

Nb、V 对 X80 热煨弯管用钢组织与性能的影响

安 涛^{1,2}, 刘文月^{1,2}, 李天怡^{1,2}, 臧 岩^{1,2}, 李江文^{1,2}, 孙美慧^{1,2}

(1. 海洋装备用金属材料及其应用国家重点实验室, 辽宁 鞍山 114009; 2. 鞍钢集团北京研究院有限公司, 北京 102200)

摘 要: 设计在 X80 热煨弯管用钢中添加不同含量的微合金元素 Nb、V, 并采用 OM、SEM、TEM 进行试样微观组织和析出相的观察, 利用拉伸试验机和冲击试验机进行力学性能的测试, 应用 Thermo-calc 软件进行试验钢热力学计算。结果表明: 减少试验钢中的 Nb 或 V 含量后, 试验钢的固溶强化分量降低; 纳米析出相的体积分数增加, 平均直径减小, 试验钢的析出强化分量提高; 细晶强化分量相差不大, 最终试验钢的屈服强度和抗拉强度降低, 而试验钢在 -20 °C 的冲击功显著提高。研究证实, 添加约 0.02%Nb、0.04%V 元素有助于改善 X80 热煨弯管用钢材料的强韧性匹配。

关键词: 热煨弯管; Nb、V 复合微合金化; 微观组织; 力学性能; 析出相

中图分类号: TF76, TG142

文献标志码: A

文章编号: 1004-7638(2025)01-0178-06

DOI: 10.7513/j.issn.1004-7638.2025.01.025

开放科学 (资源服务) 标识码 (OSID):



听
语
音
与
作
者
互
动
聊
科
研

Effect of Nb and V on the microstructures and properties of X80 hot pipe steel

AN Tao^{1,2}, LIU Wenyue^{1,2}, LI Tianyi^{1,2}, ZANG Yan^{1,2}, LI Jiangwen^{1,2}, SUN Meihui^{1,2}

(1. State Key Laboratory of Metal Materials for Marine Equipment and Application, Anshan 114009, Liaoning, China;

2. Ansteel Beijing Research Institute Co., Ltd., Beijing 102200, China)

Abstract: In this study, different contents of micro-alloying elements Nb and V were added to X80 pipeline steel. OM, SEM and TEM were used to observe the microstructures and precipitates. Tensile tests and Charpy tests were conducted to obtain the mechanical properties. Thermo-calc software was used for phase transformation calculation. The results showed that after reducing the Nb or V contents in the tested steel, the ratio of solid solution strengthening of the steel decreased; the volume fractions of the nano precipitates increased; the average diameters of the nano precipitates decreased; the ratio of precipitation strengthening of the tested steel increased; and the ratio of grain refinement strengthening of the steel was not obvious. Finally the strength of the tested steel was reduced, while the impact energy at -20 °C was significantly increased. This research has confirmed that adding appropriate amounts of 0.02%Nb and 0.04%V elements can improve the strength and toughness matching of materials.

Key words: hot heat bending pipe, Nb, V composite microalloying, microstructure, mechanical properties, precipitates

收稿日期: 2023-09-17

作者简介: 安涛, 1995 年出生, 女, 山西临汾人, 工程师, 硕士研究生, 主要从事中厚板原型钢微观组织表征研究, E-mail: AnTao202372@outlook.com。

0 引言

20 世纪以来,天然气和石油等资源的需求日益增加,这对长输管线提出了耐高压、厚管壁、大口径的要求。其中,在长输管线铺设的过程中,需要大量与干线管道配套的弯管。热煨弯管以其质量可靠、适用性强、生产效率高等优势,被广泛应用于各类管道的建设中。然而,由于服役过程中结构特殊性以及复杂的受力条件,使得热煨弯管成为管道事故的多发部位,其综合性能直接影响到管道质量和管道运行安全^[1]。目前,热煨弯管大多数通过感应加热+回火的调质工艺弯制而成,需要精确控制热加工工艺保证弯管的性能^[2]。

微合金化是管线钢常用的关键技术^[3]。常用的微合金元素为 Nb、Ti,通过和 C、N 元素结合形成纳米碳化物。对于以 TMCP 工艺生产的管线钢来说,碳氮化铌和碳氮化钛在轧制前就已析出,通过阻碍晶粒长大、为奥氏体-铁素体提供形核位点、拓宽奥氏体非再结晶区轧制工艺窗口等方式来同时提高材料的强度与低温韧性^[4-5]。此外,弥散分布的纳米

碳化物能够起到沉淀强化的作用;当它们存在于晶界上也有助于抑制裂纹扩展,从而提高钢的韧性。

一般来说,V 很少用于管线钢生产中,因为碳氮化钒的析出温度在 600 ℃ 左右,在 TMCP 工艺生产的管线钢中难以析出。然而,热煨弯管用管线钢在制管时会经过回火,这有助于 V 的析出和提高管线钢强度^[6-7]。目前,对热煨管线主要研究集中在热处理工艺上,针对 Nb、V 复合微合金化对于管线钢的组织性能的影响研究较少。笔者利用 SEM、TEM 等试验设备和热动力学计算探究 Nb、V 微合金元素复合添加对于 X80 热煨弯管钢显微组织和力学性能的影响,旨在为 X80 热煨弯管钢的强韧性设计提供成分参考。

1 试验材料和方法

试验钢采用真空感应炉冶炼,浇铸成 80 kg 铸锭,其化学成分如表 1 所示。根据 Nb、V 添加量分别命名为 06Nb1V 试验钢、02Nb1V 试验钢、06Nb04V 试验钢。钢板的热处理工艺如表 2 所示。

表 1 试验钢化学成分
Table 1 Chemical compositions of three tested steels

试验钢	C	Si	Mn+Cr+Mo	Ni+Cu	Ti	Nb	V	Al	Fe
06Nb1V	0.07	0.25	2.2	0.3	0.03	0.06	0.1	0.03	Bal.
02Nb1V	0.07	0.25	2.2	0.3	0.03	0.02	0.1	0.03	Bal.
06Nb04V	0.07	0.25	2.2	0.3	0.03	0.06	0.04	0.03	Bal.

表 2 试验钢的生产工艺参数
Table 2 Production process parameters of the investigated steels

奥氏体化温度/℃	奥氏体化时间/min	冷却方式	回火温度/℃	回火时间/min
950	40	水冷	600	60

按照 GB/T 228.1—2010《金属材料拉伸试验第 1 部分: 室温试验方法》与 GB/T 229—2007《金属材料夏比摆锤冲击试验方法》对试验钢进行室温拉伸和-20 ℃ 冲击试验。对试样进行打磨、抛光后,用 4% 硝酸酒精腐蚀,并用金相显微镜观察其微观组织。将试样进行电解抛光后,应用场发射扫描电镜进行背散射衍射(Electron Backscatter Diffraction, EBSD)测试。将试样进行电解双喷后,应用 FEI Talos F200i 型透射电子显微镜(Transmission Electron Microscope, TEM)观察微观组织。将试样表面进行喷碳,深腐蚀后制备萃取复型碳膜,然后利用透射电镜对析出相进行表征。采用 McCall-Boyd 法计算析出相的体积分数^[8],如式(1)所示。

$$f = \frac{1.4\pi}{6} \times \frac{Nd^2}{A} \quad (1)$$

式中, N 为试场中析出相的数量, d 为析出相的平均直径, A 为被统计视场的面积。利用 Thermo-calc 软件计算试验钢热力学平衡相的变化。

2 试验结果与讨论

2.1 热力学计算

利用 Thermo-calc 软件进行试验钢热力学计算(TCFE10 铁基数据库)。图 1 为 06Nb04V 试验钢的热力学平衡相图及局部放大图。在钢板轧制过程中,温度降低至 1 100 ℃ 左右时,部分 Nb 和 C 结合生成 NbC,其余 Nb 固溶于奥氏体中,这将抑制奥氏体再结晶,阻止界面迁移,从而控制奥氏体晶粒尺寸,提高相变形核率,细化贝氏体晶粒^[3]。冷却到 700 ℃ 时,VC 开始析出。由于钢板控制冷却,冷速较快,VC 析出量较少。在后续的回火过程中,Nb 和 V 会

进一步析出。由于 V 在奥氏体中的固溶度较大,在回火时候会析出更多的 VC 相。在 500 °C 时,钢的基体相为 BCC_A2, 含量较少的相为 FCC_A1#2

((Nb,Ti)C), FCC_A1#3(VC), MC_ETA((V,Mo)C), CEMENTITE_D101(Fe_3C), M7C3_D101($(\text{Fe,Mn})_7\text{C}_6$)。

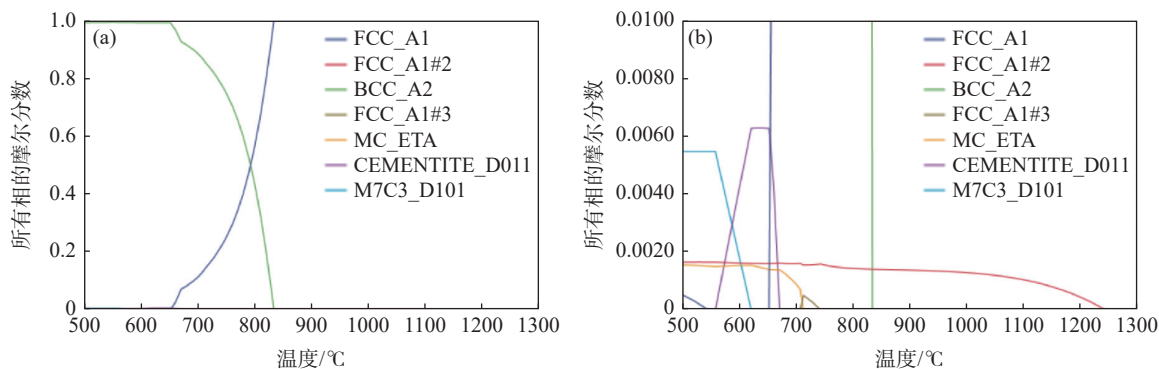


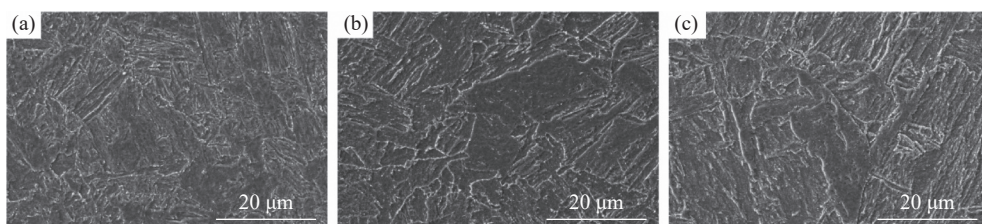
图 1 06Nb04V 试验钢的热力学平衡相图(a)及局部放大图(b)

Fig. 1 Temperature dependence of the mole fraction of equilibrium phases in the 06Nb04V steel (a) and partial enlarged view (b)

2.2 微观组织观察

图 2 为不同 Nb、V 含量试验钢在 SEM 下的微观组织。三种试验钢均由贝氏体铁素体、多边形铁素体及亮白色的 M/A 岛组成,组织形态分布均匀。一

般而言,多边形铁素体相有助于提高钢的韧性。选择 02Nb1V 试验钢,对多边形铁素体相和贝氏体铁素体相分别测试维氏硬度(HV10),并取平均值,结果分别为 229 和 299,两相硬度存在显著差异。



(a) 06Nb1V; (b) 02Nb1V; (c) 06Nb04V

图 2 试验钢的 SEM 形貌

Fig. 2 SEM photos of the investigated steels

图 3 为 3 种试验钢的 EBSD 分析结果。统计等效晶粒尺寸发现,06Nb1V、02Nb1V、06Nb04V 试验钢平均晶粒尺寸逐渐降低,分别为 8.3、7.9、7.7 μm ,晶粒逐渐细化。相比 06Nb1V 试验钢,02Nb1V 和 06Nb04V 试验钢单位面积内晶界数量明显增加。晶界可以阻碍位错运动,并且在材料断裂时阻碍裂纹扩展,有助于同时提高钢的强度和韧性。

2.3 析出相形貌及分布

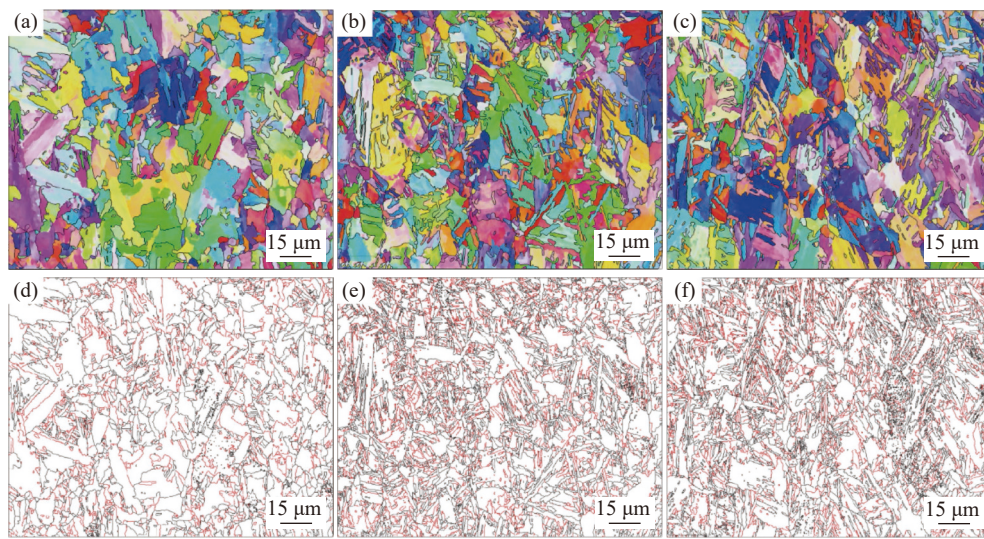
图 4 为 06Nb1V 试验钢在 TEM 下的微观组织。组织呈板条状,板条近似平行排列,内部存在较高的位错密度。在贝氏体板条边界观察到较大尺寸的条状渗碳体($\sim 800\text{ nm}$),这对于试验钢的低温冲击韧性不利。

大量呈椭圆形、球形或不规则形的纳米级析出物弥散存在于板条内部或位错附近,与位错发生交互作用,析出物尺寸约为十几到数十纳米。对其中

一个不规则析出相做 EDS 分析,发现其由 Nb、V、Ti 三种元素组成,推测该析出相为 $(\text{Nb,V,Ti})(\text{C,N})$ 。而且三种元素分布不均匀,Ti 元素分布在析出相的中心位置。推测该析出相生长过程如下:Ti 首先析出;Nb 以 $\text{Ti}(\text{C,N})$ 作为形核点,析出长大;随后,V 取代部分 Nb 的晶格位置,最终形成 $(\text{Nb,V,Ti})(\text{C,N})$ 。

图 5 为 02Nb1V 试验钢在 TEM 下的微观组织,和 06Nb1V 试验钢类似。在贝氏体团块以及板条边界可观察到 M/A 岛。由于经过回火处理,长条状和尖角状 M/A 岛逐渐分解球化,减少了应力集中,从而抑制裂纹萌生和扩展。对其中一个不规则析出相做 EDS 分析,发现主要由 Nb、V、Ti 三种元素组成,推测该析出相为 $(\text{Nb,V,Ti})(\text{C,N})$ 。

图 6 为 06Nb04V 试验钢在 TEM 下的微观组织,呈板条结构。对其中一个不规则析出相做 EDS 分析,发现主要由 Nb 元素组成,推测该析出相为 $\text{Nb}(\text{C,N})$ 。



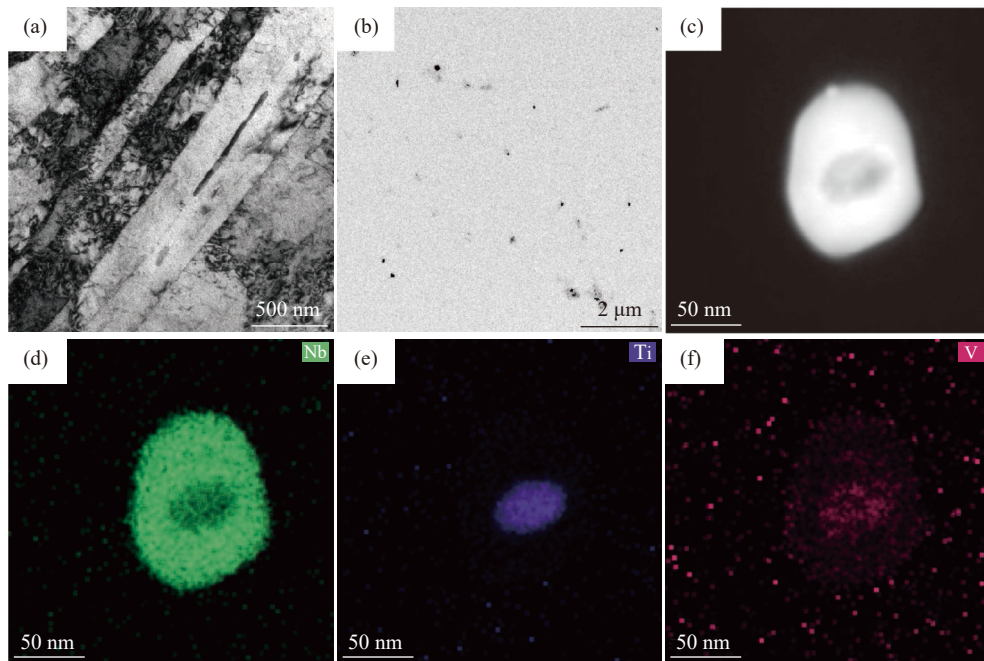
IPF: (a) ~ (c); GB: (d) 02Nb1V; (e) 06Nb04V; (f) 06Nb1V

图 3 试验钢的 EBSD 表征

Fig. 3 EBSD analysis of the investigated steels

为了探究 3 种试验钢的析出相的形态和尺寸分布, 在一个倍数下随机选择 10 个视场进行统计分析。析出相的体积分数 f 和平均直径 d 的结果如表 3 所示。由表 3 可知, 06Nb1V 试验钢的析出相平均直

径最大, 02Nb1V 试验钢的析出相体积分数和平均直径都是最小, 06Nb04V 试验钢析出相体积分数最大。一般而言, 析出相的体积分数越大, 且平均尺寸越小, 对于钢的强韧性越有利。



(a) 显微组织; (b) 碳萃取复型; (c)~(f) 析出相的 HAADF 相及其 EDS 面扫

图 4 06Nb1V 试验钢的形貌及析出相 TEM 表征

Fig. 4 TEM micrographs of the precipitated particles in 06Nb1V steels

2.4 力学性能

三种试验钢的力学性能如表 4 所示。可以看出, 06Nb1V 试验钢强度最高, 冲击功最低; 试验钢中 Nb 元素含量从 0.06% 减少至 0.02% 后, 强度降低约 50 MPa, 塑性略微增加, 冲击功提高 40 J; 试验钢

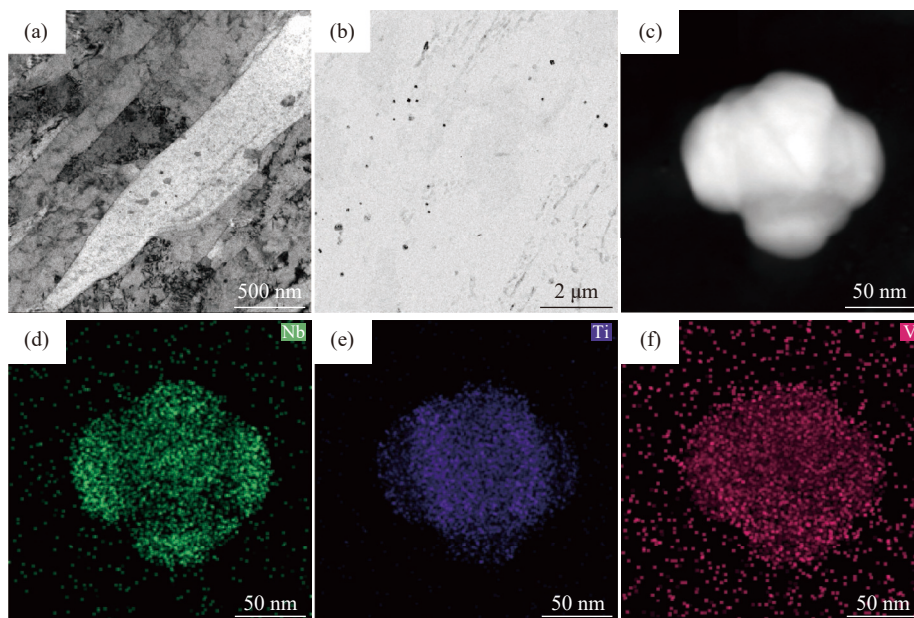
中 V 元素含量从 0.1% 减少至 0.04% 后, 强度降低, 塑性基本不变, 冲击功大幅增加。

钢中 Nb、V 元素含量的微小变化都会显著影响钢的强度、塑性、韧性。微合金元素添加过量反而会对试验钢力学性能有所损害。

3 分析与讨论

06Nb1V 试验钢的强度显著高于 02Nb1V 试验

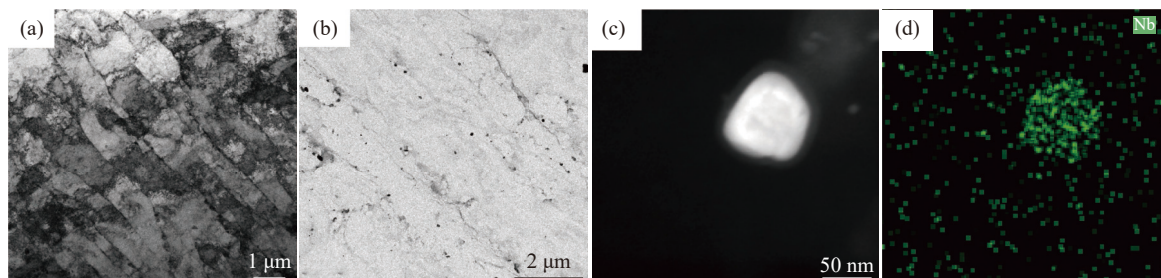
钢、06Nb04V 试验钢。析出相对于钢的强化作用,即析出强化根据 Ashby-Orowan 模型计算,如式(2)所示。



(a)显微组织; (b)碳萃取复型; (c)~(f)析出相的 HAADF 相及其 EDS 面扫

图 5 02Nb1V 试验钢的形貌及析出相 TEM 表征

Fig. 5 TEM micrographs of the precipitated particles in 02Nb1V steels



(a)显微组织; (b)碳萃取复型; (c)~(d)析出相的 HAADF 相及其 EDS 面扫

图 6 06Nb04V 试验钢的形貌及析出相 TEM 表征

Fig. 6 TEM micrographs of the precipitated particles in 06Nb04V steels

$$\sigma_p = \frac{0.538Gb f^{1/2}}{d} \ln\left(\frac{d}{2b}\right) \quad (2)$$

式中, f 为第二相粒子的体积分数; d 是第二相粒子的直径, mm; G 是剪切模量 (78 GPa); b 为伯氏矢量 (0.248 nm)。

表 3 纳米析出相的统计结果

Table 3 Statistical results of the precipitated particles

试验钢	体积分数/%	析出相平均尺寸/nm
06Nb1V	0.30	31.86
02Nb1V	0.07	20.20
06Nb04V	0.54	23.87

计算出 06Nb1V、02Nb1V、06Nb04V 试验钢的析出强化分量分别为 74.5、54.5、124.1 MPa。晶粒尺寸对于钢的强化作用能够通过 Hall-Petch 公式计算^[7], 06Nb1V、02Nb1V、06Nb04V 试验钢的细晶强化分量为 138.5、142.2、144.1 MPa, 相差不大。试验结果中, 06Nb1V 试验钢的强度高于 02Nb1V 和 06Nb04V 试验钢的强度, 与析出强化、细晶强化的计算结果相反。这主要是由于固溶强化分量不同导致的。由于 06Nb1V、02Nb1V、06Nb04V 试验钢中的 Nb+V 微合金含量依次降低, 因此固溶强化分量依次减少。

如表 4 所示, 06Nb1V、02Nb1V、06Nb04V 试

验钢的低温冲击韧性依次提高。3 种试验钢的有效晶粒尺寸差异不大, 推测对于韧性的贡献相差不多。钢在低温冲击下经历了断裂模式从韧性至脆性的转变。根据 BINGLEY 和 BAKER 的研究^[9-10], 纳米析出相的尺寸显著影响钢的韧脆转变温度, 钢中的纳米析出相的尺寸越小, 则韧脆转变温度越低, 低温韧性越好。06Nb04V 试验钢的平均析出相较小, 体积分数最大, 有助于提高材料的韧性。

表 4 试验钢的力学性能
Table 4 Mechanical properties of the investigated steels

试验钢	屈服强度/MPa	抗拉强度/MPa	断后延伸率/%	冲击功/J
06Nb1V	695	779	17.96	166
02Nb1V	643	712	20.60	206
06Nb04V	644	718	16.86	304

4 结论

- 1)X80 热煨弯管钢微观组织由贝氏体铁素体和多边形铁素体组成, 基体可见均匀分布的第二相粒子, Nb、V 微合金化含量对于组织影响不大。
- 2)不同的 Nb、V 元素添加能够改变 X80 热煨弯管中析出相的体积分数和平均直径。
- 3)与 0.06%Nb 以及 0.10%V 相比, 0.02%Nb 和 0.04%V 添加均有助于改善 X80 热煨弯管用钢材料的强韧性匹配。

参考文献

[1] ZHANG S. Study and exploitation of X80 pipeline bends steel on composition and process[D]. Shenyang: Northeastern University, 2013.
(张帅. X80 热煨弯管用钢的成分及工艺开发[D]. 沈阳: 东北大学, 2013.)

[2] WANG L. Study of X90 pipeline bends steel on microstructure and properties[D]. Chengdu: Southwest Petroleum University, 2019.
(王良. 热煨弯制 X90 的组织与性能研究[D]. 成都: 西南石油大学, 2019.)

[3] SUN L Y, LIU X, XU X, *et al.* Review on niobium application in microalloyed steel[J]. Journal of Iron and Steel Research, 2022, 29(10): 13.

[4] KONG H J, LIU C T. A review on nano-scale precipitation in steels[J]. Technologies, 2018, 6(1): 36.

[5] XIONG Z P, TIMOKHINA I, PERELOMA E V. Clustering, nano-scale precipitation and strengthening of steels[J]. Progress in Materials Science, 2020.

[6] BAKER T N. Processes, microstructure and properties of vanadium microalloyed steels[J]. Materials Science and Technology, 2014.

[7] MA G Q, CHEN Y M, WU G L, *et al.* The effects of microalloying on the precipitation behavior and strength mechanisms of X80 high-Strength pipeline steel under different processes[J]. Crystals, 2023, 13, 714.

[8] HAN R Y, YANG G W, SUN X J, *et al.* Austenite grain growth behavior of vanadium microalloying medium manganese martensitic wear-resistant steel[J]. Acta Metallurgica Sinica, 2022, 58(12): 1589-1599.
(韩汝洋, 杨庚蔚, 孙新军, 等. 钒微合金化中锰马氏体耐磨钢奥氏体晶粒长大行为[J]. 金属学报, 2022, 58(12): 1589-1599.)

[9] BINGLEY M S. Effect of grain size and carbide thickness on impact transition temperature of low carbon structural steels[J]. Mater. Sci. Technol., 2001, 17(6): 700-714.

[10] BAKER T N. Microalloyed steels[J]. ironmaking & steelmaking, 2016, 43(4): 264-307.