

热处理工艺对沉淀硬化不锈钢性能的影响

刘金强, 秦磊

中车制动系统有限公司 山东青岛 266031

摘要: 17-4PH钢是一种典型的马氏体沉淀硬化不锈钢,具有较高的强韧性及良好的耐蚀性。通过对17-4PH钢经过1040℃固溶处理后,分别进行了480℃和550℃的一次时效处理,以及480℃时效后再进行550℃二次时效下的热处理试验,检测不同热处理状态下材料的力学性能和金相组织的变化。结果表明:17-4PH钢在固溶处理和480℃时效的金相组织为马氏体,在550℃时效的金相组织为回火索氏体。17-4PH钢在480℃时效时抗拉强度和屈服强度最高,冲击韧性较低,随着一次时效温度的升高,在550℃一次时效时钢的强度下降,冲击韧性升高。17-4PH钢在1040℃固溶和550℃时效下可以获得强度和冲击韧性等较优的综合力学性能。

关键词: 17-4PH钢; 热处理; 时效; 组织; 力学性能

Effect of heat treatment process on properties of precipitation hardening stainless steel

LIU Jinqiang, QIN Lei

CRRC Braking System Co., Ltd., Qingdao 266031, Shandong, China

Abstract: 17-4PH steel is a typical martensitic precipitation hardening stainless steel with high strength, toughness, and good corrosion resistance. After solid solution treatment at 1040℃, 17-4PH steel was subjected to primary aging treatment at 480℃ and 550℃, as well as secondary aging treatment at 550℃ after 480℃ aging. The mechanical properties and metallographic structure of the material under different heat treatment states were tested. The results show that the metallographic structure of 17-4PH steel after solid solution treatment and aging at 480℃ is martensite, while the metallographic structure after aging at 550℃ is tempered martensite. 17-4PH steel has the highest tensile strength and yield strength, but lower impact toughness when aged at 480℃. As the primary aging temperature increases, the strength of the steel decreases and the impact toughness increases at 550℃. 17-4PH steel can achieve good comprehensive mechanical properties such as strength and impact toughness under solid solution at 1040℃ and aging at 550℃.

Keywords: 17-4PH steel; heat treatment; aging; microstructure; mechanical property

1 序言

17-4PH是马氏体沉淀硬化不锈钢,此材料具有C含量低、Ni和Cr含量高的特点,其耐蚀性较好。

17-4PH又含有较多的Cu、Nb等合金元素,并在热处理的金相变化中沉淀析出,强化晶粒组织结构,具有高强度和高硬度^[1]。沉淀硬化不锈钢是通过时

效过程中析出微细的金属间化合物和少量碳化物来获得高强度及一定耐蚀性的高强不锈钢^[2, 3]。因此, 该材料被广泛应用于航空航天、化工、食品和核电等行业中。

17-4PH钢热处理方式主要是固溶处理和时效处理^[4]。固溶处理得到的组织大部分为马氏体, 具有相当高的强度, 时效处理又为调整处理, 可以通过时效处理不同的温度来获得材料需要的强度和硬度等性能^[5]。本文研究了在固溶处理后采用不同时效温度和方式对17-4PH钢力学性能和组织的影响。

2 试验材料及方法

试验所用17-4PH钢试样规格为 $\phi 60\text{mm} \times 200\text{mm}$ 的钢棒, 其化学成分见表1。

表1 17-4PH钢的化学成分 (质量分数) (%)

C	Si	Mn	P	S
0.043	0.31	0.41	0.018	0.01
Ni	Cr	Cu	Nb	—
4.31	15.36	3.16	0.23	—

为研究17-4PH钢在不同时效处理温度下的力学性能和显微组织状态变化, 分别对试样进行固溶处理和不同温度的时效处理。采用真空炉对17-4PH不锈钢进行固溶处理, 固溶处理工艺为 1040°C 油冷, 之后采用一次时效 $480^{\circ}\text{C} \times 4\text{h}$ 空冷; 一次时效 $550^{\circ}\text{C} \times 4\text{h}$ 空冷; 一次时效 $480^{\circ}\text{C} \times 4\text{h}$ 空冷后进行二次时效 $550^{\circ}\text{C} \times 4\text{h}$ 空冷3种不同的时效处理方式。热处理工艺见表2。

表2 热处理工艺

时效处理	工艺参数
工艺1	$1040^{\circ}\text{C} \times 2\text{h}$ 油冷, $480^{\circ}\text{C} \times 4\text{h}$ 时效空冷
工艺2	$1040^{\circ}\text{C} \times 2\text{h}$ 油冷, $480^{\circ}\text{C} \times 4\text{h}$ 时效空冷后 $550^{\circ}\text{C} \times 4\text{h}$ 二次时效空冷
工艺3	$1040^{\circ}\text{C} \times 2\text{h}$ 油冷, $550^{\circ}\text{C} \times 4\text{h}$ 时效空冷

从 $\phi 60\text{mm} \times 200\text{mm}$ 的3种不同热处理工艺下的试棒上取样制备拉伸试样、金相试样和冲击试样, 采用WDW-100E电子拉伸试验机, 按GB/T 228.1—2010《金属材料 拉伸试验 第1部分: 室温试验方法》进行拉伸试验; 采用JB-300冲击试验机, 按

GB/T 229—2020《金属材料 夏比摆锤冲击试验方法》进行冲击试验; 采用金相显微镜MR5000进行金相检验, 检测17-4PH钢在固溶处理和不同时效温度下的显微组织与力学性能, 分析不同工艺下性能的变化情况。

3 试验结果及分析

3.1 金相组织

使用金相显微镜放大500倍下观察不同工艺状态下的金相组织。经过固溶处理后, 17-4PH钢的金相组织基体为板条马氏体, 晶粒较为粗大, 组织比较均匀, 并未出现密集的晶界沉淀相, 如图1所示。

在 480°C 一次时效处理后, 金相组织为马氏体组织+少量奥氏体, 在马氏体上存在很多细小的黑色点状渗碳体, 如图2所示。在 480°C 一次时效后再进行 550°C 二次时效后, 其金相组织为板条状马氏体, 但是晶粒相对更细小, 分布也均匀, 如图3所示。在 550°C 一次时效处理后, 马氏体开始分解, 很多细小的碳化物沿晶界析出, 金相组织为回火索氏体, 如图4所示。随着一次时效温度的升高, 当时效温度为 550°C 时, 马氏体开始分解, 很多细小的碳化物沿晶界析出, 组织为保留马氏体相位的回火索氏体。

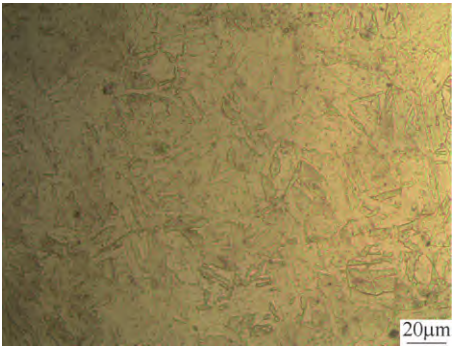


图1 固溶处理金相组织

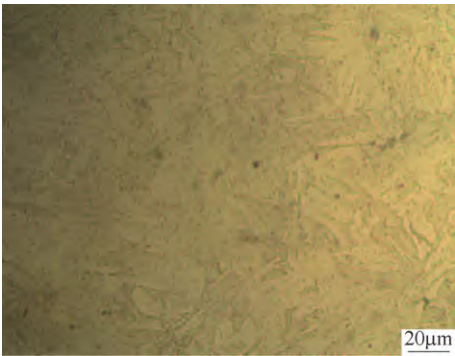


图2 480°C 一次时效金相组织

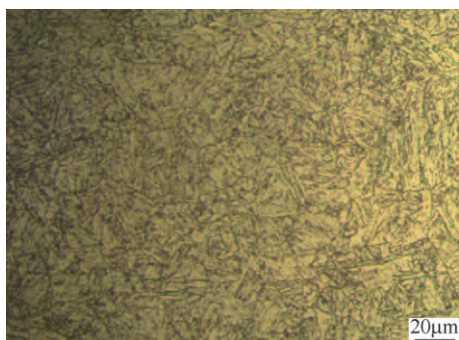


图3 480℃时效后再550℃时效金相组织

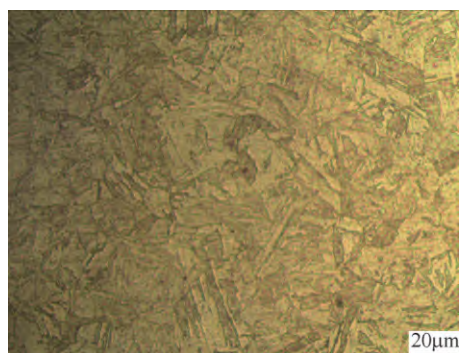


图4 550℃一次时效金相组织

3.2 力学性能

17-4PH钢在相同温度的固溶处理, 经过480℃和550℃不同时效温度处理下拉伸性能和-40℃冲击吸收能量, 见表3。

表3 经不同时效处理下的17-4PH钢的力学性能

项目	R_m /MPa	$R_{p0.2}$ /MPa	A (%)	Z (%)	KU_2 /J
工艺1	1420	1366	13	57	13
工艺2	1118	1080	17	62	72.5
工艺3	1185	1133	15.5	60	61.5

由表3可看出, 在一次时效温度480℃ (工艺1) 和一次时效温度550℃ (工艺3) 处理下的抗拉强度由1420MPa下降到1185MPa, 屈服强度由1366MPa下降到1133MPa, 断后伸长率由13%提高到15.5%, 断面收缩率由57%提高到60%, -40℃的冲击吸收能量由13J提高到61.5J。在一次时效温度480℃ (工艺1) 和在一次时效温度480℃后二次时效温度550℃ (工艺2) 处理下的抗拉强度由1420MPa下降到1118MPa, 屈服强度由1366MPa下降到1080MPa, 断后伸长率由13%提高到17%, 断面收缩率由57%提高到62%, -40℃的冲击吸收能量由

13J提高到72.5J。

在一次时效温度480℃、二次时效温度550℃ (工艺2) 和一次时效温度550℃ (工艺3) 处理下的力学性能变化不大。但是随着一次时效温度由480℃提高到550℃时, 17-4PH钢的强度开始下降, 钢的韧性得到提高。

4 结束语

1) 17-4PH钢在固溶和时效处理后的金相组织基体为马氏体。

2) 17-4PH钢在1040℃固溶和480℃时效时具有最高的抗拉强度和屈服强度, -40℃下的冲击吸收能量较低, 随着一次时效温度的升高, 抗拉强度和屈服强度都呈下降趋势, 断后伸长率和断面收缩率和冲击吸收能量呈上升趋势。

3) 固溶处理工艺相同的情况下, 在一次480℃时效下增加550℃二次时效, 17-4PH钢的抗拉强度和屈服强度均下降, 钢的韧性提升。在一次480℃时效下增加550℃二次时效与一次550℃时效下的力学性能没有明显的变化。

4) 17-4PH钢在1040℃固溶和一次550℃时效处理后获得的综合力学性能较好。因此, 在实际热处理生产时可根据产品所需要的力学性能选择合适的热处理方式。

参考文献:

- [1] 孙桂华, 刘彦秋. 浅谈17-4PH沉淀硬化不锈钢[J]. 化工设计通讯, 2013, 39 (2) : 83-85.
- [2] 高海亮, 梁盈, 王红, 等. 时效工艺对17-4PH不锈钢性能及组织的影响[J]. 热处理, 2019, 34 (1) : 36-38.
- [3] 卫争艳, 徐梅, 谭国华. 时效处理对05Cr17Ni4Cu4Nb马氏体 硬化不锈钢力学性能及组织的影响[J]. 特殊钢, 2021, 42 (5) : 85-88.
- [4] 李军, 李兴东, 周新灵. 中间时效对05Cr17Ni4Cu4Nb钢材料性能的影响[J]. 机械工程师, 2014 (3) : 279-280.
- [5] 李瀚涛. 热处理工艺对05Cr17Ni4Cu4Nb钢组织和性能的影响[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2021.

(收稿日期: 20240914)