

· XXXX ·



21Cr12MoV 马氏体耐热钢热处理工艺对力学性能的影响

张晓宇^{1,2}, 苏瑞平^{1,2}, 丁毅^{1,2}

(1 宝武特种冶金有限公司, 上海 200940; 2 核电关键材料全国重点实验室, 上海 200940)

摘要:为了系统研究淬火与回火温度对 21Cr12MoV 马氏体耐热不锈钢力学性能的影响, 通过不同热处理工艺制备 21Cr12MoV 不锈钢试样, 并进行拉伸、硬度、冲击试验以及金相与断口分析。结果表明: 淬火温度在 1 050 °C 时材料拉伸和冲击性能最优, 抗拉强度为 973 MPa, 冲击功为 37.6 J。随着回火温度的增加, 材料的强度和硬度会逐渐降低, 而冲击韧性会逐渐提高。为了使材料达到最佳强韧性匹配, 产品综合性能达到最佳, 其推荐调质热处理工艺淬火温度为 1 050 °C, 回火温度为 680 °C。

关键词: 21Cr12MoV 钢; 马氏体耐热钢; 热处理工艺; 力学性能

DOI: 10. 20057/j. 1003-8620. N260044 **中图分类号:** TG161

Effect of Heat Treatment Process on Mechanical Properties of 21Cr12MoV Martensitic Heat-Resistant Steel

Zhang Xiaoyu^{1,2}, Su Ruiping^{1,2}, Ding Yi^{1,2}

(1 Baowu Special Metallurgical Co., Ltd., Shanghai 200940, China;

2 State Key Laboratory of Materials for Advanced Nuclear Energy, Shanghai 200940, China)

Abstract: In order to systematically study the effect of quenching and tempering temperature on the mechanical properties of 21Cr12MoV martensitic heat-resistant stainless steel, specimens of the steel were prepared using various heat treatment processes. Subsequently, tensile tests, hardness tests, impact tests, as well as metallographic and fracture surface analyses were conducted. The results show that the tensile and impact properties of the material are optimal when the quenching temperature is 1 050 °C. The tensile strength is 973 MPa, and the impact energy is 37.6 J. As the tempering temperature increases, the strength and hardness of the material gradually decrease, while the impact toughness gradually increases. To achieve the optimal strength - toughness balance and the best overall performance of the product, the recommended heat treatment process consists of a quenching temperature of 1 050 °C and a tempering temperature of 680 °C.

Key Words: 21Cr12MoV Steel; Martensitic Heat-Resistant Steel; Heat Treatment Process; Mechanical Properties

Cr13 型不锈钢是汽轮机叶片部件的常用材料, 21Cr12MoV 钢是在 Cr13 型基础上通过合金化发展而来的一种改进材料^[1]。其中, 添加 Mo 固溶于基体中, 提高材料强度; 在高温环境下, Mo 能抑制晶界滑移和原子扩散, 使材料在长期高温载荷下保持稳定; 同时加入 V 元素, 可与 C 结合形成细小弥散的 VC 或 V(C, N) 析出相, 通过钉扎位错和阻碍晶界迁移, 提高材料的强度和硬度^[2-4]。

纪显彬等^[5]对 Cr13 马氏体不锈钢热处理后的组织和硬度进行了研究, 发现随着淬火温度的升高, 马氏体含量增多, 硬度升高。刘睿等^[6]对 2Cr13 不锈钢淬火后组织和力学性能进行研究, 发现随着

淬火温度在 920 °C 时, 硬度达到最大值。孙朝远等^[7]对 X22CrMoV12-1 不锈钢回火后组织和力学性能进行研究, 发现回火温度是调控强度和韧性最显著的因素, 回火温度越低, 强度越高。

21Cr12MoV 是一种马氏体耐热不锈钢, 这类不锈钢材料可以通过热处理工艺进行强化, 调质处理后材料强度、硬度和韧性可通过调整回火温度在较大范围内调控, 以满足不同使用性能的要求^[8-10]。不同热处理工艺会导致材料显微组织不同, 进而影响其力学性能^[11-13]。因此, 研究 21Cr12MoV 不锈钢的热处理制度对显微组织和力学性能的影响对实际生产具有重要意义。

作者简介: 张晓宇(1998—), 男, 硕士, 助理工程师; **E-mail:** 790173@baosteel.com; **收稿日期:** 2026-03-19

Editorial Office of Special Steel. OA under CC BY-NC-ND 4.0

1 试验材料与试验方案

1.1 试验材料

本试验所采用试验料为退火态 21Cr12MoV 不锈钢棒材,成品规格为 $\phi 110$ mm,其生产工艺为:50 t 电弧炉冶炼→电渣重熔→锻造成材→退火处理,其化学成分见表 1。

表 1 21Cr12MoV 不锈钢化学成分(质量分数)

Table 1 Chemical composition of 21Cr12MoV stainless steel								
%								
C	Si	Mn	P	S	Cr	Ni	Mo	V
0.22	0.30	0.60	0.010	0.001	12.00	0.60	1.00	0.30

1.2 试验方案

为了研究不同热处理工艺对材料力学性能的影响,将热处理后的材料加工成标准力学测试试样,分别进行拉伸、硬度和夏比 V 型缺口冲击试验。其中,拉伸测试检测标准采用 ISO 6892-1:2019,检测设备为 ETM305E 电子式万能试验机;硬度测试检测标准采用 ISO 6506-1:2005,检测设备为 BH3000 硬度计,冲击测试检测标准采用为 ISO 148-1:2010,检测设备为 450MPX 冲击试验机;金相检测设备为 Axio imager.A2m;扫描电镜检测设备为 ZEISS Evo10。本试验所采用热处理工艺参数见表 2。

2 热处理工艺对性能的影响

2.1 淬火温度对力学性能的影响

为研究不同淬火温度对 21Cr12MoV 不锈钢力学性能的影响,按表 2 热处理工艺,将回火温度固定为 680 °C,采用从 1 010 °C 到 1 090 °C 不同淬火温度进行试验。淬火温度与强度、硬度及冲击韧性的关系如图 1 所示。

如图 1 所示,不同淬火温度对材料强度影响较

表 2 21Cr12MoV 不锈钢热处理工艺

Table 2 Heat treatment process of 21Cr12MoV stainless steel

工艺	淬火温度/°C	淬火时间/min	淬火冷却方式	回火温度/°C	回火时间/min	回火冷却方式
1#	1 010	30	水冷	680	360	空冷
2#	1 030	30	水冷	680	360	空冷
3#	1 050	30	水冷	680	360	空冷
4#	1 070	30	水冷	680	360	空冷
5#	1 090	30	水冷	680	360	空冷
6#	1 050	30	水冷	640	360	空冷
7#	1 050	30	水冷	660	360	空冷
8#	1 050	30	水冷	700	360	空冷
9#	1 050	30	水冷	720	360	空冷

小,但对硬度和冲击的影响较大。当淬火温度从 1 010 °C 升到 1 050 °C 时,强度与冲击功均呈上升趋势,当淬火温度从 1 050 °C 升到 1 090 °C 时,冲击功呈下降趋势,硬度呈现上升趋势。当淬火温度为 1 050 °C 时,强度和冲击功均达到峰值,此时屈服强度为 801 MPa,抗拉强度为 973 MPa,冲击功为 37.6 J。

2.2 回火温度对力学性能的影响

为研究不同回火温度对 21Cr12MoV 不锈钢力学性能的影响,基于前期研究结果,当淬火温度为 1 050 °C 时,材料强度和冲击韧性同时达到最佳值,因此,将淬火温度固定为 1 050 °C,采用从 640 °C 到 720 °C 不同回火温度进行热处理试验,回火温度与强度、硬度及冲击韧性的关系如图 2 所示。

由图 2 可知,不同回火温度对材料强度、硬度和冲击的影响均较大。随着回火温度升高,材料强度和硬度性能降低,冲击性能提高,当回火温度为 720 °C 时,冲击达到最大值,强度和硬度均达到最小值,此时冲击功为 109.8 J,屈服强度为 639 MPa,抗拉强度为 827 MPa,布氏硬度为 254HBW。

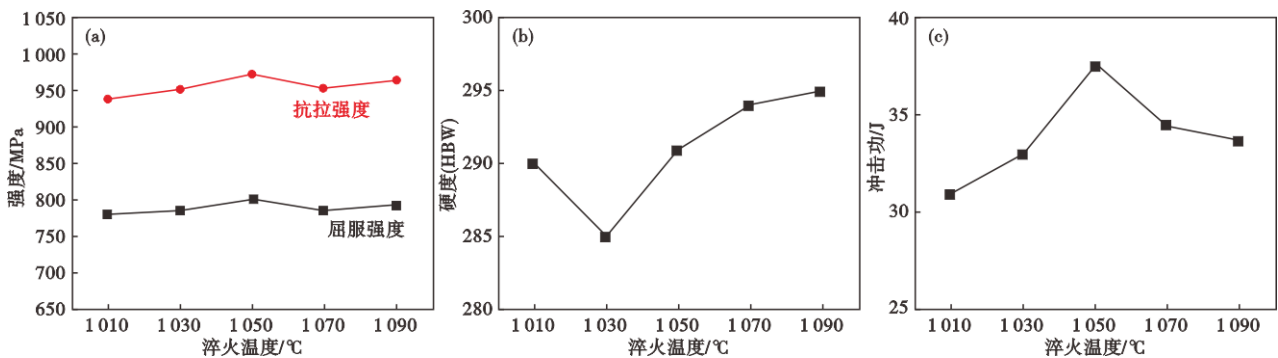


图 1 淬火温度对性能的影响:(a)强度,(b)布氏硬度,(c)冲击功

Fig. 1 Effect of quenching temperature on properties : (a) strength, (b) Brinell hardness, (c) impact energy

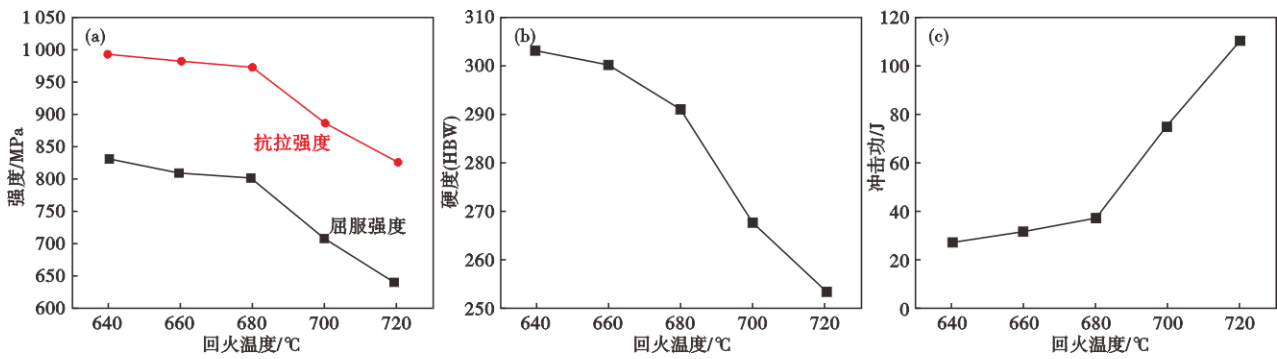


图2 回火温度对性能的影响:(a)强度,(b)布氏硬度,(c)冲击功
Fig. 2 Effect of tempering temperature on properties : (a) strength, (b) Brinell hardness, (c) impact energy

当回火温度从 640 °C 升到 680 °C 时,强度和硬度呈缓慢下降趋势,抗拉强度由 992 MPa 降低到 973 MPa,降低 2%,冲击呈缓慢上升趋势,冲击功由 26.9 J 提升到 37.6 J,提升 40%;当回火温度从 680 °C 升到 720 °C 时,强度和硬度呈快速下降趋势,抗拉强度由 973 MPa 降低到 827 MPa,降低 15%,冲击功呈快速上升趋势,冲击功由 37.6 J 跃升至 109.8 J,提升 192%。选择 680 °C 作为回火温度时,最终材料的强度和韧性综合性能最佳。

综上所述,21Cr12MoV 不锈钢淬火温度选择为 1 050 °C,回火温度选择为 680 °C,材料达到最佳的强韧性匹配。

2.3 回火温度对金相组织的影响

基于上述关于淬火温度和回火温度对

21Cr12MoV 不锈钢性能影响的研究结果表明,相较于淬火温度,回火温度对材料性能的影响更为显著。为此,本研究选取经 1 050 °C 保温 30 min 淬火处理,分别在 640、660、680、700、720 °C 下保温 360 min 回火处理的试样,使用 OM 和 SEM 观测了不同试样的显微组织,经过不同回火工艺处理下的试样金相如图 3 所示。

金相观测表明,经不同温度回火处理后,21Cr12MoV 不锈钢的组织主要由回火马氏体构成,其板条界两侧分布着颗粒状碳化物,且未观察到明显的 δ-铁素体相。扫描电镜观察结果如图 4 所示,碳化物主要呈长条状形貌,尺寸分布在 2~3 μm 范围内。随着回火温度提高,原子的扩散速率增加,碳化物发生粗化,粗大的碳化物会导致对位错的钉扎

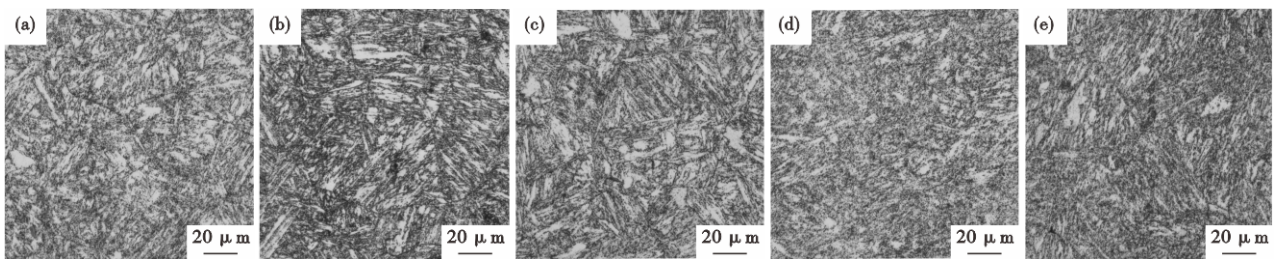


图3 不同回火温度下的显微组织:(a) 640 °C,(b) 660 °C,(c) 680 °C,(d) 700 °C,(e) 720 °C
Fig. 3 Microstructures at different tempering temperatures: (a) 640 °C, (b) 660 °C, (c) 680 °C, (d) 700 °C, (e) 720 °C

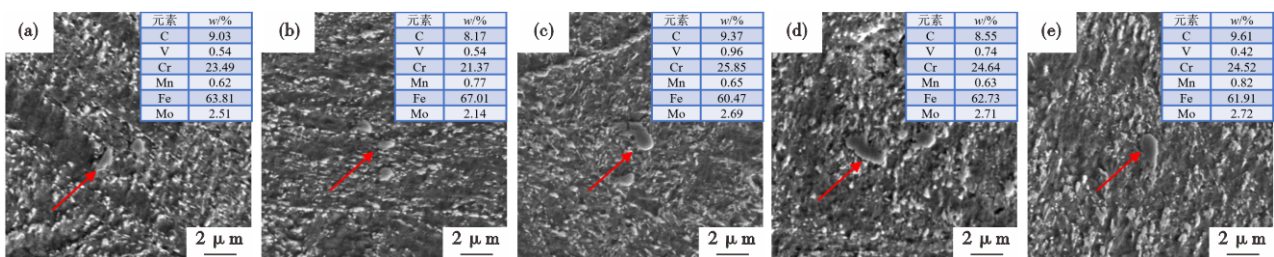


图4 不同回火温度下的碳化物:(a) 640 °C,(b) 660 °C,(c) 680 °C,(d) 700 °C,(e) 720 °C
Fig. 4 Carbides at different tempering temperatures: (a) 640 °C, (b) 660 °C, (c) 680 °C, (d) 700 °C, (e) 720 °C

作用减弱,使得强度降低。

2.4 回火温度对冲击断口形貌的影响

回火温度对 21Cr12MoV 不锈钢冲击功性能具有显著影响。当回火温度由 680 °C 升高至 720 °C 时,材料的冲击吸收功从 25.5 J 显著提升至 114 J。通过体视显微镜和扫描电镜对冲击断口的形貌观察如图 5 所示,随着回火温度升高,表现出更显著的韧性断裂特征。

断口形貌分析显示,21Cr12MoV 不锈钢的冲击断口呈现典型的混合断裂特征,包含两个明显区域:外围暗色粗糙区,表现为韧性断裂特征,可见明显韧窝结构;心部亮色平滑区,表现为脆性断裂特征,具有金属光泽。

图 5(a)(b)(c)三个试样韧性断裂区占比逐渐增大,回火温度分别为 640、660、680 °C,对应平均冲击功分别为 26.9、32、37.6 J,对应韧性区占比分别为 27%、36%、42%,随着回火温度的增大,冲击功小幅增加。图 5 中(d)(e)两个试样韧性区占比与(c)试样相比呈现显著增长,回火温度分别为 700、720 °C,

对应平均冲击功分别为 75.4、109.8 J,对应韧性区占比分别为 72%、80%。随着回火温度的升高,冲击断口韧性区占比不断增加,韧窝也变得越大越深,材料的韧性不断提高。

3 结论

通过系统研究 21Cr12MoV 不锈钢的热处理工艺,获得以下结论:

1) 经调质处理后,21Cr12MoV 不锈钢的典型组织为板条状回火马氏体,其板条界上分布着细小的碳化物。

2) 当淬火温度为 1 010~1 090 °C,回火温度为 680 °C 时,随着淬火温度的增加,21Cr12MoV 不锈钢强度和冲击功先增大后减小。

3) 当淬火温度为 1 050 °C,回火温度为 620~720 °C 时,随着回火温度的增加,21Cr12MoV 不锈钢强度减小,冲击功增大。

4) 21Cr12MoV 不锈钢推荐热处理制度为 1 050 °C 淬火,680 °C 回火,材料达到最佳的强韧性匹配,抗拉强度可达 973 MPa,冲击功可达 37.6 J。

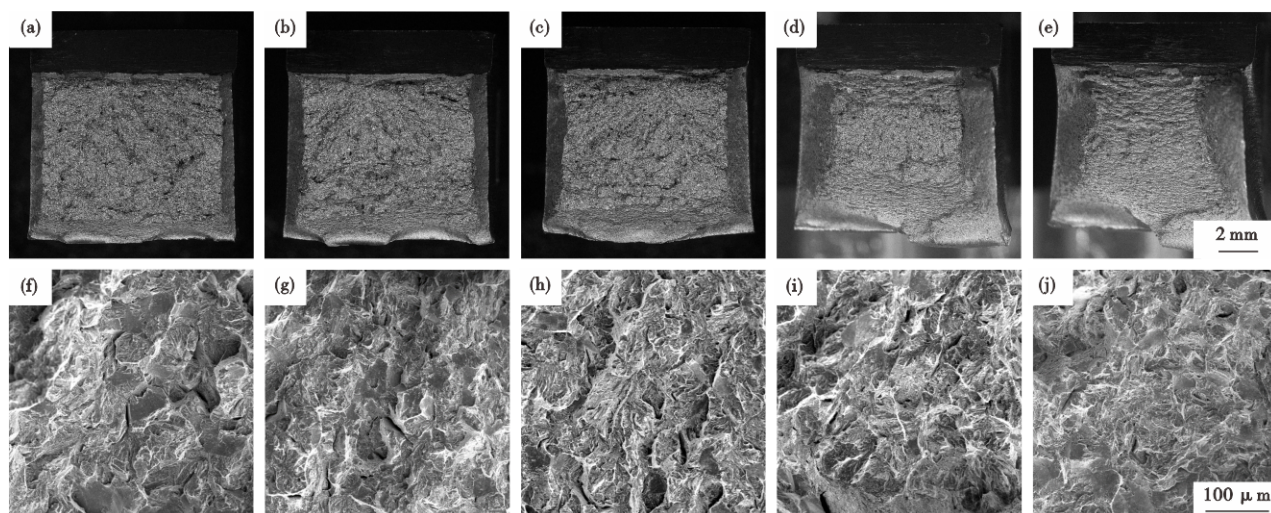


图 5 不同回火温度下的冲击断口形貌:(a) (f) 640 °C, (b) (g) 660 °C, (c) (h) 680 °C, (d) (i) 700 °C, (e) (j) 720 °C
Fig. 5 Impact fractures at different tempering temperatures: (a) (f) 640 °C, (b) (g) 660 °C, (c) (h) 680 °C, (d) (i) 700 °C, (e) (j) 720 °C

参考文献

- [1] 刘新权, 门若男, 孙风军, 等. 热处理工艺对 X22CrMoV12-1 钢组织和性能的影响[J]. 热处理, 2018, 33(3): 34-39.
- [2] 徐文亮, 唐豪清, 孙元宁. 合金元素对 2Cr13 马氏体不锈钢组织及性能的影响[J]. 宝钢技术, 2008, (5): 39-43.
- [3] Park B C, Kim S D, Park I, et al. Microstructure evolution and modelling during tempering heat treatment at 670 °C in 9 - 12 wt. % Cr ferritic/martensitic heat-resistant steel[J]. Metals, 2025, 15(12): 1350.
- [4] He Q, Chen L, Li N, et al. Effect of heat treatment process on microstructure and properties of martensitic stainless steel pipe [J]. Journal of Physics: Conference Series, 2025, 3129(1): 012037.
- [5] 纪显彬, 李具仓, 王建泽, 等. Cr13 马氏体不锈钢热处理后的显微组织和硬度[J]. 金属热处理, 2016, 41(6): 93-96.
- [6] 刘 睿, 孙彦辉. 淬火工艺对 2Cr13 不锈钢组织和力学性能的

- 影响[J]. 现代交通与冶金材料, 2023, 3(2): 85-89.
- [7] 孙朝远, 郭鸿镇, 程立维, 等. X22CrMoV12-1 马氏体不锈钢高温形变热处理工艺研究[J]. 热加工工艺, 2012, 41(6): 116-118.
- [8] 李毅, 赵永庆, 曾卫东, 等. 热处理工艺对2Cr13不锈钢组织与性能的影响[J]. 铸造, 2022, 71(11): 1364-1367.
- [9] 杨恩超, 刘新权, 尹林, 等. 热处理工艺对透平叶片用X20Cr13钢显微组织和力学性能的影响[J]. 热处理, 2022, 37(2): 15-18.
- [10] 白亚冠, 聂义宏, 杨晓禹, 等. 固溶处理温度及冷却方式对Ni-Cr-Mo-Co耐热合金组织与性能的影响[J]. 特殊钢, 2025, 46(4): 150-156.
- [11] 孙迪, 杨立新, 韩秀秀. 20Cr13钢棒材的热处理工艺和力学性能[J]. 热处理, 2025, 40(2): 38-40.
- [12] 张迎春. 热处理工艺对低碳Cr13型马氏体不锈钢组织及性能的影响[J]. 热处理技术与装备, 2024, 45(4): 49-51+61.
- [13] 李红梅, 霍洁, 李晓, 等. 9Cr马氏体耐热钢的锻后热处理工艺[J]. 特殊钢, 2025, 46(4): 135-140.