TC4-DT钛合金返回料纯净化与熔炼技术研究

王劲涛

（陕西永泰立科技有限公司，西安 710500）

摘要：针对交通领域对高性能、低成本钛合金材料的迫切需求，围绕TC4-DT钛合金返回屑料的回收利用问题展开研究。通过自主设计的纯净化处理生产线对铸锭扒皮屑料进行处理，采用30%比例返回屑料与海绵钛混合，结合电子束冷床（EB）熔炼与真空自耗电弧熔炼（VAR）双联工艺制备铸锭，并通过锻造工艺制备典型锻件。为验证EB熔炼对高密度夹杂物（HDI）的去除能力，设计模拟试验，结果表明：直径大于0.5 mm的HDI可被冷床有效捕获，小于0.5 mm的HDI可在高温下溶解。采用高精度工业计算机断层扫描（CT）对3件锻件进行无损检测，结果显示其结构致密，无夹杂、孔洞及裂纹等缺陷，验证了该返回屑料纯净化与双联熔炼工艺的可靠性。

关键词：钛合金　返回料　电子束冷床熔炼　高密度夹杂　工业计算机断层扫描

中图分类号：TF823　　**文献标志码：**B　　**DOI:** 10.19710/J.cnki.1003-8817.20260026

Research on Purification and Remelting Technology of TC4-DT Titanium Alloy Scrap

Wang Jintao

(Shaanxi Yongtaili Technology Co., Ltd., Xi'an 710500)

Abstract: In response to the urgent demand for high-performance and cost-effective titanium alloys in the rail transit sector, this paper focuses on the recycling and utilization of TC4-DT titanium alloy returned scrap. A self-developed purification line is employed to process the turning scrap from ingot peeling. The purified scrap is blended with sponge titanium at a 30% ratio, followed by melting via a dual Electron Beam Cold Hearth Melting (EBCHM) and Vacuum Arc Remelting (VAR) process. Typical forgings are then prepared through open-die forging. To evaluate the removal capability of High-Density Inclusions (HDI) during EBCHM melting, a simulated test is designed. Results demonstrate that HDIs larger than 0.5 mm in diameter can be effectively captured by the cold hearth, while those smaller than 0.5 mm are dissolved under high temperature. High-precision industrial computed tomography is applied to conduct non-destructive inspection on three forgings. The results reveal a dense micro-structure, free from defects such as inclusions, pores, and cracks, confirming the reliability of the proposed purification and dual melting process.

Key words: Titanium alloy, Returned scrap, Electron beam cold hearth melting, High-density inclusion, Industrial computed tomography

1 前言

Ti-6Al-4V系列合金作为一种综合性能优异的轻质结构材料，广泛应用于航空航天、汽车制造等领域[1]。随着轨道交通装备向轻量化、长寿命、高可靠性方向发展[2]，钛合金因其优异的比强度、耐腐蚀性和疲劳性能，逐渐成为轨道交通车辆关键部件（如转向架、车体结构、连接件等）的理想材料[3-4]。然而，钛合金在加工过程中材料利用率低、成本高，限制了其规模化应用[5-6]。据统计，从海绵

作者简介：王劲涛（1993—），男，工程师，硕士学位，研究方向为轨道交通材料及腐蚀、金属钎焊等。

参考文献引用格式：

王劲涛. TC4-DT钛合金返回料纯净化与熔炼技术研究[J]. 汽车工艺与材料, 2026(6): 45-53.

WANG J T. Research on Purification and Remelting Technology of TC4-DT Titanium Alloy Scrap[J]. Automobile Technology & Material, 2026(6): 45-53.

钛到成品材料的利用率仅为40%~60%[7-8]，大量残料和屑料的产生推高了制造成本[9-12]。

为实现钛合金残料的循环利用、降低材料成本，返回屑料的回收与纯净化处理成为行业关注的焦点。然而，返回料中可能混入的乳化液、氧化物及机加刀具碎片等杂质[13]，尤其是高密度夹杂物，会严重影响材料的疲劳性能与服役安全性。在轨道交通领域，部件对材料的纯净度和内部缺陷控制要求极为严格[14-16]，因此，须开发高效的返回料净化与熔炼工艺，确保回收材料的质量稳定性。

目前，针对TC4-DT等高损伤容限钛合金返回屑料回收的研究报道较少，尤其缺乏针对轨道交通部件制造的系统性工艺验证与缺陷检测研究。基于此，本文以TC4-DT钛合金返回屑料为研究对象，构建“纯净化处理-电子束冷床（Electron Beam Cooling Bed，EB）+真空自耗电弧（Vacuum Consumable Arc，VAR）双联熔炼-工业计算机断层扫描（Industrial Computed Tomography，ICT）缺陷检测”全流程工艺体系，重点评估该工艺在轨道交通典型锻件制备中的可行性与可靠性，旨在为轨道交通领域钛合金材料的低成本、高质量制造提供技术支撑。

2 试验方法与设备

2.1 试验材料与熔炼方法

本文所用试验材料为直径为Φ210 mm的TC4-DT棒材，化学成分如表1所示。首先在海绵钛和中间合金中添加质量分数为30%的TC4-DT返回屑料（经纯净化处理后添加），随后利用电子束冷炉床和真空自耗熔炼，即EB+VAR双联熔炼方式进行铸锭熔炼，TC4-DT铸锭质量约为8 t，熔炼参数如表2所示。将铸锭进行开坯锻造，从而获得直径为Φ210 mm的棒材，随后利用模锻工序制备出3件典型锻件，分别命名为为1号锻件、2号锻件、3号锻件，锻件的状态及工业CT检测取样方式与实物如表3所示。

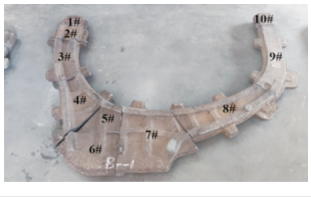
表1 TC4-DT化学成分（质量分数） %

Ti	Al	V	Fe	C	N	H	O	Y	Si	其他
基体	5.6~6.5	3.4~4.5	≤0.25	≤0.05	≤0.03	≤0.012 5	0.08~0.13	≤0.005	≤0.10	≤0.3

表2 EB+VAR双联熔炼工艺参数

熔次	坩埚尺寸/mm	熔前真空度/Pa	熔炼电流/A	炉型	冷却时间/h
一次	Φ735	≤2	5~10	EB	≥7.0
二次	Φ820	≤0.6	15 000~25 000	VAR	≥6.5

表3 3件典型锻件

锻件名称	锻件状态	锻件实物
1号锻件	经准β退火后切取了低倍试样，分为7块，依次编号为1#~7#	
2号锻件	经准β退火后切取了低倍试样，分为10块，依次编号为1#~10#	
3号锻件	经准β退火后切取了低倍试样，分为5块，依次编号为1#~5#	

2.2　钛合金返回屑料处理方法

返回屑料处理是将收集好的钛合金屑料经过破碎与筛分后,再通过清洗、漂洗降低在屑料收集过程中带入的C、N、O等气体元素,随后通过高比重分选、高密度分选、氧化物分选及多级磁选等减少高密度夹杂物和其他异物。返回屑料纯净化处理工艺过程如图1所示,包括破碎筛分、清洗漂洗、脱水烘干、高比重分选、氧化物分选、高密度分选、人工挑选、多级磁选及布料装桶等纯净化处理工序。为提高返回屑料的质量,保证添加返回料熔炼TC4-DT铸锭的成分稳定性、均匀性,特制定返回屑料处理工艺与控制要点,具体如表4所示。

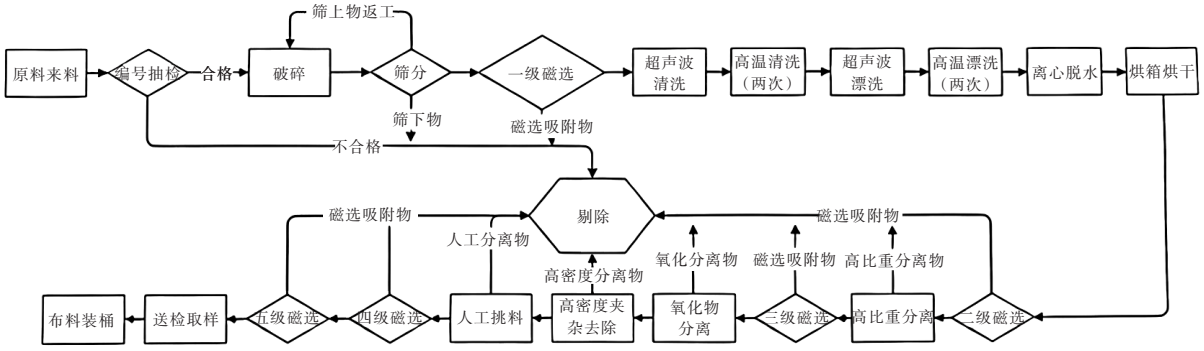


图1　返回屑料纯净化处理工艺路线

表4　返回屑料处理过程工艺与质量控制要点

序号	工序	控制要点	控制参数范围
1	破碎筛分	筛孔尺寸/mm	下筛孔1~5
2	多级磁选	磁选高度/mm	≤10
3	清洗漂洗	温度/℃ 滚筒转速/r·min^{-1}	50~100 1~10
4	烘干脱水	烘干温度/℃	250~350 ℃
5	高比重分选	振动频率/Hz	10~50
6	高密度分选	异物/背景灵敏度/lx	10~150
7	氧化物分选	进料电动机频率/Hz	250~350
8	人工挑料	100%检验	
9	成品验收	规格、表面 化学成分、挑选	
10	包装入库	标识、定点存放	

2.3　无损检测方法与设备

无损检测是在不损害检测对象使用性能和内部组织的前提下,通过材料缺陷引发的热、声、光、电、磁等信号变化,检测其内部及表面缺陷的类型、数量、位置等参数的方法。常用无损检测方法包括射线检验((Radiographic Testing,RT)、超声检测(Ultrasonic Testing,UT)、磁粉检测(Magnetic Particle Testing,MT)等,如表5所示。

工业CT作为先进的射线检测技术,具备分辨率高、可三维成像和定量分析缺陷的优势,适合钛合金锻件内部缺陷检测。本研究采用德国通用电气Phoenix v|tome|x C450型450 kV CT系统,体素分辨率为2.5 lp/mm,细节分辨能力最小为100 μm,配套数据处理软件为VG studio/Amira/Avizo/PerGeos。该设备适用于大型复杂零件的三维失效分析,可定量评估夹杂物、空洞等缺陷的尺寸、体积和密度,用于验证添加返回料的TC4-DT钛合金锻件内部"零缺陷"目标。

3　结果与讨论

3.1　TC4-DT钛合金返回屑料纯净化处理

3.1.1　钛及钛合金返回屑料质量风险识别

钛合金返回屑料在收集、存放过程中易引入各类质量风险,其中高密度夹杂物(High Density Inclusion, HDI)是影响材料服役性能的核心问题。高密度夹杂主要为W、Mo、Nb、Ta等难熔金属及其碳化物(如机加刀具来源的WC),此类杂质密度高、熔点远高于钛合金,在传统真空自耗电弧熔炼(VAR)中,熔池温度仅比纯钛熔点高约200 ℃且保温时间短,高熔点夹杂难以完全溶解,易下沉至熔池底部被液/固界面捕获,最终在铸锭中形成缺陷。

高密度夹杂物对钛合金性能危害显著,其与钛合金基体的物理性质、变形性能差异较大,易引发应力集中,成为疲劳裂纹萌生的核心源头;同时二者热膨胀系数的差异会在夹杂物周边产生内应力,加工过程中易形成微裂纹,即使未形成裂纹,也会破坏基体组织的均匀性与连续性,在复杂应

表5 常用无损检测方法对比

检测方法	适用范围	主要优点	主要缺点
射线检测	通过射线衍射信号显示各类缺陷，适用于材料次表面及内部裂纹、孔隙、高低密度夹杂物等缺陷，可成像	对直观显示缺陷的尺寸和性质，判断快速准确；对检测间无损坏且不污染环境，可原位检测	射线对人体健康有害，操作设备需防护，检测周期较长
超声检测	通过超声波反射信号显示各类缺陷，适用于各类材料表面和内部不连续组织及缺陷	设备轻便，超声波对人体健康无害，可定位缺陷的空间位置，检测速度快	缺陷显示不直观，精确定性和定量表征能力较弱；对制件形状的复杂性有一定限制且需要耦合剂
声振检测	通过设备振动噪声信号检测材料缺陷，适用于各类复合材料的裂缝等	可检测常规无损检测无法检测的部分复合材料缺陷	检测对象范围小，外场较难普及
磁粉检测	通过磁粉做显示介质显示各类缺陷，适用于铁磁性材料的各类缺陷，如尺寸极小的不连续性缺陷	灵敏度较高，可检测原材料、半成品、成品工件和在役的零部件，不受工件大小限制	检测对象局限于铁磁性材料，不能检测部分材料的焊缝
渗透检测	通过渗透检测剂显示各类缺陷，适用于金属、非金属，磁性、非磁性等多种材料	不需要复杂设备，可现场检测，可检材料种类范围大，具有较高的灵敏度，检测费用低	只能检测出表面开口缺陷，难以确定缺陷实际深度，难以定量评价，会产生污染

力作用下加速疲劳裂纹扩展，严重影响轨道交通钛合金部件的服役安全性。

针对高密度夹杂物的去除，本研究从全工艺链制定的角度提出解决方案：一是源头控制返回料收集质量，杜绝异物混入；二是采用EB+VAR双联熔炼工艺，利用EB熔炼的高温特性提升夹杂物去除能力；三是采用单根电极制备工艺，避免电极焊接引入钨夹杂；四是采用高精度工业CT开展无损检测，实现缺陷的精准识别与判定。

3.1.2 TC4-DT钛合金返回屑料收集处理方法

返回屑料的质量控制从规范收集开始，本研究制定“源头控制、区域管理、分类收集”的收集规范，实现屑料收集的标准化、可追溯。作业前需彻底清理设备及作业区域，严禁非作业人员及车辆进入；坯料装夹前精准调中，刀具领用执行“领取-检查-登记-修磨”流程；预扒皮工序车削深度控制在3 mm以内，保证坯料表面见光无氧化，缺陷处及时修磨，作业后排空排屑器并更换新刀。

扒皮作为核心屑料收集工序，严控作业全过程：作业前检查坯料表面无氧化及异物，配备专用收集装置；作业中严控扒皮屑质量，杜绝发蓝、发黄等氧化现象，实时调整转速与进刀量，持续添加冷却液，及时清理屑料避免缠绕污染，屑料随产随装严禁堆料；屑料收集执行严格分类标准，仅收集无氧化的二道扒皮屑，氧化屑、落地屑、带打刀痕迹屑料等均单独盛装剔除。合格屑料采用塑料转运箱专属包装，清晰标注批号、质量等信息，定点存放实现全流程追溯。

在规范收集的基础上，返回屑料需经多工序纯净化处理，核心流程为破碎筛分→清洗漂洗→脱水烘干→高比重分选→氧化物分选→高密度分选→人工挑选→多级磁选→布料装桶，各工序均制定明确的工艺控制标准：破碎筛分工序下筛孔尺寸控制为1~5 mm，多级磁选的磁选高度≤10 mm，清洗漂洗温度50~100 ℃、滚筒转速1 ~ 10 r/min，烘干脱水温度250~350 ℃，高比重分选振动频率10~50 Hz，高密度分选异物/背景灵敏度10~150 lx，氧化物分选进料电动机频率250~350 Hz；人工挑料环节执行100%全检，成品验收对规格、表面状态、化学成分进行全面检测，合格后标识包装入库。通过全工序标准化管控，有效去除返回屑料中的气体杂质（C、N、O）、高密度夹杂物及其他异物，保证返回屑料满足后续熔炼的质量要求。

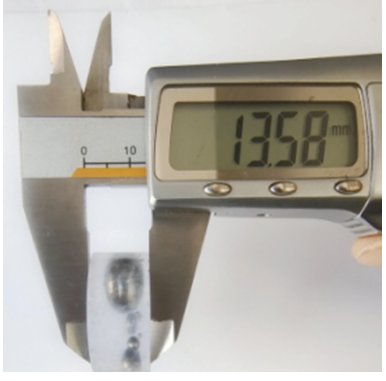
3.2 EB熔炼纯净化验证-人工添加高密夹杂试验

采用5种直径分别为Φ0.5 mm、Φ1.0 mm、Φ3.0 mm、Φ5.0 mm、Φ10 mm的YG6钨钢球模拟高密度夹杂物。钨钢球的成分包含W元素、Co元素和Fe元素，质量分数分别为97.24%、6.48%、0.11%。将10个

Φ0.5 mm、5个Φ1.0 mm、2个Φ3.0 mm、1个Φ5.0 mm、1个Φ10 mm的YG6钨钢球镶嵌在圆柱形的树脂中，图2为钨钢球镶样后的实物，镶样块呈饼状，直径为29.8 mm，厚度约为13.6 mm。



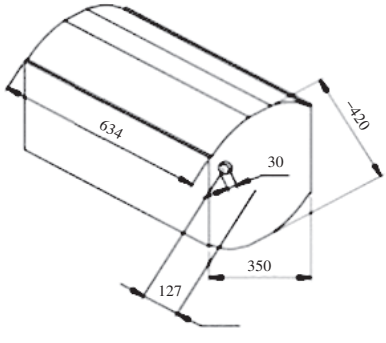
(a)横向



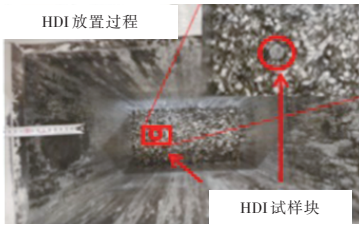
(b)纵向

图2　钨钢球镶样后横向、纵向的实物

在海绵钛中添加质量分数为30%的TC4回收屑料并压制成电极块，每块电极块质量约为280 kg，外观尺寸为634 mm×350 mm×420 mm，本试验中使用2块电极块，质量共约560 kg。将钨钢球镶嵌块放置在电极块长度方向的1/5位置处(约110 kg处，如图3所示)，保证电极块前端预留的1/5熔化后能形成完整冷床，此时，电子束将扫描添加的高密度夹杂区域。使用电子束冷床炉制备一个完整的冷床料，尺寸约为70 mm×410 mm×1 270 mm，质量约为160 kg，同时制备一个铸锭(底托料)，尺寸约为Φ735 mm×100 mm，质量为180 kg/块，投料质量共340 kg。



(a)电极块尺寸示意



(b)HDI放置示意



(c)电极块压制示意

图3　HDI放置示意与电极块压制实物

经熔炼后，首先将EB冷床料及铸锭进行全面超声探伤来初步定位高密度夹杂区域，发现高密度夹杂主要存在于冷床料2个区域，在铸锭中未检测到高密度夹杂物，如图4红色圆圈标记处所示。将冷床料上发现的2处HDI聚集区的样块分别使用线切割切开，从侧面采用X光检测。X光正面及侧面探伤结果如图5所示，由图5可知，人工添加的高密度夹杂可被探测到，但由于X射线检测的局限性，无法分辨具体的数量和规格，因此，需要利用高精度工业CT来进一步检测。

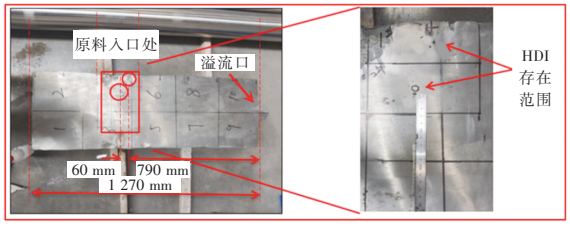


图4　冷床料超声探伤结果

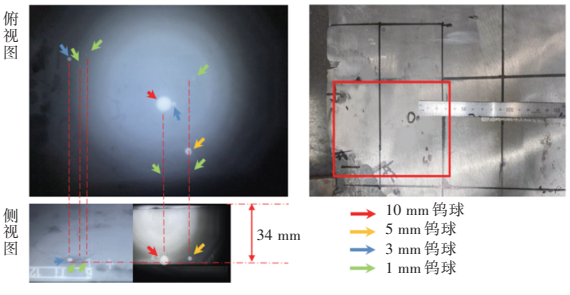


图5　冷床料X射线检测结果

为进一步验证冷床料捕获高密度夹杂物的能力，对添加WC粒子X射线检测后的试样进行高精度工业CT检测，可以看出，人工添加的

直径≥0.5 mm的高密度夹杂物均被冷床料捕获，因此，无法带入熔炼铸锭中，保障了铸锭的纯净性。所检测到的高密度夹杂信息汇总如表6所示。

表6 工业CT检测高密度夹杂结果汇总 mm

试样	对应高密度夹杂尺寸	直径	半径	中心x	中心y	中心z	投影尺寸x	投影尺寸y	投影尺寸z
1#试样	10	5.718	2.859	5.456	5.910	−14.679	7.205	20.203	5.910
	5	3.444	1.722	2.858	3.039	−19.220	18.784	23.331	3.170
	3	1.567	1.283	1.715	1.831	−14.679	15.076	16.570	1.234
	1	53.065	0.193	0.143	0.152	0.097	−17.544	19.334	0.247
	1	0.107	22.576	0.283	0.224	54.411	0.213	−17.544	0.217
	1	0.244	0.122	0.276	0.252	−17.411	25.023	13.824	0.239
2#试样	3	1.764	0.382	1.728	1.664	−20.698	0.083 0	50.337	1.772
	1	0.255	0.127	0.208	0.208	−19.006	21.805	44.646	0.216
	1	0.255	0.127	0.204	0.218	−18.827	−19.563	17.384	0.208

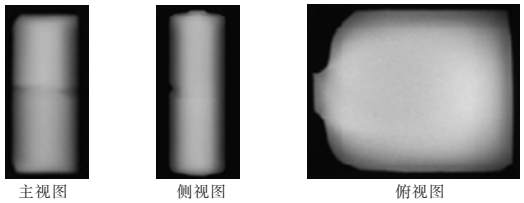
由表6的尺寸量化数据可知，Φ0.5 mm、Φ1.0 mm、Φ3.0 mm、Φ5.0 mm、Φ10 mm的YG6钨钢球均在冷床料中被精准检出，且均集中分布于冷床料原料入口侧，未向铸锭区域迁移，验证了EB熔炼冷床对大尺寸高密度夹杂物的高效捕获能力。

针对Φ0.5 mm钨钢球未在铸锭中检出的现象，开展EB熔炼高温溶解验证试验：在正常熔炼参数（电流8.5 A，熔速800 kg/h）下，将Φ0.5 mm钨钢球置于TC4块料孔中并固定，进行EB熔炼后对冷床料及熔液流经范围开展全覆盖工业CT探伤，未检测到Φ0.5 mm钨钢球的任何信号，证明直径小于0.5 mm的高密度夹杂物可在EB熔炼的高温环境中完全溶解。EB炉电子束表面温度可达3 000 ℃，熔池温度近2 000 ℃，远高于VAR熔炼温度1 700 ℃，因此，EB熔炼对小尺寸高密度夹杂物的溶解能力显著优于VAR熔炼，可实现大尺寸夹杂物“物理捕获”、小尺寸夹杂物“高温溶解”的双重除杂效果。

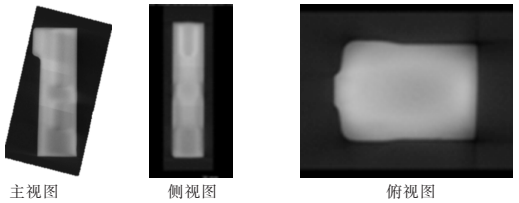
3.3 工业CT无损检测结果

为验证30%返回料配比下EB+VAR双联熔炼结合锻造工艺制备的TC4-DT钛合金锻件内部质量，采用德国通用电气Phoenix v|tome|x C450型450 kV工业CT系统，对1号、2号、3号3件典型锻件的所有低倍试样开展全尺寸三维无损检测，扫描分辨率控制在111~139 μm，其中1号锻件低倍试样编号为1#~7#、2号锻件为1#~10#、3号锻件为1#~5#，全覆盖式检测确保锻件内部缺陷无遗漏。

图6为1号锻件经准β退火后的工业CT三维重建三视图，检测结果显示锻件内部灰度分布均匀，无裂纹、孔洞、高密度夹杂物等宏观缺陷，组织致密性良好，结构完整性符合轨道交通用钛合金锻件技术要求。从主、侧、俯3个视角可清晰观测到锻件内部无任何异常缺陷信号，锻件轮廓规整、内部组织连续，表明经纯净化处理+EB+VAR双联熔炼工艺制备的铸锭，在锻造及热处理后未产生内部缺陷，高密度夹杂物去除效果显著，原料中的杂质风险已被完全消除。



(a)1#试样三视图

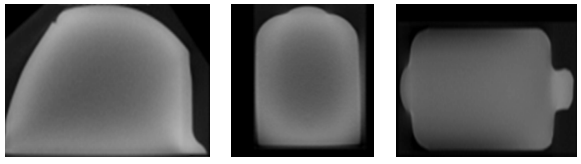


(b)2#试样三视图

图6 1号锻件部分切面CT图像

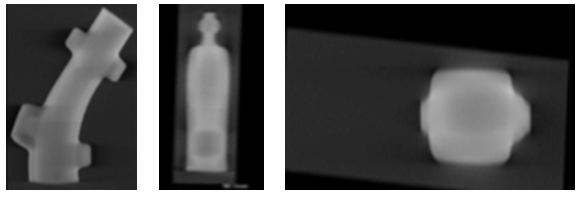
图7为2号锻件典型低倍试样的工业CT检测结果，各试样内部均无宏观缺陷，外形及内部组织均匀性良好，验证了本研究工艺体系制备钛合金

锻件的质量稳定性。两类试样均呈现出良好的内部质量,无夹杂、孔洞、微裂纹等缺陷,与1号锻件检测结果高度一致,说明本研究提出的返回料纯净化与EB+VAR双联熔炼工艺可稳定复现,制备的锻件内部质量一致性优异,无批次性质量风险,工艺稳定性满足工业化生产要求。



主视图　　侧视图　　俯视图

(a)1#试样三视图

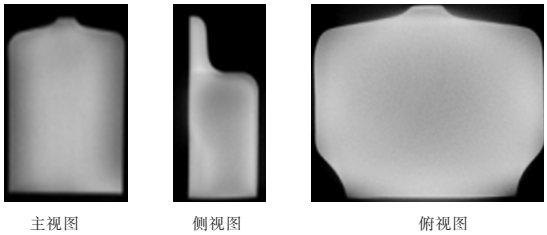


主视图　　侧视图　　俯视图

(b)9#试样三视图

图7　2号锻件部分切面CT图像

图8所示为3号锻件1#、5#试样的CT检测结果,进一步验证了锻件内部的高纯净度,无任何缺陷信号。综合图6~图8三件锻件的全覆盖式工业CT检测结果可知,所有低倍试样均实现内部零缺陷,无高密度夹杂物、孔洞、裂纹等影响服役安全的缺陷,充分证明采用经纯净化处理的30%比例返回料,结合EB+VAR双联熔炼工艺,可有效保障TC4-DT钛合金锻件的内部质量,制备的锻件满足轨道交通车辆关键部件对材料内部纯净度的严苛要求。



主视图　　侧视图　　俯视图

(a)1#试样三视图



主视图　　侧视图　　俯视图

(b)5#试样三视图

图8　3号锻件部分切面CT图像

3.4　EB+VAR双联熔炼后成分检测及氧含量分析

为验证EB+VAR双联熔炼工艺对TC4-DT钛合金成分的调控能力,对EB熔炼后冷床料、VAR熔炼后铸锭的化学成分进行全面检测,重点分析主元素、杂质元素及氧含量变化,结果如表7所示。检测结果显示,经EB+VAR双联熔炼后,铸锭中Al、V等主元素质量分数分别控制在5.7%~6.4%、3.5%~4.3%,完全符合TC4-DT钛合金主元素标准要求(Al 5.6%~6.5%、V 3.4%~4.5%);Fe、C、N、H等杂质元素质量分数分别≤0.22%、≤0.045%、≤0.028%、≤0.011%,均低于标准限定值,且无明显元素偏析现象,表明双联熔炼工艺可有效保证合金成分的均匀性与稳定性。

氧元素是影响钛合金强塑匹配的关键元素,氧含量过高会导致材料塑性下降,过低则会降低材料的强度与耐腐蚀性。本研究中,熔体经返回料纯净化处理和EB+VAR双联熔炼后,氧元素质量分数控制在0.10%~0.12%,处于TC4-DT合金氧含量标准(0.08%~0.13%)的中值范围,该氧含量区间可实现材料强度与塑性的最优匹配,既避免了氧含量过高导致的塑性劣化,又保证了材料具备优异的抗拉强度、屈服强度及耐腐蚀性,完全满足轨道交通用钛合金部件对综合性能的要求。同时,返回料经多工序纯净化处理后,有效去除了吸附的气体杂质,避免了返回料引入导致的合金氧含量异常升高,证明纯净化处理工艺可有效保障返回料的气体含量稳定性。

表7　熔炼前后TC4-DT化学成分对比(质量分数)　%

元素	Ti	Al	V	Fe	C	N	H	O	Y	Si	其他
熔炼前	基体	5.6~6.5	3.4~4.5	≤0.25	≤0.05	≤0.03	≤0.012 5	0.08~0.13	≤0.005	≤0.10	≤0.3
熔炼后	基体	5.7~6.4	3.5~4.3	≤0.22	≤0.045	≤0.028	≤0.011	0.08~0.12	≤0.005	≤0.10	≤0.28

3.5 力学性能检测

为验证30%返回料配比下制备的TC4-DT钛合金的力学性能，对EB+VAR双联熔炼后开坯得到的Φ210 mm棒材（铸锭态）及1号、2号、3号3件典型锻件（锻造+准β退火锅）开展室温力学性能检测，检测项目包括抗拉强度R_m、屈服强度$R_{p0.2}$、断后伸长率A、断面收缩率Z，每组试样取3个平行样测试后取平均值，结果如表8所示。

表8 室温力学性能

试样类型	抗拉强度R_m/MPa	屈服强度$R_{p0.2}$/MPa	断后伸长率A/%	断面收缩率Z/%
铸锭	950	850	16	44
1#锻件	970	870	17	47
2#锻件	965	865	16	46
3#锻件	975	875	18	48

检测结果表明，铸锭态棒材已具备优异的力学性能，抗拉强度达950 MPa，屈服强度850 MPa，断后伸长率16%，断面收缩率44%，强塑匹配性良好；经锻造及准β退火处理后，锻件的力学性能得到进一步优化，1号、2号、3号锻件的抗拉强度分别达970 MPa、965 MPa、975 MPa，屈服强度分别达870 MPa、865 MPa、875 MPa，断后伸长率均≥16%，断面收缩率均≥46%，所有力学性能指标均显著优于铸锭态，且满足轨道交通用钛合金部件的力学性能要求（抗拉强度≥960 MPa，屈服强度≥860 MPa，断后伸长率≥15%，断面收缩率≥45%）。

锻件力学性能的提升主要源于锻造工艺的组织细化作用，锻造过程中通过塑性变形打破铸锭态的粗大晶粒组织，形成均匀细小的锻造组织，同时准β退火处理可进一步优化组织形态，消除锻造内应力，实现强度与塑性的协同提升。此外，EB+VAR双联熔炼工艺有效去除了合金中的高密度夹杂物，保证了基体组织的连续性与均匀性，避免了夹杂物引发的应力集中，为材料力学性能的提升提供了基础保障。上述结果充分证明，添加30%质量分数经纯净化处理的返回料，结合EB+VAR双联熔炼及锻造工艺，制备的TC4-DT钛合金锻件具备优异的室温力学性能，强塑匹配性良好，可满足轨道交通车辆关键部件的服役性能需求。

4 结束语

本文对TC4-DT钛合金铸锭扒皮所产生的返回屑料进行收集与纯净化处理，随后利用EB+VAR双联熔炼工艺进行铸锭熔炼并制备3件典型锻件。试验结果表明，EB熔炼方式可有效去除高密度夹杂物。对比了多种无损检测手段优缺点，选用高精度工业CT方法对添加返回料TC4-DT钛合金锻件内部缺陷进行检测，得出结论如下：

a. TC4-DT钛合金返回屑料经破碎筛分、清洗漂洗、脱水烘干、高比重/高密度/氧化物分选、人工挑选、多级磁选等纯净化处理后，可有效去除气体杂质和高密度夹杂物，处理后的返回屑料满足回收熔炼的质量要求。

b. EB熔炼对高密度夹杂物具有优异的去除效果，直径大于0.5 mm的高密度夹杂物可被冷床料有效捕获，直径小于0.5 mm的高密度夹杂物可在EB熔炼的高温环境中完全溶解，结合VAR熔炼可进一步保证铸锭成分均匀性，避免夹杂缺陷带入成品。

c. EB+VAR双联熔炼后，TC4-DT铸锭的主元素和杂质元素含量均符合标准要求，熔体氧含量控制在0.10%~0.12%，处于最佳性能区间，纯净化效果显著。

d. 添加质量分数为30%返回料的TC4-DT钛合金铸锭和锻件力学性能优异，锻件抗拉强度≥960 MPa，屈服强度≥860 MPa，断后伸长率≥15%，断面收缩率≥45%，强塑匹配性良好，满足轨道交通用钛合金的力学性能要求。

e. 高精度工业CT无损检测结果表明，添加返回料制备的3件TC4-DT钛合金典型锻件结构致密，无高密度夹杂、孔洞、裂纹等内部缺陷，验证了本研究工艺体系制备的钛合金锻件的内部质量满足要求。

参考文献：

[1] 王林增, 于君, 林鑫, 等. 激光定向能量沉积Ti-18Zr-13Mo亚稳β生物钛合金组织与性能研究[J]. 铸造技术, 2025, 46(2): 144-152.

[2] 秦勇, 孟凡腾, 张紫城, 等. 轨道交通基础设施自主无人机智能巡检体系框架及其技术发展综述[J]. 北京交通

大学学报, 2025, 49(5): 145-175.

[3] 孙术娟, 马寅, 郝守雨, 等. 轨道交通用钛合金摆动激光-电弧复合增材成形、组织及力学性能研究[J]. 电焊机, 2025, 55(5): 1-11.

[4] 刘洪涛. 高速动车组转向架焊接构架的疲劳损伤机理及疲劳寿命评估[D]. 大连: 大连交通大学, 2010.

[5] 廖毅. 薄壁TC4合金环件精确成形工艺设计[J]. 锻造与冲压, 2025(19): 20-28.

[6] 邱炜宸, 赵军, 刘时兵, 等. 钛合金回收料的表面酸洗工艺研究[J]. 材料导报, 2024, 38(2): 400-404.

[7] 宁兴龙. 海绵钛质量与残钛利用率及钛冶金半成品质量的关系[J]. 稀有金属材料与工程, 1984(6): 44-53.

[8] 许国栋, 王桂生. 钛金属和钛产业的发展[J]. 稀有金属, 2009, 33(6): 903-912.

[9] 魏寿庸.《添加返回料TC4钛合金在航空结构件上的应用》研究通过鉴定[J]. 钛工业进展, 1993(6): 40-41.

[10] 董燕妮, 范广轩, 张宝秋. 钛合金返回料真空自耗电弧炉回收工艺研究[J]. 科技创新与应用, 2021(3): 110-113.

[11] 都海刚, 张宝秋, 冯军宁, 等. 我国钛及钛合金重要用途块状返回炉料回收处理技术探析[J]. 中国钛业, 2012(3): 25-28.

[12] 解方良, 骆合力, 李尚平, 等. 精密铸造用DZ125合金返回料净化处理研究[J]. 特种铸造及有色合金, 2017, 37(8): 875-877.

[13] 李小孟. 电子束冷床炉熔炼纯钛铸锭的工艺研究[D]. 西安: 西安建筑科技大学, 2015.

[14] 刘勇, 叶海定, 黄青松, 等. 轨道交通用超低温高韧性球墨铸铁材料研发与应用[C]//“田心杯”轨道交通金属加工技术征文大赛论文集, 2019：935-938.

[15] 哈焊所华通(常州)焊业股份有限公司. 一种轨道交通用铝合金气保焊丝及制杆工艺: CN201910378300.6[P]. 2019-07-16[2026-01-29].

[16] 南京钢铁股份有限公司. 一种轨道交通用连铸齿轮钢棒材的生产工艺: CN202110967280.3[P]. 2021-12-21[2026-01-29].

AT&M