

高硫高氮增碳剂在降低灰铸铁缸体铸件废品率上的应用

王佳香

(昆明云内动力股份有限公司, 云南昆明 650217)

摘要: 笔者公司生产的某型号灰铸铁缸体, 采用低硫低氮增碳剂进行铁液熔炼, 铸件废品率较高, 主要是气孔、缩陷废品。采用高硫高氮增碳剂和低硫低氮增碳剂按一定比例加入到铁液中, 同时提高铁液碳含量, 铸件抗拉强度没有降低, 气孔、缩陷废品率明显降低, 铸件废品率大幅下降。主要原因是高硫高氮增碳剂中氮含量较高, 高硫高氮增碳剂的加入使得铁液中氮含量提高, 氮能使石墨片长度变短, 弯曲程度增加, 端部钝化, 同时能细化珠光体, 强化基体组织, 提高了铸件力学性能, 这对提高缸体铸件质量、稳定铸件材质、降低生产成本大有好处。

关键词: 低硫低氮增碳剂; 高硫高氮增碳剂; 气孔; 缩陷; 氮元素

1 灰铸铁缸体铸件熔炼工艺

缸体是发动机的主要部件之一, 随着发动机技术的不断进步, 人们对发动机铸件的质量要求越来越高, 价格却是越来越低^[1]。这对铸件的质量和成本提出了更高的要求。笔者公司某型号发动机缸体铸件材质是HT250灰铸铁, 采用中频感应电炉熔炼铁液, 炉料配方为生铁+废钢+回炉料+合金+低硫低氮增碳剂, 需要外加增碳剂以满足原铁液的化学成分要求^[2], 炉前采用硅钙钡孕育剂进行铁液孕育。废钢加入比例较高, 生铁加入比例较低, 采用增碳剂增碳, 可降低生产成本。

增碳剂种类较多, 一种是石墨化增碳剂, 增碳剂经过石墨化, 使其在高温条件下, 碳原子的排列呈石墨的微观形态^[3], 石墨化增碳剂中灰分、挥发物、水分、硫、氮含量都大大减少, 因生产工艺复杂, 成本较高。另一种是煅烧石油焦增碳剂, 石油焦未经过高温石墨化处理, 硫、氮含量较高, 生产工艺简单, 成本较低。笔者公司采用的高硫高氮增碳剂属于煅烧石油焦增碳剂中的一种, 采用的低硫低氮增碳剂属于石墨化增碳剂的一种。该型号灰铸铁缸体铸件采用低硫低氮增碳剂进行铁液熔炼。

2 采用低硫低氮增碳剂的缸体铸件废品率现状

从表1中可以看出, 2021年1—3月缸体铸件废品率较高, 2021年3月铸件废品

表1 采用低硫低氮增碳剂缸体铸件废品率

Table 1 The rejection rate of cylinder block casting with low sulfur nitrogen recarburizer

时间	废品率/%	气孔废品率/%	缩陷废品率/%
2021年1月	2.91	1.88	0.13
2021年2月	2.96	2.21	0.22
2021年3月	4.18	2.75	0.69
平均值	3.35	2.28	0.34

作者简介:

王佳香(1989-), 女, 彝族, 工程师, 主要从事铸造熔炼和工艺设计工作。E-mail: 759138761@qq.com

中图分类号: TG251

文献标识码: A

文章编号: 1001-4977(2023)07-0827-06

收稿日期:

2022-10-08 收到初稿,
2022-12-10 收到修订稿。

率高达4.18%，2021年1—3月铸件废品率平均值为3.35%，气孔废品率平均值为2.28%，缩陷废品率平均值为0.34%，气孔和缩陷废品占总废品的78%，该时期主要废品是气孔和缩陷，高废品率不仅带来巨大的质量损失，还有较高的质量风险。因此要降低缸体铸件废品率，首先要降低气孔和缩陷废品率。

3 气孔、缩陷缺陷原因分析

3.1 气孔缺陷原因分析

图1为缸体铸件加工后出现皮下气孔的部位图示，在浇注过程中产生的气孔未来得及逸出，停留在型腔内形成皮下气孔。由于导致铸件气孔缺陷的原因很多，每一种气孔类型的形成都不是单一因素作用的结果^[4]。铸件产生皮下气孔原因之一是铁液中含有微量铝0.01%~0.1%与铸型中水汽发生反应，同时与铸件表皮层凝固速度相结合的结果^[5]。因此，气孔产生的因素有：铁液中的铝元素含量、金属-铸型界面产生的水汽、凝固速度。

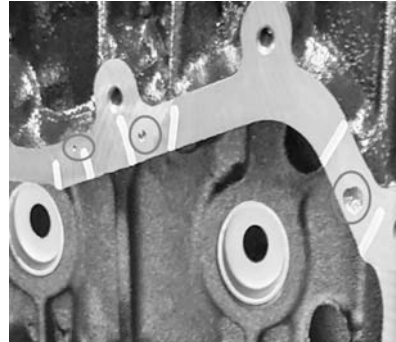


图1 缸体铸件气孔缺陷图示

Fig. 1 Diagram of gas hole defects in cylinder block casting

为查找该型号缸体铸件产生气孔的原因首先分析铸件铁液化学成分，表2为采用低硫低氮增碳剂熔炼的铁液取光谱试样，采用斯派克直读光谱仪检测铁液的化学成分，从表2中看出，该铸件铁液中铝含量在0.007%~0.009%，而将Al含量控制在0.005%~0.01%，对石墨的析出和成长有重要作用，也不会产生针孔缺

表2 采用低硫低氮增碳剂缸体铁液化学成分、抗拉强度、硬度统计

Table 2 Chemical composition, tensile strength and hardness statistics of molten iron in cylinder block with low sulfur nitrogen carburizer

编号	$w_B/\%$							σ_B/MPa	HBW
	C	Si	Mn	P	S	Ti	Al		
1#	3.17	1.78	0.84	0.025	0.081	0.018	0.009	310	197
2#	3.16	1.79	0.84	0.023	0.08	0.019	0.007	316	201
3#	3.17	1.81	0.84	0.023	0.072	0.019	0.008	312	198
4#	3.16	1.80	0.84	0.023	0.074	0.019	0.009	304	206
5#	3.18	1.75	0.81	0.022	0.073	0.019	0.007	306	195
6#	3.18	1.76	0.81	0.022	0.075	0.019	0.009	296	195
7#	3.18	1.75	0.79	0.022	0.061	0.018	0.008	293	192
8#	3.17	1.77	0.82	0.023	0.064	0.019	0.007	296	197
9#	3.17	1.79	0.81	0.023	0.073	0.019	0.006	312	200
10#	3.16	1.83	0.82	0.022	0.073	0.019	0.008	306	197
11#	3.18	1.78	0.83	0.023	0.077	0.019	0.009	296	192
12#	3.17	1.77	0.82	0.022	0.074	0.019	0.007	290	197
平均值	3.171	1.782	0.823	0.023	0.073	0.019	0.008	303	197

碳当量CE: 3.77%

陷，因此铁液中铝元素含量不作为主要影响因素分析。型砂水分过高，在浇注过程中会产生大量水汽，也是产生气孔原因之一，该型号铸件采用湿型砂造型+卧浇工艺，铸件水分在2.6%~3.0%，满足工艺要求，在此不对型砂水分进行分析。

铁液凝固过快，浇注时产生的气孔来不及逸出铁

液表面，也容易产生气孔缺陷。适当延缓凝固时间，可以让型腔中的气体在凝固前逸出铁液表面，减少气孔缺陷产生。研究表明，铁液的凝固速度和碳含量有关系，碳含量增加会使铸铁的整体凝固时间延后，铁液中的气体就更容易在铁液凝固成固体前析出而不至于产生皮下气孔^[6]。

3.2 缩陷原因分析

分析该铸件缩陷部位(见图2), 表面有凹坑, 表面上还粘附一层铁, 经分析, 凹坑是铁液自浇注温度降至合金结晶温度时产生的体积亏损^[8-9], 而凹坑部位粘附的铁是铸件凝固缩陷后期石墨析出膨胀, 挤出来的铁液^[10]。而且缩陷的部位在铸件的热节部位, 属于薄壁与厚大部位交接的地方。

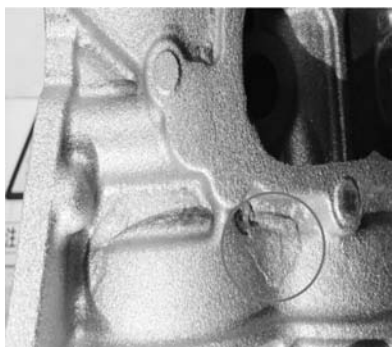


图2 缸体铸件缩陷部位图示

Fig. 2 Diagram of depression part of cylinder block casting

采用低硫低氮增碳剂进行铁液熔炼, 铸件碳当量CE平均值3.77%, 属于亚共晶铸铁, 在凝固过程中会析出大量初生奥氏体枝晶^[11], 初生奥氏体枝晶生长的同时铁液会发生收缩, 枝晶间液体亏损。如果亏损得到冒口、浇注系统的补充或后期共晶石墨化膨胀, 能够抵消之前的亏损, 就不会产生缩松, 否则枝晶间液体亏损最终会形成缩松^[12]。铁液碳当量CE较低, 析出的石墨减少, 石墨化膨胀减小, 不能够抵消之前的亏损, 同时铁液流动性差, 补缩能力也会降低, 在热节处没有铁液及时补缩, 容易产生缩松、缩陷等缺陷。

4 气孔、缩陷缺陷解决措施

通过以上分析, 要控制气孔和缩陷缺陷, 需要提高铁液碳含量, 增加铁液流动性, 延长铁液凝固时间, 提高铸件补缩能力。从表2中可以看出, 该型号铸件抗拉强度平均值约为300 MPa, 降低的空间较小, 如果在不改变任何因素的前提下提高碳含量可能造成铸件抗拉强度降低, 影响铸件力学性能。相关工艺人员利用高硫高氮增碳剂能稳定甚至提高铸件材质性能的特点, 提出采用高硫高氮增碳剂对铁液进行增碳处理, 同时适当提高铁液碳含量, 炉前严密关注三角试块断口情况, 确保铸件抗拉强度符合工艺要求。试验方案是将高硫高氮增碳剂与低硫低氮增碳剂按一定比例先后加入到感应电炉中, 增碳剂粒度2~5 mm, 其余配料不变。增碳剂的碳在溶于铁液时, 主要通过扩散

与溶解这两种方式来实现的^[13]。增碳剂的加入时机影响增碳剂中碳元素的吸收率, 电炉内熔化约20%的铁液时加入增碳剂, 增碳剂分批加入, 不能一次性全部加完, 在炉料剩余30%以前将增碳剂全部加完, 利用铁液的搅拌、翻滚将增碳剂充分溶解, 减少增碳剂浮在铁液表面被烧损的几率。

通过多次工艺试验的摸索, 最终确定增碳剂加入量约为1.6%~2.0%, 根据配料中废钢加入量的变化增碳剂加入量会随之改变, 高硫和低硫增碳剂加入比例为7:3, 孕育后铁液碳含量提高至3.3%, 同样取12个光谱试样进行化学成分检测, 表3是采用高硫高氮增碳剂熔炼铁液化学成分、铸件抗拉强度、铸件硬度。

分析表3, 高硫高氮增碳剂和低硫低氮增碳剂按一定比例搭配使用铸件碳含量在3.27%~3.32%, 碳含量平均值为3.302%, 碳含量提高了0.13%, 碳当量CE值为3.91%, 与单纯使用低硫低氮增碳剂相比, 铁液碳当量CE提高了0.14%, 铸件抗拉强度却能保持不变, 铸件硬度也能持平, 铸件的材质没有发生明显改变。从表4中可以看出, 从2021年4月开始采用高硫高氮增碳剂和低硫低氮增碳剂按一定比例搭配使用进行铁液熔炼后, 铸件废品率大大降低, 2021年1—3月的废品率平均值是3.35%, 2021年4—8月的废品率平均值是1.96%, 采用高硫高氮增碳剂后铸件废品率降低1.39%, 主要是气孔和缩陷缺陷得到有效控制, 气孔和缩陷废品率明显降低, 气孔废品率降低1.63%, 缩陷废品消失。气孔和缩陷缺陷下降的主要原因是高硫高氮增碳剂中含有高含量的氮, 高硫高氮增碳剂的加入使得铁液氮含量显著提高, 氮能改变灰铸铁石墨形态, 强化基体组织, 从而提高了灰铸铁力学性能, 为铁液提高碳含量提供了有利条件, 铁液碳含量提高, 铁液流动性和补缩能力得到提高, 铸件气孔和缩陷废品率明显下降。

5 高硫高氮增碳剂对灰铸铁铸件组织性能影响的机理分析

表5是我公司高硫高氮和低硫低氮增碳剂主要成分检测数据, 从表5中可以看出, 两种增碳剂的固定碳、水分、挥发物、灰分含量相差不大, 主要区别在于硫和氮含量, 高硫高氮增碳剂的硫含量比低硫低氮增碳剂高出约10倍, 氮含量高出约100倍。高硫高氮增碳剂能提高灰铸铁力学性能主要起作用的是高含量的氮元素。在灰铸铁中氮元素对石墨形态和基体组织都有影响。日本学者张博等人的研究表明, 在铸铁中吹入一

表3 采用高硫高氮增碳剂后铁液化学成分、抗拉强度、硬度统计表

Table 3 The chemical composition, tensile strength and hardness of the cylinder block with high sulfur nitrogen re-carburizer are summarized

编号	$w_B/\%$							σ_b/MPa	HBW
	C	Si	Mn	P	S	Ti	As		
1#	3.32	1.79	0.83	0.023	0.084	0.017	0.009	296	197
2#	3.31	1.78	0.82	0.025	0.082	0.016	0.01	303	201
3#	3.3	1.82	0.80	0.023	0.074	0.014	0.009	325	195
4#	3.29	1.81	0.80	0.024	0.073	0.014	0.009	318	198
5#	3.31	1.79	0.83	0.024	0.077	0.015	0.009	312	197
6#	3.3	1.78	0.81	0.024	0.078	0.015	0.009	299	203
7#	3.32	1.81	0.84	0.024	0.082	0.015	0.01	309	195
8#	3.31	1.78	0.83	0.022	0.08	0.016	0.008	312	205
9#	3.31	1.77	0.82	0.024	0.078	0.014	0.01	290	192
10#	3.3	1.79	0.83	0.022	0.074	0.015	0.008	296	200
11#	3.28	1.82	0.81	0.023	0.07	0.017	0.008	293	197
12#	3.27	1.83	0.81	0.023	0.074	0.017	0.008	303	195
平均值	3.302	1.798	0.819	0.023	0.077	0.015	0.009	305	198

碳当量CE: 3.91%

表4 采用高硫高氮增碳剂缸体铸件废品率统计
Table 4 The rejection rate of cylinder block casting with high sulfur nitrogen re-carburizer

时间	废品率/%	气孔废品率/%	缩陷废品率/%
2021年4月	2.15	1.19	0
2021年5月	1.47	0.47	0
2021年6月	1.36	0.3	0
2021年7月	2.83	0.47	0
2021年8月	1.98	0.66	0
平均值	1.96	0.65	0

定量的氮，可以在不加任何球化剂的条件下获得球墨铸铁。对于普通灰铸铁，氮使石墨片长度变短、弯曲程度增加，端部钝化，长宽比减小^[14]。由于石墨片的钝化，减轻了对基体组织的割裂作用。笔者公司使用低硫低氮增碳剂中氮含量为0.011%，使用10 t中频感应电炉，增碳剂按1.8%的加入量计算，铁液充分的溶解、扩散，最终铁液中的氮含量在0.000 1%~0.000 15%。采用高硫高氮和低硫低氮增碳剂按一定比例搭配使用进行铁液熔炼，使用的高硫高氮增碳剂含氮量约1.15%，最终铁液中的氮含量在0.006%~0.01%，由于氮

表5 高硫高氮增碳剂和低硫低氮增碳剂化学成分检测数据

Table 5 High sulfur nitrogen re-carburizer and low sulfur nitrogen re-carburizer chemical composition detection data

增碳剂	固定碳/%	S/%	N/%	水分/%	挥发物/%	灰分/%
低硫低氮	99.2	0.04	0.011	0.02	0.45	0.31
高硫高氮	99.13	0.45	1.15	0.026	0.41	0.43

含量的提高，能有效提高灰铸铁的性能。

氮对基体组织的影响作用：一是氮使灰铸铁平衡及非平衡共晶转变温度降低，并使其过冷度增大，这就为共晶团形核提供了更有利的能量条件，使共晶团数量增多，从而细化共晶团。共晶转变温度降低还使奥氏体含碳量提高，珠光体含量增加。另一方面是由于氮的原子半径比碳和铁都小，可以作为间隙原子固溶于铁素体和渗碳体中，氮的存在使铁素体和渗碳体

晶格产生畸变。由于上述两方面的原因，氮能强化灰铸铁基体组织^[15]。

图3、图4为使用全低硫低氮增碳剂铸件本体试样石墨形态和珠光体基体组织图片，图5、图6为使用高硫高氮增碳剂和低硫低氮增碳剂按一定比例搭配使用后的铸件本体试样的石墨形态和珠光体基体组织图片，从石墨形态图片中可以看出，采用高硫高氮增碳剂后石墨片的端部有弯曲，端部钝化。从基体组织图



图3 使用低硫低氮增碳剂的试样石墨形态 100×
Fig. 3 Graphite morphology of samples using low sulfur nitrogen recarburizer

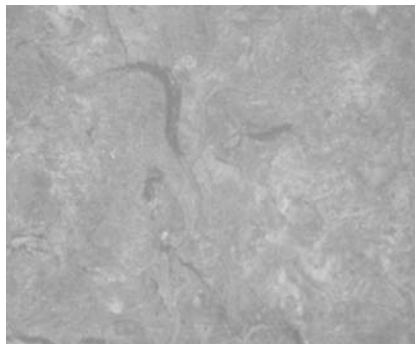


图4 使用低硫低氮增碳剂的试样基体组织 500×
Fig. 4 The metallurgical structure of the sample using low sulfur nitrogen recarburizer

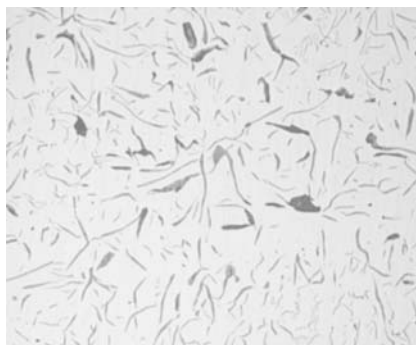


图5 使用高硫高氮增碳剂的试样石墨形态 100×
Fig. 5 Graphite morphology of samples using high sulfur nitrogen recarburizer



图6 使用高硫高氮增碳剂的试样基体组织 500×
Fig. 6 The metallurgical structure of the sample using high sulfur nitrogen recarburizer

片中看出，采用高硫高氮增碳剂后细化了珠光体，细化了基体组织，提高了灰铸铁性能。

6 结束语

使用高硫高氮增碳剂和低硫低氮增碳剂按一定比例搭配使用加入到铁液中，利用高硫高氮增碳剂中高含量的氮，可以提高铁液的氮含量，使石墨片长度变短、弯曲程度增加，端部钝化，同时细化了珠光体，改善了铸件组织形态，能稳定甚至提高铸件力学性能，为提高铁液碳当量创造了有利条件。

笔者公司某型号灰铸铁缸体铸件采用高硫高氮增碳剂和低硫低氮增碳剂按一定比例搭配使用进行铁液熔炼，铁液碳含量得以提高，结果铸件抗拉强度未降低，气孔、缩陷废品率大幅降低，缸体铸件废品率明显下降，就是利用高硫高氮增碳剂中高含量的氮元素对石墨形态和基体组织的影响。由于高硫高氮增碳剂中含氮量较高，铁液中的氮含量超过一定范围时会产生氮气孔，因此实际生产中要严格控制高硫高氮增碳剂和其余原材料的氮含量，每批材料要严格进行进厂检测。

参考文献:

- [1] 田永富, 杨群收. 增碳剂的选择及使用对铸件质量的影响 [C]//铸件质量控制及检测技术委员会第十一届学术年会暨天津市第十届铸造学术年会论文集. 北京: 北京铸锻行业协会, 2016.
- [2] 安存国, 乔进国, 鲍俊敏, 等. 高强度灰铸铁的生产过程控制及工艺探讨 [J]. 现代铸铁, 2021, 41 (6): 17-22.
- [3] 潘三红, 米寿杰. 石墨化石油焦增碳剂生产技术的现状与发展 [J]. 炭素技术, 2013, 32 (3): B13-B15.
- [4] 任现伟. 铸铁件气孔缺陷的原因分析与防止措施 [J]. 现代铸铁, 2020, 40 (4): 51-55.
- [5] 林勃. 孕育铸铁件皮下气孔从何而来 [J]. 机械工人, 1983 (1): 17-22.
- [6] 沈保罗, 李莉, 张昊. 碳含量对TU5JP4灰铸铁冷激凸轮轴铸造弯曲变形和气孔的影响 [J]. 中国铸造装备与技术, 2012 (6): 7-9.
- [7] 陆文华, 李隆盛, 黄良余. 铸造合金及其熔炼 [M]. 北京: 机械工业出版社, 2002.
- [8] 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, 1996.
- [9] 沈保罗, 李莉, 岳昌林. 消除CA55D半激冷合金灰铸铁凸轮轴缩孔 (陷) 的措施 [J]. 中国铸造装备与技术, 2010 (6): 39-41.
- [10] 蒋辉, 慕宗超, 宋学恩, 等. 中速机灰铁飞轮缩陷原因分析及防治 [J]. 中国铸造装备与技术, 2018, 53 (4): 62-64.
- [11] 程凤军, 罗广思, 陈雷, 等. 高强度合金灰铸铁件缩松形成原因与防止措施 [J]. 现代铸铁, 2019, 39 (2): 30-33.
- [12] 袁森, 魏兵. 铸铁件的树枝晶凝固分析与补缩 [J]. 铸造, 1996 (8): 27-29.
- [13] 任现伟. 增碳剂选择对合成铸铁组织性能影响的研究 [J]. 中国金属通报, 2019 (1): 185-186.
- [14] 翟启杰. 氮在铸铁中的作用及含氮高强度灰铸铁 [J]. 现代铸铁, 2001 (2): 27-33.
- [15] 翟启杰, 胡汉启. 氮对灰铸铁基体组织的作用 [J]. 金属学报, 1992 (10): B453-B456.

Application of High Sulfur Nitrogen Recarburizer to Reducing the Rejection Rate of Gray Cast Iron Cylinder Block Castings

WANG Jia-xiang

(Kunming Yunnei Power Co., Ltd., Kunming 650217, Yunnan, China)

Abstract:

A certain type of gray cast iron cylinder produced by our company use the low sulfur nitrogen re-carburizer for molten iron smelting, and the scrap rate of castings is high, mainly including blowholes and depression. The high sulfur nitrogen re-carburizer and low sulfur nitrogen re-carburizer are added to the molten iron in a certain proportion, while increasing the carbon content of the molten iron, the tensile strength of the casting did not decrease, the blowhole and depression rejection rate decreased significantly, and the rejection rate of the casting decreased significantly. The main reason is that the nitrogen content in the high sulfur nitrogen re-carburizer is high, the addition of high sulfur nitrogen re-carburizer increases the nitrogen content of liquid iron, nitrogen can make the length of graphite sheet shorter, the bending degree increased, the end is inactive, and can refine pearlite, strengthen the matrix structure, improve the mechanical properties of the casting, which is greatly beneficial to improving the quality of the cylinder casting, stabilizing the casting material, and reducing the production cost.

Key words:

low sulfur nitrogen re-carburizer; high sulfur nitrogen re-carburizer; blowhole; depression; nitrogen