

Nb、Ti 碳化物的溶解与析出对低 C 微合金钢组织和性能的影响

李维娟¹ 康小兵²

(1 鞍山科技大学, 鞍山 114044; 2 鞍钢热连轧带钢厂, 鞍山 114021)

摘要 采用理论计算方法分析了 Nb、Ti 碳化物在低 C 微合金钢(0.09C、1.42Mn、0.035Nb、0.012Ti)奥氏体中的溶解与析出,测试了不同加热温度下奥氏体晶粒尺寸以及固溶-时效后实验钢的硬度。结果表明,Nb、Ti 碳化物在 1 060 °C 全部溶解,800 °C 时效时,奥氏体中的 Nb、Ti 基本以 NbC、TiC 形式析出。700 °C 时效时,Nb、Ti 碳化物在铁素体内析出,随温度降低,碳化物析出减慢。600 °C 时效,钢的硬度达到最大值。

关键词 Nb-Ti 微合金钢 碳化物 溶解 析出

Effect of Dissolution and Precipitation of Nb-Ti Carbides on Structure and Properties of Low Carbon Microalloying Steel

Li Weijuan¹ and Kang Xiaobing²

(1 Anshan University of Science and Technology, Anshan 114044; 2 Hot Strip Mill, Anshan Iron and Steel, Anshan 114021)

Abstract The dissolution and precipitation of Nb-Ti carbides in austenite of a low carbon microalloying steel (0.09C, 1.42Mn, 0.035Nb, 0.012Ti) have been analyzed by theoretical calculation method, and the austenite grain size with different heating temperature and the hardness of steel after solid solution treatment -aging were examined. The results showed that Nb-Ti carbide completely dissolved at 1 060 °C and almost Nb and Ti in austenite precipitated in the form of NbC and TiC at 800 °C aging. At 700 °C aging the Nb-Ti carbides precipitated in ferrite, and with decreasing temperature the carbides precipitation decreased. The hardness of steel was up to maximum value as aged at 600 °C.

Material Index Nb-Ti Microalloying Steel, Carbide, Dissolution, Precipitation

钢铁结构材料中最具活力和创造性、发展最快的是低合金高强度钢,特别是微合金钢^[1]。微合金钢在控轧控冷或热处理过程中,微合金元素的溶解与析出对组织性能有重要的影响^[2-6]。有关微合金碳氮化物在奥氏体变形及弛豫过程中的析出已进行了较多研究并取得了一定成果^[5,7-9],实验研究了微合金元素 Nb、Ti 碳化物的溶解与析出对钢组织和性能的影响。

1 实验材料与方法

实验材料为鞍钢生产的 Nb-Ti 低碳微合金钢,其化学成分(%)为 0.09C、0.28Si、1.42Mn、0.010P、0.008S、0.035Nb、0.012Ti。

Nb、Ti 碳化物在奥氏体中的溶解与析出采用理论计算的方法进行分析,即根据微合金元素的固溶度积公式并结合微合金碳化物的理想化学配比,求出 700~1 000 °C 沉淀析出反应平衡时 Nb、Ti 的质量百分数。

不同温度淬火后所得的显微组织,采用过饱和苦味酸溶液加海狗洗发膏浸蚀;奥氏体晶粒大小,使用 Zeiss 显微镜及其附带的图像分析软件进行分析。

NbC、TiC 在铁素体中的析出,采用时效硬度法进行研究,即首先进行 1 200 °C 或 900 °C 4 min 固溶处理,然后再加热到 550~700 °C 进行 10~20 000 s 时效,测量时效过程中硬度的变化。

2 实验结果与分析

2.1 Nb、Ti 碳化物在奥氏体中的溶解与析出

通常微合金钢中可以形成微合金碳化物、氮化物或碳氮化物。本实验材料中不含氮元素或含氮量极少,可忽略氮元素的存在,认为所形成的微合金化合物是 NbC 和 TiC。根据 NbC 和 TiC 在奥氏体中的平衡固溶度积公式^[10],经计算得知,当温度为 1 037 °C 时,TiC 全部固溶于奥氏体中,奥氏体组织中只有极少部分 NbC 未完全固溶;当温度达到 1 060 °C 以上时,NbC 也将全部固溶。不同温度下 Nb、Ti 的溶解与析出曲线如图 1。

由图 1 可见,随着温度降低,NbC、TiC 的析出量增大,随着温度的升高,NbC、TiC 的固溶度增大。在 700~850 °C 之间,Nb、Ti 碳化物的析出量和固溶度变化较为平缓;在 900~1 050 °C 之间,Nb、Ti 碳化物的溶解和析出量均随着温度的变化而急剧变化。

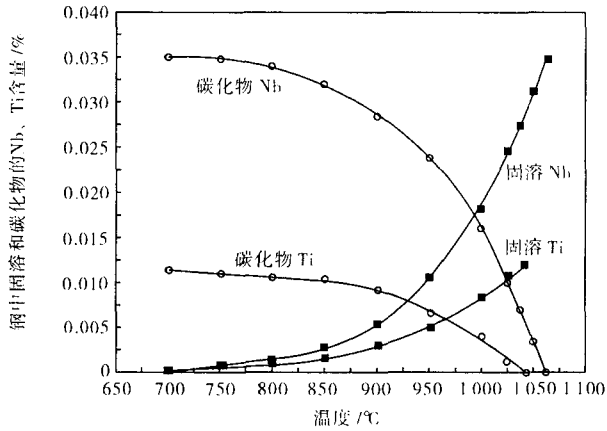


图 1 温度对微合金钢中固溶和碳化物的 Nb、Ti 含量的影响

Fig. 1 Effect of temperature on solid solution and carbide Nb-Ti content in microalloy steel

2.2 不同加热温度下的奥氏体晶粒大小

对实验钢分别采用 1 000, 1 150, 1 200, 1 250 °C 加热, 180, 300, 900 s 保温, 水淬后所获得的奥氏体晶粒尺寸与加热温度之间的关系见表 1。

由表 1 可知, 加热温度在 1 150 °C 以下时, 随加热温度的提高, 奥氏体晶粒长大较为缓慢, 当加热温度超过 1 150 °C 时, 随着加热温度的升高, 奥氏体晶粒长大速度变快。

表 1 固溶温度和保温时间对实验 Nb-Ti 微合金钢奥氏体晶粒直径的影响/μm

Table 1 Effect of solid solution temperature and time on austenite grain diameter of test Nb-Ti microalloy steel /μm

固溶温度/°C	保温时间/s		
	180	300	900
1 000	20	25	40
1 150	24	30	50
1 200	35	50	60
1 250	45	63	65

由图 1 可见, 当加热温度较低时, Nb、Ti 未能完全固溶于奥氏体中, 未溶的 Nb、Ti 碳化物质点会钉扎奥氏体晶界, 阻止奥氏体晶粒长大。当温度升高到 1 150 °C 时, Nb、Ti 碳化物已完全溶入奥氏体中, 失去对晶界的钉扎作用, 因而奥氏体晶粒长大速度变快。因此, 依据 Nb、Ti 的溶解与析出情况, 实验钢为了获得细小的奥氏体晶粒尺寸, 适宜的加热温度应选择在 1 100 ~ 1 150 °C。

2.3 Nb、Ti 碳化物在铁素体中的时效析出与硬化

为保证 Nb、Ti 完全溶入奥氏体中且有效缩短固溶时间, 将试样加热到 1 200 °C 保温 4 min、水冷, 然

后按图 1 的工艺分别进行不同温度和时间的时效处理, 测量各试样的硬度, 实验结果如图 2。

由图 2 可见, 在各时效温度下, 试样的硬度随时效时间的变化规律相同, 即硬度随时效时间的增加先下降后上升然后再下降, 存在硬度峰值和谷值。可以认为试样硬度的变化主要是组织内 Nb、Ti 碳化物的析出造成的。时效硬度谷值前随时间的增加硬度降低, 其主要原因是淬火内应力不断释放的结果。硬度经过低谷开始逐渐上升, 表示 Nb、Ti 碳化物在时效过程中开始从铁素体中析出, 并且随着析出量不断增加, 时效硬化效果越加明显, 直到硬度达到峰值, Nb、Ti 碳化物析出结束。此后随时间增加硬度逐渐降低表示析出物逐渐长大。时效硬度谷值对应的时间为 Nb、Ti 碳化物析出开始时间, 时效硬度峰值对应的时间为 Nb、Ti 碳化物析出结束时间。

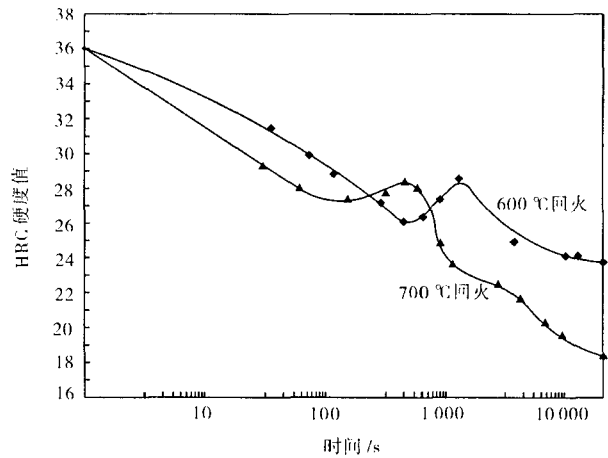


图 2 实验 Nb-Ti 微合金钢的时效硬度曲线

Fig. 2 Age-hardening curves of test Nb-Ti microalloy steel

图 3 为根据时效硬度曲线确定的 Nb、Ti 碳化物在不同的时效温度析出开始和结束时间曲线。从图 2、3 可见, 700 °C 硬度的谷值和峰值出现最快, Nb、Ti 碳化物析出开始和结束时间最短, 随时效温度降低, 出现硬度谷值和峰值的时间延长, Nb、Ti 碳化物析出开始和结束时间增加。但从各时效温度下的峰值硬度看出, 600 °C 时的时效硬化效果最明显。

因此可以认为, 实验钢的 Nb、Ti 碳化物在铁素体中的最快沉淀温度约为 700 °C, 最大形核率温度约为 600 °C, 该结果与文献 [6, 10] 中的结论相吻合。

图 4 是加热温度分别为 900 °C 和 1 200 °C 固溶处理后再于 600 °C 进行时效处理, 各不同时效时间的硬度曲线。从图 4 可见, 900 °C 固溶处理的时效

硬度曲线变化规律与1 200℃固溶处理的相同,只是

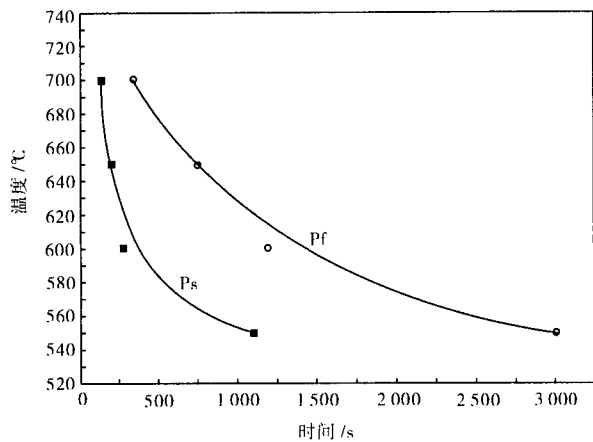


图3 实验 Nb-Ti 微合金钢的碳化物析出曲线

Fig.3 Carbides precipitation curves of test Nb-Ti microalloy steel

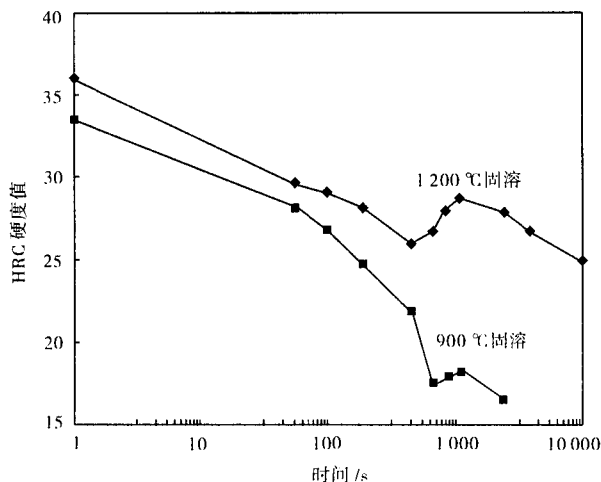


图4 固溶温度对实验 Nb-Ti 微合金钢时效硬度曲线的影响
Fig.4 Effect of solid solution temperature on age-hardening curves of test Nb-Ti microalloy steel

沉淀析出的开始时间较长,峰值硬度也较小。这是因为 900 °C 加热时奥氏体内所固溶的 Nb、Ti 元素量较少,大部分 Nb、Ti 以 Nb、Ti 碳化物的形式存在,使固溶处理后固溶体中的 Nb、Ti 元素的过饱和度较低,析出相析出的驱动力小,因此在 600 °C 时效处理时需较长的时间才有析出相析出,同时因沉淀析出物的总量较少,所产生的时效强化效果也较小。而 1 200 °C 加热时,Nb、Ti 全部固溶于奥氏体中,固溶处理后的固溶体的过饱和度很大,使析出相析出的驱动力增大,析出相析出量增多,所以比 900 °C 固溶处理具有较短的析出形核孕育期,时效强化增量较大。

从以上分析可以知道,加热温度的选择同时影响 Nb、Ti 在奥氏体内的固溶及原始奥氏体晶粒的大小、Nb、Ti 碳化物在铁素体内的析出及由此产生的时效强化效果。因此,掌握 Nb、Ti 在钢中的固溶和析出温度,制定合适的工艺制度对改善钢的组织与性能是至关重要的。

3 结论

(1)实验钢中的 Nb、Ti 碳化物在1 060 °C 可全部溶入奥氏体中,800 °C 时效时奥氏体中的 Nb、Ti 以 NbC 和 TiC 形式大部分沉淀析出。

(2)实验所获得细小的奥氏体晶粒合适的加热温度为1 100 ~ 1 150 °C。

(3)实验钢的过饱和固溶体在进行时效处理时,Nb、Ti 碳化物在铁素体内析出。700 °C 时效时,Nb、Ti 碳化物析出最快,随温度降低 Nb、Ti 碳化物析出减慢,600 °C 时效时,实验钢达到最大的硬化效果。

(4)加热温度由1 200 °C 降低到 900 °C ,Nb、Ti 碳化物时效析出减慢,由此产生的时效硬化降低。

参考文献

- 翁宇庆. 超细晶钢-钢的组织细化理论与控制技术. 北京:冶金工业出版社,2003:38
- Kyung-Tae Park, Soo Yeon Han, Dong Hyuk Shin. Effect of Treatment on Microstructures and Tensile Properties of Ultrafine Grained C-Mn Steel Containing 0.34V. ISIJ. 2004,44(6):1057
- Ali Reza Khodabandeh, Mohammad Jahazi, Steve Yue. Impact Toughness and Tensile Properties Improvement through Microstructure Control in Hot Forged Nb-V Microalloyed Steel. ISIJ. 2005,45(2):272
- 王有铭,李曼云,韦光. 钢材的控制轧制与控制冷却. 北京:冶金工业出版社,1995:51
- 苑少强,杨善武,武会宾,等. 含 Nb 微合金钢变形后弛豫及时效过程中的析出行为. 金属热处理,2005,30(1):24
- 赵明纯,单以银,杨柯. 时效处理对针状铁素体管线钢力学性能和抗硫化氢行为的影响. 金属学报,2004,40(9):948
- 王昭东,曲锦波,刘相华,等. 松弛法研究微合金钢碳氮化物的应

- 变诱导析出行为. 金属学报,2000,36(6):618
- 苑少强,杨善武,武会宾,等. 多元微合金钢中的应变诱导复合析出. 北京科技大学学报,2003,25(5):414
- 董洪波,程龙. 控轧控冷条件下 Nb-V 钢碳氮化物的析出行为. 宽厚板,2001,7(5):16
- 雍岐龙,马鸣图,吴宝裕. 微合金钢-物理和力学冶金. 北京:机械工业出版社,1989

李维娟(1966-),女,博士,教授,金属材料成型过程显微组织和性能控制。

收稿日期:2006-04-26