

# TiN纳米陶瓷对ZGMn13微观组织和力学性能影响

张磊磊<sup>1, 2</sup>, 程艳艳<sup>1, 2</sup>, 徐浩博<sup>1, 2</sup>, 郭庆福<sup>1, 2</sup>, 王文焱<sup>3</sup>

1. 中信重工洛阳重铸铁业有限责任公司 河南洛阳 471000

2. 智能矿山重型装备全国重点实验室 河南洛阳 471000

3. 河南科技大学材料科学与工程学院 河南洛阳 471023

**摘要:** 为细化ZGMn13的组织, 并提升其使用效果。采用TiN纳米陶瓷作为添加剂, 以ZGMn13为基体材料, 采用吹氩法制备了添加TiN纳米陶瓷的ZGMn13试样, 并对试样进行了固溶处理; 使用扫描电子显微镜观察了TiN纳米陶瓷对ZGMn13试样微观组织的影响; 使用布氏硬度、冲击和磨粒磨损等试验设备, 对试样的力学性能、摩擦磨损性能进行测试与研究。结果表明: 通过吹氩法加入的TiN纳米陶瓷对ZGMn13的晶粒起到了明显的细化作用, 同时组织中的连续网状碳化物也被明显地分散和隔断。添加TiN纳米陶瓷的ZGMn13试样的冲击吸收能量和硬度均有所提升。在试验条件下, 添加TiN纳米陶瓷的ZGMn13试样的磨损量降低21.1%, 耐磨性明显提高, 摩擦磨损性能得到改善。

**关键词:** TiN纳米陶瓷; 高锰钢; 力学性能; 微观组织

## Effect of nanoceramic TiN on microstructure and mechanical properties of ZGMn13

ZHANG Leilei<sup>1, 2</sup>, CHENG Yanyan<sup>1, 2</sup>, XU Haobo<sup>1, 2</sup>, GUO Qingfu<sup>1, 2</sup>, WANG Wenyan<sup>3</sup>

1. Foundry Branch CITIC Heavy Industries Co., Ltd., Luoyang 471000, Henan, China

2. State Key Laboratory of Intelligent Mining Heavy Equipment, Luoyang 471000, Henan, China

3. School of Materials Science and Engineering, Henan University of Science and Technology, Luoyang 471023, Henan, China

**Abstract:** In order to reduce the risk of heat treatment cracking of ZGMn13 and to enhance its usability. Using TiN nanoceramics as additive and ZGMn13 as matrix material, ZGMn13 samples with nanoceramics were prepared by argon blowing method, and the samples were treated with solid solution. The effect of TiN nanoceramics on the microstructure of ZGMn13 samples was observed using a scanning electron microscope. The mechanical properties, friction and wear properties of the specimens were analyzed using brinell hardness tester, impact tester and abrasive wear tester for the study. The results showed that TiN nanoceramics added by argon blowing method had a significant refining effect on the grain size of ZGMn13, while the continuous reticulated carbides in the structure are obviously dispersed and partitioned. The impact work and hardness of ZGMn13 specimens with added TiN nanoceramic were enhanced. Under the test conditions, the wear amount of ZGMn13 specimens with TiN nanoceramic added was reduced by 21.1%, and the wear resistance was obviously improved, and the wear properties was improved.

**Keywords:** TiN nanoceramic; high manganese steel; mechanical properties; microstructure

## 1 序言

ZGMn13也称为奥氏体锰钢，其显微组织一般由基体（奥氏体）和比基体硬而脆的强化相（碳化物）组成。在较大冲击载荷或接触应力作用下，其工作表面层能够产生加工硬化，从而提高耐磨性，同时心部仍保持较高的塑性和韧性，使ZGMn13具有较好的综合性能，因此广泛应用于制造耐磨工件<sup>[1, 2]</sup>。但ZGMn13的铸态组织往往晶粒粗大，碳化物主要以连续的网状形态沿奥氏体晶界分布，在热处理过程中常因热应力而造成开裂，影响了ZGMn13的生产和应用<sup>[3, 4]</sup>。

纳米陶瓷以其独特的微观结构和出色的性能，在提高材料硬度、抗磨损性、耐蚀性等方面展现出了潜在的优势。将纳米陶瓷引入到钢材的冶炼过程中，通过纳米颗粒的异质形核作用，可以细化晶粒，增加硬质相，强化基体<sup>[5, 6]</sup>。TiN是一种新型陶瓷材料，具有高强度、高硬度和高化学稳定性等特点，是一种性能优异的难熔耐磨材料<sup>[7]</sup>。将纳米陶瓷TiN添加到ZGMn13中，将有望细化ZGMn13组织，降低ZGMn13的开裂风险。

综上所述，本研究采用TiN纳米陶瓷作为添加剂，以ZGMn13为试验材料，采用吹氩加入法制备了添加TiN纳米陶瓷的ZGMn13试样，研究和分析TiN纳米陶瓷在基体组织中的存在形式、对试样组织的影响，以及对ZGMn13力学性能和摩擦磨损性能的影响。

## 2 试验材料和方法

### 2.1 试样制备

本试验所用ZGMn13的化学成分见表1。

表1 ZGMn13的化学成分（质量分数）（%）

| C   | Si  | Mn   | Cr  | P     | S     | Fe |
|-----|-----|------|-----|-------|-------|----|
| 1.3 | 0.4 | 12.8 | 1.6 | 0.056 | 0.040 | 余量 |

ZGMn13试样为随铸试样，与相关产品一起浇注、冷却并进行固溶处理。相关产品出钢温度为1450~1500℃，浇注温度为1380~1435℃。ZGMn13试样实际浇注工艺见表2。其中，1组试样为原始ZGMn13，2组试样在原始ZGMn13试样中加入0.02%（质量分数）的TiN纳米陶瓷。TiN纳米陶瓷粒径为20~50nm，采用吹氩法加入到ZGMn13钢液中。固溶处理工艺见表3。

表2 ZGMn13试样浇注工艺（℃）

| 浇注组别   | 1    | 2    |
|--------|------|------|
| 实测出钢温度 | 1480 | 1480 |
| 实测浇注温度 | 1418 | 1434 |

表3 ZGMn13固溶处理工艺

| 装炉温度 | 升温速率 / (℃/h) | 保温温度 /℃ | 保温时间 / min | 冷却方式 |
|------|--------------|---------|------------|------|
| 常温   | 60           | 1100    | 240        | 水淬   |

### 2.2 测试与表征

将添加纳米粉末前后的试样进行磨制、抛光、腐蚀处理。用JSM-5610LV型扫描电子显微镜观察样品的金相组织。试样硬度使用HB-3000B型布氏硬度试验机测试，压头为 $\phi 10\text{mm}$ 金属球，加载载荷为3000kg（1kg=9.8N），加载时间为30s。在JB-300B冲击试验机上测定材料冲击吸收能量。采用标准的U型缺口冲击试样，其尺寸为55mm×10mm×10mm。磨料磨损试验在MLD-10型动载磨料磨损试验机上进行，冲锤质量为10kg，冲击吸收能量为2J，冲击磨料磨损试样尺寸为40mm×10mm×10mm，对磨试样为45钢，直径50mm，硬度50HRC，转速200r/min，选用60~80目SiO<sub>2</sub>磨料，流速30kg/h，磨损时间为30min。用天平测量试样磨损质量，用于耐磨损性能分析。磨损试验后，用JSM-5610LV型扫描电子显微镜对ZGMn13试样的磨损形貌进行观察，分析探讨其摩擦学性能。

## 3 结果与讨论

### 3.1 显微组织分析

图1所示为ZGMn13的组织形貌（SEM）。图1中，白色基体为奥氏体（箭头A所指），奥氏体晶界上的黑色块状物为碳化物与奥氏体构成的莱氏体（箭头B所指）。对比图1a、b可看出，加入TiN纳米陶瓷后ZGMn13的晶粒明显细化，连续网状碳化物有明显的分散和隔断，基体也得到明显的净化；对比图1c、d也可看出，加入纳米陶瓷TiN能够细化ZGMn13晶粒。对比图1a、c和图1b、d可以看出，经固溶处理后，铸态组织的碳化物基本上都固溶于奥氏体中，形成了单一的奥氏体组织。

### 3.2 力学性能测试

ZGMn13固溶处理前后的冲击性能及硬度检测结果见表4。由表4可看出，添加纳米陶瓷后，铸态试样的冲击吸收能量从10.6J提高到18.1J，固溶处

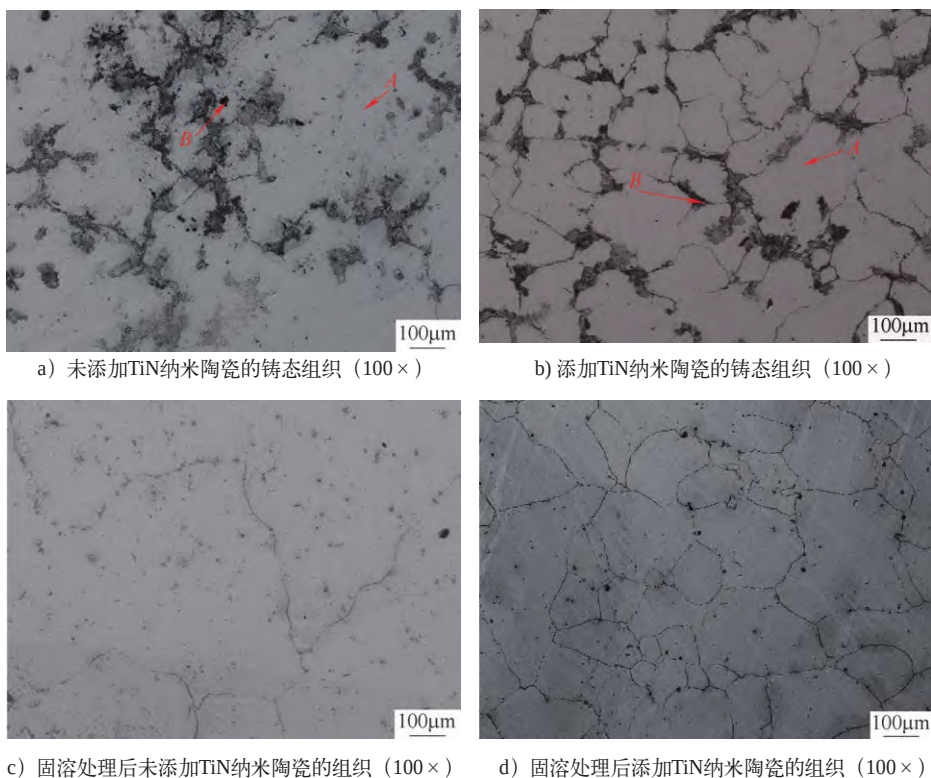


图1 ZGMn13的组织形貌

理后从126.9J提高到141.9J。这是因为加入TiN纳米陶瓷后,试样的晶粒得到细化(见图1)。添加TiN纳米陶瓷后,试样的硬度也略有提高。冲击吸收能量和硬度的提升一方面是由于TiN纳米陶瓷的异质形核作用,细化了晶粒,增加了晶界面积,提高了对位错运动和晶面滑移所需要的能量;另一方面是由于纳米陶瓷颗粒存在于奥氏体中,引起了晶格畸变,钉扎位错,从而起到了强化基体、提高硬度的作用。

表4 ZGMn13的冲击性能及硬度检测结果

| 项目      | 冲击吸收能量/J |       | 布氏硬度HBW |       |
|---------|----------|-------|---------|-------|
|         | 铸态       | 固溶处理后 | 铸态      | 固溶处理后 |
| 未添加纳米陶瓷 | 10.6     | 126.9 | 205     | 192   |
| 添加纳米陶瓷  | 18.1     | 141.9 | 217     | 201   |

### 3.3 摩擦磨损形貌观察与分析

图2所示为ZGMn13试样的磨损形貌。从图2可发现,试样表面都存在许多相互平行的犁沟,说明试样在干磨损条件下都发生了磨料磨损。另外,添加纳米陶瓷后的试样磨损表面的犁沟深度及宽度比未加纳米陶瓷的试样磨损表面的犁沟深度要浅、窄。ZGMn13试样的磨损量见表5。从表5可知,未添加纳米陶瓷的试样的磨损量为0.19g,添加纳米陶

瓷的试样的磨损量为0.15g,说明添加纳米陶瓷的试样耐磨性较好,这与上述力学性能试验结果大致相符。添加TiN纳米陶瓷后,ZGMn13试样的硬度和冲

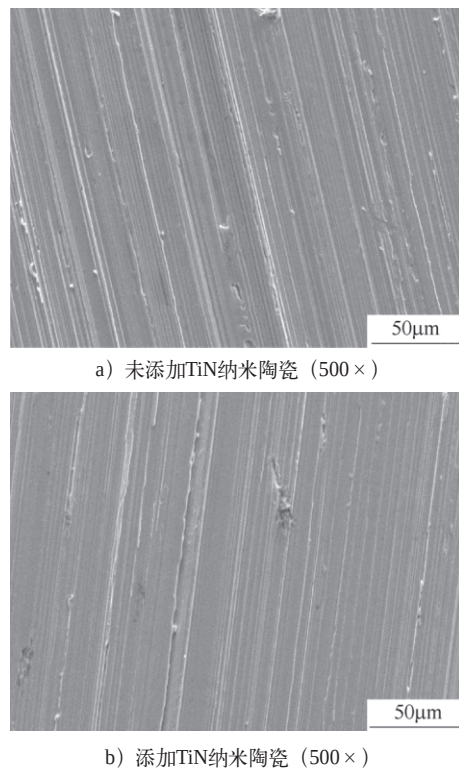


图2 ZGMn13试样磨损形貌

击吸收能量都有提高。较高的硬度能抵抗磨粒侵入试样表面,使得磨痕表面的犁沟较浅;较高的冲击吸收能量可减少裂纹拓展造成的材料脱落,降低试样的磨损量。

表5 ZGMn13试样的磨损量 (g)

| 未添加纳米陶瓷 | 添加纳米陶瓷 |
|---------|--------|
| 0.19    | 0.15   |

#### 4 结束语

综上试验和分析研究,得出以下结论。

1) 加入TiN纳米陶瓷后,铸态和固溶处理后ZGMn13试样的晶粒组织均明显细化。

2) 添加TiN纳米陶瓷后,ZGMn13试样的硬度和冲击吸收能量均有所提升。

3) 添加TiN纳米陶瓷后,ZGMn13试样的磨损量降低了21.1%,摩擦磨损性能得到明显改善。

#### 参考文献:

[1] 曹菊艳,李杨,李志翔.高锰钢铸件生产过程中常

见缺陷分析及相关预防措施[J].金属加工(热加工),2016(5):46-47.

[2] 石帅,赵燕青,高云哲,等.混合稀土La、Ce对铸造高锰钢组织及夹杂物变性的影响[J].铸造,2024,73(5):653-659.

[3] 李文生,路阳.高锰钢铸件的缺陷与对策[J].铸造,2004,53(6):476-478.

[4] 曹菊艳,李志翔.铸造工艺对高锰钢耐磨性的影响[J].金属加工(热加工),2014(23):21-22.

[5] 邱伟男,周东帅,王健,等.纳米TiC颗粒增强Al-Cu-Li基复合材料摩擦磨损性能的研究[J].铸造,2023,72(4):401-408.

[6] 李洪运,任良,乐启炽,等.纳米ZrO<sub>2</sub>颗粒增强Mg-6Zn合金复合材料组织及性能[J].铸造,2022,71(7):862-867.

[7] 于仁红,蒋明学.TiN的性质、用途及其粉末制备技术[J].耐火材料,2005,39(5):386-389.

MW 20240828

(上接第5页)

#### 8 结束语

1) 该大型铝合金齿轮箱采用低压砂型铸造、开放式浇注系统、双升液管等工艺措施,有效地减少了充型过程形成的夹渣、卷气和冷隔等铸造缺陷,同时保证了良好的补缩。

2) 采用MAGMA仿真计算,通过合理设计浇注系统、冷铁和冒口来控制铸件的充型及凝固温度场,保证了箱体的顺序凝固。

3) 对生产中出现的缩孔、缩松和气孔等典型缺陷,进行了工艺优化并成功解决。

4) 通过相关检测,齿轮箱力学性能、X射线检测结果及规格尺寸等均满足技术条件要求。

#### 参考文献:

[1] 陈红圣,徐贵宝,董雯,等.高速动车组铝合金齿轮箱低压铸造工艺研究[J].铸造,2017(1):6-10.

[2] 周斌,龚家林,李富强.高速列车用AlSi7Mg合金的应力腐蚀性能研究[J].轻合金加工技术,2020,48(7):45-47.

[3] 徐贵宝,马俊成,梁超.孔洞缺陷对高铁动车组铝合金齿轮箱疲劳性能的影响[J].失效分析与预防,2021(5):333-338.

[4] 刘振亭,高巍,金耀华,等.铸造铝合金A356.0细节疲劳性能的研究[J].铸造技术,2008(11):1530-1533.

[5] 莫德锋,何国求,胡正飞,等.孔洞对铸造铝合金疲劳性能的影响[J].材料工程,2010(7):92-96

[6] 徐贵宝,周峰,马俊成,等.机车铝合金齿轮箱体选材及低压铸造工艺研究[J].铸造,2014,63(10):987-990.

[7] 穆彦青,肖恭林,杨志刚,等.一种整体式齿轮箱铸造工艺及模具设计研究[J].铸造,2024(1):86-90.

[8] 朱慧明,苏小平.工艺参数对低压铸造铝合金轮毅缩孔形成的影响[J].热加工工艺,2022,51(15):62-64,73.

[9] 董秀琦.低压及差压铸造理论与实践[M].北京:机械工业出版社,2003.

[10] 林枫,叶锦瑞,刘志红,等.铝合金后副车架低压铸造成形工艺设计与试验验证[J].特种铸造与有色合金,2023(9):1225-1229.

MW 20240828