfer coefficients vs flight time for different droplet sizes

图 7 所示为不同尺寸熔滴温度随飞行时间的变化关系。由图可见, 所有熔滴都经历了液态冷却、形核与再辉、偏析凝固、固态冷却 4 个阶段。随熔滴尺寸的增大, 由于对流换热系数减小, 其凝固的起始和终了点均延迟至更长的飞行距离上。另外, 由形核和再辉阶段的温度变化可以看出, 熔滴尺寸

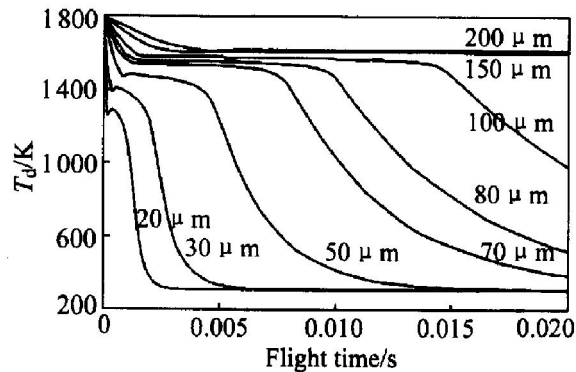


图 7 不同尺寸熔滴温度随飞行时间的变化关系

Fig. 7 Curves of Temperature vs flight time for different droplet sizes

越小, 温度变化越快, 其形核过冷度越大。

图 8 所示为不同尺寸熔滴固相分数随飞行时间的变化关系。与图 7 所示相对应, 固相分数曲线在图 8 中也分为 4 个阶段: 固相分数等于 0 的失去过热阶段; 固相分数快速增大的形核和再辉阶段; 偏析凝固阶段的缓慢升高以及固相分数等于 1 的固态冷却阶段。显然, 不同尺寸的熔滴在同一飞行时间段内具有不同的固相分数。

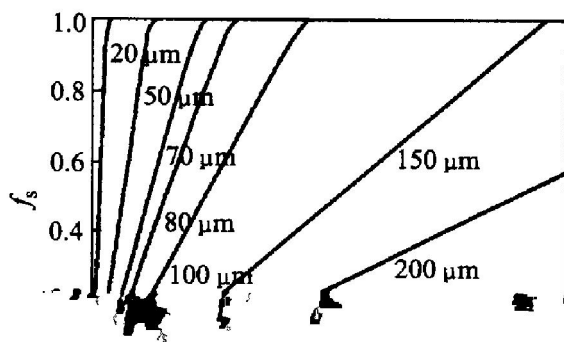


图 8 不同尺寸熔滴固相分数随飞行时间的变化关系

Fig. 8 Curves of solid fraction vs flight time for different droplet sizes

图 9 所示为不同尺寸熔滴的冷却速率随飞行时间的变化情况。在全液态阶段, 随颗粒尺寸的减小, 熔滴的冷却速率急剧增大(负值为放热, 正值为吸热), 其原因是由于小颗粒熔滴的对流换热系数大于大颗粒熔滴; 在形核再辉阶段, 由于结晶潜热的突然释放, 使冷却速率由负变正。随后经过偏析凝固阶段的冷却后进入固态冷却阶段, 颗粒温度衰减为周围冷却气体温度, 冷却速率渐趋于零。所有熔滴的冷却速率均在 10^4 K/s 量级以上, 其中, 20 ~ 30 μm 熔滴在全液态阶段的冷却速率达 10^6 K/s

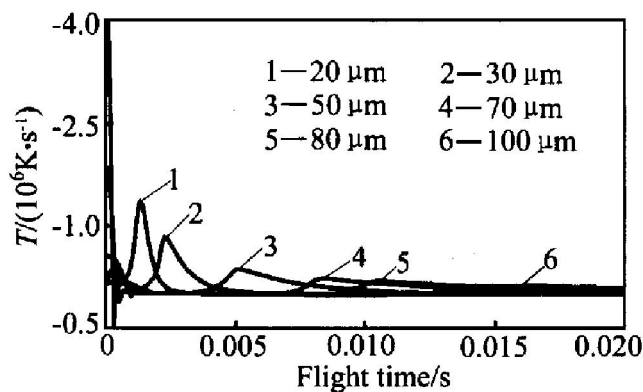


图 9 不同尺寸熔滴冷却速率
随飞行时间的变化关系

Fig. 9 Curves of cooling rate vs flight time for different droplet sizes

量级,表现出快速凝固的特征。

图 10 所示为 80 μm 熔滴在不同过热度时的冷却速率变化曲线。由图可见,当熔滴过热度由 100 K 增至 300 K 时,全液态阶段熔滴的冷速呈增大趋势,即过热度越大热量散失越快。但在偏析和固态冷却阶段,熔滴过热度的增加,对冷却速率的影响很小,即冷速对过热度的变化不敏感。

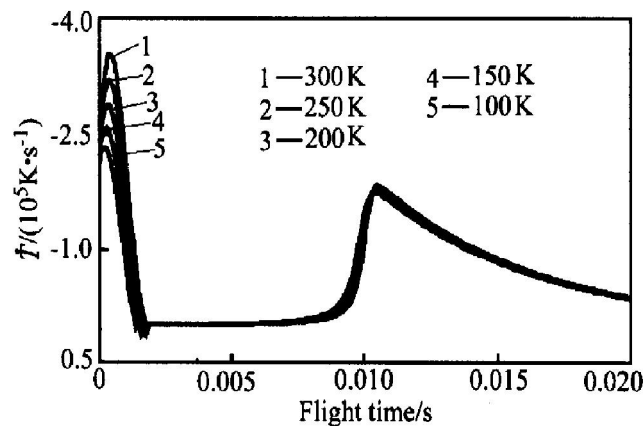


图 10 不同过热度熔滴冷速
随飞行时间的变化关系(80 μm)

Fig. 10 Curves of cooling rate vs flight time under different superheat with droplet size of 80 μm

由于 PREP 法的冷却气体是由不同比例的氩气和氦气所组成,因而混合气体的比例不同时对熔滴的凝固行为有影响。图 11 所示为 80 μm 熔滴在不同氩氦比例的冷却气氛中冷速随飞行时间的变化关系。图中的曲线 1、2、3、4、5 为不同氩、氦比例混合气体的导热率(298 K),曲线 1 为纯氦,曲线 2 为纯氩,曲线 3 为 ArHe= 14 等。由图可见,熔滴的凝固过程对于氩、氦的比例极其敏感。随氦含量的增大,冷却速率也随之增大,在同一时间段内,相

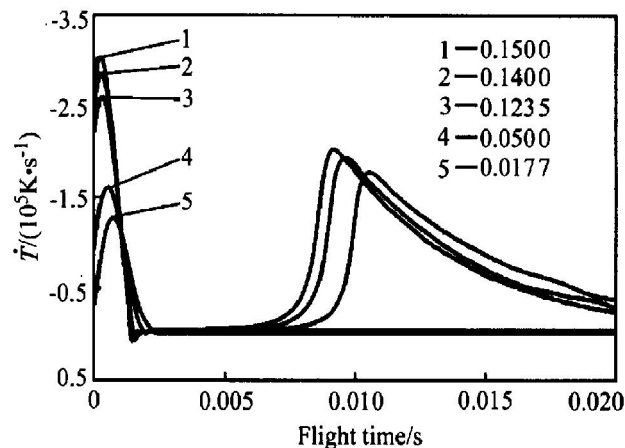


图 11 不同氩、氦比时熔滴冷速随
飞行时间的变化关系(80 μm)

Fig. 11 Curves of cooling rate vs flight time in different cooling atmosphere with droplet size of 80 μm

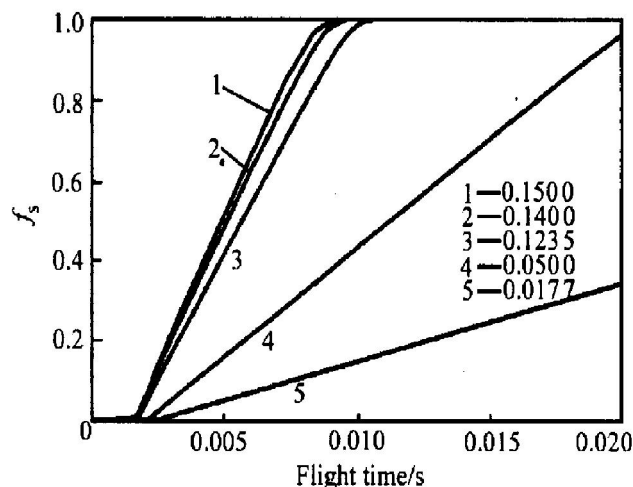


图 12 不同氩、氦比时固相分数
随飞行时间的变化关系(80 μm)

Fig. 12 Curves of solid fraction vs flight time in different cooling atmosphere with droplet size of 80 μm

应的固相分数也增多(见图 12),这完全是由于氦的导热率远大于 Ar 的结果。

5 结论

1) 等离子旋转电极法雾化熔滴的轨道运动由矢量微分方程

$$\frac{d\mathbf{v}_m}{dt} = \left(1 - \frac{\rho_g}{\rho_m}\right)\mathbf{g} - \frac{3C_{drag}\rho_g}{4d\rho_m}|\mathbf{v}_m - \mathbf{v}_g| \cdot (\mathbf{v}_m - \mathbf{v}_g)$$

在约束条件

$$|\mathbf{v}_m - \mathbf{v}_g| = \sqrt{(v_{mx} - v_{gx})^2 + (v_{my} - v_{gy})^2 + (v_{mz} - v_{gz})^2}$$

和初始条件 $\mathbf{v}_m(0)$ 下的解所决定。

2) 由牛顿流体力学的微元分析法得到初始速度 $\mathbf{v}_m(0)$, 它可以通过测定体积流量并由式

$$u|_{x=D/2} = \frac{\rho \omega^2 x (H^2 - r^2)}{2\mu} \cdot [1 + f'(x)]^{-1/2} \cdot$$

τ_0 获得。

3) 等离子旋转电极法雾化过程中, 雾化熔滴的运动速率大小除了与熔滴尺寸大小有关外, 还与熔滴飞出的角度有关。随角度的增加, 熔滴速率的下降趋势增大, 之后, 随飞行时间的增加, 熔滴速率迅速回升并趋于与角度无关的恒定速率; 对流换热系数近似为只与熔滴尺寸大小有关的量, 随熔滴飞行时间的变化不是很大。

4) 合金熔滴的温度分布为 4 个区域, 随熔滴尺寸的增大, 其凝固的起始是和终了点均延迟至更长的飞行距离上。熔滴尺寸越小, 其形核过冷度越大, 与温度分布相对应。飞行过程中固相分数逐渐增加, 在同一飞行时间内, 熔滴尺寸越大, 其固相分数越小。

5) 在本文采用提出的工艺参数下, FGH95 合金熔滴的冷却速率达 10^4 K/s 量级以上, 表现出快速凝固的特征。

[REFERENCES]

- [1] 孙剑飞, 沈 军, 贾 均, 等. 喷射成形镍基高温合金的显微组织特征[J]. 中国有色金属学报, 1999, 9(S1): 142-147.
SUN Jian-fei, SHEN Jun, JIA Jun, et al. Microstructural characteristics of a nickel-based superalloy produced by spray forming[J]. The Chinese Journal of Nonferrous Metals, 1999, 9(S1): 142-147.
- [2] HU Ben-fu, ZHANG Shou-hua. Carbide phases in ni-based P/M superalloy[J]. Journal of University of Science & Technology Beijing, 1994, 1(1): 1-7.
- [3] 孙剑飞, 沈 军, 贾 均, 等. 高温合金喷射成形过喷粉末的凝固组织特征[J]. 中国有色金属学报, 1999, 9(S1): 148-152.
SUN Jian-fei, SHEN Jun, JIA Jun, et al. Microstructure characteristics of over sprayed superalloy powder[J]. The Chinese Journal of Nonferrous Metals, 1999, 9(S1): 148-152.
- [4] 宋 铎. 旋转电极法 FGH95 粉末性质的研究[D]. 北

京: 北京科技大学, 1995.

- SONG Duo. Research on Characteristics of FGH95 Powder Produced by PREP[D]. Beijing: University of Science and Technology Beijing, 1995.
- [5] Gutierrez miravete E, Lavernia E J, Trapaga G M, et al. A mathematical model of the spray deposition process[J]. Metall Trans, 1989, 20A: 71-85.
- [6] Lee E S, Ahn S. Solidification process and heat transfer analysis of gas-atomized alloy droplets during spray forming[J]. Acta Metall Mater, 1994, 42(9): 3231-3243.
- [7] LIU Yur-zhong, CHEN Zhe-rhua, WANG Jian N. Simulation study of transfer in multi-stage rapid solidification[J]. Mater Sci and Eng, 2000(A280), 229-232.
- [8] Grant P S, Cantor B, Katgerman L. Modeling of droplets dynamic and thermal histories during spray forming[J]. Acta Metall Mater, 1993, 41(11): 3079-3108.
- [9] CAI We-dong, Lavernia E J. Modeling of porosity during spray forming[J]. Metall and Mater Trans, 1998, 29B: 1085-1095.
- [10] 徐翠微. 计算方法引论[M]. 北京: 高等教育出版社, 1985.
XU Cui-wei. Introduction to Calculation Methods[M]. Beijing: High Education Press, 1985.
- [11] 张家荣, 赵廷元. 工程常用物质的热物理性质手册[M]. 北京: 新时代出版社, 1987.
ZHANG Jia-rong, ZHAO Ting-yuan. A Handbook For Thermophysical Properties of Engineering Materials[M]. Beijing: New Era Press, 1987.
- [12] Colin J S. Metals Reference Book[M]. London & Boston: Butterworth & Co Ltd, 1976.
- [13] 张 莹, 李世魁, 陈生大. 用等离子旋转电极法制取镍基高温合金粉末[J]. 粉末冶金工业, 1998, 8(6): 17-22.
ZHANG Ying, LI Shi-kui, CHEN Sheng-da. Production of nickel-based superalloy powder by the plasma electrode process[J]. Powder Metallurgical Industry, 1998, 8(6): 17-22.

[NOMENCLATURE]

m —熔滴质量,	kg;
v_m —熔滴速率,	m/s;
v_g —气体速率,	m/s;
d —熔滴直径,	m;
ρ_m —熔滴密度,	kg/m ³ ;
ρ_g —气体密度,	kg/m ³ ;

g —重力加速度,	m/s^2 ;	$f(\theta)$ —接触角系数;	
μ_g —动力学粘度,	$\text{Pa}\cdot\text{s}$;	γ_{SL} —固液界面能,	J/m^2 ;
t —时间,	s ;	C_{pd} —固液混合态比热,	$\text{J}/(\text{kg}\cdot\text{K})$;
T_d —熔滴温度,	K ;	f_s —固相分数;	
C_L —液态雾滴比热,	$\text{J}/(\text{kg}\cdot\text{K})$;	ΔH_f —凝固潜热,	J/kg ;
C_S —固态雾滴比热,	$\text{J}/(\text{kg}\cdot\text{K})$;	k_g —气体导热率,	$\text{J}/(\text{m}\cdot\text{K})$;
h —对流换热系数,	$\text{W}/(\text{m}^2\cdot\text{K})$;	C_{pg} —气体定压比热,	$\text{J}/(\text{kg}\cdot\text{K})$;
T_L —液相线温度,	K ;	T_N —开始形核温度,	K ;
ΔT —过冷度,	K ;	D —电极棒直径,	m ;
ε —辐射率;		k_B —玻尔兹曼常数,	$\text{J}/(\text{kg}\cdot\text{K}\cdot\text{mol})$;
σ —Stefan 常数,	$\text{W}/(\text{m}^2\cdot\text{K}^4)$;	ΔH_d —熔滴单位质量的焓变,	J/kg ;
T_g —气体温度,	K ;	ω —电极棒转速,	rad/s .

Heat transfer and solidification behavior of droplets during plasma rotating electrode processing

CHEN Huan-ming^{1, 2}, HU Ben-fu¹, YU Quan-mao¹, ZHANG Yi-wen³

(1. University of Science & Technology Beijing, Beijing 100083, China;

2. Ningxia University, Yinchuan 750021, China;

3. Central Iron and Steel Research Institute, Beijing 100081, China)

[Abstract] A mathematical model to describe flight trace of droplets atomized by plasma rotating electrode processing PREP was established, and the heat transfer and solidification behavior of the droplets during PREP discussed was based on Newtonian heat transfer formulation coupled with the classical heterogeneous nucleation. With the application of the differential method of Newton fluid dynamics, the initial velocities of droplets correlated to the heat transfer coefficients were determined. Using numerical method, the droplet velocity, droplet temperature, and fractional solidification with flight time about FGH95 superalloy droplet were predicted based on mathematical model. The results show that the cooling rate of FGH95 superalloy droplet reaches above 10^4 K/s order of magnitude, and the effect of droplet superheat taking on the droplet solidification behavior is mainly in the fully liquid stage, while the cooling rate of the droplet is sensitive to the proportion of mixed cooling gas.

[Key words] plasma rotating electrode process; rapid solidification; FGH95 droplet; numerical analysis

(编辑 何学锋)