DOI:10.16410/j.issn1000-8365.2020.10.019

钢锭冒口高度优化模拟研究

朱作鑫[1],徐亚东[2]
(1.日照市科学技术情报研究所,山东 日照 276800;2. 日照市产品质量监督检验所,山东 日照 276800)

摘　要:采用 Anycasting 软件模拟分析了不同冒口高度 P91 钢锭凝固过程,预测分析了钢锭内部缺陷分布情况。为验证模拟准确性,采用原工艺和优化冒口高度后的工艺进行模铸试验,对比研究了模拟结果与试验结果缩孔缺陷位置。结果表明,原工艺冒口高度设计会导致钢锭凝固时产生缩孔缺陷,优化冒口高度后能够增强冒口的补缩作用,防止在钢锭心部因凝固收缩导致缩孔产生,显著改善钢锭的性能。

关键词:P91 耐热钢;钢锭;凝固模拟;冒口高度

中图分类号: TF777　　**文献标识码**:A　　**文章编号**:1000-8365(2020)10-0978-04

Study on Riser Height Simulation and Optimization of Steel Ingot

ZHU Zuoxin[1], XU Yadong[2]
(1. Institute of Scientific and Technical Information of Rizhao, Rizhao 276800, China; 2. Rizhao Institute of Supervision & Inspection on Product Quality, Rizhao 276800, China)

Abstract: The solidification process of P91 steel ingot with different riser heights was simulated. The distribution of shrinkage cavity was predicted by Anycasting software. For the accuracy of simulation, using the original process and optimize riser height after mould casting experiment, contrast examined the results of simulation and test results of shrinkage cavity defects. The results show that the riser height original mould casting process design could lead to ingot solidification shrinkage cavity defects are produced, after optimization of riser height can enhance the feeding effect of risers, prevent the shrinkage caused by solidification shrinkage of steel ingot the core production, significantly improve the performance of the steel ingot.

Key words: P91 steel; steel ingot; simulation of solidification; riser height

近年来随着连铸、近终形铸轧、薄板坯连铸连轧技术快速发展,传统模铸工艺的应用越来越少。但部分高附加值、高性能的核电、航空航天、国防军工等特种钢铁材料对钢材纯净度、成分和组织均匀性要求更加严格,采用连铸工艺难以保证特殊钢的性能,因此这些高端特殊钢材料目前仍然采用模铸工艺生产。影响模铸钢锭性能的主要因素有浇铸方法、浇铸速度和温度、发热剂及保温剂的使用及用量等。同时,钢锭模锥度、高径比 H/D、冒口高度及比例等因素也决定了钢锭内部缺陷分布情况。在实际模铸过程中,缩孔缺陷是影响钢锭质量的重要因素之一,为减少或消除缩孔缺陷,对深入研究冒口形状、高度等工艺参数对缩孔缺陷影响规律提出了更高的要求,需要进行科学的优化设计。随着计算机模拟仿真技术应用越来越广泛,为钢锭模结构工艺参数进一步优化设计提供了新的思路[1-3]。钢锭在凝固时由于自身液态收缩和凝固收缩容易产生缩孔缺陷,严重影响了钢锭质量,降低了材料利用率[5]。为此,模铸时通常采取持续保温和加热冒口部位等方式,使冒口处能有充分的时间处于液体状态,在钢锭心部凝固时进行持续补缩。同时,冒口位置的钢液凝固过程中还能够聚集钢锭中部分含碳、磷等夹杂物,在下步深加工前切除,减少对钢锭质量影响。而在实际模铸时因冒口高度或比例、尺寸不合理使钢锭内部产生缩孔缺陷,是导致钢锭质量变差甚至报废的主要原因[4]。为防止钢锭内部产生缩孔,企业生产时通常是按照积累的经验增加冒口高度和尺寸,冒口比例通常偏大,降低了材料利用率[6]。本文通过 Anycasting 软件开展了 13.5 t 高合金耐热钢 P91 钢锭凝固过程的模拟仿真技术研究,深入探讨了钢锭冒口高度对缩孔缺陷位置和尺寸影响规律,进行浇铸试验并对冒口部位取样分析,观察冒口部位的钢液凝固收缩情况,对比了冒口取样宏观照片与数值模拟结果,对数值模拟准确性进行了分析研究,为优化冒口工艺参数和深入研究不同材料钢锭凝固规律提供科学依据和重要手段。

收稿日期:2020-06-12

作者简介:朱作鑫(1985-),山东烟台人,博士,副研究员.主要从事冶金工艺技术及模拟仿真方面的工作.
电话:15315932598,E-mail: zhuzuoxin2004@163.com

1 钢锭浇铸模拟

1.1 模型建立

利用 Pro/E 软件对浇铸系统保温剂、绝热板、钢锭模、底板等零件完成实体建模及装配，浇铸系统装配示意图如图 1 所示，将装配体各组件生成的 STL 文件导入 Anycasting 软件进行网格划分、充型、温度分布等运算和模拟分析。

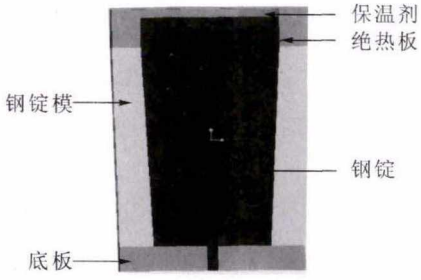


图 1 浇铸系统装配示意图

Fig.1 The schematic diagram of casting system assembly

1.2 初始条件与边界条件

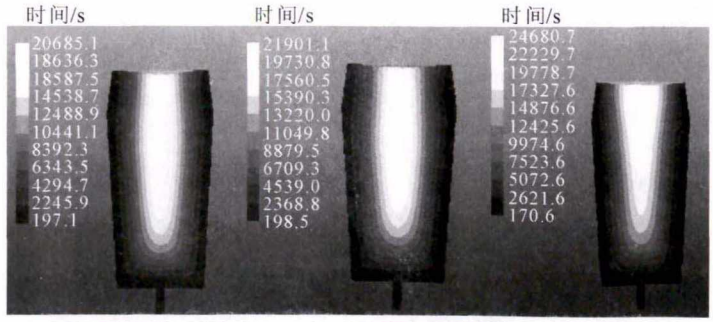
浇铸钢种为液固两相温度区间较大的高合金耐热钢钢 P91，浇铸吨位 13.5 t。利用 AnyCasting 软件材料数据库可知该材料液相温度和固相温度分别为 1 509 ℃和 1 326 ℃。钢锭模材料选用 HT200，起始温度为 70 ℃，初始浇铸温度为 1 535 ℃。浇铸时钢液充满型腔的时间忽略不计，冒口保温工艺配合使用加发热剂、挂绝热板、加覆盖保温剂“三位一体”的保温方式，其中绝热板材料为石棉板，其热导率为 0.15 $W \cdot m^{-1} \cdot K^{-1}$，与钢锭的导热系数为 20 $W \cdot m^{-2} \cdot K^{-1}$。钢锭与钢锭模的导热系数与温度变化趋势一致，平均值设为 1 250 $W \cdot m^{-2} \cdot K^{-1}$，钢锭模外表面散热方式主要为对流换热，换热系数为 10 $W \cdot m^{-2} \cdot K^{-1}$。共划分 200 万个网格单元。发热剂添加量为 18 kg，发热效率为 8 000 kJ/kg，有效发热时间为 40 min，从加热开始 9 min 后达到 1 350 ℃的最高温度[7-9]。

2 模拟结果

对冒口高度为 320 mm 原工艺（方案 1）和冒口高度为 360 mm（方案 2）、430 mm（方案 3）分别进行模拟分析，图 2 为凝固结束时的温度场分布云图。可以看出，钢锭凝固时间随着冒口高度的增加而延长，冒口高度为 320 mm 时完全凝固时间仅有 20 685.1 s，当冒口高度设计为 320 mm 时，凝固时间延长至 21 901.1 s，冒口高度优化至 430 mm 时凝固时间最长，达到 24 680.7 s。随着凝固结束时间的增加，冒口部位处于液体状态的时间得到有效的延长，对钢锭心部起到了较好的补缩作用，可以避免产生缩孔缺陷。

从图 2 还可以看出 3 种冒口高度工艺下钢锭凝固时趋势大致相同，纵向均是从钢锭下部向钢锭上部逐步凝固，横向则是从钢锭模内壁开始向钢锭心部凝固。对比分析纵向和横向散热情况发现，从凝固开始后温度场云图中等温线均分布为“U”形，表明钢锭凝固时主要通过钢锭外表面散热，而钢锭下方散热效果相对较差。从凝固过程温度场云图能够发现，冒口高度为 430 mm 的方案 3 温度分布较为合理，“U”形开口较大，符合顺序凝固原则，在冒口附近的钢液最后凝固。而冒口高度为 320 mm 的方案 1（原方案）和冒口高度为 360 mm 的方案 2 不符合顺序凝固原则，二者“U”形开口较窄，高温区域分布贯穿钢锭高度 3/4，在凝固过程中冒口处钢液不能充分起到补缩作用，导致钢锭内部钢液最后凝固，从而在钢锭中心产生了缩孔缺陷。3 种不同冒口高度钢锭凝固时缩孔缺陷预测结果如图 3 所示。

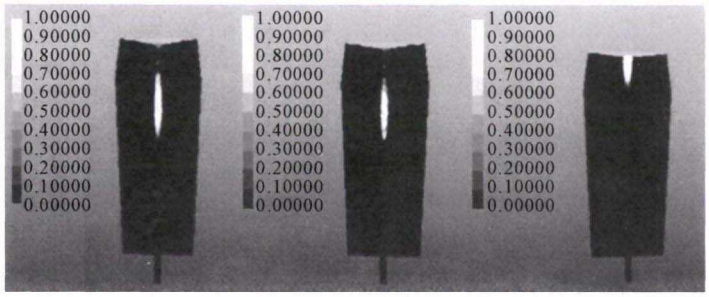
对比分析图 3 不同冒口高度钢锭温度场及缺陷模拟预测结果，方案 1 和方案 2 中钢锭凝固时在锭身内部形成了狭长的高温孤立液相区，无法进行有效补缩，导致缩孔缺陷产生。而方案 3 中高温区域集中在冒口部位，完全凝固时间最长，能够有效避免钢



(a)方案1　　(b)方案2　　(c)方案3

图 2 三种方案凝固结束时温度场分布云图

Fig.2 Temperature distribution of the three schemes at the end of solidification



(a)方案1　(b)方案2　(c)方案3

图 3 不同冒口高度缺陷预测结果

Fig.3 Results of the defect prediction with different riser heights

锭心部产生缩孔。

利用 AnyCasting 软件进行缩孔缺陷位置分析，预测方案 1 中缩孔缺陷位于冒口线下方180~850 mm 的中心区域，缩孔缺陷尺寸大致在 180~220 mm，而利用方案 3 模拟的钢锭心部在凝固过程中未产生缩孔。

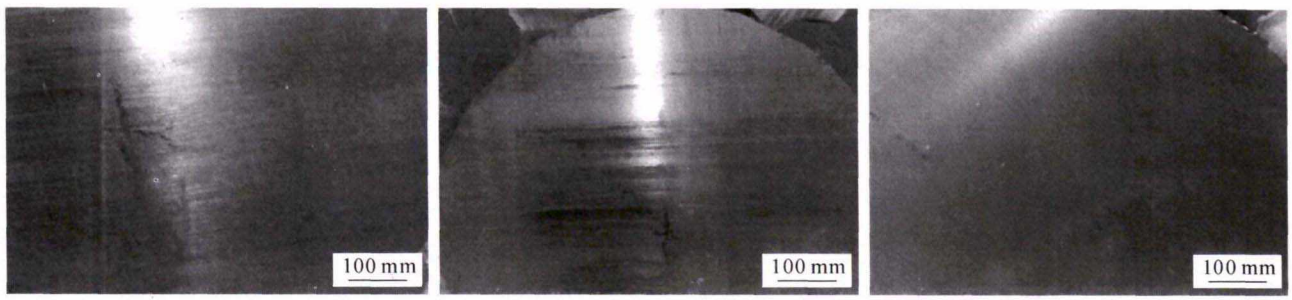
3 试验验证

为验证钢锭缩孔缺陷模拟结果与实际浇铸试验一致性，分别采用方案 1 和方案 3 进行浇铸试验，并对按照方案 1 浇铸的钢锭在距离冒口线 300 mm 和 600 mm 两个位置横切取样，对按照方案 3 浇铸的钢锭沿冒口线位置横切取样，对比观察是否产生缩孔及分布情况，3 个位置横切面宏观照片如图 4 所示。取样位置和方法见图 5。

从图 4(a)、(b)可以看出，按照方案 1 浇铸的钢锭心部由于无法得到有效补缩，产生了缩孔缺陷，而图 4(c)按照方案 3 浇铸的钢锭横切面则未产生缩孔缺陷。通过对比模拟结果与截面横切结果，可以发现两者吻合良好。

为进一步验证不同冒口高度钢锭凝固过程模拟结果与浇铸试验吻合情况，对按照方案 1 和方案 3 制备的钢锭沿冒口线横剖切下冒口，并制备宽为 20 mm 的试样进行对比分析，取样顺序和位置如图 5 所示，取样宏观照片如图 6 所示。

从图 6(a)采用方案 1 浇铸的钢锭冒口解剖照片可以发现，由于方案 1 中冒口高度设计偏小，导致冒口处钢液未能充分发挥保温和补缩作用，冒口形状呈“V”形分布，缩孔凹陷部位较深。对比分析图 6(a)冒口解剖宏观照片和图 3(a)缺陷分布预测结果可以发现，冒口收缩实际形状与模拟结果一致性较好。同时，按照方案 1 模拟时预测钢锭内部缩孔深度为冒口线下方 132 mm，实际浇铸试验测得缩孔深度为 136 mm，说明缺陷预测模拟与实际浇铸试验基本吻



(a)方案1距离冒口线300 mm横切　(b)方案1距离冒口线600 mm横切　(c)方案3沿冒口线横切

图 4 方案 1 和方案 3 钢锭横切宏观照片

Fig.4 Macro-morphology of ingot crosscutting in scheme 1 and scheme 3

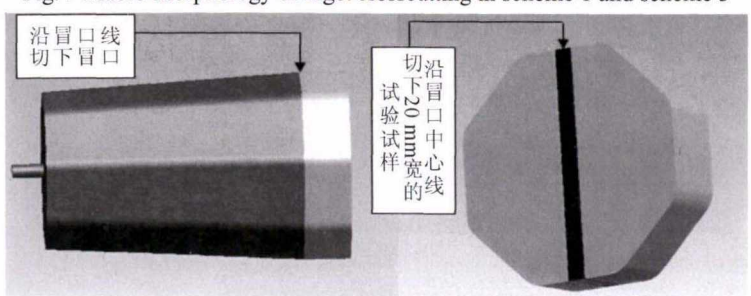
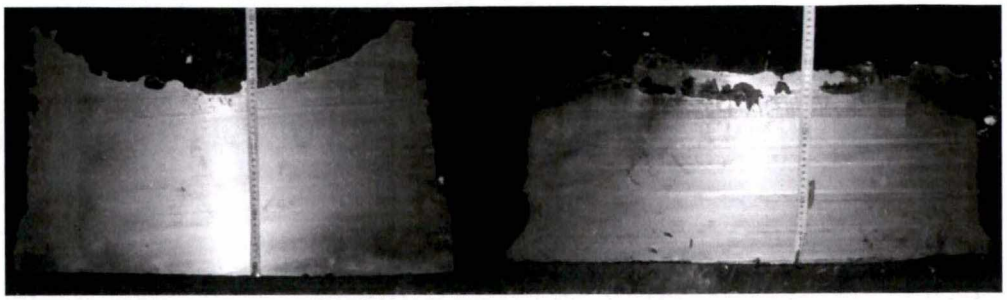


图 5 冒口处取样位置示意图

Fig.5 The schematic diagram for sampling position at riser



(a)方案1冒口取样照片　　(b)方案3冒口取样照片

图 6 方案 1 和方案 3 冒口取样宏观照片

Fig.6 Macro photographs of riser sampling in scheme 1 and scheme 3

合，表明模拟仿真时采用了准确的材料热物性参数和界面换热等边界条件，可以用于不同材料钢锭凝固规律的研究和工艺参数优化设计。

按照冒口高度为 430 mm 浇铸的钢锭冒口横切宏观照片如 6(b)所示，冒口高度优化后延长了保温时间，起到充分保温作用，同时也提高了冒口补缩效率，其形状为“碟”形分布。从图 3(c)不同冒口高度缺陷预测模拟分析也表明模拟冒口收缩形状与实际浇铸钢锭一致性较好。同时，模拟计算得到缩孔预测深度为 126 mm，浇铸试验测得缩孔实际深度为 122 mm，证明了模拟结果的准确性。

采用软件模拟预测了不同冒口高度钢锭内部缺陷分布情况，通过浇铸试验验证表明冒口高度优化后能够有效避免钢锭心部产生缩孔缺陷，显著提高钢锭质量。其主要原因是优化冒口高度后钢锭冒口部位钢液有足够的时间处于液体状态，在钢锭心部凝固时起到较强的补缩作用。模拟分析的冒口形状及缩孔缺陷位置与实际浇铸试验一致性较好，对深入研究不同材料凝固过程规律有着重要的指导作用。

4 结论

(1)通过对 13.5t 耐热钢 P91 模铸钢锭凝固过程模拟分析发现，采用原冒口高度的模铸工艺冒口补缩效果较差，钢锭内部出现缩孔缺陷，导致钢锭质量变差。

(2)按照原冒口工艺和数值模拟优化后冒口工艺进行浇铸试验，不同冒口高度模拟预测的冒口形状和缩孔位置尺寸与试验结果较为一致，可以应用于不同材料钢锭凝固规律研究和工艺参数优化设计。

(3)采用优化后冒口工艺可以明显改善冒口补缩和保温效果，避免钢锭内部产生缩孔缺陷，显著提高材料利用率。

参考文献：

[1] 许翔，惠国栋，马斌悍，等. 铸造用高效发热保温冒口的研究[J]. 铸造技术，2017，38(3): 726-728.

[2] 刘斌，张建新. 基于 AnyCasting 的长细钢锭铸造成型数值仿真[J]. 热加工工艺，2018，47(15): 98-100.

[3] Yang H, Li LX, Wang QD. Research on the development of advanced forming for lightweight alloy materials area [J]. Journal of Mechanical Engineering, 2010, 46(12): 31-42.

[4] 段建平，张永亮，傅排先. 8.4 t 钢锭冒口保温效果优化与改进[J]. 炼钢，2016(5): 67-71.

[5] 宋福康. 大型钢锭模铸造工艺的改进[J]. 铸造技术，2009，20(3): 323-324.

[6] 崔振山，陈文. 大锻件控性锻造过程的计算机模拟技术[J]. 机械工程学报，2010，46(11): 1-8.

[7] 徐亚东，沈厚发，雷丙旺，等. 冒口高度对钢锭内部品质影响的模拟分析[J]. 特种铸造及有色合金，2014(5): 483-485.

[8] 王晓花，厉英. 钢锭凝固过程温度场数值模拟[J]. 铸造，2013(5): 410-414.

[9] 董洁，袁守谦，邓林涛，等. 锻造用钢锭凝固过程温度场数值模拟[J]. 铸造技术，2007，28(2): 268-268.

《铸件均衡凝固技术及应用实例》

《铸件均衡凝固技术及应用实例》由西安理工大学魏兵教授编著。共 8 章：1、铸铁件均衡凝固与有限补缩；2、铸铁件冒口补缩设计及应用；3、压边浇冒口系统；4、浇注系统大孔出流理论与设计；5、铸件均衡凝固工艺；6、铸钢、白口铸铁、铝、铜合金铸件的均衡凝固工艺；7、浇注系统当冒口补缩设计方法；8、铸件填充与补缩工艺定量设计实例。全书 320 页，特快专递邮购价 280 元。

邮购咨询：李巧凤 029-83222071，技术咨询：13609155628