

• 工艺技术 Technology •

DOI:10.16410/j.issn1000-8365.2019.11.010

球墨铸铁曲轴铸造孔洞缺陷成因分析

胡波¹,余宁¹,李德江¹,田迎新²,曾小勤¹

(1. 上海交通大学材料科学与工程学院,上海 200240 2. 上海圣德曼铸造有限公司,上海 201805)

摘要:球墨铸铁曲轴铸件除了要求高强度和高耐磨性,含油道的曲轴铸件还要求高的气密性。曲轴中可能出现的孔洞缺陷易成为汽油泄漏的通道,因此必须避免孔洞类缺陷。本文对曲轴铸造过程中容易出现的孔洞类缺陷如缩松、皮下气孔的形成原因进行了分析,根据汽车用球墨铸铁曲轴油道边缘孔洞的缺陷种类探索了形成机理,并结合生产情况提出相应优化措施,生产实践证明优化措施的有效性。

关键词:曲轴;球墨铸铁;缩松;皮下气孔

中图分类号: TG255

文献标识码: A

文章编号: 1000-8365(2019)11-1174-05

Causes Analysis of Casting Hole Defects in Ductile Iron Crankshaft

HU Bo¹, YU Ning¹, LI Dejiang¹, TIAN Yingxin², ZENG Xiaoqin¹

(1. School of Materials Science and Engineering, Shanghai Jiao Tong University, Shanghai 200240, China; 2. Shanghai Sandmann Foundry Co., Ltd., Shanghai 201805, China)

Abstract: Not only high strength and high wear resistance were required for ductile iron crankshaft castings with oil channel, but also high air tightness was required. The possible hole defects in crankshaft was easy to become the leakage channel of gasoline, so the hole defects must be avoided. The cause of formation of hole defects in crankshaft casting is analyzed, such as shrinkage porosity and subcutaneous pores, and probes into the formation mechanism of hole defects in crankshaft oil channel edge of automobile nodular cast iron. The production practice has proved the effectiveness of the optimization measures.

Key words: crankshaft; ductile iron; shrinkage porosity; subcutaneous blowhole

汽车曲轴是发动机中最重要的零部件之一,它将连杆传来的力转化为转矩并驱动发动机工作^[1]。曲轴工作条件恶劣,承受弯扭应力和摩擦力的作用,因此对发动机曲轴提出较高要求。曲轴的工作环境决定其不但形状复杂,而且选用的材料必须具备良好的综合性能。曲轴材料的选用首先需要考虑服役安全性、质量稳定性和可靠性,再考虑加工工艺的可行性、轻量化设计要求、节能环保要求、经济性等方面^[2]。目前,国内外曲轴材料选用最普遍的是球墨铸铁和锻钢,由于球墨铸铁的轻量化和经济性,曲轴用材料优先选用球墨铸铁。然而在实际生产过程中,球墨铸铁曲轴可能会出现致命的孔洞类缺陷,这些缺陷的存在会大大降低曲轴寿命。因此,分析常用球墨铸铁曲轴铸造过程中可能产生的孔洞类缺陷的形成机理,并提出相应改进措施具有重

大经济意义。

1 常见孔洞类缺陷成因分析

1.1 缩松

缩松分为宏观缩松和显微缩松^[3],其表面不光滑、孔内偏暗,而且形状不规则。缩松一般会出现在铸件最后凝固的区域,其中宏观缩松形成于凝固早期,厚壁处形成枝晶,中心区域的铁液由于抽吸作用被吸走,最终形成宏观缩松。显微疏松一般出现在粗大枝晶与石墨-奥氏体共晶团的交界处^[4]。凝固后期,铁液被粗大枝晶分割成一个个小的熔池,当石墨化带来的膨胀量无法抵消液态收缩量和凝固收缩量时,便会在最后的熔池处形成显微疏松。

缩松的形成与化学成分、浇注温度、砂型紧实度以及铸造工艺设计等有关^[5]。碳当量过低时,石墨化产生的体积膨胀不够;流动性差不利于补缩,因而易形成缩松。浇注温度对缩松的形成有两方面作用,一方面浇注温度升高利于补缩,抑制缩松的形成;另一方面,浇注温度过高增加液态收缩量,促进缩松形成。砂型紧实度太低,石墨化膨胀将型腔撑大,进而

收稿日期: 2019-07-26

作者简介: 胡波(1995-),贵州务川人,硕士生,研究方向:合金铸造工艺优化问题。电话: 18217522350,

E-mail: 1969220462@qq.com

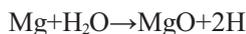
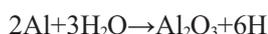
无法利用石墨化膨胀作用来进行自补缩。浇注系统设计不合理无法发挥补缩作用。

国内外消除缩松的方法有^[6-9]:控制好铁液含碳量以及稀土镁含量;改善浇注温度;对型砂紧实度以及砂箱刚度进行适当提升;合理设计冒口并在适当位置设置冷铁。

1.2 皮下气孔

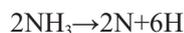
皮下气孔在球铁中较为常见,其直径多在0.5~3.0 mm。皮下气孔形成于铸件表皮之下,机加工后可见,多为椭圆状,内壁光滑。形成皮下气孔的气体主要有H₂、N₂,多数人认为是金属与铸型或型芯反应产生的反应性气体。

(1)H₂ 在湿型砂铸造中,产生气孔的氢主要来源于铁液与湿砂型中的水蒸气反应:



其中Al₂O₃和MgO为单原子氢形成氢气孔提供形核位点,促进皮下气孔的形成。Mg是球化处理的关键元素,但残余镁含量增加,皮下气孔产生的可能性也增加。因此,在不影响球化处理的前提下,应尽量减少残余镁含量。Al一般来自于孕育剂,在孕育剂选择上应严格把控。水分是湿型砂中必不可少的成分,无法直接去除。可利用煤粉或涂层来增加砂型表面光洁度,阻挡水分与铁液直接接触。同时煤粉受热分解起还原作用,可以阻碍活泼金属元素与水蒸气反应,抑制皮下气孔的形成。

(2)N₂ 皮下气孔中的氮主要来源于树脂类材料。型芯材料多为呋喃树脂,结合乌洛托品作固化剂使用,这两种材料均含有氮。呋喃树脂在高温下分解产生氮气,进而产生氮:



氮气孔多为椭圆形、梨形,气孔周围会有宽度不等的灰亮带。

各研究者给出的消除皮下气孔的方法有:控制铁液成分,尤其控制含碳量,含硫量,残余稀土和残

余镁含量;采用干燥的金属炉料和孕育剂,并严格控制型砂含水量^[10];利用涂层阻止氮进入铁液。

2 球墨铸铁曲轴孔洞缺陷成因分析

2.1 铸造孔洞类缺陷

表1为球墨铸铁曲轴的化学成分,图1(a)为球墨铸铁曲轴的整体模型,标注区域内易产生孔洞类缺陷。将模型剖开如图1(b),在油道边缘圆圈内常出现孔洞类缺陷,对实际生产的曲轴铸件进行解剖如图1(c),可以看到在油道边缘圆圈内出现了孔洞缺陷。主轴颈空心部位由热芯成型,采用呋喃树脂砂,固化剂为乌洛托品。

表1 球墨铸铁曲轴化学成分 w(%)

Tab.1 Chemical composition of ductile iron crankshaft											
C	S	Si	Mn	P	Cr	Sn	Ti	Cu	Mg	Fe	
3.70	0.01	2.45	0.32	0.05	<0.10	0.02	0.02	1.15	0.04	other	

2.2 孔洞缺陷观察

对含有孔洞缺陷的区域取样观察如图2所示,孔洞形态主要有两种:枝晶状和椭圆状。结合球墨铸铁凝固特点和型芯发气问题,判定孔洞缺陷有两类:枝晶状孔洞应是缩松缺陷,椭圆状孔洞应是皮下气孔。

2.3 缩松缺陷分析

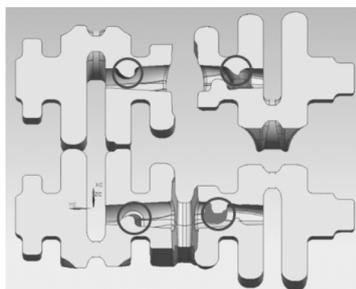
2.3.1 缩松两种形成机制

缩松多形成于铸件热节部位。如图3,当合金成分确定后,合金凝固区间不变,温度梯度越低,铁液越倾向于糊状凝固。热节部位散热慢,温度梯度低,因此其糊状凝固尤其明显,易形成缩松缺陷。

亚共晶球墨铸铁热节部位的凝固过程^[4]如图4:奥氏体枝晶自薄壁向热节中心生长直至相互接触,随后枝晶继续长大并伴随石墨的析出。薄壁处枝晶生长较快,凝固时产生体积收缩,将中心铁液抽吸至薄壁处填补。奥氏体枝晶对铁液有阻滞作用,常常需要几个大气压才能使铁液进入,大大降低补缩能力。中心区域凝固较晚,得不到补缩易形成缩松缺陷。



(a)曲轴整体图



(b)曲轴剖面图



(c)油道边孔洞类缺陷

图1 曲轴孔洞类缺陷

Fig.1 Hole defects in crankshaft

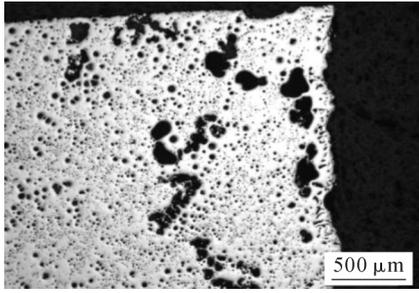


图2 孔洞缺陷金相全貌图

Fig.2 Metallographic of hole defects

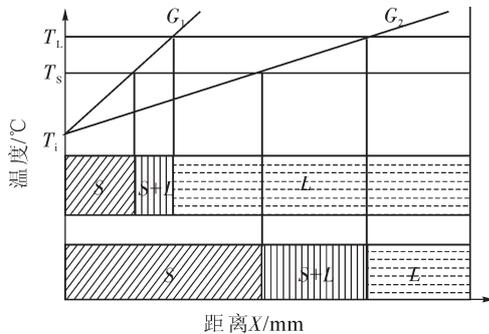


图3 温度梯度对凝固方式的影响

Fig.3 Effect of temperature gradient range on solidification mode

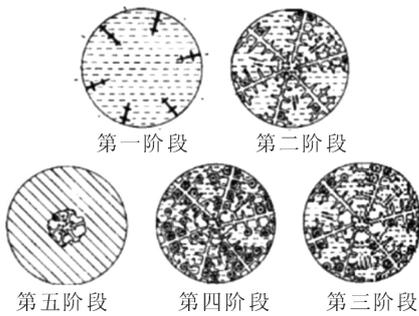


图4 亚共晶球墨铸铁中缩松形成示意图

Fig.4 Shrinkage cavity formation diagram in hypoeutectic ductile iron

对于过共晶球墨铸铁来说,缩松形成机制有所不同。如图5,张蕾等^[11]采用元胞自动机对过共晶球墨铸铁中石墨和奥氏体枝晶生长过程进行模拟。由

于实际条件下过冷度较大,过共晶球墨铸铁中仍然会有初生奥氏体析出。当温度低于液相点时,初生石墨优先析出,随着过冷度增大,初生奥氏体枝晶也开始析出。初生石墨长大,会在其周围析出奥氏体将其包围,这种包覆粗大石墨颗粒的奥氏体即为晕圈奥氏体^[12]。此后,晕圈奥氏体以枝晶生长方式继续长大。凝固后期,较大的初生石墨颗粒和奥氏体枝晶对铁液起阻滞作用,使补缩效果大大降低,促进缩松形成。石墨析出发生膨胀,可以抵消部分液态收缩量,抑制缩松形成。但若铸型刚度不够,石墨化产生的膨胀力将型壁往外推动,使型腔扩大,铁液无法充满整个型腔,反而促进缩松形成。

2.3.2 缩松形貌分析

选取其中最具有代表性的枝晶状孔洞进行分析,如图6(a)所示孔洞不深,孔内似有组织填充。经腐蚀后,如图6(b)所示孔洞右侧的奥氏体清晰可见,初生石墨周围的奥氏体外壳直径约为石墨球的1.6~2.2倍^[11],实际情况与之相符。根据实际情况勾勒出如图6(c)的奥氏体枝晶:包覆初生石墨球的晕圈奥氏体相连形成枝晶臂,继续生长出二次枝晶,同时析出石墨,但是颗粒较小。该孔洞犬牙交错的形貌正是奥氏体枝晶生长过程中留下的。周围铁液以奥氏体枝晶的形式凝固,中心部位得不到补缩,最后凝固时与相连枝晶有细微缝隙,缝隙围成枝晶状轮廓。如图6(d)枝晶状轮廓方框内有明显组织凝固的痕迹,同时圆圈内也有石墨析出。这是典型的缩松形态,缩松内壁不光滑,常有细小组织生长于其中。因此,样品中该类枝晶状孔洞是铸造过程中产生的缩松缺陷。该产品的碳当量为 $CE=[C+0.3(Si+P)+0.4S-0.03Mn]\%=4.44\%$,且组织中具有典型的初生石墨和晕圈奥氏体,因此该缩松缺陷的形成机制符合典型的过共晶球墨铸铁中缩松的形

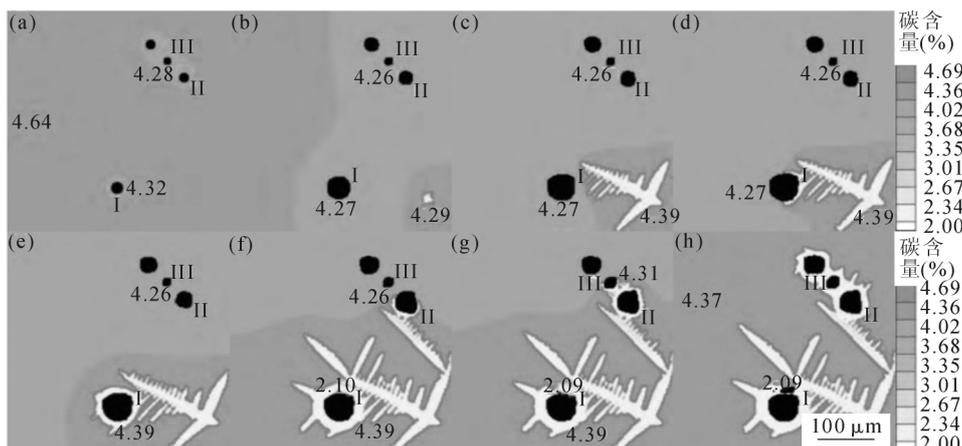


图5 过共晶球墨铸铁中石墨与奥氏体枝晶相互作用生长

Fig.5 Graphite interacts with austenite dendrites in hypereutectic ductile iron

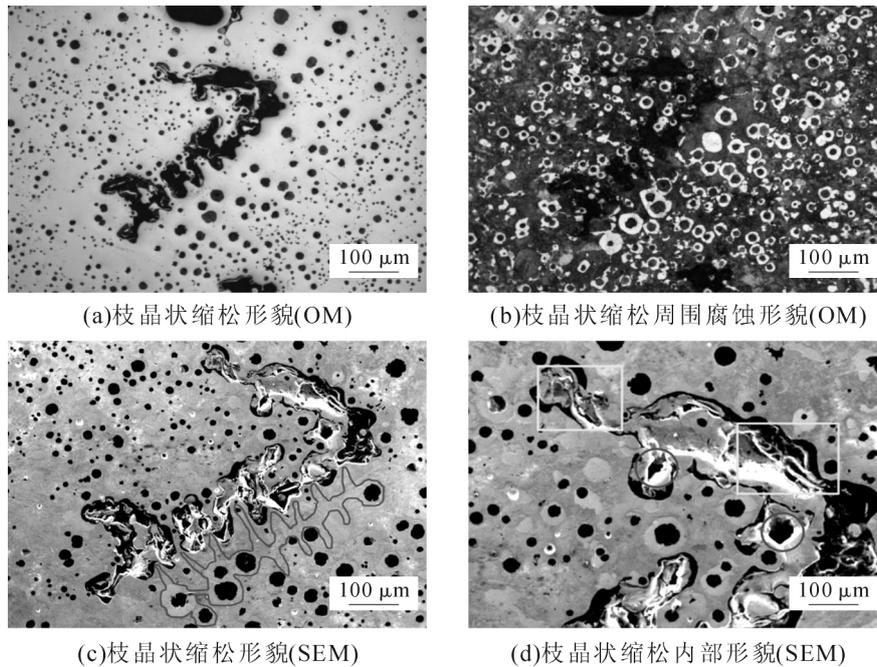


图6 枝晶状缩松形貌

Fig.6 Morphology of dendritic shrinkage cavity

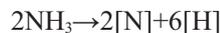
成机制。

2.4 皮下气孔分析

产生气孔的位置在铸件内表皮 2 mm 以内,所以该气孔可归为皮下气孔一类。铸造采用发气量较大的呋喃树脂型芯,是产生该气孔的主要原因。

2.4.1 氮气孔形成机制

呋喃树脂和乌洛托品含氮量较高,高温浇注时型芯材料受热分解产生 NH_3 。当型芯周围温度继续升高时,由于铸件中空气较少,氮气会直接分解产生氮:



氮在高温下扩散进入铁液表面,在浓度梯度作用下不断向内扩散,最终在表层 1~8 mm 范围内富集。氮原子在铁液中的溶解度随温度升高而增大,最大可达 0.04%。当铁液温度降低时,氮原子的溶解度降低并以气体的形式析出。当达到气泡形核条件

时,氮气分子相互聚集以微小氧化物或缩松作为形核位点形核长大。铁液凝固时,氮的溶解度显著降低,生成的氮气无法排出,封闭于铸件内,最终形成皮下气孔。

2.4.2 氮气孔形貌分析

典型氮气孔形状不规则,大多数近似椭圆形和梨形。图 7(a)中气孔边缘一圈发亮,内部不像氢气孔如球面般光滑,而是有些许起伏。孔洞内部存在纹理,且部分位置比较粗糙。这些特征与典型的氮气孔特征一致。图 7(b)所示孔洞是气孔与枝晶状缩松的结合,这是氮气以缩松为形核位点形核长大的结果。结合生产条件可以判定:该皮下气孔是呋喃树脂型芯含氮量过高,而防护措施不完善所导致的氮气孔。

3 结论

(1)球墨铸铁曲轴油道边缘孔洞缺陷有枝晶

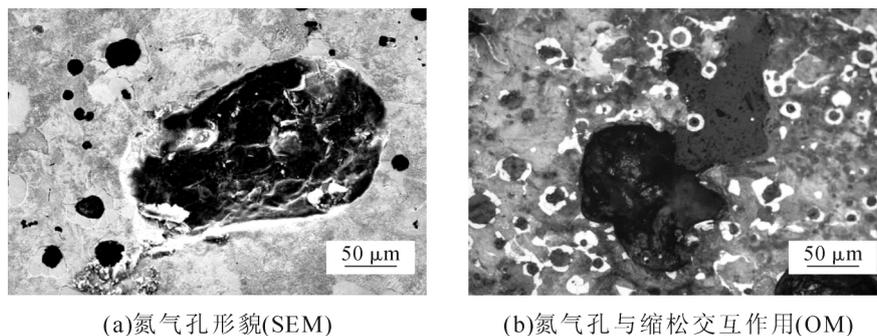


图7 氮气孔形貌

Fig.7 Morphology of nitrogen pore

(下转第 1182 页)

- [3] 杨智强, 起华荣, 郭红星, 等. 国内铸造工艺数值模拟研究及应用现状[J]. 铸造技术, 2017(9):2072-2075.
- [4] 孙治国. ProCAST 软件在铸造模拟中的应用 [J]. 计算机光盘软件与应用, 2014(20): 77-77.
- [5] Pang Y, Dong X, Liu D, et al. Influence of cooling conditions in casting Cu-Ni alloy based on numerical simulation [J]. Journal of Wuhan University of Technology-Materials Science Edition, 2010, 25(1): 68-72.
- [6] 李日. 铸造工艺仿真 ProCAST 从入门到精通 [M]. 中国水利水电出版社, 2010.
- [7] 张敏华, 屈银虎, 梁涛. ProCAST 在水龙头罩铸造模拟过程中的应用[J]. 铸造技术, 2015, 36(4):1055-1057.
- [8] Lu S L, Xiao F R, Zhang S J, et al. Simulation study on the centrifugal casting wet-type cylinder liner based on ProCAST [J]. Applied Thermal Engineering, 2014, 73(1):512-521.
- [9] Liu H, Fu P, Kang X, et al. Formation mechanism of shrinkage and large inclusions of a 70 t 12Cr2Mo1 heavy steel ingot[J]. China foundry, 2014, 11(1):46-51.
- [10] Zhang L, Rietow B, Thomas B G, et al. Large inclusions in plain-carbon steel ingots cast by bottom teeming [J]. ISIJ International, 2006, 46(5): 670-679.
- [11] 杨敬伟. 大型铸钢件冒口补浇的数值模拟 [J]. 铸造技术, 2018, 39(10): 2262-2264.

(上接第 1177 页)

状和椭圆状两种形态, 其中枝晶状孔洞为缩松, 椭圆状孔洞为氮气孔。

(2)缩松形成机制符合过共晶球墨铸铁中缩松的形成机制, 心部位置温度梯度较低, 糊状凝固严重使得该处易形成缩松缺陷。建议设置冷铁加速心部区域的冷速从而消除缩松。

(3)氮气孔是含氮量高的型芯高温分解产生的氮渗入铁液引起, 建议于型芯表面包覆高温致密涂层阻碍氮的扩散。

参考文献:

- [1] 郭力, 李东超. 国内外曲轴磨削加工工艺发展趋势[J]. 精密制造与自动化, 2013(1):48-51.
- [2] 李海国, 路俊峰. 发动机曲轴材料及其发展 [J]. 汽车工艺与材料, 2012(9):45-47.
- [3] 侯超, 任为, 宋佳健, 等. 显微缩松对铁素体球墨铸铁低温韧性的影响[J]. 铸造, 2019, 68(2):123-127.
- [4] 卢彬彬, 许景峰, 李永刚. 球墨铸铁缩松浅析[J]. 中国铸造装备与技术, 2017(1):46-48.
- [5] 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.
- [6] 赵娅. 发动机曲轴铸造缺陷的原因分析与优化[J]. 热加工工艺, 2016, 45(8):247-249, 252.
- [7] 王树宝, 郭文申, 姜霄云. 球墨铸铁典型缩松缺陷的解决[J]. 铸造, 2017, 66(23):56-58.
- [8] 谢高峰, 王晓靖. 控制球墨铸铁件缩孔缩松缺陷的新方法[J]. 铸造工程, 2016(6):34-36.
- [9] 衣社新, 洪美琴. 球墨铸铁轴箱铸件的铸造工艺设计[J]. 铸造, 2014, 63(8):852-855.
- [10] 汪丽红. 球墨铸铁常见质量缺陷及防止措施探讨 [J]. 科技经济导刊, 2016(33):65.
- [11] 张蕾, 赵红蕾, 朱鸣芳. 球墨铸铁凝固显微组织的元胞自动机模拟[J]. 金属学报, 2015(2):148-158.
- [12] 徐锦锋, 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(2):136-139.

技术资料邮购

《铸件均衡凝固技术及应用实例》

本书由西安理工大学魏兵教授编著。共8章: 1、铸铁件均衡凝固与有限补缩; 2、铸铁件冒口补缩设计及应用; 3、压边浇冒口系统; 4、浇注系统大孔出流理论与设计; 5、铸件均衡凝固工艺; 6、铸钢、白口铸铁、铝、铜合金铸件的均衡凝固工艺; 7、浇注系统当冒口补缩设计方法; 8、铸件填充与补缩工艺定量设计实例。全书320页。

特快专递邮购价: 226元。

邮购咨询: 李巧凤 电话/传真: 029-83222071 技术咨询: 13609155628