

回火温度对 9NiCrMo 钢性能和组织的影响

田景云¹ 洪波² 沈俊昶³

(1. 日照钢铁有限公司, 山东 日照 276806; 2. 唐钢中厚板材有限公司, 河北 唐山 063610; 3. 钢铁研究总院结构材料研究所, 北京 100081)

摘要: 通过对 9NiCrMo 钢在不同回火温度下常规力学性能的测试、扫描电镜、透射电镜观察和 XRD 分析, 研究了回火温度对其力学性能和微观组织的影响。结果表明: 该钢具有较高的强度和良好的低温韧性; 随着回火温度的升高, 屈服强度和抗拉强度分别在 550 °C 附近和 570 °C 附近出现高峰, 峰时效状态细小的 M_2C 型碳化物弥散析出起到了重要的强化作用。二次马氏体的析出也是导致强度增加的因素。其良好的低温韧性主要归因于极细小的二次马氏体板条束、铁素体、适量的逆转变奥氏体的出现。

关键词: 高强韧钢; 9NiCrMo; 回火温度; 二次马氏体; 逆转变奥氏体; M_2C 析出

中图分类号: TF76, TG142.1 文献标志码: A 文章编号: 1004-7638(2013)06-0101-05

DOI: 10.7513/j.issn.1004-7638.2013.06.020

Effect of Tempering Temperature on Microstructures and Properties of 9NiCrMo Steel

Tian Jingyun¹, Hong Bo², Shen Junchang³

(1. Rizhao Steel Holding Group Co., Ltd., Rizhao 276806, Shandong, China; 2. Tangshan Iron and Steel Plate Co., Ltd., Tangshan 063610, Hebei, China; 3. Structural Materials Research Institute, Central Iron and Steel Research Institute, Beijing 100081, China)

Abstract: Through testing, SEM and TEM observation and XRD analysis for common mechanical properties of 9NiCrMo steel under different tempering temperature, the effect of tempering temperature on mechanical properties and microstructures of the steel was studied. The steel shows relatively high strength and good low-temperature toughness. As the tempering temperature increases, the yield strength and tensile strength peak near 550 °C and 570 °C respectively. Fine M_2C carbides precipitated play an important role in strengthening. Secondary martensitic precipitation is also a factor that cause the increase in strength. Good low-temperature toughness can mainly be attributed to the appearance of very tiny secondary martensite lath, ferrite, and appropriate amount of reverted austenite.

Key words: 9NiCrMo, high strength steel, tempering temperature, secondary martensite, reverted austenite, precipitation of M_2C

0 引言

随着环境的恶化以及能源、资源的紧张, 急需发展高强度钢, 实现器件轻量化, 降低钢铁用量^[1-2]。在海洋焊接工程结构方面, 要求 Ni-Cr-Mo 系海洋工

程用钢在保持低温韧性的同时, 进一步提高强度。目前一般的热处理工艺为调质, 其组织为回火马氏体, 强韧匹配良好, 屈服强度一般在 500 ~ 800 MPa, 对于更高强度级别国内很少报道。为了适应发展, 提高其强度, 笔者通过适当调整合金成分, 对调质热

收稿日期: 2013-03-11

作者简介: 田景云(1985—), 男, 河南周口人, 硕士研究生, 主要研究方向为船体钢的组织与性能研究。

处理工艺中的回火温度与组织和性能的关系进行研究。通过采用淬火 + 不同的回火温度,研究组织与力学性能的变化规律,并深入研究其内在的精细组织变化规律。通过研究可知,借助调质工艺获得铁素体 + 二次马氏体 + 逆转变奥氏体混合组织,通过位错亚结构和析出强化使钢获得优良的强韧性匹配。其中回火温度对钢的性能起决定性作用。

1 试验材料与方法

1.1 试验材料

试验钢由 50 kg 真空感应炉冶炼,真空浇铸。其化学成分: C 0.08%、Si 0.14%、Mn 0.62%、S 0.002%、P 0.005%、Ni 9%,其他成分为 Cr、Mo、V。将钢锭锻成 40 mm × 120 mm × L 的钢坯,然后加热 1 200 °C 保温,轧成 16 mm 厚的钢板,轧后空冷。横向切取小试样进行 870 °C 保温 1 h,随后进行水淬冷却,而后对试样进行不同温度回火。

1.2 试验方法

1) 力学性能试验,参照国家标准 GB/T 228 - 2002,试样尺寸为 $\varnothing 10$ mm 的螺纹圆棒,试样标距为 50 mm,WE - 300 液压拉伸试验机上进行试验。夏比 V 型冲击试验参照国标 (GB/T229 - 1994),试验温度: - 20、- 84 °C,标准试样尺寸为 55 mm × 10

mm × 10 mm。采用 V 型缺口试样,开槽位置为横截面。在试验室 JBN - 300 冲击试验机上进行试验。

2) 金相组织观察及精细结构分析,采用 Leica 光学显微镜观察采集金相组织、S - 4300 型冷场离子发射扫描电镜观察、采集,利用配备的 EDAX Genesis6.0 能谱进行成分分析。用 HITACHI H - 800 透射电镜观察马氏体板条组织、第二相、逆转变奥氏体的形态、大小、分布等。

3) 逆转变奥氏体的观察研究,不同回火温度的试样经研磨、抛光及电解去应力后,用 D5000X 射线衍射仪测定逆转变奥氏体的体积分数。

2 试验结果与分析

2.1 回火温度对力学性能的影响

图 1 给出了经不同温度回火 2 h 后试验钢的力学性能。从图 1(a)可知,随着回火温度的不断升高,试验钢的抗拉强度和屈服强度均有上升趋势,屈服强度首先在 550 °C 时达到最高峰 1 175 MPa、抗拉强度随后在 570 °C 时达到顶峰 1 205 MPa。回火温度进一步升高时抗拉强度和屈服强度均开始下降,600 °C 之后回火,强度迅速下降,抗拉强度下降 75 MPa,而屈服强度则下降了 95 MPa;当回火温度继续升高时,屈服强度直线下降,抗拉强度随后趋于稳定。

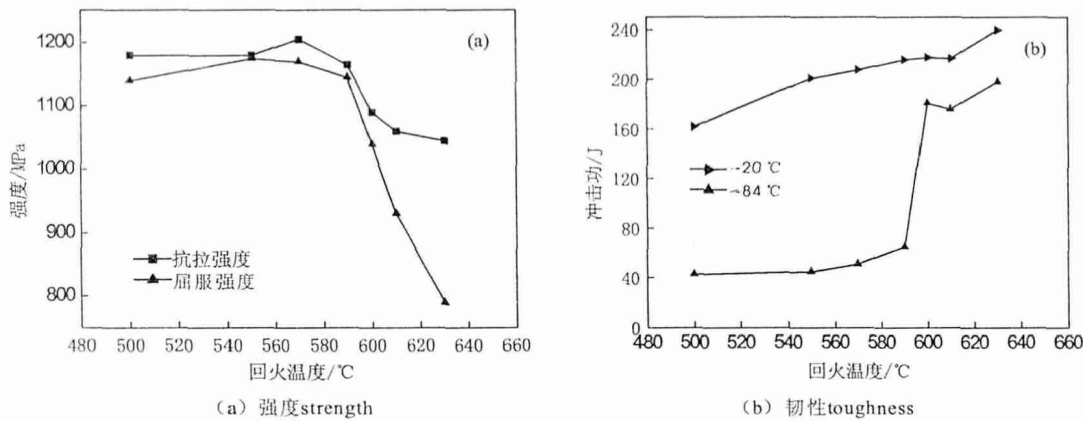


图 1 不同回火温度下钢的力学性能
Fig. 1 Mechanical properties of steel under different tempering temperature

由图 1(b)可知,随着回火温度的提高,- 20 °C 的冲击功缓慢提高,在 630 °C 回火时高达 240 J; - 84 °C 冲击功开始时较低且上升缓慢,当回火温度达 600 °C 时,冲击功从 65 J 上升到 181 J,随后有所上升但变化不大。由图 1 中变化趋势可知,随着回火温度的升高,试验钢的低温韧性得到提高,同时由图 1(a)可知强度则是不断下降,当回火温度超过

610 °C 时强度只有 790 MPa,综合研究发现在 600 °C 附近回火时试验钢强韧性匹配良好。

2.2 回火过程中组织演变规律

图 2 为试验钢淬火态的组织。由 TEM 可知,淬火态的组织主要为高位错密度的板条马氏体组织,并且在板条边界含有少量的薄膜状的残余奥氏体组织。

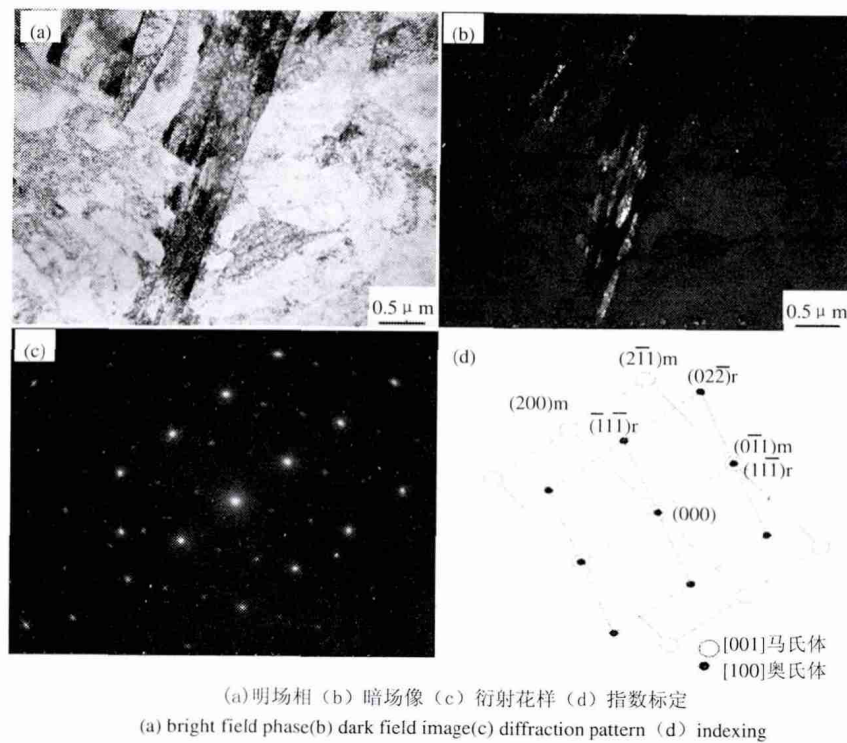


图 2 试验钢的淬火态组织及残余奥氏体组织
 Fig. 2 Microstructures under quenching state and residual austenite of the tested steel

图 3 为试验钢经不同回火温度下的 SEM 组织照片。图 3(a) 显示试验钢经 500 °C 回火后的组织为回火马氏体 板条束边界模糊 有大量的针状、圆球状颗粒析出 其尺寸较大 研究表明析出物为合金渗碳体。随着回火温度的升高 渗碳体回溶 基体得到净化。图 3(c) 表明随着回火温度的升高 马氏体板条束回复愈加充分 板条界面经原子间相互扩散、聚集、合并

和重组 相界面变得模糊 亚结构更加粗化 同时发现在板条束的边界有数量不等的白色颗粒状组织 沈俊昶^[3]等研究认为该类组织为少量的逆转变奥氏体 + 二次马氏体。采用 TEM 对 600 °C 回火的组织进行进一步研究 结果如图 4 所示 可以看到少量岛状或长条状的逆转变奥氏体生成 分布于板条马氏体边界处 且与基体也遵从 K-S 位相关系。

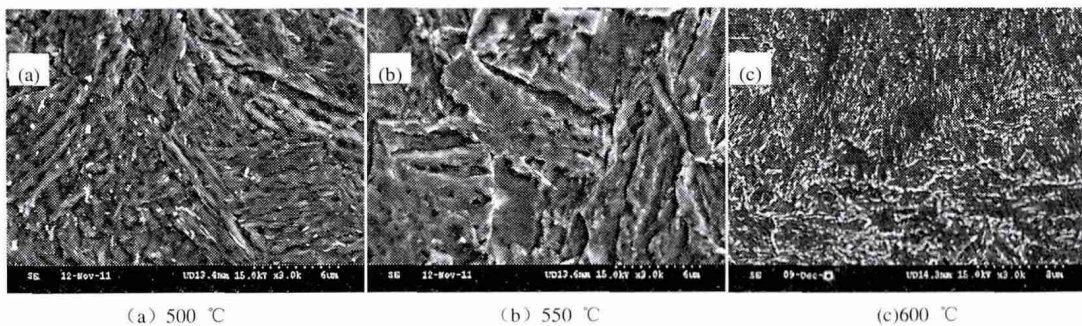
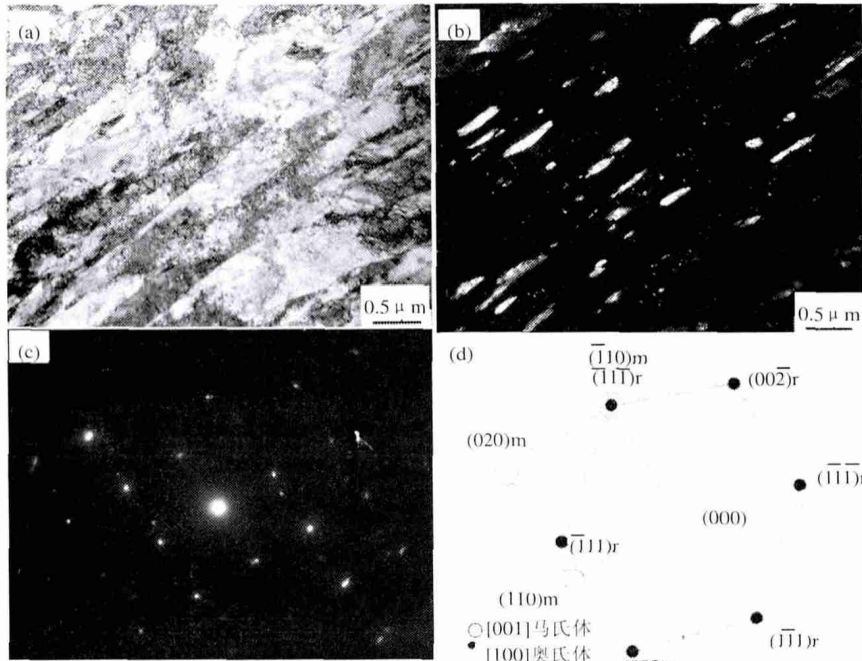


图 3 试验钢不同回火温度下的 SEM 组织
 Fig. 3 SEM microstructure of the tested steel under different tempering temperature

2.3 逆转变奥氏体含量

图 5 为不同回火温度下的逆转变奥氏体含量，由图 5 可知试验钢经 QT 热处理 逆转变奥氏体的含量随着回火温度的升高而增加。在 500 ~ 550 °C

回火范围内 逆转变奥氏体的含量几乎没有变化。从 590 °C 开始上升 在 630 °C 时达到最高。钢的低温冲击功变化(见图 1) 显示 从 590 °C 冲击功明显升高 这有可能与逆转变奥氏体的变化有关。



(a) 明场相 (b) 暗场像 (c) 衍射花样 (d) 指数标定
 (a) bright field phase (b) dark field image (c) diffraction pattern (d) indexing

图 4 试验钢 600 °C 回火后的 TEM 及逆转变奥氏体

Fig. 4 TEM pictures of microstructures of the tested steel tempered under 600 °C

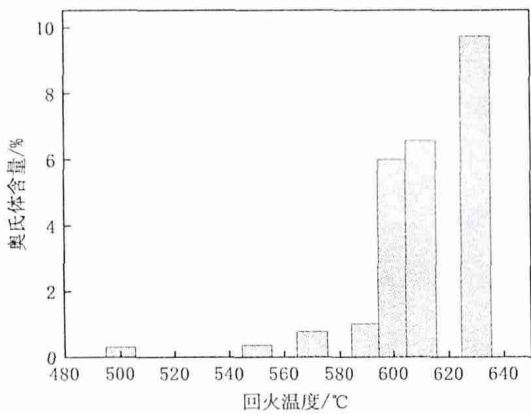


图 5 不同回火温度下逆转变奥氏体的含量

Fig. 5 The content of reverted austenite under different tempering temperature

3 讨论与分析

上述结果表明,试验钢在 600 °C 回火时,强度得到了突破,达到 1 040 MPa,同时又具有良好的低温韧性。这与钢的微观组织结构、逆转变奥氏体的形成以及第二相的强化密切相关。

本试验钢 600 °C 回火后的组织为二次马氏体 + 铁素体 + 逆转变奥氏体。当回火温度接近奥氏体相变点时,由于元素分布的不均匀性,板条束边界已部

分开始奥氏体化,在随后的空冷过程中形成了马氏体组织,由于回火过程中形成的马氏体组织富含合金元素,与淬火态不同,故称“二次马氏体”,二次马氏体的形成,分割并细化了基体,造成裂纹尖端钝化和受阻,改善了冲击韧性^[4]。与此同时,由于二次马氏体板条及其边界合金元素的富集,部分区域温度超过临界点,从而使奥氏体保持到室温,称“逆转变奥氏体”,逆转变奥氏体是通过收溶基体中的 C、N 间隙原子及 Ni、Mn 等合金元素使自身稳定,上述原子的扩散程度、对逆转变奥氏体的析出、稳定化以及对试验钢的低温韧性都有很大的影响^[5-6]。

在透射电镜观察回火组织发现,组织上分布着大小不同的纳米级颗粒。在高分辨率下对第二相粒子进行能谱分析,析出粒子的形貌及能谱见图 6。由图 6 可知,析出的第二相粒子形态各异、大小不一,平均尺寸约为 15 nm,析出物多为 Mo、Cr、V 的复合碳化物。由于析出粒子较小,无法进行衍射斑点的标定,单凭能谱无法确定其化学式。

有关 Mo、Cr、V 在二次硬化钢中多有研究,二次硬化钢在时效过程中,将出现硬度上升或降低缓慢的现象。本试验中,550 °C 回火时,屈服强度非但没有因为渗碳体的回溶而降低,反而有所提高,出现了二

次硬化高峰。回火温度超过 600 °C 时抗拉强度和屈服强度急剧下降,出现了过时效;另一方面奥氏体的硬度远低于马氏体,故逆转变奥氏体的增加也是强度下降迅速的原因。研究认为,在高强钢中出现二次硬化的现象主要是由于 Mo_2C 析出造成的,其在钢中的形成有两种方式,一是 Fe_3C 分解碎化,细小的 Fe_3C 被 M_2C 所代替;其二是 M_2C 从马氏体板条中直接析

出,即通过组织中碳的浓度起伏,钼和铬等合金元素在碳含量较高处直接形成与基体共格的 M_2C ,引起晶格畸变^[7]。Lee 等利用原子探针测量了 M_2C 的组分。结果表明碳化物中的金属元素不是单一元素,且金属元素随时效温度和时间而变化。弥散分布的纳米级析出相阻碍的位错的运动,产生强化作用,使钢在回火过程中强度上升或下降缓慢。

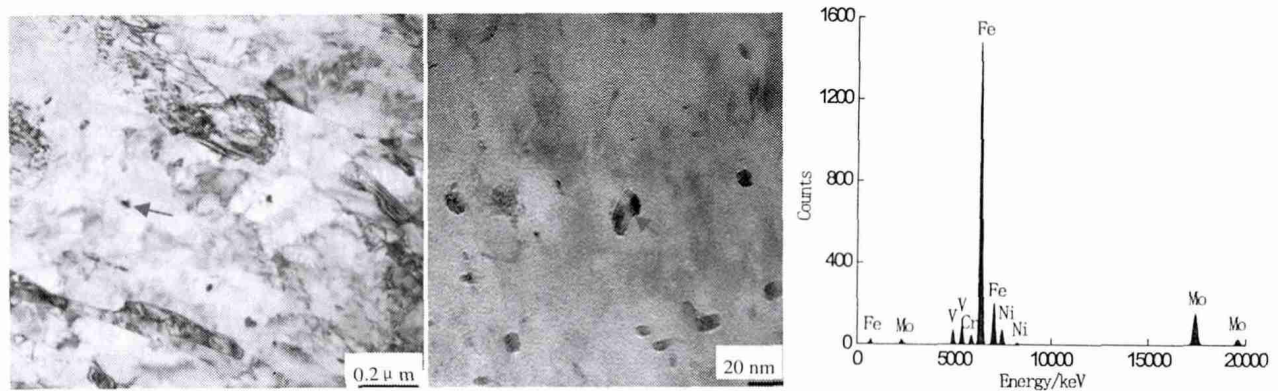


图 6 第二相的析出形貌及能谱分析

Fig. 6 The image of the second - phase particle and its energy spectrum analysis

4 结论

1) 回火过程中组织演变为板条马氏体和位错亚结构的回复,逆转变奥氏体的形成及再结晶软化过程;另一方面为渗碳体的回溶、二次马氏体的形成及第二相的析出强化。

2) 9NiCrMo 属于高纯细晶钢,细化的板条马氏体是其获得高强韧性的基础;又由于第二相的弥散均匀分布,使强度下降缓慢。适量的逆转变奥氏体对低温韧性提高起有利作用。多种因素的综合作用使 9NiCrMo 具有较高的强度和良好的低温韧性。

参考文献

- [1] Thomas G A, Speer J G, Matlock D K. Considerations in the application of the "quenching and partitioning" concept to hot rolled AHSS production [J]. *Iron and Steel Technology* 2008, 5(10): 209 - 217.
- [2] Wang X D, Zhong N, Rong Y H, et al. Novel ultrahigh - strength nanolath martensitic steel by quenching - partitioning - tempering process [J]. *Journal of Materials Research* 2009, 24: 260 - 267.
- [3] Shen Junchang. Research on strengthening heat treatment process for high - strength and toughness Ni-Cr-Mo steel [D]. Beijing: Iron and Steel Research Institute 2007. (沈俊昶. Ni-Cr-Mo 系高强度高韧性钢强韧化热处理工艺的研究 [D]. 北京: 钢铁研究总院. 2007.)
- [4] Liu Yanming, Shi Kai, Zhou Yong, et al. Heat treatment and low temperature toughness of 9Ni steel [J]. *Hot Working Technology* 2007, 36(16): 77 - 80. (刘彦明, 石凯, 周勇, 等. 9Ni 钢的热处理及低温韧性 [J]. *热加工工艺* 2007, 36(16): 77 - 80.)
- [5] Zhang Futian, Wang Jingyun, Guo Yunyi, et al. On the relationship between return austenite and toughness for Ni9 steel at cryogenic temperatures [J]. *Acta Metallurgica Sinica*, 1984, 20(6): 405 - 410. (张弗天, 王景轍, 郭蕴宜, 等. Ni9 钢中的回转变奥氏体与低温韧性 [J]. *金属学报*, 1984, 20(6): 405 - 410.)
- [6] Li Shiyang, Liu Tianzuo, Li Gang. A study of transformation of retained austenite under cryogenic conditions [J]. *Materials Review* 2003, 17(8): 80 - 81. (李士燕, 刘天佐, 李钢. 在深冷条件下残余奥氏体转变的研究 [J]. *材料导报* 2003, 17(8): 80 - 81.)
- [7] Wang Xiangrong. Microstructure and mechanical properties of hot - deformed and heat - treated AerMet100 steel and its first - principles characterization [D]. Harbin: Harbin Institute of Technology 2009. (汪向荣. AerMet100 钢热变形行为与热处理组织性能及其第一性原理表征 [D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学 2009.)

编辑 余文华