

分析金属熔滴快速凝固过程的双倒易边界元方法

郭文¹ 卢文强¹ 刘秋生² 马重芳³

(1. 中国科学院研究生院, 国家微重力实验室, 北京 100039;
2. 中国科学院力学研究所, 国家微重力实验室, 北京 100080;
3. 北京工业大学, 北京 100022)

摘要 本文发展了非线性边界条件相变传热过程的轴对称双倒易边界元方法, 数值模拟了金属熔滴在快速冷却条件下的快速凝固过程。分别研究了在微重力落管和落塔中及喷射成形过程中金属熔滴的快速凝固过程, 得到了过冷度, 再辉时间, 温度变化及相变界面随时间的变化等数值结果。

关键词 快速凝固; 双倒易边界元方法; 过冷度

中图分类号: TK124 **文献标识码:** A **文章编号:** 0253-231X(2003)06-1028-03

DUAL RECIPROcity BOUNDARY ELEMENT METHOD FOR ANALYZING RAPID SOLIDIFICATION PROCESS OF METAL DROPLETS

GUO Wen¹ LU Wen-Qiang¹ LIU Qiu-Sheng² MA Chong-Fang³

(1. Graduate School of the Chinese Academy of Sciences, National Microgravity Lab, Beijing 100039, China;
2. Institute of Mechanics, Chinese Academy of Sciences, National Microgravity Lab, Beijing 100080, China;
3. Beijing Polytechnic University, Beijing 100029, China)

Abstract The axisymmetric dual reciprocity boundary element method is developed to calculate phase-change heat transfer problems with the nonlinear boundary conditions. The rapid solidification of metal droplets in the spray forming process and microgravity falling tube or tower, which considers both the external extraction of heat carried out through convective and radiative heat transfer and the internal heat condition combined with the nucleation -controlled solidification kinetics, are simulated by the method. The undercooling temperature, the time to recalescence, the time-marching maps of temperature fields and phase -change interfaces are presented in this paper.

Key words rapid solidification; DRBEM; undercooling temperature

1 前言

金属熔滴在快速冷却的条件下可以生成高性能的金属结构, 因此已成为材料加工的一种新型方法。在快速凝固的方法中, 主要有金属雾状微滴的喷射成形 (spray forming) 和金属熔滴在微重力落管和微重力落塔中下落, 它们都是将金属微滴加热至较高的温度 (超过熔点), 然后通过与环境高温差的辐射换热和对流换热实现金属微滴的快速冷却。

金属熔滴快速凝固的过程可以分为如下四个阶段: (1) 金属熔滴的过冷。(2) 再辉过程。成核开始后, 由于金属凝固时潜热的突然释放, 部分金属熔滴被迅速加热至再辉温度, 并且相变界面以极快的

速度推进。(3) 再辉后, 凝固继续进行, 但是与过程 (2) 相比, 相变速度很慢, 直到液滴完全凝固。(4) 金属完全处于固相, 继续被冷却。

在金属的快速凝固过程中, 由于实验一般只能测量部分温度及再辉的时间, 缺乏对金属熔滴温度变化以及相变过程的精确了解, 而数值方法是模拟多种工况的简便且经济实用的途径, 因此在这一领域的研究中, 数值方法具有非常重要的意义。

2 物理模型

2.1 传热模型

认为金属熔滴为球形。初始温度均匀, 金属熔

收稿日期: 2002-12-18; 修订日期: 2003-09-19

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (No.50176048); 国家重点基础研究发展规划项目资助 (No.G200026300)

作者简介: 郭文 (1977-), 女, 甘肃泰安人, 硕士, 主要从事两相流与相变传热的研究工作。

滴与环境之间同时有辐射换热和对流换热(对于微重力落管和落塔, 对流换热可以忽略)。

控制方程为:

$$\frac{1}{r^2} \frac{\partial}{\partial r} \left(r^2 \lambda_i \frac{\partial T_i}{\partial r} \right) = \rho_i c_i \frac{\partial T_i}{\partial t}, \quad i = l \text{ or } s$$

边界条件和初始条件为:

$$\partial T / \partial r = 0 \quad r = 0, t > 0$$

$$-\lambda_i \partial T_i / \partial r = \varepsilon \sigma (T_i^4 - T_e^4) + h(T_i - T_e) \quad r = R,$$

$$T = T_0, \quad t = 0, \quad 0 \leq r \leq R$$

相变过程中固液界面上的点满足如下方程:

$$T_l = T_s = T_m, \quad -\lambda_l \frac{\partial T_l}{\partial r} + \rho_l v L = -\lambda_s \frac{\partial T_s}{\partial r}$$

其中, λ, ρ, c 分别为导热系数, 密度及比热。 ε 为辐射率, h 为对流换热系数, v 是相变界面的移动速度, L 为相变潜热。

2.2 深过冷非平衡凝固模型

由文献 [1] 可知, 对于过冷金属滴的非平衡凝固过程, 其凝固将从成核的发生开始。根据经典的成核理论 [2], 有成核率

$$I = \frac{nkT}{h_p} \exp\left(\frac{-\Delta F_A}{kT}\right) \exp\left[\frac{-16\pi\gamma^3 T_m^3}{3k\rho_l^2 L^2 (T_m - T)^2 T}\right]$$

其中, n 为单位体积的原子数, k 为波尔兹曼常数, T 为金属液滴的温度, T_m 为金属的熔点, h_p 为普朗克常数, ΔF_A 是单个原子的自由能, γ 是表面自由能。

基于经典成核理论, 再辉时间 t_n 的临界条件 [3] 是:

$$\int_V \int_0^{t_n} I(T) dt dV = 1$$

在统计学的基础上, Hirth [4] 给出了另一种形式的临界条件。

3 数值方法

3.1 轴对称双倒易边界元方法

应用双倒易原理, 可以将热传导方程转化为如下形式的矩阵方程:

$$\left(\frac{1}{\Delta t} C + \theta_T H\right) T^{m+1} - \theta_q G q^{m+1} = \left[\frac{1}{\Delta t} C - (1 - \theta_T) H\right] T^m + (1 - \theta_q) G q^m \quad (1)$$

矩阵 C 有如下形式: $C = -\frac{1}{C_k} (HT - G\hat{q})F^{-1}$, 其中 F 矩阵由以下函数确定 [5]:

$$f(i, j) = 1 + \frac{2L}{\pi} E\left(m, \frac{\pi}{2}\right),$$

其中,

$$m = \frac{2\sqrt{r_j \cdot r_i}}{\sqrt{(r_j + r_i)^2 + (z_j - z_i)^2}},$$

$$L = \sqrt{(r_j + r_i)^2 + (z_j - z_i)^2}$$

式中, r_i, r_j 是点 i 和边界点 j 到对称轴的距离, r 是点 i, j 之间的距离, $E(m, \pi/2)$ 是第二类椭圆积分。

3.2 非线性边界条件的 Newton-Raphson 迭代

式 (1) 可以写成简化的形式: $L(\psi) = \tilde{\omega}(\psi)$, 其中 ψ 是未知量。由 Newton-Raphson 方法:

$$\Pi(\psi^m) \psi^{m+1} = \Pi(\psi^m) \psi^m - \hat{L}(\psi^m),$$

$$\hat{L}(\psi) = L(\psi) - \tilde{\omega}(\psi), \quad \Pi(\psi^m) = \partial \hat{L}(\psi) / \partial \psi$$

对于式 (1), 有:

$$\psi_j^{m+1} = T_j^{m+1}$$

$$\Pi(\psi) = C_{ij} / \Delta \tau_j + \theta_u H_{ij} - \theta_q G_{ij} (\partial q_j^{m+1} / \partial T_j^{m+1})$$

$$\frac{\partial q_j^{m+1}}{\partial T_j^{m+1}} = \frac{4\varepsilon \sigma T_j^3}{k_j} + \frac{h}{k_j}$$

4 数值结果

4.1 喷射成形快速凝固算例

计算物质为镍 (Ni), 参数如下:

$$T_m = 1726 \text{ K}, \quad T_0 = 1812 \text{ K}, \quad R = 50 \mu\text{m},$$

$$L = 297700 \text{ J/kg}, \quad \rho_l = 7905 \text{ kg/m}^3,$$

$$c_l = 734.28 \text{ J/kg} \cdot \text{K}, \quad c_s = 616.66 \text{ J/kg} \cdot \text{K},$$

$$\lambda_l = 82.5 \text{ W/m} \cdot \text{K}, \quad \lambda_s = 90.0 \text{ W/m} \cdot \text{K},$$

$$\varepsilon = 0.21, \quad B_i = 1.068 \times 10^{-2}$$

表 1 比较了轴对称双倒易边界元方法和 Turnbull 和 Cech 的实验结果 [6] 及有限体积法的计算结果 [3]。结果表明轴对称双倒易边界元方法是可靠

的。图1表示金属滴表面温度随时间的变化,图2表示相变界面随时间的推进。结果也是定性合理的。

4.2 真空落管中快速凝固算例

表2、3比较了用双倒易边界元方法计算的结果与 Hofmeister^[7]的实验结果及有限体积法计算结果^[3]的比较,比较了过冷度,过冷时间,再辉后相变所需要的时间,可看出,计算结果是合理的。

表1 Ni的过冷度,再辉时间,相变时间结果比较

	过冷度 (%)	再辉时间 (10^{-3})	相变过程的时间 ($\times 10^{-3}$)
双倒易边界元方法	20.14	3.685	0.292
实验结果 ^[6]	19.4	-	-
有限体积法 ^[3]	22.08	4.32	0.421

表2 不同金属熔滴过冷度 ($\Delta T/T_m$) 的结果比较

金属熔滴 (mm)	熔点 T_m (K)	实验结果 ^[7]	边界元计算结果	有限体积法结果 ^[3]
Ti 1.8	1939	18.0±2.6	14.7	15.20
Pt 2.6	2045	18.6±2.4	16.97	17.39
Zr 5.0	2125	20.2±2.4	16.9	17.45
Rh 2.3	2233	20.2±2.2	16.9	17.39

表3 再辉时间 t_n 和再辉后相变所需要时间 Δt_c 的结果比较

金属熔滴 (mm)	实验结果 ^[7] $t_n \pm 0.03$ (s)	边界元计算结果		有限体积法结果 ^[3]	
		T_n (s)	Δt_c (s)	t_n (s)	Δt_c (s)
Ti 1.8	4.5	1.54	0.38	1.55	0.45
Pt 2.6	3.0	2.96	1.01	2.95	1.21
Zr 5.0	3.5	4.02	1.22	4.03	0.92
Rh 2.3	3.2	3.98	0.68	4.02	0.93

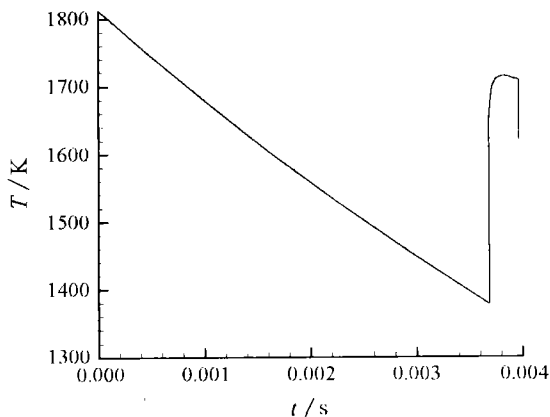


图1 金属镍滴的表面温度随时间的变化

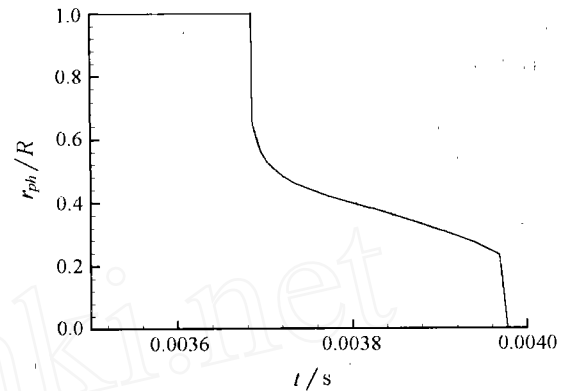


图2 相变界面随时间的推进

5 结论

金属熔滴在快速冷却的条件下,将会出现深过冷的快速凝固过程。本文分别考虑了在微重力落管和落塔中及喷射成形两种过程中金属熔滴的快速凝固过程,发展了同时具有辐射和对流边界条件的相变传热过程的轴对称双倒易边界元方法,并成功的运用于两种快速凝固过程的计算,得到了过冷度,温度随时间变化以及相变界面随时间变化等数值结果。

参考文献

- [1] D M Herlach. Non-Equilibrium Solidification of Undercooled Metallic Melts. Mater. Sci. Eng. R12, 1994, 179-272
- [2] D Turnbull. Formation of Crystal Nuclei in Liquid Metals. J. Appl. Phys., 1950, 21: 1022-1028
- [3] Keh Chin Chang, Chih Ming Chen. Revisiting Heat Transfer Analysis for Rapid Solidification of Metal Droplets. Int. J. Heat and Mass Transfer, 2001, 44: 1573-1583
- [4] J P Hirth. Nucleation Undercooling and Homogeneous Structures in Rapidly Solidified Powders. Metall. Trans., 1978, A9: 401-404
- [5] 白凤武, 卢文强. 轴对称双倒易边界元方法的 f 函数及其奇性处理. 中国科学院研究生院学报, 2002, 19(1): 18-27
- [6] D Turnbull, R E Cech. Microscopic Observation of the Solidification of Small Metal Droplets. J. Appl. Phys, 1950, 21: 804-810
- [7] W H Hofmeister, M B Robinson, R J Bayuzick. Undercooling of Pure Metals in a Containerless Microgravity Environment. Appl. Phys. Lett., 1986, 49: 1342-1344