

# 灰铸铁气缸体氮气孔缺陷的分析及解决措施

李孝艳<sup>1</sup>, 伍启华<sup>1</sup>, 孙帆<sup>2</sup>, 彭广涛<sup>1</sup>, 李娜娜<sup>1</sup>

(1. 潍柴动力股份有限公司, 山东潍坊 261061;

2. 潍柴(潍坊)材料成型制造中心有限公司, 山东潍坊 261199)

**摘要:** 采用扫描电镜和金相显微镜分析了导致灰铸铁气缸体渗漏问题的缺陷, 通过缺陷形态和数值模拟软件分析, 判断其为气孔缺陷。通过气孔产生原因及铁液中氮元素含量分析, 判定其为氮气孔缺陷。采取设置冷铁套、出铁时加入钛铁合金和随流加入高锆孕育剂等工艺措施均可在一定程度上减少氮气孔缺陷。

**关键词:** 灰铸铁; 气缸体; 渗漏; 氮气孔

灰铸铁以优异的铸造工艺性和较低的制造成本, 被广泛应用于制造发动机气缸体、气缸盖。由于灰铸铁气缸体结构复杂, 对铸造工艺要求比较高。我公司生产的某种灰铸铁气缸体铸件在加工生产过程中出现了氮气孔导致的油孔渗漏问题, 造成废品率居高不下。本研究通过对灰铸铁气缸体氮气孔缺陷特征及产生原因分析, 制定了相关工艺措施, 显著减少了铸件的氮气孔缺陷, 提高了铸件成品率。

## 1 生产条件及技术要求

铁液熔炼采用35 t/h长炉龄热风水冷富氧冲天炉与80 t工频保温电炉双联熔炼工艺, 炉前采用(Cu-Cr-Mo-Sn)合金化工艺, 材质要求HT300, 本体表面HBW硬度要求190~240。本体试样金相要求以A型为主, 长度3~5级, 允许少许B型石墨, 珠光体≥98%。气缸体采用卧浇工艺, 加工完成后通过静水压试验检测气缸体密封性能。

## 2 缺陷的形状特征

对漏水缺陷位置解剖分析, 缺陷部位断面目视可观察到裂隙状孔洞, 如图1所示。因形状特征与缩松缺陷类似, 笔者起初判断为缩松缺陷, 通过增大气眼针冒口

作者简介:

李孝艳(1983-), 女, 工学硕士, 高级工程师, 从事铸铁熔炼方面的工作。  
电话: 15064665883, E-mail: lixiaoyan5021@163.com

中图分类号: TG245

文献标识码: A

文章编号: 1001-4977(2025)03-0380-05

收稿日期:

2024-01-05 收到初稿,  
2024-03-11 收到修订稿。

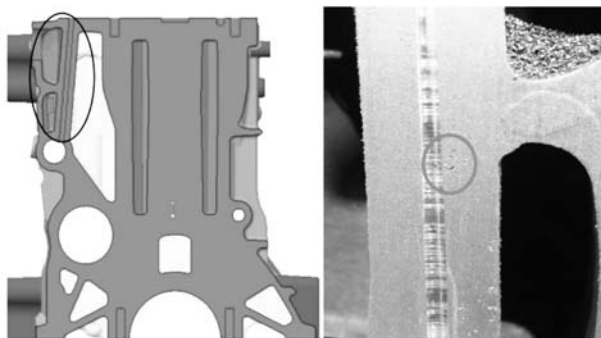


图1 渗漏位置示意图

Fig. 1 Schematic diagram of leakage location

尺寸提高其补缩能力,效果不明显。

采用数值模拟软件分析缺陷部位,判断气缸体油孔位置缩松缺陷几率2%以下,铸件产生缩松概率为0。初步判断缺陷为气孔,如图2所示。

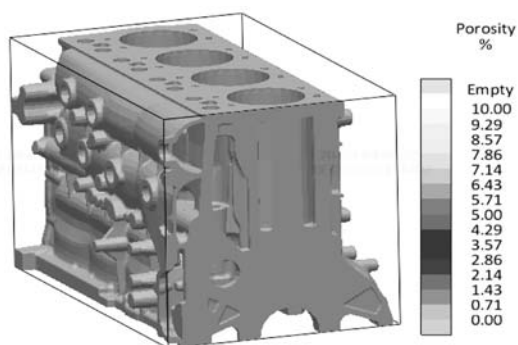


图2 仿真分析  
Fig. 2 Simulated analysis

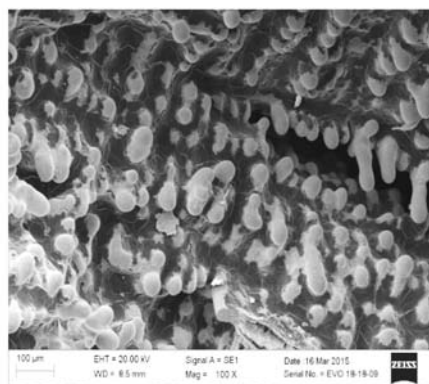
为进一步判断缺陷类型,将孔洞部位磨平抛光后采用OLYMPUS金相显微镜在100倍下观察,可观察到细小孔洞,如图3(a)所示,孔洞周围贫碳。从渗漏孔洞处断开试样,用OXFORD扫描电镜观察缺陷断面,如图3(b)所示,可看到孔壁表面有刚露头的乳状枝晶晶牙,但枝晶不发达,枝晶晶粒粗大,呈叠层式结构,且孔壁表面覆盖一层碳膜或石墨膜,符合气孔缺陷特征<sup>[1]</sup>。通过数值模拟和金相分析,判定缺陷为氮气孔。

### 3 缺陷的形成原因

氮在铸铁中以两种状态存在:一是溶解氮,二是与其他元素形成氮化物,氮化物在高温铁液中会分解出游离氮,如果铁液中溶解N量过高,在铁液冷却、凝固过程中,由于溶解度降低而以单质气体析出,氮气泡在上浮过程中聚集,如果此时上部铁液尚未结壳,



(a) 缺陷金相分析



(b) 漏水部位SEM分析

图3 缺陷微观分析

Fig. 3 Microscopic analysis of defects

氮气泡会浮出液面,不会形成氮气孔;如果此时周围铁液已经凝固结壳,则氮气泡会聚集于最后凝固的铁液(热节或厚大铸件的中上部)中而无法排除<sup>[2]</sup>,形成氮气孔。

## 4 缺陷的解决措施

### 4.1 氮的来源

公司采用冲天炉-电炉双联熔炼工艺,通过碳氮仪检测焦炭氮含量高达 $(8\ 000\sim 10\ 000)\times 10^{-6}$ 以上,此外,配料中50%以上为废钢,由于钢的C、Si含量低,氮在其中的溶解度较高,因此钢比铸铁中氮含量高得多<sup>[3]</sup>。从保温电炉中取试样,采用氮氧仪对铁液中氮含量进行检测,发现冲天炉-电炉双联熔炼铁液氮含量为 $(80\sim 100)\times 10^{-6}$ 。

铸件生产过程中,氮的来源除了冲天炉熔炼原材

料,砂芯中树脂遇高温铁液也会分解出氮原子。本文所述气缸体铸造成形过程中采用冷芯盒制芯,树脂是砂芯的主要粘结剂,树脂中的化合物NCO在高温铁液中分解成分子态的游离氮,如上述第3部分缺陷的形成原因中描述,也是形成氮气孔缺陷原因之一。检测了气缸体不同部位氮含量,如图4所示,靠近砂芯处氮含量最高达 $200\times 10^{-6}$ 以上,证明砂芯中树脂分解出的游离氮浸入铁液中,导致氮含量增高。

### 4.2 解决措施

(1) 在缺陷位置设置冷铁套。一方面加速缺陷部位铁液的冷却,使氮气在铁液凝固过程中来不及析出;另一方面即使氮气析出,冷铁套将缺陷区域与外部隔离,无法穿透铸件本体,形成一个保护层阻挡孔漏水产生。

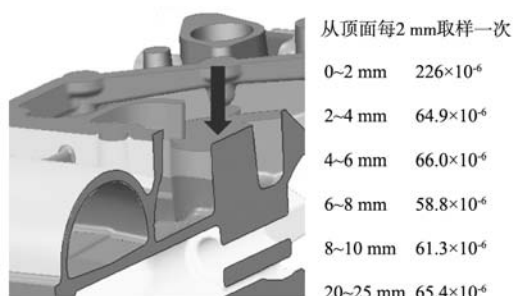
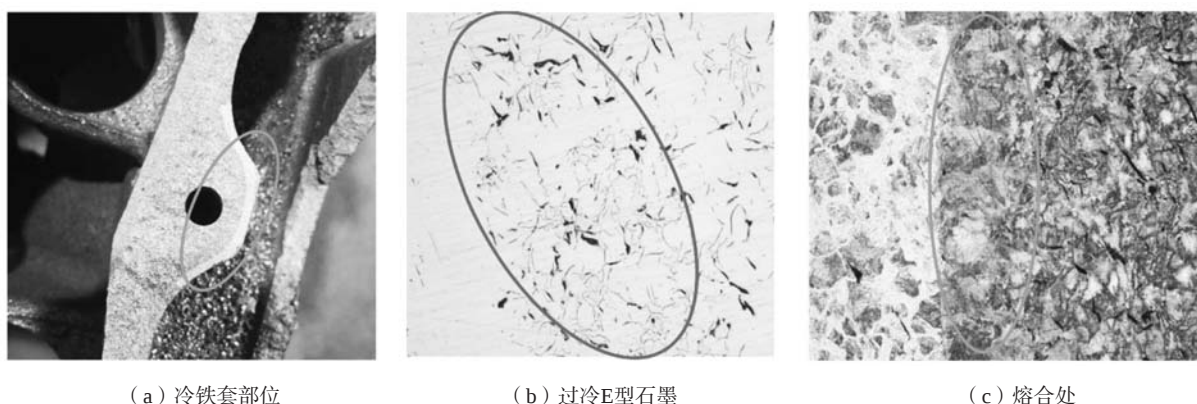


图4 不同深度氮含量

Fig. 4 Nitrogen contents at different depths

取气缸体冷铁套部位分析金相组织发现, 冷铁套与铸件本体熔合良好, 熔合处保留一层致密层。冷铁片周围铸件石墨为过冷E型石墨, 基体组织良好, 如图5所示。说明加冷铁套后, 对铸件本体凝固无不良影响。

统计分析加冷铁套后铸件漏水率, 有明显降低, 说明采用冷铁套能够起到降低缺陷作用, 但气缸体仍存在部分渗漏, 通过解剖缺陷位置, 发现缺陷部位冷铁套偏移, 原因为浇注过程中铁液冲刷导致的冷铁套漂移。



(a) 冷铁套部位

(b) 过冷E型石墨

(c) 熔合处

图5 冷铁套及金相组织

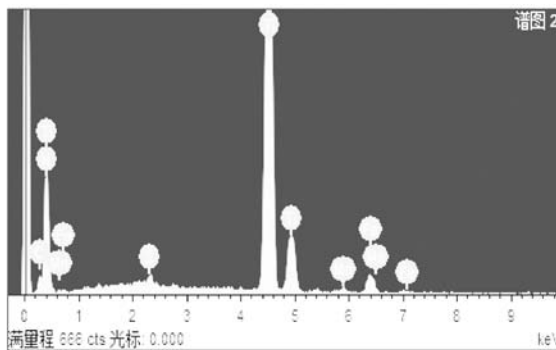
Fig. 5 Chill sleeve and metallographic structures

(2) 采用钛铁中和氮的影响。钛在铸铁中是属于一种有害元素, 但可以与氮形成化合物TiN, 减少氮气孔的风险<sup>[2]</sup>。我公司采购了含钛10%左右的钛铁合金, 出铁前随流加入0.12%的量, 控制铁液中钛含量在0.025%以下, 中和氮元素的同时, 避免钛的有害影响<sup>[4,5]</sup>。

对加入钛铁合金的铸件进行金相及SEM分析, 在金相显微镜500×下发现弥散分布的金黄色形状规则物体, 如图6(a)所示, 经SEM成分分析判定为TiN, 如图6(b)所示。TiN作为硬质点影响加工刀具寿命, 需严格控制钛铁加入量。



(a) 基体中颗粒



(b) 成分分析

图6 铸件金相及SEM分析

Fig. 6 Metallographic and SEM analysis of casting

通过计算钛元素中和氮元素作用, 判断加入钛铁后铁液中有效氮含量为 $45 \times 10^{-6}$ , 统计加入钛铁合金后铸件漏水率较未加钛铁明显降低。对比无钛铁加入铸件力学性能, 加入钛铁后抗拉强度降低20~30 MPa。

氮作为一种微量元素, 对灰铸铁的组织 and 性能有较大影响<sup>[6-7]</sup>, 据资料<sup>[7-8]</sup>介绍, 每增加 $10 \times 10^{-6}$ 的氮, 灰铸铁强度可增加5~7 MPa。根据钛铁合金中和氮元素后降低铸件力学性能作用, 梯度控制钛铁合金加入量,

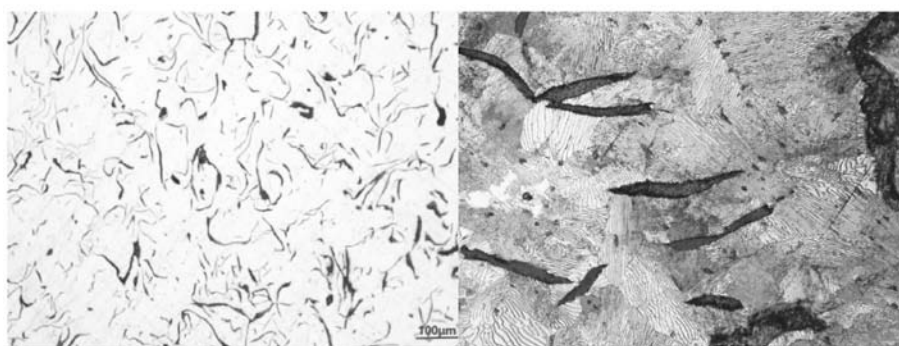
中和氮元素在 $80 \times 10^{-6}$ 以下，降低氮气孔缺陷的同时保证铸件力学性能。

(3) 采用高锆孕育剂中和氮的影响。锆能够与氮反应生成氮化物降低铁液中的溶解氮<sup>[10-11]</sup>，从而抑制氮气的产生。我公司采用含锆5%~8%的高锆孕育剂，在浇注过程中随流加入。加入高锆孕育剂后，气缸体漏水率明显降低，且铸件力学性能无降低。

对比分析加入高锆孕育剂前后金相组织，发现加入后粗片状石墨量降低，这是因为微量的锆与氮形成ZrN，可作为石墨形核核心，细化石墨，增加共晶团数，从而提高铸件力学性能。分析基体组织，未发现ZrN颗粒，分析原因为孕育剂加入量少（0.1%以下），生成细小ZrN颗粒作为石墨核心，在金相显微镜下无法观察到，如图7所示。



(a) 加入硅锆孕育剂后



(b) 加入高锆孕育剂后

图7 加入不同孕育剂后的金相组织

Fig. 7 Metallographic structures after adding different inoculants

## 5 结论

(1) 设置冷铁套、出铁时加入钛铁合金、加入高锆孕育剂等方法均能在一定程度上减少灰铸铁气缸套铸件氮气孔缺陷，设置冷铁套的方法无法杜绝气缸体渗漏，解决该类气孔缺陷的有效方法是降低铁液中溶解氮含量。

(2) 采用钛铁合金能够中和氮的影响，但加入

钛铁中和氮后，铸件性能降低，因此，灰铸铁中氮含量不是越低越好。且钛含量过多生成TiN硬质点，对切削加工性能存在风险，因此需严格控制钛铁合金加入量。

(3) 高锆孕育剂中的锆能中和氮的影响，同时能够保证铸件性能，加入高锆孕育剂是最佳控制措施。

**参考文献:**

- [1] 陈国帧, 肖柯则, 姜不居. 铸件缺陷和对策手册 [M]. 北京: 机械工业出版社, 2002: 75-76.
- [2] 张本水, 马寒坤. 灰铸铁件裂隙状氮气孔缺陷分析和解决措施 [J]. 铸造工程, 2022 (2): 49-50.
- [3] 赵鲁生, 赵新武. 氮对灰铸铁性能的影响 [J]. 现代铸铁, 2018 (6): 10-11.
- [4] 林小瑛, 卢月美, 李树江, 等. 钛在灰铸铁中行为的研究 [J]. 现代铸铁, 2001 (4): 15-16.
- [5] 程俊伟, 郭亚辉, 范随长, 等. Ti对灰铸铁性能的影响 [J]. 现代铸铁, 2014 (5): 36-37.
- [6] 王谦谦, 孙玉福, 靳存文, 等. 氮对合成灰铸铁组织和性能的影响 [J]. 铸造, 2015, 64 (6): 512-516.
- [7] 林勇传, 王凯, 何春华, 等. 氮的添加介质和工艺及添加量对灰铸铁力学性能的影响 [J]. 铸造, 2019, 68 (1): 17-22.
- [8] 李传杖. 浅谈铸铁中氢、氮和氧 [J]. 现代铸铁, 2021 (2): 36-41.
- [9] 周永泰. 氮对提高灰铸铁性能的影响 [J]. 铸造, 1997 (11): 33-36.
- [10] 李连杰, 韩振中, 朱立振, 等. 氮气孔的产生及预防 [J]. 现代铸铁, 2012 (1): 58-60.
- [11] 王文胜, 曹玉亭, 刘伟. 灰铸铁刹车盘氮气孔的产生原因及防止措施 [J]. 现代铸铁, 2012 (4): 68-69.

---

## Analysis and Solution of Nitrogen Pore Defect in Gray Cast Iron Cylinder Block

LI Xiao-yan<sup>1</sup>, WU Qi-hua<sup>1</sup>, SUN Fan<sup>2</sup>, PENG Guang-tao<sup>1</sup>, LI Na-na<sup>1</sup>

(1. Weichai Power Co., Ltd., Weifang 261061, Shandong, China; 2. Weichai (Weifang) Material Forming and Manufacturing Center Co., Ltd., Weifang 261199, Shandong, China)

**Abstract:**

The defects caused of the cylinder block leakage problem were analyzed by using of SEM and metallographic microscope, and the defects were judged to be blowhole defects through defect morphology and numerical simulation software analysis. Through the causes of the blowhole defect and the nitrogen content in the liquid iron analysis, they were determined to be nitrogen pores. The nitrogen pore defects can be reduced to some extent by using of the processing measures such as setting chill jacket, adding ferrotitanium alloy while tapping, adding inoculant with high zirconium content on the stream, and so on.

**Key words:**

gray cast iron; cylinder block; leakage; nitrogen pore

---