

# 支架用热轧变形高钛钢板 TiC 析出及力学性能分析

苏超杰<sup>1</sup>, 罗志华<sup>1</sup>, 刘圣勇<sup>2</sup>, 张丽强<sup>3</sup>

(1. 河南工业贸易职业学院 汽车工程学院, 河南 郑州 450053; 2. 河南农业大学 机电工程学院, 河南 郑州 450002;  
3. 郑州速达工业机械服务股份有限公司, 河南 郑州 451450)

**摘要:** 选择支架用热轧态真空冶炼高钛钢板作为测试材料, 通过控制轧制变形程度获得特定结构的马氏体组织, 对比了不同轧制变形程度下的钢材组织形貌和 TiC 析出相变化, 同时测试了钢材的力学性能变化。研究表明: 逐渐增大热轧变形量后, 得到了更细小的晶粒, 并且形成了宽度尺寸更小的马氏体板条束; 形成的 TiC 颗粒尺寸更加均匀且显著缩小, 并实现充分碎化且分布均匀; 形成了比例更大、粒径不超过  $\Phi 15$  nm 的 TiC 颗粒, 奥氏体的变形程度也明显增大, 生成了更细小的纳米 TiC 颗粒; 试样获得了更高的拉伸强度与屈服强度, 形成了更大的非均匀伸长率, 均匀伸长率则保持恒定, 试样的冲击性能也呈现增大趋势。

**关键词:** 高钛钢; 热轧变形量; TiC 析出相; 力学性能; 强化机理

**DOI:** 10.13330/j.issn.1000-3940.2023.08.017

**中图分类号:** TG142 **文献标志码:** A **文章编号:** 1000-3940 (2023) 08-0118-07

## TiC precipitation and analysis on mechanical properties of hot rolled deformation high titanium steel plate for support

Su Chaojie<sup>1</sup>, Luo Zhihua<sup>1</sup>, Liu Shengyong<sup>2</sup>, Zhang Liqiang<sup>3</sup>

(1. School of Automotive Engineering, Henan Vocational College of Industry and Trade, Zhengzhou 450053, China;  
2. College of Mechanical and Electrical Engineering, Henan Agricultural University, Zhengzhou 450002, China;  
3. Zhengzhou Suda Industrial Machinery Service Co., Ltd., Zhengzhou 451450, China)

**Abstract:** The hot-rolled vacuum-smelted high titanium steel plate for support was selected as the test material, and the martensitic structure with a specific structure was obtained by controlling the degree of rolling deformation degree. Then, the microstructure and TiC precipitated phase changes of the steel under different rolling deformation degrees were compared, and the changes of mechanical properties of the steel were tested at the same time. The research results show that after gradually increasing the hot rolling deformation amount, the finer grains are obtained, and the martensite lath bundles with smaller width dimensions are formed; the sizes of TiC particles are more uniform and significantly reduced, and the TiC particles are fully fragmented and uniformly distributed; a larger proportion of TiC particles with a particle size of no more than  $\Phi 15$  nm is formed, and the degree of austenite deformation also increases significantly, forming finer nano-TiC particles; the specimen reaches higher tensile strength and yield strength, forms a larger non-uniform elongation, while the uniform elongation remains constant, and the impact performance of specimen also shows an increasing trend.

**Key words:** high titanium steel; hot rolling deformation amount; TiC precipitated phase; mechanical properties; strengthening mechanism

随着支架用材料的技术进步, 传统形式的高锰钢、高铬铸铁已无法满足某些特殊领域的应用需求, 而低合金马氏体钢由于具备工艺可控、成本低以及

良好的综合力学性能等优点获得大量应用<sup>[1-2]</sup>。但对低合金马氏体钢进行性能改善方面主要通过提升钢基体的碳含量以生成更高硬度的马氏体来实现, 而这种方式则会造成机械加工难度增加, 且降低了焊接性能, 最终限制了高硬度钢在工业领域的推广。根据以上分析可知, 如何确保获得高硬度以及在保持良好加工性能的条件下增强力学性能, 成为了现阶段进行高性能钢开发的一项重要研究内容<sup>[3-5]</sup>。

近些年来, 已有许多学者通过在合金基体内添

收稿日期: 2022-09-28; 修订日期: 2022-12-24

基金项目: 河南省高等学校重点科研项目 (22A470005); 河南省基础与前沿技术研究计划项目 (162300410158)

作者简介: 苏超杰 (1981-), 男, 硕士, 副教授

E-mail: su321xing@126.com

加第二相颗粒的方式来制备高强钢<sup>[6-8]</sup>。根据文献[9]可知,以钛含量介于 0.20%~0.80% 之间的高钛微合金与铸坯通过原位内生方法将超硬 TiC 颗粒分散于钢基体组织内,能够在保持硬度基本恒定的状态下提升力学性能。相对常规结构的钛微合金钢,新型结构高钛钢中具备更高比例的 Ti,由此生成“微米-亚微米-纳米”三峰结构的 TiC 颗粒;微米级 TiC 颗粒主要是在凝固阶段中的 L →  $\gamma$ +TiC 共晶过程中生成的,亚微米 TiC 颗粒则来自凝固阶段中高温奥氏体的组织转变过程,更小尺寸的纳米级 TiC 颗粒是在热轧阶段经形变诱导的过程从奥氏体内析出的<sup>[10]</sup>。还有学者<sup>[11]</sup>通过对钢材的力学性能进行研究,发现钢材组织力学性能的提升与钢基体内微米级颗粒对组织产生阻碍的过程紧密关联,但更小尺寸的亚微米或纳米级颗粒则无法对沟槽发挥同样的作用。考虑到大尺寸微米级 TiC 颗粒具备很大的硬度,可以达到 3200 HV,无法在析出相与基体界面部位发生均匀变形而引起基体裂纹的产生;此外,TiC 颗粒受自身物理特性的影响,与基体组织存在差异较大的热膨胀系数,因此,会在两者间形成镶嵌载荷作用,引起 TiC 颗粒断裂,随着裂纹的持续扩展,最终基体断裂<sup>[12]</sup>。文献[13]显示,当在钢基体内加入更大尺寸的夹杂颗粒后,这些颗粒物和基体组织界面间将形成更大的应力,经过热轧变形可促使钢材基体内的 TiC 颗粒碎化,从而生成更细小以及尺寸更加均匀的 TiC 颗粒,最终实现钢材韧塑性的明显提升。但到目前为止,针对高钛钢的研究基本均是从 Ti 含量与钢板力学性能的角度出发,尚未有文献研究轧制变形程度对钢材力学性能的影响。

本文选择 Ti 的质量分数为 0.55% 的低合金马氏体钢作为测试材料,通过控制轧制变形程度以及轧后热处理工艺获得特定结构的全马氏体组织,对比了不同轧制变形程度下的钢材组织形貌和 TiC 析出相变化,同时测试了以上参数引起的力学性能变化,重点探讨了高钛钢的强化作用机制以及轧制变形程度对试样结构与力学性能的作用。

## 1 实验方法

本实验采用的高钛钢试样各元素组成(%,质量分数)为:C 0.29, Mn 0.52, Si 0.27, Ti 0.58, Ni 0.58, Cr 0.81, B 0.0013, Mo 0.26, P 0.003, Al 0.022, S 0.006, 余量为 Fe。本次在冶炼过程所

使用的设备为 150 kg 的真空冶炼炉,通过浇铸的方式得到尺寸为 100 mm×120 mm×90 mm 的铸锭,之后经不同程度的轧制变形获得特定厚度的钢板。图 1 为高钛钢轧制与热处理的具体工艺流程,对应的热轧变形量如表 1 所示。轧制处理前,首先把铸锭放入箱式电阻炉内升温至 1200 °C 并持续保温 2 h,轧制初始温度为 1100~1150 °C,最终温度为 835~855 °C。根据表 1 给出的 5 种工艺参数实施轧制,经不同变形程度的轧制处理形成相应厚度的钢板,表 1 记录了各道次轧制得到的钢板厚度的实际测试数据,控制热轧变形量从 3.0% 增大至 15.0%,2 道次后以 850 °C 等温轧制,以水淬方式降至室温。将经过热轧处理的钢板放入电阻炉内升温至 900 °C 使其达到完全奥氏体化的程度,经过 0.5 h 的保温处理后再以水淬方式降至室温以保留完整的马氏体结构,之后再以 250 °C 回火 0.5 h。

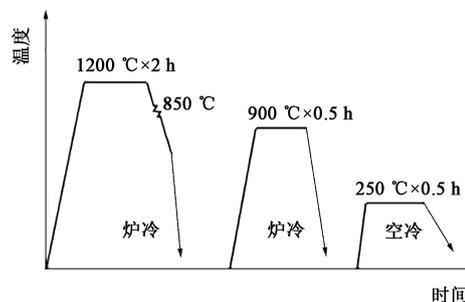


图 1 高钛钢轧制+热处理工艺图

Fig. 1 Process diagram of rolling+heat treatment for high titanium steel

表 1 高钛钢热轧变形量设置和对应厚度

Table 1 Setting of hot rolling deformation amount and corresponding thickness for high titanium steel

| 方案      | 1    | 2    | 3    | 4    | 5    |
|---------|------|------|------|------|------|
| 热轧变形量/% | 3.0  | 5.0  | 7.5  | 10.0 | 15.0 |
| 对应厚度/mm | 6.18 | 4.45 | 4.06 | 3.45 | 2.23 |

选择初始铸锭作为 TiC 析出金相试样进行微观结构表征。金相试样观察设备为 VTM1510 型光学显微镜 (Optical Microscopy, OM),同时利用自带的能谱仪表征了试样的元素含量分布。利用 HT7700 型透射电子显微镜 (Transmission Electron Microscope, TEM) 表征了 TiC 颗粒的微观形貌,同时以配备 TecnaiG2-F30 高分辨透射电镜观察了钢基体内的第二相微观形貌与颗粒结构。采用 HST10-D50 型拉伸测试机对试样开展了拉伸测试,同时利用 HB-7036D 型冲击测试机进行了试样的冲击测试,拉伸和冲击试样尺寸如图 2 所示。

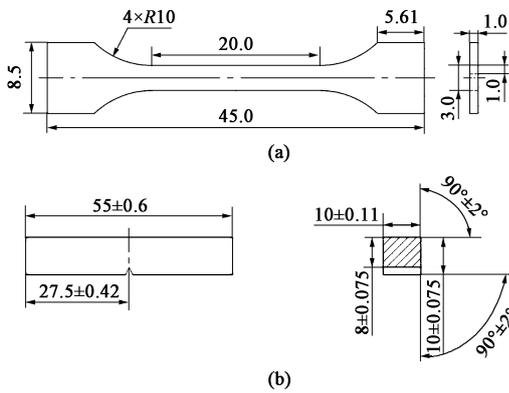


图 2 拉伸试样 (a) 和冲击试样 (b) 尺寸

Fig. 2 Sizes of tensile sample (a) and impact sample (b)

根据相分析结果分析高钛钢的第二相粒子成分。对抛光试样进行电解处理获得残渣, 利用 DX-2700 型 X 射线衍射仪表征了残渣物的相结构, 同时利用 HK-8800 等离子发射光谱仪测定了试样的元素含量

组成情况, 最后, 以小角度 X 射线散射法 (Small Angle X-ray Scattering, SAXS) 测定了第二相颗粒的粒径尺寸参数。

## 2 实验结果

### 2.1 基体组织

图 3 为各热轧变形量下形成的奥氏体晶粒的显微组织图像。根据金相统计结果可知, 热轧变形量分别为 3.0%、5.0%、7.5%、10.0% 和 15.0% 条件下的奥氏体晶粒尺寸依次为 8.2、6.4、5.2、4.8 和 3.4  $\mu\text{m}$ 。逐渐增大热轧变形量后, 形成了更细小的奥氏体晶粒, 通过对比发现, 热轧变形量为 15.0% 的奥氏体晶粒比热轧变形量为 3.0% 的缩小了近 50%, 并且形成了宽度尺寸更小的马氏体板条束。晶粒发生细化转变是由于提高热轧变形量后会提高形核率, 从而得到更细小的晶粒<sup>[14]</sup>。

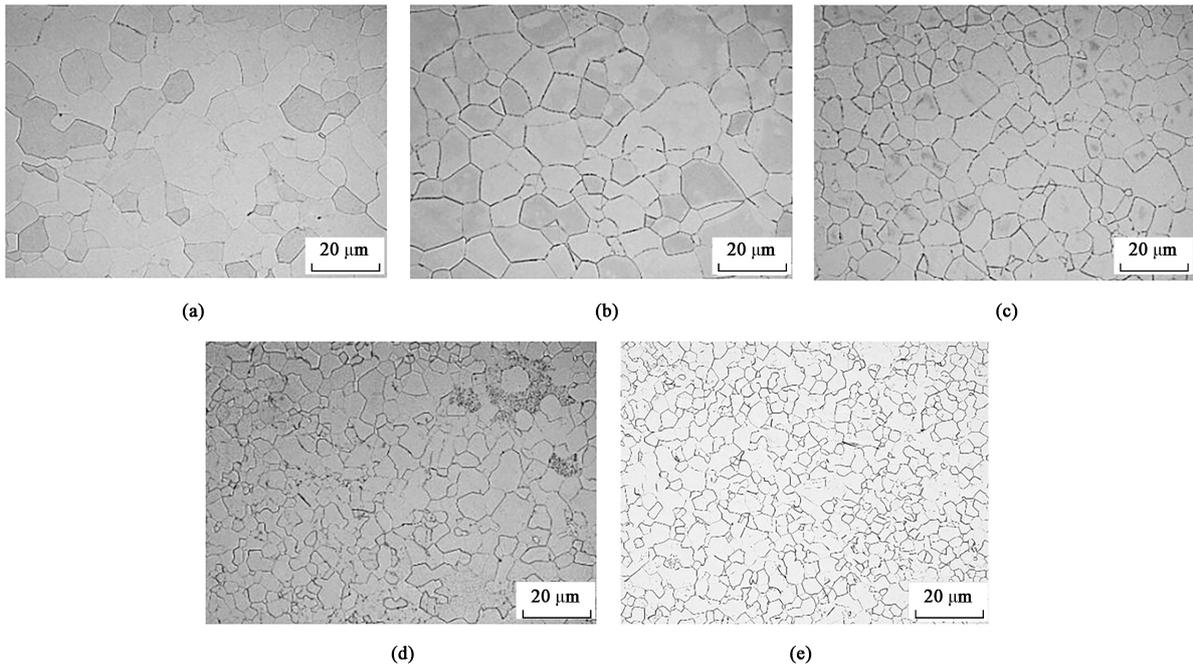


图 3 不同热轧变形量下高钛钢奥氏体晶粒的 OM 图像

(a) 3.0% (b) 5.0% (c) 7.5% (d) 10.0% (e) 15.0%

Fig. 3 OM images of austenitic grain in high titanium steel under different hot rolling deformation amounts

### 2.2 TiC 析出相

为消除基体组织因素对析出相观察结果的影响, 对不同热轧变形量试样的微观形貌进行了表征, 如图 4 所示。利用 ImageJ 软件并根据等积圆面积统计粒径尺寸超过  $\Phi 0.30 \text{ nm}$  的 TiC 析出相, 结果如表 2 所示。以热轧变形量为 3.0% 进行轧制后, 形成了更均匀分布的 TiC 颗粒, 但此时依然可以观察到原铸态结构的网状形貌, 形成了大颗粒 TiC, 直径均

值为  $\Phi 2.96 \text{ nm}$ , TiC 颗粒的最大粒径为  $\Phi 11.68 \text{ nm}$ , 上述轧制条件未能对 TiC 颗粒起到充分碎化作用。增大轧制热轧变形量后, 形成了大小更均匀的 TiC 颗粒, 同时颗粒尺寸也显著缩小。热轧变形量为 15.0% 的试样中的 TiC 颗粒保持均匀分布的状态, 颗粒直径均值降低至  $\Phi 2.28 \text{ nm}$ , 此时颗粒的最大粒径也减小为  $\Phi 8.23 \text{ nm}$ , 采用上述热轧变形量可以使 TiC 颗粒实现充分碎化并均匀分布。

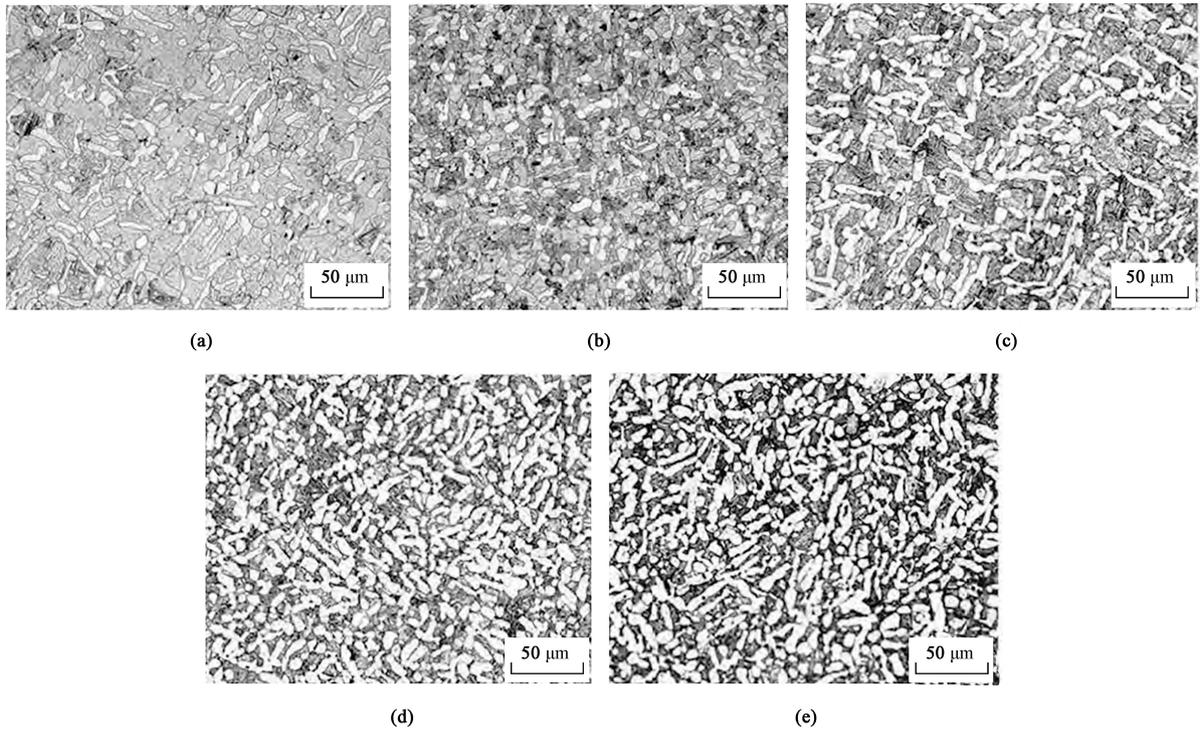


图 4 不同热轧变形量下高钛钢中 TiC 析出相的 OM 图像

(a) 3.0% (b) 5.0% (c) 7.5% (d) 10.0% (e) 15.0%

Fig. 4 OM images of TiC precipitated phase in high titanium steel under different hot rolling deformation amounts

表 2 高钛钢中 TiC 析出相金相统计结果

Table 2 Metallurgical statistical results of TiC precipitated phase in high titanium steel

| 热轧变形量/<br>% | 体积分数/<br>% | 平均面积/<br>nm <sup>2</sup> | 平均直径/<br>nm | 最大直径/<br>nm | 纵横比  |
|-------------|------------|--------------------------|-------------|-------------|------|
| 3.0         | 1.32       | 9.62                     | Φ2.96       | Φ11.68      | 3.06 |
| 5.0         | 1.28       | 8.46                     | Φ2.47       | Φ10.86      | 2.61 |
| 7.5         | 1.26       | 8.22                     | Φ2.41       | Φ9.47       | 2.18 |
| 10.0        | 1.27       | 7.68                     | Φ2.33       | Φ8.86       | 1.98 |
| 15.0        | 1.31       | 7.48                     | Φ2.28       | Φ8.23       | 1.92 |

图 5 为不同热轧变形量下高钛钢的 TiC 析出相的 TEM 图像。通过观察发现，本次轧制得到的试样中均存在近球形析出颗粒，这些颗粒的粒径介于 Φ3~Φ50 nm 之间。图 5a 显示，热轧变形量为 3.0% 的试样的 TiC 析出相粒径通常为几十纳米，大部分粒径均在 Φ5~Φ10 nm 之间，增大热轧变形量后，产生了更多 Φ5~Φ10 nm 粒径范围的 TiC 析出相。图 5 中纳米级 TiC 析出物来自轧制阶段的形变诱导过程。

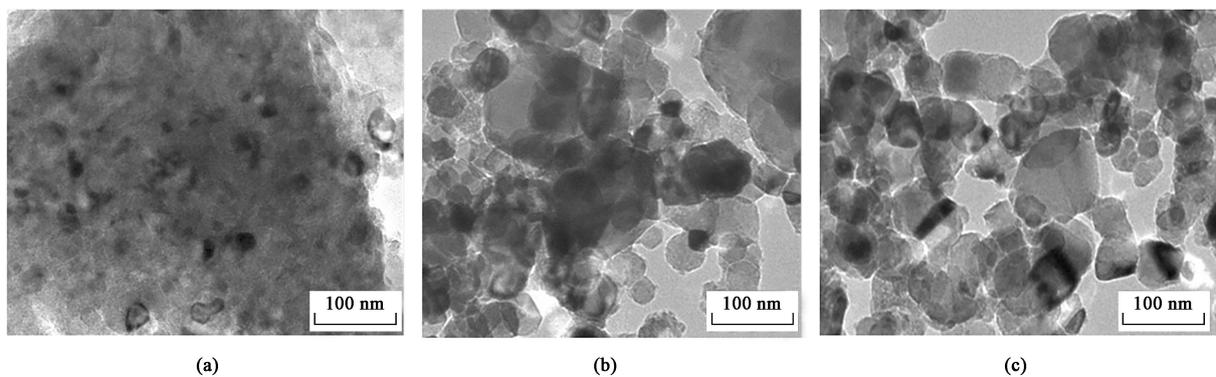


图 5 不同热轧变形量下高钛钢中 TiC 析出相的 TEM 像

(a) 3.0% (b) 7.5% (c) 15.0%

Fig. 5 TEM images of TiC precipitated phase in high titanium steel under different hot rolling deformation amounts

图 6a~图 6c 分别为热轧变形量为 7.5% 时高钛钢中 TiC 析出相的高倍透射电子显微镜 (Transmission Electron Microscope, TEM) 像、选区电子衍射 (Selected Area Electron Diffraction, SAED) 谱以及能量色散光谱仪 (Energy Dispersive Spectrometry, EDS) 测试结果。对粒径接近  $\Phi 10$  nm 的析出相进行高分辨电镜表征, 通过分析热轧变形量为 7.5%

的试样的析出相的 SAED 谱与 EDS 结果可知, 其析出相是一种 NaCl 构型的 (Ti, Mo) C, TiC 析出阶段, Mo 原子将会扩散至 TiC 晶格点阵处并与 Ti 原子发生替换, 由此获得了复合结构的 (Ti, Mo) C 析出相<sup>[15]</sup>。检测过程中碳膜被覆盖于 Cu 网表面, 因此, 实际测试形成的能谱 (图 6c) 中可以观察到明显的 Cu 特征峰。

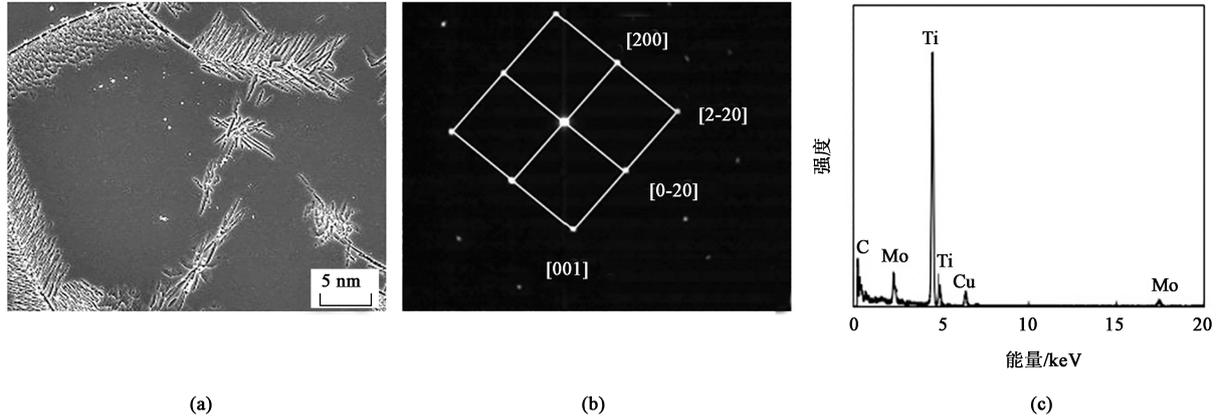


图 6 热轧变形量为 7.5% 时高钛钢中 TiC 析出相的高倍 TEM 像 (a)、SAED 谱 (b) 和 EDS 结果 (c)

Fig. 6 High-magnification TEM image (a), SAED spectrum (b) and EDS result (c) of TiC precipitated phase in high titanium steel with hot rolling deformation amount of 7.5%

图 7 为不同热轧变形量试样热处理后得到的物相粒径尺寸, 仅统计直径不超过  $\Phi 300$  nm 的颗粒, 可以发现, 逐渐增大热轧变形量后, 形成了比例更大的粒径不超过  $\Phi 15$  nm 的颗粒。高钛钢在轧制阶段发生形变诱导后生成了许多纳米级的 TiC 颗粒, 提高热轧变形量后, 奥氏体变形程度也明显增大, 形成了更多的位错缺陷, 进一步增加了 TiC 颗粒的形核点, 增大了形核速率, 由此生成了更细小的纳米 TiC 颗粒。

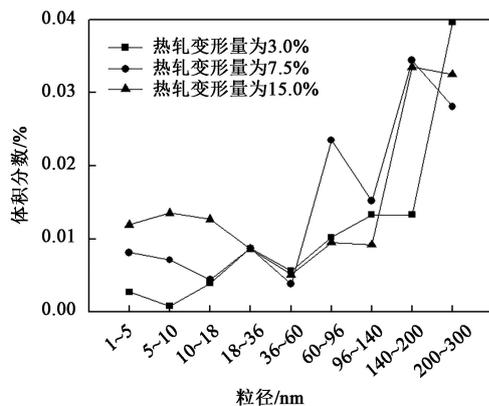


图 7 不同热轧变形量下高钛钢中 TiC 析出相的粒径分布

Fig. 7 Particle size distribution of TiC precipitated phase in high titanium steel under different hot rolling deformation amounts

### 2.3 力学性能

图 8 为高钛钢拉伸与冲击测试结果, 图 8a 为不同热轧变形量试样的强度分布, 可以发现, 随着热轧变形量的增大, 试样达到了更高的拉伸强度与屈服强度, 由热轧变形量为 3.0% 时试样的 1210 与 1440 MPa 增大至热轧变形量为 15.0% 时试样的 1320 与 1485 MPa。这是由于: 基体内析出更高含量的纳米级 TiC 颗粒后, 可以达到更高的晶界强化与沉淀强化效果<sup>[16]</sup>。图 8b 为高钛钢伸长率与热轧变形量的关系曲线, 此时, 总伸长率也与热轧变形量之间保持正相关的变化规律, 从热轧变形量为 3.0% 时的 7.2% 增大至热轧变形量为 15.0% 时的 9.8%。总伸长率包括均匀变形和非均匀变形两个变化阶段, 提高热轧变形量后, 形成了更大的非均匀伸长率, 但此时均匀伸长率保持基本恒定。图 8c 为夏比冲击能与热轧变形量的关系曲线, 图 8c 显示, 提高热轧变形量后, 试样的冲击性能也呈现持续增大的趋势。

## 3 结论

(1) 逐渐增大热轧变形量后晶粒发生细化转变是由于提高热轧变形量后会提高形核率, 从而得到更细小的晶粒, 并且形成了宽度尺寸更小的马氏体

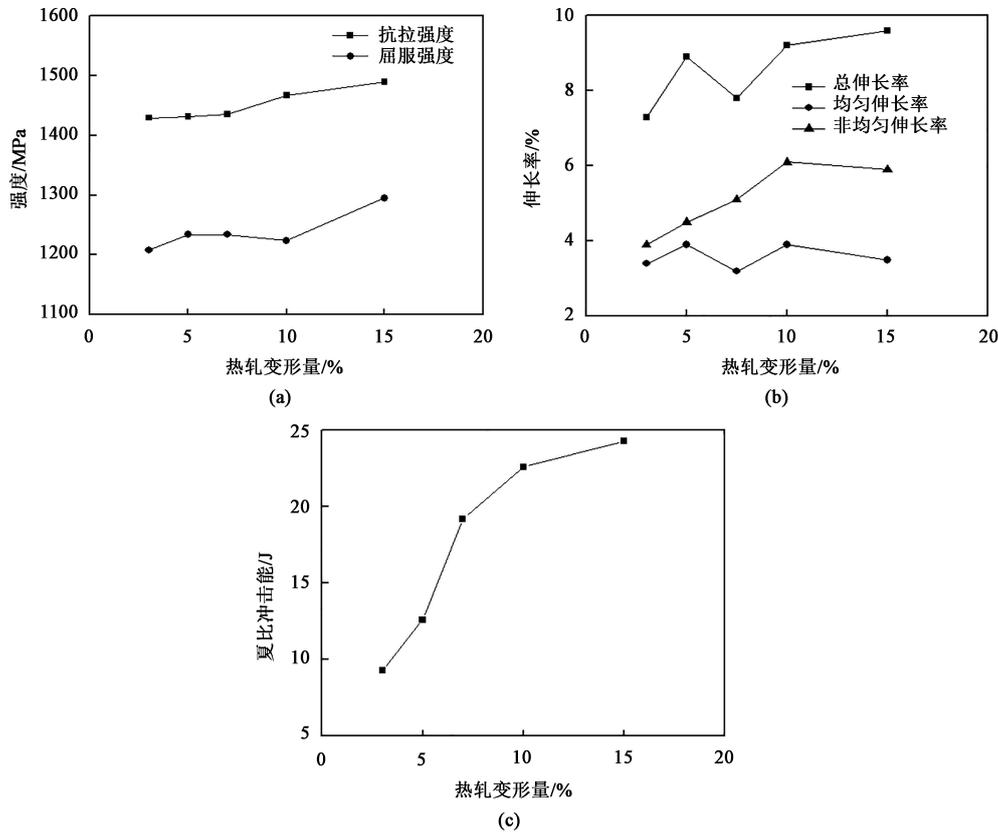


图 8 不同热轧变形量下高钛钢的力学性能

(a) 力学强度 (b) 伸长率 (c) 夏比冲击能

Fig. 8 Mechanical properties of high titanium steel under different hot rolling deformation amounts

(a) Mechanical strengths (b) Elongations (c) Charpy impact energy

板条束。

(2) 增大轧制热轧变形量后, 形成了大小更均匀的 TiC 颗粒, 且颗粒尺寸显著缩小, 使 TiC 颗粒实现了充分碎化并形成了均匀分布颗粒。轧制试样中均存在析出粒径尺寸介于  $\Phi 3 \sim \Phi 50$  nm 的近球形颗粒。逐渐增大热轧变形量后, 形成了比例更大的粒径不超过  $\Phi 15$  nm 颗粒, 奥氏体变形程度明显增大, 生成了更细小的纳米 TiC 颗粒。

(3) 随着热轧变形量增大, 试样获得了更高的抗拉强度与屈服强度; 形成了更大的非均匀伸长率, 但均匀伸长率则保持恒定; 试样冲击性能也呈现增大的趋势。

#### 参考文献:

- [1] 管弦, 唐国华. 悬吊支架法施工钢混组合梁的力学行为研究 [J]. 公路交通科技, 2022, 39 (10): 84-90.  
Guan X, Tang G H. Study on mechanical behavior of steel-concrete composite girders constructed by suspension bracing method [J]. Journal of Highway and Transportation Research and Development, 2022, 39 (10): 84-90.
- [2] 吴丽丽, 于雅倩, 胡存川. 圆形断面波形钢腹板支架结构稳定承载性能研究 [J]. 采矿与安全工程学报, 2020, 37 (3):

481-489.

Wu L L, Yu Y Q, Hu C C. Stability capacity of circular steel supporting structure with corrugated webs [J]. Journal of Mining & Safety Engineering, 2020, 37 (3): 481-489.

- [3] Zhang K, Yong Q L, Sun X J, et al. Effect of tempering temperature on microstructure and mechanical properties of high Ti microalloyed directly quenched high strength steel [J]. Acta Metall. Sin., 2014, 50 (8): 913-920.
- [4] 周成, 叶其斌, 田勇, 等. 超高强度结构钢的研究及发展 [J]. 材料热处理学报, 2021, 42 (1): 14-23.  
Zhou C, Ye Q B, Tian Y, et al. Research and application progress of ultra-high strength structural steel [J]. Journal of Materials and Heat Treatment, 2021, 42 (1): 14-23.
- [5] 赵艳君, 孟庆雪, 马本莉, 等. 高强高韧低合金马氏体钢的静态软化行为 [J]. 机械工程材料, 2017, 41 (4): 24-28.  
Zhao Y J, Meng Q X, Ma B L, et al. Static softening behavior of a high-strength and high-toughness low-alloy martensite steel [J]. Materials for Mechanical Engineering, 2017, 41 (4): 24-28.
- [6] 陈小虎, 李守华, 曹晓恩, 等. 汽车用低合金高强钢 HC500LA 连续退火工艺 [J]. 材料热处理学报, 2021, 42 (4): 132-137.  
Chen X H, Li S H, Cao X E, et al. Continuous annealing process of low alloy high strength steel HC500LA for automobile [J]. Transactions of Materials and Heat Treatment, 2021, 42 (4):

- 132-137.
- [7] Ni Z F, Sun Y S, Xue F, et al. Evaluation of electroslag remelting in TiC particle reinforced 304 stainless steel [J]. *Materials Science and Engineering: A*, 2011, 528 (18): 5664-5669.
- [8] 李媛媛, 甄维静, 李永亮, 等. 钙镁复合变质剂对冷轧高强度组织遗传性及塑性影响 [J]. *钢铁钒钛*, 2021, 42 (1): 119-125.
- Li Y Y, Zhen W J, Li Y L, et al. Effect of Ca-Mg compound modifier on microstructure and plasticity in cold-rolled high strength steel [J]. *Iron Steel Vanadium Titanium*, 2021, 42 (1): 119-125.
- [9] 刘罗锦. 高钛高钢中 TiC 析出行为及对性能的影响 [D]. 北京: 钢铁研究总院, 2019.
- Liu L J. TiC Precipitation Behavior and Its Effect on Properties in High Titanium and High Wear-resistant Steels [D]. Beijing: Central Iron & Steel Research Institute, 2019.
- [10] 孙新军, 刘罗锦, 梁小凯, 等. 高钛钢中 TiC 析出行为及其对耐磨粒磨损性能的影响 [J]. *金属学报*, 2020, 56 (4): 661-672.
- Sun X J, Liu L J, Liang X K, et al. TiC precipitation behavior and its effect on abrasion resistance of high titanium wear-resistant steel [J]. *Acta Metall. Sin.*, 2020, 56 (4): 661-672.
- [11] Liu L J, Liang X K, Liu J, et al. Precipitation process of TiC in low alloy martensitic steel and its effect on wear resistance [J]. *ISIJ Int.*, 2020, 60 (1): 168-174.
- [12] 杨跃标, 李宗强, 邓深, 等. 热轧钛微合金化高强度低温冲击韧性的控制 [J]. *钢铁*, 2021, 56 (3): 41-50.
- Yang Y B, Li Z Q, Deng S, et al. Low temperature impact toughness controlling for Ti-microalloyed high strength steel [J]. *Iron and Steel*, 2021, 56 (3): 41-50.
- [13] 杭子迪, 冯运莉, 崔岩, 等. 高 Ti 微合金高强度钢静态再结晶动力学模型 [J]. *钢铁钒钛*, 2020, 41 (1): 141-146.
- Hang Z D, Feng Y L, Cui Y, et al. Mathematical modeling of the recrystallization kinetics of high Ti microalloyed high strength steel [J]. *Iron Steel Vanadium Titanium*, 2020, 41 (1): 141-146.
- [14] 梁文, 吴润, 胡俊, 等. 加热工艺对 Nb-Ti 微合金化高强度钢的影响 [J]. *中南大学学报: 自然科学版*, 2019, 50 (9): 2063-2073.
- Liang W, Wu R, Hu J, et al. Effect of heating process on Nb-Ti microalloyed high strength steel [J]. *Journal of Central South University: Science and Technology*, 2019, 50 (9): 2063-2073.
- [15] 杨庚蔚, 陆佳伟, 孙辉, 等. Ti-V 微合金化热轧高强度钢的相变规律及组织性能 [J]. *钢铁研究学报*, 2019, 31 (8): 726-732.
- Yang G W, Lu J W, Sun H, et al. Microstructure, mechanical properties and phase transformation behavior of Ti-V microalloyed high-strength hot-strip steel [J]. *Journal of Iron and Steel Research*, 2019, 31 (8): 726-732.
- [16] 李成刚, 周晓光, 蒋小冬, 等. 冷却工艺对 Ti 微合金化高强度组织和硬度的影响 [J]. *钢铁研究学报*, 2021, 33 (9): 987-993.
- Li C G, Zhou X G, Jiang X D, et al. Influence of cooling processes on microstructure and hardness of Ti micro-alloyed high strength steel [J]. *Journal of Iron and Steel Research*, 2021, 33 (9): 987-993.

(上接第 71 页)

- [3] Jang M J, Choi H S, Lee S H, et al. Design of half blanking process for reducing rollover and stress acting on tools in forming of lower tooth [J]. *Transactions of Materials Processing*, 2011, 20 (3): 214-221.
- [4] 张明浩. 行星齿轮式汽车座椅调角器精冲工艺研究 [D]. 长春: 吉林大学, 2014.
- Zhang M H. The Research of Planetary Gear Type Car Seats Illustrates Fine Blanking Process [D]. Changchun: Jilin University, 2014.
- [5] 叶超. 行星齿轮式汽车座椅调角器精冲成形工艺研究及模具 CAE/CAD [D]. 长春: 吉林大学, 2016.
- Ye C. Fine Blanking Forming Process Study of Planetary Gear Type Car Seat Recliner and Die CAE/CAD [D]. Changchun: Jilin University, 2016.
- [6] Chen Z H, Chan L C, Lee T C, et al. An investigation on the formation and propagation of shear band in fine-blanking process [J]. *Journal of Materials Processing Technology*, 2003, 138 (1-3): 610-614.
- [7] 公冶凡娇. 带凸台板件的精冲—挤压复合成形工艺研究 [D]. 重庆: 重庆理工大学, 2018.
- Gongye F J. Forming Process Research for Combined Fine-blanking and Extrusion on Sheet Metal Parts with Boss [D]. Chongqing: Chongqing University of Technology, 2018.
- [8] Hirota K, Michitsuji K. Deformation behavior in boss forming with small punch/die diameter ratio [J]. *Journal of Materials Processing Technology*, 2015, 216: 294-301.
- [9] Gachet J M, Delattre G, Bouchard P O. Improved fracture criterion to chain forming stage and in use mechanical strength computations of metallic parts—Application to half-blanked components [J]. *Journal of Materials Processing Technology*, 2015, 216: 260-277.
- [10] Hiên B V, Kim S M, Kim H Y, et al. Numerical analysis of parameters affecting formability in micro half blanking using thin sheet metal [A]. *Proceedings of the Korean Society of Precision Engineering Conference* [C]. Gyeongju, 2007.
- [11] 韩金辉, 王建伟. 基于 GTN 模型的汽车座椅调角器失效分析 [J]. *机械强度*, 2019, 41 (2): 473-477.
- Han J H, Wang J W. Failure analysis of auto seat backrest adjuster based on GTN model [J]. *Journal of Mechanical Strength*, 2019, 41 (2): 473-477.
- [12] 郑启德. 304 不锈钢中厚板热辅助精冲成形及材料塑性变形行为研究 [D]. 上海: 上海交通大学, 2021.
- Zheng Q D. Research on Forming Mechanism of Heat-assisted Fine-blanking Process and Plastic Deformation Behavior of 304 Stainless Steel Plate [D]. Shanghai: Shanghai Jiao Tong University, 2021.