

ICS 77.120.50

CCS H 64



团体标准

T/CEATEC XXX—2025

钛及钛合金表面涂覆技术规范

Technical specification for surface coating of titanium and titanium alloys

(征求意见稿)

2025-X-XX 发布

2025-X-XX 实施

中国欧洲经济技术合作协会 发布

目 次

前言	II
1 范围	3
2 规范性引用文件	3
3 术语和定义	3
4 分类	4
5 工艺流程	4
5.1 材料验收	4
5.2 激光熔覆	4
5.3 等离子熔覆	4
5.4 阳极氧化	4
5.5 化学转化	5
5.6 热喷涂	5
5.7 气相沉积	5
6 工艺参数	6
6.1 熔覆工艺	6
6.2 阳极氧化	6
6.3 化学转化	7
6.4 热喷涂	7
6.5 气相沉积	8
7 人员要求	8
7.1 操作人员	8
7.2 检验人员	9
7.3 安全与培训	9
8 设备要求	9
8.1 一般要求	9
8.2 熔覆设备	9
8.3 涂层设备	9
8.4 辅助设备	10
9 数据要求	10
9.1 数据范围	10
9.2 数据记录	10
9.3 存储管理	10
9.4 审核修正	11

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。

本文件由中国欧洲经济技术合作协会提出并归口。

本文件起草单位：。

本文件主要起草人：。

本文件为首次编制。

钛及钛合金表面涂覆技术规范

1 范围

本文件规定了钛及钛合金表面涂覆的分类、工艺流程、工艺参数、人员要求、设备要求、数据要求。本文件适用于采用熔覆工艺和涂层工艺制备的钛及钛合金表面覆盖层。

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 3620.1 钛及钛合金牌号和化学成分

GB/T 18681 热喷涂 低压等离子喷涂 镍-钴-铬-铝-钇-钽合金涂层

GB/T 44757 钛及钛合金阳极氧化膜

YS/T 1031 化学气相沉积炉

YS/T 1262 海绵钛、钛及钛合金化学分析方法 多元素含量的测定 电感耦合等离子体原子发射光谱法

3 术语和定义

GB/T 18681、GB/T 44757、YS/T 1031界定的以及下列术语和定义适用于本文件。

3.1

熔覆层 cladding layer

通过激光、等离子等熔覆工艺，使涂覆材料与钛及钛合金基材表面同时熔化并形成冶金结合的覆盖层。

3.2

涂层 coating

通过阳极氧化、化学转化、热喷涂、气相沉积等工艺，在钛及钛合金基材表面形成的物理覆盖层或化学转化膜，基材不发生熔化。

3.3

激光熔覆 laser cladding

利用高能密度激光束将合金粉末或丝材与基体表面薄层迅速熔化并快速凝固，形成冶金结合的表面改性层的工艺。

3.4

等离子熔覆 plasma transferred arc cladding

采用等离子弧作为热源，将合金粉末加热熔化并沉积于基体表面，形成冶金结合的表面强化层的工艺。

4 分类

按涂覆原理及结合方式，钛及钛合金表面涂覆工艺分类如下：

- a) 熔覆工艺：冶金结合，通过高温热源使涂覆材料与钛及钛合金基材表面同时熔化，经凝固冷却后形成熔覆层，本文件中包括激光熔覆、等离子熔覆工艺，适用于重载构件的表面强化及批量修复场景；
- b) 涂层工艺：机械结合，通过物理覆盖、化学转化等方式，在钛及钛合金基材表面形成涂层，本文件中包括阳极氧化、化学转化、热喷涂、气相沉积工艺，适用于轻量化、精密件防护及装饰场景。

5 工艺流程

5.1 材料验收

进行涂覆处理的基材应符合GB/T 3620.1的规定，化学成分按YS/T 1262的要求检测合格。

5.2 激光熔覆

5.2.1 激光熔覆工艺流程为预处理、预热、激光熔覆、后处理、检验。

5.2.2 预处理

激光熔覆预处理步骤如下：

- a) 机械预处理：用240~400目砂纸打磨机或氧化铝喷砂设备处理，控制表面粗糙度；
- b) 化学预处理：经酸洗槽酸洗，清水冲洗后用无水乙醇除油，晾干。

5.2.3 预热

根据基材厚度，用工业加热炉预热或常温作业。

5.2.4 激光熔覆

启用光纤激光熔覆机，同步送粉并控制轨迹重叠率，全程通氩气保护。

5.2.5 后处理

自然冷却至150℃以下后用砂轮打磨机去除氧化皮，厚熔覆层经退火炉退火处理。

5.2.6 检验

无裂纹。

5.3 等离子熔覆

5.3.1 等离子熔覆工艺流程为预处理、预热、等离子熔覆、后处理、检验。

5.3.2 预处理

等离子熔覆预处理步骤如下：

- a) 机械预处理：用喷砂设备处理，控制表面粗糙度；
- b) 化学预处理：经酸洗槽酸洗、去离子水冲洗后，用烘干箱烘干。

5.3.3 预热

工业加热炉按基材厚度分级预热。

5.3.4 等离子熔覆

启用等离子熔覆机，控制弧柱距离与熔覆速度，同步送粉并通保护气。

5.3.5 后处理

冷却至室温后用打磨机修磨表面，厚熔覆层经退火炉去应力处理。

5.3.6 检验

无夹渣、未熔合现象。

5.4 阳极氧化

5.4.1 阳极氧化工艺流程为预处理、预热、阳极氧化、后处理、检验。

5.4.2 预处理

阳极氧化预处理步骤如下：

- a) 机械预处理：用400目砂纸打磨机打磨后冲洗，控制表面粗糙度；
- b) 化学预处理：经酸洗槽酸洗、清水冲洗干净，用烘干箱烘干。

5.4.3 去离子水冲洗

用去离子水设备制备的纯水多次冲洗，洗净酸液残留。

5.4.4 阳极氧化

启用阳极氧化槽组，将基材与不锈钢分别作为阴阳极，通过酸性或碱性溶液的电解作用形成均匀氧化膜。

5.4.5 后处理

去离子水冲洗，冲洗后用烘干箱烘干，酸性氧化处理时经封孔槽沸水封孔。

5.4.6 检验

外观颜色均匀，无烧伤、起皮。

5.5 化学转化

5.5.1 化学转化工艺流程为预处理、化学转化、后处理、检验。

5.5.2 预处理

化学转化预处理步骤如下：

- a) 机械预处理：用240目砂纸打磨机轻磨去浮锈，冲洗；
- b) 化学预处理：经酸洗槽酸洗后，去离子水冲洗至中性；

5.5.3 化学转化

将基材浸入化学转化槽，生成致密转化膜，期间定期搅拌确保均匀性。

5.5.4 后处理

冲洗后自然晾干或用烘干箱低温烘干。

5.5.6 检验

转化膜均匀致密，无漏镀、色差。

5.6 热喷涂

5.6.1 热喷涂工艺流程为预处理、热喷涂、后处理、检验。

5.6.2 预处理

用氧化铝喷砂设备喷砂后吹净粉尘。

5.6.3 热喷涂

启用等离子喷涂机或电弧喷涂机，控制喷枪参数与喷涂轨迹，将熔融态材料喷射至基材表面形成涂层。

5.6.4 后处理

冷却至室温后用打磨机修磨表面，去除飞溅物，必要时经封孔槽树脂封孔。

5.6.5 检验

涂层无剥离、疏松。

5.7 气相沉积

5.7.1 气相沉积工艺流程为预处理、气相沉积、后处理、检验。

5.7.2 预处理

酸性阳极氧化预处理步骤如下：

- a) 机械预处理：用600目砂纸打磨机抛光后，无水乙醇擦拭除油；
- b) 化学预处理：经超声清洗机丙酮清洗、去离子水冲洗至中性并烘干，迅速放入气相沉积炉；
- c) 真空预处理：启动气相沉积炉真空系统，抽至工艺所需真空度并升温保温。

5.7.3 气相沉积

气相沉积步骤如下：

- a) 物理气相沉积（PVD）：通入对应气体，通过气相沉积炉控制工艺条件，使材料原子沉积形成均匀薄膜；
- b) 化学气相沉积：通入反应气体与载气，控制炉内温度、压力及气体配比，通过气态反应物化学分解与反应，在基材表面沉积形成致密薄膜。

5.7.4 后处理

自然冷却至室温后取出，去除边缘多余膜层。

5.7.5 检验

膜层无划痕、杂质。

6 工艺参数

6.1 熔覆工艺

熔覆工艺参数控制见表1。

表1 熔覆工艺参数

步骤	项目	激光熔覆	等离子熔覆
预处理	表面粗糙度 Ra	3.2~6.3 μm	4.0~8.0 μm
	酸洗溶液	10% HNO_3 +5% HF , 室温处理 3~5min	15% HNO_3 , 室温处理 5~8min
	去离子水冲洗	/	pH 6.5~7.5
预热	预热温度	基材厚度 $\geq 10\text{mm}$: 200~300℃, 保温 30min; 基材厚度 $< 10\text{mm}$: 常温作业;	基材厚度 $\geq 8\text{mm}$: 150~250℃, 保温 20min; 基材厚度 $< 8\text{mm}$: 100℃;
	温度波动	$\leq \pm 10^\circ\text{C}$	
熔覆	熔覆参数	单层厚度: 0.3~0.8mm; 多层间隔: 5min 冷却; 功率稳定性: $\leq \pm 5\%$	等离子气(氩气)流量: 5~10L/min; 弧柱长度: 3~5mm; 熔覆速度: 5~15mm/s;
	粉末粒径	50~150 μm	80~200 μm
	送粉速率	10~30g/min	20~40g/min
	载气流量	氩气 5~8L/min	氩气 8~12L/min
	保护气流量	氩气 15~25L/min	氩气+氢气, 体积比 9:1, 10~18L/min
后处理	厚熔覆层 ($\geq 2\text{mm}$)	500℃退火, 保温 1h, 随炉冷却, 降温速率 $\leq 5^\circ\text{C}/\text{min}$	450℃去应力, 保温 1.5h, 随炉冷却, 降 温速率 $\leq 5^\circ\text{C}/\text{min}$

6.2 阳极氧化

阳极氧化参数控制见表2。

表2 阳极氧化参数

步骤	项目	参数
预处理	表面粗糙度 Ra	$\leq 1.6 \mu\text{m}$
	酸洗溶液	5% HF , 室温 1~2min
	去离子水冲洗	3次, 每次 2min,
氧化	电解液	酸性: 硫酸溶液(浓度 100~150g/L, 纯度 $\geq 98\%$) 碱性: 氢氧化钠溶液浓度 50~80g/L, 5g/L 柠檬酸作为稳定剂
	温度	酸性: 温度 15~25℃(波动 $\leq \pm 1^\circ\text{C}$), 水浴冷却

		碱性：30~45℃，波动 $\leq\pm 2^\circ\text{C}$
	电流密度	酸性：1~3A/dm ² ，阳与阴极面积比 1:2，间距 50~80mm； 碱性：2~5A/dm ² ，阳极与阴极间距 60~100mm；
	氧化时间	酸性：1~5 μm 膜层：10~15min；5~10 μm 膜层：20~30min； 碱性：5~20min，膜层厚度 0.5~3 μm
后处理	干燥	酸性：沸水封孔温度 95~100℃，时间 20min，封孔后烘干温度 80℃，时间 30min； 碱性：去离子水冲洗 3 次，自然晾干

6.3 化学转化

化学转化参数控制见表3。

表3 化学转化参数

步骤	项目	参数
预处理	酸洗溶液	8%HNO ₃ ，室温 3~4min
转化	转化液	草酸：草酸浓度 80~120g/L，添加 3g/L 氟化钠，pH 值 2.0~3.0； 磷酸：磷酸二氢钠浓度 50~70g/L，添加 2g/L 硝酸锌，pH 值 3.5~4.5；
	温度	草酸：80~95℃，波动 $\leq\pm 2^\circ\text{C}$ ； 磷酸：50~65℃，波动 $\leq\pm 3^\circ\text{C}$ ；
	时间	草酸：20~40min，每 5min 手动搅拌一次； 磷酸：15~30min；
	膜层厚度	草酸：0.5~1.5 μm； 磷酸：0.1~0.5 μm；
后处理	烘干	60℃烘干 20min

6.4 热喷涂

热喷涂参数控制见表4。

表4 热喷涂参数

步骤	项目	参数
预处理	表面粗糙度 Ra	6.3~12.5 μm
	预热	100~200℃，保温 15min；温度波动 $\leq\pm 10^\circ\text{C}$
热喷涂	喷涂	等离子：喷涂距离 80~120mm，喷枪移动速度 100~200mm/s，送粉速率 20~50g/min 电弧：喷涂距离 150~250mm，喷枪移动速度 150~250mm/s，丝材送进速度 2~5m/min

	气体	等离子：等离子气（氩气+氢气）流量 15~25L/min，保护气（氩气）流量 10~15L/min； 电弧：压缩空气压力 0.4~0.6MPa，流量 3~5m ³ /min
	涂层厚度	等离子：单层厚度 0.1~0.3mm，多层喷涂时层间冷却至 80℃ 以下； 电弧：涂层厚度 1~5mm；

6.5 气相沉积

气相沉积参数控制见表5。

表5 气相沉积参数

步骤	项目	参数
预处理	表面粗糙度 Ra	≤0.8 μm
	清洗	丙酮超声清洗 20min；去离子水冲洗后，120℃真空烘干 1h
	真空度	物理（PVD）：1×10 ⁻³ ~5×10 ⁻² Pa，抽气时间≤30min；升温速率 5℃/min，升至 150~400℃，保温 30min； 化学（CVD）：0.1~0.5MPa，抽气时间≤40min；升温速率 3~5℃/min，升至 300~600℃，保温 30min；
沉积	温度	物理（PVD）：沉积温度 150~400℃，升温速率 5℃/min，保温 30min 后开始沉积； 化学（CVD）：反应温度 800~1100℃，波动≤±10℃，保温 2~8h；
	气体	物理（PVD）：氩气作为工作气体，流量 5~10sccm，氮气作为反应气体，流量 3~5sccm； 化学（CVD）：反应气体为甲烷、氢气混合气体，体积比 1:10，总流量 100~200sccm；
	沉积速率	物理（PVD）：0.1~2 μm/h； 化学（CVD）：0.05~1 μm/h；
	膜层厚度	物理（PVD）：0.05~5 μm； 化学（CVD）：厚度均匀性误差≤±5%；
后处理	降温	化学（CVD）沉积后，2~3℃/min 速率降温至 150℃ 以下，自然冷却至室温

7 人员要求

7.1 操作人员

操作人员要求如下：

- 所有岗位人员年满18周岁，身体健康，无妨碍作业的疾病；
- 熟悉本文件及相关操作规程、安全技术规范，掌握应急处置方法，定期参加技能提升培训（每年不少于1次）；
- 熔覆工艺与热喷涂操作人员需持有《特种作业操作证（金属焊接与热切割作业）》；
- 熔覆工艺操作人员经熔覆设备专项培训合格，阳极氧化、化学转化工艺操作人员需经化工工艺专项培训合格，气相沉积操作人员经真空设备专项培训合格；

e) 所有操作人员从业年限应 ≥ 1 年，熟悉钛合金材料特性、涂覆粉末性能。

7.2 检验人员

检验人员应持有相应部门颁发的检验证书，熟悉材料检测相关标准，经涂覆产品检验专项培训合格，从业年限 ≥ 6 个月。

7.3 安全与培训

安全与培训要求如下：

a) 安全培训：新员工上岗前需接受不少于24学时的安全培训，内容包括防护用品、化学品安全、高温作业安全、真空设备安全、应急处置，老员工每年接受不少于8学时的安全复训；

b) 培训档案：建立人员培训档案，记录培训内容、时长、考核结果，档案保存期限 ≥ 3 年。

8 设备要求

8.1 一般要求

设备一般要求如下：

a) 设备选型需符合本文件规定的工艺参数要求，性能稳定、可靠，能满足批量生产或精密加工需求；

b) 设备安装后需经调试、验收，各项技术指标达标后方可投入使用，验收记录保存期限 ≥ 3 年；

c) 建立设备台账，记录设备名称、型号、规格、购置日期、生产厂家、校准周期等信息；定期进行维护保养，保养记录留存备查；

d) 检测设备需按规定周期校准（每年至少1次），校准合格并粘贴校准标识，未校准或校准不合格设备严禁使用，校准证书保存期限 ≥ 3 年；

e) 设备运行过程中需定期检查，发现故障立即停机维修，维修合格后经复核方可重新使用，严禁带故障作业；

f) 设备作业环境需符合要求，高温设备远离易燃物品，化学设备配备通风、防腐设施，真空设备避免粉尘、潮湿环境。

8.2 熔覆设备

8.2.1 激光熔覆机

激光熔覆机要求如下：

a) 额定参数：激光功率1.5~4kW，波长1060~1080nm，光斑直径2~5mm，扫描速度3~10mm/s，速度精度 ± 0.1 mm/s；

b) 送粉系统：配备自动送粉器和粉末回收装置；

c) 具备数控编程功能，支持轨迹规划、参数存储；

d) 配备实时监控系统、水冷系统、氩气保护系统。

8.2.2 等离子熔覆机

等离子熔覆机要求如下：

a) 额定参数：弧电流100~250A，调节精度 ± 1 A；弧电压25~40V，稳定性误差 $\leq \pm 1$ V；等离子气流量5~10L/min，保护气流量10~18L/min，可调；

b) 送粉系统：配备自动送粉器和粉末回收装置；

c) 喷枪：喷枪可360°旋转，移动速度5~15mm/s，定位精度 ± 0.2 mm；

d) 工作台：承重 ≥ 50 kg；

e) 配备过流、过压、过热保护装置和弧光防护装置。

8.3 涂层设备

8.3.1 阳极氧化设备

阳极氧化设备要求如下：

a) 电源：直流电源，输出电压0~50V，电流0~100A，电流密度调节范围1~5A/dm²，稳定性误差 $\leq \pm 0.1\text{A/dm}^2$ ；

b) 电解槽：材质为耐酸不锈钢，容量根据生产需求确定，配备搅拌装置、温控装置；

c) 防腐系统：电解槽周边配备防腐地面、废液收集装置，通风系统风量 $\geq 1000\text{m}^3/\text{h}$ ；

d) 配备封孔槽。

8.3.2 化学转化设备

化学转化设备要求如下：

a) 转化槽：材质为耐酸塑料或不锈钢，配备加热装置、手动搅拌装置；

b) 辅助设备：酸洗槽、冲洗槽（去离子水）、烘干箱，冲洗槽容积 \geq 转化槽1.5倍；

c) 配备通风橱（风量 $\geq 800\text{m}^3/\text{h}$ ）、洗眼器、应急喷淋装置，距离转化槽 $\leq 1.5\text{m}$ 。

8.3.3 等离子喷涂设备

等离子喷涂设备要求如下：

a) 额定参数：功率30~60kW，弧电压60~80V，电流400~600A；喷枪定位精度 $\pm 0.5\text{mm}$ ；

b) 送粉系统：调节精度 $\pm 2\text{g}/\text{min}$ ；配备粉末干燥装置；

c) 气体系统：压缩空气净化装置，压力0.4~0.6MPa；等离子气、保护气流量调节精度 $\pm 0.5\text{L}/\text{min}$ ；

d) 冷却系统：水冷式喷枪，冷却水温 $\leq 30^\circ\text{C}$ ，水流速 $\geq 5\text{L}/\text{min}$ 。

8.3.4 电弧喷涂设备

电弧喷涂设备要求如下：

a) 额定参数：电压25~35V，电流200~300A，功率5~10.5kW；

b) 气体系统：压缩空气压力0.4~0.6MPa，流量3~5m³/min，配备油水分离器；

c) 机械系统：喷枪可上下、左右移动，移动速度150~250mm/s；工作台承重 $\geq 100\text{kg}$ 。

8.3.5 气相沉积设备

气相沉积设备要求如下：

a) 真空系统：配备机械泵和分子泵的真空泵组，极限真空度 $\leq 1 \times 10^{-3}\text{Pa}$ ，真空度测量精度 $\pm 1 \times 10^{-4}\text{Pa}$ ；

b) 温控系统：沉积温度150~1100 $^\circ\text{C}$ ，调节精度 $\pm 5^\circ\text{C}$ ；升温速率0~10 $^\circ\text{C}/\text{min}$ ，配备热电偶测温；

c) 气体系统：反应气体、工作气体流量调节精度 $\pm 1\text{sccm}$ ，配备气体净化装置；

d) 控制系统：具备参数存储、自动升温、恒温、降温功能。

8.4 辅助设备

辅助设备要求如下：

a) 超声清洗机：功率500W，频率40kHz；

b) 去离子水设备：产水纯度 $\geq 18\text{M}\Omega \cdot \text{cm}$ ，满足酸洗后冲洗及工艺用水需求；

c) 烘干箱：温度范围50~200 $^\circ\text{C}$ ，精度 $\pm 1^\circ\text{C}$ ；

d) 退火炉：温度范围室温~1200 $^\circ\text{C}$ ，精度 $\pm 5^\circ\text{C}$ ，具备程序控温功能。

9 数据要求

9.1 数据范围

覆盖涂覆工艺全流程，包括预处理、核心工艺、后处理、基材验收、中间工序缺陷记录、检验等量化及定性信息。

9.2 数据记录

数据记录要求如下：

a) 关键工艺参数、检测结果需同步记录，不得追溯补填；

b) 明确记录数据对应的构件编号、工艺类型、设备型号、操作人员、记录时间，形成可追溯链条；

c) 采用统一表单记录，缺陷描述需精准。

9.3 存储管理

数据存储管理要求如下：

- a) 纸质记录需字迹清晰、签字确认，电子数据加密存储，备份至少 2 份；
- b) 工艺数据、质量数据及检测报告保存期限不少于 5 年，与设备台账、人员培训档案同步留存；
- c) 建立数据关联机制，通过构件编号可查询对应全流程数据，满足生产复盘、质量追溯及合规核查需求。

9.4 审核修正

数据审核修正要求如下：

- a) 每日由检验人员核对数据完整性、准确性，管理人员每周抽查，发现异常立即核查并标注原因；
- b) 数据错误需由记录人标注修正原因、签字确认，保留原始数据，严禁私自涂改、删除。