

《钛镍形状记忆合金制备方法》

（征求意见稿）

编制说明

一、工作简况

（一）任务来源

本文件由中国技术市场协会提出，经中国技术市场协会标准化工作委员会批准，正式列入 2026 年团体标准制修订计划，标准名称为《钛镍形状记忆合金制备方法》。

（二）项目背景

随着医疗健康、航空航天、机器人等高端制造业的迅猛发展，对材料性能提出了更高的要求。钛镍形状记忆合金（TiNi SMA）凭借其独特的形状记忆效应、超弹性、高阻尼特性以及优异的生物相容性，已成为医疗器械（血管支架、骨科植入物）、航空航天执行器、精密仪器等领域的关键核心材料。

目前，钛镍形状记忆合金在机械载荷下的疲劳寿命评估、相变温度控制及力学性能稳定性直接决定了其在高端应用场景下的可靠性。然而，行业内针对钛镍形状记忆合金的制备工艺，特别是从原材料选型、真空熔炼控制到后续加工热处理的全流程缺乏统一的标准规范。各生产企业在工艺参数、质量控制及性能测试方法上存在差异，导致产品批次稳定性不一，不仅增加了下游应用厂商的验证难度，也制约了该材料在高端领域的规模化应用。

为规范钛镍形状记忆合金的制备流程，统一原材料要求、熔炼工艺参数及性能测试方法，提升产品的一致性与可靠性，推动钛镍形状记忆合金产业向高质量、标准化方向发展，制定本规范

十分必要。

（三）目的意义

1. 目的

（1）确保产品性能稳定

钛镍形状记忆合金的性能高度依赖于成分的精确控制和微观组织的均匀性。本规范通过统一海绵钛、电解镍等原材料的杂质控制标准，以及真空感应熔炼（VIM）和真空电弧熔炼（VAR）的工艺参数，确保铸锭成分均匀、组织致密，从而保证最终产品在相变温度、超弹性及疲劳寿命等关键指标上的稳定性，满足高端应用对长寿命、高可靠性的严苛需求。

（2）保障生产与使用安全

钛镍合金的熔炼涉及高温、高真空及惰性气体保护，生产过程中存在安全风险。本规范明确了熔炼设备的真空度、水冷系统及操作环境要求，确保生产过程安全可控。同时，通过严格控制氢、氧等间隙元素含量，保障材料在医疗植入等使用场景下的生物安全性，避免因材料失效导致的安全事故。

（3）提升产业协同效率

通过明确合金的技术要求与测试方法，为原材料供应商、合金生产商及制造商提供统一的技术依据。减少因标准不统一导致的沟通成本与重复验证，加速产品迭代与产业链上下游的协同，推动钛镍形状记忆合金在更多领域的应用落地。

2. 意义

（1）提升高端制造核心竞争力

钛镍形状记忆合金的制备水平直接反映了国家高端金属材料

料的制造能力。本规范的实施将推动关键原材料质量一致性提升，助力我国突破高端医疗器械和航空航天关键部件的材料瓶颈，增强我国高端制造产品的国际竞争力。

（2）推动行业规范化发展

本规范填补了国内钛镍形状记忆合金制备全流程团体标准的空白，引导企业从粗放式生产向精细化、标准化制造转型。通过标准化引领，淘汰落后产能，规范市场秩序，促进钛镍形状记忆合金产业的健康有序发展。

（3）促进产业链技术升级

规范的实施将引导企业加大在高纯度海绵钛、精密熔炼设备及先进热处理工艺的研发投入，带动上游原材料和下游加工设备的协同创新，形成“原材料—制备—应用”的完整高附加值产业链集群，推动产业向高端化升级。

（四）起草单位及起草人名单

本文件起草单位：东莞市杜氏诚发精密弹簧有限公司、西安群德材料科技有限公司、华南理工大学、北京中研博采技术服务有限公司、北京六只猫创意科技有限公司。

本文件主要起草人：杜智生、张焕、杨超、乐志斌、夏卫彬、杨笛。

（五）主要起草过程

1. 文本调研

2025年12月启动了文本的调研工作，并于2026年1月完成了相关资料的收集和分析工作。

2. 标准立项

2026年3月向中国技术市场协会标准化工作委员会提出申请，于2026年3月6日获得中国技术市场协会标准化工作委员会批准立项。

3. 形成标准草案

2026年3月，起草组对资料收集情况进行汇总处理，确定了标准框架和主要内容。2026年3月23日，《钛镍形状记忆合金制备方法》形成标准初稿。

4. 形成征求意见稿

2026年3月24日至2026年5月7日，起草组根据反馈的意见和建议，对草案内容进行了修改和调整，形成标准征求意见稿。

二、确定标准主要内容的论据

（一）编制原则

本文件按照GB/T 1.1—2020《标准化工作导则 第1部分：标准化文件的结构和起草规则》以及《中国技术市场协会团体标准工作程序》的规定起草。

（二）标准主要内容及适用范围

本文件规定了形状记忆合金（SMA）材料及其简单构件在机械循环载荷下疲劳寿命的要求、制备工艺流程与过程控制要求、试验方法与检验规则、标志、包装、运输和贮存。

本文件适用于以镍钛（NiTi）系为主的超弹性形状记忆合金丝、棒材及简单弹簧元件在应变控制模式下的轴向拉-拉或拉-压疲劳寿命评估。相变诱发塑性（TRIP）疲劳及热-机械耦合疲劳可参照使用。

（三）确定标准主要内容的论据

1. 解决传统制备工艺中的质量痛点

传统钛镍合金制备过程中，常面临成分偏析、气体杂质含量高、组织不均匀等问题，导致产品在疲劳寿命和功能稳定性上表现不佳。本规范通过标准化原材料的杂质控制（C、O、N含量）、明确真空感应熔炼和真空电弧重熔的工艺窗口（温度、真空度、熔速），有效减少合金中的非金属夹杂物和气孔，优化微观组织结构，从而显著提升合金的疲劳寿命和力学性能，解决传统工艺难以满足高端应用需求的痛点。

2. 满足高端应用对材料一致性的需求

在医疗植入和航空航天领域，对材料的批次一致性要求极高。本规范通过制定严格的化学成分分析方法（GB/T 223 系列）、相变温度测试（DSC 法）及力学性能测试标准，建立了从原材料入厂到成品出厂的全过程质量控制体系。确保不同批次产品在相变温度（Af 值波动控制在 $\pm 5^{\circ}\text{C}$ 以内）和力学性能上保持高度一致，满足高端应用对零缺陷、高可靠性的使用需求。

3. 推动产业链标准化协同

当前行业内各企业制备工艺路线多样，缺乏统一的验收标准，导致下游应用端的适配成本高。本规范通过明确丝材、棒材的尺寸允许偏差、表面质量要求及包装运输规范，降低了供应链的沟通成本，提升了零部件的通用性。同时，规范中引用的 ISO 18558 等国际先进测试方法，有助于提升我国钛镍形状记忆合金产品的国际互认度，加速产业的国际化进程。

三、主要试验[或验证]情况分析、技术经济论证、预期经济

效果

（一）主要试验[或验证]情况分析

为确证本规范技术要求的科学性、可重复性与产业适用性，起草组构建了“材料—工艺—性能”全链条验证体系，联合涵盖原材料、熔炼、加工及检测认证等环节的核心单位，开展了系统性、多中心的联合试验验证。验证工作涉及不同规格（丝、棒材）的钛镍形状记忆合金，共计评估了多种典型熔炼与热处理工艺组合。

1. 关键原材料指标关联性验证

验证内容：深度剖析规范中规定的海绵钛、电解镍纯度及杂质元素（C、O、N、H）含量与合金最终力学性能及相变行为的内在关联。

数据支撑：实验发现，当海绵钛中氧含量控制在 $\leq 0.06\%$ 且电解镍纯度 $\geq 99.96\%$ 时，合金的塑性显著提升。若氢含量超过 0.003% ，极易在后续加工中形成氢脆裂纹；若氧含量过高，会导致相变温度发生漂移且材料变脆。验证结果强有力地支撑了规范中对原材料杂质元素的严格限定，为高性能钛镍合金的源头质量控制提供了精确的量化依据。

2. 熔炼工艺窗口精细化验证

验证内容：采用正交实验设计（DOE），系统交互验证真空感应熔炼（VIM）的精炼温度、保持时间与真空度的综合效应，以及真空电弧熔炼（VAR）的熔速、电流电压参数。

数据支撑：实验确定了最优工艺窗口：VIM熔炼时，精炼温度需控制在 $1550\text{ }^{\circ}\text{C}\sim 1700\text{ }^{\circ}\text{C}$ （视锭型大小），真空度维持在

0.1 Pa~1.0 Pa, 保持 10 min~20 min。在此窗口内, 合金成分均匀性 (偏析指数 <1.05) 最佳, 且气体含量最低。对于 VAR 重熔, 熔速控制在 2.5 kg/min~6.0 kg/min 时, 铸锭表面光滑无缺陷。规范所确定的工艺参数范围, 是基于系统化实验的科学结果, 能够有效指导规模化、稳定化的生产。

3. 后续加工与热处理性能映射关系验证

验证内容: 建立从热加工 (锻造/轧制) 变形量、中间退火温度到最终形状记忆热处理温度与产品性能 (相变温度、超弹性、残余应变) 的量化映射模型。

数据支撑: 相关性分析显示, 最终热处理温度对相变温度 (A_f) 有决定性影响。使用符合规范的工艺制备的丝材, 在 400 °C~500 °C 保温并淬火后, 其超弹性循环后的残余应变可控制在 0.5% 以内, 形状记忆恢复率 (R) 可达 95% 以上, 显著优于非标工艺处理的产品 (残余应变通常 $>1.0\%$)。此映射关系验证了本规范不仅是制备标准, 更是保障最终产品功能性能的关键工具。

4. 批量一致性与疲劳寿命验证

验证内容: 对不同批次 (>3 批) 的合金产品进行疲劳寿命测试, 模拟实际工况下的拉-拉或拉-压循环。

数据支撑: 规范推荐的工艺制备的合金丝材, 在应变控制模式下, 第 10 次循环卸载后的残余应变均小于 0.5%, 且在 1000 次循环内无断裂现象。500kg 批次规模的产品一致性验证表明, 抗拉强度波动范围 <50 MPa, 证明了规范的可放大性和可靠性。

(二) 技术经济论证

1. 技术可行性

技术成熟度：规范要求的核心制备技术（VIM+VAR 双联熔炼）已在行业内广泛应用，国内头部企业（如起草单位中的高校和企业）已具备成熟的生产经验，成品合格率达 95%以上，具备坚实的技术基础。

企业适配性：针对不同规模企业开展技术适配调研，结果显示：大型企业可通过现有产线的工艺参数校准即可满足规范要求；中小型企业通过引入标准化的熔炼控制软件和检测设备，可快速实现合规生产。

检测可实现性：国内具备资质的检测机构已配备规范要求的全套检测设备，单款样品检测周期可控制在 5 个工作日以内，能满足企业批量送检需求。

2. 经济可行性

短期成本测算：规范实施初期，企业需承担的新增成本包括工艺优化、设备维护及产品检测。据行业调研数据，因合规改造带来的成本增加主要体现在原材料优选和检测频次上，预计单吨合金成本增加可控，企业可通过提升良品率快速摊薄成本。

长期收益分析：

降低质量损耗：规范实施后，预计因成分偏析、气孔等缺陷导致的废品率可降低 50%以上，单家年产能 100 吨的企业年均可减少损失数百万元。

提升供应效率：标准化的产品可减少下游客户的验证周期，据测算，适配周期从原来的数月缩短至数周，大幅提升订单交付效率。

增加产品附加值：符合高标准的钛镍合金产品在医疗器械等

高端市场的溢价率可达 10%以上，显著提升企业盈利能力。

（三）预期经济效果

1. 降低产业链综合成本

生产端：标准化的制备工艺可减少企业重复研发与试错投入；原材料的通用化率提升，降低采购及库存管理成本。

应用端：统一标准的合金材料可降低医疗器械厂商的材料验证成本，据测算，材料验证成本可降低 30%以上，有效压缩高端医疗器械的量产成本。

2. 提升产品市场竞争力

国内市场：随着医疗器械国产化进程加速，高性能标准化钛镍合金将成为核心采购标的，预计头部企业的市场份额将进一步提升。

国际市场：规范指标与国际主流标准（如 ASTM F2063）接轨，企业通过规范认证后，产品出口认证周期可缩短，出口准入通过率提升，预计未来几年我国钛镍形状记忆合金的出口额将稳步增长。

3. 推动产业价值升级

带动上下游协同：规范将拉动高纯度海绵钛、精密熔炼设备、高端医疗植入器械等配套产业发展，预计未来相关配套产业市场规模将突破数十亿元。

促进技术创新：标准将倒逼企业向高疲劳寿命、低滞后效应的新型钛镍合金方向研发，预计行业在新型功能材料领域的专利申请量将增加，推动产业从“跟随制造”转向“标准引领”，实现行业的高质量增值。

四、采用国际标准和国内外先进标准的程度

本文件不涉及国际国外标准的采标情况。

五、重大分歧意见处理经过及依据

本文件在制定过程中未出现重大分歧意见。

六、与现行相关法律、法规及相关标准的协调性

与现行相关法律、法规及相关标准相协调。

七、知识产权情况说明

本文件不涉及必要专利等知识产权情况。

八、其他应予说明的事项

无。

《钛镍形状记忆合金制备方法》

团体标准工作组

2026年5月7日