DOI:10.16410/j.issn1000-8365.2019.05.022

模型剖分方式对钢锭凝固过程的影响

赵亚楠[1],郭建政[2,3]

(1.天津职业大学 机电工程与自动化学院,天津 300410;2.深圳万泽中南研究院,广州 深圳 518045;3.中南大学,材料科学与工程学院,湖南 长沙 410083)

摘　要:采用铸造模拟软件 ProCAST,针对 40T 金属模钢锭的传热凝固过程,选用不同的模型剖分方式(全模型、1/2 模型、1/8 模型),研究模型剖分方式对凝固计算精度及效率的影响。结果表明:模型选取越小,会降低计算精度,太大则会增加计算内存的使用量。综合考虑,对于大型钢锭的传热模拟计算,建议使用 1/2 模型进行计算。

关键词:数值模拟;剖分方式;大型钢锭;ProCAST

中图分类号:TF741　　**文献标识码**:A　　**文章编号**:1000-8365(2019)05-0513-04

Effect of Model Selection on Steel Ingot Solidification Process

ZHAO Yanan[1], GUO Jianzheng[2,3]

(1. School of Mechatronic Engineering and Automation, Tianjin Vocational Institute, Tianjin 300410, China; 2. Wedge &Central South Research Institute, Shenzhen 518045, China; 3. School of Material and Engineering, Central South University, Changsha 410083, China)

Abstract: Casting simulation software ProCAST was adopted to select different model subdivision methods (full model, 1/2 model and 1/8 model) for the heat transfer and solidification process of 40 tons metal mold ingot. The influence of model subdivision on solidification accuracy and efficiency was studied. The results show that the calculation accuracy will be reduced if the model is too small; the memory usage and calculation time will increase dramatically if the model is too large. Overall, it is suggested to use the 1/2 model for the heat transfer simulation calculation of large steel ingot.

Key words: numerical simulation; model; heavy-steel ingot; ProCAST

大型铸锻件的生产能力是衡量一个国家重大技术装备自给自足能力的重要标志,对国家经济和国防建设等方面都有至关重要的作用。研究结果[1-7]表明,采用数值模拟和试验检测相结合的方法,是优化铸件浇注参数和提高铸件质量的有效工具。数值模拟过程中存在很多不确定因素,其中,模拟软件本身的影响因素就有很多,包括:网格尺寸[8]、时间步长、浇注方式等,但模型的剖分方式对钢锭凝固过程的影响还未见报道。

在铸造的模拟计算中,为了减少计算量,提高计算效率,通常会将对称模型简化为 1/2、1/8 模型进行计算。本课题基于 ProCAST 软件,以 40 T 钢锭为研究对象,分析研究使用简化模型与整体模型计算结果的差异性,为模拟前模型建立提供参考,在保证计算精度的前提下,减少内存使用量,缩短计算时间,提高工作效率,对大型钢锭的凝固模拟计算具有很高的实用价值。

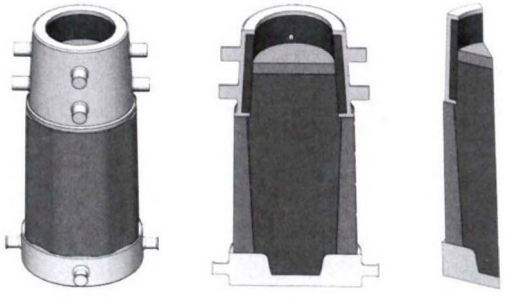
收稿日期:2019-01-24

作者简介:赵亚楠(1986-),女,河北宁晋人,硕士,讲师.研究方向:材料热加工的 CAD/CAE 分析.
电话:022-60585159,E-mail:skyzyn@126.com

1　前处理设置

1.1　三维模型

以某单位使用的 40 T 金属钢锭模钢锭为例,建立 3 种不同的模型:整体模型、1/2 模型、1/8 模型(见图 1)。



(a)整体模型　(b)1/2模型　(c)1/8模型

图 1　40 t 钢锭模型

Fig.1 Model of the ingot and mold for 40 tons

1.2　材料热物性参数

材料物性参数主要包括钢锭、钢锭模、保温砖的密度、热导率、焓、液相线温度和固相线温度。其中,钢锭的物性参数(见图 2)是根据钢液的合金成分(见表 1)计算得出的;保温砖、覆盖剂及钢锭模分别使

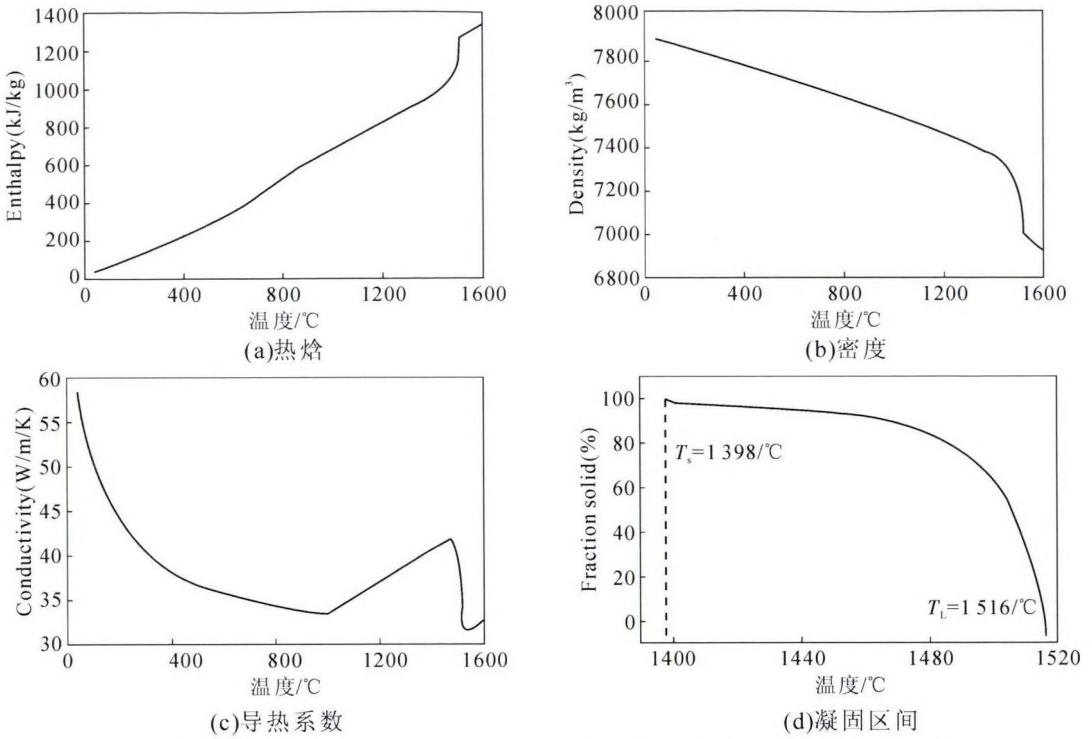


图 2 钢锭(2.25Cr1Mo0.25V) 热焓、密度、导热系数和凝固区间随温度的变化图
Fig.2 Curve of ingot physical parameters (2.25Cr1Mo0.25V) changing with temperature

表1 2.25Cr1Mo0.25V成分表 *w*(%)
Tab.1 Chemical composition of 2.25Cr1Mo0.25V alloy

C	Mo	Cr	Mn	Ni	Si	V	Cu	Ti	Nb	B
0.13	1.00	2.25	0.45	0.125	0.05	0.30	0.10	0.02	0.035	0.001

用 ProCAST 软件材料数据库中的 Sleeve、Insulation、Fe-GG-20。所有物性参数均为随温度变化的曲线,提高计算的可信度。

1.3 初始条件及边界条件

对于大型钢锭来说,钢锭的充型时间和完全凝固时间相比要小得多,因此,钢液的初始温度可简化为钢液的浇注温度,2.25Cr1Mo0.25V 的浇注温度设为 1 600 ℃。其余模型的初始温度均为 25 ℃。

本课题的目的在于进行模拟计算结果间的比较,并不与实际情况作对比,因此模型之间的界面换热系数可简化设置为常数(见表 2)。

2 计算结果与讨论

2.1 温度场分布

不论是钢锭的充型过程还是凝固过程,采用不同的模型剖分方式进行计算,其温度场分布几乎没有变化(见图 3、图 4);从完全凝固时间来看(见图 5),1/8 模型与整体模型的凝固时间均为 10.3 h,1/2

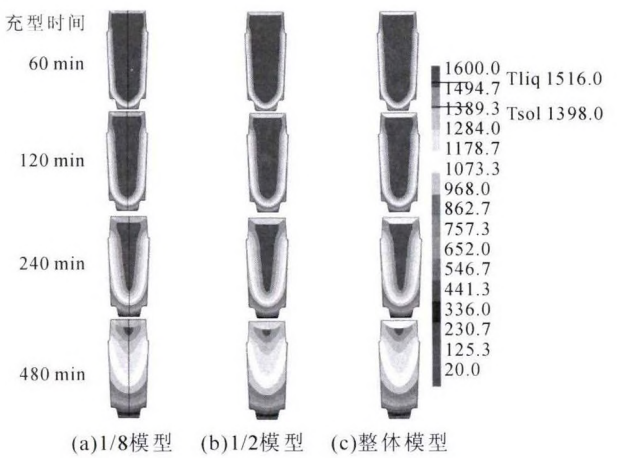
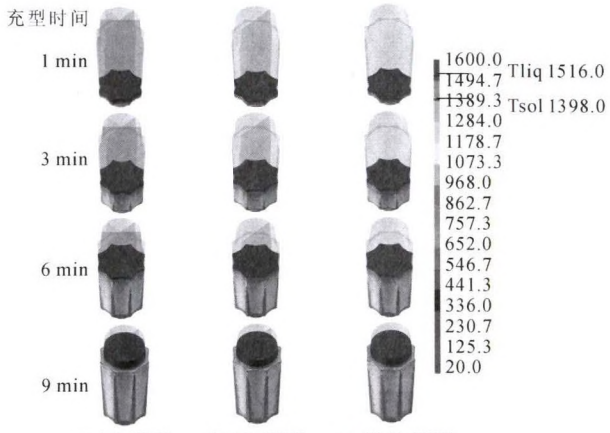


图 3 不同模型剖分方式下钢锭的温度场分布情况(充型过程)
Fig.3 Temperature distribution at different times for different models (filling process)

模型为 10.2 h,相差仅 6 min,可以认为凝固时间完全一致。为进一步分析模型剖分方式对温度场的影响情况,在钢锭及钢锭模选取相近节点(见图 6),查看 3 个模型中的节点温度随时间的变化情况 (见图 7),从曲线图看出,使用 3 种模型进行钢锭的充型和凝固计算,节点温度之间的变化不大。通过以上分析可以明确,对于对称模型的温度场计算,完全可以使

表 2 各模型之间的换热系数
Tab.2 Heat transfer coefficient of the interfaces model

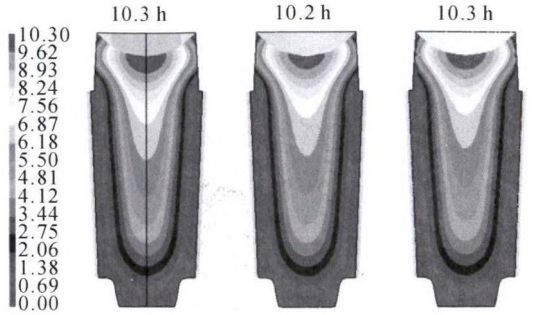
界面	钢锭-钢锭模	钢锭-保温砖	钢锭-覆盖剂	保温砖-覆盖剂	保温砖-保温帽
换热系数 W/m²·K	1 500	500	100	20	1 000



(a)1/8模型　(b)1/2模型　(c)整体模型

图 4 不同模型剖分方式下钢锭的温度场分布情况(凝固过程)

Fig.4 Temperature distribution at different times for different models (solidification process)



(a)1/8模型　(b)1/2模型　(c)整体模型

图 5 钢锭的完全凝固时间云图

Fig.5 Solidification time distribution with different models

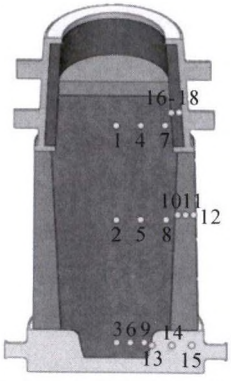


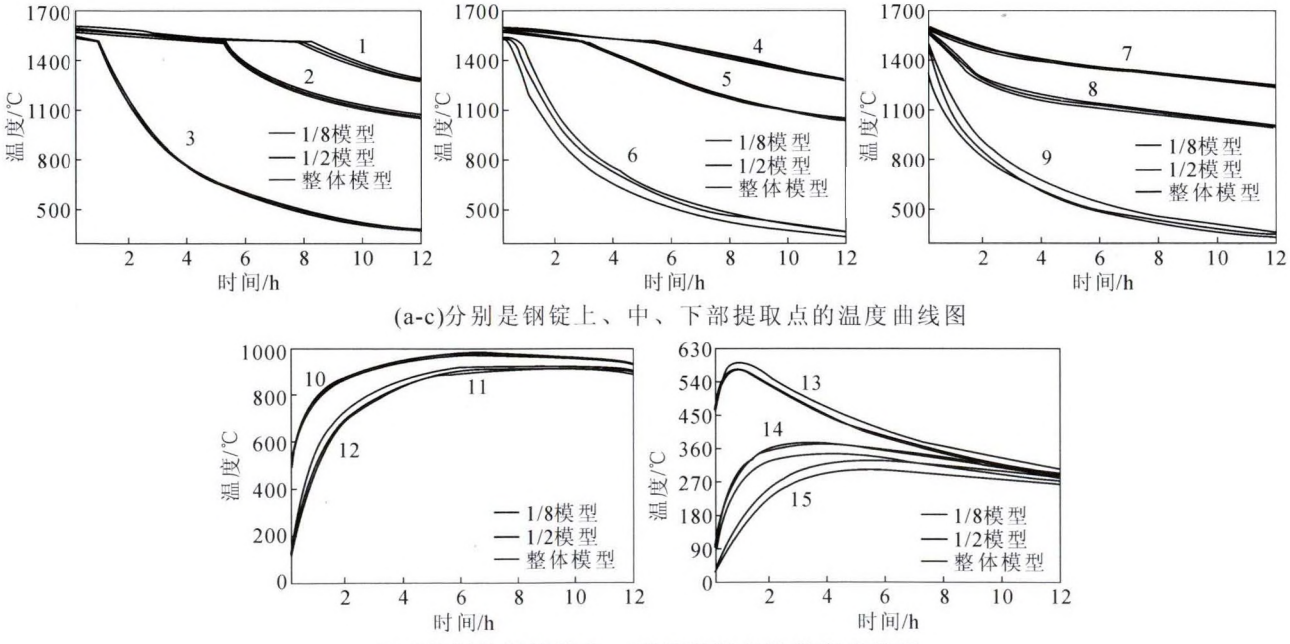
图 6 40 吨钢锭模型温度点选取位置

Fig.6 Locations of the temperature measurement point of 40 tons ingot model

用部分模型代替整体模型进行模拟计算，以减少计算时间，提高工作效率。

2.2 钢锭的缩孔缩松分布

用 NIYAMA 判据对钢锭缺陷进行了预测(见图 8)，1/2 模型与整体模型的缩松区域不论形状大小都十分接近，而采用 1/8 模型计算得出的缩松相对较短，本课题考虑了充型过程，钢锭凝固会出现不完全对称凝固现象，这在一次缩孔位置有明显的体现，1/2 模型和整体模型的结果不对称，1/8 模型的结果几乎完全对称。从对缩松的预测上，不宜采用 1/8 模型。



(a-c)分别是钢锭上、中、下部提取点的温度曲线图

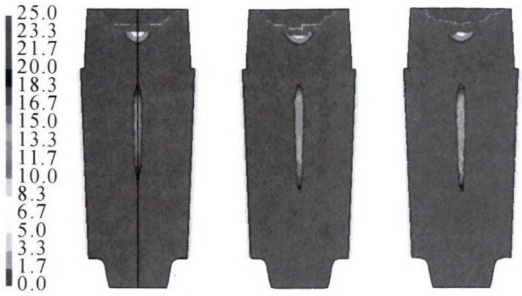
(d,e)分别是钢锭模中、下部提取点的温度曲线图

图 7 不同剖分方式下的计算温度分布图

Fig.7 Effect of model selection on temperature evolution at different locations

2.3 计算效率的比较与分析

采用 3 种不同模型的计算所用时间和最大内存使用量有较大的差异(见表 3)，随着模型的减小，最大内存使用量减少，最大降幅为 77%；计算速度也



(a)1/8模型　(b)1/2模型　(c)整体模型

图 8 网格尺寸对钢锭缩松预测的影响

Fig.8 Effect of mesh size on the prediction of shrinkage micro-porosity using NIYAMA criterion

表 3 不同网格尺寸下的最大内存使用量及计算所用时间

Tab.3 Peak memory usage and computation time by different mesh sizes

模型剖分方式	最大内存使用量 (bytes)	计算所用时间 /h
1/8 模型	2.0E8	1.2
1/2 模型	4.8E8	5.4
整体模型	8.7E8	13.0

大幅增加,增幅高达 90.8%。可见,采用对称模型进行计算,不仅能够大幅降低内存使用量,降低对计算机配置的需求,还可以大幅提高计算效率。

3 结论

(1)模型的剖分方式对钢锭充型及凝固过程中的温度场分布、完全凝固时间几乎没有影响,对缩松的预测有一定的影响,就钢锭而言,选用 1/8 模型进行计算得到的缺陷预测结果有些偏差。

(2)计算使用对称模型将大大降低内存使用量,并减少模拟计算所用的时间,提高工作效率。

(3)对于大型钢锭的传热模拟计算,建议使用对称模型进行计算,但不推荐使用 1/8 模型。

(4)需要指出的是,本结论只适合大型钢锭传热凝固计算,如果进行流动,应力和微观组织的计算,需要做进一步的研究。

参考文献:

[1] 马霈文,张振山,敖广武. 水冷扁锭凝固过程的模拟研究[J]. 铸造技术,2018, 39(4): 858-860.

[2] 赵亚楠,卜恒勇,郭建政,等. 锥度及高径比对大型钢锭质量的影响[J]. 大型铸锻件,2017, 9 (5):27-31.

[3] 牛立群,袁旗,王旭明,等. 锭模斜度及浇注工艺对钢锭质量影响的数值模拟研究[J]. 大型铸锻件,2017,9(5):3-6.

[4] 崔雅茹,马占彪,赵俊学,等. 冒口参数对 17CrNiMo6 钢锭质量及利用率的影响[J]. 铸造,2017,66(7):719-722.

[5] 于海龙,沈明钢,张春宇,等. 不同高宽比下大钢锭凝固过程的数值模拟与优化[J]. 铸造技术,2015, 36(3): 729-731.

[6] 俞基浩,赵静,张浚哲,等. 大型铸锭凝固过程热模拟方法[J]. 铸造,2015,64(8):754-757.

[7] 赵亚楠,卜恒勇,郭建政. 浇注温度对大型钢锭凝固过程的影响[J]. 铸造技术,2014, 35(10):2360-2363.

[8] 赵亚楠,郭建政,李绍敏,等. 大型钢锭凝固模拟计算中空间与时间步长选取[J]. 铸造,2013, 62(9):861-864.

技术资料邮购

《铸造涂料及应用》

《铸造涂料及应用》在内容上反映了铸造涂料的最新成果，在叙述上由浅入深，注重实用，是从事铸造生产、管理、铸造原辅材料生产及销售相关人员的专业用书之一，也可作为高等院校铸造专业或材料成形与控制专业铸造研究方向的本科生、研究生的教学研究用参考书。本书共10章，第1章为绪论；第2章和第3章分别介绍了铸造涂料用耐火粉料、载液、悬浮剂、粘结剂和助剂等原材料；第4章阐述了涂料的粘度及流变性能；第5章介绍了涂料的配制，第6～8章分别重点介绍了砂型(芯)涂料、重力及非重力金属型铸造涂料和其他铸型(芯)涂料；第9章介绍了涂料的缺陷及防止措施；第10章介绍了涂料的性能与检测。

特快专递邮购价：69元。

邮购咨询：李巧凤　　电话/传真：029-83222071