引用格式：冉兴，王哲. 航空钛合金返回料的循环再生应用及发展现状[J]. 中国材料进展，2026，45(10)：1059-1070.
RAN X，WANG Z. The Recycling and Application of Return Titanium Alloy Materials in Aviation and the Current Development Status[J]. Materials China，2026，45(10)：1059-1070.

航空钛合金返回料的循环再生应用及发展现状

冉 兴[1,2]，王 哲[1]
（1. 中航重机股份有限公司，贵州 贵阳 550005）
（2. 中航工业先进航空锻铸技术创新中心，贵州 贵阳 550005）

摘 要：钛合金作为航空领域的核心战略材料，其加工过程中因材料利用率低产生大量返回料，此类返回料富集钛、铝、钒等关键元素，具有极高的航空级回收价值。基于国内外文献及航空产业实践，系统综述了钛合金返回料从废料收集、预处理、熔炼再生到高端应用的技术进展。重点分析了航空领域钛合金返回料特有的关键技术体系，指出当前国内航空领域钛合金返回料应用的瓶颈及与国外发达国家的差距。从标准体系、技术攻关、产业协同、规模发展 4 个方面剖析了国内航空钛合金返回料的未来发展方向与挑战，强调钛合金返回料回收及应用对航空领域降低成本、保障钛材供应链安全的战略意义，希望为航空领域钛合金返回料工程化应用提供参考。

关键词：钛合金；返回料；航空领域；循环利用；低成本
中图分类号：TG146.23 **文献标识码**：A **文章编号**：1674-3962(2026)10-1059-12

The Recycling and Application of Return Titanium Alloy Materials in Aviation and the Current Development Status

RAN Xing[1,2], WANG Zhe[1]
(1. AVIC Heavy Machinery Co., Ltd., Guiyang 550005, China)
(2. AVIC Advanced Aviation Forging and Casting Technology Innovation Center, Guiyang 550005, China)

Abstract: Titanium alloy serves as a core strategic material in the aviation field, its processing stage generates a substantial amount of return materials, this is primarily due to the relatively low material utilization rate. These return materials are highly enriched with crucial elements such as titanium, aluminum, and vanadium, thus possessing extremely high recycling value at the aviation grade level. Based on an in-depth review of both domestic and international literature, and practical applications in the aviation industry, this paper systematically summarizes the technological advancements across the entire chain of titanium alloy return materials, encompassing waste collection, pretreatment, remelting and regeneration processes, and their subsequent high-end applications. Particular emphasis is placed on the analysis of the distinctive key technology systems specific to titanium alloy return materials in the aviation field. By doing so, the paper clearly identifies the current bottlenecks in the application of titanium alloy return materials within the domestic aviation sector, and the disparities compared to developed foreign countries. Furthermore, the future development direction and challenges of domestic aerospace titanium alloy scrap are analyzed from four aspects: standard system, technological breakthroughs, industrial collaboration, and scale-up development. It underscores the strategic significance of the recycling and application of titanium alloy return materials in terms of cost reduction within the aviation industry and ensuring the security of the titanium material supply chain. Ultimately, this paper aims to provide valuable references for the engineering-scale application of titanium alloy return materials in the aviation field.

Key words: titanium alloy; return materials; aviation field; recycling utilization; low cost

收稿日期：2025-11-19 **修回日期**：2025-12-23
基金项目：中航重机创新基金项目(ZJQT-2025-05)；贵州省科技支撑计划项目(黔科技支持 JM(2025)007)
第一作者：冉 兴，男，1968 年生，正高级工程师
通讯作者：王 哲，男，1987 年生，正高级工程师，Email：tianchenzhe@163.com
DOI：10.7502/j.issn.1674-3962.202511012

1 前 言

材料是航空装备研制的核心物质基础，“一代飞机、一代发动机、一代材料”深刻诠释了航空装备与特种合金材料的协同发展关系。钛合金因具有优异的比强度与高

温性能，广泛应用于飞机机身与航空发动机关键部件[1]。然而，航空钛合金材料利用率普遍偏低：钛合金棒材成材率在 70%左右、板材成材率在 60%左右、管材成材率在 30%左右，航空锻件零件材料利用率低于 10%[2, 3]。在国内航空领域钛合金零部件的完整生产流程中，产生了大量未被有效循环利用的残钛料。据统计，2024 年全球钛材产量达 26 万吨，中国占比 65%，其中航空航天领域用量为 3.1 万吨[4]，如图 1 所示，该领域的钛材具有高品质、高附加值、低材料利用率的特点。所产生的残钛料没有在高端航空领域实现闭环利用，不得不降级应用于建筑、化工等民用领域，不仅造成了显著的资源浪费，还直接推高了钛合金部件的生产成本[5, 6]。

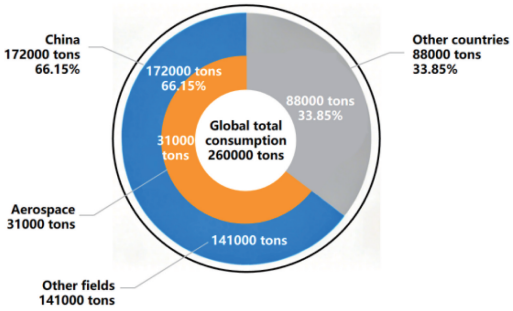


图 1 2024 年全球及我国钛材用量[4]

Fig. 1 Global and national titanium material consumption in 2024[4]

钛合金返回料的成本仅为海绵钛的 30%～40%，其高效循环利用具有重要的经济价值和战略意义。首先，返回料的应用可显著降低制造成本，通过大量添加返回料，可直接将原材料成本降低 30%以上[7, 8]。其次，节约战略资源，减少对海绵钛等初级原料的依赖，提高资源利用效率。再次，有利于环境保护和相关技术突破：减少废料排放，实现绿色制造，符合循环经济理念；可推动熔炼技术、质量控制、性能优化等关键技术的创新发展。最后，推动产业升级，促进钛合金产业向高端化、智能化、绿色化方向发展[9-11]。

与此同时，国家政策明确将“资源循环利用”“新材料”“高端装备”列为战略性新兴产业，习近平总书记强调“推进资源总量管理、科学配置、全面节约、循环利用”；《“十四五”循环经济发展规划》提出“推行循环型生产方式，建立资源循环型产业体系”；科技创新与绿色低碳也是航空工业高质量发展的核心方向之一。在此背景下，开展航空特种合金材料循环再生利用的相关研究成为必然。

本文主要就航空领域钛合金返回料的回收再利用现状及相关工艺技术进行综述，并对其未来的发展方向进行展望，以期为钛合金的高质量、绿色发展提供支撑。

2 返回料的来源与预处理

2.1 返回料的来源

钛合金返回料是钛及钛合金残料，可代替海绵钛熔炼铸锭，从而降低铸锭的成本。在钛及钛合金的生产过程中，残料主要产生在以下 5 个环节：海绵钛制造、海绵钛钛锭熔化、钛锭加工制造、最终产品制造、使用后最终产品的报废[12-17]。可见，钛合金生产和使用的各个环节都会产生残钛料，而且各个工序中产生了形状、尺寸、表面状况不同的残料。钛及钛合金残料的主要形式有：屑料、块状残料、管状料、边角料、铸锭帽口等，如图 2 所示。



图 2 钛合金返回料的部分形式

Fig. 2 Some forms of titanium alloy return materials

钛合金返回料根据污染程度可分为以下 3 类：清洁返回料、污染返回料、混合返回料。清洁返回料是指在生产过程中产生的、表面无明显污染的废料和加工余料，这类返回料表面洁净，无氧化皮、油污等杂质，化学成分明确，是最理想的回收原料，可直接回收利用[18]。污染返回料是指表面存在氧化层、油污或其他杂质的废料，

这类返回料需要经过预处理(如酸洗、碱洗、喷砂等)去除表面污染物后才能回收利用。混合返回料是指含有多种合金元素、成分复杂的废料，这类返回料成分复杂，需要精确分析和分类处理，回收难度较大[19-22]。

2.2　返回料的预处理

返回料预处理是保证最终产品质量的基础。预处理通常包括：分选、清洗、破碎和筛分。分选是根据合金成分和污染程度对返回料进行分类，避免不同牌号的钛合金相互污染。清洗则主要是去除表面氧化层和污染物。预处理后的返回料通常通过压块或点焊方式制备成自耗电极，为后续熔炼工艺做准备[23, 24]。

(1)分选技术

分选的核心目标是避免不同牌号污染，保障后续熔炼成分均匀性。针对航空返回料来源复杂的特点，主流技术各有侧重：人工分选依托外观特征(颜色、形状、标识)，适配小批量高价值物料；磁选利用钛合金无磁性的特性，去除铁屑等磁性杂质，多用于机加工屑料预处理；密度分选基于物料密度差异实现分离，重介质分选适用于块状料(分离钛合金与铝、不锈钢等)，气流分选适用于屑料或粉末料(分离非金属杂质)；光谱分析分选是牌号精准的核心保障，通过便携式光谱仪几秒内可完成成分检测，分类精度达 99%，可现场快速检测，避免传统化学分析的耗时与破坏性，解决多牌号混杂问题。

(2)清洗技术

清洗旨在去除氧化层、油污、切削液残留及微小颗粒，需根据污染类型协同应用酸洗、碱洗、超声波清洗和喷砂处理 4 种技术。酸洗采用氢氟酸-硝酸混合液，是去除氧化层的核心手段，航空领域需严格控制参数避免过腐蚀；碱洗用氢氧化钠或氢氧化钾溶液，专注去除油污与有机物，防止熔炼时生成碳化物影响部件疲劳寿命；超声波清洗通过空化效应产生高压冲击，高效清除缝隙微小杂质，适配精密返回料；喷砂处理用石英砂或氧化铝砂高速冲击，去除厚氧化层与顽固污染物，需严控砂粒硬度与压力以避免加工硬化。协同使用 4 种技术，可确保返回料表面纯净度符合航空标准[25-27]。

(3)破碎和筛分

在钛合金返回料预处理流程中，破碎和筛分是衔接清洗与熔炼的关键环节。破碎旨在将数米级大块余料调整至适配粒度，筛分保障粒度均匀，避免熔炼受热不均与成分偏析。破碎技术可按需选择：剪切破碎依托高剪切力将大块料剪切成规整小块，平稳无过多细粉，适配高价值大块料；锤式破碎通过高速锤头冲击中等硬度块状料，搭配筛网防过度破碎；球磨粉碎用于制备微米级颗粒料，一般用惰性气体保护防氧化，以满足航空增材制造的纯度要求。筛分采用多层振动筛或旋振筛，搭配不同孔径筛网分级，通过激光粒度仪实时检测分布，确保粒度合格率，以保障熔池对流顺畅，为航空锻件性能达标奠定基础[27, 28]。

当前对钛合金返回料虽已形成一套相对完整的预处理流程，但仍存在诸多瓶颈问题，制约着返回料回收利用的成本控制与质量稳定性提升。具体而言，核心问题集中在 4 个方面。首先，洁净化处理效果与分选效率偏低。钛合金返回料普遍夹杂油污、表面氧化物等杂质，不仅增加了高效分类与深度清洁的难度，更核心的问题在于 O，N，H 等杂质元素难以彻底脱除，这类杂质会直接导致后续熔炼铸锭出现脆化、塑性指标下降等质量缺陷[29]；现有分选技术均存在不同程度的局限性，调研显示，多数企业仍需依赖人工肉眼识别辅助分选，既降低了处理效率，又难以保证分选精度。其次，成分均匀性控制难度大。不同来源的返回料存在显著成分差异，以应用广泛的 TC4 合金为例，尽管国标明确其 Al 含量需控制在 5.5%~6.75%、V 含量在 3.5%~4.5%范围内(均为质量分数)，但各生产企业的内控成分区间存在细微偏差[30]。若直接混合处理而不进行精准分级，极易导致最终产品成分波动超出允许范围，进而严重影响材料力学性能的稳定性，无法满足高端应用场景的质量要求。再次，处理成本高且效率受限。设备投入门槛高，磁选、精准分选等核心设备造价昂贵，超出多数中小企业的承受能力；另外，生产流程灵活性不足，现有破碎、筛分流水线多为单牌号专用，更换合金牌号时需对设备进行彻底拆解清洗，虽对 TC4 等大宗牌号影响较小，但对小众牌号而言，设备清洗的时间成本与物料损耗成本大幅攀升，导致综合效益低下[31]。最后，酸洗工艺存在环保问题。预处理过程中普遍采用的酸洗工艺是主要污染来源，产生的废水、废气处理难度大，环保压力突出。随着国家环保政策持续收紧，新建或扩建酸洗产线的审批标准愈发严格，企业面临现有产线升级改造难、新增产能审批通过率低的双重困境，进一步限制了预处理规模的扩大与技术升级。

针对钛合金返回料的预处理，国内外相关单位进行了广泛的研究及应用探索。哈尔滨工业大学开发出含氢等离子电弧熔炼技术，通过热力学与动力学分析以及工艺控制，实现了钛合金废料中氧等低密度杂质元素的高效去除，并研究了氢分压对脱氧速率的调控作用等，为钛合金废料的高效、绿色回收和保级应用提供了理论依据和技术支持[29]。云南钛业公司提出块状返回料人工凿取取样法，通过初检比例≥50 件、机械除铁及无油污制样技术，显著提升了检测数据的代表性，避免了传统机

加工导致的污染问题[32]。宝钛集团早在 2008 年就建立了专用回收生产线，实现钛合金返回料的批量回收及预处理。西安海联石化科技有限公司与陕西天成航空材料股份有限公司合作，研发了“钛及钛合金返回屑料合金分选检测系统”，通过激光诱导击穿光谱(laser-induced breakdown spectroscopy，LIBS)技术获取光谱数据，结合神经网络模型，实现对 TC4、TA1、TC11 等合金牌号的高精度分选，解决了传统磁选无法区分合金类型的痛点[33, 34]。宝鸡北盛钛金属有限公司建成国内最大规模的碱酸洗生产线，采用“碱爆+酸洗+水洗”组合工艺，去除返回料表面的氧化皮、油污及重金属杂质，处理后的返回料表面光洁度显著提升，可直接用于熔炼[35]。

国外发达国家在航空钛合金返回料预处理方面进行了前沿探索。国外开发了机器人+LIBS 的智能分选系统，实现了返回料的快速、精准分选。例如，德国 SMS 公司的“Titanium Sorting System”，采用机器人抓取返回料，通过 LIBS 技术实时检测成分，分选速度达到 1000 件/小时，准确率≥98%，适用于大规模返回料处理[34]。近年来，基于氢等离子弧熔炼原理的氢辅助金属热还原技术受到关注。该技术利用活性氢原子在高温下还原钛中的氧，可有效去除返回料中的 O、N 等间隙杂质。美国 IperionX 公司采用该技术制备的球形钛合金粉末，满足增材制造对低氧钛粉的要求[36]。欧盟的《绿色协议产业计划》要求钛金属预处理过程减少碳排放。对此，法国 ArcelorMittal 公司采用电加热酸洗炉，酸洗过程的碳排放降低约 50%，同时采用酸液再生系统，酸液重复利用率达到 90%以上。

尽管国内相关单位在钛合金预处理方面取得了进展，但仍有较大的发展空间。未来，需从技术创新、工艺优化、成本控制及环保治理 4 个方面协同推进。在技术创新领域，可引入氢等离子弧熔炼技术、电化学脱氧技术等，改善返回料的增氧情况[29]。工艺优化需强化分类管理，建立返回料牌号数据库并进行溯源管理，避免混料污染；针对不同牌号开发专用工艺，如对 TA15 合金采用“碱洗+弱酸洗”防止 Al 腐蚀，对 TB8 合金采用“低温碱爆+超声清洗”以抑制 β 相分解[37]。成本控制方面，推动规模化预处理中心建设，通过连续式酸洗线和能源回收降低预处理成本。环保治理需推广水基酸洗液和生物酶降解技术，结合酸液再生系统及浮选-磁选联合工艺，实现废弃物资源化。通过上述措施，有望系统性解决钛合金返回料预处理中的纯度、成本与环保问题。

3 返回料的熔炼技术

目前，可用于钛合金返回料熔炼的设备主要有真空自耗电弧熔炼(vacuum arc remelting，VAR)炉(图 3)和电子束冷床(electron beam，EB)炉(图 4)。钛合金返回料回收利用时，EB 炉熔炼不受残料形式限制，可 100%利用；VAR 熔炼时，块状、长条状、铸锭冒口、圆饼可 100%利用，切削料一般不超过 50%[38, 39]。钛合金材料循环利用的熔炼技术主要为：多次 VAR 重熔；单次 EB 熔炼；EB+VAR 联合熔铸。20 世纪 80 年代末，国内开始对 TC4 钛合金返回料的回收利用工艺开展研究，返回料添加量为 25%~30%时，可获得具有良好室温和高温力学性能的 TC4 钛合金加工材。目前，我国宝钛集团、中铝沈阳有色金属加工厂、云南钛业、青海聚能等不少企业均相继建立了 EB 炉熔炼和返回料再利用生产线，但仅对添加纯钛返回料的熔炼技术研究较为成熟，而对添加钛合金返回料的铸锭熔炼技术还需进一步研究探索[40, 41]。

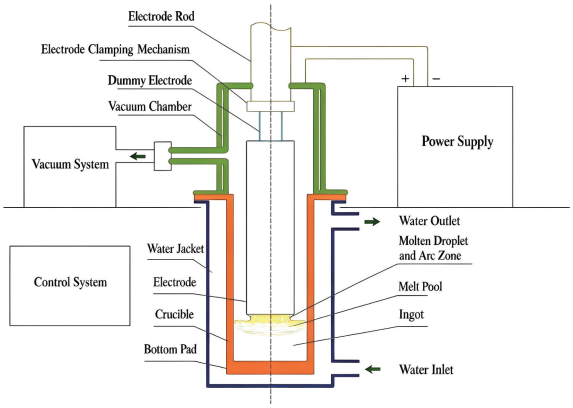


图 3 真空自耗电弧熔炼(VAR)炉结构示意图

Fig. 3 Schematic diagram of vacuum arc remelting (VAR) furnace structure

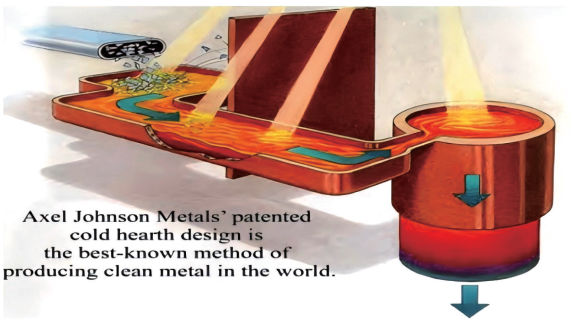


图 4 电子束冷床(EB)炉结构示意图[3]

Fig. 4 Schematic diagram of electron beam (EB) furnace structure[3]

VAR 熔炼是用回收料制备钛合金铸锭最常用的方法，以返回料自耗电极为负极、水冷铜坩埚为正极，真空电弧熔化、凝固。受自耗电极强度限制，返回料添加量≤50%。采用 VAR 熔炼的优点是设备成熟、操作简单、成本低，缺点是返回料比例有限、难去除高密度夹杂，可通过改进电极工艺等优化。EB 熔炼是返回料循环的理想熔炼技术，电

子束轰击熔化金属，流动通过冷床后凝固。返回料比例可达 100%，无需自耗电极，去夹杂能力强、成分均匀、适应性广、能耗低 20%～30%，但设备投资与维护成本高、对操作人员要求高，易挥发元素的损失难控制[25]。EB+VAR 联合熔铸整合两者优势，EB 炉去夹杂，VAR 炉提升成分均匀性与铸锭质量，返回料比例可达 80%～100%，研究验证了 TC4 合金返回料的性能与新料相当，符合使用要求标准[42]。不同的返回料熔炼技术比较如表 1 所示。

表 1　钛合金返回料熔炼技术比较

Table 1　Comparison of melting technologies for titanium alloy return materials

Technology	Advantages	Limitations	Applicable fields
EB melting	Excellent purification results, allowing direct reuse of return material, uniform composition	High equipment investment and high technical operation requirements	High-end aerospace and medical fields
VAR melting	Mature technology, relatively low cost	Limited purification capacity, requiring electrode preparation	General industrial and petrochemical fields
Combined EB+VAR melting and casting	High purification efficiency with precise control over composition	Long process flow and relatively high cost	Critical components for aviation

返回料的加入量对铸锭质量产生显著量化影响，国内外通过工艺创新解决了相关问题。未添加返回料时，钛锭成分稳定，例如全海绵钛熔炼的 TC4 铸锭，Al 元素含量可控制在 6.0%～6.3%范围内，纵向标准差低于 0.1%，力学性能均匀，抗拉强度在 895～1000 MPa，延伸率稳定在 10%以上[43]。然而，加入返回料后，问题凸显。当添加比例较低时，影响较小，但资源利用率低。添加比例升高(20%～30%)时，易挥发元素如 Al 的损失加剧，EB 炉熔炼添加 30%屑状返回料时，Al 元素平均含量降至 5.24%，纵向标准差达 0.76%，尾部因熔炼初期温度波动，Al 挥发更严重，可低至 4.15%，导致成分偏析[44]。同时，杂质元素如 O，C 可能富集，铸锭硬度从 270 升至 335 HV，塑性下降，延伸率从 16%降至 8%。若添加比例过高(50%以上)，铸锭中高密度夹杂和低密度夹杂风险增加，例如 TiC 或 TiO_2 析出，影响疲劳性能[45]。国内外解决方案聚焦于熔炼工艺优化：国内如宝钛集团采用 EB+VAR 联合熔炼工艺，将返回料添加比例提升至 20%～30%，通过精确控制电子枪电流和拉锭速度，使 Al 元素含量标准差从 0.76%降至 0.09%，抗拉强度稳定在 1005 MPa 以上，延伸率达 12%[42]；国外如美国 TIMET 公司应用高功率 EB 炉，结合添加铝豆补偿 Al 量，构建动态熔速模型，将返回料添加量提高至 60%，成分偏差控制在 0.1%内[27]。另一个关键创新是电极制备技术，用捆绑法替代传统焊接，避免了氧化夹杂，全返回料电极可实现 100%添加，但需控制密度均匀性[46]。此外，酸洗工艺可去除表面污染层，通过锻造再优化细化组织，使返回料铸锭制备的棒材性能与正常料相当[47]。这些措施降低生产成本 30%～40%，推动钛工业绿色转型，未来需引进智能监控系统提升精度[48]。

返回料添加量的量化影响不仅限于成分，还涉及微观组织和力学性能。当返回料添加量较少时，铸锭组织仍保持均匀的 $\alpha+\beta$ 魏氏结构，但添加比例增至 25%以上时，EB 熔炼铸锭中 Al 挥发导致 α 板条晶界变窄甚至消失，TiC 析出相增多，呈长条颗粒状弥散分布，降低塑性[49]。通过 VAR 熔炼时，返回料添加过多易造成电极强度不足，掉块风险增加，需通过油压机压制或捆绑法增强电极密度，例如添加 25%碎块料时，电极强度可维持，但添加 30%以上则出现开裂[50]。国内外钛合金返回料熔炼技术和返回料应用现状差异显著：国外早期就实现了高比例返回料利用，如俄罗斯采用 EB 炉熔炼时，返回料添加量达 80%，铸锭杂质元素如 O 含量控制在 0.15%以下；而国内起步较晚，但通过重点项目建设如宝钛集团的 3 万吨回收重熔基地，已将返回料利用率从 10%提升至 20%～30%[51]。

工艺参数精细调控是另一种有效途径，例如采用 EB 炉熔炼时，真空度和温度保持在一定水平，可减少 Al 挥发；双联工艺熔炼结合 EB 的净化优势和 VAR 的电磁搅拌，可提升均匀性，铸锭横向九点取样显示 Al 含量标准差从 0.26%降至 0.06%[19]。有研究表明，TC4 返回料经 EB+VAR 熔炼后，异形环锻件高温持久性能达标，表明了在航空领域应用的可行性[52]。经济性方面，返回料利用可以降低 50%的海绵钛消耗，但仍需平衡成本与质量，未来应推广 100%返回料技术，并加强残料鉴别[53]。总之，返回料添加对钛合金铸锭的量化影响明显，需通过综合工艺解决，国内外进展显著，但仍需持续创新以实现可持续发展。

4　国内外的应用发展现状

4.1　国外的应用发展现状

国外添加钛合金返回料的熔炼加工技术已非常成熟。美国、法国、俄罗斯等钛工业发达国家先后开展了钛合金返回料的回收利用研究工作，已掌握了钛合金返回料

回收处理及熔炼的关键技术，并形成工业化批量生产。国外对钛合金返回料处理技术也非常重视，从 20 世纪 60 年代初期开始研究，到 70 年代相继达到工业化生产规模，建立了众多的钛及钛合金返回料专业处理公司，仅美国 90 年代就有 5 家返回料专业处理企业，如 IMT 公司、Timet 公司的 Morgan 分部等，且都取得航空级认证，特别是 IMT 公司是 Timet 公司重要残料供货商。IMT 公司拥有比较完整的回收生产线，在残料处理装备、工艺技术及产品质量方面均达到很高水平，且规模大、自动化程度高，处理后的残料可以达到航空转动件级用料水平。据公开资料显示，美国于 2000 年在美国空军实验室材料与制造理事会的指导下，成立了金属可负担性倡议联盟(Metals Affordability Initiative Consortium)，目标是将航空领域金属构件的成本降低 50%，该联盟囊括了波音、洛克希德·马丁、普惠、通用、霍尼韦尔、罗罗、威尔曼等航空制造企业，而降低航空构件成本的主要途径之一是返回料的利用[54]。在美国，钛返回料的回收平均占铸锭生产的 35%～45%，航空领域中应用的钛合金加工材中，60%以上添加了钛合金返回料[55]。其他西方国家的钛合金相关公司也相继完善了各具特色的钛返回料回收工艺及装备。在美国、英国和法国等国家的有关航空用钛材标准中，都有可使用返回料的规定条款[2, 3]。

欧美等发达国家对钛合金返回料的过程管控非常严格，有一套标准化的处理流程。残钛料回收时，会按照牌号、品种、规格、表面状态等进行分类、分级，区分回收料的用途；然后根据不同的等级进行杂质去除、表面油污和氧化层的去除；再根据用途进行破碎、分切、备用。国外飞机结构用钛合金早已采用添加返回料进行铸锭生产，因此其价格明显低于国内产品。波音公司的 737 型客机和空客公司的 A320 型客机的钛合金板材按照 AMS4911 标准、空客公司的 A380 型客机按照 AIMS03—18 标准，均使用了添加返回料的 Ti-6Al-4V 钛合金。由于 EB 炉纯净化熔炼效果明显，近 10 年来，欧美国家生产的钛合金中，低密度夹杂和高密度夹杂的发现概率大幅度降低，航空关重件必须经过至少一次 EB 炉熔炼。EB 炉单次熔炼过程工艺简单，减少了电极块组装、焊接、一次锭熔炼等生产环节，工艺流程短，效率高，减少了制造时间，降低了成本。大量返回料的利用(通常可高达 70%以上)又降低了原材料的成本。

4.2 国内的应用发展现状

国内相关企业和研究院所早期采用 VAR 技术进行了残钛料回收技术的初步探索研究。近年来，随着我国高端设备的逐渐引进，EB 炉作为回收料主要熔炼方式，比如国内聚能钛业、宝钛、云钛、攀钢、中船 725 所等单位都不同程度地利用 EB 炉进行了残钛回收探索研究。此外，国内的科研单位也针对钛合金返回料、低成本钛合金的组织性能进行了系统研究，不管是设备层面还是技术层面，都具有较好的储备[56-60]。

钛合金返回料的高值化回收是降低钛材成本、缓解资源压力的核心路径，国内科研单位和企业围绕低成本制备、组织性能协同优化展开系统攻关，形成了从预处理、熔炼、成形到成分调控的全流程技术体系，相关研究成果已在多领域实现工程化应用，为钛产业绿色低成本发展提供关键支撑。

哈尔滨工业大学 Jiang 等[29]针对返回料中氧含量高的问题，开发了含氢等离子弧熔炼技术，通过氢分压调控脱氧动力学，实现了氧等低密度杂质的高效去除，同时保持力学性能不下降。在熔炼工艺低成本化与成分均匀性控制方面，南昌航空大学高爽[61]针对 TC4 钛合金返回料，建立合金元素挥发模型，精准预测 VAR 熔炼中 Al 挥发率达 23.4%～27.2%，通过 Al 含量补偿方案，使返回料添加比例提升至 25%时，铸锭 Al 元素含量纵向均值稳定在 6.14%，标准差仅 0.03%，满足标准要求，较传统工艺降低原料成本 30%以上。西安建筑科技大学史莹莹[46]通过优化 EB 工艺参数，实现 100%块状返回料熔炼，TC4 铸锭 Al 元素含量标准差降至 0.26%，较 VAR 工艺减少 2 次重熔工序，能耗降低 20%。宝武特冶公司联合西北有色金属研究院、昆明理工大学等 9 家单位承担了“十四五”国家重点研发计划项目，开发了 EB+VAR 双联熔炼技术，使航空级返回料添加比例达 40%，铸锭夹杂含量≤0.005%，成本较新料铸锭降低 35%，相关成果已应用于海洋工程装备[62]。云南钛业公司依托国产化 EB 炉，实现 100%返回料扁锭规模化生产，成品率 88%，打破进口设备依赖[63]。西部钛业公司开发了 TA15 和 TC6 返回料制备低成本 Ti52 钛合金铸锭的双联熔炼工艺，通过分层铺放返回料与电极块，解决了返回料成分不均匀问题，实现了 60%～80%返回料的高效利用，降低了 Ti52 合金的制备成本[64]。

中航重机公司联合南昌航空大学等单位，建立了返回料分类回收规范与多相场耦合熔炼模型，制备的大型飞机结构锻件组织均匀性达标，实现从返回料到成品件的全流程成本控制。沈阳铸造研究所针对返回料制备的构件塑性不足问题，提出通过 C 元素调控的改性方案，实现强度与塑性的平衡，为低品位返回料高值化利用提供新思路[28]。昆明理工大学在钛合金返回料回收利用领域开展系统性研究，形成从技术研发到产业化应用研发的完整链条，核心成果包括自主突破大型 EB 炉熔铸技术；研发超声波辅助脱氧、混沌混合理论下成分均匀性

调控等关键技术[65]。此外，昆明理工大学深度参与“十四五”国家重点研发计划项目，与云南钛业等企业开展产学研合作，成果已应用于航空、医疗等领域，通过返回料利用有效降低了钛合金成本、提高了资源利用率。

国内科研单位通过熔炼工艺优化、预处理技术创新、成分改性与短流程成形技术集成，实现钛合金返回料添加比例增加，制造成本降低，核心力学性能达到新料水平。依托国家重点研发计划等项目支撑，形成了高校、科研院所、企业协同的创新模式，相关技术已应用于钛合金回收料及构件等领域。

国内航空领域钛合金返回料应用正处于从技术突破向规模化落地转型的关键阶段，在政策驱动、技术升级与产业需求的共同作用下，已形成“回收-处理-熔炼-应用”的初步闭环，成为保障航空钛材供应链安全与降本增效的重要支撑。

在资源供给与产业基础方面，航空航天领域是国内钛废料的主要来源，这与航空钛材加工成材率低(普通零件利用率约 10%，复杂薄壁件不足 5%)的行业特点直接相关。回收产业呈现明显的区域集聚特征，陕西、四川、江苏等航空工业重镇成为回收核心区，其中陕西省回收量占全国 30%以上，为航空级返回料的就近处理与再利用提供了资源保障。技术突破是推动钛合金返回料航空级应用的核心动力。熔炼工艺已实现从传统 VAR 工艺向“EB+ VAR”双联工艺的升级，安立聚能、宝钛集团等企业通过 EB 炉熔炼技术研发，有效解决了返回料中的夹杂物去除与成分均匀性问题，可将 Al 含量偏差控制在 0.4%以内，优于国家标准要求的 1.25%。预处理环节则整合了分选、清洗、破碎等技术，宝钛集团率先建立专用回收生产线，实现再生钛锭的批量工业化生产。天成航材等企业已能稳定供应 TA15、TC4、TC4-DT 等航空常用牌号的再生钛锭。中航重机已开始打造钛合金返回料再生全产业链条，出台了《特种合金材料循环利用管理办法》，明确了循环利用的目标定位、基本原则、操作流程及责任分工；依托中航工业研究院的强大科研平台，中航重机建设了专业化的特种合金材料循环利用产线。该产线集成了国内外先进的生产设备与检测仪器，实现了从废料分类、预处理、再熔炼到成品检测的全链条自动化生产。中航重机下属企业特材公司已积极开展返回料的回收工作，建立了完善的回收网络和回收体系，将生产过程中产生的返回料进行集中回收和处理，降低了生产成本和环境污染。

在实际应用层面，钛合金回收料利用在民用航空与军用航空领域均取得实质性进展。民用航空领域，向空客供货的 Ti-6Al-4V 合金板材已实现 15%返回料添加，国产大飞机 C919 的部分结构件也开始采用再生钛材。军用航空领域，通过工艺优化，TC4 返回料已成功应用于歼-31 机身隔框等承力部件。目前，政策与标准体系建设正在加速完善。2025 年，工信部发布《关键战略材料发展规划(2025—2030)》，明确将钒钛材料列为新能源与国防领域核心材料，并设定了新的回收率目标：通过“钒钛磁铁矿直接还原-电炉熔分”等先进技术，钛回收率突破 45%。标准化方面，GB/T 45057—2024《再生钛锭》已于 2025 年 6 月 1 日实施，为航空级返回料的质量管控提供了统一依据。在此基础上，GB/T 20927—2026《回收钛原料》进一步细化了回收钛原料的分类与分级体系，将于 2027 年 2 月 1 日实施。

虽然钛合金返回料在应用领域取得了一些进展，但迄今为止，国内尚未建立起一条高比例添加钛合金返回料的完整再生专用生产线，没有统一的成分波动和残料收集处理标准，缺乏专业回收网络，返回料的利用率不高，实现从废料的收集、处理到电极压制及熔炼全过程控制的企业寥寥无几，大部分残钛料被降级使用，大量添加的稀贵合金元素被浪费。因此，在钛合金残料的回收和利用方面，我国还面临许多亟待解决的关键技术问题。

钛合金返回料的再利用关键是熔炼技术，而使用的主要熔炼设备是 EB 炉，当前国内 EB 炉已大量装备，表 2 展示了国内企业装备 EB 炉的情况。可见，国内的 EB 炉大部分来自进口，在设备型号、功率等方面与国外钛工业发达国家的相当。与欧美国家相比，我国钛合金返回料的再利用技术目前在以下方面存在主要差距：返回料的分级、分类、管理等方面缺乏相应的标准和规范，没有形成面向航空工业的高比例添加钛合金返回料的完整再生生产线；返回料的熔炼技术及再生钛合金的热加工工艺尚未完全掌握；缺少再生钛合金设计用的全面性能数据及评价标准。

总体而言，国内航空领域钛合金返回料应用已突破技术可行性瓶颈，具备规模化发展基础，未来随着标准完善、设备国产化与工艺成熟，有望在航空承力件、发动机部件等高端场景实现更大范围替代，成为航空绿色制造的核心支撑。

5　机遇与挑战

5.1　航空钛合金返回料的未来机遇

(1)国家政策与“双碳”目标的强力驱动

国家层面持续释放利好信号，为航空领域返回料回收提供政策支撑。工信部 2024 年专项文件就提出“建立航空钛合金返回料全生命周期追溯体系”，中央财政每年投入专项资金支持技术研发与产线建设。同时，航空工业

表 2 国内企业装备 EB 炉的情况

Table 2 Status of EB furnaces equipping in domestic enterprises

Manufacturer	Year introduced	Equipment origin	Equipment performance
Northwest Institute of Nonferrous Metals	2000	Germany	500 kW
Baotai Group	2005	Germany	2400 kW
	2021	China	3520 kW
Baosteel Special Steel	2008	United States	3200 kW
Luoyang Ship Material Research Institute	2010	Germany	3200 kW
Juneng Titanium Industry	2010	Ukraine	3150 kW
	2012	United States	4800 kW
	2018	China	1350 kW
Yunnan Titanium Industry	2010	United States	3200 kW
	2010	Ukraine	3150 kW
	2016	China	—
	2021	China	—
Baoji Nuclear Power	2021	Russia	3150 kW
Chaoyang Baisheng	2021	China	—
Tiancheng Aeronautical Materials	2020	—	—
Western Materials	2021	China	3150 kW
Xiangrun Technology	2023	—	—

“绿色制造”转型需求迫切，返回料重熔相较于原生料冶炼可减少 60%能耗与 55%碳排放，同时契合民航“净零碳排”目标，如中国商飞提出 2035 年民机制造碳排放降低 30%。政策与环保目标的叠加，为返回料回收打开了广阔政策空间。

(2)航空产业扩张带来的返回料资源增量

2021 年 12 月发布的《民用飞机中国市场预测年报(2021~2040 年)》和《通用航空中国市场预测年报(2021~2040)》指出，我国民航运输业将恢复稳定增长，未来 20 年中国市场共需要补充民用客机 7646 架，民用货机 650 架；中国通用航空具有很大发展空间，预计到 2040 年机队规模将大幅增加，固定翼通用飞机达 4.5 万架，民用直升机将超过 1 万架。

2022 年 2 月，空客公司发布 2040 年全球客运和货运飞机市场预测报告。指出，未来 20 年，亚太地区约需增加 17 620 架新的客运和货运飞机，其中近 30%新飞机将取代老式低燃油效率飞机。全球需新增约 39 000 架客运和货运飞机，其中将替换 15 250 架老旧飞机。

国内航空领域钛材需求与返回料产量呈同步增长态势，一方面，C919 进入量产阶段，军机更新换代加速，带动钛材年消耗量突破 3.5 万吨；另一方面，航空钛合金加工成材率极低(复杂发动机转子利用率不足 10%，机身薄壁件不足 5%)，2024 年国内航空领域产生的钛合金返回料已超 1.2 万吨，且以年均 15%的速度增长。充足的返回料资源为规模化回收提供了原料基础，尤其是 TC4、TA15 等主流合金牌号返回料占比超 80%，适配性强，降低了分类与熔炼难度。

(3)技术突破支撑航空钛合金返回料的应用可行性

国内已装备数量可观的 EB 炉，一些企业已基本突破返回料回收的核心技术瓶颈，为钛合金返回料的航空高端应用奠定基础。熔炼环节，“EB+VAR”双联工艺成熟度提升，安立聚能公司通过 EB 炉精准控制 Al 元素挥发率，搭配 VAR 炉精炼，使 TC4 返回料铸锭成分均匀性偏差满足 GJB 2744A—2019 航空锻件要求；预处理环节，通过“光谱分选+超声波清洗+喷砂”组合工艺实现返回料纯净度≥99.95%，杂质含量≤0.05%；成形环节，TC4 返回料成功应用于制备歼-31 机身隔框、CJ1000A 发动机机匣等承力件。技术突破使钛合金返回料从降级使用转向高端航空级复用，且成本较新料显著降低，具备经济可行性。

(4)供应链安全与降本需求的双重牵引

航空领域对钛合金的需求具有刚性、持续且高规格的特点，而原生钛材的供应体系存在多维度不确定性。一方面，钛作为战略金属，其原生资源的禀赋分布、开采加工能力受地域、技术、政策等因素制约，国际市场的价格波动、贸易壁垒、物流中断等外部风险可能直接影响航空钛材的稳定供应；另一方面，国内航空高端钛材仍存在一定对外依存度，核心牌号的原生料供应若过度依赖外部渠道，易在极端情况下面临“断供”风险，威胁航空装备研制与生产的连续性。返回料作为钛材的再生资源，能够打破对原生料的单一依赖，同时，返回料的回收利用依托国内航空工业体系内的资源流转，可实现钛材的自主循环，减少对外部资源的依赖，进一步强化航空钛材供应的自主可控性。

另外，钛合金的高成本特性始终是航空工业总成本控制的重要挑战。航空用钛合金不仅原生料采购成本高，且加工过程中因成材率低、工艺复杂，导致全生命周期成本居高不下[66-68]。返回料的核心优势在于成本端的显著优化，直接降低原材料采购支出；同时，返回料的重熔与加工流程可依托现有产业体系，无需重复原生料开采、提纯等高成本环节，进一步压缩全流程成本。对于航空工业而言，无论是民机领域的市场竞争需要，还是军机领域的资源高效利用要求，降本均是核心诉求之一。返回料回收利用将原本废弃的资源转化为可用原材料，

既减少了废料处置成本，又降低了新料采购支出，形成“降本-增效”的正向循环，成为航空工业优化成本结构的重要突破口[69]。

5.2　航空领域的钛合金返回料应用的未来挑战

(1)标准体系滞后，航空专用规范缺失

国内尚未建立针对航空领域钛合金返回料的专用标准体系，现有标准难以满足航空级要求：一是分类分级标准空白，现有标准未明确航空返回料的牌号标识、污染等级划分，导致主机厂对返回料产品信任度低；二是性能评价标准缺失，航空发动机转动件需考核疲劳寿命、断裂韧性等指标，但目前无再生钛合金的专项测试规范，只能参照新料标准，无法体现返回料特性；三是与国际标准衔接不足，美国、欧盟已细化航空返回料的熔炼参数、杂质限值，国内标准滞后导致国产再生钛材难以进入国际航空供应链。

(2)元素控制与性能一致性等技术难题待突破

航空领域对钛合金性能稳定性要求极高，虽然国内返回料已经在部分航空部件中应用，但返回料回收仍面临技术瓶颈。一是元素挥发与补偿精度不足，EB 炉熔炼返回料时，Al 元素挥发率波动，现有中间合金补偿方法难以精准控制，导致成分达标批次合格率偏低；二是性能一致性差，返回料来源复杂，导致同一批次铸锭的成分、组织存在偏差，力学性能存在波动，难以满足航空承力件的批次稳定性要求；三是微量杂质累积，返回料经多次循环后，Fe，C 元素含量易超标，会降低航空部件的力学性能，尚无经济有效的去除技术[70-72]。

(3)产业链协同不足，军民用应用不均衡

航空返回料回收涉及主机厂、回收企业、熔炼厂、锻铸厂多环节，但协同机制尚未建立。一是信息断层，例如主机厂退役部件返回料的牌号、服役状态等关键信息未同步给回收企业，导致分类难度加大；二是利益分配不均，返回料价值高，但主机厂与回收企业的定价机制不透明，影响回收积极性；三是军民用应用不均衡，民用航空已小范围采用返回料，但军用高端领域因质量风险顾虑，返回料应用比例很低，远低于美国军用航空 60%的水平[73]。

(4)设备与环保成本高，规模化受限

航空级返回料处理的设备与环保成本制约规模化发展，一是核心设备依赖进口，EB 炉的电子枪、VAR 炉的铜坩埚等核心部件进口占比超 70%，设备投资超 1 亿元，中小企业难以承担；二是环保成本高，酸洗、喷砂等环节需配套废水处理、粉尘收集系统，提高了回收成本；三是回收网络分散，航空返回料多分散于全国数 10 家企业，收集运输成本高，难以形成规模效应，导致航空级再生钛材产量占国内再生钛锭总量的比例偏低。

6　结　语

为支撑国家重大战略任务，践行高质量发展、绿色发展理念，破解航空领域钛合金产业链高成本困境与高端钛材供应链安全难题，发展钛合金返回料回收再利用技术已是必然趋势。

伴随着以精准预处理+“EB+VAR”双联纯净化熔炼为主的核心工艺技术的突破，我国航空领域钛合金在返回料循环再利用方面取得显著进步，包括返回料的光谱分选与超声清洗净化技术、EB 炉夹杂物高效去除工艺、航空级锻件多火次成形调控技术等，所制备的钛合金构件已成功应用于军机机身承力件、民机结构件及航空发动机静子部件等关键场景，初步实现从降级使用到高端航空级复用的跨越。

开发更先进的航空级钛合金返回料管理体系、纯净化与性能管控工艺技术，需相关行业协会牵头制定或完善航空专用返回料分类分级标准、性能评价规范及全生命周期追溯体系，提升返回料精细化管理水平。此外，应鼓励产学研用协同研发，加强钛合金返回料在高端场景的应用技术研究，攻克返回料成分均匀性控制、多循环杂质累积等工程化难题，力争早日缩短与国际先进水平的差距，为航空工业绿色化、自主化发展筑牢资源循环根基。

参考文献　References

[1] 赵永庆，葛鹏，辛社伟. 中国材料进展[J]，2020，39(7/8)：527-534.
ZHAO Y Q，GE P，XIN S W. Materials China[J]，2020，39(7/8)：527-534.

[2] 辛社伟，刘向宏，张思远，等. 稀有金属材料与工程[J]，2023，52(11)：3971-3980.
XIN S W，LIU X H，ZHANG S Y，*et al*. Rare Metal Materials and Engineering[J]，2023，52(11)：3971-3980.

[3] 赵秦阳，陈永楠，徐义库，等. 中国有色金属学报[J]，2021，31(11)：3127-3140.
ZHAO Q Y，CHEN Y N，XU Y K，*et al*. The Chinese Journal of Nonferrous Metals[J]，2021，31(11)：3127-3140.

[4] 安仲生，赵巍. 钢铁钒钛[J]，2025，46(3)：1-8.
AN Z S，ZHAO W. Iron Steel Vanadium Titanium[J]，2025，46 (3)：1-8.

[5] 杜彬，张志斌，雷云清，等. 中国有色金属学报[J]，2020，30(11)：2706-2713.
DU B，ZHANG Z B，LEI Y Q，*et al*. The Chinese Journal of Nonferrous Metals[J]，2020，30(11)：2706-2713.

[6] YANG Z Y，LV Z P，LI S L，*et al*. Journal of Environmental Chemical Engineering[J]，2025，13：118089.

[7] ROH K M, SUH C Y, OH J M, *et al*. Powder Technology[J], 2014, 253: 266-269.

[8] CUVALCI O, VAROL T, AKCAY S B, *et al*. Powder Technology [J], 2023, 426: 118637.

[9] 王磊, 王尧, 李晓峰, 等. 钛工业进展[J], 2025, 42(5): 43-48.
WANG L, WANG Y, LI X F, *et al*. Titanium Industry Progress[J], 2025, 42(5): 43-48.

[10] MONTGOMERY J S, WELLS M G H, ROOPCHAND B, *et al*. JOM [J], 1997, 49(5): 45-47.

[11] KOSAKA Y, FOX S P, FALLER K, *et al*. Journal of Materials Engineering and Performance[J], 2005, 14(6): 792-798.

[12] QU Z C, LIU J C, SU T, *et al*. Frontiers in Chemistry[J], 2023, 11: 1201390.

[13] 赵永庆, 李玥璐, 吴欢, 等. 稀有金属[J], 2004, 28(1): 66-69.
ZHAO Y Q, LI Y L, WU H, *et al*. Chinese Journal of Rare Metals [J], 2004, 28(1): 66-69.

[14] ZHANG K R, TIAN S, ZHANG Y Z, *et al*. Materials & Design [J], 2025, 254: 114137.

[15] ZHAO Y Q, WU W L, CHANG H, *et al*. Materials Science and Engineering: A[J], 2006, 416: 181-186.

[16] YILITI Y, ZHOU Y N, HAN W J, *et al*. Separation and Purification Technology[J], 2025, 377: 134204.

[17] HU J M, CAI Y Q, GUO J, *et al*. Electrochimica Acta[J], 2024, 507: 145064.

[18] 冯秋元, 佟学文, 王俭, 等. 材料导报[J], 2017, 31(9): 128-134.
FENG Q Y, TONG X W, WANG J, *et al*. Materials Reports[J], 2017, 31(9): 128-134.

[19] 金和喜, 魏克湘, 李建明, 等. 中国有色金属学报[J], 2015, 25(2): 280-292.
JIN H X, WEI K X, LI J M, *et al*. The Chinese Journal of Nonferrous Metals[J], 2015, 25(2): 280-292.

[20] 张文毓. 航空制造技术[J], 2011, 54(5): 74-76.
ZHANG W Y. Aeronautical Manufacturing Technology[J], 2011, 54 (5): 74-76.

[21] 高娃, 张存信. 钛工业进展[J], 2008, 25(3): 6-10.
GAO W, ZHANG C X. Titanium Industry Progress[J], 2008, 25 (3): 6-10.

[22] 张英明, 韩明臣, 舒滢, 等. 稀有金属快报[J], 2007, 26(7): 7-11.
ZHANG Y M, HAN M C, SHU Y, *et al*. Rare Metals Express Letters[J], 2007, 26(7): 7-11.

[23] FROES F H, FRIEDRICH H, KIESE J, *et al*. JOM[J], 2004, 56 (2): 40-44.

[24] 朱知寿, 商国强, 王新南, 等. 钛工业进展[J], 2012, 29(6): 1-5.
ZHU Z S, SHANG G Q, WANG X N, *et al*. Titanium Industry Progress[J], 2012, 29(6): 1-5.

[25] 于兰兰, 毛小南, 张英明, 等. 钛工业进展[J], 2009, 26(2): 14-18.
YU L L, MAO X N, ZHANG Y M, *et al*. Titanium Industry Progress[J], 2009, 26(2): 14-18.

[26] 邱炜宸, 赵军, 刘时兵, 等. 材料导报[J], 2024, 38(S2): 400-404.
QIU W C, ZHAO J, LIU S B, *et al*. Materials Reports[J], 2024, 38(S2): 400-404.

[27] 刘莎莎. 有色矿冶[J], 2025, 41(4): 25-28.
LIU S S. Nonferrous Mining and Metallurgy[J], 2025, 41(4): 25-28.

[28] 邱炜宸, 赵军, 刘宏宇, 等. 材料导报[J], 2025, 39(S1): 617-621.
QIU W C, ZHAO J, LIU H Y, *et al*. Materials Reports[J], 2025, 39(S1): 617-621.

[29] JIANG B T, WANG L, ZHOU G T, *et al*. Advanced Science[J], 2025, 12 (10): 2414747.

[30] 杨芳, 邱上兴, 李馨, 等. 一种基于钛废料制备超高强韧 TC4 钛合金的方法: CN202510141738.8[P]. 2025-05-23.
YANG F, QIU S X, LI X, *et al*. A Method for Preparing Ultra-High Strength and Toughness TC4 Titanium Alloy Based on Titanium Waste: CN202510141738.8[P]. 2025-05-23.

[31] 梁高飞, 肖永江, 夏以民, 等. 一种 TC4 钛合金块状返回料去除氧化皮的方法: CN202410464510.8[P]. 2024-04-17.
LIANG G F, XIAO Y J, XIA Y M, *et al*. A Method for Removing Oxide Scale from TC4 Titanium Alloy Scrap Material: CN202410464510.8 [P]. 2024-04-17.

[32] 蒋泰旭, 姜浩, 黄晓慧, 等. 一种块状钛及钛合金返回料取样与检测方法: CN202410457017.3[P]. 2024-07-12.
JIANG T X, JIANG H, HUANG X H, *et al*. A Method for Sampling and Testing of Scrap Titanium and Titanium Alloy Ingots: CN202410457017.3[P]. 2024-07-12.

[33] 张乃禄, 车伟, 孟智彬, 等. 一种钛及钛合金返回屑料合金分选检测方法和系统: CN202410895079.2[P]. 2024-11-15.
ZHANG N L, CHE W, MENG Z B, *et al*. A Method and System for Sorting and Detecting Titanium and Titanium Alloy Scrap Materials: CN202410895079.2[P]. 2024-11-15.

[34] 张钰哲, 韩松, 孟智彬, 等. 一种钛及钛合金返回屑料合金牌号在线分析系统: CN202410895292.3[P]. 2025-05-02.
ZHANG Y Z, HAN S, MENG Z B, *et al*. An Online Analysis System for Alloy Grades of Titanium and Titanium Alloy Return Scrap: CN202410895292.3[P]. 2025-05-02.

[35] 张乃禄, 孟智彬, 刘裕民, 等. 一种钛及钛合金块状回收料表面处理方法: CN202510518475.8[P]. 2025-06-06.
ZHANG N L, MENG Z B, LIU Y M, *et al*. A Surface Treatment Method for Titanium and Titanium Alloy Scrap Materials: CN202510518475.8[P]. 2025-06-06.

[36] OH J M, ROH K M, LIM J W. International Journal of Hydrogen Energy[J], 2016, 41 (48): 23033-23041.

[37] 张晓锋, 尹正培, 梁高飞, 等. 一种钛及钛合金块状返回料酸洗方

法：CN202410457023.9[P]. 2024-04-16.
ZHANG X F, YIN Z P, LIANG G F, *et al*. An Acid Pickling Method for Titanium and Titanium Alloy Scrap Materials：CN202410457023.9[P]. 2024-04-16.

[38] 杜彬，张志斌，曹寿林，等. 钛工业进展[J]，2021，38(1)：13-19.
DU B, ZHANG Z B, CAO S L, *et al*. Titanium Industry Progress[J], 2021, 38(1): 13-19.

[39] 陈峰，陈丽，国斌，等. 中国有色金属学报[J]，2010，20(S1)：873-876.
CHEN F, CHEN L, GUO B, *et al*. The Chinese Journal of Nonferrous Metals[J], 2010, 20(S1): 873-876.

[40] 邵志文. 金属功能材料[J]，2023，30(4)：1-10.
SHAO Z W. Metallic Functional Materials[J], 2023, 30(4): 1-10.

[41] 余挺，王晓蓉，于连旭，等. 铸造技术[J]，2021，42(1)：61-64.
YU T, WANG X R, YU L X, *et al*. Foundry Technology[J], 2021, 42(1): 61-64.

[42] 叶宁，冉兴，付绪楷，等. 锻压技术[J]，2025，50(2)：7-15.
YE N, RAN X, FU X K, *et al*. Forging & Stamping Technology[J], 2025, 50(2): 7-15.

[43] 张英明，周廉，孙军，等. 稀有金属快报[J]，2008(5)：9-14.
ZHANG Y M, ZHOU L, SUN J, *et al*. Rare Metals Express Letters[J], 2008(5): 9-14.

[44] 董燕妮，范广轩，张宝秋. 科技创新与应用[J]，2021，11(3)：110-113.
DONG Y N, FAN G X, ZHANG B Q. Technology Innovation and Application[J], 2021, 11(3): 110-113.

[45] 邱炜宸，赵军，刘时兵，等. 材料导报[J]，2024，38(S2)：390-394.
QIU W C, ZHAO J, LIU S B, *et al*. Materials Reports[J], 2024, 38(S2): 390-394.

[46] 史莹莹. 添加返回炉料生产钛及钛合金铸锭工艺研究[D]. 西安：西安建筑科技大学，2019.
SHI Y Y. Study on the Process of Producing Titanium and Titanium Alloy Ingots with Added Return Charge[D]. Xi'an: Xi'an University of Architecture and Technology, 2019.

[47] 丁长勤，高博，魏寿庸，等. 中国有色金属学报[J]，2010，20(S1)：21-24.
DING C Q, GAO B, WEI S Y, *et al*. The Chinese Journal of Nonferrous Metals[J], 2010, 20(S1): 21-24.

[48] 王桂生. 钛的应用技术[M]. 长沙：中南大学出版社，2007：472.
WANG G S. Application Technology of Titanium[M]. Changsha: Central South University Press, 2007: 472.

[49] 周彦邦. 钛合金铸造概论[M]. 北京：航空工业出版社，2000：318.
ZHOU Y B. Introduction to Titanium Alloy Casting[M]. Beijing: Aviation Industry Press, 2000: 318.

[50] 谢成木. 钛及钛合金铸造[M]. 北京：机械工业出版社，2004：418.
XIE C M. Casting of Titanium and Titanium Alloys[M]. Beijing: China Machine Press, 2004: 418.

[51] 樊振中，徐秀利，王玉灵，等. 特种铸造及有色合金[J]，2014，34(3)：285-289.
FAN Z Z, XU X L, WANG Y L, *et al*. Special Casting & Nonferrous Alloys[J], 2014, 34(3): 285-289.

[52] 李毅. 钛工业进展[J]，2012，29(3)：22-25.
LI Y. Titanium Industry Progress[J], 2012, 29(3): 22-25.

[53] 南海，谢成木. 中国铸造装备与技术[J]，2003(6)：1-3.
NAN H, XIE C M. China Foundry Machinery & Technology[J], 2003(6): 1-3.

[54] RICK M, DANIEL E. JOM[J], 2000, 3: 24-28.

[55] 李珍，孙建科. 低成本钛合金的开发与应用[C]//第十三届全国钛及钛合金学术交流会会议文集. 洛阳：中国有色金属学会，2008：973-976.
LI Z, SUN J K. Development and Application of Low-Cost Titanium Alloys[C]//Proceedings of the 13th National Academic Exchange Conference on Titanium and Titanium Alloys. Luoyang: The Nonferrous Metals Society of China, 2008: 973-976.

[56] 费跃，朱知寿，王新南，等. 热处理工艺对新型抗疲劳低成本钛合金组织和性能的影响[C]//第十五届全国钛及钛合金学术交流会会议文集. 哈尔滨：中国有色金属学会，2013：398-402.
FEI Y, ZHU Z S, WANG X N, *et al*. Effect of Heat Treatment on Microstructure and Properties of a New Fatigue-Resistant Low-Cost Titanium Alloy[C]//Proceedings of the 15th National Academic Exchange Conference on Titanium and Titanium Alloys. Harbin: The Nonferrous Metals Society of China, 2013: 398-402.

[57] 郑超，朱秀荣，辛海鹰，等. 钛工业进展[J]，2020，37(2)：14-20.
ZHENG C, ZHU X R, XIN H Y, *et al*. Titanium Industry Progress[J], 2020, 37(2): 14-20.

[58] 费跃，朱知寿，王新南，等. 稀有金属[J]，2013，37(2)：186-191.
FEI Y, ZHU Z S, WANG X N, *et al*. Chinese Journal of Rare Metals[J], 2013, 37(2): 186-191.

[59] 陈宇，任晓龙，王佳乐，等. 钛工业进展[J]，2026，43(4)：7-13.
CHEN Y, REN X L, WANG J L, *et al*. Titanium Industry Progress[J], 2026, 43(4): 7-13.

[60] 赵锋，王啸，郭树祥. 中国材料进展[J]，2024，43(11)：1030-1034.
ZHAO F, WANG X, GUO S X. Materials China[J], 2024, 43(11): 1030-1034.

[61] 高爽. TC4 钛合金返回料熔炼工艺及成分均匀性控制研究[D]. 南昌：南昌航空大学，2024.
GAO S. Study on Melting Process and Composition Uniformity Control of TC4 Titanium Alloy Return Materials[D]. Nanchang: Nanchang Hangkong University, 2024.

[62] 王继斌. 利用返回料制备钛合金技术取得突破性进展——钛合金

返回料利用及板管材高效短流程制备关键技术开发项目中期审查专家咨询会议召开[EB/OL]. (2024-05-10)[2025-11-19]. https://www.cnmn.com.cn/ShowNews1.aspx?id=451358.
WANG J B. Breakthrough in Technology for Producing Titanium Alloys from Scrap Material—Expert Consultation Meeting on the Mid-Term Review of the Key Technology Development Project for Efficient, Short-Process Production of Titanium Alloy Sheet and Tube Materials Using Recycled Scrap was Held[EB/OL]. (2024-05-10)[2025-11-19]. https://www.cnmn.com.cn/ShowNews1.aspx?id=451358.

[63] 仝鑫, 尹正培, 龚霄榕, 等. 一种 EB 炉熔铸提高海绵钛到毛坯钛锭实际成材率的方法: CN202511732204.9[P]. 2026-04-07.
TONG X, YIN Z P, GONG X R, *et al*. A Method for Improving the Actual Yield of Sponge Titanium to Ingot Blanks Using an EB Furnace Melting Process: CN202511732204.9[P]. 2026-04-07.

[64] 曹江海, 弋可, 闫昭, 等. 一种 TA15 和 TC6 返回料制备低成本 Ti52 钛合金铸锭的方法: CN202510970379.7[P]. 2026-05-08.
CAO J H, YI K, YAN Z, *et al*. A Method for Preparing Low-Cost Ti52 Titanium Alloy Ingots from TA15 and TC6 Scrap Materials: CN202510970379.7[P]. 2026-05-08.

[65] 孔令鑫, 方浩宇, 赵彦, 等. 一种步进式超声波辅助脱氧回收钛合金的方法: CN202510206174.1[P]. 2025-02-25.
KONG L X, FANG H Y, ZHAO Y, *et al*. A Stepwise Ultrasonic-Assisted Deoxidation Method for Titanium Alloy Recovery: CN202510206174.1[P]. 2025-02-25.

[66] TOPOLSKI K, BOCHNIAK W, LAGODA M, *et al*. Journal of Materials Processing Technology[J], 2017, 248: 80-91.

[67] IBRAHIM K M, MHAEDE M, WAGNER L. Transactions of Nonferrous Metals Society of China[J], 2012, 22(11): 2609-2615.

[68] ZHAO Q Y, PI Z Q, LU X, *et al*. Materials Science and Engineering: A[J], 2020, 788: 139574.

[69] 朱知寿. 新型航空高性能钛合金材料技术研究与发展[M]. 北京: 航空工业出版社, 2013.
ZHU Z S. Research and Development of Novel High-Performance Titanium Alloy Materials for Aerospace[M]. Beijing: Aviation Industry Press, 2013.

[70] MITCHELL A. Materials Science and Engineering: A[J], 1999, 263(2): 217-223.

[71] 赵瑞斌, 张亮, 王红, 等. 钛工业进展[J], 2016, 33(1): 15-18.
ZHAO R B, ZHANG L, WANG H, *et al*. Titanium Industry Progress[J], 2016, 33(1): 15-18.

[72] 陈伟文. 有色金属材料与工程[J], 2020, 41(5): 61.
CHEN W W. Nonferrous Metal Materials and Engineering[J], 2020, 41(5): 61.

[73] FENG E, GAO D J, WANG Y T, *et al*. Journal of Environmental Management[J], 2023, 339: 117818.