

# 时效温度对 14Co-11Ni-2Cr-3Mo 超高强度钢组织与性能的影响

李阿妮<sup>1</sup> 王春旭<sup>1</sup> 刘宪民<sup>1</sup> 张景海<sup>2</sup> 王瑞<sup>3</sup> 李建新<sup>3</sup>

(1 钢铁研究总院结构材料研究所,北京 100081; 2 宝钢特殊钢分公司技术中心,上海 201900;

3 东北特殊钢集团公司技术中心,抚顺 113001)

**摘要** 研究了 25 kg 感应炉熔炼的 Co-Ni-Cr-Mo 二次硬化超高强度钢( % : 0.16C、11.0Ni、2.0Cr、3.0Mo、14.0Co)经 460 ~ 580 °C 时效后的组织和力学性能。试验结果表明,该钢经 860 °C 淬火 + ( - 73 °C )冷处理 + 480 °C 时效后,组织中存在大量弥散分布的针状 M(Co,Mo)<sub>2</sub>C 碳化物,钢的屈服强度 R<sub>p0.2</sub> 达到最大值 1 685 MPa,冲击功 A<sub>KV</sub> 为 20 J;在 550 °C 过时效状态下,板条边界逆转变奥氏体明显增加,A<sub>KV</sub> 增至 32 J,同时 R<sub>p0.2</sub> 下降至 1 320 MPa。

**关键词** 14Co-11Ni-2Cr-3Mo 超高强度钢 时效温度 组织 性能

## Effect of Aging Temperature on Structure and Properties of 14Co-11Ni-2Cr-3Mo Secondary Hardening Ultra-high Strength Steel

Li Ani<sup>1</sup>, Wang Chunxu<sup>1</sup>, Liu Xianmin<sup>1</sup>, Zhang Jinghai<sup>2</sup>, Wang Rui<sup>3</sup> and Li Jianxin<sup>3</sup>

(1 Structural Materials Institute, Central Iron and Steel Research Institute, Beijing 100081; 2 Technical Center, Special Steel Branch, Baosteel, Shanghai 201900; 3 Technical Center, Dongbei Special Steel Co Ltd, Fushun 113001)

**Abstract** Structure and mechanical properties of Co-Ni-Cr-Mo secondary hardening ultra-high strength steel 0.16C, 11.0Ni, 2.0Cr, 3.0Mo, 14.0Co melted by a 25 kg induction furnace and aged at 460 ~ 580 °C have been studied. Test results showed that with 860 °C quenching + cold treatment at -73 °C + aging at 480 °C, there was large amount dispersed acicular M(Co,Mo)<sub>2</sub>C precipitates in structure of steel, yield strength R<sub>p0.2</sub> of steel was up to maximum value 1 685 MPa, impact energy A<sub>KV</sub> was 20 J; with overaged condition at 550 °C, as amount of reverse transformation austenite at lath boundary obviously increased, A<sub>KV</sub> increased to 32 J and R<sub>p0.2</sub> decreased to 1 320 MPa.

**Material Index** 14Co-11Ni-2Cr-3Mo Ultra- high Strength Steel, Aging Temperature, Structure, Properties

### 1 试验材料与热处理

试验钢为 25 kg 真空感应熔炉制备的试料,其主要化学成分(%)为: 0.16C、11.0Ni、2.0Cr、3.0Mo、14.0Co。

锻造后的试料经过 670 °C 退火处理后粗加工成所需试样。对粗加工所得试样采用以下热处理制度:860 °C 1 h 油淬 + ( - 73 °C )深冷处理,再经 460 ~ 580 °C 5 h 时效处理。

### 2 试验结果与分析

#### 2.1 时效温度与力学性能的关系

由图 1 可以看出,在试验温度范围内,抗拉强度(R<sub>m</sub>)随着温度的升高下降,特别是温度超过 510 °C 后下降幅度更大;屈服强度(R<sub>p0.2</sub>)的变化趋势和抗拉强度的变化趋势相似,只是 480 °C 时效时强度略有上升,屈服强度在 480 °C 时达到峰值(R<sub>p0.2</sub> = 1 685 MPa)。

断面收缩率随时效温度的升高呈上升趋势,500 °C 时效时略有下降,随后到 530 °C 以较大幅度升高。延伸率在 500 °C 之前变化不大,到 510 °C 时有所下

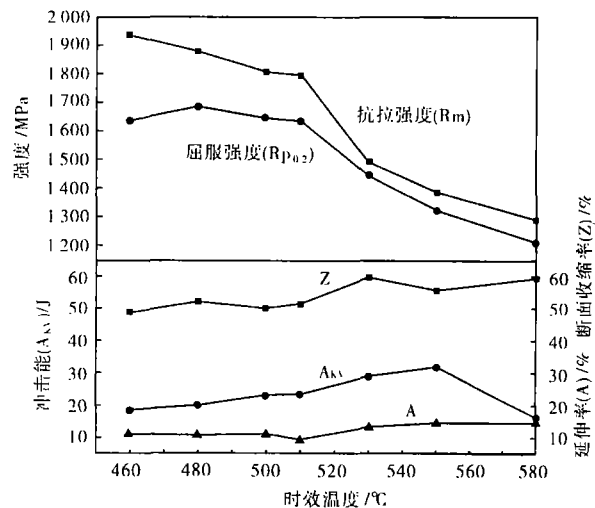


图 1 时效温度对 14Co-11Ni-2Cr-3Mo 钢力学性能的影响  
Fig.1 Effect of aging temperature on mechanical properties of 14Co-11Ni-2Cr-3Mo steel

降,随后有所上升,530 °C 后变化很小。

在 460 ~ 550 °C 时效温度范围内,冲击韧性随着温度的升高而升高,550 °C 时达到最大值(A<sub>KV</sub> = 32

J), 580 °C 时降到最低值 ( $A_{KV} = 16 \text{ J}$ )。

## 2.2 显微组织

试验钢在淬火状态下的组织为高密度位错的马氏体,组织中的碳化物是马氏体自回火过程中析出的  $\epsilon$ -碳化物和  $\text{Fe}_3\text{C}$ <sup>[1]</sup>。由公式(1)<sup>[2]</sup>(此公式适用于合金钢  $M_s$  点的计算)计算得到此钢的  $M_s$  点比较高(约 408 °C)。

$$M_s(^\circ\text{C}) = 550 - 361C - 39Mn - 35V - 20Cr - 17Ni - 10Cu - 5(Mo + W) + 15Co + 30Al \quad (1)$$

试验钢中除了含有大量的合金元素 Co、Ni 外,还含有强碳化物形成元素 Mo、Cr。Co 和 Ni 保证了钢的淬透性,共同添加 Co + Ni 助长了 Mo 的二次硬化作用,同时 Co 提高了二次析出碳化物的弥散度,从而使钢具有很高的强度和硬度。强碳化物形成元

素 Mo、Cr 则使钢在淬火和随后的回火过程中,析出与基体共格的  $M_2C$ ,从而产生二次硬化,钢的强度进一步提高。在 480 °C 时效状态下,基体组织为高密度位错的板条马氏体,存在较多的析出第二相。根据能谱分析和文献报道,第二相主要是含有 Co、Mo 和 Cr 的  $M_{23}C_6$  相,还应当有大量的针状  $M_2C$  碳化物(Co、Mo 的碳化物)(图 2b)<sup>[3]</sup>。其中  $M_2C$  无明显长大,部分共格,部分脱溶,板条边界开始出现逆转变奥氏体,但是量很少。当时效温度增加到 550 °C 时,位错组织明显回复, $M_2C$  长大,其与基体共格性下降,逆转变奥氏体明显增加(图 2d), $A_{KV}$  值明显增加(如图 1)。

480 ~ 550 °C 时的断口形貌均表现为韧性断裂特征,当时效温度升高到 580 °C 时,冲击韧性断口表

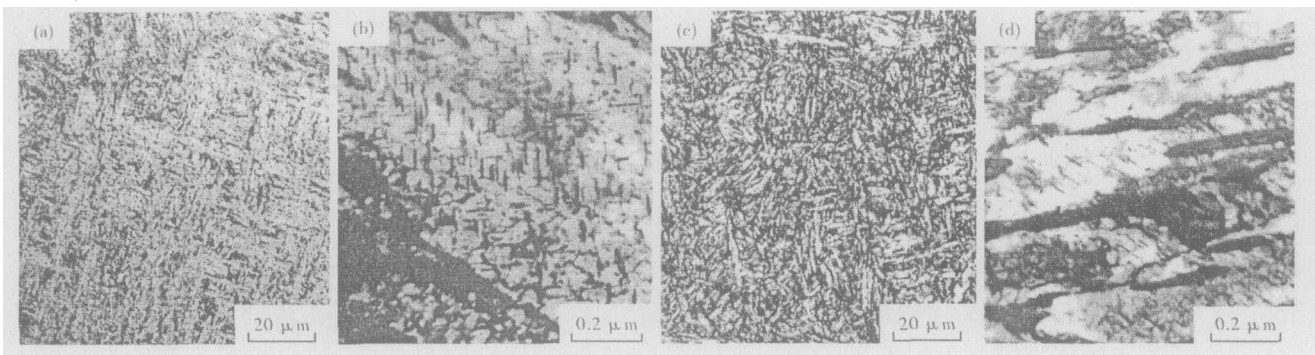


图 2 14Co-11Ni-2Cr-3Mo 钢时效组织:480 °C 时效-高密度板条马氏体(a),析出的针状碳化物(b);550 °C 时效-逆转变奥氏体明显增加(c),逆转变奥氏体的透射电镜明场像照片(d)

Fig. 2 Aged structure of 14Co-11Ni-2Cr-3Mo steel: aged at 480 °C - high density lath martensite (a), precipitated acicular carbide (b); aged at 550 °C - obviously increased reverse transformation austenite (c); morphology of reverse transformation austenite, bright field (d) TEM

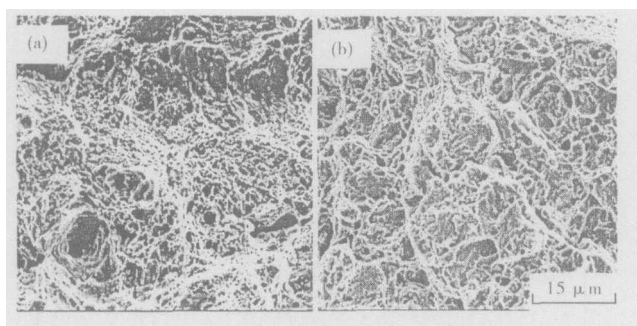


图 3 14Co-11Ni-2Cr-3Mo 钢时效断口形貌:(a) 550 °C, 微孔聚集型;(b) 580 °C, 准解理

Fig. 3 Morphology of fracture of 14Co-11Ni-2Cr-3Mo steel aged at 550 °C, micro void acculative pattern (a) and at 580 °C, quasi-cleavage fracture (b)

现为准解理断裂(图 3)。

## 3 结论

(1) 14Co-11Ni-2Cr-3Mo 钢 860 °C 淬火 + 480 °C

时效时,可以获得最佳的力学性能,组织中存在大量弥散分布的针状  $M_2C$  碳化物(Co、Mo 的碳化物),  $R_{p0.2} = 1685 \text{ MPa}$ ,  $A_{KV} = 20 \text{ J}$ 。

(2) 14Co-11Ni-2Cr-3Mo 钢在 550 °C 时效时,板条边界逆转变奥氏体明显增加,冲击韧性增加到最大值  $A_{KV} = 32 \text{ J}$ ,同时强度明显下降,  $R_{p0.2} = 1320 \text{ MPa}$ 。

## 参考文献

- 1 王六定. 超高强度钢 AerMet100 力学性能及连续转变理论研究. 西安:西北工业大学[博士学位论文],2000
- 2 胡德昌. 金属结构与抗蚀. 北京:宇航出版社,1987
- 3 万筱如. AerMet100——极好综合性能的超高强度钢. 北京航空航天大学学报,1996,022(066):639

李阿妮(1978-),女,硕士研究生,2002年北京理工大学材料科学与工程专业毕业,二次硬化型超高强度钢性能研究。

收稿日期:2006-09-18