ICS 77.120.50
CCS H 64

T/CS

团 体 标 准

T/CS 633—2026

真空自耗电极熔炼钛合金工艺规程

Code of practice for vacuum consumable electrode melting of titanium alloy

2026 - 10 - 16 发布 2026 - 10 - 16 实施

中国商品学会 发 布

目　　次

前言 II
1 范围 1
2 规范性引用文件 1
3 术语和定义 1
4 熔炼前准备 2
5 熔炼过程控制 4
6 质量检查 5
7 检验规则 5
8 安全注意事项 6
9 记录与标识 6
10 设备维护与保养 6

前　言

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》的规定起草。

请注意本文件的某些内容可能涉及专利。本文件的发布机构不承担识别专利的责任。

本文件由昆明冶金职业大学提出。

本文件由中国商品学会归口。

本文件起草单位：昆明冶金职业大学、石家庄铁道大学、江苏理工学院、西昌华腾新材料制造有限公司、广西现代职业技术学院。

本文件主要起草人：蔡川雄、魏家树、陈逸、刘爱国、王岩。

真空自耗电极熔炼钛合金工艺规程

1 范围

本文件规定了采用真空自耗电极熔炉（VAR）熔炼钛合金工艺的熔炼前准备、熔炼过程控制、质量检查、检验规则、安全注意事项、记录与标识、设备维护与保养等方面的要求。

本文件适用于航空航天、远洋深海、化工化学等领域用高质量钛合金铸锭的生产。

2 规范性引用文件

下列文件中的内容通过文中的规范性引用而构成本文件必不可少的条款。其中，注日期的引用文件，仅该日期对应的版本适用于本文件；不注日期的引用文件，其最新版本（包括所有的修改单）适用于本文件。

GB/T 2524 海绵钛

GB/T 3620.1 钛及钛合金牌号和化学成分

GB/T 3620.2 钛及钛合金加工产品化学成分允许偏差

GB/T 3766 液压传动 系统及其元件的通用规则和安全要求

GB/T 4698.7 海绵钛、钛及钛合金化学分析方法 氧量、氮量的测定

GB/T 4698.15 海绵钛、钛及钛合金化学分析方法 氢量的测定

GB 5959.2 电热装置的安全 第2部分：对电弧炉装置的特殊要求

GB/T 8180 钛及钛合金加工产品的包装、标志、运输和贮存

GB/T 10067.101 电热和电磁处理装置基本技术条件 第101部分：真空电热和电磁处理装置的通用要求

GB/T 23605 钛合金β转变温度测定方法

GB/T 26060 钛及钛合金铸锭

GB 29448 海绵钛和钛锭单位产品能源消耗限额

GB/T 45786 钛及钛合金自耗电极挤压成形规范

YS/T 776 钛合金用铝硅中间合金

YS/T 824 钛合金用铝锡中间合金

YS/T 1370 钛合金用钛锡中间合金

3 术语和定义

下列术语和定义适用于本文件。

3.1

真空自耗电极熔炉 vacuum arc remelting furnace（VAR）

一种在真空环境下，以钛合金电极作为自耗材料，通过电弧放电使电极熔化并在水冷结晶器中凝固形成铸锭的熔炼设备。

3.2

海绵钛 titanium sponge

通过四氯化钛与活泼金属（如钠、镁）经还原反应制备的疏松多孔海绵状钛原料，是钛合金铸锭生产的基础原材料。

3.3

中间合金 master alloy

为便于合金元素加入和控制成分，将两种或多种金属按一定比例熔合而成的合金。

3.4

补缩 hot topping

在铸锭凝固后期，通过控制熔炼参数使未凝固的金属液填充冒口收缩形成的空隙，减少缩孔缺陷的工艺过程。

3.5

熔炼 melting

在真空环境下，以自耗电极为阴极、水冷铜坩埚为阳极，通过电弧放电产生的高温使电极材料逐层熔化、滴落并在坩埚内形成熔池，经定向凝固获得铸锭的物理冶金过程。

3.6

铸锭 ingot

将熔融态的钛合金金属液在水冷铜坩埚中经定向凝固冷却后形成的圆柱形固态金属坯料，是钛合金加工材生产的中间产品。

3.7

压制 pressing

将混合均匀的海绵钛及中间合金原料装入模具中，通过液压机施加压力使之密实成形为具有一定形状、尺寸和密度要求的电极块的操作过程。

3.8

焊接 welding

将多个经压制形成的电极块首尾对接，采用真空等离子体焊接方法使其连接为一体，形成满足熔炼设备装入长度要求的整体自耗电极的工艺操作。

4 熔炼前准备

4.1 海绵钛品质检查

4.1.1 海绵钛的化学成分应符合 GB/T 2524 的规定。

4.1.2 海绵钛应存放于镀锌铁桶内，桶内衬聚氯乙烯薄膜袋，采用桶盖密封，桶身与桶盖连接处应标识明确、包装完好。

4.1.3 对于贮存时间超过 1 年的海绵钛，使用前应取样分析氧、氮、氢含量，检测方法应符合 GB/T 4698.7 和 GB/T 4698.15 的规定。应根据检测结果重新评估品质，避免原料污染。

4.2 选料与配料控制

4.2.1 海绵钛选料

4.2.1.1 海绵钛应为破碎后的疏松多孔小型块体。
4.2.1.2 应挑出的缺陷块体包括：过烧块、暗黄色或亮黄色氧化块、带氯化物残留块、带残渣块、高铁及伴生元素块、吸潮暗灰色块、吸氧硬化块。
4.2.1.3 应采用目视检视，将海绵钛平铺于台面，保留浅灰色或银灰色、表面清洁、无目视可见夹杂物的块体。

4.2.2 配料要求

4.2.2.1 合金元素加入形式应符合以下要求：
a) Al、V、Mo、Sn、Si 等应以二元或三元中间合金形式加入；
b) Fe、Cu 等应以纯金属形式加入；
c) Cr、Zr、Mn 等应以中间合金形式加入。
4.2.2.2 配料量应考虑以下因素：合金元素引入方法、元素与杂质允许波动范围及最佳成分范围、熔炼工艺参数和次数、组元烧损率和蒸发率、成分偏析特性等。
4.2.2.3 应优先选用同供应商、同批次海绵钛，避免混合铁、氧等关键杂质含量差异显著的批次。熔炼高品质铸锭时，返回料使用应严格控制，表面应洁净、无油污、无氧化层，化学成分应符合 GB/T 3620.1 的规定。返回料添加比例宜限制为：
a) 一般铸锭：屑状≤40%，其他≤20%；
b) 航空级铸锭：返回料总量宜≤15%，且慎用屑状料。
4.2.2.4 中间合金应有明确成分标识和检验报告，熔点、密度、粒度应与基体钛材相适应，杂质含量应合格。钛合金用中间合金应符合 YS/T 776、YS/T 824、YS/T 1370 等相关标准的规定。

4.2.3 混料控制

4.2.3.1 应使用具有合理震动强度的布料机布料，保证上料效率且避免颗粒钛材分层。
4.2.3.2 混料机与海绵钛接触部位应选用纯钛或 304 不锈钢（无 Mo），密封件应为耐腐蚀氟橡胶。工作前应检查内壁和搅拌叶片，确保干净光洁、叶片无破损。
4.2.3.3 布料和混料过程中应减少原料与空气接触，防止二次污染。

4.3 压制与焊接控制

4.3.1 电极压制

4.3.1.1 应采用大型液压机进行电极压制，根据电极块直径选择相应吨位。电极挤压成形也可参照 GB/T 45786 的规定执行。
4.3.1.2 应采用双向压制和浮动压制工艺，由上下模冲共同施力。大尺寸电极可分批投料压制，压制密度不应低于 3.5 g/cm^3。
4.3.1.3 压制前后应清理模具，检查上下模冲和阴模内部表面状况及光洁度。
4.3.1.4 电极不应出现压制不实、易碎、表面有裂纹和虚角、形状不规整等缺陷。

4.3.2 电极焊接

4.3.2.1 焊前应检查电极端面平整度，去除边角毛刺和表面凸起，在摆料架摆放整齐并在焊接架上固定夹紧。
4.3.2.2 应采用真空等离子弧焊接，确保熔焊区呈银白或银亮色泽，避免氧、氮等杂质污染。自耗电极不应采用钨极氩弧焊焊接。
4.3.2.3 应在电极周围焊接同牌号钛板条加强筋。

4.3.2.4 焊接后的电极应经专人检验，确保强度符合要求后方可进入熔炼工序。

5 熔炼过程控制

5.1 炉前准备

5.1.1 应对真空自耗电极熔炉的电源系统、控制系统、真空系统、水循环系统进行检查，确保正常运转。真空电热装置的技术条件应符合 GB/T 10067.101 的规定。
5.1.2 电极入炉前应在干燥箱内干燥，去除吸附的水蒸气。
5.1.3 应清理炉室，检查观察孔是否干净无遮挡。
5.1.4 结晶器（铜坩埚）应选用紫铜或无氧铜，应检查内外壁有无裂纹、漏洞，是否存在热变形，内壁应洁净平整光滑无残渣。
5.1.5 应通过天车将结晶器放入水冷套内，推入焊接好的电极，与辅助电极焊为一体，确保焊接牢固、焊缝质量良好。焊接时应在腔室内抽真空，达到焊接要求后引弧融化辅助电极，再将辅助电极压下完成焊接。
5.1.6 应确保铜坩埚的水冷效果符合生产要求。
5.1.7 应在结晶器底部放入引弧介质。
5.1.8 炉前检查应由专人负责，并将结果记录在册。

5.2 真空与引弧

5.2.1 真空系统极限真空度（冷态空载）应达到 10^{-3} Pa 量级。起弧熔炼时熔炼腔室气压应在 0.3 Pa 以下。正常熔炼期间，腔室内气体压力应控制在 0.1 Pa～1.3 Pa 之间。
5.2.2 真空系统应由机械泵、罗茨泵和油增压泵三级组成。机械泵应首先启动抽真空，随炉内压力降低（真空度提高），依次开启罗茨泵和油增压泵。
5.2.3 封闭炉体后应进行保压检测，压升率不应大于 0.8 Pa/h。对于高品质铸锭的熔炼，压升率不应大于 0.3 Pa/h。
5.2.4 起弧时加载空载电压，使引弧剂与自耗电极瞬间接触产生弧光放电，形成稳定电弧和一定量熔池。
5.2.5 引弧期应采用正常熔炼电流的 10%～20%预热自耗电极和凝壳，起弧后应迅速提高负载电流电压转入正常熔炼期。
5.2.6 应避免起弧控制不当导致铜坩埚底部烧损、击穿漏水，或因电流电压过小断弧、过大冲击坩埚。

5.3 主要工艺参数控制

5.3.1 正常熔炼期电压应选用 28 V～40 V，电流应选用 10 kA～30 kA。熔炼速度应根据铸锭规格确定，中小规格铸锭宜控制在 3 kg/min～8 kg/min，大规格铸锭可控制在 5 kg/min～15 kg/min。
5.3.2 电极与坩埚直径之比应为 0.60～0.90。坩埚深度与直径之比应为 1.2～1.5。具体比值应根据铸锭规格和合金牌号确定。
5.3.3 应采用“平静熔炼”法，保证电弧稳定燃烧、熔池表面平静，同时使电弧稳定均匀旋转，确保热能均匀分布于熔池表面，形成扁平熔池。
5.3.4 应综合控制熔炼电流、冷却强度、磁场强度、自耗电极与坩埚间隙等参数，确保铸锭表面质量。

5.4 补缩与取锭

5.4.1 应根据电极杆行程和平均熔速法确定预留电极量，达到该量后进入补缩程序。
5.4.2 应采用“多级补缩，低电流保温”工艺，逐级降低电弧电流，减缓熔化速度，降低熔池温度，使冒口冷却凝固时通过金属熔液补液填充收缩体积。

5.4.3 铸锭完成后应在封闭炉内缓慢冷却，大规格铸锭取锭温度不高于 200 ℃，待温度降至 200 ℃以下方可开炉取锭。随铸锭尺寸增大，取锭温度应适当降低。冷却时间应根据铸锭规格确定：直径不大于 400 mm 的铸锭一般不少于 8 h～12 h；直径 400 mm～800 mm 的铸锭一般不少于 12 h～24 h；直径大于 800 mm 的铸锭一般不少于 24 h～48 h。

6 质量检查

6.1 铸锭基本要求

6.1.1 钛及钛合金铸锭应符合 GB/T 26060 的要求。
6.1.2 铸锭的牌号和化学成分应符合 GB/T 3620.1 的规定。
6.1.3 真空自耗电弧炉（VAR）熔炼次数：一般铸锭熔炼次数不应少于 2 次，航空级铸锭熔炼次数不应少于 3 次。

6.2 外观与尺寸

6.2.1 铸锭应切除冒口、端头并机加工，冒口切除量不应小于 100 mm。
6.2.2 形状不规则或尺寸偏差可通过机械修磨达到要求。

6.3 其他要求

6.3.1 化学成分允许偏差应符合 GB/T 3620.2 的规定。
6.3.2 β转变温度按 GB/T 23605 测定。
6.3.3 超声波检查应识别表层夹层、疏松、缩孔等缺陷。
6.3.4 单位产品能耗应符合 GB 29448 的规定。
6.3.5 包装应符合 GB/T 8180 的规定。

7 检验规则

7.1 检验分类

7.1.1 检验分为过程检验、出厂检验和型式检验。
7.1.2 过程检验包括熔炼前准备、炉前检查、熔炼过程参数、补缩与冷却等。
7.1.3 出厂检验项目包括外观质量、外形尺寸和化学成分；航空级铸锭或合同注明时，还应包括超声波检查和β转变温度。
7.1.4 有下列情形之一时，应进行型式检验：

a) 新产品定型；
b) 工艺参数、原材料或设备发生重大变更；
c) 设备大修后。

7.2 组批与抽样

同一牌号、同一熔炼炉号、同一工艺条件生产的铸锭为一批。抽样按 GB/T 26060 或合同规定执行。

7.3 判定与复验

7.3.1 全部检验项目合格，判该批铸锭合格。
7.3.2 检验项目不合格时，按 GB/T 26060 或合同规定复验；复验仍不合格，判该批铸锭不合格。
7.3.3 化学成分偏析、冶金缺陷等不允许复验。

8 安全注意事项

8.1 电极质量安全

8.1.1 应确保电极压制和焊接质量，避免因电极疏松易碎导致熔炼过程中断弧。
8.1.2 防止未熔化电极部分或焊接位置断裂落入熔池引发冶金缺陷、边弧、击穿坩埚进水污染，水蒸气高温分解产生氢气，引发氢气爆炸。

8.2 设备安全检查

8.2.1 应定期检查真空系统、水冷系统等关键设备，确保其正常运行，防止因设备故障导致安全事故。
8.2.2 真空自耗炉应设有泄爆口并通室外。
8.2.3 水冷系统的安全性应符合 GB 5959.2 的相关规定；液压系统的安全性应符合 GB/T 3766 的相关规定。

8.3 操作安全规范

8.3.1 操作人员应严格遵守本文件及设备操作规程，避免因操作不当引发安全问题。
8.3.2 起弧、熔炼等关键环节应密切监控，及时处理异常情况。

8.4 作业环境安全

8.4.1 真空自耗炉操作区域应设有良好的通风系统，以防止有害气体积聚，保障作业人员健康。
8.4.2 真空自耗炉地坑外侧应按标准设置安全护栏，并设置明显安全标识。

9 记录与标识

9.1 记录要求

9.1.1 熔炼前准备、炉前检查、熔炼过程参数、质量检查等关键环节的信息均应详细记录。
9.1.2 记录应完整、准确、可追溯，保存期限应符合相关规定。

9.2 标识要求

9.2.1 钛合金铸锭及其原料、中间产品均应按要求进行标识。
9.2.2 确保物料流转过程中标识清晰、唯一，避免混淆。

10 设备维护与保养

10.1 日常维护

10.1.1 每炉熔炼前应对真空系统、水冷系统、液压系统、电源及控制系统进行外观检查和运行状态确认。
10.1.2 每炉熔炼后应清理炉膛、结晶器（铜坩埚）内壁残渣及飞溅物，检查电极杆、辅助电极、绝缘件等有无异常磨损或烧损。
10.1.3 每日应检查水冷系统各管路接口是否渗漏，水温、水压、流量是否处于规定范围，冷却水水质应符合设备要求。
10.1.4 每日应检查真空泵油位、油质，及时补充或更换，确保真空泵运行正常。

10.2 定期检修

10.2.1 每周应至少进行一次真空系统保压测试，压升率应符合第 5.2.3 条的规定，若超标应排查泄漏点。

10.2.2 每月应检查铜坩埚内外壁裂纹、变形、烧损情况，测量坩埚壁厚，壁厚减薄量超过设计值 10% 时应予更换。

10.2.3 每季度应校准真空规管、热电偶、电流电压传感器等测量仪表，确保读数准确。

10.2.4 每半年应拆检机械泵、罗茨泵、油增压泵，清洗过滤器，更换磨损件，检查密封件老化情况。

10.2.5 每年应对电源变压器、整流器、水冷电缆等进行绝缘电阻测试和耐压试验，确保电气安全。

10.3 设备档案管理

10.3.1 每台真空自耗炉应建立独立的设备档案，记录设备型号、出厂编号、安装日期、改造记录等基本信息。

10.3.2 设备维护、检修、故障处理、备件更换等均应详细记录，记录内容应包括日期、操作人员、维护内容、更换零件、测试结果等。

10.3.3 设备档案应长期保存，作为设备状态评估和寿命预测的依据。