

# 铌含量对 Fe-C-Cr-Nb 系表面熔覆金属组织及耐磨性的影响

陈翠欣<sup>a,b,c</sup>, 左玉强<sup>a</sup>, 刘宝玺<sup>b,c</sup>, 李永艳<sup>a</sup>

(河北工业大学 a.材料科学与工程学院 b.天津市材料层状复合与界面控制技术重点实验室  
c.能源装备材料技术研究院, 天津 300132)

**摘 要:** **目的** 提高钢表面熔覆层的硬度、耐磨性及其综合性能。**方法** 运用气体保护焊堆焊不同 Nb 含量的 Fe-C-Cr-Nb 系表面堆焊材料, 采用 JmatPro 软件模拟计算不同铌含量的熔覆层 CCT 曲线和平衡冷区曲线, 分析铌含量对熔覆组织转变和析出相的影响。运用光学显微镜、扫描电镜和 X 射线衍射仪观察晶粒尺寸和熔覆组织形貌, 并对析出相进行分析。利用洛氏硬度计和滑动摩擦磨损试验机, 分别对熔覆金属进行宏观硬度和耐磨性的测定。**结果** 不同铌含量熔覆组织均由马氏体和少量贝氏体组成, 基体有大量的 MC 型碳化物析出。当 Nb 含量为 1.5% 时, 碳化物弥散分布在熔覆组织中, 强化效果最佳, 此时硬度最高, 为 55.3HRC。此外, MC 型碳化物有明显的细化晶粒作用, 显著提高了熔覆组织的韧性。硬质相与韧性基体的配合, 使熔覆组织的耐磨性在铌含量为 1.5% 时达到最佳。**结论** 通过调整 Fe-C-Cr-Nb 系表面堆焊材料中铌的含量, 可以有效地控制熔覆金属组织类型及碳化物组成和分布, 从而提高熔覆层的综合性能。

**关键词:** 表面熔覆层; 碳化物; 组织细化; 硬度; 耐磨性

中图分类号: TG401 文献标识码: A 文章编号: 1001-3660(2018)12-0166-07

DOI: 10.16490/j.cnki.issn.1001-3660.2018.12.023

## Effect of Niobium Content on Microstructure and Wear-resistance for Fe-C-Cr-Nb Surface Deposited Materials

CHEN Cui-xin<sup>a,b,c</sup>, ZUO Yu-qiang<sup>a</sup>, LIU Bao-xi<sup>b,c</sup>, LI Yong-yan<sup>a</sup>

(a.School of Materials Science and Engineering, b.Tianjin Key Laboratory of Materials Laminating Fabrication and Interfacial Controlling Technology, c.Energy Equipment Materials Technology Research Institute, Hebei University of Technology, Tianjin 300132, China)

**ABSTRACT:** The work aims to improve the hardness, the wear resistance and the comprehensive performance of the deposited materials on steel. The Fe-C-Cr-Nb surface deposited materials with different contents of Nb were deposited by gas shielded welding. JmatPro was used to simulate the CCT curve and equilibrium cold reign curve of deposited layers with different contents of Nb and analyze the influence of Nb content on transformation and precipitated phase of deposited structure. The optical

收稿日期: 2018-04-02; 修订日期: 2018-07-11

Received: 2018-04-02; Revised: 2018-07-11

基金项目: 河北省自然科学基金 (E2018202245); 国家自然科学基金资助项目 (U1860114)

Fund: Supported by the Hebei Province Natural Science Foundation (E2018202245); National Natural Science Foundation of china (U1860114)

作者简介: 陈翠欣 (1975—), 女, 博士, 教授, 硕士研究生导师, 研究方向为新型材料焊接。

Biography: CHEN Cui-xin (1975—), Female, Doctor, Professor, Master supervisor, Research focus: new material welding.

通讯作者: 刘宝玺 (1986—), 男, 博士, 副研究员, 研究方向为金属材料的组织控制。E-mail: liubaoxi@hebut.edu.cn

Corresponding author: LIU Bao-xi (1986—), Male, Doctor, Assistant researcher, Research focus: microstructure control of metallic materials. E-mail: liubaoxi@hebut.edu.cn

microscope, scanning electron microscope and X-ray diffractometer were used to observe the grain size, surface morphology and composition of the deposited layer and analyze the precipitated phase. The macro hardness and wear resistance of the deposited metal were tested by rock well hardness tester and sliding friction wear tester. The microstructure of the deposited layer with different contents of Nb consisted of martensite and some bainite and a large number of MC-type carbides were formed in substrate. When the Nb content was 1.5%, the carbides were dispersed in the deposited structure, and the strengthening effect was the best. At this time, the highest hardness was 55.3HRC. In addition, MC-type carbides had an obvious effect on grain enforcement, so it could improve the toughness of the deposition. The combination of the hard phase and the tough matrix allowed the wear resistance of the deposited microstructure to reach the best when the Nb content was 1.5%. By adjusting the content of Nb in the Fe-C-Cr-Nb surface deposited materials, the microstructure of deposited materials and the composition and distribution of carbides are effectively controlled to improve the comprehensive performance of the deposition layer.

**KEY WORDS:** surface deposited materials; carbides; microstructure refinement; hardness; wear resistance

金属材料主要的三种失效形式为磨损失效、断裂失效和腐蚀失效，而磨损失效是金属材料最普遍的失效形式，因磨损造成的损失可高达国民生产总值的 2%~8%<sup>[1]</sup>。机械工业中所使用的钢材有一半消耗在备件上，而这些备件的失效往往是由于材料耐磨性差造成的<sup>[2]</sup>。因此，借助材料表面改性技术研制新型耐磨材料，以提高材料的耐磨性能至关重要。

通常认为硬度越高，耐磨性越好，材料的耐磨性不仅与硬度有关，也受组织类型的显著影响，相同硬度的珠光体、马氏体和渗碳体组织中，珠光体组织的耐磨性最好<sup>[3]</sup>。因此，为提高表面熔覆金属的耐磨性，使其在具有高硬度的同时还具有良好的韧性<sup>[4]</sup>，是科研工作者一直在重点研究和迫切解决的问题。基体组织和硬质碳化物颗粒的最佳配合是获得高硬度、高耐磨性的一种有效方法。近几年国内外学者通过添加纳米氧化物作为强化相，以细化组织来提高材料的硬度和耐磨性<sup>[5-6]</sup>。由于纳米颗粒存在严重的偏析现象，难以在熔覆组织中均匀分布，所以目前大部分研究主要通过添加铬、钨等元素来生成 M<sub>23</sub>C<sub>6</sub>、M<sub>7</sub>C<sub>3</sub> 及 MC 等硬质碳化物，以提高熔覆层的硬度，但是铬、钨等元素的添加增大了熔覆金属的淬硬倾向。而铌属于强碳化物形成元素，并与碳形成热稳定性高的 NbC，NbC 弥散分布在奥氏体晶界上，阻止奥氏体晶粒长大，细化晶粒，有利于提高表面熔覆金属的硬度和耐磨性能<sup>[7-9]</sup>。此外，NbC 的热稳定性高且密度与铁基堆焊材料接近，因此有利于其在组织中的均匀分布<sup>[10]</sup>，提高组织、性能的均匀性。

本试验将针对 Fe-C-Cr-Nb 系硬面材料，通过热力学计算和不同铌含量熔覆层组织性能的分析，控制熔覆层组织形态、碳化物的组成及分布，以期获得具有良好强韧性的基体和高硬度、高耐磨性的碳化物，从而提高熔覆层的综合性能。

1 试验

设计、制备四组 Fe-C-Cr-Nb 系药芯焊丝，其化

学成分如表 1 所示。采用熔化极气体保护焊进行堆焊，基体为 42CrMo。焊接电流为 150 A，焊接电压为 20 V，气体流量为 15 L/min，保护气体为 80%Ar+20%CO<sub>2</sub> 的混合气体，焊接速度为 6 cm/min。采用 JmatPro 软件模拟计算不同铌含量的熔覆层 CCT 曲线和平衡冷区曲线。通过奥林巴斯 BX41M 金相显微镜对腐蚀性好的试样进行观察。用 X 射线衍射仪对材料组织中的物相进行分析。采用蔡司 EVOMA15 型扫描显微镜进行表面形貌观察。利用 HR-150 型洛氏硬度计进行宏观硬度的测定。磨损试验在 MM-200 型滑动摩擦磨损试验机上进行，采用相对耐磨性  $\varepsilon$  表示表面熔覆金属耐磨性的好坏：

$$\varepsilon = \Delta M_1 / \Delta M \tag{1}$$

式中： $\Delta M$  表示堆焊试样的磨损量； $\Delta M_1$  表示基准材料磨损量。

表 1 Fe-C-Cr-Nb 系药芯焊丝化学成分  
Tab.1 Chemical composition of Fe-C-Cr-Nb welding wire wt%

| C   | Si  | Mn  | Cr  | Nb              | V+M+W+Ti |
|-----|-----|-----|-----|-----------------|----------|
| 0.5 | 0.5 | 1.5 | 3.0 | 1.0、1.5、2.0、2.5 | 4.0~5.0  |

2 结果与讨论

2.1 Nb 含量对熔覆层组织转变及析出相影响的热力学分析

图 1 为不同 Nb 含量熔覆金属的 CCT 曲线。当铌含量从 1.0% 增加到 2.5% 时，M<sub>s</sub> 点变化不大，略微升高，但贝氏体相区逐渐增大。贝氏体转变温度范围内停留的时间增加，有利于贝氏体转变，使熔覆组织中出现贝氏体。由此可以看出，铌的添加有利于贝氏体和马氏体混合组织的形成，可以降低熔覆层的淬硬倾向。

另外铌作为碳化物形成元素，对熔覆金属冷却过程中析出相的组成具有显著影响。图 2 为 Nb 含量 1.5% 的熔覆组织平衡冷却曲线，热力学计算表明（图

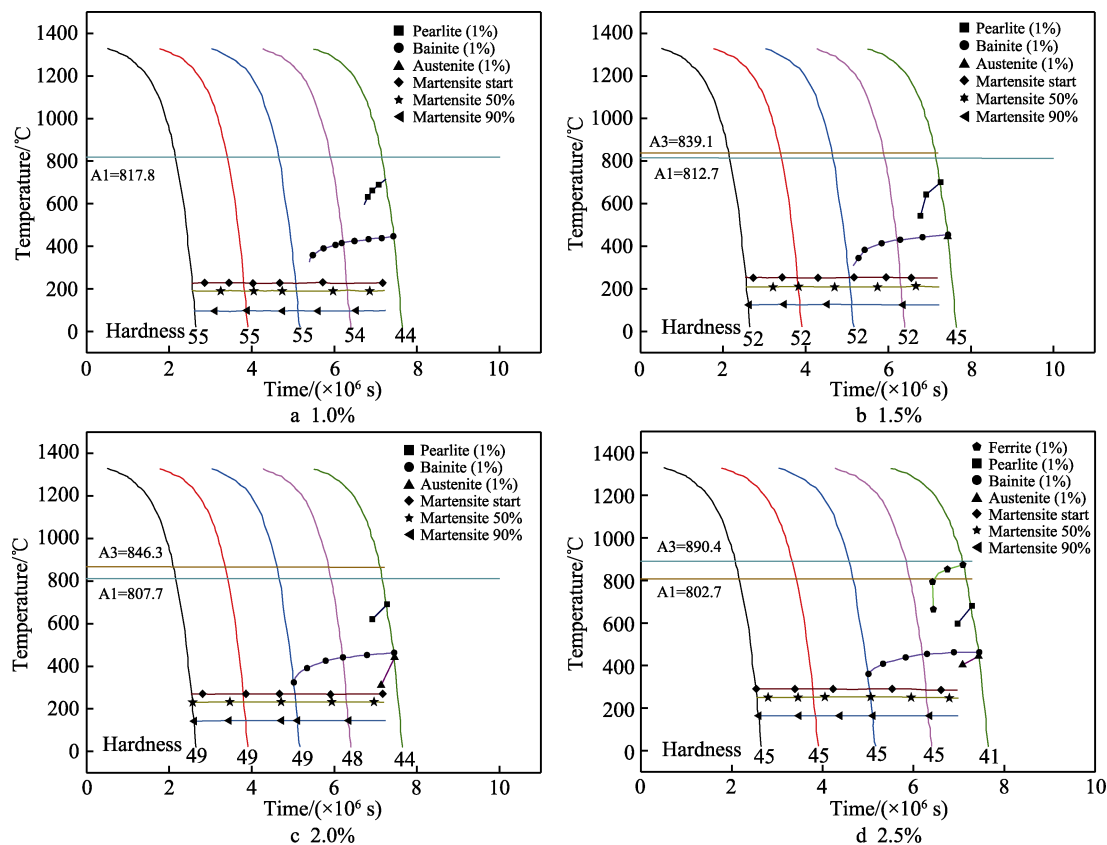


图1 铌含量对熔覆层金属 CCT 曲线的影响

Fig.1 Effect of different niobium contents on CCT curves

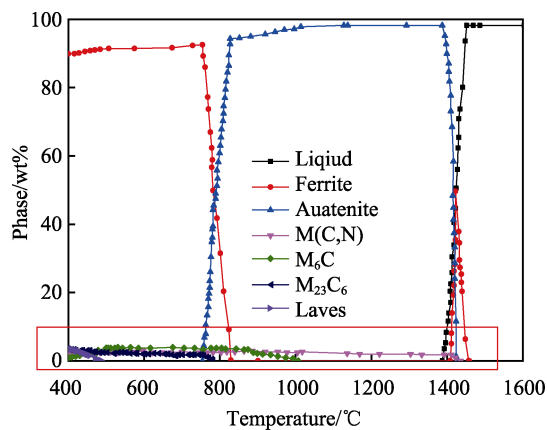


图2 铌含量为1.5%时的平衡冷却曲线

Fig.2 Equilibrium cooling curve when the content of Nb is 1.5%

2), 在冷却过程中, 由于铌元素的添加, 在 1430 °C 时最先析出  $M(C,N)$  强化相, 随着温度的降低, 有少量的  $M_6C$ 、 $M_{23}C_6$  和 Laves 相析出。图 3 为图 2 画框部分的放大图, 可以看出  $M(C,N)$ 、 $M_6C$ 、 $M_{23}C_6$  和 Laves 相的析出量分别为 2.4%、1.0%、3.4% 和 3.5%。对不同 Nb 含量的熔覆组织进行热力学计算 (因为不同 Nb 含量的平衡冷却曲线与图 2 相似, 因此仅给出 Nb 含量为 1.5% 时的计算结果), 得出  $M(C,N)$  相的析出量为 1.6%、2.4%、2.7% 和 3.1%。 $M(C,N)$  相主要成分如图 4 所示, 可以看出  $M(C,N)$  相主要由 NbC 和少量的 TiC、VC 组成, 因 Nb 为强碳化物形成元素, 所以 NbC 的析出量占 MC 相的 62.7%。

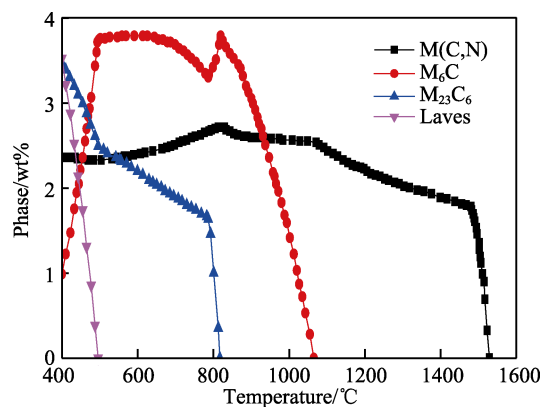
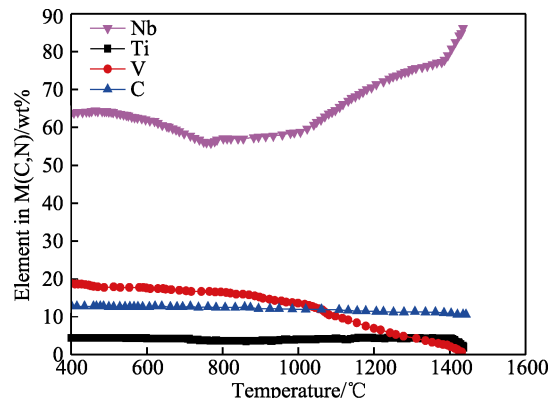


图3 铌含量为1.5%时析出相的含量

Fig.3 The content of the precipitated phase when the addition of Nb is 1.5%

图4  $M(C,N)$  型碳化物的成分Fig.4 Composition of  $M(C,N)$  type carbides

## 2.2 熔覆层的组织及析出相

图 5 为不同 Nb 含量的 Fe-C-Cr-Nb 系硬面堆焊材料的金相组织, 其组织主要由马氏体和少量的贝氏体组成。由图 6 可见, 在基体上可以观察到碳化物在晶内和晶界分布。根据 XRD 测定结果 (图 7) 及热力学

学计算 (图 4), 可以确定碳化物主要为 MC 型碳化物 (Nb,Ti)C。

由图 5 还可以看出, 随着 Nb 含量的增加, 熔覆层晶粒尺寸呈现出先减小后增大的趋势, 这与第二相质点 (MC 型碳化物) 的尺寸及分布特征有直接关系。晶粒尺寸与析出物形态的关系表征为 (2) 式<sup>[11]</sup>。

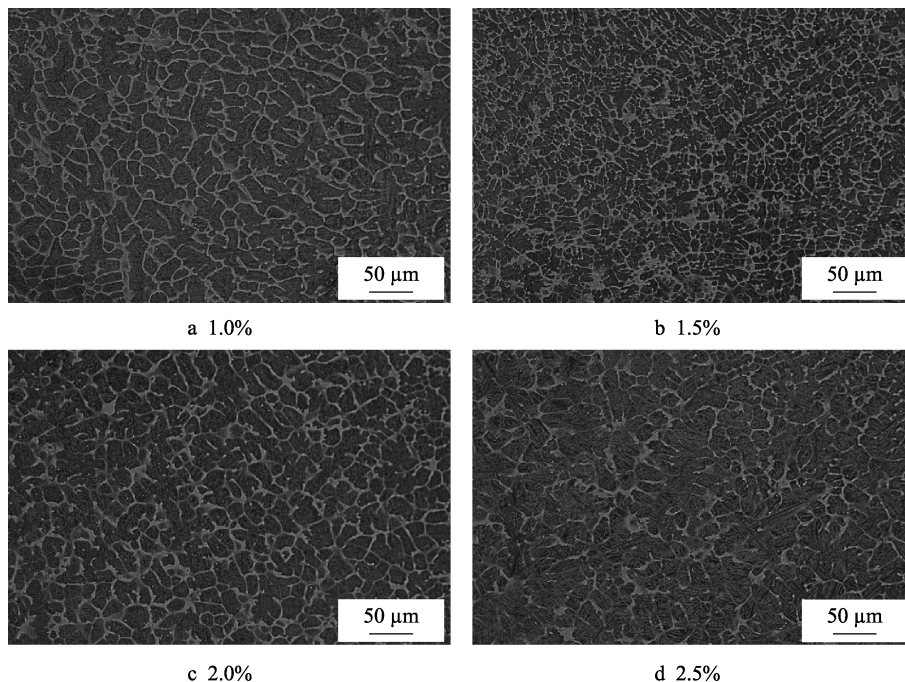


图 5 不同 Nb 含量熔覆层组织  
Fig.5 Microstructure of deposited layer with different contents of Nb

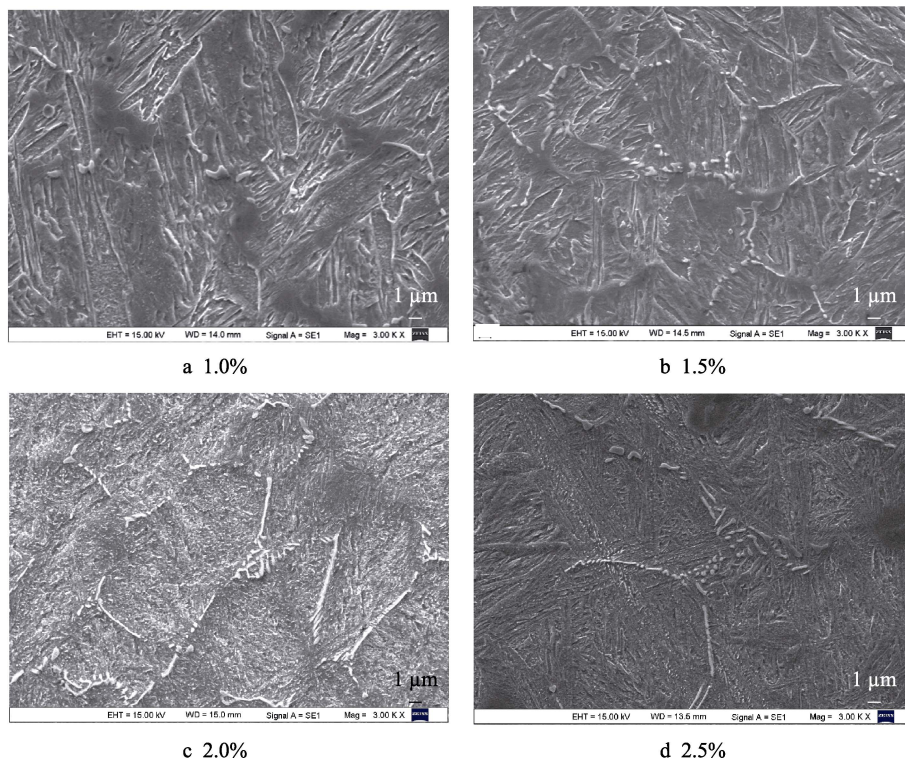


图 6 不同 Nb 含量熔覆层的碳化物形貌  
Fig.6 Carbides distribution of deposited layer with different contents of Nb

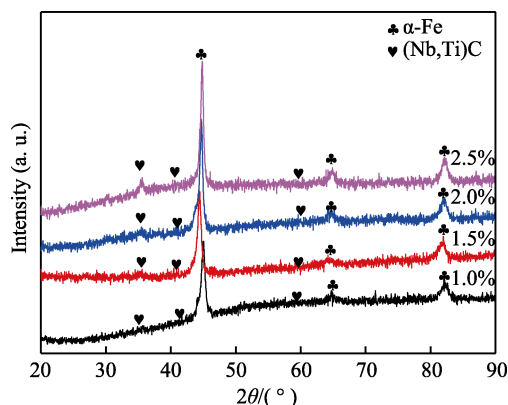


图7 不同Nb含量堆焊熔覆金属的相组成  
Fig.7 Phase composition of deposited metal with different contents of Nb

$$d = \frac{4r}{3\phi} \quad (2)$$

式中： $r$ 为第二相质点的平均半径； $\phi$ 为第二相质点的体积分数。由此可以看出，减小析出物的平均半径 $r$ 或者增大析出相的体积分数 $\phi$ ，均可有效细化组织。随着铌含量变化，晶内和晶界析出物形态的变化如图6所示。当铌含量为1%时，可以看到析出物的量比较少，晶内有相对较少的点状析出物，因此晶粒较粗。当铌含量为1.5%时，碳化物的析出量增多，出现小块状的碳化物，同时晶内和晶界出现大量点状弥散分布的析出物，晶粒最细。这是因为当钢中加入Nb元素后，作为较强的碳化物形成元素与钢中的C形成了稳定的碳化物。碳化物在晶内存在时，作为异质形核核心促进形核，细化晶粒；当碳化物在晶界弥散分布时，可以降低界面能，阻碍晶界运动，从而阻止晶粒长大，达到细化晶粒的目的<sup>[12-13]</sup>。

当铌含量继续增加，晶界的条状析出物变得粗大，并有连接成网状的趋势。当Nb含量增加到2.0%时，Nb对晶粒的细化减弱，晶粒变大。当Nb含量增加到2.5%时，晶粒变得更粗大。随着Nb元素含量的增加，碳化物的生成量也逐渐增加，大量的碳化物在晶界聚集，变得粗大，即析出物的平均尺寸增大，使细化作用减弱，晶粒变得粗大。

### 2.3 熔覆层的硬度

熔覆层的硬度如图8所示。随着Nb含量的增加，熔覆层的硬度出现了先增加再减小的情况。当Nb含量为1.5%时，熔覆层的硬度达到55.3HRC，这是因为1.5%Nb的熔覆层组织细小，晶粒细化较明显。当晶粒比较细小，晶界总面积增加，晶界强化作用增大，位错滑移的阻力大；另外随着Nb含量的增加，NbC的析出量增多，且弥散分布在晶内和晶界；因此熔覆组织的硬度较高。

随着Nb含量的进一步增加，MC型碳化物开始聚集长大，第二相质点平均尺寸增大，晶粒细化作用

减弱，熔覆组织增大，造成细晶强化效果减弱；其次，随着Nb含量的增加，NbC在晶界偏聚，弥散度下降，析出相的强化作用减弱；另外，铌含量的增加消耗更多的C形成NbC，使基体碳含量进一步下降，造成基体的硬度降低；因此，当Nb含量为2.5%时，硬度下降到50.2HRC，呈递减的趋势<sup>[14]</sup>。

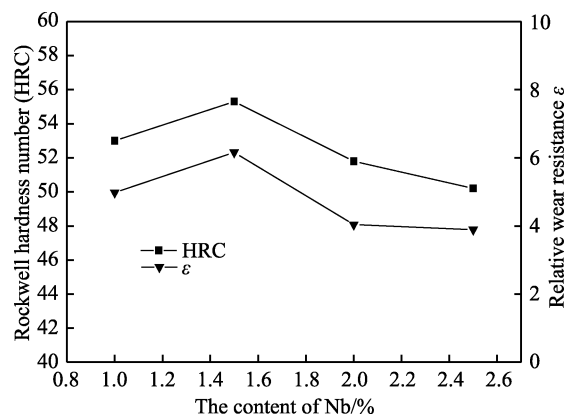


图8 不同Nb含量熔覆层的硬度和相对耐磨性  
Fig.8 Hardness and the relative wear resistance of deposited layer with different contents of niobium

### 2.4 耐磨性

磨损试验结果列于上文图8。随着Nb含量的变化，材料的相对耐磨性呈现先增强后减弱的趋势，和熔覆组织硬度以及晶粒尺寸的变化趋势相吻合。熔覆层的耐磨性受熔覆组织类型的影响<sup>[15]</sup>，主要取决于硬质相的类型、性能、数量和分布，以及基体的形态和性质。当硬质相与韧性好的基体相互匹配时，熔覆组织具有优良的耐磨性。

图9为不同铌含量的熔覆组织经过磨损试验后磨损面的扫描形貌，可以看出主要有两种磨损机制：第一种是磨粒磨损，图中可以看出受到磨粒磨损而产生的犁沟痕迹，犁沟的数量、深浅及宽度是判断耐磨性好坏的重要依据；第二种是粘着磨损，从图中看出有片状聚集成堆的磨屑粘着在磨损面上，这是由于多次塑性变形所产生的微观切削而造成的。磨粒磨损和粘着磨损在熔覆层的摩擦磨损过程中同时发生。

当铌含量为1.0%时，从图9a可以看出，磨损面有比较深且密集的犁沟，还有大面积的剥落现象。这是因为铌含量为1.0%时，生成的碳化铌数量还不够多，在磨损过程中起到耐磨质点和耐磨框架的碳化物较少，阻碍犁沟继续扩展的碳化物距离大，因此会产生比较深且数量多的犁沟。

当铌含量为1.5%时，与图9a相比，图9b的犁沟相对较浅，且没有图9a那么密集，剥落部分也比图9a面积少。这是因为铌含量为1.5%时，MC型碳化物在晶界及晶内弥散分布（如图6所示），硬质相的尺寸小，分散性好，对材料的强化作用明显。熔覆

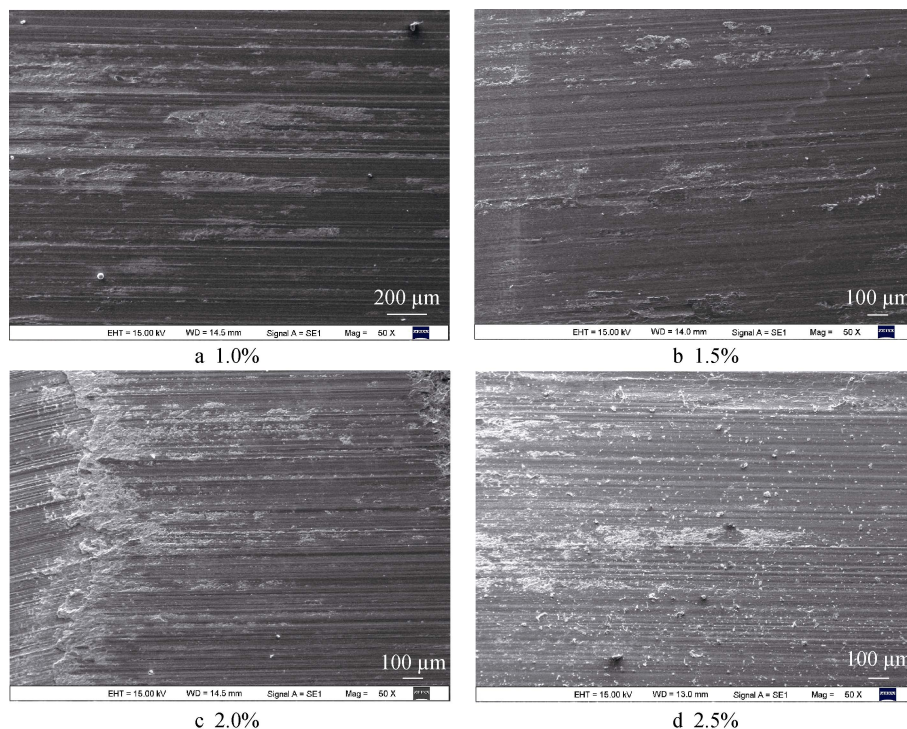


图 9 不同 Nb 含量熔覆层表面磨损形貌

Fig.9 Surface wear morphologies of deposited layer with different contents of Nb

组织中析出的 MC 型碳化物 NbC 硬度可以达到 2000~3000HV, 在磨损过程中作为耐磨质点和耐磨框架的作用, 有效地保护了基体组织, 使材料的耐磨性能得到提升。此外, 当铌含量为 1.5% 时, 组织发生明显细化, 晶粒细化作用提高了材料的强韧性, 韧性好的基体组织通过塑性变形对硬质相起到良好的保护和支撑作用, 与硬质相得到良好的配合, 提高熔覆组织的耐磨性。因此, 碳化物与基体的作用相辅相成<sup>[16]</sup>。

当铌含量为 2.0% 时, 因为铌含量的增加, 晶界处析出的碳化物增多。碳化物在晶界聚集, 有连接成网状的趋势, 对基体有割裂的作用, 并且由于碳化铌的生成消耗了基体中大量的碳, 使基体的强度降低, 对碳化物的保护作用下降。随着析出的碳化物尺寸增大, 组织细化作用减弱, 使得熔覆组织晶粒尺寸增大, 材料的韧性下降, 对硬质相的保护和支撑作用减弱, 因此碳化物容易发生脱落现象, 加重了磨粒磨损和粘着磨损对熔覆层的伤害, 造成犁沟的加深和剥落区域的扩大。

当铌含量继续增加到 2.5% 时, 晶界上生成的碳化物进一步增加, 碳化物连接成网络的趋势更加明显, 此时由于晶粒细化作用进一步减弱和基体中碳含量的进一步降低, 使耐磨性进一步下降。从图 9d 可以看出, 磨损表面存在大量磨屑, 磨损比较严重。

由此可以看出, 当 Nb 含量为 1.5% 时, 熔覆组织得到明显细化, 且硬质相在基体中弥散分布, 强韧性好的基体和硬质相得到良好匹配, 使熔覆组织耐磨性得到最佳, 相对耐磨性  $\varepsilon$  为 6.2。

### 3 结论

1) Fe-C-Cr-Nb 系硬面堆焊材料, 随着铌含量的改变, 熔覆层的组织及碳化物形态发生显著变化, 熔覆层组织为马氏体和贝氏体。当铌含量为 1.5% 时, 晶粒最细, 晶界析出的碳化物较细, 且晶内弥散分布大量碳化物, 钉扎作用最显著。

2) 随着铌含量的增加, 熔覆层的硬度升高。当铌含量为 1.5% 时, 硬度达到最高值, 为 55.3HRC。当铌含量继续增加时, 随着基体碳含量的降低和晶界碳化物的聚集长大, 硬度开始降低。

3) MC 型碳化物的高硬度起到耐磨质点和耐磨框架的作用, 有效地保护了基体组织, 基体又为碳化物提供了良好的强度支撑。在铌含量为 1.5% 时, 熔覆层的耐磨性最好。

### 参考文献:

- [1] 李茂林. 我国金属耐磨材料的发展和应用[J]. 铸造, 2002, 51(9): 525-528.  
LI M L. Development and application of wear resistant metal materials in China[J]. Casting, 2002, 51(9): 525-528.
- [2] 全健民. 耐磨钢研究进展[J]. 华电技术, 2003, 25(2): 29-32.  
TONG J M. Progress of investigation on wear-resistant steels[J]. Huadian technology, 2003, 25(2): 29-32.
- [3] MOORE M A. The relationship between the abrasive wear resistance, hardness and microstructure of ferritic

- materials[J]. Wear, 1974, 28(1): 59-68.
- [4] WANG X H, HAN F, QU S Y, et al. Microstructure of the Fe-based hardfacing layers reinforced by TiC-VC-Mo<sub>2</sub>C particles[J]. Surface & coatings technology, 2008, 202(8): 1502-1509.
- [5] RAMACHANDRA M, ABHISHEK A, SIDDESHWAR P, et al. Hardness and wear resistance of ZrO<sub>2</sub> nano particle reinforced Al nanocomposites produced by powder metallurgy[J]. Procedia materials science, 2015, 10: 212-219.
- [6] WU B, XU B S, ZHANG B, et al. Preparation and properties of Ni/nano-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, composite coatings by automatic brush plating[J]. Surface & coatings technology, 2007, 201(16): 6933-6939.
- [7] CORREA E O, ALCÂNTARA N G, TECCO D G, et al. The relationship between the microstructure and abrasive resistance of a hardfacing alloy in the Fe-Cr-C-Nb-V system[J]. Metallurgical & materials transactions A, 2007, 38(8): 1671-1680.
- [8] CORREA E O, ALCÂNTARA N G, VALERIANO L C, et al. The effect of microstructure on abrasive wear of a Fe-Cr-C-Nb hardfacing alloy deposited by the open arc welding process[J]. Surface & coatings technology, 2015, 276: 479-484.
- [9] 刘政军, 季杰, 董晓强, 等. 超硬质相在高温磨损中的行为和抗磨性[J]. 焊接学报, 1999, 20(2): 120-125.  
LIU Z J, JI J, DONG X Q, et al. Wear resistance and behavior of hard phases in high temperature[J]. Transactions of the China welding institution, 1999, 20(2): 120-125.
- [10] CAO Y B, ZHI S X, GAO Q, et al. Formation behavior of in-situ NbC in Fe-based laser cladding coatings[J]. Materials characterization, 2016, 119: 159-165.
- [11] 胡赓祥, 蔡珣, 戎咏华. 材料科学基础[M]. 上海: 上海交通大学出版社, 2010: 208-209.  
HU G X, CAI X, RONG Y H. Fundamentals of materials science[M]. Shanghai: Shanghai Jiaotong University Press, 2010: 208-209.
- [12] 颜晓峰, 章洪涛, 王瑞珍, 等. 含铌 16Mn 钢的奥氏体晶粒粗化和 NbC 固溶析出行为[J]. 钢铁研究学报, 2000, 12(2): 49-53.  
GU X F, ZHANG H T, WANG R Z, et al. Austenite grain coarsening and NbC dissolution-precipitation behavior in niobium-bearing steel 16Mn[J]. Journal of iron and steel research, 2000, 12(2): 49-53.
- [13] KESRI R, DURAND-CHARRE M. Phase equilibria, solidification and solid-state transformations of white cast irons containing niobium[J]. Journal of materials science, 1987, 22(8): 2959-2964.
- [14] 刘大双, 刘仁培, 邱悦, 等. 无渣含铌自保护堆焊药芯焊丝的研制[J]. 焊接学报, 2012, 33(9): 73-76.  
LIU D S, LIU R P, QIU Y, et al. The development of niobium self-protected surfacing flux cored wire[J]. Transactions of the china welding institution, 2012, 33(9): 73-76.
- [15] KARL H, ZUM G. How microstructure affect abrasive wear resistance[J]. Metal progress, 1979, 116(4): 46-52.
- [16] HWANG K C, LEE S, HUI C L. Effects of alloying elements on microstructure and fracture properties of cast high speed steel rolls: Part II fracture behavior[J]. Materials science & engineering A, 1998, 254(1-2): 296-304.