

灰铁凝固过程中缩孔缩松的预测*

杨杰 董怀宇 熊守美

(清华大学机械工程系, 北京 100084)

(清华大学先进成形制造重点实验室, 北京 100084)

摘要 通过热分析实验及对灰铁试件的浇注实验, 分析了碳当量及孕育对灰铁凝固过程的影响. 在动态膨胀叠加法的基础上, 综合考虑了初始温度、碳当量、孕育、初晶和共晶体积的收缩与膨胀, 建立了灰铁缩孔预测模型. 开发了灰铁凝固过程数值模拟分析系统, 并对实际的灰铁浇注件进行验证分析, 预测结果与实验结果吻合较好.

关键词 灰铁, 凝固, 缩孔缩松, 预测模型, 数值模拟

中图法分类号 TG242

文献标识码 A

文章编号 0412-1961(2005)09-0929-04

PREDICTION OF SHRINKAGE CAVITY AND POROSITY IN GRAY CAST IRON DURING SOLIDIFICATION

YANG Jie, DONG Huaiyu, XIONG Shoumei

Department of Mechanical Engineering, Tsinghua University, Beijing 100084

Key Laboratory for Advanced Manufacturing by Materials Processing Technology, Tsinghua University, Beijing 100084

Correspondent: YANG Jie, Tel: (010)62789448, E-mail: j-y03@mails.tsinghua.edu.cn

Supported by National Key Basic Research and Development Programme of China (No.G2000067208-3)

Manuscript received 2005-02-06, in revised form 2005-05-10

ABSTRACT The effects of carbon equivalent and inoculation on solidification process of gray cast iron were studied by thermal analysis experiments and pouring experiments of gray iron castings. Based on the dynamic expansion and contraction accumulation method, a shrinkage prediction model of gray cast iron was developed, in which the pouring temperature, carbon equivalent and inoculation were comprehensively considered. Besides, all the volume variations during solidification process, such as the contraction of melt, the contraction or expansion of primary graphite or austenite and eutectic phase, were taken into consideration during computation. A numerical simulation system especially for the solidification process of gray iron castings was developed and used to analyze the solidification process of practical gray iron castings. The simulation results are consistent with the experimental ones.

KEY WORDS gray cast iron, solidification, shrinkage cavity and porosity, prediction model, numerical simulation

灰铁是重要的工程材料, 广泛应用于各工业部门, 在国计民生中占有重要地位. 由于灰铁凝固过程中析出石墨, 所以石墨膨胀对铸件体积变化有着很大的影响. 目前灰铁缩孔缩松预测尚无通用判据, 很多模拟软件依然沿用铸钢的缩孔缩松判据. 但是对于铸铁件 (包括灰铁和球铁), 铸钢的缩孔缩松判据不再适用^[1]. 对于膨胀更为明显的球铁, 其缩孔缩松判据得到了广泛研究^[2-4]. 比较灰铁和球铁, 由于凝固机理不一致, 导致体积变化不一致; 灰

铁具有较小的膨胀特性, 需要寻找单独的缩孔缩松判据^[5,6]. 对灰铁件缩孔缩松缺陷的预测, 可以优化铸造工艺设计、确保铸件质量, 有着重要的理论及实际生产意义. 本工作将物理实验与数值模拟预测紧密结合, 综合考虑冶金和工艺因素的影响, 进行了灰铁件缩孔缩松形成及其预测的研究.

1 灰铁件缩孔缩松影响因素分析

在冶金和工艺因素中, 碳当量、孕育对灰铁件凝固与收缩特性以及缩孔缩松形成有重要影响. 而碳当量和孕育对凝固的影响可以直接反映到对灰铁件的固相温度、液相温度和共晶温度的影响. 为了综合研究上述各因素的作用, 本工作进行了灰铁件的热分析实验及浇注验证实验. 热分析实验结果表明: (1) 碳当量越小, 初晶奥氏体析出量

* 国家重点基础研究发展规划资助项目 G2000067208-3

收到初稿日期: 2005-02-06, 收到修改稿日期: 2005-05-10

作者简介: 杨杰, 女, 1977年生, 博士生

越大, 这个阶段体积收缩量也越大, 如果铸件补缩不畅或者后期膨胀不足, 就容易产生缩孔缩松, 反之亦然; (2) 孕育处理增加共晶形核数目, 减小了共晶晶粒的尺寸, 延迟了共晶的膨胀时间从而增加了补缩的困难, 因而容易造成缩孔缩松 [7].

2 预测模型的建立

图 1 为亚共晶灰铁凝固过程中各相的形核与生长阶段示意图. 在亚共晶灰铁凝固过程中初晶奥氏体和共晶奥氏体均产生体积收缩, 共晶石墨产生体积膨胀, 但共晶石墨与共晶奥氏体的体积变化叠加效果是膨胀 [6].

采用平衡相图, 根据本实验分析, 对实际的凝固过程进行简化, 不考虑过冷, 把共晶开始温度、共晶大量析出温度以及固相线温度简化到同一温度 T_E 上 (T_E 与共晶开始温度相同.) 将灰铁凝固过程划分为 6 个阶段, 各阶段体积变化如图 2 所示.

各阶段的体积变化计算模型如下:

(1) 液相线以上的液态体积收缩量.

在某一时间步长 (Δt) 内, 单元体 i 由于温度降低而

引起的液态体积收缩量

$$\Delta V_{iL} = \alpha_L \cdot (T_i^t - T_i^{t+\Delta t}) \cdot V_i \quad (1)$$

式中, α_L 为液态灰铁的体积收缩系数; T_i^t 为单元体 i 在 t 时刻的温度; $T_i^{t+\Delta t}$ 为单元体 i 在 $(t + \Delta t)$ 时刻的温度; V_i 为单元体 i 的体积.

(2) 初晶过程液态体积收缩量.

在初晶过程中, 初生奥氏体析出, 考虑剩余液体部分的收缩量, 则单元体 i 在时间步长 Δt 内由于温度降低而引起的初晶液态体积收缩量

$$\Delta V_{iLP} = \alpha_{LP} \cdot (T_i^t - T_i^{t+\Delta t}) \cdot (1 - f_s) \cdot V_i \quad (2)$$

式中, α_{LP} 为初晶过程液态灰铁的体积收缩系数; f_s 为固相率.

(3) 初晶奥氏体体积收缩量.

单元体 i 在时间步长 Δt 内析出初生奥氏体所产生的体积收缩量

$$\Delta V_{iAP} = \alpha_{AP} \cdot \Delta f_{iAP} \cdot V_i \quad (3)$$

式中, α_{AP} 为析出初生奥氏体的体积收缩系数; Δf_{iAP} 为单元体 i 初生奥氏体的增量.

(4) 共晶奥氏体体积收缩量及共晶石墨膨胀量.

单元体 i 在时间步长 Δt 内析出共晶奥氏体的体积收缩量

$$\Delta V_{iAE} = \alpha_{AE} \cdot f_{AE} \cdot \Delta f_{iAE} \cdot V_i \quad (4)$$

式中, α_{AE} 为析出共晶奥氏体的体积收缩系数; f_{AE} 为共晶奥氏体在共晶相里的分配系数; Δf_{iAE} 为单元体 i 共晶奥氏体增量.

单元体 i 在时间步长 Δt 内析出的共晶石墨体积的膨胀量

$$\Delta V_{iGE} = \alpha_{GE} \cdot f_{GE} \cdot \Delta f_{iGE} \cdot V_i \quad (5)$$

式中, α_{GE} 为析出共晶石墨的体积膨胀系数; f_{GE} 为共晶石墨在共晶相里的分配系数; Δf_{iGE} 为单元体 i 共晶石墨增量.

在上述缩孔模型基础上, 可计算出灰铁件总的体积变化量. 在时间步长 Δt 内, 体积变化的总叠加量

$$\Delta V = \sum_{i=1}^{rT} \Delta V_{iL} + \sum_{i=1}^{rT} \Delta V_{iLP} + \sum_{i=1}^{rT} \Delta V_{iAP} + \sum_{i=1}^{rT} \Delta V_{iAE} + \sum_{i=1}^{rT} \Delta V_{iGE} \quad (6)$$

式中, $\sum_{i=1}^{rT} \Delta V_{iL}$, $\sum_{i=1}^{rT} \Delta V_{iLP}$, $\sum_{i=1}^{rT} \Delta V_{iAP}$, $\sum_{i=1}^{rT} \Delta V_{iAE}$ 以及 $\sum_{i=1}^{rT} \Delta V_{iGE}$ 分别为 Δt 时间内铸件所有单元的液相线以上液态体积收缩量的和、初晶过程液态体积收缩量的和、初生奥氏体收缩量的和、共晶奥氏体收缩量的和以及共晶石墨膨胀量的和.

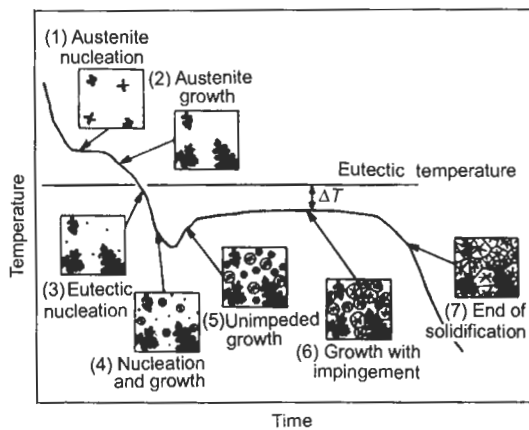


图 1 灰铁凝固过程中微观组织的形核与生长阶段示意图

Fig.1 Schematics of nucleation and growth during solidification of gray iron castings

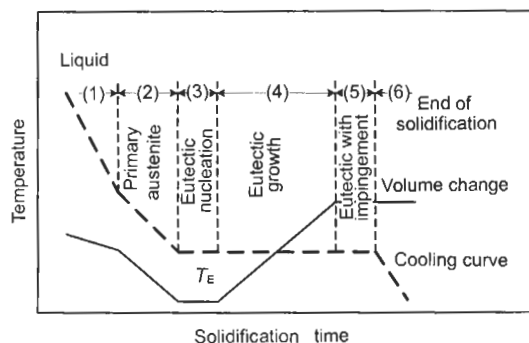


图 2 亚共晶灰铁凝固过程体积变化示意图

Fig.2 Volume change of hypoeutectic gray iron castings during solidification

以此模型为基础，开发灰铁凝固过程数值模拟分析系统。温度场数值计算采用分数步长法求解，对于灰铁的潜热处理程序，对初晶和共晶计算分别采用温度回升法。

3 预测模型的应用实例

本实验所采用的灰铁铸件各牌号及其对应的化学成分如表 1 所示。

实验分为 2 个浇注方案，各方案均浇注 4 个牌号的灰铁件。

各浇注方案铸件的形状与尺寸如图 3a, b 所示。

图 4a, b 分别为浇注方案 1 和方案 2 中 ISO 200 和 ISO 350 的实验结果与预测结果。从图可见，预测结果与实验结果基本吻合。在方案 1 中，铸件热节上方均产生了一次缩孔，缩孔随着碳当量的减小而增大。这是因为在方

案 1 中补缩通道过早中断，铸件热节上方由于液态收缩和初晶奥氏体收缩导致的一次缩孔无法由冒口补缩；而后期共晶膨胀虽然能补缩一部分收缩，但不能完全补缩，因而在铸件热节上方产生了一次缩孔。而在方案 2 中，由于凝固前期补缩通道畅通，冒口能够对铸件进行补缩，从而使得铸件能够通过共晶膨胀保持后期铸件的膨胀性，因而铸件无收缩缺陷。

模拟计算得到的铸件体积的变化曲线如图 5 所示。从图可见，同一方案中碳当量越小，由于液态收缩和初

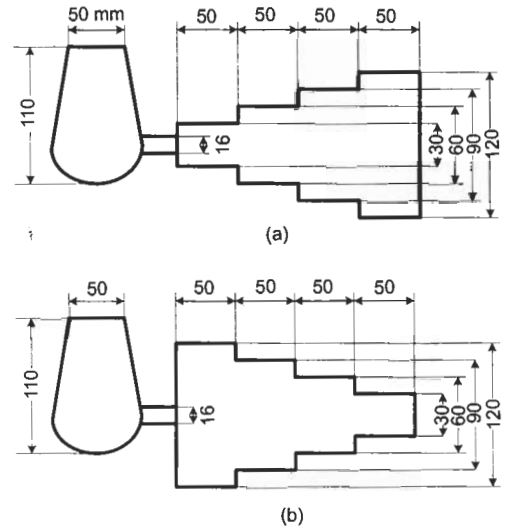


图 3 方案 1 和方案 2 的铸件尺寸图

Fig.3 Dimensions of castings poured by schemes No.1 (a) and No.2 (b)

表 1 灰铁铸件的牌号及其化学成分
Table 1 Brand and chemical composition of gray iron castings

Brand	(mass fraction, %)					
	C	CE	Si	Mn	P	S
ISO 200	3.45	4.13	2.05	0.75	<0.25	<0.1
ISO 250	3.35	4.00	1.95	0.75	<0.25	<0.1
ISO 300	3.20	3.82	1.85	0.75	<0.25	<0.1
ISO 350	3.05	3.63	1.75	0.85	<0.25	<0.1

Note: CE—carbon equivalent

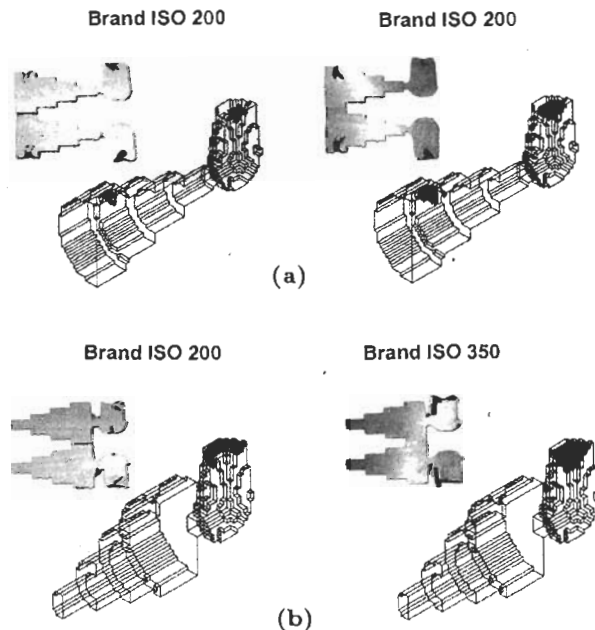


图 4 方案 1 和方案 2 的实验件解剖结果与缩孔预测结果

Fig.4 Comparison of dissected and predicted gray iron castings poured by schemes No.1 (a) and No.2 (b), showing shrinkage cavity in casting (heavy dark zone) appeared only in scheme No.1

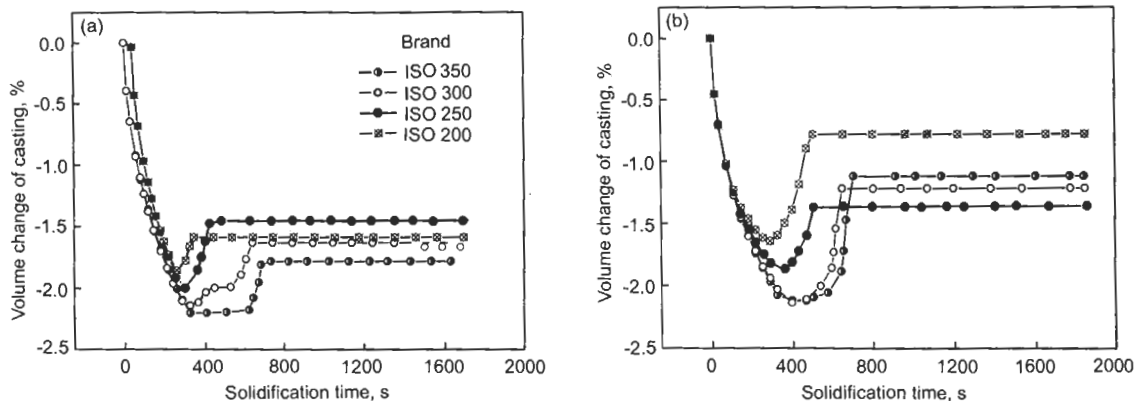


图5 方案1和方案2模拟预测的体积变化曲线

Fig.5 Volume changes of castings predicted by the schemes No.1 (a) and No.2 (b) during the shrinkage

晶奥氏体收缩, 体积收缩量越大; 且因共晶量少, 则共晶膨胀量越小. 对比方案1和方案2可见, 开始阶段收缩相差不多, 但后期方案1的有效膨胀量小于方案2, 这是由于补缩通道过早凝固, 部分膨胀量用于抵消接下来的液态收缩与奥氏体收缩, 故最终有效膨胀量较小.

4 结论

在综合考虑了初始温度、碳当量、孕育、初晶和共晶体积收缩与膨胀的前提下, 采用动态叠加法, 建立了灰铁缩孔预测模型, 开发了灰铁凝固过程数值模拟分析系统.

对实际灰铁铸件的模拟结果表明: 碳当量越小, 液态收缩和初晶奥氏体收缩越大, 此阶段的体积收缩量越大. 碳当量越小, 共晶膨胀量越小. 在补缩通道过早中断时,

一次缩孔随着碳当量的减小而增大.

参考文献

- [1] Li J R, Liu B C, Liu R. *Foundry*, 1998; (7): 9 (李嘉荣, 柳百成, 刘睿. 铸造, 1998; (7): 9)
- [2] Louvo A, Pelikka E, Alhainen J, Eklund P. *AFS Trans*, 1991; 99: 237
- [3] Bradley F J, Bartelt P F, Fung C A, Heine R W. *AFS Trans*, 1992; 100: 155
- [4] Li J R. *PhD Thesis*, Tsinghua University, Beijing, 1994 (李嘉荣. 清华大学博士学位论文, 北京, 1994)
- [5] Heine R W. *AFS Trans*, 1988; 96: 413
- [6] Goetsch D D, Dantzig J A. *Metall Mater Trans*, 1994; 25A: 1063
- [7] Skaland T. *Foundry Eng Molding Mater*, 2003; 27(2): 1 (Skaland T. 铸造工程·造型材料, 2003; 27(2): 1)