

显微缩松对铁素体球墨铸铁低温韧性的影响

侯超¹，任为¹，宋佳健²，孙海清²，常国威¹

(1. 辽宁工业大学材料科学与工程学院, 辽宁锦州 121001; 2. 锦州捷通铁路机械制造有限公司, 辽宁锦州 121116)

摘要: 针对显微缩松是否影响铁素体球墨铸铁低温韧性的问题, 采用改变冒口颈直径的办法对铸锭内显微缩松进行调控。用Axiovert200MAT金相显微镜和MLA 250 (FEI Quanta) 扫描电子显微镜观察金相组织和显微缩松, 用Nano Measurer 1.2软件测量石墨球的个数及直径。结果表明, 金属型铸造球墨铸铁时, 合适的冒口颈直径可使三角形显微缩松数量减少、尺寸减小, 同时促使三角形显微缩松向多边形或蠕虫状转变。对于纯铁素体球墨铸铁, 当球化率与石墨球数量达到一定程度后, 显微缩松转变成影响球墨铸铁超低温冲击韧性的关键因素。

关键词: 铁素体球墨铸铁; 显微缩松; 低温韧性

作者简介:

侯超 (1996-), 男, 学士, 主要研究方向为金属凝固原理及控制技术。E-mail: 791784167@qq.com

通讯作者:

常国威, 男, 教授, 博士后, 硕士生导师。电话: 0416-4198651, E-mail: cgw@lnut.edu.cn

中图分类号: TG255

文献标识码: A

文章编号: 1001-4977 (2019) 02-0123-05

基金项目:

辽宁省重点研发计划项目 (2017106019)。

收稿日期:

2018-07-25 收到初稿,

2018-09-27 收到修订稿。

随着风电、高铁等行业对球墨铸铁件低温韧性要求的不断提高, 人们对低温高韧性球墨铸铁展开了深入研究, 主要研究内容有两部分: 一是制备工艺^[1-8], 二是低温断裂过程^[9-11]。研究取得了明显的进展, 成功地开发出了低温高韧性球墨铸铁的生产技术, 可使球墨铸铁的力学性能稳定地达到QT400-18指标的同时, -40 ℃冲击功大于12 J。但是, 当温度低于-60 ℃时冲击功很难稳定达到10 J以上。

球墨铸铁凝固过程中, 包围石墨球的奥氏体圈之间容易形成显微缩松, 这种显微缩松常常带有夹角, 这些尖角对球墨铸铁低温断裂时裂纹的萌生将起到促进的作用。但是, 到目前为止, 没有人注意到奥氏体圈之间的显微缩松对球墨铸铁低温韧性的作用。

为此, 本文以铁素体球墨铸铁为研究对象, 主要研究显微缩松对铁素体球墨铸铁低温韧性的影响, 为超低温铁素体球墨铸铁的生产提供理论依据。

1 试验方法

采用500 kg中频感应炉熔化炉料, 铁液出炉温度为1 510~1 530 ℃。采用冲入法进行球化处理, 孕育处理采用硅钡孕育剂二次孕育+硫氧孕育剂随流孕育。浇注温度为1 380~1 440 ℃。

采用图1所示的方法浇注铸锭, 每炉浇注两个铸锭。用改变图1中冒口颈直径 ΦA 的办法来控制铸锭内石墨化所产生的膨胀压力, 达到调整铸锭内显微缩松的目的。

铸锭在740 ℃下保温4 h进行热处理以获得100%铁素体基体的球墨铸铁。冲击试样为10 mm × 10 mm × 55 mm的V型缺口试样, 取样方法如图1所示。用JB-50冲击试验机在-40 ℃、-50 ℃、-60 ℃、-70 ℃下测试冲击功。在冲断后的试样上取金相试样, 用Axiovert200MAT金相显微镜和MLA 250 (FEI Quanta) 扫描电子显微镜观察金相组织和显微缩松, 用Nano Measurer 1.2软件测量石墨球的个数及直径。

2 试验结果与分析

2.1 金相组织

图2为热处理后的金相组织。组织中石墨球细小、圆整、分布均匀, 球化率可达

98%以上。

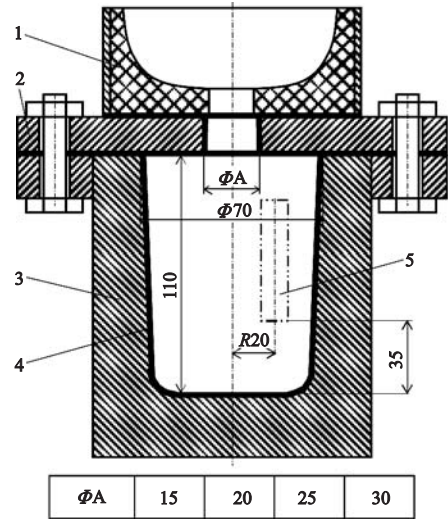
石墨球的个数与直径的测试结果如图3所示。每方毫米石墨球的个数在835~1 089个之间，大部分都分布在835~884 个/mm²范围内，如图3a所示。石墨球直径的平均值在13.2~15.2 μm范围内，如图3a所示，其中10~14 μm居多，2~6 μm以及22~30 μm很少，即石墨球大小比较均匀。

试验中石墨球的数量和大小不同是浇注时随流孕育造成的，每次浇注时随流加入的孕育剂的数量总会有些偏差，从而导致了石墨球数量与尺寸发生了变化。

热处理后金属基底为100%铁素体，铁素体晶粒大小比较均匀。

2.2 显微缩松

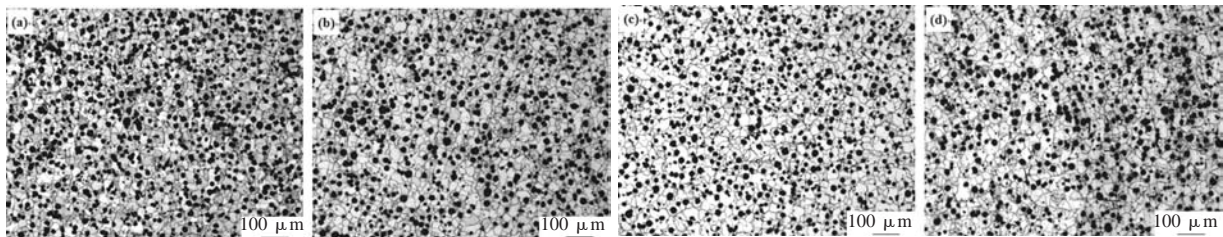
(1) 冒口颈直径对显微缩松的影响。距铸锭中心1/3半径处扫描电镜照片如图4所示，照片中可清楚地看到铁素体基体上存在有显微缩松。显微缩松主要有两种，一种是三角形显微缩松，如图4中白色箭头所示；另一种为非三角形显微缩松，如图4中黑色箭头所示。三角形显微缩松的尖角非常尖刻，其尖端曲率半径几



1. 浇口杯 2. 锭模上盖 3. 锭模 4. 涂料 5. 冲击试样

图1 铸锭浇注方法

Fig. 1 Casting method of ingot



(a) ΦA=15 mm (b) ΦA=20 mm (c) ΦA=25 mm (d) ΦA=30 mm

图2 金相组织

Fig. 2 Metallurgical structure

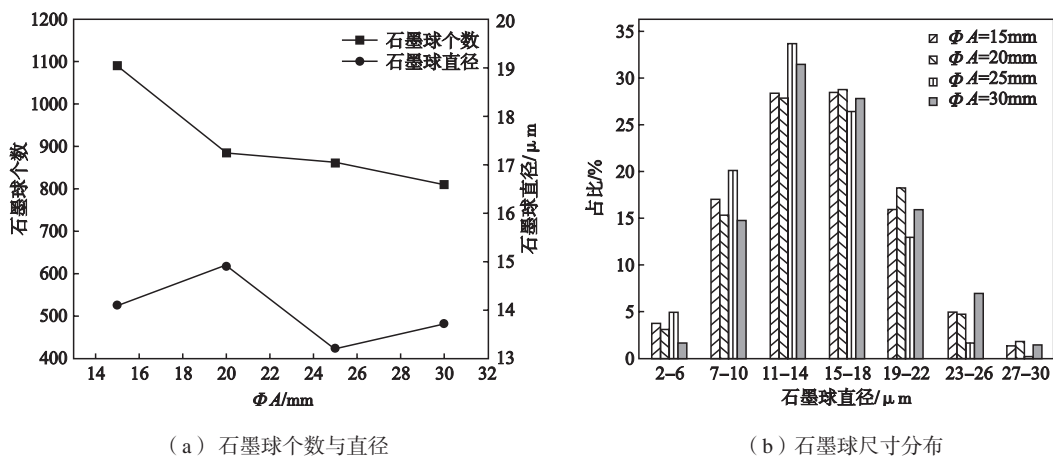


图3 石墨球个数N与直径d

Fig. 3 Graphite nodule count N and diameter d

近于零。其他显微缩松也带有尖角，但不明显，且尖端的曲率半径要远远大于三角形显微缩松尖端曲率半径。

比较图4中的显微缩松发现，显微缩松与铸锭制备时冒口颈直径有关。当 $\Phi A=20$ mm时，三角形显微缩松明显变小，如图4b中白色箭头所示，显微缩松主要呈多边形及蠕虫状，如图4b中黑色箭头所示。冒口颈直径为其他尺寸时，三角形显微缩松尺寸大、数量多。由此可知，用金属型铸造直径为70 mm、高为110 mm的铸锭，当 $\Phi A=20$ mm时，可有效抑制三角形显微缩松的形成。

(2) 铸锭内显微缩松的分布。用显微缩松在铸锭半径上的分布来表征铸锭内显微缩松的分布，则 $\Phi A=20$ mm时铸锭同一半径上不同位置扫描电镜照片如图5及图4b所示。比较图5及图4b可知，铸锭心部的显微缩松数量多，尺寸大，如图5a所示；铸锭边缘显微缩松少，尺寸小，如图5c所示。越靠近铸锭的心部，三角形显微缩松逐渐变大且增多。铸锭边缘冷却速度快，先凝固，心部冷却速度慢，后凝固，故上述显微缩松的变化主要是凝固先后造成的结果。

2.3 低温冲击韧性

-40 ~ -70 °C 试样冲击功测试结果如图6所示。

(1) 温度的影响。由图6可以看出，随着温度

的下降，冲击功呈先缓慢降低而后快速降低的变化规律。温度从-40 °C下降到-50 °C时，各试样冲击功降低值约为0.5 J，说明在这个温度范围内，冲击功变化很小。温度从-50 °C下降到-60 °C时，冲击功降低值均大于1 J，冲击功对温度的敏感程度加强。当温度从-60 °C下降到-70 °C时，大部分试样冲击功降低值都超过2 J，温度对冲击功的影响更加明显。

(2) 显微缩松的影响。对比图4与图6的试验结果可以看出，所制备球墨铸铁的冲击功与制备铸锭时冒口径直径 ΦA 有关，实质上是与显微缩松相关。对于 $\Phi A=20$ mm的铸锭，显微缩松尺寸小、数量少、尖端曲率半径大，当温度为-70 °C时，其冲击功仍然能够达到12 J，且温度从-40 °C下降到-70 °C时，冲击功只降低了1.5 J，如表1所示。显微缩松尺寸大、数量多，温度降低时，冲击功降低的幅度增大。

如果将-60 °C定义为超低温，则根据图6与表1可以确定，超低温下冒口径直径对冲击功产生明显的影响，且温度越低影响越严重。

3 讨论

3.1 球墨铸铁显微缩松与冒口颈直径的相关性

如果将铁液石墨化膨胀产生的压力作用于包围石墨球的奥氏体，促使奥氏体变形，是减少或消除球墨铸铁

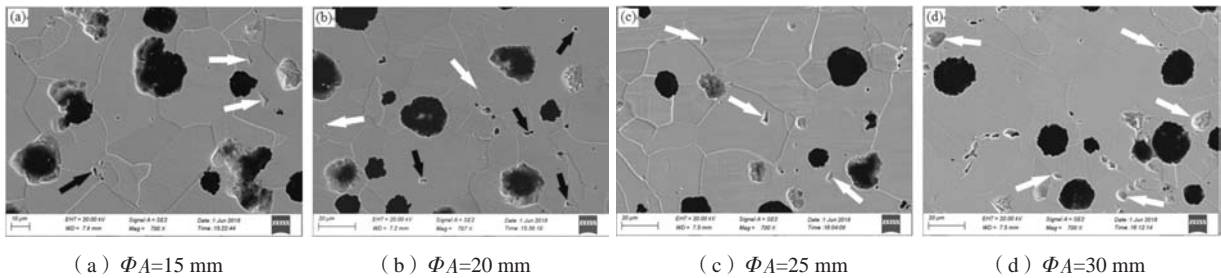
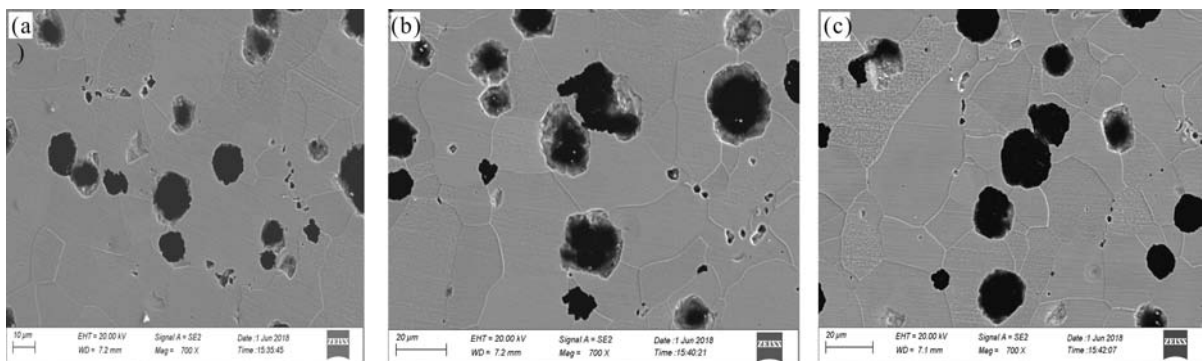


图4 距铸锭中心1/3半径处SEM照片
Fig. 4 SEM images at 1/3 radius distance from the center of ingot



(a) 铸锭心部 (b) 距铸锭中心2/3半径处 (c) 铸锭边缘

图5 $\Phi A=20$ mm时铸锭半径上显微缩松的分布

Fig. 5 The distribution of microshrinkage on the radius of the ingot at a diameter of $\Phi A=20$ mm

显微缩松的有效方法。如何利用石墨化膨胀在铁液内形成压力，需要两个条件：一是铸型具有足够的刚度，二是石墨化膨胀时，铁液处于封闭的容器内。为了满足这两个条件，必须采用金属型铸造，同时液态收缩与冒口颈直径凝固同时结束。故金属型铸造时，球墨铸铁显微缩松与冒口颈直径尺寸具有相关性。

(1) 合适的冒口颈直径有利于减少或消除显微缩松。所说的合适的冒口颈直径是指铁液的液态收缩与冒口颈的凝固同时结束，使铁液在封闭的型腔内析出石墨球，石墨化膨胀时在铁液内形成压力。该压力迫使包围石墨球的奥氏体产生变形，充填奥氏体之间的空隙，当压力足够大时，完全可以消除显微缩松，如图7b所示。试验中， $\Phi A=20\text{ mm}$ 时，显微缩松尺寸明显减小、形状明显发生变化，如图4b所示，说明冒口颈直径相对比较合适。

(2) 冒口颈直径过小或过大不易对显微缩松产生影响。如果冒口颈直径过小，则液态未开始收缩或收缩过程中，冒口颈已经凝固。尽管形成封闭的型腔，由于铁液继续收缩，导致型腔处于未被充满状态。如果石墨球析出产生的膨胀量不能使型腔处于被充满状态，则铁液内不能产生压力，凝固后形成显微缩松，如图7a所示。如果石墨球析出产生的膨胀量使型腔返回到充满状态，则铁液内将产生压力，尽管此时的压力较小，但对于减小显微缩松尺寸会有帮助。试验中， $\Phi A=15\text{ mm}$ 时，显微缩松略有减小，分析认为是由于冒口颈直径比较小造成的，如图4a所示。

如果冒口颈直径过大，冒口颈最后凝固，石墨析出时产生的膨胀力使型腔内的铁液倒流到冒口内，铁液内始终不能产生压力，凝固后形成显微缩松，如图7c所示。实验中，当 $\Phi A > 20\text{ mm}$ 时，显微缩松数量多、尺寸大的原因是由于冒口颈直径过大造成的，如图4c、图4d所示。

3.2 超低温下显微缩松是影响球墨铸铁冲击韧性的关键因素

对于铁素体基体球墨铸铁，普遍认为，石墨球越细小、圆整，低温冲击韧性越高。然而，比较图2、图3、图6的实验结果发现，超低温下冲击功的变化并不是石墨球引起的。理由是图2a、图2c中，石墨球更细小、圆整，但冲击功较低，而图2b中，虽然石墨球较大，但低温冲击功最高。由图2可知，铁素体晶粒的数量、尺寸基本一致，故超低温下冲击功的变化也不是铁素体基体引起的。

综合比较图2~图6的试验结果以及上述的分析，可以确定是显微缩松引起了铁素体基体球墨铸铁低温下冲击功的变化，并且温度越低，显微缩松的作用越明显，即超低温下显微缩松转变成影响球墨铸铁冲击韧

表1 冲击功及变化值
Table 1 Low temperature impact energy of ingots with different riser neck diameters

$\Phi A/\text{mm}$	$A_k(-40^\circ\text{C})/\text{J}$	$A_k(-70^\circ\text{C})/\text{J}$	$\Delta A_k/\text{J}$
15	13.55	10.05	3.50
20	13.50	12.00	1.50
25	13.20	8.85	4.35
30	12.80	8.35	4.45

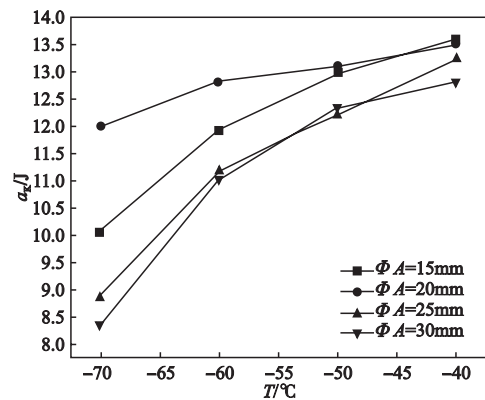


图6 冲击功测试结果
Fig. 6 Impact test results

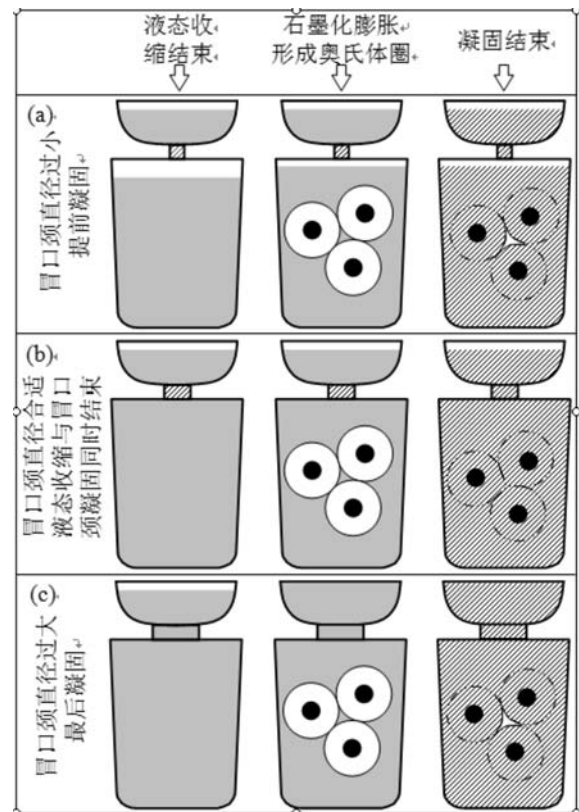


图7 球墨铸铁显微缩松形成过程示意图

Fig. 7 Schematic diagram of microshrinkage forming process in spheroidal graphite cast iron

性的关键因素。

张新宁等人^[11]认为裂纹的形成控制着铁素体球墨铸铁低温冲击断裂过程，温度越低，裂纹形成过程所起作用越明显。图4中可以看出，三角形显微缩松尖端曲率半径远小于石墨球边缘凸起的曲率半径，外力作用下，裂纹首先在三角形显微缩松处形成。故当裂纹的形成成为断裂过程的关键环节时，显微缩松就自动转变成影响球墨铸铁冲击韧性的关键因素。

4 结论

(1) 金属型铸造球墨铸铁时，通过改变冒口颈直径可使球墨铸铁组织中的三角形显微缩松数量减少、尺寸减小，同时促使三角形显微缩松向多边形或蠕虫状转变。

(2) 温度低于 $-50\text{ }^{\circ}\text{C}$ 后，球墨铸铁组织中的三角形显微缩松数量越少、尺寸越小则冲击韧性越高。对于纯铁素体基球墨铸铁，当球化率大于98%、石墨球数量大于 $810\text{ 个}/\text{mm}^2$ 时，显微缩松转变成影响球墨铸铁超低温冲击韧性的关键因素。

参考文献:

- [1] 余健, 薛振华, 谷新波, 等. 低温高韧性球墨铸铁件的生产实践 [J]. 现代铸铁, 2011 (4): 41.
- [2] 陈卫中, 邵忠, 杨明昊. 地铁轨道用铁素体球墨铸铁垫板的开发 [J]. 铸造, 2011, 60 (6): 607.
- [3] 马敬仲, 丁建中, 尤其光, 等. 超低温高韧性球墨铸铁QT400-18AL的研究及应用 [J]. 铸造, 2012, 61 (8): 864.
- [4] 马敬仲, 丁建中, 曾艺成. 高速列车转向架轴箱铸件的生产试验 [J]. 现代铸铁, 2012 (5): 15.
- [5] 苟华强, 雷强, 涂建平, 等. 低合金铁素体球墨铸铁的研制 [J]. 铸造, 2015, 64 (4): 253.
- [6] 丁建中, 赵金权, 丁杰, 等. 低温铁素体球墨铸铁的生产与研究 [J]. 现代铸铁, 2015 (2): 32.
- [7] 丁建中, 马敬仲, 曾艺成, 等. 低温铁素体球墨铸铁的特性及质量稳定性研究 [J]. 铸造, 2015, 64 (3): 193.
- [8] 李冬琪, 徐德民, 于海生. 高端球墨铸铁件的研制与应用 [J]. 现代铸铁, 2015 (5): 25.
- [9] Ostash O P, Dronyuk M M, Andreiko I M, et al. Enhancement of the resistance of cold-resistant high-strength cast irons to brittle fracture [J]. Materials Science, 1996, 32 (6): 699.
- [10] Ostash O P, Kostyk E M, Andreiko I M, et al. Effect of the microstructure on the low-temperature cyclic crack-growth resistance high-strength cast irons [J]. Materials Science, 1997, 31 (1): 51.
- [11] 张新宁, 曲迎东, 李荣德, 等. 铁素体球墨铸铁低温冲击断裂裂纹形核及扩展机理 [J]. 金属学报, 2015, 51 (11): 1333.

Effects of Microshrinkage on Low Temperature Toughness of Ferritic Ductile Iron

HOU Chao¹, REN Wei¹, SONG Jia-jian², SUN Hai-qing², CHANG Guo-wei¹

(1. School of Materials Science and Engineering, Liaoning University of Technology, Jinzhou121001, Liaoning, China;
2. Jinzhou JT Railway Machinery Co., Ltd, Jinzhou121116, Liaoning, China)

Abstract:

Microshrinkage affects the low temperature toughness of ferritic ductile iron. In order to solve the problem, cast iron ingots were cast by using different riser neck diameters in the work. The microstructure and microshrinkage were observed using Axiovert 200MAT metallographic microscope and MLA 250 FEI Quanta scanning electron microscope; graphite nodule diameter and count were measured by software of Nano measurer 1.2. The results suggest that the suitable diameter of riser neck could reduce the triangle microshrinkage and its size in matrix, and promote the transformation of microshrinkage shape from the triangle to polygon or worm-like. For the pure ferritic ductile iron, the microshrinkage became the key factor affecting the ultra low temperature toughness when the spheroidization rate and graphite nodule count reached a certain level.

Key words:

ferrite ductile iron; microshrinkage; low temperature toughness