

两次预冷处理改善马氏体不锈钢 3Cr17Mo 球化组织的工艺研究

马卫东¹ 马亿珠²

(1 黄河水利职业技术学院机械工程学院, 开封 475004; 2 国家建筑装饰材料质量监督检验中心, 郑州 450004)

摘要 针对退火 3Cr17Mo 钢(/% : 0.25C, 16.5Cr, 0.60Mn, 0.60Si, 1.0Mo, 0.020P, 0.005S) 碳化物偏聚现象, 对预冷加热温度(870~960 °C 油冷至 450 °C), 预冷次数(1~4), 保温时间(1~4 h) 对该钢组织影响进行正交试验和离散数据分析, 以研究反复预冷热处理对 3Cr17Mo 钢球化组织的影响。得出 900~910 °C 两次预冷热处理可减少热处理时间和得出均匀细小碳化物组织。通过两次 900~910 °C 30 min 油冷至 450 °C + 730 °C 2 h 退火炉冷至 400 °C 空冷的试验表明, 预冷处理工艺较 860 °C 4 h, 炉冷至 500 °C 空冷的常规退火工艺钢中球化碳化物分布更均匀、细小, 综合力学性能明显提高。

关键词 马氏体不锈钢 3Cr17Mo 碳化物球化组织 预冷热处理 等温球化退火

A Study of Process on Spheroidizing Structure of Martensite Stainless Steel 3Cr17Mo Improved by Double Pre-Cooling Heat Treatment

Ma Weidong¹ and Ma Yizhu²

(1 College of Mechanical Engineering, Yellow River Conservancy Institute, Kaifeng 475004;
2 National Center for Quality Supervision and Inspection of Building Decoration Materials, Zhengzhou 450004)

Abstract According to the phenomenon of segregation and conglomeration of carbides in annealed steel 3Cr17Mo (/% : 0.25C, 16.5Cr, 0.60Mn, 0.60Si, 1.0Mo, 0.020P, 0.005S), the orthogonal experiments and discrete data analysis on effect of pre-cooling heating temperature (870~960 °C, oil-cooling to 450 °C), pre-cooling times (1~4) and holding time (1~4 h) on structure of steel have been carried out to study the effect of repeated pre-cooling heat treatment on spheroidizing structure of steel 3Cr17Mo. It is obtained that 900~910 °C double pre-cooling heat treatment is available to decrease the time of heat treatment and get structure with uniform and fine carbides. The test results show that as compared with normal annealing process- 860 °C for 4 h, furnace cooling to 500 °C, air cooling, the spheroidizing carbides in steel with double 900~910 °C for 30 min, oil-cooling to 450 °C + annealing at 730 °C 2 h and furnace cooling to 400 °C air cooling is more uniform and fine, its comprehensive mechanical properties improve obviously.

Material Index Martensite Stainless Steel 3Cr17Mo, Carbide Spheroidizing Structure, Pre-Cooling Heat Treatment, Isothermal Spheroidizing Annealing

3Cr17Mo 属于马氏体不锈钢, 具有较好的力学性能和抗腐蚀性能, 广泛应用于塑料模具、量具等方面。3Cr17Mo 钢采用传统的退火工艺会存在碳化物偏析的现象, 直接影响了该钢材的实际使用性能^[1,2]。因此有必要通过合理的热处理工艺改善 3Cr17Mo 钢中的碳化物分布, 从而达到提高该钢材使用性能目的^[3]。

1 工艺方案

针对碳化物偏析的问题采用合适的退火工艺可加以改善, 但传统的退火处理方法往往处理周期长, 而且不易得到分布均匀的小颗粒碳化物。通过分析热处理参数对 3Cr17Mo 钢显微组织特征的影响, 提出了此类不锈钢热处理的新工艺。

1.1 加热温度

合适的加热温度可以得到理想的球化组织, 过低或过高的温度会由于加热不充分、过热甚至过烧

导致热处理的组织缺陷^[4,5]。3Cr17Mo 钢传统退火温度为 850~860 °C, 基于缩短热处理时间、提高热处理效率之目的, 采用比传统退火较高一些的温度来提高碳在奥氏体中的扩散速度。方案中分别以 870、900、930、960 °C 4 个温度作为热处理试验的温度, 采用箱式电阻炉加热试样。

1.2 预冷次数

在退火的加热阶段, 相关研究表明, 加热到一定温度后采用快速油冷的方法, 可以有效改善碳化物组织的带状或网状排列^[6], 进而提高原子的扩散速度。在试样升温到所设定的加热温度(870、900、930、960 °C), 在此温度下保温 30 min 后快速油冷至 450 °C 左右(利用测温仪或经验法控制出油温度), 完成一次预冷; 将一次预冷后的试样重新放入炉中加热到试验温度, 保温 30 min 后再次油冷至 450 °C, 完成二次预冷; 重复前述过程可实现多次预

冷。试验中分别采用不同的预冷次数,分析其对 3Cr17Mo 不锈钢碳化物形成的影响。

1.3 等温时间

等温段是生成球状珠光体的关键阶段,等温时间不足时金属组织中的碳浓度高低分布不均,但时间过长又会造成二次碳化物聚集、组合,致使晶粒长大,并增加热处理的周期和成本^[7-8]。将完成预冷处理后的试样在 730 ℃ 等温段分别保温 1~4 h 后冷却出炉,分析保温时间对碳化物形成的具体影响。

2 试验过程

2.1 试验材料

试验所选材料采用二次精炼→电渣重熔钢→精轧机轧制→钢材热轧态 880 ℃ 退火,其主要化学成分(%)为: 0.25C, 16.5Cr, 0.6Mn, 0.6Si, 1.0Mo, 0.005S, 0.020P。原材料为 30 mm 的热轧钢板,试样线切割为 20 mm × 20 mm × 30 mm 的立方柱。

2.2 正交试验设计

不锈钢的退火处理中,获得均匀且细化的组织会提高钢材的性能。试验中以加热温度、预冷次数、保温时间等 3 个因素为主要研究对象,采用 3 因素(A, B, C)和 4 水平(1, 2, 3, 4)的正交设计,以粒状碳化物的平均直径为主要指标数据,相同大小的视场内碳化物数量作为辅助指标数据,得到正交分析表,试验结果如表 1 所示。

表 1 中, K_{11} 、 K_{12} 、 K_{13} 、 K_{14} 是指标数据为“晶粒平均直径”时的各水平的算术平均值, R_1 为各试验因素的极差值; K_{21} 、 K_{22} 、 K_{23} 、 K_{24} 是指标数据为“碳化物数量”时的各水平的算术平均值, R_2 是指标数据为“碳化物数量”时的试验因素极差值。

分析表 1 的正交试验结果,以晶粒平均直径为参考指标时(指标越小越优),理想的方案应为 $A_4B_4C_2$; 而以碳化物数量为参考指标时(指标越大越优),理想的方案则应为 $A_1B_4C_2$ 。两者中可以同时符合两个指标的优选因素水平是 B_4C_2 , 即采用 3 次预冷及保温 2 h 碳化物平均截面直径最小,且碳化物的数目最多。正交分析结果中 R_1 的 3 个极差数值分别为 0.277、0.538、0.19, R_2 中的 3 个极差数值分别为 60.25、4、52.75, 表明预冷次数对碳化物直径影响较大而对碳化物数量的影响极其微小,且 B 因素的 3 水平和 4 水平的碳化物直径算术平均值非常接近,考虑到热处理的实际操作成本,采用 2 次预冷处理较为理想。由于因素 A 的两个优选水平分歧较大,故在确定 2 次预冷及保温 2 h 的基础上

表 1 3Cr17Mo 钢预冷热处理正交试验结果

Table 1 Results of orthogonal experiment of pre-cooling heat treatment of steel 3Cr17Mo

工艺号	加热温度 (A)/℃	预冷次数 (B)	保温时间 (C)/h	球化物平均直径/μm	碳化物数量
1	870	1	1	2.20	154
2	870	2	2	1.67	143
3	870	3	3	1.58	117
4	870	4	4	1.43	105
5	900	1	2	1.78	118
6	900	2	1	1.71	86
7	900	3	4	1.45	66
8	900	4	3	1.66	103
9	930	1	3	2.02	64
10	930	2	4	1.31	43
11	930	3	1	1.42	82
12	930	4	2	1.25	89
13	960	1	4	1.81	67
14	960	2	3	1.42	130
15	960	3	2	1.22	142
16	960	4	1	1.32	121
K_{11}	1.72	1.953	1.663		
K_{12}	1.65	1.527	1.48		
K_{13}	1.50	1.417	1.67		
K_{14}	1.443	1.415	1.50		
R_1	0.277	0.538	0.19		
K_{21}	129.75	100.75	110.75		
K_{22}	93.25	100.50	123.00		
K_{23}	69.50	101.75	103.50		
K_{24}	115.00	104.50	70.25		
R_2	60.25	4.00	52.75		

表 2 2 次预冷处理的加热温度对 3Cr17Mo 钢碳化物球化直径的影响

Table 2 Effect of heating temperature of double pre-cooling heat treatment on diameter of spheroidized carbide in steel 3Cr17Mo

加热温度/℃	球化物平均直径/μm
870	1.42
900	1.25
930	1.32
960	1.22

有待选择最佳的加热温度。

2.3 加热温度的确定

加热温度分别采用 870、900、930、960 ℃ 4 个温度数据,预冷次数均为 2 次、保温时间均为 2 h。把相同面积的视场内球化颗粒平均截面直径作为量化指标(表 2),并结合观察到的显微组织形态特征确定最佳加热温度。

采用不同加热温度,采用 2 次预冷并保温 2 h 后得到的试样显微组织如图 1。

表 2 中 960 ℃ 时碳化物截面平均直径最小,但根据图 1(d) 的观察,这是缘于显微组织中大量点状渗碳体的存在而使其球状体的平均数值较低。在 930 ℃、960 ℃ 时,随着加热温度的上升造成高温奥氏体晶粒长大,导致后期所形成的碳化物颗粒较为

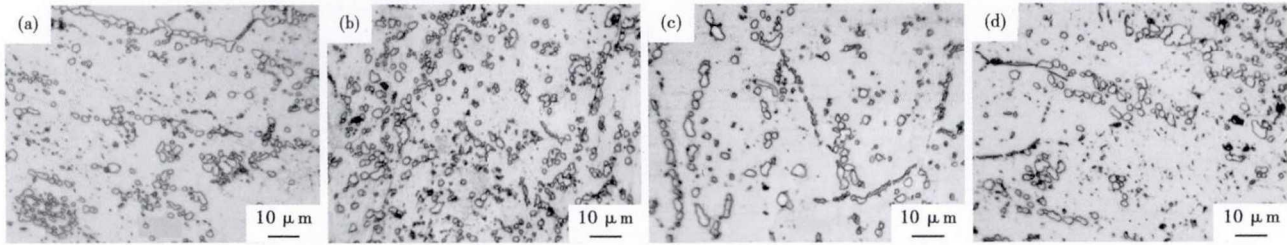


图1 870 °C(a), 900 °C(b), 930 °C(c)和960 °C(d) 2 h 2次预冷处理的3Cr17Mo 钢组织形貌

Fig. 1 Morphology of structure of steel 3Cr17Mo by double pre-cooling heat treatment at 870 °C (a), 900 °C (b), 930 °C (c) and 960 °C (d) for 2 h

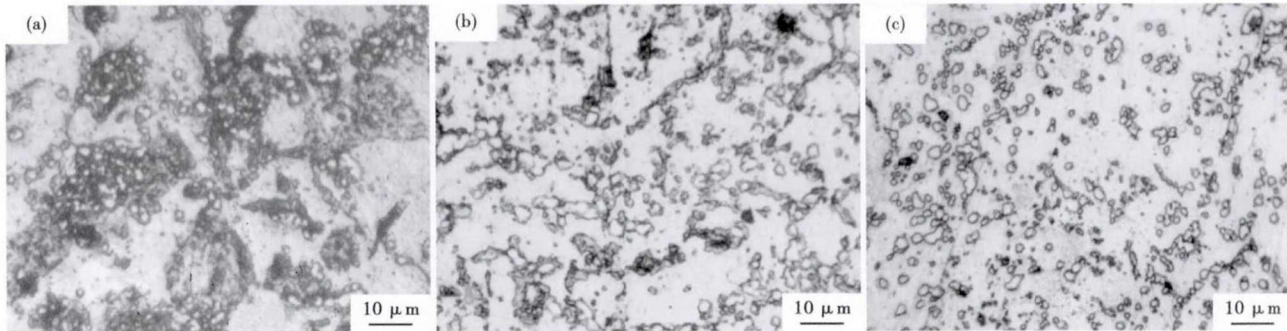


图2 热轧后880 °C退火(a), 常规退火-860 °C 4 h, 炉冷至500 °C空冷(b)和新工艺-2次900~910 °C 30 min, 油冷至450 °C +730 °C 2 h, 炉冷至400 °C空冷(c)的3Cr17Mo 钢组织形貌

Fig. 2 Morphology of structure of steel 3Cr17Mo by annealing at 880 °C after hot-rolling (a), normal annealing- at 860 °C for 4 h, furnace cooling to 500 °C, air cooling (b) and new process- double pre-cooling heat treatment at 900~910 °C for 30 min, oil cooling to 450 °C +730 °C for 2 h, furnace cooling to 400 °C, air cooling (c)

粗大。图1(d)显示960 °C加热后形成的碳化物是由球状颗粒和点状颗粒两种形态所构成,碳化物颗粒直径大小差别显著。综合考虑采用900~910 °C作为加热温度比较适宜,这个温度比常规的加热温度要高一些,采用此温度再辅以适当的预冷和保温,可以达到大幅减少热处理时间之目的,最大限度的提高热处理效率。

3 试验结果及性能分析

试验表明,新的球化处理工艺路线可归纳为:常温入炉→900~910 °C炉内30 min→快速油冷至450 °C→出油后900~910 °C炉内30 min→再次油冷至450 °C→放入炉中后730 °C保温2 h→400 °C后出炉空冷。新工艺相比起常规的退火工艺而言,金相组织的形态得到明显改善,热处理时间大幅降低。

3.1 显微组织分析

图2显示了不同工艺条件下的3Cr17Mo钢显微组织,图2(a)为热轧后880 °C退火状态;图2(b)为采用常规的完全退火后的组织状态,即加热到860 °C保温4 h后炉冷到500 °C以下出炉;图2(c)是采用新工艺处理后的3Cr17Mo钢组织状态。图2(a)中浅色的为铁素体,深色的是珠光体,碳化物偏

析严重;比较图2(b)和图2(c),可以看出相对于常规的退火处理,采用新工艺处理后的3Cr17Mo钢中渗碳体高度球状化且分布更为均匀。

3.2 硬度均匀性分析

分别取3Cr17Mo钢的原材料、常规退火工艺以及新处理工艺后的试样,将检测试样制成相同大小的六方体,在六方体上的每个平面各取3个测量点,采用布氏硬度测量不同点位的硬度值,见表3。

表3 (1)热轧后880 °C完全退火,(2)常规退火860 °C 4 h,炉冷至500 °C空冷和(3)新工艺-900~910 °C 30 min,油冷至450 °C 2次预冷处理+730 °C 2 h炉冷至400 °C空冷退火处理的3Cr17Mo钢HB硬度值

Table 3 HB hardness value of steel 3Cr17Mo treated by (1) annealing at 880 °C after hot-rolling, (2) normal annealing- at 860 °C for 4 h, furnace cooling to 500 °C, air cooling, and (3) new process- double pre-cooling heat treatment at 900~910 °C for 30 min, oil cooling to 450 °C +730 °C 2 h, furnace cooling to 400 °C, air cooling

六方体截面	(1)原材料	(2)常规退火工艺	(3)新处理工艺
A	131, 103, 111	111, 111, 103	103, 103, 103
B	156, 143, 131	131, 131, 111	103, 111, 103
C	111, 121, 131	95.5, 103, 95.5	111, 111, 111
D	121, 121, 111	121, 111, 103	95.5, 95.5, 103
E	131, 131, 121	95.5, 103, 95.5	95.5, 103, 103
F	131, 143, 131	95.5, 103, 103	103, 103, 103

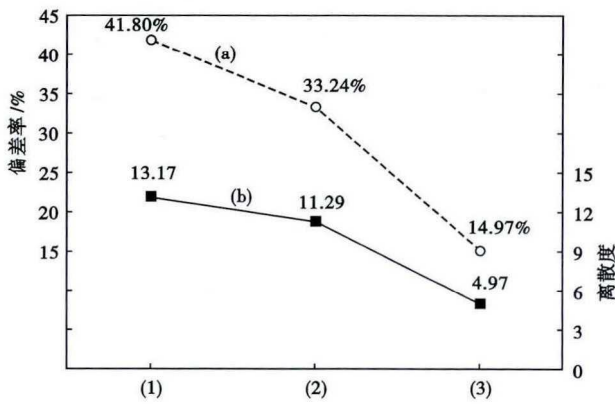


图3 热轧后 880 ℃ 完全退火(1)、常规 860 ℃ 4 h 炉冷至 500 ℃ 空冷退火(2)和新工艺- 900 ~ 910 ℃ 30 min, 油冷至 450 ℃ 2 次预冷处理 + 730 ℃ 2 h 炉冷至 400 ℃ 空冷退火(3)的 3Cr17Mo 钢硬度不均匀性的偏差率 (a) 及离散度 (b)

Fig. 3 Deviation rate (a) and discrete extent (b) of inhomogeneity of hardness of steel 3Cr17Mo by annealing at 880 ℃ after hot-rolling (1), normal annealing- at 860 ℃ for 4 h, furnace cooling to 500 ℃, air cooling (2) and new process- double pre-cooling heat treatment at 900 ~ 910 ℃ for 30 min, oil cooling to 450 ℃ + 730 ℃ 2 h, furnace cooling to 400 ℃, air cooling (3)

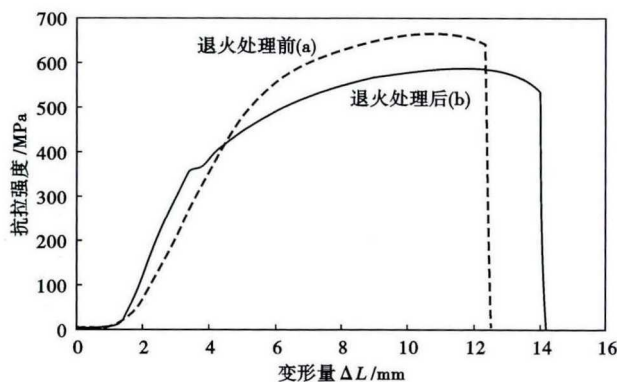


图4 退火处理前(a)和 2 次预冷处理 + 730 ℃ 2 h 退火后 (b) 3Cr17Mo 钢的拉伸试验曲线

Fig. 4 Tensile curves of steel 3Cr17Mo before annealing (a) and by double pre-cooling heat treatment + 730 ℃ 2 h annealing (b)

为便于直观反映出 3 种试样的硬度分布特征, 从偏差率和离散度两个方面来反映其硬度值的差异。用所测硬度值的最大差值比去平均值得到偏差率, 用以反映硬度值上下波动的幅度; 采用标准方差统计得到离散度, 用以反映各硬度值的离散程度。

图 3 的曲线显示, 采用新的退火工艺之后, 其偏差率(曲线 a)和离散度(曲线 b)数值均为最小, 不同检测位置的硬度数值趋于均衡, 说明球状碳化物的分布更为均匀, 软点现象得到了明显改善。

3.3 拉伸试验分析

热处理工艺前后拉伸曲线见图 4, 拉伸试样截面面积为 24 mm², 原始标距为 40 mm。新工艺处理前抗拉强度为 660 MPa、测得断后标距为 46.9 mm, 断后延伸率为 17.25%; 处理后抗拉强度为 579 MPa, 断后标距为 50.2 mm, 断后延伸率 25.5%。由图 4 可知, 虽然采用新的退火工艺处理后拉伸强度比处理前略低, 但在拉伸试验过程中出现了较为明显的屈服现象, 其伸长率也明显增加, 说明材料的塑性通过新工艺处理之后得到了提高。

4 结论

采用提高加热温度至 900 ~ 910 ℃, 并在加热期间通过两次快速油冷至 450 ℃ 的方式来消除带状或网状碳化物, 最后在 730 ℃ 等温段保温 2 h 以使碳化物颗粒更加均匀和细化。与 860 ℃ 4 h, 炉冷至 500 ℃ 空冷的常规工艺比较, 新的工艺措施使处理后的 3Cr17Mo 钢碳化物的形态和分布有了明显改善, 材料的综合性能得到显著提高。

河南省教育厅高等学校重点科研项目(15A460027)

参考文献

- [1] 张蜀红. 新型模具材料 3Cr17NiMo 热处理性能研究[J]. 铸造技术, 2009, 30(8): 1047-1049.
- [2] 赵亮, 马党参, 刘建华, 等. 淬回火工艺对马氏体不锈钢 3Cr17Mo 组织和力学性能的影响[J]. 特殊钢, 2006, 27(2): 58-60.
- [3] 邹安全. 改善 Cr12 钢不均匀性碳化物分布的热处理工艺研究[J]. 中国机械工程, 2005, 16(7): 645-647.
- [4] 刘海涛. 退火温度对超纯 Cr17 铁素体不锈钢冷轧板成形性能的影响[J]. 东北大学学报(自然科学版), 2010, 31(9): 1262-1269.
- [5] Li Hua-bing, Jiang Zhou-hua, Cao Yang, et al. Fabrication of High Nitrogen Austenitic Stainless Steels with Excellent Mechanical and Pitting Corrosion Properties [J]. International Journal of Minerals Metallurgy and Materials, 2009(4): 387-392.
- [6] 郭淑娟. 预冷等温球化退火工艺对 Cr12 型模具钢组织性能的影响[J]. 科学技术与工程, 2011, 11(8): 5-8.
- [7] 黄志涛, 田文怀, 李春华, 等. 碳化物形态及回火时间对 Cr12MoV 钢热处理畸变的影响[J]. 金属热处理, 2016, 41(11): 26-30.
- [8] 赵晓磊, 吴志星, 张晓健, 等. 不同热处理工艺下的 2Cr13 组织和性能[J]. 热加工工艺, 2015, 44(12): 220-222.

马卫东(1970-), 男, 工程师, 讲师, 1992 年江西理工大学(本科)毕业, 机械制造研究。E-mail: mawd@163.com

收稿日期: 2017-06-25