

# 亚温淬火对35CrMo钢低温冲击韧性的影响

肖攀, 李鹏辉, 刘恩奇, 王洋, 霍怡龙, 樊湘芳\*

南华大学, 湖南 衡阳

Email: 704870828@qq.com, \*253407971@qq.com

收稿日期: 2021年3月9日; 录用日期: 2021年4月1日; 发布日期: 2021年4月8日

## 摘要

本文主要研究亚温淬火对35CrMo钢低温冲击韧性的影响。经过实验发现, 在35CrMo钢两相区进行加热并淬火, 相较于常规热处理, 能够在保证强度和硬度的情况下, 提高钢种的塑性。同时, 经过亚温淬火处理的35CrMo钢在-50℃下仍能够保持较高的韧性。

## 关键词

亚温淬火, 两相区, 低温冲击韧性

# Effect of Intercritical Quenching on Impact Toughness of 35CrMo Steel at Low Temperature

Pan Xiao, Penghui Li, Enqi Liu, Yang Wang, Yilong Huo, Xiangfang Fan\*

University of South China, Hengyang Hunan

Email: 704870828@qq.com, \*253407971@qq.com

Received: Mar. 9<sup>th</sup>, 2021; accepted: Apr. 1<sup>st</sup>, 2021; published: Apr. 8<sup>th</sup>, 2021

## Abstract

This paper mainly studies the effect of intercritical quenching on impact toughness of 35CrMo steel at low temperature. It is found that heating and quenching in the two-phase region of 35CrMo

\*通讯作者。

steel can ensure strength and hardness compared with conventional heat treatment, improving the plasticity. Meanwhile, 35CrMo steel treated by intercritical quenching can still maintain high toughness at  $-50^{\circ}\text{C}$ .

## Keywords

Intercritical Hardening, Two-Phase Region, Low-Temperature Impact Toughness

Copyright © 2021 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

## 1. 引言

35CrMo 钢是一种合金结构钢, 该钢种能够承受冲击、高载荷以及弯扭等, 有较高的静力强度、较高的疲劳强度及良好的冲击韧性等, 因此适用于制造发动机主轴、电动机轴、石油机械中的穿孔器等。本文研究 35CrMo 钢制作的石油钻具, 钻具工作时, 钻管需要传递转矩及承受本身的重力和钻头破碎井底岩石产生的压力, 还会受到洗井液的冲刷, 综合受力情况较为复杂。同时, 由于开采石油的场所空间跨度大, 我国北方寒冷地带的石油资源丰富, 因此要求钻具用管在低温时不仅具有良好的静力强度, 还需要具备较高的低温冲击韧性, 这样才能有效防止钻管失效。常规的热处理是对 35CrMo 钢进行调质处理, 这种方式得到的 35CrMo 钢的低温冲击韧性无法在低温下使用, 因此研究一种新型的热处理方式对该钢种力学性能的提高及我国石油开采有着重要的意义。同时本课题立足于解决实际生产问题, 与当地的钢管厂合作并取得了相关的研究支持。

## 2. 材料制备及实验设备

### 2.1. 材料

原始钢样为钢管厂提供的轧制态的 35CrMo 钢, 原始组织为铁素体和珠光体。该钢种的临界温度  $Ac_1 = 750^{\circ}\text{C}$ ,  $Ac_3 = 800^{\circ}\text{C}$ ,  $Ms = 370^{\circ}\text{C}$  [1]。化学成分如表 1 所示。

**Table 1.** wt% of chemical compositions of material

**表 1.** 材料的化学成分 wt%

C	Mo	Mn	Cr	Ni	S	P	Si	Cu	Nb	Al
0.33	0.16	0.53	0.84	0.023	0.002	0.018	0.21	0.05	0.007	0.010

### 2.2. 试样的制备

原始板材尺寸为  $240\text{ mm} \times 125\text{ mm} \times 20\text{ mm}$ , 通过线切割加工成小块后再机加工成为  $L_0 = 100\text{ mm}$ ,  $d_0 = 10\text{ mm}$  的拉伸试样,  $55\text{ mm} \times 10\text{ mm} \times 10\text{ mm}$  的冲击试样(V 型缺口的长方体试样)以及  $d_0 = 10\text{ mm}$ ,  $L_0 = 30\text{ mm}$  金相及硬度试样。

### 2.3. 实验设备及耗材

设备: SX2-25-102 智能一体箱式电阻炉、XJP-200 金相显微镜、P-2 抛光机、洛氏硬度计、JBD-30

型冲击试验机、WAW-300 微机控制电液伺服万能试验机、CST-6 冲击试样缺口拉床、CST-50 冲击试样缺口投影仪、CDW-B0 冲击试验仪。

耗材：PAG 水溶性淬火剂、水、各个型号砂纸、浸蚀剂。

### 3. 热处理工艺的选择

35CrMo 钢属于双相钢，主要由铁素体和马氏体组成，其强度和冲击韧性会受到铁素体和马氏体体积分数的影响。一般情况下，当铁素体体积分数增加，马氏体的体积分数会相应减小，相应的强度硬度会下降而冲击韧性会上升[2]。35CrMo 钢的  $Ac_1 = 750^\circ\text{C}$ ， $Ac_3 = 800^\circ\text{C}$ ，在两相区内进行加热有利于铁素体的增加，这样就会相应提高材料的塑性和低温冲击韧性。由于淬火后钢容易产生脆断，因此在淬火后采取高温回火，降低钢种强度和硬度，提高塑韧性。

选取的热处理工艺如表 2 所示。

Table 2. Heat treatment processes

表 2. 热处理工艺

热处理工艺		淬火阶段		回火阶段		
序号	加热温度/ $^\circ\text{C}$	保温时间/min	冷却方式	加热温度/ $^\circ\text{C}$	保温时间/min	冷却方式
1	760	15	PAG 水溶性溶液	570	45	空冷
2	790	15	PAG 水溶性溶液	570	45	空冷
3	820	15	PAG 水溶性溶液	570	45	空冷

## 4. 实验结果

### 4.1. 力学性能

力学性能测试结果如表 3 所示，从表中可以看出，在  $760^\circ\text{C}$  亚温淬火 + 高温回火(工艺 1)后的 35CrMo 钢虽然在抗拉强度和硬度指标上较低，比常规热处理(工艺 3)的抗拉强度低 34.3%，硬度低 42.6%，但断面收缩率和在  $-50^\circ\text{C}$  下得到的低温冲击韧性较高，比常规热处理的低温冲击韧性高 60%，断后伸长率也高 62.5%。在  $790^\circ\text{C}$  亚温淬火 + 高温回火后的 35CrMo 钢相比较常规热处理，强度硬度有所降低，比常规热处理的抗拉强度低 17.4%，硬度低 7.6%，而断后伸长率和低温冲击韧性有较大的提高，比常规热处理的低温冲击韧性高 20%，断后伸长率高 17.5%。对比三种热处理工艺，可以看出通过亚温淬火得到的 35CrMo 钢的综合力学性能较好。

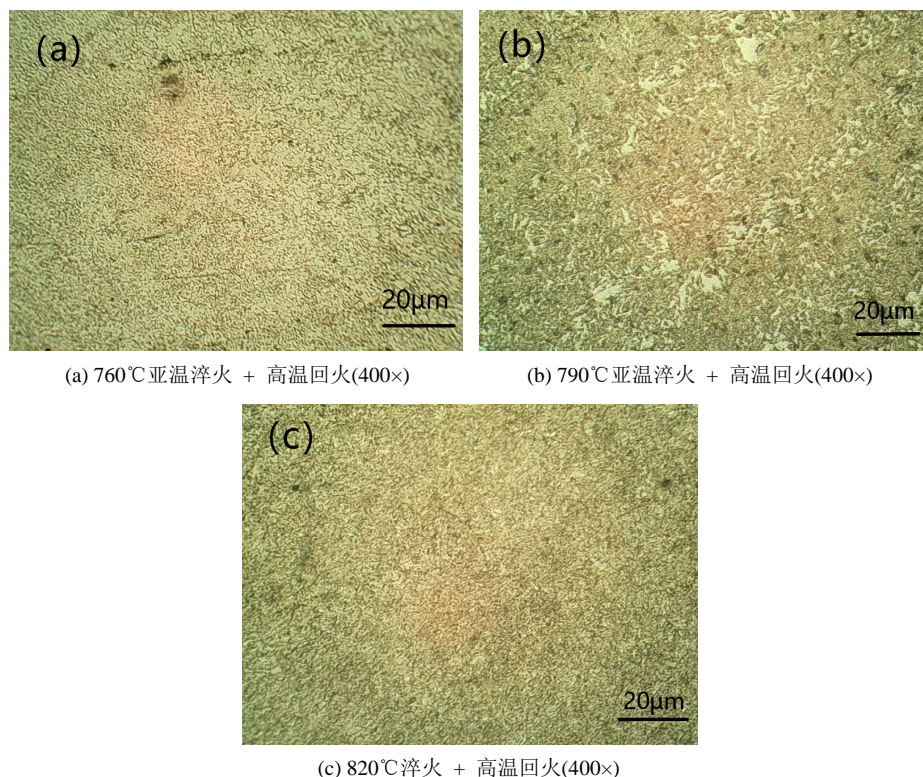
Table 3. Test results for mechanical properties

表 3. 力学性能测试结果

编号	拉伸及硬度试验( $\phi 10\text{ mm}$ 直径圆棒样)				AKV/J (纵向, $10 \times 10\text{ mm}$ , $-50^\circ\text{C}$ )
	Rm/MPa	Rp0.2/MPa	HRC	A/%	
1	741	585	18.7	32.5	135
2	932	810	30.1	23.5	90
3	1128	1040	32.6	20.0	75

### 4.2. 金相组织分析

三种热处理工艺的显微组织形貌如图 1 所示。



**Figure 1.** Microstructures of three heat treatment processes

**图 1.** 三种热处理工艺的显微组织形貌

图 1(a)为 760°C 亚温淬火 + 高温回火的金相组织，主要组织为铁素体和回火索氏体，回火索氏体均匀分布在铁素体基体上。形成该组织的原因是在奥氏体转变过程中，C 浓度高的地方(珠光体区)首先发生奥氏体的转变，但由于受到温度的影响，转变不完全，有大量的未溶铁素体残余，在冷却过程中，马氏体转变主要发生在原珠光体区，可以看到大部分马氏体分布在原珠光体的晶界上，最终马氏体经过高温回火转变成了回火索氏体。由于铁素体的塑性韧性较好，而均匀分布在铁素体基体中的回火索氏体会使得 35CrMo 钢的整体硬度和强度得到提高，但由于该组织的大部分由铁素体组成，因此整体强度和硬度指标较低，但是塑性和低温冲击韧性较高。

图 1(b)为 790°C 亚温淬火 + 高温回火的金相组织，主要组织为回火索氏体和岛状铁素体。由于加热温度的升高，奥氏体化更加充分，所形成的马氏体增加，并且有连结成网状的趋势，但由于未完全奥氏体化，仍然有未溶的铁素体残留，最终马氏体经过回火转变成了回火索氏体。该组织相对于常规热处理得到的组织硬度强度指标相差不大，而塑性和低温冲击韧性有较大的提高，这是由于岛状铁素体的存在使得该组织的塑性和低温冲击韧性得以提高[3]。

图 1(c)为 820°C 淬火 + 高温回火的金相组织，主要为回火索氏体组织，由于加热时完全奥氏体化，因此得到的组织为回火索氏体和少量的残余奥氏体。该组织的强度和硬度值较高，塑性和低温冲击韧性较低。

## 5. 讨论

### 5.1. 亚温淬火对强度硬度的影响机制

相较于常规热处理，在双相区内进行加热的亚温淬火的强度和硬度有所下降。这是由于常规热处理

得到的是回火索氏体,回火索氏体的强度较高。而 760℃亚温淬火 + 高温回火和 790℃亚温淬火 + 高温回火所得到的组织中含有较多的铁素体,而铁素体强度和硬度较低,造成整体组织强度和硬度较低。另一方面,虽然 790℃亚温淬火 + 高温回火的铁素体虽然较多,但是强度和硬度并未明显下降,这是因为,由于 C 原子的扩散发生得较少,因此淬火后得到的马氏体碳含量较高,由此转变成的回火索氏体的硬度也较高。同时,在加热时,部分铁素体也转变成了奥氏体,虽然这部分奥氏体的 C 含量较低,到通过冷却之后得到的马氏体的硬度也较高,因此也提高了亚温淬火所得的组织的硬度[4]。

晶粒度的大小也是影响组织强度和硬度的重要因素,由于加热温度较低,奥氏体晶粒长大的趋势较小,因此奥氏体化形成的奥氏体晶粒较细,避免了奥氏体的粗大,因此组织的强度和硬度并未明显降低。

## 5.2. 亚温淬火对低温冲击韧性的影响机制

在淬火时随着淬火温度的升高,奥氏体晶粒也会相应随之长大,因此淬火马氏体的晶粒粗大并且脆裂倾向增大[5]。亚温淬火的加热温度较低,晶粒较细,所以亚温淬火后的组织低温冲击韧性较高。

亚温淬火时残余的铁素体也是影响 35CrMo 钢低温冲击韧性的重要因素。在淬火时,奥氏体会迅速转变成马氏体,这时,由于转变的速度过快,因此会形成大量的显微裂纹。但是,由于亚温淬火时有许多的铁素体残余,在马氏体切变时,铁素体的存在可以使马氏体相变得到缓冲,因此,由切边所产生应力会大幅减小,与此同时,产生的显微裂纹也会大幅度减少。显微缺陷的减少,使得脆断源减少,因此低温冲击韧性得以提高。

## 6. 结论

1) 轧制态的 35CrMo 钢在经过常规热处理后所得组织强度硬度较高,但是塑性和低温冲击韧性较低。而通过亚温淬火能够得到含有未溶铁素体的组织,可提高 35CrMo 钢的塑性和低温冲击韧性。

2) 经过 790℃亚温淬火 + 高温回火处理的 35CrMo 钢具有最佳的综合力学性能。因此,采用亚温淬火时,若要获得较高的强度硬度以及良好的塑韧性,淬火时的加热温度不宜过低,应选取临界温度  $A_{c1}$  以下 10℃~20℃作为加热温度。

## 基金项目

国家级大学生创新创业项目 S202010555002。

## 参考文献

- [1] 冯唯伟,张彩红,于海涛,杨志洪. 亚温处理对 35CrMoA 钢组织性能的影响[J]. 一重技术, 2020(6): 63-66+16.
- [2] 徐芳芳. 35CrMo 截齿材料热处理工艺优化研究[D]: [硕士学位论文]. 西安: 西安工业大学, 2018.
- [3] Dulucheanu, C., Severin, T., Potorac, A. and Irimescu, L. (2019) Influence of Intercritical Quenching on the Structure and Mechanical Properties of a Dual-Phase Steel with Low Manganese Content. *Materials Today: Proceedings*, **19**, 941-948. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2019.08.005>
- [4] 郑花,胡锋,柯睿,吴开明. 临界热处理对中碳 Q&P 钢组织与性能的影响[J]. 钢铁研究学报, 2021, 33(1): 46-55.
- [5] 丰小冬,井溢农,郭兆成. 石油套管开裂原因分析与对策[J]. 包钢科技, 2008, 34(S1): 21-23.