

钛合金深冷处理技术的发展与应用研究

赵兴民¹, 袁晓东¹, 张元彬¹, 翟同广¹, 李怀学²

(1. 山东建筑大学 材料科学与工程学院 高端装备材料可靠性研究院, 山东 济南 250101)

(2. 中国航空制造技术研究院, 北京 100024)

摘要: 钛合金具有比强度高、耐蚀性好以及耐高温等优良性能, 广泛应用于高端制造领域。然而, 随着高端装备对材料性能要求的日益提高, 传统热处理工艺已难以满足提升钛合金性能的需求。深冷处理作为一种高效绿色的改性技术, 成为钛合金性能调控的有效措施。为此, 梳理了深冷处理技术的发展与应用, 围绕晶粒尺寸变化、马氏体相变行为、残余应力场优化三个方面, 阐述其调控钛合金性能的核心机理, 总结深冷处理时间、循环次数、冷热处理顺序等工艺参数对钛合金性能的影响规律, 介绍深冷复合工艺的最新研究进展, 指出当前研究面临的瓶颈, 旨在为钛合金深冷处理技术的后续研究与应用提供参考。

关键词: 钛合金; 深冷处理; 力学性能; 微观组织

中图分类号: TG166.5; TG146.23

文献标识码: A

文章编号: 1009-9964(2026)05-041-08

Development and Application of Deep Cryogenic Treatment Technology for Titanium Alloys

Zhao Xingmin¹, Yuan Xiaodong¹, Zhang Yuanbin¹, Zhai Tongguang¹, Li Huaixue²

(1. School of Materials Science and Engineering, Shandong Jianzhu University,
Institute of Reliability for High-End Equipment Materials, Jinan 250101, China)

(2. China Academy of Aeronautical Manufacturing Technology, Beijing 100024, China)

Abstract: Titanium alloys are widely applied in high-end manufacturing fields due to their excellent properties such as high specific strength, good corrosion resistance, and high-temperature resistance. However, with the increasingly stringent performance requirements of high-end equipment for materials, conventional heat treatment processes can hardly meet the demand for further improving the properties of titanium alloys. As an efficient and environmentally friendly modification technology, deep cryogenic treatment has become an effective method for the performance regulation of titanium alloys. This paper reviews the development and applications of deep cryogenic treatment technology. It elaborates on the core mechanism by which deep cryogenic treatment regulates the properties of titanium alloys from three aspects: grain size evolution, martensitic transformation behavior, and residual stress field optimization. The influencing patterns of process parameters such as deep cryogenic treatment holding time, cycle number, and cryogenic and heat treatment sequence on the properties of titanium alloys are summarized. The latest research progress in composite deep cryogenic treatment processes is introduced, and the bottlenecks in current research are pointed out, aiming to provide a reference for the subsequent research and engineering applications of deep cryogenic treatment technology for titanium alloys.

Keywords: titanium alloys; deep cryogenic treatment; mechanical properties; microstructure

钛及钛合金是继铝合金之后的轻质高性能结构材

料之一^[1]。因其具有比强度高^[2]、耐高温^[3]、耐腐蚀^[4]、生物相容性好^[5]等优良性能, 成为航空航天、生物医疗、国防军事等领域的重要材料^[6-7]。随着航空航天事业的飞速发展与航空装备轻量化的迫切需求, 钛合金

收稿日期: 2026-04-22

基金项目: 山东省重点研发计划项目(2024TSGC0296)

通信作者: 张元彬(1970—), 男, 教授。

在该领域中发挥着极其重要的作用。在第四代战机 F-22 和第五代战机 F-35 中,用量最大的金属材料均为钛合金^[8]。但钛合金室温塑性较差,成形加工困难^[9],并且在成形后往往会出现大量缺陷,因此需要对其进行后续热处理以改善性能。

钛合金的传统热处理工艺虽种类繁多,但常规处理后的强塑性协同效果往往难以达到理想状态,无法实现组织与力学性能的综合优化^[10]。深冷处理(又称超低温处理)通常以液氮为冷却介质,将材料置于 $-196\text{ }^{\circ}\text{C}$ 的超低温环境中,通过细化微观组织等途径改善其力学性能^[11]。作为传统热处理工艺的重要延伸,深冷处理在材料研发与表面改性等领域正日益受到关注^[12-14]。目前研究已证实,该工艺可通过细化晶粒、增加位错密度及调控残余应力等方式,有效提升钛合金的综合力学性能。例如,在航空航天、汽车及电子行业,深冷处理已被广泛用于提高零部件的力学性能与尺寸稳定性^[15]。

本文总结了近年来深冷处理在钛合金改性方面的研究进展,介绍了深冷处理对钛合金微观组织和力学性能的影响,以期为钛合金改性研究提供参考和基础数据。

1 深冷处理技术发展与应用

早在一百多年前,瑞士钟表制造商便将钟表的关键零件埋入阿尔卑斯雪山中进行“深冷处理”,零件的耐磨性和可靠性均得到了提高^[16]。20 世纪 30 年代,苏联学者将深冷处理技术应用于高速钢,显著提高了其强度,从而引发了诸多学者对深冷处理技术的关注与研究^[17]。国内深冷处理技术研究始于 20 世纪 60 年代。徐祖耀等人^[18]率先开展了高速钢深冷处理研究,探索并总结了相关工艺规律,为我国该领域的发展奠定了重要基础。对于钢铁材料,深冷处理的主要作用是促进残余奥氏体向马氏体转变;同时,低温环境降低了碳原子的扩散激活能,促使过饱和固溶体中的碳原子析出形成碳化物,阻碍位错运动,从而改善材料性能^[19]。王利虎等人^[20]对 GCr15 轴承钢进行了深冷处理研究,发现在低温条件下,残余奥氏体转变为马氏体,过饱和碳原子析出形成碳化物并引起晶格畸变。Pieško 等人^[21]对高速钢深冷处理的研究表明,该工艺不仅能驱动残余奥氏体向马氏体转变,还能促进二次碳化物的弥散析出,从而改善组织的均匀性。

目前,深冷处理技术的研究已从钢铁材料逐渐扩展到有色金属材料,如铝合金、铜合金、镁合金、钛合金等^[22-24]。Zhi 等人^[25]对 AZ31 镁合金的深冷处理研究发现,随着深冷时间的延长,晶粒得到细化,位

错密度先增加后降低,织构强度下降,断裂机制由脆性断裂转变为韧脆混合断裂。Niu 等人^[26]对 6061 铝合金的深冷处理研究发现,深冷处理后合金内析出物数量明显增加,分布趋于均匀,晶粒得到细化。这些变化阻碍了位错运动并改变了应力分布,从而使 6061 铝合金的残余应力降低。

围绕深冷处理对钛合金的改性效应与作用机制,国内外学者开展了大量研究工作,成果涵盖 α 型、 $\alpha+\beta$ 型及 β 型等钛合金体系。陈振华等人^[27]研究发现,对 CP-Ti、TA7、TC4、TC10 等钛及钛合金进行深冷处理均可诱导晶粒取向转变。Cakir 等人^[28]对 TC4 钛合金的研究发现,深冷处理提升了合金的可加工性与表面硬度,优化了加工后的表面粗糙度,并使电阻率降低 7%。其机理在于:随着深冷时间的延长, β 相持续向 α 相转变,内应力逐渐降低,晶粒排布更加有序。

2 深冷处理对钛合金改性机理分析

对于钛合金,其深冷处理的强韧化机理与钢铁及其他有色金属材料存在一定区别,主要涉及相变调控与微观组织协同优化。深冷处理可加速亚稳 β 相向稳定 α 相的转变,提高稳定 α 相的占比。同时,深冷处理可进一步细化钛合金晶粒,诱发合金内部形成高密度位错并产生显著的微观应变,从而弱化织构特征,降低织构强度,最终实现钛合金组织均匀性的全面提升^[29-31]。

2.1 晶粒细化

晶粒尺寸对材料强度、塑性、韧性、硬度、疲劳性能、耐蚀性及高温性能等均有显著影响,通常晶粒越细,综合性能越好^[32]。Liu 等人^[33]研究了深冷处理对 Ti55531 合金晶粒细化的影响。深冷处理前后 Ti55531 合金的 IPF 图和 TEM 像如图 1 所示。从图 1 可以看出,未经深冷处理时, Ti55531 合金主要由短棒状 α 相和颗粒状 α 相组成;经 8 h 深冷处理后,短棒状 α 相破碎消失,组织主要由颗粒状 α 相构成。未深冷处理样品的平均晶粒尺寸为 $2.35\text{ }\mu\text{m}$,深冷处理 8 h 后减小至 $1.68\text{ }\mu\text{m}$ 。深冷处理后 α 相宽度明显减小,晶粒更加细长。刘东等人^[34]对 TA7、TB6 和 TC4 钛合金进行深冷处理,通过扫描电子显微镜观察发现,3 种钛合金经深冷处理后晶粒尺寸变小,均有明显的细化现象;晶粒细化的同时伴随第二相的析出,且 TA7 和 TC4 钛合金的晶粒细化程度及析出物数量均高于 TB6 钛合金。司曼曼^[35]研究了深冷处理对 Ti-Ta 合金晶粒尺寸的影响。将常规水淬、液氮淬火、液氮淬火后于液氮中保持 3 h 及保持 6 h 的 4 种试样分别标记为 IWQ、LNQ、LNQ-3h 和 LNQ-6h。不同处理工艺下

Ti-29Ta 合金的金相组织如图 2 所示。由图 2 可知, Ti-29Ta 合金经深冷处理后平均晶粒尺寸减小。这主要是因为 Ti-29Ta 合金在骤冷过程中产生明显的晶格畸

变, 导致位错密度与内应力显著升高; 随着深冷时间延长, 合金内部位错逐渐发生运动与重排, 最终形成亚晶界, 从而促进晶粒细化。

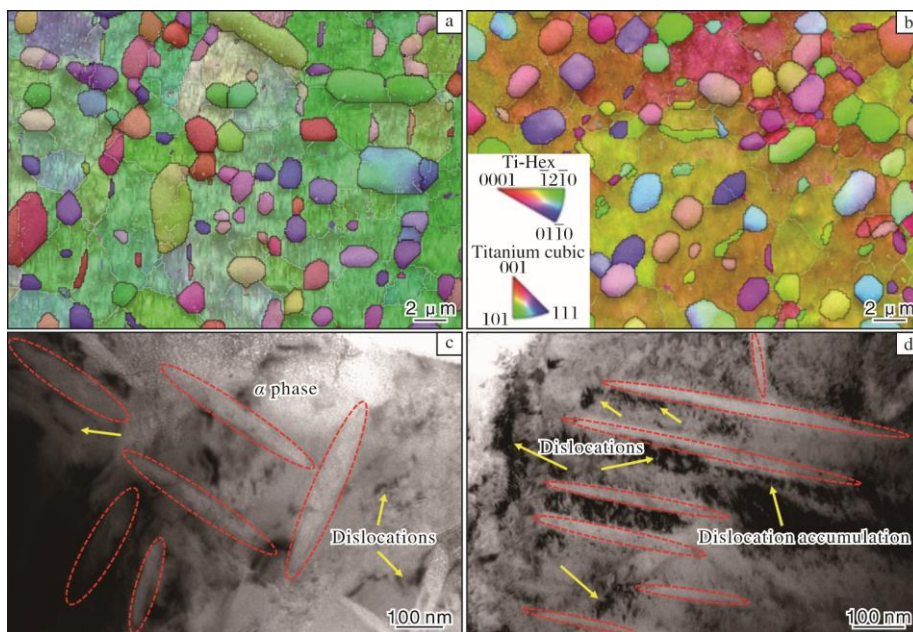


图 1 Ti55531 合金深冷处理前后的 IPF 图和 TEM 像^[33]

Fig.1 IPF maps (a, b) and TEM images (c, d) of Ti55531 alloy: (a, c) before deep cryogenic treatment; (b, d) after deep cryogenic treatment

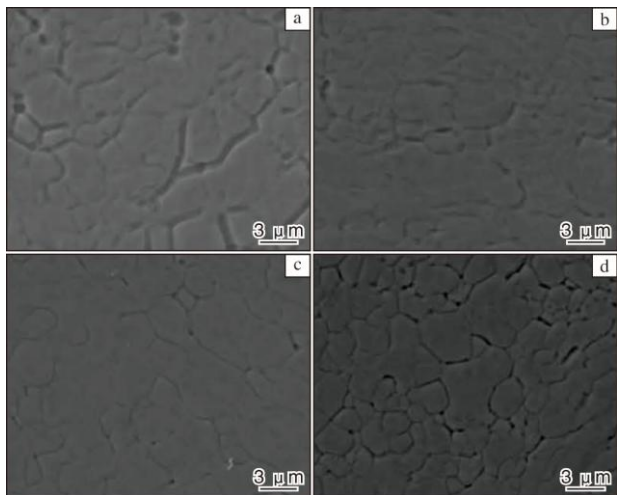


图 2 不同处理工艺下 Ti-29Ta 合金的金相组织^[35]

Fig.2 Metallographic microstructures of Ti-29Ta alloy under different treatment processes: (a) IWQ; (b) LNQ; (c) LNQ-3h; (d) LNQ-6h

2.2 马氏体相变

马氏体相变是钛合金强化的核心手段, 尤其对 β 和近 β 钛合金而言。钢中马氏体的核心特征是碳在间隙位置上的过饱和固溶, 而钛合金中马氏体的形成主

要受 β 稳定元素对相稳定性的调控, 不存在过饱和和间隙原子^[36-38]。图 3 为 TA15 钛合金深冷处理后晶粒细化和塑性改善的机理示意图^[39]。TA15 钛合金在低温环境中晶格体积收缩, 且 β 相中 Mo、V 两种 β 稳定元素的固溶度随温度降低而降低。当 TA15 钛合金长时间处于低温环境时, Mo、V 元素发生偏析, 亚稳 β 相因失去稳定化元素而转变为 α 相。由于 α 相对 Mo、V 元素的固溶度极低, 从转变区域排出的过量 Mo、V 元素富集于剩余 β 相中, 提高了其稳定性, 最终使亚

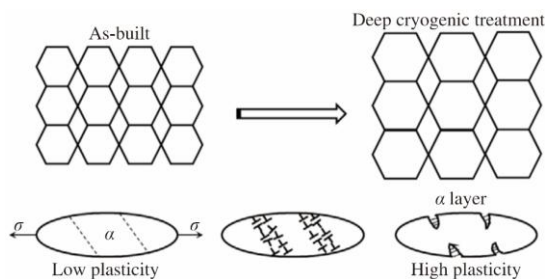


图 3 TA15 钛合金深冷处理后晶粒细化与塑性改善的机理示意图^[39]

Fig.3 Schematic diagram of mechanism for grain refinement and plasticity improvement of TA15 titanium alloy after deep cryogenic treatment

稳 β 相逐步演化为稳定 β 相^[39]。Gu 等人^[40]研究发现, 随着温度降低, TC4 钛合金 β 相中的 V 含量降低且 β 相减少, 同时位错密度增加并出现孪晶, 上述变化均可促进 TC4 钛合金塑性的提高。师佑杰等人^[41]对 TC4 钛合金进行深冷处理, 发现深冷处理后晶粒发生变形, 轧制变形储存的能量被释放并诱发再结晶, 部分亚稳 β 相转变为次生 α 相和稳定 β 相。

2.3 残余应力

残余应力对钛合金的服役性能具有显著的双向调节作用: 残余拉应力往往削弱性能, 而引入残余压应力通常会带来性能的提升。因此, 残余应力是钛合金构件性能精确调控以及服役失效预防与控制的关键指标之一^[6,42-43]。王思佳^[44]采用电子束选区熔化技术制备 TA15 钛合金, 然后对其进行不同时间的深冷处理。研究发现, 未经深冷处理时 TA15 钛合金内部的残余应力为拉应力; 深冷处理过程中钛合金受冷体积收缩, 随着冷却时间的延长, 残余拉应力逐渐减小并转变为压应力。残余应力对晶粒产生挤压和剪切作用, 导致晶粒细化, 这是深冷处理促使晶粒细化的一个重要原因。陈赫^[45]研究发现, TA7、TB6 和 TC4 钛合金经深冷处理后残余应力下降, 且由拉应力转变为压应力。上述研究表明, 深冷处理使试样内部产生巨大的冷缩内应力, 导致原有应力平衡被打破, 从而促使残余压应力增加。

3 钛合金深冷处理工艺

关于深冷处理工艺参数的研究方向较多, 尚未形成统一的优化标准。深冷处理工艺参数包括降温速率、深冷时间、循环次数等。对于不同材料及不同制备方法, 所需的深冷处理工艺参数均不相同。

3.1 深冷时间

深冷时间是钛合金深冷处理中最为重要的工艺参数之一。深冷处理通常需要较长的浸泡时间才能改变微观组织和力学性能^[46], 因此深冷时间对钛合金性能的影响尤为重要。Huang 等人^[47]将电子束选区熔化成形的 TC4 钛合金分别进行 6、12、24、48、72、96 h 的深冷处理, 研究发现深冷时间从 6 h 延长至 48 h 时, 钛合金拉伸性能不断增强; 与未深冷处理试样相比, 经 48 h 深冷处理后钛合金的抗拉强度、屈服强度和延伸率分别提高了 18.64%、18.65%和 91.67%。深冷处理后强塑性匹配的改善, 可能是由于孪生诱发塑性 (TWIP 效应) 增强所致。当深冷时间超过 48 h 后, 试样拉伸性能趋于稳定, 疲劳循环次数相比未处理试样提高 115.22%。其机理在于: 深冷时间不足 48 h 时, 片层 α 相快速细化, 细 α 相析出量持续增加, 晶粒不

断细化, 位错密度提升并引发晶格畸变, 因而合金强度提升; 深冷时间超过 48 h 后, 片层 α 相厚度和细 α 相析出数量不再变化, 细晶强化和位错强化效应达到饱和。Lan 等人^[48]对锻造态 TC4 钛合金分别进行 6、12、18、24 h 深冷处理, 发现经 18 h 深冷处理后试样综合性能最优。此时抗拉强度与未深冷处理试样相比变化不大, 延伸率(19.13%)和冲击韧性(36.36 J/cm²)分别提高了 27.53%和 8.09%。这是因为随着深冷处理时间延长, 晶粒细化效果越来越显著, 晶界数量大幅增加, 同时钛合金内部的残余压应力增大, 引发位错增殖, 位错密度大幅提升, 位错强化与细晶强化的协同作用更好地阻碍了位错运动。Huang 等人^[47]与 Lan 等人^[48]的研究结果存在一定差异, 两者材料相同但制备工艺不同, 虽然强化效果和改性结果相似, 但最佳深冷时间相差很大, 因此仍需开展更为深入的研究, 以系统阐明深冷处理的性能调控机制。Zhao 等人^[49]对 Ti-48Al-2Nb-2Cr 合金以 10 °C/min 的冷却速度分别进行 24、36、48 h 深冷处理, 结果表明深冷处理时间为 36 h 时晶粒细化最显著; 与未深冷处理试样相比, 抗拉强度提升 13.4%, 延伸率提高 41.3%, 实现了强度与塑性的同步提升。深入研究发现, 位错密度随深冷时间的延长呈现先下降后上升的趋势, 在深冷时间为 36 h 时位错密度降至最低, 这可避免位错缠结导致的应力集中, 同时在细晶强化的作用下提升了强度; 而当深冷时间达到 48 h 时, 位错密度超过阈值, 导致合金塑性下降。霍鹏丞等人^[14]对 TiC/TC4 钛基复合材料分别进行 24、48、72 h 的深冷处理, 研究表明经 24 h 深冷处理后复合材料的抗拉强度达到最大; 在微观组织方面, 经 72 h 深冷处理后针状马氏体的破碎程度最为显著。

综上所述, 钛合金材料成分和成形工艺的差异均会对深冷处理效果产生一定影响。近年来, 增材制造钛合金的应用与研究逐渐增多, 其组织形态与传统锻件存在显著差异。目前针对这种特殊工艺钛合金的深冷处理研究较少, 相关性能调控机制尚不明确, 还需进一步研究。

3.2 深冷循环次数

深冷循环次数在深冷处理中的作用十分重要, 在实际工艺中需与深冷时间等参数协同优化。Kang 等人^[50]对 TC4 钛合金分别进行了单次 24 h 深冷处理与 4 次 24 h 深冷处理的对比研究, 发现经 4 次深冷处理后, TC4 钛合金中 β 相体积分数降低, 位错密度提高, 抗压强度提高了 9.4%; 深冷处理诱导了 α 相和 β 相的转变以及位错和孪晶等亚结构的变化, 使合金耐磨性得到了显著提升。李泽铎^[51]采用激光选区熔化技术制备

TC4 钛合金并对其进行深冷处理, 在深冷处理总时间相同(12 h)的条件下, 对比了 2 次 6 h 与 3 次 4 h 两种循环工艺。研究表明, 与 3 次 4 h 工艺相比, 2 次 6 h 工艺处理后的合金晶粒更细长, 且次生 α -Ti 颗粒显著增多, 但塑性有所下降。据此推断, 在一定范围内, 次生 α -Ti 颗粒数量与塑性呈负相关。Lv 等人^[52]对 $\text{Ti}_{33}\text{Zr}_{30}\text{Cu}_9\text{Ni}_{5.5}\text{Be}_{22.5}$ 合金进行了不同循环次数的深冷处理, 发现合金塑性随着循环次数的增加先上升后下降, 在 30 次循环时达到最高值 7.8%。此时, 平均应力下降量和单位面积剪切带形成能均降至最低, 分别为 15.9 MPa 和 342.8 J/m²。

3.3 冷热顺序

一般而言, 先热处理再进行深冷处理的工艺侧重于改善钛合金的强韧性, 先深冷处理再进行热处理则侧重于保持钛合金的尺寸稳定性和改善韧性。李晓琛等人^[53]对轧制态 TC4 钛合金先进行深冷处理再进行高温退火, 研究发现该工艺可促进 β 相向 α 相的转变, 获得较高的 α 相体积分; 综合对比发现, 深冷处理 12 h 后再进行 1 h 高温退火的试样力学性能最优, 抗拉强度可达 1508 MPa, 延伸率可达 9.0%。郑会会^[54]对 TC4 和 TC18 钛合金板材先进行再结晶退火然后进行深冷处理, 发现深冷处理后晶粒发生转动并出现择优取向。当深冷时间为 12 h 时, 两种钛合金的综合性能最为理想, 虽然抗拉强度与屈服强度略有下降, 但 TC4 钛合金的延伸率提高了 14%, TC18 钛合金的延伸率提高了 23%。Song 等人^[55]提出了一种改善 TC4 钛合金性能的新工艺: 首先进行高温退火, 之后进行 -40 °C 低温处理(保温时间分别为 12、24、36 h), 最后进行热处理。研究发现, 随着低温处理时间的延长, 延伸率呈现先下降后上升的趋势, 在 36 h 时达到峰值, 而抗拉强度的变化趋势与之相反; 若追求高强度可选择 1000 °C 热处理+12 h 低温处理, 追求高塑性则可选择 900 °C 热处理+36 h 低温处理。Gu 等人^[56]对 TB8 亚稳 β 钛合金进行了固溶+深冷复合处理, 发现试样的显微硬度提高 15%, 抗拉强度和屈服强度提高 5%, 但塑性略有降低。断口形貌显示, 解理台阶与微裂纹增多, 其断裂机理为韧窝与解理的混合断裂。Yumak^[57]对 Ti-15V-3Al-3Sn-3Cr 亚稳 β 钛合金的研究发现, 采用三重时效结合深冷处理可获得最细小的 α 相组织, 且降低时效温度可进一步细化 α 相。该工艺有效降低了材料的摩擦系数与质量损失, 其中摩擦系数最低可达 0.08。此外, 磨损表面的犁沟变浅, 分层剥落现象显著减轻, 表面形貌得到明显改善。Zhang 等人^[58]采用激光粉末床熔融(LPBF)技术制备了 Ti-5Al-5V-5Mo-3Cr 合金, 并对深冷处理、时效处理及其组合工艺的先后

顺序进行了研究。结果表明, 采用时效+深冷处理工艺时, 材料的综合性能最佳。这是由于时效处理析出了均匀的 α 相, 随后的深冷处理进一步细化了组织, 使其更加均匀。该工艺使材料的抗拉强度提高了 100 MPa, 延伸率从 11% 提升至 13%; 拉伸试样断口表面以细小韧窝为主, 并伴有少量解理台阶。

4 深冷复合工艺对钛合金性能的影响

深冷复合工艺是指将深冷处理与其他加工工艺相结合, 充分发挥各工艺优势, 以获得更佳的材料性能, 更好地适应复杂工作环境对高性能零部件的需求。Dvorak 等人^[59]将深冷处理与剧烈塑性变形(SPD)相结合, 对工业纯钛开展了复合加工研究。结果表明, 室温加工晶粒尺寸大多在 0.6 μm , 而深冷加工后的晶粒尺寸可减小至 0.05 μm 。此外, 室温 SPD 后通常需进行去应力退火, 而该研究中的低温 SPD 试样未经过退火处理, 因此保留了更高的自由位错密度, 蠕变过程中易发生位错增殖和迁移。Wang 等人^[60]对 LPBF 工艺制备的 TA15 钛合金(Ti-6.5Al-2Zr-1Mo-1V)试样进行深冷处理后, 分别开展了室温(25 °C)与低温(-196 °C)下的拉伸对比研究, 其拉伸应力-应变曲线如图 4 所示。结果表明, 深冷处理使试样残余应力由拉应力转变为压应力; 在 -196 °C 环境下拉伸时, 断口呈现扁平状小韧窝, 相较于 25 °C 时的圆锥形大韧窝, 韧性明显降低。随拉伸温度降低, 强化机制由位错强化转变为孪晶界强化, 变形机制从滑移转变为孪生。师佑杰等人^[41]将深冷处理与滚磨光整加工相结合对 TC4 钛合金进行处理, 研究发现深冷处理可有效提高 TC4 钛合金的硬度与耐磨性, 磨损机理由以磨料磨损为主并伴有轻微黏着磨损, 转变为以轻微磨料磨损为主。王瑶等人^[61]同样采用深冷处理与滚磨光整复合加工工艺对 TC4 钛合金进行处理, 研究发现经该复合工艺加工后, 钛合金表面粗糙度显著降低, 表面加工纹理更加均匀, 残余压应力增大, 综合表面质量得到明显改善。罗暹^[62]将深冷处理与超声滚压表面强化技术相结合进行复合加工, 研究发现经深冷复合工艺处理后, TC4 钛合金表面形成了小尺寸位错缠结和大量纳米晶; 其疲劳强度较原始试样显著提升, 增幅达 65.2%。Li 等人^[63]将深冷处理与静磁场相结合, 有效提高了 TC4 钛合金的强度和塑性; 与未处理样品相比, 抗拉强度与延伸率分别提高了 3.01% 和 11.29%。微观组织分析表明, 经复合工艺处理后, β 相向 α 相的转变得到促进, (002)晶面呈现出明显的择优取向; 与未处理试样相比, 单一深冷处理试样中的位错密度显著增加, 并伴有明显的位错缠结现象; 而在静磁场耦合深冷处理试

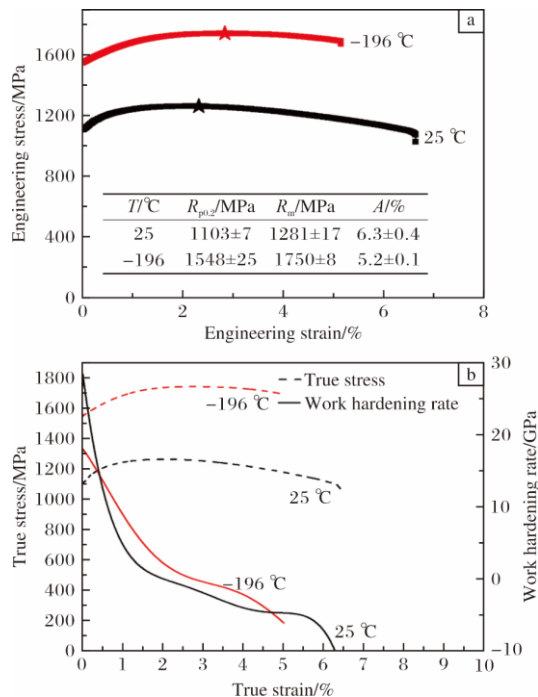


图4 TA15钛合金在室温和-196℃下的拉伸应力-应变曲线^[60]

Fig.4 Tensile stress-strain curves of TA15 titanium alloy at room temperature and -196 °C: (a) engineering stress-strain curves; (b) true stress-strain and work hardening rate-true strain curves

样中，位错密度进一步升高，但缠结现象有所减轻，位错趋于有序排列。

深冷复合工艺作为一种新兴技术，可有效提高钛合金的综合性能和服役寿命，拓宽其应用范围，展现出广阔的发展前景^[64-66]。然而，目前针对深冷复合工艺的研究相对较少，相关成果难以直接应用于工业生产与实际服役环境，还需对其进行更为深入的研究。

5 结 语

深冷处理可通过调控钛合金的微观组织演化、优化残余应力分布，实现强度、塑性、韧性及耐磨性等关键力学性能的协同优化。该方法工艺可控性强、改性效果稳定，且不损伤构件外形与尺寸精度，是一种高效的非损伤性改性技术，在钛合金高端构件性能提升领域具备一定的工程应用价值。此外，鉴于钛合金零部件制造成本较高，而深冷处理所需液氮成本相对较低廉，采用该技术可在较低成本下实现性能提升，具有良好的经济性。

现有研究多将深冷处理作为热处理的辅助工序(前处理或后处理)。目前，磁场、电场、超声波等各类复合处理方法已被广泛探索。在今后的研究中，可将深冷处理与上述方法相结合，针对不同类型的钛合

金属材料，探索并优化深冷处理工艺参数，研究其对微观组织和力学性能的影响规律，从而为深冷处理的工程化应用提供理论支撑。

参考文献 References

- [1] Zhong X Y, Deng T S, Xiao W L, et al. Improving thermal stability and creep resistance by Sc addition in near- α high-temperature titanium alloy[J]. Journal of Materials Science & Technology, 2024, 183: 1-11.
- [2] 纪晓宇, 徐建伟, 张宇, 等. 固溶冷速对超高强钛合金TB17组织及力学性能的影响[J]. 稀有金属材料与工程, 2025, 54(3): 665-670.
- [3] 郑宇宸, 王琳, 程焕武, 等. 高温中应变率作用下Ti6321合金显微组织与力学性能研究[J]. 钛工业进展, 2026, 43(2): 16-20.
- [4] 刘飞洋, 李田科, 王睿鑫, 等. 稀有金属对钢海洋大气腐蚀行为影响的研究进展[J]. 稀有金属材料与工程, 2025, 54(3): 791-802.
- [5] Elias C N, Fernandes D J, de Souza F M, et al. Mechanical and clinical properties of titanium and titanium-based alloys (Ti G2, Ti G4 cold worked nanostructured and Ti G5) for biomedical applications[J]. Journal of Materials Research and Technology, 2019, 8(1): 1060-1069.
- [6] 王梓骄, 贾雷, 苗庆东, 等. 舰船用钛合金制备技术的研究进展[J]. 中国冶金, 2024, 34(6): 14-25.
- [7] 南榕, 孙花梅, 蔡建华, 等. 钛及钛合金表面处理技术研究进展[J]. 钛工业进展, 2025, 42(3): 40-47.
- [8] 李毅, 赵永庆, 曾卫东. 航空钛合金的应用及发展趋势[J]. 材料导报, 2020, 34(S1): 280-282.
- [9] 孙杰, 国凯, 杨斌. 钛合金航空结构件加工刀具与工艺技术研究现状[J]. 航空制造技术, 2021, 64(16): 74-86.
- [10] 冯泽群, 邹海馨, 刘钊麟, 等. 钛合金深冷处理工艺研究综述[J]. 精密成形工程, 2024, 16(1): 14-23.
- [11] Korkmaz M E, Gupta M K. A state of the art on cryogenic cooling and its applications in the machining of difficult-to-machine alloys[J]. Materials, 2024, 17: 20579.
- [12] 赵子涵, 燕敬祥, 冯冰, 等. 深冷处理对锻造态和激光沉积态GCr15轴承钢组织及力学性能的影响[J]. 材料热处理学报, 2025, 46(5): 137-147.
- [13] 胡晓娜, 陈威, 邹晋. 深冷处理技术在铜合金研究中的应用综述[J]. 材料热处理学报, 2024, 45(11): 1-14.
- [14] 霍鹏丞, 柳佑涛, 白培康, 等. 深冷处理时间对激光粉末床熔化沉积TiC/TC4钛基复合材料组织演变及力学性能的影响[J]. 精密成形工程, 2024, 16(9): 123-135.
- [15] Ye Z X, Zhu M, Lan W, et al. Enhanced anti-corrosion

- performance and hardness of FeCoNi medium entropy alloys via deep cryogenic treatment and cyclic deep cryogenic treatment[J]. *Materials Chemistry and Physics*, 2026, 348: 131742.
- [16] 李佐政, 牛显明, 刘文朝, 等. 金属材料深冷处理技术研究进展[J]. *热加工工艺*, 2019, 48(10): 42-46.
- [17] 晋芳伟, 周志明. 高速钢深冷处理技术的研究现状及应用展望[J]. *热加工工艺*, 2012, 41(24): 189-192.
- [18] 徐祖耀, 任懷亮, 鈇永瑞, 等. 高速钢在零下温度时的相变[J]. *北京钢铁学院学报*, 1960(6): 1-4.
- [19] Özbek O, Özbek N A. Impact of deep cryogenic treatment on X210CrW12 steel's wear behavior and microstructural characteristics[J]. *Materials*, 2025, 18(4): 879.
- [20] 王利虎, 冯硕, 蔡圣阳, 等. 深冷处理对 GCr15 轴承钢磨削变质层及服役性能的影响[J]. *表面技术*, 2025, 54(23): 238-252.
- [21] Pieśko P, Korpysa J, Zawada-Michałowska M. On the use of cyclic cryogenic treatment to improve the properties of high-speed steel[J]. *Materials*, 2024, 17(23): 5998.
- [22] Fouad M, Nakata T, Xu C, et al. Effect of deep cryogenic treatment on aging strength of Mg-Al-Ca-Mn alloy[J]. *Materials*, 2025, 18(20): 4769.
- [23] Huang L, Dai W, Jiang Y, et al. Synergistic and comparative effects of Ag micro-alloying and cryogenic T8 on low-Cu/Li-ratio Al-Cu-Li alloys[J]. *Materials Science and Engineering A*, 2026, 957: 149882.
- [24] Zhang Y, Ding L P, Zhang Z H, et al. From cryogenic to elevated temperatures: mechanical properties and formability of an Al-Mg-Sc-Zr alloy[J]. *Journal of Materials Research and Technology*, 2026, 40: 1427-1439.
- [25] Zhi C C, Li P J, Huang Z Q, et al. Effect of cryogenic time on microstructure and properties of TRCed AZ31 magnesium alloy sheets rolled during cryogenic rolling[J]. *Metals*, 2023, 13(5): 870.
- [26] Niu X M, Chen Z, Jing L W, et al. Effect of cryogenic treatment on residual stress and microstructure of 6061 aluminum alloy and optimization of parameters[J]. *Materials*, 2024, 17(19): 4873.
- [27] 陈振华, 谢配孺, 姜勇, 等. 钛合金深冷及冷-热循环处理研究[J]. *湖南大学学报(自然科学版)*, 2014, 41(7): 1-5.
- [28] Cakir F H, Celik O N. Improvement of the machinability of Ti-6Al-4V alloy wire electro discharge machining with cryogenic treatment[J]. *Metals and Materials International*, 2021, 27(9): 3529-3537.
- [29] 李晓峰, 郭艳萍, 张少辉, 等. 低温轧制及退火处理对纯钛板微观组织演化及力学性能的影响[J]. *钛工业进展*, 2025, 42(2): 23-27.
- [30] 郭凯, 何忝琦, 和蓉. TC4 钛合金热处理工艺的研究现状及进展[J]. *世界有色金属*, 2021(7): 16-17.
- [31] 张良, 于小健. 深冷处理对 TC4 钛合金摩擦磨损性能及微观组织的影响[J]. *材料保护*, 2021, 54(8): 114-117.
- [32] 王春阳, 张旺峰, 王玉会, 等. 热处理工艺对 TA18 钛合金管材组织性能的影响[J]. *材料热处理学报*, 2026, 47(3): 90-97.
- [33] Liu Z, Deng T S, Ai R, et al. Microstructure and properties of Ti55531 alloy subjected to deep cryogenic treatment[J]. *Journal of Materials Research and Technology*, 2024, 31: 3891-3900.
- [34] 刘东, 王新. 深冷处理对钛合金微观组织的影响研究[J]. *宇航材料工艺*, 2025, 55(1): 98-102.
- [35] 司曼曼. 深冷处理 Ti-Ta 形状记忆合金的马氏体相变与功能特性[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2024.
- [36] Ma K Y, Jiang Z H, Wu K H, et al. Nanoscale α phase enables excellent strength-ductility balance in TC21 titanium alloy[J]. *Nanomaterials*, 2026, 16: 442.
- [37] Wang L, Su H, Zhao F, et al. Effects of α content on solid-state phase transformation and strength-toughness balance of Ti-55511 titanium alloy[J]. *Journal of Alloys and Compounds*, 2025, 1041: 183541.
- [38] Song B, Xi H L, Fu Y, et al. Influence of pre-deformation on phase transformations and microstructures in near β Ti alloy during aging[J]. *Rare Metal Materials and Engineering*, 2024, 53(11): 3001-3009.
- [39] Li P F, Wang Y H, Li L, et al. Effect of ultralow-temperature extreme service conditions on the plasticity of TA15 titanium alloy for aeronautics[J]. *Advanced Engineering Materials*, 2025, 27(15): 2402337.
- [40] Gu K X, Zhang H, Zhao B, et al. Effect of cryogenic treatment and aging treatment on the tensile properties and microstructure of Ti-6Al-4V alloy[J]. *Materials Science and Engineering A*, 2013, 584: 170-176.
- [41] 师佑杰, 李永刚, 李文辉, 等. 深冷处理对 TC4 钛合金表面性能的影响[J]. *金属热处理*, 2022, 47(2): 183-187.
- [42] Kolimi I Z, Marteau J, Bouvier S, et al. Residual stress and microstructural uniformity in large-scale Ti-6Al-4V fabricated via additive friction stir deposition[J]. *Journal of Manufacturing Science and Engineering*, 2026, 148: 051003.
- [43] Yu W L, Zhu W L, Yin A, et al. Investigation of thermal stability of residual stresses and microstructure of dual shot peened TC17 titanium alloy[J]. *Journal of Alloys and*

- Compounds, 2025, 1010: 178075.
- [44] 王思佳. 电子束选区熔化 TA15 钛合金微观组织及残余应力调控[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2024.
- [45] 陈赫. 深冷处理对钛合金加工表面残余应力影响研究[D]. 北京: 北方工业大学, 2024.
- [46] Xu Y, Qian P, Qiao Y, et al. The influence of heat and cryogenic treatment on microstructure evolution and mechanical properties of laser-welded AZ31B[J]. *Materials*, 2023, 16: 4764.
- [47] Huang X, Ding S B, Yue W. Cryogenic treatment on Ti6Al4V alloy fabricated by electron beam melting: microstructure and mechanical properties[J]. *Journal of Materials Research and Technology*, 2022, 20: 3323-3332.
- [48] Lan X Z, Xu Y L, Li J Y, et al. The influence of deep cryogenic treatment (DCT) on the microstructure evolution and mechanical properties of TC4 titanium alloy[J]. *Materials*, 2024, 17: 4603.
- [49] Zhao B W, Li G R, Li F, et al. Cryogenic treatment induced micro-plastic deformation to improve the strength and toughness of TiAl alloy simultaneously[J]. *Intermetallics*, 2026, 191: 109208.
- [50] Kang H H, Han S C, Ji M K, et al. Achieving synergistic improvement of wear and mechanical properties in Ti-6Al-4V alloy by multiple cryogenic treatment[J]. *Journal of Materials Research and Technology*, 2024, 29: 5118-5125.
- [51] 李泽铨. 深冷处理工艺对选区激光熔化成形 TC4 钛合金显微组织及力学性能的影响[D]. 南昌: 南昌航空大学, 2022.
- [52] Lv J W, Wang F L, Yin D W, et al. Effect of deep cryogenic cycling treatment on the microstructure and mechanical properties of Ti-based bulk metallic glass[J]. *Journal of Alloys and Compounds*, 2021, 887: 161386.
- [53] 李晓琛, 王世颖, 华天宇, 等. 深冷处理对 TC4 钛合金退火过程中微观组织和力学性能的影响[J]. *金属热处理*, 2022, 47(6): 46-53.
- [54] 郑会会. 深冷处理对 TC4、TC18 钛合金板材室温性能的影响[D]. 长春: 吉林大学, 2019.
- [55] Song X, Qi H P, Sun Z S, et al. The effect of annealing and cryogenic treatment on the microstructure and mechanical properties of Ti-6Al-4V alloy[J]. *Journal of Materials Engineering and Performance*, 2025, 34(3): 2063-2070.
- [56] Gu K X, Zhao B, Weng Z J, et al. Microstructure evolution in metastable β titanium alloy subjected to deep cryogenic treatment[J]. *Materials Science and Engineering A*, 2018, 723: 157-164.
- [57] Yumak N. Influence of cryogenic treatment combined with multi-step aging on wear behavior of Ti-15V-3Al-3Sn-3Cr metastable beta titanium alloy[J]. *Transactions of the Indian Institute of Metals*, 2022, 75(12): 3167-3174.
- [58] Zhang Z H, Chen W L, Liu Q, et al. Deep cryogenic and thermal aging treatments of Ti-5Al-5Mo-5V-3Cr alloy additively manufactured by powder bed fusion-laser beam[J]. *Advanced Engineering Materials*, 2024, 26: 2400751.
- [59] Dvorak J, Kral P, Kadomtsev A G, et al. Influence of cryo-processing and post-SPD annealing on creep behavior of CP titanium[J]. *Materials*, 2022, 15(5): 1646.
- [60] Wang Q G, Liu X Y, Ren Y J, et al. Microstructural evolution and cryogenic and ambient temperature deformation behavior of the near- α titanium alloy TA15 fabricated by laser powder bed fusion[J]. *Journal of Alloys and Compounds*, 2024, 1001: 175075.
- [61] 王瑶, 李永刚, 李文辉, 等. 深冷处理对 TC4 钛合金滚磨光整加工性能的影响[J]. *稀有金属*, 2021, 45(11): 1289-1298.
- [62] 罗暹. TC4 钛合金超声滚压表面强化方法与机理研究[D]. 北京: 北京科技大学, 2023.
- [63] Li G R, Qin T, Fei A G, et al. Performance and microstructure of TC4 titanium alloy subjected to deep cryogenic treatment and magnetic field[J]. *Journal of Alloys and Compounds*, 2019, 802: 50-69.
- [64] 雷达, 李永刚, 李文辉, 等. 深冷处理对钛合金力学性能及摩擦磨损性能的影响[J]. *机械科学与技术*, 2021, 40(4): 566-571.
- [65] 马谭达敢. 深冷及渗氮复合处理对 TC4 钛合金摩擦磨损性能影响研究[D]. 北京: 北京交通大学, 2025.
- [66] 徐连勇, 葛可可, 韩永典, 等. 深冷处理对 Ti-6Al-4V 合金 EBW 焊缝组织及性能的影响[J]. *焊接学报*, 2018, 39(2): 89-92.