DOI:10.16410/j.issn1000-8365.2020.11.010

基于数值模拟的高镍球铁材料试制与铸件缩孔缩松缺陷分析

宁林祥[1],黄伟明[2],陈　涛[3],朱博文[3],满文胜[3]

(1. 浙江欧冶达机械制造股份有限公司,浙江 湖州 314200;2. 浙江嘉善北方机械制造有限公司,浙江 嘉兴 314100;3. 武汉晨曦芸峰科技有限公司,湖北 武汉 430000)

摘　要:不同组分的高镍球墨铸铁因其石墨化膨胀情况不同,同样的铸造工艺方案下会形成不同大小的缩孔缩松缺陷。基于芸峰 CAE 的物性参数计算模块,获取了高镍球铁材料不同配比方案下的物性参数库,根据金属液降温过程中的收缩率提出缩孔缩松缺陷的估算理论,然后与仿真结果进行对比分析。结果表明,孔松缺陷主要与金属液降温过程的密度变化有关,通过铸造数值模拟可以较快地得到合适的化学成分方案。

关键词:高镍球墨铸铁;材料组分;缩孔缩松;数值模拟

中图分类号:TG255　　**文献标识码**:A　　**文章编号**:1000-8365(2020)11-1046-04

Trial Production and Shrinkage/Porosity Defect Analysis of High-nickel Ductile Iron Castings Based on Numerical Simulation

NING Linxiang[1], HUANGWeiming[2], CHEN Tao[3], ZHU Bowen[3], MAN Wensheng[3]

(1. Zhejiang Ouyeda Machinery Manufacturing Co., Ltd., Huzhou 314200, China; 2. Zhejiang Beifang Machinery Manufacturing Co., Ltd., Jiaxing 314100, China; 3. Wuhan Yunfeng Technology Co., Ltd., Wuhan 430000, China)

Abstract: Due to the different graphitization expansion of high-nickel ductile iron with different components, different sizes of shrinkage cavity and porosity would be formed under the same casting process. Based on the physical parameter calculation module of YF CAE, Obtained the physical parameter database of high-nickel ductile iron under different proportioning projects. Then the estimation theory of porosity defects was proposed according to the shrinkage rate of molten metal in the cooling process, and the simulation results were compared and analyzed. The results showed that the porosity defects was mainly related to the density change of molten metal during cooling process, and the appropriate material ratio could be quickly obtained through casting numerical simulation.

Key words: high-nickel ductile iron; chemical composition; porosity shrinkage; numerical simulation

高镍球墨铸铁具有耐高温、耐腐蚀、抗氧化性等优异性能,被广泛应用于汽车排气管等工作环境的器件使用中[1,2]。由于球墨铸铁的石墨化膨胀现象,可以实现先凝固区域的膨胀效应抵消相邻后凝固区域正在进行的收缩,从而减轻孤立液相导致的缩孔缩松现象[2-4]。由于不同化学成分的高镍球墨铸铁的石墨化膨胀情况不同,因而同样的铸造工艺方案下其缩孔缩松缺陷的形成情况也有差异,不易形成缩孔缩松缺陷的球墨铸铁材料更能满足生产需求。借助数值模拟可以缩短材料的试制周期,节约试制费用。

针对高镍球墨铸铁的材料性能与数值模拟,国内外学者做了一系列研究[5-13]。在材料性能研究方面,陈平昌等[8]研究了 Ni、Cr、Mo、Si、Al、Ce 等元素对高镍球墨铸铁高温性能的影响,并探讨了其影响机理;Yang 等[9]对比分析了高 Si-Mo 球墨铸铁和高镍球墨铸铁的抗氧化性能,发现高温下高镍球墨铸铁的抗氧化性更好;赵新武等[10]通过高温下不同地冷却速度得到了相应的常温力学性能,对比分析确定了最佳高镍球墨铸铁的退火工艺。在高镍球墨铸铁缩孔缩松缺陷的铸造模拟方面,Carlson 等[12]通过 Niyama 准则开发了一种预测缩孔缩松的工具,模拟了高镍合金的缩孔缩松情况;杨炯等借助华铸软件分析高镍球铁铸件缩孔及缩松产生的部位,通过改善铸造工艺方案,消除了铸件热节部位的缩孔及缩松。

收稿日期:2020-10-27

作者简介:宁林祥(1965-),浙江湖州人,总经理.主要从事铸造企业管理、铸造工艺及材料研究方面的工作.
电话:13906726593,E-mail:ninglinxiang@ouyeda.com.cn

通讯作者:陈　涛(1985-),广东韶关人,总经理.主要从事铸造过程数值模拟软件开发、ERP 系统开发方面的工作.
电话:18071143215,E-mail:cht1399@foxmail.com

总的来看，当前的研究在高镍球铁的材料性能研究方面，主要集中于各元素对高镍球铁的性能影响、高镍球铁的性能研究以及热处理对高镍球铁的影响等[5-10]。在高镍球铁的缩孔缩松缺陷模拟方面，主要集中在提出相应判据，以及利用商业化软件消除缺陷等[11-13]。而关于高镍球墨铸铁的化学成分对缩孔缩松缺陷的产生影响理论，以及不同化学成分下的模拟结果差异影响方面，尚缺乏相应的研究。

本文针对当前的研究问题，基于芸峰 CAE 软件计算了高镍球铁不同化学成分方案的随温变化物性参数，对比分析了其在不同方案下的铸造过程金属液收缩率情况，提出了缩孔缩松缺陷的估算理论，并基于数值模拟结果进行了验证。

1　理论与模拟

1.1　铸造工艺方案说明

铸造系统示意图如图 1 所示，包括铸件、铸型、浇注系统、冒口、排气口等部分。铸件材料为高镍球墨铸铁，铸型材料为树脂砂。铸造方式为砂型重力铸造，浇注温度为 1 500 ℃，铸型温度为室温 20 ℃，入口速度为 1 m/s。

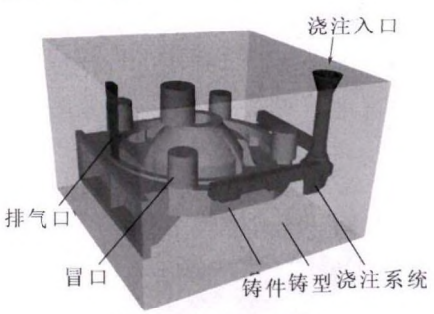


图 1 铸造系统示意图

Fig.1 Schematic diagram of casting system

为了分析不同化学成分的缩孔缩松缺陷，高镍球铁材料形成了四种不同的化学成分方案，如表 1 所示。材料组分差异会导致铸件材料物性参数的变化，包括导热系数、热焓、粘度、固液相线、密度等，其中密度对缩孔缩松缺陷的影响最大。通过芸峰 CAE 的物性参数计算模块，可以根据材料成分获取不同化学成分方案的随温变化物性参数，如图 2 所示，这些参数是数值模拟中必需的。除此之外，模拟中的界面换热系数为 500 W/(m·k)，铸造系统与空气的对流换热系数为 20 W/(m·k)。为了在同样的铸造工艺方案下，选用铸件材料能获得更小的缩孔缩松缺陷，需要从理论与模拟仿真上分析多种高镍合金的成形性能差异。

表1 不同方案的高镍球墨铸铁化学成分为 w(%)

Tab.1 Composition of different designed high-nickel ductile irons

	C	Si	Mn	Ni	Cr	Mg
方案一	2.8	1.7	1.2	19.5	2.15	0.1
方案二	2.8	2.2	1.2	19.5	2.15	0.1
方案三	2.8	2.4	1.2	19.5	2.15	0.1
方案四	2.85	2.4	1.2	19.5	2.15	0.1

1.2　缩孔缩松缺陷估算理论

缩孔缩松缺陷与铸造充型凝固过程中金属液的收缩变形有关，由浇注温度下降到金属液临界固相温度时，对应的金属液收缩率可由金属液的密度变化获得：

$$\alpha=\frac{\rho_{f=0.7}-\rho_{pour}}{\rho_{pour}}\times 100\% \tag{1}$$

式中，$\rho_{f=0.7}$ 为固相率等于 0.7 下的金属液密度，ρ_{pour} 为浇注温度 1 500 ℃下的金属液密度。

4 种方案对应的金属液密度与温度的关系曲线如图 2(e)所示，从密度曲线可推测，在液固转变过程中的石墨化膨胀，使得金属液的密度减小，这有利于抑制缩孔缩松缺陷，石墨化膨胀是铸铁相较于铸钢缩孔缩松缺陷更少的主要原因。但不同的化学成分方案石墨化膨胀情况不同，因而形成的缩孔缩松缺陷有所不同。

根据图 2(d)，提取不同化学成分方案在金属液固相率为 0.7 时对应的温度，如表 2 中所示，该温度下对应的金属液密度可从图 2(e)中获得，浇注温度 1 500 ℃时的金属液密度也由图 2(e)获得，对应的金属液收缩率根据式(1)计算获得。

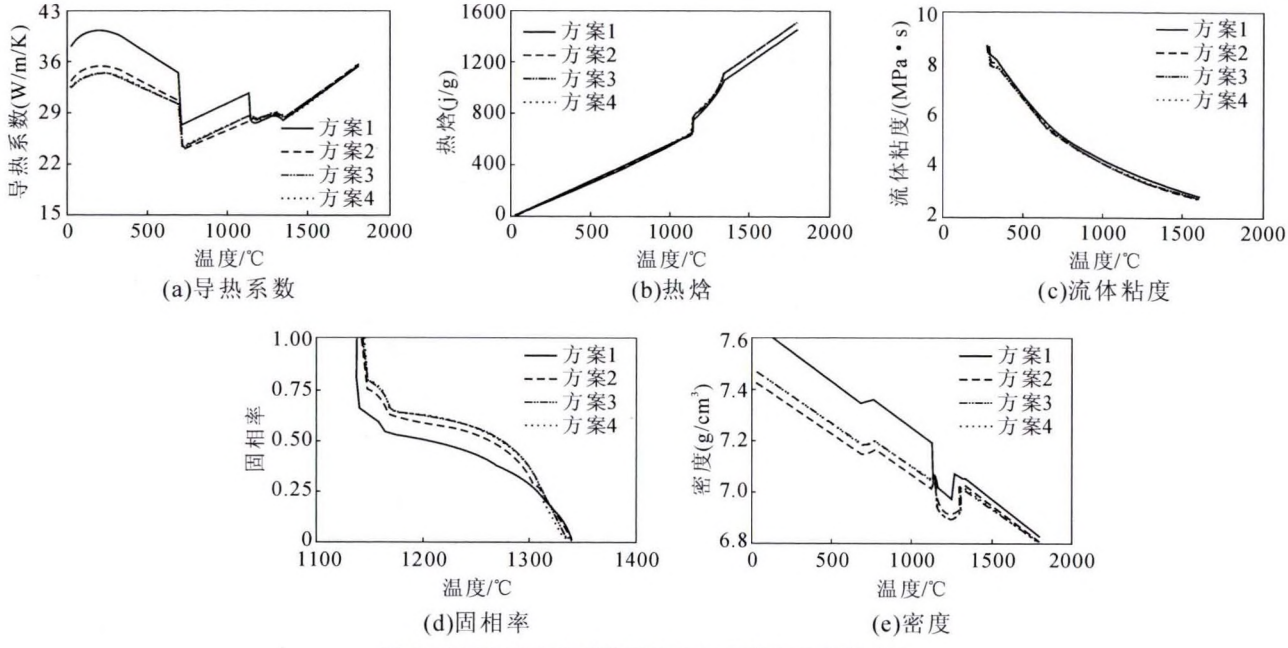
表2 不同方案高镍球墨铸铁的密度和收缩率

Tab.2 Density and shrinkage rate of different designs of high-nickel ductile irons

	金属液固相率为 0.7 时对应的温度 /℃	金属液固相率为 0.7 时的密度 /(kg/m³)×10³	浇注温度 1 500℃时的金属液密度 /(kg/m³)×10³	金属液收缩率 (%)
方案一	1 138	7.112	6.975	1.964
方案二	1 160	7.001	6.952	0.705
方案三	1 165	6.968	6.943	0.360
方案四	1 165	6.965	6.941	0.346

2　结果与讨论

图 3 为不同方案下的缩孔缩松缺陷模拟结果。可以看出，若考虑金属液全部充填区域，包括铸件、浇注系统和冒口等，方案 2 的缩松缺陷较小。然而事实上，在实际生产中只考虑铸件中的缩孔缩松缺陷，这关系到生产件的质量。铸件中的缩孔缩松缺陷多是由孤立液相造成的，在凝固过程中，局部未凝固的孤立液相冷却收缩后无法得到金属液补充，最终在铸件中形成缩孔缩松缺陷。若孤立液相在冷却收缩中收缩率较大，则形成较大的缩孔缩松缺陷。方案 3



(a)导热系数　(b)热焓　(c)流体粘度

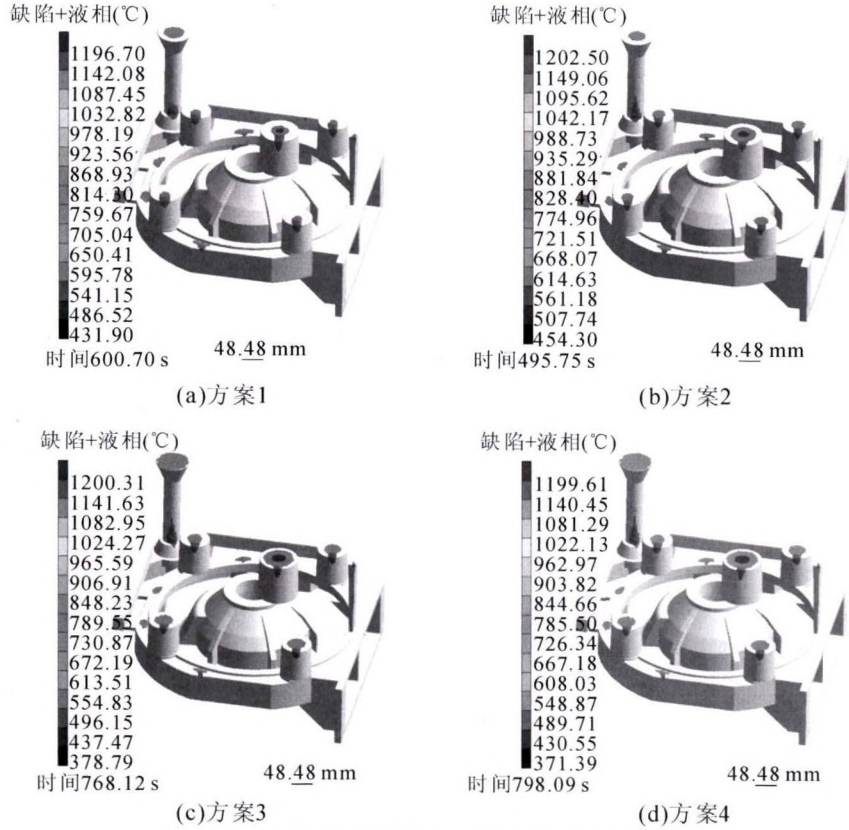
(d)固相率　(e)密度

图 2 不同方案高镍球墨铸铁物性参数随温度的变化

Fig.2 Variation of different physical parameters of different designed high-nickel ductile irons with temperature

中铸件上的缩松缺陷为 10.3 cm^3，与方案 4 差异不大，比方案 2 的 11.04 cm^3 略小，远小于方案 1 的缩松体积 17.26 cm^3。

提取图 3 中各方案铸件上的缩松总体积的数值，与表 2 中的金属液收缩率对比，结果如图 4 所示。明显地，各方案铸件上的缩松缺陷与金属液的收缩率基本成正相关，也即密度变化对缩孔缩松缺陷有较大的影响，这与理论分析基本一致。然而需要注意的是，从理论上准确地来说，计算收缩率应该根据刚形成孤立液相时对应的金属液温度，而不能简单地根据浇注温度计算，故而当前的金属液收缩率计算存在较大的误差。但由于刚形成孤立液相时对应的金属液温度无法通过理论进行计算，因而不得不采用浇注温度。所以铸件的缩松缺陷总体积与金



(a)方案1　(b)方案2

(c)方案3　(d)方案4

图 3 不同方案高镍球墨铸铁缩孔缩松缺陷模拟结果

Fig.3 Simulated shrinkage cavity and porosity results for different designed high-nickel ductile irons

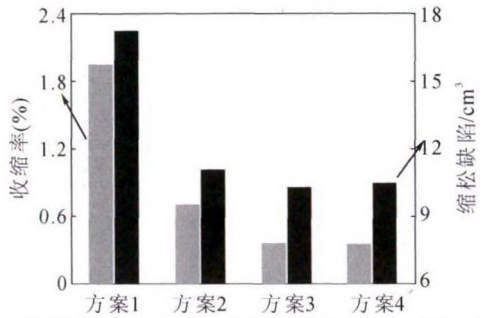


图 4 不同方案高镍球墨铸铁收缩率与缩孔缩松缺陷关系

Fig.4 Relationship between shrinkage rate and shrinkage defects of different designed high-nickel ductile irons

属液收缩率不能保证完全是正相关的关系，分析理论也只能定性地分析问题。

3 结论

根据高镍球墨铸铁的材料组分，计算了 4 种配比方案下的合金物性参数，提出了根据金属液收缩率估算缩孔缩松缺陷的分析理论，并与数值模拟的铸件缩松结果进行了对比，二者大小的正相关关系说明了分析理论的可靠性。借助数值模拟的手段可以缩短材料的试制周期，对于高镍球墨铸铁件有较大的实际生产意义。

参考文献：

[1] Ye iltepe S, Şeşen M K. Heat treatment effect on spheroidal cast iron microstructure and mechanical properties[J]. Journal of Engineering Sciences and Design, 2017, 5(3): 479-482.

[2] 程武超，赵新武，党波涛，等. 高镍奥氏体球墨铸铁饱和度和碳当量的验证[J]. 铸造技术, 2009, 30(9): 13-17.

[3] 李茂真，刘金海，付彬国，等. 碳当量对球墨铸铁热分析曲线及自补缩能力的影响 [C]// 中国机械工程学会铸造分会铸件质量控制及检测技术委员会第十一届学术年会暨天津市第十届铸造学术年会论文集. 2016.

[4] 洪恒发. 基于球墨铸铁凝固原理的补缩方法[J]. 铸造，2011，60 (12): 1194-1199.

[5] Yang Y L, Cao Z Y, Lian Z S, et al. A study on microstructure of ductile Ni-resist cast iron for exhaust manifolds and mechanical property at the condition of altermative thermal cycles [J]. Advanced Materials Research, 2011, 194-196: 95-99.

[6] Szeliga D, Kubiak K, Ziaja W, et al. Influence of silicon carbide chills on solidification process and shrinkage porosity of castings made of nickel based superalloys [J]. International Journal of Cast Metals Research, 2014, 27(3): 146-160.

[7] 刘华莉. 汽车排气歧管用高镍球墨铸铁组织与抗热疲劳性能的研究[J]. 热加工工艺, 2018, 47(1): 139-142.

[8] 陈平昌，黄志光. 高镍奥氏体球墨铸铁高温性能研究[J]. 华中理工大学学报，1995，23(1): 104-108.

[9] Yang Y L, Cao Z Y, Qi Y, et al. The study on oxidation resistance properties of ductile cast irons for exhaust manifold at high temperatures [J]. Advanced Materials Research, 2010, 97-101: 530-533.

[10] 赵新武，李兆清，张翼，等. 不同热处理对高镍奥氏体球墨铸铁力学性能的影响[C]//2015 中国铸造活动周论文集, 2015.

[11] 高顺，程凤军，史朝龙，等. 高镍奥氏体球墨铸铁涡壳的开发[J]. 铸造, 2013, 62(4): 287-291.

[12] Carlson K D, Beckermann C. Use of the niyama criterion to predict shrinkage-related leaks in high-nickel steel and nickel-based alloy castings[C]//Proceedings of the 62nd SFSA Technical and Operating Conference, 2008.

《现代铸铁》杂志征订启事

《现代铸铁》杂志创刊于 1981 年，由一汽铸造有限公司主管，无锡一汽铸造有限公司与中国机械工程学会联合主办，双月刊(双月 25 日出版)，国内外公开发行，邮发代号：28-178，国内统一连续出版物号：CN 32-1112/TG，国际标准连续出版物号：ISSN 1003-8345，国际刊名代码：CODEN XZHUEJ。

《现代铸铁》杂志是中国机械工程学会铸造分会会刊，其刊登的主要内容为：有关铸铁的新技术、新工艺、新装备、新材料、绿色铸造、节能环保、先进管理、车间技术改造、计算机应用、国内外情况介绍、检测技术等方面的研究成果和生产经验。

截止目前，《现代铸铁》正以其强大的发行量、深远的行业影响力、雄厚的信息资源优势，面向全国铸造原辅材料、熔炼及浇注设备、除尘设备、造型生产线、型砂检测仪器仪表、炉前质量控制仪器、铸件修复设备、计算机软件等企业拓展广告市场。我们恳切希望能与形象良好、综合实力较强的企业建立长期的合作关系，以使我们双方的事业相辅相成、共同上升。

《现代铸铁》全年 6 期，每册定价 12 元，全年 72 元。读者可在全国各地邮局直接订阅，邮发代号：28-178。

本刊联系地址：江苏无锡惠山经济开发区北惠路 55 号，邮编：214174，电话：0510-85405970，电子信箱：119427423@qq.com、xdzt_wf@wxfawfc.com。