

引文格式: 王美, 刘何龙, 戴广永, 等. 用于航空航天的高弹合金柔性铰链性能研究[J]. 航空制造技术, 2025, 68(22): 88-96.

WANG Mei, LIU Helong, DAI Guangyong, et al. Performance of NiTiNb high-elastic alloy flexible hinges for aerospace applications[J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2025, 68(22): 88-96.

用于航空航天的高弹合金柔性铰链性能研究*

王美¹, 刘何龙², 戴广永¹, 焦云雷¹, 曾磊³, 郝世杰²

(1. 天津航天机电设备研究所, 天津 300458;

2. 中国石油大学(北京), 北京 102249;

3. 北京空间飞行器总体设计部 空间智能机器人系统技术与应用北京市重点实验室, 北京 100094)

[摘要] 针对航空航天装备在极端温度与复杂载荷耦合作用下对高可靠性高弹性柔性构件的迫切需求, 本研究通过真空熔炼-冷拔-退火协同控制技术制备出宽温域高超弹应力的 $\text{Ni}_{51}\text{Ti}_{47}\text{Nb}_2$ 合金丝材, 并采用模具热定型工艺成功研制出适用于航空航天领域的高弹柔性铰链。结果表明, 经 400 °C、10 min 退火处理的合金丝材在 -120~120 °C 温域内呈现 1616.5 MPa 的高超弹应力和 6% 的拉伸超弹应变, 其超弹应力的温度依赖性 ($d\sigma/dT=3.3 \text{ MPa}/^\circ\text{C}$) 较传统超弹 NiTi 合金降低约 50%; 所研制的柔性铰链在 -120 °C 低温环境下经历 70% 拉伸应变循环 10 次后, 形状回复率仍保持 96%, 且未出现力学性能衰减。该柔性铰链已成功应用于深空探测器的弹性展开机构, 突破了传统金属材料在极端温度-复杂载荷耦合工况下的超弹性能极限, 为航空航天装备的轻量化设计与可靠性提升提供了创新性解决方案。

关键词: 超弹合金; 柔性铰链; 马氏体相变; 宽温域; 航空航天

中图分类号: V4; TG146.2

文献标志码: A

DOI: 10.16080/j.issn1671-833x.2025.22.088



王美

工程师, 研究方向为航天器机构制造工艺技术。

随着航空航天技术的迅猛发展^[1-3], 人类对火星、月球以及小行星的探测任务日趋频繁, 航天器面临的空间环境愈发严苛, 对其结构材料的性能提出了前所未有的挑战^[4-6]。航天器结构材料不仅需在 -120~120 °C 宽温域环境中保持长期稳定的服役性能, 还需承受交变热机械载荷。在发射、着陆与在轨展开过程中, 航天器结构材料须具备卓越的大变形能力、能量耗散特性以及抗疲劳性能^[7-9]。此外, 在严苛的质量与空间约束条件下, 航天器结构设计正向轻量化、柔性可展开与多功能集成方向发展, 亟需兼具宽温域、高强度、高循

环稳定性的超弹性材料与构件^[10-12]。

与传统金属材料相比, NiTi 形状记忆合金不仅具有独特的形状记忆效应, 在特定温域内还展现出超弹性能, 已成为航空航天材料领域的研究热点之一。该材料在嫦娥五号探月任务中用于月壤自动封口器, 在 NASA 地球观测 1 号卫星上用作 SMA 带的太阳翼帆板折叠展开铰链, 在波音公司研发的可变锯齿结构 (Variable geometry chevron, VGC) 中作为主动降噪驱动器驱动装置, 应用于 NASA 火星车轮胎等^[12]。然而, Liu 等^[13]通过分析粗晶 NiTi 合金在不同温度下的拉伸应力-应变曲线,

* 基金项目: 国家重点研发计划 (2022YFB4600500)。

发现其马氏体相变临界应力与测试温度之间存在良好的线性关系。其温度依赖性 ($d\sigma/dT$) 为 $6.07 \text{ MPa}/^\circ\text{C}$ ，与文献 [14–16] 报道的粗晶 NiTi 合金力致 $B_2 \rightarrow B'_{19}$ 相变临界应力的温度依赖性 ($d\sigma/dT=6\sim 7 \text{ MPa}/^\circ\text{C}$) 一致，这一特性导致其超弹性温域通常小于 80°C 。Wang 等 [17] 的研究表明，与粗晶相比，纳米晶 NiTi 合金的温度敏感性较低，但其超弹性温域仍然只有 54°C 。此外，NiTi 合金的超弹应力普遍低于 600 MPa [14, 18–19]，难以满足航天领域对宽温域适应性和高力学强度超弹性材料的迫切需求。由于温度敏感性和强度限制，NiTi 合金在可展开机构、振动抑制系统和热控组件等关键航天器部件的实际工程应用中表现出严重的局限性，例如在深空探测任务中，昼夜温差超过 200°C 的火星表面环境会导致形状记忆执行器的超弹应力漂移超过设计容限。

少量 Nb 置换固溶在保持单相 B_2 母相的前提下，可直接调控“相变–力学”耦合：Nb 引入的局域晶格畸变与弹性模量错配提高了位错的临界滑移应力，从而提升了屈服强度与相变应力 [20]。Nb 在马氏体相界的溶质–界面相互作用为界面迁移提供了附加阻力，使应力诱发相变的成核与传播过程更加平稳，并有效降低了临界应力的温度敏感性 ($d\sigma/dT$)。此外，Nb 对 B_2 相热力学稳定性及相变特征温度具有调控作用，使材料能够在更宽的温域内以更小温度敏感性保证可逆相变 [21]。综上，Nb 的置换固溶效应为复杂热–力耦合环境下实现宽温域稳定超弹性提供了有效路径。

1 试验及方法

1.1 NiTiNb 合金丝材的制备及测试方法

采用真空感应熔炼技术制备 $\text{Ni}_{51}\text{Ti}_{47}\text{Nb}_2$ 合金铸锭，经锻造及多次热拉拔工艺制备 $\Phi 1.0 \text{ mm}$ 热拔丝

材。在室温条件下对热拔丝实施冷拉拔加工处理，总冷拉拔变形量 $\geq 50\%$ 。为精确调控合金丝材的晶粒尺寸及微观组织，将冷拔后的丝材分别在 400°C 、 450°C 和 500°C 温度下退火 10 min 。利用 KQL WDT II–20 型万能拉伸试验机对样品进行单轴拉伸–卸载试验，该设备配备有控温精度较高的温控箱，能够覆盖 $-196\sim 200^\circ\text{C}$ 的测试温度范围，样品直径为 0.3 mm ，标距为 50 mm 。试验采用应变控制方式，应变速率为 $1 \times 10^{-3} \text{ s}^{-1}$ ，以保证不同温度下数据的可比性。为避免初始夹持与温度波动对结果的影响，在正式加载前施加 $10\sim 15 \text{ MPa}$ 的预加载应力。采用 NANOPIX–WE 穿透式广角 X 射线衍射装置，使用 Mo 旋转阳极靶 ($\lambda=0.7093 \text{ \AA}$)，工作条件为 $40 \text{ kV}/40 \text{ mA}$ ，光斑尺寸约 $200 \mu\text{m}$ 。为保证透射模式下获得清晰信号，样品直径为 0.3 mm ，标距为 25 mm 。采谱过程中，拉伸应变以位移控制方式加载，应变速率为 $3 \times 10^{-4} \text{ s}^{-1}$ ，每级应变步长为 0.5% ，每步曝光时间 30 s 。原位拉伸由配套的微型拉伸机完成。利用 NETZSCH DSC 214 型差示扫描量热仪 (DSC) 表征样品在升降温过程中的相变行为，升降温速率均为 $10 \text{ K}/\text{min}$ 。

1.2 NiTiNb 合金柔性铰链的制备及测试方法

采用模具热定型工艺制备 NiTiNb

合金柔性铰链。柔性铰链的尺寸如图 1 所示。采用 AGS–X 型万能拉伸试验机测试柔性铰链样品在不同温度下拉伸 6 mm 循环 10 次的力学性能，加卸载速率为 $0.5 \text{ mm}/\text{s}$ 。

2 结果与讨论

2.1 显微组织表征

随着退火温度的升高，合金的显微组织表现出显著的晶粒长大趋势 (图 2)。在 400°C 时，组织中均以均匀弥散的细小晶粒为主，平均尺寸约 21.1 nm ；当温度升至 450°C ，晶粒平均尺寸增大至约 42.2 nm ，部分等轴晶形貌清晰可见；在 500°C 时，晶粒进一步粗化至约 57.5 nm ，并伴随少量大尺寸晶粒形成。

2.2 超弹特性研究

图 3 展示了经不同退火工艺 (400°C 、 10 min ； 450°C 、 10 min ； 500°C 、 10 min) 热处理的 NiTiNb 合金丝在 $-120\sim 120^\circ\text{C}$ 温度范围内进行 6% 应变加载–卸载循环后的应力–应变曲线。3 组试样在整个测试温区内均呈现典型类吕德斯带型应力诱导马氏体相变，平台的上、下应力分别对应正、逆相变应力大小，作为评估超弹性能的关键指标 [22–24]。经 400°C 、 10 min 短时退火后，丝材中形成约 20 nm 的纳米晶 [21]，细小晶粒提高了母相的弹性性能 [20]，使 $B_2 \rightarrow B'_{19}$ 相变的临界应力显著上升，在 $-120\sim 120^\circ\text{C}$ 范

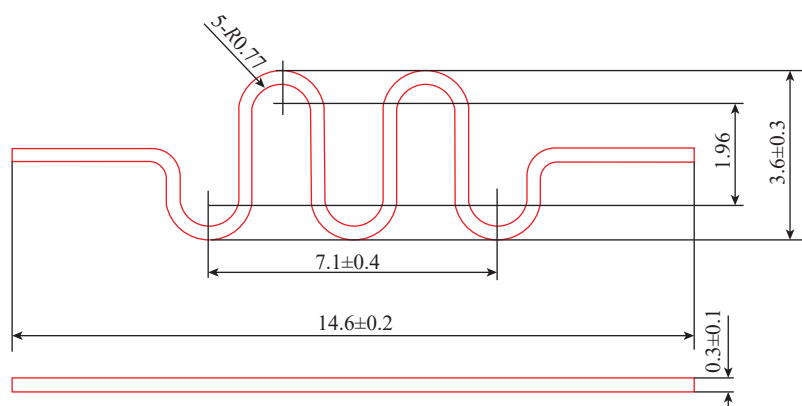


图 1 NiTiNb 合金柔性铰链尺寸示意图 (mm)

Fig.1 Schematic diagram showing dimensional parameters of NiTiNb alloy flexible hinge (mm)

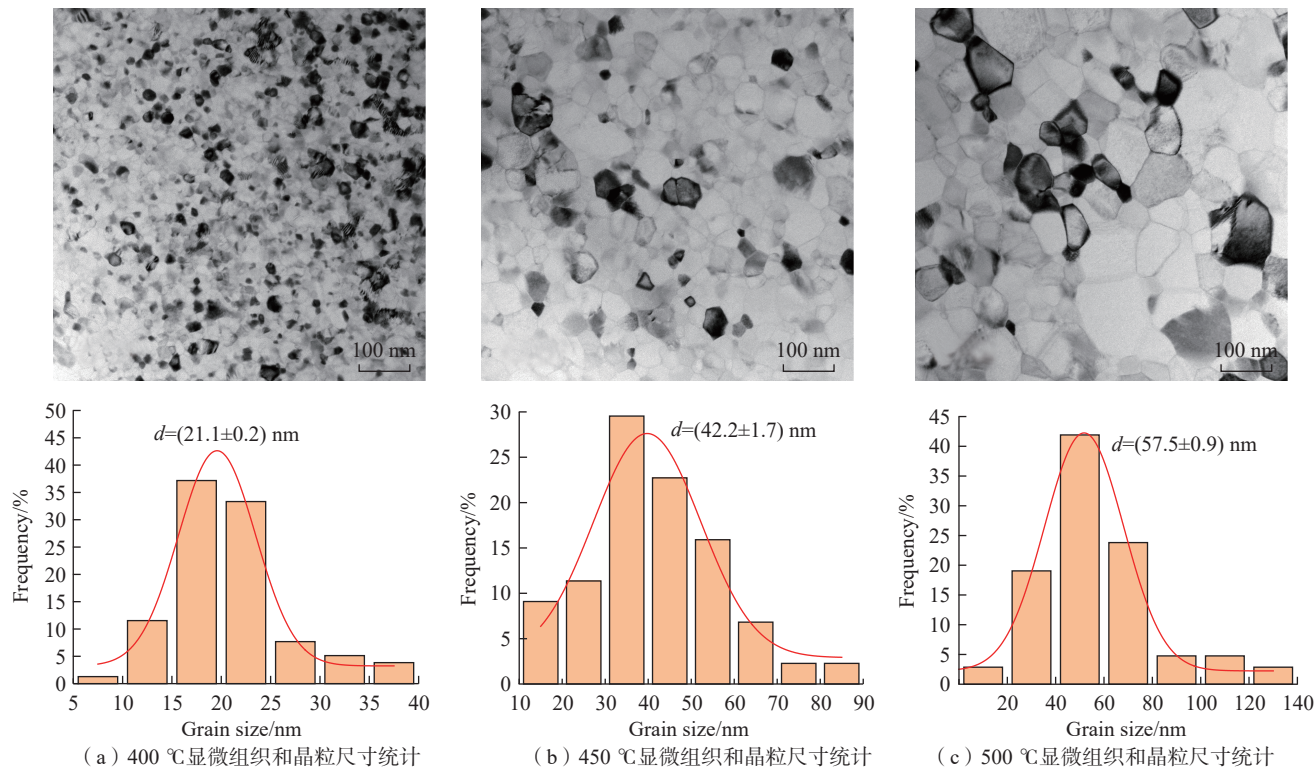


图2 不同退火温度下合金的显微组织与晶粒尺寸分布

Fig.2 Microstructure and grain size distribution of the alloy after annealing at different temperatures

围相变临界应力达 1616.5 MPa, 可回复应变达 6%。并且通过细晶强化与铌固溶强化双重作用^[19,25], 有效抑制了位错产生与滑移, 保证了相变主导的可逆变形。当退火温度升至 500 °C、10 min 时, 晶粒尺寸增至约 60 nm^[21]。试样在 120 °C 时残余应变达 0.91%, 表明随晶粒尺寸增大, 相变临界应力略有下降, 但晶粒尺寸增大明显降低了屈服强度。一旦屈服强度低于相变临界应力, 即优先激活位错滑移, 产生不可逆变形^[22]。该竞争机制提示, 需要通过微观组织设计来平衡相变临界应力与屈服强度, 以拓宽材料的高温超弹应用范围。

为系统分析不同退火工艺 (400 °C、10 min; 450 °C、10 min; 500 °C、10 min) NiTiNb 合金丝在 -120~120 °C, 经 6% 拉伸-卸载循环的力学响应, 统计图 3 中所有应力-应变曲线的上平台应力和下平台应力, 并计算出其平衡应力和应力滞后随拉伸温度的变化。其中, 平衡应力 = (上平

台应力 + 下平台应力) / 2, 应力滞后 = 上平台应力 - 下平台应力, 相关统计图如图 4 所示。

图 4 (a) 表明, 3 组样品的上平台应力随温度升高呈线性上升趋势, 400 °C 退火样品整体应力水平最高, 归因于晶粒细化程度更高, 提升了材料的相变驱动力^[21], 通过计算, 上平台应力的温度依赖性 $d\sigma/dT$ 约为 3.3 MPa/°C。图 4 (b) 显示, 下平台应力在 -120~60 °C 区间上升, 60 °C 后转为下降。图 4 (c) 显示, 平衡应力在 -120~90 °C 区间上升, 90 °C 后转为下降, 反映出高温区间内塑性变形增强导致可回复应变减小。图 4 (d) 所示, 应力滞后随温度变化, 呈“U”形曲线, 先减小后增大, 表现出温度对相变行为的双重调控效应。高温下因屈服强度下降、相变临界应力上升, 系统塑性变形增强, 能耗增大, 应力滞后扩大; 低温下马氏体相稳定性增强, 逆相变困难, 同样导致能量消耗上升。上述趋势在低温区尤为

显著, 尤其对 500 °C、10 min 退火样品表现更为敏感, 说明晶粒粗化后材料的逆相变阻力提升, 对滞后行为控制能力下降。

2.3 相变行为研究

图 5 显示了经 400 °C、10 min, 450 °C、10 min, 以及 500 °C、10 min 处理后的 DSC 曲线。结果表明, 在 -120~120 °C 温度范围内, 加热和冷却过程中均未观察到明显的热流峰, 说明在该温度范围内未发生热致马氏体相变。

图 6 (a) 和 (b) 展示了经 450 °C、10 min 退火处理的 NiTiNb 合金丝在室温拉伸至 8% 并卸载过程中的应力-应变曲线, 以及 XRD 谱图变化, 揭示出应力诱发相变的微观机制。在初始加载阶段 (O~A 段), B₂ 母相 (110) 晶面衍射峰保持稳定, 表明此阶段合金主要经历弹性变形, 未发生显著相变; 当应变达到临界值约 2.5%, 材料进入应力平台阶段 (B~D 段), XRD 谱图中 B₂ (110) 衍射峰

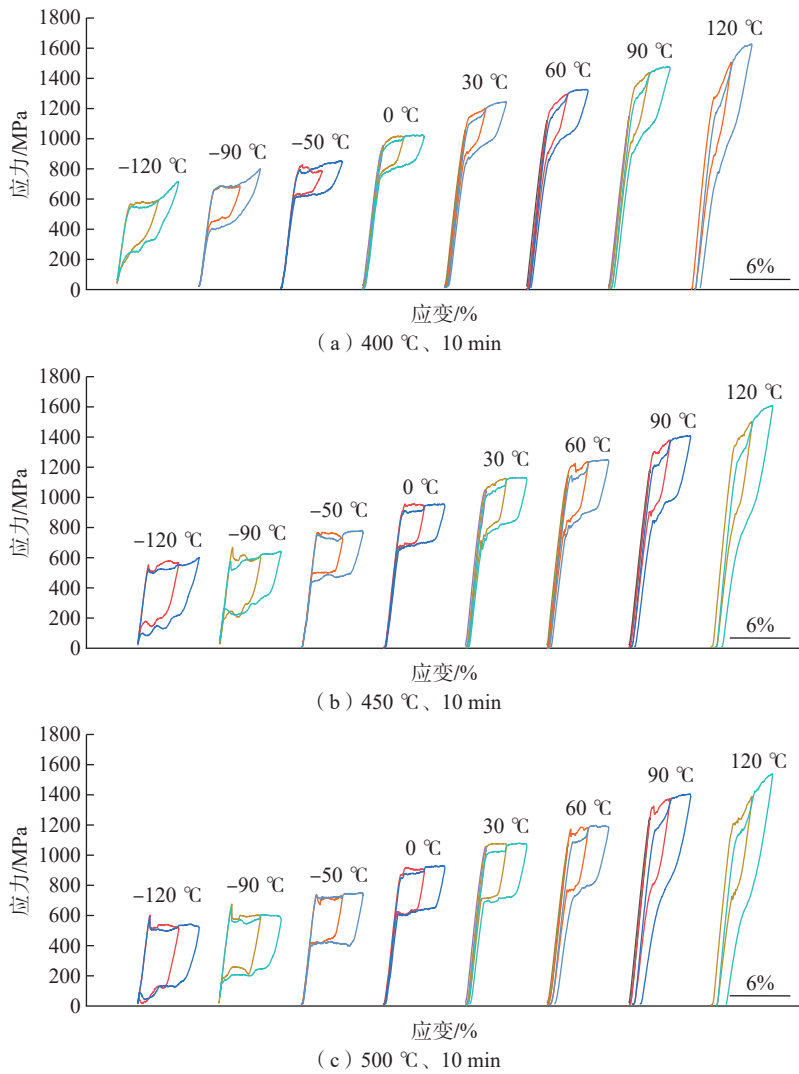


图3 不同退火工艺制备的 $\text{Ni}_{51}\text{Ti}_{17}\text{Nb}_2$ 合金丝材在不同温度下拉伸 6% 后卸载的应力-应变曲线
 Fig.3 Stress-strain curves of $\text{Ni}_{51}\text{Ti}_{17}\text{Nb}_2$ alloy wires prepared by different annealing processes and unloaded after 6% tensile strain at different temperatures

强度显著减弱,出现 B'_9 马氏体特征峰 (111)、 $(\bar{1}\bar{1}1)$ 和 (001),清晰表征出应力诱导的 $B_2 \rightarrow B'_9$ 相变过程,符合典型的吕德斯带型相变行为^[26-28];在随后的卸载阶段 ($D \sim G$ 段), B'_9 相特征峰逐渐衰减, B_2 相特征峰重新出现,说明马氏体逆相变得以发生, B_2 母相结构恢复至初始状态。图 6 (c) 和 (d) 的定量结果进一步揭示了相变特征,在加载 0~4% 区间, B_2 (110) 峰强度逐步下降,而 B'_9 (001) 峰尚未出现,说明测点仍以母相为主;当应变超过 4% 进入平台阶段时 (对应点 C), B_2 (110) 无法单独积分,表明吕德斯带已推进至检测区并触发

明显的 $B_2 \rightarrow B'_9$ 转变。卸载过程中,两者沿相反方向演化但存在轻微滞后。与此同时, B_2 (110) 半高宽随加载降低,卸载时部分恢复,表明相变伴随缺陷/微应变重排,但卸载半高宽高于加载,证明材料存在一定的残余变形。上述结果表明, NiTiNb 合金在应力作用下具有良好的可逆相变能力,从微观层面验证了其超弹性行为的相变基础,为后续柔性构件的性能设计与优化提供了有力支撑。

2.4 定型柔性铰链力学性能研究

通过热定型工艺在定型模具中加工 NiTiNb 合金丝,制备出柔性铰链结构 (图 1)。本节重点分析热定

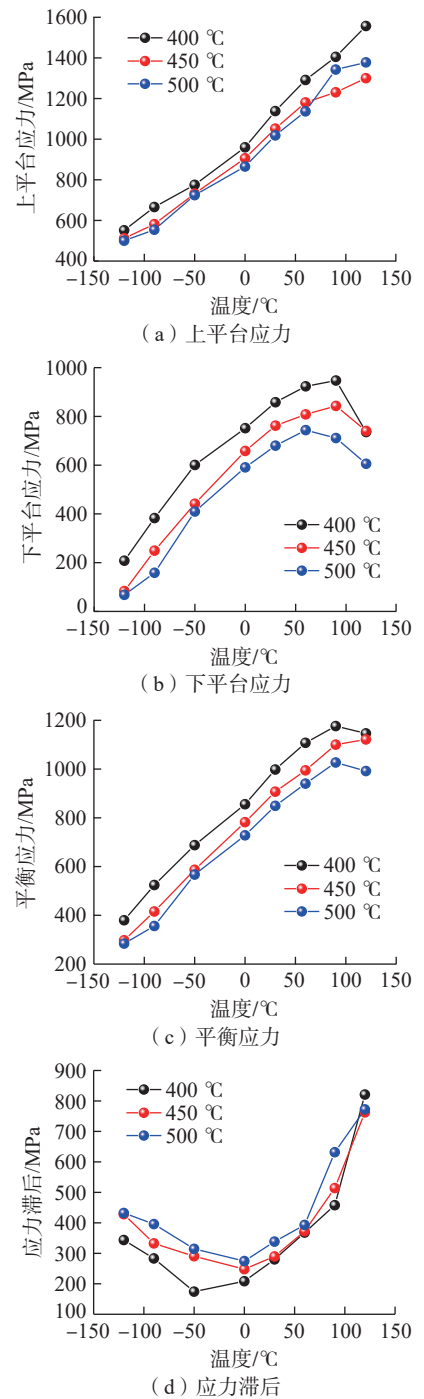


图4 应力-应变曲线的性能统计图
 Fig.4 Statistical charts of performance characteristics derived from stress-strain curves

型工艺对柔性铰链力学性能的影响。经 400 °C、30 min, 450 °C、30 min 和 500 °C、30 min 定型处理的柔性铰链,在低温 (-120 °C)、室温 (20 °C) 以及高温 (120 °C) 环境下进行 6 mm 拉伸循环 10 次测试。分析了每

次循环下柔性铰链的最大拉伸力、不可恢复变形量及吸能量与循环次数的关系。

图7系统展示了经不同热定型处理(400℃、30 min; 450℃、30 min和500℃、30 min)制备的柔性铰链

在极端低温环境(-120℃)下进行6 mm拉伸循环测试的力-位移曲线及相关统计分析。从图7(a)~(c)可以观察到,3种定型温度下柔性铰链在第1次与第10次循环中表现出一致的力学响应,表明柔性铰链在极

端低温环境下具有优异的循环稳定性。图7(d)进一步统计了最大拉伸力随循环次数的变化规律,结果显示3种样品均呈现稳定的力学输出,其中最大拉伸力随定型温度升高呈下降趋势。特别是400℃、30 min定型样品第10次循环的最大力值,比500℃、30 min定型样品高约3 N,表明低温定型处理有助于提升柔性铰链的结构刚度。图7(e)揭示了不可恢复变形量随循环次数的增长规律。3种样品均表现出随着循环次数增加而增长的趋势,且定型温度越高,最终的不可恢复变形量越低。在第10次循环时,500℃、30 min定型样品的塑性变形最小,表明高温定型工艺显著增强了柔性铰链的形状保持能力与抗疲劳性能,其循环10次后仍保持96%的形状回复率。

图7(f)呈现了柔性铰链每次

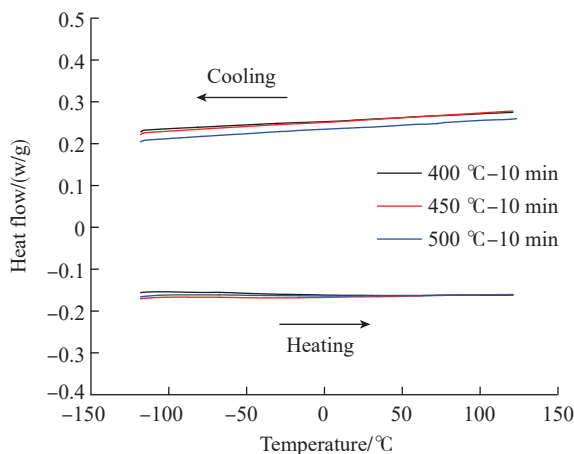


图5 NiTiNb合金丝材在-120~120℃的DSC曲线
Fig.5 DSC curves of NiTiNb alloy wire at -120~120℃

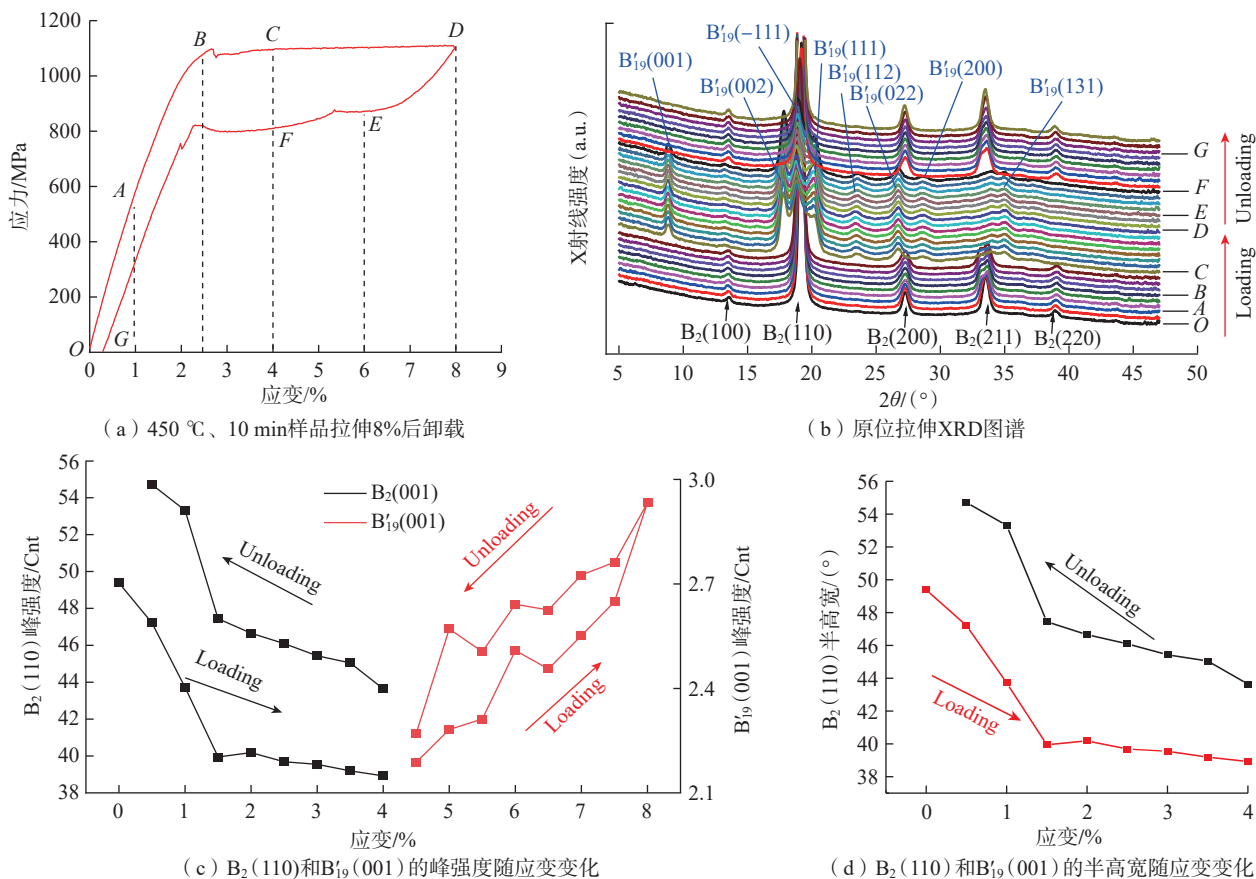


图6 450℃、10 min退火样品单拉伸曲线、原位拉伸XRD图谱和衍射峰的变化
Fig.6 Single tensile curve, in-situ tensile XRD patterns, and diffraction peak changes of sample annealing at 450℃ for 10 min

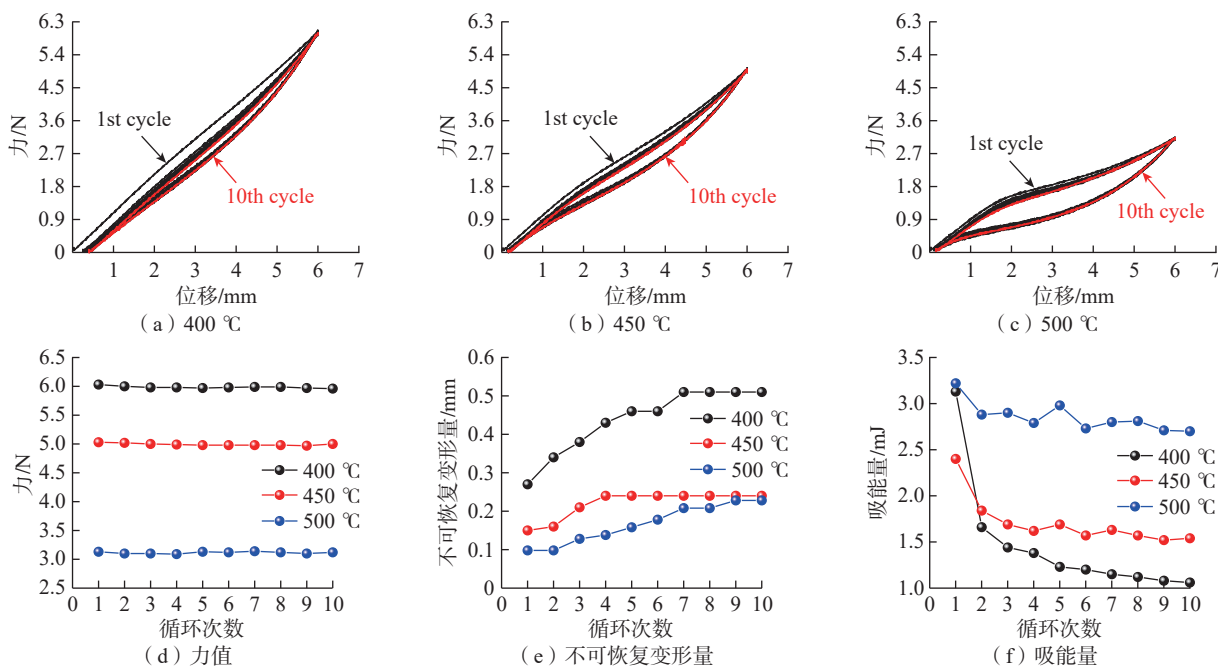


图7 不同定型工艺制备柔性铰链在低温(-120 °C)拉伸6 mm循环10次的力-位移曲线与性能统计图

Fig.7 Force-displacement curves and performance statistics of flexible hinges prepared by different shaping processes after 10 cycles of stretching 6 mm at low temperature (-120 °C)

循环吸能量的变化情况。首次循环后,所有样品的吸能量快速下降并趋于稳定,其中500 °C、30 min定型样品的吸能量最高,体现出其在低温条件下较强的吸能与阻尼能力。

综上所述,从低温循环性能的角度分析,尽管400 °C、30 min定型样品表现出较高的结构刚度,但500 °C、30 min定型工艺更能兼顾抗变形能力与吸能特性,适用于低温振动吸收场景。

图8展示了经不同定型工艺(400 °C、30 min; 450 °C、30 min和500 °C、30 min)处理的柔性铰链在室温(20 °C)环境中进行6 mm拉伸的循环力学性能演化规律。图8(a)~(c)中,第2次与第10次循环的力-位移曲线显示出高度重合性,未表现出异常突变,表明3种定型温度处理的柔性铰链在室温下表现出优异的循环稳定性。图8(d)显示,随循环次数增加,3种样品拉伸6 mm时的力值基本维持稳定,其中400 °C、30 min样品的力值高于其他两组,表明低温定型工艺有助于增强铰

链的结构刚度。在图8(e)中,3种样品的不可恢复变形量随着循环次数的增加而持续上升,其中500 °C、30 min定型样品的不可恢复变形量最低,表明该处理工艺使NiTiNb合金的超弹性性能最佳。图8(f)展示了3种样品的吸能量与循环次数之间的关系,首次循环中吸能量最高,随后迅速下降并趋于稳定;在稳定循环阶段,500 °C、30 min定型样品显示出更高的能量吸收能力,表明该样品中参与力致马氏体相变的量最大。

综上所述,高温定型工艺有助于优化铰链在室温下的形变控制与能量耗散能力,而低温定型工艺则提供更强的初始结构刚度,适用于力学输出要求更高的应用场景。

图9进一步分析了经不同热定型工艺(400 °C、30 min; 450 °C、30 min和500 °C、30 min)制备的柔性铰链在120 °C高温环境下进行6 mm拉伸循环测试的力学性能。图9(a)~(c)显示,柔性铰链在高温下仍能顺利完成10次拉伸循环,未出现断裂

或失效现象,验证了柔性铰链在高温极端环境下的循环力学可靠性。图9(d)统计了最大拉伸力随循环次数的变化趋势,结果表明3种样品的最大力值均随着循环次数增加而逐渐下降,其中400 °C、30 min样品下降幅度最大,下降了5%,表明其高温力学性能衰退速度较快;相比之下,500 °C、30 min样品仅下降了3.7%,表现出更高的力学稳定性和循环耐久性。图9(e)分析了不可恢复变形量随循环次数的积累情况,结果显示,不可恢复变形量随着循环次数逐渐积累,但500 °C、30 min定型样品的积累速度最慢,表明其在高温环境下具有更卓越的抗塑性变形能力。图9(f)反映了各样品吸能量随循环次数的典型下降趋势,前两次循环后吸能量迅速下降,并逐渐趋于稳定;在稳定阶段,500 °C、30 min样品吸能量最高,表明该样品中参与力致马氏体相变的数量最大。

综上所述,500 °C、30 min定型处理显著提升了柔性铰链在高温动态载荷环境下的服役性能,其较低的

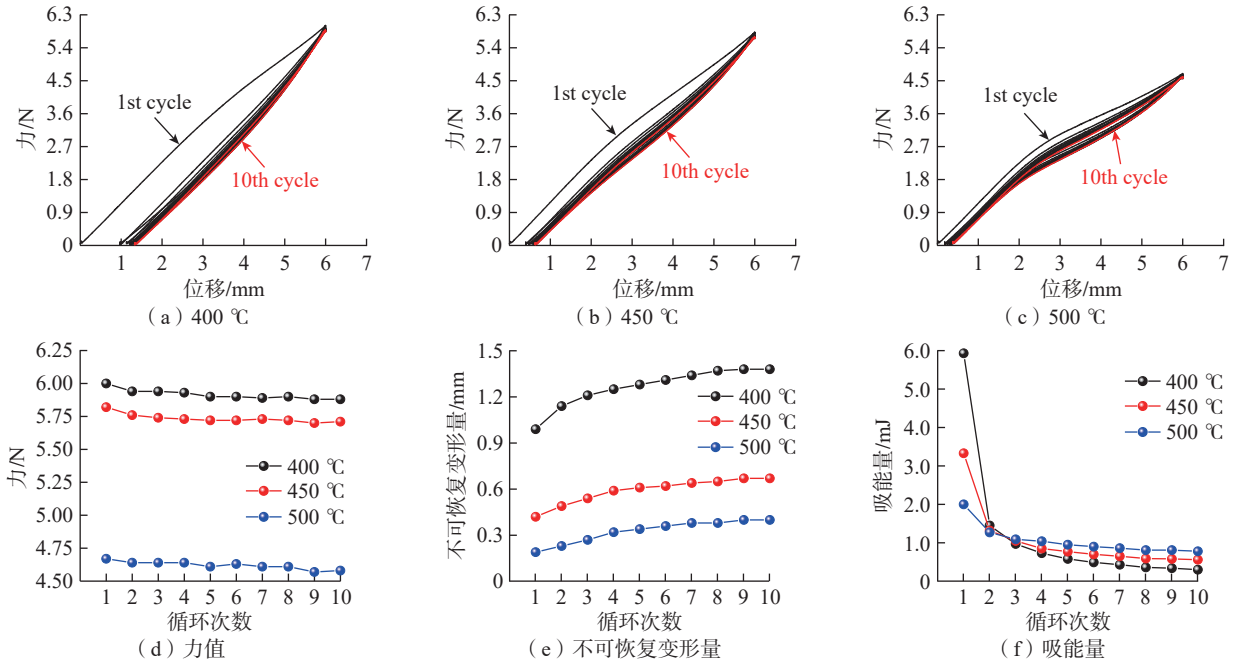


图8 不同定型工艺制备柔性铰链在室温(20 °C)拉伸6 mm循环10次的力-位移曲线与性能统计图
 Fig.8 Force-displacement curves and performance statistics of flexible hinges prepared by different shaping processes after 10 cycles of stretching 6 mm at room temperature (20 °C)

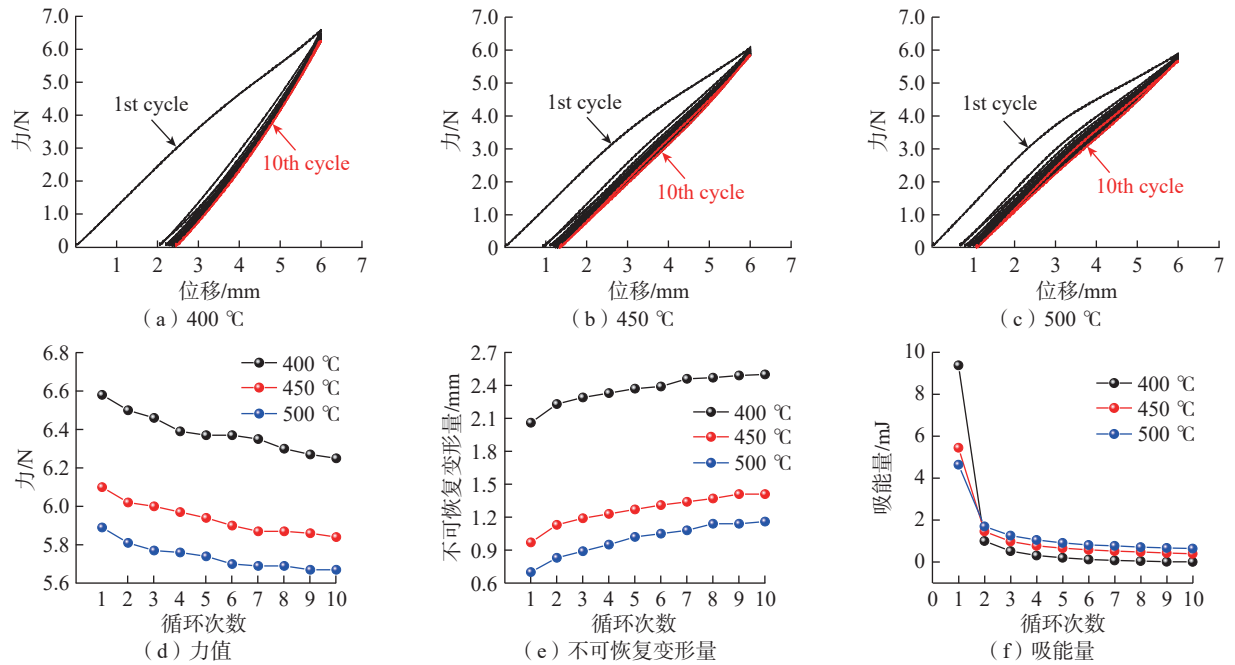


图9 采用不同定型工艺制备柔性铰链在高温(120 °C)拉伸6 mm循环10次的力-位移曲线与性能统计图
 Fig.9 Force-displacement curves and performance statistics of flexible hinges prepared by different shaping processes after 10 cycles of stretching 6 mm at high temperature (120 °C)

塑性变形和较高的能量耗散能力优于400 °C、30 min与450 °C、30 min定型样品,非常适合高温复杂工况下柔性结构件的应用需求。

3 结论

本研究聚焦于NiTiNb合金丝材的超弹性性能调控及柔性铰链在多

温区循环载荷条件下的力学响应,以探索其在深空环境中作为可展开机构核心构件的应用潜力。通过热处理和热定型工艺的优化,成功实现了

柔性铰链在 $-120\sim 120\text{ }^{\circ}\text{C}$ 宽温域下的稳定形状恢复和吸能性能, 主要研究结论如下。

(1) NiTiNb 合金丝在 $-120\sim 120\text{ }^{\circ}\text{C}$ 宽温域内表现出卓越的超弹性性能。其中, $400\text{ }^{\circ}\text{C}$ 、10 min 退火样品在 $120\text{ }^{\circ}\text{C}$ 时的上平台应力可达 1616.5 MPa; 而 $500\text{ }^{\circ}\text{C}$ 、10 min 退火样品在 $120\text{ }^{\circ}\text{C}$ 时出现 0.91% 的残余应变, 表明在高温条件下其超弹性受到屈服强度的限制。

(2) 通过原位 XRD 分析, 明确了应力驱动的 $B_2\rightarrow B'_{19}$ 马氏体相变及其逆相变路径, 阐明了 NiTiNb 合金超弹性行为的物理机制。

(3) 柔性铰链在 3 种温度下 ($-120\text{ }^{\circ}\text{C}$ 、 $20\text{ }^{\circ}\text{C}$ 和 $120\text{ }^{\circ}\text{C}$) 经 10 次 6 mm 循环拉伸测试后展现出优异的循环稳定性。其中, $500\text{ }^{\circ}\text{C}$ 、30 min 定型样件的不可恢复变形量最小, 吸能量最高, 且最大力值下降幅度最小, 适合高温复杂工况下柔性结构件的应用需求。

参考文献

- [1] 张轶男, 彭兢, 邹乐洋, 等. 国际行星保护发展综述[J]. 深空探测学报, 2019, 6(1): 3-8.
- ZHANG Yinan, PENG Jing, ZOU Leyang, et al. An overview of planetary protection development[J]. Journal of Deep Space Exploration, 2019, 6(1): 3-8.
- [2] 徐冲, 辛冰牧, 吴斌, 等. 国际行星保护政策解读与技术前瞻[J]. 深空探测学报, 2019, 6(1): 16-22.
- XU Chong, XIN Bingmu, WU Bin, et al. Overview of policy and technology developments of international planetary protection[J]. Journal of Deep Space Exploration, 2019, 6(1): 16-22.
- [3] 张兰涛, 杨宏, 印红, 等. 行星保护的防控环节分析及实施建议[J]. 航天器工程, 2016, 25(5): 105-110.
- ZHANG Lantao, YANG Hong, YIN Hong, et al. Prevention and control links analysis and implementation suggestions of planetary protection[J]. Spacecraft Engineering, 2016, 25(5): 105-110.
- [4] HU S, HE H C, JI J L, et al. A dry lunar mantle reservoir for young mare basalts of Chang'e-5[J]. Nature, 2021, 600(7887): 49-53.
- [5] LI Q L, ZHOU Q, LIU Y, et al. Two-billion-year-old volcanism on the Moon from Chang'e-5 basalts[J]. Nature, 2021, 600(7887): 54-58.
- [6] TIAN H C, WANG H, CHEN Y, et al. Non-KREEP origin for Chang'e-5 basalts in the procellarum KREEP terrane[J]. Nature, 2021, 600(7887): 59-63.
- [7] 褚英志, 徐航, 张晓, 等. 行星保护在深空探测任务中的实践探讨[J]. 上海航天(中英文), 2025, 42(3): 9-17.
- CHU Yingzhi, XU Hang, ZHANG Xiao, et al. Practical exploration of planetary protection in deep space exploration missions[J]. Aerospace Shanghai (Chinese & English), 2025, 42(3): 9-17.
- [8] 陈宏博, 张兰涛, 袁俊霞, 等. 深空探测器表面采样技术适应性研究[J]. 航天器环境工程, 2022, 39(2): 200-204.
- CHEN Hongbo, ZHANG Lantao, YUAN Junxia, et al. Study on adaptability of surface sampling technology for deep space detector[J]. Spacecraft Environment Engineering, 2022, 39(2): 200-204.
- [9] 杨斌久, 王振威, 盖玉先. 航天器非火工释放装置研究进展[J]. 机械设计与制造, 2018(3): 267-269.
- YANG Binjiu, WANG Zhenwei, GAI Yuxian. Research progress of non-pyrotechnic releasing devices on the spacecraft[J]. Machinery Design & Manufacture, 2018(3): 267-269.
- [10] 曹乃亮, 董得义, 李志来. 基于形状记忆合金的空间分离装置研究进展[J]. 航天返回与遥感, 2014, 35(5): 9-18.
- CAO Nailiang, DONG Deyi, LI Zhilai. Non-pyrotechnic separation devices research based on shape memory alloy[J]. Spacecraft Recovery & Remote Sensing, 2014, 35(5): 9-18.
- [11] 高滨. 形状记忆合金在航天器分离机构上的应用[J]. 航天返回与遥感, 2005, 26(1): 48-52.
- GAO Bin. Shape memory alloys and their application to aerospace separation mechanisms[J]. Spacecraft Recovery & Remote Sensing, 2005, 26(1): 48-52.
- [12] 渠磊, 闫泽红, 饶智祥, 等. 形状记忆合金在航空航天领域的应用研究综述[J]. 航空动力学报, 2022, 37(10): 2127-2141.
- QU Lei, YAN Zehong, RAO Zhixiang, et al. Review on shape memory alloys' application in field of aerospace[J]. Journal of Aerospace Power, 2022, 37(10): 2127-2141.
- [13] LIU Y N, MAHMUD A, KURSAWE F, et al. Effect of pseudoelastic cycling on the Clausius-Clapeyron relation for stress-induced martensitic transformation in NiTi[J]. Journal of Alloys and Compounds, 2008, 449(1-2): 82-87.
- [14] MIYAZAKI S, OTSUKA K, SUZUKI Y. Transformation pseudoelasticity and deformation behavior in a Ti-50.6at%Ni alloy[J]. Scripta Metallurgica, 1981, 15(3): 287-292.
- [15] SONG Z L, DAI H H, SUN Q P. Propagation stresses in phase transitions of an SMA wire: New analytical formulas based on an internal-variable model[J]. International Journal of Plasticity, 2013, 42: 101-119.
- [16] LIU Y N, GALVIN S P. Criteria for pseudoelasticity in near-equiatomic NiTi shape memory alloys[J]. Acta Materialia, 1997, 45(11): 4431-4439.
- [17] WANG T, MA Z, RAO X, et al. Temperature-dependence of superelastic stress in nanocrystalline NiTi with complete transformation capability[J]. Intermetallics, 2020, 127: 106970.
- [18] LIU H L, XIAO Y, ZHOU M, et al. Reusable energy-absorbing NiTi alloy assembled mechanical metamaterials with ultra-large recoverable strain and ultra-high cyclic stability[J]. Applied Materials Today, 2025, 44: 102790.
- [19] FENG B, LIU H L, YANG Y, et al. Endowing low fatigue for elastocaloric effect by refined hierarchical microcomposite in additive manufactured NiTiCuCo alloy[J]. International Journal of Extreme Manufacturing, 2024, 6(4): 045501.
- [20] STACHOWIAK G B, MCCORMICK P G. Shape memory behaviour associated with the R and martensitic transformations in a NiTi alloy[J]. Acta Metallurgica, 1988, 36(2): 291-297.
- [21] FANG C, WANG J W, XIAO Y, et al. Superelastic nanocrystalline NiTiNb SMA cables with wide working temperature window for seismic application[J]. Construction and Building Materials, 2025, 483: 141787.
- [22] LIANG X, XIAO F, JIN M J, et al. Elastocaloric effect induced by the rubber-like behavior of nanocrystalline wires of a Ti-50.8Ni (at.%) alloy[J]. Scripta Materialia, 2017, 134: 42-46.
- [23] KONG X G, YANG Y, REN Y, et

al. In-situ high energy X-ray diffraction study of deformation behavior in Nb nanoparticle-martensitic NiTi composite wire[J]. Composites Part B: Engineering, 2023, 263: 110856.

[24] SITTNER P, LIU Y, NOVAK V. On the origin of Lüders-like deformation of NiTi shape memory alloys[J]. Journal of the Mechanics and Physics of Solids, 2005, 53(8): 1719–1746.

[25] MIYAZAKI S, OHMI Y, OTSUKA K, et al. Characteristics of deformation and transformation pseudoelasticity in Ti–Ni alloys[J]. Le Journal de Physique Colloques, 1982, 43(C4):

C4-255–C4-260.

[26] WANG S, CUI L S, HAO S J, et al. Locality and rapidity of the ultra-large elastic deformation of Nb nanowires in a NiTi phase-transforming matrix[J]. Scientific Reports, 2014, 4: 6753.

[27] LI Z H, CAI J X, ZHAO Z H, et al. Local chemical inhomogeneity enables superior strength-ductility-superelasticity synergy in additively manufactured NiTi shape memory alloys[J]. Nature Communications, 2025, 16: 1941.

[28] WANG C, FENG B, CHEN J, et al.

The effect of laser scanning strategy on NiTi shape memory alloys processed by laser powder bed fusion[J]. Materials Characterization, 2024, 215: 114185.

通信作者：郝世杰，教授，博士，研究方向为形状记忆合金。

刘何龙，博士，研究方向为形状记忆合金。

Performance of NiTiNb High-Elastic Alloy Flexible Hinges for Aerospace Applications

WANG Mei¹, LIU Helong², DAI Guangyong¹, JIAO Yunlei¹, ZENG Lei³, HAO Shijie²

(1. Tianjin Institute of Mechanical and Electrical Equipment, Tianjin 300458, China;

2. China University of Petroleum, Beijing 102249, China;

3. Beijing Key Laboratory of Intelligent Space Robotic System Technology and Applications, Beijing Institute of Spacecraft System Engineering, Beijing 100094, China)

[ABSTRACT] To address the urgent demand for high-reliability, high-elasticity flexible components in aerospace applications under extreme temperatures and complex load coupling, this study developed Ni₅₁Ti₄₇Nb₂ alloy wires using a vacuum melting-cold drawing-annealing synergistic control process. Further, high-elastic flexible hinges tailored for aerospace applications were successfully fabricated via mold-based thermal shaping. Experimental results demonstrate that alloy wires annealed at 400 °C for 10 min exhibit exceptional superelastic stress of 1616.5 MPa and a tensile superelastic strain of 6% across a wide temperature range from –120 °C to 120 °C. Notably, the temperature dependence of superelastic stress ($d\sigma/dT=3.3$ MPa/°C) is reduced by approximately 50% compared to traditional NiTi alloys. The flexible hinges, subjected to 70% tensile strain cyclic testing for 10 cycles at –120 °C, retained a shape recovery rate of 96% without degradation in mechanical performance. These hinges have been successfully deployed in the elastic deployment mechanisms of deep space exploration probes, overcoming the limitations of conventional metallic materials under extreme temperature and complex load coupling conditions. This achievement marks a significant advancement in superelastic performance, offering an innovative solution for lightweight design and enhanced reliability in aerospace systems.

Keywords: Superelastic alloy; Flexible hinges; Martensitic phase transformation; Wide temperature range;

Aerospace applications

(责编 七七)