

TC4 铸态与返回料组织特性及性能差异的对比研究

材料 2102 班：赵泊先 指导教师：张可人 论文类型：毕业论文

摘要：本研究聚焦钛合金制造领域残料利用率低的核心问题，以航空工业广泛应用的 TC4 钛合金为研究对象，系统对比原始合金与添加 50%返回料的再生合金在微观组织、力学性能及热处理响应上的差异。通过自主开发的全自动分拣装备实现高氧废料 99.4%分选率与夹杂物 99.9%去除率，采用真空电弧重熔与电子束熔炼双联工艺制备返回料铸锭，结合相同锻造参数保证工艺一致性。研究发现：钛合金切削屑料表面氧化膜颜色梯度变化与切削热积累直接相关，其显色机制由薄膜干涉效应和氧化物本征色共同调控；返回料经精细化分选后氧含量增量控制在 19ppm 极低水平，元素偏移引发 β 相比例提升与 α 相晶粒细化；再生合金在保持抗拉强度与原始合金相当的同时，延伸率显著提升 34.2%，冲击韧性达 34.714J/cm²；经三种典型热处理后，返回料的抗拉强度均满足国标要求。本研究为钛合金返回料在航空锻件领域的规模化应用提供了实验依据与理论支撑。

关键词：TC4 钛合金；返回料；氧化膜；微观组织；力学性能

1 研究背景与意义

钛及钛合金因其卓越的比强度、优异的生物相容性和出色的耐腐蚀性能，已成为航空航天、海洋工程及生物医疗领域的战略材料。然而钛金属冶炼过程能耗高达钢铁的 8 倍，从钛锭到航空零部件的材料利用率仅为 10%-20%，每年产生数百万吨高价值残料。国际钛协会统计显示，全球钛加工材产量 40%的成本源自原料损耗，因此发展返回料高效回收技术具有重大经济价值。

TC4 钛合金 (Ti-6Al-4V) 作为典型的 $\alpha+\beta$ 双相合金，占航空钛合金用量的 50% 以上。其名义成分中 6% 铝元素稳定 α 相并提升高温强度，4% 钒元素扩展 β 相区改善热加工性。当前返回料利用技术面临两大瓶颈：一是加工屑料表面氧化膜导致熔炼过程吸氧增脆；二是再生材料组织均匀性难以保障。本研究通过创新性分选技术破解氧含量控制难题，并结合多尺度表征手段系统解析组织性能演变规律，为建立钛合金资源循环技术体系提供科学依据。

2 实验材料与方法

2.1 材料制备

采用全自动分拣设备处理 TC4 切削屑料，设备集成锤击破碎、三重洗涤、色识别与双 X 射线监测模块，实现高氧废料分选率 99.4% 和高密度夹杂物去除率

99.9%。将 50% 处理屑料与 50% 原始 TC4 混合压制自耗电极，经两次真空电弧重熔与一次电子束熔炼制备返回料铸锭；对照组原始 TC4 采用三次真空电弧重熔工艺。两种材料经相同锻造工艺制成试样。

2.2 热处理方案

设计三种典型固溶时效工艺：方案①采用 960°C 固溶 1h 水冷 + 450°C 时效 1h 空冷，针对高强度低塑性需求；方案②采用 960°C 固溶 30min 水冷 + 500°C 时效 4h 空冷，旨在提升强度并降低残余应力；方案③采用 940°C 固溶 30min 空冷 + 500°C 时效 4h 空冷，侧重强度与塑性均衡匹配。

2.3 表征与测试

使用 X 射线衍射仪分析氧化膜物相组成；结合金相显微镜与扫描电镜观察显微组织；通过电子背散射衍射分析晶界分布与取向差；采用能谱仪测定元素成分；依据国家标准 GB/T 228.1-2021 进行室温拉伸试验，依据 GB/T 229-2020 进行夏比冲击试验；使用氧氮氢分析仪精确测定氧含量。

3 加工屑料氧化膜特性

切削速度从 62 m/min 升至 140 m/min 时，屑料表面颜色呈现黄色向蓝色最终至紫色的渐变过程。XRD 与 EDS 分析表明：黄色表面以厚度 1.97 μm 的 TiO_2 氧化层为主；蓝色表面因 VO_2 含量显著增加使氧化层增厚至 2.55 μm ；紫色表面 Al_2O_3 内层增厚且 TiO_2+VO_2 外层减薄至 700 至 800 nm。膜厚较小时，氧化膜表面颜色由薄膜干涉效应主导，公式为 $2nd=m\lambda$ ；当膜厚大于 1 μm 时，氧化膜主要成分的自身颜色决定氧化膜颜色。氧化膜颜色、膜厚及成分的关联性为基于色选的分拣技术提供了理论依据。

4 TC4 与返回料组织性能对比

4.1 显微组织特征

原始合金与返回料均呈现典型的双态组织特征，氧含量仅较原始合金增加 19 ppm，但返回料因色选工艺选择性剔除富 Al 贫 V 的高氧化屑料，导致 Al 元素含量降至 6.33%，V 元素含量升至 4.42%。元素差异引发显微组织变化：返回料等轴 α 晶粒尺寸细化至 21.8 μm ， β 相比例提升至 7.9%。EBSD 分析进一步显示返回料晶粒尺寸分布均匀性提高，KAM（核平均取向差）值降低表明残余应力减小。

4.2 力学性能

室温拉伸测试数据显示，TC4 返回料抗拉强度为 1055 MPa，较原始 TC4 合金

1063 MPa 降低 0.75%；延伸率达 10.01%，较原始 TC4 合金 7.45% 显著提升 34.2%。应力-应变曲线表明返回料呈现更平缓的加工硬化阶段。断口分析显示两类材料宏观均呈银灰色粗糙形貌伴明显颈缩，微观均表现为韧性断裂特征，返回料韧窝尺寸均匀分布，与晶粒尺寸分布均匀性相关。冲击性能测试测得 TC4 返回料冲击功 $KV_2=25.862$ J，冲击韧性为 34.714 J/cm²，断口宏观呈纤维状，边缘有剪切唇，微观为均匀韧窝结构，表明试样为韧性断裂。返回料合金力学性能均满足航空标准 GJB 2744A-2019 要求。机理分析表明：原始 TC4 合金高 Al 含量通过稳定 α 相增加界面强化效应，但限制了塑性变形能力；返回料高 V 含量促进 β 相形成，其体心立方结构提供 12 个滑移系，显著增强塑性协调能力，同时其更低的残余应力使强度略低。

5 热处理态组织与性能

5.1 组织演变

方案①和方案②的快速水冷工艺使两类材料均形成等轴 α 相、针状 α' 马氏体与细小时效相的复合组织，返回料 α 晶粒细化特征更显著；方案③的空冷工艺则维持双态组织结构，返回料 β 相比例更高且 α 晶粒尺寸更小。

5.2 力学性能

经方案①（960°C/1h 水冷 + 450°C/1h 空冷）处理后，TC4 返回料抗拉强度为 960 MPa，屈服强度为 833 MPa，延伸率为 2.13%；原始 TC4 合金抗拉强度为 1111 MPa，屈服强度为 1035 MPa，延伸率为 2.40%。两类材料拉伸曲线均未显示塑性变形阶段，断口宏观无颈缩，微观呈现河流状花样与撕裂棱，属准解理脆性断裂，符合高强度低塑性构件的预期性能。

经方案②（960°C/30min 水冷 + 500°C/4h 空冷）处理后，TC4 返回料抗拉强度达 1187 MPa，原始 TC4 合金抗拉强度为 1124 MPa。两类材料延伸率均低于 3%，断口宏观未见颈缩，微观形貌存在河流花样与少量韧窝共存特征，属准解理断裂。返回料强度较方案①提升 23.6%，表明延长时效时间可促进马氏体分解强化。

经方案③（940°C/30min 空冷 + 500°C/4h 空冷）处理后，TC4 原始合金抗拉强度为 1069 MPa，屈服强度为 1013 MPa，延伸率为 5.50%；TC4 返回料抗拉强度为 1047 MPa，屈服强度为 983 MPa，延伸率达 8.37%。返回料延伸率较原始合金提升 52.2%，断口呈银灰色粗糙形貌伴明显颈缩，微观为均匀分布的等轴韧窝，属典型韧性断裂。

三类热处理方案下返回料抗拉强度均超过国家标准 GJB 2744A-2019 中的要求，方案①与方案②适用于高强度需求场景，方案③满足综合性能要求。

6 结论

本研究通过系统实验与理论分析，分析研究了 TC4 与 TC4 返回料在组织性能上的差异，形成以下核心结论：

(1) TC4 加工屑料氧化膜颜色随切削速度升高呈现“黄→蓝→紫”渐变，厚度在 1.97~2.55 μm 范围内变化，屑料氧化膜颜色由光的薄膜干涉现象、厚度及成分影响。基于颜色识别的全自动分拣技术可有效剔除高氧化废料，使 TC4 返回料氧含量仅比 TC4 合金增加 19 ppm。

(2) TC4 返回料的等轴 α 晶粒尺寸更细， β 相含量增加，源于两种材料因色选过程带来的 Al 元素和 V 元素的差异。TC4 返回料拉伸断口呈韧性断裂特征，力学性能满足国标要求；其室温延伸率更高，主要归因于 β 相增多带来的滑移系增加与晶界协调变形能力增强；而其抗拉强度略低，与 α 相含量减少导致的界面强化效应减弱和残余应力更小相关。冲击性能亦满足国标韧性断裂要求。

(3) 经方案①、方案②处理后，TC4 与 TC4 返回料均形成以等轴 α +针状 α' 马氏体+细小时效相的组织，导致高强度但低塑性，断口呈准解理脆性特征；经方案③后，材料成双态组织，TC4 返回料强度略低但塑性更好，与未热处理态规律一致。三种热处理方案下 TC4 返回料强度均满足 GJB 2744A-2019 航空标准，验证了其工艺适用性。

本研究证实通过加工屑料高效分拣与熔炼工艺，添加 50% 返回料制备的 TC4 返回料合金在氧含量、组织及力学性能上均满足航空锻件标准，整体与 TC4 合金差异较小，其在航空非关键承力件、民用结构件中具备替代原始合金的潜力，可降低成本并减少资源浪费，为钛合金低成本化与资源循环利用提供了工业化应用依据。