

试验研究

# 600 MPa级在线淬火型高强钢回火显微结构研究

侯东华

(山东钢铁集团日照有限公司,山东 日照 276800)

**摘要:**通过在线淬火及不同温度回火的热模拟试验,观察了600 MPa级高强钢回火后的显微结构,分析了回火过程碳氮化物粒子的析出规律。结果表明,回火温度对钢板显微结构有较大影响,随回火温度的升高,贝氏体数量逐渐减少,多边形铁素体含量增多,平均晶粒尺寸逐渐增大;钢中第二相粒子析出量增多,析出物形貌由方形逐渐转变为圆形。结合实物第二相分析及性能,回火温度以620℃为宜。

**关键词:**600 MPa高强钢;回火;显微结构;析出行为;热模拟试验

中图分类号: TG142.1

文献标识码: A

文章编号: 1004-4620(2018)04-0027-03

## 1 前言

与传统的调质工艺相比,在线淬火工艺(DQ)省略再加热奥氏体化过程,节约能源并简化生产工艺,降低生产成本,减少污染。随着国内钢铁行业设备的升级,许多有较高综合性能要求的高强钢开始采用在线淬火加离线回火的工艺生产<sup>[1]</sup>。在线淬火的实质是在热轧终了轧件处于奥氏体组织时,通过急冷处理使轧件组织产生马氏体和贝氏体相变。此外,钢板淬硬性增大能提高低碳钢和低合金钢的强度<sup>[2]</sup>,可以降低合金元素含量从而降低了碳当量,改善其焊接性能,使材料的组织性能得到较大提高<sup>[3-5]</sup>。本研究利用Gleeble 1500热模拟试验机,对在线淬火型600 MPa级高强钢在不同回火工艺下的组织特点与第二相粒子进行观察,对在线淬火型高强钢回火组织、粒子析出行为规律进行分析,以期并对该类产品的生产提供指导。

## 2 试验材料与方法

试验材料选自批量化生产的大热量输入焊接用600 MPa级高强度钢板,钢的主要化学成分:C 0.08%、Si 0.25%、Mn 1.60%、Mo 0.20%,另有少量微合金元素(Nb、V、Ti)。采用的生产工艺流程为:KR铁水脱硫、冶炼、精炼、连铸、粗轧、精轧、在线淬火、回火等。

将试验材料加工成 $\Phi 10\text{ mm} \times 15\text{ mm}$ 的圆柱形热模拟试样,在MMS-200热模拟试验机上进行热模拟试验。试验方法:将试样加热至1 200℃后,保温3 min;以5℃/s的冷速冷至1 100℃,变形30%;以5℃/s冷至840℃,变形25%;再以25℃/s冷至室

温。随后分别在530℃、590℃、620℃、650℃的温度下进行回火处理,回火时间为20 min。

将热模拟试验后的样品利用Struers精密切割机沿试样中心剖开,镶嵌后利用Struers自动磨抛机进行机械研磨抛光处理,最后再在手动磨抛机上进行最终抛光处理,4%硝酸酒精溶液侵蚀,利用Olympus金相显微镜观察金相组织。回火试样经金相组织观察后进行表面真空喷碳处理,对碳化物进行萃取复型,将碳膜置于铜网上观察其TEM形貌。碳化物观察在FEI Tecnai G2 F30场发射透射电子显微镜上进行,加速电压300 kV。

同时,对现场批量生产钢板取样进行第二相析出物能谱分析以及综合性能检测,现场批量生产钢板的回火温度为620℃,回火时间为2.0 min/mm。

## 3 试验结果及分析

### 3.1 不同回火温度下的金相组织

试样的回火过程是组织逐渐向平衡态的转变过程,组织转变的同时释放内应力,消除内部位错,合金元素以碳氮化物的形式从贝氏体中析出,降低晶粒内部的固溶度。图1为试验钢不同温度回火后的金相组织。回火温度为530℃时,C和合金元素未能充分扩散,回火组织中仍保留了原始组织的大部分形态,金相组织主要为粒状贝氏体加少量板条贝氏体(见图1a);590℃回火时,贝氏体开始发生转变,析出少量多边形铁素体,组织仍以贝氏体为主(见图1b);当回火温度为620℃时,多边形铁素体数量增加,显微组织呈现为回火贝氏体加多边形铁素体的混合组织特征(见图1c);回火温度继续升高到650℃时,贝氏体特征基本消失,组织以多边形铁素体为主,在铁素体周围包含少量贝氏体组织(见图1d)。

随回火温度的升高,贝氏体数量逐渐减少,显

收稿日期:2018-04-08

作者简介:侯东华,男,1977年生,2005年毕业于太原科技大学材料加工工程专业,硕士。现为山东钢铁集团日照有限公司高级工程师,从事中厚板产品开发与焊接技术研究工作。

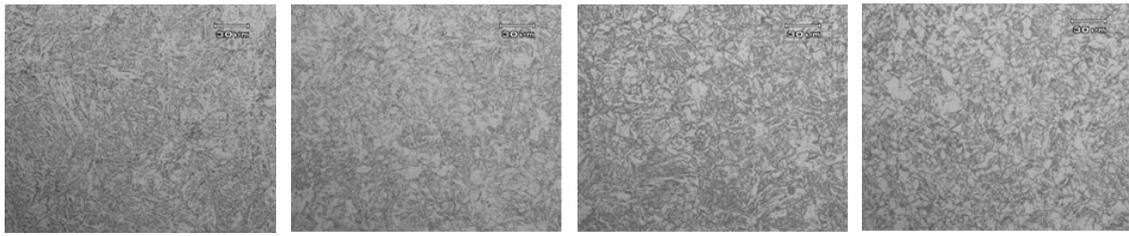


图1 840 °C终轧、25 °C/s冷速冷却不同温度回火后试验钢的金相组织

微组织向平衡态转变,多边形铁素体含量增多,平均晶粒尺寸逐渐增大。这种组织转变在降低强度的同时,会改善材料的塑性和冲击韧性。

### 3.2 回火后析出的第二相

图2为不同回火温度回火后试验钢的析出相

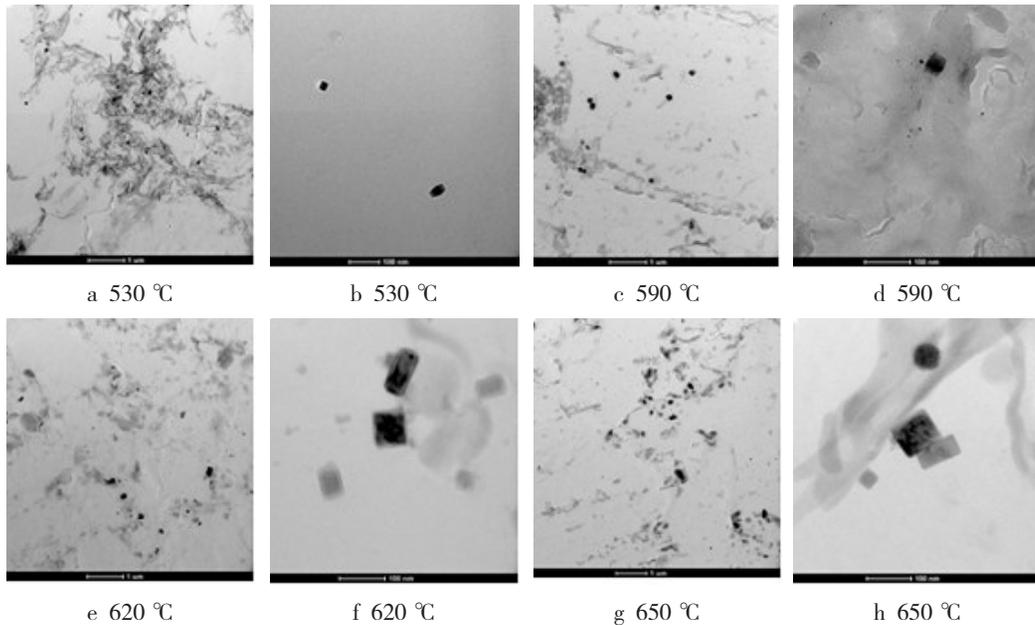


图2 试验钢不同温度回火后析出碳化物的形貌

回火温度较低时,析出物主要位于晶界处,随着回火温度的升高,在晶粒内析出复合型Nb(C、N)+V(C、N)+Ti(C、N)化合物,复合型粒子析出量逐渐增多,大多数附着于TiN粒子,以此为核心包覆析出。复合相随着Nb、V碳氮化物的增多,形状逐渐由方形向圆形转化。随回火温度的升高,析出物尺寸逐渐增大,析出物的最大尺寸由50 nm增大至100 nm以上。

### 3.3 产品实物第二相分析及性能

析出物的形貌、分布和数量对钢板的性能影响较大,100 nm的大尺寸析出物已经失去第二相粒子的强化作用。结合金相组织,在650 °C以上继续升高回火温度,除强度下降严重,钢板的塑韧性也会随着晶粒尺寸和析出物尺寸的增大急剧下降。因此,回火温度不宜太高,推荐620 °C。采用620 °C回火的钢板实物产品组织中析出的第二相粒子形貌及能谱分析结果见图3。

由图3可以看出,回火后实物钢板组织中析出

形貌,可以看出,随回火温度的升高,伴随着内部缺陷的减少,回火产物中碳氮化物在晶界和晶内的析出量逐渐增多,析出物尺寸增大;碳化物形貌主要由以方形为主转变为椭圆形增多,同时渗碳体和复合析出的相数量明显增多。

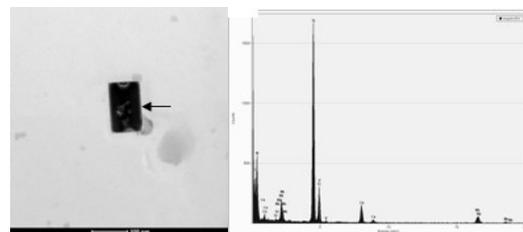


图3 钢板620 °C回火后典型析出相形貌及能谱分析物主要为Nb、V、Ti的碳氮化物和Fe、Mn的碳化物,其中以方形的TiN居多。

表1为采用在线淬火、620 °C离线回火的试验钢板的典型性能。采用在线淬火配合高温回火的钢板可以获得良好的综合性能,强塑性俱佳,低温韧性优良。

表1 批量生产钢板在线淬火、620 °C回火后力学性能

| 厚度/<br>mm | 屈服强度/<br>MPa | 抗拉强度/<br>MPa | 伸长率<br>A <sub>5</sub> /% | 冷弯<br>(D=3a) | -20 °C<br>KV <sub>2</sub> /J |
|-----------|--------------|--------------|--------------------------|--------------|------------------------------|
| 20        | 550          | 620          | 19.5                     | 合格           | 246                          |
| 24        | 548          | 625          | 18                       | 合格           | 219                          |
| 32        | 552          | 627          | 19                       | 合格           | 236                          |

## 4 结 论

4.1 回火温度对在线淬火后钢板的显微结构特征有较大的影响,试验钢在回火温度为620℃时,显微组织主要为回火贝氏体和多边形铁素体,晶粒较为细小。混合组织保证了钢板具有良好的综合机械性能。推荐该高强钢的回火温度为620℃。

4.2 随回火温度的升高,第二相粒子析出量增多,析出物形貌由方形逐渐转变为圆形。

4.3 在试验回火温度下析出物主要由TiN及依附其上形核长大的Nb、V碳氮化物、渗碳体等组成。

4.4 回火温度继续升高,析出物整体数量和尺寸均增大,同时大尺寸析出物数量增多。

### 参考文献:

- [1] 陈银莉,余伟,苏岚,等.SP490钢板在线淬火回火工艺的研究[J].北京科技大学学报,2007,29(2):85-88.
- [2] 尼托.采用在线淬火和回火工艺生产高强度钢板[J].宽厚板,1997,3(4):39.
- [3] Chiaki Ouchi. Development of Steel Plates by Intensive Use of TMCP and Direct Quenching Processes [J].ISIJ International, 2001,41(6):542-553.
- [4] Chang-Sun Lee, Wung-Yong Choo. Effects of Austemite Condition and Hardenability on Mechanical Properties of B-Containing High Strength [J].ISIJ International, 2000,40(2):189-193.
- [5] 其其格,余伟,武会宾,等.回火工艺对在线淬火12MnNiVR钢组织和性能的影响[J].热加工工艺,2008,37(24):100-103.

## Study on Tempering Microstructure of On-line Quenched High Strength Steel with Grade 600 MPa

HOU Donghua

(Shandong Iron and Steel Group Rizhao Co., Ltd., Rizhao 276800, China)

**Abstract:** By thermal simulation test of on-line quenching and tempering at different temperatures, the microstructures of high strength steel with 600 MPa after tempering were observed and the precipitation rule of carbonitride particles in tempering process was analyzed. The results showed that the tempering temperature has great influence on the microstructure of steel plate. With the increasing of tempering temperature, the number of bainite is decreased, the polygonal ferrite content is increased and the average grain size is increased, the precipitation amount of the second phase particles in steel is increased, and the morphology of precipitates gradually is changed from square to round. Combined the physical phase analysis with the properties of product object, the tempering temperature is suitable at 620℃.

**Key words:** 600 MPa high strength steel; temper temperature; microstructure; precipitation behavior

(上接第26页)

## Research on the Melting and Dropping Properties of Ferruginous Burden in Laiwu Steel

AN Jinbo

(Laiwu Steel Group Yinshan Section Steel Co., Ltd., Laiwu 271104, China)

**Abstract:** The test of melting and dropping properties of ferruginous burden between single ore and mixed ore in Laiwu Steel were carried out. The results showed that the property of LK pellet and NM lump ore is best respectively among common pellets and lump ore. The property of sinter becomes better with the increasing of sintering machine capacity. The melting and dropping property of sinter is best among sinter, pellets and lump ore, and the performance index of mixed ore show complementarity of single burden. So, it is necessary to further strengthen the optimization research of mixed ore, ensuring the stable and smooth operation of blast furnace and reducing the cost of blast furnace smelting.

**Key words:** ferruginous burden; melting and dropping property; sinter; pellet; lump ore

### 单位名称和符号常见错误用法

1) 错将ppm等当作单位使用。ppm、pphm、ppb为英文的缩写,并不是计量单位的符号,也不是数学符号。他们所表示的含义为:ppm, parts per million,  $10^{-6}$ ; pphm, parts per hundred million,  $10^{-8}$ ; ppb, parts per billion,  $10^{-9}$ (美、法等)或 $10^{-12}$ (英、德等)。

因此不能当作单位,如12 ppm应改为 $12 \times 10^{-6}$ 。

2) 用%(m/m)或%(V/V)等错误表示。由于百分是纯数字,所以质量百分或体积百分的说法是无意义的,也不能在百分符号上附加其他信息。可选用量的名称质量分数或体积分数等表示。

如硫酸的质量分数,或 $w(\text{H}_2\text{SO}_4)=5\%$ 。错误用法是硫酸的质量百分数,或 $\text{H}_2\text{SO}_4\%=5\%$ 。(燕明宇)