

金属型铸造凝固过程温度场数学模型 及定解条件的确定

潍坊学院机电工程学院 (山东 261061) 梁梅 周桂云

一、概述

金属型铸造时生产量一般都很大,对铸件的质量要求很高,而且要求铸件是稳定的,也就是说同一副金属型中铸造出来的铸件质量应该是一样的。金属液的凝固过程对铸件质量影响很大,因此模拟凝固过程温度场的分布,对优化铸造工艺、预测与控制铸件质量和各种铸造缺陷,以及提高生产效率都非常重要。具体讲,凝固过程温度场模拟可实现如下目的:

- (1) 提供浇注充型时序图,使浇注、凝固过程可视化。
- (2) 预测缩孔、缩松等宏观缺陷。
- (3) 为预测铸造应力、微观组织等提供基础数据。
- (4) 分析、评价并通过控制凝固条件优化铸造工艺。
- (5) 减少工艺准备失误差。
- (6) 缩短试制周期,降低试制成本。

对铸件凝固过程进行数值模拟的依据就是其数学模型,因此数学模型合理与否对模拟结果的准确性起到关键性作用。数学模型确定之后,相应的具体条件才能得出所要求的计算结果,因而必须由实际问题确定其初始条件和边界条件。初始条件和边界条件是影响温度场计算精度的主要原因。

二、凝固过程温度场模拟的数学模型

影响铸件凝固过程的因素非常多,在求解中若要把所有复杂因素考虑进去是不现实的,也是不可能的。因此在实际模拟过程中常忽略一些次要因素,对模型做合理的简化,使问题的解与实际结果仍能相近。一般做如下假设:

(1) 认为液体金属是瞬时充满铸型后开始凝固。这对小型或薄壁铸件来说是存在问题的,但是对大型铸件不会引起太大的误差。

(2) 不考虑液、固相的流动。一般通过适当放大液态金属的热导率进行补偿。

(3) 不考虑合金的过冷。假定凝固是从液相线温度

开始到固相线温度结束,铸件的传热过程为三维不稳态传热,其控制方程为:

$$\rho c_p \frac{\partial T}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial X} \left(\lambda \frac{\partial T}{\partial X} \right) + \frac{\partial}{\partial Y} \left(\lambda \frac{\partial T}{\partial Y} \right) + \frac{\partial}{\partial Z} \left(\lambda \frac{\partial T}{\partial Z} \right) \quad (1)$$

常用的数值计算方法是有限差分法、有限元法及边界元法。因为有限差分法对于具有规则的几何特性和均匀的材料特性问题,其计算程序设计和计算过程较为简单,收敛性好,所以本文采用有限差分法来建立金属型温度场的数学模型,对控制方程应用于节点 (i, j, k) 时有如下的形式:

$$\frac{1}{a} \left(\frac{\partial T}{\partial t} \right)_{i,j,k}^p = \left(\frac{\partial^2 T}{\partial X^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial Y^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial Z^2} \right)_{i,j,k}^p \quad (2)$$

其差分方程式为:

$$\begin{aligned} \frac{1}{a} \left(\frac{T_{i,j,k}^{p+1} - T_{i,j,k}^p}{\Delta t} \right) = & \eta \left[\frac{T_{i+1,j,k}^{p+1} - 2T_{i,j,k}^{p+1} + T_{i-1,j,k}^{p+1}}{(\Delta x)^2} + \right. \\ & \left. \frac{T_{i,j+1,k}^{p+1} - 2T_{i,j,k}^{p+1} + T_{i,j-1,k}^{p+1}}{(\Delta y)^2} + \frac{T_{i,j,k+1}^{p+1} - 2T_{i,j,k}^{p+1} + T_{i,j,k-1}^{p+1}}{(\Delta z)^2} \right] + \\ (1-\eta) \left[& \frac{T_{i+1,j,k}^p - 2T_{i,j,k}^p + T_{i-1,j,k}^p}{(\Delta x)^2} + \right. \\ & \left. \frac{T_{i,j+1,k}^p - 2T_{i,j,k}^p + T_{i,j-1,k}^p}{(\Delta y)^2} + \frac{T_{i,j,k+1}^p - 2T_{i,j,k}^p + T_{i,j,k-1}^p}{(\Delta z)^2} \right] \quad (3) \end{aligned}$$

式中 a ——导热系数, $a = \frac{\lambda}{\rho c}$;

η ——权函数,取值界于 0~1 之间。

当 $\eta = 0$ 时,为显式格式; $\eta = 1$ 时为完全隐式格式; $\eta = 1/2$ 时为 C-N 格式;当 $0 < \eta < 1/2$ 或 $1/2 < \eta < 1$ 时,为一般隐式格式。因此可根据所选的差分格式,确定其差分方程式。

在上式控制方程中没有考虑相变的影响及潜热的释放对系统的影响。因为铸件在凝固过程中放出结晶潜热是铸件凝固过程重要特征之一,所以必须要考虑结晶潜热。常用的处理结晶潜热方法有等价法、热焓法、温度回升法。温度回升法是一种物理意义比较明确并适合数值计算的潜热处理方法,所以本文采用温度回升法处理

结晶潜热。

三、定解条件

热传导问题的完整数学描述,必须根据具体条件才能得出所要求的计算结果,因而只有热传导微分方程是不够的,必须根据实际问题确定其初始条件和边界条件,即定解条件。

1. 初始条件

物体开始导热的瞬间(即 $t=0$) 的温度分布。根据基本假设(1)认为铸件被瞬时充满,故有 $T(x, y, z) = T_{01}$ (在铸件区域中); $T(x, y, z) = T_{02}$ (在铸型区域中)。一般认为 T_{01} 等于或略低于浇注温度, T_{02} 为铸型预热温度。显然要精确确定铸件开始凝固时的初始温度场,只能通过铸件充型过程的数值模拟或实测。上述方法是一种较简单的方法,存在一定误差。另一种更为准确的方法是:在进入模拟温度场的循环计算以前,要先处理一下浇注瞬间由于高温液体金属和低温铸型突然接触而带来的温度变化。

2. 边界条件

边界条件指铸件边界上的热交换条件,因为铸件内部的导热现象总是与发生在其边界上的各种传热过程联系在一起的。

(1) 铸型-流体介质界面 其中流体介质包括空气、冷却和加热介质。一般要产生界面温度差 ΔT_m , 铸造方法不同,处理这一边界的作法有所差别。若流体介质是空气时,在金属型中因铸型外表面温度较高,一般考虑铸型外表面与大气之间发生自然对流和辐射热交换。对金属型铸造,铸型-大气界面的传热系数 h 应采用下式计算:

$$h = h_c + h_r \quad (4)$$

$$\text{在自然对流条件下 } h_c = C \sqrt{T_{\text{型}} - T_{\text{介}}} \quad (5)$$

$$h_r = \frac{C_0 \epsilon \left[\left(\frac{T_{\text{型}}}{100} \right)^4 - \left(\frac{T_{\text{介}}}{100} \right)^4 \right]}{T_{\text{型}} - T_{\text{介}}} \quad (6)$$

式中 $T_{\text{型}}$ 、 $T_{\text{介}}$ ——金属型表面和周围介质的绝对温度;

h_c ——自然对流换热时的换热系数;

h_r ——热辐射传热系数;

C ——系数(在自然对流条件下,铸型上表面 $C = 2.1$,垂直表面 $C = 1.7$,向下表面 $C = 1.1$);

C_0 ——绝对黑体的辐射系数;

ϵ ——材料的黑度(铸铁金属型 $\epsilon \approx 0.82$)。

另外,铸型底面同地面之间的界面,可按第一类边界条件处理,即设边界条件为已知。这时只要计算单元取地面以下某一深度,并假定该处的温度为一常数,不会引起大的误差。若流体介质是冷却或加热的管道,则对流换热系数的计算公式为:

$$h = N_u \cdot \frac{\lambda_f}{D} \quad (7)$$

式中 N_u ——努塞尔数;

λ_f ——流体的导热系数;

D ——冷却或加热的管道的直径。

其中努塞尔数可根据流体的流速、平均温度、粘度系数及冷却或加热的管道壁的动力学粘度系数等由经验公式求得。

(2) 铸件-铸型界面 在此界面上的传热是一个非常复杂的过程,在许多情况下,界面换热往往是整个系统传热的关键。铸件-铸型界面通常分为理想接触和非理想接触两种情况。所谓理想接触,就是铸件与铸型之间相互紧贴。相互接触的两表面具有相同的温度,在这种情况下,若导热系数不随温度而变化,可按串联复合导热系数处理边界条件。即 $\lambda_{A \rightarrow B} = 2\lambda_A \lambda_B / (\lambda_A + \lambda_B)$,并认为此时节点界面之间没有热阻。如果界面上存在热阻,热阻为 $R = 1/h$, h 是界面传热系数,则等值的串联复合导热系数 $\lambda_{A \rightarrow B}$ 可按下式求得:

$$\lambda_{A \rightarrow B} = \frac{1}{\frac{\lambda_A + \lambda_B}{2\lambda_A \lambda_B} + \frac{R}{L}} \quad (8)$$

其中, L 为节点中心距。

实际上,铸件-铸型界面属于非理想接触,因为铸件在铸型内冷却凝固时,它的体积要逐渐收缩,而铸型受热要逐渐膨胀。此时在铸件-铸型之间形成一层很薄的气体层,这一气体层和铸型内表面上的涂层合在一起称为气隙。由于空隙的存在,在铸件和铸型之间就要产生界面温度差 ΔT_m 。

金属型铸造时必须在型腔表面敷上涂料。在涂料层中的热量传递是靠导热,而在气隙的气体层内同时存在着导热、辐射和对流换热现象。气隙中的物质在受热时能蓄热,在冷却时能放出热量。因此,气隙中的热量传

(下转第 63 页)

该处的缩松、缩孔类缺陷。

3. 内浇口位置探讨

在选择球墨铸铁件内浇口时,应根据不同铸件,尽量避免将内浇口开设在铸件的热节部位,这样可防止因产生几何热节和接触热节重叠而产生缩松、缩孔类缺陷,同时可减小冒口尺寸,提高工艺出品率。一般情况应将内浇口开设在离开热节但应接近热节的地方,使补缩距离较短且补缩通道畅通,这样才能保证有效的补缩,从而消除铸件的缩松、缩孔类缺陷,同时可使冒口充分发挥补缩作用,提高工艺出品率。

二、内浇口形状的选择

1. 应用实例

对球墨铸铁件内浇口一般采用宽扁梯形状,但对于有些铸件往往会在内浇口处产生缩松、缩孔缺陷。我公司为柳汽生产的一发动机支架零件,其结构如图2所示。由图可见,该件结构比较均匀,我们在试制时采用了常用的扁平梯形内浇口,但无论怎样调整均无法完全消除内浇口处的缩松,最后我们将内浇口形状由宽扁梯形改为高窄梯形,从而消除了内浇口处的缩松、缩孔缺陷。改进前后内浇口的形状及尺寸见图3。

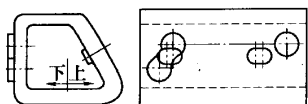


图 2

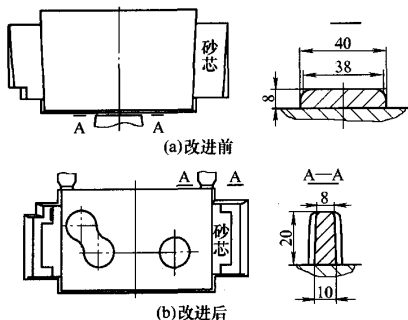


图 3

2. 原因分析

上例铸件的结构均匀,在内浇口引入位置极易形成物理热节,而该件由于其中心部位有散热能力较差的砂芯,加之受铸型布板的限制,横浇道与铸型之间仅有26mm的距离,故浇口周围的型砂散热条件很差,致使

内浇口引入部位形成了物理热节,使该处最后凝固且无铁液补缩,从而形成内浇口处缩松。

3. 内浇口形状探讨

宽扁梯形内浇口是球墨铸铁件最常见的内浇口形状,但不是惟一形状,根据不同的铸件及生产方式,可以是高窄梯形、圆形和三角形等,设计人员应根据铸件的结构形状、生产方式及型腔散热条件等因素,全面综合考虑后选择合理的内浇口形状,以消除铸件的缩松、缩孔类缺陷。

三、结语

对球墨铸铁件的内部缩松、缩孔类缺陷,除加强成分、温度及型腔紧实度的过程控制外,还应特别应注意浇注系统中内浇口位置及形状的设计。工装设计人员应针对不同铸件进行认真分析,合理确定内浇口的位置和形状,只有这样才能降低或消除铸件的缩松、缩孔类缺陷,为企业降低废品率,提高经济效益做出较大的贡献。

(20070522)

(上接第 61 页)

递是很复杂的。气隙的厚度 δ_g 一般是零至几毫米,所以气隙的厚度同铸件和铸型的尺寸相比,通常是很小的,这意味着复杂形状的气隙可允许看作为传热学意义上的平壁,气隙热阻 R_b 可按下式计算:

$$R_b = R_g + R_{co} = \frac{\delta_g}{\lambda_g} + \frac{\delta_{co}}{\lambda_{co}} \quad (9)$$

式中 R_g ——气体层热阻;

R_{co} ——涂料层热阻;

λ_g ——气体层导热系数;

λ_{co} ——涂料层导热系数。

气隙中的传热系数 $h = 1/R_b$ 。铸件-铸型间产生了气隙,通过传热系数 h 必然要影响铸件的凝固过程。有关学者对此问题做了不少研究,但目前还没找到一种令人满意的方法来确定界面热交换系数 h 值的大小。

四、结语

在对金属型铸造凝固过程进行合理假设的基础上,利用有限差分法得出通用差分格式,为模拟凝固过程温度场奠定了基础。同时根据金属型铸造的实际状况,确定了凝固过程传热的初始条件和边界条件。

(20070828)