

高镍奥氏体球墨铸铁涡轮增压器壳体材质及工艺研究

金永锡, 范仲嘉

(上海圣德曼铸造有限公司, 上海 201805)

摘要: 对高镍球铁涡轮增压器壳铸件的开发和研究进行了系统总结, 包括高镍奥氏体球铁材质成分和铸件工艺设计, 球化剂、孕育剂的选择和制备, 高镍球铁壳铸件表面气孔缺陷和缩孔缩松缺陷的消除, 高镍奥氏体球铁铸造性能的测试以及高镍球铁涡轮增压器壳铸件理化检测问题。

关键词: 高镍奥氏体球铁; 涡轮增压器壳体; 工艺设计; 镍镁硅球化剂; 缺陷消除

中图分类号: TG255 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-4977 (2005) 05-0494-07

Investigation About Material and Technology for Turbine Housing of High-Ni Austenitic Ductile Iron

JIN Yong-xi, FAN Zhong-jia

(Shanghai Sandmann Foundry Co, Ltd., Shanghai 201805, China)

Abstract: Manufacture and investigate about turbine housing of high-Ni austenitic ductile iron were summarized systematically. It include material component and technological design of high-Ni austenitic S.G.I, selection and manufacture of spheroiditic agent and inoculant, elimination of surface porosity and shrinkage defects for turbine housing castings, determination of foundry properties and physiochemical properties for high-Ni austenitic S.G.I.

Keywords: Ni-resist austenitic S.G.I; turbine housing; technological design; Ni-Mg-Si spheroiditic agent; eliminate defect

近 20 余年来, 涡轮增压技术不仅广泛用于大中型客车、载重汽车, 而且已广泛应用在轿车的发动机上, 以增加驱动功率、改善经济性和减少对环境的污染。近几年, 一些国产中高级轿车也配备了涡轮增压器, 如奥迪、帕萨特轿车等; 以帕萨特 B5 轿车为例, 1.8T 涡轮增压发动机功率已达到 110 kW。随着涡轮增压技术的发展, 进入涡轮的废气的温度从原来的 550 ℃ 增高到 650~750 ℃ 或更高。以往使用的 Si-Mo 合金球铁已不能满足要求, 高镍奥氏体球铁因具有比 Si-Mo 合金球铁更好的耐热、耐腐蚀性而获得广泛应用。

在美国 ASTM 标准中奥氏体球墨铸铁有 D-2、D-2B、D-2C、D-3、D-3A、D-4、D-5、D-5B、D-5S 等九个型号, 镍含量为 18%~38%。这种铸铁不仅常温力学性能高, 有极好的抗热冲击性和抗热蠕变性, 极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性。尤其是其中含镍最高、碳最低的 D-5S。

我国 90 年代以前一直限制镍的使用, 故有关高镍奥氏体球铁的科研及生产几乎处于空白, 在国内文献中也很难见到有关技术的报道, 大规模工业化生产

有待开发。

在多年生产 Si-Mo 系耐热球铁增压器壳的基础上, 开发了某公司 D-5S 牌号高镍壳, 先后解决了下述技术问题:

- (1) 高镍球铁球化处理用球化剂的选用与开发制备;
- (2) 高镍球铁涡轮增压器壳体铸件的气孔和皮下气孔问题;
- (3) 高镍球铁涡轮增压器壳体铸件的缩孔、缩松问题;
- (4) 高镍球铁涡轮增压器壳体铸件的性能和化学成分的检测技术。

通过开发, 掌握了高镍球铁的生产技术, 研制完成了高镍奥氏体球墨铸铁涡轮增压器壳体铸件的合格样品; 同时, 完成了铸件机加工的工艺装备, 具备了向用户提供高镍球铁涡轮增压器壳体零件的条件。

1 铸件技术要求

材料标准按 D-5S 含镍奥氏体球墨铸铁的要求, 见表 1、2、3。

收稿日期: 2004-10-14 收到初稿, 2005-03-31 收到修订稿。

作者简介: 金永锡 (1943-), 男 (回族), 浙江杭州人, 教授级高工, 主要从事铸铁工艺及设备的研究。E-mail: yongxij@shanghai-sandmann.com

表1 力学性能(铸件本体取样)

Table 1 Mechanical properties of Ni austenitic ductile cast iron

抗拉强度 /MPa	屈服强度 /MPa	伸长率 (%)	硬度 (10/3000 HB)
≥345	≥207	12	≤240

表2 金相组织(铸件本体取样)

Table 2 Microstructure of Ni austenitic ductile cast iron

石墨形态	石墨个数 / (个·mm ⁻²)	基体
I+II≥90%	>100	奥氏体+碳化物

表3 化学成分

Table 3 Chemical composition of Ni austenitic ductile cast iron

元素	质量百分比 (%)	元素	质量百分比 (%)
C	≤2.0	P	≤0.07
Si	4.8~5.3	S	≤0.03
Ni	34.0~38.0	RE	≤0.01
Cr	1.6~2.2	其它元素	≤0.2
Mn	≤0.7	杂质总量	≤2.0
Mg	0.035~0.09	Fe	余量

2 铸造工艺的开发

2.1 铸造工艺方法的确定

研制的涡轮增压器壳体铸件虽是形状不很复杂的小铸件,但该铸件质量和技术要求高。

(1) 尺寸精度要求高,尤其对流道的三维曲面尺寸精度要求很高,按规定的27个剖面流道曲线必须与三维光盘中相应的剖面的流道曲线完全吻合;

(2) 为降低流动阻力,流道部位铸件表面质量须符合产品标准,表面粗糙度 $Ra12.5$,铸件不允许有缩孔、缩松、气孔、夹杂、冷隔等缺陷;

(3) 铸件材质为含镍、硅最高的奥氏体球铁 D-5S,合金含量高、碳量低,熔炼浇注温度高,铸造工艺性能差。

因此,正确选用合适的铸造工艺十分重要。首先确定采用壳型作为铸型,覆膜砂热芯盒制芯,以满足对铸件精度和表面质量的要求;其次,确定采用中频感应电炉熔炼,试制时用150 kg电炉,在试验工场仿照实际生产条件进行,批量认可时在车间500 kg电炉和壳型生产线上进行。球化方法仍沿用硅钼球铁壳采用的包内冲入法,包内加瞬时孕育。另外,为消除铸件缺陷,工艺设计中采用陶瓷过滤网和保温发热冒口技术。

2.2 铸造工艺参数的确定

根据前期材质试验测试,确定铸件线收缩率和体收缩率,浇注温度大于1450℃时,铁水流动性接近普通球铁。

2.3 浇冒口和工装设计

2.3.1 型板和芯盒布置

该铸件在德国 Hottinger 公司 MSA-11B 翻斗式壳型机上制壳,1型2件,水平分型,水平浇注。最初设计为大孔法兰朝下,以利于型芯定位,后因铸件呛火而改为大孔法兰朝上,以使砂芯排气畅通。

2.3.2 浇注系统设计

(1) 浇注时间计算

已知2件/型,4 kg/件,设工艺出品率为50%,则每型铁水量 $W = 8/0.5 = 16$ kg,采用统计平均公式

$$t = \sqrt{W} + \sqrt[3]{W} \quad (1)$$

则 $t = \sqrt{16} + \sqrt[3]{16} = 4 + 2.52 = 6.52$ s (2)

若采用球铁的经验公式,则

$$t = (2.0 - 3.5)\sqrt[3]{W} = 2.0 \times \sqrt[3]{16} = 2 \times 2.52 = 5.04$$
 s (3)

综合式(2)、(3)计算结果,取 $t = 5.5$ s。

(2) 浇注系统截面计算

按大孔出流计算法。

设 $\mu_1 = 0.6, \mu_2 = 0.55, \mu_3 = 0.5$,

$$A_1 : A_2 : A_3 = 2 : 1.4 : 1 \quad (4)$$

由 $K_1 = \frac{\mu_1 A_1}{\mu_2 A_2} = 1.56$ (5)

$$K_2 = \frac{\mu_1 A_1}{\mu_3 A_3} = 2.4 \quad (6)$$

得 $\frac{K_2^2}{1 + K_1^2 + K_2^2} = 0.626$ (7)

将式(7)及 $H = 13$ cm、 $C = 10.5$ cm 代入下式

$$h_p = \frac{K_2^2}{1 + K_1^2 + K_2^2} \left(H - \frac{C}{8} \right) = 7.32$$
 cm (8)

$$\sum A_3 = \frac{W}{0.31 \mu_3 t \sqrt{h_p}} = 6.94$$
 cm² (9)

$$A_2 = 1.4 \times \sum A_3 = 1.4 \times 6.94 = 9.72$$
 cm² (10)

$$A_1 = 2.0 \times \sum A_3 = 2 \times 6.94 = 13.88$$
 cm² (11)

2.4 冒口设计

采用王济洲先生和周尧和先生提出的周界高法设计冒口尺寸^[1]。由铸件图将需补缩的厚壁部分简化为一空心圆柱体,其内径 $d = 3.45$ cm,外径 $D = 10.5$ cm,高度 $h = 3.24$ cm。但因砂芯直径小,被铸件壁厚包围,散热差,根据铸造手册第5卷提出的近似方法可将空心圆柱体看作实心圆柱体来计算模数。

$$M_c = \frac{rh}{2(r+h)} = 1.0$$
 cm (12)

$$\text{周界商 } Q_c = \frac{V}{M_c^2} = 280 \quad (13)$$

选定冒口形式, 采用边冒口, $H/D = 1.5$ 。

查常用冒口参数表(几何值)^[1], $Q_r = 154$, $D/M_r = 5.29$, $V_r/D^3 = 1.04$ 。

$$\frac{Q_c}{Q_r} = \frac{280}{154} = 1.82 \quad (14)$$

根据前述的铸造工艺参数取 $\epsilon = 7\%$ 。

查 f 数值表^[1] (f 是冒口和铸件的模数比, $f = M_r/M_c$)

得 $f = 1.174$

$$M_r = fM_c = 1.174 \times 1 = 1.174 \quad (15)$$

$$D = 5.29 \times 1.174 = 6.22 \text{ cm} \quad (16)$$

选用 Foseco 公司 Kalminex 2000 (1) 型冒口, 规格 SFP7/10K 有较大的安全量。

2.5 高镍球铁化学成分的确

奥氏体球铁材质 D-5S 的化学成分在技术标准中已有规定, 但具体控制范围确定则应考虑以下几点:

(1) 成分选择必须保证获得技术标准规定的金相组织, 即在含有少量碳化物的奥氏体基体上分布球状石墨, 没有片状石墨, 没有超标的碎块状石墨、蠕虫状石墨, I + II 型石墨含量 $\geq 90\%$;

(2) 要尽可能有利于铸造工艺性能的改善;

(3) 要尽可能降低原材料成本。

按以上原则确定各元素的准确范围。

2.5.1 碳 (C)

碳是高镍球铁的重要元素, 它不仅决定石墨的数量和分布形态, 而且对流动性、收缩性、白口倾向等铸造工艺性能影响很大。从改善铸造工艺性出发, 碳量应选取技术验收标准允许范围的上限, 但受到出现碎块状石墨 (Chuck graphite) 的限制, 对高镍奥氏体球铁来说存在一个经验公式

$$w(C) + 0.2 \times w(Si) + 0.06 \times w(Ni) = A \quad (\text{常数})^{[2]}$$

A 称为饱和数, 若铁水的 C、Si、Ni 含量使饱和值大于某一极限值, 则石墨形态就呈碎块状分布。其值与凝固速率有关, 对尺寸为 $127 \text{ mm} \times 127 \text{ mm} \times 254 \text{ mm}$ 试块而言, 其饱和数为 4.5, 而涡轮壳类薄壁小件饱和数可达 4.8 以上。据此确定 C 的质量分数为 $1.75\% \sim 1.85\%$ 。

2.5.2 硅 (Si)

鉴于耐热性要求, 技术标准将 D-5S 含硅量定得很高, 为 $4.8\% \sim 5.3\%$ 。但 Si 量同样受饱和数的限制, 为此 Si 只能取技术标准的下限即 $4.8\% \sim 4.9\%$ 。

2.5.3 碳当量 (CE)

高镍球铁碳当量还与含 Ni 量有关, 其碳当量的计算公式^[2]

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

对于涡轮壳薄壁铸件, 为避免出现白口, 碳当量控制在 $4.1\% \sim 4.4\%$ 。

2.5.4 镍 (Ni)

Ni 是高镍球铁的基本元素, 加入量大于 13.5% , 就能在室温得到奥氏体基体。D-5S 是镍球铁中镍含量最高的一种, 达 $34\% \sim 38\%$, 具有特别高的抗氧化性和低的热膨胀性, 可长期在 $800 \text{ }^\circ\text{C}$ 以上的高温环境下工作。但 Ni 是价格昂贵的金属, 从经济效益考虑, Ni 量应控制在要求的下限 $34.5\% \sim 35.5\%$ 。

2.5.5 铬 (Cr)

Cr 是高镍球铁的重要元素, 少量 Cr 能溶于奥氏体基体, 有利于稳定奥氏体^[3], 并因 Ni 与 Cr 的综合作用获得更好的耐热性和耐蚀性。但 Cr 是强碳化物形成元素, 形成的铬合金碳化物分布在晶间, 会影响切削性能, 降低伸长率和冲击值。Cr 应控制在标准下限, 即为 $1.6\% \sim 1.7\%$ 。

2.5.6 锰 (Mn)

球墨铸铁中一般选用低的 Mn 含量, 因既不需要用 Mn 来平衡 S 量, 也可避免因 Mn 的偏析而生成硬化组织, 在高镍球铁中, 则 $w(Mn) \leq 0.25\%$ 。

2.5.7 磷 (P)

P 在奥氏体中溶解度极低, 一般以磷共晶形式存在于晶界, 恶化高镍球铁的性能, 则 $w(P) < 0.03\%$ 。

2.5.8 硫 (S)

S 在高镍球铁中亦是一种杂质。要求原铁水 $w(S) < 0.02\%$ 。

2.6 高镍球铁的熔炼工艺

2.6.1 炉料及配比

生产高镍奥氏体球铁 D-5S 应选用高质量的炉料, 炉料中不能含有超标的微量有害元素, 如 Pb、Ti、As 等。由于高镍球铁中不允许含有能抵消微量有害元素影响的铈 (Ce) 等稀土元素, 故过量的 Pb、Ti、As 就会对石墨形态和性能产生很有害的影响。要求 $w(Pb) \leq 20 \times 10^{-6}$, $w(Ti) \leq 300 \times 10^{-6}$ 。注意炉料尤其是废钢的洁净度, 否则会加剧铁水吸气、造成气孔。为此, 使用了加拿大 QIT 公司的高纯生铁和固定来源的冲压边角废钢。

高镍球铁回炉料因 Ni 和 Cr 的含量高, 应尽量回用。回炉料配比很高时, 须注意缩孔、缩松问题^[4]。

高镍球铁中的 Ni 以电解形式加入。Cr 以含 Cr 质量分数为 $61\% \sim 65\%$ 的铬铁加入, Si 以 75% 硅铁加入。

2.6.2 熔炼控制

镍在熔炼中烧损很小, 但镍有很强的吸气性^[5], 氧、氢、氮都能溶解于高镍铁水中。为避免针孔, 电解 Ni 要在熔炼后期加入。为降低 Cr 的烧损, 减少炉

衬侵蚀, 铬铁应在铁水过热后期加入^[2]。

高镍球铁的熔点较高, 铁水流动性较差, 为保证足够的浇注温度, 铁水出炉前的过热温度需比一般球铁高得多。

2.7 球化处理工艺。

2.7.1 球化处理及球化剂

高镍球铁的球化处理仍采用简便的凹坑冲入法。在试制初期曾使用过三种球化剂, ①常用的含稀土(RE) 1%的镁硅铁球化剂, ②无稀土的镁硅铁球化剂, ③镍镁硅铁球化剂。

(1) 普通含稀土球化剂处理后, 铸件金相组织中石墨呈碎块状、蠕虫状和点状, 不符合技术标准, 见图1。铸件本体的 σ_b 为315~366 MPa, δ 为5.0%~8.5%, 均不合格。

(2) 使用不含稀土的镁硅铁球化剂, 虽消除了碎块状石墨, 但石墨球化不理想, 见图2。

(3) 使用镍镁硅铁球化剂, 不但无碎块状石墨, 而且石墨球化理想, 见图3。力学性能大大提高, 铸件本体 σ_b 为475~510 MPa, δ 为14%~23%, 都超过了技术标准规定。

2.7.2 球化控制及碎块状石墨的消除

上述金相图可见, 球化剂不能含有稀土(RE), 文献[2]认为, 只要含有微量的铈(Ce), 就对高镍奥氏体球体十分有害, 石墨呈碎块状, 力学性能大大下降。因此高镍球铁不允许使用含稀土的镁硅铁球化剂。

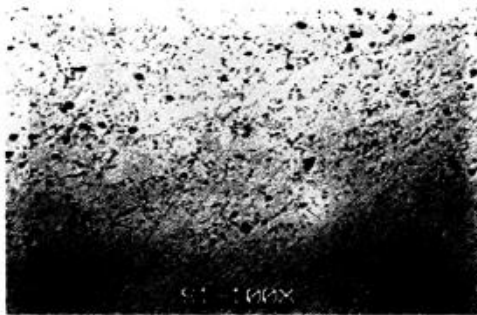


图1 稀土镁硅铁球化处理金相照片(未腐蚀)100×

Fig.1 Microstructure of experimental samples treated by RE-Mg-Si nodularizer



图2 无稀土镁球化处理金相照片(未腐蚀)100×

Fig.2 Microstructure of tested samples without globularizing

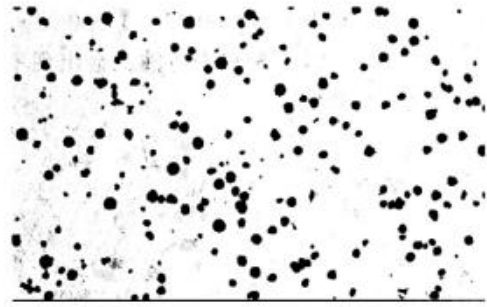


图3 Ni-Mg-Si 球化处理金相照片(未腐蚀)100×

Fig.3 Microstructure of tested samples with the globularizing of Ni-Mg-Si nodularizer

对高镍球铁比较适合、常用的球化剂是镍镁硅合金, 实践证明, 用镍镁硅球化剂处理时反应激烈程度小, 产生的烟雾少, Mg的吸收率可达60%以上。

高镍球铁需要比普通球铁更高的残余Mg量。残余Mg量高, 有利于石墨形态的改善和性能的提高, 但也不能过高, 不然会出现黑渣缺陷。奥氏体球铁中的高镍使铁水中镁衰减率降低, 能显著减少球化衰退^[2]。

当铸件壁厚较大, 冷却速度较慢时高镍球铁很容易出现碎块状石墨, 导致性能下降。除了降低饱和数, 选用合适的球化合金及其加入量外, 加入某些能促进生成晶界间片状石墨的元素, 如Sb、Bi、Sn等, 可消除碎块状石墨而得到球状石墨^[2,6]。用Sn试验, 未加Sn的阶梯试块, 壁厚22mm以上出现碎块状石墨; 而在同一包铁水中加Sn后, 阶梯试块厚断面得到球状石墨。两种情况下的涡壳铸件本体金相组织都出现球状石墨, 但加Sn的石墨形态更圆整, 力学性能也更好些。图4为不加Sn, 用镍镁球化剂处理的金相照片; 图5为加Sn, 用镍镁球化剂处理的金相照片。

2.8 孕育处理

高镍球铁进行孕育处理是必须的。在饱和数小于临界值时, 用合适的孕育剂进行孕育, 即使在厚大截面上亦能获得规则的球状石墨结构; 不孕育则将产生粗的不规则的石墨, 力学性能差。当然, 若饱和数高于临界值, 即使进行孕育也会产生碎块状石墨。

高镍奥氏体球铁白口倾向大, 故孕育的另一主要目的是消除白口, 通过良好的孕育增加石墨球数, 避免含铬1.6%以上的D-5S铸件产生共晶碳化物并减少晶间碳化物的量^[2-3]。孕育剂可以采用75硅铁等, 按德国铸造厂的经验我们的试验, 采用含铈的孕育剂和含锆的孕育剂效果更好。铈对增加石墨球数十分有效, 锆则能脱氮, 促进石墨化, 抑制孕育衰退。

2.9 浇注

由于高镍球铁铁水流动性随充型过程下降很快, 应快速浇注充型, 这也有利于补缩, 但更重要的是保

证高的浇注温度。控制在 $1460\text{ }^{\circ}\text{C} \sim 1530\text{ }^{\circ}\text{C}$ 。当浇注温度低于 $1450\text{ }^{\circ}\text{C}$ 时, 涡轮壳铸件就会出现不同程度的冷隔、浇不足缺陷。



图4 不加 Sn, 用镍镁球化剂处理的球铁组织 $100\times$
Fig.4 Microstructure of ductile iron treated by Ni-Mg nodularizer

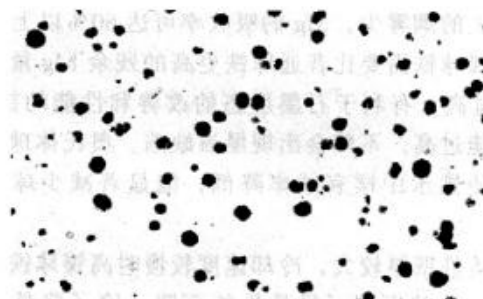


图5 加 Sn, 用镍镁球化剂处理的球铁组织 $100\times$
Fig.5 Microstructure of Sn-containing ductile iron, treated by Ni-Mg nodularizer

2.10 热处理

高镍球铁涡轮壳铸件热处理工艺见图6。铸件经过热处理, 组织中碳化物由条块状转变成粒状(图7、8), 改善了铸件的切削性能。

3 试制中若干工艺技术问题的研究

3.1 高镍球铁用球化剂、孕育剂的选择和开发

高镍球铁采用 Ni-Mg 合金球化剂, 国外资料有报道, 但国内没这种球化剂供应。为此须自制 Ni-Mg-Si 合金球化剂。

根据 Ni-Si、Ni-Mg 和 Si-Mg 合金相图, 采用二步熔炼法。

第一步将金属镍和硅铁熔炼成 Ni-Si-Fe 合金使其熔点降低, 使第二步熔炼时镁可保持在沸点以下。

第二步将 Ni-Si-Fe 合金碎块与金属镁和金属 Ni

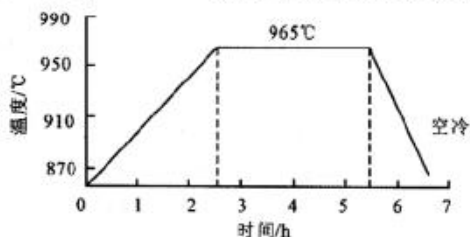


图6 热处理工艺

Fig.6 Heat treatment technology of high-Ni turbine housing casting

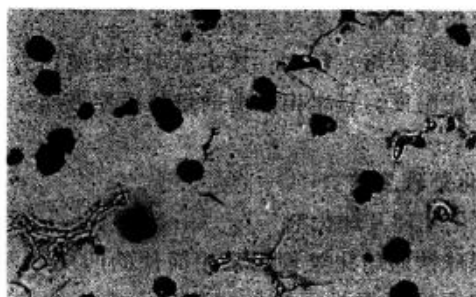


图7 铸态组织金相(苦味酸腐蚀) $400\times$
Fig.7 Micrograph of as cast turbine housing casting

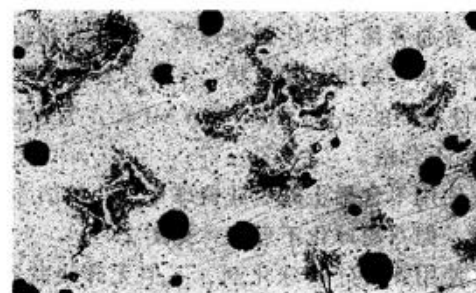


图8 热处理后组织金相(苦味酸腐蚀) $400\times$
Fig.8 Micrograph of turbine housing casting after heat treatment

以合理的熔炼工艺得到所需的 Ni-Mg-Si-Fe 合金。

3.2 高镍球铁涡轮壳铸件气孔问题

3.2.1 气孔缺陷状况

高镍球铁因低碳、高镍, 浇注温度比普通球铁高得多, 浇注温度必须在 $1450\text{ }^{\circ}\text{C}$ 以上, 在此高温浇注的镍球铁铸件, 铸件表面出现密集的气孔, 见图9, 涡轮壳气孔缺陷形貌见铸件剖面图10。

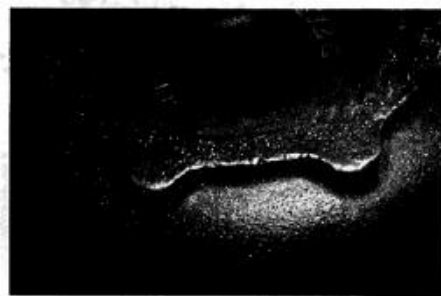


图9 严重气孔缺陷的涡轮壳体
Fig.9 A turbine housing with heavy gas holes defect



图10 涡轮壳体剖面皮下气孔缺陷
Fig.10 Subsurface porosity at cross-section of a turbine housing



图 11 采用加抗气孔添加剂覆膜砂所浇铸件

Fig. 11 A casting produced by coated sand with additive against gas holes

3.2.2 气孔原因分析

(1) 高镍球铁涡轮壳采用壳型铸造和覆模砂热芯工艺, 浇注时发气量大;

(2) 高镍球铁浇注温度高达 1 500 ℃ 以上, 树脂发气快而集中;

(3) 大量气体来不及从铸型逸出, 侵入金属液, 形成气孔。

3.2.3 采取的措施及效果

采取了一系列的措施 (表 4), 最终解决了皮下气孔缺陷难题。

3.3 高镍球铁涡轮壳铸件的缩孔缩松问题

3.3.1 缩孔缩松缺陷的状况

表 4 消除皮下气孔采取的工艺措施及效果评价

Table 4 Evaluation and technology measurements for eliminating subsurface porosity

序号	采取的措施	消除气孔的效果
1	增加壳型出气, 将砂芯直线段钻空以利排气	无效
2	减少树脂加入量 ≤ 3%, 发气量 ≤ 18%	无效
3	减小内浇口截面, 减慢浇注速度	无效
4	减少回炉料比例, 减少球化剂加入量	无效
5	优化熔炼加料次序, 把易吸气的 Cr-Fe、电解镍在出铁前加入, 铁水包充分预热, 加强铁水覆盖以减少吸气	无效
6	壳型和砂芯分别上醇基涂料	无效
7	壳型和砂芯上氧化铁红水基涂料并充分烘干	有效, 但铸件表面质量及尺寸不符合要求
8	壳型采用加氧化铁红粉的覆膜砂, 砂芯覆膜砂树脂加入量减少到 2%	有微效, 局部表面仍有气孔
9	外模和坭芯均采用加入抗气孔添加剂的覆膜砂制作 (图 11)	有显著, 铸件达到要求

高镍涡轮壳体的材质缩孔、缩松倾向大, 铸件壁厚又不均匀, 易在壁厚处出现缩孔或缩松等问题。经 X 射线探伤和解剖铸件, 在铸件剖面上, 可看到铸件厚实部位有缩孔和缩松现象 (图 12)。

3.3.2 几种解决缩孔、缩松缺陷的措施及效果

(1) 增大保温冒口的冒口颈尺寸, 结果无效。经冒口补缩距离复验, 原因是补缩距离过长。加大冒口, 采用发热保温冒口套等措施都不能解决问题。

(2) 在铸件产生缩孔相应部位的壳型、砂芯表面上激冷碲涂料, 结果无效。

(3) 在缩孔部位壳型上放置 3 块小冷铁, 结果无效。

(4) 在铸件缩孔部位放置与铸件同样材质的内冷铁 (图 13), 经 X 射线探伤和解剖, 缩孔、缩松消除, 内冷铁与铸件熔合良好。

(5) 在铸件缩孔部位相对应的砂芯表面放置外冷铁 (图 14), 经 X 射线探伤和解剖, 缩孔、缩松消除。

4 高镍球铁铸造性能的测试

4.1 流动性试验

铸铁铁液的流动性与合金的性质、铸型工艺特

点、浇注条件和铸件结构等因素有关。掌握高镍球铁铁液流动性的数据, 将为控制浇注温度和浇注系统设计提供依据。

测定铸铁铁液流动性的方法很多, 螺旋试样法应用较普遍, 其特点是接近生产条件, 操作简便, 测量的数据明显, 故本试验采用螺旋试样法。测定的数据见表 5。

4.2 线收缩试验

铸造合金线收缩的测定装置很多, 本试验采用单测线收缩测定仪。试验所得的线收缩率为 1.5%。



图 12 厚实部位的缩孔和缩松缺陷

Fig. 12 Shrinkage and porosity at the thick-wall section of a casting

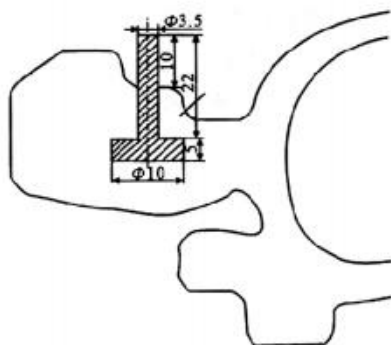


图 13 内冷铁大小和放置部位

Fig. 13 Shape of internal chill and its placement

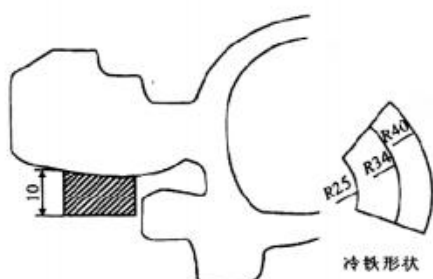


图 14 外冷铁形状及放置部位

Fig. 14 Shape of external chill and its placement

表 5 高镍球铁铁液流动性

Table 5 Fluidity of high-Ni ductile iron

材质	含 C 量 (%)	温度 / $^{\circ}\text{C}$	螺旋试样长度 /mm
DS-S	1.4	1 409	650
		1 527	985
	1.57	1 354	600
		1 467	950
	1.6	1 430	750
		1 511	1 000
	1.7	1 360	600
		1 432	825
	2.22	1 418	950
		1 531	1 275
稀土镁普 通球铁	3.62	1 338	980
		1 296	660
		1 280	410

5 理化检测

5.1 高镍球铁铸件试样的制备

高镍球铁金相组织中有很多的碳化物，碳化物硬质点在切削时易损伤刀具，在用普通带锯切削时，锯条很快变钝，不能使用。为此，选用了 JQ-1 型金相砂轮切割机，并用厚度为 1.2 mm 的砂轮片切割铸件，这样既降低了加工成本，也缩短了加工时间。

5.2 高镍球铁化学成分分析条件的创建

(1) 对原有的光谱分析仪加装了分析高镍成分的通道。

(2) 从美国贝尔公司购进镍球铁光谱标样。

(3) 组织光谱控样研制小组，制作高镍球铁光谱化学校正控制试样，具备较为完整的光谱化学成分标样和控样。

(4) 培训掌握高镍球铁成分的湿化学分析的方法。

6 结论

(1) 采用壳型铸造生产高镍球铁涡轮壳铸件能达到规定的尺寸精度和表面质量要求。

(2) 要获得金相组织、性能符合标准的高镍奥氏体球铁必须正确进行成分设计，控制成分的饱和数，并不能使用含稀土的球化剂及孕育剂。

(3) 镍镁硅球化剂是高镍奥氏体球铁理想的球化剂，熔制方法应采用两步法。

(4) 高镍奥氏体球铁熔炼、浇注温度高，铸件极易产生针孔缺陷，在覆模砂中加入特殊抗气孔添加剂并降低壳型砂的发气量，可消除铸件气孔缺陷。

(5) 合理设置浇口及冒口，必要时放置内冷铁和外冷铁可以解决铸件的局部缩孔缩松缺陷。

(6) 生产高镍奥氏体球铁必须建立快速有效的成分分析手段，增加高镍光谱通道，准备好光谱标样和控样，同时必须掌握湿法化学分析方法。

参考文献:

- [1] 周尧和, 王济周. 周界画法的实用性分析 [J]. 铸造, 1997, (6): 41
- [2] 奥氏体球铁的生产 [A]. BCIRA. 英国铸铁研究协会活页资料译文集, 第 7 分册 [C]. 英国: 英国铸铁研究协会 (BCIRA), 1990
- [3] 高岩, 王焕庭, 王富. 镍对铸铁耐高温浓硫酸腐蚀的影响 [J]. 铸造, 1997, (6): 12-15
- [4] 中泽曠, 等. 高镍奥氏体球铁的生产工艺特征 [J]. 铸造技术, 2003, (2): 91-93
- [5] 刘建立. 铸造镍铜合金——蒙耐尔合金的开发和应用 [J]. 铸造技术, 1993, (4): 36-37
- [6] Katsay R. 球墨铸铁 (第 1 册): 制造实务 [M]. 加拿大: QIT-Fer et Titane Inc, 1995

(编辑: 曲学良, qxl@foundryworld.com)

(选自《铸造》2005 年第 5 期)