

热处理工艺对 27SiMn 钢力学性能的影响

杨栋杰¹⁾ 刘雅政¹⁾ ✉ 周乐育¹⁾ 李亚欣²⁾ 井溢农³⁾ 杨维宇³⁾

1) 北京科技大学材料科学与工程学院, 北京 100083 2) 北京科大中冶技术发展有限公司, 北京 100029

3) 包钢(集团)公司技术中心, 包头 014010

✉通信作者, E-mail: lyzh@ustb.edu.cn

摘要 27SiMn 液压支架管经过调质热处理来实现其良好的综合力学性能。采用四因素三水平的热处理正交试验, 研究了不同热处理工艺参数(淬火温度、淬火保温时间、回火温度和回火保温时间)对力学性能的影响, 并确定了最优热处理工艺制度为 930 °C /40 min 淬火和 480 °C /50 min 回火。经最优热处理工艺处理后, 其力学性能为: 屈服强度 895 MPa, 抗拉强度 1 030 MPa, 伸长率 15%, 断面收缩率 54%, 冲击功 53.3 J, 满足了 GB/T 17396—1998 标准中对 27SiMn 钢的性能要求。

关键词 合金钢; 钢管; 热处理; 力学性能; 正交试验

分类号 TG 162.84

Effect of heat treatment on the mechanical properties of 27SiMn steel

YANG Dong-jie¹⁾, LIU Ya-zheng¹⁾ ✉, ZHOU Le-yu¹⁾, LI Ya-xin²⁾, JING Yi-nong³⁾, YANG Wei-yu³⁾

1) School of Materials Science and Engineering, University of Science and Technology Beijing, Beijing 100083, China

2) SinoMet Technologies Co. Ltd., University of Science and Technology Beijing, Beijing 100029, China

3) Baotou Iron and Steel Group Technology Center, Baotou 014010, China

✉ Corresponding author, E-mail: lyzh@ustb.edu.cn

ABSTRACT Excellent mechanical properties of 27SiMn hydraulic support can be achieved by heat treatment. In this paper heat treatment orthogonal experiments with four factors and three levels were performed to investigate the effects of quenching temperature and holding time as well as tempering temperature and holding time on the mechanical properties of the hydraulic support. The heat treatment process was optimized as quenching after holding at 930 °C for 40 min and then tempering at 480 °C for 50 min. At these optimized heat treatment parameters, the hydraulic support has excellent comprehensive mechanical properties: the yielding strength of 895 MPa, the tensile strength of 1 030 MPa, the elongation of 15%, the area reduction of 54%, and the impact energy of 53.3 J, which meet the requirements of 27SiMn steel according to the standard GB/T 17396—1998.

KEY WORDS alloy steel; steel pipe; heat treatment; mechanical properties; orthogonal experiments

我国无缝钢管市场目前供求已基本平衡或略微供大于求, 但从品种、规格看, 目前高质量、大规格(厚壁管)的无缝钢管仍有缺口, 需要从国外进口^[1-2]。钢管外径和壁厚之比小于 20 的钢管为厚壁钢管。液压支架管系无缝厚壁钢管, 主要用于制作煤矿开采用的液压支架、汽车起重机的液压缸、柱塞等, 其中, 液压支架用无缝钢管的需求量最大, 其典型材质为 27SiMn 钢。27SiMn 钢是根据我国资源研制的低合金低碳调质钢, 它具有良好的强韧性, 广泛用于单体液压支柱的缸体和活柱筒的材料^[3-5]。27SiMn 是在优质碳素结构钢基础上, 适当地加入一

种或几种合金元素, 用来提高钢的强度、韧性和淬透性能。这类钢在制成后, 通常均需经过调质、化学热处理和表面淬火等热处理。

27SiMn 经过调质热处理来实现良好的综合力学性能, 而淬火和回火工艺参数会影响最终产品的综合力学性能^[6-7]。本文所研究 27SiMn 无缝钢管尺寸为直径 375 mm, 壁厚 35 mm, 属于无缝厚壁钢管, 对热处理工艺要求更为严格。因此为制定合理热处理工艺参数, 采用了四因素三水平的正交试验, 研究了不同热处理工艺参数(淬火温度、淬火保温时间、回火温度和回火保温时间)对力学性能的影响, 确

定了最优热处理工艺制度,并现场生产获得了各项性能均合格的成品。

1 实验材料

实验材料取自包钢无缝钢管厂生产的 27SiMn

无缝厚壁液压支架管,其化学成分见表 1。

2 实验方案

沿管轴向截取轴向 200 mm,径向 25 mm,周向 25 mm 的长条试样,用于制作拉伸试样和冲击试样,

表 1 27SiMn 钢的化学成分(质量分数)

Table 1 Chemical composition of 27SiMn steel

| 牌号 | C | Si | Mn | S | P | Cr | Ni | Cu |
|--------|------|------|------|-------|--------|-------|-------|--------|
| 27SiMn | 0.32 | 1.29 | 1.33 | 0.003 | 0.0189 | 0.079 | 0.011 | ≤0.009 |

采用 RX3-15-8 型箱式电阻炉加热及保温。

热处理工艺参数为: 淬火温度 T_1 、淬火保温时间 t_1 、回火温度 T_2 和回火保温时间 t_2 。根据测得的 27SiMn 临界相变点温度 T_{Ac3} 为 855 °C, 淬火加热温度在 855 + (30 ~ 70) °C 范围。淬火保温时间根据生产钢管的最大壁厚设定。

正交试验为四因素三水平的实验,具体的工艺参数如表 2 所示,按正交表 $L_9(3^4)$ 安排实验。按照正交试验表设计的四因素三水平实验,共做九组,实验方案如表 3 所示。

表 2 四因素三水平正交试验

Table 2 Orthogonal experiments with four factors and three levels

| 因素 | 淬火温度, 淬火保温时间, 回火温度, 回火保温时间, | | | |
|------|-----------------------------|--------------------|------------------------|--------------------|
| | $T_1 / ^\circ\text{C}$ | t_1 / min | $T_2 / ^\circ\text{C}$ | t_2 / min |
| 水平 1 | 890 | 30 | 450 | 50 |
| 水平 2 | 910 | 40 | 480 | 60 |
| 水平 3 | 930 | 50 | 510 | 80 |

表 3 按照正交试验表设计的实验方案

Table 3 Experimental programs designed by the orthogonal experimental table

| 组号 | 淬火温度, 淬火保温时间, 回火温度, 回火保温时间, | | | |
|----|-----------------------------|--------------------|------------------------|--------------------|
| | $T_1 / ^\circ\text{C}$ | t_1 / min | $T_2 / ^\circ\text{C}$ | t_2 / min |
| 1 | 890 | 30 | 450 | 50 |
| 2 | 890 | 40 | 480 | 60 |
| 3 | 890 | 50 | 510 | 80 |
| 4 | 910 | 30 | 480 | 80 |
| 5 | 910 | 40 | 510 | 50 |
| 6 | 910 | 50 | 450 | 60 |
| 7 | 930 | 30 | 510 | 60 |
| 8 | 930 | 40 | 450 | 80 |
| 9 | 930 | 50 | 480 | 50 |

按照表 3 设计的正交试验方案进行热处理,将调质处理后的试样加工成标距尺寸为 50 mm 的 $\phi 10$ mm 拉伸试样和 10 mm × 10 mm × 55 mm 的冲击试

样。拉伸试验按照 GB/T 228—2002 标准,主要检测不同热处理工艺下屈服强度 R_{eL} 、抗拉强度 R_m 、伸长率 A 、断面收缩率 Z 和冲击功。

3 工艺参数对力学性能的影响

GB/T 17396—1998 标准中对 27SiMn 液压支架管的性能要求: 屈服强度 835 MPa、抗拉强度 980 MPa、伸长率 12%、断面收缩率 40% 和冲击功 39 J。按表 3 进行热处理正交试验,相应工艺下力学性能如表 4 所示。

根据表 4 测定的力学性能结果,对不同的性能指标分别计算各因素三个水平下的平均试验指标及极差,分析不同热处理工艺参数对 27SiMn 钢强度和韧性的影响规律,分析结果如表 5 所示。

由极差法可知,各因素对屈服强度、抗拉强度和伸长率影响主次为: 屈服强度, $T_2 > T_1 > t_2 > t_1$; 抗拉强度, $T_2 > T_1 > t_1 > t_2$; 伸长率, $T_2 > T_1 > t_2 > t_1$, 断面收缩率, $T_2 > t_2 > T_1 > t_1$; 冲击功, $T_2 > T_1 > t_2 > t_1$ 。可见,回火温度是屈服强度、抗拉强度、伸长率、断面收缩率和冲击功最主要的影响因素,其影响水平分别达到 125 MPa、144.3 MPa、2.5%、3% 和 8 J。

3.1 淬火温度和保温时间对力学性能的影响

当回火温度在 450 ~ 510 °C,回火时间在 50 ~ 80 min 范围内时,淬火温度对 27SiMn 力学性能的影响如图 1 所示。随淬火温度升高,合金碳化物逐渐分解,合金元素 C、Mn、Si 在奥氏体中的溶解量增加,固溶强化效果加强,使得强度增加^[8];另一方面,随淬火温度升高,奥氏体晶粒逐步长大,得到粗大的马氏体组织,且奥氏体稳定化后残余奥氏体量增多,强度降低。综合作用,强度增加浮动不大。随着淬火温度升高,伸长率逐渐降低,当淬火温度为 890 °C 时,伸长率最大。材料的冲击功在 930 °C 时达到最大值。为了使性能满足 GB/T 17396—1998 要求,同时考虑到包钢对材料的韧性要求,即保证强度的同时,以韧性性能为目标,因此淬火温度选择 930 °C。

表 4 不同热处理工艺下 27SiMn 的力学性能

Table 4 Mechanical properties of 27SiMn specimens under different heat treatment processes

| 组号 | 热处理工艺 | | 力学性能 | | | | |
|----|---------------|---------------|---------------------|------------------|--------|--------|-------|
| | 淬火 | 回火 | R_{eL}/MPa | R_m/MPa | $A/\%$ | $Z/\%$ | 冲击功/J |
| 1 | 890 °C 30 min | 450 °C 50 min | 935 | 1 115 | 15 | 53 | 37 |
| 2 | 890 °C 40 min | 480 °C 60 min | 887 | 1 040 | 15 | 57 | 48 |
| 3 | 890 °C 50 min | 510 °C 80 min | 775 | 927 | 18 | 59 | 39 |
| 4 | 910 °C 30 min | 480 °C 80 min | 835 | 987 | 16 | 55 | 47 |
| 5 | 910 °C 40 min | 510 °C 50 min | 802 | 942 | 16 | 56 | 52 |
| 6 | 910 °C 50 min | 450 °C 60 min | 867 | 1 040 | 15 | 55 | 45 |
| 7 | 930 °C 30 min | 510 °C 60 min | 797 | 940 | 16 | 57 | 44 |
| 8 | 930 °C 40 min | 450 °C 80 min | 947 | 1 090 | 13 | 55 | 43 |
| 9 | 930 °C 50 min | 480 °C 50 min | 872 | 1 015 | 14 | 55 | 56 |

表 5 27SiMn 正交试验结果

Table 5 Orthogonal experimental results of 27SiMn specimens

| 性能指标 | 试验指标 | 因素 | | | |
|----------|-------|------------|--------------|------------|--------------|
| | | 淬火温度 T_1 | 淬火保温时间 t_1 | 回火温度 T_2 | 回火保温时间 t_2 |
| 屈服强度/MPa | K_1 | 865.8 | 855.8 | 917 | 870 |
| | K_2 | 835 | 852.5 | 865 | 850.8 |
| | K_3 | 872.5 | 838.3 | 792 | 852.5 |
| | R | 37.5 | 17.5 | 125 | 19.2 |
| | 优水平 | 930 | 30 | 450 | 50 |
| 抗拉强度/MPa | K_1 | 1027.5 | 1014 | 1081 | 1024 |
| | K_2 | 990 | 1024 | 1014 | 1007 |
| | K_3 | 1015 | 994 | 936.7 | 1002 |
| | R | 37.5 | 30 | 144.3 | 22 |
| | 优水平 | 890 | 40 | 450 | 50 |
| 伸长率/% | K_1 | 16.25 | 16 | 14.7 | 15 |
| | K_2 | 16 | 15.25 | 15.4 | 15.8 |
| | K_3 | 15 | 16 | 17.2 | 16.08 |
| | R | 1.25 | 0.75 | 2.5 | 1.08 |
| | 优水平 | 890 | 50/30 | 510 | 80 |
| 断面收缩率/% | K_1 | 56.7 | 55.3 | 54.6 | 55.1 |
| | K_2 | 55.4 | 56.3 | 56 | 56.7 |
| | K_3 | 56.1 | 56.5 | 57.6 | 56.4 |
| | R | 1.3 | 1.2 | 3 | 1.6 |
| | 优水平 | 890 | 50 | 510 | 60 |
| 冲击功/J | K_1 | 41.3 | 43 | 42 | 48 |
| | K_2 | 48 | 47.6 | 50 | 45.7 |
| | K_3 | 48 | 47 | 45 | 43 |
| | R | 6.7 | 4.6 | 8 | 5 |
| | 优水平 | 930 | 40 | 480 | 50 |

注: K_1 、 K_2 、 K_3 以及 R 分别表示各因素在水平 1、2 和 3 时对应的各性能的平均值以及极值。

淬火保温时间对屈服强度和抗拉强度的影响很小,屈服强度和抗拉强度在 30 ~ 40 min 之间基本没有变化。淬火保温时间对伸长率、面缩率和冲击功的影响稍大一些,随着保温时间的延长,材料塑性逐渐升高。考虑淬火工艺参数对碳和合金元素均匀化,保证充分奥氏体化以及保持较细的奥氏体晶粒,淬火保温时间选择 40 min。

3.2 回火温度和保温时间对力学性能的影响

当淬火温度在 890 ~ 930 °C,淬火保温时间在 30 ~ 50 min 范围内时,回火温度和回火保温时间对 27SiMn 力学性能的影响见图 2。随回火温度的升高,屈服强度和抗拉强度逐渐下降,伸长率和面缩率呈上升趋势,冲击功在 480 °C 时达到最大。参照 GB/T 17396—1998 标准对液压支架管强度性能指标的规定。考虑到包钢的实际生产以及对材料的性能要求,即满足强度的同时,以韧性最佳为准,480 °C 为最佳回火加热温度。随着回火保温时间的延长,屈服强度、抗拉强度缓慢降低,伸长率有所上升,冲击功有所下降,面缩率出现了先上升后下降的趋势。考虑回火消除淬火引起的内应力,并考虑其综合性能,回火保温时间定为 50 min。

随回火温度的升高和回火保温时间的延长,钢的强度降低,伸长率呈上升趋势。随回火温度升高,过饱和 C 原子从 α 固溶体中不断析出,C 原子的固溶强化效应不断下降,使得强度降低;随回火温度升高,钢中合金碳化物数量增加并逐渐聚集、长大,对位错运动阻碍作用大大减弱,使强度急剧降低^[9]。在回火过程中马氏体板条内部、板条边缘和奥氏体晶界上析出碳化物。其中在马氏体板条内部有大量弥散析出的 ϵ -碳化物质点,并开始逐渐聚集为片状渗碳体。当回火温度逐渐升高的过

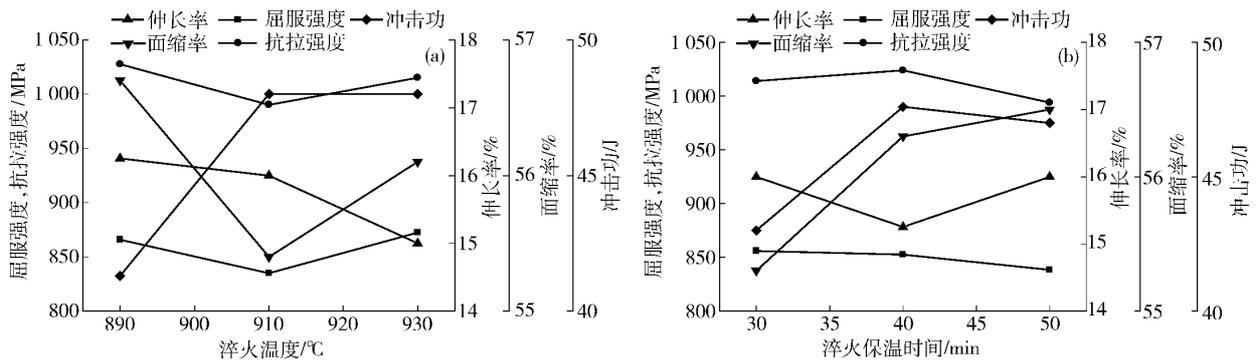


图 1 淬火温度和淬火保温时间对力学性能的影响。(a) 淬火温度; (b) 淬火保温时间

Fig. 1 Effects of quenching temperature and holding time on the mechanical properties: (a) quenching temperature; (b) holding time

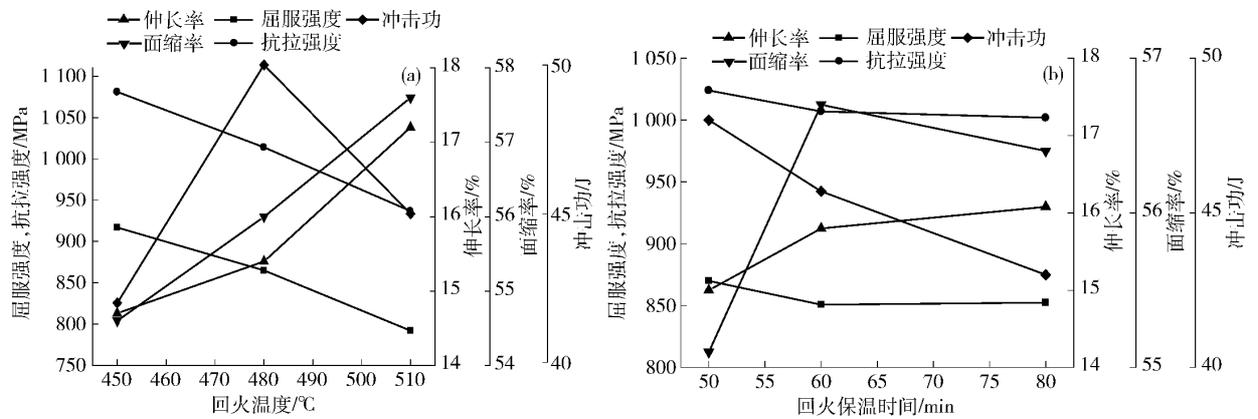


图 2 回火温度和回火保温时间对力学性能的影响。(a) 回火温度; (b) 回火保温时间

Fig. 2 Effects of tempering temperature and holding time on the mechanical properties: (a) tempering temperature; (b) holding time

程中,马氏体中析出的细小粒状渗碳体易于向马氏体晶界聚集,粒状渗碳体开始球化和聚集长大,加上 α 因回复、再结晶所引起的软化是伸长率增加的主要原因^[10]。

考虑 GB/T 17396—1998 对 27SiMn 液压支架管力学性能的规定,并结合淬火温度、淬火保温时间、

回火温度、回火保温时间对力学性能影响的分析,最终确定 27SiMn 液压支架管的最佳热处理工艺为: (930 °C 40 min) + (480 °C 50 min)。

按照上述工艺,对试样进行热处理,结果见表 6,各力学指标均满足 GB/T 17396—1998 标准中对 27SiMn 液压支架管的性能要求。

表 6 最佳热处理工艺下的力学性能及 GB/T 17396—1998 标准要求

Table 6 Mechanical properties under the optimum heat treatment and the GB/T 17396—1998 standard

| 组号 | 热处理工艺 | | 力学性能 | | | | |
|------|---------------|---------------|---------------------|------------------|--------|--------|-----------------------|
| | 淬火 | 回火 | R_{eL}/MPa | R_m/MPa | $A/\%$ | $Z/\%$ | 冲击功 A_{kv}/J |
| 标准 | — | — | 835 | 980 | 12 | 40 | 39 |
| 最优工艺 | 930 °C 40 min | 480 °C 50 min | 895 | 1030 | 15 | 54 | 53.3 |

4 结论

(1) 淬火温度对屈服强度和抗拉强度的影响是一致的,随着淬火温度升高强度略有变化,但是变化的浮动不大。淬火保温时间对屈服强度和抗拉强度的影响很小,屈服强度和抗拉强度在 30 ~ 40 min 之间基本没有变化。淬火保温时间对伸长率、面缩率

和冲击功的影响稍大一些,随着保温时间的延长,材料塑性逐渐升高。

(2) 随回火温度的升高,屈服强度和抗拉强度逐渐下降,伸长率和面缩率呈上升趋势,冲击功在 480 °C 时达到最大。回火保温时间对屈服强度和抗拉强度的影响大体相同,随着回火保温时间的延长,屈服强度、抗拉强度缓慢降低,伸长率有所上升,冲

击功有所下降,面缩率出现了先上升后下降的趋势.

(3) 最终确定热处理工艺为(930℃,40 min) + (480℃,50 min). 其力学性能达到屈服强度 895 MPa,抗拉强度 1 030 MPa,伸长率 15%,面缩率 54%,冲击功 53.3 J,综合力学性能良好,满足了 GB/T 17396—1998 标准中对 27SiMn 钢的性能要求.

参 考 文 献

- [1] Gu L G. Analysis of domestic supply-demand situation of seamless steel tubes and pipes. *Steel Pipe*, 2008, 37(4): 57
(谷力功. 我国无缝钢管市场供需情况分析. 钢管, 2008, 37(4): 57)
- [2] Zhang Z G, Sun K M, Chen W M. Production and development of high quality casting. *Iron Steel*, 1999, 34(8): 28
(张振钢, 孙开明, 陈为民. 优质石油套管的生产与开发. 钢铁, 1999, 34(8): 28)
- [3] Guo Z T, Li X, Guo D F, et al. Trial production of 27SiMn hydraulic holder tube. *Sci Technol Baotou Steel Group Corp*, 2003, 29(4): 36
(郭智韬, 李晓, 郭殿锋, 等. 27SiMn 液压支架管的试制. 包钢科技 2003 29(4): 36)
- [4] Xu Q X, Huo W K, Sun H F, et al. Research for the strengthening and toughening of steel 27SiMn. *Heat Treat Met*, 1991(4): 35
(徐庆莘, 霍万库, 孙宏飞, 等. 27SiMn 钢强韧化的研究. 金属热处理, 1991(4): 35)
- [5] Liang B. Properties and heat treatment of 27SiMn steel. *Heat Treat Met*, 1995(2): 30
(梁璧. 27SiMn 钢无缝钢管的性能和热处理. 金属热处理, 1995(2): 30)
- [6] Grum J, Božič S, Zupančič M. Influence of quenching process parameters on residual stresses in steel. *J Mater Process Technol*, 2001, 114(1): 57
- [7] Von Bergen R T. Control and monitoring of polymer quenchant systems. *Heat Treat Met*, 1991, 18(2): 37
- [8] Shang X G, Wang X J, Zhao J Y. Effect of “zero heat preservation” quenching temperature on properties and structure of Steel 27SiMn. *Sci Technol Inf*, 2007(21): 362
(尚显光, 王向杰, 赵俊岩. “零保温”淬火温度对 27SiMn 钢组织和性能的影响. 科技信息 2007(21): 362)
- [9] Hui W J, Dong H, Weng Y Q, et al. Effect of heat treatment parameters on mechanical properties of high strength Cr-Mo-V steel. *Acta Metall Sin*, 2002, 38(10): 1009
(惠卫军, 董瀚, 翁宇庆, 等. 回火温度对 Cr-Mo-V 系高强度钢力学性能的影响. 金属学报 2002 38(10): 1009)
- [10] Ma SY, Xu J H, Wang D L, et al. Influence of grinding on microstructure of steel tempered at different temperature. *Trans Master Heat Treat*, 2005, 26(2): 47
(马素媛, 徐建辉, 王东林, 等. 磨削对不同温度回火钢铁材料微观结构的影响. 材料热处理学报 2005 26(2): 47)