

· 试验研究 ·

42CrMo4 钢 39 t 锭真空浇铸和凝固过程数值模拟和生产实践

李胜利 关锐 艾新港 许长军 胡林
(辽宁科技大学材料与冶金学院, 鞍山 114051)

摘要 用 Anycasting 铸造软件对 42CrMo4 钢(/% :0.38 ~ 0.45C, 0.90 ~ 1.20Cr, 0.025Mo) 39 t 锭真空浇铸和凝固过程进行计算机模拟, 确定浇铸钢水温度 1 527 °C, 过热度 40 °C 时 39 t 钢锭充型时间 18.78 min, 其中锭身 10 min, 帽口 8.78 min, 预判缩孔仅出现在帽口中心处。现场生产实践表明, 铸锭锻造后的模块经 II 级超声波探伤合格, 成材率从工艺改进前的 65% 提高至 71.35%。

关键词 模具钢 42CrMo4 39 t 钢锭 浇铸工艺 数值分析 成材率

Numerical Simulation for Vacuum Casting and Solidification Process of 39 t Ingot of Steel 42CrMo4 and Production Practice

Li Shengli, Guan Rui, Ai Xingang, Xu Changjun and Hu Lin
(School of Materials and Metallurgy, Liaoning University of Science and Technology, Anshan 114051)

Abstract The computer simulation for vacuum casting and solidification process of 39 t ingot of steel 42CrMo4 (/% : 0.38 ~ 0.45C, 0.90 ~ 1.20Cr, 0.025Mo) has been carried out by using Anycasting software to get that with cast liquid temperature 1 527 °C and superheat extent 40 °C the casting time for 39 t ingot is 18.78 min including ingot body for 10 min and casting head for 8.78 min and the predicted shrinkage cavity location only occurs at center of casting head. The results of production practice in situ show that the forged die block is qualified by grade II ultrasonic detection, and the yield of products increases to 71.35% from 65% before process improvement.

Material Index Die Steel 42CrMo4, 39 t Ingot, Casting Process, Numerical Analysis, Yield of Products

在国内的各大特钢企业中, 模具钢大模块的生产普遍面临着内部质量和成材率较低的问题^[1]。解决这些问题最根本的手段就是从浇铸与凝固方面入手, 采用真空浇铸设备、合适的真空浇铸工艺以及正确的动模时间^[2]。本文对 39 t 钢锭的真空浇铸与凝固过程进行铸造仿真模拟, 从而改进真空浇铸的工艺参数, 预判凝固后内部疏松缩孔可能发生的部位, 达到优化生产工艺和提高钢锭质量的目的^[3,4]。

1 材料的热物性参数

1.1 模具钢 42CrMo4 热物性参数

模拟实验所使用的钢种为 42CrMo4, 其钢种化学成分如表 1 所示^[5]。

根据 AnyCasting 材料数据库中给出的数据, 42CrMo4 液相线温度为 1 487.76 °C, 固相线温度为 1 422.65 °C; 动态黏度 $3.0265 \times 10^{-3} \text{ kg}/(\text{m} \cdot \text{s})$;

凝固收缩体积变化为 3.16%; 临界凝固比率 0.3; 表面张力 1.696 9 N/m; 结晶潜热 $2.4169 \times 10^5 \text{ kJ}/\text{kg}$ 。

1.2 钢锭模铸铁的热物性参数

本次试验的钢锭模材质为灰口铸铁, 其化学成分如表 2^[6]。

铸铁的密度、热膨胀系数、热导率和比热容同样可以用 AnyCasting 软件材料数据库提供的数据确定。

1.3 初始和边界条件

所谓初始条件是指计算过程中零时刻时系统内部各部分的温度分布, 初始条件的确定即是计算零时刻铸件内部温度、铸型内部温度的确定^[7]。

本模拟实验所选用的浇铸温度为 1 527 °C, 过热度为 40 °C。锭模初始温度为 80 °C。

边界是指凝固数值解析模型的外边界, 一般将它取在铸型与环境的交界面上, 有时也将它取在铸型/铸件界面上, 视具体情况而定。本文假设在边界处的换热系数的选取情况如表 3 所示^[8]。

表 1 42CrMo4 钢化学成分 /%

Table 1 Chemical composition of steel 42CrMo4 /%

C	Si	Mn	P	S	Mo	Cr
0.38 ~ 0.45	≤ 0.40	0.60 ~ 0.90	≤ 0.003 5	≤ 0.035	0.025	0.90 ~ 1.20

表 2 钢锭模铸铁成分 /%

Table 2 Analysis of cast iron of ingot /%

C	Si	Mn	P	S	Fe
3.77	1.81	0.40	0.037	0.096	93.887

表 3 界面换热系数/($W \cdot m^{-2} \cdot K^{-1}$)Table 3 Coefficient of interface heat transfer / ($W \cdot m^{-2} \cdot K^{-1}$)

锭模/ 钢锭	钢锭/ 绝热板	锭模/ 绝热板	钢锭/ 耐火砖	锭模/ 耐火砖	冒口顶部/ 环境
2 000	50	100	100	200	10

表 4 39 t 钢锭相关参数

Table 4 Relevant parameters of 39 t ingot

帽容比/ %	本体高 度/mm	本体上口 对径/mm	本体下口 对径/mm	平均对 径/mm	本体锥 度/%	本体细长 比/%	尾部占 比/%
14.8	2 310	1 720	1 494	1 670	4.89	1.44	3.40



图 1 钢锭的三维几何模型(a)和网格划分(b)

Fig. 1 3-dimensional geometry model (a) and mesh division (b) of ingot

2 计算机模拟实验方案

2.1 锭型主要设计参数

本次模拟的锭型为十二边的多边形锭,可以在锻造过程中有效的减轻“折叠”现象。表 4 给出了钢锭的相关设计参数。

2.2 几何模型的建立

图 1(a)为运用三维建模软件 SolidWorks,建立的实体模型,划分后的网格模型如图 1(b)所示。文中铸件尺寸(mm)为 $1\ 750 \times 2\ 890 \times 1\ 750$,网格尺寸(mm)选为 $3 \times 3 \times 3$,网格总数为 450 万^[9]。

2.3 模拟实验设置步骤

设置目标工艺为真空铸造,分析类型为充型分析及充型前后的热/凝固分析(包括耦合传热计算充型及充型结束后的凝固传

热计算),同时将真空铸造所需的初始条件及边界条件导入,激活收缩模型,对钢锭的浇铸及凝固过程温度场进行模拟,并预测凝固后的疏松及缩孔等缺陷情况^[10]。

3 实验分析

3.1 充型过程模拟

模拟计算得到 39 t 钢锭充型过程为,充型时间 18.78 min,浇铸温度 $1\ 527\ ^\circ\text{C}$ 。由模拟结果图 2 可以看出,在钢液的充型过程中,液面十分平稳,未出现明显的钢液起伏现象,有利于改善钢锭的表面质量^[11]。

在模拟计算中,总结出最适合提高 39 t 锭型的浇铸工艺,其具体的工艺参数见表 5。

3.2 凝固过程温度场

39 t 钢锭表面温度场的模拟结果见图 3,可以看出,在凝固的全过程中,钢锭的表面温度分布均匀,锭型表面的各部分温度变化趋势平稳,使凝固收缩的钢锭不会由于热应力过大导致表面出现裂纹^[12]。39 t 钢锭的边数为十二边,采用正弦波形,以增强表面竖壳带厚度和刚性,其波高与弦长之比大于 1:5,以防止锻造时产生折叠。虽然在凝固后期边角部的温度要较表面其他部位的温度低,可是范围小,在锻造之前的加热过程中,可以迅速的得到温度补偿。

由表面温度场模拟结果得出,39 t 钢锭在自然空冷 9.34 h 的时候,钢锭凝固结束,此时可进行脱模,脱模时钢锭表面温度为 $653\ ^\circ\text{C}$ 。相比放冷之后

表 5 39 t 锭的浇铸工艺参数

Table 5 Parameters of casting process of 39 t ingot

出钢温度/ $^\circ\text{C}$	镇静时间/ min	模温/ $^\circ\text{C}$	锭身浇铸 时间/min	帽部浇铸 时间/min
1 540	10 ~ 15	60 ~ 80	9 ~ 10	8 ~ 9

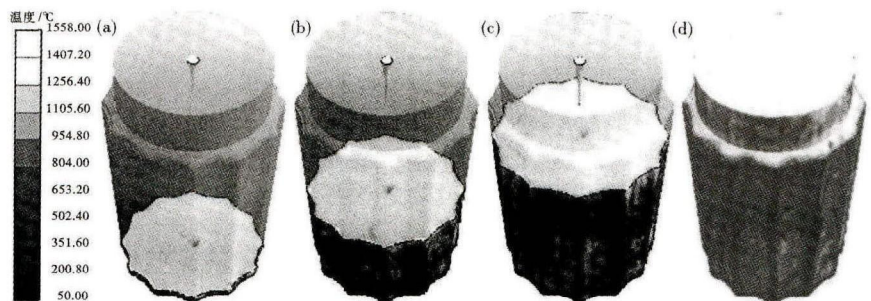


图 2 39 t 钢锭浇铸过程模拟结果,真空浇铸时间,充型百分比:(a)1.91 min,5%;(b)7.43 min,35%;(c)12.06 min,65%;(d)18.78 min,100%

Fig. 2 Simulation results of 39 t ingot casting process, vacuum casting time and filling ratio: (a) 1.91 min, 5%; (b) 7.43 min, 35%; (c) 12.06 min, 65% and (d) 18.78 min, 100%

再装炉加热,热装热送可以提高装炉温度,节约加热能耗。

39 t 钢锭温度场的中心剖面图模拟结果如图 4 所示。温度场的中心剖面图显示,在钢锭的凝固进程中,钢锭的凝固趋势是横向上由钢锭底部向钢锭的端部生长,而径向上从钢锭四周模壁处向钢锭的中心处生长,固液界面的整体推进趋势成“V”字形^[13]。这样的“V”字形凝固趋势,有利于帽部钢液对凝固过程中的钢锭本体进行充分的补缩。模拟计算结果显示,钢锭的最后凝固区域在帽口线上侧,可知凝固过程中帽部钢液补缩顺利,初步预测钢锭在整体凝固之后,本体不会出现明显的内部缺陷,帽部的帽口线以上虽然有出现缩孔的概率,可是在后续的锻压过程中,帽部是要切除的,所以不会对成材率的提高造成影响。

3.3 钢锭缺陷预测

缩孔产生的主要原因是合金的液态收缩和凝固收缩大于固态收缩而产生的^[14]。金属凝固后,由于温度下降,那么凝固的部分会因温度下降使得尺寸减小,造成体积的缩减,而未凝固区域也会由于温度的下降发生液态收缩来补充固相的体积缩减^[15]。由于相变发生凝固收缩也会造成体积收缩。当凝固收缩与液态收缩的体积大于固态收缩的体积时,就会出现一个差值,这个差值就是缩孔的体积^[16]。

由模拟结果可知在帽口中心处有出现缩孔的概率,从试验结果可以看出,钢锭整体凝固之后,本体未出现明显的内部缺陷,缺陷的预测结果和图 4 的分析结果基本吻合,可知该锭型的设计合理。

4 生产实践

4.1 试验钢种与设备

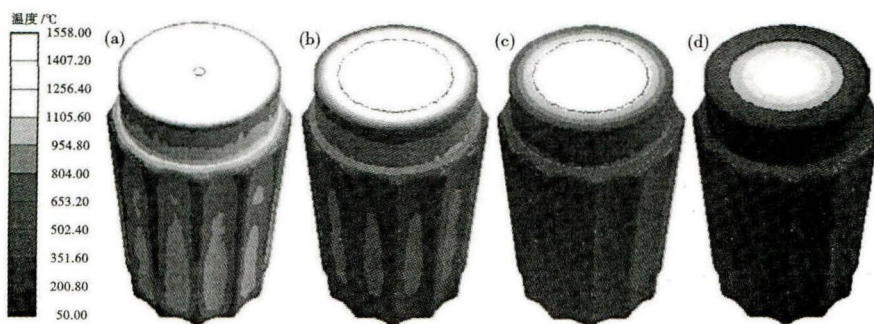


图 3 39 t 钢锭表面温度场,自然空冷时间和凝固百分比:(a)0.54 h,35%;(b)1.90 h,65%;(c)4.04 h,85%;(d)9.34 h,100%

Fig. 3 Temperature field of surface of 39 t ingot, natural air cooling time and solidification ratio: (a)0.54 h,35%;(b)1.90 h,65%;(c)4.04 h,85%;(d)9.34 h,100%

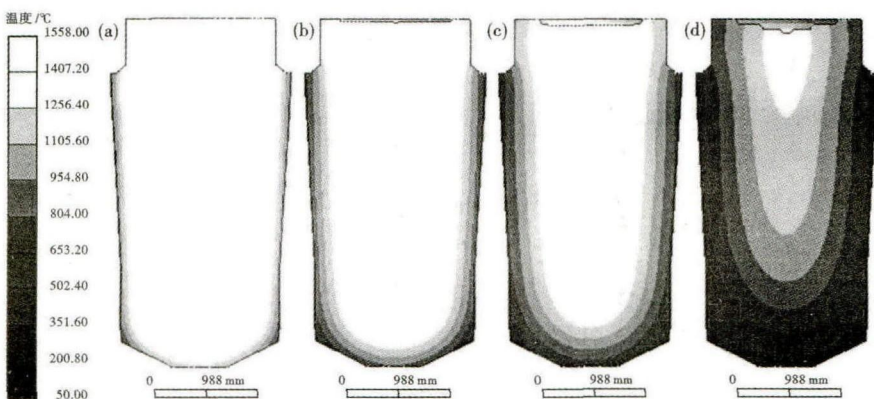


图 4 39 t 钢锭温度场的中心剖面图,自然空冷时间:(a)0.54 h;(b)1.90 h;(c)4.04 h;(d)9.34 h

Fig. 4 Temperature field at center section of 39t ingot, natural air cooling time: (a)0.54 h;(b)1.90 h;(c)4.04 h;(d)9.34 h

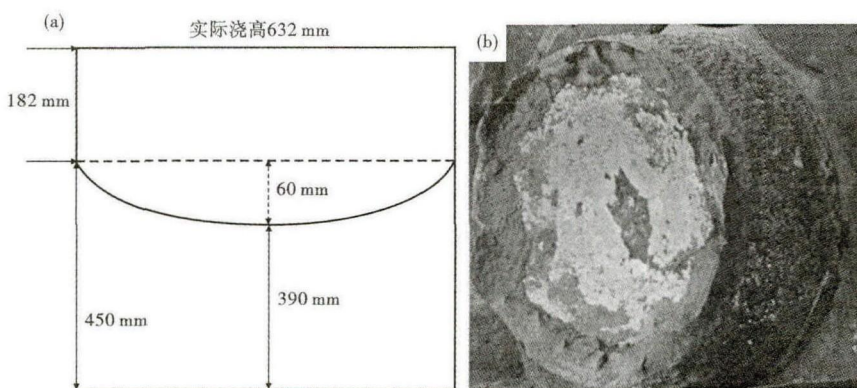


图 5 39 t 锭冒口收缩情况:(a)冒口收缩尺寸示意图;(b)冒口形貌

Fig. 5 Contraction status of 39 t ingot at hot top: (a) schematics of contraction size of hot top and (b) morphology of hot top

现场生产大模块 42CrMo4 模具钢 VD 真空脱气后的化学成分分析结果为(%) :0.41C, 0.28Si, 0.75Mn, 0.0016 P, 0.005S, 0.025Mo, 1.15Cr, 0.00011H。

本次现场实验设备所用的钢包与中间包容量一致,均为 40 t,钢液通过中间包进行浇铸,钢包注流中间包过程采用 Ar 气保护,当中间包内注入 26 t 以上时且温度为 1 527 °C 时开始浇铸,过热度 40 °C。

4.2 真空浇铸工艺

在真空浇铸过程中,开浇后,尾部慢注,钢液为散流浇铸,此时注流以中心细圆流为主,外侧球滴状下落,帽口稍慢注,熔池自下而上搅动并扑向绝热板,共计浇铸时间 18.58 min。真空下加入一半发热剂,破真空后人工加入另一半发热剂。浇铸过程内注流散射程度适中,钢液中心受真空影响为发散注流,外侧以球滴状散落为主。

4.3 冒部收缩情况

39 t 钢锭的补缩情况如图 5(a) 所示,由示意图可知,水平实线所围区域为帽口所浇入钢液的情况,凝固收缩后形成凹弧补缩形貌,实际浇铸高度为 632 mm,凝固后钢液下降 182 mm,凹弧形的补缩浅盘深 60 mm;实际帽口补缩情况参看图 5(b) 的现场照片,由收缩情况可知,钢锭凝固补缩效果良好。

4.4 成材率

凝固后的锭型被锻造成规格 830 mm × 1 200 mm 模块重 27.825 t,成材率为 71.35%,对比原有锭型 65% 的成材率,本设计在模拟软件的帮助下,可以使模具钢大模块的成材率提高 6.35 百分点。

4.5 钢坯探伤情况

按 JB/T5000.15-2007 标准进行超声波探伤,39 t 钢锭满足 II 级探伤要求,证明经优化后的锭型,不仅成材率得到有效的提高,而且还能够保证内部质量。

5 结论

(1) 模拟计算得到 39 t 钢锭的充型时间为 18.78 min,其中锭身浇铸时间 10 min,帽部浇铸时间 8.78 min,浇铸温度 1 527 °C,过热度为 40 °C。

(2) 由温度场模拟结果得出,39 t 钢锭在自然空冷 9.34 h 时,可进行脱模,脱模时钢锭表面温度为 653 °C。钢锭最后凝固区域在帽口线上侧,可知帽部钢液补缩顺利,本体不会出现明显的内部缺陷。

(3) 由模拟结果可知,在帽口中心处有出现缩孔的概率,但是在钢锭整体凝固之后,本体未出现明显的内部缺陷,可知该锭型的设计合理。

(4) 凝固后的锭型被锻造成规格为 830 mm × 1 200 mm 的模块,重 27.825 t,成材率 71.35%,对比工艺改进前 65% 的成材率,本设计在模拟软件的辅助下,可以使模具钢大模块的成材率提高 6.35 百分点,锻造后的模块按 JB/T5000.15-2007 标准进行超声波探伤,满足 II 级探伤要求。

国家自然科学基金(51374125),教育部 2011 年度高等学校博士学科点专项科研基金项目(20112120120003),辽宁省教育厅项目(L2015251)资助

参考文献

- [1] 耿鑫明. 模具业与模具钢生产现状及压铸模钢材的选用[J]. 金属加工(热加工),2009(9):78-79.
- [2] 李亚敏,刘洪军,郝远. 真空浇注对充型过程的作用及其在快速铸造中的应用[J]. 热加工工艺,2007,36(17):35-37.
- [3] William C Erickson. Computer Simulation of Solidification[J]. Advances in Metal Processing,1981,25:345-376.
- [4] 王翠华. 计算机模拟在铸钢件铸造工艺设计中的应用[J]. 中国铸造装备与技术,2001(5):26-27.
- [5] Spittle J A, Brown S G R. Computer Simulation of the Effects of Alloy Variables on the Grain Structures of Casting[J]. Acta Metallurgica,1989,37(7):1803-1810.
- [6] Kim S G. A Phase-Field Model with Antitrapping Current for Multi-component Alloys with Arbitrary Thermodynamic Properties[J]. Acta Materialia,2007,55(13):4391-4399.
- [7] Karma A. Phase-Field Formulation for Quantitative Modeling of Alloy Solidification[J]. Physical Review Letters,2001,87(11):1-5.
- [8] Ohno M, Matsuura K. Quantitative Phase-Field Modeling for Dilute Alloy Solidification Involving Diffusion in the Solid[J]. Physical Review E,2009,79(3):461-475.
- [9] Chen Songdong. Influence of Meshing on the Numerical Simulation of Liquid Composite Molding Processes[J]. International Journal of Mechanics and Materials in Design,2011,7(2):141-148.
- [10] 王晓芸,厉英. 钢锭凝固过程温度场数值模拟[J]. 铸造,2013,62(5):410-419.
- [11] Kumar, Zaloznik M, Combeau H. Prediction of Equiaxed Grain Structure and with Experiment[J]. International Journal of Advances in Engineering Sciences and Applied Mathematics,2010,2(4):140-148.
- [12] 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.
- [13] 董洁. 锻造用钢锭凝固过程温度场、应力场的数值模拟及其应用[D]. 西安:西安建筑科技大学,2005:54-62.
- [14] Rosch R, Kluge S, Becher H H. Simulation Aided Designing and Process Development for Die Casting[J]. Die Casting Engineer,2003,5:56-59.
- [15] 柳百成. 铸造工程的模拟仿真与质量控制[M]. 北京:机械工业出版社,2001:56-67.
- [16] 程军,柳百成. 铸钢件缩孔缩松形成过程的数值模拟[J]. 清华大学学报(自然科学版),1991,31(2):24-32.

李胜利(1967-),男,博士(2006年东北大学),教授,1988年鞍山钢铁学院(本科)毕业,钢铁材料和冶金工艺研究。E-mail:lishengli66@suhu.com

收稿日期:2015-08-16