

加热与热处理

## II 型 30CrMnSiA 钢回火脆性研究

黄有华<sup>1</sup>, 艾永平<sup>2</sup>

(1. 江西机电职业技术学院 机械工程学院, 江西 南昌 330006; 2. 井冈山大学 机电工程学院机械系, 江西 吉安 343009)

**摘要:** 为解决 II 型 30CrMnSiA 钢容易产生回火脆性, 导致冲击韧性降低进而引发疲劳断裂事故的问题, 对 II 型 30CrMnSiA 钢在不同温度和冷却介质下进行了淬火和回火处理, 分析了 II 型 30CrMnSiA 钢回火后的力学性能和微观结构, 研究了回火脆性与回火冷却速率的关系。结果表明: II 型 30CrMnSiA 钢基体中的碳化物在晶界和晶粒内分散分布, 650 °C 回火后的硬度较 510 °C 回火后的硬度显著降低; 510 °C 回火属于钢的脆性段, 回火后产生的脆性与回火冷却速率无关, 在此温度下无论是快冷还是慢冷均会产生回火脆性, 应尽量避免在此温度下回火; 在相同的回火温度下, 快速冷却比缓慢冷却的硬度高, 但冲击性能差别不大, 且冲击性能主要受回火温度的影响。

**关键词:** 合金结构钢; 回火脆性; 冷却速率; 冲击韧性; 力学性能

**DOI:** 10.13330/j.issn.1000-3940.2024.12.020

**中图分类号:** TB31

**文献标志码:** A

**文章编号:** 1000-3940 (2024) 12-0162-04

## Study on temper brittleness for 30CrMnSiA steel of type II

Huang Youhua<sup>1</sup>, Ai Yongping<sup>2</sup>

(1. College of Mechanical Engineering, Jiangxi Vocational and Technical College of Mechanical and Electrical Engineering, Nanchang 330006, China; 2. College of Mechanical and Electrical Engineering, Jinggangshan University, Ji'an 343009, China)

**Abstract:** In order to solve the problem of 30CrMnSiA steel of type II being prone to temper brittleness, which leads to a decrease in impact toughness and subsequently caused fatigue fracture accidents, the quenching and tempering treatments of 30CrMnSiA steel of type II were carried out at different temperatures and cooling media, and the mechanical properties and microstructure of 30CrMnSiA steel of type II after tempering were analyzed. Then, the relationship between tempering brittleness and tempering cooling rate of 30CrMnSiA steel of type II was studied. The results show that carbides in the matrix of 30CrMnSiA steel of type II are dispersedly distributed at grain boundaries and within grains, and the hardness after tempering at 650 °C is significantly reduced compared to that after tempering at 510 °C. Tempering at 510 °C belongs to the brittle section of 30CrMnSiA steel of type II. The brittleness generated after tempering is independent of the cooling rate of tempering. At this temperature, whether it is fast cooling or slow cooling, tempering brittleness occurs, and tempering at this temperature should be avoided as much as possible. At the same temperature of tempering, the hardness of rapid cooling is higher than that of slow cooling, but the difference in impact performance is not significant, and the impact performance is mainly affected by the tempering temperature.

**Key words:** alloy structural steel; tempering brittleness; cooling rate; impact toughness; mechanical properties

含铬、锰、硅合金结构钢淬火后, 随着回火温度的升高, 硬度降低、塑性提高, 理论上韧性也应提高, 但在回火后的某些特定温度范围内, 韧性却大大降低。II 型 30CrMnSiA 钢由于具有良好的力学性能、耐硬化性和良好的焊接性能, 广泛应用于造船和航天领域的钢部件, 如起落架、螺栓、对接接头、天窗盖和冷风瓶等, 也用于涡轮喷气压缩机转

子的叶片盘和框箱导刀的制造。II 型 30CrMnSiA 钢属于低合金结构钢。当其在 450~550 °C 下回火时, 容易产生回火脆性, 导致冲击韧性降低, 并发生疲劳断裂事故<sup>[1]</sup>。Yang A J<sup>[2]</sup> 认为脆性相在基体  $\alpha$ -Fe 中的溶解度随浓度的降低而降低。在合金钢中, 镍、铬、锰等合金元素的含量较高, 其在热处理过程中的作用不容忽视<sup>[3-6]</sup>。Guttmann M 等<sup>[7]</sup> 进一步研究了杂质平衡偏析理论, 同时考虑了杂质元素和合金元素的影响, 并提出了二次偏析理论。

目前, 对回火脆性的研究主要集中在预防措施上<sup>[8-16]</sup>。本文对 II 型 30CrMnSi 钢在不同温度和冷却介质下进行了淬火和回火处理, 分析了 II 型

收稿日期: 2024-04-19; 修订日期: 2024-07-16

作者简介: 黄有华 (1973-), 男, 学士, 副教授

E-mail: 284932031@qq.com

通信作者: 艾永平 (1977-), 男, 博士, 教授

E-mail: 27440767@qq.com

30CrMnSiA 钢回火后的力学性能和微观结构,研究了回火脆性与回火冷却速率的关系,为有效防止回火脆性在工业应用中的危害提供了一定的理论和数据支持。

1 试验方法

将金属丝切割后的样品放入电风炉中进行淬火和回火。淬火工艺方案如下:升温至 900 ℃,保温 30 min,油冷却。回火温度分别为 510 和 650 ℃,均保温 60 min,冷却方式为水冷和炉冷。各组样品的热处理过程见表 1。

表 1 II 型 30CrMnSiA 钢的热处理过程

Table 1 Heat treatment processes for 30CrMnSiA steel of type II

组别	热处理工艺
第 1 组	淬火+510 ℃回火、炉冷
第 2 组	淬火+510 ℃回火、水冷
第 3 组	淬火+650 ℃回火、水冷

对经过热处理后的样品进行冲击试验。为了保证数据的准确性,每组样本为 3 个。冲击试验后计算试验数据的平均值作为样品的冲击韧性值。冲击后的试样用于硬度试验,用 5%浓度的硝酸醇溶液(质量比)进行金相蚀刻,腐蚀时间为 15 s。试验采用 ZXcamam1600 光学显微镜和 Nova NanoSEM450 扫描电子显微镜观察 II 型 30CrMnSiA 钢的显微组织,采用 SU1510 扫描电子显微镜观察其断裂形貌。

2 试验结果及分析

2.1 力学性能分析

2.1.1 硬度分析

3 组样品的硬度值如表 2 所示,最终硬度值为样品表面上多个点测试后的平均值。

表 2 II 型 30CrMnSiA 钢的硬度测试结果

Table 2 Hardness test results for 30CrMnSiA steel of type II

组别	硬度/HV
第 1 组	295.89
第 2 组	322.50
第 3 组	244.20

从表 2 可以看出:经过 510 ℃回火后的水冷样品的硬度最高,达到 322.50 HV;510 ℃回火后的炉冷样品的硬度为 295.89 HV;650 ℃回火后的水

冷样品的硬度最低,为 244.20 HV。在相同温度下冷却,冷却速率越大,其硬度越大。当回火冷却方法相同时,回火温度越高,其硬度越低。这是因为随着温度的升高,基体中的碳化物沉淀得更快,从而减少了晶格畸变,碳化物在随后的水冷过程中聚集和生长。同时,当温度升高时,II 型 30CrMnSiA 钢的基体出现高温回复现象,位错密度减小,这两个因素导致了硬度值的降低<sup>[17]</sup>。

2.1.2 影响性能分析

3 组试样的冲击韧性值见表 3。

表 3 II 型 30CrMnSiA 钢的冲击性能试验结果

Table 3 Impact performance test results for 30CrMnSiA steel of type II

组别	冲击性能/(J·cm <sup>-2</sup> )
第 1 组	93.79
第 2 组	85.30
第 3 组	221.8

510 ℃属于 II 型 30CrMnSiA 钢的回火脆性阶段。在此温度下回火,无论使用何种冷却方式,均会产生回火脆性。在冲击韧性试验中,第 3 组样品的热处理方法是在淬火后 650 ℃回火冷却,因为不在回火脆性温度范围内,在此温度范围内快速冷却不会产生回火脆性,测试其冲击韧性高达 221.80 J·cm<sup>-2</sup>,而在 510 ℃回火的样品,由于在回火脆性温度阶段,均产生回火脆性。与在 650 ℃时回火的样品相比,在 510 ℃回火时样品的冲击韧性降低了 50%以上,均产生了回火脆性。这说明在脆性温度范围内产生的回火脆性与回火冷却速率无关,无论是快冷却还是慢冷却,均会在此温度段内产生回火脆性。

2.2 微观结构分析

2.2.1 金相分析和扫描电镜结果

从图 1 和图 2 可以看出,各组样品的微观结构均为回火索氏体、铁素体和碳化物(白色部分)组成。510 ℃回火导致残余马氏体相变,转变为回火索氏体和珠光体,同时碳化物分散在晶界和晶粒中。冷却后,由于回火马氏体易腐蚀,呈黑色,其主要集中在晶界处;但水冷快速冷却后,碳化物溶解于回火索氏体中,不易腐蚀,呈灰色<sup>[18-19]</sup>。从扫描电镜结果(图 2)中可以看出,650 ℃回火的碳化物(白色部分)的尺寸大于 510 ℃回火的两组样品,因此,650 ℃回火后的硬度低于 510 ℃回火后的硬度。

510 ℃回火属于 II 型 30CrMnSiA 钢的回火脆性温度范围,无论是快速冷却还是缓慢冷却,晶界偏

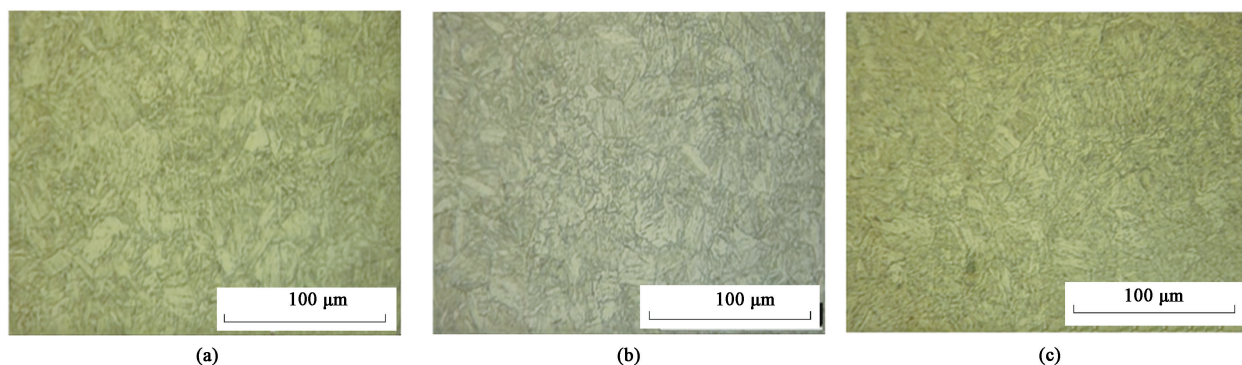


图 1 淬火和回火后的金相组织

(a) 淬火+650 °C 回火, 水冷 (b) 淬火+510 °C 回火, 炉冷 (c) 淬火+510 °C 回火, 水冷

Fig. 1 Metallographic structures after quenching and tempering

(a) Quenching + 650 °C tempering, water cooling (b) Quenching + 510 °C tempering, furnace colling  
(c) Quenching + 510 °C tempering, water cooling

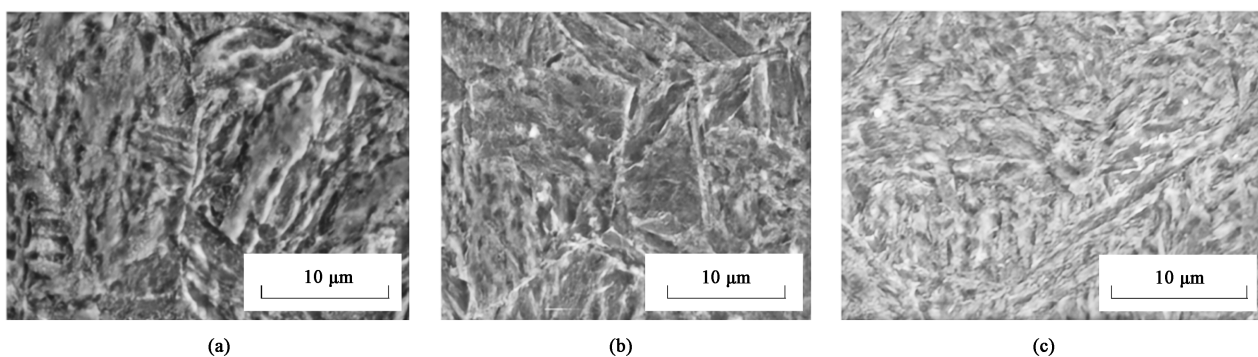


图 2 淬火和回火后的扫描电镜图像

(a) 淬火+650 °C 回火, 水冷 (b) 淬火+510 °C 回火, 炉冷 (c) 淬火+510 °C 回火, 水冷

Fig. 2 SEM images after quenching and tempering

(a) Quenching + 650 °C, water cooling (b) Quenching + 510 °C tempering, furnace cooling  
(c) Quenching + 510 °C tempering, water cooling

析现象均会导致晶界中出现碳化物和杂质元素, 显著降低材料的冲击韧性, 并产生回火脆性。650 °C 回火虽然没有导致回火脆性, 但在此温度下回火会使 II 型 30CrMnSiA 钢的硬度较低, 在实际生产中应考虑上述影响, 选择适当的温度区间进行回火。

### 2.2.2 断裂形态学分析

图 3 分别显示了 3 组样品的冲击断裂显微组织。淬火+回火 (炉冷) 样品的断裂形态为晶间有可见的相对较浅的凹陷, 这是晶界微腔成核和生长连接的结果。淬火+回火 (水冷) 样品的断裂形态为沿晶体表面有许多颗粒和小孔, 这是因为第二相颗粒沿晶界沉淀, 削弱了晶界的强度, 成为裂纹扩展过程中促进裂纹扩展的核心, 从而留下许多痕迹<sup>[20]</sup>。淬火+650 °C 回火 (水冷) 样品的断裂有凹窝形态, 断裂处存在许多不同尺寸的坑, 有些凹窝较深, 说明其韧性较好。

## 3 结论

(1) II 型 30CrMnSiA 钢基质中的碳化物在晶界和晶粒内分散, 650 °C 回火后的硬度较 510 °C 回火后的硬度显著降低。

(2) 510 °C 回火属于 II 型 30CrMnSiA 钢的脆性段, 回火后产生的脆性与回火的冷却速率无关, 在此温度下无论是快冷还是慢冷均会产生回火脆性, 应尽量避免在此温度下回火。

(3) 在相同的回火温度下进行回火后, 快速冷却比缓慢冷却的硬度高, 但冲击性能差别不大, 且冲击性能主要受回火温度的影响。

### 参考文献:

- [1] 李召华, 王春净, 罗湘燕. 30CrMnSiA 钢的最终热处理工艺研究 [J]. 新技术新工艺, 2017 (10): 1-3.  
Li Z H, Wang C J, Luo X Y. Research on the final heat treatment process of 30CrMnSiA steel [J]. New Technology & New Process, 2017 (10): 1-3.



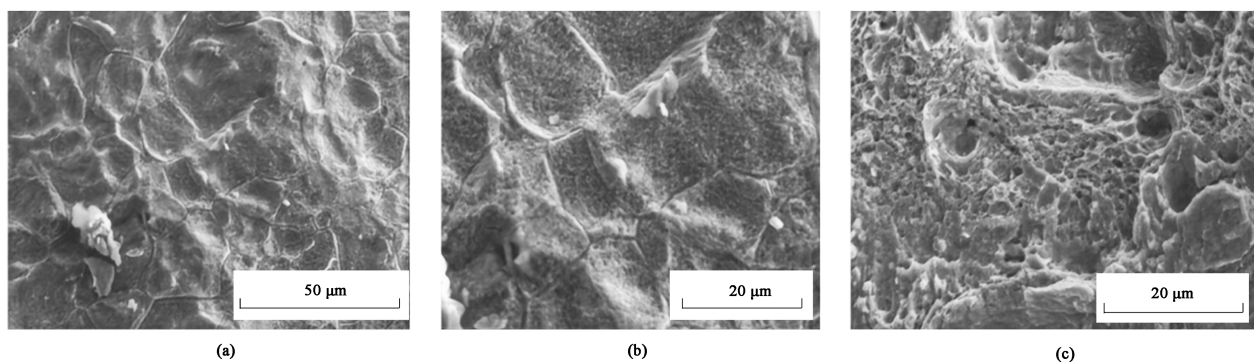


图3 淬火和回火后的冲击断裂显微组织

(a) 淬火+650 °C 回火, 水冷 (b) 淬火+510 °C 回火, 炉冷 (c) 淬火+510 °C 回火, 水冷

Fig. 3 Microstructures of impact fracture after quenching and tempering

(a) Quenching +650 °C tempering, water cooling (b) Quenching +510 °C tempering, furnace cooling

(c) Quenching +510 °C tempering, water cooling

- [2] 杨安静. 钢的高温回火脆性 [J]. 机械工程材料, 1980 (6): 11-15.  
Yang A J. High temperature tempering brittleness of steel [J]. Materials for Mechanical Engineering, 1980 (6): 11-15.
- [3] Olefjord I. Temper embrittlement [J]. Metallurgical Reviews, 1978, 23 (1): 149-163.
- [4] 凌纯, 姚智颖. 结构钢的回火脆性综述 [J]. 热加工工艺, 2018, 47 (2): 11-14.  
Ling C, Yao Z Y. Review on tempering brittleness of structural steel [J]. Hot Working Technology, 2018, 47 (2): 11-14.
- [5] 孙长辉, 王红. 钢的两类回火脆性综述 [J]. 采矿与矿山机械, 2003, 31 (7): 75-78.  
Sun C H, Wang H. Review on two types of tempering brittleness of steel [J]. Mining Machinery, 2003, 31 (7): 75-78.
- [6] Olefjord I, 蒋正行. 回火脆性的研究现状 [J]. 金属热处理, 1980, 23 (10): 43-53, 65-66.  
Olefjord I, Jiang Z X. Research status of temper brittleness [J]. Heat Treatment of Metals, 1980, 23 (10): 43-53, 65-66.
- [7] Guttman M, Dumoulin P, Wayman M. The thermodynamics of interactive co-segregation of phosphorus and alloying elements in iron and temper-brittle steels [J]. Metallurgical Transactions A, 1982, 13 (10): 1693-1711.
- [8] 曹建春, 刘铨霖, 高鹏, 等. 钢中元素偏聚的研究现状及其发展趋势 [J]. 钢铁, 2019, 54 (6): 11-19.  
Cao J C, Liu C L, Gao P, et al. Research status and development trend of element segregation in steel [J]. Iron and Steel, 2019, 54 (6): 11-19.
- [9] 丁志敏, 阎颖, 王淑荣. 30CrMnSiA 钢高温回火脆性的研究 [J]. 热加工工艺, 1998 (4): 3-6.  
Ding Z M, Yan Y, Wang S R. Study on high temperature tempering brittleness of 30CrMnSiA steel [J]. Hot Working Technology, 1998 (4): 3-6.
- [10] 李昶. 合金钢回火脆性机制探讨 [J]. 江汉大学学报 (自然科学版), 1987 (2): 72-76.  
Li C. Discussion on tempering brittleness mechanism of alloy steel [J]. Journal of Jianghan University (Natural Science), 1987 (2): 72-76.
- [11] Nakajima H X, Gao X L, Zhang C X. Temper cooling rate on the influence of chromium steel tempering brittleness [J]. Journal of Weapon Materials Science and Engineering, 1985 (10): 60-66.
- [12] Zhao B J, Wang J Y, Zhao J X, et al. Influence of arsenic and antimony on low temperature tempering brittleness of 30CrMnSiA steel [J]. Ordnance Materials Science and Engineering, 1995 (2): 46-50.
- [13] 路宇. 消除 4Cr9Si2 钢回火脆性的措施 [J]. 热加工技术, 1989 (5): 62-63.  
Lu Y. Measures to eliminate the tempering brittleness of 4Cr9Si2 steel [J]. Hot Working Technology, 1989 (5): 62-63.
- [14] Hafeez M A, Farooq A. Microstructural, mechanical and tribological investigation of 30CrMnSiNi2A ultra-high strength steel under various tempering temperatures [J]. Materials Research Express, 2017, 5 (1): 16505-16515.
- [15] Tikhontseva N T, Sofrygina O A, Yu S, et al. Reversible tempering brittleness of structural steel [J]. Steel in Translation, 2012, 42 (5): 32-41.
- [16] Dong J, Zhou X S, Liu Y C, et al. Carbide precipitation in Nb-V-Ti microalloyed ultra-high strength steel during tempering [J]. Materials Science & Engineering A, 2017, 683: 54-60.
- [17] 吴士恺, 陈伟, 周海铭, 等. 回火温度对 30CrMnSiA 钢力学行为的影响 [J]. 金属热处理, 2019, 44 (2): 163-167.  
Wu Z K, Chen W, Zhou H M, et al. Tempering temperature on the mechanical behavior of 30CrMnSiA steel [J]. Metal Heat Treatment, 2019, 44 (2): 163-167.
- [18] 黄晓琳, 贺跃辉, 张乾坤, 等. 热处理工艺对 18%Cr 马氏体不锈钢组织与力学性能的影响 [J]. 粉末冶金材料科学与工程, 2017, 22 (4): 503-509.  
Huang X L, He Y H, Zhang Q K, et al. Effect of heat treatment on microstructure and mechanical properties of 18%Cr martensitic stainless steel [J]. Materials Science and Engineering of Powder Metallurgy, 2017, 22 (4): 503-509.
- [19] 刘士峰. 钢的晶界马氏体形成与低温回火脆性 [D]. 天津: 河北工业大学, 2009.  
Liu S F. Grain Boundary Martensitic Formation and Low Temperature Tempering Brittleness of Steel [D]. Tianjin: Hebei University of Technology, 2009.
- [20] 马跃新, 周子年. 30CrMnSiA 钢亚温淬火工艺研究 [J]. 热加工工艺, 2009, 38 (8): 151-153.  
Ma Y X, Zhou Z N. Research on the sub temperature quenching process of 30CrMnSiA steel [J]. Hot Working Technology, 2009, 38 (8): 151-153.