

# 影响灰铸铁气缸盖表面硬度的因素分析

沙羽, 李涛

(中国重汽(香港)有限公司济南成型厂, 山东济南 250200)

**摘要:** 分析了灰铸铁表层铁素体层的形成原因, 综述了影响灰铸铁缸盖表面硬度的影响因素, 包括生铁加入量、时效处理温度、孕育剂加入量、熔炼过热温度。通过试验验证表明, 型砂含水量的增加促进气缸盖表面形成一层铁素体层, 降低硬度值; 生铁加入量越高, 气缸盖表面硬度降低越明显。

**关键词:** 灰铸铁; 硬度; 生铁加入量; 过热温度; 型砂含水量

汽车产品零部件的各大总成, 如驱动桥总成、发动机总成、变速箱总成都离不开铸件的生产, 其中发动机上铸件占总重量比约75%左右。铸造毛坯件投入汽车加工行业的比例也从原来的20%增加到现在的30%<sup>[1]</sup>。柴油发动机市场消耗90%的灰铸铁和球铁件<sup>[2]</sup>。发动机加工单位对缸盖表面硬度提出了必须确保稳定维持在高限的要求。

缸盖作为发动机重要零部件之一, 其燃烧室承受着发动机工作时近70 MPa的爆发压力和高达近300 °C的壁面温度, 工作环境十分恶劣。为了提升铸件硬度, 可能要牺牲机加工单位的刀具寿命及生产效率, 降低铸件硬度, 切削性能提高了, 但是后续铸件的耐磨性、可靠性都要受到极大的影响。因此, 研究如何稳定控制缸盖的本体硬度和更好改善切削性能, 探索影响缸盖本体硬度和切削性能的根本原因, 从而在获得较好的使用性能前提下, 满足加工单位对切削性能的需求。

## 1 灰铸铁气缸盖硬度在实际生产中的控制

一般来说, 硬度和灰铸铁的抗拉强度大小、耐磨性高低呈正相关, 而硬度与切削性能好坏是呈负相关的, 即铸铁硬度升高的同时, 抗拉强度增大、耐磨性高, 但切削性能降低。因此, 行业中硬度通常被用来作为衡量铸铁机械加工性能优劣的标准<sup>[3]</sup>。硬度值也是作为铸件生产方与零部件加工方分析切削性能的主要参考数据, 但实际生产过程中, 时常会遇到不同铸件硬度值波动大不易控制、同一铸件硬度值不均匀的现象。

### 1.1 现场生产工艺

与本次试验分析相关的生产设备有KW水平静压造型线、15吨中频感应电炉, 相关的试验装置有GS1000直读光谱仪、高频红外碳硫分析仪、德国蔡司金相显微镜, 试验对象为柴油机气缸盖, 材质为灰铸铁, 牌号为合金HT250, 对应化学成分见表1。

### 1.2 现场硬度不合格的理化分析

灰铸铁的基体组织主要包含珠光体与铁素体。基体组织是影响灰铸铁力学性能的

表1 气缸盖化学成分

Table 1 Chemical composition of the cylinder head

$w_B / \%$

C	Si	Mn	S	P	Cr	Mo	Cu
3.3~3.5	1.7~2.0	0.6~1.0	0.08~0.12	≤0.1	0.1~0.3	0.10~0.2	0.4~0.6

作者简介:

沙羽(1986-), 男, 铸造工程师, 硕士, 主要从事铸造及锻造过程的工序质量控制、铸锻件检测方法的优化改进等工作。电话: 15863137075, E-mail: 15863137075@163.com

中图分类号: TG113.25<sup>+</sup>  
文献标识码: B  
文章编号: 1001-4977(2022)01-0084-05

收稿日期:

2021-07-10 收到初稿,  
2021-08-26 收到修订稿。

因素，但片状石墨片的割裂作用能起到决定性影响。硬度一般与基体组织相关程度更高，而影响强度、塑性、韧性、弹性等物理性能的是石墨。为了查找影响生产过程影响硬度值的因素，对现场的缸盖进行检验确认，发现以下现象。

(1) 检测点出现了1~2 mm的铁素体层，铸件整体表层均有1~2 mm左右铁素体层，如图1；

(2) 打磨掉表层铁素体后，珠光体含量明显增多，且硬度值明显提高；

(3) 试样不仅表层有大量铁素体，心部组织依然有较多铁素体，同时伴有大量E型石墨，如图2。

## 2 影响铸件表面硬度的因素分析

### 2.1 表层铁素体层分析

产生这种现象的原因可能有两个：铁液保温时间、型砂含水量。

#### 2.1.1 铁液保温时间

一般工厂采用双联熔炼时，出于节约成本的考虑，如生产过程停产时间不长时，会让保温电炉中的铁液持续保温一段时间，有时能达到10 h左右，由于铁液长时间在电炉感应电流搅拌作用下会产生变化，比

如微细的晶态石墨和外来结晶核心都逐渐溶于铁液，石墨化的核心大幅度减少<sup>[4]</sup>。铁液产生这种变化，会导致大的过冷度，常规的孕育处理无法得到符合要求的微观组织；同时也发现，即使化学成分完全符合要求，浇注后的毛坯内在质量仍然不合格，会产生大量铁素体、过冷石墨。这应该是个别铸件整体表层均有1~2 mm左右铁素体层的原因，即铁液保温时间长可能降低缸盖整体表面乃至心部的硬度。

#### 2.1.2 型砂含水量对表面硬度的影响

型砂水分按两个水平控制：低水平为3.0%~3.4%，高水平为3.6%~4.0%。两种试验方案生产的产品检测结果见表2，方案1的产品硬度均值为HB 213，表层石墨形态和基体组织见图3a和图3b，均为A型石墨、珠光体含量95%。方案2的产品硬度均值为HB 189，表面金相组织出现了表层明显铁素体层，铁素体层厚度约1~2 mm，如图4b，同时也发现铁素体层区域有大量E型过冷石墨，如图4a。在将方案2的产品表面打磨后，再次确认金相，与方案1一样也是A型石墨、珠光体含量95%，说明影响方案1硬度偏低的原因应为表层铁素体层。

其中方案2的金相试样取的是主螺栓孔部位，是铸型形成表面，随后对本件的燃烧室底面取样发现并没

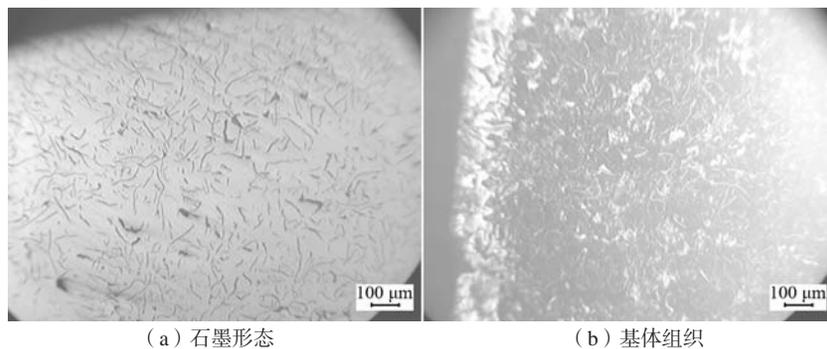


图1 试样表层石墨形态与基体组织

Fig. 1 Graphite morphology on the surface of the sample and matrix microstructure

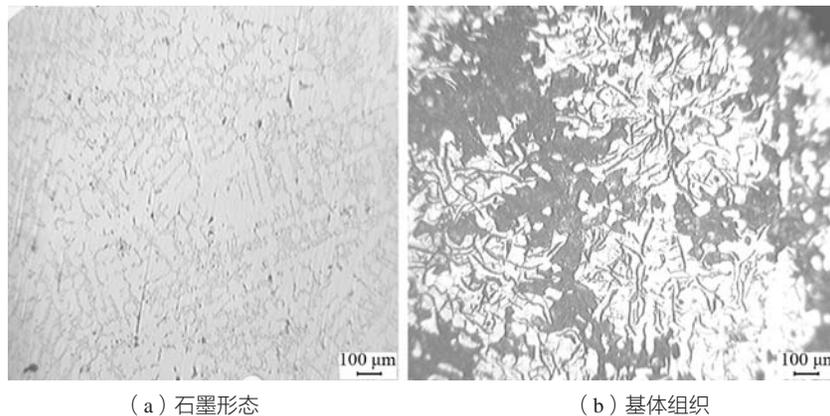


图2 试样心部石墨形态与基体组织

Fig. 2 Graphite morphology in the core of the sample and matrix microstructure

表2 不同型砂含水量生产产品的检验结果  
Table 2 Test results of products with different molding sand moisture contents

方案	型砂含水量控制水平	平均表面硬度HB	抗拉强度/MPa
1	低水平	213	264
2	高水平	189	267

有明显铁素体层，该部位是砂芯形成表面。型砂形成铸件部位易出现铁素体层，这可能是造成同一个铸件主螺栓孔处有明显铁素体层，但燃烧室底面没有的主要原因。因为只有与型砂接触的本体表面才出现铁素体层，所以分析时重点考虑型砂对铸件的影响。

首先湿型砂中混有一定比例的煤粉，这样靠近型砂表层的碳元素极为丰富，同时硅元素使得碳活度、作用力增加，而作为石墨化元素，硅在灰铸铁中也能达到1.9%以上，铁液浇注后在型腔内靠近砂芯的铁液

层反应强化，脱碳显著，能明显促进铁素体形成。而硅又是偏析倾向较强的元素，由于铸件早期凝固层中已经富含硅，降低了碳在铁液中的溶解度，铁液冷却过程发生共析转变，奥氏体将过饱和的碳析出在附近的石墨上，石墨相的析出为铁素体的形核和生长创造了条件，从而使基体铁素体化<sup>[5]</sup>。其次，型砂含水量高导致局部冷却环境变化，若靠近型砂的部位水分偏高，将增加铸型表面铁液的过冷度，D型和E型都是在石墨成核条件较差，以及冷却速度大而造成过冷时形成<sup>[6]</sup>。而铁素体的数量、形状和位置会受奥氏体枝晶的影响，铁素体与E型石墨伴生就易于理解了<sup>[7]</sup>。型砂含水量是影响型砂接触表面产生铁素体层的原因。

## 2.2 生铁不同加入比例的影响

生铁按炉料总量的5%、10%、15%、20%加入。

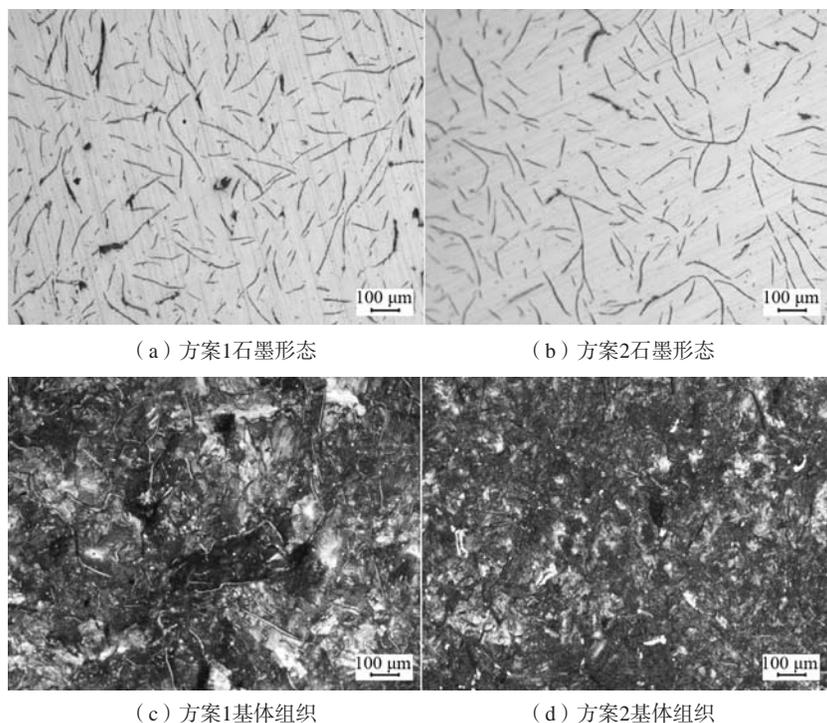


图3 不同含水量方案试样金相组织（试样已经将表层铁素体层打磨掉）

Fig. 3 Metallographic microstructures of the samples with different water contents schemes (scheme 2 samples have polished the surface ferrite layer)

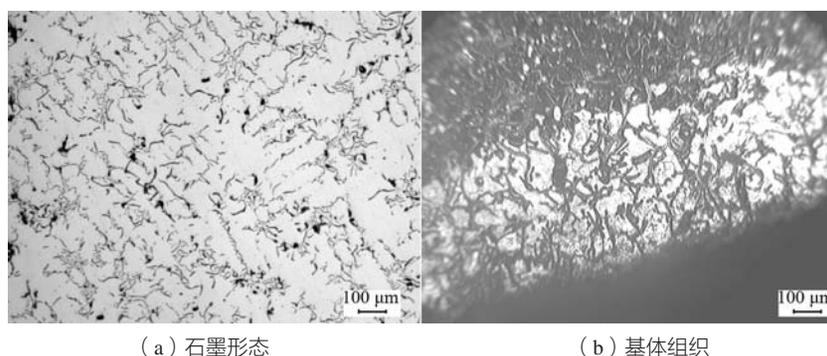


图4 方案2试样石墨形态与基体组织照片

Fig. 4 Graphite morphology and matrix microstructure of the scheme 2 sample

两种试验方案生产的产品，检验结果如表3。图5是不同生铁加入量时的石墨形态。

由表3和图5可以看出，不同生铁加入量，对铸件的影响如下。

(1) 金相组织的变化。①不同试验方案基体组织变化不大，珠光体含量 $\geq 95\%$ ；②随着生铁加入量的增加，石墨长度明显变长，石墨长度由5-6级，增加到3-4级左右，图5a和5b比5c和5d石墨要短；③随着生铁加入量的增加，石墨数量明显减少，图5a和5b比5c和5d石墨数量明显要多。

(2) 本体表面硬度的影响。随着生铁加入量增多，表面硬度逐渐降低。

(3) 抗拉强度的影响。随着生铁加入量增多，抗拉强度逐渐降低。

铸造生铁铸造性能好，价格便宜，一般是铸铁熔炼必备的炉料，但生铁受制于原矿的影响，不同产地原矿所含杂质元素含量不一，所以一般生铁加入量都会控制在30%以内。但炉料的遗传性影响，生铁中自带的粗大石墨片在熔炼后无法消除，从液态保留到了

固态，使得铸件形核中存在大量粗大石墨，原因是生铁虽然经过重熔，但石墨熔点在 $2\ 000\ ^\circ\text{C}$ 以上，在重熔过程中石墨不能完全熔化，这些未重熔的石墨，在熔炼中与碳、硅含量中高C—C键的强化作用形成的石墨结合在一起，在结晶中首先成为了石墨结晶的核心，它会随着结晶过程不断长大，减少了析出石墨，最终使石墨变得粗大<sup>[8]</sup>，灰铸铁的强度是被石墨割裂了的基体强度，因此，在一定的碳、硅含量下，粗大石墨结合片的存在使基体强度减弱。随着铸造生铁加入量的增加，灰铸铁的抗拉强度显著下降，同时硬度也随之降低。当生铁加入量 $\geq 30\%$ 时，抗拉强度值很低<sup>[9]</sup>。

### 2.3 时效处理的影响

对于灰铸铁的发动机件，如气缸体、气缸盖、曲轴箱等铸件，在生产流程中都有时效处理的工艺，但随着环保压力的增加，热处理资源也趋于稀缺，我们一直在尝试对发动机中的铸件不再进行时效热处理，比如发动机中的曲轴箱毛坯，我们已经通过取消时效处理，获得了很大收益，而灰铸铁的缸盖一直还保留

表3 不同生铁加入量生产产品的检验结果

Table 3 Test results of products with different pig iron contents

序号	生铁加入量/%	石墨类型	珠光体含量/%	平均表面硬度HB	抗拉强度/MPa
1	5	A型	95	210	279
2	10	A型	95	205	263
3	15	A型	95	193	248
4	20	A型	95	187	235

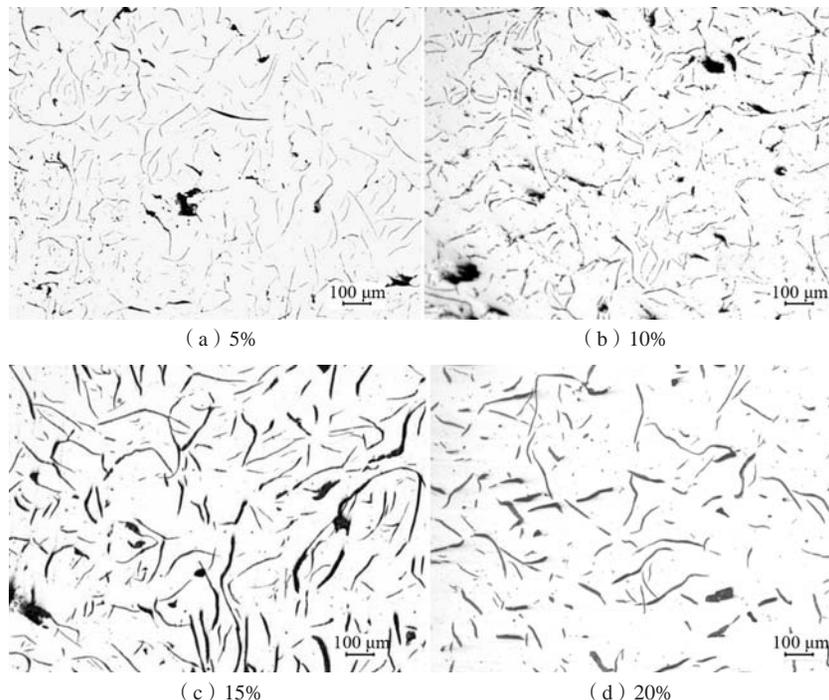


图5 不同生铁加入量时的石墨形态

Fig. 5 Graphite morphology with different pig iron additions

了时效处理。目前采用的时效工艺是将铸件加热到530~630℃,经2~6h保温后,在炉内缓冷至200℃以下出炉空冷。但灰铸铁在温度高于550℃时,即可能改变基体组织导致强度、硬度降低。这说明时效处理的温度控制也是影响铸件硬度的因素。

#### 2.4 硅钡长效孕育剂的加入量

在工艺开发初期是以75SiFe作为主要的灰铁孕育剂,随着后期材料的开发,又引入了硅钡孕育剂,两种孕育剂均可用于正常生产,硅钡孕育剂的使用量与75SiFe一样。孕育效果接近时,硅钡孕育剂应加入量减少,而硅钡孕育剂加入量过高易造成铁素体增加,硬度降低<sup>[10]</sup>。但是硅钡孕育剂作为长效孕育剂对于改善壁厚敏感性有较大的帮助。

#### 2.5 熔炼过热温度过高

熔炼时,为了净化孕育处理会将铁液加热到正常温度以上,这种就是过热熔炼。过热可以去除杂质,净化铁液,主要是降低铁液中的溶氧量。铁液温度从1350℃逐渐升高到1450℃,溶氧量一直上升至最

高,在1450℃以上,低于1500℃时,发生反应生成CO,溶氧量下降,含氮量增加。铁液过热温度同样会影响铸铁力学性能,抗拉强度随着铁液温度升高而增加,铁液温度低于1460℃,硬度值随着温度升高而增加;铁液温度高于1500℃,硬度值随着温度升高而降低。但是过热温度超过1550℃,铸铁白口倾向大,A型石墨减少,D型石墨增多<sup>[11-12]</sup>。

### 3 结论

(1) 灰铸铁气缸盖生产过程中铁液保温时间不宜超过10h。

(2) 随着型砂含水量的增加,容易在铸件表面形成一层铁素体层,降低表面硬度;实际生产中生铁加入量控制在5%左右,型砂含水量控制在3%~3.4%为宜。

(3) 时效热处理温度不能高于550℃。

(4) 使用硅钡孕育剂代替75SiFe孕育,可改善断面敏感性,使得产品硬度值更为均匀。

(5) 正常生产中过热温度不能超过1550℃。

#### 参考文献:

- [1] 王成刚,马顺龙.汽车铸件材质的应用现状与发展[C]//2009年中国铸造活动周论文集.沈阳:中国机械工程学会铸造分会,2009.
- [2] 阿尔弗雷德·斯帕达.预测美国金属铸件生产将缓慢复苏[J].铸造技术,2009,30(8):1062-1066.
- [3] 田永生.铸铁硬度与切削加工性能的关系[J].钢铁研究学报,1998(2):77-79.
- [4] 李传杖.铸铁的增碳和常用的增碳剂[J].金属加工(热加工),2010(9):25-28.
- [5] 朱彦方.灰铸铁件表面铁素体层及过冷石墨形成机理及消除对策[J].中国铸造装备与技术,2002(6):21-22.
- [6] 杨永录,张绪国,宋岩,等.灰铸铁组织中不良石墨形态的金相分析及质量改进[J].金属加工(热加工),2012(1):71-75.
- [7] 邱复兴.D.E石墨的形成机理和防止E型石墨产生的措施[J].铸造,1989(3):23-25.
- [8] 赵书城.现代灰铸铁熔炼技术[J].现代铸铁,2002(3):35-38.
- [9] 刘佑平.提高柴油机灰铸铁件力学性能的工艺措施[J].中国铸造装备与技术,2002(4):22-25.
- [10] 刘三星,谢青云.硅钡合金与75硅铁孕育效果比较[J].热加工工艺,1994(1):34-35.
- [11] 潘庚生,徐正楚,肖幼云.铁水过热温度对铸件质量的影响[J].武汉工学院学报,1987(2):77-89.
- [12] 程俊伟,张忠祥.菲亚特GH190合金铸铁的熔炼[J].中国铸造装备与技术,2000(2):31-33.

## Analysis on Factors Affecting Surface Hardness of Gray Cast Iron Cylinder Head

SHA Yu, LI Tao

(Sinotruk (Hongkong) Limited Jinan Casting & Forging Center, Jinan 250200, Shandong, China)

#### Abstract:

This paper analyzes the causes of ferrite layer on the surface of gray cast iron, and summarizes the influencing factors on the surface hardness of gray cast iron cylinder head, including pig iron addition, aging treatment temperature, inoculant addition and melting superheat temperature. The test results show that the increase of water content in molding sand promotes the formation of a ferrite layer on the surface of the cylinder head and reduces the hardness value; the higher the amount of the pig iron, the more obvious the decrease of the surface hardness of the cylinder head.

#### Key words:

gray cast iron; hardness; pig iron addition; superheating temperature; sand moisture content