

球化退火工艺对 440C 轴承钢碳化物影响研究

马帅, 李阳*, 姜周华, 孙萌, 毛昀愜, 马彦硕, 李天赐, 王禹程

东北大学冶金学院, 沈阳 110819

Effect of spheroidizing annealing process on the carbide of 440C bearing steel

Ma Shuai, Li Yang, Jiang Zhouhua, Sun Meng, Mao Yunqie, Ma Yanshuo, Li Tianci,
Wang Yucheng

School of Metallurgy, Northeastern University, Shenyang, 110819, China

1. 前言

440C 钢是一种高碳高合金轴承钢, 在航空航天、装备制造等领域有着广泛的应用。在完成锻造后的 440C 钢中分布着大量的碳化物, 这些碳化物不仅硬度较高, 难于切削加工, 而且会增加钢的脆性, 造成淬火变形甚至开裂^[1]。因此, 对锻造后钢材进行的球化退火尤为重要, 其目的在于降低钢材硬度, 得到球状碳化物颗粒, 并为后续的淬火做好组织准备^[2]。Li 等^[3]研究了退火工艺参数对 1.0C-1.5Cr 轴承钢等温球化过程的影响, 结果表明: 当奥氏体化时间从 0.5 h 增加到 7 h, 或奥氏体化温度从 760 °C 增加到 880 °C 时, 碳化物平均直径和颗粒间距均增大。尹德福等^[4]对 GCr15 轴承钢 60 mm 棒料进行了不同工艺的球化退火, 结果表明, 经加热至 790 °C、保温 3.7 h 炉冷至 720 °C 保温 3.2 h 炉冷球化退火的 GCr15 钢组织较细小均匀, 接触疲劳寿命 L10 达 1.2×10^7 次。目前, 大部分球化退火研究仅停留在 Cr 含量 1% 左右的轴承钢, 对高 Cr (15% 以上) 轴承钢球化退火研究较少。因此, 本文通过设计不同的 440C 钢球化退火工艺制度, 观察其对 440C 钢中二次碳化物影响, 以探索最佳的球化退火温度与时间。

2. 实验材料和步骤

本文以 440C 轴承钢为研究对象, 在锻造后的方棒上切取 8 个尺寸为 10 mm × 10 mm × 8 mm 的试样 (8 mm 高为垂直于锻造方向的横向, 即实验观察面为纵向), 分别进行球化退火温度与保温时间的探索。其中 4 个试样用于球化退火温度探索, 分别取 T = 800 °C、850 °C、900 °C、950 °C 的温度梯度, 保温时间均为 4 h; 另外 4 个试样进行保温时间探索, 分别取保温时间 t = 1 h、2.5 h、4 h、7 h, 选择球化退火温度为 900 °C。退火后将试样由中间切成两个 10 mm × 10 mm × 4 mm 的试样, 对试样的 10 mm × 10 mm 平面进行打磨、抛光至表面光亮无划痕, 对抛光后的试样进行腐蚀, 采用的腐蚀剂成分为: 50 mL HCl + 50 mL 无水乙醇 + 10 g FeCl₃, 腐蚀时间: 5 s。将腐蚀后的纵向试样置于 Quanta 250 FEG 场发射扫描电子显微镜下观察球化退火后的碳化物形貌, 各随机拍取 10 张照片, 用于二次碳化物统计。

3. 结果与分析

3.1 球化退火温度探索

不同球化退火温度下钢中碳化物形貌如图 1 所示。从图中可以看出, 800 °C 下未达到 440C 钢的奥氏体化温度, 球化退火后碳化物仍具有明显的方向性, 碳化物溶解不明显; 850 °C 及 900 °C 下碳化物球化明显, 而 950 °C 球化退火下大尺寸碳化物较多, 碳化物数量变少。对钢中碳化物的个数、平均面积、面积占比、 R_{\max}/R_{\min} 及圆形度进行统计。表 1 为碳化物统计结果。随着退火温度由 800 °C 提高到 950 °C, 碳化物

个数由 2591 个降低到 1573 个，碳化物的平均面积从 0.237 μm^2 增加到 0.323 μm^2 ，圆形成度由 2.750 降低到 1.610，且圆形成度会随温度上升呈先快后慢的下降趋势。

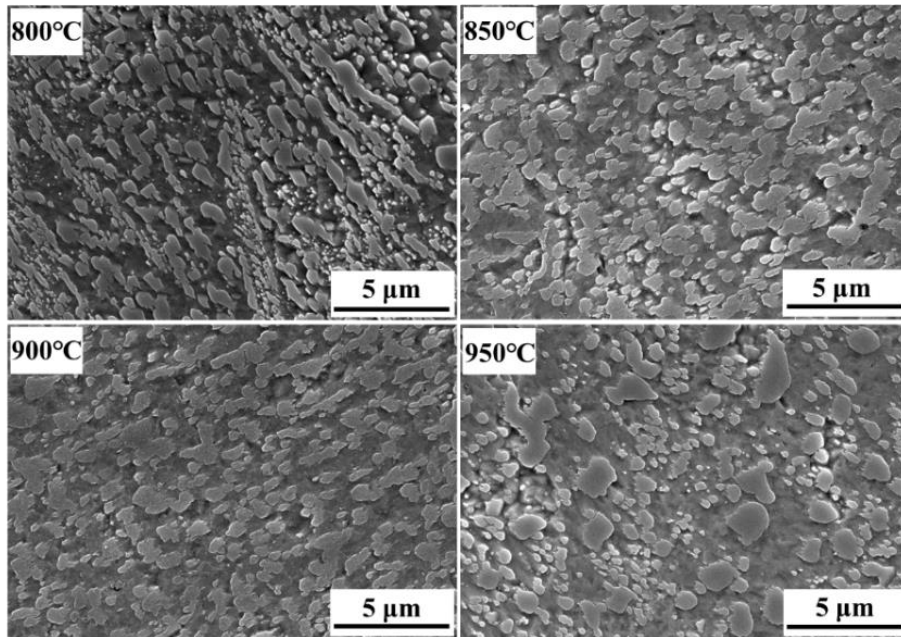


图 1 不同退火温度下碳化物形貌

Fig. 1 Carbide morphologies at different annealing temperatures

表 1 不同球化退火温度下碳化物统计

Table 1 Carbide statistics at different spheroidizing annealing temperatures

温度/ $^{\circ}\text{C}$	碳化物个数/个	平均面积/ μm^2	面积占比/%	$R_{\text{max}}/R_{\text{min}}$	圆形成度
800	2591	0.237	41.77	3.018	2.750
850	2265	0.241	37.13	2.747	2.536
900	1662	0.276	31.20	2.115	1.704
950	1573	0.323	34.56	1.906	1.610

经典 LSW 理论^[5]认为，碳化物在球化过程中粒子半径 r 与时间 t 有如下关系：

$$\frac{dr}{dt} = M \left(\frac{1}{\bar{r}} - \frac{1}{r} \right) \quad (1)$$

其中， M 与基体中合金元素的浓度、碳化物中合金元素的浓度、气体常数、绝对温度、碳化物与基体之间的界面能等因素有关； \bar{r} 为粒子的平均半径。由式（1）可以看出，只有当碳化物的半径 $r > \bar{r}$ ，即碳化物半径大于平均半径时才会长大，而小于平均半径的碳化物将会溶入基体，这也是本实验中碳化物的个数逐渐减少，而平均面积逐渐增加的原因。

可以看出：随退火温度的升高，碳化物的圆形成度逐渐变小，但同时也带来了碳化物长大的不利影响，以 950 $^{\circ}\text{C}$ 下最为明显。综上，本实验条件下选择 900 $^{\circ}\text{C}$ 作为最佳球化退火温度。

3.2. 球化退火保温时间探索

不同保温时间的试样中碳化物形貌如图 2 所示。可以看出随保温时间的增加，碳化物逐渐减少，且存在碳化物长大现象。球化退火保温时间为 1 h 时，条状碳化物有所改善，但转化不完全，钢中碳化物较多；增加保温时间到 2.5 h，球化效果进一步优化，但仍存在连续的链状碳化物；当保温时间为 4 h 时，球化效果较好，但尺寸较小的碳化物溶解，钢中出现了大小不一的碳化物；当保温时间继续增加至 7 h，钢中碳化物颗粒明显减少，碳化物间距增加，且碳化物直径较大，这也符合奥斯瓦尔德熟化机制^[6]。不同保温时间

下的碳化物统计结果如表 2 所示。可以看出随保温时间的延长，碳化物的平均面积呈增→减→增的趋势，在保温 7 h 条件下尺寸增加明显，达到了 $0.428 \mu\text{m}^2$ ；圆形成度由 1.721 下降到 1.408，逐渐趋向于 1。碳化物个数由保温 1 h 的 1032 个降低到保温 7 h 的 534 个，碳化物数量减少了一半，且面积占比逐渐减小，由 45.96%减小到 30.47%； $R_{\text{max}}/R_{\text{min}}$ 也由 2.324 降低到 1.828，说明碳化物的球形度逐渐接近于 1。

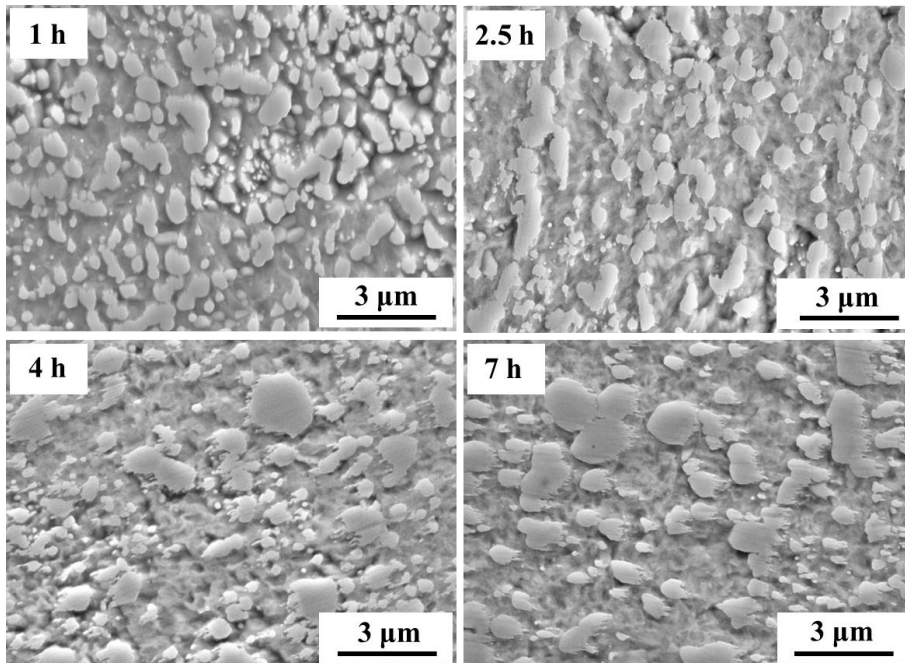


图 2 不同保温时间下碳化物形貌

Fig. 2 Carbide morphologies under different holding times

表 2 不同球化退火保温时间下碳化物统计

Table 2 Carbide statistics under different spheroidizing annealing holding time

时间/h	碳化物个数/个	平均面积/ μm^2	面积占比/%	$R_{\text{max}}/R_{\text{min}}$	圆形成度
1	1032	0.334	45.96	2.324	1.721
2.5	870	0.383	44.13	2.247	1.656
4	903	0.327	39.37	2.018	1.550
7	534	0.428	30.47	1.828	1.408

根据 Ostwald 熟化机制，钢中小尺寸的碳化物会逐渐溶解，并在降温过程中在大尺寸碳化物周围析出，导致随着保温时间增加，碳化物的数量减少，而尺寸增大。Ostwald 熟化过程中，碳化物的长大速率可表示为^[7]：

$$m = \left(\frac{8\sigma V_p^2 D c_0}{9V_B c_p RT} \right)^{\frac{1}{3}} \quad (2)$$

式中， m 为碳化物粗化速率； σ 为碳化物于基体之间的比界面能； V_p 为钢中碳化物的摩尔体积； D 为溶质原子在基体中的扩散系数； c_0 为溶质原子在基体中的平衡浓度； V_B 为溶质元素的摩尔体积； c_p 为控制性元素在碳化物中的平衡摩尔浓度。由式（2），在确定的碳化物中， σ 、 V_p 、 D 等均为定值，碳化物的粗化速率主要受溶质原子在基体中的平衡浓度 c_0 的影响，而在碳化物生长过程中，基体中溶质原子的浓度逐渐减小，这会导致碳化物的生长粗化速率逐渐减小，本实验中由保温 4 h 到保温 7 h，碳化物的平均面积由 0.327 增加到 0.428，这是小尺寸碳化物的溶解和大尺寸碳化物长大的共同作用。

可以看出：随保温时间的延长，碳化物的球化效果越好，但保温时间的延长同样会导致碳化物的聚合长大，同时会浪费能耗。综上，本实验条件下选择 4 h 为最佳球化退火保温时间。

4. 结论

（1）球化退火温度探索实验显示：退火温度的升高有利于碳化物的球化，但过高的温度会造成碳化物长大，本实验的最佳球化退火温度为 900 °C。

（2）球化退火时间探索实验显示：保温时间的延长有利于碳化物球化，但同样会带来碳化物聚合长大，本实验的最佳球化保温时间为 4 h。

（3）结合球化温度及保温时间实验，最终确定 440C 钢的最佳球化退火工艺为 900 °C 下保温 4 h。

致谢

感谢国家自然科学基金（52074075）和教育服务东北振兴产学研用合作重点项目课题“汽车用高端特殊钢棒线材制备关键技术”对本研究的资助。

参考文献

- [1] 崔忠圻, 覃耀春. 金属学与热处理[M]. 北京: 机械工业出版社. 2007, 108-109.
- [2] 周宏亮, 黄训增, 杨弋涛. 球化退火工艺对 55MnB 钢碳化物球化效果的影响[J]. 金属热处理, 2015, 40(2): 135-139.
- [3] Li Z X, Li C S, Zhang J, et al. Effects of annealing on carbides size and distribution and cold formability of 1.0 C-1.5 Cr bearing steel[J]. Metallurgical and Materials Transactions A, 2015, 46: 3220-3231.
- [4] 尹德福, 汪开忠, 丁雷, 等. 球化退火工艺对 GCr15 轴承钢组织和疲劳性能的影响[J]. 热处理, 2023, 38(1): 37-39.
- [5] 李晶. 特殊钢中碳化物控制[M]. 北京: 冶金工业出版社. 2019, 2.
- [6] Prat O, Garcia J, Rojas D, et al. Investigations on coarsening of MX and M₂₃C₆ precipitates in 12% Cr creep resistant steels assisted by computational thermodynamics[J]. Materials Science & Engineering A, 2010, 527(21-22): 5976-5983.
- [7] 张志慧, 杨卯生, 孙世清, 等. 高氮不锈钢轴承钢碳化物演变规律及球化机制[J]. 材料热处理学报, 2017, 38(9): 104-113.