

V 对低合金 MnSiCr 空冷贝氏体/ 马氏体复相钢强韧性的影响

李文韬, 李正操*, 白秉哲

(清华大学 材料科学与工程系, 北京 100084)

摘要: 反应堆安全壳结构起着包容放射性物质和保护反应堆系统免受外界干扰的作用, 是关系到核电站安全运行的重要结构。核反应堆筒体预应力钢筋混凝土结构用精轧螺纹钢的强韧性直接影响安全壳的寿命。为了开发新一代超高强钢筋, 在新型空冷 Mn 系贝氏体钢的基础上进行 V 微合金化, 并采用空冷回火工艺, 实验钢筋的屈服强度达到 1 494 MPa, 抗拉强度 1 688 MPa。利用 SEM、TEM 等方法研究 V 微合金化对实验钢强韧性、组织、相变的影响, 对 (Ti, V) C 析出物形貌、分布及大小进行了观察和研究。

关键词: V 微合金化; 贝氏体/马氏体; 强韧性; (Ti, V) C

中图分类号: TL341 文献标志码: A 文章编号: 1000-6931 (2010) S0-0359-04

Effect of V on Strength and Toughness of Low Alloyed Air-Cooled MnSiCr Bainite/Martensite Multiphase Steels

LI Wen-tao, LI Zheng-cao*, BAI Bing-zhe

(Department of Materials Science and Engineering, Tsinghua University, Beijing 100084, China)

Abstract: Secure reactor structure plays the role of containing radioactive substances and protecting system from the interference of reactor, which is related to the safe operation of the power, so it is an important structure. Nuclear reactor cylinder prestressed concrete structure with pure rolling steel rebar directly influences the tenacity of secure life. Vanadium microalloyed super strength finish rolled rebar based on air-cooled Mn series bainitic steels was developed in order to meet the needs. Yield strength of vanadium-alloyed air-cooled tempering steel reaches 1 494 MPa, and tensile strength is 1 688 MPa. Effect of vanadium on the strength and snugness, structure and phase transformation was studied by means of SEM and TEM. Besides, morphology, size and distribution of vanadium precipitates were studied.

Key words: vanadium microalloying; bainite/Martensite; strength and toughness; (Ti, V)C

第IV代核反应堆的设计理念是为了保证一个共同的目标, 即建造更安全、寿期更长、可防止核扩散和经济性更好的核电厂。要实现第IV代核电厂的成功开发和建造, 首先要考虑的问题是反应堆堆芯及堆外结构材料的性能和可

靠性。反应堆安全壳结构是关系到核电站安全运行的重要结构, 起着包容放射性物质和保护反应堆系统免受外界干扰的作用^[1]。核反应堆筒体为预应力钢筋混凝土结构, 随着核反应堆壳体建筑向大跨度化、高层化、多样化发展,

收稿日期: 2010-06-29; 修回日期: 2010-08-03

基金项目: 国家重点基础研究发展计划资助项目 (2004CB619105, 2010CB731600)

作者简介: 李文韬 (1985—), 男, 甘肃陇南人, 硕士研究生, 材料科学与工程专业

*通信作者: 李正操, E-mail: zcli@tsinghua.edu.cn

钢筋混凝土用热轧高强度带肋大截面钢筋得到了大量应用。同时,核反应堆的质量和安全性要求更高的钢筋的强度等级。目前,国际上超强钢筋主要采用微合金化、控扎控冷、轧后余热处理等技术,显著改善了钢筋的综合使用性能。但主要存在工艺过程复杂、合金元素复杂且成本高、屈强比高抗震性能差等问题^[2]。因此,研制高性能、低成本高强钢筋对于核反应堆建设和运行有着十分重要的意义。

20世纪60年代开始发展起来的Ti、V、Nb微合金化技术在世界范围内得到广泛应用^[3]。在各种微合金元素中,钒具有最高的溶解度,是微合金化钢最常用、也是最有效的强化元素之一。钢中增加0.10%的钒可使强度增加200 MPa以上^[4]。本工作在新型中碳Mn系贝氏体钢的基础上采用V、Ti微合金化,探讨V对低合金MnSiCr空冷贝氏体/马氏体复相钢强韧性的影响,同时研究V的强化机理。

1 试验方法及工艺

试验用钢采用ZG-50真空感应炉熔炼,浇注成27 kg铸锭,锻造成 $\phi 30$ mm圆棒,切成60 mm长圆棒,1050 °C保温30 min,让V充分回溶,空冷至室温,随后在不同温度下回火2 h,切取标准拉伸、冲击试样。试验用钢成分列于表1。

表1 试验用钢成分

Table 1 Chemical composition of experimental steel

编号	w(C)/%	w(Mn)	w(Si)/%
D8	0.3	适量	1.0
D6	0.3	适量	1.0
w(Cr)/%	w(Ti)/%	w(V)/%	w(N)/%
0.9	0.02	—	<0.000 4
0.9	0.02	0.04	<0.000 4

力学性能测试在JB-30A冲击实验机和Instron1255拉伸试验机上进行,试样均按国家标准制备。采用OPTON CSM950、JEOL 6301F扫描电子显微镜对显微组织进行观察。采用碳萃取复型和双喷减薄法制备透射样品,在JEM-200CX和JEOL-2010F上进行观察和EDS分析。选取5个视场,利用Image tool统计其中析出颗粒,计算其平均尺寸和分布。

2 结果与讨论

2.1 V对力学性能的影响

实验钢D6、D8的力学性能随回火温度的变化示于图1。由图1可见,随着回火温度的升高,D6、D8的抗拉强度均降低,且减小速率基本一致,约在350 °C回火时,D6与D8屈服强度均达到最大值。D6的屈服强度达到1 494 MPa,抗拉强度1 688 MPa,在核反应堆钢筋混凝土壳体建筑中有着巨大的应用潜力。同时还可看出,在空冷条件下,添加0.04%的V可使得试验材料D6相比D8,抗拉强度和屈服强度增幅约为106 MPa、60 MPa。另外,实验测得空冷条件下D6、D8的U口夏比冲击值分别为62和51 J,可见,V的加入对韧性也有一定的提高。

图2示出D6、D8的屈强比随回火温度的变化。由图2可看出,D6、D8在空冷和低温回火时屈强比均小于0.8,含V钢D6具有更低的屈强比,使用的安全性能更高。由图3两种实验材料硬度的径向分布可知,D6硬度从中心到表面更加均匀,具有更好的淬透性。

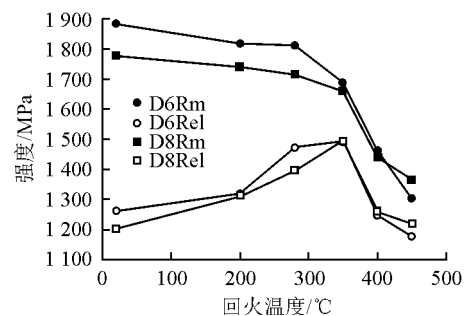


图1 力学性能随回火温度的变化

Fig. 1 Mechanical properties vs tempering temperature

2.2 V对组织的影响

膨胀曲线测得D6、D8的AC1、AC3点分别为:756 °C、756 °C和817 °C、814 °C。空冷条件下,D6、D8组织如图4所示。由图4可看出,D8主要以下贝氏体和马氏体为主,而D6除了下贝氏体和马氏体外,还存在少量的粒状贝氏体组织(箭头所示)。图4c为D6空冷条件下典型的透射组织照片,也观测到了存在的少量粒状贝氏体。说明V的加入促进了粒状贝氏体转变。在粒状贝氏体的生长过程中,V能够阻碍铁素体生长前沿富碳奥氏体区进一步分解,且碳化物又来不及析出,则相邻铁素体板条合并后在其间留下富碳奥氏体小岛,冷却至

室温, 奥氏体发生部分分解而得到最终组织为 $\alpha + (M + \gamma)$, 即所谓粒状贝氏体^[5]。

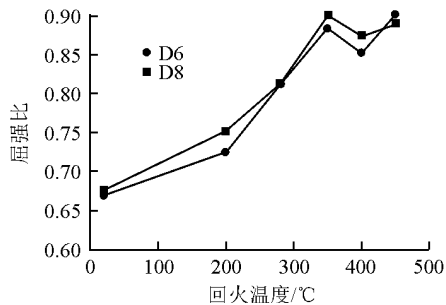


图2 屈服比随回火温度的变化

Fig. 2 Yield ratio vs tempering temperature

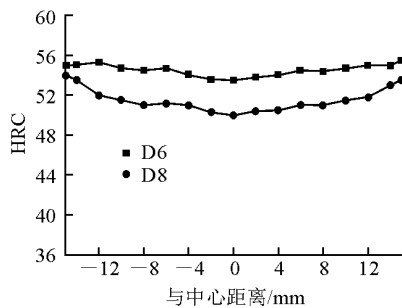


图3 D6、D8 硬度径向分布

Fig. 3 Hardness distributions of D6 and D8

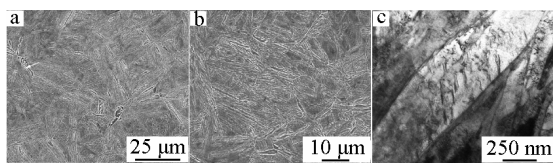


图4 D6 与 D8 显微组织

Fig. 4 Microstructures of D6 and D8

a—D6, SEM; b—D8, SEM; c—D6, TEM

统计原奥氏体晶粒大小发现, D6 为 20 μm , D8 为 23 μm 。V 的加入使得奥氏体晶粒略有减小, 但晶粒细化效果不明显。在 Gleeble1500 试验机上进行热模拟, 图 5 示出 D6、D8 加热到 1 050 $^{\circ}\text{C}$ 保温 30 min, 以冷速 0.52 $^{\circ}\text{C}/\text{s}$ (直径 30 mm 的圆棒对应的空冷冷速) 冷却时的膨胀曲线。由图 5 可见, D6 在约 550 $^{\circ}\text{C}$ 发生相变, 而 D8 未发生相变。

2.3 (Ti, V) C 析出物

钢中 V 的析出主要分为 3 个过程^[6]: 1) 浇注过程中形成的含 V 的夹杂物, 比较稳定且尺

寸较大; 2) 锻造轧制过程在奥氏体中析出, 平均尺寸约 22 nm; 3) 奥氏体-铁素体转变过程中或转变后, 在 γ/α 相界或铁素体内形核析出细小颗粒 (≤ 15 nm)。由 V 在奥氏体中典型的平衡方程 $\lg([V][C]) = 6.72 - 9500/T$ 可知, 对于 D6, 当加热温度为 812 $^{\circ}\text{C}$ 时, V 便能完全固溶进基体中。文献[7]指出, 对于 V-Ti 微合金钢, 原始态试样中存在两种析出颗粒, 均为 (Ti, V) (C, N) 析出颗粒, 由于 V、Ti 间的交互作用, 对于较大的析出颗粒, 在 1 100 $^{\circ}\text{C}$ 保温也未完全回溶。PBR 钢筋的轧制温度高于 1 050 $^{\circ}\text{C}$, 因此, 较小颗粒的 (Ti, V) (C, N) 能充分溶解于奥氏体中, 较大尺寸的仍以颗粒形式存在。在轧后空冷过程中, VC 形核析出, 主要机制有两种^[8]: 一种是以未溶解的 (Ti, V) (C, N) 为核心形核析出, 形成一种包覆结构, 此类颗粒尺寸较大; 一种是自身形核长大, 形成细小弥散颗粒。图 6 示出利用碳复型样品在 TEM 下观测到的析出物的典型形貌, 图 7 示出析出物的尺寸分布。可以看到, 含 V 钢中存在大量的析出颗粒, 主要以球形为主, 兼有少量的方形或椭球形颗粒。析出物平均尺寸为 17.1 nm, EDS 结果表明, 此类析出物均为 (Ti, V) C; 同时还可看出, 存在尺寸小于 8 nm 的细小析出物。

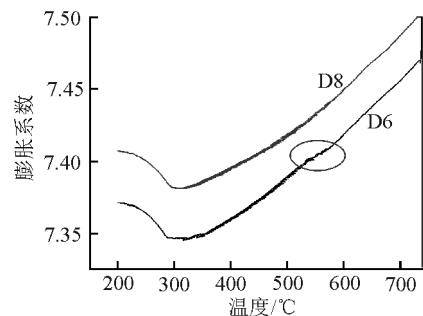


图5 D6、D8 膨胀曲线

Fig. 5 Expansion curves of D6 and D8

文献表明, 主要强化作用的粒子应该是尺寸较小的弥散析出物, Gladman^[9]沉淀强化增量计算方法通常使用的经验公式为:

$$\Delta\sigma_p = 8.9952 \times 10^3 \ln(2.417d) f^{1/2} / d$$

其中: f 为沉淀析出颗粒的体积分数; d 为沉淀析出颗粒的直径, nm。

当 V 原子全部被 C 固定而形成 V 的析出颗粒时 (ρ_{Fe} 为 7.875 g/cm^3 , ρ_{VC} 为 5.717 g/cm^3), 可计算得到 f 为 0.068 1%, 将 $d = 17.1$ nm 代入, 计

算得到 $\Delta\sigma_p=68.7\text{ MPa}$ ，由于更细小的析出物粒子无法用复型的手段统计，因此，V的沉淀强化效果必然大于68 MPa。

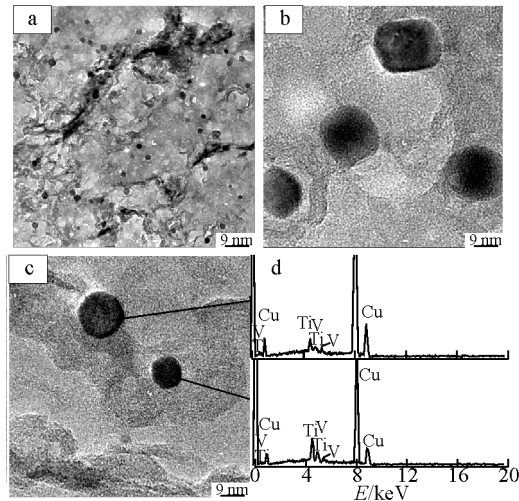


图6 D6钢中(Ti, V)C析出物

Fig. 6 (Ti, V)C precipitates in D6

a——典型析出物；b、c——细小析出物；d——EDS

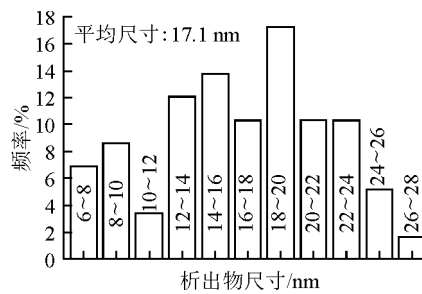


图7 (Ti, V)C析出物尺寸及分布

Fig. 7 Size and distribution of (Ti, V)C

3 结论

实验钢加入0.04%的V在空冷条件下可使得抗拉强度增加约160 MPa，屈服强度增加60 MPa；V同时能够增加钢的淬透性，降低屈强比。在微合金化的基础上，通过空冷回火的简单工艺获得了1494 MPa/1688 MPa超高强性能钢筋，可作为核反应堆筒体预应力钢筋混凝土结构的潜在材料。

V对于Mn系低合金MnSiCr空冷贝氏体/马氏体复相钢而言，细化晶粒效果不明显，但对于促进粒状贝氏体的生成有较大影响。含0.04%V的钢中存在大量的析出物，EDS结果表明，组成为(Ti, V)C，平均粒径为17.1 nm。

参考文献:

- [1] 刘云飞, 王天运, 贺锋, 等.核反应堆预应力钢筋混凝土安全壳内爆炸数值分析[J]. 工程力学, 2007, 24(8): 168-170.
LIU Yunfei, WANG Tianyun, HE feng, et al. Numerical simulation for pre-stressed concrete containment under internal explosive loading[J]. Engineering Mechanics, 2007, 24(8): 168-170(in Chinese).
- [2] 王勇围. 低碳Mn系空冷贝氏体钢的强韧化途径[D]. 北京: 清华大学材料科学与工程系, 2008.
- [3] 白玉光, 刘春明, 任海鹏, 等. 高强度精轧螺纹钢的组织与性能[J]. 东北大学学报: 自然科学版, 2003, 24(3): 268-270.
BAI Yuguang, LIU Chunming, REN Haipeng, et al. Microstructure and properties of high strength finish rolled rebar[J]. Journal of Northeastern University: Natural Science, 2003, 24(3): 268-270(in Chinese).
- [4] ZAJAC S. Precipitation and grain refinement in vanadium: Containing steels[C]//钒应用技术研讨会论文集. 北京: [出版者不详], 2001: 282-295.
- [5] 杨柳, 刘世凯, 张根元. 钒、钛对Fe-C合金奥氏体分解动力学及转变组织的影响[J]. 西南交通大学学报, 1994, 10: 525-529.
YANG Liu, LIU Shikai, ZHANG Genyuan. The influence of the V and Ti on the Fe-C austenite decomposition dynamics and transformation structure[J]. Journal of Southwest Jiaotong University, 1994, 10: 525-529.
- [6] LUI W J, JONAS J J. Proc. Conf. on 'Processing, microstructure and properties of HSLA steels'[C]. [S. l.]: [s. n.], 1988.
- [7] 张鹏程, 武会宾, 唐荻, 等. Nb-V-Ti和V-Ti微合金钢中碳氮化物的回溶行为[J]. 金属学报, 2007, 43(7): 753-758.
ZHANG Pengcheng, WU Huibin, TANG Di, et al. Dissolving behaviors of carbonitrides in Nb-V-Ti and V-Ti microalloying steels[J]. Acta Metallurgica Sinica, 2007, 43(7): 753-758.
- [8] BAKER. Processes, microstructure and properties of vanadium microalloyed steels[J]. Materials Science and Technology, 2009, 25(9): 1083-1105.
- [9] GLADMAN T, DULIEU D. Structure-property Relationships in high-strength microalloyed steels [C]//Microalloying'75. New York: Union Carbide Corp., 1975: 32-55.