

DOI: 10.16410/j.issn1000-8365.2025.5003

Nb 含量对 Ti-Nb 合金显微组织和力学性能的影响

尚金金^{1,2}, 吴与伦², 杨 策², 雷 强^{1,2}, 李斌强², 刘向宏³, 曾卫东¹

(1. 西北工业大学凝固技术全国重点实验室, 陕西 西安 710072; 2. 西部超导材料科技股份有限公司, 陕西 西安 710018; 3. 西北有色金属研究院, 陕西 西安 710016)

摘要: Ti-Nb 二元合金具有形状记忆效应、抗腐蚀性、无毒性、超导电性等特点, 在航空航天、医疗、超导领域得到了广泛应用。通过真空自耗电弧熔炼和热轧加工制备了 Nb 含量 35%~55%(质量分数)的 Ti-Nb 合金, 分析了 Nb 含量对合金微观组织演变及力学行为的影响及作用机制。结果表明, 当 Nb 含量为 35% 时, 其固溶态显微组织由直径约 50~100 μm 的等轴晶组成, 晶粒内部存在应力诱导马氏体, 拉伸曲线呈现出明显的双屈服现象, 抗拉强度可达 650 MPa, 但屈服强度仅为 225 MPa。随着 Nb 含量增加至 45%~55%, 合金晶粒细化且 β 相稳定性增强, 抑制了马氏体相变, 拉伸曲线无明显双屈服现象, 实现了强度与塑性的良好匹配。Nb 元素通过 β 相稳定化、固溶强化及晶粒细化三重作用机制, 显著改善了合金的综合力学性能。

关键词: Ti-Nb 合金; Nb 含量; 真空自耗电弧熔炼; 显微组织; 力学性能

中图分类号: TG146.2+3

文献标识码: A

文章编号: 1000-8365(2025)07-0689-06

Influence of the Nb Content on the Microstructures and Mechanical Properties of Ti-Nb Alloy

SHANG Jinjin^{1,2}, WU Yulun², YANG Ce², LEI Qiang^{1,2}, LI Binqiang², LIU Xianghong³, ZENG Weidong¹

(1. State Key Laboratory of Solidification Processing, Northwestern Polytechnical University, Xi'an 710072, China; 2. Western Superconducting Technologies Co., Ltd., Xi'an 710018, China; 3. Northwest Institute for Non-ferrous Metal Research, Xi'an 710016, China)

Abstract: Ti-Nb alloys are widely used in aerospace, medical, and superconductivity applications because of their excellent properties, such as shape memory effects, corrosion resistance, nontoxicity, and superconductivity. Ti-Nb alloys with compositions ranging from 35 wt.% to 55 wt.% were prepared via vacuum arc remelting and hot rolling processing to elucidate the influence of the Nb content on the microstructural evolution and mechanical behavior. The results demonstrate that the microstructure of the solution-treated Ti-35Nb alloy consists of equiaxed grains with a grain size of approximately 50~100 μm , accompanied by stress-induced martensite within the grains. The tensile curve exhibits a distinct double-yield phenomenon, with an ultimate tensile strength of 650 MPa but a relatively low yield strength of 225 MPa. As the Nb content increases to 45 wt.%~55 wt.%, the alloy undergoes significant grain refinement, coupled with enhanced β -phase stability, which suppresses martensitic transformation. Consequently, the tensile curves display no double-yield behavior, and the strength and ductility of the alloy match well. The incorporation of Nb improves the comprehensive mechanical performance through three mechanisms: β -phase stabilization, solid-solution strengthening, and grain refinement.

Key words: Ti-Nb alloy; niobium content; vacuum arc remelting; microstructure; mechanical properties

Nb 元素和 Ti 元素同属过渡族元素, 二者具有相近的原子尺寸和电负性。根据 Ti-Nb 相图可知, Nb 元素在 β -Ti 中可无限固溶, 而在 α -Ti 中固溶度为 0.4%~4.0%(质量分数, 下同)^[1]。Ti-Nb 二元合金,

收稿日期: 2025-01-10

基金项目: 国家自然科学基金联合基金重点支持项目(U24A2038)

作者简介: 尚金金, 1984 年生, 博士生, 正高级工程师。研究方向为钛合金熔炼技术开发。Email: sjandsj@c-wst.com

通信作者: 刘向宏, 1967 年生, 博士, 教授级高工。主要从事高性能钛合金材料工程化技术研究工作。Email: ylwu@c-wst.com

引用格式: 尚金金, 吴与伦, 杨策, 雷强, 李斌强, 刘向宏, 曾卫东. Nb 含量对 Ti-Nb 合金显微组织和力学性能的影响[J]. 铸造技术, 2025, 46(7): 689-694.

SHANG J J, WU Y L, YANG C, LEI Q, LI B Q, LIU X H, ZENG W D. Influence of the Nb content on the microstructures and mechanical properties of Ti-Nb alloy[J]. Foundry Technology, 2025, 46(7): 689-694.

或者以 Ti-Nb 为基体的三元和四元合金,具有形状记忆效应、抗腐蚀性、低弹性模量、无毒性、超导电性、与复合材料电位差小和良好的可加工性等性能,在航空航天、医疗器械、大科学装置等领域受到了广泛的关注和应用^[2-5]。

Nb 元素含量对 Ti-Nb 合金的性能有着显著的影响。当 Nb 元素含量小于 44% 时, Ti-Nb 二元合金呈现明显的固态相变特性。具体地,当 Nb 含量介于 19%~44% 时, Ti-Nb 合金冷却时发生非扩散型的热弹性马氏体相变,表现出形状记忆效应^[6-8],虽然其形状记忆恢复应变不到 2%,但是马氏体相变温度可达 300 °C 以上,是一种典型的高温环境用功能型钛合金^[9-10]。当 Nb 元素含量在 42%~47% 时, Ti-Nb 合金具有优良的耐蚀性、高的比强度、良好的力学性能和加工性能,其与复合材料的电位差仅 530 mV,是航空用碳纤维复合材料的最佳铆接材料^[11-12]。此外,当 Nb 含量高于 40% 时, Ti-Nb 合金表现出一定的低温超导电性,且 Nb 含量在 50%~54% 之间的 Ti-Nb 合金是目前工程化应用最为广泛的低温超导材料^[13-15]。

目前针对 Ti-Nb 合金的研究多聚焦于典型成分(如 Ti-45Nb、Ti-53Nb)的热加工工艺优化及单一性能提升。如 Völker 等^[16]通过高压扭转(severe plastic deformation, SPD)将 Ti-45Nb 合金晶粒细化至约 50 nm 后,经 300 °C 退火 30 min 可显著提升硬度和强度(峰值硬度),同时伴随 α -Ti 相析出,杨氏模量呈温度依赖性变化,证实 SPD 结合后续热处理是优化 β -Ti 合金力学性能的有效途径,适用于高强度植入材料。朱宝辉等^[17]发现轧制温度对 Ti-45Nb 合金成品丝材的性能影响是非线性的,轧制温度在 750~800 °C 时丝材的强度和塑性匹配度优异。郭强等^[18]以高均匀性 Nb47Ti(Ti-53Nb)合金棒和高纯无氧铜为原材料制备了 NbTi/Cu 超导线,通过开发新型时效热处理工艺,显著提高超导线材的临界电流密度。Helth 等^[19]研究了热加工对低模量 Ti-40Nb 合金性能的影响,发现冷轧加工硬化可显著提升合金强度,同时维持低弹性模量。上述研究主要针对特定成分,但对宽成分范围内显微组织演化与力学性能的关联机制缺乏系统性分析。此外,现有成果多关注单一机制对合金力学性能的影响,而 Nb 含量对多机制协同作用的定量影响尚未明确。为此,本研究采用真空自耗电弧熔炼及热轧工艺制备出 Nb 含量介于 35%~55% 之间的 Ti-Nb 合金板材,系统研究了 Nb 含量对固溶态 Ti-xNb 合金显微组织和力学性能的影响,以期明确 β 相稳定化、晶粒细化与相

变抑制的协同作用机制,为航空航天铆接材料、超导组件等领域的成分设计与工艺优化提供理论支撑。

1 实验材料与方法

根据 Ti-Nb 二元相图^[20], Nb 含量在 35%~55% 范围内存在 $\beta \rightarrow \alpha''$ 及 $\beta \rightarrow \omega$ 多种相变。为此,本文以海绵钛(99.95%)和高纯 Nb(99.95%)为原料,使用 500 t 油压机压制出直径 30 mm 的近圆形电极块,经 2 次真空自耗电弧熔炼,制备出直径为 60 mm 名义成分为 Ti-(35, 42, 45, 47, 55)Nb 5 种合金铸锭。铸锭的化学成分由电感耦合等离子体发射光谱仪测定,如表 1 所示。将 5 个铸锭在 1 000 °C 下高温均匀化 10 h 后,采用热轧加工为厚度 2.5 mm 的板材。随后,将板材在 800 °C 下进行 1 h 的固溶处理,然后水冷淬火。使用电火花线切割机从板材相同位置切取用于显微组织分析和力学性能检测的试样。首先,用砂纸研磨去除表面加工层,再用 SiO₂ 悬浮液振动抛光至镜面,得到 EBSD 高质量样品。随后使用体积比为 7:3 的 HCl 和 HNO₃ 混合溶液进行腐蚀,获得用于显微组织观察的金相试样。在 Olympus GX71 型光学显微镜和配备有电子背散射衍射探头的 SUPRA55 ZEISS 型扫描电子显微镜上完成 Ti-xNb 合金微观组织的表征及分析。此外,切取厚度为 1 mm、宽度为 3 mm、标距长 20 mm 的板状拉伸试样,样品表面经砂纸研磨后,在 AGXplus 型电子万能试验机上,以 $8 \times 10^{-4} \text{ s}^{-1}$ 的速率于室温下完成试样的拉伸测试,并借助 SUPRA55 ZEISS 型扫描电子显微镜观察 Ti-xNb 合金的断口形貌,分析 Nb 含量对 Ti-Nb 二元合金力学性能的影响。

表1 Ti-xNb合金Nb元素名义含量及实测含量
Tab.1 Nominal and measured Nb contents of the
Ti-xNb alloys

(mass fraction/%)					
No.	1#	2#	3#	4#	5#
Nominal	35	42	45	47	55
Measured	35.05	41.96	45.13	47.09	55.18

2 实验结果及讨论

2.1 显微组织

图 1 为不同 Nb 含量下 Ti-xNb 合金($x=35, 42, 45, 47, 55$)固溶态样品的光学显微组织。当 Nb 含量为 35% 时,其微观组织由直径约为 50~100 μm 的等轴晶组成,如图 1a 所示,且部分晶粒内部存在少量片层马氏体,说明 Ti-35Nb 合金在淬火时发生了马氏体相变。随着 Nb 含量增加, Ti-xNb 合金的微观组织仍由等轴晶组成,但晶粒尺寸明显减少,未见第二

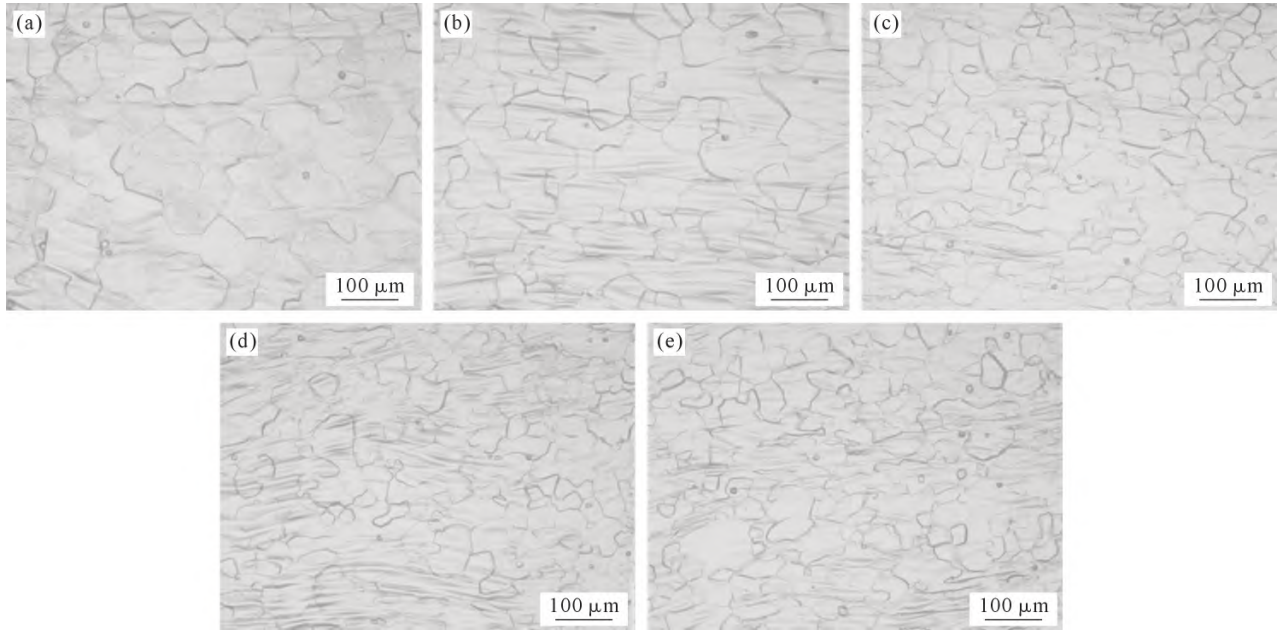


图 1 固溶态 Ti-xNb 合金显微组织:(a) 35%; (b) 42%; (c) 45%; (d) 47%; (e) 55%

Fig.1 OM images of the solution treated Ti-xNb alloys: (a) 35%; (b) 42%; (c) 45%; (d) 47%; (e) 55%

相析出,而淬火马氏体的数量随 Nb 含量的增加呈先增后减的趋势^[21-22]。

2.2 室温拉伸性能

Ti-xNb 合金固溶态样品的室温拉伸性能如图 2 所示。当 Nb 含量为 35%和 42%时,两种合金拉伸曲线存在明显的双屈服现象,特别是 Ti-35Nb 合金,其抗拉强度可达 650 MPa,但屈服强度仅为 225 MPa,严重限制了该材料的应用。这是因为 Ti-35Nb 合金触发应力诱导马氏体(stress induced martensite, SIM)相变

所需的临界应力较低,在加载过程中出现了 SIM,导致 Ti-35Nb 合金发生过早的屈服。然而,当伸长率达到 5%后,Ti-35Nb 合金中 SIM 的密度达到了最大值, SIM 的存在促进了合金的塑性变形^[23-25],且随着应力的持续加载,位错滑移和应力诱导马氏体相互作用,使得 Ti-35Nb 合金表现出优异的加工硬化能力,如图 2c 所示。此外,在 Ti-45Nb、Ti-47Nb 和 Ti-55Nb 合金中,未发现双屈服现象,且合金具有较高的强度、塑性匹配。

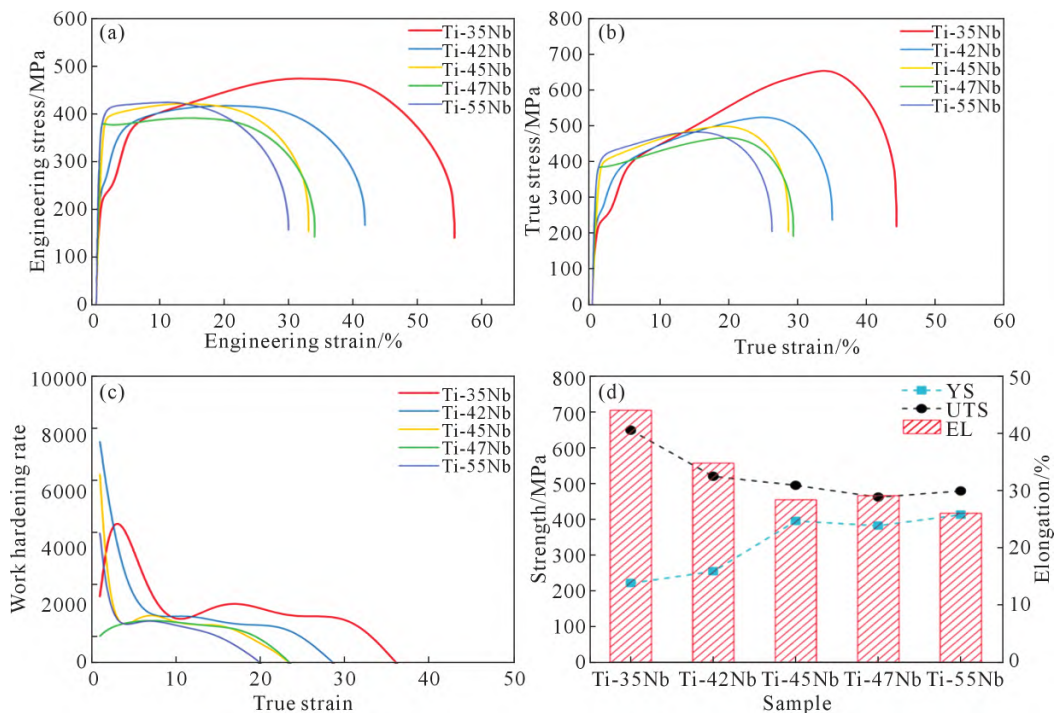


图 2 固溶态 Ti-xNb 合金室温拉伸性能:(a) 工程应力-应变曲线;(b) 真应力-应变曲线;(c) 加工硬化率曲线;(d) 室温拉伸性能

Fig.2 Mechanical properties of the solution treated Ti-xNb alloys: (a) engineering stress-strain curve; (b) true stress-strain curve;

(c) work hardening curve; (d) tensile properties at room temperature

2.3 变形机制分析

图 3 呈现了 Ti-xNb 合金固溶态样品的取向分布谱。由 EBSD 结果也可以进一步确认,随着 Nb 含量的增加,Ti-xNb 合金的晶粒尺寸明显减小,再结晶程度增加,且晶粒取向趋于各向同性,如图 3e 所示。类似地,从图 3a 和 b 可以发现,Ti-35Nb 和 Ti-42Nb 合金经 800 °C 固溶处理 1 h 后,虽然获得了等轴形貌的基体,但依然残留着变形诱导的马氏体,其以片条状分布于基体中。然而,随着 Nb 含量的增加,尤其是 Ti-55Nb 合金, β 相稳定性显著增强, M_s 点(马氏体转变开始温度)已低于室温,在热轧变形过程中未发生应力诱导的马氏体相变。经固溶处理后,能够获得完全再结晶为细小等轴晶粒。

结合室温拉伸性能和变形机制分析可知,Nb 元素的加入对 Ti-Nb 合金性能的影响机制主要体现在以下两方面:① β 相稳定与固溶强化。Nb 作为 β 相稳定元素,在 Ti-Nb 合金中显著提高了 β 相的稳定性。当 Nb 含量较低(如 35%~42%)时, β 相的稳定性不足,在应力作用下易发生应力诱导马氏体相变。这种相变需要较低的临界应力,导致合金在拉伸过程中出现第一次屈服,随后通过位错滑移和相变协同作用引发第二次屈服,表现为双屈服现象。而当 Nb 含量增加至 45%及以上时, β 相稳定性增强,抑制了马氏体相变,变形机制以均匀的位错滑移为主,因此未观察到双屈服现象。②晶粒细化与微观组织调控。Nb 含量的增加促进了晶粒细化,并提高了再结晶程度。细晶强化效应不仅提升了合金强

度,还减少了局部应力集中,进一步抑制了马氏体相变的触发。同时,高 Nb 含量下晶粒取向趋于各向同性,降低了变形过程中的各向异性,使塑性变形更加均匀,从而改善了强塑性匹配。

2.4 断口分析

Ti-xNb 合金固溶态样品的拉伸断口形貌如图 4 所示。Ti-35Nb 合金的断口表面被聚集型微孔覆盖,存在大量韧窝,如图 4a 所示,呈现出明显的韧性断裂特征^[26-27]。然而,随着 Nb 含量的增大,Ti-xNb 合金断口表面的微孔数量明显减少,且在 Ti-55Nb 合金中出现了较明显的撕裂棱和褶皱状台阶,如图 4e 所示,表现出局部塑性变形弱化的特征^[28-29],这与图 2d 中 Ti-xNb 合金的拉伸性能一致。

3 结论

(1)Ti-35Nb 合金微观组织由直径约为 50~100 μm 的等轴晶粒组成,部分晶粒内部存在少量的片层状马氏体,说明其发生了马氏体相变。随着 Nb 含量的增加,微观组织仍呈等轴晶,但晶粒尺寸明显减少,且未见第二相析出及马氏体相变。

(2)Ti-35Nb 合金因触发应力诱导马氏体相变所需的临界应力较低,在加载过程中出现了 SIM 和明显的双屈服现象,导致其抗拉强度可达 650 MPa,但屈服强度仅为 225 MPa。当 Nb 含量增加至 45%~55%时,未观察到双屈服现象,合金具有较高的强度、塑性匹配。

(3)Ti-35Nb 合金的断口表面被聚集型微孔覆

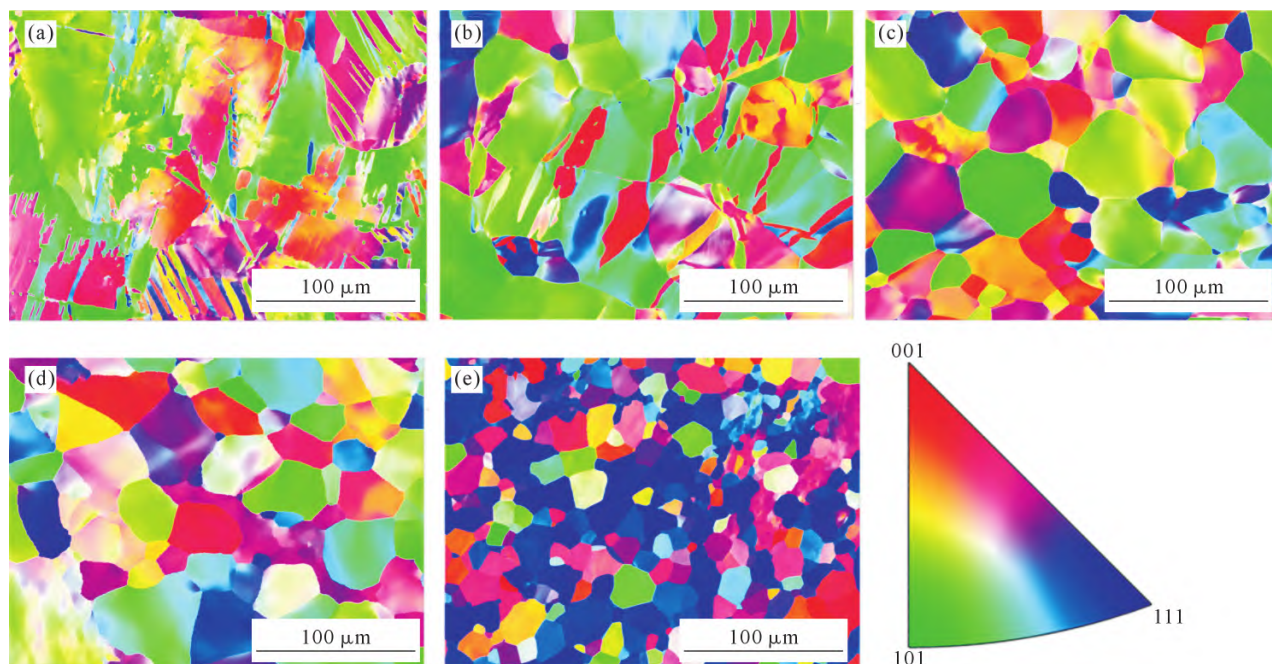


图 3 固溶态 Ti-xNb 合金 EBSD 分析:(a) 35%; (b) 42%; (c) 45%; (d) 47%; (e) 55%

Fig.3 EBSD results of the solution treated Ti-xNb alloys: (a) 35%; (b) 42%; (c) 45%; (d) 47%; (e) 55%

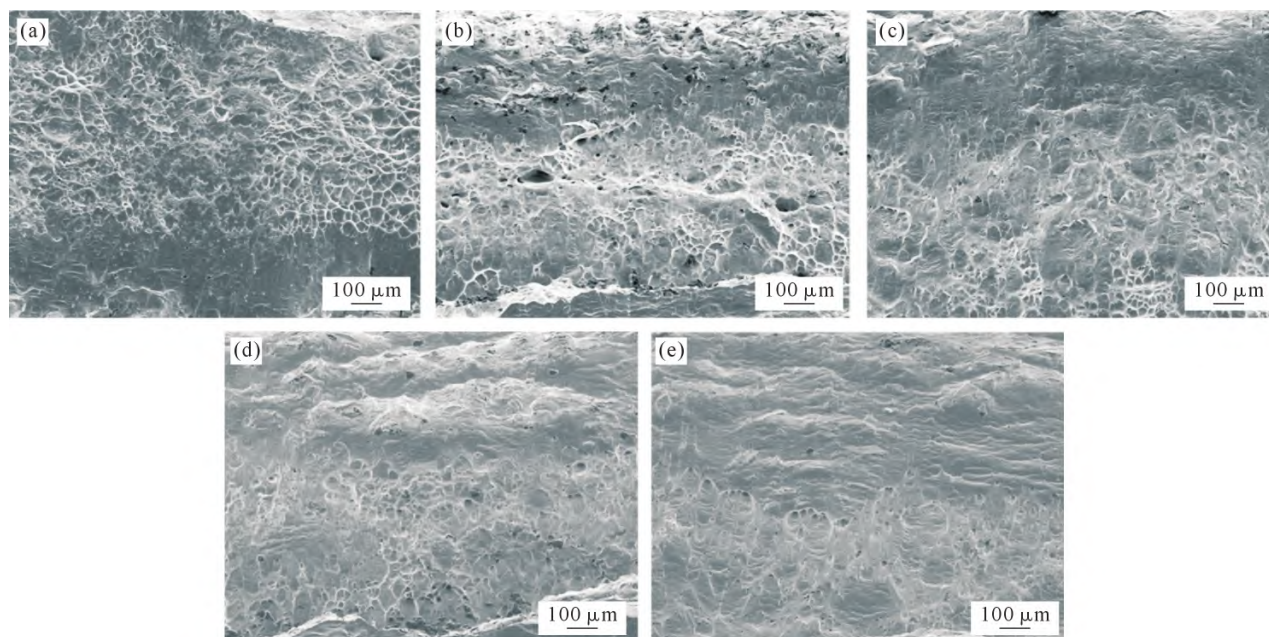


图4 固溶态 Ti-xNb 合金的断口形貌:(a) 35%; (b) 42%; (c) 45%; (d) 47%; (e) 55%

Fig.4 Fracture morphology of the solution treated Ti-xNb alloy: (a) 35%; (b) 42%; (c) 45%; (d) 47%; (e) 55%

盖,存在大量韧窝,呈现出明显的韧性断裂特征。随着 Nb 含量的增大,Ti-xNb 合金断口表面的微孔数量明显减少,且在 Ti-55Nb 合金中出现了较明显的撕裂棱和褶皱状台阶。

(4)Nb 元素通过 β 相稳定化、晶粒细化与相变抑制的协同作用机制影响 Ti-Nb 合金力学性能,Nb 含量增加,可提高 β 相的稳定性,抑制马氏体相变,促进晶粒细化并使得晶粒取向趋于各向同性,降低了变形过程中的各向异性,使塑性变形更加均匀,合金具有较高的强度、塑性匹配。

参考文献:

- [1] LIU X H, SHANG J J, WU Y L, XIA Y, WANG K X, ZHAO X H, DU Y X, ZENG W D, XIE L S, LIANG Z D. The morphology features, formation mechanism and elimination of channel segregation in industrial-scale Ti-Nb ingots produced by vacuum arc remelting[J]. Journal of Materials Research and Technology, 2023, 27: 5029-5040.
- [2] KIM H Y, SATORU H, KIM J L, HOSODA H, MIYAZAKI S. Mechanical properties and shape memory behavior of Ti-Nb alloys [J]. Materials Transactions, 2004, 45(7): 2443-2448.
- [3] BÖNISCH M, WAITZ T, PANIGRAHI A, ZEHETBAUER M, GEBERT A, SKROTZKI W. Thermal stability and phase transformations of martensitic Ti-Nb alloys[J]. Science and Technology of Advanced Materials, 2016, 14(5): 055004.
- [4] OKULOV I V, VOLEGOV A S, ATTAR H, BÖNISCH M, E-HTEMAM-HAGHIGHI S, CALIN M, ECKERT J. Composition optimization of low modulus and high-strength TiNb-based alloys for biomedical applications[J]. Journal of the Mechanical Behavior of Biomedical Materials, 2017, 65: 866-871.
- [5] KIM J I, KIM H Y, INAMURA T, HOSODA H, MIYAZAKI S. Shape memory characteristics of Ti-22Nb-(2-8)Zr(at.%) biomedical alloys[J]. Materials Science and Engineering: A, 2005, 403(1-2): 334-339.
- [6] KIM H Y, IKEHARA Y, KIM J I, HOSODA H, MIYAZAKI S. Martensitic transformation, shape memory effect and superelasticity of Ti-Nb binary alloys[J]. Acta Materialia, 2006, 54(9): 2419-2429.
- [7] MATHEBULA C, MATIZAMHUKA W, BOLOKANG A S. Effect of Nb content on phase transformation, microstructure of the sintered and heat-treated Ti (10-25) wt.% Nb alloys [J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2020, 108: 23-34.
- [8] GEHRING D, MONROE J A, KARAMAN I. Effects of composition on the mechanical properties and negative thermal expansion in martensitic TiNb alloys[J]. Scripta Materialia, 2020, 178: 351-355.
- [9] 孙斌. 热机械处理 Ti-16Nb 高温记忆合金的组织结构与形状记忆效应[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2019.
- [10] SUN B. Microstructure and shape memory effect of thermomechanically treated Ti-16Nb high temperature shape memory alloy [D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2019.
- [11] OTSUKA K, REN X B. Recent developments in the research of shape memory alloys[J]. Intermetallics, 1999, 7(5): 511-528.
- [12] 张利军,王幸运,郭启义,谢田,薛祥义,常辉. 钛合金材料在我国航空紧固件中的应用[J]. 航空制造技术, 2013, 16: 129-133.
- [13] ZHANG L J, WANG X Y, GUO Q Y, XIE T, XUE X Y, CHANG H. Application of titanium alloy in Chinese aircraft fastener [J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2013, 16: 129-133.
- [14] 梁书锦,侯峰起,李英浩,张鹏,王飞云,张丰收,刘向宏,冯勇,张平祥. 航空紧固件用 Ti45Nb 合金丝材的组织性能[J]. 稀有金属材料与工程, 2015, 44(9): 2203-2209.
- [15] LIANG S J, HOU F Q, LI Y H, ZHANG P, WANG F Y, ZHANG F S, LIU X H, FENG Y, ZHANG P X. Microstructure and mechanical properties of Ti-45Nb wires used in aviation rivets [J].

- Rare Metal Materials and Engineering, 2015, 44(9): 2203-2209.
- [13] LEE P J. Abridged metallurgy of ductile alloy superconductors[J]. Wiley Encyclopedia of Electrical and Electronics Engineering, 1999, 21: 75-87.
- [14] 李建峰, 张平祥, 刘向宏, 李金山, 冯勇, 王天成, 杜社军, 刘维涛, GRUNBLATT G, VERWAERDE C, HOANG G K. ITER 用 NbTi 超导线材微观组织及性能[J]. 稀有金属材料与工程, 2009, 38(2): 263-265.
- LI J F, ZHANG P X, LIU X H, LI J S, FENG Y, WANG T C, DU S J, LIU W T, GRUNBLATT G, VERWAERDE C, HOANG G K. Microstructure and properties of NbTi superconducting composite wire for ITER[J]. Rare Metal Materials and Engineering, 2009, 38(2): 263-265.
- [15] ZHU B H, CHEN Z Z, CAO Y F, LIU Y C, KANG X H, CHEN Y, LIU H W, FU P X, LUAN Y K, LI D Z. Characteristics, mechanism and criterion of channel segregation in NbTi alloy via numerical simulations and experimental characterizations[J]. Materials, 2021, 14(4): 796.
- [16] VÖLKER B, MAIER-KIENER V, WERBACH K, MÜLLER T, PILZ S, ECKERT J, HOHENWARTER A. Influence of annealing on microstructure and mechanical properties of ultrafine-grained Ti45Nb[J]. Materials & Design, 2019, 179: 107864.
- [17] 朱宝辉, 王培军, 刘彦昌, 陈睿博, 赵洪章, 王晓平, 郑爱国. 热轧温度对 Ti-45Nb 合金棒材微观组织及力学性能的影响[J]. 中国有色金属学报, 2013, 23(S1): s619-s623.
- ZHU B H, WANG P J, LIU Y C, CHEN R B, ZHAO H Z, WANG X P, ZHENG A G. Influence of rolling temperature on microstructure and mechanical properties of Ti-45Nb alloy bars[J]. Transactions of Nonferrous Metals Society of China, 2013, 23(S1): s619-s623.
- [18] 郭强, 张平祥, 冯勇, 刘向宏, 李建峰, 闫凯鹏. 新型时效热处理工艺对多芯 NbTi 超导线材微观组织和临界电流密度的影响[J]. 稀有金属材料与工程, 2019, 48(12): 4113-4118.
- GUO Q, ZHANG P X, FENG Y, LIU X H, LI J F, YAN K J. Effect of new heat treatment on microstructure and critical current density of NbTi superconducting wire [J]. Rare Metal Materials and Engineering, 2019, 48(12): 4113-4118.
- [19] HELTH A, PILZ S, KIRSTEN T, GIEBELER L, FREUDENBERGER J, CALIN M, ECKERT J, GEBERT A. Effect of thermomechanical processing on the mechanical biofunctionality of a low modulus Ti-40Nb alloy[J]. Journal of the Mechanical Behavior of Biomedical Materials, 2017, 65: 137-150.
- [20] BÖNISCH M, PANIGRAHI A, CALIN M, WAITZ T, ZEHETBAUER M, SKROTZKI W, ECKERT J. Thermal stability and latent heat of Nb-rich martensitic Ti-Nb alloys [J]. Journal of Alloys and Compounds, 2017, 697: 300-309.
- [21] SALLOOM R, REITH D, BANERJEE R, SRINIVASAN S G. First principles calculations on the effect of interstitial oxygen on phase stability and β - α'' martensitic transformation in Ti-Nb alloys [J]. Journal of Materials Science, 2018, 53: 11473-11487.
- [22] TALBOT C E P, CHURCH N L, HILDYARD E M, CONNOR L D, MILLER J R, JONES N G. On the stability and formation of the α'' and ω phases in Ti-Nb alloys upon cooling[J]. Acta Materialia, 2024, 262: 119409.
- [23] MAO S C, LUO J F, ZHANG Z, WU M H, HAN X D. EBSD studies of the stress-induced B2-B19' martensitic transformation in NiTi tubes under uniaxial tension and compression[J]. Acta Materialia, 2010, 58(9): 3357-3366.
- [24] 李威翰. Ti-V-Al 合金的马氏体相变与形状记忆效应[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2015.
- LI W H. Martensite transformation and shape memory effect of Ti-V-Al alloys[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2015.
- [25] HSU W, POLATIDIS E, ŠMÍD M, VAN PETEGEM S, CASATI N, VAN SWYGENHOVEN H. Deformation and degradation of superelastic NiTi under multiaxial loading [J]. Acta Materialia, 2019, 167: 149-158.
- [26] ZHANG X Y, JIA W J, MAO X N. Effect of microstructure on the tensile properties and impact toughness of TC21G titanium alloy [J]. Materials Characterization, 2022, 185: 111752.
- [27] ZHAO Q Y, SUN Q Y, XIN S W, CHEN Y N, WU C, WANG H, XU J W, WAN M P, ZENG W D, ZHAO Y Q. High-strength titanium alloys for aerospace engineering applications: A review on melting-forging process[J]. Materials Science and Engineering: A, 2022, 845: 143260.
- [28] WANG H, ZHAO Q Y, XIN S W, ZHAO Y Q, ZHOU W, ZENG W D. Microstructural morphology effects on fracture toughness and crack growth behaviors in a high strength titanium alloy [J]. Materials Science and Engineering: A, 2021, 821: 141626.
- [29] LI Y L, FANG H Z, CHEN R R, SUN S C, XUE X, GUO J J. Optimization of $(\alpha+\beta)$ microstructure and trade-off between strength and toughness: Based on $Mo_{[eq]}$ and d electron theory in β -Ti alloy[J]. Materials & Design, 2023, 231: 112022.

(责任编辑: 杨浩雪)