

620 °C超超临界汽轮机用 CB2 铸钢件试制

李伟华¹, 陈 成², 张云博³

(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: 根据620 °C超超临界汽轮机CB2铸件材料的技术要求, 并结合工厂现有熔炼设备、工艺方法及多年生产超超临界9%~12%Cr耐热钢汽轮机铸件的经验, 确定了该材料的化学成分控制范围。按照此成分范围试制了汽轮机缸体铸件等壁厚试块, 并进行了热处理。各项性能检测结果均满足CB2铸件材料的技术要求, 并顺利通过了客户鉴定, 为后续CB2材质铸件的投产提供了宝贵的经验与参考。

关键词: 超超临界汽轮机; CB2铸件材料; 化学成分; 熔炼工艺; 热处理工艺

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。因此欧洲从1994年开始实施COST开发计划, 研制出了一系列的9%~12%Cr耐热钢^[1-3], 比如GX12CrMoWVNbN10-1-1和GX12CrMoVNbN9-1是COST501计划研发出的改良型9%~12%Cr耐热钢铸件材料, 已经广泛应用于各类高参数超超临界汽轮机铸件^[4-5], 且运行情况良好。而CB2则是COST522计划研发出的新型9%~12%Cr耐热钢铸件材料。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、缸体等大壁厚铸件也陆续投入电厂应用。目前我国只有极少数铸造企业开发与研究CB2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在一些问题^[3]。鉴于国内对CB2铸件材料研究报道较少, 为了便于铸造工艺设计、生产制造以及质量控制, 有必要对该材料进行试制和研究。本文针对620 °C超超临界汽轮机CB2铸件材料技术要求, 对该材料进行了试制, 最终各项检测结果均合格, 并顺利通过了客户鉴定, 为后续CB2铸件投产提供了宝贵的经验和参考。

作者简介:

李伟华(1985-), 男, 硕士, 工程师, 主要从事铸造工艺与质量改进工作。
Email: liweihua007@126.com

中图分类号: TG142.73
文献标识码: A
文章编号: 1001-4977(2019)02-0118-05

收稿日期:

2018-07-27 收到初稿,
2018-08-25 收到修订稿。

1 材料技术要求

CB2铸件材质为GX13CrMoCoVNbNB9-2-1, 对应国内牌号为ZG13Cr9Mo2Co1NiVNbNB。该材料化学成分要求见表1, 成品化学成分允许偏差见表2, 室温力学性能、高温屈服强度和高温持久强度要求分别见表3、4、5。

2 化学成分及熔炼工艺控制

2.1 化学成分的确

结合工厂现有熔炼设备、工艺方法及多年生产超超临界9%~12%Cr耐热钢汽轮机铸件的经验, 确定了该材料的化学成分控制范围(如表6)。该范围是在规范成分的基础上做了相应的调整, 比如Mn的下限调高了0.05%, Cr的下限调高了0.20%, Mo的下限调高了0.05%, 有害元素P降低到0.010%以下, 加入微量稀土等。

表1 化学成分要求
Table 1 Chemical composition requirements

														$w_B/\%$
C	Si	Mn	P	S	Cr	Ni	Mo	Co	V	Nb	B	N	Al _{tot}	
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	

注：Al、Ti含量以≤0.01%为目标，Sn和Cu含量应检验并报告。

表2 成品化学成分允许偏差
Table 2 Permissible deviation of chemical composition

														$w_B/\%$
C	Si	Mn	P	S	Cr	Ni	Mo	Co	V	Nb	B	N	Al _{tot}	
±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	

2.2 熔炼工艺及控制

熔炼工艺流程如图1。前期采用电弧炉氧化法冶炼，后期采取LF炉LFV法精炼，采取氩气保护浇注。

2.2.1 配料及控制

电弧炉熔炼配料见表7。重废钢和废钢屑优先选用工厂内部As、Sn、Sb、Cu等残余元素含量低的返回料，要求Ni<0.18%，并对Ni、Sn、Cu、N等残余元素化验；采用优质轻废钢，优先选用船板料，要求Ni≤0.15%（尽可能低），并对Ni、Sn、Cu、N等残余元素化验；禁止使用来源不明的混杂轻废钢和并块；精选萤石、活性石灰等辅助材料，严格按照工厂熔炼规范烘烤；合金使用金属铬，要求高纯度、低磷、低硅、低氮、低杂质，复验铬、氮含量；金属钴复验钴、镍含量，氮化铬复验氮含量；电极块保持清洁、干燥。

2.2.2 电弧炉熔炼及控制

(1) 在熔化阶段，严格按照工厂熔炼规范和工艺要求配料、装料、补炉、进料；确认设备正常后方可通电。当炉料熔化超过60%时可吹氧助熔，供氧压力为0.6~0.8 MPa，氧气管不宜深插，应以切割炉料为主，以免熔清碳偏低。熔化期应尽早造渣，吹氧时可加1%~1.5%石灰和1%碎矿石或氧化铁皮以及适量的萤

表3 室温力学性能要求
Table 3 Mechanical property requirements at room temperature

$R_{p0.2}/\text{MPa}$	R_m/MPa	$A_5/\%$	$Z/\%$	A_K/J
≥500	630~750	≥15	≥40	≥30 ^a

a: 3个夏比V型冲击试样的平均值，其中最小值≥24 J。

表4 高温屈服强度要求
Table 4 Yield strength requirement at elevated temperature

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

表5 高温持久强度要求
Table 5 Stress-rupture strength requirement at elevated temperature

温度/°C	应力/MPa	试验要求
620	170	断裂时间≥100 h

表6 化学成分控制范围
Table 6 Control range of chemical composition

														$w_B/\%$
C	Si	Mn	P	S	Cr	Ni	Mo	Co	V	Nb	B	N	Al _{tot}	
0.11~0.14	0.20~0.30	0.85~0.95	≤0.010	≤0.010	9.20~9.45	0.10~0.20	1.45~1.60	0.90~1.10	0.20~0.23	0.05~0.08	0.008~0.011	0.015~0.022	≤0.010	



图1 熔炼工艺流程

Fig. 1 Smelting process flow

石, 以利于除磷和防止钢液吸气。炉料全熔后搅拌、测温、取样分析, 着重关注Ni、Mo含量, 不得超过冶炼上限。

(2) 在氧化阶段, 采用矿氧综合脱碳法氧化, 注意调整炉渣, 前期大渣量去磷, 自动流渣; 后期高温薄渣脱碳, 注意防止大沸腾。矿石分批加入, 氧气压力为0.6~0.8 MPa, 矿石总量不超过30 kg/t。当温度升高到1 570 ℃及以上, 氧化期脱碳量应达0.40%及以上, 换掉初期渣, 记录每次的取样温度和成分, 直到满足要求; 当温度升高到1 650 ℃及以上, [C]尽可能低, [P]≤0.003%时, 应快速扒除氧化渣。

(3) 在出钢阶段, 扒渣后造新渣, 温度升高到1 670 ℃时即可出钢。出钢过程中, 随钢流再加Al (0.5~1.0 kg/t) 和Ca-Si (0.5~1.0 kg/t); 精炼包接受钢液前10 min往包中通入氩气。

2.2.3 精炼及控制

(1) 确认LF炉正常, 精炼包进入到加热工位后通电、加热, 测温并取样分析; 补加渣料(渣料10~15 kg/t, 石灰:萤石=5:1), 渣层厚度达到200~350 mm; 钢液还原时间不少于40 min, 精炼总时间不超过3 h; 造好还原渣, 保证渣量, 确保埋弧效果, 防止电弧区钢液裸露吸气; 精炼初期使用小电压和电流供电, 随还原渣形成依次提高电压和电流; 当温度升高到1 560 ℃时取样, 继续加热升温, 采用Ca-Si (1.0~1.5 kg/t) 和C (1.0~2.0 kg/t) 均匀扩散脱氧, 保持还原气氛; 当温度升高到1 600 ℃及以上时, 造还原渣, 埋弧效果理想情况下, 方可进行合金成分微调。

(2) 加入电解钴, 调整Co含量进入控制目标; 加入金属铬, 调整Cr含量进入控制目标; 调整Si含量在0.15%~0.20%; 加入Fe-Al, 调整[Al]在0.020%; B不做调整。

(3) 真空前钢液温度不低于1 640 ℃, 但最高不超过1 670 ℃; [C]=0.10%~0.12%; 精炼包法兰边进行密封, 确认无漏气后换工位抽气; 有效真空度≤133 Pa, 有效脱气时间≥30 min, 氩气流量为50~200 L/min, 严防钢液上涌粘住脱气炉盖。

(4) 出钢前测定H与O; 取样分析并微调成分, [Si]控制在目标下限, 若N含量小于控制目标下限, 则加入氯化铬使其进入控制目标, 严禁使用吹氮气调整; 除B以外, 其余全部元素成分进入控制目标; 按照[Al]=0.010%加入Fe-Al, 加稀土(0.5 kg/t) 和Fe-Ti (0.2 kg/t); 迅速调整B, 目标0.015% (不计烧损); 取成品样, 10 min内出钢; 出钢温度为1 580~1 590 ℃。

2.2.4 浇注及控制

浇注前15 min通过浇冒口向铸型型腔内通氩气, 氩气流量为150~250 L/min。浇注时, 浇口采用氩气保护圈保护, 浇注温度为1 570~1 580 ℃。

3 当量试块设计与试制

3.1 当量试块设计

依照620 ℃超超临界汽轮机CB2铸件, 如阀壳、缸体等, 铸件最大壁厚为300 mm, 设计热处理当量试块, 其尺寸为500 mm×300 mm×300 mm, 数量5块。图2为当量试块三维模型。按照CB2铸件技术要求, 每个当量试块附铸有力学性能试块(2块), 力学性能试块尺寸为250 mm×70 mm×125 mm, 每块当量试块重约400 kg。

3.2 铸造工艺及控制

当量试块铸造工艺模型如图3 (当量试块侧边附

表7 电弧炉熔炼配料

Table 7 Charges used in electric arc furnace smelting

类别	重废钢	轻废钢	废钢屑	碳
	15CrMo	碳钢	12Cr2Mo1	
配料范围	35%~45%	30%~40%	20%~25%	电极块
目标值	40%	35%	25%	

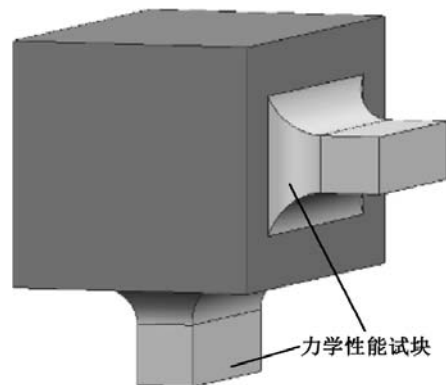


图2 热处理当量试块

Fig. 2 Test block size for heat treatment



图3 铸造工艺模型

Fig. 3 3D model of casting process

铸了一焊接试板)。采用热节圆法和比例法进行冒口设计。冒口放置在试块上平面,为圆形保温冒口,尺寸为 $\Phi 400\text{ mm} \times 500\text{ mm}$ 。采用Experto-ViewCAST铸造数值模拟软件模拟,结果缩孔缩松全部集中在冒口中。采取一箱5件当量试块,酯硬化水玻璃砂造型,试块铸型表面覆约20 mm厚铬铁矿砂,型腔表面全部涂刷醇基铸钢专用涂料,型腔热风烘烤,热风温度为150~200 $^{\circ}\text{C}$,烘烤时间不少于24 h,浇注前半小时往型腔通氩气,在氩气保护下浇注。图4为切割冒口后的当量试块照片。

4 热处理工艺及控制

综合考虑CB2铸件技术要求中推荐的热处理工艺

以及工厂多年生产9%~12%Cr超超临界汽轮机铸件的经验,拟定的热处理工艺曲线如图5。其中当量试块加热到680~730 $^{\circ}\text{C}$ 温度后,升温速率为80 $^{\circ}\text{C}/\text{h}$;正火温度为1 100~1 130 $^{\circ}\text{C}$,冷却方式采取鼓风机风冷,两台风机一大一小,交错对热处理试块鼓风,直至试块所有表面温度降到50 $^{\circ}\text{C}$ 以下停止鼓风;回火温度为740~750 $^{\circ}\text{C}$ 。

5 当量试块检测结果

对当量试块附铸力学性能试样进行化学成分、拉伸、冲击、高温拉伸及高温持久等检测试验,试验结果见表8和表9。各项检测结果均符合CB2铸件材料技术要求,并通过客户的鉴定与验收。



图4 割冒口后

Fig. 4 Test block after cutting riser

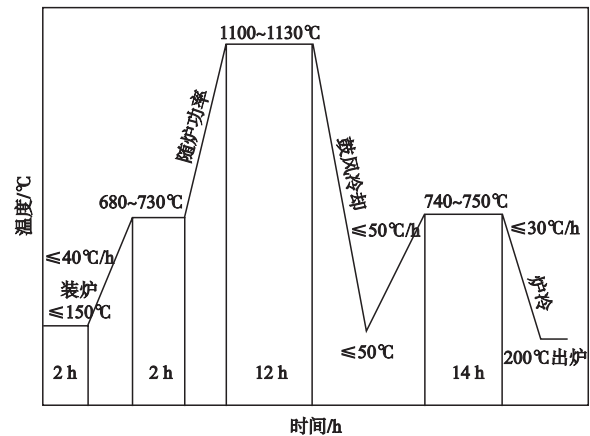


图5 热处理工艺

Fig. 5 Heat treatment process

表8 化学成分检测结果

Table 8 Result of chemical composition analysis

														$w_B/\%$		
C	Si	Mn	P	S	Cr	Ni	Mo	Co	V	Nb	B	N	Al _{tot}	Sn	Cu	
0.13	0.26	0.88	0.009	0.002	9.36	0.12	1.44	1.07	0.22	0.06	0.011	0.013	< 0.01	0.005	0.06	

表9 力学性能检测结果

Table 9 Results of mechanical property tests

温度/ $^{\circ}\text{C}$	$R_{p0.2}/\text{MPa}$	R_m/MPa	$A_5/\%$	$Z/\%$	A_K/J	持久时间/h
室温	543	693	17.9	60.2	32、51、45	-
550	399	426	17.2	67.8	-	-
600	330	339	19.2	74.2	-	-
620	302	319	19.2	78.9	-	147、136、161
650	258	267	21.8	83.3	-	-

6 结束语

针对620℃超超临界汽轮机CB2铸件材料技术要求,并结合工厂多年超超临界9%~12%Cr耐热钢生产经验,成功试制了该材料等壁厚当量试块,各项检测指标均合格,且顺利通过客户的鉴定与验收,说明采取的工艺措施是切实有效的,为后续620℃超超临界汽轮机CB2铸件国产化投产提供了宝贵的经验和参考。

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] 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.
- [5] 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.

Trial Manufacture of CB2 Steel Casting for 620 °C Ultra-Supercritical Steam Turbine

LI Wei-hua¹, CHEN Cheng², ZHANG Yun-bo³

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

Abstract:

Based on technical specifications of steel CB2 for 620 °C ultra-supercritical steam turbine and years of experience producing 9%~12%Cr heat resistant steel castings, the range of chemical composition control were adjusted for individual elements in steel CB2, and smelting process was determined. Using the adjusted chemical composition produced the same wall-thickness test blocks, and heat treatment was conducted. Experimental results indicated that all the mechanical properties meet the requirements of technical specifications of steel CB2 for 620 °C ultra-supercritical steam turbine, which will provide valuable experiences and technical references for the follow-up production of CB2 steel castings.

Key words:

ultra-supercritical steam turbine; CB2 casting material; chemical composition; smelting process; heat treatment process