

## 热处理对新型沉淀硬化不锈钢 1Cr16Ni3Cu1MoW 组织与性能的影响

钟海林<sup>1,2</sup> 杨 钢<sup>2</sup> 王立民<sup>2</sup> 孙力军<sup>1</sup> 高永亮<sup>1</sup>

(1 昆明理工大学材料冶金工程学院, 昆明 650091; 2 钢铁研究总院, 北京 100081)

**摘 要** 研究了新型沉淀硬化不锈钢 1Cr16Ni3Cu1MoW 100~700 °C 回火对钢的组织 and 机械性能的影响。试验结果表明, 不锈钢 1Cr16Ni3Cu1MoW 经 1 070 °C 1 h 固溶处理, 油冷, -70 °C 冷处理 2 h, 485 °C 时效 2 h,  $\sigma_b$  达 1 475 MPa, 且冲击功  $A_{KU2}$  仍能达到 119 J; 经 1 070 °C 1 h 固溶处理, 油冷, -192 °C 冷处理 2 h, 500 °C 时效 2 h,  $\sigma_b$  达到峰值, 为 1 605 MPa, 此时  $A_{KU2}$  为 88 J。

**关键词** 沉淀硬化 不锈钢 固溶 时效

## Effect of Heat Treatment on Structure and Properties of A New Precipitation Hardening Stainless Steel 1Cr16Ni3Cu1MoW

Zhong Hailin<sup>1,2</sup>, Yang Gang<sup>2</sup>, Wang Limin<sup>2</sup>, Sun Lijun<sup>1</sup> and Gao Yongliang<sup>1</sup>

(1 Material and Metallurgical Engineering School, Kunming University of Science and Technology, Kunming 650091; 2 Central Iron and Steel Research Institute, Beijing 100081)

**Abstract** The effect of tempering at 100~700 °C on structure and mechanical properties of a new precipitation hardening stainless steel 1Cr16Ni3Cu1MoW has been studied. The test results showed that with solid solution treated at 1 070 °C for 1 h, oil cooling, cold treated at -70 °C for 2 h, then aged at 485 °C for 2 h, the tensile strength  $\sigma_b$  of stainless steel 1Cr16Ni3Cu1MoW was 1 475 MPa and the impact energy  $A_{KU2}$  was 119 J; and with solid solution treated at 1 070 °C for 1 h, oil cooling, cold treated at -192 °C for 2 h then aged at 500 °C for 2 h, the peak tensile strength  $\sigma_b$  of steel was 1 605 MPa and the impact energy  $A_{KU2}$  was 88 J.

**Material Index** Precipitation Hardening, Stainless Steel, Solid Solution, Aging

在所有的不锈钢中, 沉淀硬化不锈钢由于具有高强度和相对好的韧性而得到快速发展。为开发新型的高强度高韧不锈钢, 研究了热处理工艺对新型沉淀硬化不锈钢组织与性能的影响。

### 1 试验材料及方法

将试验钢加热到 1 070 °C, 保温 1 h 后油淬, -70 °C 冷处理 2 h, 接着在 100~700 °C 范围内每隔 50 °C 进行时效 2 h 后空冷。

将试验钢加热到 1 070 °C, 保温 1 h 后油淬, -192 °C 冷处理 2 h, 接着经 455, 470, 485, 500 °C 时效 2 h 处理后空冷。

试验钢采用真空感应炉冶炼, 25 kg 钢锭, 化学成分见表 1。钢锭经 1 160 °C 锻造开坯, 最后一火变形量大于 50%, 终锻温度控制在 900~850 °C, 缓冷。在 JB-30 摆锤式冲击试验机上测定室温下各试样的冲击功 ( $A_{KU2}$ , 单位 J), 试样 (10 mm × 10 mm × 55 mm) 采用 U 型槽口, 用洛氏硬度

表 1 试验钢的化学成分/%

Table 1 Chemical composition of test steel /%

C	V	P	W	Cr	Mo	Ni	S	N	Cu
0.16	0.44	<0.005	0.97	15.69	1.34	3.54	<0.002	0.078	1.43

计测定硬度, 所用载荷为 150 kg。在 Leica 型光学显微镜下观察组织形貌, 用透射电镜观察不同时效温度后的显微组织。

### 2 试验结果及分析讨论

从图 1 可以看出, 固溶淬火后组织为板条马氏体 + 少量残余奥氏体 + 少量  $\delta$ -铁素体。从图 2 知, 随着回火温度的提高,  $\sigma_b$  是先降低后增加再降低的变化趋势, 在 500 °C 达到峰值, 为 1 475 MPa。

在 100~350 °C 区间回火, 随着回火温度的升高,  $\sigma_b$  不断降低, 这是由于在此回火阶段, 起强化作用的是碳和其它合金元素的固溶, 随着回火温度的升高, 马氏体基体中碳含量逐渐降低, 正方度

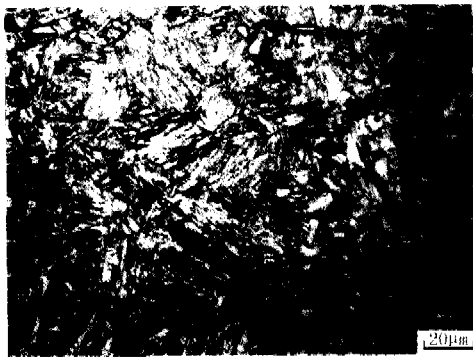


图 1 1Cr16Ni3Cu1MoW 沉淀硬化不锈钢的组织: 1 070 °C 1 h, 油冷, -70 °C 2 h, 100 °C 2 h, 空冷  
Fig.1 Structure of precipitation hardening stainless steel 1Cr16Ni3Cu1MoW: 1 070 °C 1 h, OC, -70 °C 2 h, 100 °C 2 h, AC

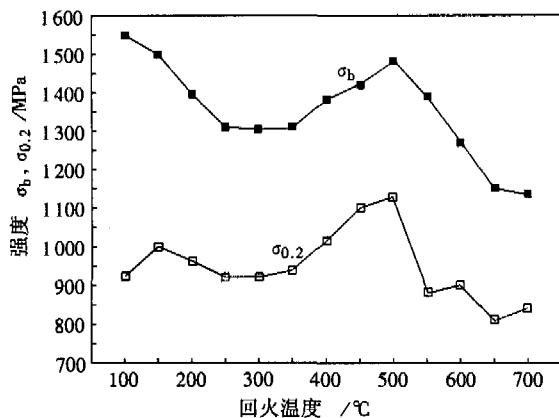


图 2 时效温度对 1 070 °C 1 h 油冷, -70 °C 2 h 处理的沉淀硬化不锈钢 1Cr16Ni3Cu1MoW 强度的影响  
Fig.2 Effect of aging temperature on strength of precipitation hardening stainless steel 1Cr16Ni3Cu1MoW treated at 1 070 °C for 1 h, OC, and at -70 °C for 2 h

c/a 减小, 固溶强化效果减弱。

在 350 ~ 650 °C 区间属于二次硬化区, 分为欠时效区和过时效区, 其中 350 ~ 500 °C 是欠时效区, 随着时效温度提高, 试验钢的 σ<sub>b</sub> 和 σ<sub>0.2</sub> 都增大, 超过 500 °C 时效属过时效区, 该钢的强度随时效温度的升高而减小。

由于大部分析出的第二相尺寸大于临界转变尺寸, 所以主要是遵循 Orowan 机制, 强度增量 YS<sub>PO</sub> 与第二相的体积分数 *f* 和颗粒尺寸 *d* 之间的关系如下:

$$YS_{PO} \propto f^{1/2} d^{-1} \cdot \ln d$$

从上式可以看出, 第二相的体积分数越大, 颗粒尺寸越小, 强化效果越大。

所以在欠时效状态下, 第二相的体积分数占主导作用。此时析出的第二相尺寸细小、弥散分布在位错线附近和板条界上(图 3a, b), 有效地起到钉扎位错运动的作用, 强度不断提高。

随着时效温度的提高, 第二相析出的数量增多, 体积分数增大, 尺寸变大, 强度增量大致与第二相颗粒的尺寸成反比。此时第二相颗粒大小占主导作用, 强化效果减小, 伴随着位错密度降低和基体软化, 所以硬度在达到峰值后开始减小。在过时效状态下, 第二相明显长大, 并且析出相形态由球状颗粒转变为杆状或短棒状(图 3c), 与基体失去共格关系, 沉淀强化作用也随之减弱<sup>[1]</sup>。

σ<sub>0.2</sub> 总体变化趋势和 σ<sub>b</sub> 相一致, 只是在 200 °C 之前回火有一个峰值出现(图 2)。由于此沉淀硬

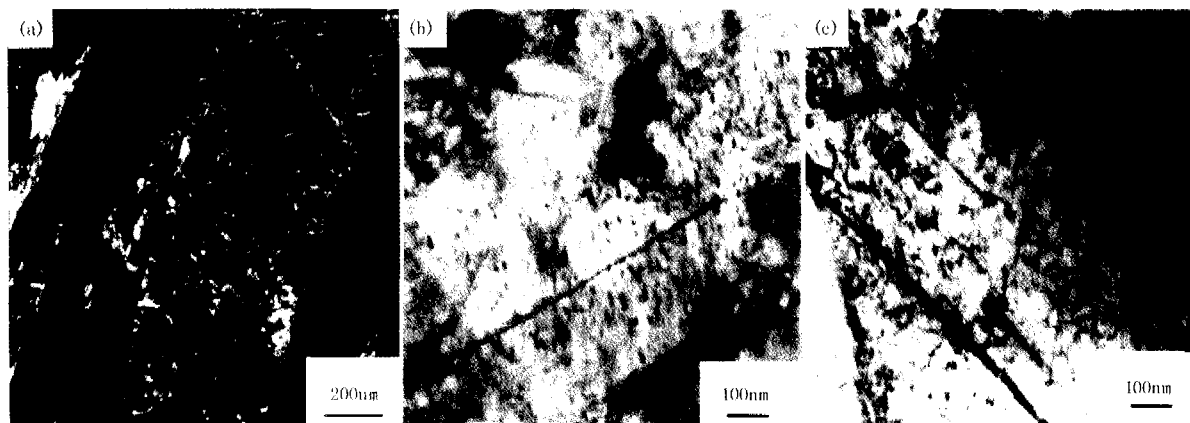


图 3 1Cr16Ni3Cu1MoW 沉淀硬化不锈钢第二相析出形貌: (a) 450 °C 2 h, (b) 500 °C 2 h, (c) 550 °C 2 h 时效  
Fig.3 Morphology of precipitated second phase in precipitation hardening stainless steel 1Cr16Ni3Cu1MoW: aged at 450 °C for 2 h (a), 500 °C for 2 h (b) and 550 °C for 2 h (c)

化不锈钢含碳不高,在 200 °C 低温回火时碳原子不脱溶析出  $\epsilon$ -碳化物。因为低碳马氏体中碳原子完全被位错吸收,没有多余的碳可供过渡相的析出,此时碳原子偏聚在位错线附近,因此钢的组织形态变化不大。但由于回火温度升高时碳原子向位错附近的偏聚增大,所以屈服强度随回火温度升高而增加<sup>[2]</sup>,超过 150 °C 后开始下降,在 350 °C 后出现回升,500 °C 时达到峰值为 1 125 MPa,接着再次下降。

在 100 ~ 250 °C 温度范围内,  $A_{KU2}$  随着回火温度的提高而增大(图 4),这是因为样钢经淬火后内应力较大,经低温回火此应力得到部分消除,使钢的韧性明显提高。

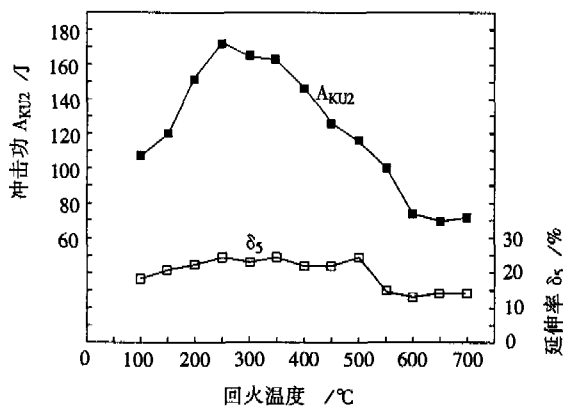


图 4 时效温度对沉淀硬化不锈钢 1Cr16Ni3Cu1MoW 冲击功  $A_{KU2}$  和延伸率的影响

Fig.4 Effect of aging temperature on impact energy  $A_{KU2}$  and elongation of precipitation hardening stainless steel 1Cr16Ni3Cu1MoW

在 250 ~ 350 °C  $A_{KU2}$  一直降低,这是因为随着回火温度的提高,残余奥氏体分解,分解为比较连续的板条间碳化物及直接析出的碳化物,残余奥氏体的减少和碳化物的析出,导致韧性显著降低。

在 350 ~ 500 °C 温度区间时效,此时强化相颗粒极细小弥散(图 3a, b),分布比较密集,位错线无法通过这些颗粒,而被堵塞,  $\sigma_b$  极大提高,从而导致钢样脆化和韧性下降。

$\delta_5$  变化趋势较平缓,在 500 °C 出现峰值接着下降,  $\Psi$  随着时效温度提高而增加,在 450 °C 达到峰值后开始下降。

从图 2 可以看出:强度的峰值出现在 500 °C 左右,为了较为准确地确定峰值的时效温度,进一步做了时效试验。

经过固溶 + - 192 °C 后时效钢样的  $\sigma_b$  及  $\sigma_{0.2}$  峰值(表 2)要比经过固溶 + - 70 °C(图 2)的要高,前者  $\sigma_b$  峰值为 1 605 MPa,后者峰值为 1 475 MPa,前者  $\sigma_{0.2}$  峰值为 1 180 MPa,后者  $\sigma_{0.2}$  峰值为 1 125 MPa,但前者  $\delta_5$ 、 $A_{KU2}$  却明显减小,且在 470 ~ 500 °C 温度区间时效,  $A_{KU2}$  是不断提高的(图 2)。可见,降低冷处理温度对提高钢样的  $\sigma_b$  是有利的。

表 2 时效温度对 1 070 °C 1 h 油冷, - 192 °C 2 h 处理的 1Cr16Ni3Cu1MoW 沉淀硬化不锈钢力学性能的影响

Table 2 Effect of aging temperature on mechanical properties of 1 070 °C 1 h, OC, - 192 °C 2 h treated precipitation hardening stainless steel 1Cr16Ni3Cu1MoW

回火温度/°C	$\sigma_b$ /MPa	$\sigma_{0.2}$ /MPa	$\delta_5$ /%	$A_{KU2}$ /J
455	1 550	1 150	20	78
470	1 580	1 170	22	-
485	1 600	1 170	21	84
500	1 605	1 180	20	88

### 3 结论

(1) 试验钢的  $\sigma_b$  和  $\sigma_{0.2}$ ,随着回火温度的提高,均遵循先降低后增加再降低的变化趋势。但  $\sigma_{0.2}$  在 150 °C 回火出现一小峰,  $A_{KU2}$  先增后减在 250 °C 回火出现峰值。

(2) 经过 1 070 °C 加热,保温 1 h,油冷, - 70 °C 冷处理,485 °C 时效 2 h 后空冷,该试验钢具有高硬度(HRC 48.1)和高韧性( $A_{KU2}$  119 J)。

(3) 经过 1 070 °C 加热,保温 1 h,油冷, - 192 °C 冷处理,500 °C 时效 2 h 后空冷,该试验钢  $\sigma_b$  达到最大值 1 605 MPa,此时韧性仍较好,  $A_{KU2}$  为 88 J。

(4) 该试验钢在欠时效阶段,析出的第二相细小弥散,分布在位错线上。随着时效温度的提高,第二相数量增多,颗粒尺寸变大,强度增加,韧性下降。在过时效阶段,第二相尺寸明显变大,部分第二相形貌由球状变为短棒状,与基体失去共格,强度下降。

### 参考文献

- 1 杨才福. Cu 时效硬化型高强度船体钢的研究. 北京:钢铁研究总院,2004:107
- 2 松涛,顾军. 热处理工. 北京:化学工业出版社,1999:64

钟海林(1979-),男,硕士研究生,从事金属材料研究。