

高镍 D5B 奥氏体球铁排气管的生产工艺

赵新武

(西峡县内燃机进排气管有限责任公司 河南 西峡 474500)

摘要: 总结了高镍球铁排气管铸件的铸造工艺, 对影响高镍奥氏体球墨铸铁球化率和力学性能的饱和度数据做了新的探索, 当饱和度 A 达到 4.9 时也生产出了球化合格的铸件。把均衡凝固技术运用到高镍奥氏体球铁铸件, 克服了热节处碎块状石墨的问题。通过与国外某公司退火处理对比试验, 验证了本文的热处理工艺是合理的。生产出的铸件远远超出了 ASTM 标准规定的力学性能指标, 达到了抗拉强度大于 400 MPa 的概率为 100%。

关键词: 高镍球铁; 排气管; 铸造工艺; 饱和度; 高温退火; 力学性能

中图分类号: TG255 文献标识码: A 文章编号: 1000-8365(2008)11-1456-05

Casting Technology of High-nickel Ductile Iron Exhaust Pipe

ZHAO Xin-wu

(Xixia County Internal Combustion Engine Air Intake and Discharge Pipe Co., Ltd., Xixia 474500, China)

Abstract: The casting process of high-nickel ductile iron exhaust pipe is summarized, and the saturation degree, which effects the spheroidization rate and mechanical properties of high-nickel austenite ductile cast iron, is discussed. When saturation A reaches up to 4.9, a casting with a good quality of spheroidization can also be produced. Furthermore, the chunky graphite on hot spots of high-nickel austenite ductile iron casting is solved utilizing proportional solidification technology. The heat treatment process is verified to be reasonable when compared with that in a foreign company. The mechanical properties of castings manufactured is far above the ASTM specification and the tensile strength of all castings is above 400 MPa.

Key words: High-nickel ductile iron; Exhaust pipe; Casting process; Saturation degree; High temperature annealing; Mechanical properties

高镍 D5B 球铁是耐热温度较高的铸铁材料。随着汽车马力的加大, 气体排放温度越来越高, 当气体排放温度超过 750 °C 时, 普通球铁和硅钼铸铁已不能满足需要。高镍奥氏体球墨铸铁具有强的抗热冲击性和抗热蠕变性, 很好的耐蚀性及高温抗氧化性, 而且有低的热膨胀性和很好的低温冲击韧度。因此, 高镍 D5B 和高镍 D5S 球铁就成了排气管的首选材料。目前我公司已能批量生产出口 D5S 球铁排气管, 最近又研制成功高镍 D5B 材质的球铁排气管供应国外某公司。

本文对比高镍 D5B 和 D5S 球铁排气管的铸造工艺谈一点体会。

1 高镍 D5B 和 D5S 球铁排气管的材质及结构特点

1.1 化学成分

两种高镍球铁材质的化学成分见表 1。可以看出, D5B 的硅低、铬高, 其余和 D5S 基本相同。高镍材质的共同点是: 碳量低, 熔炼温度高 ($\geq 1\ 620\ ^\circ\text{C}$), 浇注温度高 ($1\ 550\ ^\circ\text{C}$ 左右), 体收缩大, 流动性差, 糊状凝固, 补缩困难, 缩松倾向大, 工艺出品率低。

表 1 两种高镍球铁材质的化学成分 w(%)

Tab. 1 Chemical compositions of two kinds of high-nickel ductile iron w(%)

材质	碳	硅	锰	镍	铬	铜	磷	硫	镁	铁
D5S	≤ 2.4	5 ~ 5.5	≤ 0.5	34 ~ 36	1.5 ~ 2.5	≤ 0.5	≤ 0.05	≤ 0.03	≤ 0.09	余量
D5B	≤ 2.4	1.5 ~ 2.8	≤ 0.5	34 ~ 36	2 ~ 3	≤ 0.5	≤ 0.15	≤ 0.10		余量

1.2 力学性能

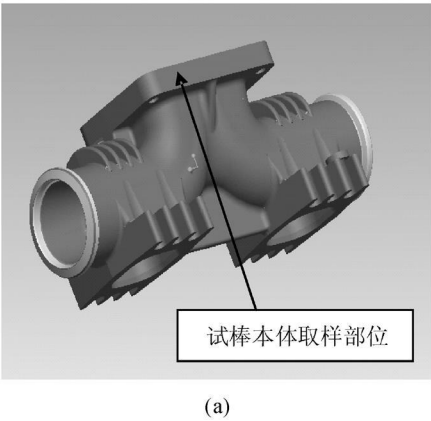
两种高镍球铁材质的力学性能见表 2。可以看出, 除了伸长率不同外, 其余基本一样。

表 2 两种高镍球铁材质的力学性能

Tab. 2 Mechanical properties of two kinds of high-nickel ductile iron

材质	抗拉强度 σ_b /MPa	屈服强度 $\sigma_{0.5}$ /MPa	伸长率 $\sigma(\%)$	HB
D5S	≥ 370	≥ 200	≥ 10	140~190
D5B	≥ 370	≥ 215	≥ 5	140~190

1.3 理化指标



基体组织: 奥氏体+碳化物; 石墨类型: 球状; 石墨大小 5~6 级; 球化率 $\geq 80\%$ (GB)。

1.4 产品结构特点

高镍球铁排气管的结构形状见图 1, 分别为两种类型。其特点是: 壁薄, 最小壁厚 5.5 mm; 壁厚差大, 最大壁厚 20 mm; 孤立热节多, 放置冒口困难; 尺寸精度尤其是对流道的三维曲面尺寸精度要求高。铸件重 6 kg。

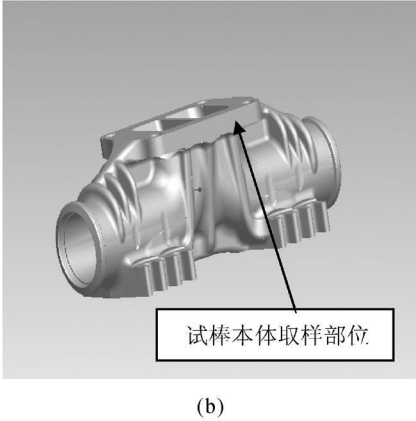


图 1 高镍球铁排气度的结构形状

Fig. 1 Structure of high-nickel ductile iron exhaust pipe

2 生产工艺分析

常规生产球墨铸铁把碳当量作为控制产品质量的重要手段, 在不产生石墨漂浮的前提下, 碳当量尽可能高, 以提高铁液的流动性, 并通过充分石墨化达到自补缩效果。但 D5B 材质的碳、硅量低, 普通球墨铸铁的生产工艺能不能用于高镍材质? 高镍奥氏体球墨铸铁和普通球墨铸铁的凝固特性是否相似?

高镍奥氏体球墨铸铁目前还没有国家标准, 国外在生产高镍材质时普遍采用大冒口或加保温冒口套补缩, 工艺出品率低。国内没有适用于生产线的保温冒口套, 使用保温冒口套需要进口。

国外配料普遍采用高纯度低碳钢加增碳剂的方法。但国内较纯的低碳钢来源困难, 国产增碳剂含硫高, 不能达到速溶, 且吸收率较低。

据资料介绍, 高镍奥氏体球铁中的碳、硅、镍含量必须满足饱和度公式:

$$A \geq TC\% + 0.25\%Si + 0.06\%Ni \tag{1}$$

式中 A 称为饱和度, 当铁液中的碳、硅、镍大于某一极限值(饱和度 A)时则石墨形态就呈碎块状分布。奥氏体枝晶发达, 铁液流动性差, 补缩困难, 极易产生缩松、缩孔缺陷。有资料介绍 A 不能大于 4.4, 而 D5B 和 D5S 的饱和度很容易超过 4.4。因此, 某公司把终碳量定为 1.75%~1.85%(D5S 德国标准 $C \leq 2\%$), 可能是考虑到饱和度 A 的影响, 有意把碳压低的缘故。

故。

据资料介绍碳当量与镍有关, 其公式为:

$$CE = w(C) + 0.3 \times w(Si) + 0.047 \times w(Ni) - [0.0055 \times w(Ni) \times w(Si)] \tag{2}$$

抗拉强度随碳当量的提高而提高。提高碳当量就意味着饱和度 A 的提高, A 的提高反过来又有可能产生碎块状石墨和降低力学性能。三者互为影响, 互相制约。

3 生产工艺

3.1 化学成分选择

(1) 碳: 原铁液控制在 2.35%~2.45%, 终碳量控制在 2.1%~2.3%。碳是一种石墨化元素, 在普通球铁中, 高碳低硅大孕育量已是成熟的经验。能不能把这一经验用在高镍奥氏体球墨铸铁的生产中, 我们通过实践进行了验证。

(2) 硅: 技术要求 D5B 含 1.5%~2.8%Si, D5S 含 5.0%~5.5%Si, 两者有明显的差别。D5S 在制定工艺时考虑到饱和度的影响, 硅取下限。D5B 硅低, 为避免出现白口, 终硅必须靠上限, 通过多次孕育以促使石墨化、细化晶粒和消除白口。终硅量定在 2.5%~2.8%。

(3) 镍: 考虑到经济性, Ni 选在 34%~35%。

(4) 铬: 少量的铬能溶入奥氏体, 起稳定奥氏体的作用, Si 与 Cr 的综合作用可获得更好的耐热性和耐

蚀性。但铬与碳形成的碳化物分布在晶间,影响切削性能,降低伸长率和冲击值。Cr 控制在 2.0% ~ 2.5%。

(5) 锰:配料时一般不考虑, Mn 不超过 0.5%。

(6) 磷:配料时一般不考虑, P 不超过 0.035%。

(7) 硫:配料时一般不考虑, S 不超过 0.02%。

S、P 均是杂质元素,应尽可能控制的低一些。

3.2 熔炼工艺

生产高镍奥氏体球墨铸铁的炉料一定要干净纯洁,避免有害元素的混入,如 Pb、Ti、As 等。

使用南非的高纯生铁,质量一直很稳定,我们曾试图使用国产的 Q10 生铁,在冒口处发现有片状石墨。后在使用南非生铁生产时也发现有片状石墨。经过分析认为电炉熔炼蠕铁材质后接着熔炼高镍材质,混入了微量元素(如 Ti),高镍材质不含稀土元素,无法抵消微量有害元素的影响,估计微量有害元素的干扰是产生片状石墨的原因。后来把熔炼顺序改为生产普通球铁后再生产高镍球墨铸铁,并加强炉料的管理,这一现象得到了消除。增碳剂一定要用速溶增碳剂在低温加入。镍有极强的吸气性,为防止铁液吸气,镍板在熔炼后期加入,铁液要覆盖熔炼。铬铁等合金最好在光谱测量原铁液成分后调整成分时加入。

3.3 球化处理工艺

球化处理采用凹坑处理法,铁液包要充分预热,浇注前要多烫包,保证铁液包始终保持暗红色。由于高镍材质的残留镁量高,极易产生皮下气孔,铁液要平稳浇注,浇道要采取多次避渣,底返式横浇道。当内浇口过于封闭,进入型腔的铁液产生飞溅,造成镁大量烧损,就会产生皮下气孔。浇注温度不能小于 1460℃,否则同样产生皮下气孔,如图 2。尽量减少球化处理和浇注过程的温差,具体措施就是铁液包充分的预热,浇注尽可能的快,充满浇口,不得断流。这也是保证产品质量重要的一环。



图 2 皮下气孔

Fig. 2 Subsurface blowhole

合金选用龙南县龙钇重稀土材料有限公司的镍镁合金,该合金含镁量 20%,采用真空熔炼技术, MgO 含量小于 0.05%,杂质少,成分均匀,经过几年的使用,效果很好。也曾使用过镍镁硅合金、稀土硅铁镁合金,都有成功的案例,但质量不稳定。镍镁合金处理的管壁上球化率可稳定达到 90%以上,如图 3。

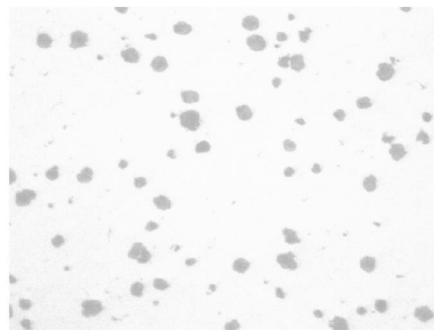


图 3 镍镁合金处理的球化率达 94%(ISO 标准)

Fig. 3 94% spheroidization processed by NiMg alloy (ISO standard)

3.4 孕育处理工艺

D5B 和 D5S 的孕育工艺相同。由于 D5B 的硅低,一方面要考虑到尽量把回炉料用完,另一方面还要考虑到铸件不产生白口,多次孕育也是获得合格铸件的关键。利用 75 硅铁较强的石墨化作用和硅锆孕育剂平稳持久的孕育效果,不但球化率较高,碳化物分布也较均匀,如图 4、图 5。

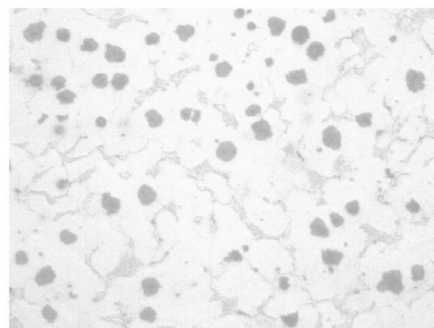


图 4 D5B 材质中心碳化物分布(铸态)

Fig. 4 Distribution of carbides in the centre of D5B (as-cast)

球化剂用 0.3% ~ 0.5% 的 75 硅铁覆盖。选用 0.3% ~ 0.6% 的硅锆孕育剂,铁液出三分之二时撒入;浇注时硅锆孕育剂随流孕育。

3.5 饱和度和碳当量的验证

按照上述成分设计,饱和度 A 是 4.904 9,碳当量 CE 为 4.06%。从铸件加工、解剖到 X 光探伤,未发现任何缩松,见图 1。为什么饱和度 A 超过 4.4 而未出现缩松呢?本文认为饱和度 A 是受多种因素影响的数值,如壁厚大小、温度高低、合金的用量、合金的选

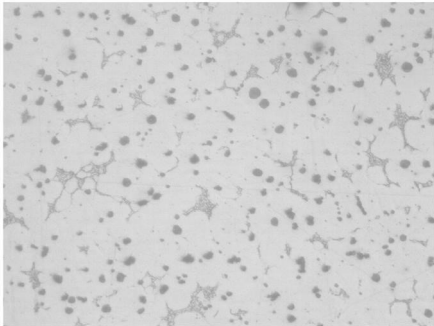


图 5 D5S 材质中心碳化物分布(铸态)

Fig. 5 Distribution of carbides in the centre of D5S (as-cast)

用、凝固速率等。根据我们的经验, 饱和度 A 和碳当量在生产薄壁小件时均应选高一些, 高的碳当量可提高铁液的流动性, 采用多次孕育不但细化了组织, 提高了球化率, 而且消除了缩松。

刚开始试制时, 冒口颈处球化率不符合要求, 有碎块状石墨, 见图 6; 断口处有缩松, 见图 7。后经采用均衡凝固原理^[1]进行工艺改进, 冒口颈设计成宽、薄、短形式, 不但解决了缩松, 不但减小了冒口, 由于加快了冒口颈处的冷却速度, 使球化率得到了提高, 见图 8、图 9。实践证明, 高镍奥氏体球墨铸铁具有和普通球铁类似的凝固特性, 均衡凝固技术也适用于高镍球墨铸铁。

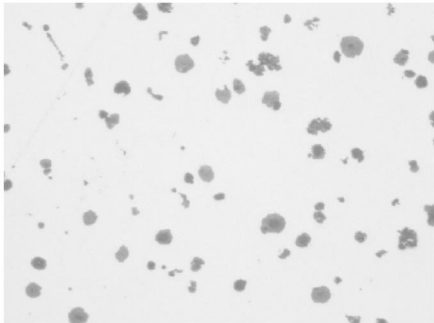


图 6 冒口颈处球化率 78.7%(ISO 标准)

Fig. 6 78.7% spheroidization in the neck of riser (ISO standard)

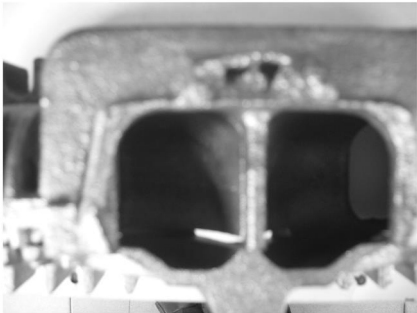


图 7 冒口颈缩松

Fig. 7 Shrinkage porosity in the neck of riser

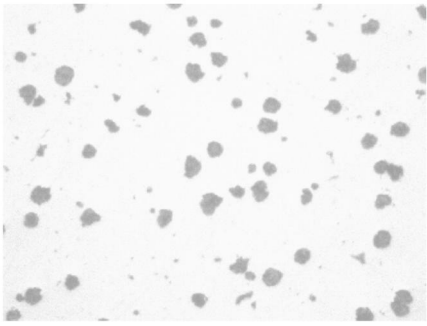


图 8 冒口颈处球化率 89%(ISO 标准)

Fig. 8 89% spheroidization in the neck of riser (ISO standard)



图 9 铸件无缩松

Fig.9 Casting without shrinkage porosity

3.6 制芯、造型、混砂工艺

高镍奥氏体球墨铸铁的浇注温度高, 砂芯必须耐高温性好, 防止砂芯在高温下变形。砂芯发气量小, 透气性要好, 防止砂芯在高温下产生大量气体使铸件产生呛火、起皮、气孔等缺陷。我们委托厂家生产一种高强度低发气量、规格为 50~100 目的覆膜砂, 常温抗拉强度 4.8~5.2 MPa, 热态抗拉强度 2.2~2.3 MPa, 发气量 ≤ 17 mL/g, 结壳厚度不小于 7 mm, 并在砂芯不易倒空的地方扎气眼针, 加强排气, 存放超过两个星期的砂芯不能使用。

造型设备是日本的东久主机, 天津亨特尔的湿型砂造型生产线。生产高镍奥氏体球墨铸铁同样要考虑到砂型的排气问题, 具体方法就是在模具上开排气道、扎气眼针, 加强排气。覆膜砂全部经过焙烧, 造型砂全部用溃散的覆膜砂芯, 不存在高温下由于相变产生的铸造缺陷。从目前的情况看能完全满足生产需要。

混砂设备是丹麦的迪砂混砂机, 在线检测。为了减少铸型的发气量, 尽可能的压低含水量, 水分控制在 3.5%, 根据气候适当调整。适当增加煤粉含量, 由原来的 0.5% 提高到 0.8%, 既提高了铸件的表面粗糙度, 产生的保护性气体又能防止镁的过分燃烧。

3.7 热处理

根据顾客的要求,按照顾客的热处理工艺对产品进行退火处理,热处理工艺为 870 °C×4 h,炉冷至 540 °C后空冷。退火后的金相图片见图 10。退火后的力学性能不符合要求,抗拉强度 340 MPa,屈服强度 230 MPa,伸长率4%。分析原因:碳在奥氏体中的溶

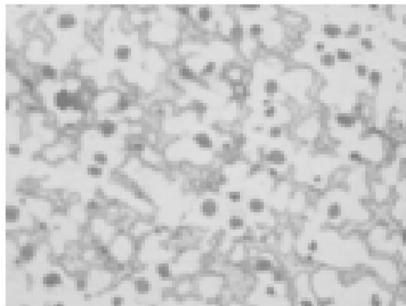
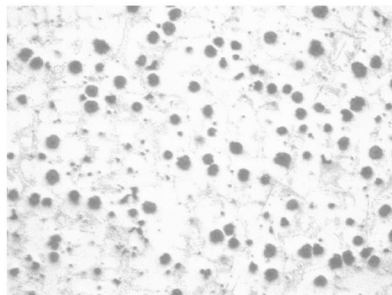
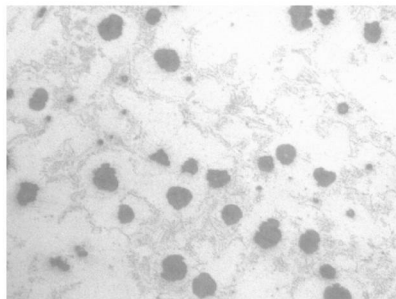


图 10 870 °C退火金相组织

Fig. 10 Microstructure of ductile iron after annealing at 870 °C



(a) 石墨×100



(b) 基体×200

图 11 改进热处理工艺后的金相组织

Fig. 11 Microstructure of ductile iron utilizing the modified heat treatment process

表 4 改进热处理工艺后的力学性能

Tab. 4 Mechanical properties of ductile iron after heat treatment by modified technology

状态	屈服强度/MPa	抗拉强度/MPa	伸长率(%)	硬度/HB
退火	325	470	13.5	163
退火	360	405	6.5	168
退火	335	475	11.5	171
退火	310	500	13	166
退火	380	410	6.5	162

D5B 材质由于它的凝固特性极易产生显微缩松,显微缩松对试棒的伸长率是有影响的。我们分别把铸件法兰盘的上(上箱)下(下箱)左右制成四个试棒,铸件法兰盘的上箱中部放有补缩冒口,试棒的有效部位就在冒口颈的中部,此处冷却缓慢,晶粒较粗,枝晶发达,并存在显微缩松,导致伸长率较低。下箱和左右试棒不存在显微缩松,伸长率明显高。

解度随着温度的升高而增大,在随炉缓慢冷却过程中,碳以铬的复合碳化物形态从奥氏体中析出并分布在晶界,这是伸长率下降的根本原因,见表 3。依据以上的分析,我们调整了热处理工艺,即 970 ±10 °C保温 4 h 后空冷,铸件经过热处理后碳化物完全变成了珠粒状,见图 11。伸长率和力学性能大幅度提高,见表 4。但伸长率相差较大,是什么原因呢?经分析认为,按照客户标准要求,试棒采用单铸试块,我们在单铸试块力学性能合格的基础上又对铸件本体取样,值得注意的是,

表 3 原热处理工艺的力学性能

Tab. 3 Mechanical properties of ductile iron after heat treatment by original technology

状态	屈服强度/MPa	抗拉强度/MPa	伸长率(%)	硬度/HB
铸态	260	390	6	178
铸态	255	405	8	174
退火	260	340	4	165
退火	230	345	3	162

4 结语

高镍奥氏体球墨铸铁具有和普通球铁类似的凝固特性,均衡凝固技术也适用于高镍奥氏体球墨铸铁。采用宽、薄、短冒口颈,利用石墨化膨胀产生自补缩作用消除缩松,克服了由于饱和度太高,冒口颈处凝固过慢产生的碎块状石墨。在生产薄壁小件时饱和度达到 4.9,碳当量在较宽的范围内波动,也能生产出合格铸件。生产中还应注意,在每道工序严格控制产生气体的来源,加强排气;加强炉料管理,防止微量元素混入;D5B 和 D5S 的铸造工艺基本相同。目前已生产出满足顾客需求的排气管。

致谢:本文的工作曾得到西 安理工大学袁森教授的指导,在此表示诚挚的谢意。

参考文献

[1] 魏 兵,袁 森,张卫华. 铸件均衡凝固技术及其应用 [M]. 北京:机械工业出版社,1998.