

超强韧多功能钛合金及其制备方法



制造

生物医学与基因工程/化工产品

纳米技术与新材料

机会

先进钛合金的开发在平衡多种关键性能以满足不同高性能应用需求方面面临重大挑战。在生物医学领域，广泛使用的商用合金如Ti-6Al-4V (TC4)和Ti-Ni含有钒、铝、镍等元素，这些元素存在毒性、致敏性风险，并且若植入体腐蚀可能引发不良生物反应。虽然新型生物相容性β-Ti合金（如Ti-Nb、Ti-Nb-Zr）解决了毒性问题，但其强度往往不足，限制了它们在承重植入物或多环境场景中的应用。在航空航天和汽车工业中，需求是具备卓越强度、延展性和抗疲劳性的材料。传统钛合金经常表现出强度与延展性之间的权衡；例如，通过相变诱导塑性（TRIP）或孪晶诱导塑性（TWIP）等机制实现高加工硬化率，通常以降低屈服强度为代价。此外，具有伪弹性等功能特性的合金（如形状记忆合金）通常缺乏极端条件所需的超高强度。因此，市场和技术上存在一个紧迫的机遇，需要一种新型钛合金，能够和谐地整合超高强度、显著延展性、优异的抗疲劳性、功能性伪弹性和固有的生物相容性，以满足生物医学、航空航天和汽车领域的高要求应用。

技术

本发明通过一种具有特定成分的超强韧多功能钛合金提供了创新解决方案，其分子式为 $Ti_aZr_bHf_cNb_dSn_e$ ，其中原子百分比范围为： $45 \leq a \leq 55$ ， $36 \leq b \leq 43$ ， $3 \leq c \leq 6$ ， $3.5 \leq d \leq 7.5$ ， $1.5 \leq e \leq 3$ 。一个优选实施例是 $Ti_{48}Zr_{39}Hf_{4.5}Nb_{6.3}Sn_{2.2}$ 。其关键技术创新在于其独特的微观结构以及多种变形机制的协同激活。该合金通过电弧熔炼、滴铸、剧烈冷轧（97-99%厚度减薄）和短暂受控退火（800-900°C，20秒至20分钟）制备。此工艺产生了初始微观结构：完全再结晶的等轴超细晶（UFG）β相结构，晶粒尺寸可通过退火时间从约400纳米调整至数十微米。核心创新在于这种UFG结构在变形过程中如何被分层纳米结构顺序强化。最初，UFG提供高强度，导致与可逆β→α'马氏体相变（TRIP效应）相关的第一个屈服点（~1.36 GPa）。这种可逆相变有助于显著的加工硬化并赋予伪弹性。在进一步变形时，纳米孪晶在超细晶粒内形成，随后，纳米带在这些纳米孪晶内部受限形成。这种分层纳米结构（UFGs → 纳米孪晶 → 纳米带）实现了持续且卓越的加工硬化，克服了典型的强度-延展性权衡。该技术本质上设计了一种在应力下动态演化的微观结构，激活并结合了TRIP、孪生和纳米带形成，从而实现了前所未有的机械和功能性能。

优势

- 卓越的机械性能：实现了超高抗拉强度（~1.75 GPa）和均匀延伸率（≥20%）的非凡结合，超越了传统β-Ti和许多其他钛合金。
- 多功能性：将高强度与显著的伪弹性（最大可恢复应变~7%）相结合，这在金属合金中十分罕见。

备注

IDF: 1549

IP状态

已申请专利



技术成熟度等级 (TRL) ?

4

发明人

杨涛教授

张积勋博士

查询: kto@cityu.edu.hk

Follow-on
Funding

Develop
Concept

Proof
Concept

Build Value

- 增强的生物相容性：完全由无毒、非致敏性元素（Ti, Zr, Hf, Nb, Sn）组成，消除了TC4或Ti-Ni等常见合金中V、Al或Ni带来的风险。
- 优异的抗疲劳性：表现出功能稳定性，在1.4 GPa的极高恒定拉伸应力下可承受超过1000次疲劳循环。
- 有竞争力的耐腐蚀性：在模拟体液中表现出与基准商用TC4合金相当的耐腐蚀性。
- 性能可调：机械和功能性能（强度、延展性、晶粒尺寸）可通过改变加工过程中的短时退火时间进行定制，为特定应用需求提供灵活性。
- 协同强化：利用多种机制（UFG强化、可逆TRIP、纳米孪生、纳米带形成）的独特顺序激活来实现持续加工硬化。

应用

- 生物医学植入物：骨科植入物（如骨板、脊柱杆）、心血管支架、正畸丝和弓丝、牙科植入物，这些应用对高强度、抗疲劳性、生物相容性和一定柔韧性至关重要。
- 航空航天部件：先进减震装置、减震器、振动阻尼器以及需要高比强度、能量吸收和在极端条件下耐久性的轻质结构部件。
- 汽车零件：高性能弹簧、减震器和安全关键部件，这些部件受益于该合金的强度、用于能量管理的伪弹性和疲劳寿命的结合。
- 先进阻尼材料：由于其高应力伪弹性和抗疲劳性，可用于精密仪器、机械和基础设施中的振动隔离和冲击吸收系统。
- 现有合金的替代品：在毒性或机械性能限制成为关注点的应用中，可作为商用TC4和Ti-Ni形状记忆合金的优越且更安全的替代品。

