

球铁件皮下气孔形成机理的研究

孙少东¹ 张孟群² 马翔² 何时剑¹ 万苏文¹

(1. 淮安信息职业技术学院 机电工程系 江苏 淮安 223003)

(2. 南京大学 现代分析中心 江苏 南京 210018)

[摘要] 皮下气孔是球铁件常见的铸造缺陷之一,其形成机理至今说法不一.既然非金属夹杂物伴随气泡一并迁移,那么,检测铸件各部位的镁含量势必能够追踪到气泡的迁移路径,从而能够对其运动过程作出分析.检测结果表明,铸件内部的镁含量由外而内呈梯度增加,铸件表面的氧化皮中富含镁元素.研究表明,皮下气孔由不能外逸的气泡形成,其外逸阻力来自于已经凝固的氧化膜.提高碳当量有助于增强石墨化膨胀能力,从而在氧化结膜前将气泡尽快挤出金属液,避免皮下气孔的产生.

[关键词] 球墨铸铁 皮下气孔 气泡迁移 石墨化膨胀 氧化结膜

[中图分类号] TG143.5 **[文献标志码]** A **[文章编号]** 1672-4292(2012)04-0078-04

Study on Formation Mechanism of Blowholes in Nodular Cast Iron

Sun Shaodong¹ Zhang Mengqun² Ma Xiang² He Shijian¹ Wan Suwen¹

(1. Mechanical & Electrical Engineering Department, Huaian College of Information Technology, Huaian 223003, China)

(2. Center of Materials Analysis, Nanjing University, Nanjing 210018, China)

Abstract: The subcutaneous blowhole is one of defects in nodular cast iron, and its formation mechanism has no final conclusion in the area of foundry technology. Because non-metallic inclusion always transfers in metal liquid together with bubbles, we believe that determinations of magnesium in different inner parts of a casting will be helpful in analyzing the motion paths of bubbles migration. The testing results have shown that the magnesium content gradually increases from the surface to the center of the casting, and the oxide film has shown enrichment of magnesium and sulfur. Our study shows that the oxide films hinder the bubbles to transfer outward and those stranded bubbles form subcutaneous blowholes. Increasing of carbon equivalent will raise the graphitization expansion property, and in the meanwhile accelerate the bubbles transfer, so the subcutaneous blowholes will be avoided.

Key words: nodular cast iron, subcutaneous blowhole, bubble transfer, graphitization expansion, oxide film

球墨铸铁皮下气孔是一种位于铸件表面以下的空洞类缺陷.目前,关于皮下气孔形成机理的学说很多,主要分为两大类:侵入说和析出说.

侵入说认为皮下气孔是由金属液外的高压气体或铸型界面上的反应性气体侵入铸件形成的^[1],用此理论可以很好地解释皮下气孔在铸件各个方向上都有可能出现的现象.有文献指出,皮下气孔与球铁基体之间存在着—层薄膜,其中富含 Mg、Si、Mn、S、La 等元素,质量百分比远远超出各元素在球铁件中的平均含量^[2,3],这一点用侵入说无法解释.

析出说认为,皮下气孔是金属液内部的气体由于温度下降引起溶解度降低而析出造成的^[4],析出的过程包含气泡形成和气泡运动.球墨铸铁液中的气泡形成以后,在浮力的作用下向金属液上表面迁移,滞留在氧化结膜层下而形成皮下气孔.依此理论,很容易解释铸件上表面出现的皮下气孔现象.但是,大量的事实已经表明,皮下气孔缺陷可能出现在铸件的各个方向表面以下^[5,6],所以,将气泡在金属液内的运动理解为单方向的上浮是不妥当的.

收稿日期:2012-07-09.

基金项目:淮安市产学研合作促进计划(HAC201023).

通讯联系人:张孟群,工程师,研究方向:金属材料. E-mail: zmq3693@126.com

以上两类观点在解释皮下气孔形成问题上都存在一定的缺陷,因此,有必要开展进一步的研究.本文在测定球墨铸铁铸件各部位的镁、硫含量的基础上,研究了气泡运动的动力以及路径问题,旨在用气泡迁移理论揭示皮下气孔的形成过程.

1 实验方法和实验方案

1.1 实验材料与试块制备

第一种试块取自单铸的 50 mm×50 mm×50 mm 球墨铸铁铸件,如图 1 所示(已部分加工),测定铸件表面(黑皮)中心区域镁及硫的百分含量,试块上的记号从 1 个点到 6 个点分别代表铸件上、下、左、右、前、后 6 个方向的表面.第二种试块同样取自单铸的 50 mm×50 mm×50 mm 球墨铸铁铸件,测试面为铸件中心对称面,如图 2 所示,试块上的记号从 1 个点到 4 个点分别代表上、下、左、右 4 个方向的铸件内部,测定从表面到心部等距离 3 个点的镁及硫的百分含量,无记号的代表铸件中心.

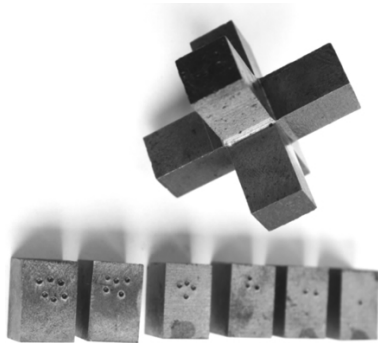


图 1 铸件 6 个表面的试块
Fig.1 Six test blocks of casting surface

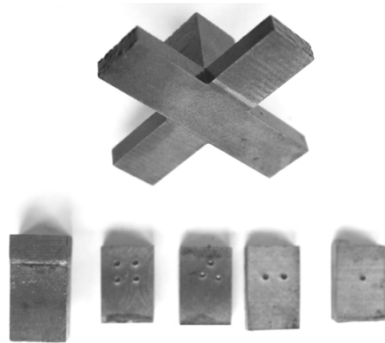


图 2 铸件中心对称面上 5 个试块
Fig.2 Five test blocks of center symmetry plane

1.2 实验方法

用瑞士 ARL9800XP+型 X 射线荧光光谱仪对测试面进行成分分析,扫描范围为直径 8 mm 的圆,并对由表面粗糙度引起的成分偏差进行了对比校正.用日本 S-3400N II 电子显微镜对铸件内部的缩松以及中心区域的缩孔进行扫描观察,测定中心区域缩孔壁的化学成分.

1.3 实验结果

1.3.1 铸件表面中心区域镁及硫的测定

如表 1 所示,对球墨铸铁件 6 个方向表面中心区域镁、硫的光谱测定表明,镁、硫在铸件表面呈现富集状态,但铸件上表面的镁、硫的百分含量并不比其他方向的表面高.

表 1 铸件不同方向表面的镁、硫含量

Table 1 Percent content of magnesium and sulfur on different directional casting surfaces						%
	上表面	下表面	左边表面	右边表面	前面	后面
Mg	0.714	0.721	0.683	0.771	0.802	0.779
S	0.234	0.283	0.255	0.216	0.237	0.213

1.3.2 铸件中心对称面上镁的测定

本实验对铸件中心对称面上的镁进行了光谱测定,如表 2 所示,结果表明,由铸件表面到心部镁呈现梯度分布状态.

表 2 铸件中心对称面上不同部位镁的含量

Table 2 Percent content of magnesium of different internal part on the symmetry plane of the casting					%
	上部	下部	左部	右部	中心
近表面	0.039	0.032	0.041	0.046	0.056
远表面	0.044	0.039	0.045	0.049	

1.3.3 铸件内部缩松及中心缩孔电镜扫描

图 3 为铸件中心缩孔的照片及电镜扫描的形貌.电镜扫描的结果表明,缩孔壁上布满一层非金属夹杂物,经测定发现主要为铁、碳和氧,并未检测出镁,说明镁在缩孔壁上的百分含量至少在能够检测到的 3‰ 以下.扫描电镜测量铸件表面氧化结膜层厚度在 8 μm 左右.

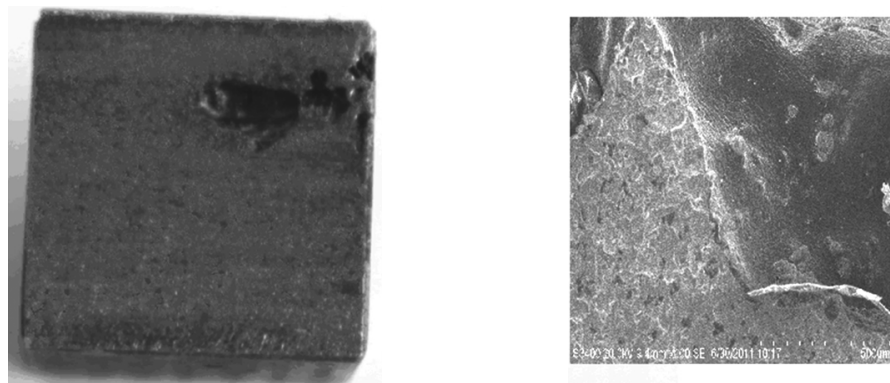


图3 铸件中心区域缩孔形貌

Fig.3 Shrinkage graph of the casting in the center

2 分析讨论

2.1 追踪非金属夹杂物的意义

金属液内部的气泡不可能自发形核,高熔点的非金属夹杂物成为非自发形核的核心,且气泡在长大和运动的过程中会不断粘附更多的非金属夹杂物.球墨铸铁采用镁球化处理,所形成的氧化镁及硫化镁由于熔点明显高于铁水温度,因此,气泡无论是在形核还是长大后粘附的非金属夹杂物中,该两种夹杂物居多,也即铁水中的氧化镁及硫化镁基本上与气泡合并在一起,伴随气泡一起向金属液外迁移.

当气泡迁移到金属液表面的时候,非金属夹杂物就被留在了铸件表面,有些非金属夹杂物与氧发生置换反应,反应产物中的非金属元素又回到金属液中形成新的非金属夹杂物,再次粘附在后续的气泡上继续向金属液表面迁移,其中以硫化镁最为显著^[7].

伴随气泡一并迁移的非金属夹杂物中本身就含有大量的氧化镁,加之硫化镁在金属液表面的置换反应产物又是氧化镁,因此,铸件表面的平均含镁量比铸件内部高很多,出现镁的富集.按照皮下气孔析出说的观点,气泡在浮力作用下向金属液的上表面迁移,因而铸件的上表面镁的富集程度应明显高于其他方向的表面.实验结果表明,铸件上表面的平均含镁量并不比其他方向表面高,故可断定,气泡在金属液中的运动不是浮力作用下的单方向上浮.

2.2 气泡运动分析

实验表明,铸件各个方向表面上几乎具有相同的镁含量,说明气泡向金属液外各个方向运动的概率相同,也即气泡向金属液外就近迁移,并不选择方向.

海绵中的水在没有受到挤压力作用的情况下,由于重力的作用,经过长时间的下沉会到达海绵的底部,若受到挤压,水就会很快从海绵的各个方向上逸出.金属液中的气泡也是如此,只在受到浮力的作用下,经过长时间的上浮到达金属液的上表面,若受到挤压,同样也会很快向四处逸出.因此,弄清挤压力的来源对于揭示气泡的运动路径将起着至关重要的作用.

对于球墨铸铁液而言,挤压力的形成主要体现在以下两个方面:

(1) 球墨铸铁液浇注后温度下降,气体在金属液中处于过饱和状态,同时,金属液体积收缩,对气泡构成挤压作用.

(2) 球墨铸铁液冷却过程中存在石墨化膨胀,使得球墨铸铁液内部压力升高.

体积收缩向内压迫金属液,石墨化膨胀向外排开金属液,两者共同构成了对金属液的挤压作用.球墨铸铁石墨化膨胀分为3个阶段:石墨化膨胀第一阶段即先生石墨产生阶段,金属液此时并无任何强度可言,膨胀所产生的内部压力升高不可能通过排开型砂使型壁外移得到释放,释放途径只可能是挤压金属液中的气泡使之外逸;石墨化膨胀的第二阶段即共晶石墨产生阶段,此时,奥氏体枝晶骨架已形成,但液流通道仍未完全堵塞,石墨化膨胀挤出气泡也是有可能的;石墨化膨胀第三阶段即共析石墨产生阶段,此时金属液已经完全结晶为固态,对气泡向外迁移没有贡献.

2.3 皮下气孔形成机理

皮下气孔是球墨铸铁常见的一种缺陷,它的产生和采用镁作为主要球化元素有关,很多研究人员认

为减少气体的发生量是消除皮下气孔缺陷最有效的措施^[8,9]。将研究重点放在减少气体的来源上,至于如何将已经产生的气体排出金属液外则少有涉及。

炉前处理及浇注以后,球墨铸铁液中含有大量的各种气体。随着温度的下降,这些气体在球墨铸铁液中呈过饱和状态,通过非自发方式形核继而长大成为气泡,并吸附周围金属液中的各种非金属夹杂物。在球墨铸铁液内部挤压力的作用下,气泡和其吸附的非金属夹杂物一并向金属液外迁移,迁移到金属液表面的气泡破碎,气体由铸型间隙逸出,非金属夹杂物则被留在了金属液表面。

伴随气泡一并迁移到金属液表面的非金属夹杂物中本身就含有大量的氧化镁,加之硫化镁在金属液表面置换反应形成的氧化镁,使得金属液表面出现镁的富集状态。从实验结果可明确地看出,铸件表皮的含镁量在0.7%左右,而铸件内部的残余镁量一般在0.03%~0.05%之间。氧化镁是极其稳定的氧化物,熔点高达2000℃,它的大量存在使得金属液表面非金属夹杂物在远高于金属液熔点的温度就产生凝固,形成致密的氧化膜。电镜扫描的结果表明,氧化膜厚度约8μm左右,相当于电镀层的厚度。

球墨铸铁液表面所形成的氧化膜对后续气泡的向外逸出构成极大的阻碍,致使后续气泡被滞留在氧化膜下。且随着温度的不断下降,迁移到氧化膜下的气泡越来越多。气泡的向外迁移降低球墨铸铁液所受挤压力的同时,球墨铸铁液对气泡向内的抽吸力却在增加,迫使滞留在氧化膜下的气泡向金属液内部迁移。此时,奥氏体枝晶骨架已经形成^[10],气泡向内迁移的液流通道被部分堵塞,部分滞留在氧化膜下的气泡不能迁移,最终形成皮下气孔。

处于氧化膜下的气泡及金属液中的残余气泡在向内迁移的过程中,不断受到金属液中奥氏体枝晶的阻碍,有的气泡被封闭在奥氏体枝晶间,只有少量气泡沿树枝晶间的剩余金属液通道迁移到铸件中心。被封闭在树枝晶间的气泡最终被抽吸到树枝晶间微观缩孔内,迁移到铸件中心部位的气泡聚集在铸件中心缩孔处。

2.4 皮下气孔的预防

对皮下气孔形成机理的分析表明,皮下气孔是由向外迁移的气泡受高温氧化结膜阻碍而滞留在氧化膜下而形成的。在氧化结膜之前,若金属液内的气泡能够全部迁移出金属液,皮下气孔就不会形成,能否顺利迁移取决于金属液高温时气泡受到的挤压力大小,很显然,挤压力越大,气泡迁移越快。

金属液对气泡的挤压力构成因素中,能够有效控制的因素只有石墨化膨胀。增大碳当量值,使金属液第一阶段石墨化能力增强,从而在氧化结膜之前将金属液中的气泡尽快地挤出,避免皮下气孔的产生。有文献指出,对中等壁厚球墨铸铁件,碳当量调整在4.55%以上可消除皮下气孔缺陷^[11]。

3 结论

(1) 球墨铸铁液浇注后的温度下降使得气体出现过饱和,过饱和的气体通过形核并长大成为气泡,在挤压力的作用下,气泡向金属液外各个方向迁移,而不是单方向的上浮。

(2) 伴随气泡迁移的非金属夹杂物以及界面反应形成的非金属氧化物在球墨铸铁液表面氧化结膜,同时,氧化镁在表面的富集使得氧化结膜温度远高于共晶转变温度。后续迁移的气泡被氧化膜滞留,受已经形成的奥氏体枝晶的阻碍,不能向内迁移,最终形成皮下气孔。

(3) 提高碳当量,强化球墨铸铁液第一阶段石墨化能力,有助于增高挤压力,迫使气泡在有效的氧化结膜前逸出球墨铸铁液,从而消除皮下气孔缺陷。

[参考文献](References)

- [1] 司乃潮. 球铁件皮下气孔缺陷形成的影响因素分析[J]. 铸造, 1997(4): 38-40.
Si Naichao. Analysis of influence factors on blowhole defect in nodular cast iron[J]. Foundry, 1997(4): 38-40. (in Chinese)
- [2] 刘荣, 檀传淼, 周松流. 球墨铸铁活塞环皮下气孔的扫描电镜分析[J]. 铸造, 2001(12): 756-758.
Liu Rong, Tan Chuanmiao, Zhou Songliu. Analysis of subskin blowhole of nodular iron in piston ring through scanning electronic microscope[J]. Foundry, 2001(12): 756-758. (in Chinese)

(下转第86页)

- Wang Xichun. The Latest Automotive Coating Technology [M]. Beijing: Machinery Industry Press, 1998. (in Chinese)
- [2] 娄性义. 固体废物处理与利用 [M]. 北京: 冶金工业出版社, 1996.
- Lou Xingyi. Processing and Utilization of Solid Waste [M]. Beijing: Metallurgical Industry Press, 1996. (in Chinese)
- [3] 刘均科. 塑料废弃物的回收与利用技术 [M]. 北京: 石化出版社, 2001.
- Liu Junke. Recycling and Using Technology of Plastic Waste [M]. Beijing: Petrochemical Press, 2001. (in Chinese)
- [4] 彭长琪. 固体废物工程 [M]. 武汉: 武汉理工大学出版社, 2004.
- Peng Changqi. Solid Waste Project [M]. Wuhan: Wuhan University of Science and Technology Press, 2004. (in Chinese)
- [5] Mazza G, Falcoz Q. A particulate model of solid waste incineration in a fluidized bed combining combustion and heavy metal vaporization [J]. Combustion and Flame, 2009, 156: 2 084-2 092.
- [6] Taib M R, Swithenbank J, Nasserzadeh V, et al. Investigation of sludge waste incineration in a novel rotating fluidized bed incinerator [J]. Institution of Chemical Engineers, 1999, 77(5): 298-304.

[责任编辑: 严海琳]

(上接第81页)

- [3] 王景德. 球墨铸铁产生皮下气孔的影响因素及预防 [J]. 铸造, 1994(7): 25-29.
- Wang Jingde. Influence factors and precautions of blowholes in nodular cast iron [J]. Foundry, 1994(7): 25-29. (in Chinese)
- [4] 李庆春. 铸件形成理论基础 [M]. 北京: 机械工业出版社, 1982: 192.
- Li Qingchun. Theoretical Foundation of Casting Formation [M]. Beijing: China Machine Press, 1982: 192. (in Chinese)
- [5] 周亘, 刘婉华. 球铁件皮下气孔产生原因及防止方法 [J]. 现代铸铁, 2008(5): 15-25.
- Zhou Gen, Liu Wanhua. Factors influencing pinhole formation of nodular iron castings and pinhole prevention measures [J]. Modern Cast Iron, 2008(5): 15-25. (in Chinese)
- [6] 孙渭清, 郭领军. 综述球铁件的皮下气孔 [J]. 铸造技术, 1996(4): 32-36.
- Sun Weiqing, Guo Lingjun. Summary of subsurface blowhole in nodular cast iron [J]. Foundry Technology, 1996(4): 32-36. (in Chinese)
- [7] 陆文华. 铸铁及其熔炼 [M]. 北京: 机械工业出版社, 1986: 94.
- Lu Wenhua. Cast Iron and Its Melting [M]. Beijing: China Machine Press, 1986: 94. (in Chinese)
- [8] 代金水, 罗能. 球墨铸铁导盘常见缺陷分析与对策(下) [J]. 金属加工, 2010(7): 67-69.
- Dai Jinshui, Luo Neng. Analysis and precaution on common pitfalls in nodular iron casting guide disc [J]. Machinist Metal Forming, 2010(7): 67-69. (in Chinese)
- [9] 徐建林. 球铁件皮下气孔影响因素的研究 [J]. 铸造, 2002(10): 614-617.
- Xu Jianlin. Study on influence factors on surface blowhole in ductile iron casting [J]. Foundry, 2002(10): 614-617. (in Chinese)
- [10] 徐锦峰, 翟秋亚, 袁森, 等. 过共晶球铁凝固过程中奥氏体的生长方式与形貌特征 [J]. 金属学报, 2003, 39(2): 136-139.
- Xu Jinfeng, Zhai Qiuya, Yuan Sen, et al. Morphology characteristic and growing manner of austenite in hypereutectic ductile iron during solidification process [J]. Acta Metallurgica Sinica, 2003, 39(2): 136-139. (in Chinese)
- [11] 孙少东, 徐松奎, 李健. 利用石墨化膨胀消除球铁皮下气孔的研究 [J]. 热加工工艺, 2004(5): 35-36.
- Sun Shaodong, Xu Songkui, Li Jian. Study on making use of graphitizing expansion to eliminate surface blowhole of ductile cast iron [J]. Hot Working Technology, 2004(5): 35-36. (in Chinese)

[责任编辑: 严海琳]