

1.18Cu 高纯钢等温时效时富铜相的析出行为

安治国 任慧平 刘宗昌 王海燕

(内蒙古科技大学材料科学与工程学院, 包头 014010)

摘要 用扫描电子显微镜(SEM)、高分辨电子显微镜(HREM)和 HV50 硬度计, 试验研究了含铜高纯钢(%:0.014C, 0.10Mn, 0.05Si, 1.18Cu, < 0.002S, 0.006P) 650 °C 100 s ~ 300 h 等温时效时的组织和硬度。结果表明, 650 °C 等温时效时富铜相优先在铁素体晶界析出, 随等温时效时间增加, 富铜相尺寸增大。650 °C 等温时效 10^3 s 时, 富铜过渡相与铁素体基体保持共格性, 使硬度达到最大值。在过时效期间, 富铜过渡相逐渐演化成 fcc ϵ -Cu 颗粒。

关键词 含铜高纯钢 时效硬化 富铜过渡相

Precipitation Behavior of Rich Copper Phase in 1.18Cu High Purity Steel during Isothermal Aging

An Zhiguo, Ren Huiping, Liu Zongchang and Wang Haiyan

(Material Science and Engineering School, Inner Mongolia University of Science and Technology, Baotou 014010)

Abstract The structure and hardness of contained Cu high purity steel - 0.014C, 0.10Mn, 0.05Si, 1.18Cu, < 0.002S, 0.006P during isothermal aging at 650 °C for 100 s ~ 300 h have been tested and studied by scanning and high resolution electron microscope and HV50 hardness tester. The test results showed that with aging at 650 °C, the rich copper phase particles precipitated prior at ferrite grain boundary, and with increasing isothermal aging time the size of rich copper phase increased. As aging at 650 °C for 10^3 s, the rich copper transient phase kept coherency with ferrite matrix led to maximum hardness value. And during overaging period, the transient phase evolved gradually into fcc ϵ -Cu particle.

Material Index High Purity Steel Containing Cu, Age-Hardening, Rich Copper Transient Phase

20 世纪 80 年代开发的高强韧性、良好焊接性和耐蚀性的船体用钢^[1], 将铜作为合金元素加入钢中, 利用其时效硬化效应来获得良好的综合性能^[2,3]。钢中添加铜, 依靠铜的时效硬化作用, 在对韧塑性没有明显损害的条件下获得高强度和抗疲劳性^[4,5]。

铜在高纯钢中的作用主要是其析出硬化产生的时效硬化效应^[6~9], 并通过研究含铜高纯钢等温时效过程的显微组织, 来考察铜在钢中的时效硬化作用。

1 实验材料及方法

实验材料为由 50 kg 真空感应炉冶炼的含铜低碳高纯净钢。开锻温度 1 000 °C, 终锻温度 800 °C, 锻后入水冷却。其化学成分(%): 0.014C, 0.05Si, 0.10Mn, 1.18Cu, < 0.002S, 0.006P。

将钢锭加热轧制成 10 mm 厚的板材, 应用 DK-77 型电火花切割机床将板材切成尺寸为 15 mm × 10 mm × 6 mm 的小试样。将试样在 850 °C

加热保温 2 h 后水冷进行固溶处理, 随后在 650 °C 经 10^2 s ~ 300 h 等温时效后空冷至室温。

将固溶和时效处理后的试样在 HV-50 型硬度计上测定维氏硬度(HV), 选用载荷为 30 kg。将热处理后的试样制备成金相试样, 用 4% 的硝酸酒精腐蚀, 在金相显微镜(ZEISS)和扫描电子显微镜(Quanta 400)下观察并分析组织。试样经双喷减薄后, 应用 JEM-2010 高分辨电子显微镜进行观测和衍射分析, 研究其纳米结构。

2 实验结果与分析

2.1 显微硬度

从 650 °C 的等温时效硬度变化曲线(图 1)可以看出: 固溶态的硬度为 110(HV)。随时效时间增加, 硬度曲线在 10^3 s 出现时效峰, 其峰值硬度为 159(HV), 表明此时强化效果达到最佳。再延长时效时间, 试样硬度开始下降, 对应于过时效状态, 直至时效 300 h, 硬度降低到 94(HV)左右。

2.2 固溶组织

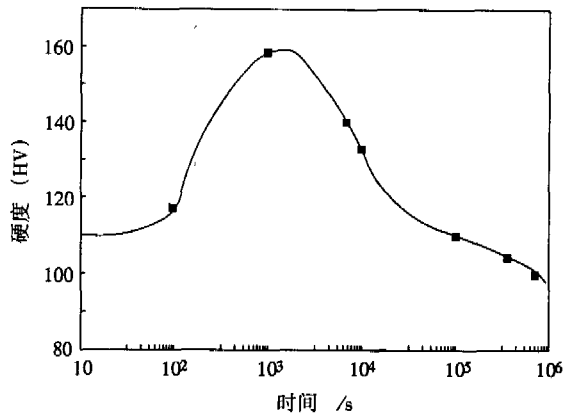


图 1 0.014C-1.18Cu 钢 650 °C 等温时效硬度曲线
Fig.1 Hardness curve of 0.014C-1.18Cu steel isothermal aging at 650 °C

试样经 850 °C 加热 2 h, 水冷固溶后, 光学金相观察为单一的等轴状铁素体晶粒, 如图 2(a) 所示。用 JEM-2010 高分辨电子显微镜, 在数十万倍下观察, 发现在过饱和铁素体晶粒中分布着大量纳米级的“颗粒”, 如图 2(b) 所示。

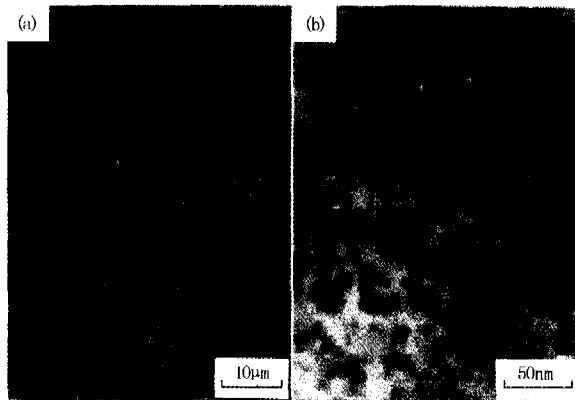


图 2 0.014C-1.18Cu 钢固溶组织(a)光学的和 TEM(b)
Fig.2 Solution structure of 0.014C-1.18Cu steel: (a) optical; (b) TEM

从图 2 可见, 在铁素体晶粒内分布着密密麻麻的等轴状区域, 尺度大多为 4 ~ 25 nm, 并且数量很大, 体积分数约占 30%。这些区域与铁素体基体之间没有清晰的界限。等轴状区域无疑是铜原子的偏聚区。

2.3 时效组织

实验钢热处理工艺为 850 °C 固溶 2 h 后进行 650 °C 等温时效处理。图 3 为时效试样扫描电镜照片。从图 3 可见, 在欠时效阶段, 如图 3(a) 所示, 发生了铜的脱溶, 含铜析出物在铁素体晶界处形成, 在铁素体晶粒内部几乎看不见析出物。在铁素体晶界上, 断断续续的析出颗粒状白色析出物, 颗粒大小约 260 nm。图 3(b) 为时效峰处的扫描电镜照片, 不但在铁素体晶界处有富铜颗粒析出, 在铁素体晶粒内部也出现了弥散分布的析出颗粒, 其大小约 460 nm。当试样处于过时效阶段时, 析出颗粒长大粗化, 析出颗粒尺寸约 670 nm。并且其数量与时效峰时有所减少(图 3c), 弥散度降低。

本实验对等温时效过程中富铜析出颗粒进行了成分能谱分析。欠时效阶段析出物中铜含量(质量百分数)为 11.98%。时效峰处(图 3b 中 A 颗粒)析出物中铜含量为 20.58%。过时效阶段(图 3c 中 B 颗粒)析出物中铜含量为 21.93%。可见, 这种富铜颗粒并不是纯铜, 而是含有较高 Fe 的过渡相。对比发现, 随着时效时间的延长, 富铜析出颗粒中铜的含量逐渐提高。

图 4(a) 为时效峰处的高分辨电镜照片, 可以看到, 析出颗粒与铁素体基体保持完全共格。经分析, 时效峰处的析出颗粒并不是纯铜颗粒, 而是一种富铜颗粒, 处于向平衡的面心立方结构相转

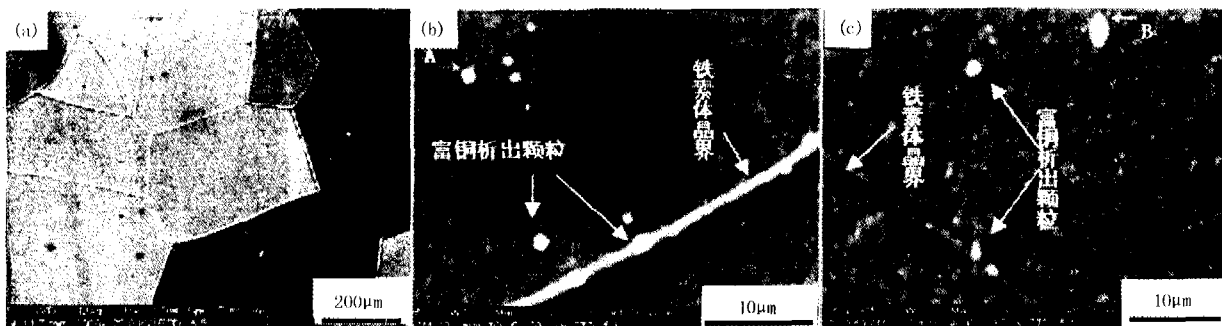


图 3 0.014C-1.18Cu 钢 650 °C 等温时效(a) 10² s(欠时效), (b) 10³ s(时效峰)和(c) 100 h(过时效)的显微组织
Fig.3 Structure of 0.014C-1.18Cu steel aged at 650 °C for 10² s - insufficient aging (a), 10³ s - aging hardness peak (b) and 100 h - overaging (c)

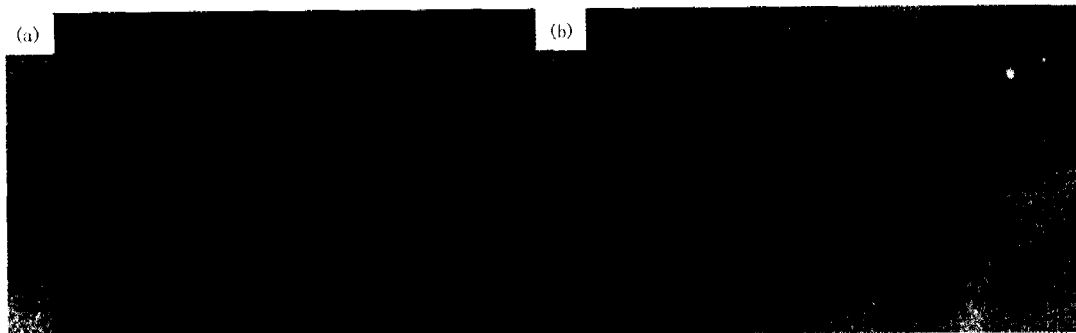


图 4 等温时效 0.014C-1.18Cu 钢中的富 Cu 过渡相形貌(a)和过时效 ϵ -Cu 颗粒(b)

Fig. 4 Morphology of rich copper transient phase (a) and overaging ϵ -Cu particles (b) in isothermal aging 0.014C-1.18Cu steel

变过程的中间亚稳定阶段^[10],这种过渡相弥散分布,含较高的 Fe 并与基体保持完整的共格关系,导致时效过程中硬度达到最大值。图 4(b)为 650 °C 等温时效 300 h 的电镜照片及对应的选区衍射斑点。在过时效阶段,铜原子不断富集,析出颗粒长大粗化,颗粒间距变大,弥散度降低,并由原来的颗粒状变成棒状或者盘状。从图 4(b)中衍射花样上可以看到,在中心斑点(000)周围存在小衍射斑点构成的衍射环,经分析,时效 300 h 后析出颗粒已经为 fcc 结构的 ϵ -Cu。

3 讨论

铁素体基体中存在大量的位错等晶体缺陷,并且这些缺陷具有一定的能量。在时效过程中,一方面可以为析出相的形核提供高能量区,另一方面又为铜的扩散提供扩散通道。回火温度越高,原子活动的的能力增加,位错的运动使位错密度不断降低。含铜脱溶物的形成,成为位错运动的障碍物,位错的运动被这些弥散的质点钉扎,被迫

切割或绕过弥散的含铜质点,使合金得到明显强化。过时效时,脱溶物长大粗化,较近距离的析出相逐渐合并,尺寸增大,含铜析出物之间的距离增大,位错可以在脱溶物之间弓弯,造成强化效果减弱,导致硬度下降。由此可见,符合时效硬度曲线的变化(图 1)。

4 结论

(1) 实验钢 850 °C 固溶处理后,在等轴状铁素体晶粒中分布着大量纳米级的铜原子偏聚区。

(2) 650 °C 时效时,富铜析出物优先在铁素体晶界上析出,然后在晶粒内析出,使含铜高纯钢得到强化。过时效阶段,富铜颗粒粗化,导致硬度下降。

(3) 650 °C 等温时效 10^3 s 时,富铜过渡相与铁素体基体保持共格关系,使硬度达到峰值。在过时效阶段,这些过渡相逐渐演化成 fcc 结构的棒状或者盘状 ϵ -Cu 颗粒。

国家自然科学基金资助项目(50361001)

参考文献

- 1 Montem arano T W. High Strength Low Alloy Steels in Nava Construction, Journal of Ship Production, 1986, 2(3): 145
- 2 Wang Shyi-Chin, Kao Powe. Effect of Alloying Elements on the Structure and Mechanical Properties of Ultra Low Carbon Bainitic Steels. J mater Sci, 1993, 28(19): 5169
- 3 Thompson S W, Krauss G. Copper Precipitation during Continuous Cooling and Isothermal Aging of A710-Type Steels. Met Trans A, 1996, 27A(6): 1573
- 4 Thompson S W. Continuous Cooling Transformation Behavior in HS-LA80 Steel. Metallurgical and Materials Transactions, 1996, 27A(6): 1557
- 5 Deschamps M, Militzer and Poole W J. Precipitation Kinetics and Strengthening of a Fe-0.8 wt% Cu Alloy, ISIJ International, 2001, 41: 196
- 6 王学敏,周桂峰,杨善武,等.含铜低合金高强钢的时效行为。

- 7 钢铁研究学报, 2000, 12(5): 40
- 7 杨才富,张永权,刘天罕.汽车用含铜高强度薄钢板.钢铁研究学报, 1997, 9(3): 63
- 8 朱丽慧,赵钦新,顾海澄,等.关于钢中用铜合金化的再认识.钢铁, 1999, 34(3): 71
- 9 王海燕,刘宗昌,任慧平.固溶温度对含铜钢时效行为的影响.包头钢铁学院学报, 2004, 23(1): 41
- 10 毛卫民,任慧平,余永宁.结构钢中含铜析出相的时效强化作用.材料热处理学报, 2004, 25(2): 1

安治国(1979-),男,硕士研究生,从事新材料研究。

收稿日期:2005-09-02