

文章编号:1673-9469(2015)02-0086-04

doi:10.3969/j.issn.1673-9469.2015.02.021

## 新型低合金高强度 Cr-Mo 钢热处理工艺研究

郑立允, 甄凌雪

(河北工程大学 机电学院, 河北 邯郸 056038)

**摘要:**本文对一种 Cr-Mo 系的低合金结构钢进行了研究, 通过对该新型的射孔枪管用钢进行完全淬火, 研究了淬火温度、保温时间和回火温度对实验钢组织和性能的影响。研究表明, 钢的晶粒随淬火温度的升高而增大, 硬度先增大后减小; 在相同的淬火温度下, 随着保温时间的延长, 钢的硬度和晶粒度变化不大; 回火温度升高, 钢的硬度和强度逐渐降低, 断面收缩率和冲击功逐渐增大。当淬火温度为 900 °C 保温时间为 40 min、回火温度为 560 °C 保温时间为 80 min 时, 钢的屈服强度达到 927 MPa, 大于 130 ksi, 硬度达到 31.2 HRC, 同时纵横冲击功分别达到了 74.5 J 和 119.7 J 的水平, 综合性能最优。

**关键词:**Cr-Mo 钢、低合金、热处理工艺、性能

**中图分类号:**TG142.1

**文献标识码:**A

### The research about some kind of Cr-Mo steel heat treatment progress

ZHENG Li-yun, ZHEN Ling-xue

(Mechanical and Electrical Engineering Institute, Hebei University of Engineering, Hebei Handan 056038, China)

**Abstract:** In this paper, a low-alloy structural steel Cr-Mo system has been studied. Completely quenching process was performed on a novel steel for perforated gun tube and the influences of the quenching temperature, holding time and tempering temperature on the microstructure and properties of the experimental steel had been investigated. The results show that, the grain of the experimental steels became larger with the increase of the quenching temperature. The hardness of the quenched steel increased firstly and then decreased with the increase of quenching temperature. At the same quenching temperature, hardness and grain size changed little, with the holding time extending. With the increase of the tempering temperature, the hardness and strength of the steel quenched at the same temperature decreased, but shrinkage of section and the impact energy increased. When the quenching temperature was 900 °C, holding 40min and tempering temperature was 560 °C, holding 80min, the steel achieved a yield strength of 927MPa that was higher than 130ksi. Its hardness was HRC31.2, while its vertical and horizontal impact energies reached 74.5J and 119.7J. Thus, the overall performance is the best.

**Key words:** Cr-Mo steel; low alloy; heat treatment progress; performance

低碳钢的完全淬火是在完全奥氏体化以上 50~70 °C 进行, 保温一段时间后以大于临界冷却速度的速度冷却得到的最终组织为马氏体。淬火的主要目的是使奥氏体化后的工件获得尽量多的马氏体, 然后为了减少或消除淬火应力, 保证相应的组织转变, 提高钢的韧性和塑性, 获得硬度、强度、

塑性和韧性的适当配合, 对实验钢在不同温度下进行了高温回火。本文主要针对 130ksi 钢级的射孔枪管用钢, 采用 Cr-Mo 系低碳低合金钢为实验用钢, 在确定了实验钢的成分之后对其热处理工艺进行研究。在常规调质处理的基础上, 通过改变工艺参数对该射孔枪管用钢的热处理工艺进行

收稿日期: 2015-03-23

基金项目: 国家自然科学基金项目(51271060); 河北省杰出青年科学基金项目(E2013402051)

特约专稿

作者简介: 郑立允(1969-), 女, 河北邢台人, 教授, 从事磁性材料方面的研究。

了优化,获得了优良的综合力学性能,能够满足使用要求。

## 1 实验材料和实验方法

### 1.1 实验材料

本实验采用的是 Cr-Mo 系列的钢作为实验材料,其具体成分及其所占的百分比如下:0.26% C、0.20% Si、0.9% Mn、0.01% P、0.005% S、0.1% Ni、0.95% Cr、0.42% Mo、0.02% Al,其余成分为 Fe 和一些必要杂质。

实验材料经过环形炉加热→穿孔→轧制→减径→矫直等轧制工艺加工后,进行热处理及组织结构性能表征。

冲击试样按照 GB/T 299-1994 加工,由于钢管壁厚较小加工成的标准尺寸为:55 mm × 10 mm × 7.5 mm(夏比冲击试验 V 型缺口),用 NIS00C 型摆锤式仪器化动态冲击试验机测定冲击韧性。拉伸试样按照 GB/T 228-2002 加工成标准试样,其中壁厚为 10 mm,在万能材料拉伸试验机上对其进行拉伸试验。以上实验的每个工艺为 5 个试样测试后的平均值。

金相试样是用锯床将钢管锯成钢条再用金相试样切割机切割成 30 mm × 20 mm × 10 mm 的小块,依次经过由粗到细金相砂纸磨样、抛光后采用 4% 的硝酸酒精溶液腐蚀 7 s-10 s。测定晶粒度的试样采用饱和苦味酸溶液(1 g 苦味酸 + 5 ml 盐酸 + 100 ml 酒精)腐蚀 10 s-12 s。利用 4XC-MS 型光学显微镜对实验钢的显微组织进行观察,用 ZEISS EV018 型扫描电镜对其精细组织进行分析。

### 1.2 实验方法

用 HENVEN-HJ 型差热分析仪测定钢的奥氏体开始转变温度和完全奥氏体化温度,具体测定过程如下:设置两个升温阶段,第一个阶段终止温度设为 700℃,升温速率为 10℃/min;第二阶段终止温度为 1 050℃,升温速率为 5℃/min。通入的保护气体为氮气,气体流量为 15 ml/min。经测定该钢的临界温度为:Ac1 = 765.3℃,Ac3 = 859.6℃。

完全淬火温度分别为:880℃、900℃、920℃、940℃、960℃,保温时间分别为 40min 和 70min,冷却介质为水。在最佳淬火温度下进行淬火然后进

行 520℃、540℃、560℃、580℃、600℃、620℃,保温时间为 80min 的回火处理,冷却介质为空气。

## 2 实验结果及分析

### 2.1 不同淬火温度的影响

不同温度下进行完全淬火后试样的微观组织照片如图 1 所示。完全淬火,可以使原来的自由铁素体完全融入奥氏体中,最终获得马氏体组织。比较图 1 中的不同温度下完全淬火试样的金相组织,可以看出,组织均比较细小,都是由板条马氏体、残留奥氏体和少量分布的未溶碳化物组成。在相同的保温时间下,随着淬火加热温度的升高,组织状态有了明显的粗化,板条长度变长,宽度也增大。剩余碳化物量减少,由图 1 中也可以清楚地看到 a、b、c 中碳化物量越来越少,d 和 e 中碳化物含量极少,因为随着淬火温度的升高,碳化物的融入量越来越大。

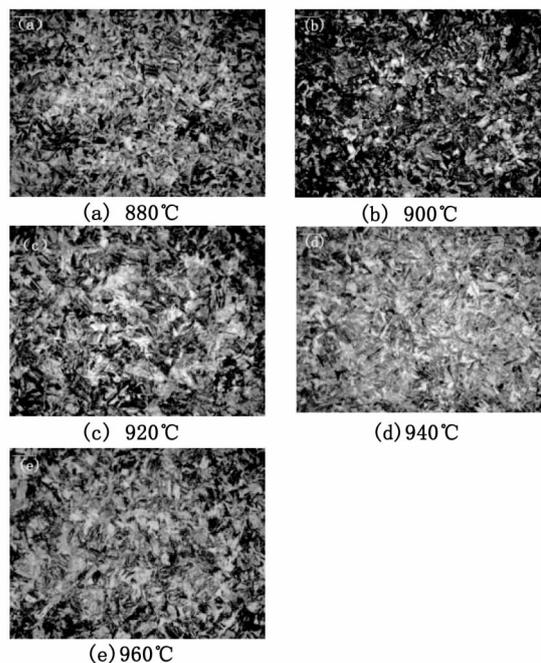


图1 不同温度下淬火后保温40min的金相照片  
Fig.1 Microstructures of the specimens quenched at (a) 880℃, (b) 900℃, (c) 920℃, (d) 940℃, (e) 960℃ (holding for 40min)

表 1 给出了保温 40min 时,不同淬火温度下钢的平均晶粒尺寸和硬度的测试结果。由表 1 可知,随亚温淬火温度的升高,晶粒的平均截距呈增大趋势,由 8.5μm 增大到 11.4μm。同时,随着淬火温度的升高,试样的硬度先增大后减小。分析原因是,在 900℃ 以前淬火,淬火加热温度不足,会

使硬度随淬火温度的升高而增大。但高于 900℃ 以后淬火时,硬度随淬火温度的升高而减小,则是因为此时合金元素的碳、氮化物已得到了充分溶解,不能再阻止奥氏体晶粒的长大,与此同时,淬火后残余奥氏体的量也逐渐增多,也会导致硬度的减小。所以试样硬度呈现先增大后减小的趋势。

表 1 淬火后的晶粒度和硬度(保温时间为 40min)

Tab.1 Grain size and hardness after quenching  
(holding for 40min)

淬火温度 /℃	晶粒平均截距 /μm	硬度 /HRC
880	8.51	50.2
900	10.00	50.9
920	10.62	49.6
940	10.91	49.0
960	11.38	48.4

## 2.2 淬火时不同保温时间的影响

不同保温时间下进行亚温淬火后试样的微观组织照片如图 2 所示。

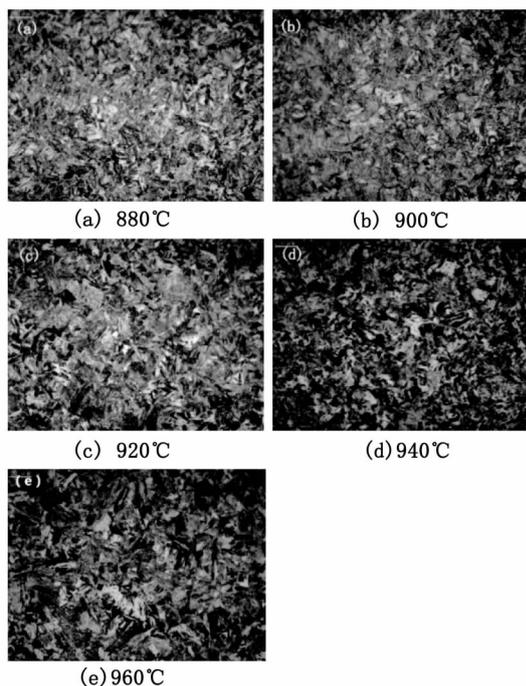


图 2 不同温度下淬火后保温 70min 的金相照片

Fig.2 Microstructures of the specimens quenched at (a) 880℃, (b) 900℃, (c) 920℃, (d) 940℃, (e) 960℃ (holding for 70min)

比较图 1 和图 2, 相同的淬火温度下比较不同保温时间的淬火试样的金相组织, 可以发现随保温时间的延长淬火后组织变化并不明显。表 2 为

保温 70 min 时晶粒大小随淬火温度变化情况, 对比表 1 和表 2, 可以发现, 延长保温时间后晶粒和硬度的变化趋势与未延长时相同, 晶粒稍微有所长大, 硬度降低程度也不明显, 说明保温时间的延长对晶粒的大小和硬度的影响并不明显。从而可以得出结论对淬火后组织影响较大的是淬火温度, 而淬火保温时间基本无影响。

表 2 淬火后的晶粒度和硬度(保温时间为 70min)

Tab.2 Grain size and hardness after quenching  
(holding for 70min)

淬火温度 /℃	晶粒平均截距 /μm	硬度 /HRC
880	8.97	49.9
900	10.28	50.5
920	10.84	49.3
940	11.72	48.7
960	13.35	48.2

## 2.3 不同回火温度对组织和性能的影响

根据组织、硬度和晶粒度的测定结果选取最佳的完全淬火温度为 900℃, 保温 40 min。在此淬火工艺下进行 520℃、540℃、560℃、580℃、600℃、620℃回火处理。

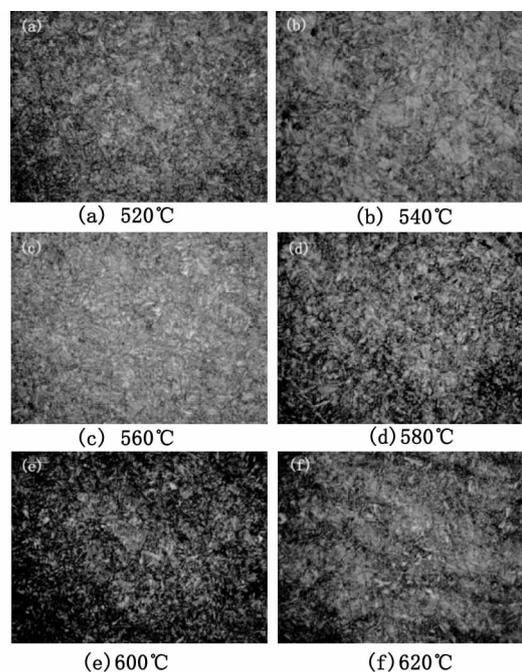


图 3 900℃ 淬火、520–620℃ 回火后的金相照片  
(a) 520℃, (b) 540℃, (c) 560℃, (d) 580℃, (e) 600℃ (f) 620℃

Fig.2 Microstructures of the specimens quenched at 900℃ and tempered at (a) 520℃, (b) 540℃, (c) 560℃, (d) 580℃ (e) 600℃ (f) 620℃

表 3 900℃ × 40min 淬火和不同温度回火后的力学性能

Tab. 3 Mechanical properties of the steel tempering at different temperatures

回火温度/℃	硬度/HRC	屈服强度/MPa	抗拉强度/MPa	断面收缩率/%	横向冲击功/J	纵向冲击功/J
520	33.2	1110	1117	46.3	60.6	87.9
540	31.8	1104	1113	50.6	66.1	95.8
560	31.2	927	998	51.6	74.5	119.7
580	30.6	898	986	53.1	75	131.3
600	29.8	844	946	54.9	78.3	134.1
620	27.9	804	890	61.1	84.2	174.3

钢淬火后得到的组织为马氏体和残余奥氏体,都是非平衡组织,它们在回火过程中都会发生转变。在回火过程中发生的转变过程为:当回火温度在 80 ~ 250℃ 之间时马氏体开始分解,马氏体中的碳原子偏聚在位错线附近的间隙位置;温度继续升高到 300℃,这期间残余奥氏体会发生相应的转变;在温度升高到 400℃ 的过程中马氏体中的碳原子会全部析出,从而在马氏体内或晶界上形成渗碳体与此同时  $\alpha$  相依然保持板条形貌;温度继续升高就会发生  $\alpha$  相的回复、再结晶和渗碳体的集聚和球化。

图 3 给出了 900℃ 淬火、520 ~ 620℃ 回火试样的金相组织照片。观察实验钢回火后的金相组织可以发现最终形成的组织为细粒状渗碳体和等轴状铁素体所构成的回火索氏体。 $S_{回}$  依然保持着原来马氏体的位相。

完全淬火后的综合力学性能如表 3 所示。可以发现随回火温度的升高,实验钢的硬度和强度逐渐降低,断面收缩率和冲击逐渐增大。这是因为随着回火温度的升高,碳化物会球化和长大,同时  $\alpha$  相也发生回复和再结晶形成了  $S_{回}$ 。所加入的合金元素 Mo 与碳亲和力较强,从而使合金渗碳体的溶解减慢,同时 Mo 还可以有效抑制渗碳体在 450 - 600℃ 下的聚集长大。综合考虑最终选择 560℃ 为最佳回火温度。

图 4 为完成冲击试验后,用扫描电镜观察的断口形貌。

由扫描电镜观察冲击后断口的微观形貌可以看出在所选温度中回火后冲击断裂都是韧性断裂,因为金属韧性断裂最主要的微观形貌特征就是韧窝。韧窝的形成是由于材料内部分离形成空洞,在滑移的作用下空洞逐渐长大并和其他空洞连接在一起就形成了韧窝断口。观察冲击断口的微观形貌可以清晰的看见韧窝为剪切韧窝,试样的断口形貌都以准解理为主要特征且韧窝中有第二相粒子分布。随回火温度的增高,韧窝的面积

有逐渐增大的趋势。

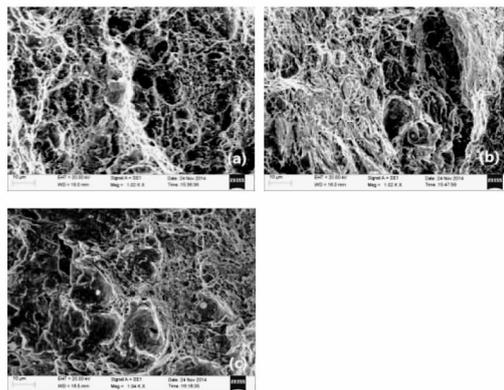


图 4 扫描电镜下冲击断口形貌 (a) 520℃ (b) 560℃ (c) 620℃

Fig. 4 Fracture surfaces of impact (SEM) (a) 520℃ (b) 560℃ (c) 620℃

### 3 结论

综合以上实验结果最终确定最优的热处理工艺为:淬火 900℃ 保温 40 min 回火 560℃ 保温 80 min。此时获得的综合力学性能最好,屈服强度为 927 MPa,横向冲击功为 74.5J,晶粒度为 10 级。符合射孔枪管在使用中所需要的性能。

### 参考文献:

- [1] 齐菲. 新型射孔枪管用高强低合金钢的制备及强韧性的研究[D]. 天津:天津理工大学,2010.
- [2] 周海祥,斯松华. 热处理对高强度微合金钢组织与性能的影响[J]. 安徽工业大学学报. 2006, 23(2): 139 - 141.
- [3] 钟群鹏,赵子华. 断口学[M]. 北京:高等教育出版社, 2005.
- [4] 杨静兰,张军,罗先登. 高强度射孔枪管的试制[J]. 钢管, 2005, 34(2): 17 - 19.
- [5] 王彦华,贾祥才. 热处理工艺对低合金钢组织和性能的影响[J]. 铸造技术. 2013, 34(4): 429 - 431.

(责任编辑 刘存英)