

考虑液面凹陷时金属熔化与蒸发的数值研究

薄 勇 王德武 应纯同

(清华大学 工程物理系, 北京 100084)

(2003 年 7 月 3 日收到, 2003 年 8 月 4 日收到修改稿)

将关于液面凹陷的 Young-Laplace 方程与关于金属溶池的流体力学方程组及关于金属蒸发的 BGK 方程联立求解, 在给定的电子枪加热条件下, 获得了熔池流场和温度场图像及金属蒸气密度、速度和温度分布. 数值计算结果表明, 随电子枪功率增加, 金属的蒸发速率增加, 蒸气的密度增大、温度降低而速度升高. 与假设液面为平面的情况相比, 考虑液面凹陷后求得的液面温度较低, 金属的蒸发速率较小, 并且这种差别随电子枪功率的增加而扩大. 因此对于高功率电子枪加热金属蒸发, 必须考虑液面凹陷的影响才能得到符合实际的结果.

关键词: 液面凹陷, Young-Laplace 方程, 熔池, 金属蒸发

PACC: 4725Q, 7215C

1. 引 言

现代科技的许多领域需要研究电子枪加热金属的熔化与蒸发过程, 如金属铸造、电解冶炼、表面处理及核能工业等. 电子枪加热坩埚中的金属, 蒸发时产生的反冲力将使熔池表面出现凹陷. 这会影响到液态金属的流动及传热特性, 从而影响金属的蒸发速率以及金属蒸气的密度、速度和温度分布. 因此需要研究不同条件下液面凹陷对电子枪加热金属熔池的影响. 1983 年 Haroon 和 Philip 给出了熔池液面凹陷的 Young-Laplace 方程^[1]. 1993 年王永刚研究了给定液面温度分布条件下的液面凹陷形状以及给定液面凹陷形状下的液面温度分布, 并测量了电子枪加热金属铜熔池的液面凹陷深度^[2]. 1998 年 Westerberg 等人用有限元法研究了电子枪加热柱状金属铝熔池的流场情况, 其中考虑了液面凹陷问题^[3]. 本文将关于液态金属流动的流体力学方程组与关于液面形状的 Young-Laplace 方程^[4]联立求解, 获得了熔池的液面凹陷形状及液面温度分布, 并在此基础上利用 BGK 模型方程^[5]求解了金属蒸气从凹陷液面蒸发的动力学过程, 进而研究了不同电子枪功率下熔池液面凹陷形状对金属蒸发速率及金属蒸气宏观特性的影响.

2. 金属熔化与蒸发的数学模型

线性电子枪加热长槽形坩埚中金属的熔化与蒸

发过程, 其截面如图 1 所示. 在电子束的作用下, 坩埚中部分固态金属熔化, 熔池表面由于金属蒸气的反冲力而形成凹陷, 坩埚外壁由循环水冷却, 坩埚内则存在着比较稳定的固液界面. 金属蒸气在真空室中向上蒸发, 在蒸发液面附近的 Knudsen 层原子之间猛烈碰撞, 宏观物理量变化显著, 在外部膨胀区金属蒸气由亚音速区经跨音速区过渡到超音速分子流区, 在分子流区蒸气密度很低, 金属原子之间几乎不发生相互碰撞.

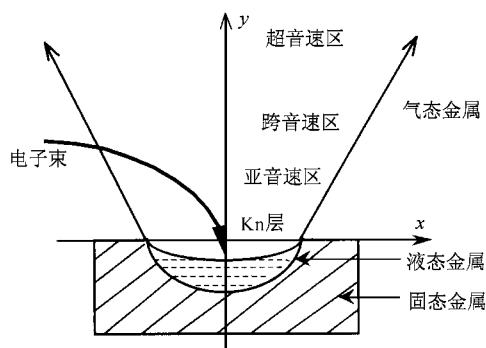


图 1 金属熔化与蒸发的物理模型及坐标系

2.1. 考虑液面凹陷时金属熔池的数学模型

把液态金属作为黏性不可压的层流流体, 只在计算密度项时采用 Boussinesq 近似, 则可以得到液态金属流动满足的涡量-流函数形式的流体力学方程组^[6]

$$U \frac{\partial \omega}{\partial x} + V \frac{\partial \omega}{\partial y} = g\beta \frac{\partial T}{\partial x} + \nu \left(\frac{\partial^2 \omega}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \omega}{\partial y^2} \right), \quad (1)$$

$$U \frac{\partial T}{\partial x} + V \frac{\partial T}{\partial y} = \chi \left(\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} \right), \quad (2)$$

$$U = -\frac{\partial \psi}{\partial y}, V = \frac{\partial \psi}{\partial x}, \quad (3)$$

$$\omega = -\left(\frac{\partial^2 \psi}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \psi}{\partial y^2} \right), \quad (4)$$

其中 U, V 为流体速度的 x, y 分量, ω 为涡量, ψ 为流函数, T 为流体温度, ν 为运动黏性系数, χ 为热扩散系数, β 为体积膨胀系数. 对于固态金属部分采用无内热源的固体热传导方程描述, 即

$$\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} = 0. \quad (5)$$

由于熔池液面的法向上, 存在着蒸气压、液体压力及表面张力的平衡, 因此可以得到关于液面凹陷形状 $y = h_v(x)$ 的 Young-Laplace 方程^[2]

$$\frac{\sigma \frac{d^2 h_v(x)}{dx^2}}{\left[1 + \left(\frac{dh_v(x)}{dx} \right)^2 \right]^{3/2}} + \rho g h_v(x) = \left(1 - \frac{\delta}{2} \right) \cdot P_0(T), \quad (6)$$

其中 σ 为液态金属表面张力, ρ 为液态金属密度, $P_0(T)$ 为液面处金属的饱和蒸气压. 为了处理液面的曲线边界条件, 引入如下坐标变换将不规则的物理平面 (x, y) 转换为规则的计算平面 (ξ, η) ,

$$\begin{cases} x = \xi, \\ y = (1 - h_v(x))\eta + h_v(x), \end{cases} \quad (7)$$

则关于液态金属流动的流体力学方程组转换到 (ξ, η) 坐标中为

$$U \frac{\partial \omega}{\partial \xi} + V_\omega \frac{\partial \omega}{\partial \eta} = \nu \left[\frac{\partial^2 \omega}{\partial \xi^2} + 2k_1 \frac{\partial^2 \omega}{\partial \xi \partial \eta} + k_b \frac{\partial^2 \omega}{\partial \eta^2} \right] + g\beta \left(\frac{\partial T}{\partial \xi} + k_1 \frac{\partial T}{\partial \eta} \right), \quad (8)$$

$$U \frac{\partial T}{\partial \xi} + V_T \frac{\partial T}{\partial \eta} = \chi \left(\frac{\partial^2 T}{\partial \xi^2} + 2k_1 \frac{\partial^2 T}{\partial \xi \partial \eta} + k_b \frac{\partial^2 T}{\partial \eta^2} \right), \quad (9)$$

$$U = -k_2 \frac{\partial \psi}{\partial y}, V = \frac{\partial \psi}{\partial \xi} + k_1 \frac{\partial \psi}{\partial \eta}, \quad (10)$$

$$\omega = -\left(\frac{\partial^2 \psi}{\partial \xi^2} + 2k_1 \frac{\partial^2 \psi}{\partial \xi \partial \eta} + k_b \frac{\partial^2 \psi}{\partial \eta^2} + k_a \frac{\partial \psi}{\partial \eta} \right), \quad (11)$$

其中 $V_\omega = k_v - k_a v, V_T = k_v - k_a \chi, k_a = k_3 + k_1 k_4, k_b = k_1^2 + k_2^2, k_v = k_1 U + k_2 V, k_1 = \frac{(\eta - 1)h'_v}{1 - h_v}, k_2 = \frac{1}{1 - h_v}, k_3 = (\eta - 1) \cdot \frac{h''_v(1 - h_v) + h'_v{}^2}{(1 - h_v)^2}, k_4 = \frac{h'_v}{1 - h_v}$, h'_v 和 h''_v 分别为 h_v 的一次导数和二次导数.

气液界面和固液界面上的边界条件参考文献 [7] 整个熔池液面上金属的蒸发速率为

$$\begin{aligned} \delta \rho_e &= 2 \int_L S_x \cdot dl \\ &= 2 \int_L \delta P_0 \sqrt{M(1 + h'_v{}^2)} 2\pi RT \cdot dx, \end{aligned} \quad (12)$$

其中 S_x 为液面 x 处的蒸发速率, M 为金属原子量, R 为气体常数.

2.2. 考虑液面凹陷时金属蒸发的数学模型

电子枪加热坩埚中金属真空蒸发属于稀薄气体动力学研究范畴, 可以用 BGK 方程描述:

$$u \frac{\partial f}{\partial x} + v \frac{\partial f}{\partial y} = \gamma_c \alpha (F - f), \quad (13)$$

$$F = \frac{\rho}{(2\pi RT)^{3/2}} \exp \left[-\frac{(V_x - u)^2 + (V_y - v)^2 + w^2}{2RT} \right], \quad (14)$$

其中 $f(x, y, z, u, v, w)$ 为蒸气原子速度分布函数, F 为 Maxwell 速度分布函数, u, v, w 分别为 x, y, z 方向的原子随机速度, V_x, V_y 分别为 x, y 方向的原子平均速度, ρ 为原子蒸气密度, T 为蒸气温度, γ_c 为常数. 考虑 z 方向无限长的对称性, 引入分布函数

$g = \int_{-\infty}^{+\infty} f dw$ 和 $h = \int_{-\infty}^{+\infty} f w^2 dw$, 可得无量纲化的模型方程^[8]

$$u \frac{\partial g}{\partial x} + v \frac{\partial g}{\partial y} = \frac{1}{\sqrt{\pi Kn}} \alpha (G - g), \quad (15)$$

$$u \frac{\partial h}{\partial x} + v \frac{\partial h}{\partial y} = \frac{1}{\sqrt{\pi Kn}} \alpha (H - h), \quad (16)$$

其中 $Kn = \lambda/2L$ 为蒸发表面处的 Knudsen 数, λ 为分子自由程, L 为熔池半宽度, G, H 为参变量:

$$\begin{aligned} G &= \frac{\rho}{\pi T} \exp \left[-\frac{(V_x - u)^2 + (V_y - v)^2}{T} \right], \\ H &= GT/2 \end{aligned} \quad (17)$$

为了处理曲面蒸发的边界问题, 也要引入坐标变换式(7), 可得模型方程为

$$u \frac{\partial g}{\partial \xi} + v_k \frac{\partial g}{\partial \eta} = \frac{1}{\sqrt{\pi Kn}} \alpha (G - g), \quad (18)$$

$$u \frac{\partial h}{\partial \xi} + v_k \frac{\partial h}{\partial \eta} = \frac{1}{\sqrt{\pi Kn}} \alpha (H - h), \quad (19)$$

其中 $v_k = k_1 u + k_2 v$. 则得到无量纲化的金属蒸气密度、速度和温度分别为

$$\rho = \int_{-\infty}^{+\infty} \int_{-\infty}^{+\infty} g \, du \, dv, \quad (20)$$

$$V_\xi = \frac{1}{\rho} \int_{-\infty}^{+\infty} \int_{-\infty}^{+\infty} g u \, du \, dv, \quad (21)$$

$$V_\eta = \frac{1}{\rho} \int_{-\infty}^{+\infty} \int_{-\infty}^{+\infty} g v \, du \, dv, \quad (22)$$

$$T_\xi = \frac{2}{\rho} \int_{-\infty}^{+\infty} \int_{-\infty}^{+\infty} (V_\xi - u)^2 g \, du \, dv, \quad (23)$$

$$T_\eta = \frac{2}{\rho} \int_{-\infty}^{+\infty} \int_{-\infty}^{+\infty} (V_\eta - v)^2 g \, du \, dv, \quad (24)$$

$$T_z = \frac{2}{\rho} \int_{-\infty}^{+\infty} \int_{-\infty}^{+\infty} h \, du \, dv, \quad (25)$$

$$T = \frac{1}{3} (T_\xi + T_\eta + T_z). \quad (26)$$

在蒸发表面处,金属蒸气的密度、速度和温度边界条件为

$$\rho = MP_L / RT_L, \quad (27)$$

$$V_\xi = -V_m \sqrt{T_L / T_m} \sin \theta, \quad (28)$$

$$V_\eta = V_m \sqrt{T_L / T_m} \cos \theta, \quad (29)$$

$$T = T_L, \quad (30)$$

其中 T_m 为蒸发表面中心处的温度, $V_m = \sqrt{2RT_m}$, $\sin \theta = h' / \sqrt{1 + h'^2}$, P_L 和 T_L 分别为液面处的饱和蒸气压和温度.

由于金属的熔化与蒸发区域左右对称,可以只计算右半部分.对于流体力学方程,其中的一阶偏导项采用三阶迎风差分格式,二阶偏导项采用四阶中心差分格式进行离散.对于 Young-Laplace 方程,利用二阶中心差分格式进行离散.对于 g, h 方程,采用一阶迎风差分格式进行离散.在数值计算中采用不等间距的空间网格划分形式,即物理量变化快的地方采用较密的网格,而物理量变化慢的地方采用较疏的网格,这样既可以保证计算精度又可以提高计算速度.

3. 计算结果及分析

3.1. 考虑液面凹陷的金属熔池与金属蒸气的特性分析

利用上述方程组、边界条件和计算方法,对于宽

4cm 深 2cm 坩埚中的金属钽熔池,在电子枪单位厘米长功率 6kW、半束宽 3mm 的条件下,进行了计算分析,求得熔池流场、温度场、液面温度分布及液面凹陷形状如图 2 所示,金属蒸气的密度、温度及横、纵向速度分布如图 3 所示.

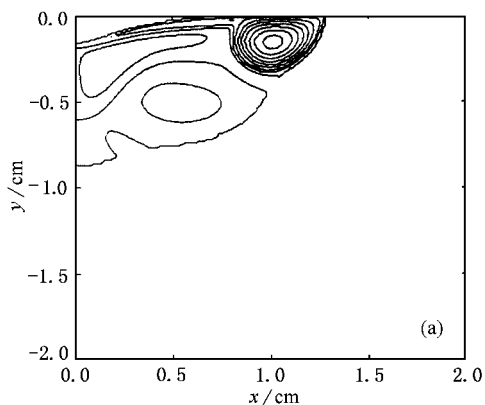
金属熔池的流场、温度场与假设液面为平面时^[7]的情况相似.其中,流场是由表面热毛细流、内部浮力流以及两者之间的二次环流组成,热毛细流较强而浮力流较弱.熔池的温度场中,液态金属部分温度梯度较大,而固态金属部分温度梯度较小.熔池的液面温度分布如图 2(c)所示,液面中心处温度最高,逐渐成曲线下降,在熔点处形成拐点,而后在固态金属部分接近线性下降.与假设液面为平面的情况相比,熔池表面存在凹陷的部分温度较低,因此金属的蒸发速率要低些.液面凹陷形状如图 2(d)所示,在液面中心处,电子束的功率密度最高,液面温度最高,金属的蒸发速率最大,蒸气的反冲力也最大,因而凹陷深度最大(约为 1.6mm).随着离开液面中心距离的增加,凹陷深度减少得较快,到液面宽度(约为 1.3cm)的一半时,凹陷深度已经减小到最大深度的 1/7.

由于液面凹陷较小(小于 2mm),蒸发表面为曲面时金属蒸气的宏观物理量分布与蒸发表面为平面时^[8]基本相同,如图 3 所示.金属蒸气的密度随着离开液面距离的增加而迅速降低.蒸气纵向速度在靠近液面处增加很快,随着离开液面距离的增加,蒸气密度降低,原子间相互碰撞减少,纵向速度增长逐渐变缓而后趋于平稳.蒸气横向速度随着离开蒸发轴线距离的增加而增大,也逐渐趋于平缓.蒸气温度在靠近液面处增加很快,随着离开液面距离的增加而下降,也逐渐趋于平缓.

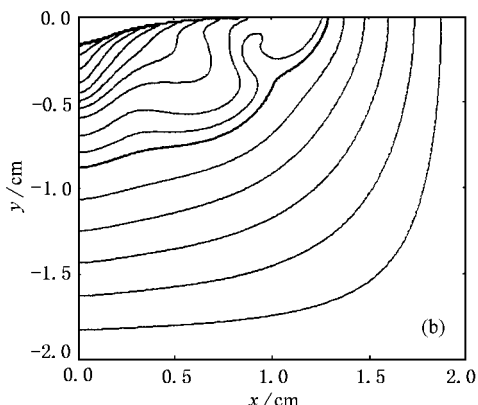
3.2. 电子枪功率对液面凹陷深度的影响

电子枪功率与金属熔池的液面温度分布以及金属的蒸发速率有直接关系,因此对液面凹陷深度及金属蒸气宏观特性的影响较大.对于宽 4cm 深 2cm 坩埚中的金属钽熔池,在电子枪半束宽为 3mm 时,分别对电子束单位厘米长功率为 3.0kW—8.0kW 的情况进行了计算分析,求得液面中心凹陷深度 h_0 、中心温度 T_c 和液面蒸发速率 S_p 如图 4 所示,求得金属蒸气的密度、温度和速度分布如图 5 所示.

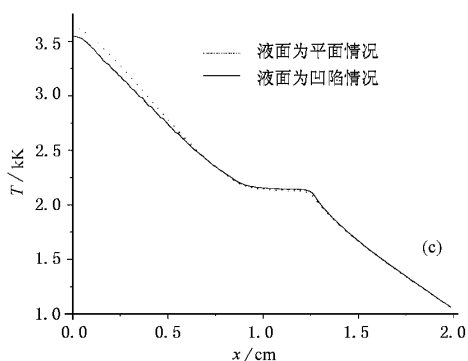
如图 4(a)所示为熔池液面中心处的凹陷深度



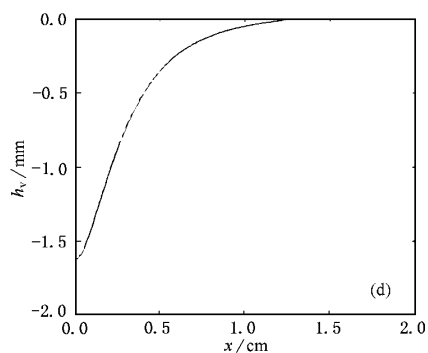
(a) 熔池的流场



(b) 熔池的温度场(粗线表示固液界面)



(c) 熔池的液面温度分布



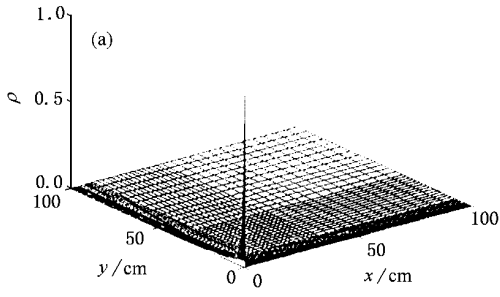
(d) 熔池的液面凹陷形状

图 2 考虑液面凹陷的金属熔池的特性

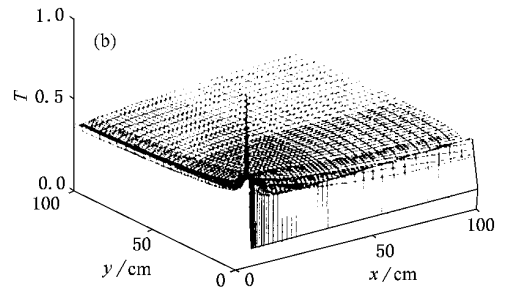


与电子枪功率的关系. 图中的虚线为流体力学方程组与 Young-Laplace 方程分立求解的结果, 即先假设熔池的液面为平面, 利用流体力学方程组求得液面温度分布, 再将其代入 Young-Laplace 方程求得液面凹陷形状. 而图中的实线为流体力学方程组与 Young-Laplace 方程联立求解的结果. 从中可以看出, 联立求解和分立求解所得结果相同的是, 随电子枪功率的增加, 液面凹陷的深度增加得较快. 这是由于金属的蒸发速率随电子枪功率增长得较快, 从而蒸气对液面的反冲力增长得较快. 两者不同的是, 联立求解得到的液面凹陷深度比分立求解得到的液面凹陷深度小些, 并且随电子枪功率的增加, 两种求解方法获得的液面凹陷深度相差越大. 这是因为考虑液面凹陷时相当于电子束功率密度降低, 所以液面温度下降, 而液面温度的下降反过来也使液面凹陷深

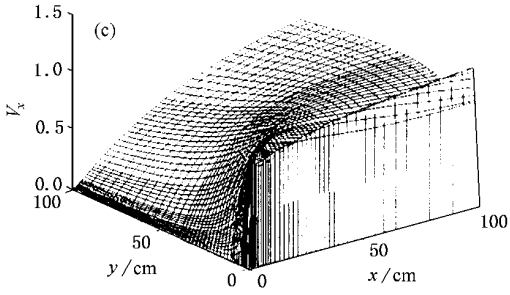
度减小, 因此联立求解获得的液面凹陷深度比分立求解得到的液面凹陷深度小, 而且随电子枪功率的增加, 两者的差别更加明显. 当电子枪功率为 8kW 时, 联立求解获得的液面中心凹陷深度(约为 6.5 mm)仅为分立求解的一半. 如图 4(b)所示为熔池液面中心温度与电子枪功率的关系. 从中可以看出, 考虑液面凹陷比假设液面为平面时熔池液面的中心温度降低了, 并且随电子枪功率的增加, 液面温度的下降越明显, 由此也使金属的蒸发速率比假设液面为平面时低. 如图 4(c)所示为金属蒸发速率与电子枪功率的关系. 从中可以看出, 随电子枪功率的增加, 液面凹陷深度变大, 从而使金属的蒸发速率较不考虑液面凹陷的情况下降得越多. 当电子枪功率为 4kW 时, 两者的蒸发速率相差约 5%, 当电子枪功率增大到 8kW 时, 相差达 30%.



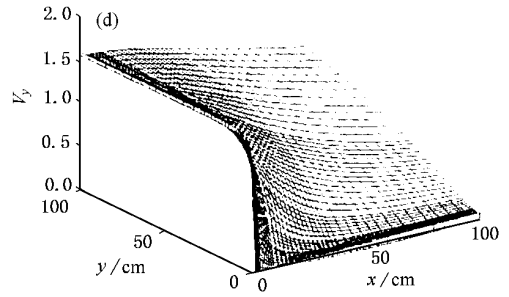
(a) 密度分布



(b) 温度分布

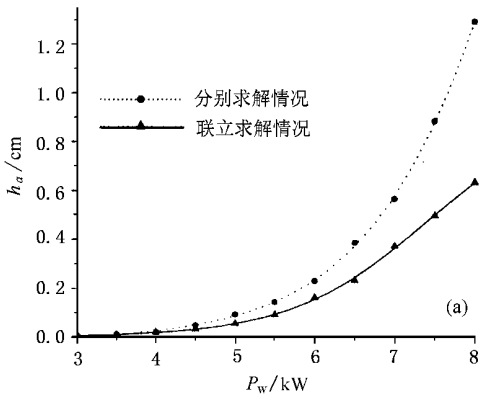


(c) 横向速度分布

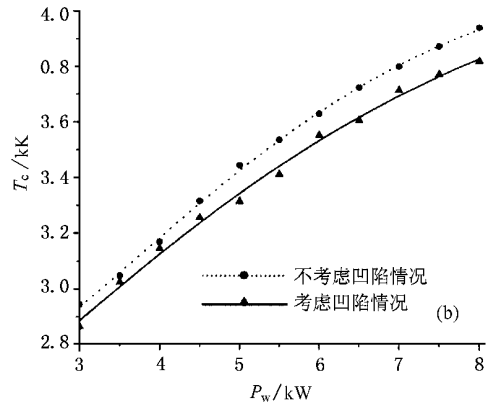


(d) 纵向速度分布

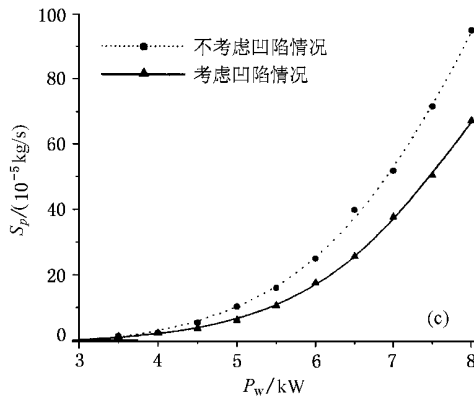
图3 考虑液面凹陷的金属蒸气的特性



(a) 中心凹陷深度与电子枪功率的关系

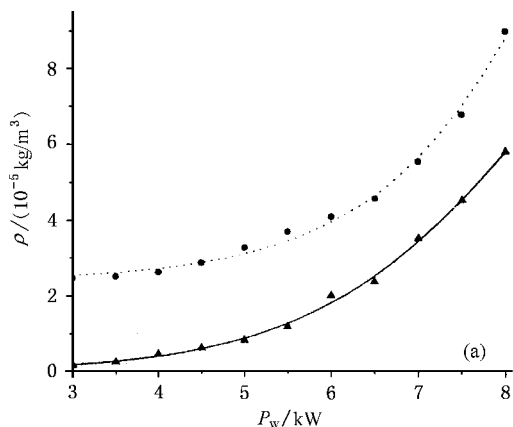


(b) 中心温度与电子枪功率的关系

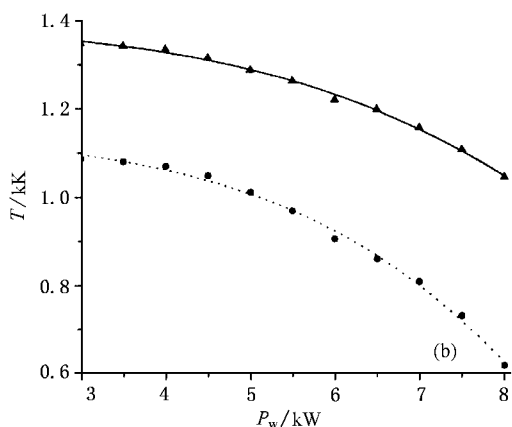


(c) 蒸发速率与电子枪功率的关系

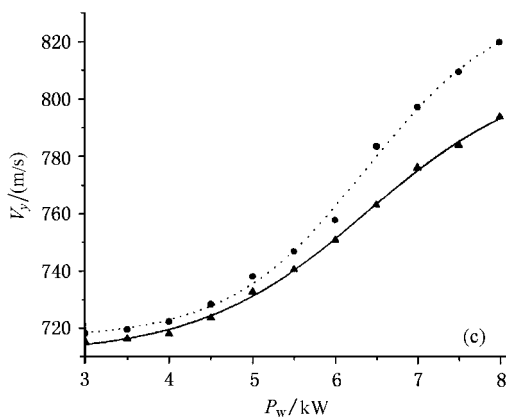
图4 金属熔池液面特性随电子枪功率的变化



(a) 密度随电子枪功率的变化



(b) 温度随电子枪功率的变化



(c) 速度随电子枪功率的变化

图 5 离液面中心 100cm 处蒸气的宏观物理量随电子枪功率的变化(实线表示曲面蒸发,虚线表示平面蒸发)

如图 5(a)、(b) 和 (c) 所示分别为蒸发轴线上距离液面 100cm 处金属蒸气的密度、温度和纵向速度随电子枪功率的变化曲线,其中虚线为假设液面为平面的情况,而实线为考虑液面凹陷的情况.从中可以看出,考虑液面凹陷时比假设液面为平面时求得的蒸气密度更低、温度更高、纵向速度更小.并且随电子枪功率的增加,两种情况下求得的蒸气密度、温度和纵向速度的差别有扩大的趋势.当电子枪功率为 3kW 时,考虑液面凹陷时比假设液面为平面时求得的蒸气密度约低 $2.3 \times 10^{-5} \text{ kg/m}^3$ 、蒸气温度约高 262K、蒸气的纵向速度约小 2.8m/s.当电子枪功率增大到 8kW 时,考虑液面凹陷时比假设液面为平面时求得的蒸气密度约低 $3.2 \times 10^{-5} \text{ kg/m}^3$ 、蒸气温度约高 328K、蒸气的纵向速度约小 26.0m/s.由于随电子枪功率的逐渐增加,考虑液面凹陷时比假设液面为平面时求得的金属蒸发速率越来越低,因此蒸气密度的差逐渐扩大.由于液面附近的蒸气密度随电

子枪功率而逐渐增加,液面附近蒸气原子间的相互碰撞越激烈,内能更多的转化为动能,因此假设液面为平面时比考虑液面凹陷时求得的蒸气温度下降得更多,蒸气速度变得更大.

4. 计算与实验结果的比较

钷与钷有相似的理化性能,如熔点和沸点差距较大、导热系数较小等,只是钷的挥发性较好,蒸发量较大,能够方便地测量钷蒸气的密度和速度分布,所以选择钷进行电子枪加热蒸发实验^[9].采用激光感生荧光法测量速度 V ,采用石英共振测厚法测量密度 ρ ,获得钷蒸气的密度通量($D_v = \rho V$)如图 6 所示.其中,坩埚的宽为 4cm 深为 2cm,电子枪半束宽为 3mm,功率分别为 390W 和 720W,测量位置距离液面中心 39cm.当电子枪功率为 390W 时,钷熔池液面凹陷很小($< 0.2\text{mm}$),当电子枪功率为 720W 时,

液面凹陷约为 1mm.对比数值计算(实线所示)和实验测量(虚线所示)结果,金属蒸气的密度通量随电子枪功率及径向角的变化很接近,只是数值计算获得的密度通量值比实验测量结果稍低些,这有两个原因:一是电子束与金属原子束相互作用,通过非弹性碰撞转移给原子束部分能量,二是从液面蒸发的金属原子束中部分原子处于激发态,在退激发过程中把部分能量转换为动能,而在数值计算中并没有考虑到这些因素.

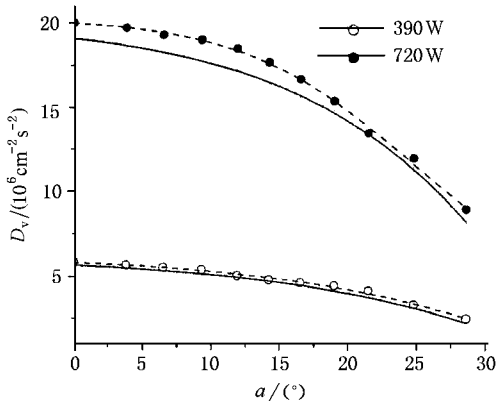


图 6 金属蒸气的密度通量 D_v 随径向角 α 的变化(虚线表示测量值,实线表示计算值)

5. 结 论

本文研究了电子枪功率对金属熔池液面凹陷及金属蒸气宏观特性的影响,主要获得以下结论.

1. 将关于液面凹陷形状的 Young-Laplace 方程与关于液态金属熔池的流体力学方程以及关于金属蒸发的 BGK 方程联立求解,在给定的电子枪加热条件下,获得了带有液面凹陷的熔池流场和温度场图像以及相应金属蒸气的密度分布、速度分布和温度分布情况.

2. 随电子枪功率增加,液面温度升高,金属的蒸发速率增加,蒸气的反冲力增大,液面凹陷深度增加,因此金属蒸气的密度增加、温度下降、速度升高.与假设液面为平面的情况相比,考虑液面凹陷后求得的液面温度较低、金属的蒸发速率较小,因此金属蒸气的密度较低、温度较高、速度较小,并且随电子枪功率的增加,这种差别有继续扩大的趋势.

因此在电子枪加热金属蒸发时,尤其是高功率蒸发,由于熔池液面凹陷的存在,对金属的蒸发速率及金属蒸气的宏观物理特性有很大的影响,因此液面凹陷问题必须考虑,以求得更加符合实际的结果.

[1] Haroon S K and Philip M G 1983 *UCRL - 94575* 9 113
 [2] Wang Y G, Ying C T, Wang D W and Zhu X H 1994 *Chinese Journal of Nuclear Science and Engineering* 14 117 [in Chinese] 王永刚、应纯同、王德武、诸旭辉 1994 *核科学与工程* 14 117]
 [3] Westerberg K W, McClelland M A and Finlayson B A 1998 *Int. J. Numer. Meth. Fluids* 26 637
 [4] Saez A E and Carbonell R G 1990 *Journal of Colloid and Interface Science* 140 408
 [5] Waichman K 1996 *Phys. Fluids* 8 1321

[6] Srinivasan J and Basu B 1986 *Int. J. Heat Mass Transfer* 29 563
 [7] Bo Y, Wang D W and Ying C T 2002 *Acta Phy. Sin.* 51 1535 [in Chinese] 薄 勇、王德武、应纯同 2002 *物理学报* 51 1535]
 [8] Xiao J X and Wang D W 1999 *J. Tsinghua, Univ(Sci & Tech)* 39 55 [in Chinese] 肖踞雄、王德武 1999 *清华大学学报(自然科学版)* 39 52]
 [9] Kong Y F, Wang D W and Ying C T 1994 *Chinese Laser A* 21 261 [in Chinese] 孔羽飞、王德武、应纯同 1994 *中国激光 A* 21 261]

Numerical analysis of metal melting and evaporating with liquid surface depression

Bo Yong Wang De-Wu Ying Chun-Tong

(*Department of Engineering Physics , Tsinghua University , Beijing 100084 , China*)

(Received 3 July 2003 ; revised manuscript received 4 August 2003)

Abstract

A metal molten-pool is described by the Navier-Stokes and energy equations and the depressed liquid surface is described by the Young-Laplace equations ,and the metal evaporation is described by the BGK equation. The velocity and temperature distributions of the pool and the vapor heated by an electron gun are solved by the finite difference method. The numerical results show the evaporation rate of the metal increases with the power of the electron gun , so the vapor density increases and the vapor temperature decreases and the vapor velocity increases. The surface temperature of the pool with the depressed surface is less than the one of the pool with the plane surface , so is the metal evaporation rate. The difference of the evaporation rate between them increases with the power of the electron gun , so the liquid surface depression should be taken into consideration for a high power electron gun.

Keywords : liquid surface depression , Young-Laplace equation , molten pool , metal evaporation

PACC : 4725Q , 7215C