

[文章编号] 1004- 0609(2001)S1- 0034- 05

铝合金铸件缩孔缩松预测新技术^①

徐 宏¹, 程 军¹, 钟雪友²

(1. 华北工学院 材料工程系, 太原 030051; 2. 北京科技大学 材料科学与工程学院, 北京 100083)

[摘 要] 在铝合金铸件三维温度场计算的基础上, 提出了采用动态多熔池等效液面收缩量法对缩孔进行预测; 并综合质量守恒方程、动量方程和氢含量守恒方程, 建立了数学模型对缩松进行预测。通过实验验证了数学模型的正确性。

[关键词] 温度场; 缩孔; 缩松; 预测

[中图分类号] TG 249

[文献标识码] A

一般认为缩孔是由凝固收缩引起液面下降而形成的, 采用等效液面收缩量法^[1]定量预测缩孔形成时, 假设所有的补缩都来自铸件最高处的可流动单元, 显然这种处理方法没有考虑是否存在补缩通道。预测缩松时, Compell^[2]指出, 在铸件的整个凝固过程中, 补缩由液体补缩、质量补缩、枝晶间补缩、爆炸充填和固体补缩 5 种方式组成, 形成缩松的主要原因是质量补缩和枝晶补缩产生困难。目前缩松预测判据很多, 但一般缩松预测只是基于凝固的热状况, 得出凝固时间、温度梯度、冷却速度等热参数来获得预测判据^[3, 4], 这些判据对于窄结晶区合金缩松预测效果较好, 对于宽结晶区合金却不太适合^[5]。缩松的形成应综合考虑铸型内热状况、枝晶间流动状况、金属液中过饱和和气体析出、金属静压力的影响^[6]。

本文作者在缩孔预测上提出了动态多熔池等效液面收缩量法, 缩松的预测综合运用了质量守恒方程、动量方程和气体含量守恒方程。

1 温度场模型

$$c\rho\frac{\partial T}{\partial t} + \varphi_L c\rho(u\frac{\partial T}{\partial x} + v\frac{\partial T}{\partial y} + w\frac{\partial T}{\partial z}) = \lambda(\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2}) - \rho L \frac{\partial \varphi_L}{\partial t} \quad (1)$$

式中 T 为温度, c 为比热, ρ 为液相和固相的平均密度, L 为结晶潜热, λ 为导热系数, u, v, w 为枝晶间液体流速, φ_L 为液相体积分数, 与温度有关。

等号左边第 2 项表示枝晶间液体流动的热对流, 由于结晶潜热释放, 两相区温度梯度和液相体积分数的比较, 可以忽略不计, 式(1)变为

$$\frac{\partial T}{\partial t} = \frac{\lambda}{c\rho}(\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2}) - \frac{L}{c} \frac{\partial \varphi_L}{\partial t} \quad (2)$$

其中 φ_L 可采用式(3)^[7]计算:

$$\varphi_L = 1 - [\frac{T_m - T}{T_m - T_L}]^{1/(k-1)} \quad (3)$$

式中 T_m 为纯金属熔点, T_L 为液相温度, k 为溶质平衡分配系数。

2 动态多熔池等效液面收缩量法

在铸件的凝固过程中, 往往同时存在多个孤立的熔池, 凝固收缩时各个封闭熔池的最高液面金属液均向下补缩, 由此预测各孤立熔池的缩孔或单元致密度。

2.1 动态多熔池的判定

1) 在 t_n 时刻对所有铸件单元赋予熔池编号“- 1”。

2) 判断全部单元, 定 $\varphi_{Si} > \varphi_c$ 的单元凝固状态号为“1”, 定 $\varphi_{Si} < \varphi_c$ 的单元凝固状态号为“0”(φ_{Si} 为 i 单元的固相体积分数, φ_c 为合金的临界固相体积分数, $\varphi_{Si} > \varphi_c$ 的意义为此单元没有补缩能力)。

3) 任选一个凝固状态编号为“0”且熔池编号为“- 1”的单元进行孤立熔池判断。此单元与该单元相邻的“0”单元以及与这些“0”单元中任意一个相邻的“0”单元, 必处于同一个孤立熔池, 给这些单元

① [收稿日期] 2000- 08- 18; [修订日期] 2001- 03- 07

[作者简介] 徐 宏(1971-), 男, 讲师, 博士研究生。

赋予熔池编号“1”。

4) 重复步骤 3), 依次赋予熔池编号“2, 3, ...”直至 t_n 时刻全部单元的熔池编号不为“-1”。

5) t_{n+1} 时刻重复步骤 1)~4)。

用该方法能确定凝固过程中各个时刻的熔池个数及熔池状况。

2.2 孤立熔池的等效液面收缩量法

金属液刚充满型腔时所有单元处于一个熔池中, 随着凝固的进行, 铸件中有的部位补缩通道不畅而导致形成多个孤立熔池。将等效液面收缩量法用于各个孤立熔池, 并假设金属液补缩仅考虑液相向固相转变时的体积收缩, 不考虑热胀冷缩影响; 当单元的固相体积分数达到临界值时, 此单元丧失补缩能力。

1) 单元从液相转变为固相时体积收缩率为

$$\beta = \frac{\rho_s - \rho_L}{\rho_L} \quad (4)$$

式中 ρ_s 为固相密度, ρ_L 为液相密度。

2) i 单元从 $(t - \Delta t)$ 时刻到 t 时刻的体积收缩量为

$$\Delta V_i = \beta(\Delta \varphi_L) V_i \quad (5)$$

3) 如果从 $(t - \Delta t)$ 时刻到 t 时刻, P 号熔池中有 n 个单元发生液固转变, P 号熔池总的体积收缩量为

$$\Delta V_P = \sum_{i=1}^n \Delta V_i = \beta \left(\sum_{i=1}^n \Delta \varphi_L \right) V_i \quad (6)$$

4) P 号熔池最高液面(假设为第 n 层)单元的液相体积之和为 V_n , 此时可能出现 2 种情况:

①若 $V_n > \Delta V_P$, 液面仍处在第 n 层, 对于 $\varphi_{si} < \varphi_c$ 的各个单元, 其单元液量减少, 单元液相体积为

$$V_{i,n} = V_{i,n} - \frac{\Delta V_P}{N_n} \quad (7)$$

式中 N_n 为第 n 层 $\varphi_{si} < \varphi_c$ 的单元个数, $V_{i,n}$ 为第 n 层 i 单元液相体积。

②若 $V_n < \Delta V_P$, 则第 n 层 $\varphi_{si} < \varphi_c$ 的单元变成空单元, 液面下降至第 $(n+1)$ 层, 第 $(n+1)$ 层中 $\varphi_{si} < \varphi_c$ 的单元其金属液量进一步减少, $(n+1)$ 层单元液量变为

$$V_{i,n+1} = V_{i,n} - \frac{\Delta V_P - V_n}{N_{n+1}} \quad (8)$$

当然若第 n 层和第 $(n+1)$ 层中可用于补缩的合金液不足, 则液面将下降至第 $(n+2)$ 层, 处理方法类似。

5) 其余熔池处理方法重复步骤 3)~4)。

3 缩松预测方法

假设: 1) 枝晶骨架不能流动; 2) 缩松形成起源于一次枝晶的根部, 这是由于一次枝晶间距比二次枝晶间距大几个数量级, 二次枝晶间距内形成气孔的表面阻力很大^[8]; 3) 达西定律描述的是枝晶域内液体流动的阻力^[9]。在此基础上建立单元体积内缩松预测模型。

1) 质量守恒方程

$$\left(\frac{\rho_s}{\rho_L} - 1 \right) \frac{\partial \varphi_L}{\partial t} - \frac{\partial \varphi_L u}{\partial x} - \frac{\partial \varphi_L v}{\partial y} - \frac{\partial \varphi_L w}{\partial z} + \frac{\partial \varphi_v}{\partial t} = 0 \quad (9)$$

式中 第 1 项代表收缩量, 第 2, 3, 4 项代表枝晶流动的液体进入量, 第 5 项为缩量。

2) 动量方程

在两相区内描述枝晶间流动的动量方程可用达西定律表示:

$$\left. \begin{aligned} u &= - \frac{k}{\mu \varphi_L} \frac{\partial p}{\partial x} \\ v &= - \frac{k}{\mu \varphi_L} \frac{\partial p}{\partial y} \\ w &= - \frac{k}{\mu \varphi_L} \frac{\partial p}{\partial z} - \frac{k \rho_L g}{\mu \varphi_L} \end{aligned} \right\} \quad (10)$$

式中 k 为渗透率, $k = \varphi_L^3 d^2 / [180(1 - \varphi_L)^2]$; d 为晶胞直径, $d = \alpha \Delta t_i^n$; α 和 n 为常数, 其值分别为 7.5×10^{-6} 和 $0.39^{[10]}$; Δt_i 为单元 i 的凝固时间。

缩松中的气体压力为

$$p_G = p + \frac{2\sigma_{LG}}{r} \quad (11)$$

式中 p 为金属液体压力, σ_{LG} 为液气表面能, r 为气孔半径。

3) 气体含量守恒方程

在铝合金中溶解氢时, 氢含量满足下列守恒方程:

$$[H]_0 = (1 - \varphi_L)[H]_s + \varphi_L[H]_L + \alpha_H \frac{p_G \varphi_v}{T} \quad (12)$$

式中 $[H]_0$ 为初始氢含量, $[H]_s$, $[H]_L$ 分别为在固相和液相的氢含量。

$$\left. \begin{aligned} [H]_s &= K_S p_G^{1/2} \\ [H]_L &= K_L p_G^{1/2} \end{aligned} \right\} \quad (13)$$

式中 K_S 和 K_L 分别为固相和液相的气体平衡常数。

联立求解方程(9)~(18)可对缩松产生的位置

及数量进行预测。

4 实验研究及验证

铝合金成分如表 1 所示。实验条件如表 2 所示, 含氢量通过测氢仪测得。对实验铸件剖切后分析缩孔缩松分布发现每个孤立熔池都产生缩孔, 并且缩松的含量随氢含量的增加而增加, 如图 1 所示。缩松的含量随冷却速度的加快而减少, 如图 2 所示。

表 1 实验用铝合金成分

Table 1 Composition of aluminium alloy

$w(\text{Al})$ / %	$w(\text{Cu})$ / %	$w(\text{Mg})$ / %	$w(\text{Si})$ / %	$w(\text{Fe})$ / %	$w(\text{Impurities})$ / %
90.4	1.36	0.414	6.58	0.608	0.638

表 2 实验条件

Table 2 Experimental parameters

Mould type	Casting temperature	$[\text{H}]/(10^{-2} \text{ mL} \cdot \text{g}^{-1})$
Sand	700	0.03
Sand	700	0.16
Sand	700	0.01
Metal	700	0.29
Metal	700	0.01
Metal	700	0.16

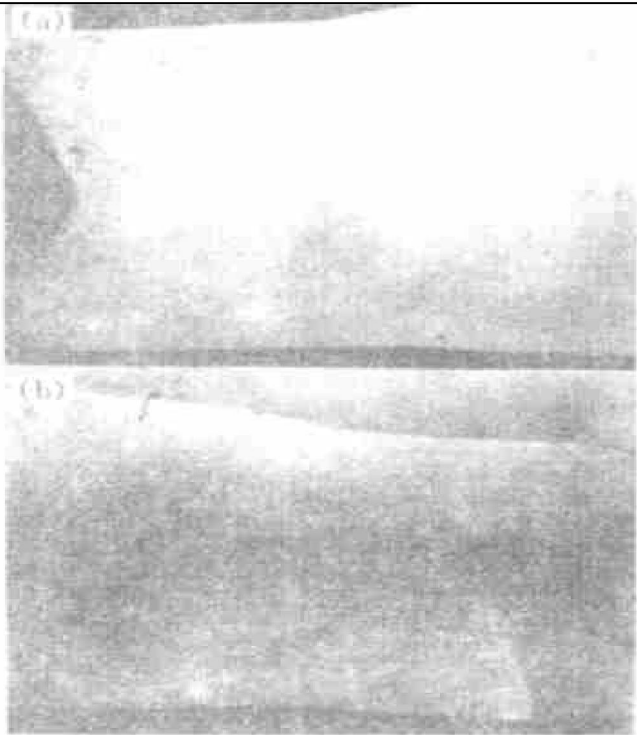


图 1 H 含量对缩孔及缩松分布的影响(砂型)

Fig. 1 Influence of hydrogen content on distribution of shrinkage capacity and porosity (sand casting)
(a) $-\text{[H]} = 3 \times 10^{-4} \text{ mL/g}$; (b) $-\text{[H]} = 1.6 \times 10^{-3} \text{ mL/g}$

在三维温度场模拟的基础上, 对试样进行缩孔及缩松的模拟预测, 结果如图 3~ 5 所示。

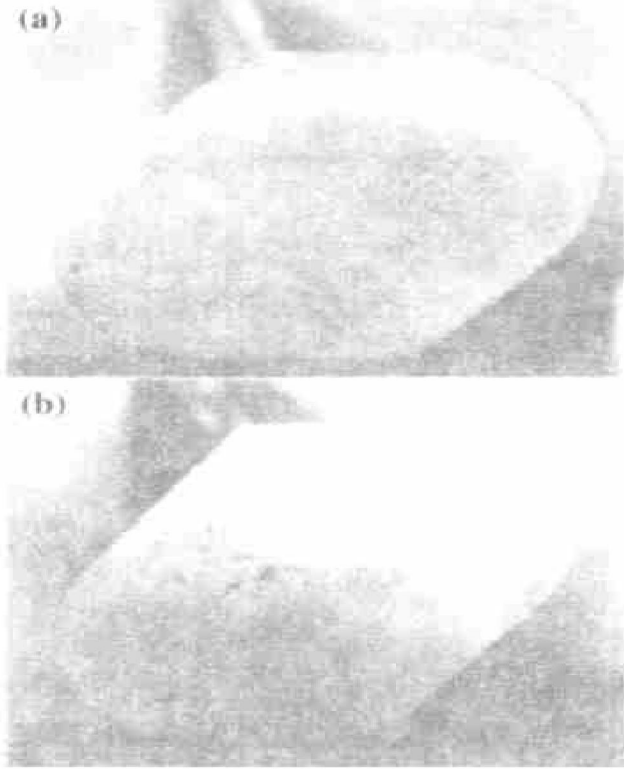


图 2 不同冷却速度对缩松分布的影响

Fig. 2 Influence of cooling rate on porosity
(a) —Metal mould; (b) —Sand mould

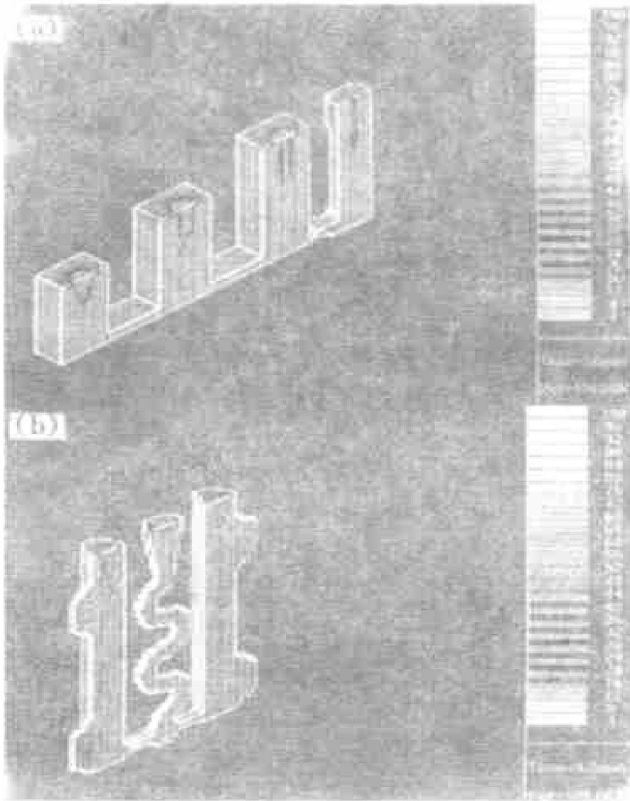


图 3 缩孔模拟结果(砂型)

Fig. 3 Simulation results of shrinkage capacity
(a) —Sample 1; (b) —Sample 2

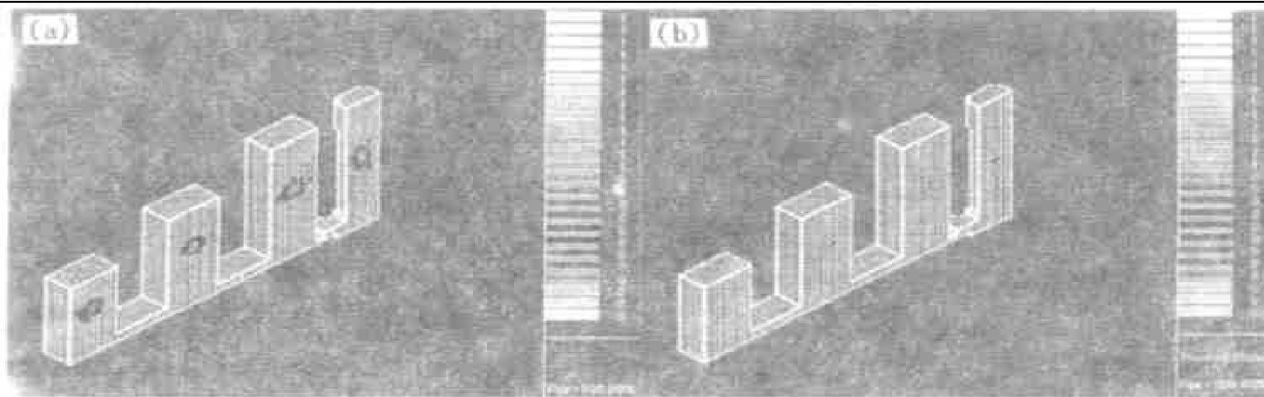


图 4 试件一缩松模拟结果(砂型)

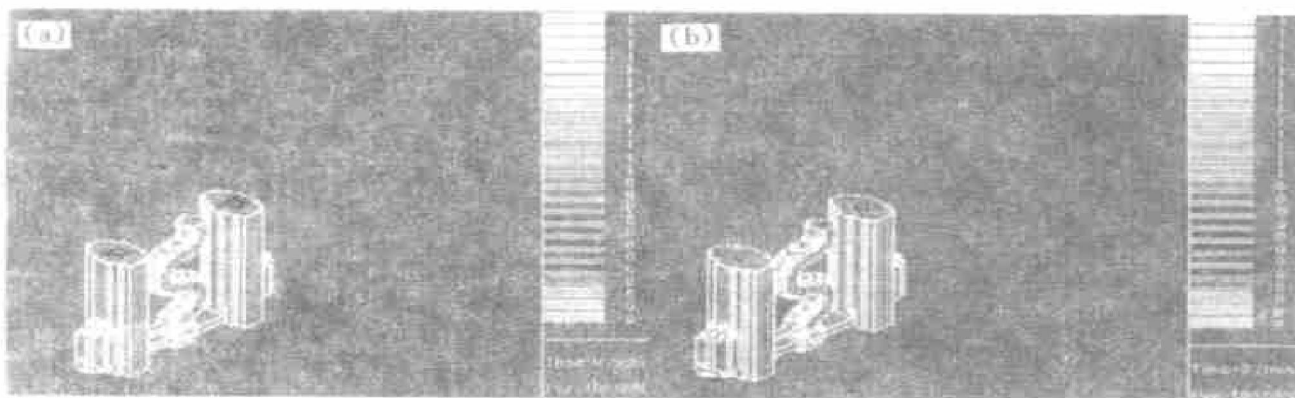
Fig. 4 Simulation results of porosity in sample 1 (sand casting)(a) $-[H] = 1.6 \times 10^{-3} \text{ mL/g}$; (b) $-[H] = 3 \times 10^{-4} \text{ mL/g}$ 

图 5 试件二缩松模拟结果

Fig. 5 Simulation results of porosity in sample 2

(a) —Sand mould; (b) —Metal mould

从模拟结果可见每个孤立熔池顶部都形成了缩孔, 并且含氢量和冷却速度对缩松有较大影响。通过对比可以看出, 计算机模拟结果与实验结果一致。

5 结论

1) 采用动态多熔池等效液面收缩量法可正确定量预测缩孔。

2) 建立了缩松预测的综合数学模型。该模型综合了铸件形状、合金液枝晶间流动和含气量的影响, 提高了缩松预测的精度。

3) 通过实验研究及验证, 证明了数学模型的正确性。

shrinkage cavity predication in steel castings [J]. AFS Transactions, 1983, 10: 527– 540.

[2] Compell J. On the origin of porosity in long freezing-range alloy [J]. British Foundryman, 1964(4): 147– 157.

[3] Niyama E, Uchida T, Morikawa M, et al. Predicating shrinkage in large steel casting from temperature gradient calculation [J]. AFS International Cast Metals Journal, 1981, 2: 16– 22.

[4] Lee Y W, Chang E, Chieu C F. Modeling of feeder behavior of solidifying Al7Si0.3Mg alloy plate casting [J]. Met Trans, 1990, 21B: 715– 722.

[5] Suri V K, Paul A J, El-kaddah N, et al. Determination of correlation factors for predication of shrinkage in casting —part I: predication of microporosity in castings, A Generalized Criterion [J]. AFS Transactions, 1994, 102: 861– 867.

[6] Chiou I J, Tsai H L. Modeling of porosity formation in castings [J]. AFS Transactions, 1990, 98: 823– 830.

[7] Flemings M C. Solidification Processing [M]. McGraw-

[REFERENCES]

[1] Imafuku I, Chijiwa K A. Mathematical model for

- Hill Book Co, New York, USA, 1974.
- [8] Poirier D R, Yeum K and Maples A L. A thermodynamic predication for microporosity formation in aluminum-rich Al-Cu alloys [J]. Met Trans, 1987, 18A: 1979–1987.
- [9] Ganesan S, Poirier D R. Conservation of mass and momentum for the flow of interdendritic liquid during solidification [J]. Met Trans, 1987, 18A: 721–723.
- [10] Kimio K, Robert D P. Mathematical modeling of porosity formation in solidification [J]. Metallurgical Transactions B, 1985, 16B: 359–365.

New technology of cavity and porosity predication for aluminum alloy casting

XU Hong¹, CHENG Jun¹, ZHONG Xueyou²

(1. Department of Materials Engineering, North China Institute of Technology,
Taiyuan 030051, P. R. China;

2. Materials Science and Engineering Institute, University of Science and Technology Beijing,
Beijing 100083, P. R. China)

[Abstract] On the basis of 3-D temperature fields calculation of aluminum alloy casting, the liquid face shrinkage capacity method of varied several melt pool is put forward to predicate shrinkage cavity; also the mathematical model of porosity predication which consists of continuity equation, motion equation and conservation equation of gas content is established. The above models are proved correct by comparing the simulation and test results.

[Key words] temperature field; shrinkage cavity; porosity; predication

(编辑 杨 兵)