DOI:10.16410/j.issn1000-8365.2020.08.011

球墨铸铁件异常灰斑组织的研究

邓　晗,杨志刚,王　瑞,陈　璐
(中车戚墅堰机车车辆工艺研究所有限公司,江苏 常州 213011)

摘　要:球墨铸铁件厚大部位在特定情况下易产生一种条带状灰斑缺陷,该缺陷会显著降低材料的硬度。通过扫描电镜(SEM)和能谱分析(EDS)等方法对异常灰斑的金相组织和微区成分进行了分析。结果表明:低于4.3%的碳当量、成分偏析和厚大且相对封闭的铸件结构是形成这一缺陷的主要原因。在这些条件下易形成缓冷枝晶,Si元素在缓慢冷却的奥氏体支晶内部偏析并富集,促进形成铁素体;而Mn元素和Cu元素在枝晶附近及外部偏析并富集,促进珠光体形成。两种基体组织的硬度差使加工后出现很大的色差,形成宏观的灰斑形貌。

关键词:球墨铸铁;灰斑;偏析

中图分类号:TG245　　**文献标识码**:A　　**文章编号**:1000-8365(2020)08-0753-03

Research on Abnormal Grey-speckle Structure of Ductile Iron

DENG Han, YANG Zhigang, WANG Rui, CHEN Lu
(CRCC Qishuyan locomotive &rolling stock technology research institute Co., Ltd., Changzhou 213011, China)

Abstract: Under certain conditions, most of the thickness of nodular cast iron was prone to strip gray spot defects, which would significantly reduce the hardness of the material. The microstructure and microregion composition of abnormal gray spots were analyzed by SEM and EDS. The results show that carbon equivalent of less than 4.3%, composition segregation and thick and relatively closed casting structure are the main causes of this defect. Under these conditions, slow-cooling dendrites are easy to form. Si elements are isolated and enriched in the slow-cooling austenite branchlets to promote the formation of ferrite. Mn and Cu are separated and enriched near and outside the dendrite to promote the formation of pearlite. The hardness difference of the two kinds of matrix makes great color difference after processing and forms the macroscopic gray spot morphology.

Key words: ductile iron; black spot; segregation

薄壁球墨铸铁件由于冷却速度快,容易产生冷隔、气孔等缺陷,因此需要保证铁液有较好的流动性,以提高铸件的充型能力,减少铸造缺陷。螺线试验表明,碳当量在4.6%~4.7%时铁液的流动性最好[1],因此薄壁球铁件的碳当量多按此原则设计。但铸件厚大部位冷却速度慢,按此成分设计的铸件极易产生石墨漂浮的现象。生产中主要采取降低碳当量和浇注温度等措施[2],减少液态铁液中先共晶石墨的形成、长大与转移,从而达到控制石墨飘浮的目的。但实际生产中发现,当碳当量降低至亚共晶成分(CE≤4.3%)以下时,铸件厚大部位在特定情况下易产生一种条带状灰斑缺陷,该缺陷会显著降低材料的硬度。本文从某大缸径球铁活塞裙在生产过程中遇到的实际问题出发,研究球墨铸铁件厚大部位条带状灰斑缺陷的形成机理,并提出相应的解决对策。

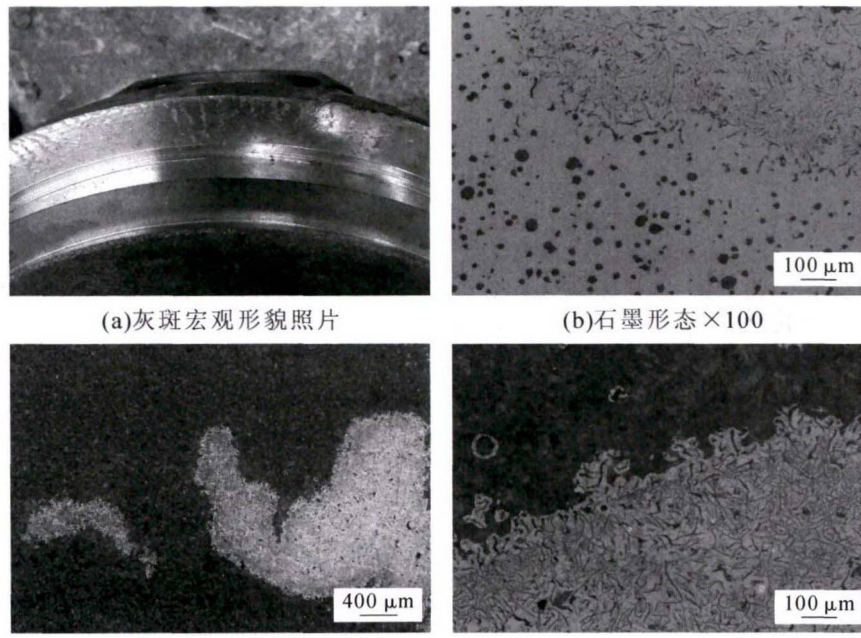
1　问题描述

球铁活塞是柴油机核心零部件之一,大缸径球铁活塞裙的主体结构复杂,外圆起导向作用,为薄壁圆筒形结构,壁厚约为13 mm,但头部与柴油机燃烧室的高温高压气体长期接触,需要有较高的强度,因此设计较为厚大,其最大壁厚约为90 mm。该产品材质为QT700-2,试制过程初期碳当量设定为4.5%~4.6%,

浇注温度1 360~1 380 ℃。铸件加工后,头部厚大部位出现大面积黑斑,将实物解剖进行金相分析发现为石墨漂浮。为了防止石墨漂浮,将碳当量调整为4.1%~4.3%,如表1所示。铸件加工后其头部出现大量灰色带状组织,沿铸件表面向里延伸,分布深度约30~40 mm,缺陷区域的硬度为100~150 HB,远低于其铸态的正常硬度值(225~305 HB),如图2所示。对其金相组织进行观察发现,灰白色带状异常区域的石墨形态为片状,基体组织为铁素体。而正常区

收稿日期:2020-05-18

作者简介:邓　晗(1986-),土家族,湖北宜昌人,工程师.主要从事铸铁材料及成型工艺方面的工作.
电话:15106123738,E-mail:493856266@qq.com

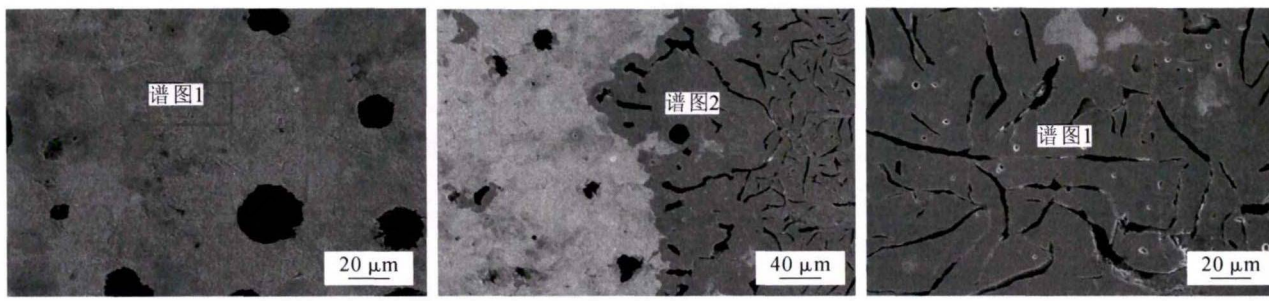


(a)灰斑宏观形貌照片　(b)石墨形态×100

(c)基体组织 ×25　(d)基体组织×100

图 1 灰斑的宏观形貌及金相组织

Fig.1 Macrostructure and Microstructure of black spots



(a)灰斑外部区域　(b)过渡区域　(c)灰斑内部区域

图 2 灰斑附近的 SEM 像及 EDS 选取位置

Fig.2 SEM images and EDS selection locations near black spots

表1 调整后铸件成分 w(%)

Tab.1 Composition of casting after adjustment

编号	C	Si	Mn	P	Mg	Cu
1	3.40	2.38	0.49	0.025	0.037	0.50
2	3.45	2.28	0.46	0.024	0.038	0.47

域的石墨形态为球状,基体组织为珠光体。异常区域与正常区域之间有清晰分界线,分界线附近的石墨形态为蠕虫状。

2 灰斑的形成过程及原因分析

2.1 灰斑中的片状石墨

石墨形态的演变本质上由早期的生长方式决定。采取降低碳当量和浇注温度等措施可有效防止铸件厚大部位出现石墨漂浮。但当铁水中的碳当量降低至亚共晶成分以下时,奥氏体将成为共晶反应的领先相，靠近型腔的铁水冷却速度相对较快,铸件表面会快速结壳，而当型腔受热温度升高后,对铁液激冷作用减弱,奥氏体可以早期形成的铸件外壳为基底快速向铸件中心生长，形成发达的奥氏体枝晶[2]。奥氏体(111)面与片状石墨(000 1)面存在共格关系[3],因此在奥氏体枝晶向铸件中心生长的过程中,石墨片层结构(000 1)面可以奥氏体(111)面为衬底进行结晶,当此过程受到扰动较小时,两者可相互促进形成深达数十毫米的奥氏体-片状石墨带。

2.2 灰斑中的基体组织

大量研究表明，大多数石墨化元素，如 Si、Al、Cu、Ni 等主要分布在共晶团的奥氏体中，在共晶团的边界较少,产生反偏析(Kef>1),与之相反,大多数反石墨化元素，如 Mn、Cr、Mo、V 以及 Mg、Ce 等元素常富集在最后凝固的残存液体中，即共晶团边界上的含量要比共晶团内高,产生正偏析[4]。对灰斑的外部、过渡以及内部区域进行了能谱分析,如图2。

经归一化处理后，灰斑及其附近区域主要化学成分为如表 2 所示。其中灰斑外部区域 Mn 元素的质量分数为 0.85%,Cu 元素的质量分数为 1.09%,

表2 灰斑附近的基体组织成分 w(%)

Tab.2 Composition of matrix structure of gray spots

位置	Fe	Si	Mn	Cu
灰斑外部区域	94.06	2.13	0.85	1.09
灰斑内部区域	97.2	2.43	0.18	0.21
过渡区域	97.26	2.43	—	0.33

两种合金元素均发生偏析，超出铸件平均质量分数的两倍，这两种元素均有强烈的促进珠光体形成的作用，因此形成了100%的珠光体基体。灰斑内部区域正好相反，基体组织Si含量为2.43%，较正常含量高出0.13%，Mn含量为0.18%，较正常含量低0.30%。Si是强烈促进石墨化的元素，而Mn是稳定珠光体的元素，由于两种元素的偏析，使奥氏体枝晶内部的碳充分析出，形成了接近100%的铁素体基体。

2.3 消除灰斑缺陷的对策

控制合理的碳当量。碳当量低于4.3%时，奥氏体成为共晶反应的领先相，由于石墨与奥氏体的共格关系，奥氏体枝晶生长的同时促进了片状石墨的形成。对此类铸件，应将碳当量控制在4.3%~4.4%。当铸件碳当量在共晶点附近，液态时析出的石墨数量较少，难以出现石墨漂浮现象，同时可有效抑制先共晶奥氏体的产生，从而达到防止灰斑的目的。

抑制成分偏析。高牌号的球墨铸铁合金含量较高，Si、Al等促进石墨化元素的负偏析和Mn、Cr等反石墨化元素的正偏析使奥氏体枝晶内部石墨化程度加强，是形成灰斑铁素体基体的主要原因。

优化铸造工艺。由于铸件厚大部位铁水凝固时间长，易形成粗大的奥氏体枝晶，铸件顶部或半封闭的厚大部位易出现灰斑。而且铁水在铸件顶部或半封闭的结构中凝固受到的扰动较小，有利于枝晶生长和成分偏析。对此类铸件，可设置溢流冒口改善凝固过程中的元素偏析，使基体组织均匀化。利用流动的高温铁水对最早接触冷铁形成的激冷层进行重熔，从而扰乱奥氏体基体的正常生长，并使溶质再分配，使组织的成分均匀化。

3 结论

(1)厚大球墨铸铁中条带状灰斑缺陷的形成主要有3方面的原因：低于4.3%的碳当量、成分偏析和厚大且相对封闭的铸件结构。

(2)亚共晶成分下的厚大球墨铸铁件，易形成粗大的奥氏体枝晶。在一定条件下，Mn、Si等元素会发生严重偏析，产生条带状铁素体区域，使铸件硬度降低，在成分设计中应适当控制合金含量的加入量，抑制偏析。

(3)厚大球墨铸铁件成分设计中应将碳当量控制在4.3%~4.4%，在铸造工艺上应采取措施抑制缓冷枝晶生长，减少灰斑缺陷的产生。

参考文献：

[1] 张伯明主编. 铸造手册(铸铁卷)第二版[M]. 北京：机械工业出版社，2003.

[2] B Kaoui1, M Noureddine1, R Nassif. Phase-field modelling of dendritic growth behaviour towards thecooling/heating of pure nickel[J]. VOLUME 6, NUMBER 1.

[3] 姜志超. 球墨铸铁铸造新工艺新技术与产品质量缺陷控制实用手册[M]. 北京：北方工业出版社，2016.

[4] 陈丹，赵岩，刘天佑. 金属学与热处理[M]. 北京：北京理工大学出版社，2017.

(上接第748页)

原铁液，部分中频炉间歇式调质的特点，形成了大批量生产与单件小批量生产方式兼容的特点，对于市场的覆盖范围极宽。而且品质优异竞争力强。可使综合管理成本下降近30%。

(4)原铁液的大量集中连续或熔炼，便于实现铸件生产销售的智能化管理及粉尘集中治理系统的智能化管理。

(5)特别适用于国内有铸造产能的中小型钢企的低成本转型升级，在大幅减少设备投资的前提下向集约化绿色铸造企业转型而且铸件产品性价比优势特别突出。节能减排方面更加明显。

(6)在未来发展过程中，随着装备制造业个性化生产的需求增加，本工艺更能体现出优势；在打造高端精密机床部件产业集群化区域的同时，其带动形成的综合社会效益更加明显。

8 结束语

电弧炉中频炉双联熔炼工艺可生产高附加值精密机床件或其他类似高端铸铁件，其绿色节能特点显著是未来绿色节能智能铸造新工艺之一。

参考文献：

[1] 芮争家. 铸铁及其熔炼技术 [M]. 北京：化学工业出版社出版，2010.

[2] 杨清顺. 电弧炉熔炼铸铁的机械性能 [J]. 铸造技术，1984(2)：63-67.

[3] 吴军，张有功，孙涛. 采用1.5 t中频炉浇注4.4 t灰铸铁件的生产方法[J]. 现代铸铁，2019(6):16-18.

[4] 王锋. 灰铸铁件的生产[J]. 现代铸铁，2019(1):17-21.