

超临界机组用 9Cr 钢铸件热加工工艺优化

杨程坤^{1, 2}, 叶文辉², 吴仁贵²

(1. 辽宁福鞍重工股份有限公司, 辽宁鞍山 114016; 2. 中国铸造协会, 北京 100084)

摘要: 针对现行超临界机组用9Cr钢铸件热加工工艺存在生产周期长等问题, 本文探究并提出了打箱、预备热处理、回火、补焊和焊后回火处理优化工艺参数。采用高温打箱方式缩短生产周期15~20天; 在AC3附近进行预备热处理能够消除组织遗传, 细化晶粒尺寸; 采用补焊后冷却到80℃以下和去氢处理能够减少补焊次数; 控制加热和冷却速率可以有效防止铸件裂纹。

关键词: 9Cr; 超临界; 铸钢件; 热加工

目前, 从我国和世界范围的一次能源结构看, 仍然是以煤炭为主体。为了实现“双碳”目标, 能源结构调整成为碳中和最重要的举措。提高煤电转化效率、发展清洁煤电技术逐渐被重视起来。2022年4月20日召开的国务院常务会议指出, 一要发挥煤炭的主体能源作用。推进煤炭清洁高效利用, 加强储备设施建设。二要推动煤发电机组节能改造、灵活性改造、供热改造, 提高能源使用效率, “十四五”期间改造规模超过3.5亿千瓦, 超(超)临界燃煤机组成为改造机的首选。燃煤效率的提高是靠提升蒸汽温度和压力来实现的, 而温度和压力的提高对铸钢件的选材和结构设计是一个新的挑战, 因此对9Cr钢的工艺研究以及生产问题的解决具有重要的意义。

1 9Cr钢的材料特性

9Cr铁素体系耐热钢(简称9Cr钢)是在P91的基础上进行成分优化设计的钢种, 通过热处理的手段达到Laves相强化、弥散强化、固溶强化、位错强化等综合强化机制的效果, 获得沉淀硬化马氏体耐热钢, 用于蒸汽入口温度为590~610℃和蒸汽压力22~34 MPa的蒸汽轮机^[1]。这种材料的微观组织提供了优良的长期高温强度、蠕变和应力断裂性能。根据多年的生产经验, 为了获得综合性能良好的铸钢件, 该材质的内控成分和目标值如表1所示。

表1 9Cr钢化学成分内控范围和目标值

Table 1 Nominal and aimed chemical composition of 9Cr Steel

w_B /%

项目	C	Si	Mn	P	S	Cr
范围	0.10~0.14	0.20~0.35	0.40~0.60	0.020	0.005	8.80~9.40
目标值	0.13	0.30	0.50	0.015	0.005	9.10
Mo	V	Ni	Al	Nb	N	
0.95~1.05	0.20~0.25	0.20~0.60	0.020	0.06~0.08	0.04~0.06	
1.00	0.21	0.40	0.015	0.07	0.045	

需要说明的是, 该材质在熔炼过程中, 脱氧方式的选择非常重要, 因为氮的合金化目的是形成强化相(Nb, V)(C, N)(即MX相, 是该钢种的主要强化相)。许多用于脱氧的元素(Ti、CaSi等)和氮也有很高的亲和力, 它们可以束缚氮, 在热处理过程中就不能形成铌的氮化物。这样一来, 将形成大的块状碳化物相。Ti的最高含量应限制为0.015%。氮/铝的比率应至少为2:1~4:1。其他有害元素, 如As、Sb、Sn、Pb和Cu, 应保持在绝对最低值, 因为它们可能对高温性能有

作者简介:

杨程坤(1984-), 男, 高级工程师, 硕士, 研究方向为大型铸钢件铸造工艺研发和产品质量控制。电话: 13841257329, E-mail: yck919@163.com

中图分类号: TG24

文献标识码: A

文章编号: 1001-4977(2024)

02-0244-04

收稿日期:

2023-04-19 收到初稿,

2023-07-06 收到修订稿。

害。一般来讲,前期用硅铁硅锰脱氧,VOD精炼后加铝粉还原,其他时间用硅钙粉。近年来的研究表明, δ -铁素体的存在会恶化基体组织,造成强度和韧性的下降,尤其是在锻造过程中容易开裂^[2-4]。因此,铬和镍当量按图1所示经验公式计算,并且Ni当量/Cr当量 ≥ 0.42 ,确保最终的组织中不含 δ -铁素体。位于改进后的谢弗勒图中所示的斜线区,如图1所示。

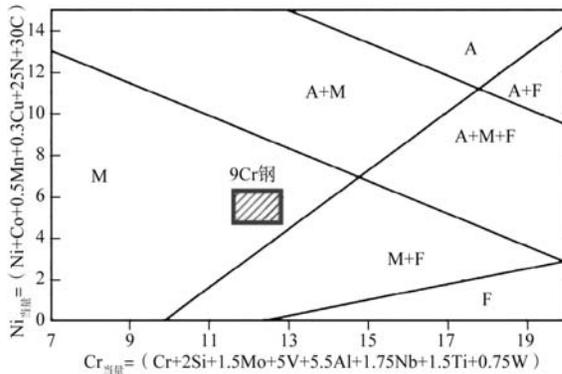


图1 9Cr钢成分设计原则

Fig. 1 Composition design principle of 9Cr steel

使用JMatPro模拟软件测试该钢种的CCT曲线如图2所示,从CCT曲线可知, A_{C1} 约为810 $^{\circ}\text{C}$, M_s 点约为385 $^{\circ}\text{C}$, M_f 点约为105 $^{\circ}\text{C}$ 。CCT曲线模拟测试用9Cr钢的化学成分(质量分数,%):0.11 C,0.32 Si,0.47 Mn,0.014 P,0.003 S,0.038 N,0.018 Al,8.50 Cr,0.13 Ni,0.85 Mo,0.22 V,0.076 Nb。

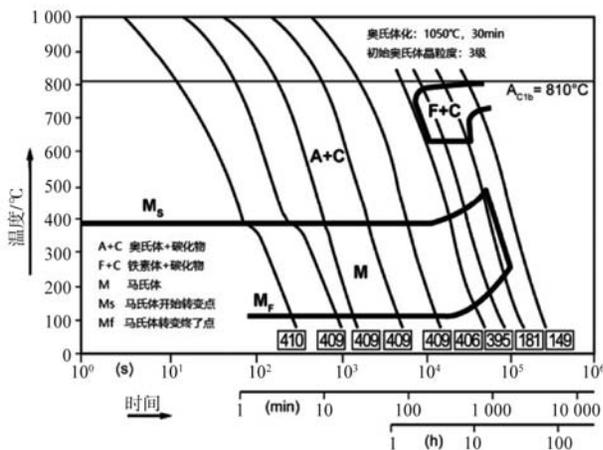


图2 使用JMatPro模拟软件测试的9Cr钢CCT曲线

Fig. 2 CCT curves of 9Cr steel tested by JMatPro

2 原热加工工艺方案及问题

该材质的淬透性非常好,即便是浇注后在砂型中缓冷,该材质也可能发生马氏体相变。马氏体转变体积膨胀容易导致铸件开裂,所以一般是在砂型中冷却到室温。但是这样铸件的生产周期太长,如浇注重105 t的阀体,仅铸件冷却这一个工序就需要40天左右,无

法满足交付周期的需求,也不利于地坑的周转。

在正火前的预备热处理阶段,为了消除微观偏析,实现成分均匀化,现阶段多采用扩散退火的方式^[5]。但是这样,奥氏体与原马氏体结构保持了K-S的位向关系,也就是粗晶组织遗传,无法实现晶粒的细化,导致厚壁铸件无法进行超声波探伤,需要二次正火才能解决这一问题。

由于马氏体相变的特性,该铸钢件可能需要多次补焊,每次焊后回火均需采用720 $^{\circ}\text{C}$ 至少保温8 h的高温回火方式。补焊前需要将补焊区预热到250 $^{\circ}\text{C}$,该温度位于 M_s 和 M_f 之间。也就是说,如果铸件保持250 $^{\circ}\text{C}$ 进行焊后热处理,补焊区在没有完成马氏体转变的情况下直接进行了焊后回火处理,那么在回火结束后铸件出炉冷却到室温的过程中,补焊区的残余奥氏体将继续完成马氏体转变,造成延迟裂纹的产生。这样一来,补焊次数和焊后回火次数增加,对铸件的性能有一定的影响。而且生产周期延长,生产成本也不断增加。基于以上分析,结合笔者在原单位的生产经验,进行了热加工工艺方案的优化。

3 热加工工艺优化

3.1 打箱

根据9Cr钢的CCT曲线, M_s 点约为385 $^{\circ}\text{C}$,在此温度之上打箱,尚未发生马氏体相变,原始组织为奥氏体,具有一定的强韧性,打箱后铸件的温度在进炉退火前保持在385 $^{\circ}\text{C}$ 以上就不会产生裂纹。高的打箱温度有利于地坑的周转,但是打箱温度不能过高,否则铸件高温强度不够,容易发生变形或者撕裂。为了确定合适的打箱温度,测试了该材质的高温强度。如图3所示。

从图3可以看出,在450 $^{\circ}\text{C}$ 强度能够达到340 MPa以上,足以防止起吊过程中的变形。温度500 $^{\circ}\text{C}$ 以上,强度降低幅度较大,过高的温度也不利于工人操作,综合考虑,将打箱温度设定在400~450 $^{\circ}\text{C}$ 。在冬季寒冷的时候,应注意避免任何空气通风,以防止铸件局部温度降低过快,造成冷裂。

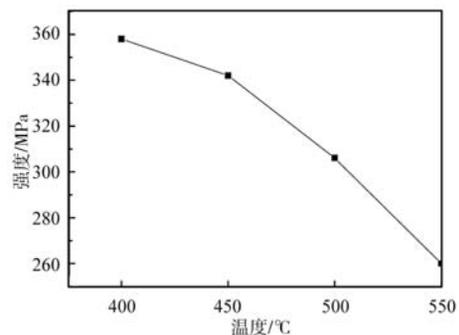


图3 ZG1Cr10MoVNbN铸件铸态高温强度试验

Fig. 3 Tensile strength of ZG1Cr10MoVNbN steel casting at elevated temperature as cast status

由于铸件内部温度高于表面温度至少50℃，所以当冒口根部温度降低到400℃的时候，准备打箱。打箱时需要注意，准备好退火窑，按照铸件的尺寸规格放置好窑枕垫铁，窑内加热到200~300℃；准备好钩机。用两条钢丝绳，4个吊点垂直起吊，先把铸件吊起200~300mm高，落下，反复2~3次，然后吊出地坑。

铸件运到清砂区，用钩机振动芯骨，进行清砂。这个时候为了避免铸件冷却太快，允许内腔留有部分型砂，但是务必做到内腔通透，否则热处理加热时砂芯容易将铸件胀裂。

3.2 预热处理（退火）

中国和日本的采购标准中都有均匀化退火的要求。奥钢联生产此类材质的铸件不进行均匀化退火，因为在正火阶段就能完成这一目的。他们一般采用760~780℃的退火^[6]，但是需要很长的保温时间才能消除组织遗传。为了实现细化晶粒的目的，将退火温度提高到 $A_{C3}+$ （30~100℃），而低于均匀化退火的温度。在这一温度下，奥氏体进行再结晶，球形初晶奥氏体析出，达到细化晶粒的目的。

退火后的铸件本体温度冷却到400℃的时候出窑，切除冒口和补贴等，去除上窑前型腔内未清除的型砂、芯骨。需要注意的是，整个过程中铸件的温度不能低于350℃，如果切割所需时间长，铸件最好上窑加热，在400℃保温。

3.3 补焊及焊后回火

补焊过程是这类铸钢件的重点工序，补焊质量也是影响产品交付周期的关键。相比较来说，缩松类缺陷的补焊难度较大。缩松类缺陷在挖除的时候，因为有些缺陷不超标，没有必要将所有的缩松挖除。这样一来，补焊工艺就十分重要，氩弧焊的打底工作需要十分仔细，因为这种地方在补焊的过程中会塌陷。塌陷的地方要打2~4层底。每层用圆头风铲清根、消除夹

杂物和层间应力。

补焊前的预热温度通常不低于200℃，层间温度不应高于300℃，以避免热裂，并允许每一次通道在开始下一通道前至少部分转变为马氏体。补焊结束后，焊缝必须冷却到低于 M_s 温度以下，以确焊缝组织完全马氏体转变。尤其对于厚壁和复杂件来说，考虑到马氏体转变的滞后性，回火前的冷却不应高于80℃。冷却、预热和重新预热应缓慢进行，以防止热应力。这一点非常重要，往往容易忽视，担心铸件冷却下来后开裂就带着温度进行焊后回火了。

如果有多次补焊，以往的时候可能会进行多次回火，回火过程中固溶在基体中的合金元素进一步析出，造成力学性能的部分降低，此外也造成较高的能源消耗。因此，在焊后回火之前，增加去氢处理的工序，即补焊结束后铸件冷却到 $\leq 80^\circ\text{C}$ ，然后把铸件加热到 $(425 \pm 10)^\circ\text{C}$ 保温不低于4h，然后缓冷到室温，进行补焊处的无损检测、缺陷挖除、补焊等工作，直至无损检测结果合格，然后进行焊后回火。

3.4 加热和冷却速率的选择

从组织和性能来说，在加热过程中涉及到合金元素的固溶、奥氏体形核和再结晶，在冷却过程中涉及到马氏体相变、MX相和 $M_{23}C_6$ 等沉淀强化、析出强化等过程^[7]；从铸件的质量方面，由于9Cr钢的导热系数小，线膨胀率高，加上马氏体相变的体积膨胀，容易产生裂纹缺陷。因此，加热速度一般不超过50℃/h；除了淬火冷却外，其余热处理的冷却速度一般 $\leq 30^\circ\text{C}/\text{h}$ 。

4 工艺方案及生产实践

9Cr钢材质的铸钢件生产难度较大，应注意整个热加工过程工艺参数的正确选择和执行，因为每道工序处理不当都可能使铸件产生裂纹，甚至报废。热加工工艺的顺序需要根据材料和铸造设计进行调整。形成标准化作业规程。可行的热加工工艺参数如图4所示。

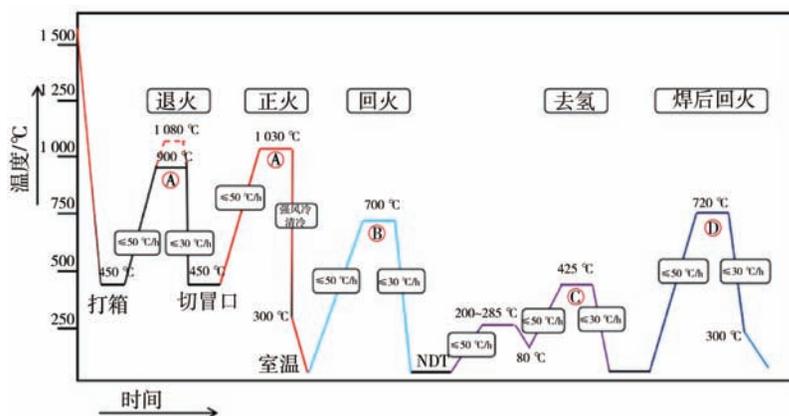


图4 9Cr钢铸件热加工工艺参数

Fig. 4 Thermal process parameters of 9Cr steel casting

其中,在退火阶段,如果标准要求扩散退火,而铸件壁厚较大,那么在扩散退火和正火之间加上900℃的中间退火,为细化晶粒做准备,防止混晶组织。壁厚超过450 mm的铸钢件,一般选择2次回火。图4中,A、B、C、D为保温时间,按照表2的要求执行。

表2 不同热处理工序保温时间参数选择
Table 2 Parameter selection of soaking time for different heat treatment procedure

符号	热处理工序	保温时间要求
A	退火、正火	25 mm/h, 最少8 h
B	回火	25 mm/h, 最少12 h
C	去氢	25 mm/h, 最少4 h
D	焊后回火	25 mm/h, 最少8 h

我公司根据此热加工工艺生产了应用于超临界机组的汽缸、阀体等铸件,部分铸件如图5所示。这些铸件的打箱工序可以缩短15~20天;在补焊工序能够将原来的3~4次补焊控制在1~2次内完成,在保证铸件的性能没有明显降低的同时,缩短了生产周期,降低了生产成本。

参考文献:

- [1] 太田定雄. 铁素体系耐热钢 [M]. 张善元, 张绍林, 译. 北京: 冶金工业出版社, 2003.
- [2] 赵义瀚, 赵成志, 王健楠, 等. δ 铁素体形成机制以及对马氏体耐热钢冲击功的影响 [J]. 钢铁, 2013, 48 (4): 70-75.
- [3] LI J, LIU J, JIANG B, et al. Influence of high temperature pre-deformation on the dissolution rate of delta ferrites in martensitic heat-resistant steels [J]. Met. Mater. Int., 2017, 23 (2): 239-245.
- [4] LI S, ELINIYAZ Z, ZHANG L, et al. Microstructural evolution of delta ferrite in SAVE12 steel under heat treatment and short-term creep [J]. Mater. Charact., 2012, 73: 144-152.
- [5] 张亚才, 姜文杰, 白云龙, 等. 600 MW超临界汽轮机高压内缸的研制 [J]. 铸造, 2006, 55 (6): 649-651.
- [6] 李伟华, 陈成, 张云博, 等. 620℃超超临界汽轮机CB2阀壳铸件试制研究 [J]. 铸造, 2019, 68 (3): 264-268.
- [7] 马煜林, 刘越, 江旭, 等. 铸造冷却速率对CB2钢微观组织和力学性能的影响 [J]. 铸造, 2018, 67 (11): 1016-1020.

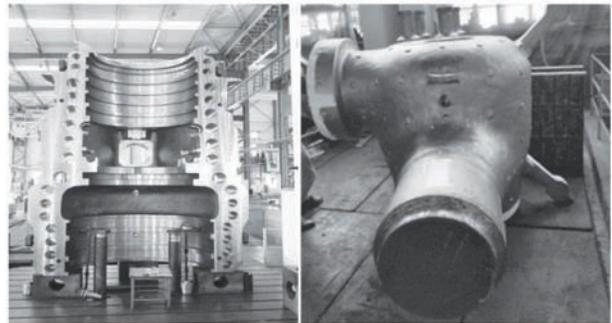


图5 超临界机组用9Cr钢汽缸和阀体

Fig. 5 Turbine shell and valve with 9Cr steel used for supercritical units

5 结束语

9Cr钢铸件热加工工艺优化后可获得如下效果:采用高温打箱方式缩短生产周期15~20天;在 $A_{C3}+$ (30~100℃)进行预备热处理能够消除组织遗传,细化晶粒尺寸;采用补焊后冷却到80℃以下和去氢处理能够减少补焊次数;控制加热和冷却速率可以有效防止铸件裂纹。

Optimization of Thermal Process of 9Cr Steel Castings for Supercritical Units

YANG Cheng-kun^{1,2}, YE Wen-hui², WU Ren-gui²

(1. Liaoning Fuan Heavy Industry Co., Ltd., Anshan 114016, Liaoning, China; 2. China Foundry Association, Beijing 100084, China)

Abstract:

Aiming at the problems such as long production cycle of 9Cr steel castings in the current hot processing process for supercritical units, the optimization process parameters of shaking out, pre-heat treatment, tempering, repair welding and post-welding tempering were explored and proposed in this paper. Shaking out at high temperature can shorten the production cycle of 15-20 days. The preliminary heat treatment near A_{C3} can eliminate the structure inheritance and refine the grain obviously. Cooling to 80℃ and dehydrogenation treatment after welding repair can reduce the cycle of welding repair, shorten the production cycle and reduce the production cost under the premise of ensuring the mechanical properties. Controlling the heating and cooling rate can effectively prevent the casting from cracking.

Key words:

9Cr steel; supercritical; steel casting; thermal process