

4.4 缩松缩孔缺陷判据方法^{[70]~[79]}

4.4.1 Cooling Curve Analysis 冷却曲线分析

虚拟热电偶进行任意点的冷却曲线分析是 PROCAST 软件的一个重要功能。冷却曲线的分析基于如下的方程式：

传给砂型的热=相变产生热-金属的散热^[70]

$$\frac{dQ_L}{dt} - \rho VC_p \frac{dT}{dt} = hA(T - T_0)$$

Q_L : 结晶潜热

ρ : 金属密度

C_p : 金属比热

T : 金属温度

t : 时间

h : 热转换系数

A : 传热表面积

V : 金属试样的体积

T_0 : 周围环境的温度

以上公式可整理为：

$$\left(\frac{dT}{dt}\right)_{cc} = \left[\frac{dQ_L}{dt} - hA(T - T_0)\right] / (\rho VC_p)$$

如果无相变发生，则 $\frac{dQ_L}{dt} = 0$ ，以上公式可变为：

$$\left(\frac{dT}{dt}\right)_{zc} = -hA(T - T_0) / (\rho VC_p)$$

其中下标 ZC 是指起始曲线，与上式相减得：

$$\frac{dQ_L}{dt} = \rho VC_p \left[\left(\frac{dT}{dt}\right)_{cc} - \left(\frac{dT}{dt}\right)_{zc}\right]$$

积分得：

$$Q_L = \rho VC_p \int_0^{t_f} \left[\left(\frac{dT}{dt}\right)_{cc} - \left(\frac{dT}{dt}\right)_{zc}\right] dt$$

这里 t_f 是凝固时间。因此相变的凝固潜热可表示为：

$$L = Q_L / \rho V$$

4.4.2 铸造缺陷的查看的方法

在 PROCAST 软件的铸造缺陷的查看功能中,比较成熟的是 R, G, L 功能和 ISOCHRONES 功能。

1. R, G, L 功能

R, G, L 功能中的 R 是指金属的凝固速度 (Solidification rate); G 是指温度梯度 (Temperature gradient); L 是指冷却的速度。

具体 G 定义为

$$G = \left[\left(\frac{\partial T}{\partial x} \right)^2 + \left(\frac{\partial T}{\partial y} \right)^2 + \left(\frac{\partial T}{\partial z} \right)^2 \right]^{1/2}$$

$$L = \left| \frac{T_{upper} - T_{lower}}{t_{upper} - t_{lower}} \right|$$

这里 T 是温度, t 是到达这一温度的时间。例如 T_{upper} 可以是液相线温度, T_{lower} 可以是固相线温度。

R, G TEMP 是指用来计算等温线移动速度和温度梯度的温度值。如果 R, G TEMP 被设成固相线温度,则 R 将是凝固速度。但是, R 可以被计算成在任意温度下的等温线推移速度。当一给定点的温度到达 R, G TEMP 点温度时就计算温度梯度 G 值。

由公式 $M = aR^bG^cL^d$ 可以演化出三种判据: |G 温度梯度法, G/L^{1/2} 法 (即当前最为流行的 Niyama 判据: $G/\sqrt{\dot{T}} < A$ (G 代表温度梯度, \dot{T} 为冷却速率))、G/R 法。

下面对这几种判据作一些介绍。

● 温度梯度法

温度梯度法认为^[74], 铸件中心线上的缩孔与缩松受凝固时温度梯度支配, 当温度梯度大时, 补缩通道的扩张角越大, 冒口补缩作用就越好, 铸件内越不容易产生缩孔和缩松; 而当温度梯度小时, 补缩通道将在凝固结束前的某个时刻被截断, 铸件内会出现缩孔和缩松。其中温度梯度的可利用温度场的模拟结果定义为

$$G = \max \left(\frac{T' - T_0'}{\Delta L} \right)$$

式中: T' 为与任一单元节点相邻的某一单元节点在 $\tau + \Delta \tau$ 时刻的温度;

ΔL 为与某时刻相邻的某一单元节点间距的距离

若此温度梯度小于某个临界温度梯度值, 则该单元将产生缩孔或缩松。新山英辅等人将温度梯度法用于大型铸钢件和圆筒形状铸铁件; 曾我等人用此法对钢管件中的缩松发生的部位进行了预计; 陈海清^[11]等人对大型复杂 Cr-Mo-V 铸钢件——汽轮机高压内缸的二维截面进行了温度场数值模拟, 以 2°C/cm 作为缩孔发生的判据, 并以此对工艺加以改进, 均取得了较的预测效果。

温度梯度法 (G 法) 主要对不稳定热传导问题进行凝固数值模拟, 具有简便、计算量小的特点, 即使在等温曲线不封闭的场合也能预测缩孔的发生。作为判据, 它具有充分、必要的条件; 但是判断缩孔发生的临界温度梯度因铸件形状、尺寸及合金组成而异, 并且临界温度梯度只能靠实验来确定, 对不同形状、尺寸及不同合金种类的铸件要获得众多的临界温度梯度值不是一件容易事。因此, 此法存在一定的局限性。

● $G/\sqrt{\dot{T}}$ 法

1982年,日本的新山英辅等人在温梯度法的基础上提出了 $G/\sqrt{\dot{T}}$ 法用来预测铸件中的收缩缺陷。他们在研究中指出, $G/\sqrt{\dot{T}}$ 法在所研国内外铸的范围与合金成分、铸件的形状和尺寸无关。之后,经过众多铸造科技工作者的努力, $G/\sqrt{\dot{T}}$ 法已成为目前最为流行的铸件缩孔、缩松判定法。该法在 MAGMA、ProCAST 及 FTSolver 等凝固过程数值模拟商品化软件中已获得广泛应用。

文献[71]作者认为新山英辅等人在对铸钢、铸铝合金试样进行了大量的实验的基础上得到的 $G/\sqrt{\dot{T}} < A$ (G 代表温度梯度, \dot{T} 为冷却速率) 经验判据虽已获得广泛应用,但仍缺乏明确的物理意义,且无合适量纲。对其进行了重新推导。他们首先根据张承甫先生在理论上得出的树枝晶生成的判据式:

$$R > 2D_L/\lambda$$

式中 R 代表凝固速度 (m/s),

D_L 为液体中的溶质的扩散系数 (m^2/s),

λ 表示胞晶间距或一次枝晶间距 (m),

并进一步依据一次枝晶间距的计算公式:

$$\lambda = 2\varepsilon \sqrt{m \cdot C_0 \cdot (k-1) \cdot D_L / \sqrt{\dot{T}}}$$

式中: ε ——枝晶生长形态修正系数

m ——液相线斜率

C_0 ——溶质浓度 wt %

k ——溶质分配系数

\dot{T} ——液相线局部冷却速度 $^{\circ}C/s$

及局部冷却速度、温度梯度 G 和冷却速度 R 三者之间存在的关系式 $\dot{T} = G \cdot R$ 即 $R = \dot{T}/G$, 推出缩孔、缩松生成判据:

$$G/\sqrt{\dot{T}} < A\sqrt{\Delta T}/\sqrt{D_L} \text{ 或 } G/\dot{T} < B \cdot \Delta T/D_L$$

式中 $B = A^2$, A 和 B 皆为与枝晶形态有关的修正系数

从而赋予 $G/\sqrt{\dot{T}}$ 判据以明确的物理意义。

由于判据中考虑到成分偏析的影响,从而为缩孔、缩松的定量化预计提供了有力的理论依据。目前此法主要应用于铸钢件,近来也有人^{[72][73]}尝试将这一判据应用于铸铁件的缩孔缩松,在当前铸件凝固过程数值模拟的缩孔、缩松预测中,这种法是最为流行的方法。它不仅考虑了铸件的形状、尺寸因素影响,而且能够更加精确地评价流动压力损失,较温度梯度法更为优越。但是,此法把凝固时间 τ_f 看作到达固相线温度的某个单元的凝固时间,之后判断该单元内是否产生缩孔。而实际上凝固收缩量的大小不仅取决于特定单元的凝固收缩,还与整个连续流动区域的凝固收缩量有关。因此,此法虽比温度梯度法优越,但不充分;另外,由于并未考虑到球铁件缩孔缩松的形成机理的特殊性,导致在球铁件缩松缩孔预测中的应用受到限制。大量实践证明,此法在预测铸钢件缩松的形成上更为准确^[74]。

2. 等时线 (ISOCHRON) 法

等时线法^[77]可以描绘铸件系统到达某一指定温度的时间曲线图。这一功能尤其对于判断热节点和缩颈很有参考价值。可以设定相应的参数,将其输出以供VIEWCAST程序查看。比如,对于灰铁铸件,将等时温度设为1150 $^{\circ}C$,可以获得较为满意的结果。

3. 补缩长度法

补缩长度法认为^[78]，在铸件的成型过程中，当金属液中的固相分数到达某一临界值时液态金属的补缩受阻，在无法补缩的部位即有可能形成收缩缺陷。此法与当前国内铸造界所使用的流导法和补缩距离法在意义上有相似之处。数学模型可参照下式：

$$FL_{cr}=AP+B$$

式中，P为水利学压头，由系统自动算出；A、B为常数，由使用者设定。

4.5 小结：

1. 研究了灰铸铁产生缩孔缩松的自身化学成分的影响因素，通过对灰铸铁在凝固过程中的体积膨胀和体积收缩的变化特性进行了理论分析。
2. 研究了产生灰铸铁缩孔缩松的铸造工艺影响因素，认为铸件凝固过程中的热节是产生缩孔缩松的重要原因，同时冒口的补缩功能也是重要的影响因素。
3. 考察了充型及模拟过程中的能量传输，质量传输，动量传输的数值模拟数学模型。
4. 对在灰铸铁数值模拟中，冷却曲线分析和用来判断的缩孔缩松缺陷的方法：温度梯度法， G/\sqrt{T} 法，等时线法，补缩长度法进行了研究。