DOI:10.16410/j.issn1000-8365.2022.02.004

回火处理对 ZG04Cr13Ni4 马氏体不锈钢铸件组织及性能的影响

孙　兰[1],杨明川[2],蒋　繁[1],鲜　广[1],范洪远[1]

(1. 四川大学 机械工程学院,四川 成都 610065;2. 中建钢构工程有限公司,四川 眉山 620564)

摘　要:以 800~1 000 MW 级水轮机转轮常用材料 ZG04Cr13Ni4 马氏体不锈钢为研究对象,分析了不同回火温度和回火次数对材料显微组织及力学性能的影响。结果表明:ZG04Cr13Ni4 马氏体不锈钢经过正火及一次回火或二次回火处理后,其金相组织均为板条状马氏体,并具有明显的原奥氏体晶界;当二次回火温度进一步升高时,板条状马氏体粗化,但仍保持马氏体板条位向及形貌;经正火及二次回火后材料综合力学性能显著提高;最佳热处理工艺为选择正火及二次回火工艺,且回火温度控制在 600~640 ℃可以满足产品行业标准中力学性能要求。

关键词:ZG04Cr13Ni4;马氏体不锈钢;回火温度;热处理;力学性能

中图分类号:TG156; TG113　　**文献标识码**:A　　**文章编号**:1000-8365(2022)02-0095-04

Effect of Tempering Treatment on Microstructure and Properties of ZG04Cr13Ni4 Martensitic Stainless Steel Castings

SUN Lan[1], YANG Mingchuan[2], JIANG Fan[1], XIAN Guang[1], FAN Hongyuan[1]

(1. School of Mechanical Engineering, Sichuan University, Chengdu 610065, China; 2.China Construction Steel Structure Engineering Co., Ltd., Meishan 620564, China)

Abstract: The microstructure and mechanical properties of ZG04Cr13Ni4 martensitic stainless steel commonly used for 800-1000 MW water turbine runner were studied at different tempering temperatures and times. The results show that the microstructure of ZG04Cr13Ni4 martensitic stainless steel after normalizing and primary or secondary tempering is strip martensite and has obvious original austenite grain boundary. When the secondary tempering temperature increases further, the lath martensite becomes coarser, but still retains the orientation and morphology of martensite lath. After normalizing and secondary tempering, the comprehensive mechanical properties of the materials are significantly improved. The best heat treatment process is normalizing and secondary tempering process, and the tempering temperature is controlled between 600 ℃ and 640 ℃, which can meet the mechanical properties requirements of product industry standards.

Key words: 04Cr13Ni4; martensitic stainless steel; tempering temperature; heat treatment; mechanical property

转轮是水轮机机组的心脏,混流式水轮机主要由上冠、下环、叶片组焊而成,各部件需具有高强度、抗汽蚀、抗泥沙磨损、抗腐蚀、抗疲劳等性能要求。而 800~1 000 MW 级特大型水电机组的核心铸件因其机组工作功率更大,铸件质量要求更高。目前,我国的水轮机转轮材质普遍选择具有高强度、高韧性、良好的耐磨性和耐冲刷腐蚀性能良好的 ZG04Cr13Ni4 马氏体不锈钢材质[1]。而对此材质的进一步强化主要集中在各种热处理工艺的选择[2-5],因此掌握该类钢的热处理技术成为许多科研工作者的重要研究内容。

本文作者研究分析了 ZG04Cr13Ni4 马氏体不锈钢在不同回火次数和回火温度热处理工艺下的组织和性能变化,寻求最佳性能的热处理工艺方案,以生产出满足高性能要求的铸件。

1　试验材料及方法

1.1　试验原材料

实验原材料 ZG04Cr13Ni4 马氏体不锈钢由二重(德阳)重型装备有限公司提供。该 ZG04Cr13Ni4 大试板(未进行任何热处理)主要化学成分满足表1。

1.2　热处理工艺设计

表 2 为 ZG04Cr13Ni4 马氏体不锈钢的正火和回火热处理的温度、保温时间和冷却方式。选择的热

收稿日期:2021-09-16
基金项目:四川省科技计划重点研发项目(2020YFG0265)
作者简介:孙　兰(1977—),副教授.研究方向:铸造灰铸铁、不锈钢及耐热钢.电话:02885595187,
Email:sunlan@scu.edu.cn

(C)1994-2022 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

表1 ZG04Cr13Ni4大试板铸件主要化学成分 w(%)
Tab.1 Main chemical composition of ZG04Cr13Ni4 large test plate casting

C	Mn	Si	Cr	Ni	Mo	S	P	P+S	Fe
0.031	0.580	0.420	13.130	4.060	0.490	0.003	0.012	0.015	余量

处理工艺为正火+一次回火或二次回火。实验中选取正火温度为 1 040 ℃保温 2 h，冷却方式为空冷。设置回火温度为 600~660 ℃。

1.3 组织性能检测

依照 GB/T13298-2015 标准金相组织分析，按不同试验方案进行热处理后，依照 GB/T228.1-2010，GB/T229-2007，GB/T231.1-2009 标准进行力学性能包括布氏硬度、屈服强度、抗拉强度、伸长率和断面收缩率进行检测。

2 实验结果及分析

2.1 金相组织分析

图 1(a)~(e)是 ZG04Cr13Ni4 马氏体不锈钢经 1 040 ℃正火及一次回火和二次回火处理后的金相组织照片。从图中可以看出 ZG04Cr13Ni4 马氏体不锈钢在经过两次回火后获得的基体组织均为板条状马氏体，并具有明显的原奥氏体晶界，原奥氏体晶粒被分割成为不同取向的马氏体板条束，分布在奥氏体晶界两侧分布。马氏体束的板条尺寸大致相同、平行排列，板条束之间以大角度晶界相间，板条束内板条间不严格平行，而是以小角度晶界相间[6]。依据文献[7]，在 590 ℃以上的回火温度下，生长在马氏体板条中间的组织为逆变奥氏体，其是沿马氏体板条

表 2 热处理试验工艺
Tab.2 Experimental heat treatment process

编号	正火			一次回火			二次回火		
	温度 /℃	保温时间 / h	冷却方式	温度 /℃	保温时间 / h	冷却方式	温度 /℃	保温时间 / h	冷却方式
1#	1 040	2	空冷	600	2	空冷	590	2	炉冷
2#	1 040	2	空冷	620	2	空冷	610	2	炉冷
3#	1 140	2	空冷	640	2	空冷	630	2	炉冷
4#	1 140	2	空冷	660	2	空冷	650	2	炉冷
5#	1 140	2	空冷	600	2	空冷	—	—	—

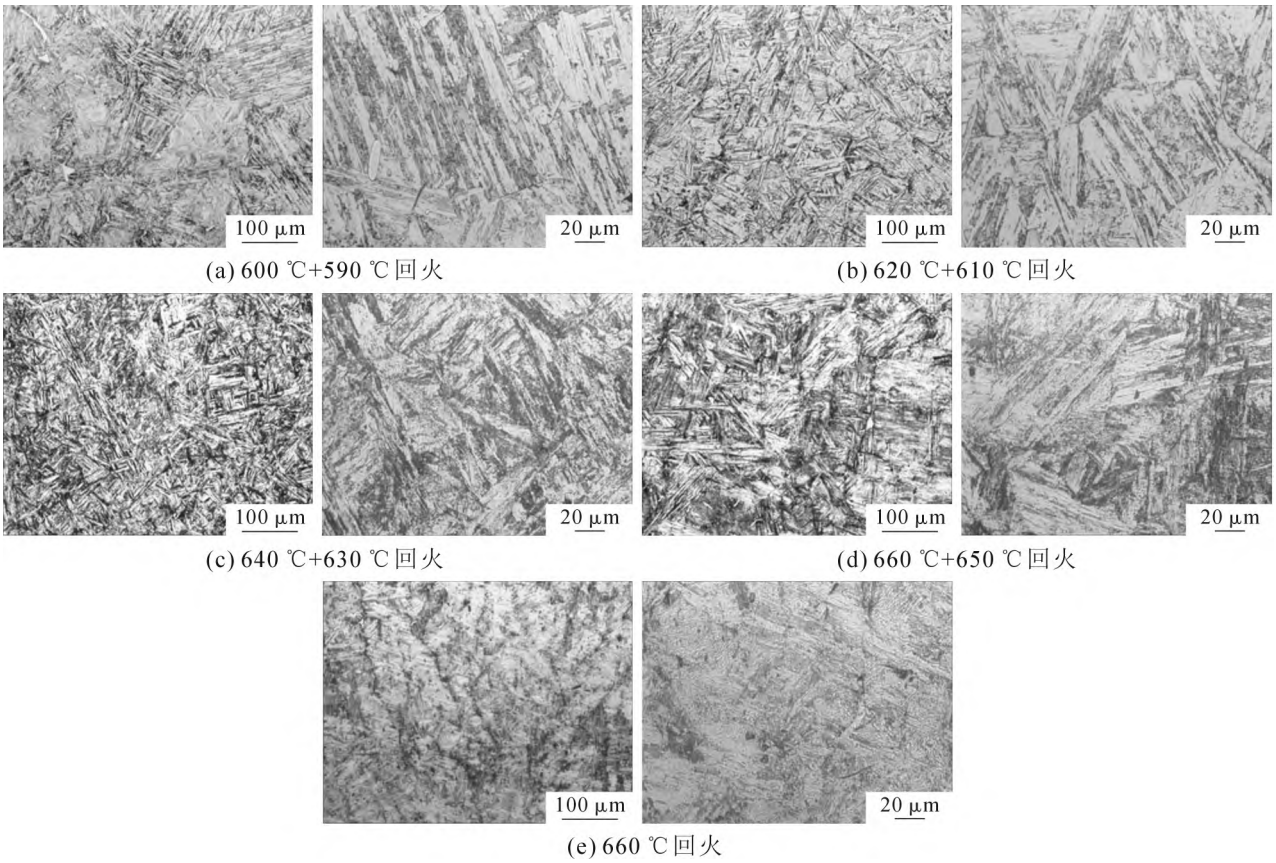


图 1 ZG04Cr13Ni4 经 1 040 ℃正火不同温度回火后的微观组织
Fig.1 Microstructure of ZG04Cr13Ni4 martensite steel with different tempering after 1 040 ℃ normalization

(C)1994-2022 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

界面纵向长大形成极细的奥氏体，这种较细的马氏体板条和在板条边界处分布的逆变奥氏体对改善钢材的力学性能有较好的促进作用。

当二次回火温度进一步升高时，板条状马氏体粗化，但仍保持马氏体板条位向及形貌，部分相邻马氏体板条界消失，马氏体板条合并。

相比于二次回火的样品，只进行了一次 660 ℃回火的样品，其基体仍为板条状马氏体，其部分板条马氏体束较粗长，而进行两次回火后基体组织稍有变化，马氏体组织也略有细化，组织相对更加均匀，有助于提高其屈服性能和塑性。

2.2　力学性能分析

表 3 是 ZG04Cr13Ni4 马氏体不锈钢在 1 040 ℃正火，不同温度回火后的力学性能。

表3 ZG04Cr13Ni4经1 040 ℃正火不同回火处理后的力学性能

Tab.3 Mechanical properties of ZG04Cr13Ni4 martensite steel with different tempering after 1 040 ℃ normalization

编号	回火温度及次数	抗拉强度 R_m/MPa	屈服强度 $R_{p0.2}$/MPa	屈强比	伸长率 δ(%)	断面收缩率 ψ(%)	硬度(HBS)
1#	600 ℃+590 ℃	907.56	775.84	0.855	19.20	49.72	313.4
2#	620 ℃+610 ℃	900.84	702.17	0.779	19.45	50.09	297.0
3#	640 ℃+630 ℃	893.29	593.30	0.664	20.18	51.13	302.8
4#	660 ℃+650 ℃	869.78	557.16	0.641	19.60	47.14	282.6
5#	660 ℃	890.61	576.54	0.647	13.40	44.75	297.6

由表 3 发现，正火处理后进行两次回火时，两次回火温度低于 640 ℃时（1#、2# 和 3# 样品），相比一次回火的屈服强度、抗拉强度、硬度、屈强比和塑性（伸长率和断面收缩率）等综合性能都有明显的提高。分析原因在于：正火加热保温经奥氏体化后形成细小晶粒的奥氏体，快冷后转变为低碳马氏体。在第一次回火中马氏体分解，过饱和的碳析出，减少固溶的碳含量，适当降低了材料的强度，提高了塑性和韧性。由于一次回火温度较高，一次回火在产生回火马氏体外，还产生极其细小的逆变奥氏体。这些逆转变奥氏体在回火冷却时又部分转变成马氏体，给二次回火过程中再次生成的稳定逆变奥氏体的形核与长大提供条件。进行二次回火的目的是得到足够多的稳定的逆变奥氏体。这些逆变奥氏体可以在塑性变形过程中发生相变，从而提高材料的强度及塑性[3]。

由表 3 也可以发现，在二次回火过程中，随着回火温度的升高，样品的屈服强度和抗拉强度同时下降，特别是屈强比显著降低。4# 样品经过两次回火后，其力学性能低于一次回火后的 5# 样品。分析原因可能为：随着回火温度的增加，马氏体分解合金元素扩散加快，从基体中迁出而减弱了固溶强化的效果；马氏体板条的逐渐分解合并，使马氏体的强化作用减弱，导致强度下降，塑韧性略有增加[8]。当回火温度增加到 660 ℃时，材料中的奥氏体含量增多，一方面，新形成的细小奥氏体不但增加了相界数量，同时作为第二相组织增加材料的应变硬化能力[9]；另一方面，新形成的奥氏体在屈服后的塑性变形阶段极有可能发生马氏体相变，使材料具有连续的屈服行为并增加材料的应变硬化能力，材料的拉伸曲线发生显著的改变，材料的屈强比大幅降低[2]。

表 4 为机械行业标准《大型不锈钢铸件技术条件》（JBT6405-2018）中的 ZG04Cr13Ni4 马氏体不锈钢的力学性能要求[10]。经过表 3 对不同回火热处理后的试样的力学性能结果，选择在 590~640 ℃温度进行二次回火后，其强度、硬度和塑性满足行业标准的要求，而只进行一次回火时其屈服强度及伸长率略低于标准要求值。因此，在对 ZG04Cr13Ni4 马氏体不锈钢进行热处理过程中，需要选择二次回火且回火温度控制在 590~640 ℃温度，同时二次回火温度略低于一次回火温度，可以满足产品行业标准中力学性能的要求。

表 4 大型不锈钢铸件力学性能要求

Tab.4 Mechanical property requirements for large stainless steel castings

力学性能	屈服强度 $R_{p0.2}$/MPa	抗拉强度 R_m/MPa	伸长率 A(%)	断面收缩率 Z(%)	硬度（HBW）
性能要求	≥580	≥780	≥18	≥40	221~294

3　结论

（1）ZG04Cr13Ni4 马氏体不锈钢经过正火及一次回火或二次回火处理后，其金相组织均为板条状马氏体，并具有明显的原奥氏体晶界；当二次回火温度进一步升高时，板条状马氏体粗化，但仍保持马氏体板条位向及形貌。

（2）相比于正火及一次回火处理，样品经正火及二次回火后屈服强度、抗拉强度、硬度、屈强比和塑性等综合性能明显提高，且随着二次回火温度的升高，屈服强度和抗拉强度略有下降。

（3）ZG04Cr13Ni4 马氏体不锈钢热处理选择正火及二次回火工艺，且二次回火比一次回火温度略

(C)1994-2022 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

低，回火温度控制在 590~640 ℃可以满足产品行业标准中力学性能的要求。

参考文献：

[1] 张洪生，付晓虎，张苏星. ZG04Cr13Ni4Mo 马氏体不锈钢力学性能研究[J]. 一重技术，2018（1）：43-47.

[2] 张迎春. 回火温度对 00Cr13Ni4 马氏体不锈钢组织与性能的影响[J]. 金属热处理，2013，38 (11)：95-97.

[3] 周彤， 卫心宏. ZG06Cr13Ni4Mo 马氏体不锈钢叶片热处理工艺研究[J]. 铸造设备与工艺，2017 (3)：32-34，47.

[4] 支金花，王裕，李继红，等. 1Cr12Ni2W1MoIV 马氏体不锈钢的组织和高温力学性能[J]. 金属热处理，2018，43(3)：68-70.

[5] 王培. 13CrNi 不锈钢组织性能控制及其在三峡水轮机转轮上的应用[D]. 北京：中国科学院，2011.

[6] 孙立斌，许庆彦，柳百成. G0Cr13Ni4Mo 不锈钢铸件微观组织试验研究[J]. 铸造，2002，51（12）：745-749.

[7] 姜雯，赵昆渝，业冬，等. 热处理工艺对超级马氏体钢逆变奥氏体的影响[J]. 钢铁，2015，50(2): 70-75.

[8] 宋阳. 低碳马氏体不锈钢的热处理特性研究[D]. 北京: 机械科学研究总院，2020.

[9] 王培，陆善平，李殿中，等. 低加热速率下 ZG06Cr13Ni4Mo 低碳马氏体不锈钢回火过程的相变研究 [J]. 金属学报，2008，44(6): 681-685.

[10] JBT6405-2018，中华人民共和国机械行业标准，大型不锈钢铸件技术条件[S].

(C)1994-2022 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net