

# 抽油杆用圆钢 30CrMoA 调质热处理工艺研究

张晓晨, 赵美英, 史文义, 惠治国, 赵晓敏, 李学东, 刘丽娟

(内蒙古包钢钢联股份有限公司技术中心, 内蒙古 包头 014010)

**摘 要:** 文章研究了不同调质热处理工艺对 30CrMoA 抽油杆用圆钢显微组织和力学性能的影响。针对 30CrMoA 钢的实际应用要求, 通过调节淬火温度和回火温度, 优化热处理工艺, 以提高材料的强度和韧性。试验结果表明, 适当的调质处理能显著提高材料的屈服强度、抗拉强度、屈强比和冲击功, 尤其在 850 °C 淬火(水冷) + 540 °C 回火(水冷)条件下, 30CrMoA 抽油杆用圆钢表现出最佳的综合机械性能, 具有良好的强度和韧性。金相分析显示调质后的显微组织主要由回火索氏体组成, 结构稳定。

**关键词:** 调质热处理工艺; 30CrMoA; 抽油杆用圆钢; 显微组织; 力学性能

中图分类号: TG142.1

文献标识码: B

文章编号: 1009-5438(2025)01-0076-05

## Study on Quenched – tempered Heat Treatment Process of Round Steel 30CrMoA for Sucker Rods

Zhang Xiaochen, Zhao Meiyong, Shi Wenyi, Hui Zhiguo,  
Zhao Xiaomin, Li Xuedong, Liu Lijuan

(Technical Center of Inner Mongolia Baotou Steel Union Co., Ltd., Baotou 014010,  
Inner Mongolia Autonomous Region, China)

**Abstract:** In this paper, the effects of different quenched – tempered heat treatment processes on the microstructure and mechanical properties of 30CrMoA round steel for sucker rod are studied. The strength and toughness of the material are improved by adjusting the quenching and tempering temperatures as well as optimizing heat treatment process aiming at the actual application requirements of 30CrMoA steel. The experimental results showed that the yield strength, tensile strength, yield ratio and impact energy of the material could be significantly improved with proper quenching and tempering, especially under the conditions of 850 °C quenching(water cooling) + 540 °C tempering (water cooling), the comprehensive mechanical properties of round steel 30CrMoA for sucker rod were the best, which was with good strength and toughness. The metallographic analysis showed that the quenched and tempered microstructure was mainly composed of tempered sorbite, which was with stable microstructure.

**Key words:** quenched – tempered heat treatment process; 30CrMoA; round steel for sucker rod; microstructure; mechanical property

石油作为现代工业的“血液”, 在人类社会发 展 进程中扮演着不可替代的角色<sup>[1]</sup>。从能源供应角

度看,石油是全球最主要的能源来源之一,为汽车、飞机、轮船等各类交通工具提供动力,保障人员与货物的高效运输。在工业领域,它是众多化工产品的基础原料,从塑料、橡胶到化纤、化肥,石油衍生品几乎渗透到生产、生活的每一个角落,支撑着现代工业体系的运转。在经济层面,石油价格的波动直接影响着全球经济的走势,是各国经济发展的重要风向标。从地缘政治角度看,石油资源分布不均,使其成为影响国际关系和地缘政治格局的关键因素。可以说,石油的稳定供应与合理利用,是维持现代社会正常运转和经济持续发展的根基<sup>[2]</sup>。

在石油开采作业过程中,对于不能自喷的油井,通常采用各种类型的抽油泵把原油从油井中抽出。世界石油工业最传统的采油方式是有杆泵采油法,抽油杆是抽油机井的细长杆件,它上接光杆,下接抽油泵,起到动力传递的作用,作为石油工业的“三抽设备”之一,其原材料抽油杆用钢属于国家“十一五”规划鼓励发展的产品<sup>[3]</sup>。当前油田的现状是稠

油井数量增多,油井开采深度增加,地质条件复杂,开采难度大。一般来说,抽油杆的长度为9 m,油井的深度都在千米以上,数支抽油杆连接在一起形成抽油杆柱,作业中抽油杆在交变载荷的作用下很容易发生断裂和破坏,导致失效。一旦抽油杆失效,不仅影响油井的正常生产,降低生产效率,而且会造成较大的经济损失,因此对抽油杆的服役性能提出了严苛要求,应有更高的强度和更优异的韧性、塑性<sup>[4]</sup>。

本文对抽油杆用圆钢 30CrMoA 进行常规的淬火和回火工艺优化,以期获得最优的力学性能。

## 1 试验材料及方法

### 1.1 试验材料

试验材料取自轧钢厂生产的  $\Phi 19$  mm 30CrMoA 抽油杆用圆钢成品,化学成分见表 1,热轧态成品力学性能和冲击性能见表 2 和表 3。

表 1 化学成分(质量分数)

项目	C	Si	Mn	Cr	Mo	P	S
标准要求	0.26~0.33	0.17~0.37	0.40~0.70	0.80~1.10	0.15~0.25	≤0.025	≤0.020
成分	0.31	0.25	0.53	0.916	0.179	0.015	0.006

表 2 热轧态成品拉伸试验结果

编号	屈服强度 /MPa	抗拉强度 /MPa	延伸率 /%	面缩率 /%
1#	570	813	17.5	49
2#	568	804	19.1	48
3#	572	812	25.0	48

表 3 热轧态成品冲击试验结果

编号	$KU_2$ /J		
1#	50.9	57.8	50.9
2#	56.7	52.6	49.2
3#	52.1	52.9	47.2
4#	43.6	44.7	47.8

火温度以及处理时间,淬火和回火介质为水,比较不同调质工艺下的试样力学性能,检测金相组织,找出综合性能最优的调质处理工艺指导用户生产。

试验选取的调质热处理工艺制度见表 4。淬火温度选取 2 个温度,分别为 880 °C 和 850 °C,保温时间均为 40 min,与 880 °C 淬火温度配合回火温度分别为 600 °C、540 °C、500 °C,保温时间均为 80 min;与 850 °C 淬火温度配合回火温度分别为 540 °C、500 °C,保温时间均为 80 min。

表 4 调质热处理工艺参数

调质热处理工艺	淬火		回火	
	温度/°C	时间/min	温度/°C	时间/min
1	880	40	500	80
2	880	40	540	80
3	880	40	600	80
4	850	40	540	80
5	850	40	500	80

### 1.2 试验方法

在标准 GB/T 26075—2019《抽油杆用圆钢》推荐的热处理制度基础上,选取不同的淬火温度和回

根据 GB/T 2975—2018《钢及钢产品力学性能试验取样位置及试样制备》，分别制取材料调质态的拉伸试样、纵向夏比 U 型缺口冲击试样，加工成  $\Phi 10$  mm 的标准拉伸试样和  $10\text{ mm} \times 10\text{ mm} \times 55\text{ mm}$  的冲击试样。依照 GB/T 229—2020《金属材料夏比摆锤冲击试验方法》，采用 JBD-300A 冲击试验机进行室温冲击试验。依照 GB/T 228.1—2018《金属材料拉伸试验第 1 部分 室温试验方法》，采用英斯特朗 120T 电液伺服拉伸试验机进行室温拉伸试验。制取调质态圆钢的金相试样，经粗磨、细磨、抛光及 4% 硝酸酒精溶液腐蚀后，采用蔡司 Axiovert 5 光学显微镜对其显微组织进行观察，采用蔡司 Sigma 500 扫描电镜对其冲击断口形貌进行分析。

## 2 结果与讨论

### 2.1 力学性能

对经过 5 种调质热处理后的试验钢进行 2 组平行的拉伸试验，测试时室温为  $28\text{ }^{\circ}\text{C}$ 。30CrMoA 试验钢调质态的拉伸性能如表 5 所示。

表 5 调质态 30CrMoA 拉伸试验结果

试样号	屈服强度 /MPa	抗拉强度 /MPa	延伸率 /%	面缩率 /%
1#	985	1 074	13.7	60
	991	1 098	14.0	59
2#	1 060	1 157	13.0	58
	1 078	1 169	12.5	59
3#	1 012	1 094	16.5	60
	1 009	1 091	16.5	62
4#	1 072	1 157	15.0	61
	1 070	1 164	14.5	61
5#	894	983	18.5	65
	896	985	17.5	63
标准	$\geq 735$	$\geq 930$	$\geq 12$	$\geq 50$

从表 5 试验结果可以看出，试验材料经过调质热处理之后，屈服强度和抗拉强度显著提高，这意味着材料能承受更大的静态载荷而不发生明显的塑性变形和断裂。其中， $850\text{ }^{\circ}\text{C}$  淬火 +  $540\text{ }^{\circ}\text{C}$  回火调质处理的 4# 试样，强度、塑性匹配最佳。

对经过 5 种调质热处理后的试验钢进行 2 组冲击试验，每组测试 3 个平行试样，测试时的室温为

$27\text{ }^{\circ}\text{C}$ 。30CrMoA 试验钢调质态的冲击性能见表 6。

表 6 调质态 30CrMoA 冲击试验结果

试样号	$KU_2$ /J		
1#	126.7	121.4	124.2
	130.5	123.2	128.1
2#	116.6	120.7	108.4
	113.8	113.8	114.2
3#	126.0	129.8	123.5
	131.6	136.2	131.2
4#	110.0	110.4	112.1
	115.9	118.3	114.8
5#	154.0	163.3	156.3
	159.2	158.1	165.6

从表 6 试验结果可以看出，试验材料经调质热处理后冲击功显著增大，表明材料韧性提高。

30CrMoA 钢中加入 0.80% ~ 1.10% 的 Cr，在提高强度的同时会增加材料的回火脆性，通过添加 0.15% ~ 0.25% 的 Mo 来抑制回火脆性，Cr 与 Mo 的合理配合可保证材料良好的回火稳定性。30CrMoA 钢经调质热处理后，各项力学性能明显改善，尤其是冲击性能改善效果更好。

(1) 强度提高。抗拉强度和屈服强度显著提高，让材料能够承受更大的拉力而不发生变形或断裂，能有效防止材料在高负载下出现过度拉伸甚至破坏。

(2) 屈强比提高。屈强比提高意味着材料的屈服强度更接近抗拉强度，这使得材料在从弹性变形过渡到塑性变形阶段更能有效发挥其强度优势，能在接近极限强度的工况下工作。

(3) 韧性增强。冲击功的提高代表材料韧性变好，材料在受到瞬时冲击时，能够吸收更多的能量而不发生脆性断裂，有利于提高材料的抗冲击能力，增加使用寿命。

(4) 综合性能改善。强度、塑性和韧性得到良好配合，这种综合性能的优化使材料可以用于多种复杂工况，在制造承受交变载荷、冲击载荷以及要求抗磨损的零部件时，能同时满足高强度和抗断裂的要求。

### 2.2 显微组织

通过对显微组织的观察和分析，能够了解材料的微观结构特征，评估其性能并优化材料的设计。

30CrMoA 试验钢热轧态以及其调质热处理后试样的显微组织照片如图 1 所示。

从显微组织可以看出,热轧态 30CrMoA 试验钢显微组织为贝氏体 + 铁素体,而经过调质热处理之后试验钢的显微组织为回火索氏体,即铁素体基体上分布有均匀细粒状碳化物。这种组织的优势在于:①使材料兼具较高的强度和良好的韧性。它比正火后的组织更细小均匀,可以保证在工作过程中既不会因强度不够而产生过量变形,也不会因为韧

性差而突然断裂。②尺寸稳定性高。由于组织结构稳定,在长期使用过程中或者在复杂的工况条件下,材料的尺寸变化极小,可以确保零件在使用期间保持精准的尺寸。③抗疲劳性能增强。稳定的回火索氏体结构有助于提高材料的抗疲劳性能。疲劳裂纹的产生和扩展在这种组织中会受到抑制,因为其均匀细小的组织特性使得应力集中现象得到缓解,能有效延长疲劳寿命。

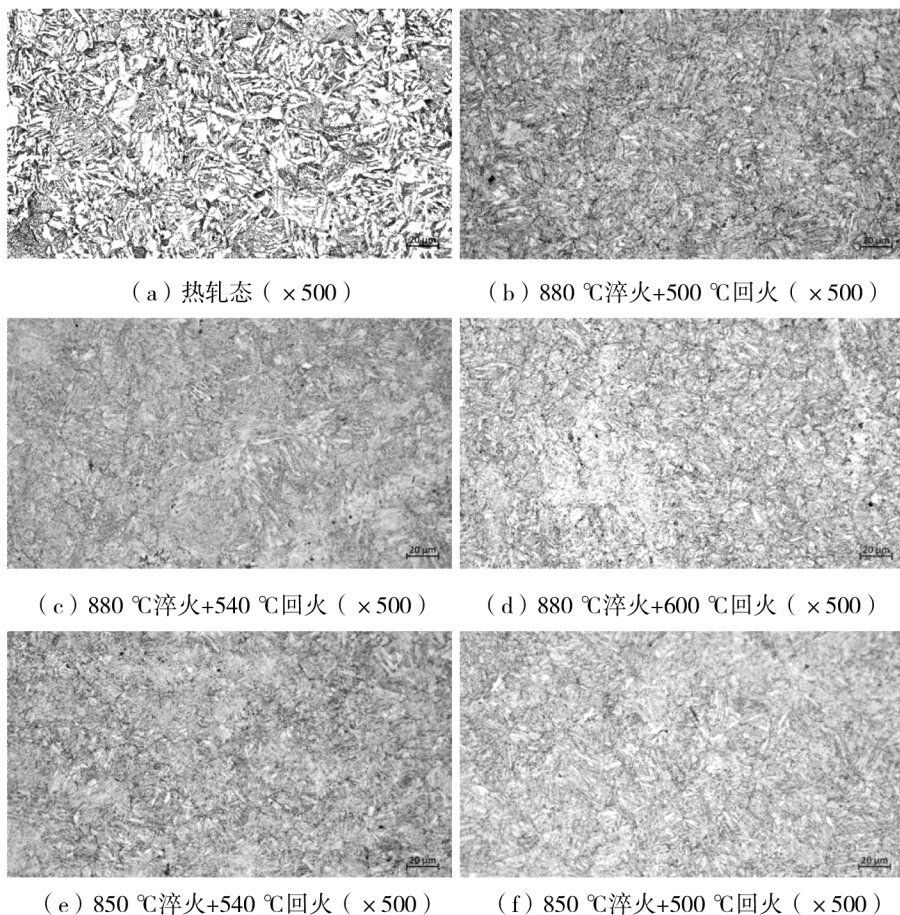


图 1 显微组织

### 2.3 冲击断口形貌分析

断口的微观形貌特征是直接反映材料的组织状态对断裂过程影响的痕迹。30CrMoA 试验钢调质热处理试样的冲击断口裂纹源形貌和断口扩展区形貌如图 2 所示。

从图 2 可以看出,30CrMoA 试验钢调质热处理试样的冲击断口呈韧窝形貌,韧窝周围有白色的撕裂棱,显示冲击断口为韧性断裂,这表明:①材料具

有良好的韧性。韧窝形貌是韧性断裂的典型特征,这表明调质态 30CrMoA 试验钢在受到冲击时,通过微孔的形核、长大和聚合来吸收大量能量,有效防止材料发生脆性断裂,使材料在动态加载条件下依然能够保持较好的完整性。撕裂棱也是材料在断裂过程中发生塑性变形的迹象,它与韧窝一起证明材料在断裂时消耗了较多能量用于塑性变形,而非直接脆断,从而提高了材料对冲击能量的吸收能力,能够

应对工作过程中可能出现的意外冲击。②抵抗裂纹扩展能力强。韧窝周围的撕裂棱可以起到阻碍裂纹扩展的作用。在裂纹扩展过程中,撕裂棱的存在使得裂纹扩展路径变得曲折,需要消耗更多能量继续扩展。对于长期使用的结构件,尤其是那些承受交变应力或者存在潜在疲劳裂纹的部件来说,可以有

效延缓裂纹扩展速度,延长材料的使用寿命。③材料综合性能优越。这种断口特征暗示材料具有良好的综合力学性能,强度和韧性配合合理。因为只有在具备良好强韧性的基础上,材料才能在承受较大应力的时候,通过韧性变形来消耗能量,使材料在多种复杂工况中安全服役。

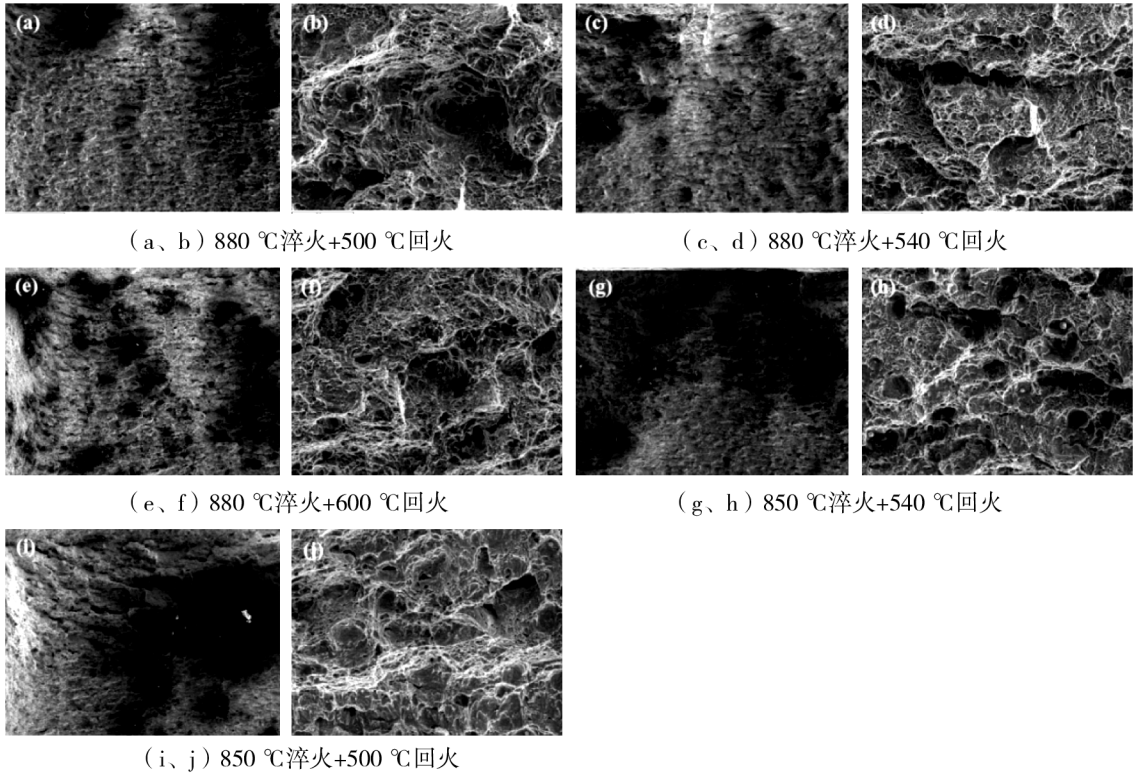


图 2 调质态试样冲击断口裂纹源形貌和断口扩展区形貌

### 3 结论

(1)抽油杆用圆钢 30CrMoA 在 850 °C 淬火(水冷)+540 °C 回火(水冷)的调质热处理工艺下显示出最好的综合机械性能。

(2)调质热处理后,试验钢的显微组织为回火索氏体,结构稳定。

#### 参 考 文 献

[1] 谢玉洪. 双碳背景下中国海洋能源产业升级及绿色发展思考[J]. 新型电力系统, 2023, 1

(1): 44-48.

[2] 钱兴坤, 陆如泉, 罗良才, 等. 2023 年国内外油气行业发展及 2024 年展望[J]. 国际石油经济, 2024, 32(2): 1-13.

[3] 张立新, 李宁会. 人工举升设备分类与命名探讨[J]. 中国石油和化工标准与质量, 2023, 43(20): 12-13.

[4] 金军涛, 王万荣, 关文韬, 等. 一种特超高强度抽油杆的开发[J]. 锻造与冲压, 2024(5): 77-80.