

回火冷却速率对 30CrMnSiA 组织与性能的影响^①

李丰¹, 许磊², 饶金³, 李彩虹¹, 周玉成¹, 王琴¹, 张海盟¹

(1.航空工业江西洪都航空工业集团有限责任公司,江西 南昌 330096; 2.空军装备部驻南昌地区军事代表室,江西 南昌 330000; 3.南昌航空大学,江西 南昌 330063)

摘要: 对退火态 30CrMnSiA 钢进行了回火冷却速率实验,探究回火后冷却速率对 30CrMnSiA 钢性能的影响及其组织演变规律。结果表明,回火冷却速率对 30CrMnSiA 钢硬度影响较小,对冲击韧性有一定影响,30CrMnSiA 钢经 510 °C 回火后表面主要受到压应力、心部受到拉应力,且回火冷却越快,试样表面残余应力越大。回火过程中 C 元素主要与 Fe 元素结合形成铁碳化合物,少量 C 元素与 Cr、Si 元素形成铬碳化合物、硅碳化合物。快冷范围内冷却速率对碳化物含量及尺寸影响较小。

关键词: 回火; 合金结构钢; 冷却速率; 冲击韧性; 残余应力; 碳化物

中图分类号: TG156

文献标识码: A

doi:10.3969/j.issn.0253-6099.2023.05.031

文章编号: 0253-6099(2023)05-0136-04

Effect of Cooling Rates During Tempering on Structure and Properties of 30CrMnSiA Steel

LI Feng¹, XU Lei², RAO Jin³, LI Caihong¹, ZHOU Yucheng¹, WANG Qin¹, ZHANG Haimeng¹

(1. Jiangxi Hongdu Aviation Industry Group Co Ltd, Nanchang 330096, Jiangxi, China; 2. Military Representative Office of Air Force Armaments Department in Nanchang, Nanchang 330000, Jiangxi, China; 3. Nanchang Hangkong University, Nanchang 330063, Jiangxi, China)

Abstract: Experiments on tempering at different cooling rates were conducted for annealed 30CrMnSiA steel to investigate the effect of cooling rate during tempering on the properties of tempered 30CrMnSiA steel and its microstructure evolution. The results show that the cooling rate during tempering has brought slight effect to the hardness, and a certain influence to impact properties of 30CrMnSiA steel. After tempering at 510 °C, the 30CrMnSiA steel has its surface mainly subjected to compressive stress and the center subjected to tensile stress. A faster cooling rate during tempering will result in a higher residual stress on the surface of the sample. During the tempering process, C element mainly combines with Fe element to form Fe-C compounds, while a trace of C element, together with Cr and Si elements, forms Cr-C compounds and Si-C compounds. It is found that the rapid cooling rate has slight effect on the content and size of carbides.

Key words: tempering; alloy structural steel; cooling rate; impact toughness; residual stress; carbide

30CrMnSiA 钢属于合金结构钢,强度高,加工性能、抗疲劳性能好,但焊接性能较差,实际生产中一般经调质后使用。调质后的 30CrMnSiA 钢有很高的强度和足够的韧性,可用于制作砂轮轴、齿轮、链轮等,在航空航天领域被广泛用于制造各种重要锻件、机械加工零件及紧固件等^[1-3]。然而,在热处理过程中,30CrMnSiA 钢容易产生回火脆性,从而导致材料性能降低。因此,消除热处理中产生的回火脆性非常重要。

目前,国内针对钢件热处理过程中冷却速度与力学性能的关系已开展了部分研究工作,发现回火温度对高冷速试验钢力学性能的影响大于对低冷速试验钢力学性能的影响^[4];同时也发现正火 12Cr1MoV 钢的回火脆化在较高温区和较低温区具有两种不同的冷速敏感性^[5]:较低温区(<640 °C),随回火温度降低,炉冷试样具有较高的脆化敏感性,空冷试样脆化程度得到改善;较高温区(>640 °C)炉冷和空冷试样的脆化

① 收稿日期: 2023-04-26

基金项目: 国家自然科学基金(51504138,51674118);航空动力基金(6141B090573)

作者简介: 李丰(1984—),男,河南沈丘人,工程师,主要从事热表处理技术及管理工

通信作者: 李彩虹(1990—),女,江西南城人,硕士,工程师,主要研究方向为热处理工艺。

敏感性差别不大。回火时所用介质的冷速越高,钢强度及硬度越高,但伸长率会降低;冷却速率较快时,由于形成碳化物所需的 C、Cr 元素扩散时间少,碳化物尺寸减小,分布更加弥散均匀^[6-11]。目前针对 30CrMnSiA 钢回火相关的研究主要集中在回火温度对其性能的影响,关于回火冷速对其性能影响方面的研究较少。本文对 30CrMnSiA 钢进行不同冷速下的回火实验,并对回火后样品进行力学性能测试及微观组织分析,探究回火冷却速率对 30CrMnSiA 钢性能的影响及其组织演变规律。

1 实 验

采用退火态 30CrMnSiA 钢进行实验,钢材成分如表 1 所示。先进行淬火及回火实验,并对热处理后的样品进行加工。参照 GB/T 229—2007《金属材料夏比摆锤冲击试验方法》,选择全尺寸夏比 V 型缺口,使用线切割机对棒材进行加工,试样尺寸 55 mm×10 mm×10 mm,如图 1 所示。去除线切割加工试样表面的油污及氧化部分,并用酒精洗净后烘干。

表 1 30CrMnSiA 钢化学成分(质量分数) %

C	Si	Mn	S	P
0.28~0.34	0.9~1.2	0.8~1.1	≤0.025	≤0.025
Cr	Ni	Cu	Fe	
0.8~1.1	≤0.030	≤0.025	余量	

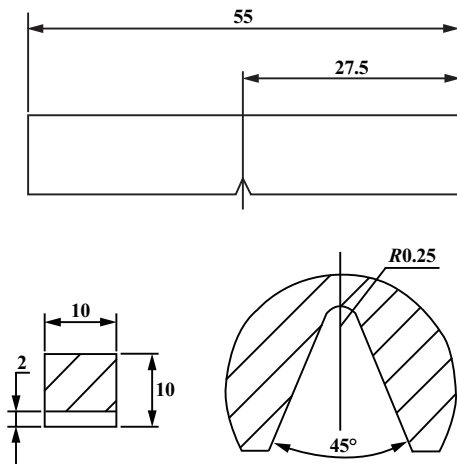


图 1 实验试样尺寸(单位:mm)

将切割后的样品放入空气电炉中进行淬火及回火处理,淬火工艺方案为:以升温速率 10 °C/min 将电炉升温到 900 °C,到温装样,保温 30 min,油冷;回火工艺方案为:510 °C 回火,到温装样,保温 60 min;冷却方式

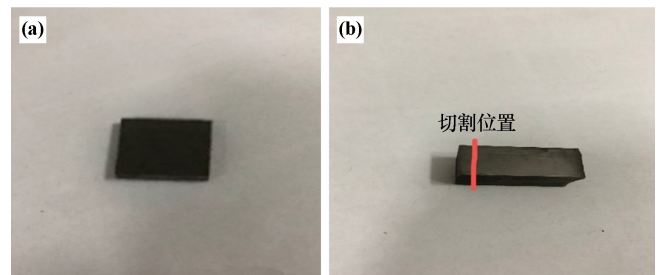
为:油冷、15% pag 淬火剂冷却、5.3% pag 淬火剂冷却。样品热处理工艺见表 2。

表 2 30CrMnSiA 样品热处理工艺

样品编号	热处理工艺
1	900 °C 淬火+510 °C 回火(油冷)
2	900 °C 淬火+510 °C 回火(15% pag 淬火剂冷却)
3	900 °C 淬火+510 °C 回火(5.3% pag 淬火剂冷却)

对热处理后样品进行冲击实验,在棒材中间位置取样,每组样品进行 3 次冲击实验,取平均值作为该样品冲击韧性值。而后对冲击后样品进行硬度测试。

使用 XSTRESS 3000 型 X 射线应力测试仪对部分热处理后的样品表面进行残余应力检测,检测前把表面打磨平整,测试过程中样品不能移动,每次测量样品表面 3 个点的值,取平均值。残余应力测试包括样品表面及样品内部 4 mm 处,侧面为表面样品在距离尾端 4 mm 左右切割的一个小方块,如图 2 所示。



(a) 样品侧面; (b) 样品切割位置

图 2 样品侧面及样品切割位置

在断口附近截取金相试样,打磨后使用 5% 硝酸酒精腐蚀 15 s。采用 ZXcamera-1600 型光学显微镜及 Nova Nano SEM450 型扫描电镜对 30CrMnSiA 钢微观组织进行观察,采用 xstress-3000 型残余应力测试仪测试样品表面残余应力,采用瑞典 IVF 冷却特性测试仪测试 3 种冷却介质的冷却特性。

2 实验结果及讨论

2.1 力学性能分析

2.1.1 硬度分析

样品硬度测试结果见表 3。从表 3 可以看出,冷却速率对样品硬度影响较小,3 组样品硬度无太大差别。

2.1.2 冲击性能分析

样品冲击性能测试结果见表 4,最后的冲击韧性值为多个样品测试后的平均值。从表 4 可以看出,随着冷却速率增加,样品冲击性能逐渐提高,但提升幅度不大。

表3 样品硬度测试结果

样品名称	冷却速率/($^{\circ}\text{C} \cdot \text{s}^{-1}$)	硬度(HV)
原始样品	/	245.0
样品1	40.5	311.6
样品2	79.8	297.6
样品3	111.7	315.8

表4 样品冲击性能测试结果

样品名称	冲击性能/($\text{J} \cdot \text{cm}^{-2}$)
样品1	94.77
样品2	104.49
样品3	107.96

2.1.3 残余应力分析

样品表面残余应力测试结果见表5。从表5可以看出,油冷的冷却速率最低,其表面残余应力也最小;5.3%*pag* 淬火剂冷却样品残余应力最大;油冷样品表面残余应力为压应力,距表面4 mm处的内部残余应力为拉应力。这是因为工件在加热和冷却过程中,表层和心部的冷却速率和冷却时间不一致形成温差,导致体积膨胀和收缩不均而产生应力,即热应力,在热应力作用下,表层开始温度低于心部,收缩也大于心部,使心部受拉,冷却结束时,心部最后冷却体积收缩不能自由进行而使表层受到压应力、心部受到拉应力。这种现象受到冷却速率、材料成分和热处理工艺等因素的影响。冷却速率越高,含碳量和合金成分越高,冷却过程中在热应力作用下产生的不均匀塑性变形越大,最终产生的残余应力也越大^[12-16]。

表5 样品表面残余应力测试结果

样品名称	残余应力/MPa
淬火后样品	368.6 \pm 8.4
样品1(表面)	-187.0 \pm 3.7
样品1(内部)	427.8 \pm 18.0
样品2	-199.0 \pm 18.4
样品3	-221.6 \pm 11.5

2.2 微观组织分析

对回火后样品进行显微组织分析,结果如图3所示。回火后样品组织均为回火索氏体、少量铁素体和碳化物,碳化物在晶界和晶粒内部弥散析出。

对3个样品放大后可以观察到铁素体基体上有细小的颗粒状碳化物,对碳化物采用点扫描方式进行能谱分析,观察碳化物元素含量,结果如图4~6所示。其中样品1碳化物中C元素含量为54.80%、样品2碳

化物中C元素含量为43.99%、样品3碳化物中C元素含量为37.90%,呈现逐渐下降的趋势。3种冷却介质的冷却速率为:油<15%*pag* 淬火剂<5.3%*pag* 淬火剂,在冷却过程中,碳化物会沿晶界和晶粒内部弥散析出,冷却速率越大,样品停留在碳化物析出敏感区间的时间越短,基体上析出的碳化物越少,则在能谱中观察到C元素含量越少。从元素种类上来看,C主要与Fe结合

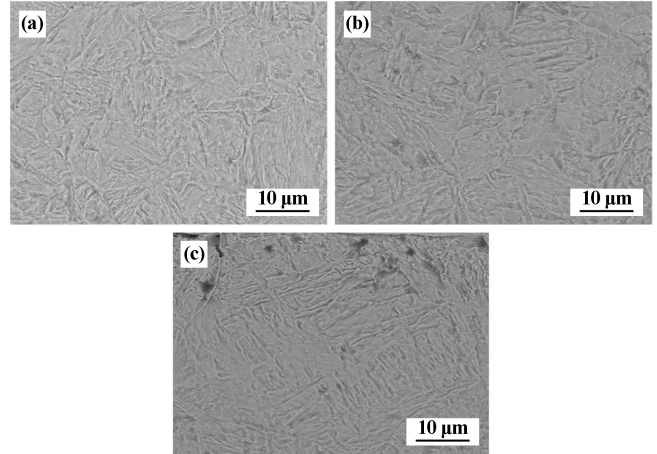


图3 回火后样品 SEM 图

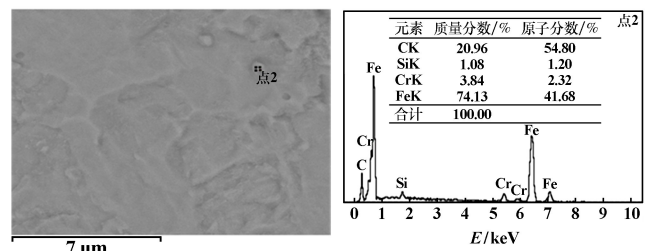


图4 样品1能谱分析结果

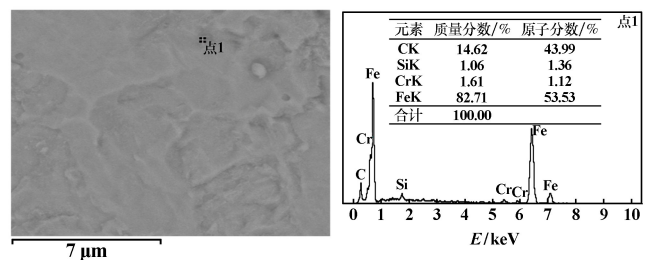


图5 样品2能谱分析结果

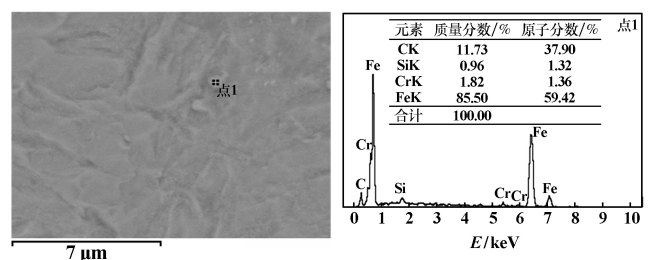


图6 样品3能谱分析结果

形成铁碳化合物,少量 C 与 Cr、Si 元素形成铬碳化合物、硅碳化合物。3 种冷却介质在 510 ℃ 下的最大冷速分别为 40.5 ℃/s、79.8 ℃/s、111.7 ℃/s,属于快速冷却,在该冷速条件下碳化物含量较少(见图 3),说明在快速冷却条件下冷速对碳化物含量影响较小。

一般来说,回火温度越高,碳化物尺寸越大。碳化物的生长除受温度影响外,还受到冷却速率的影响。碳化物的生长需要基体中的 C、Cr 等元素扩散析出,随着冷却速率增加,碳化物生长时间减少,远程的原子扩散不充分,无法满足碳化物继续长大的成分需求^[17]。因此,回火过程中冷速越快,样品中碳化物尺寸越小。本文研究的 3 组样品冷速都较大,从图 3 看出,3 组样品的碳化物尺寸都较小,没有明显差别。

3 结 论

1) 回火冷速对 30CrMnSiA 硬度影响较小;随着回火冷却介质冷却速率增加,30CrMnSiA 样品冲击性能小幅提高。

2) 30CrMnSiA 经 510 ℃ 回火后的样品表面主要受到压应力、心部受到拉应力,随着回火冷却速率增加,样品表面受到的压应力增加,回火冷却速率越快,冷却后样品表面残余应力越大。

3) 冷却过程中,30CrMnSiA 钢中碳化物会沿晶界及晶粒内部弥散析出,冷却速率越大,样品停留在碳化物析出敏感区间的时间越短,基体上析出的碳化物越少。回火过程中 C 元素主要与 Fe 元素结合形成铁碳化合物,少量 C 元素与 Cr、Si 元素形成铬碳化合物、硅碳化合物。在快冷范围内冷速对碳化物含量及尺寸影响较小。

参考文献:

[1] 韩舒展,惠卫军,刘荣佩,等. 回火温度对 30CrMnSiA 钢氢致延迟断裂行为的影响[J]. 材料热处理学报, 2014,35(7):114-119.

- [2] 李召华,王春净,罗湘燕. 30CrMnSiA 钢的最终热处理工艺研究[J]. 新技术新工艺, 2017(10):1-3.
- [3] 周 翠. 淬火、回火对钢的组织 and 性能的影响[J]. 东方企业文化, 2012(4):136.
- [4] 王冬雪,蔡庆伍. 回火温度对不同冷速淬火 Q690 钢组织及力学性能的影响[J]. 金属热处理, 2014,39(4):72-75.
- [5] 孙树文,雷廷权,唐之秀,等. 正火 12Cr1MoV 钢回火脆化的冷速敏感性[J]. 钢铁, 1998(8):40-43.
- [6] 陈军明,孔令男,尹臣男,等. 淬火配分-深冷复合处理下 NM300 耐磨钢微观组织与性能研究[J]. 矿冶工程, 2022,42(3):143-146.
- [7] 王东梅,赵磊城,陈 林,等. 淬火冷速对过共析轨钢中珠光体组织的影响[J]. 金属热处理, 2021,46(3):12-17.
- [8] 李闪闪,陈 云,巩桐兆,等. 冷速对高碳铬轴承钢液析碳化物凝固析出机制的影响[J]. 金属学报, 2022,58(8):1024-1034.
- [9] 刘香茹,周旭东,李 俊,等. 热处理温度和冷速对 DP980 钢烘烤硬化性能的影响[J]. 机械工程材料, 2017,41(3):54-57.
- [10] 方俊飞,徐震霖,斯松华,等. 不同冷速下 Q1100 高强钢焊接热影响区粗晶区的组织转变特征[J]. 机械工程材料, 2017,41(1):107-110.
- [11] 端 强,阎 军,朱国辉,等. 冷速对 X80 管线钢淬火组织和应变硬化特性的影响[J]. 华南理工大学学报(自然科学版), 2014,42(10):31-35.
- [12] 刘艳丽,安治国,黄艳新. 不同冷速对 49MnVS3 钢过冷奥氏体转变的影响[C]//中国金属学会. 第十一届中国钢铁年会论文集. 北京:冶金工业出版社, 2017:1042-1046.
- [13] 李 阳,张建伟,朱鹏凯,等. 碳含量及冷却速率对钢件淬火残余应力的影响[J]. 金属热处理, 2022,47(6):192-195.
- [14] 王瑞利,肖 娜. 淬火温度对 H13 钢性能及残余应力的影响[J]. 热加工工艺, 2022,51(16):131-134.
- [15] 罗建旭. 高强钢残余应力模式及影响因素[J]. 四川建筑, 2019,39(6):284-285.
- [16] 张 悦,王 刚,徐广涛,等. 残余应力对 18CrNiMo7-6 渗碳钢耐腐蚀性的影响[C]//第十届全国腐蚀大会摘要集. 南昌:[出版者不详], 2019:147.
- [17] 全 琪. EA4T 车轴钢残余应力与组织性能的研究[D]. 昆明:昆明理工大学, 2018.

引用本文: 李 丰,许 磊,饶 金,等. 回火冷却速率对 30CrMnSiA 组织与性能的影响[J]. 矿冶工程, 2023,43(5):136-139.