

Nb 对重载车用低合金铸钢组织及力学性能影响

张家成, 金洋帆, 赵天天, 杨弋涛

(上海大学材料科学与工程学院, 上海 200444)

摘要: 运用扫描电子显微镜, X射线衍射仪和室温拉伸试验机等设备对重载车用低碳低合金铸钢的显微组织、碳化物及力学性能进行研究。结果表明: 添加Nb元素, 试验钢会出现明显的细晶强化现象, 且随着Nb含量增加, 试验钢中发生 M_3C 型($(Fe, Cr)_3C$)碳化物向MC型(NbC)碳化物的转变; 当Nb添加过多时, 则会出现碳化物以非连续链状形式沿晶析出的现象, 从而使钢的力学性能下降。Nb的添加量在0.2%左右时, 该铸钢材料表现出良好的微观组织和力学性能。

关键词: Nb; 低合金铸钢; 碳化物; 力学性能

伴随着汽车越来越普及, 汽车的轻量化成为材料研究方面一个重要的领域。轻量化是在确保汽车的强度和安全性能的前提下, 尽可能降低汽车质量, 提高动力性, 减少燃料消耗和尾气排放。低合金钢有着较高的强度、较好的塑韧性以及良好的焊接性能, 在汽车上应用范围广泛^[1]。本研究中的车用低合金铸钢主要用于半挂车和牵引车重要连接装置的牵引座, 是重型卡车重要零部件。为了实现在节能环保同时减轻质量, 提高企业的经济效益的目标, 需对此低合金铸钢进行提升其力学性能的改良研究。通常该试验钢都会使用淬火进行热处理, 但大型工件进行淬火时容易出现变形开裂, 淬不透的现象, 得到的工件强度比较高, 但塑韧性相对较差。相较于淬火来说, 正火的冷速较慢, 不易造成开裂, 并且能得到较均匀的珠光体组织, 晶粒细化效果好, 虽然正火处理后试验钢强度较淬火低, 但塑韧性好。

Nb作为钢中常见的添加元素, 添加到钢中会形成碳/氮化铌, 未溶解的碳/氮化铌会阻止高温晶粒长大, 固溶Nb和奥氏体中应变诱导析出的碳/氮化铌强烈阻止形变奥氏体再结晶, 起到析出强化和细晶强化的效果, 从而提高钢的强度和塑性^[2-3]。在钢中添加不同含量的Nb元素对钢的性能有不同程度的影响, 对于不同的成分钢种, Nb的最佳添加量及第二相析出物需要进行有针对性的研究探讨^[4]。目前大多数有关低合金钢的研究集中在对淬火态的研究^[5-7], 对于其正火态的相关研究尚不多见^[8]。本文主要以重载车用铸造低合金钢为研究对象, 探讨Nb对其正火态的组织及力学性能影响规律。希望在得到最好的力学性能的同时, 减轻重量, 以实现企业对车用材料轻量化的需求。

1 试验材料与方法

1.1 试验材料

本次试验钢为真空电弧炉熔炼的钮扣型铸锭(以下简称为“钮扣锭”), 铸其质量约为80 g, 设计加入Nb的含量(质量分数, 下同)分别为: 0(1[#]), 0.1%(2[#]), 0.2%(3[#]), 0.3%(4[#]), 0.4%(5[#]), 0.5%(6[#])。采用移动式直读光谱仪PMI-MASTER PRO分析铸钢试样的化学成分, 结果如表1所示。

试验钢的热处理工艺为: ①均匀化退火: 在1 100 ℃下保温2 h, 随炉冷至室温; ②正火: 在930 ℃加热保温2 h, 随炉冷至620 ℃保温2 h, 空冷。在YFA12/15G-Y型箱式电阻炉中完成热处理。

作者简介:

张家成(1995-), 男, 硕士生, 主要从事Nb对低碳低合金钢组织和性能的影响研究。电话: 18800373056, E-mail: 1249047274@qq.com

通讯作者:

杨弋涛, 男, 教授。电话: 021-66136550, E-mail: yangyitao@shu.edu.cn

中图分类号: TG142.1

文献标识码: A

文章编号: 1001-4977(2020)01-0016-07

收稿日期:

2019-07-12 收到初稿,
2019-08-02 收到修订稿。

表1 试验低合金钢化学成分
Table 1 Chemical composition of low alloy steels with different Nb addition levels in the present study $w_B/\%$

编号	C	Si	Mn	Cr	Mo	Ni	Nb
1 [#]	0.187	0.219	0.793	0.538	0.198	0.475	0.003
2 [#]	0.198	0.235	0.776	0.586	0.192	0.482	0.098
3 [#]	0.206	0.229	0.789	0.546	0.206	0.490	0.209
4 [#]	0.193	0.245	0.819	0.546	0.187	0.487	0.293
5 [#]	0.198	0.238	0.806	0.556	0.185	0.485	0.360
6 [#]	0.183	0.241	0.805	0.559	0.206	0.506	0.505

1.2 试验方法

对热处理结束后的纽扣锭进行线切割，加工成形状为10 mm × 10 mm × 3 mm的试样，除去氧化皮后在布洛维光学硬度计 (HBRVU-187.5) 上测量硬度，每个试样打5个点取平均值作为最终的硬度值。将试样进行镶嵌、打磨、抛光后，用4%的硝酸酒精溶液进行腐蚀，利用钨灯丝扫描电子显微镜 (SEM, HITACHI SU-1500) 对试样表面进行组织观察和X射线能谱 (EDS) 分析。为了研究出不同Nb含量对试验钢中碳化物类型及数量的影响，采用电解萃取法定量分析试样钢中的碳化物含量，电解萃取液是用375 mL水+125 mL盐酸+16 g柠檬酸配制的^[9]，利用X射线衍射仪 (XRD, 18kWD/MAX2500V) 对萃取出来的碳化物进行物相分析，其中X射线衍射仪采用铜靶，测试角度范围为10°~90°，扫描速率为4°/min。在热处理完的纽扣锭上线切割出厚度为1 mm，标距为10 mm的非标拉伸样，拉伸样尺寸如图1所示^[10]，在CMT5105型电子万能试验机上进行室温拉伸试验。

2 试验结果与讨论

2.1 相图计算

为了初步了解Nb元素对车用低合金铸钢相的类

型与比例的影响，利用相图模拟软件Thermo-Calc对试验钢进行了平衡相图计算，计算结果如图2所示。从相图中可以知道，不含Nb试验钢的相组成为铁素体相、 $M_{23}C_6$ 型碳化物和 Fe_3C 。当加入Nb后，会出现MC型 (NbC) 碳化物，而且随着Nb含量的升高，在600~800 °C温度范围内NbC相体积分数增大， $M_{23}C_6$ 型碳化物地体积分数基本无变化， Fe_3C 相体积分数在减小，说明存在 M_3C 型碳化物 (Fe_3C) 向MC型碳化物 (NbC) 转变的可能性。

2.2 组织观察与分析

将腐蚀后的试样钢放在光学显微镜下观察不同Nb含量试样正火态金相组织，见图3。试样微观组织由白色的铁素体，暗色的珠光体以及少量的碳化物组成。

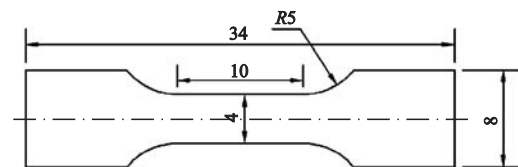


图1 非标拉伸样尺寸示意图

Fig. 1 Schematic diagram of non-standard tensile sample size

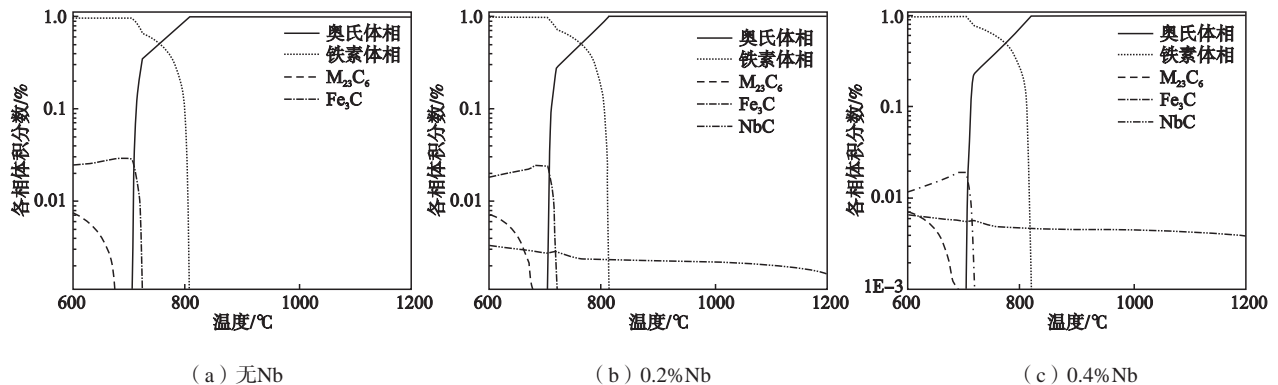
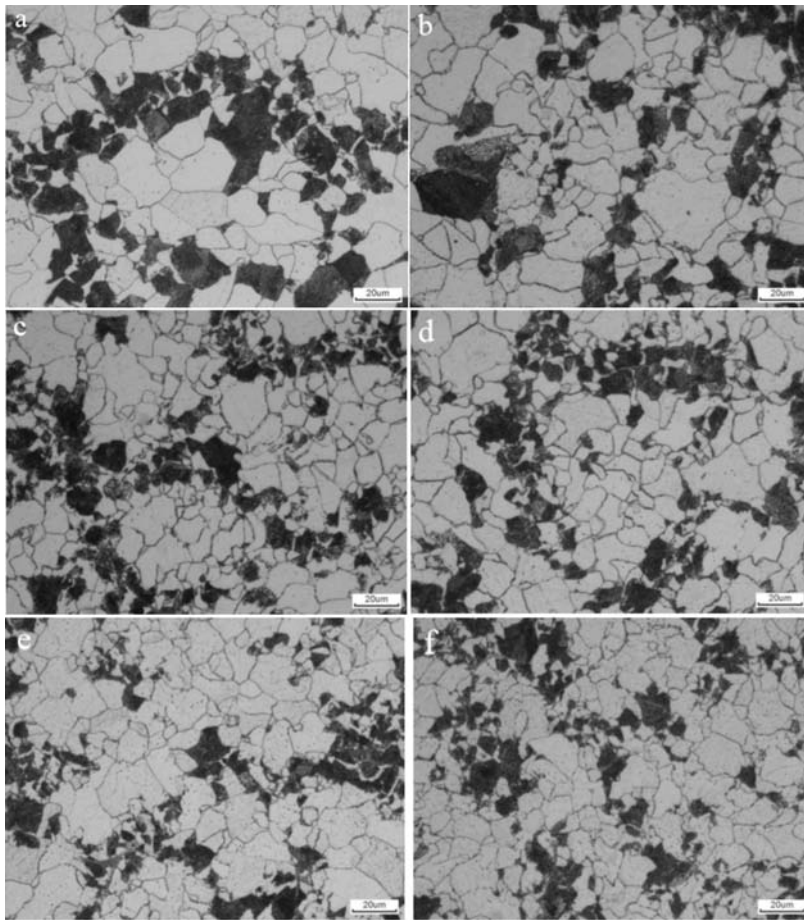


图2 不同Nb含量平衡相图

Fig. 2 Equilibrium phase diagram of Nb-containing experimental steel

从图3中可以看到,加入Nb后,组织有明显的细化现象。对试样进行晶粒度^[11]和晶粒直径(μm)的测量统计结果显示(如表2),试样的晶粒度等级均为10级,从晶粒直径可以发现在0~0.5%Nb试样钢中晶粒出现较明显细化后稍有变粗的现象。这是因为添加Nb元素后会在晶界析出NbC,析出的NbC能够通过钉扎作用阻碍晶粒长大,但最终组织的晶粒大小还受到相变温度和析出物尺寸的影响^[12-13]。NbC只有以适当尺寸析出

才能起到最佳的抑制晶粒生长的效果,当Nb含量过高时,晶界处的NbC会变得粗大,这反而会加速晶粒生长。从图3c-e中可以看到,基体组织内部以及晶界上有明显的碳化物析出现象,经EDS分析知,碳化物主要为NbC和 Fe_3C ,当Nb含量超过0.2%时,晶界NbC会变得粗大,从而加速了晶粒生长,晶粒变大。图4是不同Nb含量试验钢正火态下SEM图像。



(a) 无Nb; (b) 0.1%Nb; (c) 0.2%Nb; (d) 0.3%Nb; (e) 0.4%Nb; (f) 0.5%Nb

图3 不同Nb含量试样钢正火态金相组织

Fig. 3 Metallographic structure of normalized steel samples with different Nb addition levels

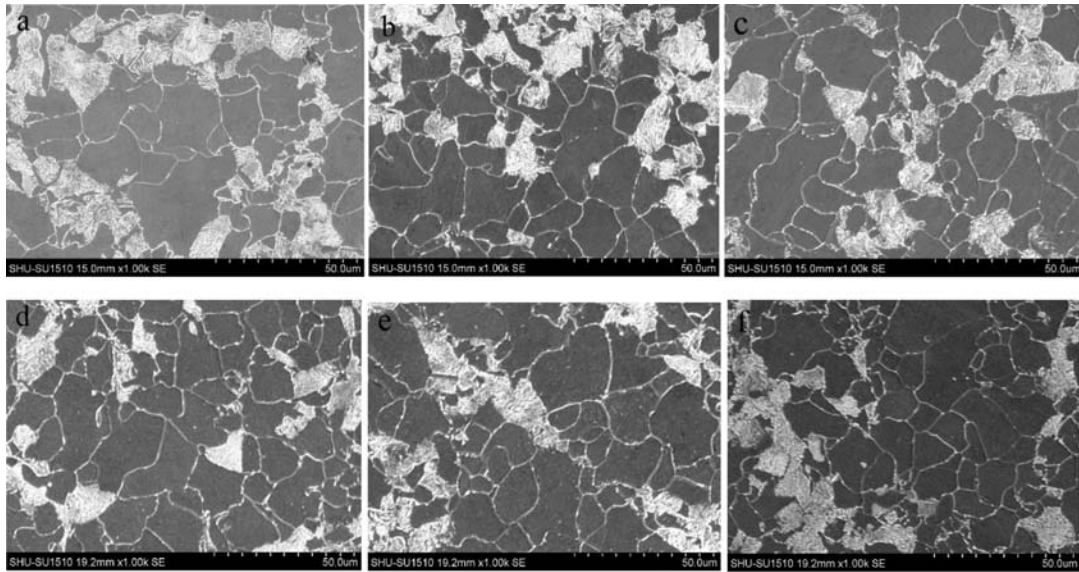
SEM下的基体组织主要由黑色的铁素体、白亮的珠光体以及少量的碳化物组成。可以看到在无Nb的时候,铁素体和晶界处都很少出现白亮点(后经过EDS分析确定白亮点为碳化物),在Nb加入量达到0.2%后,碳化物析出量明显增多,在晶界上有明显的碳化物沿晶析出现象,析出的碳化物有球状、棒状,且呈现出非连续型链状分布。Nb添加量超过0.3%后,可以从SEM照片上看到晶粒内部碳化物明显增多,且碳化物形状主要为球状,分布比较弥散。为了确定析出物的种类,对析出物进行能谱的点扫描分析,结果如图5和表3所示。

表2 不同Nb含量试验钢组织晶粒度与晶粒尺寸
Table 2 Grain size of experimental steels with different Nb addition levels

Nb含量/%	晶粒度等级	晶粒直径/ μm
0	10	9.54
0.1	10	9.02
0.2	10	8.6
0.3	10	9.78
0.4	10	10.12
0.5	10	9.66

从图5和表3中可以发现晶界上存在Fe、Cr、Nb、C原子的富集，说明存在碳化物沿晶析出现象。虽然加入了0.1%的Nb，但由于含量较低，Nb主要与基体内的C结合分布于珠光体内，并没有与C原子结合形成NbC。Cr与C原子结合能力比Nb低，由于Cr的含量比Nb高，Cr与C原子结合在晶界析出Cr₃C。虽然会有Cr₃C

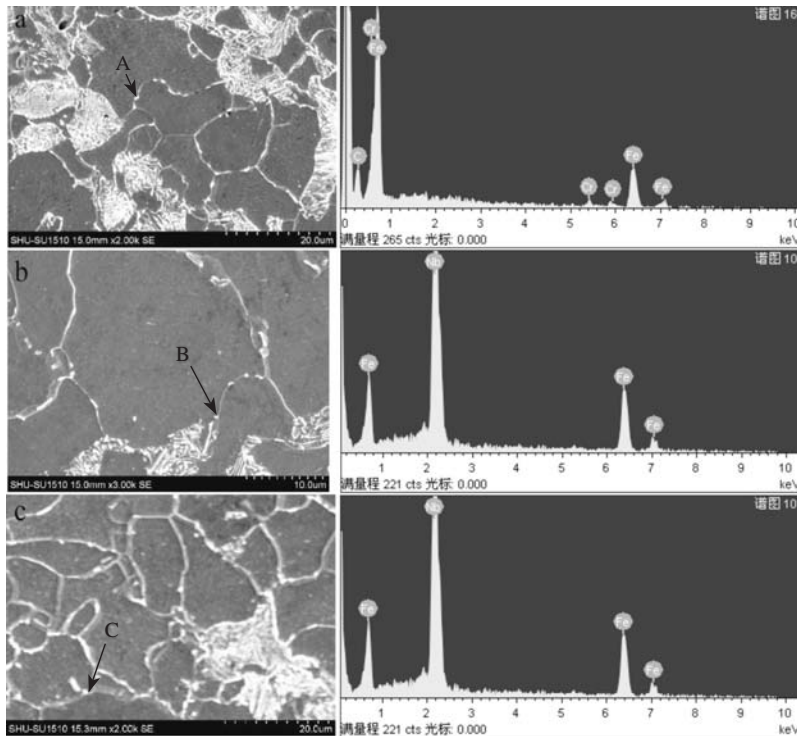
碳化物析出，但是Cr含量比较低，所以形成Cr的碳化物并不多，在后面的XRD分析中没有显现出来。在加入0.2%Nb后，可以发现在晶界上弥散分布着更多的Fe₃C和NbC，而加入0.4%Nb后，加入量过多导致Nb原子在晶界上形成偏聚。为了确定碳化物的分布位置，进行了面扫描能谱分析，结果如图6所示，可以看到，



(a) 无Nb; (b) 0.1%Nb; (c) 0.2%Nb; (d) 0.3%Nb; (e) 0.4%Nb; (f) 0.5%Nb

图4 不同Nb含量试样钢正火态扫描电镜图像

Fig. 4 SEM images of normalized steel samples with different Nb addition levels



(a) 0.1%Nb; (b) 0.2%Nb; (c) 0.4%Nb

图5 试验钢微观组织点扫能谱分析

Fig. 5 SEM and EDS spot scanning of experimental steels with different Nb addition levels

C原子有明显的沿晶界分布的规律，在珠光体组织内有轻微的聚集，而Nb主要在珠光体组织内形成偏聚，生成的NbC主要分布于珠光体内。

为了分析加入Nb后试样钢的碳化物类型与含量，本文用自制的电解萃取装置对纽扣锭进行电解萃取，将萃取完的碳化物进行定量分析，分析结果如图7所示。从图7可以发现随着Nb元素含量的升高，碳化物的含量在不断的提高，在0.2%Nb时，碳化物显著增加，这与我们在扫描电镜中观察到的析出物变多的现象是一致的。

通过对电解萃取后的碳化物进行XRD物相分析，得到结果如图8所示。可以看到当钢中没有加入Nb时，试验钢中只有 $(Fe, Cr)_3C$ 类碳化物，加入Nb元素后，试验钢中开始出现NbC，随着Nb元素含量增加，NbC越来越多，在0.5%Nb达到峰值，从分析图谱上可以看到 $(Fe, Cr)_3C$ 相强度峰在0.2%Nb时达到最大值，此时钢中有最多的 $(Fe, Cr)_3C$ 型碳化物，这与之前扫描电镜下观察到 Fe_3C 含量增多是一致的。当Nb

含量继续添加时，因为Nb与C结合形成碳化物的稳定性比Cr, Fe强，导致碳化物发生了 M_3C 合金渗碳体型向MC型转变的过程，这也印证了之前相图计算的结果。

2.3 力学性能测试与分析

对正火态的低合金钢进行硬度，室温拉伸等力学性能试验，得到结果如图9所示。试验钢的抗拉强度、硬度和伸长率的变化规律类似，三种力学性能指标都在含0.2%Nb时达到峰值，由此可见最佳的Nb元素添加量应该是在0.2%左右。因为Nb是强碳化物形成元素，对C原子吸附能力很强，使原本在晶界析出 $(Fe, Cr)_3C$ 碳化物溶解，Cr、Mn等元素固溶到基体里，从而起固溶强化作用。碳化物发生了 $(Fe, Cr)_3C$ 向NbC的转变，在晶界形成NbC对奥氏体晶界迁移起阻碍作用，细化奥氏体晶粒，提高材料的强度和韧性。而当Nb含量超过0.2%时，Nb含量越高，Nb的过饱和度越大，NbC析出的驱动力也越大，同时Nb含量的增加还可以缩短Nb原子在NbC形核和长大时需要扩散的距离，促进了

表3 EDS能谱分析结果
Table 3 EDS results of spots A, B and C in Fig.5

测量点	C	Cr	Nb	Fe	$w_B/\%$
A	71	1.93	27.07	0	
B	39.15	0	1.85	59.00	
C	0	0	50.52	49.48	

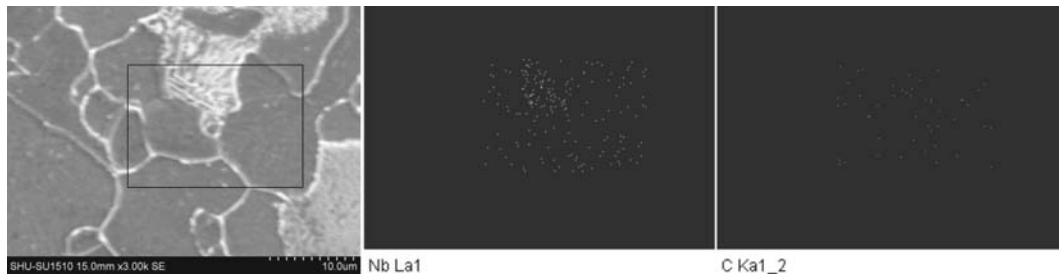


图6 0.3%Nb试验钢试样面扫能谱分析

Fig. 6 EDS surface scanning of experimental steel containing 0.3% Nb

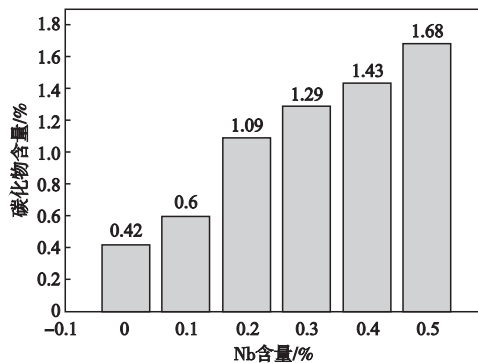


图7 不同Nb含量试样钢中碳化物含量

Fig. 7 Carbide content in experimental steels with different Nb addition levels

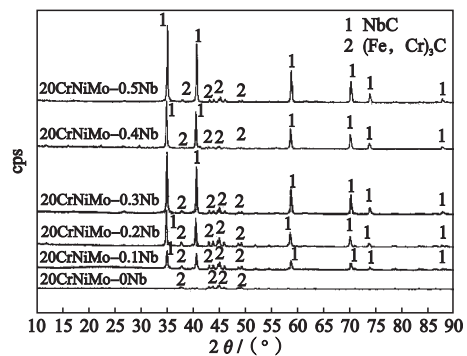


图8 不同Nb含量试样钢中碳化物XRD分析

Fig. 8 XRD analysis of carbides in experimental steels with different Nb addition levels

NbC的析出^[14]。NbC过多时会在晶界上呈现非连续链状分布，降低基体的连续性，使得抗拉强度下降，同时NbC含量过高时，会使得晶界上NbC晶粒粗大，导致材料的塑韧性降低。

图10为拉伸完的试样断口SEM形貌。从断口形貌来看，主要为韧性断裂，没有加入Nb时断口韧窝较

少，出现了一些无韧窝平面和少量韧窝拉长的现象，断口表面不平整，有一些孔洞。加入0.2%Nb元素后，断口表面趋于平整，韧窝数量开始变多变密集，基本没有大块无韧窝区域，当Nb添加量继续增多时，断口表面又变得不平整，韧窝数量变少且深度变浅，这与组织中析出链状碳化物有关。

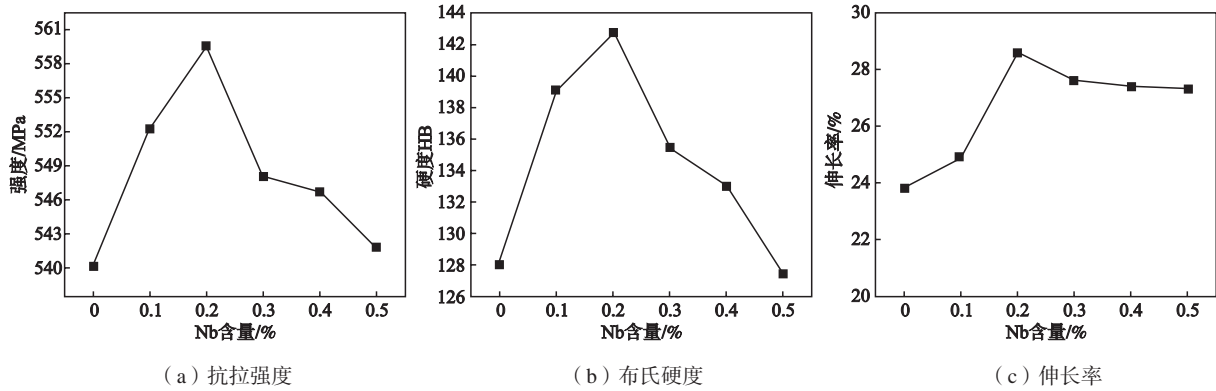
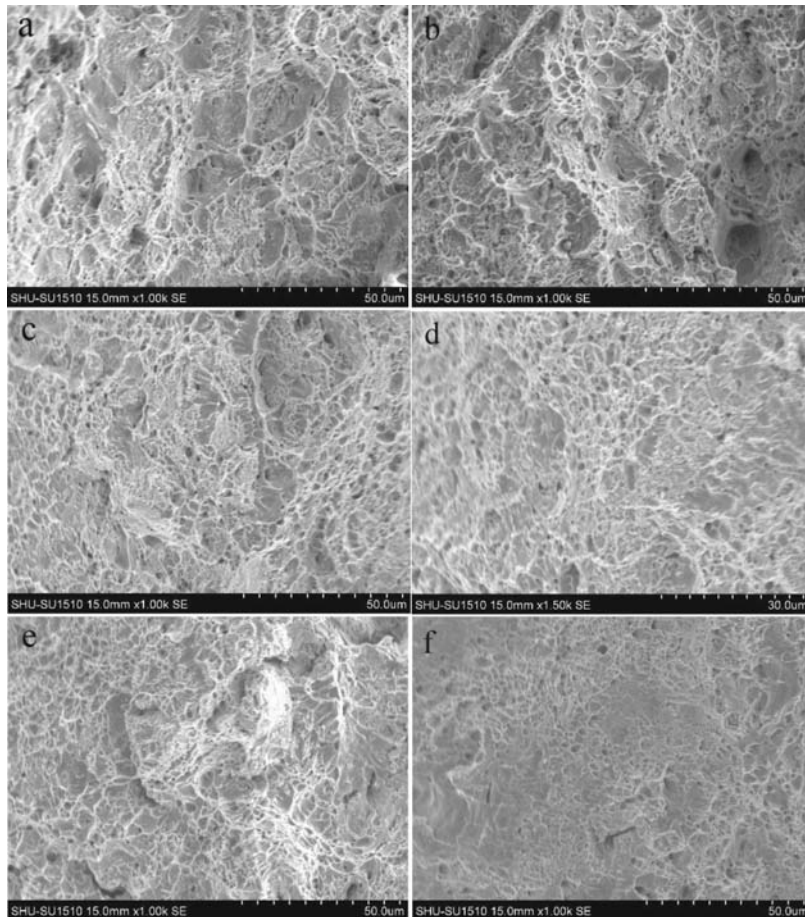


图9 不同Nb含量对硬度及拉伸性能的影响

Fig. 9 Effect of different Nb addition levels on hardness and tensile properties of experimental steel



(a) 无Nb; (b) 0.1%Nb; (c) 0.2%Nb; (d) 0.3%Nb; (e) 0.4%Nb; (f) 0.5%Nb

图10 不同Nb含量试样拉伸断口SEM形貌

Fig. 10 SEM morphology of tensile fracture of experimental steel samples with different Nb addition levels

3 结论

(1) 向钢中加入微合金元素Nb使得碳化物发生 $(\text{Fe}, \text{Cr})_3\text{C}$ 向NbC的转变, 碳化物沿晶析出, 阻碍晶界迁移, 起到细化晶粒的效果。同时Cr、Mo等元素会固溶到基体中, 这样会同时产生细晶强化和固溶强化, 抗拉强度随之提高。

(2) 随着试验钢中Nb含量增加, 产生的碳化物也增多, 在加入0.2%Nb时会产生最多的 $(\text{Fe}, \text{Cr})_3\text{C}$ 渗

碳体型碳化物, 试验钢呈现最好的塑韧性。当Nb含量继续增多时, 因NbC沿晶析出数量增加而导致塑韧性下降。

(3) 低合金铸钢中的最佳Nb元素添加量为0.2%, 此时抗拉强度达到560 MPa, 伸长率为28.6%。相较于不含Nb试验钢, Nb的加入使试验钢抗拉强度和伸长率分别提升了3.5%和16.8%。

参考文献:

- [1] BEVIS Hutchinsona, NORMAN Ridley. On dislocation accumulation and work hardening in Hadfield steel [J]. Scripta Materialia, 2006, 55: 299–302.
- [2] 胡日荣, 武会宾, 蔡庆伍, 等. Nb含量对NM550耐磨钢组织和力学性能的影响 [J]. 材料热处理学报, 2013, 34 (S2): 41–45.
- [3] 付俊岩. Nb微合金化和含铌钢的发展及技术进步 [J]. 钢铁, 2005 (8): 1–6, 25.
- [4] 周文彬, 征灯科, 华勤, 等. 制动盘用高碳当量灰铸铁的铌合金化 [J]. 铸造, 2010, 59 (3): 320–323.
- [5] YU Q B, WANG Z D, LIU X H, et al. Effect of microcontent Nb in solution on the strength of low carbon steels [J]. Materials Science and Engineering A, 2004, 379: 384–390.
- [6] JOON C K, CHANG Y S, JUNHYUK H, et al. Fatigue behavior of AISI 8620 steel exposed to magnetic field [J]. Journal of Alloys and Compounds, 2018, 764: 73–79.
- [7] 王培科, 刘朝晖, 黎贤鹏, 等. 20CrNiMo齿座断裂原因分析及热处理工艺的优化 [J]. 热加工工艺, 2017 (4): 229–230, 233.
- [8] 林振铭, 季清清, 朱源, 等. 正火温度对20CrNiMo齿轮钢显微组织和切削性能的影响 [J]. 上海金属, 2016, 38 (5): 43–47.
- [9] 张拓, 曹静, 滕铝丹, 等. Nb对中铬耐磨铸钢组织及力学性能的影响 [J]. 铸造, 2017, 66 (10): 1100–1103.
- [10] 刘腾轼, 杨弋涛. 铌对低合金铸钢组织及性能的影响 [J]. 铸造, 2014, 63 (10): 1051–1055.
- [11] 中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局. 金属平均晶粒度测定方法: GB/T 6394—2002 [S]. 中国标准出版社, 2003.
- [12] 曹雅彬. 高Nb微合金钢中Nb的溶解/析出及其对组织演变影响的研究 [D]. 秦皇岛: 燕山大学, 2012.
- [13] 邱友绪. 超细硬质合金晶粒长大抑制机理及热处理工艺研究 [D]. 成都: 四川大学, 2007.
- [14] 孙明煜. 高Nb微合金钢中NbC的析出对组织与硬度的影响 [D]. 秦皇岛: 燕山大学, 2014.

Effect of Nb on Microstructure and Mechanical Properties of Low Alloy Cast Steel for Heavy-Duty Vehicles

ZHANG Jia-cheng, JIN Yang-fan, ZHAO Tian-tian, YANG Yi-tao

(School of Materials Science and Engineering, Shanghai University, shanghai 200444, China)

Abstract:

The microstructure, carbide and mechanical properties of low carbon low alloy cast steel for heavy duty vehicles were studied by means of scanning electron microscopy, X-ray diffractometer and room temperature tensile testing machine. The results show that the addition of Nb element can result in obvious fine-grained strengthening, and with an increase in Nb content, the transformation of M_3C type $(\text{Fe}, \text{Cr})_3\text{C}$ carbide into MC type (NbC) carbide occurs in the experimental steel. When Nb is excessively added, there exist a phenomenon in which carbides are precipitated in a discontinuous chain form, thereby deteriorating the mechanical properties of the steel. The results further found that the cast steel material has good microstructure and mechanical properties when the amount of Nb added is about 0.2%.

Key words:

Nb; low alloy cast steel; carbide; mechanical properties