

基于数值模拟的球墨铸铁板簧座铸造工艺设计及组织研究

向思雨¹, 刘兰俊¹, 李永红², 宋进林¹

(1. 合肥工业大学材料科学与工程学院, 安徽合肥 230009; 2. 安徽禹王铸造有限公司, 安徽怀远 233400)

摘要: 研究了铸态下高强度、高韧性球铁板簧座, 在对三维结构和过共晶球墨铸铁的凝固特性进行分析后, 根据模数法确定了冒口的形状、尺寸以及位置, 并设计了阶梯式和顶注式两种浇注系统。采用ProCAST软件对这两种铸造工艺进行了数值模拟, 并对模拟结果进行了对比研究。最后, 对阶梯浇注系统下获得的铸件进行取样分析, 研究对比了五个本体试样的力学性能、金相组织和断口形貌。

关键词: 球墨铸铁; 板簧座; 铸造工艺; 力学性能; 微观组织

球墨铸铁由于其高强度和高韧性, 在大型机床、汽车、重卡等领域有着广泛的应用, 常用的高强韧性球墨铸铁有QT600-10^[1], QT750-5^[2]以及QT800-5^[3]等, 随着现代工业的不断发展, 对球墨铸铁的性能有了更高的要求, 有一些研究获得的奥氏体球墨铸铁(ADI)抗拉强度可达到1 000 MPa以上, 但这些试验对奥氏体化的时间、温度以及后续的淬火工艺都有严格的要求^[4]。

球铁由于自身的糊状凝固和石墨化膨胀等凝固特性, 在铸造的过程中容易产生疏松缩孔等缺陷, 在很大程度上影响了铸件的力学性能, 降低了铸件的质量。因此, 球铁件往往要通过对铸造工艺的优化来避免疏松缩孔等铸造缺陷的出现, 大多数的缺陷通过改善浇注系统、添加冒口或冷铁都可以被消除^[5]。本文基于数值模拟技术研究了球墨铸铁板簧座铸造工艺设计与优化, 并研究了不同浇注系统下球墨铸铁板簧座铸件的组织和性能特征, 以期将球墨铸铁板簧座零件的铸造生产提供指导。

1 铸件的结构与材质分析

本研究中的铸件为汽车的板簧座, 是汽车零部件的一个重要组成部分, 其主要功能是用以安装和承载钢板弹簧, 而钢板弹簧的作用是连接车桥和车架, 其在使用过程中往往要承受很大的冲击载荷, 从而对板簧座的力学性能提出了很高的要求。铸件采用Unigraphics NX10.0实体建模, 其三维结构图如图1所示, 铸件为对称件, 质量约为30 kg, 最薄位置厚度约为8 mm。上下两端的过渡区(图1中标注点1、2)以及侧面的圆柱区(图1中标注点3)为厚大位置, 这两处极易形成孤立液相区, 产生

作者简介:

向思雨(1997-), 女, 硕士生, 主要研究方向为球墨铸铁的铸造成形工艺设计及模拟分析。电话: 18856964323, E-mail: xiangsiyu1997@163.com

通讯作者:

刘兰俊, 男, 副教授。电话: 18919662359, E-mail: liulanjun@hfut.edu.cn

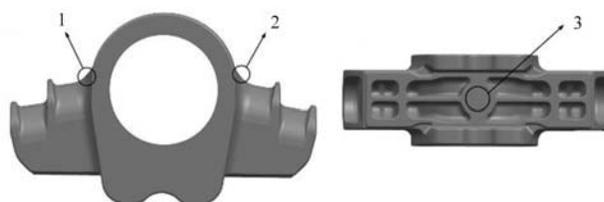
中图分类号: TG244; TG255

文献标识码: A

文章编号: 1001-4977(2022)05-0625-07

收稿日期:

2021-07-10 收到初稿,
2021-07-29 收到修订稿。



(a) 正视图

(b) 仰视图

图1 铸件的正视图和仰视图

Fig. 1 Front view and bottom view of the casting

表1 QT800-5的化学成分
Table 1 Chemical composition of the QT800-5

C	Si	Mn	Cu	Sn	S	P	Ce	Mg	Fe	$w_B/\%$
3.5~3.6	2.6~2.8	0.4~0.6	0.6~0.8	0.01~0.03	<0.03	<0.04	0.02~0.03	0.025~0.05	其余	

气孔及缩松缩孔等缺陷。因此，在对铸件进行铸造工艺设计时，应特别注意这三处的凝固顺序，防止缩松缩孔的出现。

本次的板簧座铸件采用DISA垂直分型线制作，它是一种垂直分型射压快速造型线，通过压缩空气挤压砂型，射压机射砂成形。

球墨铸铁是糊状凝固倾向较大的铸铁^[6]，且碳当量越大，其共晶凝固糊状度越大。典型的糊状凝固是指铸件的外部 and 内部同时开始凝固。本次采用的QT800-5为过共晶成分，糊状凝固倾向极大，糊状区也是微缩孔最容易出现的区域。此外，过共晶球墨铸铁还会析出大量的球状石墨，在凝固过程中发生石墨化膨胀，一方面共晶反应第一阶段的石墨化膨胀容易使铸件产生缩孔，另一方面石墨膨胀导致糊状区的压力增加，使金属液流向未被充满的空腔，减小铸件的缺陷。这些因素都会对铸件的缩松缩孔缺陷产生影响^[7-8]。

2 铸造工艺设计

2.1 铸件的冒口设计

本文采用以均衡凝固为指导的铸铁件收缩模数法进行冒口的设计^[9]。

铸件的模数为：

$$M_c = \frac{V_c}{A_c} = 10.3 \text{ mm} \quad (1)$$

体积周商界为：

$$q_v = \frac{V_c}{M_c^3} = 3 \ 586 \quad (2)$$

质量周商界为：

$$q_m = \frac{G_c}{M_c^3} = 27 \text{ g/mm}^2 \quad (3)$$

球墨铸铁件的收缩时间分数：

$$P_c = \frac{1}{e^{(0.65M_c + 0.01q_m)}} = 0.391 \quad (4)$$

补缩率：

$$F_c = \frac{0.08}{e^{(0.5M_c + 0.01q_m)}} = 0.036 \ 5 \quad (5)$$

式中： V_c 为铸件体积， A_c 为铸件散热表面积， G_c 为铸件的质量。

因此该铸铁件的收缩模数为：

$$M_s = \sqrt{P_c} \times M_c = f_2 \times M_c = 6.44 \text{ mm} \quad (6)$$

式中： f_2 为收缩模数系数， $f_2 = \sqrt{P_c}$ 。

一个铸件上只设置一个冒口，根据球墨铸铁件收缩模数法冒口设计参数表^[10]，选取冒口模数 $M_r = 1.26 \text{ cm}$ ，冒口颈模数 $M = 0.33 \text{ cm}$ 。根据模数最终设计的冒口与冒口颈形状如图2所示，其在铸件上的位置如图3所示。

2.2 浇注系统的设计

张华^[11]等人对DISA铸造生产线工艺冒口进行了研究，对比了均衡凝固冒口与控制压力冒口、热冒口与冷冒口在DISA铸造生产线球铁件生产中的补缩效果。结果表明，对于DISA铸造生产线使用热冒口工艺下的均衡凝固冒口，其冒口的补缩效果最好。根据此分析，本文设计了阶梯式浇注系统和顶注式浇注系统两种浇注工艺，并对其进行了对比和分析。

2.2.1 阶梯式浇注系统

根据阶梯浇注系统的设计方法^[12]，浇注系统采用封闭-开放式浇注系统，阻流截面积 $\Sigma F_{阻} = 679 \text{ mm}^2$ ，分配直浇道的截面积 $\Sigma F_{分直} = 1 \ 000 \text{ mm}^2$ ，底层内浇道的截面积 $\Sigma F_{底内} = 846 \text{ mm}^2$ ，上层内浇道的截面积 $\Sigma F_{上内} = 800 \text{ mm}^2$ 。阶梯式浇注系统的示意图如图4所示。



图2 冒口与冒口颈

Fig. 2 The diagram of the riser and riser neck

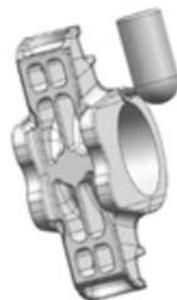


图3 冒口在铸件上的位置

Fig. 3 The diagram of the position of the riser on the casting

2.2.2 顶注式浇注系统

顶注式浇注系统能很好地满足顺序凝固的要求，同时为了避免金属液流速过快，冲刷型壁，采用开放式浇注系统，直浇道截面积为 $\Sigma F_{直}=720 \text{ mm}^2$ ，内浇道总截面积为 $\Sigma F_{内}=1\ 120 \text{ mm}^2$ 。顶注式浇注系统的示意图如图5所示。

注的特点，即只有底层内浇道进行浇注时，直浇道呈现未充满状态，如图7a所示；之后当铸件内液面上升到一定高度后，上层内浇道开始进行浇注，如图7b所示。整个充型过程中金属液流动平稳，没有出现紊流现象。冒口最后由高温金属液充满，温度明显高于铸件上部温度。

3 模拟参数的设定

本文采用ProCAST软件对设计的两种铸造工艺进行数值模拟，ProCAST软件为有限元模拟分析软件，在模拟过程中需要对铸件进行网格划分，铸件的体网格划分如图6所示，模拟过程工艺参数的设定如表2所示^[13]。

4 模拟结果分析

图7为阶梯式浇注系统下的铸件充型过程中流场模拟结果。可以看到，金属液的流动状态符合阶梯浇

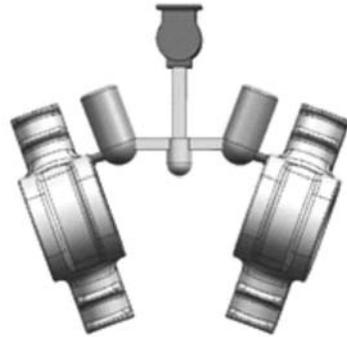


图5 顶注式浇注系统示意图

Fig. 5 The diagram of the top pouring system



图4 阶梯浇注系统示意图

Fig. 4 The diagram of the step pouring system



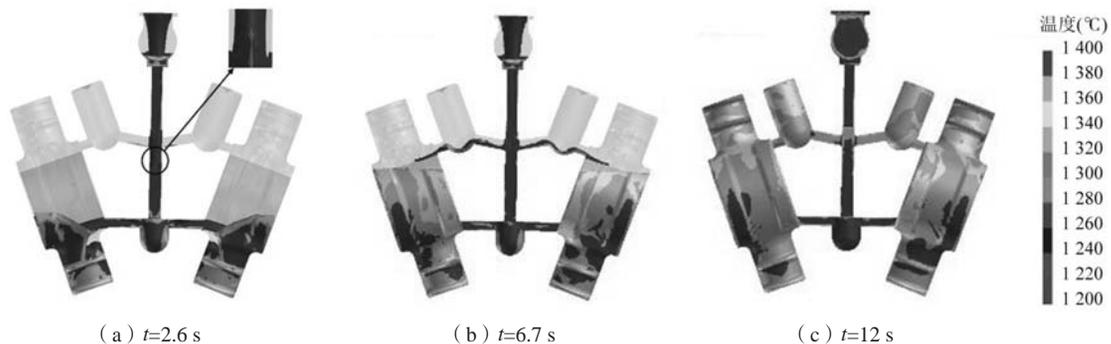
图6 铸件的体网格划分示意图

Fig. 6 The body mesh division of the casting

表2 模拟参数的设定

Table 2 The parameters of simulation

材料 铸件	换热系数(砂型与铸件 界面)/(W·m ⁻² ·K ⁻¹)	边界条件			重力加速度 /(m·s ⁻²)	初始条件		浇注 方式
		浇注温度/℃	浇注时间/s	冷却		砂型的初始温度/℃	浇注初始温度/℃	
QT800-5	500	1 400	12	空冷	9.8	20	1 400	重力浇注



(a) $t=2.6 \text{ s}$

(b) $t=6.7 \text{ s}$

(c) $t=12 \text{ s}$

图7 阶梯式浇注系统下充型过程的流场

Fig. 7 The flow field during mold filling process of the castings with the step pouring system

当浇注完成后，铸件开始凝固。图8为阶梯式浇注系统下铸件的凝固场。可以看到，冒口对铸件能起到明显的补缩作用，但是还难以避免铸件内部热节处孤立液相区的出现。

图9为顶注式浇注系统下铸件的充型过程，可以看到金属液流速过快，并冲击型壁，金属液在撞击型壁后发生反弹，形成一个向内包裹的形状，且其对已经进入铸件内部的金属液也起到了强烈的冲击作用，金属液紊流现象严重，容易导致卷气等一系列铸造缺陷的产生。不过，在充型过程中，铸件上部与下部温差较小，上部的局部位置甚至温度高于下部，而冒口温度则远高于铸件温度，这都有利于铸件的顺序凝固。

当浇注完成后，铸件开始凝固。图10为顶注式浇注系统下铸件的固相分数。相较于阶梯式浇注系统来说，冒口对铸件的补缩时间明显变长，孤立液相区有所减小。

对比两个浇注系统可以发现，阶梯式浇注系统的液体流动较为平稳，而顶注式浇注系统能使铸件获得更有利于冒口补缩的温度场。本次铸件的铸造工艺设计则选用阶梯式浇注系统进行了实际的铸造生产。

5 微观组织的观察与分析

从铸造车间生产的5个板簧座上的同一位置进行了本体取样，获得了5个拉伸试样棒并进行拉伸试验。使

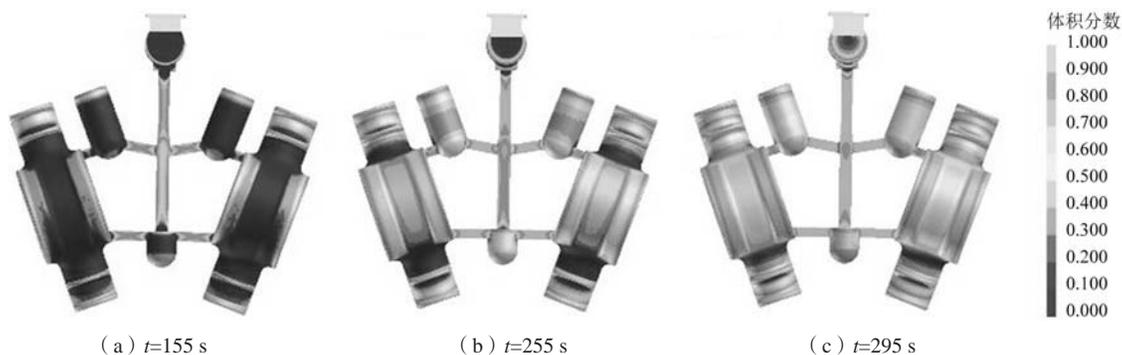


图8 阶梯式浇注系统下铸件的体积分数

Fig. 8 The solid fraction during solidification of the castings with the step pouring system

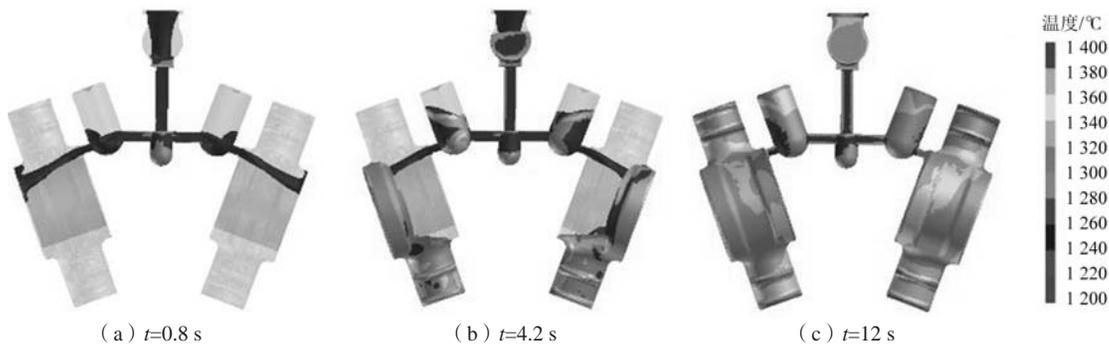


图9 顶注式浇注系统下铸件的流场

Fig. 9 The flow field of the castings with the top pouring system

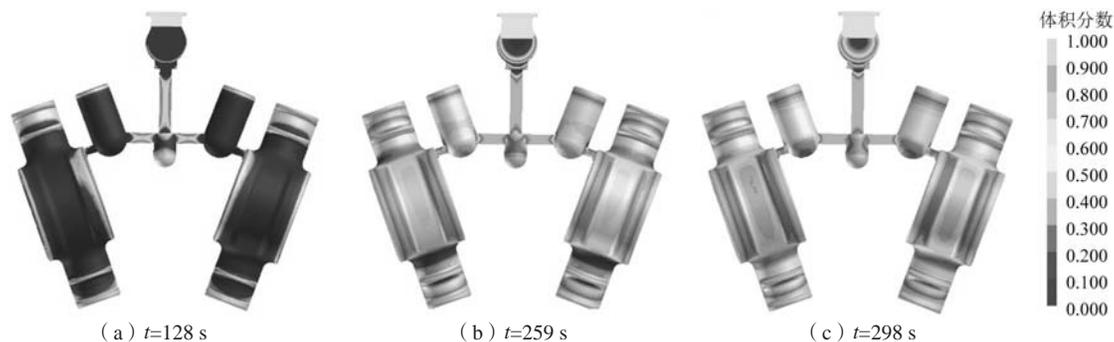


图10 顶注式浇注系统下铸件的固相分数

Fig. 10 The solid fraction of the castings with the top pouring system

用扫描电子显微镜观察并记录了试样的断口形貌，接着使用砂纸和抛光机对试样进行抛光处理，然后使用4%的硝酸酒精溶液对试样进行腐蚀，采用金相显微镜记录了腐蚀前后样品的微观组织。

5个试样的力学性能如图11所示。从图中可以看出，试样1和试样5的综合力学性能较好。图12为未腐蚀样品的微观组织，图13则为腐蚀后样品的微观组织。利用Image-Pro Plus软件和Photoshop软件计算样品中石墨的体积分数，以及基体中铁素体和珠光体的体积分数，计算结果如图14所示。

通过对以上试验结果的分析可以发现，试样的拉伸强度与其基体中珠光体含量成正比，这说明高珠光体含量能够保证球墨铸铁铸态下的高强度。然而，对比图11b和图14b可以发现，断后伸长率与基体中铁素体的体积分数并不对应，这说明在对拉伸试验的结果

进行分析时，应该结合球墨铸铁中石墨球的形状和分布进行分析。所有试样的石墨球形状均为规则球状石墨和不规则球状石墨的混合物，并且石墨球直径分布不均匀，这是过共晶球墨铸铁的典型特征^[14-15]。相较于球铁的基体组织，石墨球几乎不具有强度，并且裂纹还会优先在石墨球中萌生，因此具有较高石墨含量的试样3和试样4抗拉强度较低。此外，试样3的石墨直径较大，且石墨球聚集现象严重。通过观察3号试样的断口形貌发现，石墨球聚集的位置还容易萌生二次裂纹，如图15a所示，这就进一步恶化了球铁的力学性能^[16-17]。观察图15b中试样1的断口形貌还可以发现，珠光体的断裂呈现撕裂的河流状花纹，为准解理断裂，在试样1的断裂机理中占较大比例；而铁素体的断裂则呈现密集的韧窝分布，为韧性断裂，在图15b中分布较少。

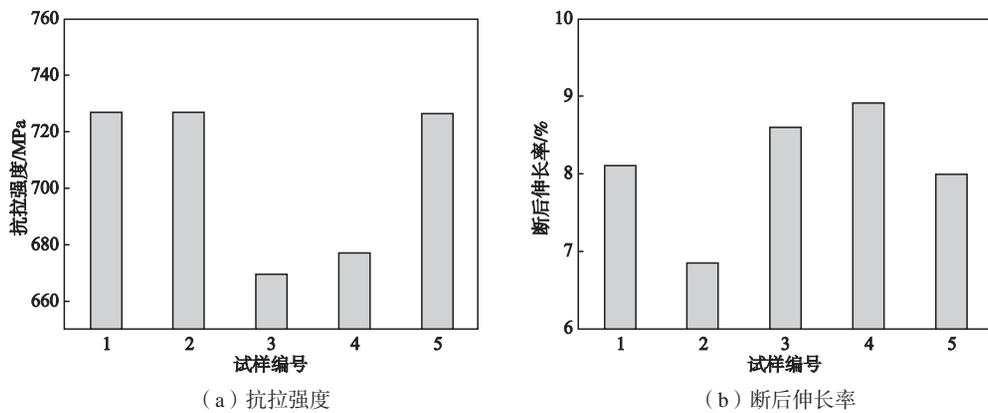
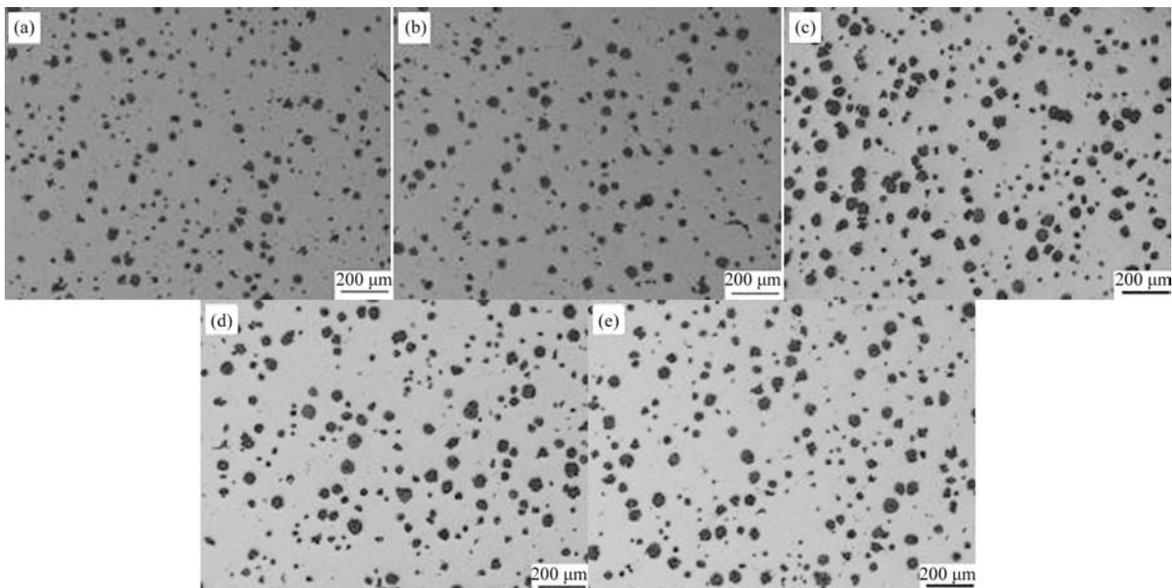


图11 拉伸试样的力学性能

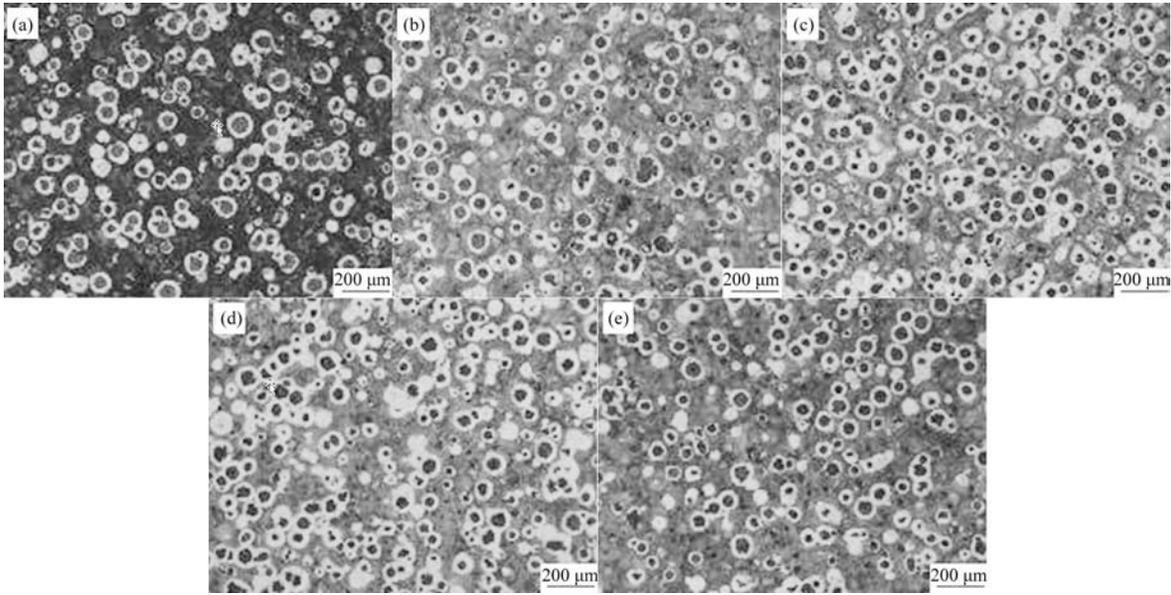
Fig. 11 Mechanical properties of the five specimens



(a) ~ (e) : 试样1~5

图12 未腐蚀试样的金相组织

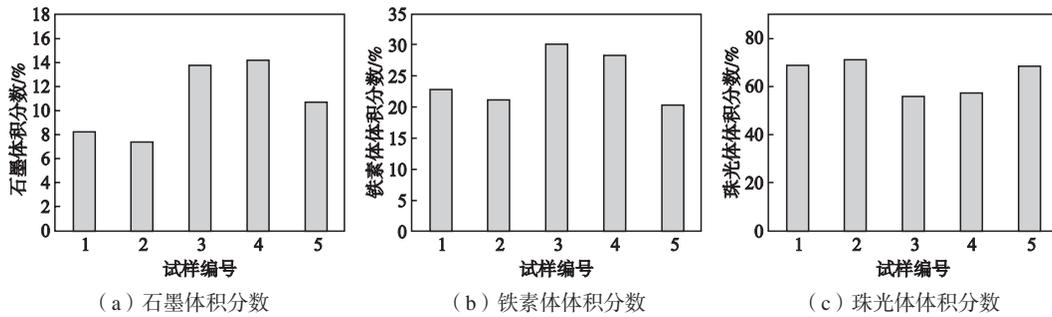
Fig. 12 Unetched micrographs



(a) ~ (e) : 试样1~5

图13 腐蚀试样的金相组织

Fig. 13 Etched micrographs



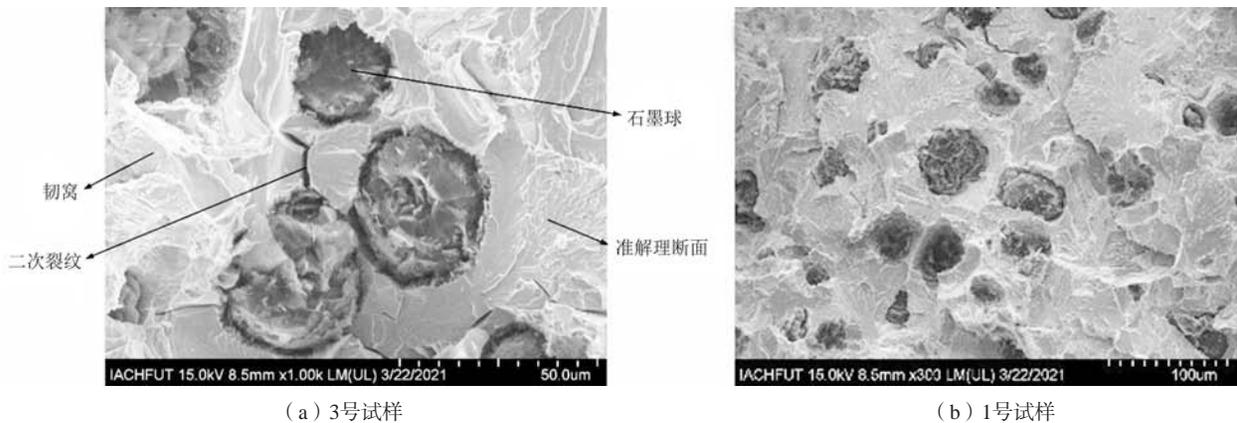
(a) 石墨体积分数

(b) 铁素体体积分数

(c) 珠光体体积分数

图14 试样微观组织的相组成

Fig. 14 The volume fractions of phases in five samples



(a) 3号试样

(b) 1号试样

图15 试样的断口形貌图

Fig. 15 The fracture morphologies of the samples

6 结论

(1) 相较于阶梯式浇注系统, 顶注式浇注系统的设计更为简单, 在浇注完成时, 铸件的温度场更有利于铸件的补缩。但是顶注式浇注系统会导致金属液流

速过快, 使得浇注过程中金属液出现紊流现象, 对铸件的性能产生不利的影响。

(2) 对于铸态下高强韧性的球墨铸铁件, 保证基体中珠光体的含量是保证铸件抗拉强度的关键因素,

而铁素体的含量能在一定程度上反映铸件的韧性。性能有十分重要的影响。

(3) 球墨铸铁中石墨的形状和分布对球铁的力学

参考文献:

- [1] 程建龙. 铸态高强度高韧性QT600-10球墨铸铁控制技术 [J]. 铸造技术, 2019 (6): 579-581.
- [2] 陈忠士, 傅高升, 蓝敏俐. 铸态高强度高韧性合成球铁QT750-5的研制 [J]. 铸造技术, 2013 (5): 28-30.
- [3] 张连军, 景学广, 刘慧玲. 铸态QT800-5支架的生产试验 [J]. 现代铸铁, 2019 (4): 12-14.
- [4] SINGH G, SHARMA S, SINGH D. Study of austempered ductile iron (ADI) on varying austempering temperatures [M]. *Advances in Materials and Metallurgy*, 2019: 325-334.
- [5] TAKEMOTO Y, MIZUMOTO M, KINNO K. Internal porosity defects in ductile cast irons [J]. *International Journal of Metalcasting*, 2020: 1-14.
- [6] HOU H, ZHANG G W, MAO H K, et al. A new prediction way to shrinkage cavity formation for ductile iron castings [J]. *Materials Science Forum*, 2008, 575-578: 127-134.
- [7] KWEON E S, ROH D H, KIM S B, et al. Computational modeling of shrinkage porosity formation in spheroidal graphite iron: a proof of concept and experimental validation [J]. *International Journal of Metalcasting*, 2020, 14 (3): 60-609.
- [8] RIPOSAN I, STAN S, CHISAMERA M, et al. Control of solidification pattern of cast irons by simultaneous thermal and contraction / expansion analysis [J]. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 2019, 529: 1-6.
- [9] 张卫华, 魏兵. 铸铁件收缩模数法冒口设计 [J]. 铸造技术, 1998 (4): 1-3.
- [10] 柳百成, 黄天佑. 铸造成形手册 [M]. 化学工业出版社, 2009.
- [11] MIYAMOTO Y, ITOFUJI H. Prediction of shrinkage cavity in heavy-section ductile cast iron using CAE considering volume change during solidification [J]. *Materials Transactions*, 2018, 59 (10): 1578-1584.
- [12] 李魁盛. 阶梯式浇注系统的设计原理和新算法 [J]. 铸工, 1979 (2): 29-34.
- [13] 刘继飞, 李福军, 李涛, 等. 基于ProCAST的Cr-Ni-Mo低合金钢大转轴铸件工艺设计及优化 [J]. 热加工工艺, 2020, 49 (5): 63-67.
- [14] LIU J H, YAN J S, ZHAO X B, et al. Precipitation and evolution of nodular graphite during solidification process of ductile iron [J]. *China Foundry*, 2020, 17 (4): 260-271.
- [15] RIPOSAN I, STEFAN E, STAN S, et al. Effects of inoculation on structure characteristics of high silicon ductile cast irons in thin wall castings [J]. *Metals*, 2020, 10 (8): 1-15.
- [16] ALMANZA A, DEWALD D, LICAVOLI J, et al. Effect of cobalt additions on the microstructure and mechanical properties of as-cast thin-wall ductile iron [J]. *International Journal of Metalcasting*, 2020, 15 (2): 417-432.
- [17] MUKHERJEE K, FÆSTER S, HANSEN N, et al. Graphite nodules in fatigue-tested cast iron characterized in 2D and 3D [J]. *Materials Characterization*, 2017, 129: 169-178.

Research on Casting Process Design and Microstructure of the Ductile Iron Leaf Spring Seat Based on Numerical Simulation

XIANG Si-Yu¹, LIU Lan-Jun¹, LI Yong-Hong², SONG Jin-Lin¹

(1. Department of Materials Science and Engineering, Hefei University of Technology, Hefei 230009, Anhui, China; 2. Anhui Yu Wang Casting Industry Co., Ltd., Huaiyuan 233400, Anhui, China)

Abstract:

In this paper, the leaf spring seat of ductile iron with high strength and toughness in as-cast condition was studied. After analyzing its three-dimensional structure and the solidification characteristics of hypereutectic ductile iron, the shape, size and position of riser were determined according to the modulus method, and two pouring systems of step type and top type were designed. The two kinds of casting processes were simulated by ProCAST software, and the simulation results were compared. Finally, the castings obtained under the step gating system were sampled and analyzed, and the mechanical properties, microstructure and fracture morphology of the five bulk samples were studied and compared.

Key words:

ductile iron; leaf spring seat; casting process; mechanical properties; microstructure