

灰铸铁凝固收缩的数值模拟

合肥工业大学 黄 斌 陈志对

陕西机械学院 袁 森 魏 兵

【摘要】 利用计算机数值模拟技术研究铸铁的均衡凝固过程，确定铸件的收缩量和收缩时间，设计铸件的补缩工艺。

关键词： 灰铸铁 补缩工艺 数值模拟

The Numerical Simulation of the Solidification and Shrinkage-expansion of Gray Iron Castings

Huang Bin, Chen Zhidui

(Hefei University of Technology)

Yuan Sen, Wei Bing

(Shanxi Institute of Mechanical Engineering)

Abstract

The equalizing solidification processes of gray iron casting has been studied using the computer numerical simulation method. The shrinkage degree and the shrinkage time for a casting were determined. The calculated results can be used to design the feeding system for gray iron castings.

一、引言

灰铸铁件凝固过程的收缩是液态收缩和凝固收缩与石墨化膨胀相抵销后的剩余量。图1是铸铁件凝固过程中收缩与膨胀叠加变化示意图。从图1可以看出，为了获得健全的铸件，在P点之前，铸件外部必须向铸型内提供足够的金属液以弥补铸件产生的收缩；在P点之后，必须及时封闭铸件，以充分利用石墨化膨胀增加铸件的致密度^[1]。铸铁件凝固收缩时间和收缩量与铸件的合金成份、浇注温度、铸件结构、铸型条件有关。本文介绍的是，应用计算机数值模拟技术，在温度场模拟计算的基础上，计算铸件各单元的收缩体积、铸件收缩时间和需要补缩的金属量，确定铸件的补缩工艺。

《铸造》1991.4

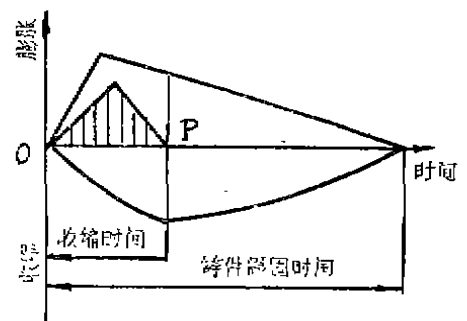


图1 灰铸铁凝固过程膨胀与收缩

二、灰铸铁件凝固过程的模拟计算

1. 温度场的计算

温度场的计算采用内节点直接差分法^[2]，根据热能守恒定律得

$$T_i^{t+\Delta t} = T_i^t + \frac{\Delta t}{\rho C_p \Delta V_i} \cdot \sum_{j=1}^n \frac{S_{ij}}{R_{ij}} (T_j^t - T_i^t) \quad (1)$$

式中 $T_i^{t+\Delta t}$ ——i节点($t+\Delta t$)时刻的温度, °C

T_i^t ——i节点t时刻的温度, °C

Δt ——时间步长, s

ρ ——密度, kg/m³

C_p ——比热容, J/(kg·°C)

ΔV_i ——单元体i的体积, m³

S_{ij} ——节点领域的面积, m²

R_{ij} ——节点ia的热绝缘系数, m²·°C/w

T_i^t ——节点at时刻的温度, °C

潜热的处理是采用温度回升法, 液相线与固相率按线性关系处理, 铸件—铸型采用变步长矩形分割。对于先共晶奥氏体阶段则有^[3]

$$T_L = T_{L0} - (T_{L0} - T_E) \frac{f_s}{f_A} \quad (2)$$

($f_s \leq f_A$)

式中 T_L ——与固相率相对应的液相线温度, °C

T_{L0} ——合金的液相线温度, °C

T_E ——共晶开始温度, °C

f_s ——凝固的固相份数, %

f_A ——先共晶奥氏体的最大含量, %

共晶阶段为

$$T_L = T_E - (T_E - T_S)(f_s - f_A)/(1 - f_A) \quad (3)$$

式中 T_S ——共晶终结温度, °C

2. 体积变化量的计算

铸铁凝固过程的体积变化可分为三个阶段, 即液态收缩、先共晶奥氏体收缩、共晶奥氏体收缩和共晶石墨膨胀。

(1) 液态收缩

在某一时间步长内, 微小单元体由于温度降低而引起的液态体积收缩量为

$$\Delta S_{iL} = \alpha_L \cdot \Delta V_i \cdot (T^t - T^{t+\Delta t}) \quad (4)$$

式中 ΔS_{iL} ——单元体i在时间步长 Δt 内的液相收缩量, m³

α_L ——铸铁合金的液态体积收缩系数, 1/°C

(2) 先共晶奥氏体收缩

亚共晶灰铸铁凝固时, 首先析出初生奥氏体, 由此而产生的体积收缩量为

$$\Delta S_{iA} = \alpha_A \cdot \Delta f_s \cdot \Delta V_i \quad (5)$$

($0 < f_s \leq f_A$)

式中 ΔS_{iA} ——单元体i由于析出初生奥氏体而引起的体积收缩量, m³

α_A ——析出初生奥氏体的体积收缩系数

Δf_s ——奥氏体增量, %

(3) 共晶收缩与膨胀

奥氏体和石墨共晶转变阶段的体积变化为

$$\Delta S_{iE} = [\alpha_L(T^t - T^{t+\Delta t})(1 - f_s) + \alpha_A \cdot \Delta f_{sA} - \alpha_G \cdot \Delta f_{sG}] \cdot \Delta V_i \quad (6)$$

式中 ΔS_{iE} ——单元体i由于共晶而引起的体积变化, m³

Δf_{sA} ——共晶时析出的奥氏体量, %

Δf_{sG} ——共晶时析出的石墨量, %

α_G ——共晶石墨的膨胀系数

铸件的宏观体积变化为

$$S^{\Delta t} = \sum_{i=1}^n \Delta S_i \quad (7)$$

当 $S^{\Delta t} > 0$ 时, 铸件体积收缩; $S^{\Delta t} = 0$ 时, 铸件膨胀均衡点, 对应的时刻为收缩时间; $S^{\Delta t} < 0$ 时, 铸件体积膨胀, 具有自补缩能力。

铸件从浇注开始, t 时间内的体积变化为

$$S = \sum_{i=1}^n S^{\Delta t} \quad (8)$$

三、数值模拟的应用实例

1. 试验铸件的工艺方案

以 34E-63B-100a 液压阀体为试验对象, 其材质为 HT250, 重 7.2kg, 化学成份为 C 3.0~3.3%、Si 1.5~1.8%、Mn 1.0~1.2%、P 0.07~0.09%, 采用煤粉砂湿型(铸型尺寸为 80×80×155mm), 浇注温度 1350~1370°C(铁水出炉温度 1450°C), 工艺简图见图 2^[4]。

2. 模拟计算结果及分析

由 Fe-C 二元相图可推出理论先共晶奥氏体含量与碳当量的关系为

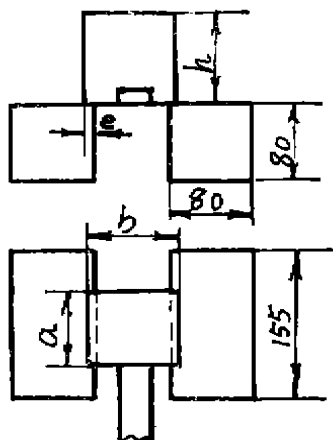


图2 阀体铸造工艺简图

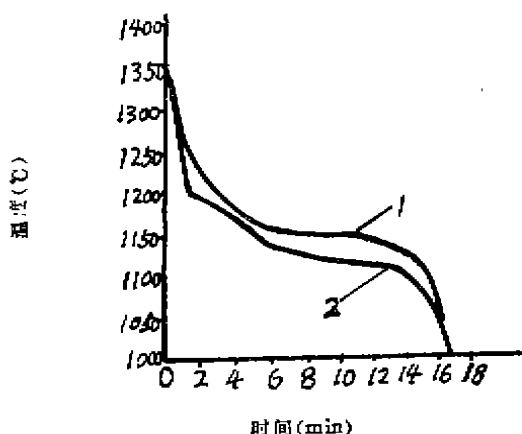


图3 铸件中心实测温度与计算温度曲线
1. 计算温度 2. 实测温度

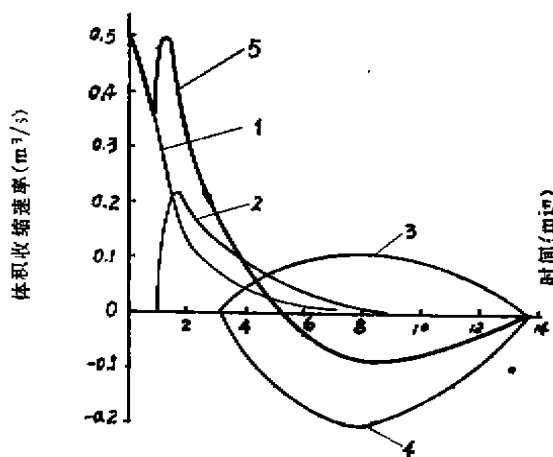


图4 收缩速率与膨胀速率计算值叠加图
1. 液态收缩 2. 先共晶奥氏体收缩 3. 共晶奥氏体收缩 4. 共晶石墨膨胀 5. 铸件的表现收缩

$$f_A^0 = \frac{4.26 - CE}{4.26 - 2.08} \quad (9)$$

$$CE = C + \frac{1}{3} Si \quad (10)$$

根据化学成份，按式(9)计算得到的理论先共晶奥氏体含量约为27%。但实际上先共晶奥氏体与铸件的冷却凝固速度有关，其近似关系为^[8]

$$f_A = K \cdot \ln V + f_A^0 \quad (11)$$

按式(11)计算的先共晶奥氏体含量约为33%。

按上述各式计算的铸件中心冷却曲线和实测的温度变化曲线见图3，铸件凝固过程收缩速率与膨胀速率计算值的叠加图如图4所示。

由图3可见，铸件中心温度的计算结果与实测结果基本吻合。由图4可见，浇注完毕1分钟以后，边界单元开始进入凝固状态，析出初生奥氏体相，体积开始收缩；2分钟后，由于凝固潜热的释放，冷却速度有所下降，收缩速率降低；3分钟后，开始进入共晶阶段；到5分钟左右，铸件表现收缩速率为0，达到体积均衡凝固点；9分钟后，先共晶奥氏体凝固结束，铸件体积在不断胀大，但由于铸型和凝固表层金属的限制，铸件尺寸基本不变；至13.5分钟时，铸件凝固过程结束。计算结果与试验结果基本吻合。

3. 模拟计算结果在冒口设计上的应用

对于象液压件阀体这样的厚实铸铁件，生产时需要设置冒口补缩；通常采用压边冒口，因为它具有补缩能力强和挡渣排气效果好等特点。压边冒口的补缩量 and 补缩时间由冒口模数、压边缝隙的长度和宽度所决定。为了保证铸件不产生缩松、缩孔，冒口设计的补缩时间

应等于或稍大于铸件达到均衡凝固点的收缩时间，补缩量应大于此时铸件的收缩量。

以34E-63B-100a液压阀体为例，把模拟计算结果用于冒口设计中。图5是模拟计算得到的铸件收缩

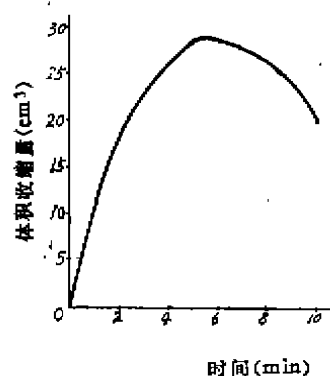


图5 阀体件的收缩量与凝固时间的关系

量与凝固时间的关系曲线图。由图5可以看出,浇注后铸件体积开始收缩,到5.3分钟时,铸件收缩量达到最大值(约 28.8cm^3),此后,由于共晶石墨的析出,使铸件体积开始膨胀。因此,设计的冒口补缩时间应等于或稍大于5.3分钟。但是,设计过长的补缩时间是没有必要的。

图6是模拟计算的冒口尺寸、压边缝隙宽度与补缩时间的关系,由图6可以确定满足补缩时间要求的冒口设计方案:

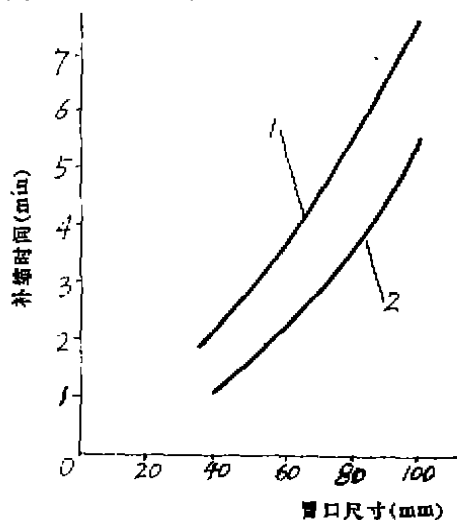


图6 压边冒口尺寸、压边宽度与补缩时间的关系
1. 压边宽度8~9mm 2. 压边宽度4~5mm

方案1: 冒口尺寸 $100\times 100\times 100\text{mm}$, 压边宽度4mm;

方案2: 冒口尺寸 $90\times 90\times 90\text{mm}$, 压边

(上接第40页)

轴含P0.06%,而且还有钼,易和磷一起偏析,但磷共晶一般小于1%,观察冒口切片也未见到磷共晶有多大偏析,而此时硅往往在2.4%以上。所以笔者认为,如硅在2.0%以下、磷在0.06%,当440mm厚的球铁中(设法定共晶凝固时间在3小时左右)为100%铁素体基体、试样致密、球化良好时,延伸率有可能在17.5%以上。所以,制做核废料罐先行研究课题之一是要弄清楚是否确实有必要把磷降到0.03%以下。

四、结 语

中国即将建成的核电站,势必促进我国核

宽度6mm,

方案3: 冒口尺寸 $80\times 80\times 80\text{mm}$, 压边宽度8mm。

试验结果表明,采用以上三种方案设置冒口,铸件均未产生缩松、缩孔等缺陷,满足了生产的要求。但是,为了节省铁水,采用第三种方案为好。

四、结 论

(1)通过对灰铸铁件凝固过程中温度场和铸件体积收缩量的模拟计算,可以确定铸件收缩量和收缩停止时间,相应确定冒口的补缩量 and 补缩时间,并以此为根据,准确选择铸铁件补缩元件尺寸。

(2)试验结果表明,通过模拟计算确定的补缩冒口工艺可以保证厚实铸铁件不产生收缩缺陷。

参 考 文 献

- 1 魏兵. 灰铸铁的均衡凝固与有限补缩. 铸造, 1985(2)
- 2 大中益雄. 计算机传热凝固解析入门. 北京: 机械工业出版社, 1988.
- 3 松田政夫. 铸物的形状を考慮した凝固時間の予測法. 铸物, 1989, 61(5)
- 4 魏兵. 灰铸铁件的均衡凝固与压边冒口的补缩. 铸造技术, 1988(4)
- 5 王贻青. 初生奥氏体量对灰铸铁机械性能的影响. 铸造技术, 1985(5)

(编辑: 田秀全)

动力工业的发展。制造核废料罐的任务将光荣地落在我国铸造工作者身上。而用我国原料和技术解决的可能性确实是存在的。为此,我们必须进行深入的基础研究工作,以迎接核能时代的到来。

参 考 文 献

- 1 中村史朗等. 铸态厚断面铁素体球铁的机械性能. 铸物, 1987(11): 664~669
- 2 矢中操二等. 暂时贮藏输送核燃料的球铁容器的进展. 铸物, 1988(1): 20~25
- 3 唐玉林. 球墨铸铁. 北京: 机械工业出版社, 1982
- 4 钼因亿 张竹. 稀土对大断面球墨铸铁中碎块形石墨形成影响的研究. 球铁, 1982(9): 1~9
- 5 岩崎健幸等. キャスク用厚壁球铁的生产. 铸物, 1988(3): 167~172

(编辑: 王惠愚)

《铸造》1991.4