# 40 t 中空侧壁钢锭定向凝固过程模拟

李宝亮,沈明钢,敖广武,张振山,李晓冬 (辽宁科技大学材料与冶金学院 辽宁 鞍山 114051)

摘 要:采用大型商用有限元软件 PROCAST,对 40 t 传统定向凝固钢锭和中空侧壁定向凝固钢锭的温度场和缩孔的分 布,以及钢液完全凝固时间进行对比。由数值模拟得出:中空侧壁定向凝固温度场分布合理,能够明显降低缩孔程度及分布 范围,进而提高产品收得率及质量。

关键词:中空侧壁;定向凝固;数值模拟;钢锭;缩松缩孔

中图分类号: TF771.2; TF19 文献标识码: A

文章编号:1000-8365(2012)10-1183-04

#### Simulation of Directional Solidification Process of 40 t Hollow-sidewall Steel Ingot

LI Baoliang, SHEN Minggang, AO Guangwu, ZHANG Zhenshan, LI Xiaodong

(School of Material and Metallurgy, Liaoning University of Science and Technology, Anshan 14051, China)

**Abstract**: A comparative analysis of the directional solidification process between a 40t hollow-sidewall steel ingot and a 40t traditional steel ingot was done by large-scale commercial FEM software PROCAST in temperature distribution, shrinkage cavity distribution and full solidification time. The simulating results show that the temperature distribution of hollow-sidewall steel ingot in directional solidification is reasonable and the degree and the range of the shrinkage cavity are reduced. The yield and quality of steel ingots improves.

Key words: hollow sidewall; directionalal solidification; numerical simulation; steel ingot; shrinkage

普通钢锭存在着诸如A偏析、V偏析、疏松等缺陷。 而且这些缺陷在大单重钢锭中显得更为突出,并且难 以控制。当这些铸件被用作压力容器件时,它的品质是 无法达到要求的。

定向凝固是指在凝固过程中采用强制手段、在凝 固金属和未凝固熔体中建立起沿特定方向的温度梯 度、从而使熔体在模型壁上形核后沿背与热流相反的 方向,按要求的结晶方向进行凝固。定向凝固的方法主 要有发热剂法、功率降低法 (PD法)<sup>[1]</sup>、快速凝固法 (HRS)<sup>[2]</sup>、液态金属冷却法(LMC)<sup>[3]</sup>、超高温度梯度定向 凝固(ZMLMC法)、电磁约束成形定向凝固(DSEMS)、 单晶连铸技术、深过冷定向凝固(DUDS)、经熔体热处 理的定向凝固、激光超高温度梯度快速定向凝固 (LRM)、连续定向凝固法(OCC)等[4-6],以上技术都存在 侧壁保温效果不佳问题。本文采用中空侧壁定向凝固 技术<sup>[7]</sup>:即侧壁内侧为耐高温材料,外侧为高保温材 料,内侧与外侧之间留有一定的间隔,利用气体的绝热 性,显著提高侧壁的保温性能,以解决传统定向凝固侧 壁保温的问题。上层覆盖保温材料、底部采用强制水 冷, 使钢液从下至上定向凝固。让晶粒沿受力方向生 长,消除横向晶界,明显提高其高温性能<sup>[8]</sup>,使钢锭下 部洁净且致密,缩孔、缩松、偏析、夹杂等铸造缺陷只存 在于钢锭的上部。钢锭的质量和成材率得到提高<sup>[9]</sup>。

### 1 模型的建立

#### 1.1 几何建模及网格划分

由于PROCAST的几何建模能力有限,本文采用三 维CAD软件Solidworks进行几何建模,图1(a)为Solidworks所建立的中空侧壁定向凝固模型,其底部为水冷 底盘,上层由里至外分别为钢锭、耐高温材料、气隙、高 保温材料、铸铁。将模型所有零件用网格划分软件 geomesh划分面网格,再利用PROCAST所带的MESH-CAST软件进行装配以及体网格的划分处理,划分完 有限元网格图形如图1(b)所示。钢锭为:长4 000 mm、 宽2 500 mm、高为600 mm。

1.2 数学模型建立

1.2.1 材料物性参数

钢锭和锭模以及耐火砖等材料的物性参数采用随 温度变化的变物性参数。

1.2.2 控制方程

质量守恒方程:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial (\rho_u)}{\partial x} + \frac{\partial (\rho_v)}{\partial y} + \frac{\partial (\rho_w)}{\partial z} = 0$$
(1)

能量守恒方程:

$$\rho \frac{\partial(\partial H)}{\partial t} + \rho \frac{\partial H}{\partial T} \left[ u \frac{\partial T}{\partial x} + v \frac{\partial T}{\partial y} + w \frac{\partial T}{\partial z} \right] =$$

收稿日期:2012-06-25; 修订日期:2012-07-20

基金项目:辽宁省教育厅重点实验室项目(2008S122)

作者简介:李宝亮(1989-),内蒙古通辽人,硕士生.研究方向:计算机 在铸造中的应用;洁净钢冶炼.E-mail:lnassmg@163.com

(9)

$$\frac{\partial}{\partial x}(k\frac{\partial T}{\partial x}) + \frac{\partial}{\partial \gamma}(k\frac{\partial T}{\partial \gamma}) + \frac{\partial}{\partial z}(k\frac{\partial T}{\partial z})$$
(2)

模拟对实际过程做合理的简化处理,当钢液充型 结束后钢液不再流动。铸件某一点焓的变化用下式 定义:

$$H(T) = \int_{0}^{T} C_{\rm p} dT + L[1 - f_{\rm S}]$$
(3)

其中 $\rho$ 为密度(kg·m<sup>-3</sup>),*t*为时间(s),*u*、*v*和*w*分别是 *x*、*y*和*z*的方向上的速度分量(m·s<sup>-1</sup>),*H*为焓(J·mol<sup>-1</sup>),*T* 为温度(K);*k*为渗透率(W·m<sup>-1</sup>·℃<sup>-1</sup>);*C*<sub>p</sub>为比热(J·kg<sup>-1</sup>· K<sup>-1</sup>),L为潜热(J·kg<sup>-1</sup>),*f*<sub>s</sub>为固相率。

1.2.3 初始条件

实验钢种为316L。由于PROCAST无法计算高Cr 钢材料的数据,本文利用Jmatpro软件计算出316L钢的 各项参数后导入PROCAST。其化学成分如表1。其液相 线温度为1437.1℃,固相线温度为1330℃。钢液底注 温度为1500℃,底注速度为8 kg/s(即整体为32 kg/s)。 环境以及除钢液外各物体的初始温度均为20℃。

表1 试验用钢的化学成分 w(%)

Tab.1 Chemical composition of the tested steel								
С	Si	Mn	Р	S	Cr	Ni	Мо	Ν
0.023	0.73	1.74	0.03	0.03	17.3	13.1	2.66	0.1

1.2.4 边界条件

由于所要计算的模型具有对称性,按模型的1/4进 行研究。对称面取q=0。钢锭上表面与大气的换热量 为:

$$q_0 = \sigma \varepsilon (T_m^4 - T_q^4) + h(T_m + T_q)$$
(4)  
保温材料与锭模的换热量为:

$$q_{i} = h(T_{bw} - T_{dn}) \tag{5}$$

钢锭与水冷底盘(或耐火砖)的界面换热量为:

$$q_2 = h(T_{gw} - T_{nm}) \tag{6}$$

$$q_{3} = \varepsilon' \sigma(T_{gw} - T_{nm}) \tag{7}$$

$$\varepsilon' = 1/(1/\varepsilon_{gw} + 1/\varepsilon_{nn})$$
 (8)

耐火砖与保温材料中间有一层厚度很小的气隙, 所以不考虑空气的对流传热,只考虑辐射传热,换热量 由下式表示:

$$q_{4} = \varepsilon_{1}' \sigma (T_{\rm mw} - T_{\rm bn})$$

$$\varepsilon_1' = 1/(1/\varepsilon_{\rm nw} + 1/\varepsilon_{\rm bn}) \tag{10}$$

式中:q为热流密度W/m<sup>2</sup>; $\sigma$ 为黑体辐射系数(W·m<sup>-2</sup>·k<sup>-4</sup>),取 $\sigma$ =5.67×10<sup>-8</sup>; $\varepsilon$ 为黑度,取 $\varepsilon$ =0.85; $T_m$ 为铸模的表面温度(°C); $T_q$ 为环境的温度(°C)。 $\varepsilon$ '与 $\varepsilon_1$ '为距离很近的两平行面的黑度; $\varepsilon_{gw}$ 为钢锭外表面黑度; $\varepsilon_m$ 为水冷底盘(或耐火砖)内表面换热黑度; $\varepsilon_{nw}$ 为耐火砖外表面黑度; $\varepsilon_{lm}$ 为保温材料内表面黑度; $T_{bw}$ 为保温材料外部温度; $T_{dm}$ 为锭模内部温度; $T_{gw}$ 为钢锭的外表面温度; $T_{mw}$ 为耐火砖外表面温度; $T_{mw}$ 为保温材料内表面温度; $T_{mw}$ 为耐火砖外表面温度; $T_{mw}$ 为保温材料内表面温度;

#### 2 模拟结果与分析

图2为钢液的整个凝固过程温度变化规律图。在整 个钢液凝固过程中由于液态钢有效导热系数很高,使 得其温度和成分趋于一致,由于凝固潜热的释放使得 钢液在较长时间内高于其液相线温度。由于耐火砖的 保温作用,使得钢液在四周的热损失较少,保温剂的使 用保证了顶部良好的绝热效果。底部的强制冷却效果 非常明显,温度逐层传递,从而有利于凝固组织中的柱 状晶的形成和生长。

由于中空侧壁定向凝固采用了气隙,气隙的热阻 很大,使得耐火砖的保温效果明显改善、钢液的完全凝 固时间从25 993 s延长到28 423 s。钢锭的侧壁温度曲 线也发生变化,其具体效果如图3所示。正由于完全凝 固时间的提高,使得缩孔、疏松明显减少。分别在传统 定向凝固钢锭和中空侧壁定向凝固钢锭侧壁的从上至 下1/6、1/2、5/6选取3个测温点,图3是对应的温度变化 曲线。

预测铸件缩孔缩松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<sup>10</sup>等。利用熊守美<sup>111</sup>所提出的方法,钢锭 在单元体积在t+Δt时间步长间的体积收缩量由下式 表示:



 (a) 中空侧壁定向凝固模形
 (b) 中空侧壁定向凝固有限元网格图形

 图 1 中空侧壁钢锭的定向凝固模型

 Fig.1 The directional solidification model of hollow-sidewall steel ingots



(c) 26 600 s

(d) 40 000 s



Fig.2 The temperature field of hollow-sidewall steel ingots in directional solidification



《铸造技术》10/2012

Fig.3 The temperature carves of hollow-sidewall steel ingots

$$\Delta V = \sum_{i=1}^{n} 1 - \frac{\rho t}{\rho^{t+\Delta t}} V_i \tag{11}$$

式中:n为钢锭的单元数,V<sub>i</sub>为单元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,当碳含量在在0.1%时,钢的凝固收缩率为2% <sup>[12]</sup>。实验钢种碳含量为0.023%,以体积收缩为2%作为 缩孔、缩松的临界值,大于2%的部分在图4中以深色 显示。

从图4中可以看出,传统定向凝固钢锭在顶部有着 较严重的缩孔,导致其切头率较高,底部洁净度也不是 很高,但中空侧壁定向凝固钢锭缩孔很少,洁净度也相 对提高。

### 3 结论

(1)中空侧壁定向凝固与传统定向凝固相比其温度分布均匀合理,符合顺序凝固要求,有利于柱状晶生长,减少树枝状晶。

(2)气隙的使用增强了保温效果,使得钢液完全 凝固时间从25 993 s延长到28 423 s,减少头部正偏析, 降低缩孔程度,减少分布范围。钢锭下部洁净度提高、 产品质量得到改善、收得率提高。钢锭下部洁净度提高 且均匀致密。

(3)中空侧壁保温定向凝固的方法,只要设计参数合理完全具备生产定向凝固钢锭的条件。



图 4 钢锭缩孔预测图 Fig.4 Prediction map of shrinkage cavity in the steel ingots

**致谢:**本论文是在沈明钢教授的指导下完成的,在论 文撰写期间,北京科技大学的罗衍昭先生提出了许多 宝贵意见,在此表示衷心的感谢。

#### 参考文献:

- [1] Versnyder F L, Barlow R B, Sink LW, et al. Directional Solidification in the Precision Casting of Gas Turbine Parts [J]. Modern Casting, 1967, 52(6):68-75.
- [2] Erickson J S, OwczarskiW A, Curran P M. Advances in Fabricating Aerospace Structures. Process Speeds up Directional Solidification [J]. Metal Progress, 1971, 99(3):58-60.
- [3] Giamei A F, Tschinkel J G. Liquid Metal Cooling: A New Solidification technique [J]. Metallurgical Transactions, 1976, 7A(9):1 427-1 434.
- [4] 谢发勤,张 军,毛协民,等.深过冷熔体激发快速定向凝固[J].材

料科学与工艺,1996,4(3):102-105.

- [5] 陈 光,李建国,傅恒志.先进定向凝固技术 [J].材料导报, 1999,10(13):5-8.
- [6] 杨 森. 超高温度梯度快速定向凝固的Cu-Mn合金胞晶间距[J]. 中国有色金属学报,2001,2(11):243-246.
- [7] 沈明钢. 定向凝固钢锭侧壁双层中空绝热装置:中国,2006100476 67.2[P]. 2006-09-08.
- [8] 周振平,李荣德.定向凝固技术的发展[J].中国铸造装备与技术, 2003(2):1-3.
- [9] 冯伟明,柳百成. 凝固模拟软件在大型铸钢件上的应用研究[J]. 新 技术新工艺,2002(3):8-10.
- [10] 李文珍,柳百成,王春乐.铸钢件缩孔疏松预测的试验方法[J].铸 造技术,1995,16(4):37-40.
- [11] 熊守美,许庆彦,康进武.铸造过程模拟仿真技术[M].北京:机械 工业出版社,2004.
- [12] 王寿彭. 铸件形成理论及工艺基础[M]. 西安: 西北工业大学出版 社,1994.



## 《铸件均衡凝固技术及应用》

《铸件均衡凝固技术及应用》(铸件充填与补缩工艺定量设计理论及实例),由西安理工大学 魏兵教授编著。共6章:1.铸铁件均衡凝固与有限补缩;2.铸铁件冒口设计;3.浇注系统当冒口补缩 设计方法;4.浇注系统大孔出流理论与设计;5.铸钢、白口铸铁、铝、铜合金铸件的均衡凝固工 艺;6.铸件充填与补缩工艺定量设计实例。全书24万字,特快专递邮购价96元,邮购咨询:魏兵教 授 029-82312421;13609155628。

# 《铸造手册》第2版

《铸造手册》共分铸铁、铸钢、铸造非铁合金、造型材料、铸造工艺和特种铸造6卷出版,比较 系统和全面地概括了铸造方面的技术内容。由机械工业出版社出版。

《铸造手册》第2版第3卷《铸造非铁合金》,特快专递邮购价62元。

《铸造手册》第2版第5卷《铸造工艺》,特快专递邮购价80元。

《铸造手册》第2版第6卷《特种铸造》,特快专递邮购价68元。

邮购地址:710048 西安理工大学608信箱 铸造技术杂志社
联系人:刘晓辉 18729237741
邮购咨询:13609155628
电话:029-82312140
传真:029-82312292