

## SCM822H 钢 3 t 铸锭缩孔缺陷优化的数值模拟

杨万良<sup>1,2</sup> 李京社<sup>1,2</sup> 杨宏博<sup>1,2</sup> 宋方方<sup>1,2</sup> 黄婷<sup>1,2</sup>

(北京科技大学 1 冶金与生态工程学院; 2 冶金国家重点实验室, 北京 100083)

**摘要** 在现场脱锭时铸锭表面温度测定值的基础上, 利用 ProCAST 软件建立了 SCM822H 钢 (/% : 0.20C, 0.80Mn, 0.25Si, 0.013P, 0.006S, 1.14Cr, 0.39Mo, 0.01V, 0.036Al, 0.0002B) 3 t 铸锭 (锭身高 1 675 mm, 冒口倾角 65.3°, 冒口内液面高 290 mm) 充型和凝固过程的计算模型。通过该模型计算得出冒口倾角、锭身高宽比与缩孔引起的锭身切除体积比的关系, 优化了锭型参数-锭身高宽比为 1 864/530, 冒口倾角 90°。按照优化锭型参数的模拟结果表明, 采用新锭型可使锭身切除体积由原先的 13.5% 降至 0, 可保证将缩孔缺陷完全控制在冒口内。

**关键词** SCM822H 钢 3 t 铸锭 缩孔 充型和凝固过程 ProCAST 软件 数值模拟

## Numerical Simulation on Optimization of Shrinkage Cavity Defect of Steel SCM822H 3 t Ingot

Yang Wanliang<sup>1,2</sup>, Li Jingshe<sup>1,2</sup>, Yang Hongbo<sup>1,2</sup>, Song Fangfang<sup>1,2</sup> and Huang Ting<sup>1,2</sup>

(1 School of Metallurgical and Ecological Engineering; 2 State Key Lab of Advanced Metallurgy, University of Science and Technology, Beijing 100083)

**Abstract** Based on the measured value of ingot surface temperature in ingot stripping at situ, with using ProCAST software the calculation model for filling and solidifying process of 3 t ingot (body height 1 675 mm, hot top inclined angle 65.3°, height of liquid surface in hot top 290 mm) of steel SCM822H (/% : 0.20C, 0.80Mn, 0.25Si, 0.013P, 0.006S, 1.14Cr, 0.39Mo, 0.01V, 0.036Al, 0.0002B) has been established. With calculation by the model the relation between hot top inclined angle, ingot body height-width ratio and body cut-off volume ratio caused by shrinkage cavity is gotten to get the optimized ingot parameters i. e. body height-width ratio 1 864/630 and hot top inclined angle 90°. According to optimized ingot mould parameters the simulation results show that with using the new ingot mould the ingot body cut-off volume ratio decreases from original 13.5% to 0, it is available to ensure all the shrinkage cavity is in the hot top.

**Material Index** Steel SCM822H, 3 t Ingot, Shrinkage Cavity, Filling and Solidifying Process, ProCAST Software, Numerical Simulation

由于钢铁行业不景气, 连铸产品过剩, 适用于生产特种钢材的金属型铸造又引起了人们的极大关注。与连铸相比, 金属型铸造具有很好的产品尺寸和形状选择性, 产品质量小至几十千克, 大至几十吨, 既有方形铸锭、圆形铸锭, 也有八角形铸锭、椭圆形铸锭等, 同时金属型铸造产品表面精度高, 机械性能好<sup>[1]</sup>, 并且产品种类多、可选择空间大<sup>[2-3]</sup>。

缩孔是钢液由液相向固相转变过程中体积收缩而导致最后凝固部位出现的孔洞<sup>[4-8]</sup>, 是铸锭的常见缺陷, 该缺陷严重影响到铸锭的致密性, 使其力学性能急剧降低, 导致生产中不得不切除存在缩孔缺陷的部分, 严重时还可能整个铸锭报废, 给企业造成巨大经济损失<sup>[9-11]</sup>。现场常用的检测缩孔缺陷的方法为剖锭法, 该方法工作量大、周期长、成本高, 已经不能满足研究的需要, 而数值模拟的方法不仅成本低、周期短, 同时还能研究缩孔形成过程及机理, 逐渐被越来越多的研究者所采用<sup>[12-18]</sup>。

在数值模拟软件中, ProCAST 软件以模拟结果

精确、计算方法快速、模拟范围广泛、操作界面友好等优点脱颖而出<sup>[19-22]</sup>, 成为众多铸造研究者所采用的模拟工具。本文采用 ProCAST 软件, 以钢厂 SCM822H 3 t 金属型铸造铸锭为原型, 建立了铸锭充型和凝固过程的计算模型, 研究工艺参数对缩孔缺陷的影响规律, 对实际生产具有重要的指导意义。

### 1 数值模拟模型

#### 1.1 几何模型

考虑到采用综合换热系数法, 即采用一个综合换热系数表示锭身与锭模以及空气之间的总的换热情况, 所以在建立模型时可以省去锭模, 以简化模型。模型几何参数见表 1。根据表 1 中数据, 利用 ANSYS12.0 中的 ICEM CFD 建模模块建立与实际大小相等的几何模型, 并将该模型导入到 ProCAST 中, 利用 MeshCAST 模块进行网格划分, 其结果如图 1(a, b) 所示, 网格类型为四面体网格。

#### 1.2 初始和边界条件

表 1 SCM822H 钢铸锭的几何参数  
Table 1 Geometry parameters of steel SCM822H ingot

项目	参数
铸锭身高/mm	1 675
锭身顶面积/(mm × mm)	550 × 550
锭身底面积/(mm × mm)	466 × 466
冒容比	0.8 ~ 0.12
冒口倾角(冒口侧面与铸锭中心线夹角)	65.3°
冒口内钢液高度/mm	290
冒口内钢液面的面积/(mm × mm)	283 × 283

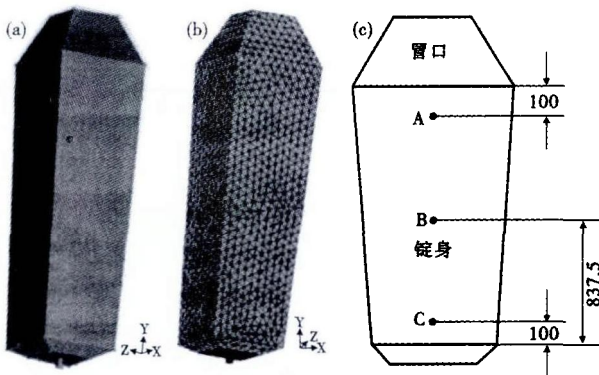


图 1 SCM822H 铸锭几何模型(a)、网格划分(b)及铸锭测温点(c)

Fig.1 Geometry model (a), meshing division (b) of steel SCM822H ingot; and measuring temperature location of ingot (c)

钢厂 SCM822H 钢用电弧炉流程冶炼, 本文所模拟的 SCM822H 钢水成分见表 2, 铸锭浇注温度为 1 548 °C, 浇注前铸型温度为 200 °C, 重力方向竖直向下。锭身浇注时间 360 s, 冒口浇注时间 300 s, 由此计算出的锭身浇注速度 8.45 kg/s, 冒口浇注速度 1.4 kg/s。

本文采用经验参数和数值模拟修正参数的方法确定铸锭冷却过程中的综合换热系数。首先对现场脱锭时铸锭表面进行测温, 然后利用换热系数的经验值进行模拟计算, 发现脱锭时铸锭表面温度与实际测量温度存在偏差, 所以需要修正相应的经验参数值并进行模拟计算, 再次对比计算结果和测量结果, 如此反复修正, 直至计算结果和测量结果吻合。最终得出冒口顶部的综合换热系数为 5 W/(m<sup>2</sup> · K)、冒口壁的综合换热系数为 41 W/(m<sup>2</sup> · K)、脱锭前锭身的综合换热系数为 68 W/(m<sup>2</sup> · K), 脱锭后锭身的综合换热系数为 8 W/(m<sup>2</sup> · K), 锭底综合换热系数为 80 W/(m<sup>2</sup> · K), 底注烫道绝热。

表 2 SCM822H 钢的化学成分/%  
Table 2 Chemical composition of steel SCM822H /%

C	Mn	Si	P	S	Cr	Ni	Cu	W	Mo	V	Al	Ti	B
0.20	0.80	0.25	0.013	0.006	1.14	0.03	0.05	0.02	0.39	0.01	0.036	0.002 1	0.000 2

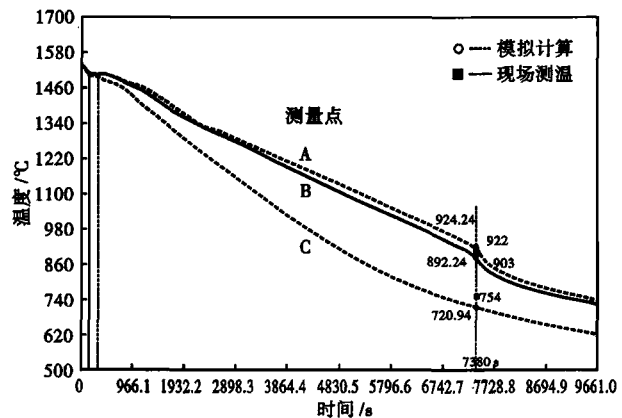


图 2 铸锭温度模拟结果和测量结果对比

Fig.2 Comparison between simulated results and measured results of ingot temperature

## 2 模型验证

在实际生产过程中, 利用红外测温仪, 选取如图 1(c) 所示的锭身表面 A、B 和 C 三点进行测温。SCM822H 在距离浇注钢液开始 7 380 s 时脱锭, 此时采用 3 个红外测温仪, 对 A、B、C 三个位置分别采集 30 个温度样本, 取其平均值作为脱锭时该位置的温度。测温过程耗时 3 s 左右, 不会出现因测温时间长而引起误差的现象, 测温结果见图 2。

利用 ProCAST 软件可以导出锭身表面 A、B、C 三个位置的节点温度随时间变化曲线, 如图 2 所示。在 7 380 s 时刻温度出现急剧变化是因为此刻进行脱锭操作的原因。从图 2 可以看出, 脱锭时 A、B、C 三个位置的模拟温度和测量温度的绝对误差分别为 2.24、10.76、33.06 °C, 相对于近千度的铸锭表面, 该误差完全满足了模拟计算的精度要求, 所以该模型边界条件设定合理, 模拟结果准确, 可以用于参数优化研究。

## 3 数值模拟结果及分析

铸锭凝固过程中体积不断收缩, 导致铸锭中存在缩孔缺陷, 该缺陷可以通过如图 3(a) 所示的钢液体积收缩率分布图直观显示, 并且通过 ViewCAST 模块可以得到缩孔的位置, 从而计算出缩孔的深度。通过对现场工艺的数值模拟得出铸锭的一次缩孔(h1)、二次缩孔(h2)的深度分别为 352 mm 和 193 mm, 而实际生产过程中, 一次缩孔深度在 300 ~ 400

mm, 二次缩孔深度为 200 mm 左右, 模拟结果和实际经验结果再次吻合, 进一步证明了模型正

确合理。

### 3.1 工艺参数对铸锭缺陷的影响

#### 3.1.1 冒口倾角

能否合理控制冒口部分的冷却过程是实现补缩的关键所在,而冒口倾角的变化又直接影响到冒口部分钢液和外界环境的换热方向,所以研究冒口倾角变化对铸锭缩孔位置的影响规律十分必要。

本文在保证冒容比为 0.12 的前提下,模拟了不同冒口倾角下的缩孔位置分布,并根据模拟结果得出了铸锭的缩孔深度和相应的锭身切除体积比,如图 4(a) 所示。从图 4(a) 中可以看出,随着冒口倾角的增加,一次缩孔和二次缩孔的深度都呈减小趋势,相应的锭身切除体积比也呈减小趋势。当冒口倾角为 90° 时,一次缩孔深度由原先的 352 mm 降低为 179 mm,锭身切除体积比由原先的 4.31% 减小

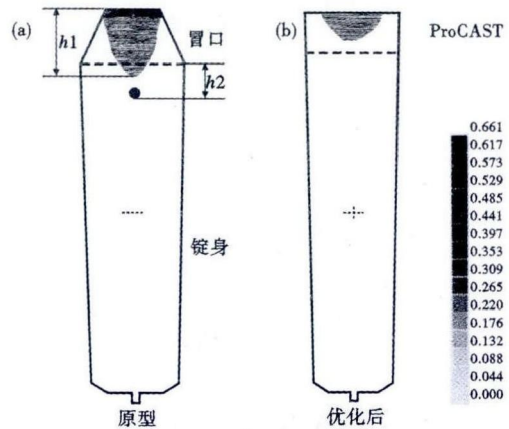


图 3 原型( $h_1$ -一次缩孔深度; $h_2$ -二次缩孔深度)(a)及优化(b)的铸锭剖面体积收缩率分布图

Fig. 3 Distribution of liquid volume shrinkage ratio on ingot longitudinal section at end of solidification; (a) original prototype ingot ( $h_1$ - depth of primary shrinkage;  $h_2$ - depth of secondary shrinkage); (b) optimum ingot

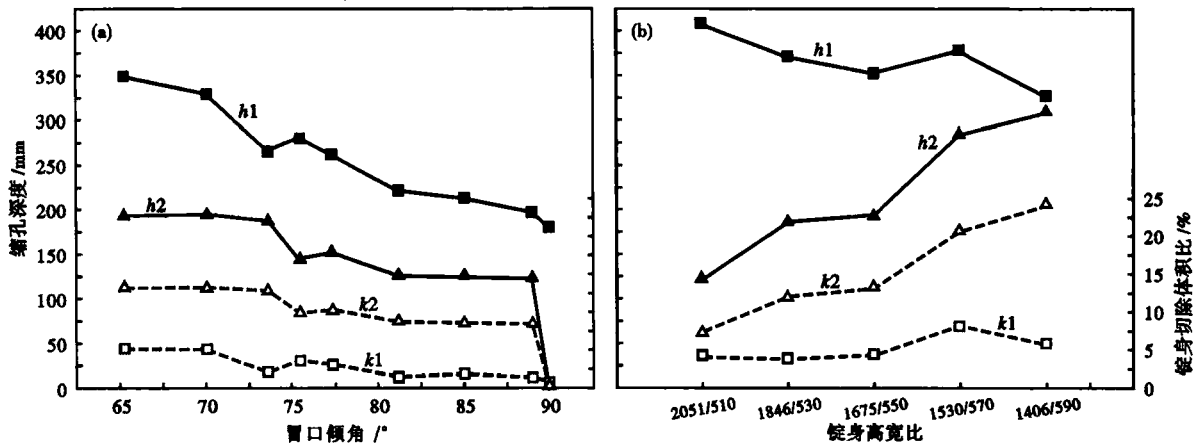


图 4 冒口倾角(a)和锭身高宽比(b)对缩孔深度、锭身切除体积比的影响; $h_1$ -一次缩孔深度; $h_2$ -二次缩孔深度; $k_1$ -切除一次缩孔的锭身体积比; $k_2$ -切除二次缩孔的锭身体积比

Fig. 4 Effect of hot top inclined angle (a) and body height-width ratio (b) on depth of shrinkage cavity and body cut-off volume ratio caused by shrinkage cavity;  $h_1$ - depth of primary shrinkage;  $h_2$ - depth of secondary shrinkage;  $k_1$ - body cut-off volume ratio of primary shrinkage;  $k_2$ - body cut-off volume ratio of secondary shrinkage

为 0.63%,二次缩孔则完全消失,所以建议现场将冒口倾角改为 90°。

在保证冒容比不变的前期下,增加冒口倾角导致冒口变得“矮胖”,使得冒口在水平方向上的冷却变得缓慢,而在竖直方向上由于冒口顶部保温层和绝热板的存在确保了该方向的热损失很小,保证了冒口内钢液处于液态,从而能够有效地补充凝固过程因钢液体积收缩引起的空间,进而改善缩孔缺陷。

#### 3.1.2 锭身高宽比

锭身高宽比直接影响到铸锭锭身的凝固速度和凝固方向,是影响铸锭缺陷的重要影响参数。目前钢厂的锭身高宽比为 1 675/550,为了研究锭身高宽

比对缩孔缺陷的影响规律,在铸锭体积不变的前提下,分别建立了锭身高宽比为 2 051/510、1 846/530、1 675/550、1 530/570、1 406/590 的铸锭模型,通过模拟计算得到锭身高宽比与缩孔缺陷的关系曲线,如图 4(b) 可以看出,随着锭身高宽比的不断减小,一次缩孔深度呈减小趋势,二次缩孔深度呈增大趋势,但是锭身切除比都呈增大趋势。

高宽比降低,锭身部分横向凝固时间变长,保证了铸锭中心部分钢液的流动性,使得一次缩孔深度降低,同时,由于中心部分钢液凝固滞后,易产生搭桥,导致二次缩孔产生。但是,由于高宽比降低,使得相同深度的缩孔而引起的锭身切除比增加,虽然

一次缩孔深度随着高宽比的减小而减小,但是由一次缩孔引起的锭身切除比随着锭身高宽比的减小却在增大,如图4(b)所示。最终,考虑到锭型的要求及锭身高宽比变化带来的风险,建议现场将锭身高宽比改为1 846/530。此措施可以将因一次缩孔、二次缩孔而导致的锭身切除体积比分别由原先的4.32%、13.25%降低为3.81%、11.85%。

### 3.2 最优锭型参数模拟结果

结合前面的研究规律,将锭身高宽比改为1 846/530,同时将冒口的倾角改为90°,然后进行模拟计算,如图3所示。从图3中(b)中可以看出,优化后一次缩孔完全在冒口之内,二次缩孔完全消失,从而使得因缩孔而导致的锭身切除体积比降低为0,锭身切除体积比由原先的13.25%降低为0,说明锭型优化很成功,使用优化后的锭型可以为企业提高成材率,降低生产成本,具有重大的经济效益。

### 参考文献

- [1] 唐 骥. 我国铸铁件金属型铸造概况与发展趋势[J]. 铸造, 2000, 49(9): 516-518.
- [2] 杜亚伟, 文光华, 唐 萍. 模铸在大钢锭及特殊钢生产方面的比较优势[J]. 金属世界, 2009(5): 48-52.
- [3] 汪 煦, 赵玉涛, 苏大为, 等. 基于 ProCAST 的金属型重力铸造摩托车车轮浇冒口优化设计[J]. 铸造, 2009, 58(7): 700-704.
- [4] 刘宏伟. 铸钢铸铁件缩孔疏松缺陷预测的数值模拟研究及软件开发[D]. 天津: 河北工业大学, 2007: 5.
- [5] 李文珍. 铸件凝固过程微观组织及缩孔疏松形成的数值模拟研究[D]. 北京: 清华大学, 1995: 13-28.
- [6] 郭 庆. 铸件凝固过程的温度场模拟及缩孔、变形和热裂缺陷预测[D]. 天津: 河北工业大学, 2002: 32.
- [7] 桑宝光, 张秀伟, 康秀红. 大型钢锭凝固数值模拟与试验研究[J]. 铸造, 2010, 59(3): 276-279.
- [8] 侯延辉, 成志强, 冯威潮. ProCAST 在铸造缩孔预测及其优化中的应用[J]. 中国水运, 2007, 7(3): 67-69.
- [9] 姚 山, 郑贤淑, 金俊泽. 钢铸件、铸锭缩孔形成过程的数值模拟及应用[J]. 铸造, 1996, 45(8): 11-13.
- [10] 李振彦. 大型锻造用钢疏松缺陷的模拟与试验研究[D]. 太原: 太原科技大学, 2009: 4-5.
- [11] 赵彦灵. 钢锭疏松、缩孔的因素分析及对策[J]. 宽厚板, 2000, 6(3): 14-17.
- [12] 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): 59-63.
- [13] 汪 煦, 赵玉涛, 苏大为. ProCAST 在金属型重力铸造充型和模具温度场中的应用[J]. 铸造, 2008, 57(12): 1263-1266.
- [14] 崔吉顺, 李文珍. 铸件缩孔疏松多种预测判据的应用[J]. 清华大学学报, 2001, 41(8): 5-8.
- [15] 孙智刚, 林 琳, 王耀琨. 模拟软件在优化上注钢锭模设计中的应用[J]. 大型铸锻件, 2011(3): 23-25.
- [16] 潘利文, 高 永, 高文理. 基于 ProCAST 的 TiAl 叶片缩孔预测及工艺优化[J]. 特种铸造及有色合金, 2010, 30(6): 504-508.
- [17] 刘 庄, 赵 勇, 张 沈. 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.
- [18] 胡红军, 杨明波, 罗 静, 等. ProCAST 软件在铸造凝固模拟中的应用[J]. 材料科学与工艺, 2006, 14(3): 293-295.
- [19] 郭善海. 基于数值模拟的铸钢件工艺分析与优化设计[D]. 杭州: 浙江大学, 2006: 6-9.
- [20] 杨亚杰. 铸造模拟软件 ProCAST[J]. DAD/DAM 与制造业信息化, 2004(Z1): 109-111.
- [21] 马敏团, 陈鹏波, 黄引平. ProCAST 在铸造工艺优化中的应用[J]. 热加工工艺, 2006, 35(1): 52-54.
- [22] 胡红军. ProCAST 软件的特点及其在铸件成形过程中的应用[J]. 热加工工艺, 2005, 34(1): 70-71.

## 4 结论

(1) 利用 ProCAST 软件建立了 SCM822H 铸锭充型和凝固过程模拟计算模型, 并验证了该模型的正确性。

(2) 得出了冒口倾角、锭身高宽比对缩孔缺陷的影响规律: ①冒口倾角越大, 一次缩孔、二次缩孔深度越小, 成材率越高, 建议现场将冒口倾角改为90°; ②锭身高宽比越高, 因缩孔导致的锭身切除体积比越低, 建议现场将锭身高宽比改为1 846/530。

(3) 提出了能够将缩孔缺陷完全控制在冒口之内的新的锭型参数: 锭身高宽比为1 846/530, 冒口倾角为90°。该模型将锭身切除体积比由原先的13.25%降低为0, 改善效果明显。

国家自然科学基金资助(No. 51074021)

杨万良(1972-), 男, 博士研究生, 1995年北京科技大学毕业, 钢液凝固过程数值模拟研究。

E-mail: yangwanliang@263.net

收稿日期: 2013-04-19

# 欢迎订阅 2014 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