

Ni 对高碳铬钼铸钢组织及性能的影响

侯智伦¹ 赵 龙¹ 翟敢超¹ 胡宏发² 陈湘茹¹ 翟启杰¹
(1.上海大学材料科学与工程学院先进凝固技术中心;2.加拿大温莎大学机械汽车材料系)

摘 要 探究了 Nb 对高碳铬钼铸钢奥氏体晶粒尺寸、珠光体片层间距及硬度的影响。在最佳 Nb 含量的基础上,对比研究了 Nb 对高碳铬钼铸钢冲击磨料磨损性能的影响。结果表明,当 Nb 含量(质量分数)为 0.05% 时,高碳铬钼铸钢奥氏体晶粒尺寸、珠光体片层间距最小,而硬度最高。在冲击磨料磨损试验中,不同的磨损参数下,0.05% Nb 含量试样的磨损量比不含 Nb 的减少了 9%~41%。在高碳铬钼铸钢中,Nb 的细晶强化、析出强化作用成为了高碳铬钼铸钢组织及性能优化的关键。

关键词 Nb; 高碳铬钼铸钢; 冲击磨料磨损; 微合金

中图分类号 TG113.25;TG146.4⁺16 文献标志码 A

DOI:10.15980/j.tzzz.2023.08.018 开放科学(资源服务)标识码(OSID):

Influence of Niobium on Microstructure and Properties of High Carbon Chromium Molybdenum Cast Steel

Hou Zhilun¹, Zhao Long¹, Zhai Ganchao¹, Hu Hongfa², Chen Xiangru¹, Zhai Qijie¹
(1.Center for Advanced Solidification Technology, School of Materials Science and Engineering, Shanghai University;2.Department of Mechanical Automotive Materials, University of Windsor)

Abstract: The effects of niobium on austenite grain size, pearlite lamellum spacing and hardness of high-carbon CrMo cast steel were investigated. Based on the optimal niobium content, the effects of niobium on impact abrasive wear properties of high-carbon CrMo cast steel were analyzed comparatively. The results show that when the niobium content is 0.05%, the austenite grain size and pearlite lamellum spacing of high-carbon CrMo cast steel are minimum, and the hardness reaches the maximum value. In the impact abrasive wear test, the wear amount of the sample containing 0.05% Nb is reduced by 9%~41% compared with that without niobium under different wear parameters. In high carbon CrMo cast steel, the fine grain strengthening and precipitation strengthening of niobium play the key role to optimize the microstructure and properties of high carbon CrMo cast steel.

Key Words: Niobium, High Carbon CrMo Cast Steel, Impact Abrasive Wear, Microalloy

球磨机衬板在服役时不但会承受来自矿料和磨球的冲击,并且还处于三者间的相互磨损之中。这种恶劣的服役环境要求球磨机衬板具备优异的抗冲击磨料磨损性能,要求衬板材料具有较高的硬度,还应具有较高的冲击韧性。微合金钢中 Nb 的加入可在基体上形成细小的硬质析出相^[1],也可细化晶粒,使材料强韧化,耐磨性能明显提高^[2-4]。

目前,有关 Nb 在耐磨铸钢中的研究大多集中在低碳、中碳铬钼铸钢中。白云等^[5]对低碳合金铸钢中 Nb 的最佳添加量进行了研究,发现 Nb 含量为 0.06% 左右时,材料的抗拉强度达到 1 545 MPa,有较好的力学性能和耐磨性能。傅定发等^[6]发现在低碳铸钢中添加

0.044% 的 Nb,与普通低碳铸钢相比,其塑性基本保持不变,但屈服强度、抗拉强度和室温冲击功分别提高了 20.7%、7.2% 和 25.6%;在中碳低合金铸钢添加 0.04%~0.06% 的 Nb,由于细晶强化的效果,其综合力学性能明显提升^[7]。孟超^[8]发现 Nb 添加量为 0.057% 时,中碳 42CrMo 铸钢的硬度(HBW)、抗拉强度和屈服强度分别为 294、1 066 MPa、887 MPa,而 Nb 含量为 0.039% 时,合金伸长率达到 17.0%,冲击韧度可达到 121 J/cm²。

然而,Nb 对高碳铬钼铸钢的应用研究却鲜有报道。高碳铬钼铸钢的硬度适中,冲击韧度良好。其常用的热处理工艺为正火+回火,由于工艺简单,合金元素

收稿日期:2023-01-13;修改稿收到日期:2023-03-12
基金项目:国家自然科学基金资助项目(52071195)
第一作者简介:侯智伦,男,1999 年出生,硕士研究生,上海(200444),E-mail:884573024@qq.com
通信作者:陈湘茹,女,1981 年出生,高级实验师,上海(200444),E-mail:chenxr@shu.edu.cn
引用格式:侯智伦,赵龙,翟敢超,等. Ni 对高碳铬钼铸钢组织及性能的影响[J]. 特种铸造及有色合金,2023,43(8):1 105-1 110.
HOU Z L, ZHAO L, ZHAI G C, et al. Influence of niobium on microstructure and properties of high carbon chromium molybdenum cast steel[J]. Special Casting & Nonferrous Alloys, 2023, 43(8):1 105-1 110.

含量较低,所以生产成本较低。热处理后所得到的高碳珠光体型耐磨铸钢硬度(HBW)最高可达 400,使用寿命高于传统的高锰钢,但是低于淬火+回火处理的铬钼马氏体型耐磨钢^[9],常用于制造各型球磨机外壳衬板^[10]。本研究分析 Nb 对高碳铬钼铸钢奥氏体晶粒尺寸、珠光体片层间距及硬度的影响,在最佳 Nb 含量的基础上,对比研究了 Nb 对高碳铬钼铸钢冲击磨料磨损性能的影响,旨在为其应用提供参考。

1 试验材料及方法

本研究中不同 Nb 含量的试样均取自铸钢厂生产的 Y 型试块底部,将不同 Nb 含量的试样在 910 ℃下正火处理 1 h,500 ℃下回火处理 1 h,空冷。试样的化学成分见表 1。

表 1 试验钢的化学成分

编号	Tab.1 Chemical composition of test steel %								
	w_B								
	C	Si	Mn	Cr	Mo	Ni	Cu	Nb	Fe
1	0.89	0.26	0.85	1.91	0.35	0.10	0.17	0	余量
2	0.82	0.41	0.74	1.98	0.31	0.10	0.21	0.02	余量
3	0.76	0.35	0.79	2.06	0.39	0.17	0.18	0.05	余量
4	0.85	0.41	0.77	1.99	0.31	0.11	0.17	0.10	余量

由于实验室研究受试样尺寸的限制,与实际生产的产品存在较大的差异,故在最佳 Nb 含量的基础上制备 200 mm 当量厚度试样,见图 1,化学成分见表 2,对其进行冲击磨料磨损性能评价。

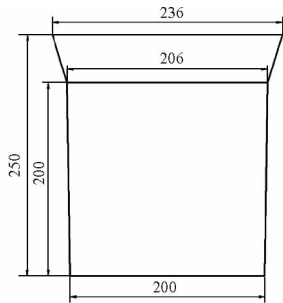


图 1 200 mm 当量厚度试块

Fig.1 Sample with equivalent thickness of 200 mm

表 2 200 mm 当量厚度试样的化学成分

编号	Tab.2 Chemical composition of sample with equivalent thickness of 200 mm %								
	w_B								
	C	Si	Mn	Cr	Mo	Ni	Cu	Nb	Fe
200-1	0.79~0.90	0.35~0.45	0.85~0.95	2.0~2.2	0.3~0.4	0.10~0.15	0.17~0.2	0	余量
200-2	0.79~0.90	0.35~0.45	0.85~0.95	2.0~2.2	0.3~0.4	0.10~0.15	0.17~0.2	0.05	余量

热处理后的试样经研磨、抛光后在 55 ℃恒温水浴中浸蚀 10 s 后取出,在 Carl Zeiss(Axio-Image A2M)光学显微镜下观察奥氏体晶粒,浸蚀剂主要成分为

100 mL去离子水+4 g 苦味酸+2 g 海鸥牌洗发膏。采用配有能谱仪的 Phenom Pro XL 台式扫描电镜对试样的显微组织进行观察及分析。采用垂直线段法^[11]统计珠光体片层间距,选取多张图片 and 多个视角,其中每个试样的受检面上随机取 20 个视场,每个视场随机取 10 个珠光体分布均匀的区域进行统计,求得平均珠光体片层间距。采用 EPMA-8050G 电子探针对 NbC 析出相进行观察和成分分析。

利用 HBRVU-187.3 型洛氏硬度计测量试样的宏观硬度,每个试样取 7 个点,去掉最大值与最小值后取平均值。采用 MH-5L 半自动显微维氏硬度计,测量冲击磨料磨损后试样纵截面的显微硬度,载荷设定为 1.96 N,保持时间为 5 s,每两个点之间间隔 50 μm。

采用动载 MLD-10 型动载磨料磨损试验机进行冲击磨料磨损试验。图 2 为冲击磨料磨损试验原理图。其中,上试样为待测试样,冲击频率为 3.3 Hz,下试样材质为 40Cr(其热处理工艺为 860 ℃水淬 1 h+200 ℃回火 1 h,空冷),转速为 200 r/min,磨料为 8~16 目石英砂(粒径为 1.18~2.36 mm),磨料流速为 150 mL/min。试验前后试样均采用超声波+酒精溶液清洗,并用精度为 0.001 g 的电子分析天平称重。

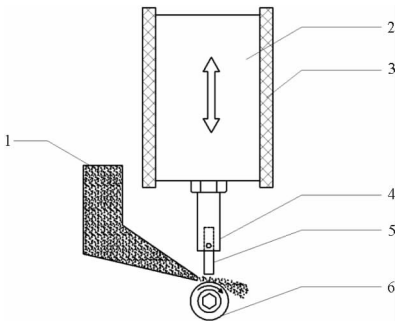


图 2 冲击磨料磨损试验原理图

Fig.2 Schematic diagram of impact abrasive wear test

1.磨料 2.锤头 3.导轨 4.上试样夹持端 5.上试样 6.下试样

2 结果与讨论

2.1 Nb 含量对显微组织及硬度的影响

图 3 为热处理后不同 Nb 含量试样的奥氏体晶粒形貌。可以看出,加入 Nb 后的奥氏体晶粒尺寸明显减小,但随着 Nb 含量从 0.05% 增加至 0.10% 时,奥氏体晶粒尺寸出现增大趋势。不同 Nb 含量试样的奥氏体晶粒尺寸见图 4,可见随着 0.02% 的 Nb 的添加,奥氏体晶粒的平均尺寸从 15.27 μm 减小到 10.68 μm,减小了约 30%。Nb 含量为 0.05% 时,晶粒尺寸最小,为 6.89 μm,相比于不含 Nb 的试样减小了约 54%。继续增加 Nb 含量至 0.10%,平均晶粒尺寸增加到 9.04 μm。

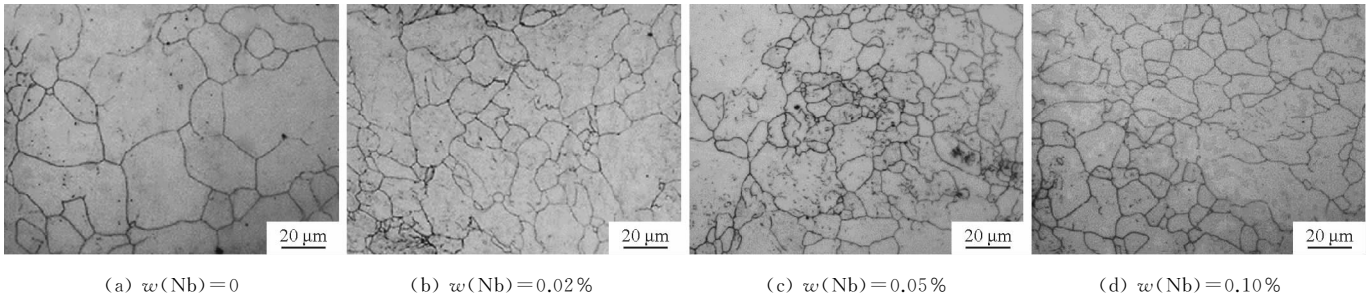


图 3 不同 Nb 含量试样的奥氏体晶粒形貌

Fig.3 Austenite grain morphologies in samples with different niobium contents

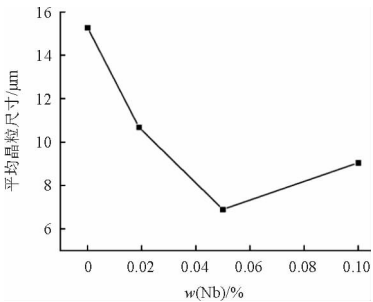


图 4 不同 Nb 含量试样的奥氏体平均晶粒尺寸

Fig.4 Average grain size of austenite samples with different niobium contents

试验结果表明,Nb 的添加可以有效地细化奥氏体晶粒尺寸。已有研究显示,Nb 作为一种微合金化元素,可有效防止等温过程中奥氏体晶粒的粗化^[12-14]。

形核和长大是影响奥氏体晶粒尺寸的两个重要过程。从形核角度分析,在钢水凝固过程中,Nb 与 C 形成的高熔点碳化物 NbC,与 $\gamma\text{-Fe}$ 的晶格错配度低于

6%^[15],可作为奥氏体化异质形核的核心,其数量的增加可提高奥氏体形核率,有利于奥氏体晶粒尺寸的减小。从晶粒长大角度分析,Nb 作为强碳化物形成元素,Nb 含量的增加使其在奥氏体中的固溶度增加^[16],会减缓 C 在奥氏体中的扩散速度,从而抑制奥氏体的长大。随着 Nb 含量从 0.05% 增加至 0.10%,碳化物数量的进一步增加,在增加异质形核质点的同时,也使 C 的扩散距离减小,C 浓度梯度增大,C 和 Fe 的扩散系数增加,从而增加了奥氏体的长大倾向,此可能为奥氏体晶粒尺寸出现增大趋势的原因之一。

图 5 为不同 Nb 含量试样的珠光体形貌。珠光体平均片层间距统计结果见图 6。可见随着 Nb 含量增加,珠光体平均片层间距由不加 Nb 时的 0.209 μm 依次减小到 0.201、0.152 和 0.169 μm 。相比于不加 Nb 试样的珠光体平均片层间距,加入 0.05% 的 Nb 试样的珠光体平均片层间距减少了约 27%。珠光体转变是典型

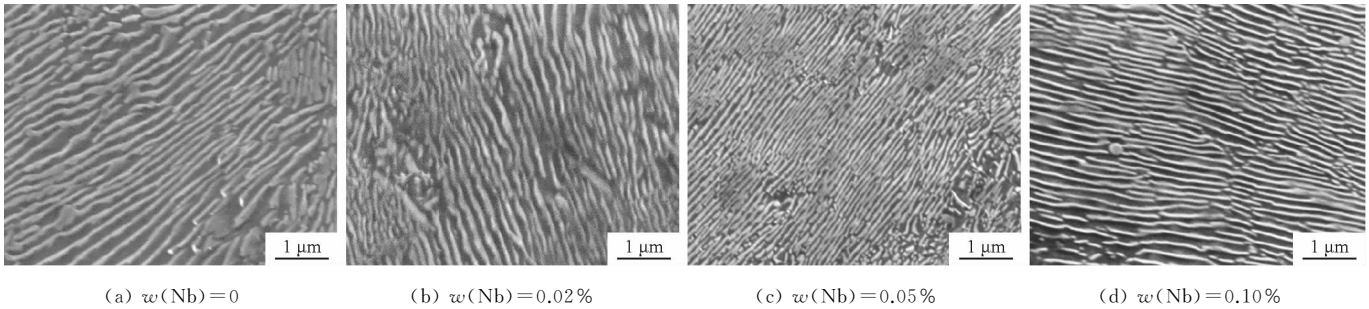


图 5 不同 Nb 含量试样的珠光体形貌

Fig.5 Pearlite morphologies in samples with different niobium contents

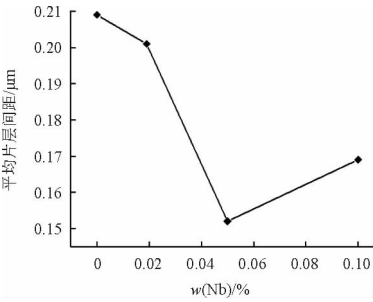


图 6 Nb 含量对铬钼铸钢珠光体平均片层间距的影响

Fig.6 Effects of niobium content on mean lamellar spacing of pearlite in chromium-molybdenum cast steel

的扩散型相变,其转变过程包括孕育期和形核长大,所以 Nb 的加入必然对珠光体转变产生一定的影响。有研究表明,高碳钢中 Nb 的加入可以推迟连续冷却转变曲线中珠光体开始转变温度,并且这种作用随着冷速的增大而更加明显,使过冷度增加,进而减小珠光体片层间距^[17]。

珠光体的形成同样需要经过形核及长大两个过程,领先相无论是铁素体还是渗碳体,都会优先在奥氏体晶界上形核,因为晶界处存在大量的晶格畸变,更高的畸变能使 C 原子处于更高的能量状态,故晶界处的扩散

激活能比晶内低,C 原子易于扩散。晶粒细化致使晶界增加,为珠光体领先相提供了更多的形核位置^[18],形核位置的增加将有利于珠光体片层间距的减小。故珠光体片层间距的大小与奥氏体晶粒尺寸存在着相似的变化趋势。根据研究,Nb 含量由 0 增至 0.05%,奥氏体晶粒尺寸明显减小,晶界数量及珠光体领先相形核位置增加,可减小珠光体片层间距。当 Nb 含量由 0.05%增至 0.10%,晶粒尺寸呈增加趋势,晶界数量及珠光体领先相形核位置有所减少,故珠光体片层间距呈增大趋势。此外,根据珠光体的长大速率与碳在奥氏体中扩散系数的关系^[19],珠光体长大速率 v 可以表示为:

$$v = n D_{\gamma} (\Delta T)^2 \tag{1}$$

式中, n 为常数; D_{γ} 为碳在奥氏体中的扩散系数; ΔT 为过冷度。由于 Nb 是强碳化物形成元素,置换固溶于奥氏体中的 Nb 会影响碳在奥氏体中的扩散,其扩散系数可以描述为^[20]:

$$D_{\gamma} = D_0 \exp \left[-5\,000x(\text{Nb}) \left(\frac{2\,750}{T} - 1.85 \right) \right] \tag{2}$$

式中, D_0 为碳在奥氏体中的原始扩散系数; $x(\text{Nb})$ 为 Nb 元素的摩尔分数; T 为相变温度。由式(2)可知, D_{γ} 与 Nb 的摩尔分数增加而减小,故 Nb 含量的增加会导致 C 在奥氏体中的扩散速度 D_{γ} 减缓。在相同的过冷度下, D_{γ} 的降低可抑制珠光体晶核的长大速度,从而减小珠光体片层间距。也有研究表明,Nb 表现出较强的溶质阻力效应,可有效防止相间边界的迁移,从而细化珠光体层间间距^[21]。

Nb 含量对高碳铬钼铸钢宏观硬度的影响见图 7。可见随着 Nb 含量增加至 0.05%,硬度(HRC)达到最高,为 38.4,当 Nb 含量增加至 0.10%时,硬度呈现下降趋势。这是因为随着 Nb 含量增加,奥氏体晶粒尺寸逐渐减小,后有粗大趋势。根据 Hall-Petch 公式可知^[22-23],材料的硬度与晶粒尺寸成反比,故硬度会出现先增加后减小的变化趋势。其次,珠光体片层间距与奥氏体晶粒尺寸相似的变化趋势,也是引起材料硬度改

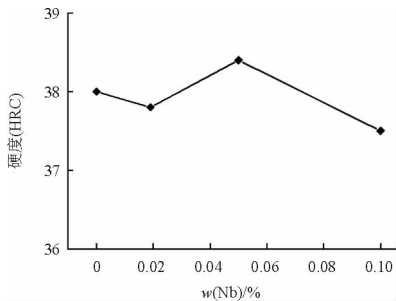
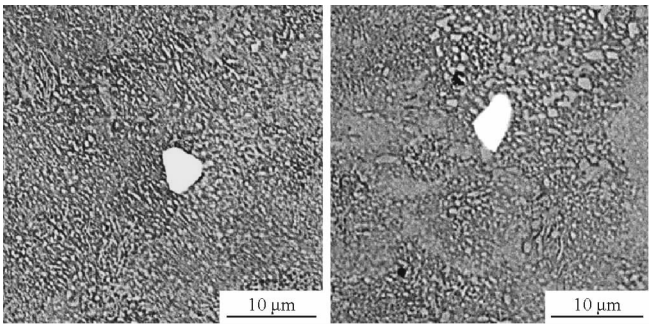


图 7 Nb 含量对高碳铬钼铸钢洛氏硬度的影响
Fig.7 Effects of niobium content on Rockwell hardness of high carbon chromium-molybdenum cast steel

变的原因。另外,作为强碳化物形成元素,Nb 在基体中的固溶度较低,添加的合金元素主要以碳、氮化物的形式析出,从而产生析出强化,也是材料硬度增加的原因之一。

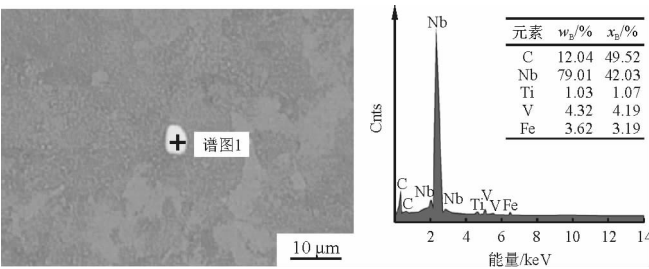
2.2 Nb 在高碳铬钼铸钢中的存在形式

在低合金高强度耐磨钢中加入 Nb 后,Nb 除了会少量固溶在基体组织中,还会在基体上形成含 Nb 析出相,含 Nb 析出相具有更高的硬度,可以有效抵抗磨损,提高耐磨性能。图 8 为在扫描电镜下观察到的含 0.05% 的 Nb 试验钢中含 Nb 析出相的形貌,在背散射模式下,析出相呈白色,尺寸为 4~5 μm 。



(a) 析出相形貌 (b) 背散射模式下形貌
图 8 含 0.05%Nb 的试验钢中含 Nb 析出相形貌
Fig.8 Morphologies of niobium precipitated phase in test steel with 0.05% Nb

为了定性和定量地分析含 0.05% Nb 试验钢中的析出相,采用电子探针进行点扫分析,结果见图 9。图 9a 为受检测的析出相形貌,从成分分析结果可知,析出相主要成分是 Nb、C,并且含有少量的 V、Ti 和 Fe,V、Ti 为熔炼原料中的杂质元素,根据 Nb 与 C 的摩尔比可判断析出相为 NbC。图 10 为含 0.05% 的 Nb 试验钢在电子探针下析出相面扫描分析结果,可以看出,Nb、C 是析出相的主要成分,并且有微量的 Ti 和 V,没有 Fe 和 Cr 元素。



(a) 含 Nb 析出相形貌 (b) 谱图 1 能谱分析结果
图 9 含 0.05%Nb 试验钢中含 Nb 析出相形貌及成分分析
Fig.9 Morphology and composition analysis of precipitated phase containing Nb in test steel with 0.05% Nb

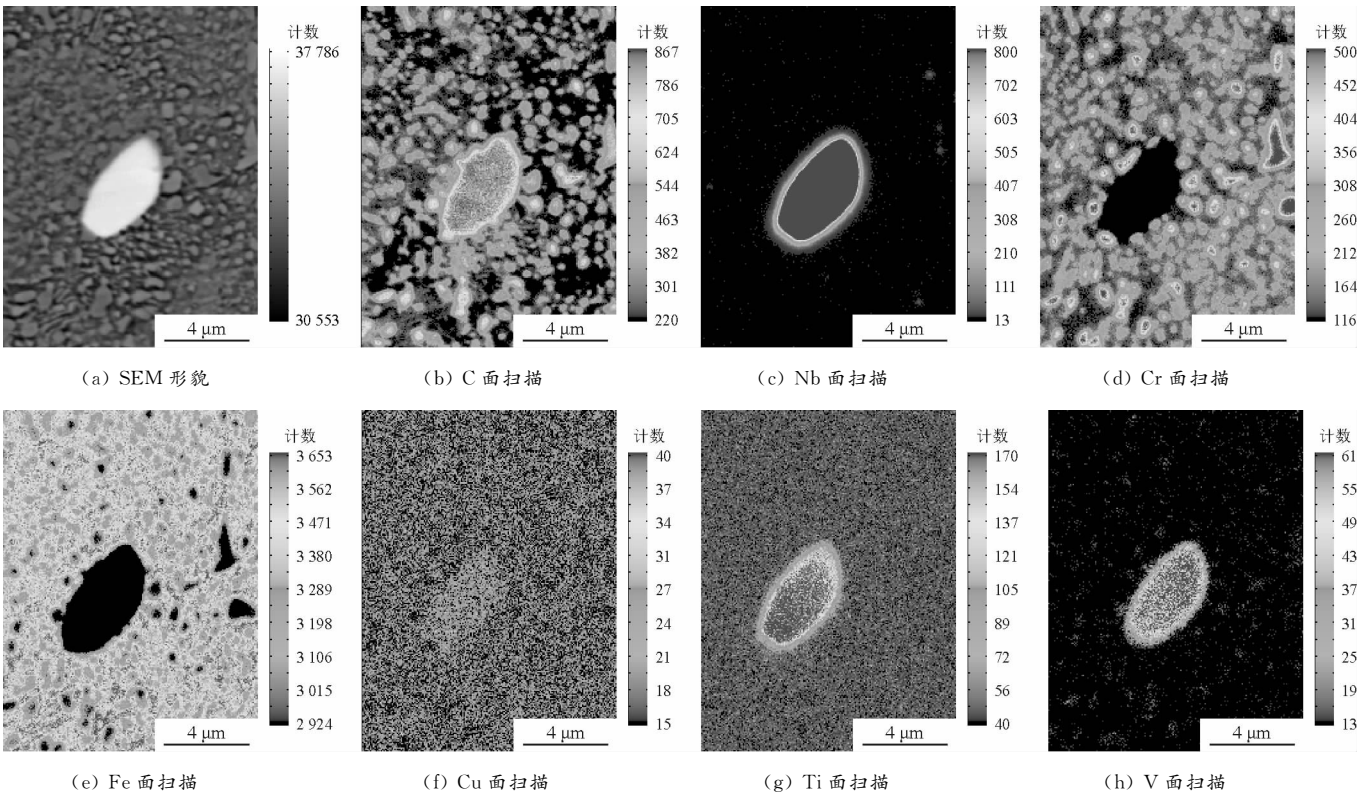


图 10 含 0.05.% Nb 试验钢析出相中各元素面分布分析结果

Fig.10 Analysis results of surface distribution of elements in precipitated phase of test steel with 0.05 % Nb

2.3 含 Nb 高碳铬钼铸钢的冲击磨料磨损性能

制备 200 mm 当量厚度的不同 Nb 含量试样来研究不同工况下 Nb 对试验钢耐磨性的影响。图 11 为试验钢在 1 和 2 J 相对冲击功下磨损 0.5、1 和 1.5 h 后的磨损质量损失。结果显示,在两个相对冲击功下,随着磨损时间延长,试验钢的磨损质量损失均呈现上升的趋势,并且不含 Nb 的试样的磨损质量损失明显较高。冲击功及冲击时间分别为 1 J、0.5 h 时,含 0.05% 的 Nb 试样磨损质量损失比不含 Nb 试样减少了 41%,但是随着磨损时间延长至 1 和 1.5 h 时,磨损质量损失逐步减小至 24% 和 20%。从图 11b 可见,冲击功为 2 J,冲击时间为 0.5、1 和 1.5 h 时,含 0.05% 的 Nb 试样的磨损质量损失比不含 Nb 试样分别减少了 22%、20% 和 9%。

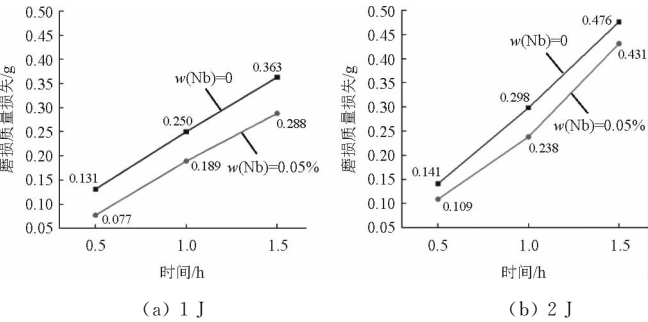


图 11 不同相对冲击功下各试样磨损 0.5、1 和 1.5 h 后的磨损量
Fig.11 Wear rates of each sample after wear under different relative impact energies for 0.5, 1 and 1.5 h

由此可见,在 1 J 和 2 J 冲击功下含 0.05% Nb 的试样均展现出了更为优异的耐磨性,同时随着冲击时间延长,不含 Nb 与含 0.05% Nb 试样的磨损质量损失差异越来越小,可以推断随着磨损时间延长,含 0.05% Nb 试样表面的硬质相可能出现剥落,使得基体的硬度及强度逐渐减小,越来越接近于不含 Nb 的试样。

图 12 为不含 Nb 与含 0.05% Nb 试样在不同磨损参数下亚表层显微硬度的变化。可以看出,含 0.05% Nb 的试样的显微硬度高于不含 Nb 试样,抗冲击磨料磨损能力较强,从而体现出了更小的磨损质量损失。同时,越接近于磨损面,显微硬度越高,这体现出试样亚表层都产生了不同程度的加工硬化现象。

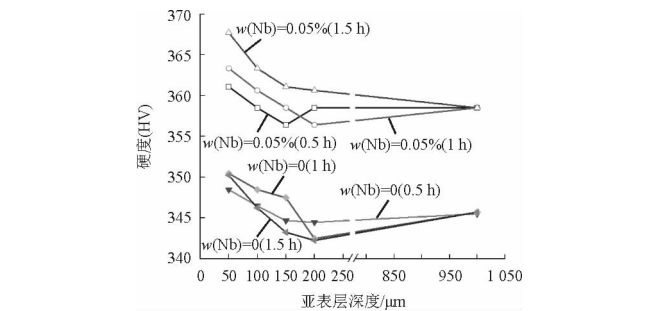


图 12 不含 Nb 与含 0.05% Nb 试样经不同冲击磨损
时间后亚表层显微硬度的变化
Fig.12 Microhardness changes of the subsurface of specimen without and with 0.05% Nb after different impact wear times

Nb 的加入有利于高碳铬钼铸钢抗冲击磨损性能的提高,主要是如下两个因素综合影响的结果:第一,Nb 的加入抑制了奥氏体晶粒的长大,细化了珠光体片层间距,提高了材料的硬度和韧性,而韧性好的材料抵抗塑性变形的能力强,硬度提高能保证磨料对材料表面的破坏减小,从而有效地提高了耐磨性。含 0.05% Nb 的试样晶粒细化后,晶界增多,裂纹在相同面积的扩展要穿过数量更多的晶界,而晶界能够吸收裂纹扩展时的能量,减缓和阻碍裂纹的扩展;第二,Nb 是强碳化物形成元素,与 C 形成了稳定细小的碳化物,可以提高基体的强度和硬度,是铬钼铸钢中的主要抗磨相,有利于抗冲击磨损性能的提高。试验所采用的石英砂磨料显微硬度(HV)在 1 000~1 200 之间,远高于珠光体基体的显微硬度,因此在冲击磨料磨损过程中,会导致不同程度地磨料嵌入及切削磨损,使材料失效。NbC 的显微硬度(HV)为 2 400,远高于磨料(石英砂)的显微硬度,在冲击磨料磨损过程中,析出相与磨料接触时,可使磨料破碎并阻止磨料的嵌入与切削,从而减少磨料对基体组织的破坏,提高材料的耐磨性。

3 结 论

(1)向高碳铬钼铸钢中加入 0.05% 的 Nb,其平均晶粒尺寸由 15.27 μm 减小到 6.89 μm ,珠光体片层间距由 0.209 μm 减小至 0.152 μm ,硬度(HRC)也随之增长至 38.4。当 Nb 含量增加至 0.1% 时,奥氏体晶粒尺寸及珠光体片层间距粗化,硬度降低。

(2)含 0.05% Nb 的试样具有更高的抗冲击磨料磨损能力,与不含 Nb 试样的磨损质量损失相比,冲击功为 1 J 时,在冲击时间为 0.5、1 和 1.5 h 下,含 0.05% 的 Nb 试样的磨损质量损失分别减少了 41%、24%、20%;冲击功为 2 J 时,含 0.05% 的 Nb 试样的磨损质量损失分别减少了 22%、20%、9%。

(3)高碳铬钼铸钢中加入 0.05% 的 Nb,有效地抑制了晶粒长大,强化了基体组织。加入 Nb 后所形成的 NbC 硬质颗粒,提高了高碳铬钼铸钢硬度,可有效地阻止磨料的嵌入及切削,耐磨性得到了明显的提升。细晶强化、析出强化作用成为了 Nb 优化高碳 CrMo 铸钢组织及性能的关键。

参 考 文 献

- [1] GOLAHSKI G. Evolution of secondary phases in GX12CrMoVNbN9-1 cast steel after heat treatment[J]. Archives of Materials Science & Engineering, 2011, 48(1): 12-18.
- [2] 雍岐龙. 钢铁材料中的第二相[M]. 北京:冶金工业出版社, 2006.
- [3] 张芳, 李军平, 彭军, 等. Nb 微合金化对贝氏体耐磨铸钢组织和性能的影响[J]. 金属热处理, 2020, 45(12): 205-211.
- [4] 戴敦才, 林怀涛. 铬钼钼合金耐磨铸钢的研制[J]. 铸造, 1996 (11): 11-15.
- [5] 白云, 孙亚肖, 李富强, 等. 微量 Nb 对低碳合金耐磨铸钢的力学及摩擦磨损性能的影响[J]. 中国铸造装备与技术, 2022, 57(1): 84-87.
- [6] 傅定发, 冷宇, 高文理. 微合金元素 Nb 对低碳铸钢强度和冲击韧性的影响[J]. 材料导报, 2018, 32(2): 238-242.
- [7] 安立聪, 刘腾斌, 边璐, 等. 合金元素 Mo 和 Nb 对中碳低合金铸钢组织和性能的影响[J]. 铸造技术, 2015, 36(4): 847-850.
- [8] 孟超. 金属钼对铬钼铸钢组织与性能的影响研究[J]. 设备管理与维修, 2014(4): 33-35.
- [9] 姜延春. 铸造手册[M]. 北京:机械工业出版社, 2011.
- [10] 徐扬. 含钼铬钼耐磨铸钢的热力学分析和组织与性能研究[D]. 上海:上海大学, 2016.
- [11] 赵坚, 黄孝瑛, 张文莱. 钼对碳素轨钢组织和性能的影响[J]. 钢铁研究学报, 1987 (1): 49-54.
- [12] 王晓军, 徐博, 南宏强, 等. Nb 含量对 Cr20Ni80 合金组织和力学性能的影响[J]. 特种铸造及有色合金, 2018, 38(6): 586-589.
- [13] TITHER G. Niobium in steel castings and forgings[A]. International Symposium on Niobium[C]. Orlando, 2001.
- [14] RAY A. Niobium microalloying in rail steels[J]. Materials Science and Technology, 2017, 33(14): 1 584-1 600.
- [15] ZHANG Y, SONG R, PEI Y, et al. The formation of TiC-NbC core-shell structure in hypereutectic high chromium cast iron leads to significant refinement of primary M_7C_3 [J]. Journal of Alloys and Compounds, 2020, 824: 153 806.
- [16] 方磊, 丁松, 黄桂斌, 等. 钼在高碳钢凝固过程中行为特性的模型分析[J]. 工业加热, 2007(6): 36-38.
- [17] TIAN J Y, WANG H X, ZHU M, et al. Improving mechanical properties in high-carbon pearlitic steels by replacing partial V with Nb[J]. Materials Science & Engineering, 2022, A834: 142 622.
- [18] 苏雪, 王厚昕, 朱敏, 等. 原位观察钼对高碳钢珠光体相变的影响[J]. 钢铁, 2022, 57(4): 88-96.
- [19] VERHOEVEN J D. Fundamentals of Physical Metallurgy[M]. New York: John Wiley and Sons Inc., 1975.
- [20] LEE K J, LEE J K. Modelling of γ/α transformation in niobium-containing microalloyed steels[J]. Scripta Materialia, 1999, 40(7): 831-836.
- [21] LIU P C, WANG Z X, CONG J H, et al. The significance of Nb interface segregation in governing pearlitic refinement in high carbon steels[J]. Materials Letters, 2020, 279: 128 520.
- [22] HALL E O. The deformation and ageing of mild steel: III Discussion of results[J]. Proceedings of the Physical Society, 1951, 643 (9): 746-748.
- [23] PETCH N J. The cleavage strength of polycrystals[J]. Transactions of the Iron and Steel Institute of Japan, 1953, 173(1): 24-26.

(编辑:张正贺)

欢迎使用在线稿件处理系统

投稿、查稿、审稿

敬请登录 www.special-cast.com