

淬火和回火工艺对00Cr13Ni5Mo钢力学和组织性能的影响

Effect of Quenching and Tempering Process on the Microstructure and Properties of 00Cr13Ni5Mo

供稿|武光江¹, 李颜² / WU Guang-jiang¹, LI Yan²

内容导读

文章通过金相和电镜观察相结合的方法研究了淬火和回火工艺对00Cr13Ni5Mo钢力学和组织的影响。结果表明, 淬火态的00Cr13Ni5Mo钢组织主要为板条状的马氏体组织和 δ 铁素体组织。随着淬火温度的升高, 抗拉强度和屈服强度逐渐降低, δ 铁素体宽度先变细后变粗, 延伸率呈现下降的趋势。

随着我国经济的迅速发展, 传统的火力发电量已远不能满足我国日益增长的供电需求, 核电已经逐渐成为安全绿色的新型发电力量。核能发电因其电厂占地面积小、高效率、环境污染少、可控性强的特点, 在我国发电种类的比重逐渐增加。而在核电工业发展过程中, 各个重要机组所需钢材要求质量尤其为高。其中00Cr13Ni5Mo是在Fe-Cr-Ni-Mo系基础上发展的超低碳马氏体不锈钢, 它具有良好的强度、韧性、可焊接性及耐磨性的优点, 常用于核电站汽轮机叶片、水压机阀、辅助泵传动轴、蒸发器支撑件、控制棒驱动机构等^[1-3]。基于核反应堆中恶劣的使用环境, 为了保证核电站的安全顺利运行, 有必要对00Cr13Ni5Mo钢的性能进行研究。刘环等人利用人工神经网络法建立了00Cr13Ni5Mo钢淬火力学性能模型, 获得了淬火参数与该钢性能的

关系^[4]。罗昌森等人开展了00Cr13Ni5Mo对1Cr13马氏体不锈钢焊接实验, 并对焊缝及热影响区的金相组织进行分析, 焊缝处为整齐排列的细柱状组织, 晶间残余奥氏体均匀交替分布, 基体上弥散分布着碳化物和粗大的合金化合物质点^[5]。刘璐等人研究了00Cr13Ni5Mo钢加热和冷却过程的相变过程, 认为00Cr13Ni5Mo加热到1250℃时, 奥氏体完全恢复初始显微形貌, 该相具有遗传性, 未发生再结晶^[6]。

上述研究虽然取得了一定的成果, 但鲜有人从淬火和回火工艺上对该钢的力学性能进行研究。在工业化生产过程中, 00Cr13Ni5Mo马氏体不锈钢需要先进行淬火获得较高的强度, 然后再通过回火获得适宜的韧性。实验结果表明, 淬火是00Cr13Ni5Mo马氏体不锈钢获得优异性能的先决条件, 淬火温度较高, 则淬火后钢材强度太大,

其回火区间选择的范围较窄；淬火温度太低，则钢材的强度难以满足工艺要求。因此，有必要对00Cr13Ni5Mo的淬火温度进行研究，从而为制定后续回火工艺、确保产品高强度和优异的延伸率奠定理论和实际基础，本文研究了淬火和回火工艺对00Cr13Ni4Mo钢力学性能的影响关系，为确保核电用材料的性能，保证核电站的安全运行提供了必要的数据库支持。

实验

实验用00Cr13Ni5Mo钢，其化学成分如表1

表1 00Cr13Ni5Mo化学成分(质量分数)

C	Si	Mn	Cr	Ni	Nb	Mo	其余
≤0.015	≤0.20	≤0.61	≤12.98	≤4.92	≤0.024	≤2.04	杂质

结果与分析

力学性能影响

图1为各种淬火温度加630℃/2h处理后的00Cr13Ni5Mo钢力学性能影响关系图。从图中可以看出，随着淬火温度的升高，抗拉强度逐渐降低，在1050℃有明显的升高后，又随着温度的升高略有降低。屈服强度的变化趋势与抗拉强度近似相同，只是在980℃出现了一个小的峰值。而延伸率随着淬火温度的升高，总体呈现下降的趋势，在940、1000和1050℃处表现出良好的韧性。

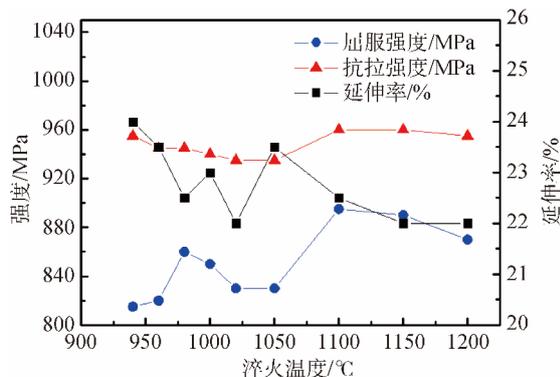


图1 淬火温度与00Cr13Ni5Mo钢力学性能关系图

淬火态显微组织影响

图2为各种淬火温度下的00Cr13Ni5Mo钢金相组

所示，将该棒材制备成为φ150mm×200mm的试样。淬火温度依次为940、960、980、980、1000、1020、1050、1100、1150及1200℃，淬火保温时间为0.5h，淬火后直接空冷至室温，随后将试样按照630℃/2h的参数进行回火。上述试样完成后在万能试验机上对各种试样进行室温拉伸实验。

将上述淬火态和回火态的试样经过打磨、抛光，制成金相试样后，用氯化铜(5g)+盐酸(40mL)+乙醇(25mL)+蒸馏水(30mL)溶液腐蚀约30s后，利用光学显微镜和扫描电子显微镜观察各种热处理条件下微观组织。

组织。淬火态的基体组织主要为板条状的马氏体组织和δ铁素体组织。随着淬火温度的升高，δ铁素体宽度先变细后变粗。

在940℃淬火，可以看到马氏体组织较为凌乱，大量的δ铁素体沿原奥氏体晶界分布且尺寸较宽，在局部δ铁素体内部还留有岛状的原奥氏体相。这可能是因为淬火温度较低，合金化元素扩散不均匀，组织转变不平衡所致。当温度升高到1000℃时，合金元素扩散均匀，晶粒细化，δ铁素体呈现较窄的条状分布。随着温度升高，原奥氏体晶粒尺寸逐渐长大，淬火后得到十分粗大的马氏体组织，并且原奥氏体晶界处析出的δ铁素体又重新粗化。

淬火温度在980~1100℃时，原奥氏体晶粒不断长大，淬火后的得到十分粗大马氏体组织。此外，随着淬火温度升高，原奥氏体晶界处会析出的δ铁素体组织逐渐增多，由于δ铁素体十分硬并且是脆性相，并且在回火的过程中不易分解，淬火后粗大状的δ铁素体就保存下来。提高淬火温度，碳化物(或氮化物)能及时溶入到原奥氏体中，因此，颗粒状的碳化物(氮化物)在淬火后的组织中明显减少。此外，钢在淬火状态(油冷或者空冷)，淬火后组中都有残余奥氏体组织甚至钢经过-78℃深冷处理的组织也发现有残余奥氏体由于这些残余奥氏体属于过冷奥氏体转变马氏体未完全所残留，目前只有通过变形和在一定温度的回火才能消除，所以钢中出现为转变完成的

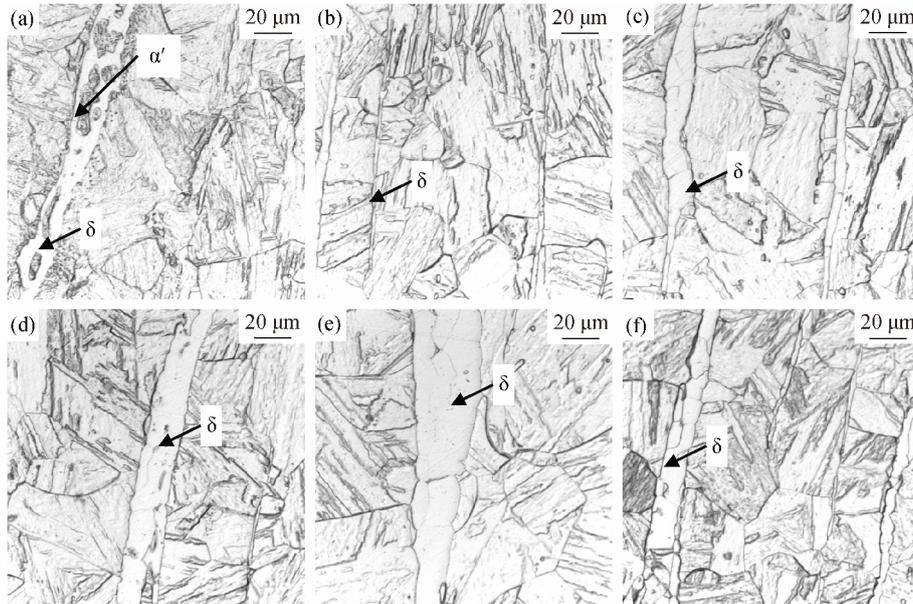


图2 淬火态金相组织: (a) 940°C; (b) 1000°C; (c) 1020°C; (d) 1050°C; (e) 1100°C; (f) 1200°C

残余奥氏体。当淬火达到1200°C，原奥氏体内部和晶界中的合金元素与C、N结合的激活能显著增强，会形成较为稳定的碳化物(或氮化物)。这些碳化物(或氮化物)钉扎在奥氏体内部和晶界处，阻止了奥氏体的长大，在随后空冷至室温的过程中生成的束状板条马氏体组织会比较短小。此外，由于碳化物(或氮化物)可能消耗了δ铁素体组织所生成的Ti、Mo、V

和Nb等合金元素，并且淬火后的马氏体因位错塞积会造成应力集中会产生大量的应力限制δ铁素体的长大，所以淬火后生成的δ铁素体组织比较细小^[7-10]。

回火对显微组织影响

图3为扫描电镜下各种温度淬火后经630°C回火的00Cr13Ni5Mo钢显微组织。在940~1050°C时，随

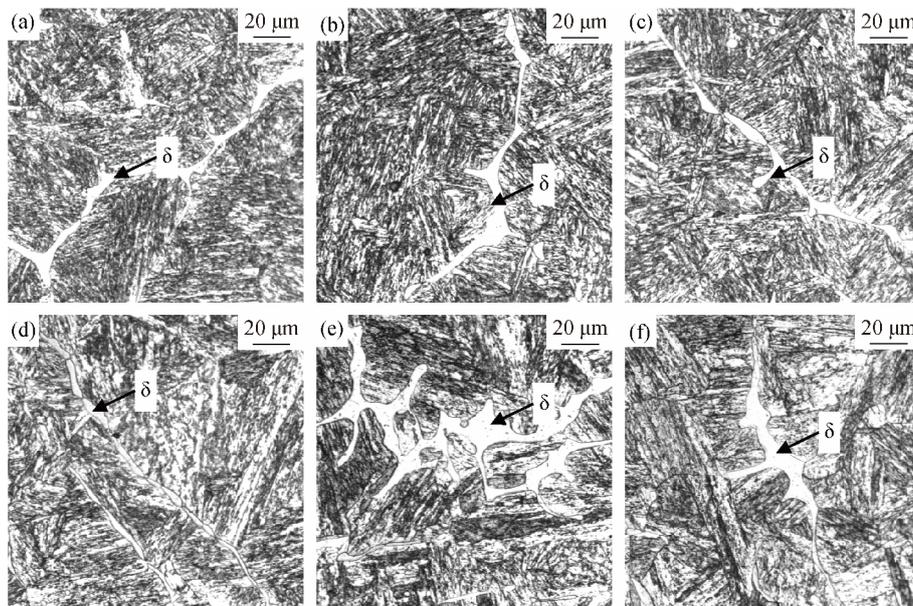


图3 淬火温度后回火的金相组织: (a) 940°C淬火+630°C回火; (b) 1000°C淬火+630°C回火; (c) 1020°C淬火+630°C回火; (d) 1050°C淬火+630°C回火; (e) 1100°C淬火+630°C回火; (f) 1200°C淬火+630°C回火

随着淬火温度的升高,晶界处的 δ 铁素体逐渐增大。在1100℃淬火条件下,晶界处的 δ 铁素体呈现网状分布。在1200℃的淬火条件下, δ 铁素体又逐渐变小。在较低温度下淬火时,大量的 δ 铁素体主要分布在钢中原奥氏体三叉晶界处。由于晶界处能量较高,并且存在大量的缺陷和应力,给 δ 铁素体的析出提供了充足的形核位置和驱动力。

在940~1050℃淬火时,钢中可能析出了含Nb和V的碳氮化合物,致使其具有良好的综合性能。随着淬火温度的升高,回火处理逐渐减少了淬火后存在于板条马氏体之间的残余应力和高密度位错,并且钢中更多的合金元素融入到原奥氏体中, δ 铁素体变得细小均匀分布,减少了其给钢带来的恶劣影响。然而,过高的淬火温度,如1100℃以上,00Cr13Ni5Mo钢淬火加热过程中奥氏体晶粒迅速长大,空冷后的板条马氏体尺寸较宽,致使钢中的逆变奥氏体含量变少,所以强度普遍升高。但随着淬火温度的升高,如在1100℃和1200℃淬火时,00Cr13Ni5Mo钢强度有下降趋势;大部分 δ 铁素体在高温淬火后呈现网状分布,局部在晶界也有球化趋势的 δ 铁素体。这些规律与前期力学性能的变化趋势基本保持一致^[10-13]。

结论

1) 随着淬火温度的升高,抗拉强度和屈服强度逐渐降低,延伸率呈现下降的趋势。

2) 淬火态的00Cr13Ni5Mo钢组织主要为板条状的马氏体组织和 δ 铁素体组织。随着淬火温度的升高, δ 铁素体宽度先变细后变粗。

3) 00Cr13Ni5Mo钢径各种温度淬火又经630℃回

火后, δ 铁素体先增大,后呈现网状,最终又逐渐变小。

参考文献

- [1] 扎依莫夫斯基.核动力用铝合金.北京:原子能出版社,1988
- [2] 核材料会议文集编辑小组编.核材料会议文集(1982).北京:原子能出版社,1982
- [3] 刘建章.核结构材料.北京:化学工业出版社,2008
- [4] 刘环,邹德宁,闫东娜,等.基于人工神经网络的超级马氏体不锈钢淬火力学性能预测.热加工工艺,2011,40(20):151
- [5] 罗昌森,郭熠.00Cr13Ni5Mo焊丝焊接1Cr13马氏体不锈钢的组织与性能.热加工工艺,2011,40(3):143
- [6] 刘璐,杨志刚,张弛.00Cr13Ni5Mo钢加热及冷却过程相变原位观察及相关研究.动力工程学报,2016,34(4):331
- [7] 荆丽娜.水电行业用超级马氏体不锈钢合金化特点.山西冶金,2009(4):1
- [8] 张然,康进武,黄天佑,等.ZG0Cr13Ni5Mo马氏体不锈钢铸态高温力学性能测试研究.铸造世界,2009,30(10):12521
- [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相变的研究.金属学报,2008,44(6):681
- [10] 马越初.15-5PH析出硬化不锈钢时效过程的分析及其不同相的研究[学位论文].沈阳:沈阳铸造研究所,1985
- [11] 李明德,秦勇.用差热分析法鉴别相变类型.材料导报,1996(4):15
- [12] 王春路.淬火温度对00Cr13Ni6MoNb不锈钢组织和性能的影响.杭氧科技,1997(4):10
- [13] 徐玉君.00Cr13Ni5Mo马氏体不锈钢焊接材料及焊接工艺方法的研究[学位论文].北京:机械科学研究院,2007

作者简介:武光江(1985—),男,山东沂南人,2010年毕业于海军工程大学,现为海装重庆局工程师。主要研究方向为核科学与技术。

李颜(1982—),山东沂南人,工程师。2005年毕业于沈阳工程学院,热能与动力工程专业,现就职于中国核电工程有限公司深圳设计院,发表论文4篇。E-mail:2008dongxue@163.com。