

基于时间梯度法的铸钢件三维补缩路径计算

周 琴¹ 王 瞳² 沈 旭³ 周建新³

(1.华中科技大学工程实践创新中心; 2.武汉科技大学冶金装备及其控制教育部重点实验室;
3.华中科技大学材料成形与模具技术国家重点实验室)

摘 要 为进一步促进冒口工艺优化,针对传统方法在冒口优化设计中的不足,重点研究了铸钢件三维补缩路径的计算,阐明了铸钢件基于时间梯度的补缩路径计算方法。以平板铸件和模架件模型为例,验证了补缩路径计算的有效性以及适用性。

关键词 冒口优化;补缩路径;时间梯度;铸钢件

中图分类号 TG260;TP311 **文献标志码** A

DOI:10.15980/j.tzzz.2022.02.005

开放科学(资源服务)标识码(OSID):



Three-dimensional Feed Path Computation of Steel Casting Based on Time Gradient Method

Zhou Qin¹, Wang Tong², Shen Xu³, Zhou Jianxin³

(1.Center for Practice Innovations, Huazhong University of Science and Technology;
2.Key Laboratory of Metallurgical Equipment and Control Technology, Ministry of Education, Wuhan University of Science and Technology; 3.State Key Laboratory of Materials Processing and Die & Mould Technology, Huazhong University of Science and Technology)

Abstract: In order to further promote the riser process optimization, three-dimensional feed path calculation of steel casting was focused in view of deficiencies of traditional methods in the riser optimization design. The feed path computation method of steel casting based on time gradient was clarified, and two steel casting models were set as examples to verify the validity and applicability.

Key Words: Riser Optimization, Feed Path, Time Gradient, Steel Casting

在铸件补缩系统的设计过程中,冒口的设计极为重要^[1]。相较于传统的依赖经验设计,铸造过程数值模拟显著提高了铸件生产效率。但在以往的冒口设计中,对冒口的形状和尺寸形成了较为成熟的设计理论和准则,而对于冒口的位置关注较少。铸造工艺师在设计冒口位置时往往是依据经验来判定,无法实现冒口最优化。因此,针对传统方法在冒口优化中的不足,本课题提出补缩路径模型。熔融金属在凝固过程中产生的体积收缩由相邻区域的液态金属进行补偿,液态金属的这种微观流向即为补缩路径^[2]。

20 世纪 50 年代,补缩距离被提出,即当冒口能提供金属液将简单成形铸件中补缩至没有收缩缺陷时,从冒口到铸件被补缩的最远点之间的长度,并随后对补缩距离进行了研究^[3~6]。RAVI B 等^[7]通过引出补缩路径的概念将补缩距离的定义扩展到形状复杂的铸件中,

提出了模量法(MVM)来模拟补缩路径,确定了铸件中热节的分布。SUTARIA M 等^[2]提出矢量单元法(VEM)计算补缩路径,随后又提出水平集法(LSM)^[8]、梯度矢量法^[9,10]用来计算补缩路径,这些都极大推动了补缩路径的计算方法的发展。

传统的计算机模拟方法在热节预测中存在不足,当整个铸件完全凝固后,此时的温度分布并不能反映出铸件的所有热节。这是由于在凝固早期形成的较小热节可能会随着凝固时间的推移而逐渐消失,导致热节在铸件完全凝固后不能被显示出来。而补缩路径能够加强铸件内部可视化,显示铸件凝固过程中形成的所有热节,为冒口系统的工艺设计提供更为可靠的基础。通过补缩路径不仅可以看到金属液在凝固过程中的微观流向,还可以依据补缩路径的长度信息(也就是用来补缩的金属到被补缩区域的距离)对冒口进行评估和设计,

收稿日期:2021-04-30;修改稿收到日期:2021-05-09
基金项目:国家自然科学基金资助项目(51605174,51775205);材料成形与模具技术国家重点实验室开放课题研究基金资助项目(2022-018)
第一作者简介:周琴,女,1988 年出生,工程师,武汉(430074),E-mail:q200815@hust.edu.cn
通信作者:王瞳,男,1989 年出生,讲师,武汉(430081),E-mail:wangtong@wust.edu.cn
引用格式:周琴,王瞳,沈旭,等. 基于时间梯度法的铸钢件三维补缩路径计算[J]. 特种铸造及有色合金,2022,42(2):158-161.
ZHOU Q, WANG T, SHEN X, et al. Three-dimensional feed path computation of steel casting based on time gradient method[J]. Special Casting & Nonferrous Alloys, 2022, 42(2):158-161.

为冒口放置的位置提供参考,实现冒口的最优化设计,提高铸件出品率和品质,降低资源消耗。因此,补缩路径的发展对冒口的设计及优化极其重要。本课题主要研究铸钢件三维补缩路径的计算,首先通过温度场的数值模拟,获取不同时刻的固-液界面,构建凝固时间模型,然后利用凝固时间梯度计算三维补缩路径,并以 2 个铸钢件模型验证补缩路径计算的可靠性及适用性。

1 固-液界面模型

1.1 凝固过程温度场数值模拟

铸钢件的凝固过程中,其内部的温度变化和热量传递主要是通过热传导实现的,其导热微分方程为:

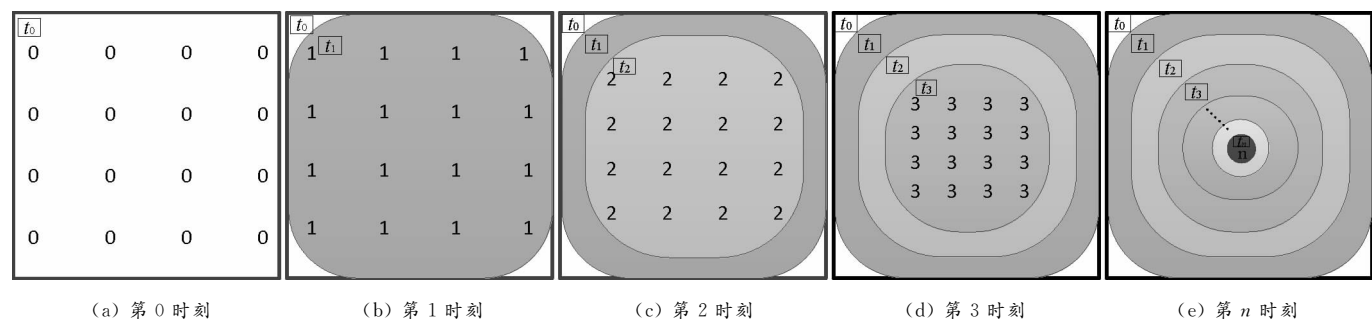


图 1 不同时刻固液界面

Fig.1 Solid-liquid interface at different moments

图 1 中用同一数字 $n(n=0,1,2,\dots)$ 标明的区域为铸件在第 n 时刻的液相区域, t_n 为不同时刻固液界面的凝固时间。如在第 0 时刻,铸型刚被液体充满,此时铸件还未开始凝固,铸型边界则为其固液边界,将该时刻固-液界面(即凝固时间)标示为 t_0 ,图中 0 代表第 0 时刻的液相分布。图 1e 为第 n 时刻的固-液界面模型。

2 三维补缩路径的计算

三维补缩路径计算作为二维补缩路径^[11]的拓展,其目的是为铸造凝固过程中的工艺优化提供依据,为冒口位置设计研究奠定基础,并使其能真正应用到实际铸造凝固过程中,为铸造工艺优化提供指导。

固-液界面上任一点的最大温度梯度方向产生最大的拉应力,液态金属沿着最大温度梯度方向移动进行补缩,所以铸件中任何位置的补缩路径都是沿着该处最大温度梯度方向。而沿着固-液界面的温度梯度为 0,垂直界面处的温度梯度最大,所以补缩路径总是垂直于固-液界面。

2.1 凝固时间梯度

以凝固时间对固液界面进行标识,所以垂直界面处既是最大温度梯度方向,也是时间梯度方向。故三维固-液界面最大温度梯度的获取可以通过计算凝固时间

$$\rho c \frac{\partial T}{\partial t_0} = \lambda \left(\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} \right) + \dot{Q} \quad (1)$$

式中, T 为热力学温度, K; t_0 为时间, s; x, y, z 为空间坐标, m; ρ 为密度, kg/m^3 ; c 为比热容, $\text{J}/(\text{kg} \cdot \text{K})$; λ 为热导率, $\text{W}/(\text{m} \cdot \text{K})$; $\dot{Q}$ 为单位体积、单位时间内放出的热量, W/m^3 。

1.2 固-液界面模型的建立

通过固-液界面模型能清晰地观察铸件的整个凝固进程。固-液界面模型是建立在温度场数值模拟分析基础上的。对应于不同时刻的铸件温度场分布信息,获得不同时刻的固-液界面信息,形成固-液界面模型,见图 1。

梯度近似获取,时间梯度计算如下:

$$\nabla t = \left(\frac{t_{(i+1),j,k} - t_{(i-1),j,k}}{2\Delta x}, \frac{t_{i,(j+1),k} - t_{i,(j-1),k}}{2\Delta y}, \frac{t_{i,j,(k+1)} - t_{i,j,(k-1)}}{2\Delta z} \right) \quad (2)$$

式中, ∇t 为时间梯度, s/m ; t 为相邻网格的时间, s; $\Delta x, \Delta y, \Delta z$ 分别为 3 个方向上的网格尺寸, m。

2.2 补缩路径的计算方法

通过获得的凝固进程中固-液界面信息,可计算出铸件凝固过程中的补缩路径,见图 2。

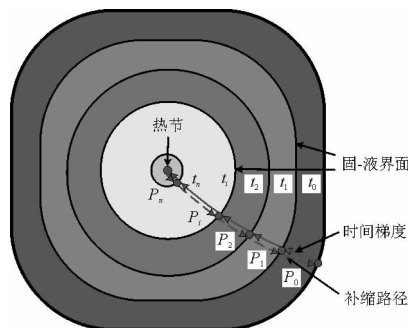


图 2 补缩路径计算示意图

Fig.2 Schematic diagram of feed path calculation

当开始计算补缩路径时,在铸件边界上设置 n 个初始点,从设置的某一初始点开始沿着凝固时间梯度的

方向到热节上的各点用 $P_{i,j,k}$ 表示为:

$$P_{i,j,k} = P_{i,j,k-1} + \nabla t \cdot \Delta x \tag{3}$$

式中, $P_{i,j,k}$ 为各点坐标, m。补缩路径计算流程图见图 3。

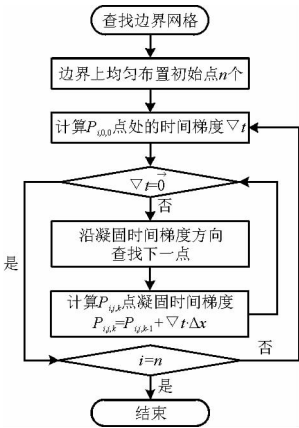


图 3 补缩路径计算流程图

Fig.3 Flow chart of feed path calculation

3 应用案例分析

采用 C++ 语言和 VS2010 平台,自主研发数值计算求解器,并通过个人 PC 机进行计算求解。本课题通过平板件模型^[12]对其有效性进行验证,使补缩路径能真正应用到实际铸造工艺设计中。

3.1 平板件模型验证

补缩路径计算作为对传统设计方法的改进,不仅能预测缩孔、缩松位置,还能提供补缩路径方向和长度信息,为冒口位置设计提供参考。首先采用平板件模型初步验证本课题补缩路径以计算研究的正确性。该模型采用 Niyama 判据预测出了其缺陷位置。现对此模型进行补缩路径计算,并将其计算结果与采用 Niyama 判据得到的结果进行对比,观察两种方法得到的结果是否一致。采用 UG 软件进行建模,并导出为 STL 格式,图 4 为平板件模型图。平板件尺寸为 482.6 mm×139.7 mm×25.4 mm,冒口尺寸为 $\phi 76.2$ mm×114.3 mm。

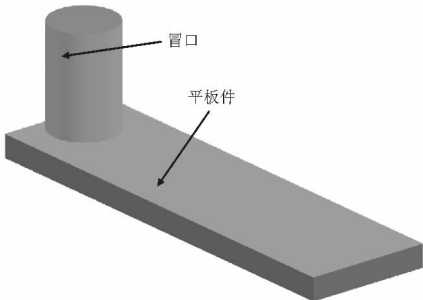


图 4 平板件模型图

Fig.4 Model of plate casting

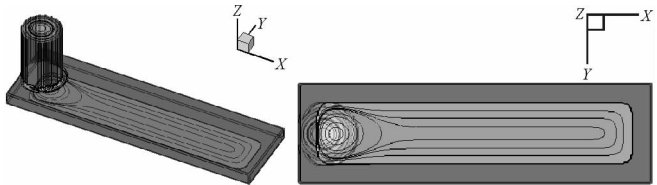
此模型采用的材质为 WCB 钢,其成分见表 1。采

用砂型铸造方式,初始温度设定为 1 569 °C^[12]。

表 1 WCB 钢的化学成分

Tab.1 The chemical composition of WCB steel							%
w_B							
C	Cr	Mn	P	S	Si	Fe	
0.19	0.2	1.25	0.04	0.045	0.4	余量	

对该平板件模型进行了凝固过程的温度场模拟,并判定其固液相状态,建立了平板件固-液界面模型,见图 5。可以看出,铸件由边界向中心凝固,冒口位置成最后凝固区域。



(a) 固-液界面

(b) 中间截面的固-液界面

图 5 平板件固-液界面模型

Fig.5 Solid-liquid interface of the plate casting

以补缩路径计算方法对此平板件进行补缩路径计算,结果见图 6。可以看出,平板件左侧补缩路径汇聚到冒口中,而中间及右侧部分的补缩路径分别由边界向中心汇聚,最终没有再汇聚到一起,见黑圈处,在此位置将可能形成弥散性缩松。采用 Niyama 判据获得的缩松分布见图 7^[12]。

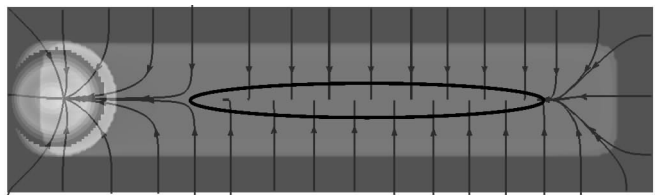


图 6 平板件补缩路径图

Fig.6 Feed path diagram of the plate casting

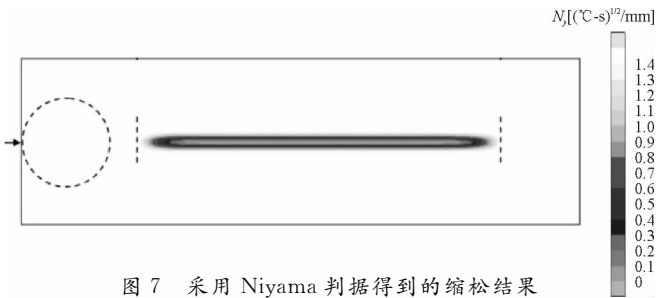


图 7 采用 Niyama 判据得到的缩松结果

Fig.7 Simulation results based on Niyama criterion

对比图 6 与图 7 可知,采用两种方法所得到的缩松位置是一致的,初步证明了补缩路径计算的正确性,采用补缩路径方法也能正确地预测铸件缺陷位置。

3.2 模架模型

此模架模型的设计是为了验证补缩路径能应用到较为复杂的铸件中。图 8 为模架三维模型图,采用的材

质是 ZG35 钢,在模拟计算过程中,采用砂型铸造,初始温度设置为 1 550 ℃。

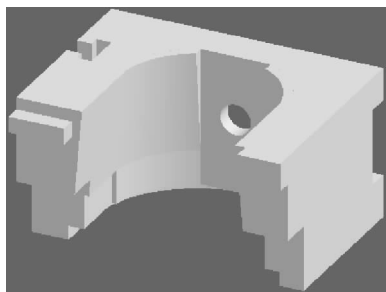


图 8 模架三维模型图

Fig.8 3D model of mold frame

通过对其温度场模拟,固-液相的判定以及凝固时间梯度的计算,得到铸件的补缩路径见图 9。可以看出,补缩路径分别汇聚在 3 个区域,见圆圈处,圆点代表热节。这 3 个区域均为壁厚较厚的部分,最后凝固,为其他区域的凝固收缩提供液态金属补偿,从而形成缩孔、缩松缺陷。根据此计算结果,可以对铸钢件进行冒口工艺设计和优化,以此模型说明了补缩路径能应用到复杂的铸钢件中。

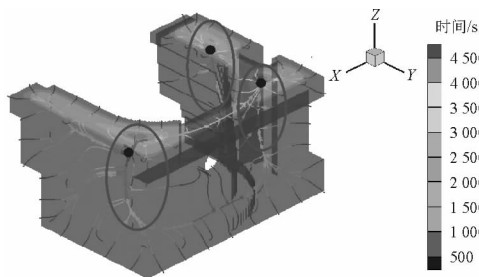


图 9 模架补缩路径结果

Fig.9 Feed path results of mold frame

4 结 论

补缩路径能显示铸件凝固过程中形成的所有热节,可以对铸钢件补缩路径进行计算,获得了铸钢件的补缩路径。利用平板件模型,将补缩路径计算结果与 Niyama 预测结果对比,结果相符。此外,利用模架模型说明补缩路径计算也能应用到复杂的铸钢件中。

参 考 文 献

- [1] 李新亚. 铸造手册-第 5 卷[M]. 北京: 机械工业出版社, 2011.
- [2] SUTARIA M, JOSHI D, JAGDISHWAR M, et al. Automatic Optimization of Casting Feeders using Feed-paths Generated by VEM[A]. Proceedings of the ASME 2011 International Mechanical Engineering Congress & Exposition[C]. USA, Denver; 2011.
- [3] BISHOP H F, MYSKOWSKI E T, PELLINI W S. A simplified method for determining riser dimensions[J]. Transactions of the American Foundrymen's Society, 1955, 63: 271-281.
- [4] CARLSON K D, OU S, HARDIN R A, et al. Development of new

feeding-distance rules using casting simulation: Part I. Methodology[J]. Metallurgical and Materials Transactions, 2002, B33(5): 731-740.

- [5] OU S, CARLSON K D, HARDIN R A, et al. Development of new feeding-distance rules using casting simulation: Part II. The new rules[J]. Metallurgical and Materials Transactions, 2002, B33(5): 741-755.
- [6] MYSKOWSKI E T, BISHOP H F, PELLINI W S. Application of chills to increasing the feeding range of risers[J]. Transactions of the American Foundrymen's Society, 1952, 60: 389-399.
- [7] RAVI B, SRINIVASAN M N. Casting solidification analysis by modulus vector method[J]. International Journal of Cast Metals Research, 1996, 9(1): 1-7.
- [8] SUTARIA M, GADA V H, SHARMA A, et al. Computation of feed-paths for casting solidification using level-set-method[J]. Journal of Materials Processing Technology, 2012, 212(6): 1 236-1 249.
- [9] SUTARIA M, RAVI B. Gradient Vector Method for Computing Feed-paths and Hot-spots During Casting Solidification[A]. Proceeding of 37th International MATADOR Conference[C]. British, Manchester; 2012.
- [10] SUTARIA M, RAVI B. Computation of casting solidification feed-paths using gradient vector method with various boundary conditions[J]. International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2014, 75(1): 209-223.
- [11] ZHOU J X, ZHOU Q, CHEN T, et al. Computation of feed-path based on temperature gradient method[J]. Materials Research Innovations, 2015, 19(S5): 811-816.
- [12] CARLSON K D, BECKERMAN C. Prediction of shrinkage pore volume fraction using a dimensionless niyama criterion[J]. Metallurgical and Materials Transactions, 2009, A40(1): 163-175.

(编辑:刘晨辉)

2021 年我国铝箔出口创历史新高

根据海关数据显示,2021 年 1~12 月中国铝箔出口量 133.5 万 t,同比增长 7.73%,出口量超过此前 2019 年的最高值 129.5 万 t,创历史最高水平。全年铝箔出口额 51.42 亿美元,同比增长 34.2%,同创历史新高,此前最高水平是 2018 年的 43.04 亿美元。2021 年铝箔出口额占中国铝产品出口额的 14.8%。

这一成绩是在中国经济增速下降,市场有效需求不振,疫情及自然灾害频发,铝锭等原材料大幅上涨,能耗双控,拉闸限电频发,供应链错乱错配,航运价格急剧上涨,外贸出口交运不畅,反倾销案件增多等前所未有的困难背景下实现的,更属不易。这背后有铝箔企业在复杂环境下的坚忍坚守和努力运营,展现了中国铝箔的加工制造能力不断提升,供应能力增强,展现了铝箔及铝加工行业的综合竞争优势和发展韧性,成为保持全球铝箔供应链稳定的重要力量。

(摘自中国有色网)