● 生产技术 Production Technology ●
DOI:10.16410/j.issn1000-8365.2020.08.015

铸铁孕育不良缺陷的形成机制及防止措施

程凤军，潘安霞，罗广思
(常州工业职业技术学院，江苏 常州 213164)

摘　要：对高镍奥氏体球墨铸铁碎块状石墨和灰铁 D 型石墨的形态进行研究分析，认为铸铁孕育不良缺陷与凝固过程中奥氏体和石墨的析出时机有直接关系：当奥氏体大量析出，而石墨析出严重滞后，易形成异常组织；当石墨优先析出的倾向增大，则易形成正常组织。球墨铸铁孕育不良会使石墨析出严重滞后，奥氏体析出时机提前，从而形成碎块状石墨、spiking 枝晶、反白口、白口等缺陷组织。在生产实践中，根据缺陷类型的不同，改变孕育量、孕育剂类型、孕育剂粒度、孕育方式、孕育温度或采用特殊孕育剂等强化孕育措施可有效防止缺陷的形成。

关键词：铸铁；组织缺陷；孕育

中图分类号：TG245　　**文献标识码**：A　　**文章编号**：1000-8365(2020)08-0767-04

Formation Mechanism and Prevention Measures of Inoculating Defects in Cast Iron

CHENG Fengjun, PAN Anxia, LUO Guangsi
(Changzhou Vocational Institute of Industry, Changzhou 213164, China)

Abstract: The morphology of fractal graphite and D-type graphite of high nickel austenite nodular cast iron were studied. The results show that the defects are directly related to the precipitation time of austenite and graphite during solidification. When a large amount of austenite precipitates, but the graphite precipitates seriously, it is easy to form abnormal structure. When the preference of graphite precipitation increases, it is easy to form normal structure. Poor instillation of nodular cast iron will lead to a serious lag in graphite precipitation and an earlier timing of austenite precipitation, resulting in the formation of broken graphite, Spiking dendrite, antileucorrhoea, leucorrhoea and other defects. In production practice, according to the different types of defects, changing inoculating amount, inoculating agent type, inoculating agent particle size, inoculating mode, inoculating temperature or using special inoculating agent can effectively prevent the formation of defects.

Key words: cast iron; microstructure defect; inoculation

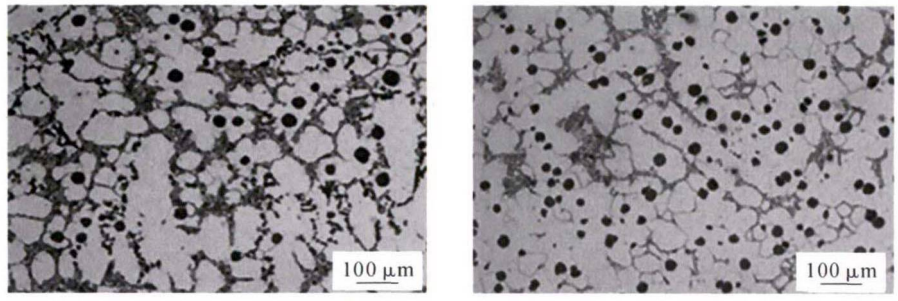
铸件除宏观铸造缺陷，如缩松、缩孔、气孔、夹杂物等还存在着微观组织缺陷[1]，这些缺陷有时严重影响铸铁件的使用性能，而这些组织缺陷的形成往往是凝固过程中的外界因素干扰或控制不当导致的，形成的原因较复杂。常见的铸铁主要包括灰铁和球墨铸铁，生产中经常出现异常组织，对这些异常组织形成原因的研究较多，而这些研究往往注重理论分析，对解决实际问题往往针对性不够强[2-4]。为防止铸铁孕育不良组织缺陷，有效控制铸铁孕育过程对铸造生产者来说是非常重要的。本文提出孕育不良缺陷的形成机制，并提出了有效提高孕育效果的具体措施，为生产实践提供了理论指导。

1　孕育不良缺陷的形成机制

图 1 为高镍奥氏体球墨铸铁的金相组织，从图 1(a)可看出，组织中除少量的正常石墨球外，其余为分布于奥氏体之间的细小的碎块状石墨，表明石墨明显滞后于奥氏体析出，石墨只能在奥氏体形成之后的残余液相中析出长大的，此时石墨生长空间受限，最终形成了这种细小的点状石墨及分布。图 1(b)是正常的奥氏体球墨铸铁组织，可以看出，石墨主要分布在奥氏体晶粒内部，表明石墨析出不滞后于奥氏体，而是优先或伴随着奥氏体在液相中自由析出长大的，从而形成了正常的球状石墨及分布。

灰铁属亚共晶铸铁，先析出相应为奥氏体，随后共晶石墨析出并充分长大，最终形成 A 型石墨。图 2 是灰铁 D 型石墨金相组织，如图 2(a)是正常壁厚铸

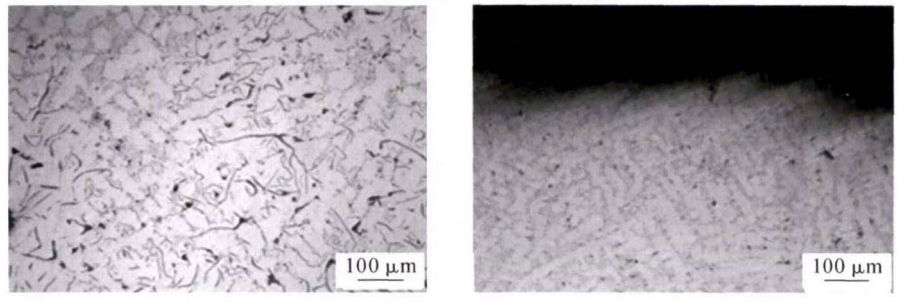
收稿日期：2020-05-09
基金项目：江苏省第五期“333 工程”第三层次培养对象基金资助项目；江苏省“青蓝工程”优秀教学团队基金资助项目
作者简介：程凤军(1975-)，江苏盐城人，博士，高级工程师. 主要从事金属材料和铸造技术方面的研究.
电话：0519-86335160, E-mail：cfjsub@163.com



(a)碎块状石墨　　(b)球状石墨

图 1 奥氏体球墨铸铁异常石墨和正常石墨形态

Fig.1 Abnormal graphite and normal graphite morphology of austenitic ductile iron



(a)D型石墨　　(b)边缘D型石墨

图 2 灰铁 D 型石墨

Fig.2 D type graphite of gray iron

件的 D 型石墨,结果表明,孕育不良时,石墨析出严重滞后,奥氏体枝晶优先大量析出,最终石墨只能在大量析出奥氏体残余液相中析出,形成了分布于奥氏体枝晶间的极细片状石墨。另外,奥氏体的析出能力和铁液过冷度有很大关系,过冷度越大,奥氏体优先析出能力越强,图 2(b)为铸件边缘 D 型石墨,这种边缘 D 形石墨就是大量奥氏体优先析出的结果,这种情况下即使良好的孕育也不能有效消除 D 型石墨。

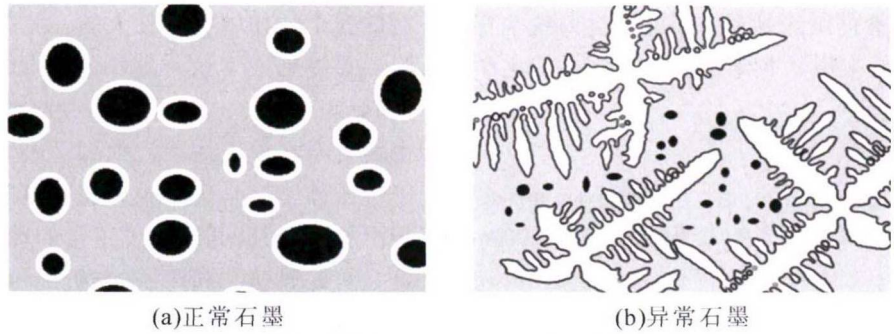
上述结果表明,铸铁凝固过程中奥氏体和石墨的析出时机对组织形态有重要影响。图 3 为球墨铸铁组织的形成过程的示意图,在孕育良好的情况下石墨相优先析出,随后与奥氏体共同生长,形成了分布于奥氏体中的球状石墨,如图 3(a)所示。但对于孕育不良等情况,石墨相不能优先析出,而奥氏体却能大量析出,滞后析出的石墨只能在奥氏体枝晶间的残余液相中生长,最终形成了分布于奥氏体枝晶间的点状石墨——碎块状石墨,如图 3(b)所示),如果残余液相中碳原子的石墨化能力极弱或碳化物元素的偏析,最终可在奥氏体枝晶间形成碳化物。

实际生产中无法定量表达石墨和奥氏体的析出的准确时机,但凝固过程中石墨优先析出的倾向增大,则易形成正常组织,反之,异常组织的形成倾向就越大。

2 孕育不良缺陷

2.1 碎块状石墨

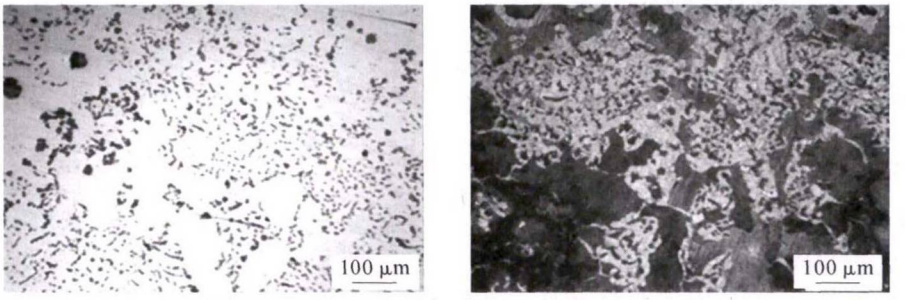
图 4 是一种铁素体球墨铸铁件的碎块状石墨金相,该石墨形态通常在厚大断面铸件中出现,因为厚大铸件冷却速度慢,孕育衰退严重,加上石墨在凝固过程中析出再溶解,难以有效形核长大,而奥氏体优



(a)正常石墨　　(b)异常石墨

图 3 球墨铸铁两相竞争机制示意图

Fig.3 Schematic diagram of two-phase competition mechanism



(a)石墨形态　　(b)基体组织

图 4 球墨铸铁碎块状石墨

Fig.4 Chunky graphite of ductile iron

先析出倾向大，由文献[5]及孕育不良缺陷形成机制可知，在球墨铸铁中，奥氏体大量优先析出，而石墨析出严重滞后可导致碎块状石墨的产生，碎块状石墨严重降低铸件的力学性能。

2.2 Spiking 枝晶

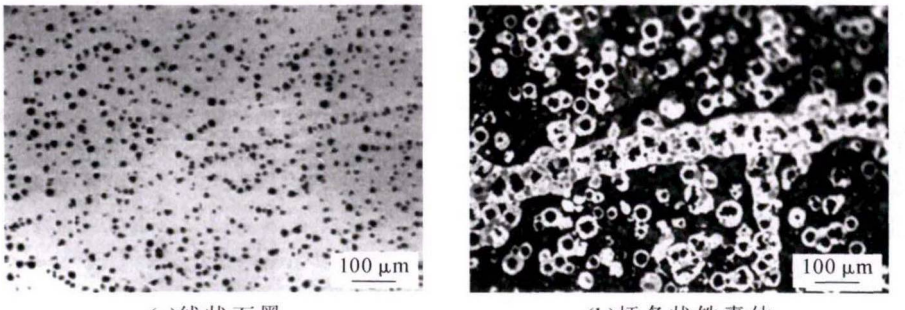
在生产中经常发现球墨铸铁冒口与铸件分离后，在冒口颈处呈灰黑色石状断口，金相分析发现部分石墨呈线状分布，如图 5(a)。图 5(b)为腐蚀后的基体形貌，其中有部分铁素体呈杆条状，其形成原因是在铁液凝固过程中冒口颈一直处于过热状态，孕育衰退严重，石墨不易析出，而奥氏体则会异常生长成杆条状的缓冷枝晶，凝固后期石墨在奥氏体枝晶间滞后析出，呈线性排列，且形成的石墨相对细小[7,8]，该组织一般不影响铸件的使用，但仍属于一种异常组织。

2.3 反白口

一种球墨铸铁铸件在加工过程中发现心部有亮斑，该部位硬度高，但铸件的表面硬度正常。图 6 是亮斑部位金相组织，为典型的球墨铸铁反白口组织，与正常白口组织的区别是碳化物呈针状。铸件在凝固过程中由于表面的冷却速度较快，析出正常数量的石墨球，而心部由于冷却速度较慢，根据孕育不良缺陷形成机制可知，在中心过热区，石墨析出再溶解，不易形核长大，奥氏体则有条件优先析出长大。由于石墨的严重滞后析出，再加上剩余液相中存在稀土、镁等碳化物元素偏析、孕育衰退等原因碳原子不能有效石墨化析出[6]，而部分以碳化物形式析出，从而形成了反白口缺陷。

2.4 白口

一种薄壁球墨铸铁件开裂，分析其金相组织发现球状石墨和碳化物共存，如图 7 所示，属于球墨铸铁白口组织。生产过程跟踪发现，当出铁温度较高、浇注时间较长时就会出现上述现象。分析原因是铸件壁厚较薄，冷却速度过快，在较大的过冷度之下，



(a)线状石墨　　(b)杆条状铁素体

图 5 球墨铸铁 Spiking

Fig.5 Spiking of ductile iron

图 6 球墨铸铁反白口

Fig.6 Reverse chill of ductile iron

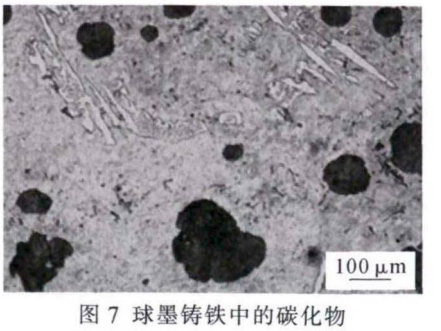


图 7 球墨铸铁中的碳化物

Fig.7 Carbides in ductile iron

奥氏体大量优先析出,石墨相对于奥氏体析出严重滞后,加上孕育效果不佳,部分碳原子不易析出稳定的石墨相,而更易形成碳化物。

3 防止措施

铁液凝固过程中使石墨析出倾向增大的措施对获得正常组织是有利的。虽然无法定量表达石墨的析出时机,但在化学成分、冷却速度等条件一定的情况下,良好的孕育可增加石墨非自发核心的数量,提高石墨析出能力,可有效防止缺陷组织的产生。生产过程中提高孕育效果,适当增大孕育量、多次孕育和滞后孕育等措施对防止孕育不良组织缺陷通常是有利的,但要针对具体情况进行孕育工艺的优化,才能取得良好的效果。

对于壁厚较大的铸件,凝固过程中铸件心部石墨在析出——溶解机制作用下,难以形核长大,孕育衰退严重,温度越高越明显,可能会引起碎块状石墨、反白口等缺陷。在冷却速度和冷却方式不变的情况下,增加孕育量和孕育次数等措施往往效果不明显,而适当降低孕育温度可增加心部石墨提前析出能力,从而有效防止缺陷的产生。

针对容易产生白口碳化物的铸件,在化学成分、冷却速度不变的条件下,增大孕育量可促进石墨化能力,防止产生碳化物。但对于白口倾向很大的薄壁件,即使增大孕育量也难以使石墨有效析出,而硅铋、硫氧等特殊孕育剂可大大提高石墨化能力,促进石墨相的提前析出,防止薄壁处碳化物的产生。

生产方式与孕育也有对应的关系,造型线生产一般是自动浇注机浇注铁水,要进行铁水倒包。传统的出铁槽孕育效果不佳,而倒包时温度较低,而且离浇注时间短,这种倒包孕育可以减少孕育次数,孕育量也可适当减少,孕育效果良好,对防止孕育不良缺陷和提高铸件质量的稳定性十分有效。

4 结论

(1)铸铁孕育不良组织缺陷形成与凝固过程中奥氏体和石墨的析出时机有直接关系,若由于孕育不良等原因,石墨析出严重滞后于奥氏体,易形成异常组织;若石墨优先析出的倾向增大,则易形成正常组织。球墨铸铁由于孕育衰退等原因,石墨析出倾向受阻,而奥氏体大量析出,易产生碎块状石墨、Spiking 枝晶、反白口等缺陷。

(2)球墨铸铁凝固过程中,在较大的过冷度之下,奥氏体大量优先析出,石墨相对于奥氏体析出严重滞后,如果孕育不良,会导致碳原子石墨化能力较弱,最终以碳化物形式析出,从而形成白口组织。

(3)在化学成分、冷却速度等条件一定的情况下,良好的孕育可增加石墨非自发核心的数量,提高石墨析出能力,可有效防止缺陷组织的产生。生产过程中一般通过多缺陷产生的具体原因,对孕育剂种类、孕育方式、孕育温度、孕育剂粒度等都工艺措施进行针对性改善,可以有效防止缺陷的产生。

参考文献:

[1] 杨明月,叶小龙,麻先银. 球墨铸铁金相组织缺陷原因及防止方法概述[J]. 现代铸铁,2017(3): 65-70.

[2] Haruki Itofuji, Ayumi Masutani. Nuclear an growth behaviour of chunky graphite in heavy section casting [J]. JFS, 2004, 76(2): 98-106.

[3] Hideo Nakae, Sanghoon Jun, Ho-Chul Shin. Formation mechanism of chunky graphite and its preventive measures [J]. Mater Sci J Technol, 2008, 24(3):289-295.

[4] 周继扬, Engler S. 厚壁球铁件中的碎块状石墨 [J]. 铸造,1997(11):10-15.

[5] 程凤军,高顺,莫俊超,等. 球墨铸铁中碎块状石墨的形成原因及防止措施[J]. 现代铸铁,2015(3):29-34.

[6] 陈数平. 对球墨铸铁反白口缺陷的再认识[J]. 铸造设备与工艺,2015(3):48-49.

[7] 徐锦锋,孟冬波. 球墨铸铁凝固及组织的形成 // 第八届全国铸铁及熔炼学术会议暨先进球化处理方法研讨会论文集[C]. 中国机械工程学会,2010(9):250-253.

[8] 周继扬. 球墨铸铁中奥氏体枝晶及球墨铸铁的偏析 [J]. 现代铸铁,2003(1):1-5.

杭州文特机电有限公司

热处理炉、加热炉、工业自动化工程、环保节能工程、机电设备的设计、制造、加工、安装、技术开发、技术咨询、技术服务。工业自动化设备、仪器仪表、工业炉窑配件、计算机等的生产、批发、零售。

地址:杭州市西湖区万塘路 262 号 6 号楼 5-65 室
厂址:长兴县林城镇午山岗开发区
联系人:丁为兵
电话:15088362822
传真:0572-6087688
邮箱:dwb150@163.com