

## 奥氏体化温度对 30Cr3SiMnNiWMo 钢组织性能的影响

路 妍<sup>1,2</sup> 王军华<sup>3</sup> 苏 杰<sup>2</sup> 杨卓越<sup>2</sup> 谢 刚<sup>1</sup>

(1 昆明理工大学冶金与能源工程学院, 昆明 650093; 2 钢铁研究总院结构材料研究所, 北京 100081;

3 河南省工业学校机电系, 郑州 450053)

**摘 要** 试验研究了 860 ~ 980 °C 奥氏体化处理对 30Cr3SiMnNiWMo 钢 ( % : 0.28C, 0.74Mn, 1.04Si, 2.70Cr, 1.15Ni, 0.45Mo, 1.04W, 0.07V, 0.05Al) 组织以及 260 °C 回火后钢的力学性能的影响。结果表明, 30Cr3SiMnNiWMo 钢 860 ~ 920 °C 淬火组织中存在大量  $M_6C$  碳化物, 对回火钢的韧性不利; 950 °C 淬火后, 钢中  $M_6C$  碳化物基本溶解, 原奥氏体晶粒开始长大, 回火后钢的强度降低; 30Cr3SiMnNiWMo 钢经 920 °C 1 h 油淬 + 260 °C 2 h 回火可以获得具有少量残余奥氏体和未溶碳化物的板条马氏体组织, 并具有优良的强韧性 ( $R_m = 1\ 680\ \text{MPa}$ ,  $R_{p0.2} = 1\ 330\ \text{MPa}$ ,  $A = 13\%$ ,  $Z = 58.5\%$ ,  $A_{KU} = 85\ \text{J}$ )。

**关键词** 30Cr3SiMnNiWMo 钢 奥氏体化温度 微观组织 力学性能

## Effect of Austenizing Temperature on Structure and Mechanical Properties of Steel 30Cr3SiMnNiWMo

Lu Yan<sup>1,2</sup>, Wang Junhua<sup>3</sup>, Su Jie<sup>2</sup>, Yang Zhouyue<sup>2</sup> and Xie Gang<sup>1</sup>

(1 Faculty of Metallurgical and Energy Resources Engineering, Kunming University of Science and Technology, Kunming 650093;

2 Institute for Structural Materials, Central Iron and Steel Research Institute, Beijing 100081;

3 Faculty of Electrical Engineering, Henan Province Industry School, Zhengzhou 450053)

**Abstract** The effect of austenitic treatment at 860 ~ 980 °C on microstructure of steel 30Cr3SiMnNiWMo ( % : 0.28C, 0.74Mn, 1.04Si, 2.70Cr, 1.15Ni, 0.45Mo, 1.04W, 0.07V, 0.05Al) and mechanical properties of steel tempered at 260 °C has been studied. Results show that there are a lot of carbide  $M_6C$  in microstructure of steel 30Cr3SiMnNiWMo quenched at 860 ~ 920 °C led to slightly decrease toughness of tempered steel, and after quenched at 950 °C, the carbides in steel are basically dissolved and the original austenite grains of steel beginning coarsen led to decrease strength of tempered steel; with oil quenched at 920 °C for 1 h + tempered at 260 °C for 2 h, the steel 30Cr3SiMnNiWMo has lath martensite microstructure with minor residual austenite and un-dissolved carbides, so it has excellent strength and toughness i. e. UTS- 1 680 MPa, YS- 1 330 MPa, elongation- 13%, RA- 58.3% and impact energy- 85 J.

**Material Index** 30Cr3SiMnNiWMo Steel, Austenizing Temperature, Microstructure, Mechanical Properties

热处理的目的是改变钢的微观组织结构, 从而改善钢的性能<sup>[1]</sup>。合适的热处理工艺不仅可以获得良好的强韧性配比, 还可以消除后期热加工工艺造成的各种缺陷, 细化晶粒、去除偏析、降低内应力等。低合金超高强度钢奥氏体化温度对钢组织性能的影响, 国内外进行过大量研究, 不同钢种的研究结果存在一定差异。

John<sup>[2]</sup> 等认为 900 ~ 1 010 °C 淬火时, 随着奥氏体化温度的升高, Eglin 钢的晶粒长大, 硬度降低, 残余奥氏体增多, 韧性提高; 而 Wang<sup>[3]</sup> 等研究 Cr-Ni-Mo-Nb 钢微观组织及力学性能时, 指出奥氏体化温度升高, 钢的抗拉强度提高, Wang 把这种现象归因于一次碳化物的溶解。

为了提高断裂韧性, 超高温淬火工艺得到了重视, 但是其影响规律尚不清晰, Robert<sup>[4]</sup> 及其合作者研究 1 200 °C 超高温淬火与 AISI4340 钢韧性的关系

时, 发现 1 200 °C 淬火时, 4340 钢断裂韧性提高, 而冲击韧性降低, 因此 Ritchie 认为超高温淬火工艺是否改善韧性需要深入研究; 然而 Wood<sup>[5]</sup> 对 Ritchie 的试验提出质疑, 认为 Ritchie 的数据不全面, 并在其试验基础上添加了 1 200 °C 奥氏体化直接淬火处理及不同淬火介质淬火的韧性数据, 指出 1 200 °C 奥氏体化时直接淬火对于改善 4340 钢的韧性是可行的。

30Cr3SiMnNiWMo 钢是新开发设计的一种低合金超高强度钢, 主要应用于室温工作, 承力较大的构件, 本文研究了 30Cr3SiMnNiWMo 钢奥氏体化温度对力学性能和微观组织的影响, 试图找出最佳的强化热处理工艺。

### 1 试验材料及方法

30Cr3SiMnNiWMo 钢采用高纯化冶炼工艺, 经 25 kg 真空感应炉冶炼, 开坯锻造, 锻成 15 mm × 15

mm棒材,进行680℃ 24 h去应力退火处理。钢的化学成分(%)为:0.28C、0.74Mn、1.04Si、2.70Cr、1.15Ni、0.45Mo、1.04W、0.07V、0.05Al、0.004S、0.001P。

力学性能采用标准拉伸、冲击试验测试。拉伸试验在WE-300型试验机上进行,冲击试验在JBN-300B冲击试验机上进行。根据GB/T228-2002、GB/T229-2007在棒材上分别切取拉伸、U型缺口冲击试样,首先所有试样均进行980℃ 1 h正火处理,680℃ 2 h退火处理,然后分别采用860、890、920、950、980℃奥氏体化温度进行淬火处理,保温时间60 min,油淬,260℃ 2 h回火处理,空冷。对应各奥氏体化温度取10 mm×20 mm淬火态金相试样,微观组织观察采用S-4300冷场发射扫描电子显微镜(SEM);从淬火态金相试样上切取0.3 mm厚的TEM薄膜样品,采用化学减薄至0.05 mm,然后用电解双喷室温减薄,电解液为5%的高氯酸-冰醋酸混合溶液,制备的薄膜试样采用H-800透射电子显微镜(TEM)进行观察,操作电压为200 V。

## 2 试验结果与分析

### 2.1 力学性能测试

图1为回火态30Cr3SiMnNiWMo钢的室温力学性能。由图1可知,奥氏体化温度提高,抗拉、屈服强度略有下降,920~950℃时存在一个平台,强度基本不变,继续提高温度,强度突然降低,这可能与残余奥氏体量的增加和组织中未溶碳化物溶解所导致的原奥氏体晶粒的长大有关<sup>[2,6]</sup>。整个研究范围内,断后伸长率(A)几乎无变化,表明奥氏体化温度

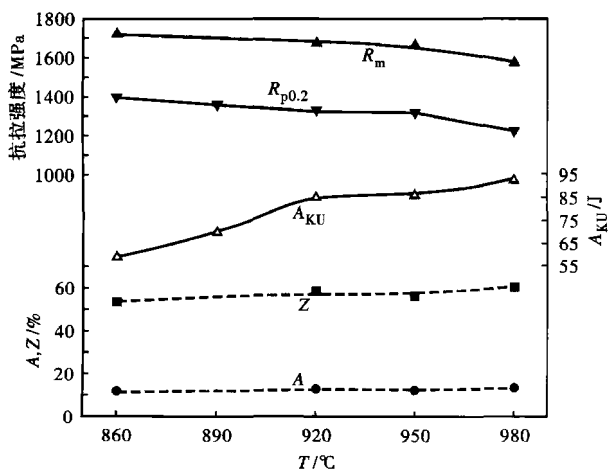


图1 淬火温度对260℃ 2 h回火30Cr3SiMnNiWMo钢力学性能的影响

Fig. 1 Effect of quenched temperature on mechanical properties of steel 30Cr3SiMnNiWMo tempered at 260℃ 2 h

对其影响不大;断面收缩率(Z)始终保持较高水平,均在50%以上,980℃时具有极大值61%。

钢的冲击韧性随奥氏体温度的变化示于图1,奥氏体化温度提高,钢的冲击韧性降低。与强度相同,920~950℃时,断面收缩率及冲击韧性均存在一个平台。然而继续提高温度,尽管原奥氏体晶粒尺寸增大,钢的断面收缩率及冲击韧性均缓慢提高(图1),可能是由于脆性未溶碳化物大量溶解,钢中合金元素的分布更加均匀,也有研究者认为<sup>[7]</sup>,提高奥氏体化温度导致残余奥氏体增加,孪晶马氏体减少甚至消失,从而提高韧性。

### 2.2 微观结构分析

经X射线衍射(XRD)分析表明,860、890、920、950、980℃淬火处理后的微观组织主要为马氏体组织,其中有少量( $\leq 2\%$ )的残余奥氏体。图2为30Cr3SiMnNiWMo钢淬火态微观组织的SEM形貌。由图2可知,860℃淬火时,淬火态组织上存在大量灰白色未溶相,呈圆球状及椭圆球状,直径在100~200 nm,大部分沿晶界成串状分布,小部分弥散分布于晶内(图2a),随着温度的升高,未溶相逐渐减少,颗粒细化,直径小于100 nm(图2b)。920℃淬火时,基体组织上仅存在极少量未溶碳化物,弥散分布于晶内,晶界上的粒子几乎完全溶解,原奥氏体晶粒开始长大(图2b)。950℃淬火时,未溶相完全溶解,原奥氏体晶粒粗化(图2c)。能谱分析表明,未溶相粒子富集W、Mo元素,估计为 $M_6C$ 碳化物。

进一步进行TEM观察分析,860℃时,30Cr3SiMnNiWMo钢淬火态组织中未溶碳化物的明暗场像,及其[013]方向衍射花样和指标化图如图3所示。TEM分析表明,这些未溶碳化物为 $M_6C$ 相,直径约为100 nm。

未溶碳化物对钢的性能有着双重影响,一方面未溶碳化物的存在降低了钢的固溶碳量及合金度,不利于强度和韧性的提高,另一方面未溶相的存在阻碍晶粒长大,能够改善强韧性<sup>[2,3,6]</sup>。980℃加热时,未溶碳化物完全溶解,奥氏体晶粒还没有长大到强烈降低韧性的程度,此时,未溶碳化物溶解引起的韧性增加远大于晶粒长大导致的韧性降低,因此钢的韧性提高。

### 2.3 断口形貌分析

室温下,夹杂物与周围基体的硬度不一致,导致基体变形应力和应变集中。通过基体和夹杂物的分离或者夹杂物的破裂产生孔洞,断裂过程中,孔洞一般是在大尺寸MnS夹杂处形成,或者稍小的氧化物

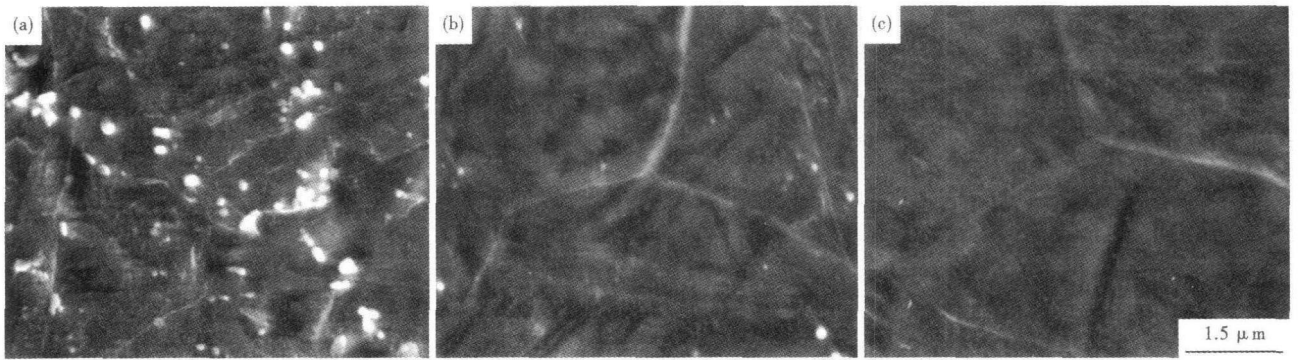


图 2 30Cr3SiMnNiWMo 钢淬火组织形貌, SEM; 奥氏体化温度/°C - (a) 860; (b) 920; (c) 950

Fig. 2 Morphology of structure of quenched steel 30Cr3SiMnNiWMo, SEM; austenizing temperature /°C - (a) 860; (b) 920 and (c) 950

夹杂及细小的碳化物, 随后裂纹扩展、合并直至断裂<sup>[8]</sup>。

SEM 观察断口裂纹起源区处回火态碳化物相形貌(图 4a, c, e), 860 °C 时, 裂纹起源区由许多密集微小的孔洞组成, 微孔内均存在细小的碳化物, 这些微孔是材料断裂前塑性变形到一定程度的产物, 这种微孔聚集式的断裂一定程度上会加剧微区解理的进行, 降低断裂抗力。由图 4 可知, 920 °C 时, 碳化物减少, 微孔变得深而大, 宏观上表现为韧性

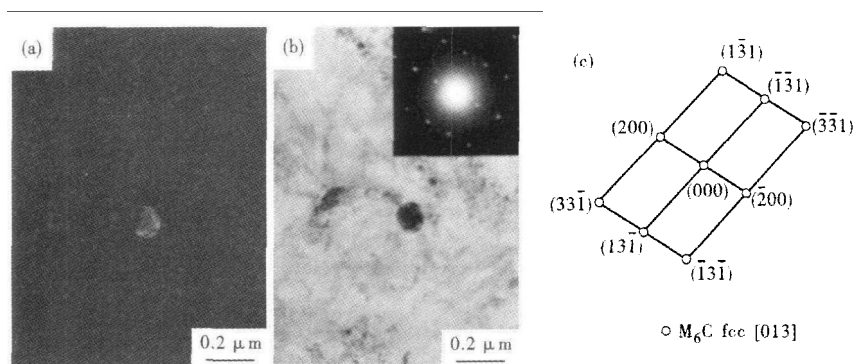


图 3 860 °C 淬火的 30Cr3SiMnNiWMo 钢未溶碳化物暗场(a)、明场(b)形貌和结构分析(c)

Fig. 3 Morphology- dark field (a), bright field (b), and structure analysis (c) of un-dissolved carbide in steel 30Cr3SiMnNiWMo quenched at 860 °C

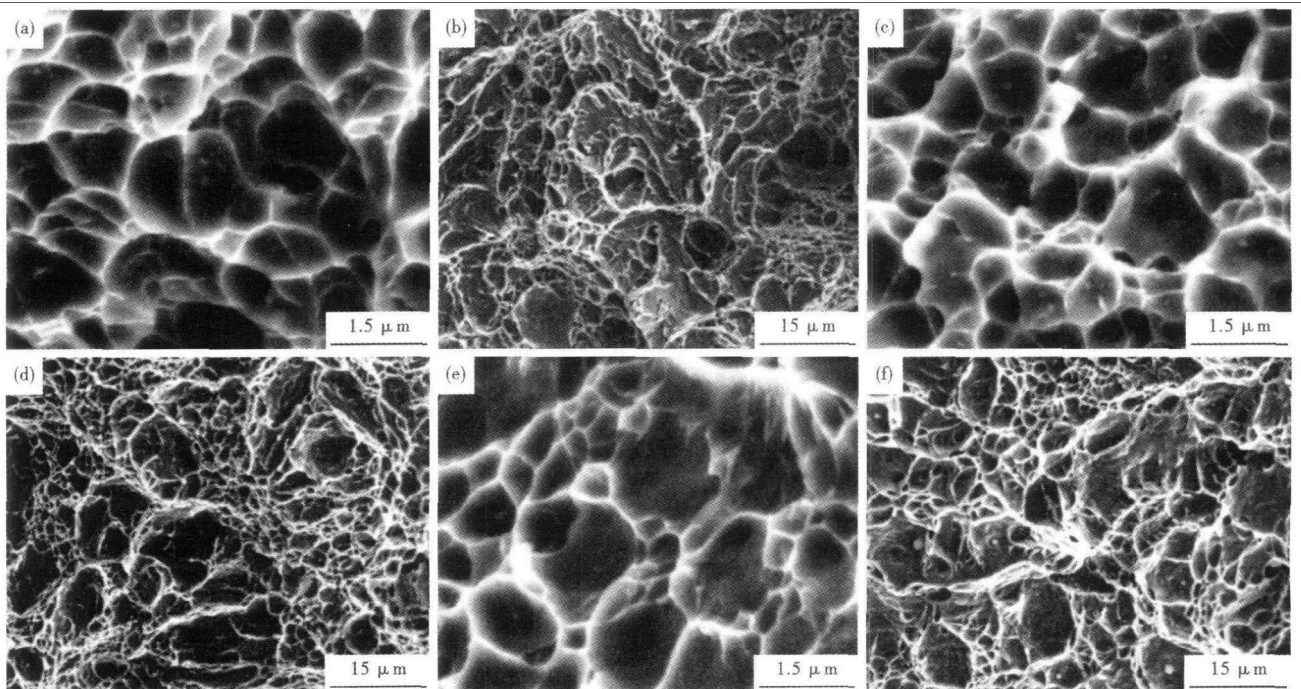


图 4 30Cr3SiMnNiWMo 钢 260 °C 淬火-回火断口和碳化物形貌, 奥氏体化温度/°C - (a) (b) 860; (c) (d) 890; (e) (f) 920

Fig. 4 Morphology of fracture and carbides of steel 30Cr3SiMnNiWMo tempered at 260 °C, austenizing temperature /°C - (a) (b) 860; (c) (d) 890 and (e) (f) 920

的升高。夏志新等认为<sup>[8]</sup>,细小的碳化物在塑性断裂过程中,对拉伸性能无显著影响;然而高于920℃淬火时,碳化物几乎完全溶解,奥氏体晶粒粗化,势必造成强度的降低(图1)。

图4为回火态冲击试样断口的SEM微观形貌。观察发现,860℃淬火时,断口表层呈准解理形貌,准解理面的面积较大,随着温度的升高,断口表层呈韧窝形貌加少量准解理刻面(图4b),韧性有所改善,然而韧窝孔洞此时长大并不充分,因此韧性提高并不十分明显;920℃淬火时,韧窝尺寸增大,分布均匀,夹杂物形成的韧窝孔洞长大更加充分,未溶碳化物大量溶解,使韧性改善显著;提高奥氏体化温度,夹杂物形成的韧窝孔洞长大更加充分,变得大而深,大韧窝由许多小韧窝组成,未溶碳化物已经全部溶解,断裂抗力相对较大,这种撕裂情况消耗更多的能量,表现出更好的韧性。

但是随着奥氏体化温度升高,钢中未溶碳化物完全溶解,晶界处未溶相的钉扎作用消失,原奥氏体晶粒长大,降低强度。同时Tomita<sup>[9]</sup>认为超高温淬火会降低冲击韧性,因此为了避免晶粒的过度长大,保证钢的优良强韧性,保留一定量的未溶碳化物是有必要的。

### 3 结论

(1)860~980℃奥氏体化处理时,温度升高,30Cr3SiMnNiWMo钢的强度降低,冲击韧性显著提高;920~950℃淬火时,强度、断面收缩率、冲击韧性均有一个平台区;试验钢经920℃1h油淬+260℃2h回火可以获得优良的强韧性。

(2)SEM及TEM分析表明,在研究的淬火温度范围内,30Cr3SiMnNiWMo钢淬火态显微组织中仅有一种未溶相;直径约为100nm的M<sub>6</sub>C相。

(3)920℃奥氏体化处理,是M<sub>6</sub>C相溶解的临界

状态,保证了高强度,并明显改善了韧性;980℃时,M<sub>6</sub>C相完全溶解,原奥氏体晶粒开始长大,导致强度降低。

(4)SEM分析表明,860~920℃时,断口形貌主要呈微孔聚集型断裂,有少量准解理,表现出优良的韧性;860~920℃时,断口裂纹起源区存在大量碳化物,920℃时,碳化物几乎完全溶解,起源区微孔变得大而深,有利于改善韧性。

### 参考文献

- 1 胡光立,谢希文. 钢的热处理(原理及工艺). 第二版. 西安:西北工业大学出版社,1996
- 2 John R Paules, Morris F Dilmore, Kevin J Handerhan. Development of Eglin Steel-A New, Ultrahigh-Strength Steel for Armament Aerospace Applications. *Materials Science and Technology*, Pittsburgh, PA, 2005, 2:13
- 3 Wang M Q, Dong H, Hui W J, et al. Effect of Heat Treatment on Microstructure and Mechanical Properties of Cr-Ni-Mo-Nb Steel. *Materials Science and Technology*, 2007, 23(8):963
- 4 Robert O Ritchie, Benjamin Francis, William L Server. Evaluation of Toughness in AISI4340 Alloy Steel Austenitized at Low and High Temperatures. *Metallurgical Transactions A*, 1976, 7A(7):831
- 5 Wood W E. Discussion of "Evaluation of Toughness in AISI4340 Alloy Steel Austenitized at Low and High Temperature". *Metallurgical Transactions A*, 1977, 8A(7):1195
- 6 Youngblood J L, Raghavan M. Correlation of Microstructure With Mechanical Properties of 300M Steel. *Metallurgical Transactions A*, 1977, 8A(9):1439
- 7 Lai G Y, Wood W E, Clark R A, et al. The Effect of Austenitizing Temperature on the Microstructure and Mechanical Properties of As-quenched 4340 Steel. *Metallurgical Transaction*, 1974, 5(7):1663
- 8 夏志新,杨卓越,苏杰,等. 夹杂物的类型与形态对超高强度钢塑性的影响. *航空材料学报*, 2008, 28(5):17
- 9 Yoshiyuki Tomita. Low-temperature Improvement of Mechanical Properties of AISI4340 Steel Through High-temperature Thermomechanical Treatment. *Metallurgical Transactions A*, 1991, 22A(5):1093

路妍(1983-),女,博士生,2005辽宁工业大学毕业,低合金超高强度钢合金及工艺设计的研究。

收稿日期:2011-02-09

## 下期要目

12CaO·7Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> 基精炼渣脱硫试验	曹余良等
非真空吹氮工艺对316L奥氏体不锈钢吸氮行为的影响	时彦林等
首钢小方坯连铸机中间包数值模拟分析	丁宁等
Cr20Ni32AlTi合金平衡相的热力学模拟计算与分析	杨常春等
非碳冶金高温熔炼的研究	侯明山等
新冶钢电弧炉粉尘精细还原实验研究	汪玉娇等
运用智能控制技术改进交流电弧炉电极调节器的研究	赵健等
国内外高强度船板钢的研发现状和发展	陈妍等