

# ZG5Cr17Ni2 马氏体不锈钢软化工艺研究

索忠源, 王 鑫, 王文革, 张志浩, 王毅坚

(吉林化工学院机电工程学院, 吉林吉林 132022)

**摘要:** 采用光学显微镜、扫描电镜、洛氏硬度计等实验设备, 通过高温回火+等温球化处理工艺研究了ZGCr17Ni2马氏体不锈钢的软化行为, 分析了组织、硬度变化规律。结果表明: 回火温度由600 ℃逐步提高至700 ℃, 组织由铸态的珠光体+马氏体+残余奥氏体+莱氏体+碳化物转变为珠光体+回火索氏体+不稳定残余奥氏体+莱氏体+碳化物, 硬度由铸态时的HRC47逐步降低至HRC29。随后进行的等温球化使其基体珠光体进一步球化, 但对硬度影响不大。最佳软化处理工艺为: 高温回火650 ℃+2 h, 等温球化760 ℃+2 h-700 ℃+2 h, 炉冷。其组织为粒状珠光体+莱氏体+碳化物, 硬度为HRC27。

**关键词:** ZG5Cr17Ni2马氏体不锈钢; 软化工艺; 微观形貌; 硬度

## 作者简介:

索忠源(1979-), 男, 副教授, 博士, 主要从事耐热金属及非晶合金制备与性能研究。电话: 15843280391, E-mail: zhy\_suo@126.com

## 通讯作者:

王毅坚, 教授, 电话: 13500986001, E-mail: jlwyl961@163.com。

中图分类号: TG142.24;

TG162.9

文献标识码: A

文章编号: 1001-4977(2019)10-1094-04

## 基金项目:

吉林市科技局项目(20166020); 吉林化工学院项目(2017036)。

## 收稿日期:

2019-04-04 收到初稿,  
2019-05-28 收到修订稿。

ZG5Cr17Ni2作为一种中高碳马氏体不锈钢, 因具有较好的淬硬性、耐磨性、耐腐蚀性, 被广泛地应用于耐蚀刀具、热磨机磨片等领域<sup>[1-3]</sup>。但其铸件, 由于存在较大的铸造应力、铸件复杂带来的组织不均匀、高硬度等特点, 使其影响后续的机械加工及淬回火热处理工艺制度制订<sup>[4-6]</sup>。因此, 对于该类铸钢在使用前有必要进行软化处理。目前, 按不锈钢钢种特性、软化目的及客户使用要求等, 可将其软化退火工艺分为以下3种<sup>[7-10]</sup>: 完全退火软化处理, 适用于淬透性不强且软化硬度要求严格的钢种, 如2Cr13、9Cr18MoV等; 高温回火软化处理, 适用于淬透性强、裂纹敏感、采用完全退火退而不软的钢种, 如Cr17Ni2、3Cr17Mo等; 过时效软化处理, 适用于大截面尺寸的棒材、锻件, 如17-4PH、00Cr13Ni5Mo等沉淀硬化和马氏体时效钢。

本文采用高温回火+等温球化工艺对ZG5Cr17Ni2马氏体不锈钢进行软化处理, 研究高温回火温度对显微组织及硬度的影响规律, 探讨该类钢的最佳软化工艺参数, 为其在后续加工及最终热处理提供理论依据及技术支持。

## 1 试验材料与方法

ZG5Cr17Ni2马氏体不锈钢以微碳铬、低碳钢、镍板、圆钢等为原料, 在250 kg中频感应熔炉中进行熔炼, 树脂砂铸造成150 mm×300 mm×12 mm的板材。利用线切割将软化处理试样尺寸切割为10 mm×10 mm×10 mm若干。其试验钢的化学成分如表1所示。

软化退火工艺: 将试样放在JK-SX2型可控硅箱式电阻炉中加热, 精度±5 ℃。高温回火温度分别为600 ℃、620 ℃、650 ℃、680 ℃和700 ℃, 分别保温2 h后炉冷; 等温球化退火工艺为: 760 ℃, 保温2 h, 随后快冷降至700 ℃, 保温2 h, 炉冷。

金相试样利用王水腐蚀后, 分别在MPC-400倒置金相显微镜、JSM-6490扫描电镜下观察其显微组织; 洛氏硬度采用HR-150C型洛氏硬度计测定, 每个试样测5次, 取其平均值作为试样的硬度。

## 2 结果与讨论

### 2.1 高温回火温度对不锈钢组织及软化行为的影响

图1为ZG5Cr17Ni2马氏体不锈钢铸态及不同高温回火后的显微组织形貌。图1a

为该钢铸态显微形貌,从图中可以看出,ZG5Cr17Ni2马氏体不锈钢主要由珠光体+马氏体+残余奥氏体+莱氏体+碳化物组成。ZG5Cr17Ni2马氏体不锈钢碳含量为0.5%,本应属于亚共析钢,但由于超过18%合金元素的共同作用,本研究用钢成分已经落到过共析钢成分范围内,因此在每个晶粒的晶界处均有断续的莱氏体出现,莱氏体组织较稳定,特别是该组织中的碳化物在热处理过程中不发生任何转变,如图1中白色块状形貌。图1b、c、d分别为600℃、650℃和700℃下保温2h后的回火显微组织。从图中可以看出,在回火处理过程中,随回火温度升高,马氏体中的碳不断以碳化物形式析出,使固溶于马氏体晶格中的碳原子数量减少,促使晶格畸变程度降低<sup>[11]</sup>,马氏体组织消失,转变为回火索氏体。残余奥氏体由于碳、铬元素的析出,出现奥氏体不稳定性,造成马氏体转变开始温度提升,在随后冷却过程中会出现部分马氏体,但此时的马氏体因碳、铬元素的析出,使硬度提升不再明显。因此通过高温回火后的显微组织主要由铸态珠光体+回火索氏体+不稳定残余奥氏体+莱氏体+碳化物组

成。图1b为600℃保温2h后的回火组织形貌。部分 $\alpha$ 相发生回复再结晶,马氏体的共格关系依稀可见。回火温度升高至650℃后,碳化物析出明显,回火索氏体均匀分布。而温度进一步升高至700℃后,碳化物数量明显减少,同时发生聚集长大,如图1d圈定位置。

图2为高温回火对ZG5Cr17Ni2马氏体不锈钢的软化行为。从曲线上可以看出,合金的铸态硬度高达HRC47;回火温度由600℃逐步提高至650℃过程中,硬度快速降低,达到HRC29;当回火温度进一步提高至700℃时,硬度不降反而缓慢升高至HRC32。这主要是由于回火后,显微组织中的马氏体分解,转变为回火索氏体,造成硬度大幅降低,当回火温度高于650℃后,因碳化物集聚长大,造成合金硬度缓慢提高,硬度的变化行为与图1显微组织的变化规律完全一致。从经济效益出发,回火温度达到650℃时,硬度已经达到最低,无需再提高回火温度。

## 2.2 等温球化对不锈钢组织及软化行为的影响

在650℃高温回火的基础上,对ZG5Cr17Ni2马

表1 ZG5Cr17Ni2马氏体不锈钢成分

Table 1 Chemical composition of ZG5Cr17Ni2 martensitic stainless steel

C	Cr	Ni	Si	Mn	Mo	S	P	Fe	$w_B / \%$
0.53	16.74	2.25	0.57	0.42	0.23	0.012	0.030	余量	

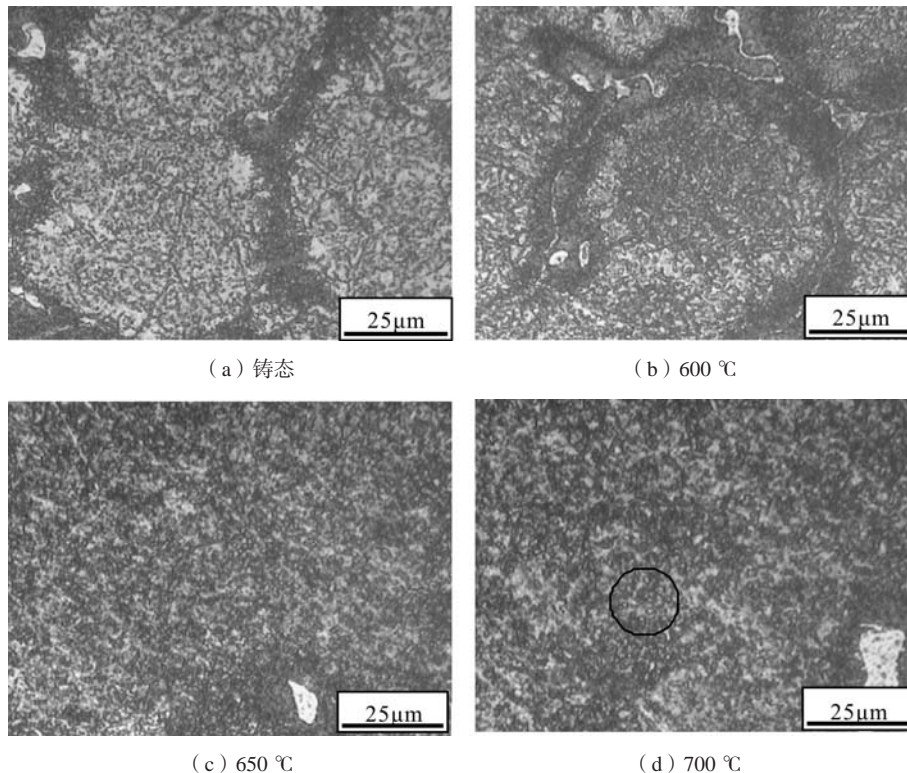
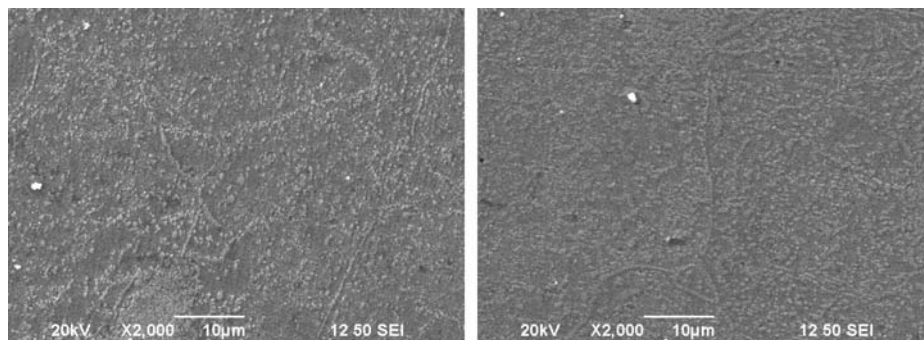


图1 ZG5Cr17Ni2马氏体不锈钢铸态及不同高温回火后的显微组织形貌

Fig. 1 Microstructure of ZG5Cr17Ni2 martensitic stainless steel in as-cast state and at different tempering temperatures

氏体不锈钢珠光体基体进一步球化,其球化工艺为760℃,保温2h,随后快冷降至700℃,保温2h,炉冷。图3为等温球化前后ZG5Cr17Ni2马氏体不锈钢的显微扫描形貌。图3a为650℃高温回火后的显微组织。可以看出,碳化物细小分布,但基体仍然为片状珠光体。等温球化后,碳化物数量增多,同时片状珠光体基体转变为粒状珠光体,其显微组织组成为粒状珠光体+莱氏体+碳化物,如图3b所示。此时,显微组织中的碳化物数量大,较高温回火时更细小,对于组织改善具有重要作用。苏俊义<sup>[12]</sup>指出,不锈钢在加热奥氏体化过程中,存在碳化物的析出和融入现象。奥氏体化温度高,碳化物以融入为主,碳和合金元素大量融入奥氏体中,使得奥氏体组织稳定,在随后的冷却过程中,产生大量的残余奥氏体;而在奥氏体化温度下,碳化物以析出为主,导致奥氏体中碳、合金元素含量较低,稳定性变差,随后冷却过程中,易转变为其他组织。本研究采用的等温球化温度为760℃,在Ac1线温度以上20~30℃,奥氏体化温度较低,碳化物以析出为主,当温度快速降低到Ar1以下20~30℃后,不稳定的奥氏体随后转变为粒状珠光体,达到了球化的目的,这与文献[12]分析一致。



(a) 等温球化前

(b) 等温球化后

图3 ZG5Cr17Ni2马氏体不锈钢等温球化前后的显微组织

Fig. 3 Microstructure of ZG5Cr17Ni2 martensitic stainless steel before and after isothermal spheroidization

表2 ZG5Cr17Ni2马氏体不锈钢等温球化前后的硬度

Table 2 Hardness of ZG5Cr17Ni2 martensitic stainless steel before and after isothermal spheroidization

热处理方法	工艺参数	显微组织	硬度HRC
高温回火	650℃+2h、炉冷	片状珠光体+回火索氏体+不稳定残余奥氏体+莱氏体+碳化物	29
高温回火+等温球化	650℃+2h—760℃+2h—700℃+2h、炉冷	粒状珠光体+莱氏体+碳化物	27

### 3 结论

(1) ZG5Cr17Ni2马氏体不锈钢由600℃逐步提高至700℃之间高温回火,组织由铸态的珠光体+马氏体+残余奥氏体+莱氏体+碳化物转变为珠光体+回火索氏体+不稳定残余奥氏体+莱氏体+碳化物,硬度由铸态时的

表2为ZG5Cr17Ni2马氏体不锈钢等温球化前后硬度的变化情况。从表中可以看出,硬度几乎未发生变化,等温球化后的洛氏硬度为HRC27,主要是碳化物的析出与珠光体基体球状化的硬度降低相互抵消造成的,但等温球化后的组织对于最终热处理具有重要的促进作用。

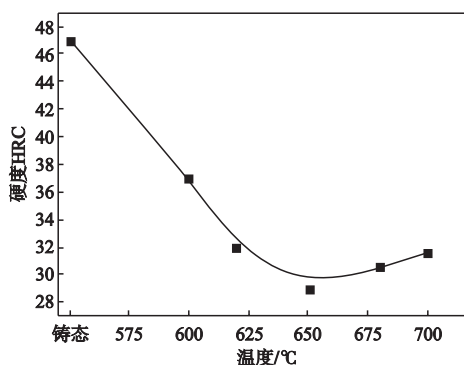


图2 高温回火对ZG5Cr17Ni2马氏体不锈钢硬度的影响

Fig. 2 Hardness of ZG5Cr17Ni2 martensitic stainless steel at

different tempering temperatures

HRC47逐步降低至HRC29。随后进行的等温球化使其基体珠光体进一步球化,对硬度影响不大。

(2) ZG5Cr17Ni2马氏体不锈钢最佳软化处理工艺为:高温回火650℃+2h,等温球化760℃+2h—700℃+2h,炉冷。其组织为粒状珠光体+莱氏体+碳化物,硬度HRC27。

## 参考文献:

- [1] CALLIARI I, ZANESCO M, DABALA M, et al. Investigation of microstructure and properties of a Ni-Mo martensitic stainless steel [J]. *Material and Design*, 2008, 29 (1): 246-250.
- [2] VERHOEVEN J D, PENDRAY A H, CLARK H F. Wear tests of steel knife blades [J]. *Wear*, 2008, 265 (7/8): 1093-1099.
- [3] 宋自力, 杜晓东, 陈翌庆, 等. 7Cr17Mo马氏体不锈钢组织和冲击韧性 [J]. *材料热处理学报*, 2011, 32 (5): 95-99.
- [4] 秦斌. 热处理对马氏体不锈钢5Cr15MoV冷轧退火板组织和性能的影响 [J]. *特殊钢*, 2011, 32 (2): 66-68.
- [5] 于文涛, 李晶, 史成斌, 等. 高碳马氏体不锈钢8Cr13MoV球化退火过程中碳化物的演变 [J]. *金属热处理*, 2016, 41 (9): 25-31.
- [6] 黄晓琳, 贺跃辉, 张乾坤, 等. 热处理工艺对18%Cr马氏体不锈钢组织与力学性能的影响 [J]. *粉末冶金材料科学与工程*, 2017, 22 (4): 503-509.
- [7] 姚长贵, 孙利军. 马氏体型不锈钢热加工后软化处理工艺研究 [J]. *江苏冶金*, 2005, 33 (2): 5-8.
- [8] 魏玉伟, 李宁, 文玉华, 等. 热处理工艺对1Cr17Ni2Si2双相不锈钢组织与性能的影响 [J]. *金属热处理*, 2010, 35 (7): 44-46.
- [9] XIE Guoliang, WANG Yanlin, LIU Jing, et al. The microstructure mechanical property characteristic of 1Cr17/9Cr18MoV multilayered plates [J]. *Journal of Iron and Steel Research, International*, 2011, 18 (S1-2): 933-935.
- [10] 花小省, 杨钢, 王鲁, 等. 二次固溶对1Cr16Ni4Mo2Cu2W1VN钢组织及力学性能的影响 [J]. *金属热处理*, 2016, 41 (3): 14-18.
- [11] 任福战, 赵维民, 王如, 等. 高铬铸铁里的碳化物形貌对力学性能的影响 [J]. *中国铸造装备与技术*, 2007, 2 (3): 23-26.
- [12] 苏俊义. 铬系耐磨白口铸铁 [M]. 北京: 国防工业出版社, 1990: 83-91.

---

## Softening Process of ZG5Cr17Ni2 Martensitic Stainless Steel

SUO Zhong-yuan, WANG Xin, WANG Wen-ge, ZHANG Zhi-hao, WANG Yi-jian  
(College of Mechanical and Electrical Engineering, Jilin Institute of Chemical Technology, Jilin 132022, Jilin, China)

**Abstract:**

The softening behavior of ZG5Cr17Ni2 martensitic stainless steel was studied by high temperature tempering + isothermal spheroidization. The change rules of microstructure and hardness were analyzed by using optical microscope, scanning electron microscope and Rockwell hardness tester. The results show that, as ZG5Cr17Ni2 martensitic stainless steel was tempered and the temperature was gradually increased from 600 °C to 700 °C, the microstructure transformed from pearlite + martensite + retained austenite + ledeburite + carbide in the as-cast state into pearlite + tempered sorbite + unstable retained austenite + ledeburite + carbide in the tempering state; the hardness was reduced to HRC29 from HRC47 in the as-cast state. Subsequent isothermal spheroidization made the pearlite spheroidization further and had little effect on hardness. Therefore, the best softening process of ZG5Cr17Ni2 martensitic stainless steel is: tempering at 650 °C for 2 h, isothermal spheroidizing at 760 °C for 2 h and subsequently rapidly cooling to 700 °C and holding for 2 h, furnace cooling. The microstructure consists of spheroidized pearlite + ledeburite + carbide, and the hardness is HRC27.

**Key words:**

ZG5Cr17Ni2 martensitic stainless steel; softening process; microstructure; hardness