

试验研究

大型钢锭凝固过程三维数值模拟

李文胜¹ 沈丙振² 周翔² 沈厚发¹ 柳百成¹

(1 清华大学机械工程系, 北京 100084 2 中信重工机械股份有限公司, 河南 471039)

摘要: 开发了大型钢锭凝固过程三维模拟程序。利用本程序对 53 钢锭的凝固过程进行了模拟, 预测的钢锭和锭模中典型测试点的冷却曲线、钢锭完全凝固时间及冒口一次缩孔形状等与商用有限元软件 ProCAST 的计算结果吻合良好。

关键词: 大型钢锭; 凝固; 温度场; 数值模拟

中图分类号: TG156.3 文献标识码: B

Three-dimensional Simulation of Solidification Process
in Large Steel Ingot

Li Wen-sheng, Shen Bing-zhen, Zhou Xiang, Shen Hou-fa, Liu Bai-cheng

Abstract: A three-dimensional mathematical model of solidification in large steel ingot has been developed. The solidification of a 53-ton industrial steel ingot was numerically simulated by the model as well as the commercial finite element software ProCAST. The present predictions for cooling curves at different characteristic positions in the solidifying ingot and in the mold, the total solidification time and the shrinkage cavity of the ingot were in good agreement with those calculated by ProCAST.

Key words: large steel ingot; solidification; temperature distribution; numerical simulation

随着电力、冶金、石化、船舶等工业领域重大装备中锻件的大型化, 使用的钢锭也在向超大型化方向发展。大型钢锭中通常存在缩孔、缩松等缺陷。由于实验研究代价高, 因此数值模拟成为认识这些缺陷和优化钢锭设计的重要途径^[1, 2]。

文献中有关钢锭凝固过程传热现象的数学模型多为二维或轴对称模型^[1, 3~6]。实际上, 钢锭的传热是三维的, 目前的计算条件也可以满足大型钢锭三维计算的要求。最近, 文献[7, 8]利用商用有限元软件 ProCAST^[9]对钢锭凝固过程进行了三维模拟。但是, 文献[7]仅对实测的缩孔形状进行了比较, 而文献[8]预测的凝固时间与实测差别较大。显然, 模拟结果的准确性及软件的实用性, 取决于模型与方法的准确性, 同时也取决于材料物性参数、界面换热系数等基本参数是否符合实际。

本文开发了大型钢锭凝固三维模拟程序 FT-INGOT, 同时通过与 ProCAST 计算结果的比较与验证, 得出了 53 钢锭冷却曲线、凝固时间和一次缩孔形状。

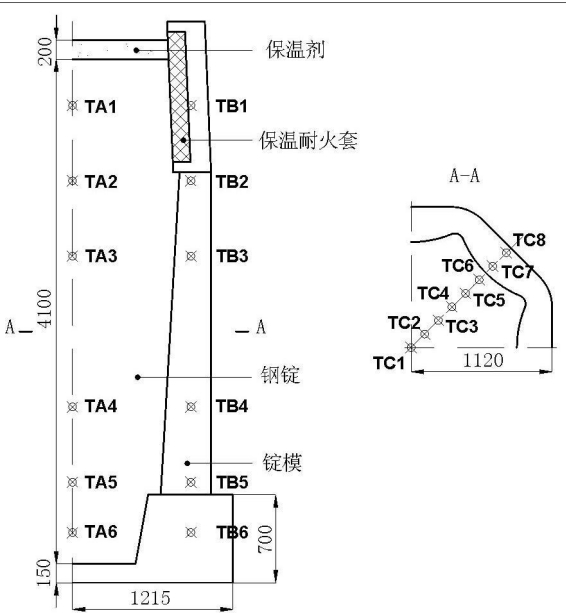


图 1 53 钢锭尺寸与测试点位置的示意图
Figure 1 Dimension of 53-ton ingot and locations for temperature comparison

1 研究对象

本文研究对象为 53 钢锭。图 1 所示为钢锭的基本尺寸和测试点的位置。该钢锭横截面为八边形, 高约 4.10 m, 平均直径约 1.56 m。测试点用于考察钢锭凝固过程的温度变化, 其中 TA1~6

收稿日期: 2010-02-09
资助项目: 国家科技重大专项课题 2009ZX04014-082

位于钢锭中心轴线，TB1-6位于锭模，TC1-8位于高度方向的横截面。

2 数学模型

2.1 控制方程

描述钢锭凝固过程的三维非稳态导热控制方程为：

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

式中， ρ 为密度， c_p 为定压比热容， T 为温度， t 为时间， λ 为热导率， Q 为源项， x, y, z 为坐标。

热源项表示凝固过程潜热的释放，

$$Q = \rho L \frac{df}{dt}$$

式中， L 为凝固潜热， f 为固相率。

2.2 初始条件

钢锭充填后初始温度为 1 540℃，其余区域的初始温度为环境温度 30℃。

2.3 界面换热系数

锭模（或耐火砖）与环境之间的界面换热系数为

$$h_{ext} = \sigma \epsilon (T_{sur}^2 + T_{\infty}^2) (T_{sur} + T_{\infty}) + h$$

式中， T_{sur} 和 T_{∞} 分别为锭模（或耐火砖）的表面温度和环境温度（单位为 K）， σ 为 Stefan-Boltzmann 常量， ϵ 为锭模（或耐火砖）表面的辐射系数； h 为对流换热系数。计算体系不包含冒口上方的保温剂（发热剂），冒口与环境之间的界面换热系数设为零。

2.4 材料物性参数

钢锭和锭模的材料物性参数采用随温度变化的分段线性的变物性参数。

2.5 模型求解

基于均匀直角六面体网格，控制方程的离散采用有限差分方法和显式的时间步格式^[10]。钢

锭缩孔的计算基于文献[10~12]中提出的方法，在 $t+\Delta t$ 时间步长内的所有钢锭单元的体积收缩总量为

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

式中， n 为钢锭单元总数， V_i 为单元 i 的体积。

基于以上模型和方法，本文开发了大型钢锭凝固模拟软件 FT-NGOT。

3 模拟结果

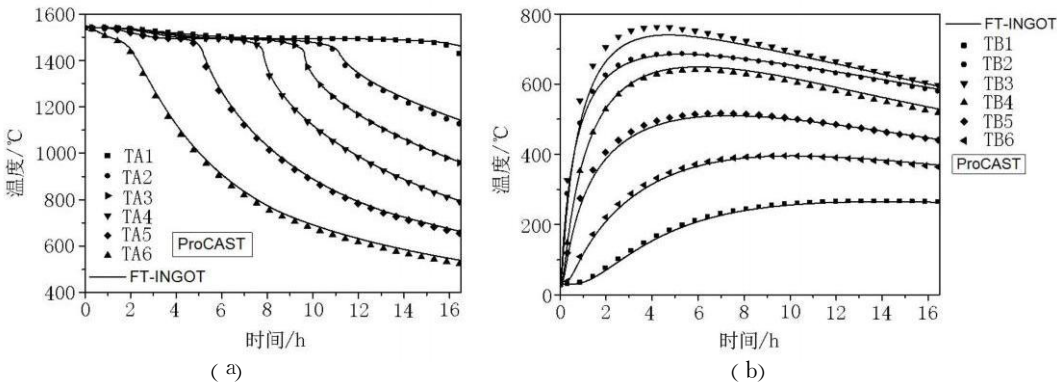
考虑到对称性，仅对 1/4 钢锭进行模拟。FT-NGOT 选取均匀直角六面体单元，单元尺寸为 20 mm×20 mm×20 mm；ProCAST 选取非均匀四面体单元，钢锭单元尺寸为 20 mm~40 mm，保温材料单元尺寸为 40 mm，锭模单元尺寸为 20 mm~80 mm。表 1 所示为模拟计算的网格数、时间步长、使用的 CPU 数量和计算所需 CPU 时间等参数。

表 1 模拟计算参数

Table 1 Calculation parameters in the simulation

	网格总数	时间步长 / s	CPU 数	CPU 时间 / h
FT-NGOT	953 312	7	1	0.6
ProCAST	723 573	20	2	3

图 2 所示为 FT-NGOT 和 ProCAST 预测的 53 钢锭及其锭模中测试点温度曲线的比较。可见，由 FT-NGOT 和 ProCAST 预测的 TA、TB 和 TC 三组测试点凝固过程温度曲线吻合良好。此外，FT-NGOT 预测的完全凝固时间为 16.97 h，ProCAST 预测的完全凝固时间为 16.54 h，两者相对误差为 2.6%。值得注意的是，由于假设冒口与环境之间的界面换热系数为零，因此冒口的保温条件优于实际情况，预测的完全凝固时间也会大于实际凝固时间。



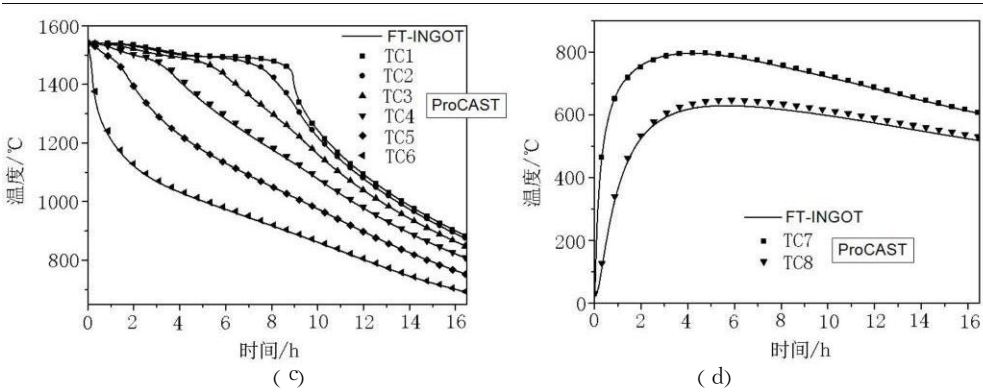


图 2 预测温度曲线的比较

Figure 2 Comparison of cooling curves Predicted by FT-NGOT and ProCAST

图 3 所示为 FT-NGOT 和 ProCAST 预测的冒口一次缩孔形状的比较。对于中心轴线上的缩孔深度，FT-NGOT 的预测值为 300 mm，ProCAST 的预测值为 278 mm。总体上，FT-NGOT 预测的缩孔形状与 ProCAST 的计算结果吻合良好。

通过以上冷却曲线、凝固时间及一次缩孔形状的比较，可知本文开发的程序所预测的 53 钢锭凝固过程与 ProCAST 基本一致。而且，如表 1 所示，FIFT-NGOT 的计算效率明显优于 ProCAST。

图 4 所示为 FIFT-NGOT 预测的 53 钢锭凝固相分数和缩孔形状的演变过程。图 4 选取的凝固过程的四个时刻分别对应钢锭凝固比例为 40%、80%、90% 和 98%。可见，随着凝固潜热的释放及散热速度的降低，凝固糊状区逐渐变宽，尤其是钢锭中心部位，且凝固壳的形状从 U 形变为 V 形。然而，在凝固过程绝大部分的时间内，糊状

区基本能得到斜上方液相区的补缩，且补缩通道通畅。因此，该钢锭的凝固模式总体上较好，钢锭本体中形成缩松的可能性较小。实际生产的钢锭质量也表明，该钢锭模及冒口设计合理。

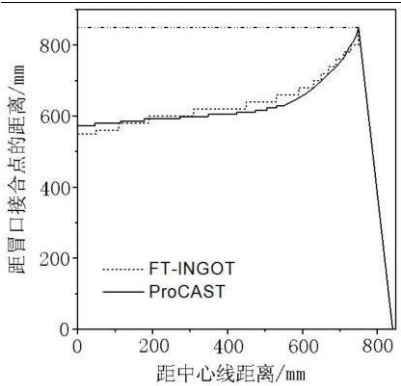


图 3 预测的一次缩孔形状比较

Figure 3 Comparison of shrinkage cavity Predicted by FIFT-NGOT and ProCAST

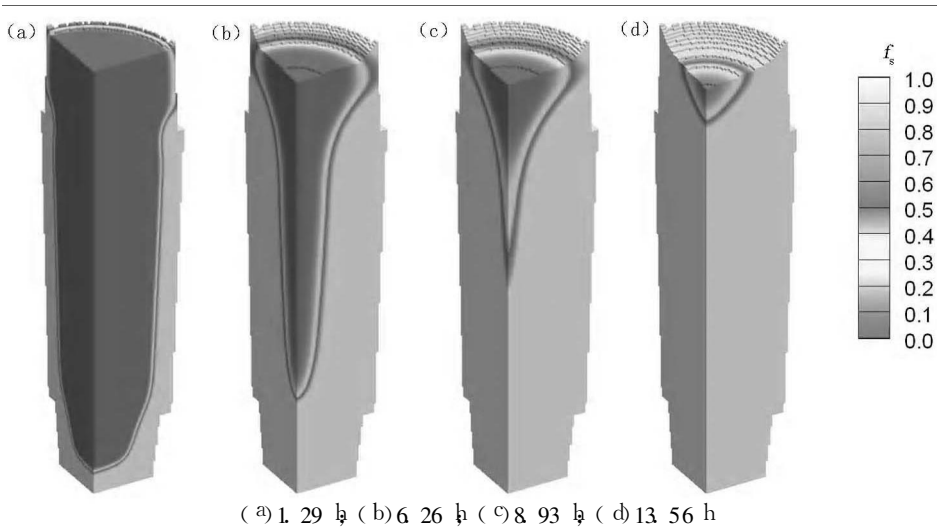


图 4 固相分数和缩孔形状的计算结果

Figure 4 Predicted distributions of solid fraction and shrinkage cavity

4 结论

开发了大型钢锭凝固过程三维模拟程序 FT-FT-NGOTNGOT 预测的 53 钢锭及锭模中典型点的冷却曲线、钢锭完全凝固时间与冒口一次缩孔形状与商用有限元软件 ProCAST 的计算结果吻合良好,并且比 ProCAST 的计算效率更高。模拟结果表明,该钢锭的凝固模式总体上较好,钢锭本体中形成缩松的可能性较小。初步工程应用表明,FIFT-NGOTNGOT 可以用于大型钢锭模及冒口设计。

参考文献

[1] 刘庄,赵勇,张沅,等. 大钢锭凝固过程的温度场计算及缩孔缩松预测. 钢铁研究学报, 1993 5 (1): 23—32

[2] 李金良. 优化锭型在生产中的应用. 大型铸锻件, 2008 (6): 22—23 26

[3] Tashiro K, Watanabe S, Kitagawa, I et al. Influence of mould design on the solidification and soundness of heavy forging ingots. ISIJ Int 1983 23 312—321

[4] Thomas B G, Samarasekera IV, Brinacombe J K. Mathematical model of the thermal processing of steel ingots. Part J. Heat

flow model. Metall Trans B 1987 18 B 119—130

[5] Gu J P, Beckermann C. Simulation of convection and macrosegregation in a large steel ingot. Metall Mater Trans A 1999 30A 1357—1366

[6] Radovic Z, Lajovic M. Numerical simulation of steel ingot solidification process. J Mater Proc Technol 2005 160 156—159

[7] Keamey M, Crabbe M, Talamantes, Silva J. Development and manufacture of large plate mill rolls. Ironmaking Steelmaking 2007 34 380—383.

[8] Kemanpur A, Eskandarim, Purnchamad H et al. Influence of mould design on the solidification of heavy forging ingots of low alloy steels by numerical simulation. Mater Design 2010 31: 1096—1104.

[9] ProCAST version 2008.0. ESI Group, Rungis Cedex, France

[10] Liu B C, Shen H F, Li W Z. Progress in numerical simulation of solidification process of shaped casting. J Mater Sci Technol 1995 11: 313—322

[11] 柳百成,荆涛. 铸造工程的模拟仿真与质量控制. 北京: 机械工业出版社, 2001.

[12] 熊守美,许庆彦,康进武. 铸造过程模拟仿真技术. 北京: 机械工业出版社, 2004.

编辑 龙礼建

国务院国资委举办巡视工作培训班

4月 20日 ~ 23日, 国务院国资委举办巡视工作培训班。国资委党委高度重视这项工作, 国资委主任李荣融亲自审定了培训方案, 副主任金阳作了动员讲话, 副主任孟建民作了总结讲话, 纪委书记贾福兴带领中央检查组在外地开展监督检查, 一直关注培训班进展情况, 对巡视培训工作提出了明确要求。中央巡视办曾明子副主任受强卫东主任委托出席开班式, 传达了贺国强同志的重要讲话精神。中央组织部干部监督局巡视员王金兰做了关于中央企业选人用人和监督工作的专题讲座。国资委三个巡视组、巡视办、有关厅局的领导和同志共 50 多人参加了培训。

金阳同志在动员讲话中指出, 国资委党委根据贺国强同志的重要指示, 2009 年认真部署并积极开展了对中央企业的巡视试点工作, 取得了积极成果。国资委对中央企业开展巡视工作是中央巡视工作的重要补充, 是完善国有资产监督管理工作的重要内容, 为进一步加强党内监督、增强监督合力、促进中央企业领导班子建设探索了新的路子。他强调, 国资委对中央企业开展巡视工作, 必须坚持有利于完善国有资产监管和国有企业改革; 有利于加强企业领导班子建设; 突出重点并抓住关键环节; 注重增强监督实效的原则。今年, 国资委将对中国电子信息产业集团公司等三家中央企业继续开展巡视试点工作。要认真做好五个方面的工作: 一是巡视组要扎实做好各项工作。二

是巡视办要做好协调服务工作。三是要抓紧建立健全国资委巡视工作制度。四是要加强巡视队伍建设。五是被巡视企业要积极配合巡视组开展工作。

孟建民同志在总结讲话中指出, 这次培训班安排合理, 培训内容丰富, 注重针对性和实效性, 组织协调有序, 研讨交流比较深入, 达到了预期目的。主要有五点收获: 一是进一步提高了开展中央企业巡视工作的认识, 增强了责任心和使命感。二是熟悉了巡视工作的程序和方法。三是明确了巡视工作的重点和主要任务。四是研究制订了巡视工作方案。五是增进了相互之间的了解, 为做好巡视工作打下了坚实的基础。他特别强调要切实把握巡视工作的重点; 要不断完善巡视工作的方式方法; 要严格执行巡视工作的程序; 要进一步加强巡视组的自身管理。

培训班邀请师金泉、孔令鉴两位组长介绍了巡视试点的经验和做法, 特别是在工作中需要把握的原则和重点。纪委副书记、监察局局长兼巡视办主任邵春保作了贯彻落实《国有企业领导人员廉洁从业若干规定》的专题讲座, 明确了加强对企业领导人员廉洁从业情况开展巡视监督的重点。中国电子信息产业集团公司、中国机械工业集团有限公司、中国煤炭地质总局等三家被巡视企业的有关领导参加了培训班开班式。

(摘自 中国二重纪检监察网)