

模拟软件在钢锭模设计中的应用

徐亚东^{1,2}, 沈厚发², 雷丙旺¹, 胡永平¹, 韩 非¹

(1. 内蒙古北方重工业集团公司, 内蒙古 包头 014033 2. 清华大学 材料科学与工程学院 北京 100084)

摘 要:运用 Anycasting 软件对某公司生产过程中易出现问题的 15 t 钢锭模进行了模拟分析和优化设计, 预测出缩孔的位置及相对大小, 通过解剖实验发现模拟结果与实际结果一致。根据模拟结果筛选出设计更合理的一种钢锭模并在生产过程中取得了良好的使用效果。

关键词: Anycasting 模拟软件; 优化设计; 数值模拟

中图分类号: TF77

文献标识码: A

文章编号: 1000-8365(2014)09-2056-03

Application of Numerical Simulation in Steel Ingot Mold Designing

XU Yadong^{1,2}, SHEN Houfa², LEI Bingwang¹, HU Yongping¹, HAN Fei¹

(1. Special Material Institute of Inner Mongolia North Heavy Industry Group Co., Ltd., Baotou 014033, China; 2. School of Material Science and Engineering, Tsinghua University, Beijing 100084, China)

Abstract: Aimed at the problem of the 15 t steel ingot mold in production, the simulation analysis and optimization designing of the easy problems were conducted by Anycasting software. The position and relative size of the shrinkage porosity were predicted. The dissection experiment show that a most optimized steel ingot mold is selected.

Key words: Anycasting simulation software; optimized design; numerical simulation

为了满足船舶工业、重型机械制造业及风电设备产业用户的需求, 各大型钢铁公司都在积极研发大吨位钢锭。从十几吨甚至几百吨的钢锭都需要技术攻关, 大钢锭的制造技术已成为制约我国重点工程发展的瓶颈, 突破这一共性技术难题, 是实现大型锻件国产化的关键。大型铸锻件的生产能力, 能体现出一个国家制造业的整体水平, 能充分展现一个国家的综合实力。在钢锭制备过程中需要避免钢锭中出现缩孔缩松缺陷, 确定钢锭模形状、冒口形状及尺寸等工艺参数和发热材料添加等辅助工艺^[1-3]。

由于钢锭凝固过程是一个涉及高温、合金相变及钢液与钢锭模材料相互作用的复杂过程, 因此在钢锭制备过程中难以直接观察和控制。同时由于钢锭生产日趋大型化, 钢锭凝固过程中的偏析、缩孔、疏松、气泡、夹杂等质量问题将更加严重, 这与要求高质量的后续产品形成尖锐的矛盾。研究和掌握钢锭凝固过程中的规律, 弄清楚钢锭凝固过程中缺陷形成及分布规律, 并在此基础上优化生产工艺及钢锭模几何尺寸, 对于控制钢锭质量具有重要意义, 也是制备高质量锻件的重要保证。

钢锭的质量依赖于钢液在钢锭模中的凝固顺

序, 而钢锭模的锥度和高径比在很大程度上决定着钢液在钢锭模中的凝固顺序。具有较小高径比和具有较大锥度的钢锭模可以降低钢锭芯部的凝固速度, 利于补缩和减少疏松, 并使偏析区上移至冒口部位便以切除, 这对易于形成缩孔的 Cr-Ni-Mo 体系的高合金钢尤为有利。本文以常用的 15 t 钢锭模为研究对象, 采用数值模拟方法, 通过建立凝固过程中凝固传热的数学模型, 再利用铸造质量形成理论及判据模拟钢锭模结构, 设计出合理的钢锭模。

1 Anycasting 软件模拟钢锭凝固过程的可行性分析

铸造数值模拟技术(CAE)经过了 40 余年的发展过程, 经历了从简单到复杂、从温度场到流动场、应力场, 从宏观模拟到微观领域, 从实验室研究到工业化实际应用等过程。使用计算机模拟软件, 实现钢锭模设计的计算机化, 能大大缩短设计及修改周期, 促使企业大型钢锭生产更上一个台阶。通过钢锭凝固模拟分析软件的数值模拟钢液凝固过程中的温度场、固相分数和温度梯度等多种方式, 进而分析钢锭在凝固过程中内部缺陷的形成机理, 为生产实践提供理论依据。在众多的 CAE 软件中, 韩国 Anycasting 有限公司研发的“铸造 CAE 软件 AnycastingTM”以钢液充型过程、凝固过程数值模拟为核心, 拥有独立的钢锭模拟模块, 能有效地预测钢锭凝固过程中出现的缩孔、疏松、偏析等缺陷, 在模拟仿真性与实用性

收稿日期: 2013-12-08

基金项目: 国家重点基础研究发展计划项目资助(2011CB012900)

作者简介: 徐亚东(1976-), 山东菏泽人, 副研究员, 博士。研究方向: 冶金技术及计算机模拟。

电话: 14747218848, E-mail: xuyadong2005@163.com

方面都非常高。

2 大钢锭凝固过程传热的数学模型

大钢锭凝固是一个复杂的物理过程,为建立凝固过程中的数学模型,现对钢锭的凝固过程简化如下:①由于大型钢锭的浇注时间远小于钢锭的凝固时间,为简化分析,忽略充型对凝固过程的影响,仅对浇注完之后钢液的凝固传热过程建立数学模型;②凝固过程的潜热释放按热焓法处理;③忽略钢液的流动对凝固传热的影响。

2.1 传热控制方程

基于以上简化,建立大钢锭凝固传热的三维非稳态数学模型^[4],钢锭凝固传热模型控制方程如式(1):

$$\rho C_p \frac{\partial T}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} (\lambda \frac{\partial T}{\partial x}) + \frac{\partial}{\partial y} (\lambda \frac{\partial T}{\partial y}) + \frac{\partial}{\partial z} (\lambda \frac{\partial T}{\partial z}) + Q \quad (1)$$

式中, ρ 为密度, $\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$; λ 为导热系数, $\text{W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$; C_p 为比热, $\text{J} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$; t 为时间, s ; T 是温度; Q 是源项。

2.2 边界条件和初始条件及物性参数

钢液初始温度均匀,为浇注温度,在钢锭的对称轴及对称面上的传热为绝热条件,其它各界面传热按式(2)处理^[5]。

$$-\lambda \frac{\partial T}{\partial t} = h(T - T_\infty) \quad (2)$$

式中, h 为边界上的传热系数; T 、 T_∞ 分别为边界单元和环境的温度。考虑到钢锭因凝固收缩引起的钢锭与锭模之间的气隙对凝固传热的影响,将钢锭与钢锭模之间的界面热阻引入传热模型中,钢锭与钢锭模界面的热流计算公式如式(3)^[6]:

$$q = h(T_{\text{steel}} - T_{\text{mold}}) \quad (3)$$

材料的物性参数包括:密度、导热系数、比热或热焓(凝固问题还包括固液相变温度区间和凝固潜热)及热膨胀系数。物性参数影响材料的传热分析结果,一般而言,当材料一定时,材料的物性参数随温度的变化而变化^[7]。

浇注钢种为 H13, 利用软件内置材料数据库可得到该材料的液相线温度和固相线温度分别为 1477°C 和 1405°C 。钢锭模材料为 HT200, 钢锭模初始温度为 70°C , 假设浇注过程中钢液瞬时充满铸型, 钢液初始温度为 1535°C 。冒口部位采用挂绝热板的方式保温, 网格划分为 2 000 000 单元, 保温冒口材料热导率为 $0.15 \text{ W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$, 与钢锭之间的界面传热系数为 $20 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-1}$, 钢锭模与钢锭之间的界面传热系数随温度改变而变化, 平均值设为 $1250 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-1}$ 。钢锭模外表面与空气的对流热传导系数为 $10 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-1}$ 。发热剂加入量为 15 kg, 其

发热效率为 8000 J/g , 发热持续时间为 40 min。

在后处理中观察预测缺陷位置及大小的残余熔体模数(残余熔体体积/残余熔体比表面积)选用 0.002 0。

3 15 t 钢锭模的设计及模拟结果

针对某公司原 15 t 钢锭模在浇注过程中出现较严重二次缩孔的问题, 设计不同参数的钢锭模来改善钢锭中的缺陷及避免此吨位的钢锭在浇注中产生疏松缩孔等缺陷的。

对 15 t 钢锭模坯的 3 种定型方案进行分析。3 种设计方案如图 1 和表 1 所示, 其中表 1 中设计参数的位置参照图 1。

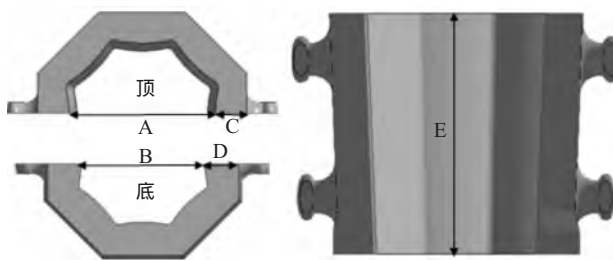


图 1 各字母代表钢锭模的位置

Fig.1 The letters represents the location of the ingot mould

表 1 字母表示各个位置的长度(mm)

Tab.1 Main dimension design of steel ingot mold

方案	A	B	C	D	E
1	1300	1200	300	315	1920
2	1380	1200	280	330	1890
3	1300	1100	270	320	2010

注: 方案 1 为旧模具, 方案 2, 3 为拟设计模具。

利用三维绘图软件 Pro/E 绘制钢锭模的各个部件, 然后进行装配, 之后根据装配体各组件生成 STL 格式的文件导入 AnyCasting 铸造模拟软件的前处理模块中完成初始条件、边界条件及物性参数的设置, 分别对 3 组设计方案进行充型过程和凝固过程的数值模拟, 充型结束后得到的温度分布如图 2 所示。可以看出, 3 种设计方案中钢液凝固过程的趋势基本一致, 轴向上都是由钢锭底部向钢锭顶部不断推进, 径向上则是从钢锭模内壁开始向钢锭中心逐步推进。轴向上和径向上散热相比而言则是钢锭在凝固过程中的散热以钢锭侧壁为主, 通过钢锭底面的散热则相对较弱, 具体表现为在不同时刻的温度场分布等温线呈“U”字形分布。由凝固刚结束时的温度场分布曲线可以明显地看出, 方案 2 的温度分布比较合理, 表现为“U”字形开口较大, 基本上可以满足顺序凝固的原则, 最后凝固的部位集中在冒口附近。而方案 1(旧模具)和方案 3 中的凝固顺序则不合理, 具体表现为“U”字形开口较小, 同时高温区域过长, 冒口部位的钢液难以对锭身部位进行充分

补缩,致使最后凝固区域进入钢锭本体,从而易在凝固过程中在锭身部位形成二次缩孔及疏松等缺陷,这是在生产过程中不希望得到的结果。

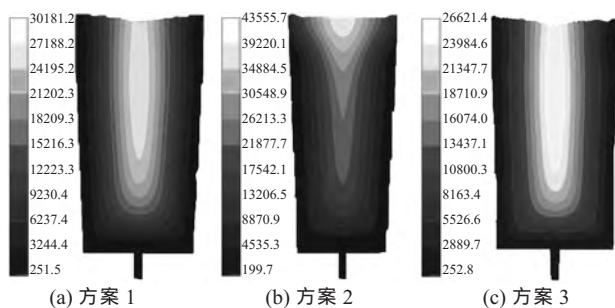


图 2 3 种设计方案模拟结果的温度场分布

Fig.2 Temperature distribution in ingot with mold taper design 1, 2 and 3

图 3 为 3 种不同设计方案下钢锭内部缩孔疏松预测结果。各钢锭预测得到的缩孔或疏松的位置。通过对各设计方案的温度场及缺陷预测情况分析可以发现方案 2 中锭身部位没有发现缩孔, 缩孔集中形成于冒口部位。而在方案 1, 3 中, 钢锭在凝固过程中形成一个高温区较长的孤立液相区, 此处钢液无法得到有效补缩, 容易形成较大的缩孔。综上分析确定方案 2 为最佳的设计方案。通过对上述 3 种方案进

行比较,确定了采用方案 2 进行模具制造。在实际生产中采用新设计的钢锭模铸出的钢锭消除了缩孔(疏松)缺陷。

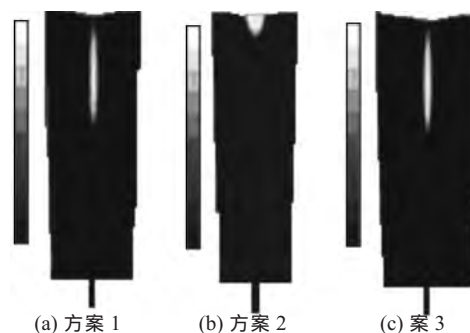
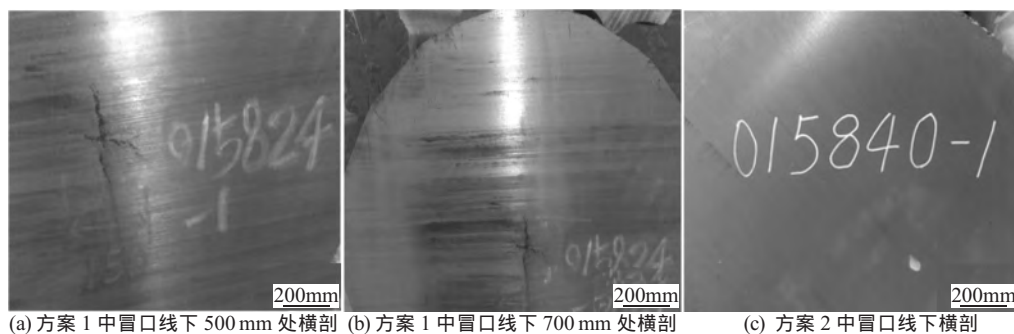


图 3 3 种设计方案缺陷预测结果

Fig.3 Predicted results of defects in three kinds of designing scheme

为验证模拟结果的可靠性, 利用 Anycasting 自带的分析程序进行分析, 预测结果表明在方案 1 中缺陷位置为分布在 220~900 mm 的中心区域, 缺陷直径约为 180~200 mm。现场对方案 1 制备的钢锭分别在冒口线 500 mm 处和 700 mm 处进行横剖分析。同时对方案 2 制备的钢锭在冒口线进行横剖分析, 剖面结果见图 4。



(a) 方案 1 中冒口线下 500 mm 处横剖 (b) 方案 1 中冒口线下 700 mm 处横剖 (c) 方案 2 中冒口线下横剖

图 4 方案 1 和方案 2 钢锭横剖照片

Fig.4 The steel ingot section photos of scheme 1 and scheme 2

4 15 t 钢锭模拟结论

(1) 通过对 15 t 钢锭的数值模拟, 可以得到钢锭凝固过程中的重要信息, 如钢锭的凝固时间、钢锭中缩孔和疏松的位置等, 还可以检验钢锭模设计的合理性, 缩短钢锭模从设计到优化的周期。

(2) 分别对旧的设计方案制成的大钢锭产品和采用优化的大钢锭模设计方案试验生产出的 15 t 大钢锭件做裁剖试验观察缩孔缺陷, 发现模拟结果与实际试验切片的结果一致。AnyCasting 软件模拟的结果与实际相符合, 对大钢锭模的设计定型设计起到了指导作用。

(3) 在实际的钢锭浇铸生产中, 浇铸不同钢种及不同吨位的钢锭对钢锭模几何尺寸的要求不同。运用 AnyCasting 模拟软件可以有效针对不同钢种、不同浇注吨位对钢锭模进行选取及设计, 从而可以

控制钢锭质量, 为制备高质量的锻件产品奠定理论基础。

参考文献:

- [1] 王立功, 张文杰. 大型钢锭模的优化设计与开发 [J]. 大型铸锻件, 2005, 34(02): 34-35.
- [2] 宋福康. 大型钢锭模铸造工艺的改进 [J]. 铸造技术, 2009, 30(3): 323-324.
- [3] 李金良. 优化锭型在生产中的应用 [J]. 大型铸锻件, 2008, 42(6): 22-23.
- [4] 仇圣桃, 刘和平. 基于连续模型的板坯连铸凝固过程的数值模拟 [J]. 钢铁研究学报, 2003, 15(6): 16-20.
- [5] 宁宝林, 杨泽宽. 液芯钢锭数值模型 [J]. 钢铁, 1989, 28(5): 15-18.
- [6] 蒋国顺. 20.306 吨钢锭凝固传热解析与生产工艺探讨 [J]. 钢铁, 1992, 27(6): 12-17.
- [7] 李长庚, 沈宏远. 金属材料熔点温度多个热物性的测试 [J]. 湘潭矿业学院学报, 2003, 18(03): 53-55.