

基于回火 P 参数的低碳贝氏体钢回火性能预测

孙国进^{1,2}, 朱兴林^{1,2}, 崔国明^{1,2}

(1. 河南工学院 材料科学与工程学院, 河南 新乡 450003;
2. 新乡市材料成形技术与模具重点实验室, 河南 新乡 450003)

摘要: 以低碳贝氏体钢为研究对象, 讨论了回火参数对材料硬度的影响, 基于回火 P 参数理论建立了钢的回火性能预测模型, 绘制了回火参数换算图。硬度误差分析结果显示, 误差在 15% 以内, 此模型可以用于回火工艺参数的优化和回火性能的预测。

关键词: 回火处理; P 参数; 低碳贝氏体钢; 算图

中图分类号: TG156.5; TG142.1

文献标志码: A

文章编号: 2096-7772-(2024)01-0014-04

0 引言

随着先进冶炼技术的不断发展, 严格控制钢中 S、P 等杂质的含量, 已经成为冶炼高性能钢种的常用手段^[1-3]。低碳贝氏体钢正是在纯净冶炼技术的基础上开发的新型钢种^[4-6]。由于采用了细晶强化、微合金强化和沉淀强化等方式, 低碳贝氏体钢具有优良的机械性能, 在桥梁、海上平台等领域具有广泛的应用空间^[7-9]。由于低碳贝氏体钢具有优良的综合力学性能和成型能力, 所以可以用于制备传递动力的扭力棒零件。与大多数钢类似, 低碳贝氏体钢在作为扭力棒使用过程中需要进行热处理, 以进一步改善其使用性能。回火热处理常常作为钢热处理的最后处理工艺, 对于材料力学性能优化尤其重要。温度和时间是回火处理过程中的两个关键参数, 也是精确控制和预测钢回火性能的关键^[10-13]。为了建立回火预测模型, Hollomon 等人在扩散理论的基础上提出了回火 P 参数理论, 将回火温度和回火时间综合成为一个单一的 P 参数^[14]。基于回火 P 参数所建立的回火预测模型,

不但用于钢回火性能的预测, 而且还可以用于回火工艺的优化和调整。国外热处理企业在早期就已经建立了常见钢种的回火模型并用于回火工艺优化设计, 然而我国在这方面的的工作并没有被足够重视, 大部分热处理企业依然是根据生产经验调整回火工艺^[15, 16]。

基于此, 本文以低碳贝氏体钢为研究对象, 基于回火 P 参数理论建立了回火方程, 绘制了回火参数换算图, 为低碳贝氏体回火工艺优化提供支持。

1 实验方法

本研究材料为低碳贝氏体钢, 试样经控制轧制后水冷, 主要化学成分如表 1 所示。在坯料上切取厚度为 5 mm 的试样, 然后在 200—700 °C 回火 0.5 h、1.0 h、1.5 h 和 2.0 h。回火后的试样磨制和抛光后, 采用 4% 的硝酸酒精腐蚀, 观察分析微观组织。采用 HV-1000 型显微硬度计测量试样硬度, 每个试样测量位置不少于 10 个点, 取平均值作为该试样最终硬度。基于显微硬度数据建立钢的回火 P 参数模型, 绘制回火温度和回火时间换算图。

表 1 钢主要化学成分 (质量分数, %)

C	Si	Mn	P	S	Ni	Nb	Cr	Mo
0.04	0.2	1.8	<0.006	<0.006	<1.0	0.015—0.07	<0.7	<0.5

收稿日期: 2023-12-20

基金项目: 河南省科技攻关项目 (232102220064); 河南省首批专创融合特色示范课程项目 (工程材料设计创新)

第一作者简介: 孙国进 (1982—), 男, 河南商丘人, 副教授, 博士, 主要从事金属材料热处理及模拟仿真研究。

2 结果与讨论

2.1 回火工艺对硬度的影响

回火温度和回火时间对材料硬度的影响如图 1 所示。

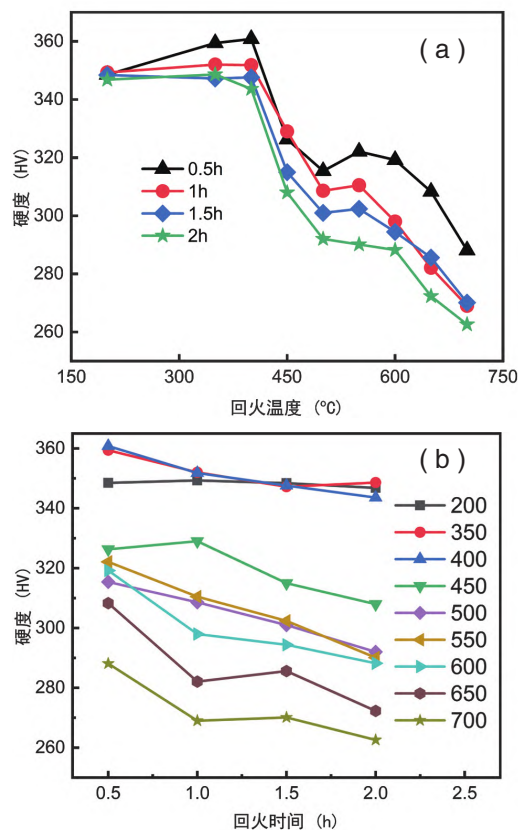


图 1 回火参数对材料硬度的影响 (a) 回火温度; (b) 回火时间

从图 1 中可以看出, 在低温范围内回火时, 随着回火温度的升高, 硬度呈缓慢上升的趋势, 并且在 400 °C 附近达到最大值; 当回火温度再升高时, 钢的硬度又开始下降; 当回火温度升高到 550 °C 附近时, 有轻微的回火二次硬化现象出现; 当回火温度超过 600 °C 时, 硬度急剧下降。回火时间对材料硬度的影响相对简单, 随着回火时间的延长材料硬度呈现下降趋势, 并最终趋于稳定。

本研究中低碳贝氏体钢所呈现出的复杂硬度分布与回火过程中的组织变化有关, 当回火时间为 0.5 h 时, 回火温度对材料微观组织的影响如图 2 所示。

从图 2 可以看出, 低碳贝氏体钢在经过低温回火后, 其微观组织变化不大, 但是残余奥氏体在低温回火过程中会转变分解, 这就造成了硬度在低温回火过程中随着温度的升高而升高。当回火温度继续升高时, 残余奥氏体的分解使硬度继续升高, 但是在此期间, 板条马氏体的转变和 M-A 岛的分解又会降低材料的硬度, 在两者的共同作用下造成了材料在 350—

500 °C 之间回火时, 随着回火温度的升高硬度呈现下降的趋势。而材料在 550 °C 所呈现出的轻微二次硬化, 可能是因为 NbC 的析出造成的^[17, 18]。当回火温度超过 550 °C 时, 由于回火温度高、马氏体完全分解、碳化物粗化以及块状铁素体组织的出现, 材料硬度急剧下降。

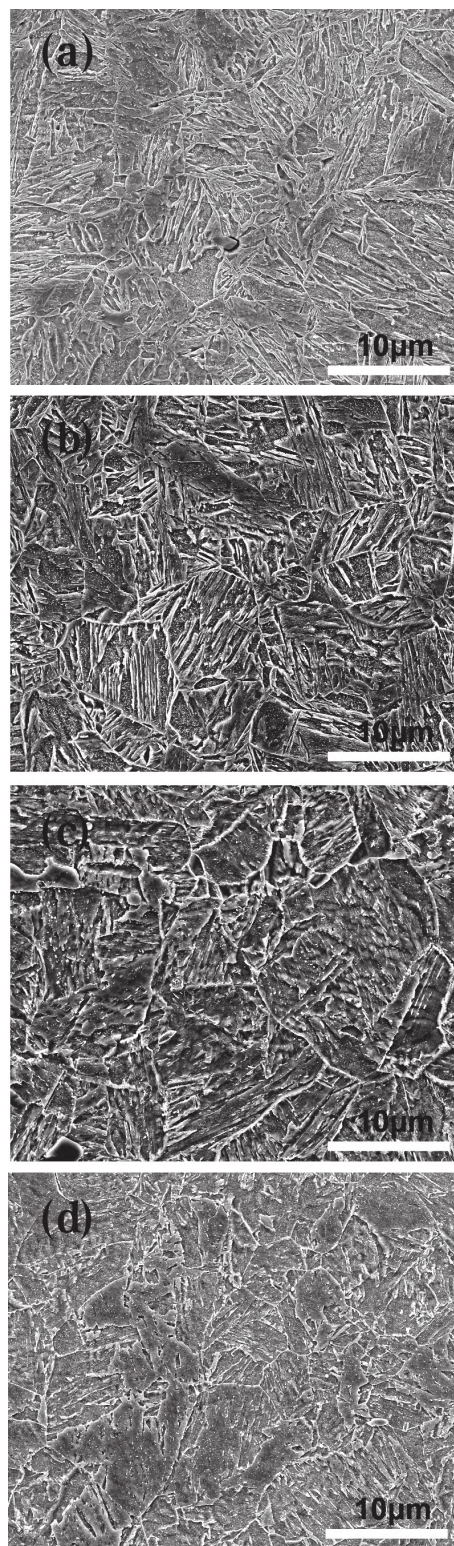


图 2 不同回火温度下材料微观组织 (a) 原始水冷态; (b) 200 °C; (c) 500 °C; (d) 600 °C

2.2 回火模型的建立

回火过程中合金元素在热激活作用下扩散和析出，这一过程遵循 Arrhenius 原理^[19, 20]。基于 Arrhenius 原理，Hollomon 和 Jaffe 将回火温度和回火时间综合为一个单独的 P 参数^[14]，回火后的性能可以看作是 P 参数的函数，即：

$$H = f[P] \quad (1)$$

其中：

$$P = T(K + \lg t) \quad (2)$$

K 为常数；

t 为回火时间，单位小时 (h)；

T 为回火温度，单位绝对温度 (K)。

通过回火 P 参数可以将回火过程中的温度和时间间的二元函数，转变为简单的一元函数，这极大地简化了回火模型的建立和回火性能的预测。而对于不同的回火温度和回火时间，只要对应的 P 参数值相等，那么理论上来说其回火后的力学性能数值也必将相等，这为回火工艺的优化和调整提供了理论依据。

试验结果显示，式 (2) 回火 P 参数中的常数 K ，仅与钢中的碳含量有关，当回火时间以小时为单位时，常数 K 与钢中碳含量关系为：

$$K = 21.3 - 5.8 \times 100(C\%) \quad (3)$$

本研究的低碳贝氏体钢的碳含量 ($C\%$) 为 0.04%，代入式 (3) 可得 K 的取值为 21.1，计算了不同回火温度和回火时间对应的 P 参数值，如表 2 所示。回火 P 参数对低碳贝氏体钢硬度的影响如图 3 所示。

表 2 不同回火温度和回火时间的回火 P 参数值 ($\times 10^3$)

回火温度 ($^{\circ}\text{C}$)	回火时间 (h)			
	0.5	1.0	1.5	2.0
200	9.8	9.9	10.0	10.1
350	12.9	13.1	13.2	13.3
400	13.9	14.1	14.3	14.3
450	15.0	15.2	15.3	15.4
500	16.0	16.2	16.4	16.5
550	17.0	17.3	17.4	17.5
600	18.1	18.3	18.5	18.6
650	19.1	19.4	19.5	19.7
700	20.1	20.4	20.6	20.7

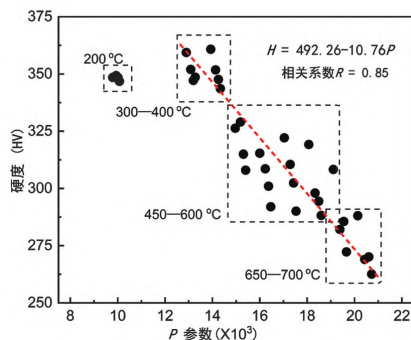


图 3 钢的回火 P 参数曲线

从图 3 可以看出，除低温范围，回火后的硬度与回火 P 参数基本呈线性关系。经线性拟合，得到本文所研究低碳贝氏体钢的回火模型为：

$$H = 492.6 - 10.76 T(21.1 + \lg t) \quad (4)$$

本模型的相关系数为 0.85，具有较高的精度。

2.3 误差分析及性能预测

将回火温度和回火时间工艺参数代入式 (4)，就可以对回火性能进行预测计算，将试验测量值与计算预测值进行对比得到了如图 4 所示的对比图和误差分布图。

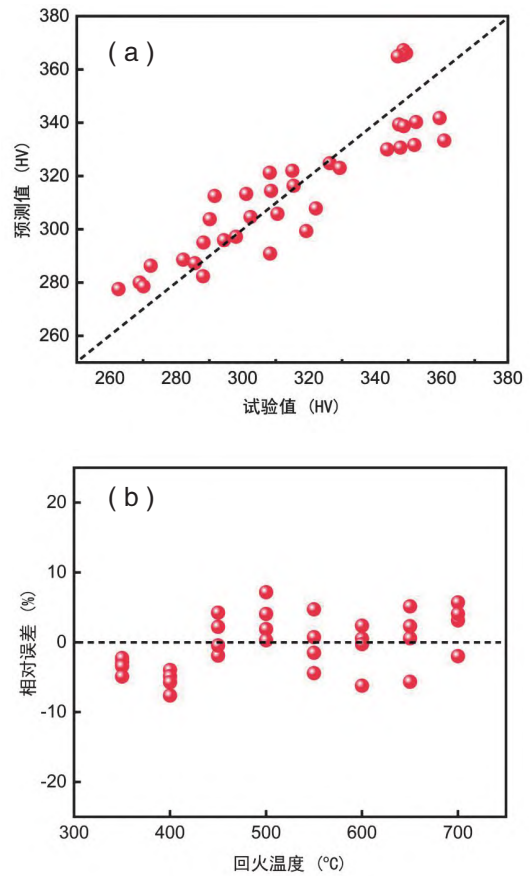


图 4 模型精度分析 (a) 计算值与实测值对比；
(b) 模型误差分布

从图 4 模型精度分析结果可以看出，本研究基于回火 P 参数所建立的低碳贝氏体钢预测模型预测值与试验测量值较为吻合，计算值与试验测量值之间的相对误差在 10% 以内。

从上述误差分析可以看出，本研究基于回火 P 参数所建立的回火性能预测模型，可以用于低碳贝氏体钢回火性能的预测。为了便于回火工艺参数优化设计，基于回火 P 参数建立了如图 5 所示的回火工艺参数换算图。

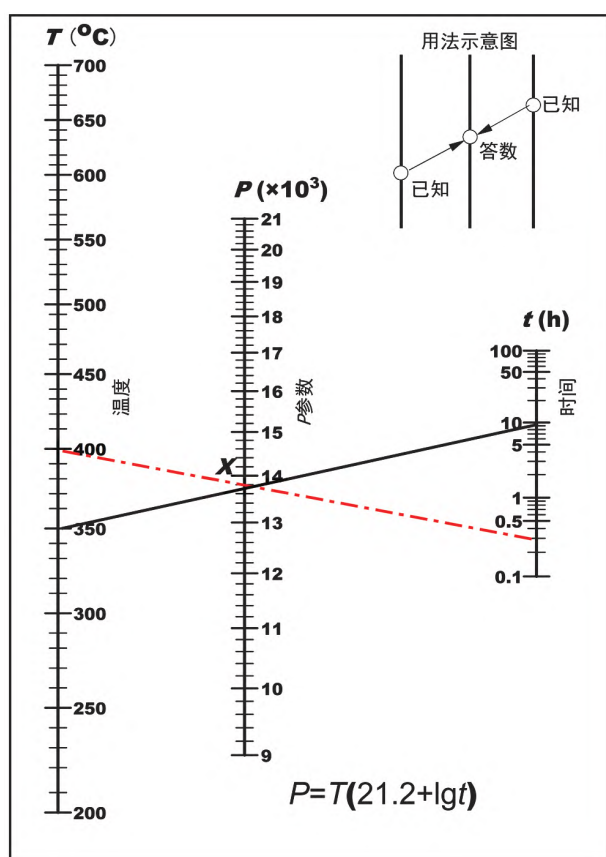


图5 回火工艺参数转换算图

在实际回火生产过程中,假如对应的回火工艺为350℃回火10h,为缩短回火时间可以通过提高回火温度的方法来实现。具体方法为,连接原回火温度和回火时间,与 P 参数轴交于点 X ,然后通过 X 点做一条直线,直线与温度 T 轴和时间 t 轴的交点,就是优化后的回火工艺参数,即400℃回火0.3h。可以看出,采用本研究所绘制的回火工艺参数转换算图,可以非常方便地进行回火工艺参数的优化和调整。

3 结论

1) 基于回火 P 参数理论建立的低碳贝氏体钢的回火硬度预测模型为, $H=492.26-10.76T(21.1+\lg t)$,其中回火温度 T 的单位取摄氏度,回火时间 t 的单位取小时,模型误差在10%以内;

2) 硬度误差分析显示,本模型相对误差在15%以内,可以用于回火硬度的预测及回火工艺参数的优化;

3) 基于回火 P 参数绘制了回火工艺参数转换算图。

参考文献:

- [1] 杨利彬. “十三五”中国炼钢关键技术进步及思考[J]. 钢铁, 2022, 57(8): 1-10.
- [2] 宗男夫, 张慧, 张兴中. 国内外高品质轴承钢洁净化与均质化控制技术的进展[J]. 轴承, 2017(1): 48-53.
- [3] 孙敬明. 精炼炉洁净钢冶炼工艺探究[J]. 冶金与材料, 2023, 43(1): 142-144.
- [4] 冯绍强, 黄斌, 罗友元, 等. 低碳贝氏体钢CW590L生产技术开发[J]. 钢铁钒钛, 2011, 32(2): 69-73.
- [5] 戴钊, 郭智, 龙晓燕, 等. Si含量对高碳贝氏体钢微观组织与性能的影响[J]. 金属热处理, 2023, 48(9): 165-173.
- [6] RAHMAN S A A E, SHASH A, EL-FAWKHRY M K, et al. Designing, Processing and Isothermal Transformation of Al-Si Medium Carbon Ultrafine High Strength Bainitic Steel[J]. Defect and Diffusion Forum, 2017, 380: 1-11.
- [7] 龚丽, 张弦, 刘静, 等. 显微组织对微纳结构贝氏体钢海洋腐蚀行为的影响[J]. 钢铁研究学报, 2023, 35(8): 1025-1036.
- [8] 刘志桥, 冯庆晓, 李化龙, 等. 退火工艺对低碳贝氏体钢组织与力学性能的影响[J]. 金属热处理, 2022, 47(3): 53-56.
- [9] 范苛, 魏子海, 邢炜, 等. 低碳贝氏体钢在寒冷地区电站风机上的应用[J]. 焊接技术, 2022, 51(2): 60-63.
- [10] 郭从盛, 夏鹏举, 张会, 等. CrWMn钢等硬度回火曲线的建立及应用[J]. 铸造技术, 2009, 30(9): 1141-1143.
- [11] 赵帆, 周文健, 张志豪. 稀土钨对H13模具钢回火稳定性和抗氧化性的影响[J]. 材料导报, 2023, 37(2): 128-133.
- [12] 万勇, 马冬, 迟敦苇, 等. 中碳高硅高铝钢回火过程石墨析出动力学[J]. 金属热处理, 2023, 48(10): 225-230.
- [13] 孙国进, 郜家武, 任泰安, 等. 石油套管用钢的回火性能预测[J]. 材料热处理学报, 2020, 41(8): 166-172.
- [14] HOLLOMON J H and JAFFE J H. Time-temperatures relations in tempering steel[J]. Transactions of the American Institute of Mining and Metallurgical Engineers, 1945, (162): 223-249.
- [15] 郭从盛, 龙姝明, 李海娃, 等. 淬火钢回火特性函数的建立与节能热处理[J]. 金属热处理, 2012, 37(2): 53-56.
- [16] SEMIATIN S L, STUTZ D E, BYRER T G. Induction tempering of steel: Part I. Development of an effective tempering parameter[J]. Journal of Heat Treating, 1985, 4(1): 39-46.
- [17] 张晓娟. Nb, Mo超低碳贝氏体钢的析出行为[J]. 热加工工艺, 2013, 42(24): 57-59+63.
- [18] 董毅, 韩斌, 时晓光, 等. Si和Nb对高强热轧高扩孔钢组织和性能的影响[J]. 材料科学与工艺, 2016, 24(2): 53-57.
- [19] 文超, 孙前江, 徐浩, 等. 基于Arrhenius模型和修正Johnson-Cook模型的TC21钛合金流动应力预测[J]. 塑性工程学报, 2023, 30(11): 82-90.
- [20] 温宏权, 李文霄, 吴琼, 等. 轧辊用012Al钢热处理试验研究[J]. 上海金属, 2014, 36(1): 14-17.

(下转第44页)

(Xinxiang University,Xinxiang 453003, China)

Abstract:Xinxiang City is one of the four intelligent equipment industry bases in Henan Province, but there are problems such as arduous transformation and upgrading, low degree of agglomeration, many small and micro enterprises but not strong, and insufficient high-end technical talents. In combination with the theory of industrial clusters and technological innovation and industrial upgrading, we should increase support, strengthen policy support and organizational guarantee, adhere to innovation-driven, enhance the core competitiveness of enterprises, optimize industrial layout, promote the development of industrial clusters, strengthen talent security, and accelerate the attraction of high-end talents to settle down. The countermeasures to enhance the competitiveness of Xinxiang intelligent equipment manufacturing industry are put forward in five aspects, such as enhancing brand influence and creating intelligent equipment manufacturing business cards.

Key words: Xinxiang City; intelligent equipment manufacturing; competitive power; government; industrial clusters

(责任编辑 杨文忠)

(上接第 17 页)

Tempering Mechanical Predation of Low-carbon Banitic Steel Based on P Tempering Parameter

SUN Guojin^{1,2}, ZHU Xinglin^{1,2}, CUI Guoming^{1,2}

(1. School of Materials Science and Engineering, Henan Institute of Technology, Xinxiang 450003, China; 2. Xinxiang Key Laboratory of Materials Processing Technology and Mould, Xinxiang 453003, China)

Abstract:Taking low-carbon banitic steel as the research subject, the influence of tempering parameters on the hardness of low-carbon banitic steel were discussed here. The mechanical prediction mode was established and the nomograph of tempering parameters was plotted based on P parameter. Error analysis shows that the error of predicted mode was within 15% which can be used for the mechanical predictions and tempering parameters optimization.

Key words: tempering; P parameter; low-carbon banitic steel; Nomograph

(责任编辑 吕春红)

(上接第 40 页)

Tripartite Game Analysis of Rural Financial Institutions, Rural Industry and Local Government

ZHANG Qingye, JIANG Qin

(School of Economics, Henan Institute of Technology, Xinxiang 453003, China)

Abstract:The core of rural revitalization is to develop rural industries, and the development of rural industry cannot be separated from the support of rural financial institutions. Based on the perspective of game theory, the strategic choices of rural financial institutions, rural industry and local government, in the implementation of the national rural revitalization strategy, are explored. Through the analysis of the Nash equilibrium solution of the game model, strategies that should be adopted by each participant in the process of implementing the rural revitalization are put forward: villages seek suitable industries, rural financial institutions enhance their capacity and level of service for rural revitalization, and local governments provide guidance in the early stages and supervision in the later stages.

Key words: rural revitalization; dynamic game; financial institution; local government

(责任编辑 杨文忠)