

1 000 MW二次再热汽轮机特大型球墨铸铁件中压外缸的铸造

王 强, 吴铁明, 蒋毓良

(上海宏钢电站设备铸锻有限公司, 上海 200240)

摘要: 介绍了1 000 MW二次再热汽轮机特大型球墨铸铁件中压外缸的铸件结构特征、技术要求及生产难点。通过合理的工艺设计、成分选择及生产控制, 经力学性能、金相组织、无损检测等检查, 中压外缸铸件首次生产即满足技术标准的要求。

关键词: 特大型球墨铸铁件; 中压外缸; 生产控制

中图分类号: TG255 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-4977 (2016) 05-0424-04

Casting of Ultra-Large SGI Intermediate Pressure Outer Casing of 1000 MW USC Steam Turbine with Double Reheating

WANG Qiang, WU Tie-ming, JIANG Yu-liang

(Shanghai Honggang Power Station Equipment Castings & Forgings Co., Ltd., Shanghai 200240, China)

Abstract: The paper introduces the structure characteristics, technical requirements and production difficulties of ultra-large SGI (Spheroidal Graphite Iron) intermediate pressure (IP) outer casing of 1000 MW USC steam turbine with double reheating. Through the reasonable process design, composition choice and production control, the test of the mechanical properties, microstructure, nondestructive testing, the intermediate pressure outer casing meets the technical requirements at the first production.

Key words: ultra-large SGI; intermediate pressure outer casing; production control

我国是以煤炭为主要一次能源的国家, 火力发电在我国电力生产中占有主导地位, 火电厂的能源资源消耗和污染物排放已成为国民经济发展的关注焦点。大功率、高参数、高可靠性、高热效率和清洁环保已经成为当今汽轮机技术的发展方向。以节能减排为核心, 降低发电煤耗, 进一步提高汽轮机机组性能, 开发更高效的产品成为汽轮机设备制造业不可推卸的历史使命。二次再热技术可以有效地提高火力发电机组的热效率, 在相同蒸汽压力温度条件下, 二次再热机组的热效率比一次再热机组提高2%左右, CO₂排放降低约3.6%。因此, 上海电气电站设备有限公司汽轮机厂为适应我国电力生产行业的发展, 开发了汽轮机二次再热技术, 机组再热温度达到625℃, 压力35 MPa。二次再热1 000 MW汽轮机机组球墨铸铁中压外缸就是为此特别设计生产的。

1 中压外缸铸件特征及结构

表1、图1分别为中压外缸铸件的主要特征数据和

结构图。由表及图知, 铸件尺寸大, 呈壳体状, 表面积大, 结构复杂 (尤其是下半呈多孔分散布置), 厚薄不匀, 壁厚差悬殊 (最小壁厚60 mm, 最大壁厚320 mm)。

铸件重量大 (上半浇注重量约68 t, 下半约84 t), 属厚壁特大型球墨铸铁件。



(a) 中压外缸上半

(b) 中压外缸下半

图1 中压外缸上/下半结构图

Fig. 1 The structure chart of IP outer casing up/low

2 铸件的技术要求

铸件要求的力学性能如表2所示。

金相组织: 铸件应在交货状态进行金相组织检验,

收稿日期: 2015-08-02收到初稿, 2015-09-11收到修订稿。

作者简介: 王强 (1972-), 男, 高级工程师, 主要从事铸造工艺研发及企业管理工作。电话: 021-64358331-2608, E-mail: wangqiang3@shanghai-electric.com

球化级别不应低于3级，石墨尺寸应达到5~8级，珠光体含量应 $\leq 10\%$ 。

表1 中压外缸的主要特征数据

名称	外形尺寸 (长×宽×高)/mm	中分面 法兰/mm	垂直法兰 /mm	壳体 /mm	排/抽气口 法兰/mm
上半	6 890×5 000×2 655	325		65~120	232
下半	6 590×5 010×2 355	325	255	65~120	185

表2 铸件的力学性能要求

屈服强度 /MPa	抗拉强度 /MPa	伸长率 /%	断面收缩率 /%	冲击功 /J	硬度 HB
≥ 300	≥ 420	≥ 10	实测值		155~200

无损探伤：100%磁粉（MT）探伤和100%超声波（UT）探伤。探伤等级：中分面法兰、垂直法兰、猫爪、抽气口法兰为2级（局部为1级），其余均为4级。关键部位声速大于5 500 m/s。

精加工结束需15 bar泵水检验，保持30 min不渗漏。

3 铸造难点

中压外缸尺寸大，浇注重量分别为68 t及83.8 t，属特大型球墨铸铁件。铸件结构复杂，厚薄不匀，壁厚差悬殊（最小壁厚60 mm，最大壁厚350 mm），验收标准高，100% UT、MT检测。铸件是同类型中压外缸中最大的，如此大吨位的铸件是公司首次生产，对铸造工艺设计、熔炼、工装准备和整个生产过程的控制要求都非常严格。

铸件材质为合金球墨铸铁，无论是线收缩还是体收缩都要比普通球铁大，厚薄交界处更易产生收缩缺陷，影响铸件的承压能力，材质致密性控制难度高。同时，由于铸件表面积大，铁液注入型腔的过流时间长，浇注系统设计不当，易产生浮渣。

抽气口法兰易产生缩松。铸件下半位于铸件浇注位置的顶端，有5个抽气口，该部位浇注时流入到冒口的铁液温度较低，铁液经冒口过流后在抽气口法兰处易造成局部过热，在凝固时产生缩松，所以，如果冒口设计不当，易出现收缩缺陷。

两端汽封尺寸精度高。两端汽封尺寸为封闭尺寸，二槽之间最小距离有5 250 mm，两根汽封槽的宽度分别为45 mm和50 mm，要求按形状铸出。因汽封槽狭窄，加工余量小，靠铸造缩尺来保证，在生产中有难度。

熔炼设施及行车的布置不尽合理，导致铁液球化处理及浇注处理过程复杂繁琐。而中压外缸为厚壁特大型球墨铸铁件，凝固时间长，厚壁处石墨球易产生畸变。受此影响，石墨形态的控制具有无法预判的不

确定因素，风险极大。

4 生产控制

综上所述，要生产如此特大型铸件，对铸造工艺、铁液质量、工装等均有较高的要求。

4.1 铸型刚度的控制

球墨铸铁在凝固时会产生石墨膨胀，如果铸型刚度差，膨胀时砂型型壁位移而产生收缩缺陷。所以，大型球铁件的浇注，保证铸型的刚度是确保铸件质量的基础，为此制作了专用砂箱，同时在合箱后用专用装置加以紧固。

4.2 浮渣的控制

浮渣是球墨铸铁中存在的常见缺陷之一，其组分主要为 Mg_2SiO_4 （一次渣）和 $MgSiO_3$ （二次渣），铸件中存在的浮渣一般以二次渣居多，大多位于铸件的上表面及边角处。由于球化处理时镁的氧化及浇注过程中铁液充型的不平稳产生的二次氧化，浮渣是不可避免的。在浇注系统上设计过滤网是减少浮渣有效的措施之一。考虑到铸件吨位大，过滤网数量多，成本高，设置不当或质量不稳易产生铸造缺陷，所以设计开放型浇注系统，铁液平稳充型，可抑制紊流，减少浮渣。

4.3 收缩缺陷的控制

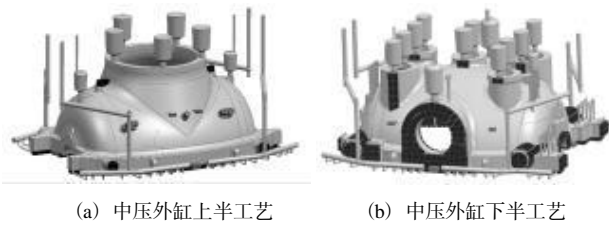
铸件产生缩松、缩孔缺陷，与工艺设计、铁液的冶金质量和铸型的刚度有直接的关系，从工艺角度看，主要从浇注系统、冷铁和冒口加以控制。浇注系统：设计底注、开放及内浇道分散的浇注系统，缩短浇注时间，以平衡铁液充型时的温度场。冷铁：对于球墨铸铁件，使用冷铁可以改变球铁的凝固顺序，有助于克服球铁的收缩缺陷^[1]。故在铸件的重要区域、铁液过流区域、热节位置设置冷铁以调节铸件的冷却速度及温度梯度，避免产生缩松等缺陷，冷铁厚度为铸件壁厚的0.5~1.0倍。冒口：冒口设置在铸件的最高处，按模数法设计为小颈冒口，既满足铸件的液态补缩，又保证铁液凝固膨胀前冒口颈及时封闭。

4.4 汽封槽尺寸的控制

按经验，要成功浇注出汽封槽的形状，汽封槽宽度的铸造尺寸不能小于30 mm，也就是说，长度在5 250 mm的尺寸，毛坯要控制在15 mm之内。为此从以下几个方面进行严格控制：工艺上按0.83%的缩尺，相距的两根汽封再分别移动3.5 mm；木模砂芯尺寸严格按工艺做准；配箱下芯时两端部汽封之间尺寸严格按工艺要求落准。中压外缸工艺如图2所示。

4.5 熔炼浇注控制

碳与硅，碳是促进石墨化的主要元素，一般含量在3.6%~3.8%。在球墨铸铁件的生产中，提高碳含量不仅可促进镁的吸收，改善球化率，同时增加石墨球



(a) 中压外缸上半工艺 (b) 中压外缸下半工艺

图2 中压外缸铸件工艺图

Fig. 2 The process of IP outer casing

数, 缩短碳的扩散距离, 有利于奥氏体转变生成铁素体, 有利于促进石墨膨胀, 在保证铸型刚度足够的条件下, 增强铸件凝固过程中自补缩能力, 降低铸件产生缩孔、缩松的生成倾向, 获得致密的健全铸件。但是过高的碳 (尤其是在碳当量较高的情况下) 会导致石墨过早析出长大, 易使铸件厚壁处产生石墨漂浮缺陷。

硅是促进石墨化、提高相变温度和抗氧化能力的最常见元素。硅能在铸铁表面形成具有很好保护效果的 SiO_2 钝化膜, 在各种气氛中都具有优异的抗氧化性, 同时具有一定自愈能力; 在含钼球铁中常与钼形成金属间化合物 MoSi_2 , 提高材料的耐磨性、耐高温腐蚀性和抗氧化性。同时, 硅是具有双重性能的元素, 既增加铁素体数量, 提高韧性与塑性, 同时又固溶强化铁素体基体, 增加强度与硬度。硅量的增加提高球墨铸铁的脆性-韧性转变温度, 影响球墨铸铁的冲击性能。根据生产经验, 选择 (原铁液): 3.55%~3.65% C, 2.90%~3.10% Si。

锰是碳化物形成元素, 易在晶界处富集。由于球墨铸铁的硫含量较低, 少量的锰即显示偏析的负面影响, 促进凝固过程中碳化物和珠光体的形成, 降低韧性。考虑国内原材料供应的限制, $w_{\text{Mn}} < 0.20\%$ 。

磷是磷共晶形成元素。含钼球铁对磷的不良作用相当敏感, Mo与P形成四元磷共晶, 显著降低球墨铸铁韧性^[2]。控制磷含量小于0.030%。

硫是显著干扰石墨球化的表面活性元素。硫高消耗的球化剂也多, 易形成 MgS 和 MgO 及 MgSiO_3 , 增加夹杂物的数量, 过量的硫导致球化不良, 过低则影响球铁结晶时的形核, 继而影响石墨球的数量, 易产生碳化物。所以将S含量控制在0.008%~0.015%。

钼提高球墨铸铁高温强度、增加抗蠕变能力和蠕变断裂特性。但钼是促进碳化物产生的元素, 呈正偏析, 添加超过0.3%的钼就会在晶界处形成碳化物。在厚壁铸件中, 由于冷却速度低, 促进钼的偏析, 形成复杂的合金化合物^[3]。Mo $\geq 0.46\%$ 时, 固溶强化铁素体球墨铸铁效果明显。钼含量控制在0.55%~0.65%。

稀土具有辅助球化、提高球化级别、增加石墨球数的作用。适量的稀土能中和干扰元素对球化的影响; 稀土过量, 促进铸件厚断面处“chunky”石墨的产生,

使石墨形态恶化; 同时, 因稀土的晶间偏析行为, 形成稀土化合物, 降低韧性。 $w_{\text{Re残}} < 0.010\%$ 。

镁过低易引起球化不良, 在组织中出现片状石墨, 这种状况在铸件凝固较晚的厚断面处尤为显著; 过高促进铁液白口化, 增加产生缩孔的倾向, 增加夹杂、浮渣的产生。 $w_{\text{Mg残}}: 0.045\% \sim 0.060\%$ 。

熔炼。熔清后的铁液经1 500~1 520 °C过热5~10 min后, 倒入保温炉并在1 380 °C以下保温。熔化炉及保温炉进行铁液保温时必须避免高温, 防止碳的氧化烧损, 减少石墨核心, 增大铁液收缩倾向。球化处理前调整铁液成分, 升温至球化处理温度。必要时, 对铁液进行预处理。

孕育处理。厚断面球墨铸铁石墨变态的重要原因, 随着凝固时间的延长, 铁液中结晶核心浓度起伏和能量起伏逐渐减弱, 孕育效果降低 (即孕育衰退), 导致缺乏足够数量的稳定核心。对于中压外缸, 由于浇注重量大, 熔炼时间长, 铁液长时间的保温, 结晶核心损失严重。为确保孕育效果, 采用多次孕育工艺。一次孕育选用长效孕育剂, 二次孕育选用对提高石墨球数有特殊效果的孕育剂。孕育剂总加入量为0.8%。

球化处理及浇注。使用低稀土镁球化剂, 加入量1.3%, 采用冲入法处理。根据中压外缸铸件的结构以及处理过程的复杂性, 球化处理温度1 450~1 465 °C, 浇注温度1 340~1 360 °C。控制球化浇注处理过程在20 min内完成。

5 生产结果

生产的铸件的力学性能如表3所示。金相组织如表4所示。

表3 中压外缸上下半力学性能

送检 编号	试样规格 /mm	力学性能					
		R_{m2} /MPa	R_m /MPa	A/%	Z/%	HB	A_{kv} /J
N140115 (上)	70	378	539	12.6	12.0	187	3, 4, 6
	100	361	508	23.0	27.5	184	4, 4, 4
N140310 (下)	70	354	495	21.8	25.1	175	3, 3, 3
	100	351	494	18.6	21.1	175	4, 4, 4

表4 中压外缸上下金相组织

送检 编号	试样规格 /mm	金相			
		球化级别	石墨级别	珠光体/%	磷共晶/%
N140115 (上)	70	2	6	10	<1
	100	2	6	10	<1
N140310 (下)	70	2	6	10	<1
	100	2	6	10	<1

铸件检测及声速。VT检测: 铸件表面光洁, 轮廓清晰, 无粘砂。两端部之间汽封槽尺寸在工艺预设范

围内。无损检测：UT检测在铸件的4级区域存在缺陷，但在可接受标准范围，无浮渣记录。MT检测符合标准。铸件关键部位的声速：上半(m/s)：5 650、5 690、5 707、5 678，平均5 681；下半 (m/s)：5 664、5 693、

5 685、5 690，平均5 682。上下半铸件的声速均大于5 500 m/s的标准要求。

铸件经检验，达到技术标准要求。图3为铸件实物。



(a) 中压外缸上半铸件



(b) 中压外缸下半铸件

图3 中压外缸上半/下半

Fig. 3 The up (left) /low (right) of IP outer casing

6 结束语

特大型球墨铸铁中压外缸首次生产即满足技术标准的要求，说明制订的铸造工艺是合理可行的，生产控制措施是正确有效的。中压外缸的成功制造不仅保证了配套机组的顺利运行，同时也提升了公司生产大型高端球墨铸铁件的技术能力。

参考文献：

- [1] 徐祖良. 冷铁在大型球墨铸铁件中的应用 [J]. 现代铸铁, 1982 (1): 19-25.
- [2] 沈阳铸造研究所, 大连工学院, 上海科学技术协会. 球墨铸铁 [M]. 北京: 机械工业出版社, 1982: 269.
- [3] M. Gagné. The sorematal Book of Ductile Iron [M]. Canada: Rio Tinto Iron & Tiatunium Inc, 2004.

(编辑: 刘冬梅, ldm@foundryworld.com)

(选自《铸造》2016年第5期)