

# 620 °C超超临界汽轮机 CB2 阀壳铸件试制研究

李伟华<sup>1</sup>, 陈 成<sup>2</sup>, 张云博<sup>3</sup>

(1. 广州启帆工业机器人有限公司, 广东广州 511356; 2. 国家知识产权局专利局专利审查协作广东中心, 广东广州 510530; 3. 上海重型机器厂有限公司, 上海 200245)

**摘要:** 结合工厂多年超超临界汽轮机铸件生产及620 °C等级CB2铸件材料前期试制经验, 研究了CB2阀壳铸件的铸造、熔炼、浇注、清理及热处理等工艺方法及控制措施, 成功试制了阀壳铸件, 其各项检测结果均合格且顺利通过了客户鉴定。这为620 °C超超临界汽轮机CB2铸件批量生产提供了重要的技术指导与参考。

**关键词:** 超超临界汽轮机; CB2铸钢; 阀壳

9%~12%Cr耐热钢具有优异的高温性能及较低的线膨胀系数, 能够满足高参数超超临界汽轮机高温铸件的使用要求<sup>[1]</sup>。CB2材料是欧洲COST522计划研发的新型9%~12%Cr耐热钢铸件材料<sup>[2]</sup>。随着620 °C超超临界汽轮机的陆续制造及投产, 采用CB2材料制造的阀壳、缸体等大壁厚汽轮机铸件也陆续投入电厂应用<sup>[1]</sup>。目前我国只有极少数铸造企业开发与研究CB2材质铸件, 比如上海宏钢、中国二重等, 而且制造的铸件在技术与质量上还存诸多的不足, 严重制约了汽轮机机组的交期、市场投放及推广<sup>[3-4]</sup>。作者结合工厂多年超超临界汽轮机铸件生产及620 °C等级CB2铸件材料前期试制经验, 研究了CB2阀壳铸件的铸造、熔炼、浇注、清理及热处理等工艺方法及控制措施。

## 1 阀壳技术要求

阀壳铸件材质为CB2材料, 国内牌号为ZG13Cr9Mo2Co1NiVNbNB。采用阀壳本体附铸试样进行化学成分和力学性能检测。该材料化学成分要求和化学成分允许偏差范围见表1。室温力学性能、高温屈服强度及高温持久性能要求分别见表2至表4。该阀壳粗加工交付, 图纸重量为13 069 kg, 整体尺寸为2 700 mm × 2 200 mm × 1 700 mm, 结构简图和三维模型分别见图1和图2。阀壳铸件100%UT和MT检测, 其中铸件本体UT和MT检测分别按照客户PS-1.0020标准V2等级和PS-1.0021标准S2等级执行; 图1中质量等级所指示的阴影区(即三个管口)为焊接部位, 其UT和MT检测分别按照高一等级等级的V1和S1执行。

## 2 浇注方案及造型方法

从图1可以看出, 阀壳壁厚厚的地方有两处: 一处是最大管口处, 另一处为两管口与壳体交接的地方, 同时三个管口区为质量等级1级区, 均必须保证无损探伤质量。综合各方面考虑, 浇注方案采取平放, 即阀壳三通结构呈水平放置。该方案不仅便于两处厚实部位放置冒口补缩, 还将三个重要管口面处于侧面, 减少了铸造缺陷倾向, 另外相比竖直放置方案, 减少了合箱操作的高度、制芯与下芯的难度。选取阀壳最大中分面为分型面。采用砂箱实样造型, 分上下箱, 内腔三通采用整体砂芯。为了便于阀壳内腔后期清砂, 芯砂采用酯硬化碱性酚醛树脂砂。三通整体

作者简介:

李伟华(1985-), 男, 工程师, 硕士, 主要从事铸造工艺与开发。E-mail: liweihua007@126.com

中图分类号: TG24

文献标识码: A

文章编号: 1001-4977(2019)03-0264-05

收稿日期:

2018-09-10 收到初稿,  
2018-11-25 收到修订稿。

表1 化学成分要求和允许偏差范围  
Table 1 Chemical composition requirements and permissible deviation range

C	Si	Mn	P	S	Cr	Ni	Mo	Co	V	Nb	B	N	Al <sub>tot</sub>
0.11~0.14	0.20~0.30	0.80~1.00	≤0.020	≤0.010	9.00~9.60	0.10~0.20	1.40~1.60	0.90~1.10	0.18~0.23	0.05~0.08	0.008~0.011	0.015~0.022	≤0.020
±0.01	±0.05	±0.05	+0.005	+0.005	±0.20	±0.02	±0.02	±0.02	±0.02	±0.005	±0.001	±0.003	+0.002

表2 室温力学性能  
Table 2 Mechanical property requirements at room temperature

R <sub>p0.2</sub> /MPa	R <sub>m</sub> /MPa	A <sub>5</sub> /%	Z/%	A <sub>K</sub> /J
≥500	630~750	≥15	≥40	≥30 <sup>a</sup>

a: 3个V型冲击样平均值, 其中最小值≥24 J。

砂芯被高温钢液包裹, 受热时间长, 排气量较大。为了便于砂芯的排气, 砂芯内部有焊接牢固的十字中空圆筒芯骨, 不仅可减少砂芯起吊和下芯时的变形, 而且中空圆筒芯骨上开有均匀分布的孔洞并用稻草绳包裹, 一方面可增大砂芯的退让性, 另一方面利于砂芯排气。三通整体砂芯分型面2/3以上圆弧采取龙门档刮板造型, 严格按工厂刮板造型操作, 确保顶部1/3圆弧处的砂芯强度和表面稳定性。型砂采用酯硬化水玻璃砂。铸型所有型腔表面覆30 mm厚铬铁矿砂, 两处厚实部位则覆50 mm厚, 增强铸型耐火度, 同时所有型腔表面涂刷两遍醇基铸钢专用涂料, 确保涂层强度和厚度均匀, 减少铸件粘砂倾向。造型过程部分照片见图3。

### 3 铸造工艺及控制措施

结合工厂铸钢件工艺规范和多年超超临界汽轮机铸件生产经验<sup>[5]</sup>, 铸造工艺参数选取如下: 收缩率取2%; 铸造尺寸公差等级为CT14; 加工面余量取15~20 mm; 外表面毛坯面补正量为3 mm, 内腔毛坯面补正量为8 mm。

针对阀壳两处厚实部位和三个管口1级质量区重点进行冒口和冷铁设计。阀壳整体呈三通结构, 采取分区域补缩方法设置冒口和冷铁。冒口设计采用热节圆和比例法。在阀壳分型面上半表面三个部位各放置一保温发热冒口, 其中一处也在最大管口正上方, 补缩该厚实部位并确保该管口内部质量, 为腰圆形保温发热明冒口, 其尺寸为700 mm×1 000 mm×1 100 mm; 一处在中部厚实部位上方, 确保该厚实部位的补缩, 同时该部位壁厚到管口是逐渐减小的, 形成了顺序凝固的梯度, 可保证该管口内部质量, 为圆形保温发热明冒口, 其尺寸为Φ700 mm×1050 mm; 最后一处在侧管口处, 用于补缩该区域并确保该管口内部质量, 为腰圆形保温发热暗冒口, 其尺寸为500 mm×800 mm×680 mm。为了防止铸件凝固时三个冒口补缩通道相互贯通, 对铸件补缩造成不利, 在冒口之间放置隔断明冷铁(如图3b所示)。同时为了进一步确保三个管口

表3 高温屈服强度要求  
Table 3 Yield strength requirement at elevated temperature

温度/℃	屈服强度/MPa
550	≥325
600	≥275
620	≥245
650	≥200

表4 高温持久强度要求  
Table 4 Stress-rupture strength requirement at elevated temperature

温度/℃	应力/MPa	断裂时间/h (试验要求)
620	170	≥100

处内部质量, 在三个管口底部1/3圆弧处放置明冷铁。管口内部圆角处放置圆角冷铁, 一是减小该处热节, 二是可以防止铸件凝固收缩受阻产生裂纹。冷铁厚度不小于该部位铸件壁厚的0.8倍。明冷铁要求清洁、干净, 尤其是与钢液接触面, 应打磨至金属光泽, 如图3b所示。阀壳铸造工艺三维模型见图4。采用Expert-ViewCAST铸造数值模拟软件对阀壳凝固过程进行仿真分析, 其缩孔缩松预测结果如图5。从模拟结果可以看出: 几乎所有缩孔缩松缺陷都集中在冒口, 仅有少量分散分布在阀壳内腔表面, 基本说明该工艺方案是合理, 能够满足铸件质量要求。阀壳铸件重量为15.7 t。

### 4 熔炼与浇注工艺及控制

结合工厂熔炼工艺方法和多年超超临界汽轮机铸件生产经验以及前期CB2材料试制经验, 阀壳铸件熔炼成分在技术要求的基础上进行相应的调整, 如Mn下限调高0.05%, Cr下限调高0.20%, Mo下限调高0.05%, 有害元素P降低到0.010%以下, 加入微量稀土等。熔炼工艺流程如图6。前期采用电弧炉氧化法熔炼, 采用矿氧综合脱碳氧化; 后期采用LF炉LFV法精炼, 钢液还原时间≥40 min, 精炼总时间≤3 h, 有效真空度≤133 Pa, 有效脱气时间≥30 min, 氩气流量为50~

200 L/min。浇冒口重量为12 800 kg，钢液总重28 500 kg。采用单包双包孔浇注，包孔直径为 $\Phi 80$  mm。浇注系统采用底注开放式，浇道采用成形陶瓷管连接，直浇道2道，直径均为 $\Phi 120$  mm；阀壳底部三通两个方向各摆1道横浇道和各4道内浇道，因此横浇道共2道，直径均为 $\Phi 120$  mm；内浇道共8道，直径均为 $\Phi 80$  mm。浇注前铸型用热风烘烤24 h以上，热模浇注；浇注前15 min往型腔通氩气，并点火测试，确保型腔内空气排净；浇注时氩气保护；当液面上升到冒口1/3高度时散发热剂；浇注完毕在冒口覆盖200 mm保温剂。浇注温度为1 570~1 580  $^{\circ}\text{C}$ 。

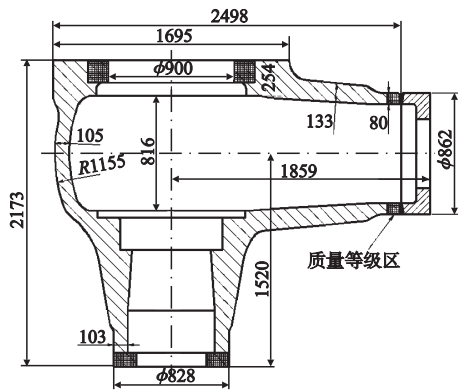


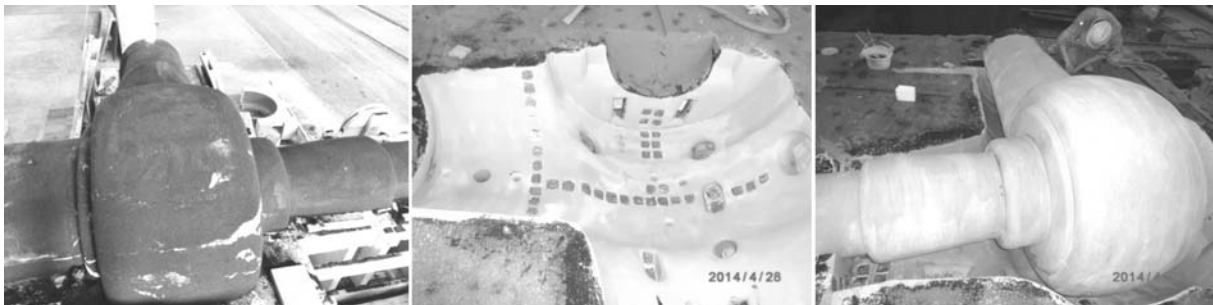
图1 阀壳结构简图

Fig. 1 Structure sketch of valve casing



图2 阀壳三维模型

Fig. 2 3D model of valve casing



(a) 三通整体砂芯

(b) 下半铸型

(c) 下芯

图3 阀壳造型过程部分照片

Fig. 3 Moulding process photos



图4 铸造工艺三维模型

Fig. 4 3D model of casting process

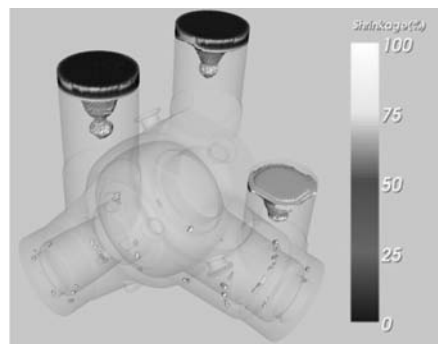


图5 铸造数值模拟结果

Fig. 5 Result of casting CAE



图6 熔炼工艺流程图

Fig. 6 Smelting process chart



图7 打箱后铸件  
Fig. 7 Valve casting with gating system



图8 铸件装炉热处理  
Fig. 8 Valve casting without gating system

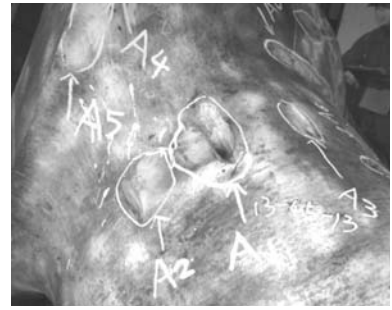


图9 鼓风冷却  
Fig. 9 Air blast cooling after heat treatment

## 5 清砂与热处理工艺及控制

图7为开箱清砂照片。开箱时间不少于144 h。先去掉砂箱，将铸件吊出，当表面温度降到80 °C以下时清砂。清砂后去应力退火，退火温度760~780 °C，待炉冷到300 °C时，出炉趁热割冒口，热割温度为250~300 °C。热处理装炉和正火冷却照片见图8和图9。综合考虑客户推荐的热处理工艺和工厂多年9%~12%Cr超超临界汽轮机铸件生产以及CB2材料前期试制经验，拟定的性能热处理工艺曲线见图10。正火温度为1 100 °C；正火后采用强风冷却，待铸件全部表面温度到50~70 °C时再进炉回火处理。

## 6 铸件检测结果

所有热处理完毕后，取阀壳本体试块，进行力学性能和化学成分检测，检测结果见表5和表6，均符合技术要求。阀壳粗加工后，按照技术要求进行100%MT

和UT检测。铸件表面有少量的面积较小的深度较浅的夹杂缺陷，见图11，内部主要缺陷位置见图12。采用专用的焊补规范对缺陷进行清除、检测、焊补、打磨、再检测等。消耗焊条为32 kg，焊补率约为1.7%，远低于要求的3%焊补率。

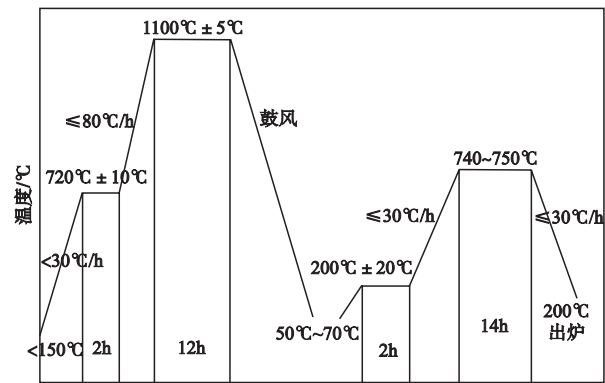


图10 热处理工艺曲线  
Fig. 10 Heat treatment procedure curve

表5 化学成分检测结果  
Table 5 Chemical composition of casting

							$w_B/\%$	
C	Si	Mn	P	S	Cr	Ni	Mo	
0.12	0.26	0.87	0.009	0.002	9.51	0.12	1.46	
Co	V	Nb	B	N	Altot	Sn	Cu	
1.01	0.21	0.06	0.011	0.013	<0.01	0.006	0.06	

表6 力学性能检测结果  
Table 6 Mechanical properties of casting at room and elevated temperatures

温度/°C	$R_{p0.2}/\text{MPa}$	$R_m/\text{MPa}$	$A_5/\%$	Z/%	$A_K/\text{J}$	持续时间/h
室温	553	726	17.6	58.2	44 45 47	
550	416	443	19.8	75.0		
600	369	379	22.4	80.8		
620	328	356	29.6	88.5		160 h未断 130 h未断
650	293	316	30.4	91.1		



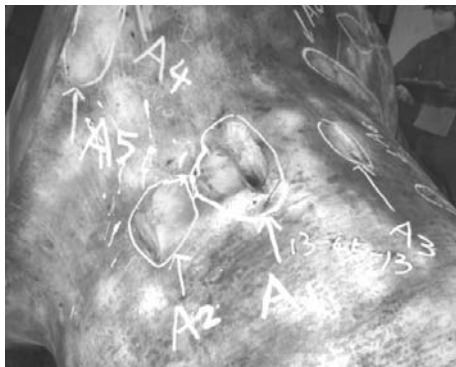


图11 表面缺陷  
Fig. 11 Surface defects

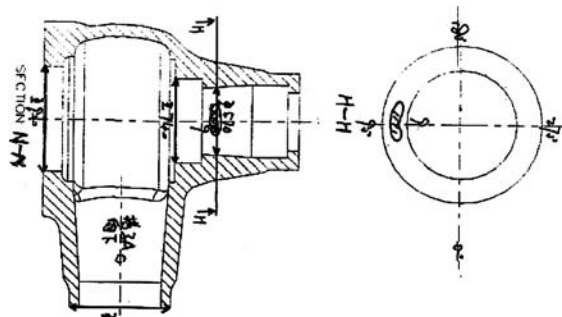


图12 内部缺陷  
Fig. 12 Sketch of internal defects

## 7 结束语

结合多年超超临界汽轮机铸件生产和前期CB2铸件材料试制经验,成功试制出了CB2阀壳铸件,其各项检测结果均合格且顺利通过了客户鉴定,说明所采取的铸造、熔炼、浇注、清理及热处理等工艺方法及控制措施是切实有效的,为620℃超超临界汽轮机CB2铸件批量生产提供了重要的技术指导与参考。

### 参考文献:

- [1] 田雨, 彭建强, 魏双胜, 等. 我国超超临界汽轮机用高温铸件材料发展趋势 [J]. 大型铸锻件, 2016 (1): 1-5.
- [2] 马志宝. 620℃等级超超临界机组CB2缸体铸件补焊技术 [J]. 焊接技术, 2017, 46 (7): 35-38.
- [3] 陈瑞, 田雨, 吴铁明, 等. 铸造技术路线图: 铸钢 [J]. 铸造, 2017, 66 (8): 783-788.
- [4] 陈红来, 吴铁明, 鲍学俊, 等. GX-12CrMoVNbN高合金马氏体不锈钢铸件气孔的产生和防止 [J]. 铸造, 2012, 61 (9): 1043-1046.
- [5] 贺腾, 李直, 康进武. 超超临界汽缸体铸件新型浇注系统研究 [J]. 铸造, 2016, 65 (7): 88-91.

## Casting Process of CB2 Valve Casing for 620 °C Ultra-Supercritical Steam Turbine

LI Wei-hua<sup>1</sup>, CHEN Cheng<sup>2</sup>, ZHANG Yun-bo<sup>3</sup>

(1. Guangzhou STS Industrial Robot Co., Ltd., Guangzhou 511356, Guangdong, China; 2. Patent Examination Cooperation Center of the Patent Office, SIPO, Guangdong, Guangzhou 510530, Guangdong, China; 3. Shanghai Heavy Machinery Plant Co., Ltd., Shanghai 200245, China)

### Abstract:

Based on years of experience in the production of ultra-supercritical steam turbine castings and preliminary trial production of 620 °C CB2 steel casting material, the process method and control measures of casting, smelting, pouring, cleaning and heat treatment were investigated for CB2 valves, and the castings were successfully trial-produced. Test results for the valve casings show that chemical composition and mechanical properties at room and elevated temperatures all meet the requirements of technical specifications of steel CB2, which will provide the important technical guidance and reference for the mass production of CB2 steel castings for 620 °C ultra-supercritical steam turbine.

### Key words:

ultra-supercritical steam turbine; CB2 steel; valve casing