

# 奥氏体化温度对 40CrMoVTiNb 钢组织和力学性能的影响

孙永真, 程巨强, 安镜逸

(西安工业大学材料与化工学院, 陕西西安 710021)

**摘要:** 用硬度-温度法测定了试验材料的相变温度, 研究了不同奥氏体化温度对40CrMoVTiNb钢组织和力学性能的影响。研究表明, 40CrMoVTiNb钢的相变温度 $A_{C1}$ 为700~710 °C、 $A_{C3}$ 为820 °C。40CrMoVTiNb钢820 °C以下温度加热时, 随着奥氏体化温度提高, 试验材料淬火态的硬度升高, 淬火温度为820 °C时, 淬火态硬度最高, HRC为56.3。试验材料780 °C淬火加热时综合性能最佳, 抗拉强度为1 120 MPa, 伸长率为18%, 断面收缩率为61.9%, 冲击功 $A_{KV}$ 为107.3 J, 组织为回火索氏体和少量铁素体。

**关键词:** 奥氏体化温度; 40CrMoVTiNb钢; 相变温度; 组织; 力学性能

AISI4140或42CrMo是一种中碳低合金结构钢, 调质处理后具有较高的强韧性, 广泛应用于矿山、油田、海洋机械等领域<sup>[1-4]</sup>。对于AISI4140钢, 研究回火温度对其组织和力学性能文献较多, 研究淬火奥氏体化加热温度对其组织和力学性能文献并不多见<sup>[5-10]</sup>, 但奥氏体化加热温度会影响材料的组织和力学性能, 改变材料的强韧性。40CrMoVTiNb钢是在AISI4140钢的基础上通过微合金化而形成的中碳调质钢, 为了确定最佳奥氏体化加热温度对其组织和力学性能的影响, 本文研究了不同的奥氏体化温度对40CrMoVTiNb调质钢组织和力学性能的影响, 以期为40CrMoVTiNb钢的应用奠定基础。

## 1 试验材料及方法

试验用钢的牌号为40CrMoVTiNb, 其化学成分(质量分数)为: 0.40% C、0.90% Mn、1.00% Cr、0.22% Mo、0.03% V、0.06% Nb、0.03% Ti。试验材料的生产过程为采用电炉熔炼+真空处理(VD), 铸成钢锭。然后钢锭加热进行锻造, 力学性能检验试块锻造加工成尺寸为101 mm × 101 mm × 203 mm方料块, 线切割加工为10 mm × 10 mm × 55 mm带V型缺口冲击试样, 缺口深度为2 mm。拉伸试样线切割成 $\Phi 10$  mm × 110 mm圆棒料, 然后进行机械加工, 加工成为 $\Phi 8$  mm的标准短拉伸试样。40CrMoVTiNb钢的热处理加热温度由测得的 $A_{C3}$ 温度确定淬火加热温度分别为740、760、780、800、820、840、860、900、920、940 °C, 冷却介质为20号机油; 拉伸实验在DDL300万能试验机上进行。冲击实验在JBD-300型摆锤式冲击试验机进行实验。硬度的测试使用HR-150A型洛氏硬度计进行测试, 组织腐蚀液为4%的硝酸酒精溶液。用NIKON ERHOT-300型光学金相显微镜观察试样的金相组织。在QuantaFEG400型场发射扫描电子显微镜观察冲击断口形貌。

## 2 试验结果及分析

### 2.1 试验材料相变温度的测定

相变温度是轧制、锻造及热处理工艺参数制定的重要依据, 40CrMoVTiNb属于

作者简介:

孙永真(1997-), 男, 硕士研究生, 主要研究方向为高强度钢铁材料研究与应用。E-mail: 2195318475@qq.com

通讯作者:

程巨强, 男, 教授。E-mail: chengjuqiang@163.com

中图分类号: TG141.2

文献标识码: A

文章编号: 1001-4977(2023)

02-0135-05

收稿日期:

2022-04-08 收到初稿,

2022-05-15 收到修订稿。

中碳低合金调质钢，其相变温度需要根据材料的具体化学成分来确定。测定钢的相变温度的方法主要有金相法、热分析法、热膨胀法、末端淬火法、磁性法等<sup>[1]</sup>，本文采用温度-硬度法测量40CrMoVTiNb钢的相变温度，温度-硬度法原理为随着钢的加热温度的升高，达到 $A_{C1}$ 温度后组织中会有奥氏体组织的形成，随加热温度升高，奥氏体组织的含量增加，淬火后马氏体组织的含量增加，材料的硬度也会增加，当加热温度到达奥氏体完全转变温度 $A_{C3}$ 时，淬火后组织全部转变为马氏体组织，硬度达到最高值，之后随加热温度的升高，硬度不变，从温度-硬度曲线的拐点中可以达到 $A_{C1}$ 及 $A_{C3}$ 值。图1是不同的温度加热淬火后硬度随温度的变化曲线。从图1可以看出，40CrMoVTiNb钢的奥氏体转变开始温度( $A_{C1}$ )在700~710℃，奥氏体转变结束温度( $A_{C3}$ )为820℃。

## 2.2 奥氏体化温度对试验钢淬火后力学性能的影响

图2是不同奥氏体化温度加热淬火及淬火+550℃回火硬度的变化曲线。图2a是不同温度加热淬火态的硬度变化曲线。可以看出，820℃以下加热时，材料硬度值随加热温度的升高而升高，当淬火温度为820℃时，试验材料的硬度达到最大，为HRC 56.3。820℃至

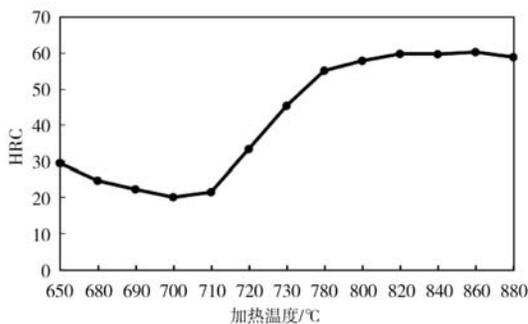
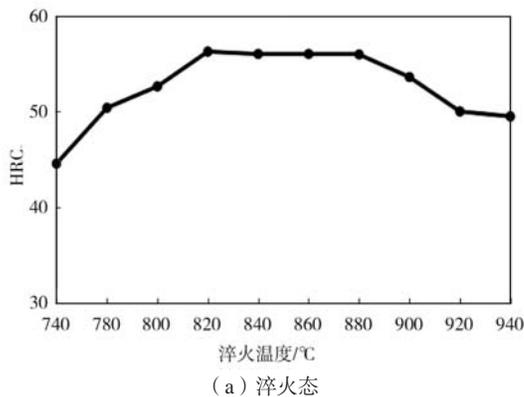


图1 硬度-温度法测得试验材料淬火后硬度随加热温度的变化  
Fig. 1 The hardnesses of experimental materials after quenching with the heating temperature measured by Hardness-temperature method

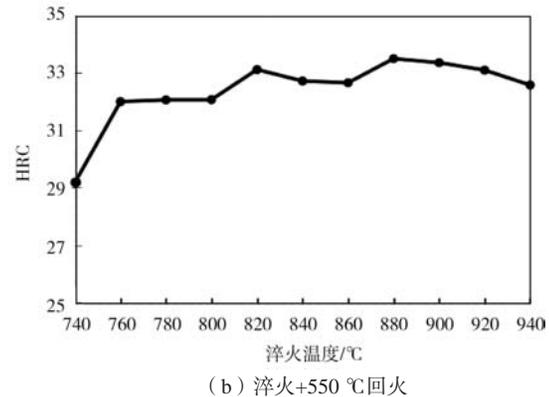


(a) 淬火态

880℃加热淬火时，试验材料的硬度值变化不大。加热温度超过880℃时，淬火马氏体组织粗化，组织中的残余奥氏体量增加，造成硬度降低。图2b是不同温度加热淬火+550℃回火材料硬度变化曲线。可以看出，不同温度加热淬火+550℃回火，试验材料的硬度随淬火温度升高而升高，硬度变化范围为HRC 29~33。出现这种变化的原因是740℃淬火组织中存在较多的铁素体组织，铁素体组织硬度低，随着加热温度的提高，铁素体含量减少，回火后的主要组织变为回火索氏体，使得硬度上升。

图3为40CrMoVTiNb钢不同奥氏体化加热油冷+550℃回火后的力学性能试验结果。从抗拉强度随淬火加热温度的变化曲线(图3a)可以看出，淬火温度从740℃提高到760℃时，抗拉强度由940 MPa增加到1150 MPa，之后随加热温度上升，抗拉强度变化幅度不大， $R_m$ 值在1090~1140 MPa变化。从伸长率随淬火加热温度变化曲线(图3b)可以看出，淬火加热温度小于800℃时，伸长率随加热温度升高而增大，加热温度为800℃时达到峰值，为18.7%；当淬火温度超过800℃后，伸长率出现下降。试验材料的断面收缩率在淬火温度为780℃时最大，为61.9%(图3c)。淬火温度为780℃时，冲击功最大，为107.3 J(图3d)。当加热温度超过780℃淬火后，试验材料冲击值有下降的趋势，900℃加热淬火，材料韧性最低，缺口冲击功为80.1 J，仍保持较高值。

试验材料力学性能出现变化的原因是，在740℃到820℃加热属于亚温淬火，这一过程中，随加热温度的升高，原始组织不断向奥氏体发生转变，由于亚温淬火温度相对较低，钢的晶粒长大倾向较小，淬火组织晶粒也很细小，以及亚温淬火组织中存在一定量的铁素体会阻止奥氏体组织长大，因此淬火高温回火后，材料的强度、塑性指标及冲击值较高。加热温度到达 $A_{C3}$ 温度以后，组织完全奥氏体化，淬火后高温回火，其抗拉强度变化幅度不大，但是当温度继续升高



(b) 淬火+550℃回火

图2 不同奥氏体化温度淬火及550℃回火试验材料硬度的变化曲线

Fig. 2 Change curves of hardness of the experimental materials with austenitizing temperature quenching and 550℃ tempering

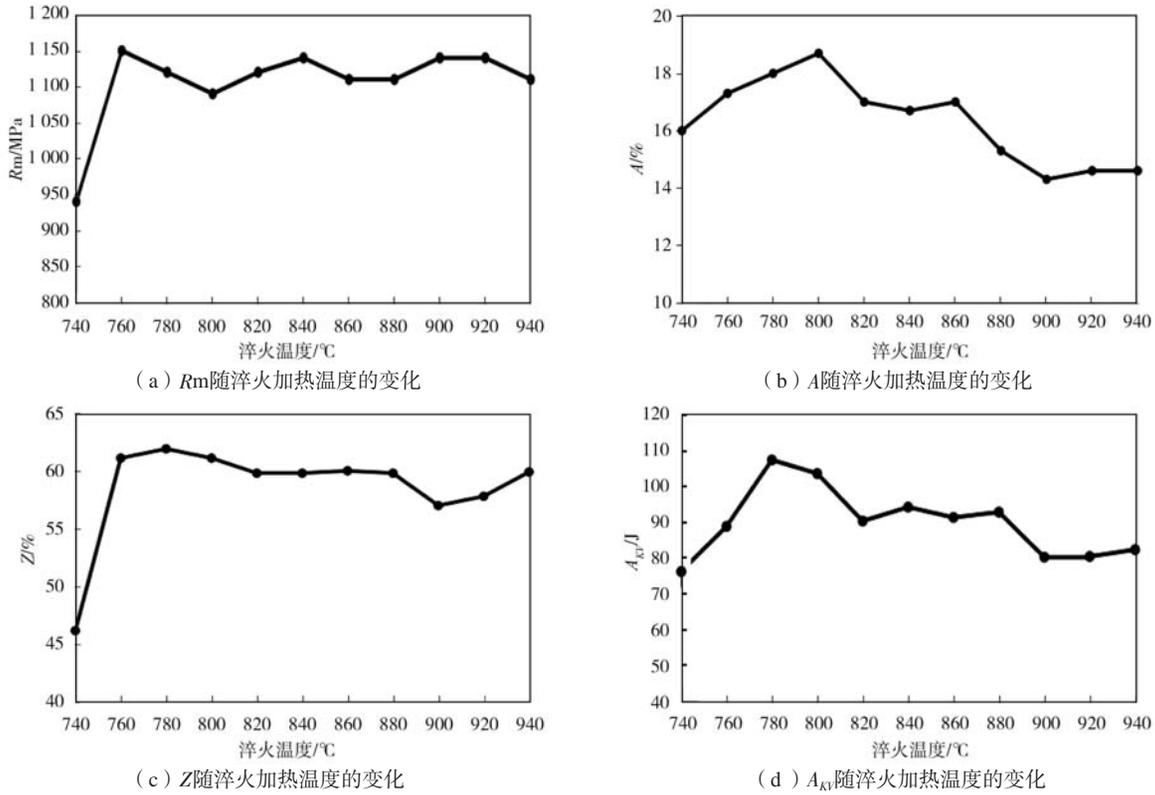


图3 40CrMoVTi钢力学性能随淬火加热温度的变化

Fig. 3 Changes of mechanical properties of the 40CrMoVTi steel with quenching heating temperature

时，过高的加热温度使得材料组织及晶粒逐渐粗大，抗拉强度及其塑性指标下降。从强韧性配合来看，40CrMoVTiNb钢最佳淬火加热温度为780℃。780℃加热淬火550℃回火，获得的力学性能指标为抗拉强度1120 MPa、伸长率18%、断面收缩率为61.9%、缺口

冲击功 ( $A_{KV}$ ) 107.3 J。

### 2.3 不同加热温度淬火、550℃回火的组织

图4分别为不同温度奥氏体化加热油冷+550℃高温回火后的显微组织。图4a为40CrMoVTiNb钢740℃加

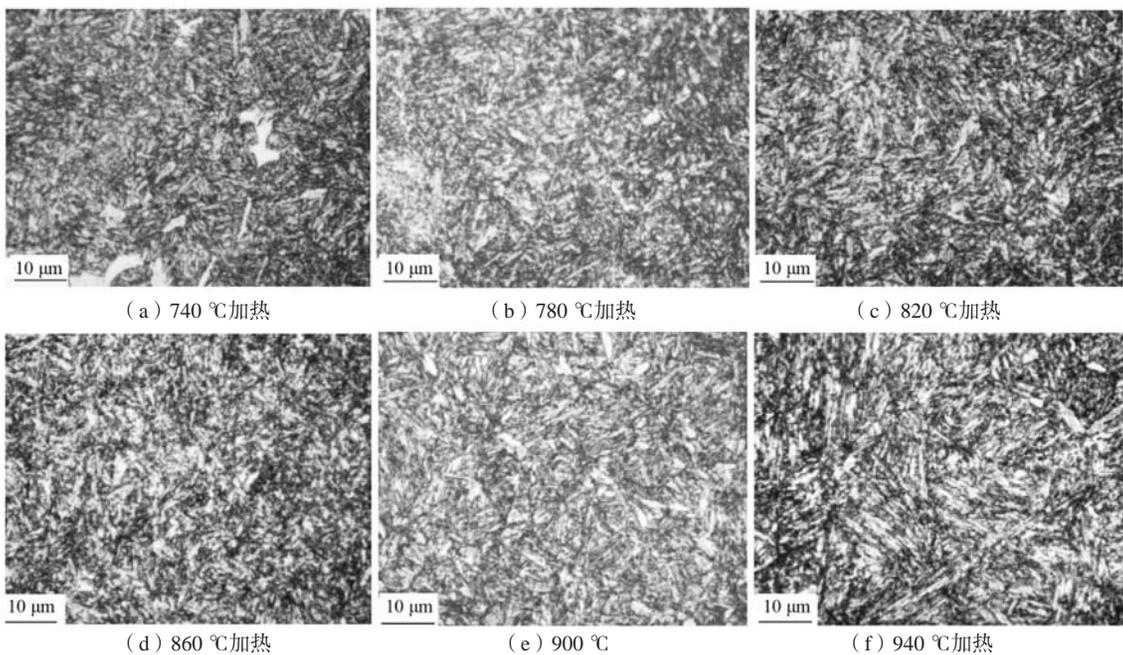


图4 不同温度加热淬火+550℃回火试验材料的微观组织

Fig. 4 Microstructures of the materials after quenching at different temperatures and tempering at +550℃

热油冷 + 550 °C 回火的组织, 可以看出, 740 °C 加热淬火试验材料的组织为铁素体+索氏体组织, 铁素体的存在是由于740 °C 加热温度属于亚温加热淬火, 组织存在尚未发生奥氏体转变的铁素体组织, 呈白色的块状, 分布在晶界。748 °C 加热油冷 + 550 °C 回火的组织 (图4b), 为索氏体+少量的小粒状铁素体, 与740 °C 加热淬火回火组织比较, 块状铁素体明显减少。淬火温度继续增加, 820 °C 淬火回火时 (图4c), 铁素体完全转变为奥氏体, 550 °C 高温回火时, 淬火组织基体会发生分解, 基体会弥散析出碳化物粒状分布, 形成回火索氏体组织。淬火温度为860 °C 高温回火时 (图4d), 由于淬火加热温度高于 $A_{C3}$ 温度, 淬火高温回火组织为回火索氏体。当奥氏体化温度增加到900 °C (图4e) 及940 °C 时, 由于奥氏体化温度过高, 淬火后板条马氏体粗大, 与860 °C 以下加热淬火组织相比, 所形成的回火索氏体组织晶粒粗大, 部分回火索氏体保持着粗板条马氏体 (图4f)。

## 2.4 试验钢冲击断口形貌分析

图5、图6分别为780 °C和860 °C加热后油冷的冲击试样断口形貌及微观扫描电镜。图5a、图6a的宏观断

口主要分为三个区: A为缺口纤维区、B放射区与C剪切唇区。可以看出, 40CrMoVTiNb钢经780 °C与860 °C加热淬火, 550 °C高温回火处理后, 其冲击断口的宏观断口形貌出现较多的剪切唇, 为典型的韧性断裂, 且在780 °C时, 冲击试样的剪切唇要比在860 °C淬火的剪切唇多, 这说明, 当奥氏体化温度为780 °C淬火时, 40CrMoVTiNb钢的韧性要优于860 °C淬火。

图5b、图5c、图5d分别为780 °C加热油冷550 °C回火冲击试样断口缺口纤维区、裂纹扩展区、剪切唇区的扫描电镜断口形貌。可以看出, 冲击断口各区断裂特征主要为韧窝, 存在较多塑性变形的痕迹, 说明韧性较高。图6b、图6c、图6d分别860 °C加热油冷550 °C回火冲击试样断口各区的形貌。与图5中断口形貌相似, 各区断口上存在大量的韧窝及塑性变形撕裂棱, 因此, 780 °C及860 °C淬火后高温回火, 40CrMoVTiNb钢的主要断裂机理为韧窝断裂。从断口还可以看出, 780 °C的淬火回火断口较深, 韧窝的数量要多于860 °C的, 韧窝中存在第二相, 围绕第二相颗粒韧窝在断裂过程发生较大的塑性变形, 这也说明40CrMoVTiNb钢780 °C淬火高温回火的韧性要好于860 °C加热淬火高温回火的韧性。

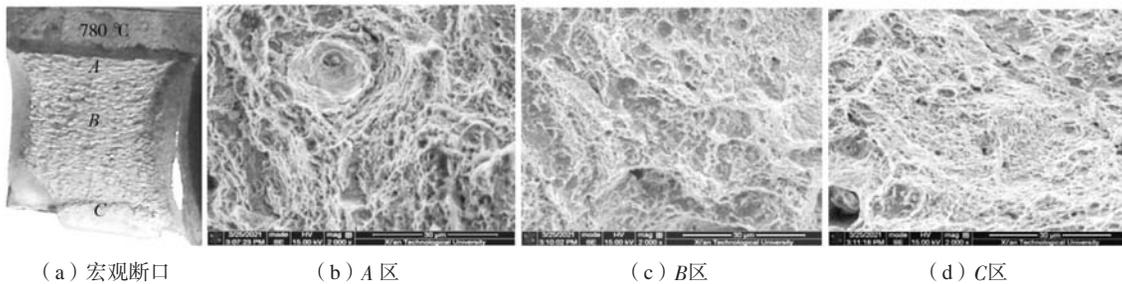


图5 780 °C加热油冷550 °C回火试验材料冲击断口SEM照片

Fig. 5 SEM images of the tempered impact fracture of the materials with heated oil at 780 °C and cooled at 550 °C

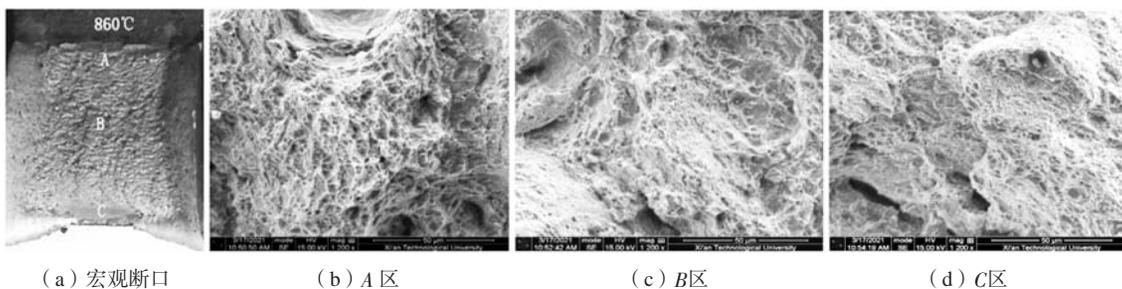


图6 860 °C加热油冷550 °C回火试验材料冲击断口SEM照片

Fig. 6 SEM images of tempered impact fracture of the materials with oil heated at 860 °C and cooled at 550 °C

## 3 结论

(1) 采用硬度-温度法测定了40CrMoVTi钢的相变温度, 得到40CrMoVTi钢的 $A_{C1}$ 为700~710 °C,  $A_{C3}$ 为820 °C。

(2) 40CrMoVTi钢780 °C淬火后550 °C回火时有

着优良的综合力学性能, 获得的抗拉强度为1 120 MPa, 伸长率为18%, 断面收缩为61.9%, 冲击功为107.3 J, 组织为回火索氏体和少量铁素体, 冲击试样断口特征主要为韧窝形貌, 为韧窝断裂机制。

## 参考文献:

- [1] MIAN M B, KHURRAM Y, MOHAMMAD H Z. Effect of austempering conditions on the microstructure and mechanical properties of AISI 4340 and AISI 4140 steels [J]. Journal of Materials Research and Technology, 2019, 8 ( 6 ) . 5194–5200.
- [2] 郭建良, 程巨强, 麻以林. 水-空冷热处理贝氏体钢液冷时间对其组织性能的影响 [J]. 铸造技术, 2021, 42 ( 3 ) : 216–219.
- [3] 刘建宇. 深海锻件AISI 4140钢热处理工艺优化及性能研究 [D]. 天津: 天津理工大学, 2020.
- [4] 郭建良, 程巨强, 麻以林. 冷却工艺对高强度贝氏体钢组织和性能的影响 [J]. 铸造技术, 2021, 42 ( 6 ) : 509–512.
- [5] 贺欢, 于海涛. 回火温度对AISI4140钢力学性能的影响 [J]. 锻造与冲压, 2020 ( 21 ) : 79–82.
- [6] 李晴, 程巨强. 回火温度对无碳化物贝氏体钢组织和性能的影响 [J]. 铸造, 2019, 68 ( 8 ) : 844–847.
- [7] 杨敏. 回火温度对42CrMo钢相组织及力学性能的影响 [J]. 现代冶金, 2019, 47 ( 1 ) : 4–5.
- [8] 陈俊丹. 回火温度对42CrMo钢冲击韧性的影响 [J]. 金属学报, 2012, 48 ( 10 ) : 1186–1193.
- [9] 窦强将. 回火温度对42CrMo钢超高周疲劳行为的影响 [J]. 现代冶金, 2018, 46 ( 06 ) : 1–4.
- [10] 张度宝, 回火温度对42CrMo高强度力学性能及应力腐蚀敏感性的影响 [J]. 材料导报, 2021, 35 ( 16 ) : 16133–16137.
- [11] 林慧国, 傅代直. 钢的奥氏体转变曲线-原理、测试与应用 [M]. 北京: 机械工业出版社, 1988.

---

## Effect of Austenitizing Temperature on Microstructure and Mechanical Properties of 40CrMoVTiNb Steel

SUN Yong-zhen, CHENG Ju-qiang, AN Jing-yi

(College of Materials Science and chemical Engineering, Xi'an Technological University, Xi'an 710021, Shaanxi, China)

**Abstract:**

The effect of different austenitizing temperatures on the microstructure and mechanical properties of 40CrMoVTiNb steel was studied. The results showed that the phase transition temperature  $A_{C1}$  of the 40CrMoVTiNb steel was 700-710 °C and  $A_{C3}$  was 820 °C. When the 40CrMoVTiNb steel was heated below 820 °C, the hardness of quenched state increased with the increase of the austenitizing temperature. When the quenched temperature was 820 °C, the hardness of quenched state was the highest, and the HRC was 56.3. When heated and quenched at 780 °C, the material had the best comprehensive properties, including tensile strength of 1 120 MPa, elongation of 18%, section shrinkage of 61.9%, impact energy ( $A_{KV}$ ) of 107.3 J, and the microstructure was composed of tempered sox-austenite and a small amount of ferrite.

**Key words:**

austenitizing temperature; 40CrMoVNbTi steel; phase-transition temperature; microstructure; mechanical properties