

钛合金等金属零部件的 离子渗氮技术

2026.09

引言

- 近年来，钛（Ti）合金应用快速扩张，成为明星材料，性能优点非常突出：
- **（1）强度高、重量轻；**（比强度（强度/密度）No. 1，武器装备，航天航空航海）
- **（2）耐腐蚀性能极强；**（海洋、化工等恶劣工况）
- **（3）高低温性能优秀；**（高、低温长时工作场景）
- **（4）生物相容性很好；**（医疗器械，人造骨骼）
- **（5）抗疲劳、寿命长。**（价格逐年下降，性价比优秀，物超所值）

引言

- 2025年，中国钛产业总规模突破2000亿元人民币，其中军用占到70%以上。
- 伴随生产技术快速进步，钛材价格越来越亲民，目前已经低于许多高端钢材。
(以应用最广的TC4钛合金为例，材料公斤单价已经从几年前的三四百元降至目前的100元左右。)
- 可以预见，**钛材在民用领域的应用也一定会更加快速增长。**

引言

表面提升耐磨/耐蚀性的主要技术对比：

技术手段	优点	缺点
热喷涂 (涂层, 机械结合)	(1) 成分和厚度可调范围大; (2) 制备成本相对较低。	(1) 喷涂之后需要后处理; (2) 结合力差, 长期服役必会脱落。
PVD (涂层, 机械结合)	(1) 表面质量好; (2) 不影响零件尺寸。	(1) 厚度有限, 一般 $< 10\mu\text{m}$; (2) 结合力差, 动载/重载容易剥落。
激光熔覆 (涂层, 冶金结合)	(1) 成分和厚度可调范围大; (2) 结合强度较热喷涂/PVD大幅提升。	(1) 物相和结构难以精确调控; (2) 表面质量差, 需要后处理; (3) 残余应力大, 有开裂剥落风险。
离子渗氮 (渗层, 冶金结合)	(1) 固溶和化合作用, 无剥落风险; (2) 几十至数百微米厚, 普适性好。	偏细的盲孔不适合

离子渗氮vs.气体渗氮

对比项目	传统气体渗氮	等离子体渗氮/离子渗氮 (辉光放电渗氮)
基本原理	480~650℃下，高温作用下的富氮气体在工件表面发生 分解、吸收、扩散 渗氮	380~900℃温度区间低真空条件，基于 辉光放电 效应，在电场作用下工件表面发生离子 活化/轰击/溅射 渗氮
适用范围	广泛运用于传统钢铁材料，不适用于钛合金等新材料	采用合适的装备和工艺，可普适于 多种金属材料
装备要求	装备技术含量低、成本低	装备技术含量高、成本高
渗氮效果	效率低、能耗大、渗层浅、脆性大、易变形、有废气	效率高、能耗较小、渗层深、脆性小、变形小、“绿色”渗氮
工艺灵活性	工艺简单，灵活性小，渗氮组织/性能无法精准调控	工艺参数多、灵活性强， 可针对不同服役要求定制工艺方案



国内外同类装备对比

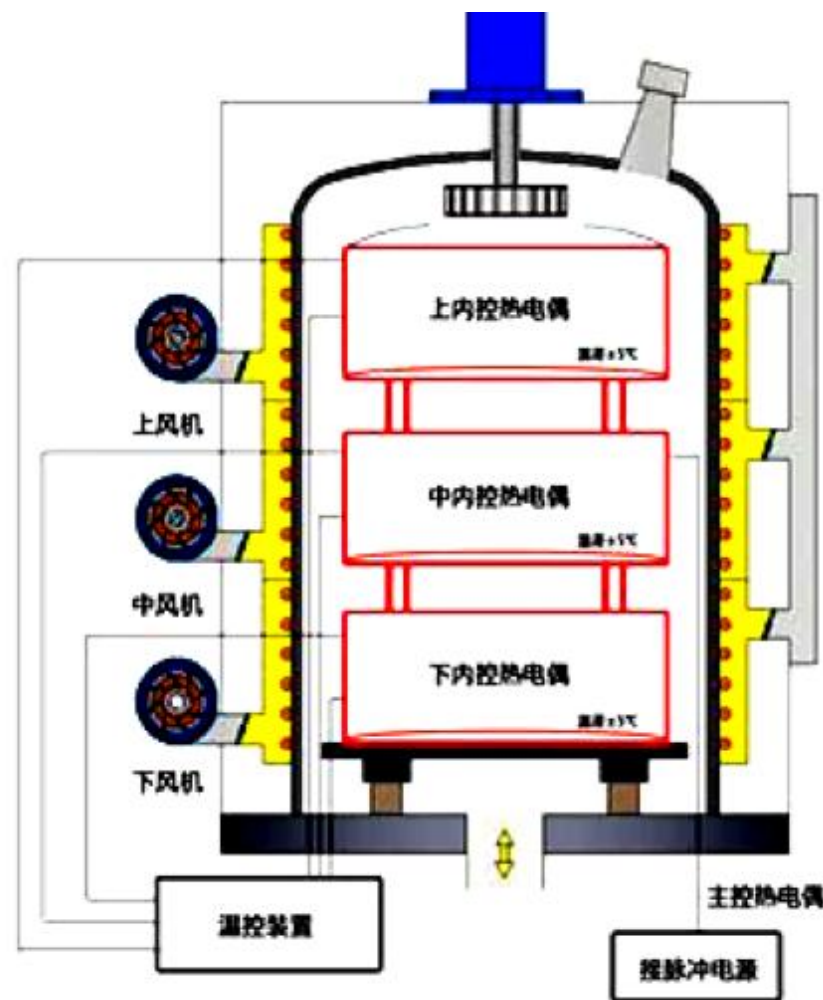
对比项目	国内同类装备	国外同类装备	我司自主装备
渗层均匀性, 变形量, 脆性等级, 氮化组织	未见	符合标准要求	符合标准要求; 满足客户特殊需求
最高工作温度	$\leq 650^{\circ}\text{C}$ (不适用于钛合金渗氮)	$700\sim 900^{\circ}\text{C}$	$600\sim 950^{\circ}\text{C}$可调
产品耐盐雾实验	未见	45#钢 900hrs/NSS	40Cr 336hrs/干湿交变
渗层均匀性, 变形量, 脆性等级, 氮化组织	未见	符合标准要求	符合标准要求; 满足客户特殊需求
最高工作温度	$\leq 650^{\circ}\text{C}$ (不适用于钛合金渗氮)	$700\sim 900^{\circ}\text{C}$	$600\sim 950^{\circ}\text{C}$可调
产品耐盐雾实验	未见	45#钢 900hrs/NSS	40Cr 336hrs/干湿交变

装备竞品对比

对比项目	国内同类装备	国外同类装备	我司自主装备
辅助加热措施及炉内温差控制	未见	内/外置式辅助热源； 上中下 $\leq \pm 5^{\circ}\text{C}$	内置式三组以上辅助热源； 上中下 $\leq \pm 5^{\circ}\text{C}$
钛合金渗氮层深度	$< 50\mu\text{m}$	$\leq 300\mu\text{m}$	300 μm 范围内可调
钛合金渗氮表面硬度	$\leq 600\text{HV}_{0.1}$	$\leq 1000\text{HV}_{0.1}$	550~1100 $\text{HV}_{0.1}$ 可调

技术简介

- **离子渗氮技术用途：**渗氮层硬度为基体的2~4倍、表面耐蚀陶瓷相，热稳定性好，不影响尺寸精度，显著改善基体抗磨损/冲刷/疲劳、耐高温/强酸碱腐蚀等性能；**成倍延长关键部件使用寿命，大幅提升装备系统服役可靠性。**
- **钛合金等渗氮难点：**相较于传统钢铁材料，因为材料本质特性差异，气体渗氮对于钛合金等新材料几乎无效果；钛合金离子渗氮则对装备和工艺技术要求很高，**国内尚未大范围普及。**
- **我们的技术优势：**(1)自主研发了**高压脉冲电源-内置式辅助加热-高功率多功能离子渗氮炉**，显著改善辉光放电和炉温控制效果；(2)针对镍基合金/高温合金、钛合金等难渗材料，**设计开发了上百种工艺手段和特种工装**，完美实现钛合金等材料零部件的表面氮化改性。**装备&工艺均为自主技术，渗氮过程全面可控，质量更有保证。**



目前加工服务能力

序号	规格型号 (mm)	适用对象
1	Ø300×280	各类尺寸的钛合金、锆合金、镍基合金、特种钢铁等材料。
2	Ø600×800	
3	Ø800×600	
4	Ø900×1000	
5	Ø800×1800	
6	Ø1200×1200	
7	Ø800×3000 (1000+1000+1000三节)	
8	Ø1000×4500 (1500+1500+1500三节)	
9	Ø400×1600 (600+1000两节)	
10	Ø1600×1300	



最新技术进展

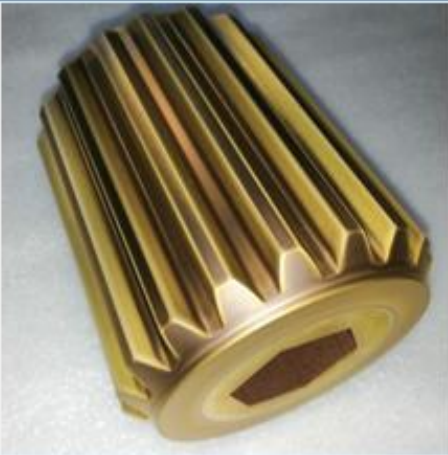
对比项目	传统NH ₃ 离子渗氮装备	新开发多气体离子渗氮装备
渗氮温度（同等指标对比）	TC4钛合金800HV/0.1mm：≥800℃ 17-4不锈钢1100HV/0.3mm：≥530℃	TC4钛合金800HV/0.1mm：≤700℃ 17-4不锈钢1100HV/0.3mm：≤510℃
渗氮时间（同等指标对比）	TC4钛合金800HV/0.1mm：≥25h 17-4不锈钢1100HV/0.12mm：≥30h	TC4钛合金800HV/0.1mm：≤15h 17-4不锈钢1100HV/0.12mm：≤20h
在同等渗氮指标要求下，新开发多气体渗氮装备（工艺）可以显著降低渗氮温度，同时缩短工艺时间。大幅改善零件基体性能受损、热胀变形等传统NH ₃ 渗氮技术的局限，且极大提升工艺绿色环保和安全性。		

不同材质渗氮效果

基体材质	最高表面硬度HV _{0.1}	最大渗层深度mm	备注
TC4/TC6/TC11/TC21钛合金	1100	0.25	钛合金渗氮效果： TC (α+β) >TA (α) >TB (β)
TA1/TA2工业纯钛	1000	0.2	
TB17钛合金	700	0.05	
R60702/705锆合金	900	0.15	——
TaW2.5/TaW10钽钨合金	850/1500	0.06	——
Inconel600/625/718镍基合金	800~1000	0.05~0.10	——
1Cr13~4Cr13不锈钢	950	0.20	不锈钢低温 (<450℃) 离子渗氮技术，可大幅提高硬度并兼顾耐蚀性；高温 (~500℃) 离子渗氮硬度更高、渗层更深，但耐蚀性会下降。
304/316L不锈钢	900	0.15	
17-4/15-5不锈钢	1000	0.20	
40Cr/42CrMo/38CrMoAl低合金钢	1050	0.90	独创多元离子渗技术，可同时显著提升耐磨性和耐蚀性。

渗氮效果示例

某型TC4钛合金传动花键离子渗氮处理(项目来源：舰船装备)

对比项	渗氮前	渗氮后
实物照片		
表面硬度	HV300	HV800
渗层深度	——	100μm
尺寸变形量	——	≤20μm
实际工况服役寿命 (要求承受脉冲式10000N·m扭矩冲击6000次以上)	< 3000次	> 15000次

某型ZTC4钛合金航空流道部件(项目来源：航空工业)

对比项	渗氮前	渗氮后
实物照片		
表面硬度	HV300	HV850
渗层深度	——	70μm
尺寸变形量	——	≤30μm
实际工况服役寿命 (要求长期服役耐高温高压冲刷/磨损)	不可用	> 5年

某型车载发射架40Cr钢制液压组件离子氧氮共渗处理(项目来源：航天科技)

对比项	渗氮前	渗氮后
实物照片		
表面硬度	HV320	HV700
渗层深度	—	800μm
盐雾腐蚀试验	中性盐雾试验（NSS）24h	交替NSS（24h喷+24h干）×8周期，共336h
实际工况服役寿命 (要求长期服役不发生严重腐蚀/磨损)	< 2个月	> 3年

工件名称：TC4钛合金球阀 工件用途：石油化工PTA

技术指标：表面硬度 $> 800\text{HV}_{0.1}$ ，渗层深度 $> 100\mu\text{m}$



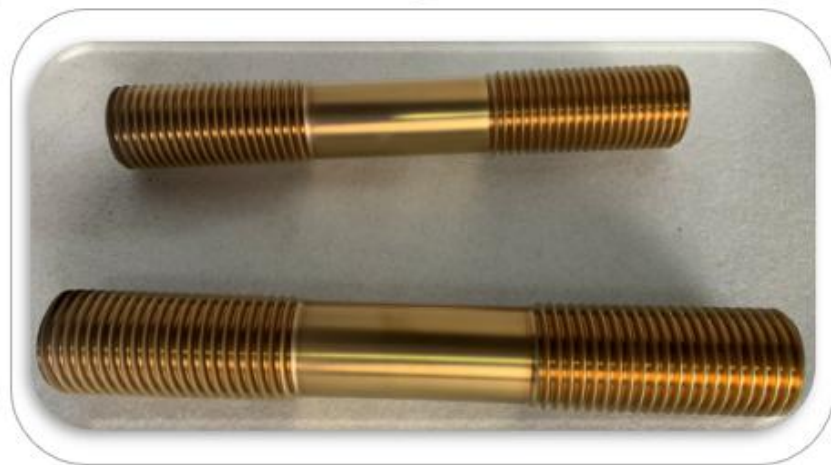
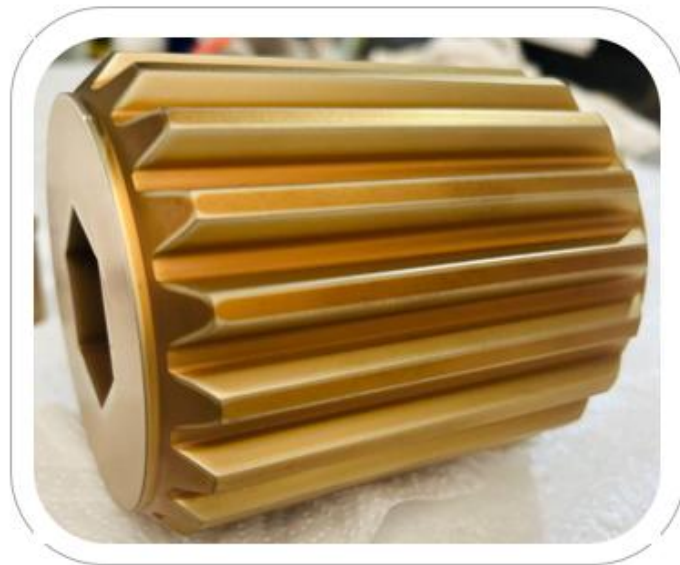
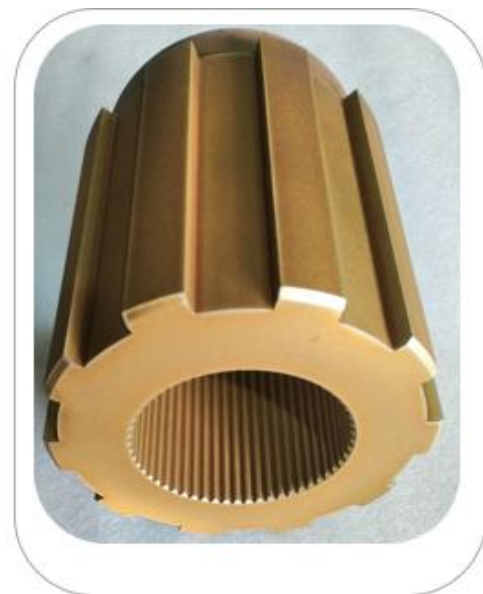
工件名称：钛合金紧固件

表面硬度 $> 700\text{HV}_{0.1}$ ，渗层深度 $> 50\mu\text{m}$ ，变形控制 $\leq 0.01\text{mm}$



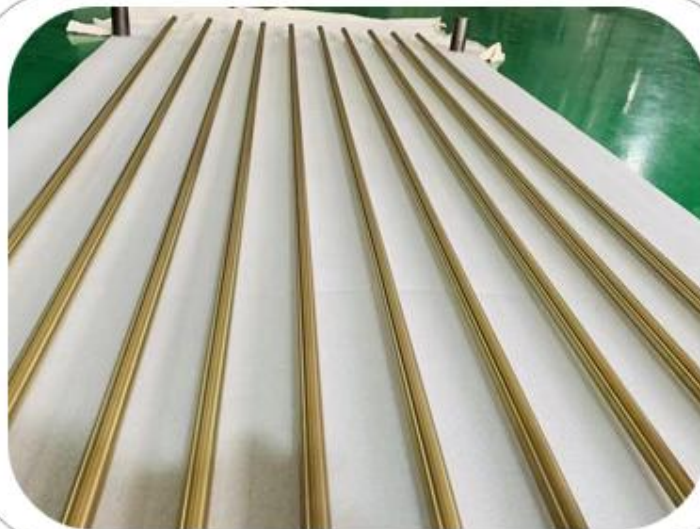
工件名称：TC4钛合金传动件 工件用途：动力传动

技术指标：表面硬度 $> 700\text{HV}_{0.1}$ ，渗层深度 $> 80\mu\text{m}$ ，变形控制 $\leq 0.02\text{mm}$



工件名称：钛合金细长杆件（最长3100mm）

技术指标：表面硬度 $> 900\text{HV}_{0.1}$ ，渗层深度 $> 100\mu\text{m}$ ，单边变形 $< 0.015\text{mm}$



工件名称：TC6钛合金异型件 工件用途：航空工业

技术指标：表面硬度 > 900HV_{0.1}，渗层深度 > 100μm，内孔壁同等要求



钛钽合金 (TA9) 和TA10零部件渗氮

表面硬度 $> 1000\text{HV}_{0.1}$, 渗层深度 $> 150\mu\text{m}$



钛合金精密零件渗氮



表面硬度 $> 800\text{HV}0.1$, 渗层深度 $> 100\mu\text{m}$, 变形控制 $\leq 0.02\text{mm}$



大型汽轮机主机TC4钛合金叶片渗氮



工件名称：锆合金阀杆和球阀 **工件用途：**石油化工

技术指标：表面硬度 $\geq 900\text{HV}_{0.1}$ ，渗层深度 $> 80\mu\text{m}$

(氧氮共渗)



钢铁件离子渗氮/氧/碳



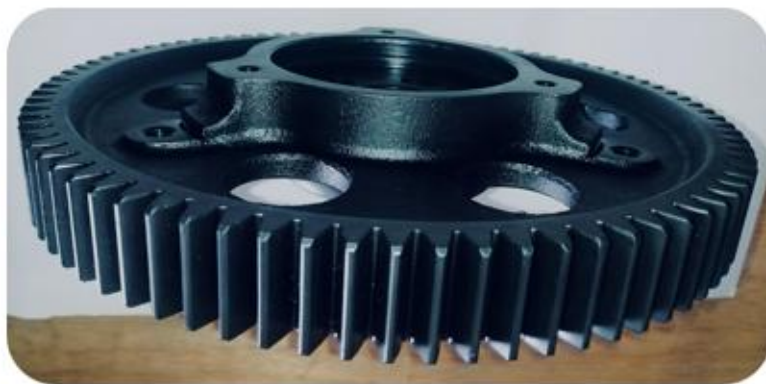
45号钢缸筒
(1000mm)



40Cr活塞杆
(3050mm)



40CrNiMo重载离合齿



20MnCr5差速器齿圈



38CrSi部件



38CrMoAl密封耐磨环

精益求精，为高端装备制造；打造品牌，创一流科技企业

■ **求真务实**

- 围绕高端装备制造，切实解决材料真实问题。

■ **保障可靠**

- 持续致力技术开发，提供专业可靠技术保障。

■ **打造品牌**

- 转变升级经营思路，主动作为服务更多客户。

■ **追求卓越**

- 基于30年成果积累，全面打造一流科技企业。

欢迎交流

期待合作