

预变形对超低碳贝氏体钢中 ϵ -Cu 析出行为的影响

张胤彦¹ 唐金权² 郭爱民² 袁泽喜¹

(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 研究了 10% 预变形对 0.98% ~ 2.90% Cu 超低碳贝氏体钢(% : 0.042 ~ 0.045C, 1.43 ~ 1.48Mn, 0.30 ~ 0.33Si, 0.70 ~ 0.73Ni, 0.29 ~ 0.30Mo, 0.025 ~ 0.029Nb, 0.011 ~ 0.019Ti, 0.001 3 ~ 0.002 3B) 在 450 °C 和 550 °C 处理 1 ~ 10⁴ min 的时效动力学行为的影响。试验结果表明, 该钢在时效过程中, ϵ -Cu 析出动力学曲线出现硬度峰值, 当经过预变形处理后, ϵ -Cu 析出峰值出现的时间显著降低, 峰值高度明显增加。在 450 °C 时效时, 预变形的这一作用更为明显。

关键词 超低碳贝氏体钢 时效 ϵ -Cu 沉淀 预变形

Effect of Pre-Deformation on ϵ -Cu Precipitation Behavior in Ultra-Low-Carbon-Bainitic Steel

Zhang Yinyan¹, Tang Jinquan², Guo Aimin² and Yuan Zexi¹

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

Abstract The effect of 10% pre-deformation on aging dynamic behavior of an ultra-low-carbon-bainitic steel 0.042 ~ 0.045C-1.43 ~ 1.48Mn-0.30 ~ 0.33Si-0.70 ~ 0.73Ni-0.29 ~ 0.30Mo-0.025 ~ 0.029Nb-0.011 ~ 0.019Ti, 0.001 3 ~ 0.002 3B containing 0.98 ~ 2.90Cu at temperature 450 °C and 550 °C for 1 ~ 10⁴ min. The test results showed that the peak hardness of ϵ -Cu precipitation dynamic curves occurred during ageing of steel; as the steel was pre-deformed the time occurred peak hardness of ϵ -Cu precipitation obviously decreased and the value of peak hardness increased appreciably. The effect of pre-deformation was more evident for steel aging at 450 °C.

Material Index Ultra-Low-Carbon-Bainitic Steel, Aging, ϵ -Cu Precipitation, Pre-Deformation

超低碳贝氏体钢(ULCB)是近 20 多年来发展起来的一大类高强度、高韧性、多用途新型钢种。为了保证高的焊接性能, 该钢在原有的高强度低合金(HSLA)钢的基础上, 大幅度减少碳含量($\leq 0.05\%$), 添加 Cu 及微合金元素以得到高强度, 并获得极细的有高密度位错的强韧性贝氏体基体组织^[1]。其中有美国的 Cu-Nb-B 系列和日本 Mn-Nb-B 系列为典型钢种。Cu-Nb-B 系列钢是利用 ϵ -Cu 析出强化以及极细的且具有高位错密度的贝氏体组织强化来获得优异的综合性能。由于 Cu 具有良好的抗海水腐蚀性能, 因此这类钢主要用于海洋平台、船舶、桥梁和工程机械上。如美国 20 世纪 80 年代研制的 A710M, HSLA-100 等钢种, 现已全面代替需调质处理的高合金 HY-80 和 HY-100 钢^[2]。

在国内, 为了获得具有高强度与优良韧性相

结合的新一代船舶用钢, 含 1% 以上铜的超低碳贝氏体钢的研究正在进行, 600 ~ 700 MPa 级含铜工程结构用钢正在开发^[3]。

钢中 Cu 的作用除了对相变点发生影响外, 它作为主要合金元素加入钢中是利用 ϵ -Cu 析出的时效硬化效应来获得良好的综合性能。 ϵ -Cu 析出的时效行为影响着 Cu 的作用发挥, 控制 ϵ -Cu 析出是调节钢的强韧性与耐蚀性的关键^[4]。因此, 研究预变形对 ϵ -Cu 析出行为的影响很有必要。

1 实验材料与方法

1.1 实验材料

本次试验用钢由 50 kg 真空感应炉冶炼, 其化学成分如表 1 所示, 5 个试样 Cu 含量的变化范围为 1.00% ~ 3.00%, 其它元素成分十分相近。

试验用钢在 1 250 °C 均热, 1 100 °C 开轧至

表 1 试验用钢的化学成分/%
Table 1 Chemical compositions of test steel /%

编号	C	Si	Mn	P	S	Cu	Ni	Mo	Nb	Ti	B
(1)	0.043	0.30	1.43	0.007	0.004	0.98	0.70	0.29	0.025	0.011	0.001 7
(2)	0.044	0.32	1.43	0.007	0.005	1.52	0.71	0.30	0.027	0.018	0.001 3
(3)	0.042	0.31	1.43	0.008	0.004	2.10	0.72	0.30	0.028	0.012	0.001 5
(4)	0.045	0.32	1.47	0.008	0.004	2.50	0.71	0.29	0.029	0.016	0.002 3
(5)	0.045	0.33	1.48	0.008	0.004	2.90	0.71	0.29	0.029	0.016	0.001 5

900 °C 终轧后水冷。将轧后厚度为 12 mm 板坯切割成 300 mm × 30 mm × 12 mm 小板坯进行固溶处理后于冰盐水中淬火,固溶温度为 920 °C,保温时间 30 min。然后将一部分板坯进行拉伸变形量为 10% 的冷预变形处理,接着分别将预变形和未变形小板坯线切割成 20 mm × 12 mm × 8 mm 试样,并在打磨机上将毛刺和锈皮磨掉,同时将试样表面磨平,备做等温时效用。

1.2 时效动力学曲线测试和组织观察

将变形和未变形的小试样均进行时效处理,时效温度选取 450, 550, 650 °C,时效在盐浴炉中进行,保温时间从 5 ~ 1 200 min 不等,然后水冷。时效处理后的试样两面磨光后在维氏硬度计上进行硬度 (HV) 测量,选用载荷为 30 kg。每个试样测试 3 ~ 5 个点,取它们的平均值作为该试样的硬度值,然后

作出维氏硬度 (HV)-时间 (min) 时效动力学曲线。最后采用金相显微镜进行组织分析。

2 实验结果与分析

2.1 预变形对试验钢时效动力学曲线的影响

图 1a 和图 1c 是未预变形钢在 450 °C, 550 °C 时效温度下的动力学曲线。由图可见,硬度值随铜含量的增加而增大,随温度的升高而下降;在低温 450 °C 时曲线出现较宽的峰, Cu 含量低的钢 (1) 时效峰值还未出现。而 550 °C 时分裂为两个峰,第一个峰高于第二个峰,峰态更加陡峭,且随铜含量的增大此现象更加明显, Cu 含量的增加促进了 ϵ -Cu 的析出。同时,第一个峰比 450 °C 时效的第一个峰更靠左,表明时效温度升高, ϵ -Cu 析出速度加快。第二个峰为碳氮化物的析出峰。

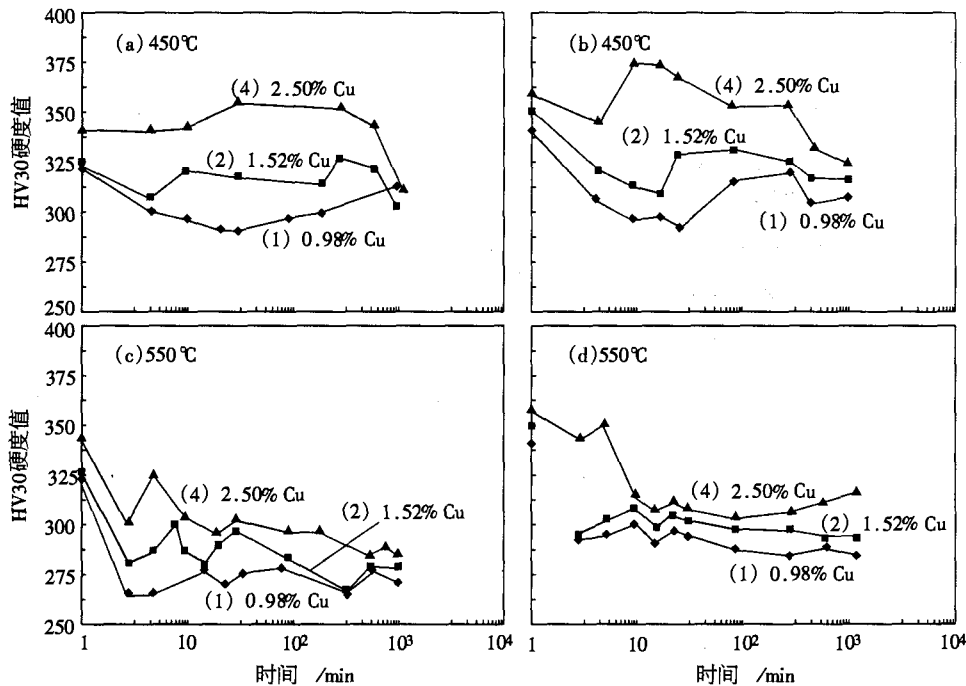


图 1 试验钢 ϵ -Cu 析出动力学曲线:(a) 450 °C, 未预变形;(b) 450 °C, 预变形 10%;(c) 550 °C, 未预变形;(d) 550 °C, 预变形 10%

Fig.1 ϵ -Cu precipitation dynamic curves: (a) 450 °C, non pre-deformation; (b) 450 °C, 10% deformation; (c) 550 °C, non pre-deformation; (d) 550 °C, 10% pre-deformation

不同 Cu 含量的试验钢经预变形在 450 °C 时效的动力学曲线(图 1b)表明,随时效时间的延长会出现硬度峰值,峰值高度随 Cu 含量的升高而升高。由于温度较低, Cu 原子的扩散速度较慢, ϵ -Cu 的析出慢长大也慢,从而导致曲线上升慢下降变缓,峰位变宽。而当 Cu 含量进一步增加时,见钢(4), ϵ -Cu 峰出现的时间明显左移,峰态陡峭, ϵ -Cu 的析出明显加快。总之,与无预变形试验钢的时效动力学曲线(见图 1a)相比,经预变形的试验钢时效硬度峰值出现的较早,硬度峰值普遍升高。

当时效温度为 550 °C 时(见图 1d),与图 1c 相比较,出现了两个峰,硬度峰值比 450 °C 的低,第一个峰与第二个峰明显分开,这和未变形的 550 °C 时效动力学曲线相似,但经预变形的时效动力学曲线的峰值硬度明显增高。且硬度峰值位置提前很小,或者说基本不变,这可能是温度高, ϵ -Cu 析出本身就比较快,预变形的作用很小的缘故。

2.2 预变形对 ϵ -Cu 析出行为的影响

由图 1 曲线分析可得,在铜含量相同的情况下,经预变形钢的硬度普遍高于未变形试验钢的硬度,且无论是第一个峰值位置还是第二个峰值位置都提前出现。这表明固溶处理后的预变形使 ϵ -Cu 析出与 Nb, Ti(C, N) 的析出明显加快,且导致峰值硬度升高。在低温 450 °C 时,预变形的作用就更加明显。

预变形使钢样产生很多形变带,位错密度大大增加。它不仅为钢样提供大量的形核位置,使析出物的弥散分布更加均匀,而且也提供了形核的动力,相当于使临界形核功 ΔG^* 减少^[5]。这样就使形核率增加,导致脱溶沉淀的沉淀相的相对体积分数增加。沉淀相的强化作用就使试验钢时效后的强度和硬度升高。这就解释了在 ϵ -Cu 时

效动力学曲线上经预变形试验钢的硬度普遍大于无预变形试验钢的硬度。

预变形的钢(2)在 90 min 左右达到峰值硬度 HV333.2,未变形的钢(2)却要 600 min,预变形的钢(4)在 10 min 左右就达到峰值硬度 HV375.67,未变形的钢(4)却要 100 min。在中温(550 °C)时, Cu 原子有了一定的扩散能力,预变形对 ϵ -Cu 析出的促进作用较低温时小,预变形的钢(2)在 10 min 左右达到峰值硬度 HV311.5,预变形的钢(4)在 5 min 左右达到峰值硬度 HV351,而未变形的钢(2)和钢(4)到达硬度峰值的时间分别相当,硬度有较大的降低。这与 Tomita^[6] 研究的结果相似,他们的结果只是在 590 °C 时效时, Cu 含量对 ϵ -Cu 析出行为才有明显的影响。

在本实验中,由于有一定的预变形处理,预变形促进 ϵ -Cu 析出, Cu 含量对 ϵ -Cu 析出行为就有较为明显的影响。故在有预变形的时效动力学曲线上峰值位置较无预变形的时效动力学曲线上峰值位置有所提前。

预变形促进 Fe-Cu 合金和含铜钢中 ϵ -Cu 的析出,不仅使到达峰值硬度所需的时间缩短,而且变形量越大,达到峰值所需时间越短,峰值也越高^[7]。佐野直幸等^[8]对 Fe-1.4% Cu 的差热分析研究结果表明,样品变形 10% 后时效,发现第一个放热反应向低温方向移动,经 HRTEM 和 AP 分析表明,第一个放热反应对应着含 10 个 Cu 原子的原子团的出现。故当试样进行变形处理后, ϵ -Cu 在低温时就可出现。

2.3 金相显微组织观察

图 2 列出钢(2)、(4)在固溶处理后的显微组织。固溶处理态组织为粒状贝氏体和少量条状贝氏体。在粒状贝氏体组织中,贝氏体铁素体基体

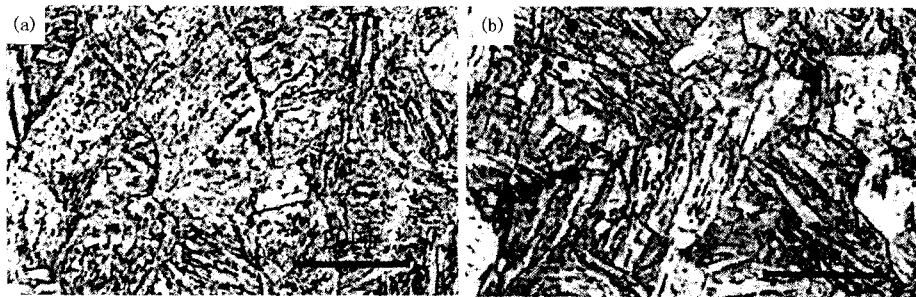


图 2 固溶态试验钢组织:(a) 1.52% Cu 钢(No. 2 钢);(b) 2.50% Cu 钢(No. 4 钢)
Fig. 2 Structure of test steel, solid solution condition: (a) 1.52Cu (No2 steel) (b) 2.50Cu (No4 steel)

上有零乱分布的马氏体/奥氏体(M/A)小岛;条状贝氏体区域内板条边界不连续,呈断续状的残余奥氏体条或 M/A 小岛;随着 Cu 含量的升高,见图 2(b),组织中条状贝氏体所占的比例变大,同时粒状贝氏体与板条贝氏体团的尺寸也变小,板条也较窄、连续和平直。钢中 Cu 量增加,使组织转变温度降低,故条状贝氏体量升高而且变细。

图 3 列出的是钢(4)时效后的金相组织。在 450 °C 时效时,钢(4)中的条状贝氏体和粒状贝氏体的界面变得模糊不清,条界逐渐消失,这是由于 ϵ -Cu 在晶界和晶内弥散析出,以及条界晶内的残余奥氏体和 M/A 小岛发生分解所致。而且经过预变形的钢(4)时效后更加模糊不清。钢(2)在

550 °C 时效时,也发生了组织模糊的现象,但相对要清晰一些,界面还可分辨,即使经过预变形,界面和条界还隐约可见。钢(2)含 Cu 量低, ϵ -Cu 析出的量要少,对界面和条界搅动小。随着 Cu 含量的升高,组织中的 ϵ -Cu 析出物逐渐增多,由于钢(4)的铜含量较高,达到了 2.5%, ϵ -Cu 析出物多使硬度峰值提高很多,对界面和条界搅动大,组织的模糊程度比钢(2)大得多,这与时效动力学曲线的结果是一致的。同时,预变形在 550 °C 促进 ϵ -Cu 析出与 Nb, Ti(C, N)的析出,这些析出物阻止了贝氏体的分解,延缓了再结晶的速度, Nb, Ti(C, N)析出的这种阻止更加明显。

试验钢经变形后增加了 ϵ -Cu 析出相形核位

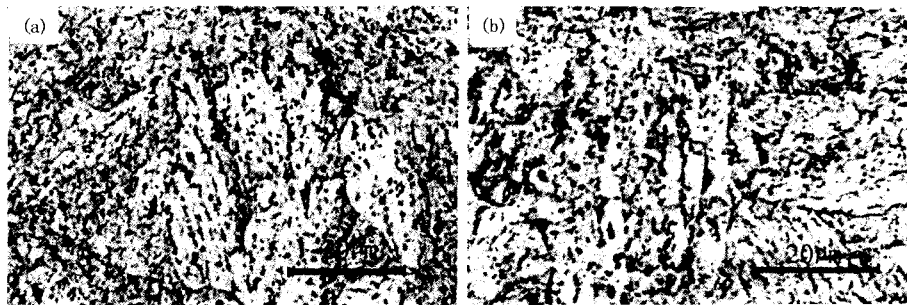


图 3 2.50% Cu 钢(No. 4 钢)450 °C 时效后的组织:(a) 未预变形;(b) 10% 预变形
Fig. 3 structure of 2.50Cu steel (No4), aged at 450 °C: (a) non pre-deformation; (b) 10% deformation

置, ϵ -Cu 析出的量为增加,而且使析出物的弥散分布更加均匀,从而使合金析出硬化程度大幅度提高。故在固溶和时效处理之间添加一定的预变形处理可进一步强化合金。

3 结论

(1) 试验的含 Cu 超低碳贝氏体钢在较低温 450 °C 时效时,预变形对 ϵ -Cu 析出行为的促进作用较大;时效温度升至 550 °C 时,预变形的促进作用相对较小。

(2) 试验钢固溶处理后的 10% 预变形使 ϵ -Cu 析出与 Nb, Ti(C, N)的析出明显加快,且导致峰值硬度升高。在低温 450 °C 时,预变形的作用更加明显。

(3) 固溶处理试验钢组织为粒状贝氏体和少量条状贝氏体。随 Cu 含量升高,组织中条状贝氏体所占比例变大,同时粒状贝氏体与板条贝氏体团的尺寸变小,板条较窄、连续和平直。变形时效后,试验钢的第二相析出大量增加且更加均匀。

参考文献

- 1 Yang S W, Zhang S H, He X L, et al. Microstructure in a Low Carbon High Strength Bainitic Steel, In: Microstructure LCS94, Tokyo, 1994: 39
- 2 Thompson S W, Krauss G. Copper Precipitation During Continuous Cooling and Isothermal Aging of A710-Type Steels, Metal Mater Trans, 1996, 27A: 1573
- 3 王思鸿. 现代舰船新技术发展研究. 中国舰船工业总公司, 1990: 549
- 4 周家祥, 袁泽喜. ϵ -Cu 沉淀析出对超低碳贝氏体钢耐蚀性的影响. 材料科学与工程科技学术论文集. 北京: 原子能出版社, 2005: 85
- 5 Christian J W. The Theory of Transformation in Metal and Alloys, Pergamon, New York, 1975
- 6 Tomita Y, Haze T, Saito N, et al. Development of 590-MPa Class High Tensile Strength Steel with Superior HAZ Toughness by Copper Precipitation Hardening, ISIJ International, 1994, 34(10): 836
- 7 雍岐龙, 马鸣国. 微合金钢—物理和力学冶金. 北京: 机械工业出版社, 1989
- 8 佐野直幸, 前原泰裕. Cu 添加极低碳素钢における Cu 析出初期阶段. 日本金属学会志, 1996, 60(3): 261

张胤彦(1981-), 女, 硕士研究生, 从事冶金材料研究。

收稿日期: 2005-08-30