

# 钛含量对高铬铸铁耐磨性能的影响

刘夙伟<sup>1</sup>, 季峰<sup>2</sup>, 张艳<sup>2</sup>, 郭宇航<sup>2</sup>

(1. 江阴职业技术学院 机电工程系, 江苏江阴 214405; 2. 江苏科技大学 材料科学与工程学院, 江苏镇江 212003)

**摘要:** 研究了含0.1%、0.6%、1.1%、1.6%钛的高铬铸铁的硬度和耐磨性能与组织之间的关系。通过金相组织图、XRD测试、EDS分析以及磨损试验, 发现钛的添加对高铬铸铁的耐磨性能有显著影响, 形成的TiC对 $(Cr, Fe)_7C_3$ 碳化物有明显的细化作用, 但是过多的钛会导致TiC团聚并减少基体组织中的含碳量, 对高铬铸铁的耐磨性能造成负面影响。当钛含量为1.6%时, 高铬铸铁硬度达到HRC 63, 有着最佳的耐磨损性能, 其热处理工艺为1 020 ℃保温2 h, 油淬, 再经250 ℃保温4 h, 空冷。

**关键词:** 高铬铸铁;  $M_7C_3$ 碳化物; 耐磨性能; 碳化钛

作为新材料领域的核心, 耐磨材料对高新技术的发展起着重要的支撑作用<sup>[1-2]</sup>。高铬铸铁作为继普通白口铸铁、镍硬铸铁之后第三代耐磨材料<sup>[3]</sup>, 自20世纪80年代开始就进行了大量理论和实际应用研究, 为我国抗磨材料的发展做出了很大贡献<sup>[4-6]</sup>。研究表明, 适量的钛添加到高铬铸铁中可以有效细化共晶碳化物, 增加高铬铸铁的耐磨性能<sup>[7-8]</sup>。然而, 由于钛是强碳化物形成元素且化学性质活泼, 作为微量元素添加到高铬铸铁中会与碳、氮等非合金元素发生多种反应<sup>[9-10]</sup>, 因此少量或过量的钛都可能会造成负面影响。本试验研究不同钛含量高铬铸铁的硬度以及耐磨性能与组织结构之间的关系, 希望通过揭示钛在高铬铸铁中的作用机理, 提高高铬铸铁的耐磨性能。

## 1 试验材料与方法

本试验以废钢、钼铁、低碳铬铁、钒铁、铜丝、纯钛、电解锰、纯镍和纯钛为原材料。采用WK-II型非自耗真空电弧炉对每个试样都进行5次反复熔炼, 熔炼完成后采用直读光谱仪对试样的化学成分进行测量, 具体结果如表1所示。

用电火花线切割机将熔炼完成后的铸锭切割成10 mm × 10 mm × 2 mm的试样, 热处理工艺的选择为960 ℃、990 ℃、1 020 ℃, 保温2 h后油淬, 随后250 ℃回火4 h, 空冷。采用ZEISS光学金相显微镜, 观察金相组织; 采用JSM-6480型扫描电子显微镜附带的能谱仪进行微区的成分分析; 采用HRS-150型数显式洛氏硬度计进行硬度测试; 采用岛津公司产的XRD-6000型 X射线衍射仪进行物相分析; 采用MLD-10型冲击磨料磨损试验机进行磨损试验, 将试样切割成10 mm × 10 mm × 30 mm大小, 磨面的尺寸为10 mm × 10 mm, 选用热轧态40Cr钢为配对试样, 硬度为HRC 20, 硬磨料为4-6目石英砂, 砂流量为50 kg/h, 试验结束后采用4-6目煤作为软磨料对试样表面进行清洁处理。

## 2 结果与讨论

### 2.1 热处理及硬度测试结果

图1所示为不同钛含量高铬铸铁铸态以及热处理后的硬度变化图。可以明显看到, 经过热处理后高铬铸铁的硬度值有了较大幅度的提升, 其中以1 020 ℃淬火

作者简介:

刘夙伟(1981-), 女, 博士, 讲师, 主要从事金属摩擦及热处理研究工作。E-mail: justlsw@163.com

中图分类号: TG163

文献标识码: A

文章编号: 1001-4977(2021)01-0068-06

收稿日期:

2020-07-03 收到初稿,  
2020-08-24 收到修订稿。

表1 试验用高铬铸铁化学成分  
Table 1 Chemical composition of high chromium cast irons with different amounts of titanium

编号	C	Cr	Cr/C	V	W	Ni	Mn	Cu	Mo	Fe	Ti
1	2.67	22.6	8.46	1.79	0.83	0.41	0.58	0.96	0.61	余量	0.11
2	2.68	21.8	8.13	1.75	0.81	0.40	0.61	1.04	0.61	余量	0.59
3	2.73	21.8	7.99	1.78	0.84	0.39	0.60	1.01	0.60	余量	1.12
4	2.66	22.3	8.38	1.81	0.78	0.42	0.59	0.97	0.62	余量	1.61

+250℃回火为最佳。这是因为经热处理后，硬度值较低的奥氏体转变成硬度值较高的马氏体，而较高的淬火温度有利于奥氏体向马氏体的转变。在钛含量为0.1%时，可以看到不同淬火温度下的高铬铸铁硬度值非常接近，这可能是热处理的过程中本就十分稀少的钛与高铬铸铁中的氮、氧等元素发生了反应，使得形成的TiC数量十分有限。随着钛含量的不断增加，无论是铸态还是热处理后，高铬铸铁的硬度值都有所增加。众所周知，材料的耐磨性能取决于碳化物与基体的相互作用，当钛含量大于0.6%以后，硬度值虽然继续增加但增加的幅度明显下降，这是因为TiC的数量虽然增加了，但是基体中大量的碳被消耗， $M_7C_3$ 碳化物的构型受到了影响<sup>[11]</sup>。在钛含量为1.6%，淬火温度为1 020℃的情况下，高铬铸铁的耐磨性能最佳，硬度值达到HRC 63.0。

## 2.2 金相组织

图2所示为不同钛含量高铬铸铁在铸态以及经1 020℃淬火250℃回火后的金相显微组织。可以看到，高铬铸铁主要由碳化物和基体组织组成，其中铸态时，基体组织中大部分为奥氏体，热处理后基体组织中大部分为马氏体。图2a和e是钛含量为0.1%的金相图，此时钛含量较低，图中仍能看到许多六边角状初生 $M_7C_3$ 碳化物，其中图2e中的 $M_7C_3$ 碳化物尺寸较大，与周围细小的晶粒形成了鲜明的对比，在磨损过程中易剥落形成磨屑。随着钛含量的增加， $M_7C_3$ 碳化物的形状发生了变化，图2f中可以看到大量条状白色 $M_7C_3$ 碳化物。为确定其成分，对其进行EDS以及XRD测试。图3a显示，Fe与Cr的原子比之和为67.05%，碳的原子比为32.5%，比值基本符合7:3。图4a的X射线衍射图谱显示，高铬铸铁中含有 $(Cr, Fe)_7C_3$ 碳化物，因此可以确定，高铬铸铁中的 $M_7C_3$ 碳化物为 $(Cr, Fe)_7C_3$ 碳化物。

图3b所示为黑色颗粒的EDS测试结果。Ti和C为主要元素，原子比分别为58.85%和39.47%，比值接近1:1，并含有微量的Fe和V元素。结合图4a的X射线衍射图谱可以确定该黑色颗粒为TiC。随着钛含量的增加，无论是铸态还是热处理后，高铬铸铁中的 $(Cr, Fe)_7C_3$ 碳化物均有一定程度的细化。这是因为高铬铸铁在凝固的过程中，TiC会优先于 $(Cr, Fe)_7C_3$ 碳化

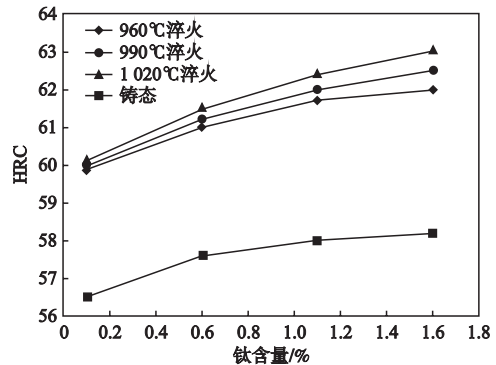


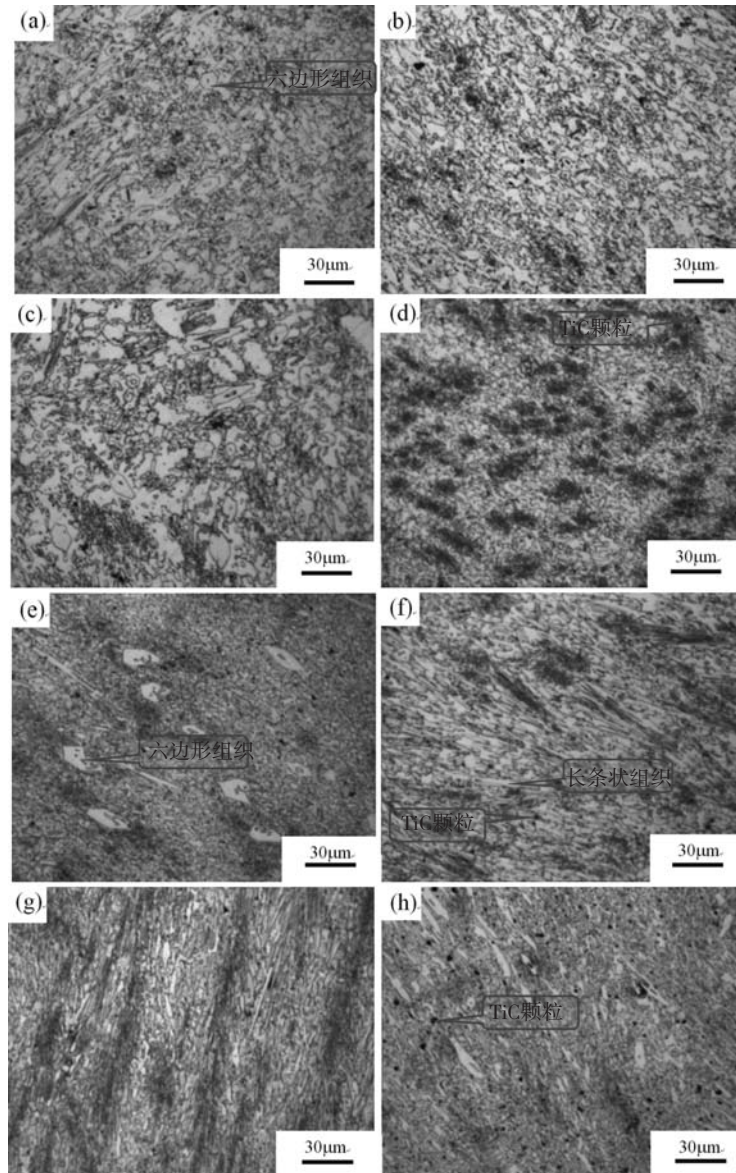
图1 不同钛含量抗磨铸铁高温淬火+250℃回火后的洛氏硬度  
Fig. 1 Rockwell Hardness of wear resistant cast iron samples with different amounts of titanium after heat treatment

物析出，并作为 $(Cr, Fe)_7C_3$ 碳化物的非均质基底，从而起到细化 $(Cr, Fe)_7C_3$ 碳化物的作用<sup>[12]</sup>。另一方面，TiC数量的不断增加会消耗基体中的碳，这也可能是造成 $(Cr, Fe)_7C_3$ 碳化物体积减小的原因<sup>[13]</sup>。众所周知，均匀分散的TiC颗粒有助于提高材料的耐磨性能，然而当钛含量为1.6%时，图1d和h中出现了数量较多且团聚在一起的TiC颗粒，此时虽然耐磨性能最佳，但由于TiC的团聚，耐磨性能的提升并不明显。

图4为不同钛含量高铬铸铁经1 020℃淬火，250℃回火后的X射线衍射图谱。可以看到，随着钛含量的增加，图谱中大致衍射峰没有太大的差别，相的种类也没有发生变化。图4b中TiC的衍射峰相较于图4a明显增强， $(Cr, Fe)_7C_3$ 碳化物的衍射峰明显减弱，这证明了TiC数量的增加对 $(Cr, Fe)_7C_3$ 碳化物的析出有抑制作用。

## 2.3 耐磨性

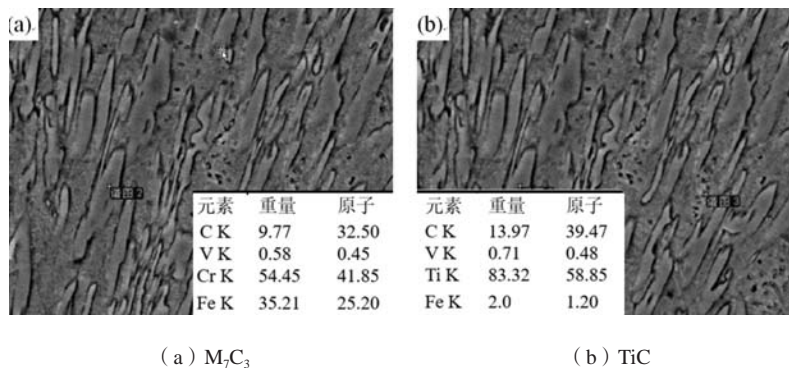
图5所示为不同钛含量的高铬铸铁在冲击功为2 J、磨损时间30 min条件下的磨损试验结果。可以看到，磨损结果与硬度测试的结果一致，铸态高铬铸铁的磨损量远大于热处理后的高铬铸铁。钛含量的增加不仅使得TiC的数量得到了提升，对初生 $M_7C_3$ 碳化物也有一定的细化作用，然而大量碳被消耗对基体的组织成分产生了一定的影响；另一方面，随着钛含量的增加，TiC会发生长大团聚现象，团聚的TiC颗粒与周围



(a, e) 0.1%; (b, f) 0.6%; (c, g) 1.1%; (d, h) 1.6%; (a-d) 铸态; (e-h) 热处理态

图2 不同钛含量试样铸态及1 020 °C淬火250 °C回火后的显微组织

Fig. 2 Microstructure of samples with different amounts of titanium in as-cast and heat treatment (1 020 °C quenching, 250 °C tempering) conditions



(a)  $M_7C_3$

(b) TiC

图3 含钛量为0.6%的高铬铸铁1 020 °C淬火250 °C回火后的EDS分析

Fig. 3 EDS analysis of wear resistant cast iron containing 0.6wt% titanium after 1 020 °C quenching and 250 °C tempering treatment

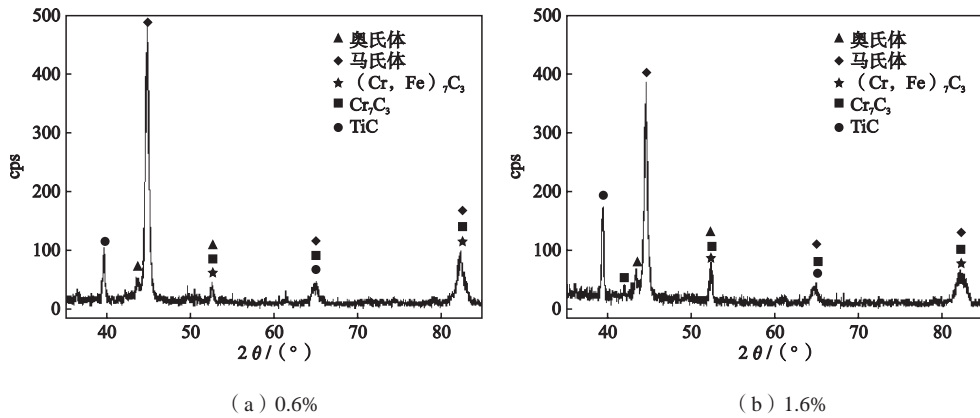


图4 不同钛含量高铬铸铁试样1020 °C淬火250 °C回火后X射线衍射图谱

Fig. 4 XRD patterns of wear resistant cast iron samples with 0.6% and 1.6% titanium after 1 020 °C quenching and 250 °C tempering treatment

基体组织硬度值差距明显，不利于高铬铸铁耐磨性能的提升。

图6是不同钛含量的高铬铸铁经1 020 °C淬火，250 °C回火后随着载荷以及时间变化的磨损结果。从图6a中可以看到，在高载荷（5 N）作用下，高钛含量（1.6%）高铬铸铁与低钛含量（0.1%）高铬铸铁的磨损量之差明显大于低载荷（2 N）的情况，这说明TiC不仅可以提高高铬铸铁的耐磨性，在高载荷的情况下，效果更加显著。从图6b中可以看到，随着磨损时间的变化，高铬铸铁的磨损量变化基本呈一条直线，这说明整个磨损试验过程中，高铬铸铁磨损的过程是均匀的。

### 2.4 耐磨机理分析

图7为1 020 °C淬火，250 °C回火后不同钛含量高铬铸铁在5 J载荷条件下磨损0.9 h后的磨损表面照片，图中的黑色区域是磨损的过程中，石英砂粘在试样表面所致。可以看到，图7a、b、c中均出现了明显的磨损凿坑。钛含量为0.1%时，凿坑尺寸较大且属于高应力凿削磨损<sup>[14]</sup>，这可能与初生M<sub>7</sub>C<sub>3</sub>碳化物尺寸过大有关。钛含量为0.6%时（图7b），可以很清晰地看到数量不少的凿

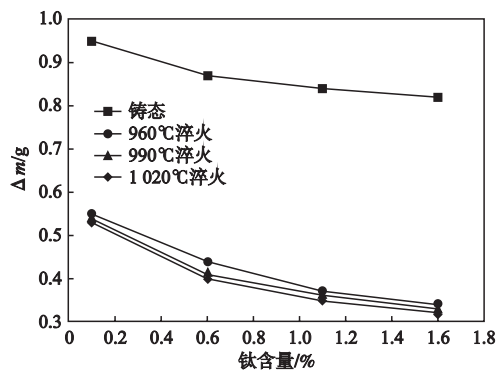
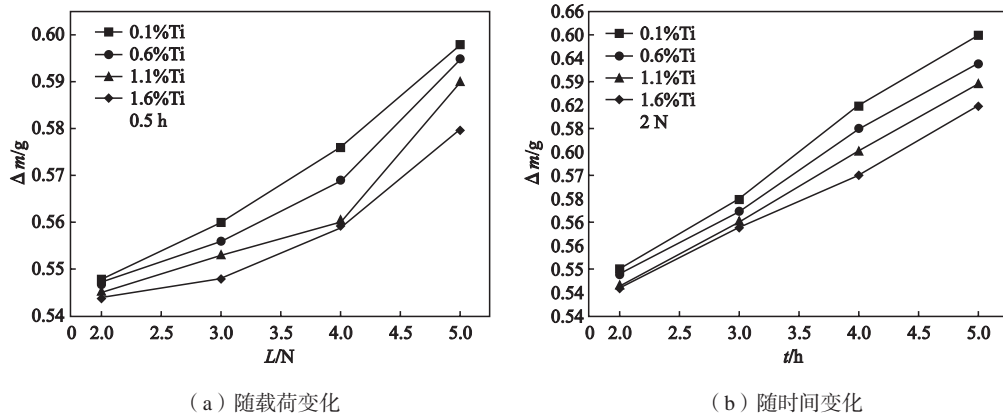


图5 磨损量随钛加入量的变化图

Fig. 5 Effects of titanium content on wear resistance of high chromium cast iron after 1 020 °C quenching and 250 °C tempering treatment

坑，此时虽然基体组织得到了一定程度的细化，但TiC的数量仍然较少，耐磨性能较差。当Ti含量为1.1%时，凿坑明显减少，晶粒的尺寸进一步细化，此时磨损机理将逐渐转化为显微切屑和犁沟变形<sup>[15]</sup>。当Ti含量为1.6%时（图7d），（Cr，Fe）<sub>7</sub>C<sub>3</sub>碳化物明显细化，可以看到凿坑基本消失，有很轻微的划痕存在，说明Ti含量为1.6%时高铬铸铁有着最佳的耐磨性能。

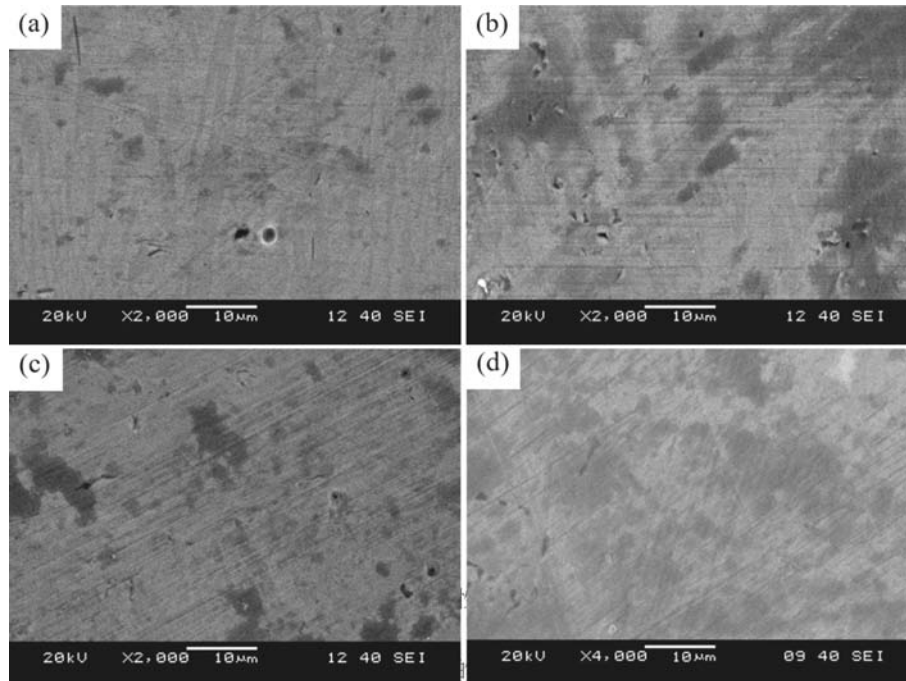


(a) 随载荷变化

(b) 随时间变化

图6 磨损量随载荷以及时间的变化

Fig. 6 Changes of wear loss with load and time



(a) 0.1%; (b) 0.6%; (c) 1.1%; (d) 1.6%

图7 不同钛含量高铬铸铁试样1 020 ℃淬火, 250 ℃回火后的磨损表面形貌

Fig. 7 Images of worn faces of heat treated samples with different amounts of titanium content after 1 020 ℃ quenching and 250 ℃ tempering treatment

### 3 结论

(1) 热处理工艺显著地改善了高铬铸铁的耐磨性能, 最佳的热处理工艺为1 020 ℃保温2 h, 油淬, 再经250 ℃保温4 h, 空冷。

(2) 钛的添加对高铬铸铁的耐磨性能有显著的影响, 形成的TiC对 $(Cr, Fe)_7C_3$ 碳化物有明显的细化作用, 从而提高了高铬铸铁的耐磨性能。但是过多的钛会导致TiC团聚并减少基体组织中的含碳量, 对高铬铸铁的耐磨性能造成负面影响。

(3) 在钛含量为1.6%, 热处理工艺为1 020 ℃淬火, 250 ℃回火时, 试样硬度达到HRC 63, 此时高铬铸铁有着最佳的耐磨性能。

#### 参考文献:

- [1] 王建玲, 孙秀伟, 张洪潮. 合金元素对高铬铸铁耐磨性能的影响 [J]. 热加工工艺, 2016, 45 (20): 42-44.
- [2] 魏世忠, 徐流杰. 钢铁耐磨材料研究进展 [J]. 金属学报, 2020, 56 (4): 523-538.
- [3] 韩凯, 唐香馨, 赵芳. 超高铬白口铸铁优化及应用 [J/OL]. 热加工工艺: 1-4.[2020-06-08].<https://doi.org/10.14158/j.cnki.1001-3814.20191318>.
- [4] 黄鹏, 纪秀林, 吴怀超, 等. 冷却速度对高铬铸铁凝固组织及耐磨性的影响 [J]. 铸造, 2019, 68 (8): 854-859.
- [5] 邓家祥, 郑宝超, 李鹏飞, 等. 新型铸态耐磨蚀高铬铸铁的韧化机制研究 [J]. 铸造, 2019, 68 (8): 832-837.
- [6] 吕刚磊, 刘军, 刘正颖, 等. 添加硼和热处理工艺对高铬白口铸铁组织和性能的影响 [J]. 铸造, 2018, 67 (6): 529-533.
- [7] 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: 153806.
- [8] RAZAQ A, YIN Y, ZHOU J, et al. Influence of alloying elements Sn and Ti on the microstructure and mechanical properties of gray cast iron [J]. Procedia Manufacturing, 2019, 37: 353-359.
- [9] CHUNG R J, TANG X, LI D Y, et al. Effects of titanium addition on microstructure and wear resistance of hypereutectic high chromium cast iron Fe-25wt.%Cr-4wt.%C [J]. Wear, 2009, 267 (1): 356-361.

- [10] 姜吉鹏, 李世波, 胡树郡, 等. 添加TiC对高铬铸铁性能的影响 [J]. 稀有金属材料与工程, 2020, 49 (2): 701-705.
- [11] 闫永旺, 范秀风, 高占勇, 等. 含钛高铬铸铁热处理工艺的研究 [C] //中国机械工程学会. 2012中国铸造活动周论文集. 中国机械工程学会铸造分会, 2012: 354-358.
- [12] WU X, XING J, FU H, et al. Effect of titanium on the morphology of primary  $M_7C_3$  carbides in hypereutectic high chromium white iron [J]. Materials Science and Engineering A, 2007, 457 (1-2): 180-185.
- [13] ZHI X, XING J, FU H, et al. Effect of titanium on the as-cast microstructure of hypereutectic high chromium cast iron[J]. Materials Characterization, 2008, 59 (9): 1221-1226.
- [14] 张艳, 辛伟, 季峰. 钒对高铬铸铁耐磨性能的影响机理研究 [J]. 热加工工艺, 2011, 40 (5): 23-26.
- [15] 刘宇诚. Cr20高铬铸铁的热处理工艺及磨粒磨损研究 [D]. 湖南大学, 2018.

---

## Effect of Titanium Content on Wear Resistance of High Chromium Cast Iron

LIU Su-wei<sup>1</sup>, JI Feng<sup>2</sup>, ZHANG Yan<sup>2</sup>, GUO Yu-hang<sup>2</sup>

(1. Department of Mechanical and Electrical Engineering, Jiangyin Polytechnic College, Jiangyin 214405, Jiangsu, China;  
2. School of Materials Science and Engineering, Jiangsu University of Science and Technology, Zhenjiang 212003, Jiangsu, China)

### Abstract:

The relationships between the hardness, wear resistance and microstructure of high chromium cast irons with 0.1%, 0.6%, 1.1%, 1.6% titanium content were studied. Based on metallographic structure diagram, XRD test, EDS analysis and wear experiment, it was found that the addition of titanium has a significant effect on the wear resistance of high chromium cast iron, and the formed TiC has a significant refinement effect on  $(Cr, Fe)_7C_3$  carbide. However, too much titanium will cause TiC to agglomerate and reduce the carbon content in the matrix structure, which will negatively affect the wear resistance of high-chromium cast iron. When high chromium cast iron containing titanium 1.6% was heat treated at 1 020 °C for 2 h, oil quenching, then tempering at 250 °C for 4 h, air cooling, its hardness was HRC 63 and the wear resistance was optimal.

### Key words:

high chromium cast iron;  $M_7C_3$  carbide; wear resistance; TiC

---