

40CrNiMo 钢 35 t 多边形铸锭凝固过程的数值模拟

李卫平¹ 钱国钢¹ 季克进² 宁佳君³ 敖广武⁴

(湖北新冶钢有限公司 1 机制事业部, 2 中信特钢研究院新冶钢研究分院, 3 销售总公司, 黄石 435001;

4 辽宁科技大学应用技术学院, 鞍山 114011)

摘要 运用三维铸造软件 Procast 建立了 40CrNiMo 合金钢 (/%: 0.37 ~ 0.44C, 0.17 ~ 0.34Si, 0.50 ~ 0.80Mn, ≤0.035P, ≤0.035S, 0.60 ~ 0.90Cr, 1.25 ~ 1.65Ni, 0.15 ~ 0.25Mo) 35 t 多边形铸锭凝固过程的数学模型, 模拟铸锭的浇注 (1 313 s)、充型凝固 (73 942 s) 过程铸锭的温度场和钢的凝固收缩率。结果表明, 模拟计算得出铸锭完全凝固时间 20.5 h 与现场测量的凝固时间 22 h 基本一致; 钢的凝固收缩率 ≤2.5%, 铸锭无二次缩孔, 疏松轻微。

关键词 40CrNiMo 钢 35 t 多边形铸锭 凝固过程 数值模拟

Numerical Simulation of Solidification Process of 40CrNiMo Steel 35 t Polygonal Ingot

Li Weiping¹, Qian Guogang¹, Ji Kejin², Ning Jiajun³ and Ao Guangwu⁴

(1 Machinery Manufacture Test Division, 2 Branch of Zhongxin Special Steel Research Institute, 3 Sell General Co, Hubei Xinyegang Co Ltd, Huangshi 435001; 4 School of Application Technology, Liaoning University of Science and Technology, Anshan 114051)

Abstract A mathematic model for solidification process of 35 t polygonal ingot of 40CrNiMo steel (/%: 0.37 ~ 0.44C, 0.17 ~ 0.34Si, 0.50 ~ 0.80Mn, ≤0.035P, ≤0.035S, 0.60 ~ 0.90Cr, 1.25 ~ 1.65Ni, 0.15 ~ 0.25Mo) has been established by using three-dimensional software Procast to simulate the ingot temperature field and steel shrinkage rate during pouring (for 1 313 s) and mold-filling solidification (for 73 942 s) process. Results show that the simulation-calculated complete solidification time of ingot- 20.5 h is basically the same as measured solidification time of ingot in situ- 22 h; the shrink rate of steel is ≤2.5%, the cast ingot has no secondary pipe and only has light porosity.

Material Index 40CrNiMo Steel, 35 t Polygonal Ingot, Solidification Process, Numerical Simulation

模铸钢锭凝固过程是一个非稳态的传热过程, 在钢锭浇铸和凝固过程中伴随着液态金属的强制流动、自然热对流和凝固收缩流动, 伴随着结晶潜热的释放和金属间、金属与锭模和环境的对流、传导、辐射等物理化学过程。所以钢锭凝固一般存在缩孔、疏松、夹杂和偏析等缺陷。大型多边形钢锭由于结构复杂、厚度大, 冷却强度低, 凝固时间长等特点。易造成钢锭的铸造组织粗大, 偏析严重, 裂纹敏感性大, 同时造成钢锭模热应力大, 热疲劳寿命降低, 从而使模耗增加。

计算机模拟技术已经成为研究钢锭最有效和常用的工具。利用 Procast 软件进行数值模拟, 可以模拟不同浇铸速度、温度、冷却条件以及保温加热情况下的凝固过程, 预测其不同时间和部位的温度场, 确定最终凝固时间及部位, 并预测柱状晶生长情况等, 为优化设计铸模, 确定工艺方案提供全面可靠的数据。

1 钢锭工艺模拟

1.1 研究对象

本文研究对象为 35 t 钢锭^[1], 设计采用十六边

锭, 帽容比 15%。图 1(a) 为十六边形钢锭几何结构尺寸模型。采用 Solidworks 进行三维建模, 由钢锭、钢锭模、保温帽、绝热板、发热剂^[2]、底盘、模底砖组成装配体。

1.2 数学模型

描述钢锭凝固过程的三维非稳态导热控制方程为^[3]:

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

式中: ρ - 密度/($\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$); C_p - 定压比热容/[$\text{J} \cdot (\text{kg} \cdot \text{K})^{-1}$]; T - 温度/ $^{\circ}\text{C}$; t - 时间/s; λ - 导热系数/[$\text{W} \cdot (\text{kg} \cdot \text{K})^{-1}$]; x, y, z - 坐标; Q - 热源项表示凝固过程的潜热释放。

$$Q = \rho L \frac{df}{dt} \quad (2)$$

式中: L - 凝固潜热; f - 固相率。

1.3 网格划分

将模型导入 ANSA 软件进行网格划分前处理,

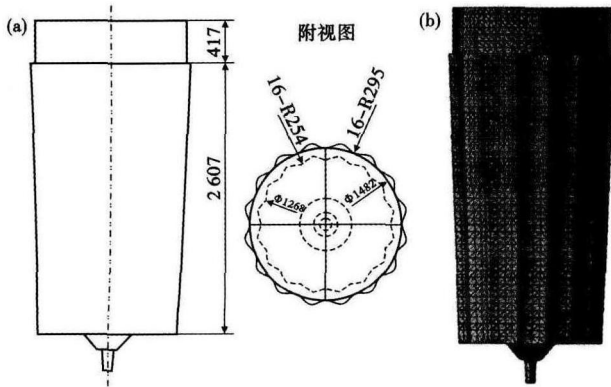


图1 35 t 钢锭几何结构尺寸(a);模型网格划分图(b)
Fig.1 Geometric structure dimensions of 35 t ingot (a) and model mesh division (b)

表1 40CrNiMo 钢化学成分 / %

Table 1 Chemical composition of 40CrNiMo steel / %

C	Si	Mn	Cr	Ni	Mo	Cu	P	S
0.37 ~ 0.44	0.17 ~ 0.37	0.50 ~ 0.80	0.60 ~ 0.90	1.25 ~ 1.65	0.15 ~ 0.25	≤ 0.30	≤ 0.035	≤ 0.035

得到图1(b)为钢锭网格划分图。

1.4 初始条件和边界条件

钢锭材质为40CrNiMo,其化学成分见表1;设置装配体界面换热系数见表2。

根据计算,其固相线温度为1423℃,液相线温度1493℃;钢锭模材料为HT200,钢锭模初始温度100℃,环境温度25℃;假设钢液瞬时充满铸型,钢液初始温度1540℃。炼钢工艺流程:EAF(电弧

表2 界面换热系数/[W·(m⁻²·K⁻¹)]
Table 2 Heat transfer coefficient of interface / [W·(m⁻²·K⁻¹)]

钢锭模/钢锭(液)	800
钢锭(液)/绝热板	100
钢锭模/绝热板	100
钢锭(液)/模底砖	100
钢锭模/模底砖	100
钢锭模/环境	20

炉)-LF(精炼炉)-VD(真空脱气)-VC(真空浇注)。

为便于求解,可将钢锭凝固过程中的各种边界条件表示成统一形式^[4]:

$$q_i n_i = h_{eff} (T_s - T_e) \quad (3)$$

式中: q_i -热流密度/(W·m⁻²); n_i -单位法向矢量; h_{eff} -等效对流换热系数/[W·(m⁻²·K⁻¹)]; T_s -界面温度/℃; T_e -环境温度/℃。

2 模拟结果及分析

2.1 充型凝固结果及分析

钢锭的整个浇注时间是1313s,钢锭充型过程的模拟结果如图2所示,金属液从下而上达到钢锭的顶部。在整个充型的过程中,金属液平稳上升,没有飞溅和卷气现象。

钢水注入钢锭模后并开始凝固的初期阶段,由于钢锭模和钢锭内部温差较大,较大的热流有助于加快凝固和柱状晶的生长,因此钢锭本体凝固进行得很快,表现为钢锭模内表面接触的凝壳迅速增厚。

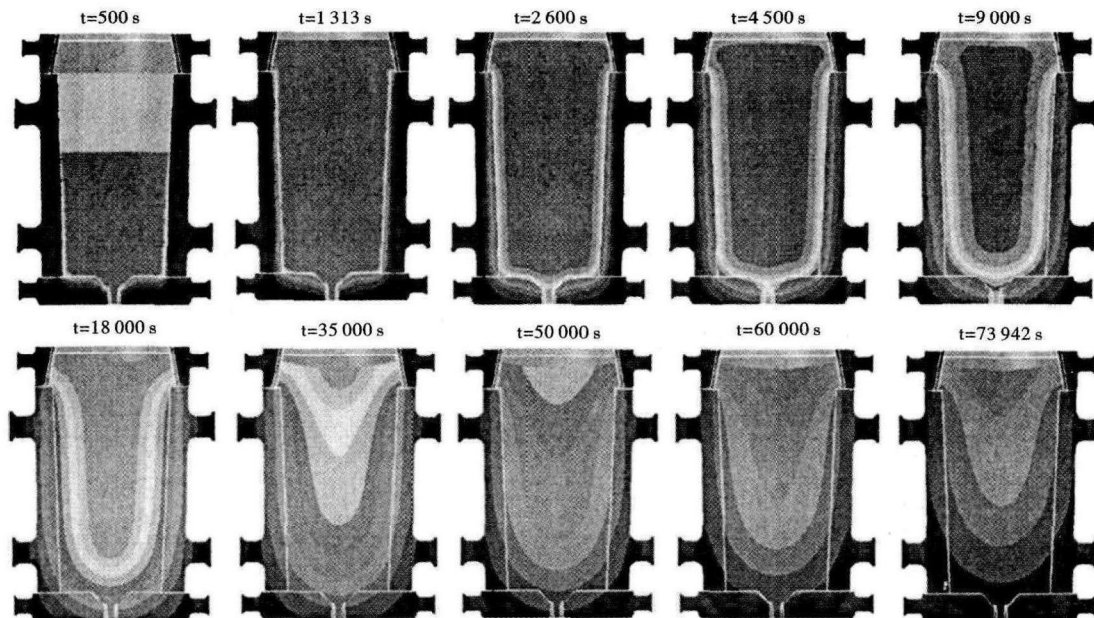


图2 钢锭充型过程模拟云图

Fig.2 Simulation cloud diagram of mold-filling process of ingot

在钢锭的凝固过程中,液态钢水由于具有较高的有效导热系数而使其温度趋于均匀和一致;同时由于存在凝固潜热的释放,钢锭心部的钢水在较长时间内保持其温度高于其液相线温度。

由于帽部绝热板及发热剂的作用,帽部导热系数在开始 20 ~ 35 min 基本没有变化,故帽部的钢水凝固进行的较慢,帽部钢液因补缩而平行下降。同时伴随着钢锭的迅速冷却,钢锭模大量蓄热,模内壁温度迅速升高,而模外壁温度缓慢增加。在浇铸开始后 30 min 左右,钢锭与钢锭模之间开始形成气隙,并且钢锭模温度不断升高,由于气隙界面热阻的作用和钢锭与锭模之间温度梯度减小,使得钢锭本体凝固速度趋于减缓。此时帽部绝热板、发热剂的导热系数开始增大,帽部的钢水凝固速度开始加快,帽口上部钢水部分开始凝固,导致钢锭帽口头部形状为浅“碟”形^[5],这与现场实际生产的钢锭帽口头部形状是一致的。由于钢锭凝固潜热的大量释放,模外壁温度迅速升高,模内壁温度变化不大。

钢锭凝固后期,钢锭芯部的结晶潜热已大部分散尽,钢锭与锭模之间形成稳定气隙,钢锭内部处于等轴晶生成阶段,故钢锭本体凝固速度变化的很慢。帽部由于绝热板导热系数一直增大,帽部凝固速度进行的很快,但凝固收缩量很小,缩孔形状和大小变化不大。锭模温度有所上升,模外壁热流减小。而且钢液粘度逐渐增加,中心偏析逐渐加大,钢锭内残留气体析出,最终导致中心部位出现疏松^[6]。

2.2 凝固热节分布

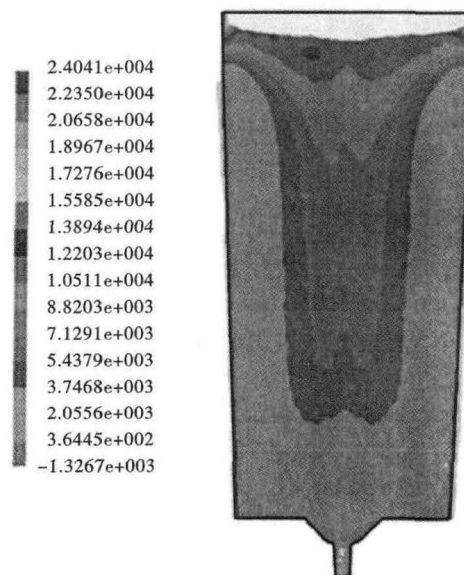


图 3 钢锭凝固热节

Fig. 3 Distribution of heat of ingot during solidification

钢锭凝固过程的热节如图 3 所示。模拟计算出钢锭完全凝固时间 20.5 h,现场实际测量的凝固时间为 22 h,模拟得到的凝固时间与现场实测值基本一致,这表明模拟计算 35 t 钢锭的凝固过程是正确的,模拟所选取的热物性参数、换热系数和边界条件是合适的;同时也说明 ProCAST 对多边形钢锭模拟计算是可行的。从图 3 中可以看出,钢锭的凝固趋势是在轴向上由钢锭底部向钢锭顶部推进。径向从钢锭四周模壁处向钢锭中心逐步进行。

2.3 钢锭边与角温度分布与变化

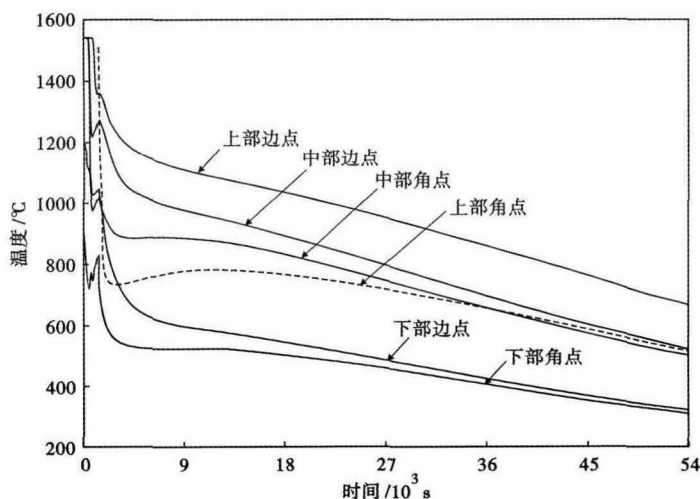
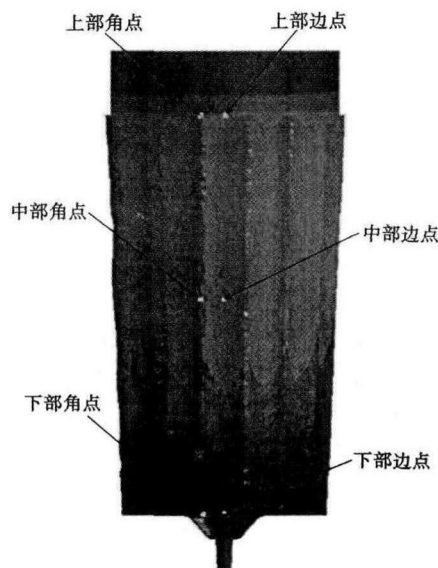


图 4 钢锭边角温度分布

Fig. 4 Distribution of temperature at corner of ingot

观察云图 4 可以发现,在同一时间节点,钢锭凝固过程中钢锭波半径温度高于角半径温度,这表明钢锭角半径处较波半径处先凝固,最先凝固的是钢锭下部的角半径处,最后凝固的是钢锭上部波半径处。

从图 4 还可以看出,高温区始终集中在钢锭上部和中心,而底部的温度最低。保温剂和绝热板的使用,保证了顶部良好的绝热效果,钢锭基本沿着垂直底盘方向逐层凝固;同时保证了钢锭凝固的最后阶段在其上部进行,有利于凝固组织中柱状晶的形成和生长。

2.4 缺陷预测

钢锭疏松缩孔形成的模拟预测是控制钢锭内部质量的一种重要手段。预测铸件疏松缩孔的判据和方法有温度梯度法、等温曲线法、收缩量法、多热节法、临界固相率法、Niyama 准则等。利用文献[7]所提出的方法,钢锭在单元体积($t + \Delta t$)时间步长间的体积收缩量由式(4)表示:

$$\Delta V = \sum_{i=1}^n 1 - \frac{\rho^i}{\rho_{(t+\Delta t)}} V_i \quad (4)$$

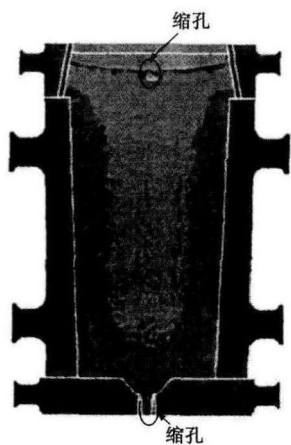


图5 钢锭缩孔疏松位置和范围预报

Fig.5 Forecast of porosity location and rang of ingot

式中: n - 钢锭的单元数; V_i - 单元 i 体积。碳含量在 0.7% 以下时,随着碳含量的增加钢的凝固收缩率逐渐增加,当碳含量在 0.4% 时,钢的凝固收缩率为 2.5%^[8]。

本模拟计算预报了钢锭最终凝固结构中疏松、缩孔可能产生位置和范围。从图 5 中可以读出内部的疏松级别均在 2.5% 以下,钢锭的内部均无二次缩孔出现,而且疏松相对轻微。

3 结论

(1)用有限元软件 ProCAST 可直观地显示出 35 t 钢锭充型凝固的温度场分布、温度梯度、金属液流动行为、热节部位、疏松、缩孔等。

(2)数值模拟可以快速准确地预测钢锭的缺陷,钢锭本体中心和帽口中心有宏观疏松,宏观疏松集中缩孔位于冒口区以内,且未出现二次缩孔,钢锭内部质量可以保证。

参考文献

- [1] 颜秉福,姬生永,陈冰廷,等. 大钢锭的优化设计与开发[J]. 热加工技术,2003(4):29-30.
- [2] 李成斌,范正洁. 大钢锭的凝固工艺数值模拟研究[J]. 宝钢技术,2011(4):59-62.
- [3] 刘庄,赵勇,张沅,等. 大钢锭凝固过程的温度场计算及缩孔疏松预测[J]. 钢铁研究学报,1993,5(1):23-32.
- [4] 陈海清,李华基,曹阳. 铸件凝固过程数值模拟[M]. 重庆:重庆大学出版社,1991:97-100.
- [5] 桑宝光,张秀伟. 大型钢锭凝固数值模拟与试验研究[J]. 铸造,2010,59(3):276-279.
- [6] 王芹,王海峰. 锻造用钢锭凝固过程温度场分析[J]. 中国稀土学报,2008,26(8):307-309.
- [7] 李宝亮,沈明钢,敖广武,等. 40 t 中空侧壁定向凝固钢锭凝固过程模拟[J]. 铸造技术,2012(10):1183-1186.
- [8] 张国伟. 大型扁钢锭凝固过程及结构数值预报[D]. 鞍山:鞍山科技大学,2003.

李卫平(1969-),男,高级工程师,黄石理工学院(本科)毕业,特殊钢产品凝固数值模拟及工艺研究。

收稿日期:2014-04-16

欢迎订阅 2015 年《特殊钢》杂志

全国各地邮局均可订阅(可破订)

邮发代号:38-183

定价:16.00 元/期 96.00 元/年

邮编:435001

地址:湖北省黄石市黄石大道316号新冶钢-大冶特殊钢股份有限公司《特殊钢》杂志社