

## 铜含量对超高强度低碳贝氏体钢力学性能的影响

宋新莉<sup>1</sup> 郭爱民<sup>2</sup> 袁泽喜<sup>1</sup> 唐金权<sup>2</sup> 董汉雄<sup>2</sup>

(1 武汉科技大学高温陶瓷与耐火材料湖北省重点实验室, 武汉 430081; 2 武汉钢铁集团公司, 武汉 430080)

**摘要** 实验用低碳贝氏体钢 (C: 0.042 ~ 0.045, Mn: 1.43 ~ 1.47, Cu: 1.0 ~ 2.5, Mo: 0.29 ~ 0.30, Nb: 0.025 ~ 0.029, Ti: 0.011 ~ 0.018, B: 0.0013 ~ 0.0023) 由 50 kg 真空感应炉冶炼。实验结果表明, 随铜含量由 1.0% 增加至 2.5%,  $\epsilon$ -Cu 在钢中沉淀速度加快, 峰值硬度增大; 随 Cu% 的增加, 轧后直接淬火 (DQ) 钢的屈服强度由 865 MPa 增至 918 MPa, DQ + 500 °C 回火钢的屈服强度由 935 MPa 增至 1 140 MPa, 但 1.0% ~ 2.5% Cu DQ + 500 °C 回火钢的抗拉强度和冲击韧性均比 DQ 态钢有所降低。

**关键词** 超高强度 低碳贝氏体  $\epsilon$ -Cu 沉淀 力学性能

## Effect of Cu Content on Mechanical Properties of Ultra High Strength Low Carbon Bainitic Steel

Song Xinli<sup>1</sup>, Guo Aimin<sup>2</sup>, Yuan Zexi<sup>1</sup>, Tang Jinquan<sup>2</sup> and Dong Hanxiong<sup>2</sup>

(1 Hubei Province Key Laboratory of Ceramics and Refractories, Wuhan University of Science and Technology, Wuhan 430081; 2 Wuhan Iron and Steel Group Company, Wuhan 430080)

**Abstract** Test low carbon bainitic steel (C: 0.042 ~ 0.045, Mn: 1.43 ~ 1.47, Cu: 1.0 ~ 2.5, Mo: 0.29 ~ 0.30, Nb: 0.025 ~ 0.029, Ti: 0.011 ~ 0.018, B: 0.0013 ~ 0.0023) was melted by a 50 kg vacuum induction furnace. Test results showed that with increasing Cu content from 1.0% to 2.5%, the precipitation speed of  $\epsilon$ -Cu in steel and the peak hardness increased; and with increasing Cu%, the yield strength of direct-quenching (DQ) steel after rolling increased from 865 MPa to 918 MPa and the yield strength of DQ + 500 °C tempering steel increased from 935 MPa to 1 140 MPa, while the tensile strength and impact toughness of DQ + 500 °C tempering 1.0 ~ 2.5Cu steel were lower than that of DQ steel.

**Material Index** Ultra High Strength, Low Carbon Bainitic Steel,  $\epsilon$ -Cu Precipitation, Mechanical Properties

### 1 实验材料和方法

试验材料由 50 kg 真空感应炉冶炼 (表 1), 钢锭加热到 1 250 °C 保温 2 h, 进行两阶段控制轧制:

1 150 ~ 1 000 °C 进行再结晶区轧制, 900 ~ 800 °C 为非再结晶区轧制, 轧成 16 mm 钢板, 轧后喷水冷却至 550 °C 后空冷。

表 1 试验用钢化学成分/%  
Table 1 Chemical compositions of test steels / %

编号	C	Si	Mn	P	S	Cu	Ni	Mo	Nb	Ti	B
1	0.043	0.30	1.43	0.007	0.004	1.0	0.70	0.29	0.025	0.011	0.001 7
2	0.044	0.32	1.43	0.007	0.005	1.5	0.71	0.30	0.027	0.018	0.001 3
3	0.042	0.32	1.43	0.008	0.004	2.0	0.72	0.30	0.028	0.012	0.001 5
4	0.045	0.32	1.47	0.008	0.004	2.5	0.71	0.29	0.029	0.016	0.002 3

轧后直接淬火 (DQ) 的钢板切成 (mm) 300 × 30 × 16 的样品, 在 500 °C 进行回火时效热处理, 保温时间从 5 ~ 600 min 不等。

### 2 实验结果与讨论

实验结果表明, 随铜含量的增加,  $\epsilon$ -Cu 的析出时间提前, 且维氏 (HV30) 硬度值也随铜含量的增加而增大。1.0% Cu 钢在 500 °C 时效处理 90 min 才达到硬度峰值, 硬度值为 337, 1.5% Cu 钢时效 20

min, 就达到硬度峰值 341, 而 2.0% Cu 钢时效 10 min 达到硬度峰值 359, 2.5% Cu 钢达到硬度峰值的时间也是 10 min 左右, 最大硬度值为 378。由于试验钢随铜含量的增加, 在相同回火温度条件下,  $\epsilon$ -Cu 析出的速度增大, 而且析出的量也增多, 达到峰值的时间缩短且硬度也增高。透射电镜观察结果显示, Cu 主要在铁素体基体内的位错线上和沿板条析出, 析出相颗粒非常细小, 尺寸为 nm 级, 见图 1。

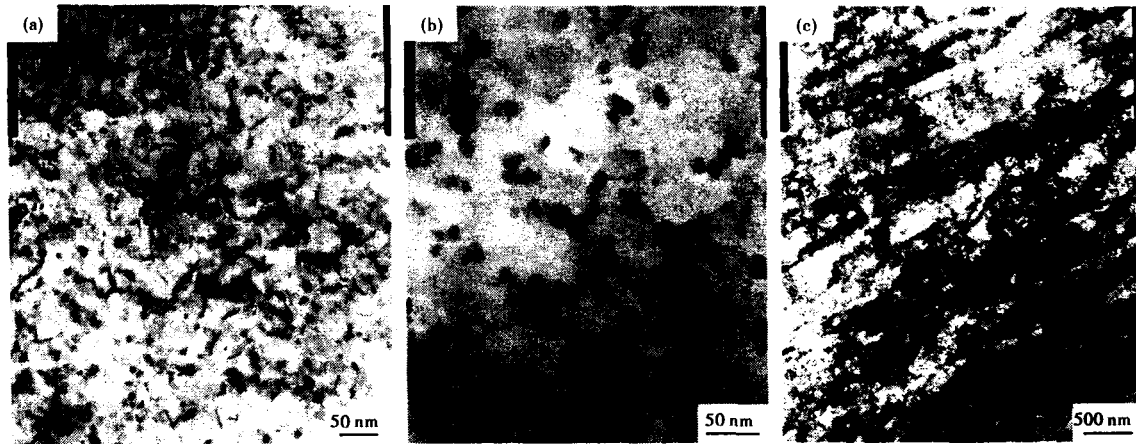


图 1 500 °C 回火 1 h 低碳贝氏体钢  $\epsilon$ -Cu 析出相的形貌, TEM: (a) 沿位错线的  $\epsilon$ -Cu 析出相; (b)  $\epsilon$ -Cu 析出相; (c) 沿板条析出的  $\epsilon$ -Cu 相  
Fig. 1 Morphology of  $\epsilon$ -Cu precipitates in low carbon bainitic steel tempered at 500 °C for 1 h, TEM: (a)  $\epsilon$ -Cu precipitates along dislocation line; (b)  $\epsilon$ -Cu precipitate phase; (c)  $\epsilon$ -Cu phase precipitated along lath

表 2 示出随铜含量的增加, 试验钢的屈服强度和抗拉强度都增大。与轧态相比, 不同铜含量的试验钢回火以后的屈服强度增大, 而抗拉强度降低。铜含量由 1.0% 变化到 2.0% 时, 轧态屈服强度在 865 ~ 908 MPa 之间, 抗拉强度在 1 060 ~ 1 090 MPa 之间, 在 500 °C 时效处理 1 h 以后, 屈服强度增大到 935 ~ 1 065 MPa, 而抗拉强度减少到 945 ~ 1 070 MPa 之间。由于试验钢经过控轧以后直接淬火, 抑制固溶的铜发生析出, 随着铜含量的增大, 固溶的铜量增大, 固溶强化效果显著。同时, 由于铜降低了贝氏体转变点, 高铜含量的试验钢组织更细, 细晶强化效果显著, 因此屈服强度随铜含量的增加而增大。同时试验钢时效处理以后,  $\epsilon$ -Cu 析出强化效果增大, 所以时效以后材料的屈服强度比轧态的屈服强度大。回火时基体出现共格 Cu 沉淀相和非共格沉淀相是导致强度和硬度增加的主要原因<sup>[1,2]</sup>。

试验钢时效处理以后的延伸率比轧态略有增加, 但是增加的幅度不是很大(表 2)。轧态时, 试验

钢的(-20 °C)冲击韧性随铜含量的增加有所增加, 但变化不大; 而在 500 °C 时效处理 1 h 以后, 冲击韧性随铜含量的增加而降低。透射电镜分析结果表明, 试验钢中铜含量较低时, 回火时析出的  $\epsilon$ -Cu 第二相颗粒数量较少, 尺寸也较小; 随铜含量增大, 析出的  $\epsilon$ -Cu 第二相明显增多, 而且尺寸增大, 所以试验钢的韧性随基体中第二相的增多及颗粒的增大而降低。

### 3 结论

(1) 试验钢在 500 °C 时效, 随铜含量的增加, 时效速度加速, 到达峰值硬度所需的时间缩短, 且峰值维氏硬度也随之增加。

(2) 与轧态相比, 试验钢时效处理以后, 屈服强度增大, 含铜 1.0% ~ 2.5% 的试验钢回火以后的屈服强度达到 935 ~ 1 140 MPa。而抗拉强度降低, 韧性也明显降低, 但是塑性变化不大。

(3) 随钢中铜含量的增加,  $\epsilon$ -Cu 第二相的析出量增多, 颗粒尺寸也增大。

### 参考文献

- Garcia C I, Mujahid M, Deardo A J. Proceedings of the International Symposium on High Performance Applications, Cleveland, OH, 1995, 135
- Fox A G, Mikalac S, Vassilaros M G. Speich Symposium Proceedings, ISS, Warrendale, PA, USA 1992, 155

宋新莉(1973-), 女, 讲师, 硕士, 2004 年毕业于华中科技大学, 钢的强韧性研究。

收稿日期: 2006-05-19

表 2 铜含量对低碳贝氏体钢力学性能的影响  
Table 2 Effect of Cu content on mechanical properties of low carbon bainitic steel

Cu/ %	热处理 工艺	$R_d$ / MPa	$R_m$ / MPa	A/ %	Z/ %	$A_{KV}$ (-20 °C)/J
1.0	轧态	865	1 060	10.0	51.0	68.0
	500 °C 回火	935	945	13.5	51.0	63.3
1.5	轧态	863	1 050	10.5	48.8	86.7
	500 °C 回火	938	988	12.5	54.0	42.0
2.0	轧态	908	1 090	11.2	52.8	82.7
	500 °C 回火	1 065	1 070	11.5	53.5	38.5
2.5	轧态	918	1 115	11.2	51.5	62.3
	500 °C 回火	1 140	1 145	11.0	50.5	18.0