

# Ti 对中碳高硅锰合金钢组织及耐磨性的影响

杨康<sup>1</sup>, 王志英<sup>1</sup>, 郭云婷<sup>2</sup>, 田春健<sup>1</sup>, 杨帅<sup>1</sup>

(1. 辽宁科技大学材料与冶金学院, 辽宁鞍山 114051; 2. 吉林大学生物与农业工程学院, 吉林长春 130025)

**摘要:** 利用SEM、EDS、Q10M显微维氏硬度计、RtecMFT-5000多功能往复式摩擦试验机、白光干涉仪等设备研究了不同Ti含量的中碳高硅锰合金钢的微观组织、显微硬度、析出相成分和形貌等特征, 并进行了耐磨性分析与磨损机制解析。结果表明: Ti的适量加入可以有效细化晶粒, 但过量Ti(0.7wt.%)的加入会导致晶粒粗化, 并且Ti加入量的不同会导致析出物种类、尺寸与形貌的变化; 硬度与摩擦磨损试验对比发现, Ti的添加总体上降低了中碳高硅锰合金钢的硬度, 其耐磨性能得以提升主要依赖于合金化后析出的微米级TiC、TiN颗粒硬质相, 0.5wt.%的Ti添加量可有效降低中碳高硅锰合金钢的硬度, 同时降低摩擦系数, 提高耐磨性, 这主要归因于晶粒细化强化与析出强化作用。

**关键词:** Ti合金化; 耐磨钢; 显微组织; 硬度; 耐磨性能

## 作者简介:

杨康(1999-), 男, 硕士生, 主要研究方向为耐磨钢的力学性能研究。电话: 16642299082, E-mail: 16642299082@163.com

## 通讯作者:

王志英, 女, 博士, 硕士生导师。电话: 18841201307, E-mail: wzhy74@163.com

中图分类号: TG142.1

文献标识码: A

文章编号: 1001-4977(2024)01-0060-08

## 基金项目:

国家级大学生创新计划(No.202110146016); 国家自然科学基金青年基金项目(No.52205310); 山东省自然科学基金青年基金项目(No.ZR2021QE263)。

## 收稿日期:

2023-07-03 收到初稿,  
2023-09-21 收到修订稿。

随着科技进步和工业化的飞速发展, 耐磨钢的服役环境日趋复杂和严苛, 因此, 加强耐磨材料的开发日显重要和紧迫。提高耐磨性的途径主要有两种: 一是表面涂层强化提高耐磨性, 如采用激光熔覆、磁控溅射、电化学等手段<sup>[1-3]</sup>, 在钢材表面制备一种高硬度、高耐磨性的涂层; 二是采用微合金化细化基体组织, 引入耐磨性颗粒提高耐磨性, 即向钢中加入微量Ti、Mo、V、Nb、B和RE等元素来提高钢材耐磨性, 原因是这些元素加入至钢中有助于细化晶粒、其与钢中C形成的碳化物析出相也有助于提高耐磨钢铸件的力学性能和耐磨性能<sup>[4]</sup>。其中, TiC析出相因具有较高的熔点、强度和硬度<sup>[5]</sup>(HV 3200)、良好的热稳定性和优良的耐磨性能, 且能实现与绝大多数金属基体的良好润湿, Ti作为TiC的引入元素被广泛运用于高强、高硬、高耐磨性钢基(铁基)复合材料制备的微合金化过程<sup>[6-8]</sup>。除Ti合金化外, 一些稀土合金(RE)<sup>[9]</sup>、稀土氧化物颗粒(CeO<sub>2</sub>、La<sub>2</sub>O<sub>3</sub>)<sup>[10-11]</sup>、陶瓷氧化物颗粒(ZrO<sub>2</sub>)<sup>[12]</sup>也被应用于增强材料耐磨性。

国内外部分学者针对Ti含量对碳钢耐磨性的影响展开过相应研究<sup>[13-16]</sup>, 但其研究钢种多为低碳钢, 合金钢等钢种, 对于中/高碳钢的研究少有涉及, 且Ti元素添加的含量范围相对狭窄, 难以确定最优的Ti添加量。考虑到Ti的添加量不当会损害钢的性能, 本文以中碳高硅高锰合金钢为研究对象, 综合考虑Ti添加量对于中碳高硅高锰合金钢力学性能、耐磨性能及可加工性的影响, 确定Ti的最优添加量, 探讨Ti对其微观组织及耐磨性能的影响规律, 并揭示其强化机理。

## 1 试验材料及方法

在200 kg真空感应炉中熔炼出不同钛含量的中碳高硅锰合金钢种, 添加的Ti含量分别为0, 0.1wt.%, 0.3wt.%, 0.5wt.%和0.7wt.%, 熔炼钢种的化学成分如表1所示。

取不同Ti含量的钢样制成25 mm × 25 mm × 5 mm的试样, 利用扫描电镜(SEM, EVO MA25)观察经SiC砂纸研磨至2 000#, 然后抛光的样品微观组织。并利用SEM配备的能谱仪(EDS, Oxford)分析样品的主要元素组成、元素分布和占比情况。

采用Q10M显微硬度计进行硬度测量; 采用RtecMFT-5000多功能往复式摩擦

表1 不同试验钢的化学成分  
Table 1 Composition of different test steel

编号	C	Si	Mn	P	S	Ni	Ti	Mo	N	$w_B/\%$
1 <sup>#</sup>	0.4	1.25	3.2	0.01	0.005	1.5	0	0.2	0.004 5	
2 <sup>#</sup>	0.4	1.25	3.2	0.01	0.005	1.5	0.1	0.2	0.004 5	
3 <sup>#</sup>	0.4	1.25	3.2	0.01	0.005	1.5	0.3	0.2	0.004 5	
4 <sup>#</sup>	0.4	1.25	3.2	0.01	0.005	1.5	0.5	0.2	0.004 5	
5 <sup>#</sup>	0.4	1.25	3.2	0.01	0.005	1.5	0.7	0.2	0.004 5	

试验机测量摩擦磨损性能，对磨材料为直径4 mm不锈钢淬火钢球（HRC硬度62），试验温度为室温（25℃），载荷为10 N，试验时间30 s，往复行程为10 mm，获得摩擦系数（COF）值；最后通过白光干涉仪（WLI, Rtec）分析样品往复摩擦磨损后的二维和三维形貌。

## 2 试验结果与分析

### 2.1 微观组织结构分析

图1为不同Ti含量对耐磨钢微观组织的影响。从中可以发现，加入Ti元素后，合金钢组织变得细密，随着Ti元素含量由0逐步增加至0.5wt.%时，组织细密化、均匀化程度增加，因为Ti与少量的C、N、O等元素有比较强的结合力，在凝固过程中，Ti元素优先与N元素形成稳定的TiN，增加了晶核的数量，从而细化了晶粒。

当Ti含量增加至0.7wt.%时，合金钢片层间距增加，组织致密度下降，析出物明显粗化。与此同时，结合图1和图2可以发现，Ti添加量的不同也导致析出相种类、形状和尺寸发生变化，当Ti含量为0.1wt.%时，析出物主要为短棒状的TiC，呈弥散分布；Ti增加到0.3wt.%时，又有方形颗粒状的TiN析出相出现；当Ti含量增加至0.5wt.%时，除短棒状与方形颗粒状析出物外，还出现了新的点粒状MoC析出相；当Ti含量进一步增加到0.7wt.%时，析出物逐渐团聚，尺寸变大，形状由短棒状变为长棒状并在晶界处析出，经面扫描结果得知存在Ti元素的富集，确定为TiC析出物。通常析出物的生长和粗化主要受远程扩散的控制，这种作用下析出物的生长缓慢。然而由于管道扩散效应<sup>[17]</sup>的存在，晶界提供了更快的扩散路径，提高了合金元素的扩散速率，故易在晶界处形成长棒状析出物<sup>[18]</sup>。长棒状析出

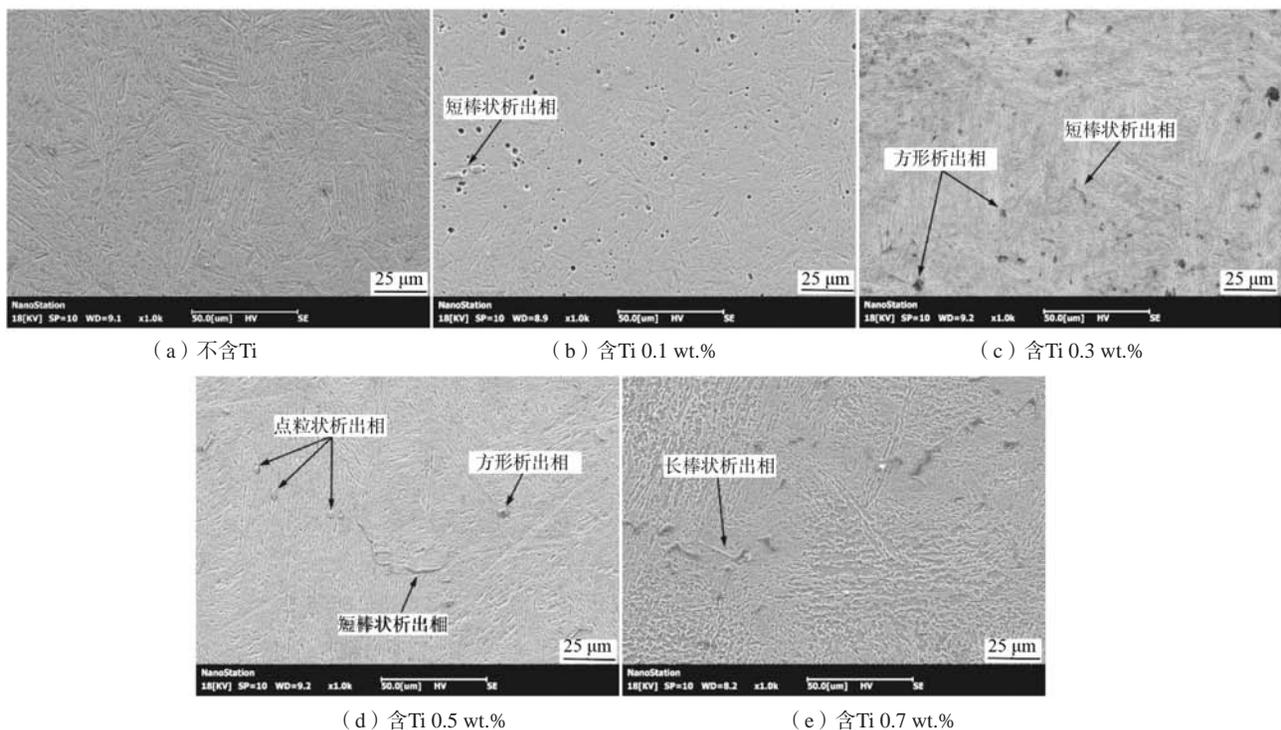


图1 不同Ti含量铸态耐磨钢显微组织

Fig. 1 Microstructure of wear-resistant steel with different Ti content

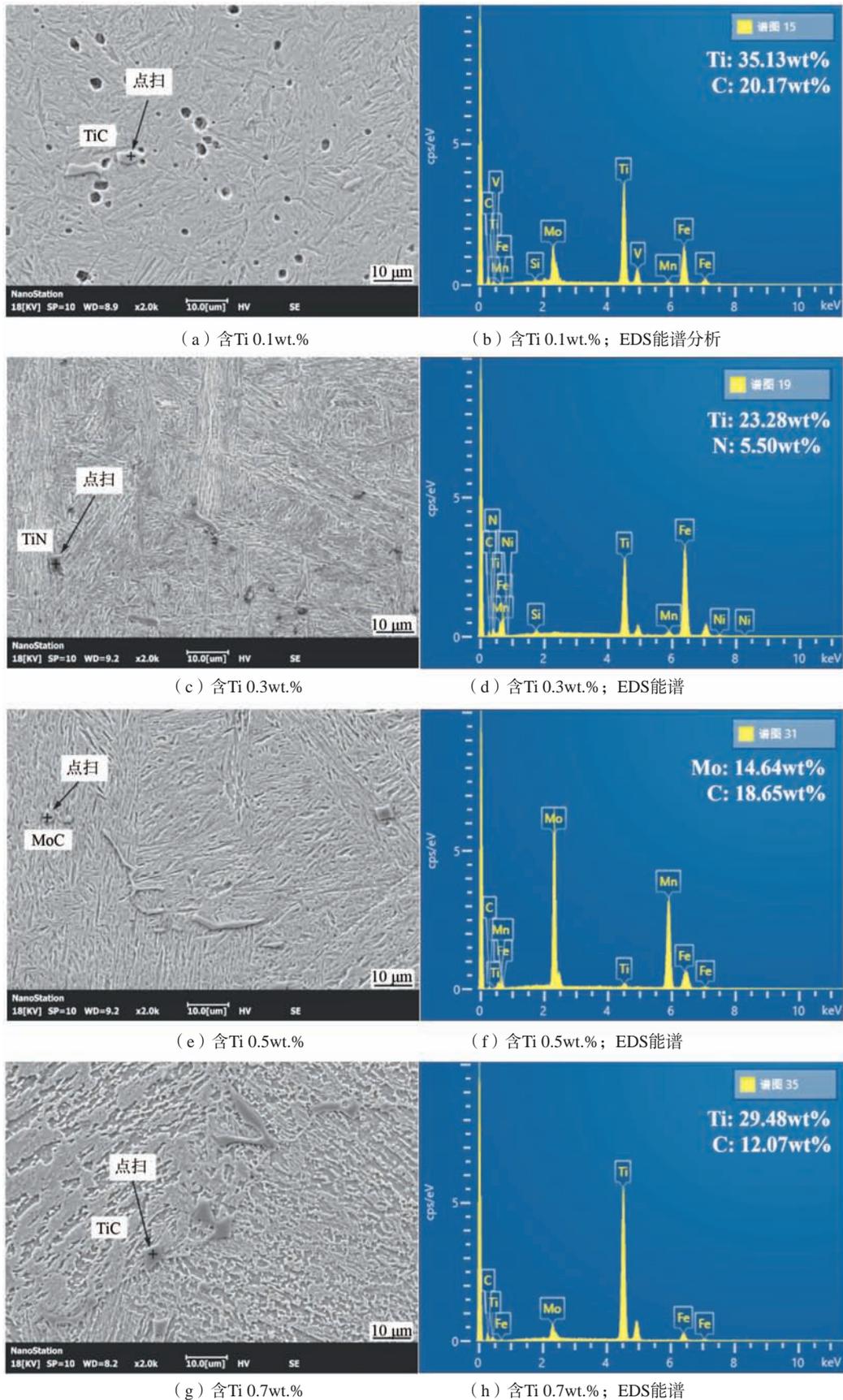


图2 不同Ti含量铸态耐磨钢析出物EDS点扫描分析

Fig. 2 EDS point scanning analysis of as-cast wear-resistant steel precipitates with different Ti content

物的形成破坏了Ti、C元素在钢基体中的均匀性，对部分晶界的钉扎能力减弱，晶粒尺寸增大。

对新生成的析出物进行EDS面扫描分析(图3)，发现析出相中富含Ti元素，种类以Ti的碳化物、氮化物为主，且随着Ti元素的过量添加，析出相和晶粒尺寸

明显变得粗大。根据TiC和TiN在液相中的固溶度积公式，式(1)和式(2)<sup>[19]</sup>可知，钢液中TiN的固溶度积远小于TiC，因此试验钢中Ti先以TiN形式析出，温度降低达到TiC的固溶度积时，TiC开始析出。但由于钢中C含量(0.4wt.%)比N含量(0.0045wt.%)高出约两个

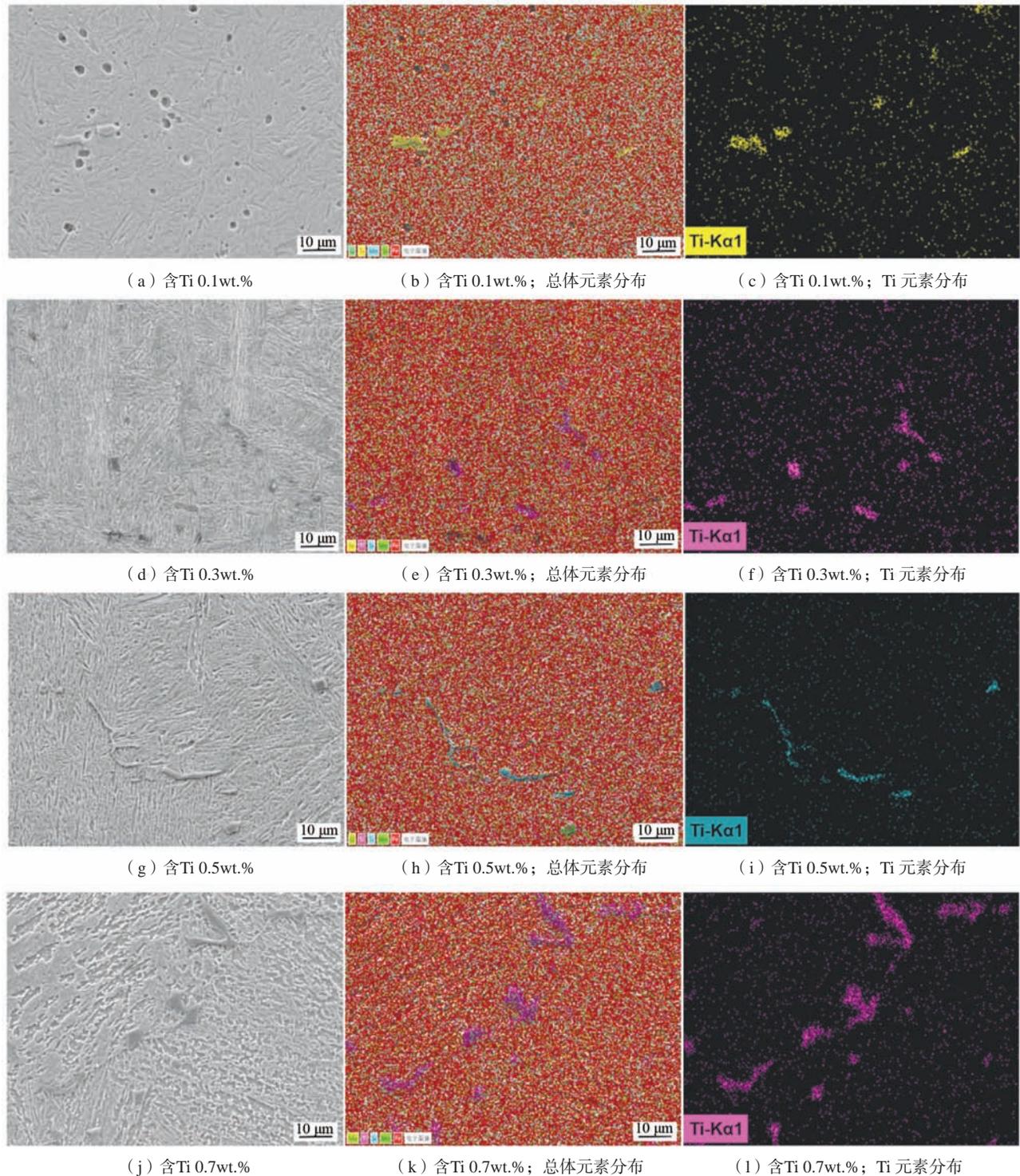


图3 不同Ti含量铸态耐磨钢中Ti析出物形貌变化

Fig. 3 Morphology of Ti precipitates in cast wear-resistant steels with different Ti content

数量级（100倍），N的竞争能力较弱，因此析出物大部分以TiC的形式析出，与图2中的EDS分析结果相吻合。与此同时，随着Ti含量的增加，析出相的热力学析出温度升高<sup>[20]</sup>，析出相在高温下更容易生长和粗化。因此，Ti添加量为0.7 wt.%时，析出相尺寸增加，晶粒粗化明显。

$$\log[\text{Ti}][\text{C}]=5.33-10\,475/T \quad (1)$$

$$\log[\text{Ti}][\text{N}]=3.82-15\,020/T \quad (2)$$

式中：[Ti]、[C]、[Ti]、[N]分别为TiC、TiN在钢中的平衡浓度产物， $T$ 为绝对温度。

## 2.2 显微硬度分析

图4为不同Ti含量的铸态耐磨钢的显微硬度，从图中可以看出，钢中不含Ti时，平均显微硬度高达HV<sub>0.5</sub>680，这是因为钢基体自身硬度高，但是单纯高硬度，不利于后续的轧制和热处理。此外，还会降低耐磨钢的韧性，对使用性能不利。当Ti的添加量为0.1wt.%时，显微硬度略微下降（HV<sub>0.5</sub>659），因为有弥散分布的TiC析出；Ti添加量为0.3wt.%时，显微硬度下降明显（HV<sub>0.5</sub>467）；Ti添加量为0.5wt.%时，显微硬度回升（HV<sub>0.5</sub>484）；当Ti含量进一步添加至0.7 wt.%时，显微硬度下降最明显（HV<sub>0.5</sub>421）。Ti、Mo合金化后，钢液在凝固过程中易与碳原子结合形成TiC、MoC化合物析出<sup>[21]</sup>，造成钢基体中的碳元素含量降低，硬度下降；析出相析出会提高钢的硬度，但不足以抵消因钢基体含碳量减少导致的硬度降低，因而Ti元素的加入总体上降低了中碳高硅锰合金钢的硬度，Ti加入量为0.7wt.%时，这一现象更为明显。结合图1和图2的微观试验结果可知，含Ti量为0.5wt.%时，耐磨钢显微组织更加细密，Ti、Mo的析出物细小，分布均匀，有利于分散应力，增强了钢基体抵御硬度计压头的的能力，同等试验力条件下所形成的压痕表面积较小，测算出的显微硬度值得以回升。

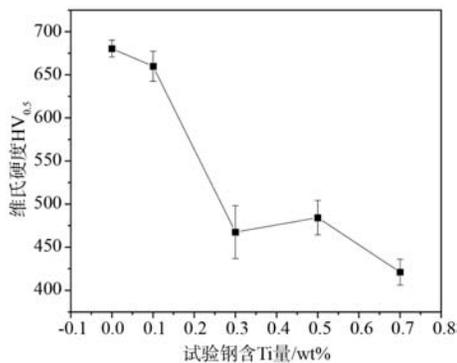


图4 不同Ti含量铸态耐磨钢显微硬度分布

Fig. 4 Microhardness of cast wear-resistant steel with different Ti content

## 2.3 摩擦磨损性能评价

图5为不同Ti含量的中碳高硅锰合金钢在10 N载荷下的摩擦系数试验结果。可以看出，未添加Ti时，钢基体的摩擦系数稳定在1.0附近；随着Ti的添加，摩擦系数明显下降，稳定至0.7左右。这证明了Ti的加入可以明显提高中碳高硅锰钢的耐磨性，结合显微硬度的分析结果，Ti的添加总体上降低了中碳高硅锰合金钢的硬度，其耐磨性能仍得以提升。原因主要归因于以下几点：首先是高硬度的TiC、TiN以及MoC等颗粒与钢基体组织牢固结合，难以被磨粒直接磨损，同时还能破坏磨粒尖角，有效减弱了磨粒对耐磨钢表面的犁削能力；与此同时，这些硬质颗粒分布在钢基体表面起到了微突起的作用，有效阻止了磨粒穿过基体，避免了大量磨粒与基体的直接接触，从而大大减少了磨粒与钢基体的实际接触面积，减少了磨损损失，有效提高了基体的耐磨性；此外，Ti的加入起到了细晶强化的作用，当晶粒尺寸减小时，晶界面积则增大，可以有效增加裂纹扩展路径，分散材料中的应力集中，从而提高耐磨性。

图6为白光干涉仪（WLI，Rtec）对磨损后的形貌进行二维与三维表征的结果。可以看出，在试验钢中加入Ti元素后，钢基体表面磨损形貌发生了显著变化。未添加Ti元素时，耐磨钢表面除了磨损过程中所形成的

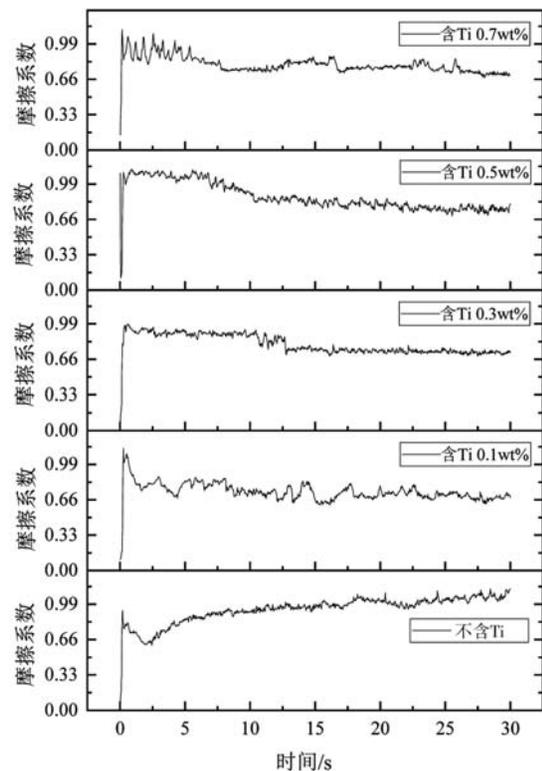
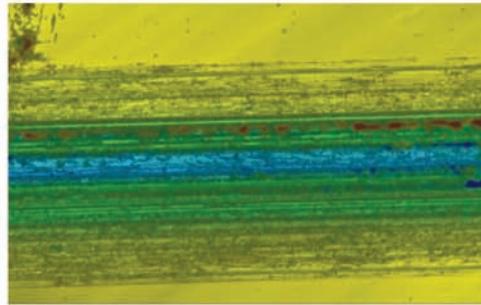
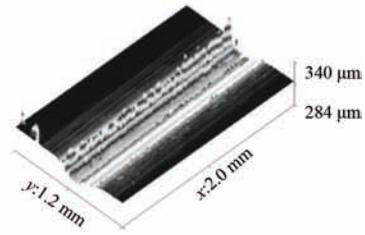


图5 10 N载荷下不同Ti含量添加的摩擦系数对比

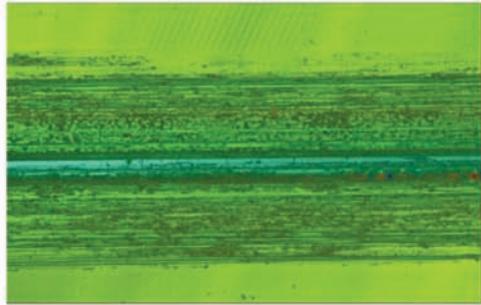
Fig. 5 Comparison of friction coefficients added by different Ti contents under 10 N load



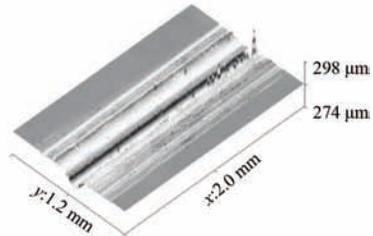
(a) 不含Ti; 磨痕的二维形貌



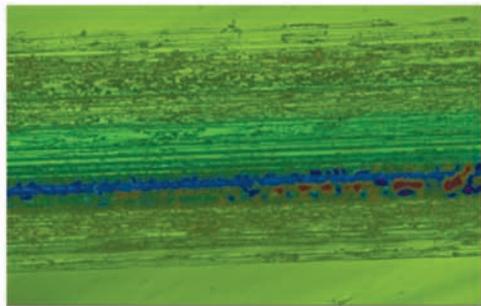
(b) 不含Ti; 磨痕的三维表征



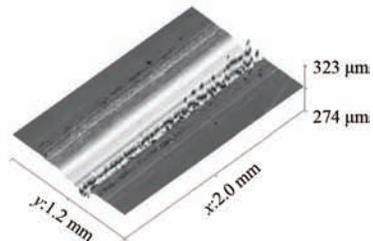
(c) 含Ti 0.1wt.%; 磨痕的二维形貌



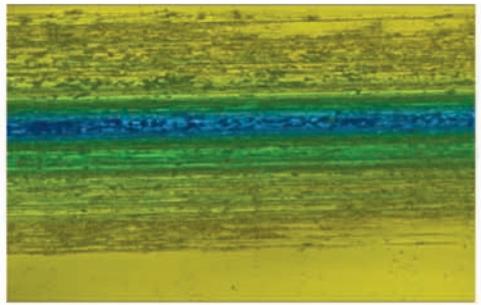
(d) 含Ti 0.1wt.%; 磨痕的三维表征



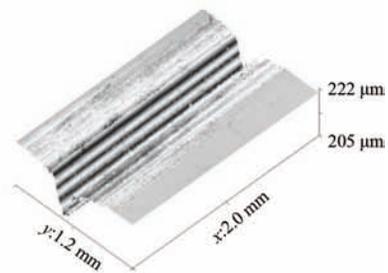
(e) 含Ti 0.3wt.%; 磨痕的二维形貌



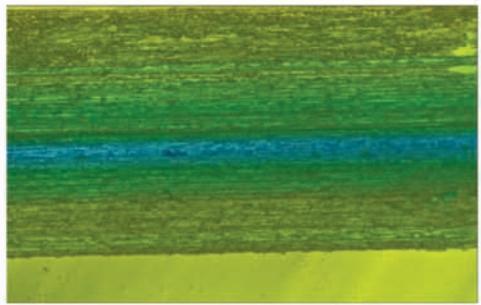
(f) 含Ti 0.3wt.%; 磨痕的三维表征



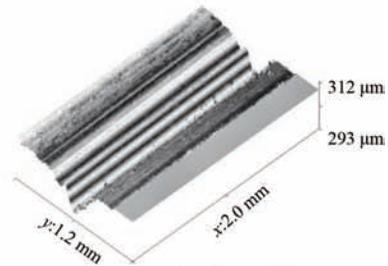
(g) 含Ti 0.5wt.%; 磨痕的二维形貌



(h) 含Ti 0.5wt.%; 磨痕的三维表征



(i) 含Ti 0.7wt.%; 磨痕的二维形貌



(j) 含Ti 0.7wt.%; 磨痕的三维表征

图6 不同Ti含量铸态耐磨钢中磨痕二维/三维形貌

Fig. 6 2D/3D morphologies of wear marks in as-cast wear-resistant steels with different Ti content

犁沟外,还产生了大部分的深划痕,而添加Ti元素后,明显降低了划痕的深度。说明该耐磨钢添加Ti后,其磨损机制发生改变,从未添加Ti的犁式磨损为主,微切削为辅的磨损机制转变为完全的犁式磨损机制。进一步对比不同含Ti量耐磨钢试样磨痕的三维形貌,发现Ti的添加能够有效减小磨痕深度,其深度由原始样品(不含Ti)的56  $\mu\text{m}$ 降低至最浅17  $\mu\text{m}$  (0.5wt.% Ti),进一步证明了Ti的加入可以有效提高中碳高硅锰合金钢的耐磨性。

### 3 结论

(1) Ti的添加可以有效细化试验钢的基体组织,

当添加量为0.5wt.%时效果最为显著,当Ti添加量增加至0.7wt.%时,晶粒尺寸变得粗大。

(2) Ti的加入可以形成多种析出相,随着Ti添加量的不同,析出物的种类、数量、形貌都会发生明显变化,析出相主要以Ti的碳化物与氮化物为主。

(3) Ti的添加总体上降低了中碳高硅锰合金钢的硬度,其耐磨性能得以提升主要依赖于合金化后析出的微米级TiC、TiN颗粒硬质相。

(4) 0.5wt.%Ti的添加可以最有效地提高中碳高硅锰钢的耐磨性,摩擦系数可以降低至0.7左右,适当降低了硬度的同时提高了可加工性。

#### 参考文献:

- [1] WU Q, LI W, ZHONG N, et al. Microstructure and properties of laser-clad  $\text{Mo}_2\text{NiB}_2$  cermet coating on steel substrate [J]. *Steel Research International*, 2015, 86 (3): 293-301.
- [2] ZEGHNI A E, HASHMI M S J. Comparative wear characteristics of tin and tic coated and uncoated tool steel [J]. *Journal of Materials Processing Technology*, 2004, 155: 1923-1926.
- [3] JAFARI Y, GHOREISHI S M, SHABANI-NOOSHABADI M. Electrochemical deposition and characterization of polyaniline-graphene nanocomposite films and its corrosion protection properties [J]. *Journal of Polymer Research*, 2016, 23: 1-13.
- [4] 李卫. 国家标准《耐磨钢铸件》解读 [J]. *铸造*, 2016, 65 (5): 479-481.
- [5] LAN K, DING W, YANG Y. Effect of heat treatment on microstructure and mechanical properties of Ti-containing low alloy martensitic wear-resistant steel [J]. *China Foundry*, 2023, 20 (4): 329-338.
- [6] DENG X, HUANG L, WANG Q, et al. Three-body abrasion wear resistance of TiC-reinforced low-alloy abrasion-resistant martensitic steel under dry and wet sand conditions [J]. *Wear*, 2020, 452: 203310.
- [7] HUANG L, DENG X, WANG Q, et al. Solidification and sliding wear behavior of low-alloy abrasion-resistant steel reinforced with TiC particles [J]. *Wear*, 2020, 458: 203444.
- [8] NING B, NIU G, YU X, et al. Study on wear resistance performance along the thickness direction of in situ TiC-reinforced high-strength steel [J]. *Steel Research International*, 2023, 94 (3): 2200654.
- [9] 王建民, 朱慧, 杨森, 等. 稀土变质处理对低合金铸钢组织和性能的影响 [J]. *铸造*, 2007 (8): 866-867.
- [10] ATAPOUR M, BLAWERT C, ZHELUDKEVICH M L. The wear characteristics of  $\text{CeO}_2$  containing nanocomposite coating made by aluminate-based PEO on AM 50 magnesium alloy [J]. *Surface and Coatings Technology*, 2019, 357: 626-637.
- [11] XU YONGFU, KONG DEJUN. Effect of  $\text{La}_2\text{O}_3$  addition on microstructure and tribological performance of laser clad Ni-WC coating on S136 steel [J]. *Transactions of the Indian Institute of Metals*, 2022, 75 (7): 1843-1852.
- [12] QI M J, WANG C, DONG L M. Wear resistance of nano  $\text{ZrO}_2$  ceramic for hip joint head prostheses [J]. *Rare Metal Materials & Engineering*, 2015, 44: 381-383.
- [13] 郑健, 杨曦, 王麒, 等. TiC粒子增强低合金耐磨钢NM450SP三体磨损性能研究 [J]. *金属材料与冶金工程*, 2020, 48 (5): 27-31.
- [14] 陆春洁, 邵春娟, 镇凡, 等. 低Ti含量(0-0.15%)对高强钢耐磨性的影响 [J]. *金属热处理*, 2023, 48 (5): 104-109.
- [15] DING W, FAN Z, YANG Y. Effect of Ti addition on the wear resistance of low alloy steel [J]. *Transactions of the Indian Institute of Metals*, 2022, 75 (11): 2857-2866.
- [16] 滕铝丹, 曹静, 张拓, 等. 含Ti铸造双相不锈钢组织与耐腐蚀性能研究 [J]. *铸造*, 2017, 66 (12): 1317-1321.
- [17] MARIE LANDEIRO DOS REIS, YVELIN GIRET, PHILIPPE CARREZ, et al. Efficiency of the vacancy pipe diffusion along an edge dislocation in MgO [J]. *Computational Materials Science*, 2022, 211: 111490.
- [18] JIANG S, WANG H, WU Y, et al. Ultrastrong steel via minimal lattice misfit and high-density nanoprecipitation [J]. *Nature*, 2017, 544: 460-464.

- [19] 梁小凯, 孙新军, 雍岐龙, 等. 高钛钢中TiC析出机制 [J]. 钢铁研究学报, 2016, 28(9): 71-75.
- [20] 宋扬. 钛微合金化及热处理对低碳高强度钢组织和性能的影响 [D]. 哈尔滨: 哈尔滨工程大学, 2020.
- [21] 殷延涛. 新型TiC颗粒增强型耐磨钢的耐磨性能研究 [J]. 山东冶金, 2020, 42(1): 42-45.

---

## Effect of Ti on Microstructure and Wear Resistance of Medium-Carbon, High Silicon Manganese Alloy Steel

YANG Kang<sup>1</sup>, WANG Zhi-ying<sup>1</sup>, GUO Yun-ting<sup>2</sup>, TIAN Chun-jian<sup>1</sup>, YANG Shuai<sup>1</sup>

(1. College of Materials and Metallurgy, University of Science and Technology Liaoning, Anshan114051, Liaoning, China; 2. College of Biological and Agricultural Engineering, Jilin University, Changchun 130025, Jilin, China)

### Abstract:

The microstructure, microhardness, precipitated phase composition and morphology of medium carbon high silicon manganese alloy steels with different Ti content were studied by means of SEM, EDS, Q10M micro-Vickers hardness tester, RtecMFT-5000 multi-function reciprocating friction testing machine and white light interferometer. The wear resistance and wear mechanism were analyzed. The results show that the appropriate addition of Ti can effectively refine the grain, but the addition of excessive Ti (0.7 wt.%) leads to grain coarsening, and the difference of Ti addition leads to the change of species, size and morphology. The comparison between hardness and friction and wear test shows that the addition of Ti generally reduces the hardness of medium-carbon high-silicon manganese alloy steel, and the improvement of its wear resistance mainly depends on the micron-grade TiC and TiN granular hard phases precipitated after alloying. The addition of 0.5wt.% Ti can effectively reduce the hardness of medium-carbon high-silicon manganese alloy steel, reduce the friction coefficient, and improve the wear resistance. This is mainly due to the effect of grain refinement and precipitation strengthening.

### Key words:

Ti alloying; wear-resistant steel; microstructure; hardness; wear-resistant properties

---