DOI:10.16410/j.issn1000-8365.2022.2295

303 t 钢锭凝固过程缩孔分布及其影响因素的模拟研究

张　伦[1],周秋月[2],陈　威[1],王亚栋[3],张立峰[3]

(1. 燕山大学 机械工程学院,河北 秦皇岛 066044; 2. 北京科技大学 冶金与生态工程学院,北京 100083; 3. 北方工业大学 机械与材料工程学院,北京 100144)

摘　要:本研究基于国内某厂 16Mn 钢 303 t 钢锭的生产过程,通过 ProCAST 软件建立三维凝固数学模型,研究了铸造温度、保温材料以及冒口高度对钢锭缩孔和凝固时间等的影响规律。通过对比实际生产过程中钢锭温度以及凝固完成后缩孔的测量值和预测值验证了模型的准确性。初始工况下钢液从底部和侧壁开始凝固,中心液相呈现从“U”形–“V”形–半椭圆形的变化,凝固时间约为 54 h。针对不同工艺下钢锭的凝固过程进行计算,得到了缩孔深度和凝固时间的拟合公式,为指导实际生产提供了理论依据。结果表明,随着铸造温度的升高,钢锭的缩孔深度逐渐加深,凝固时间逐渐增加;随着保温材料导热性的增加,缩孔深度逐渐加深,凝固时间逐渐降低;随着冒口高度的增加,钢锭的缩孔深度逐渐减小,凝固时间逐渐增大。

关键词:钢锭;缩孔;铸造温度;保温材料;冒口高度

中图分类号:TG244　　**文献标识码**:A　　**文章编号**:1000-8365(2022)12-1051-07

Numerical Simulation of Shrinkage Cavity Distribution and its Influencing Factors during Solidification of 303–ton Steel Ingot

ZHANG Lun[1], ZHOU Qiuyue[2], CHEN Wei[1], WANG Yadong[3], ZHANG Lifeng[3]

(1. School of Mechanical Engineering, Yanshan University, Qinhuangdao 066004, China; 2. School of Metallurgical and Ecological Engineering, University of Science and Technology Beijing, Beijing 100083, China; 3. School of Mechanical and Materials Engineering, North China University of Technology, Beijing 100144, China)

Abstract: Based on the production process of a 16Mn steel 303 t ingot in a domestic plant, a three-dimensional solidification mathematical model was established by ProCAST software to investigate the effect of the casting temperature, insulation material and height of the upriser on the shrinkage cavity and solidification time during solidification. The accuracy of the model was verified by comparing the measured and predicted values of the ingot temperature in the actual production process and the shrinkage cavity after solidification. In the initial working condition, the liquid steel solidifies from the bottom and sidewall, and the central liquid phase changes from a "U" shape to a "V" shape and then to a semioval shape. The solidification time is approximately 54 h. The solidification process of the steel ingot under different technologies was calculated, and the fitting formula of the shrinkage cavity depth and solidification time was obtained, which provided a theoretical basis for guiding actual production. The results show that with increasing casting temperature, the shrinkage cavity depth of the ingot gradually deepens, and the solidification time gradually increases. With the increase in the thermal conductivity of the thermal insulation material, the shrinkage cavity depth gradually deepens, and the solidification time gradually decreases. With increasing riser height, the shrinkage cavity depth of the ingot decreases, and the solidification time increases.

Key words: ingot; shrinkage; casting temperature; insulation material; height of the upriser

收稿日期:2022-10-07

基金项目:河北省科技计划项目(20311006D)

作者简介:张　伦(1996—),硕士.研究方向:大型钢锭浇铸过程仿真等工作.电话:18712766193,
Email:zhanglunysu@163.com

通讯作者:陈　威(1994—),博士,讲师.研究方向:冶金过程数值模拟研究.电话:18810610413,
Email: weichen@ysu.edu.cn

16Mn 钢因其良好的力学性能，经过锻造和机械加工后常用于大型压力容器的生产[1-3]。在 16Mn 钢钢锭的生产过程中，由于钢液的补缩作用而使凝固末端产生缩孔[4],若缩孔无法随冒口被切除,将严重影响到钢锭的质量[5]。因此,研究大型钢锭凝固过程中缩孔的产生及分布对提高钢锭质量具有重要意义。

不同生产工艺对钢锭缩孔的产生有明显影响。张立峰等[6-7]通过建立真空环境下 Fe-Ni 基合金凝固

(C)1994-2023 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

过程的数学模型，研究了浇注速度和最大充型率对缩孔的影响。结果表明，随着浇注速度的增加，冒口端缩孔逐渐加重；而随着最大充型率的增加，冒口端缩孔逐渐减弱。Patil 等[8]用有限元模型研究了 4 种钢在相似铸造条件下的凝固过程，结果表明，合金钢比碳钢更容易出现缩孔。Tkadlečková 等[9]通过数值模拟的方法研究了 90 t 钢锭在不同工艺下的凝固过程，结果表明，通过增加浇注时间、降低浇注温度可以使钢锭的缩孔率达到最低。Zhang 等[10]计算了 39~45 t 钢锭的缩孔情况，发现缩孔情况随着钢锭质量的增加而逐渐加重。Isobe[11]利用 150 kg 真空熔炼炉研究了向钢液添加芯材对凝固过程的影响，结果表明，添加芯材可以有效消除缩孔。

已发表的研究大多基于几千克[12-14]到几十吨[15-18]钢锭的凝固过程，对百吨级以上的超大型钢锭缩孔的研究还相对较少。百吨级超大型钢锭与小型钢锭的铸造工艺不同，并且超大型钢锭的凝固时间可长达数日，因此，用小型钢锭的缩孔结果预测超大型钢锭的缩孔情况是不准确的。本研究基于国内某厂 16Mn 钢 303 t 钢锭实际生产过程建立了耦合传热和凝固的三维数值模型，对不同铸造温度、保温材料以及冒口高度下钢锭冒口端的缩孔情况进行模拟研究，并对缩孔形状、深度进行了定量预测。为实际生产中降低钢锭缩孔的发生率，提高成品率，保证后续锻件的质量提供理论基础。

1 模型参数

1.1 模型介绍

本研究以国内某重型机械厂生产的核电用 16Mn 钢 303 t 钢锭为研究对象，通过 ProCAST 商业软件对钢锭凝固过程进行仿真计算，利用 POROS 模型预测钢锭的缩孔情况。钢锭的结构如图 1(a)所示，整个钢锭高 5 285 mm，锭身最大直径为 3 433 mm，保温层由内外两层组成，内层冒口砖厚度为 160 mm，外层保温砖厚度为 40 mm。网格分布如图 1(b)所示，数量约为 397 万。冒口砖和保温砖的热导率为温度的函数，具体如图 2 所示。钢锭的铸造温度为 1 580 ℃，钢锭模初始温度为 30 ℃，浇注完成后在空气中冷却。在实际生产中除了会在冒口端产生一次缩孔，还会在钢锭内部产生二次缩孔，考虑到超大型钢锭的内部缩孔检测困难，本研究只针对冒口端的缩孔情况进行了讨论。

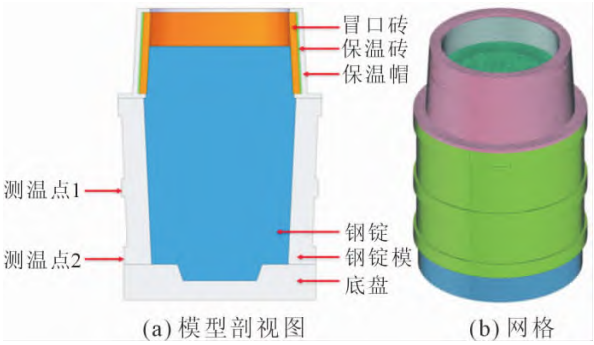


图 1 钢锭模型示意图

Fig.1 Diagram of the steel ingot model

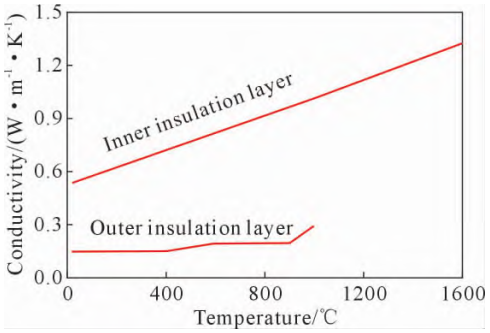


图 2 内外保温层热导率随温度的变化

Fig.2 Variation of thermal conductivity of the inner and outer insulation layer with temperature

16Mn 钢的成分如表 1 所示。模型中 16Mn 钢的物性参数通过 ProCAST 软件自带的热力学数据库计算得出，钢种的导热性、密度和热焓与温度的关系如图 3 所示。钢液的液相线为 1 514 ℃，固相线为 1 469 ℃。

1.2 传热模型

基于傅里叶导热方程，考虑凝固潜热的释放，得到能量守恒方程：

$$k_{\mathrm{m}}\left(\frac{\partial^2 T}{\partial x^2}+\frac{\partial^2 T}{\partial y^2}+\frac{\partial^2 T}{\partial z^2}\right)=\rho\left(C_{\mathrm{p}}-L\frac{\partial f_{\mathrm{s}}}{\partial T}\right)\frac{\partial T}{\partial \mathrm{t}} \tag{1}$$

采用热焓法处理凝固潜热[19]：

$$H=\int_0^T C_{\mathrm{p}}\mathrm{d}T+(1-f_{\mathrm{s}})L \tag{2}$$

对上式求导：

$$\rho\frac{\partial H}{\partial \mathrm{t}}=C_{\mathrm{p}}-L\frac{\partial f_{\mathrm{s}}}{\partial T} \tag{3}$$

将公式(3)代入公式(1)得到采用热焓法处理凝固潜热的能量守恒方程：

$$\rho\frac{\partial H}{\partial \mathrm{t}}=k_{\mathrm{m}}\left(\frac{\partial^2 T}{\partial x^2}+\frac{\partial^2 T}{\partial y^2}+\frac{\partial^2 T}{\partial z^2}\right) \tag{4}$$

式中，k_{m} 为热导率，$\mathrm{W\cdot m^{-1}\cdot K^{-1}}$；$T$ 为节点温度，℃；ρ

表 1 钢种成分 *w*/%

Tab.1 Chemical composition of steel

C	Si	Mn	P	S	Cr	Ni	Mo	V	Al	Nb	Cu
0.170	0.260	1.210	0.007	0.002	0.200	0.290	0.050	0.006	0.007	0.019	0.050

(C)1994-2023 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

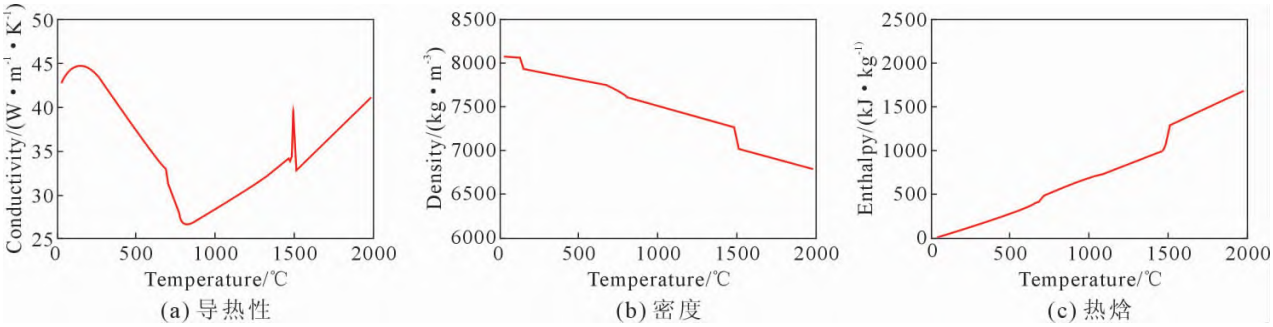


图 3　钢锭的热物性参数

Fig.3　Thermophysical parameters of the ingot

为密度，kg·m^{-3}；C_p 为比热容，J·kg^{-1}·K^{-1}；t 为时间，s；L 为凝固潜热，J/kg；f_s 为固相率；H 为热焓，J/mol。

1.3　POROS 模型

POROS 模型通过临界固相率(MACROFS=0.7)和补缩距离(FEEDLEN=5 mm)相结合来预测钢液凝固过程产生的缩孔[20]。在钢液凝固时，会形成一定数量由糊状区包围液体的孤立区域，如图 4(a)所示。在糊状区域内到达临界固相率的位置和固相等值面之间的距离大于临界补缩长度时就会出现缩孔，如图 4(b)所示，A 处会产生缩孔，B 处不会产生缩孔。

1.4　边界条件

模型中接触面之间的换热系数如表 2 所示。钢锭模外表面设置为空冷边界条件。由于实际生产过程中，浇注完成后会在钢液表面覆盖保温剂与发热剂，为了简化模型，本研究假设浇注完成后的钢液面为绝热状态。

表 2　接触面之间换热系数

Tab.2 Heat transfer coefficient between contact surfaces

Contact surface	Coefficient of heat transfer/(W·m^{-2}·K^{-1})
Mold-Inner insulation layer	500
Mold-Outer insulation layer	500
Outer insulation layer-Inner insulation layer	400
Ingot-Inner insulation layer	600
Mold-Ingot	1 000

2　实验结果及讨论

2.1　模型验证

为了验证目前传热凝固模型的准确性，在实际生产过程中利用红外测温仪对图 1(a)所示的 2 个测温点进行测温。测温点 1 在钢锭模的中间位置，测温点 2 距离底盘 100 mm，每隔 1 h 记录一次测温数据，具体测量结果见表 3[20]。测温结果和温度仿真结果的对比如图 5 所示，可以看出，预测结果与测温结果吻合较好。在凝固的前 5 h 内，钢锭模上温度上升速率较快，测温点 1 和 2 处温度分别达到了 382 ℃和 241 ℃。凝固 14 h 后，测温点 1 温度达到 591 ℃，测温点 2 达到 406 ℃，随后温度上升速度趋于平缓。

表 3　测温结果[20]

Tab.3　Results of measured temperature[20]

Time	Point1	Point2
Completion of pouring	114.7 ℃	93.1 ℃
After 1 h	318.4 ℃	148.4 ℃
After 2 h	386.8 ℃	184.3 ℃
After 3 h	397.4 ℃	222.7 ℃

图 6(a)为钢锭完全凝固状态下的计算结果，发生在冒口顶端的缩孔与图 6(b)中生产现场得到的结果一致，表明目前钢锭凝固和缩孔模型的准确性。由于钢锭模的冷却作用，钢液从底部和侧壁开始凝固，已经凝固的钢液产生收缩现象，未凝固的中心液相

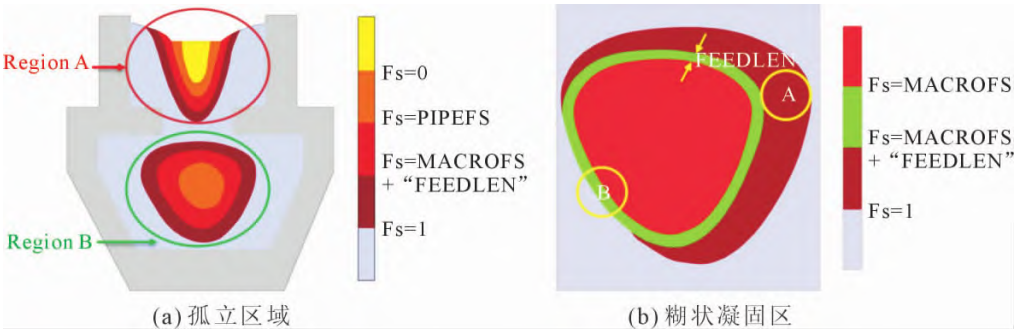


图 4　缩孔预测示意图[21]

Fig.4　Schematic diagram of shrinkage cavity prediction[21]

(C)1994-2023 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

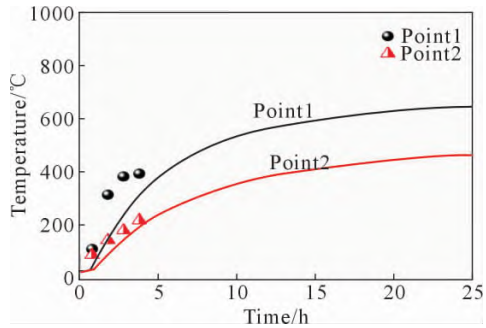


图 5 计算得到的温度和测量结果对比[20]

Fig.5 Comparison between calculated and measured results of temperature[20]

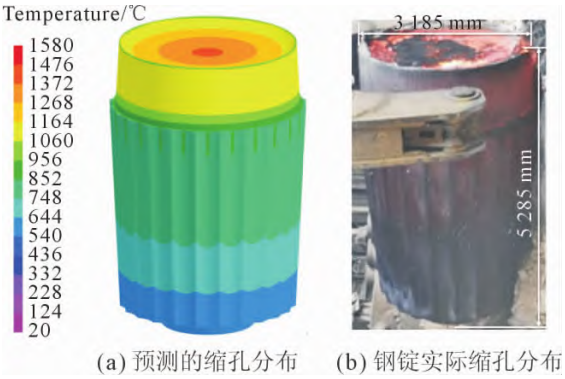


图 6 计算得到的缩孔与实际产生缩孔的对比

Fig.6 Comparison of the calculated shrinkage porosity with the actual shrinkage porosity

发生补缩行为,钢液顶部出现凹陷,直到凝固完成形成最终缩孔,缩孔深度为 275 mm。

2.2 凝固结果讨论

303 t 钢锭凝固过程固相率变化如图 7 所示,凝固前期钢液与钢锭模之间的换热最为剧烈,发生在冒口顶部的缩孔主要在这个阶段形成。钢液从底部和侧壁开始凝固,中心液相呈“U”形;当凝固时间超过 24 h,中心液相逐渐变为“V”形;当凝固时间超过 40 h,中心液相逐渐变为半椭圆形,直至最终完全凝固。钢锭最终凝固点为冒口顶端,缩孔缺陷发生位置远离锭身,保证了最终产品的质量;56 h 后钢液已经完全凝固。

定义模型中心液相的深度为熔池深度,凝固进行 24 h 后,熔池深度约为 3 860 mm,如图 7 所示。凝固过程中熔池深度与时间的关系如图 8 所示,在 28~36 h 之间,由于中心液相由“V”形转变为半椭圆形使得中心液相下侧迅速固化,导致熔池深度变化剧烈,在此期间熔池深度下降了约 1 450 mm。由于冒口端存在缩孔,所以中心液相消失后,熔池深度不为 0。

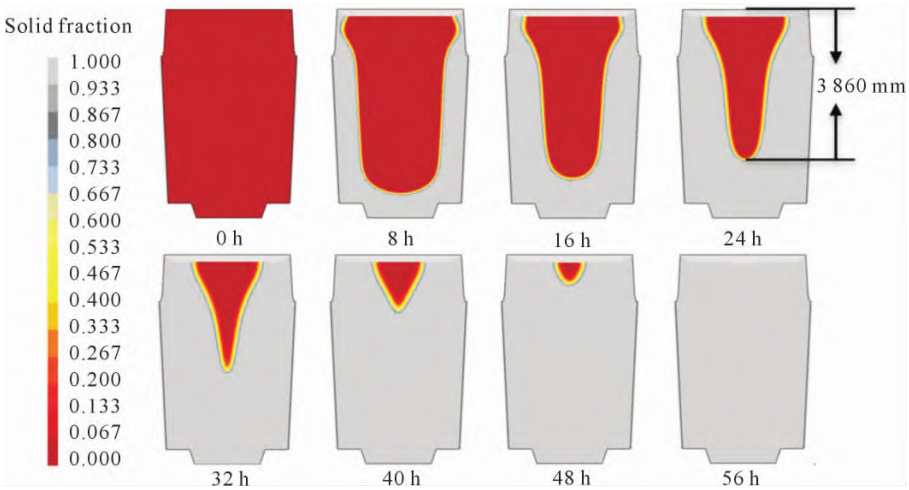


图 7 凝固过程的固相率

Fig.7 Solid fraction during the solidification process

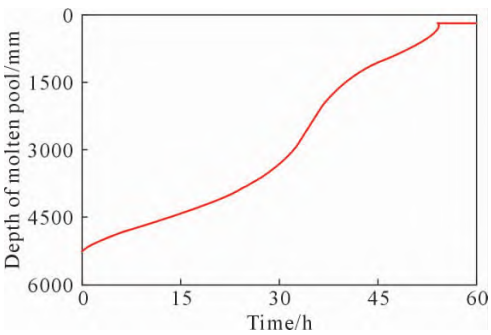


图 8 不同时刻下的熔池深度

Fig.8 The depth of the molten pool at different time

2.3 不同工艺参数对钢锭冒口端缩孔的影响

2.3.1 铸造温度对钢锭冒口端缩孔的影响

为了研究铸造温度对钢锭凝固过程及缩孔的影响规律,本研究分别计算了铸造温度为 1 540、1 580、1 620 ℃时钢锭的凝固过程,计算结果如图 9 所示。铸造温度增大时,冒口端的缩孔变得更加平坦,但缩孔体积总体变化不大。不同铸造温度下的缩孔深度和凝固时间见图 10(a)。3 种铸造温度对应的缩孔深度分别为 226、275、328 mm,钢液的铸造温度每增大 40 ℃,缩孔深度增加约 50 mm;3 种铸造

(C)1994-2023 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

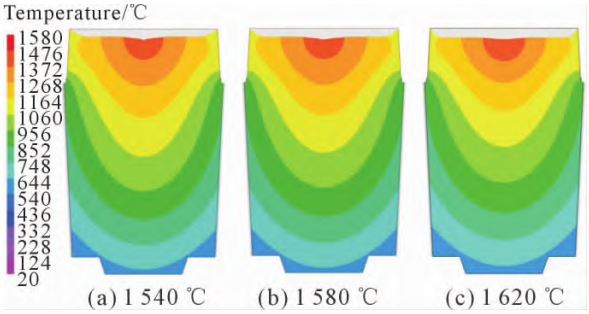


图 9　不同铸造温度下的缩孔

Fig.9　Shrinkage cavity at different casting temperatures

温度对应的凝固时间分别为 51、54、58 h。

拟合得到缩孔深度和铸造温度的关系式：

$$l=-1\ 738.18+1.28T \tag{5}$$

拟合得到凝固时间和铸造温度的关系式：

$$t_s=-86.15+0.09T \tag{6}$$

式中，l 为缩孔深度，mm；t_s 为凝固时间，h；T 为铸造温度，℃。

钢液不同铸造温度在不同时刻下的熔池深度如图 10(b)所示，同一时刻下钢液的铸造温度越高，熔池越深，凝固所需的时间也越长。铸造温度的提高使得合金的流动性有所增加，钢液能够更充分进入凝固前沿枝晶生长形成的空隙，对冒口端的凝固补缩要求更大，缩孔深度随铸造温度的增加而增加。

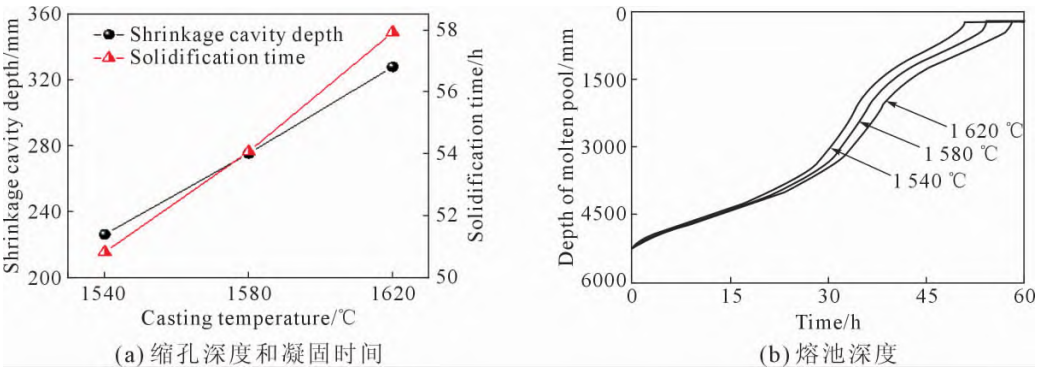


图 10　不同铸造温度下的计算结果

Fig.10　Calculation results at different casting temperatures

2.3.2　冒口保温材料对钢锭冒口端缩孔的影响

为了研究保温材料对钢锭凝固过程及缩孔的影响规律，本研究分别计算了冒口砖分别为原始材料、莫来石以及氧化镁砖条件下钢锭的凝固过程，3 种材料的导热性依次增加，如图 11 所示。计算结果如图 12 所示，随着保温材料导热性的增加，冒口端的缩孔逐渐加深，缩孔形状的锥度逐渐增大。不同保温材料下的缩孔深度和凝固时间见图 13(a)，随着保温材料导热性的增加，缩孔深度逐渐加深，分别为 275、463、655 mm，3 种保温材料下钢锭的凝固时间分别为 54、46、43 h。不同保温材料下，钢锭的熔池深度随时间的变化如图 13(b)所示。保温材料的改变对钢锭凝固前 33 h 内的熔池深度基本没有影响，对 33 h 后的熔池深度影响较大。保温材料导热性越好，同一凝固时刻下熔池越浅，所需凝固时间越短。保温材料导热性的增加使得冒口端沿水平方向的传热增加，凝固坯壳沿水平方向的生长速度加快，对钢液凝固补缩要求提高，所以随着保温材料导热性的增加，缩孔深度增加，锥度增大。

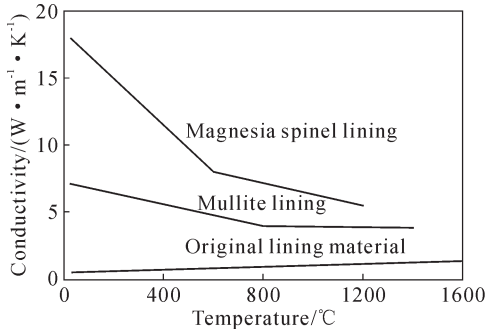


图 11　不同冒口砖的导热性

Fig.11　Thermal conductivity of different insulation layers

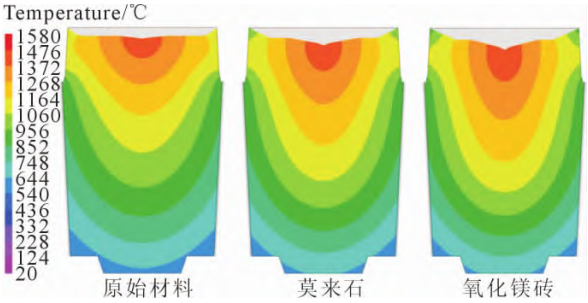


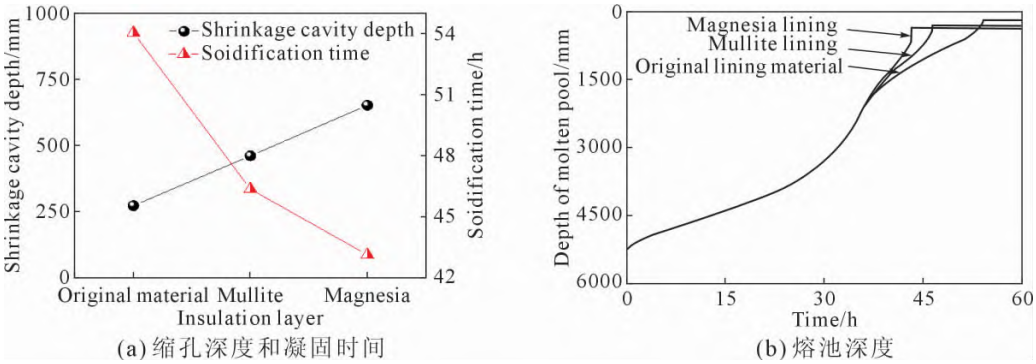
图 12　不同保温材料下的缩孔

Fig.12　Shrinkage cavity under different insulation materials

2.3.3 冒口高度对冒口端缩孔的影响

为了研究冒口高度对钢锭凝固过程及缩孔的影响规律，本研究分别计算了冒口高度为 670、1 170、1 670 mm 时钢锭的凝固过程，计算结果如图 14 所示。随着冒口高度的增加，剖面缩孔形状由“花括号”形转变为“梯”形。不同冒口高度对应的缩孔深度和凝固时间见图 15(a)，随着冒口高度的增加，冒口端的缩孔逐渐变浅，凝固时间增加。不同冒口高

(C)1994-2023 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net



(a) 缩孔深度和凝固时间　(b) 熔池深度

图 13　不同保温材料下的计算结果

Fig.13　Calculation results for different insulation materials

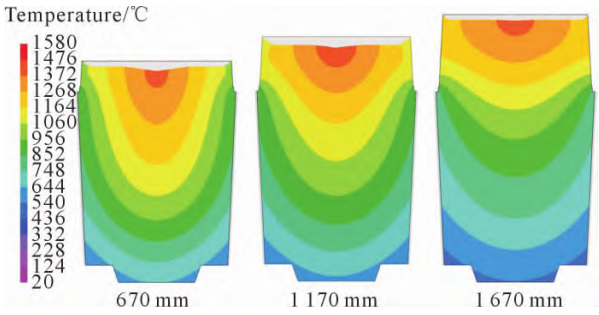


图 14　不同冒口高度下的缩孔

Fig.14　Shrinkage cavity at different heights of the upriser

度对应的缩孔深度分别为 346、275、187 mm；凝固时间分别为 44、54、77 h。

拟合得到缩孔深度和冒口高度的关系式：

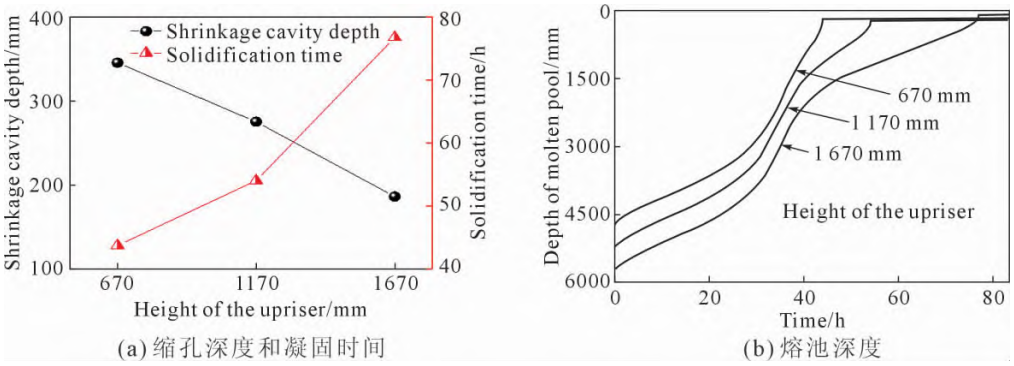
$$l=455.32-0.16h \tag{7}$$

拟合得到凝固时间和冒口高度的关系式：

$$l=19.65+0.03h \tag{8}$$

式中，h 为冒口高度，mm。

冒口取不同高度时钢锭在不同时刻下的熔池深度如图 15(b)所示，由于钢锭整体尺寸不同，所以 3个工况下熔池深度的初始值不同，冒口高度取 1 670 mm 时缩孔深度最小，对应的凝固终点熔池深度也最浅。在凝固进行 40 h 以后，随着冒口高度的增加，熔池深度的减小速度逐渐减慢。合理设计冒口高度可以控制凝固时间，节省原材料，保证缩孔不进入铸件内部。



(a) 缩孔深度和凝固时间　(b) 熔池深度

图 15　不同冒口高度下的计算结果

Fig.15　Calculation results at different riser heights

4　结论

(1)初始工况下钢液从底部和侧壁开始凝固，中心液相呈现从“U”形到“V”形再到半椭圆形的变化，凝固时间约为 54 h。

(2)随着铸造温度的升高，钢锭的缩孔深度逐渐加深，凝固时间逐渐增加，同一时刻下钢液的铸造温度越高，熔池越深。铸造温度为 1 540、1 580、1 620 ℃条件下，缩孔深度分别为 226、275、328 mm，凝固时间分别为 51、54、58 h。

(3)随着保温材料导热性的增加，缩孔深度逐渐加深，凝固时间逐渐降低。凝固进行 33 h 后，同一时刻下，保温材料导热性越好熔池越浅。冒口砖材质分别为原始材料、莫来石以及氧化镁砖条件下钢锭缩孔深度分别为 275、463、655 mm，钢锭的凝固时间分别为 54、46、43 h。

(4)随着冒口高度的增加，钢锭的缩孔深度逐渐减小，凝固时间逐渐增大，在凝固进行 40 h 以后，随着冒口高度的增加，熔池深度的减小速度逐渐变慢。冒口高度为 670、1 170、1 670 mm 时，钢锭缩孔深度分别为 346、275、187 mm，钢锭的凝固时间分别为 44、54、77 h。

(C)1994-2023 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

参考文献：

[1] 朱帅，张艳召，祁一星，等. 16Mn 低碳锰钢厚板锻件探伤缺陷的原因分析[J]. 热加工工艺，2021, 50(17): 144-147.

[2] 洪福东，冯路路，乔文玮，等. 热处理工艺对 16Mn 钢组织和性能的影响[J]. 金属热处理，2019, 44(12): 157-160.

[3] PICKERING E J. Macrosegregation in steel ingots: The applicability of modelling and characterisation techniques[J]. ISIJ International, 2013, 53(6): 935-949.

[4] 俞占扬，张慧，王明林，等. 钢锭中缩孔与缩松缺陷的研究现状及进展[J]. 特种铸造及有色合金，2021, 41(9): 1073-1078.

[5] LAN P, ZHANG J Q. Numerical analysis of macrosegregation and shrinkage porosity in large steel ingot[J]. Ironmaking & Steelmaking, 2014, 41(8): 598-606.

[6] ZHANG L F, GAO C, LI C W, et al. Modeling on the solidification of 1J51 Fe-Ni-based alloy ingot under vacuum conditions[J]. JOM, 2014, 66(7): 1175-1183.

[7] ZHANG H J, ZHANG L F. Modeling on the solidification structure of Fe-Ni-based alloys using cellular automaton method [J]. Metallurgical Research and Technology, 2016, 113(4): 410.

[8] PATIL P, MARJE V, BALACHANDRAN G, et al. Theoretical study on influence of steel composition on solidification behaviour in ingot casting of low alloy steels at similar casting conditions[J]. International Journal of Cast Metals Research, 2015, 28 (2): 117-128.

[9] TKADLEČKOVÁ M, MICHALEK K, GRYC K, et al. The effect of boundary conditions of casting on the size of porosity of heavy steel ingot [J]. Journal of Achievements in Materials and Manufacturing Engineering, 2013, 56(1): 29-37.

[10] ZHANG Y, XU C, LIU N, et al. Effects of weight-compatible design on ingot solidification [J]. Steel Research International, 2021, 92(3): 2000560.

[11] ISOBE K. Development technology for prevention of macro-segregation in casting of steel ingot by insert casting in vacuum atmosphere: Casting and solidification[J]. ISIJ International, 2021, 61(5): 777-787.

[12] RIEDLER M, MICHELIC S, BERNHARD C. Formation of shrinkage porosity during solidification of steel: Numerical simulation and experimental validation[C]//International Symposium on Liquid Metal Processing and Casting 2015. Leoben, Austria: IOP Publishing Ltd., 2016. 487-494.

[13] 高晨，张立峰，李崇巍，等. 真空条件下锭模参数对铁镍合金缩孔分布的影响[J]. 北京科技大学学报，2014, 36(7): 887-894.

[14] 王建武，徐志强，杨树峰. 热顶设计对镍基高温合金铸锭收缩孔隙的影响[J]. 中国冶金，2022, 32(4): 63-69, 76.

[15] KERMANPUR A, ESKANDARI M, PURMOHAMAD H, et al. Influence of mould design on the solidification of heavy forging ingots of low alloy steels by numerical simulation[J]. Materials & Design, 2010, 31(3): 1096-1104.

[16] ZHANG C, BAO Y, WANG M. Influence of casting parameters on shrinkage porosity of a 19 ton steel ingot [J]. Metallurgia Italian, 2016, (1): 37-44.

[17] ZHANG C, BAO Y, WANG M, et al. Modeling and predication of shrinkage porosity formation in steel ingot [C]// 146th Annual Meeting and Exhibition Supplemental. United states: Springer International Publishing, 2017. 539-550.

[18] 姬发，肖志霞，冯建航，等. 电加热冒口铸钢辊凝固过程数值模拟及优化[J]. 中国冶金，2021, 31(3): 73-81, 86.

[19] 周建兴，刘瑞祥，陈立亮，等. 凝固过程数值模拟中的潜热处理方法[J]. 铸造，2001 (7): 404-407.

[20] HU W, ZHOU Q, CHEN W, et al. Numerical simulation on the fluid flow, air entrainment, heat transfer and solidification during top pouring and cooling of a 303 ton heavy ingot[J]. ISIJ International, Under review.

[21] ESI GROUP. ProCAST User Manual Version 2018.0 [M]. Paris: ESI Group, 2018.

(C)1994-2023 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net