

模铸法制备 P20 钢锭模拟与微观组织研究

董晓传^{1, 2}, 吴润谋³, 彭宇珑¹

(1. 天津职业技术师范大学 汽车模具智能制造技术国家地方联合工程实验室, 天津 300222; 2. 天津市高性能精准成形制造技术与装备重点实验室, 天津 300222; 3. 南京长江工业技术研究院, 江苏 南京 211500)

*通讯作者: 董晓传, 男, 副教授, 博士学位。E-mail: ohh2161004@163.com

摘要: 利用 Pro/E 建立 50kg 的 P20 钢锭三维模型, 通过 ProCAST 软件, 模拟了钢锭凝固过程的温度场和微观组织。基于温度场中的 Niyama 判据模拟结果, 预测了缩松、缩松缺陷的分布; 基于微观组织模拟结果, 预测了钢锭组织中等轴晶层的占比。通过低倍、金相、能谱等物理实验对模拟结果进行了验证以及进一步研究。实验结果表明: 钢锭的缩孔集中在帽头部位, 钢锭中心易产生缩松; 钢锭组织中等轴晶层的占比为 1/6; 钢锭中缩孔缩松处疑似产生了 MnS, 而夹杂物主要是以 Si、Al、Ca、O 等元素成分含量较高。
关键词: 模铸法; 数值模拟; 夹杂物; ProCAST; 缩孔缩松

Simulation and Microstructure Study of P20 Steel Ingot Prepared by Die Casting Method

Dong Xiaochuan^{1,2}, Wu Runmou³, Peng Yulong¹

(1. National-Local Joint Engineering Laboratory of Intelligent Manufacturing Oriented Automobile Die & Mould, Tianjin University of Technology & Education, Tianjin 300222, China; 2. Tianjin Key Laboratory of High Performance Precision Forming Manufacturing Technology and Equipment, Tianjin 300222, China; 3. Nanjing Yangtze River Industrial Technology Research Institute Co., Ltd, Nanjing 211500, China)

Abstract: A three-dimensional model of a 50kg P20 steel ingot was established using Pro/E. The temperature field and microstructure of the ingot during solidification were simulated using ProCAST software. Based on the simulation results of Niyama criterion in the temperature field, the distribution of shrinkage porosity and shrinkage porosity defects is predicted; Based on the microstructure simulation results, the proportion of axial crystal layer in ingot microstructure was predicted. The simulation results were verified and further studied through physical experiments such as low magnification, metallography, and energy spectrum. The experimental results show that the shrinkage cavities of steel ingots are concentrated at the cap, and the center of the ingot is prone to shrinkage porosity; The proportion of axial crystal layer in ingot structure is 1/6; It is suspected that MnS is produced at the shrinkage cavity and porosity in the ingot, and the inclusions are mainly composed of high content of elements such as Si, Al, Ca, and O.

Keywords: Mold casting method; Numerical simulation; Inclusions; ProCAST; Shrinkage porosity

1 前言

近年来, 塑料模具钢的市场需求正在快速的增長, 其中最具代表性的就是 P20 钢材。而想要获取高品质的模具钢, 就得先制备品质优良的模具钢钢锭。在实际生产当中, 钢锭铸造过程往往会产生缩

孔缩松、夹杂、偏析等缺陷, 严重影响钢锭的品质, 也给后续的加工增加难度^[1-5]。为了改善铸造工艺, 提高铸锭的质量, 就需要对钢锭凝固过程进行研究。

当前, 基于计算机科学的发展, 有很多研究者应用有限元模拟技术对钢锭浇铸过程进行了模拟研究, 并与生产实践进行了对比, 证实了有限元模拟

技术的可行性。马占彪^[6]利用 ProCAST 模拟软件对钢锭的充型过程和凝固过程进行了数值模拟,并通过红外测温技术对模拟参数和假设进行了验证。朱花^[7]对常规底注式浇注 4.2t Mn18Cr18N 空心钢锭的凝固过程进行了模拟研究,分析了浇注和冷却参数对凝固缺陷和组织的影响。关锐^[8]利用 ProCAST 软件模拟了小型模具钢钢锭的凝固、冷却过程,并依据模拟结果对此锭型以及浇注工艺进行了优化设计。陈昌华^[9]等利用 ProCAST 软件,模拟了 24 寸的 42CrMo 钢锭凝固过程中温度场、凝固分数、收缩率及 Niyama 的分布。

基于此, 本文利用 Procast 软件, 模拟了 50kg P20 钢锭采用模铸法的制备过程, 研究了温度场和微观组织, 进而预测了该钢锭缩孔缩松、夹杂以及微观组织等的分布规律。然后, 完成 1:1 浇铸试验, 并通过低倍、金相、能谱等物理实验予以验证。研究结果对于钢锭的实际生产过程具有一定的参考意义。

2 模型建立

本研究中,选用的 P20 钢的具体化学成份组成如表 1 所示。基于 P20 钢的化学成分已知,所以能够利用 ProCAST 软件当中包含的材料数据库建立 P20 材料,计算出其液相线温度为 1496℃,固相线温度为 1450℃。另外,也可以计算其热物性参数随温度的变动关系,包括导热系数、密度、热焐以及固相率随温度的变化情况。

表 1 P20 钢化学成分组成表

元素	C	Si	Mn	S	P	Cr	Ni	Mo
标准值 (%)	0.32	0.3	0.9	/	/	1.9	0.2	0.5

为了验证模拟的可靠性,利用 Pro.E 软件 1:1 建立钢锭的三维模型,具体尺寸图以及钢锭模型结构示意图分别如图 1、图 2 所示。然后通过 ProCAST 软件,将导入的三维模型划分网格。其中,选用四面体网格类型,网格尺寸设定为 8mm,总的 3D 网格数为 24.6 万。

基于 P20 钢材液相线温度为 1496°C ，钢锭的初始温度应高于钢水温度 $65\text{--}80^{\circ}\text{C}$ ，所以浇注温度选定为 $1560\text{--}1570^{\circ}\text{C}$ ，而模拟过程设定钢锭的初始浇注温度为 1570°C ，同时环境温度为 25°C ，浇注速度为 6.57kg/sec 。基于实际生产条件并参阅前人研究^[10-12]，将各结构之间的传热条件设置，如表 2 所示。

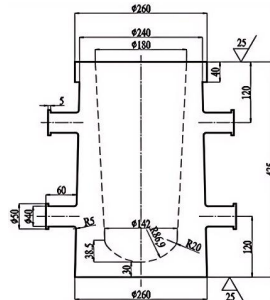


图 1 50kg 试验钢锭尺寸图

Fig.1 50kg test ingot size diagram

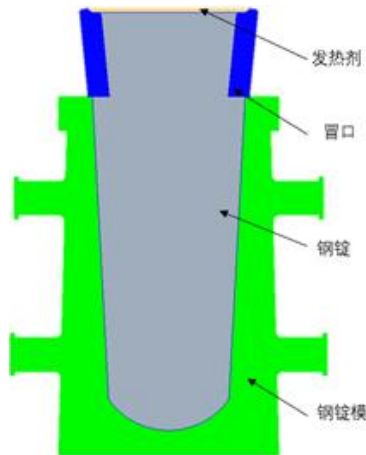


图 2 50kg 试验钢锭结构示意图

Fig.2 Schematic diagram of 50kg test ingot structure

表 2 50kg 试验钢锭各结构之间传热条件参数

**Tab.2 Heat transfer condition parameters between structures of
50kg test ingots**

序号	传热位置	传热类型	换热系数 W/(m ² *k)
1	钢锭与发热剂	COINC	h=300
2	钢锭与钢锭模	COINC	h=1000
3	钢锭模与冒口	COINC	h=200
4	钢锭与冒口	COINC	h=200
5	冒口与发热剂	COINC	h=100

3 结果与分析

3.1 缺陷预测与验证

为了研究钢锭的缩孔疏松等缺陷情况, 利用 ProCAST 当中的 Cut Off 功能, 提取了孔隙率大于 10% 的缩孔率模拟结果, 如图 3 所示。同时, 提取了钢锭 Niyama 判据模拟结果, 考虑到钢锭表层对于结果的干扰性, 仅展示钢锭中心区域的厚度为 20mm 的区域, 并选定 Niyama 判据^[13-15]标准, 模拟结果如图 4 所示。

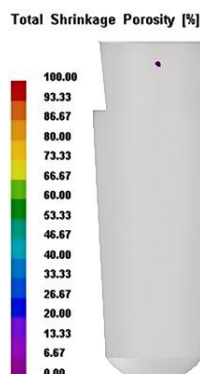


图 3 钢锭缩孔疏松结果
Fig.3 Results of shrinkage porosity of steel ingot

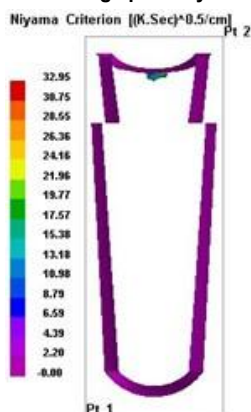


图 4 钢锭 Niyama 判据模拟结果
Fig.4 Simulation results of Niyama Criterion for Ingot

由图 3 可得，钢锭的锭身组织致密，没有出现明显的疏松现象，仅有小部分疏松集中在冒口端的一次缩孔的正下方。这是由于在钢锭的生产过程中，当钢液充满钢锭模型腔后，在钢锭模的激冷作用下，钢液温度不断降低并在与钢锭模内壁接触的表面形成一层凝固壳。随后，钢液温度进一步降低并不断发生钢液的液态收缩和凝固层的固态收缩，钢锭头部的钢液面在重力作用下不断下降，最终在钢锭头部形成浅盘或管状的缩孔。如果此时缩孔下方还有未凝固的液相，那么该液相区域会由于进一步的收缩并在重力作用下与上方凝固壳脱离，最终形成二次缩孔。在钢锭凝固后期，最后凝固的区域呈现许多被晶粒孤立或者不完全孤立的钢液，凝固时得不到补缩并形成分散而微小的疏松。而由图 4 分析可得，钢锭的缩孔缺陷主要是集中于钢锭冒口处一次缩孔的下方。可以看到，Niyama 判据得到的结果同缩孔率模拟结果是一致的。

3.2 微观组织模拟结果

为研究钢锭的微观组织，在钢锭 1/2 锭身高度处，沿径向模拟并提取了微观组织和晶粒取向偏差结果分别如图 5、图 6 所示。

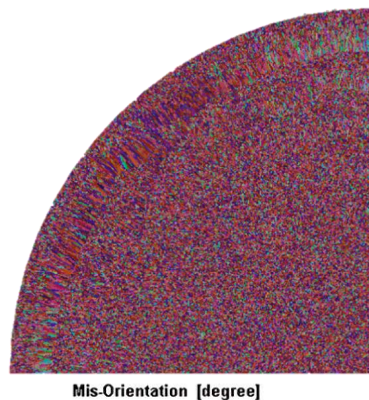


图 5 钢锭微观组织模拟结果
Fig.5 Simulation results of microstructure of ingot

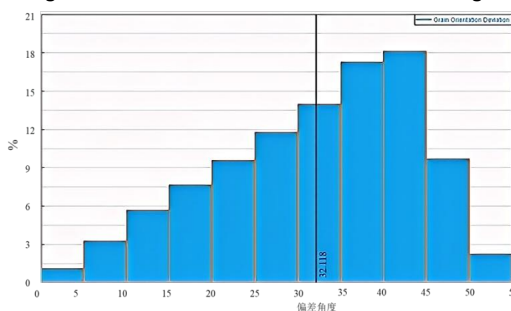


图 6 钢锭晶粒取向偏差
Fig.6 Ingot grain orientation deviation

由上图可得，钢锭的外缘部分有一层很薄的急冷层，紧接着出现的是柱状晶，中心部分是等轴晶，其中柱状晶约占 1/6 半径长度，这说明在凝固的过程中，已经出现了柱状晶向等轴晶的转变过程，即发生了 CET 转变，继而有效的抑制了柱状晶的生长。同时经过模拟，还得到晶粒取向偏差的平均值为 32.1176° ，晶粒尺寸的平均值为 0.004cm ，形状因子的平均值为 1.9425。

3.3 物理试验结果

图 7 所示为钢锭中间纵剖面的低倍结果，可以观察到样板的宏观组织结构。在靠近模壁处能够观察到柱状晶区，这是由于钢液充型、凝固时大量传热，使得钢锭模模壁受热升温，同时加上结晶释放

潜热,使得凝固前沿钢液的过冷度减小,增大形核难度。再加上钢锭模壁传热具有方向性,继而引导晶体沿着与散热相反的方向生长,从而形成柱状晶区;当凝固进行一段时间后,散热速度有所减小,影响到柱状晶的生长,当钢锭中心部分的未凝固钢液全部降温到低于实际结晶温度时,在钢锭内杂质的影响下,以非均匀形核方式形成许多尺寸较大的等轴晶粒,即为等轴晶区;由于钢液在凝固时发生体积收缩,在最后凝固的钢锭冒口上部区域会出现一次缩孔,而在一次缩孔下方的区域会有少量未凝固的钢液在凝固收缩时得不到新的钢液的补充,也就形成了疏松区,可以看到实验钢锭的疏松区沿着钢锭中心一直延伸到了钢锭的中下部,疏松面积约占锭身面积的20%;而在最后钢锭的下部,由于“结晶雨”的作用,形成了底部细晶沉积锥。同模拟结果对比,试验钢锭的柱状晶区所占的比例约为18%,与模拟得到的占比1/6基本保持一致。

分别选取锭身和冒口处的两个试样块,如图8所示。经过打磨抛光等处理后,利用扫描电镜,进行能谱试验。

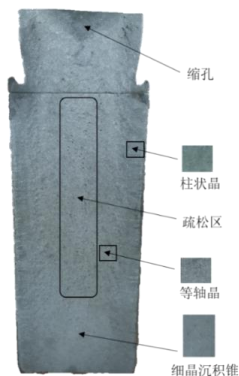


图7 低倍试验结果

Fig.7 Low magnification test results

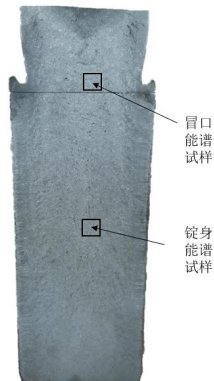


图8 能谱试样位置示意图

Fig.8 Schematic diagram of the position of the energy spectrum sample

其中,冒口处在进行能谱试验时,观测到存在

夹杂物聚集,而锭身处,却主要是存在较明显的疏松。所以在进行能谱试验时,冒口处试样选取的是夹杂物严重的视场,而锭身处则是选取疏松较为明显的视场。希望通过能谱试验能够分析夹杂物和疏松处的主要成分。试验结果如图9、图10所示。

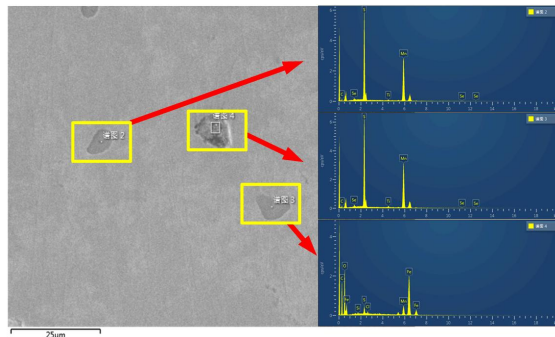


图9 锭身处能谱试验结果

Fig.9 Energy spectrum test results of ingot body

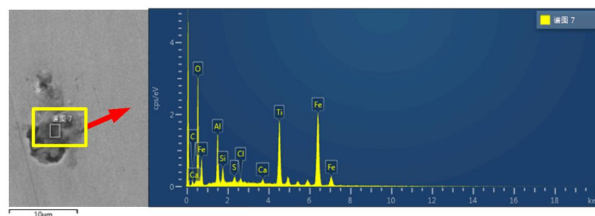


图10 冒口处能谱试验结果

Fig.10 Experimental results of energy spectrum at riser

由能谱试验的结果分析可得:钢锭冒口处以及钢锭中心处都存在较严重的疏松,在扫描电镜观察下主要呈现为灰白色;同时还聚集了大量的夹杂物,在扫描电镜观察下主要呈现为灰黑色。疏松处的主要成分为S、Mn、C,疑似产生了MnS,并形成了碳元素聚集。这是因为钢锭中心和冒口处冷却速度相对较慢,容易产生碳、硫等元素的偏析^[16]。夹杂物主要是以Si、Al、Ca、O、Ti等元素成分含量较高,夹杂物的来源主要是除氧的氧化物及残渣等。

4 结论

(1) 钢锭的数值模拟结果显示:钢锭的锭身组织致密,没有出现明显的疏松现象,仅有的小部分疏松集中在冒口端的一次缩孔的正下方。同时,Niyama判据得到的结果同缩孔率模拟结果是一致的。

(2) 通过对微观组织的模拟可得:钢锭的外缘部分有一层很薄的急冷层,紧接着出现的是柱状晶,中心部分是等轴晶,其中柱状晶约占1/6半径长度。同时经过模拟,得到晶粒取向偏差的平均值为 32.1176° ,晶粒尺寸的平均值为0.004cm,形状因子的平均值为1.9425。说明钢锭的微观组织相对比

较优良。实际浇铸试验结果同模拟结果基本保持一致。

(3) 钢锭疏松处的主要成分为 S、Mn、C, 疑似产生了 MnS, 并形成了碳元素聚集。而冒口处出现的夹杂物主要是以 Si、Al、Ca、O、Ti 等元素成分含量较高, 夹杂物的来源主要是除氧的氧化物及残渣等。

参考文献:

- [1] 陈亮, 宋波, 陈天明. 45 钢连铸大方坯中心疏松与缩孔控制[J]. 钢铁, 2018, 53(08): 49-54.
- [2] 张海臣, 胡峰, 王勇. 大型锻造用钢锭疏松缩孔防止方法研究[J]. 邢台职业技术学院学报, 2017, 34(03): 75-76+104.
- [3] Alderighi T, Malomo L, Auzinger T, et al. State of the Art in Computational Mould Design[J]. Computer Graphics Forum, 2022, 41(6)
- [4] 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(04): 63-69+76.
- [5] Tkadlečková K, Michalek K, Gryc K, et al. Research and development of the solidification of slab ingots from special tool steels [J]. Archives of Metallurgy and Materials, 2017, 62(3): 1453-1458.
- [6] 马占彪. 大型钢锭凝固过程及缺陷的数值模拟与优化[D]. 西安: 西安建筑科技大学, 2017.
- [7] 朱花, 张博, 田继红. Mn18Cr18N 空心钢锭凝固缺陷与组织的模拟研究[J]. 铸造技术, 2020, 08: 727-732.
- [8] 关锐. 小型钢锭的优化设计与数值模拟研究[D]. 辽宁: 辽宁科技大学, 2016.
- [9] 陈昌华, 陈新华, 张闻聘. 42CrMo 模铸钢锭凝固场数值仿真与超声检测分析 [J]. 物理测试, 2022, 40(02): 8-12.
- [10] 代志功, 毕俊喜. 热交换系数对铸件质量影响探究[J]. 中国铸造装备与技术, 2018, 53(02): 37-39.
- [11] 刘桐旺. 金属型铸造凝固过程中界面热交换系数的研究[D]. 重庆: 重庆大学, 2016.
- [12] Liu F. B, Yu J, Li H-B, et al. Numerical simulation of the magneto - hydrodynamic two - phase flow and heat transfer during electrosag remelting hollow ingot process[J]. Steel Research International, 2020, 91(4): 1-10.
- [13] 李荣德, 张子慧, 向青春. Niyama 判据预测大型铸钢件旋回破碎机横梁缩孔缩松缺陷[J]. 铸造技术, 2015, 36(05): 1196-1200.
- [14] 潘利文, 郑立静, 张虎. Niyama 判据对铸件缩孔缩松预测的适用性[J]. 北京航空航天大学学报, 2011, 37(12): 1534-1540.
- [15] Ignaszak Z. Discussion on usability of the niyama criterion for porosity predicting in cast iron castings[J]. Archives of Foundry Engineering, 2017, 17(3): 196-204.
- [16] 吕迺冰, 马跃, 刘珂. 车轴钢铸锭中 MnS 的生成、长大、熟化规律分析[J]. 钢铁, 2020, 55(07): 58-64