

# 浅析烟花用钛粉制备关键技术与发展趋势

周丰铝

浏阳市达浒镇人民政府经济发展办公室, 湖南 长沙

收稿日期: 2024年11月8日; 录用日期: 2024年12月12日; 发布日期: 2024年12月19日

## 摘要

钛粉因其优异的热、光学性能, 成为提升烟花燃烧效果的关键材料, 本文浅析了烟花用钛粉的制备工艺和关键技术, 探讨了钛粉的粒径、纯度和化学稳定性等因素对燃烧速度和光效的影响。在钛粉制备方面, 气雾化法以其高效生产能力和粒径控制优势; 随着环保要求的提高, 低烟低毒钛粉的开发和智能化生产的引入, 推动了钛粉制备工艺向环保、高性能方向发展, 为烟花行业带来新的可持续发展机遇。

## 关键词

钛粉, 烟花, 气雾化法, 燃烧性能, 纯度与粒径

# A Brief Analysis of Key Technologies and Development Trends in Titanium Powder Preparation for Fireworks

Fenglu Zhou

Economic Development Office, People's Government of Dahu Town, Liuyang City, Changsha Hunan

Received: Nov. 8<sup>th</sup>, 2024; accepted: Dec. 12<sup>th</sup>, 2024; published: Dec. 19<sup>th</sup>, 2024

## Abstract

Titanium powder has become an essential material for enhancing the combustion performance of fireworks due to its excellent thermal and optical properties. This article provides a brief analysis of the preparation process and key technologies for titanium powder in fireworks, examining the effects of factors such as particle size, purity, and chemical stability on combustion rate and luminosity. Among preparation methods, atomization stands out for its high production efficiency and precise particle size control. As environmental standards increase, the development of low-smoke, low-toxicity titanium powder and the integration of intelligent production technologies have advanced

titanium powder preparation towards greater environmental friendliness and performance, offering new opportunities for sustainable growth in the fireworks industry.

## Keywords

Titanium Powders, Fireworks, Gas Atomization, Combustion Performance, Purity and Particle Size

Copyright © 2024 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

## 1. 引言

钛是一种地球储量排名第四的结构材料，具有出色的力学性能、抗腐蚀性、热导性能，以及良好的生物相容性[1][2]，即是国防建设不可或缺的“战略金属”，又是在众多领域发挥重要作用的“第三金属”。作为一种极具发展潜力的有色金属，钛已广泛应用于航空航天、石油化工、交通运输和医疗器械等诸多领域[3]-[6]。钛是现代工业中至关重要的战略金属，是国民经济发展的基础材料，同时也是高新技术领域中不可替代的重要材料。

钛粉是指尺寸在一定范围内的细小颗粒，钛粉具有较大的表面自由能，性能活泼，极易氧化、易燃、易爆、易与其他元素发生反应，其在燃烧时产生的高温和明亮的白光。钛粉因其活泼的物理化学性质在烟花制造中发挥着重要作用[7]，成为不可或缺的材料。钛粉一般呈浅灰色，其颜色与颗粒尺寸密切相关，粒径越小颜色越深，粗粉具有明显的金属色泽，微粉一般呈现浅灰色，超微粉则呈现出黑色。钛粉的粒形通常有球形、不规则形和片状等几种，其粒形的选择会根据不同的应用需求而变化[8]。钛粉的粒径规格和形态对其燃烧效果有重要影响，而钛粉的制备工艺直接决定了其粒形状态。

为进一步促进钛粉在烟花行业的应用，亟需优化钛粉的燃烧效果并减少其对环境的影响。针对当前烟花用钛粉的纯度、粒径和环保性能要求逐步提高的现状[9]，本文围绕烟花制造领域用钛粉的基本要求、制备工艺进行深入分析，并对该钛粉末制备的未来发展趋势进行了展望，以期为高性能钛粉制备及产业化项目建设提供参考。

## 2. 烟花用钛粉的基本要求

烟花用钛粉必须具备一系列特定的物理化学属性以满足燃烧效果和安全性要求[10]。首先，钛粉的粒径对其燃烧速度和光效有直接影响。较小粒径的钛粉可以迅速燃烧，适用于需要快速闪光效果的烟花；而较大粒径的钛粉燃烧时间较长，适合持续燃烧的烟花效果[11]。钛粉的球形度影响其在烟花中的流动性和均匀燃烧性，球形度较高的钛粉能够提供更稳定和一致的光效。此外，钛粉的纯度直接关系到燃烧时产生的烟雾量和颜色的纯净度，高纯度的钛粉可以减少烟雾和提高光效的亮度[12][13]。最后，钛粉的化学稳定性和安全性也是重要考虑因素，确保钛粉在储存和运输过程中的稳定性，防止自燃或在非预期条件下发生危险反应。

## 3. 烟花用钛粉的制备方法

烟花用钛粉的制备工艺是一个精细和系统的过程，旨在生产出能够满足特定燃烧效果和安全性要求的高品质钛粉。这一流程开始于选择高纯度的钛金属作为原料，这是确保最终钛粉品质的基础[14]。钛粉的传统制备方法主要包括机械粉碎法、电解法和还原法[15]，这些制备技术各有优缺点，特别是在颗粒尺

寸、纯度控制, 颗粒形状等方面存在一些不足, 部分颗粒呈现多角形、多孔海绵状、树枝状等特征。目前, 钛粉的常用制备工艺包括等离子体雾化法、等离子旋转电极法和气雾化技术等, 这些方法可以生产出符合高品质烟花制造需要的钛粉[16]。此外, 电化学法、氢化脱氢法和激光熔化法也被应用于钛粉的制备过程中。

### 3.1. 等离子旋转电极法

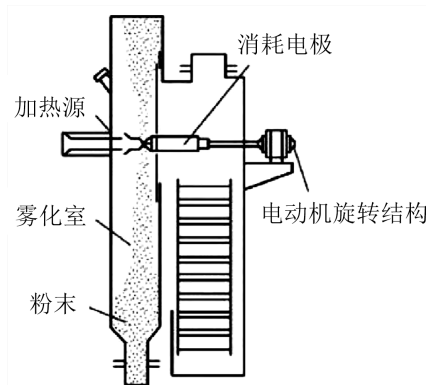
等离子旋转电极制粉技术(PREP)是当前生产高品质球形金属粉末的重要技术之一, 其原理如图 1 所示。核心环节是将等离子体喷枪定位于一个高速旋转的消耗性金属电极的端部。在这一过程中, 高温等离子体弧光将电极端部加热至熔化状态, 从而形成一层熔融液体膜。由于电极的高速旋转产生的离心力, 这层液体膜被有效地从电极上剥离, 并进一步分散成细小的液滴。这些液滴通过在表面张力以及冷却环境下的作用, 逐渐凝固成球形的粉末。最终, 这些粉末在重力的影响下落入收集区域[17]。采用 PREP 技术制备的钛粉末以其高球形度、高品质粉末、粒径可控及微型粉末少等特性而受到青睐。依据该技术雾化过程的原理, 当熔融液滴从电极表面脱离后, 判断是否形成球形液滴的关键依据便是, 表面张力与离心力是否已经达到平衡状态, 此条件可以用公式(1)来表示[15]。

$$\frac{\pi d^3}{6} \rho \omega^2 \frac{D}{2} = \sigma \pi d \quad (1)$$

式中,  $d$  代表液滴的直径;  $\sigma$  代表表面张力,  $\rho$  代表液滴的密度, 这两个参数在雾化过程中保持恒定;  $D$  代表电极棒的直径,  $\omega$  则代表其旋转的角速度。粉末的最终尺寸与液滴的尺寸对应相等, 这一关系可以通过公式(2)来进行近似的描述。

$$\begin{cases} d = \frac{M}{n\sqrt{D}} \\ M = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{12\sigma}{\rho}} \end{cases} \quad (2)$$

式中:  $n$  表示电极棒的旋转速度。当电极棒的直径保持不变时, 增加旋转速度能够有效降低粉末颗粒的直径, 并提升细粉末的收集效率[18]。



**Figure 1.** Schematic diagram of plasma rotating electrode powder making technology (PREP)  
**图 1.** 等离子旋转电极制粉技术(PREP)示意图

等离子旋转电极工艺在转速方面的限制影响了细粉末的产量。传统的等离子旋转电极水平式设备在提升转速时, 常伴随着振动加剧和噪音增大的问题。为此, 塞隆增材(SAILONG AM)开发了新型的垂直

式等离子旋转电极设备(SLPREP), 该设备不仅将旋转速度提升至 18,000 转每分钟, 同时也将噪音水平降至 89 分贝[19]。超高转速等离子旋转电极工艺(SS-PREP)具备优异的粉末综合性能, 已经熟练应用于球形钛粉末的生产加工, SS-PREP 技术可达到每分钟 30,000 转以上的超高转速, 很好地改进了传统工艺生产中易生产粗粉末等问题, 为金属 3D 打印等对精细粉末需求较高的制造技术提供了新的选择[20]。

在 PREP 技术的粉末制备过程中, 电极棒熔化一端形成的液膜厚度存在差异, 会导致液滴的分裂方式存在不同。其分裂方式可根据液膜的厚度分为以下三种: 直接液滴破碎(DDF)、液膜破碎(FD)和液线破碎(LD) [21]。在直接液滴破碎(DDF)过程中, 在液膜厚度较薄的情况下, 熔融端面能够直接释放出均匀的液滴, 这些液滴随后凝固成均匀分布的粉末颗粒。在液线破碎(LD)过程中, 随着熔化量的增多和液膜厚度的增加, 原本的液滴被拉伸成液线状, 这些液线在冷却时进一步分裂成更细小的粉末。至于液膜破碎(FD), 伴随熔化量的持续增加和液膜的进一步增厚, 最终形成的颗粒的尺寸也随之增大。

### 3.2. 等离子体雾化法

等离子雾化形成的粉末球形度高, 且不易产生成分偏析现象。等离子体雾化技术(PA), 最初由美国开发, 是一种用于生产球形金属粉末的方法[22]。该技术的制粉过程以金属或合金的丝材作为原料, 使用等离子枪作为加热源, 金属或合金丝材被送入等离子体焦点, 被迅速熔化或汽化, 熔化的金属丝材在等离子体的高温作用下, 通过等离子体的冲击分散雾化成超细液滴或气雾状, 随后通过冷却凝结成超细粉末, 具体过程详见图 2。等离子体雾化法(PA)的主要特征包括: 1) 原料熔化与液相破碎雾化两个过程可看作同步进行; 2) 使用高温氩气替代低温氩气, 以提高气流速度; 3) 极少产生附属的小球体; 4) 粉末球形度好且粒径偏细; 5) 粒径分布集中[23]-[26]。为了优化等离子体雾化制粉工艺(PA)的效果, 需要共同考量多个参数, 其中最关键的是加热的功率和送料速度。同时, 等离子体加热系统的反应室设计以及等离子体的流速也会对粉末形态和粒径分布产生重要影响[27]。

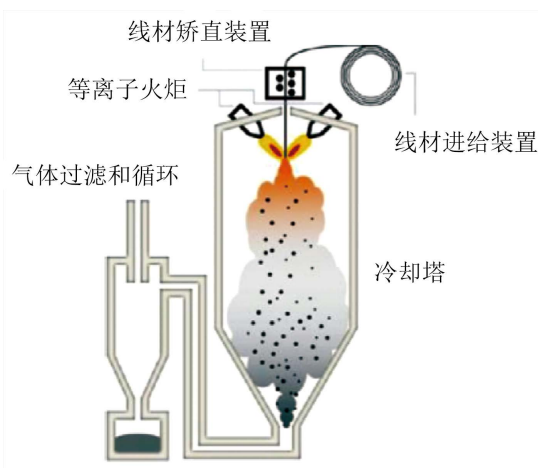


Figure 2. Schematic diagram of plasma atomization technology (PA)

图 2. 等离子体雾化技术(PA)示意图

在钛合金 3D 打印领域, 等离子体雾化技术正面临一些挑战。由于该技术依赖于丝状原料, 这限制了难以加工的金属或合金粉末的生产以及可生产的种类, 并且由于制造成本高以及商业化生产技术的保密, 使得这项技术的普及受到了不同程度的限制, 这也使得高品质钛粉末的价格居高不下。PyroGenesis Canada Inc 通过研究新型等离子体雾化技术(PA), 能够生产粒度在 5 至 20 微米的金属粉末, 在降本增效方面有极大的推进作用[28]。顶立科技(ACME)通过等离子体制粉的核心技术, 开发了新型等离子体雾化设备,

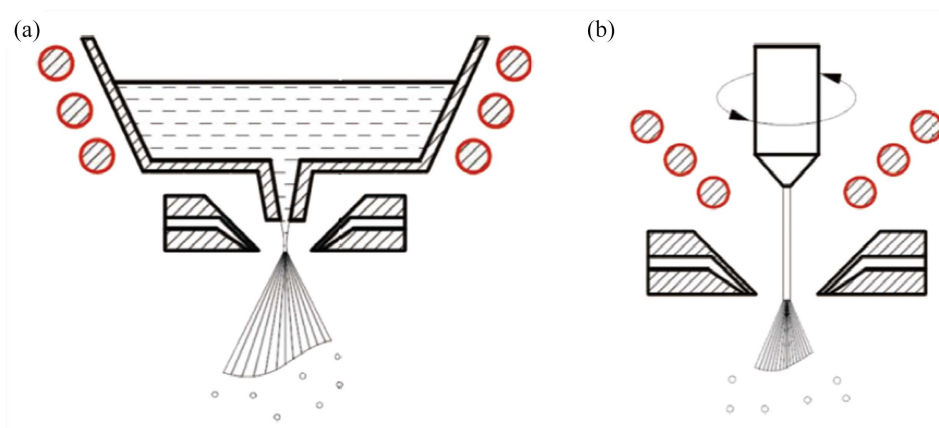
该设备生产的粉末球形度不低于 95%，松装密度达到 54%，细粉末比例可做到 32.6% [29]。这些发展显示出等离子体雾化技术(PA)拥有巨大的发展潜力和重要的研究价值。

### 3.3. 气雾化技术

气雾化技术(GA)包括超声波雾化(UA)、等离子体雾化(PA)、等离子体雾化(PS)、真空感应气雾化(VIGA)和电极感应气雾化(EIGA)等，这些气雾化技术各有特点，其中 VIGA 技术和 EIGA 技术是现在工业化生产中最主要的两种方法[30]。真空感应气雾化(VIGA)起源于 19 世纪 90 年代，当时的美国提出了用该技术实现钛及钛合金制备的方法，并以此为依据得到了专利许可，此后完成了年产 11 吨的设施的设计制造[31]。

这种技术是一种在真空环境中进行的金属粉末制备技术，通过感应加热原理将金属材料加热至熔点以上，使其熔化成液态。感应熔炼器内部设有高频感应线圈，通电后在感应区域形成高频交变磁场，金属材料在该区域受到感应加热而熔化；此后通过气体喷嘴对熔融金属进行喷射。高速气流冲击熔融金属流，通过碰撞将气体的动能转化为金属熔体的表面能，使熔融金属流被击碎成细小液滴，并在气流氛围中快速冷却凝固形成粉末[32]，详见图 3(a)。VIGA 技术特点包括：(1) 单次熔炼量大且粉末纯度高；(2) 粉末回收率高且球形度好；(3) 粉末粒度分布可控；(4) 工艺参数灵活，适合大规模连续生产操作[33]。坩埚内壁形成的凝壳层减少了熔体污染。尽管如此，VIGA 技术制备的粉末杂质含量仍较高，这是因为坩埚中的熔体保温时间长，使得导流管易腐蚀。前人[34]发现，即使提前在对应位置设置保护性涂层，但还是检测大量的杂质元素聚集在靠近导流管出口的位置，因此控制杂质含量是 VIGA 技术的关键挑战。此外，也有学者致力于改进 VIGA 工艺以提升粉末质量[35] [36]。

电极感应气雾化(EIGA)技术是由德国 ALD 公司开发的一种先进的金属粉末制备技术。最早提出于 1991 年，发展 30 余年至今已成为大规模制备粉末冶金增材制造用超洁净金属粉末的重要方法。EIGA 技术通过使用高频感应线圈加热预制的棒材电极，使其在交变磁场中迅速升温至熔点，在重力作用下熔化液态金属并使其沿棒材流动并落入喷嘴中心，熔化的金属液流经过雾化器中心孔，在高速气流的冲击下雾化成金属粉末[37]。与 VIGA 技术相比，EIGA 技术不使用与金属熔体直接接触的坩埚，这减少了熔炼过程中杂质的引入；同时，由于避免了坩埚材料的污染，EIGA 技术能够制备出高纯度的金属粉末，这对于活性金属及其合金粉末的制备尤为重要；并且，该技术特别适用于高活性金属及其合金粉末的制备，可提供一种更为洁净、可控的熔炼和雾化过程[38]。详见图 3(b)。



**Figure 3.** (a) Vacuum induction atomization technology (VIGA), (b) Electrode induction atomization technology (EIGA)

**图 3.** (a) 真空感应气雾化技术(VIGA), (b) 电极感应气雾化技术(EIGA)

这项技术的核心优势在于它防止了钛及其合金在熔炼过程中受到污染，同时，它的能效较低，操作过程也相对简便。然而，电极感应熔炼气雾化法同样面临若干挑战：1) 电极的尺寸扩展受到限制；2) 熔炼过程的稳定性不高；3) 电极的熔断可能会引起喷嘴堵塞；4) 细粉末的回收率较低。

电极感应熔炼气雾化技术(EIGA)涵盖了熔化和雾化两个关键步骤。其中的熔化对熔体的属性，如温度、黏度、表面张力和流动特性等产生直接作用，从而对其进入雾化区的状态，以及粉末的粒度、形状和收得率有着直接影响，这进一步决定了粉末的特性。Lubanska 通过对气雾化制粉技术的研究提出了 Lubanska 粉末粒度公式[39]，这可以用来描述熔体属性如何影响粉末特性，具体表达式参见公式(3)：

$$d_{50} = \left[ \frac{\eta_m \sigma_m A^2 \rho_g^2 d_t}{(\eta_g G^2 \rho_m) \left(1 + \frac{M}{G}\right)} \right]^{\frac{1}{2}} \quad (3)$$

式中， $d_{50}$  表示粉末的质量中值粒径； $\eta_m$ ， $\sigma_m$  分别指金属液的运动粘度和表面张力； $A$  代表气体的质量流速； $\rho_g$  是气体的密度； $\eta_g$  表示气体的动态粘度； $\rho_m$  为金属液的密度； $M$  代表熔体的质量流速。根据公式(3)， $\eta_m$  和  $\sigma_m$  的值越低， $d_{50}$  也越小，表明金属熔体的运动粘度和表面张力两个参数可以决定粉末的质量中值粒径[40]。金属熔体的运动粘度( $\eta_m$ )和表面张力( $\sigma_m$ )与温度呈线性关系，以钛合金为例，相关的线性方程[41] [42]如公式(4)：

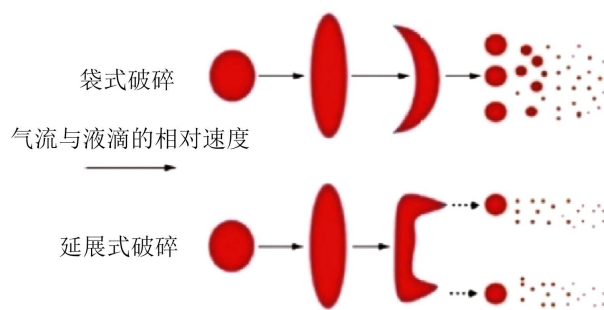
$$\begin{cases} \eta(T) = 4.42 - 6.67 \times 10^{-3} (T - T_m) (\text{mPa} \cdot \text{s}) \\ \sigma(T) = 1.557 \times 10^3 - 0.156 (T - T_m) (\text{mN} \cdot \text{m}^{-1}) \end{cases} \quad (4)$$

式中， $T_m$  表示钛合金的熔化温度。其中金属熔体的粘度和表面张力会随着熔体温度  $T$  的升高，而全部降低。根据公式(3)，这种降低将有助于粉末的质量中值粒径的减少。

因此，精细调控钛合金的熔化工艺对于最终钛粉末的品质极为关键。雾化技术的核心在于三个主要阶段以及两种典型的二次破碎模型，如图 4 所示。第一阶段，金属液流被高速气流冲击，形成波浪状的金属液膜；第二阶段，波浪状金属液膜在液体表面张力的作用下变得不稳定，再次被撕裂成细长的棒状液滴；第三阶段，棒状液滴和未完全破碎的金属液膜在高速雾化气流的持续冲击下经历二次破碎[43]。在雾化制粉过程中，评估二次破碎过程的一个重要参数是韦伯数(Weber Number,  $W_e$ )。韦伯数是一个无量纲的物理量，用于描述流体在某种力(如惯性力和表面张力)作用下的破碎趋势。其定义公式[44]如下式(5)：

$$W_e = \frac{\rho_g U_r^2 d_p}{\sigma} \quad (5)$$

式中： $\rho_g$  代表气体的密度( $\text{kg}/\text{m}^3$ )， $U_r$  表示气流与液滴之间的相对速度( $\text{m}/\text{s}$ )， $d_p$  指液滴的直径( $\text{m}$ )， $\sigma$  是液滴的表面张力( $\text{N}/\text{m}$ )。韦伯数的大小可以反映液滴在气流中的破碎程度，是描述液滴二次破碎物理过程的一个重要参数，韦伯数越大，液滴越容易破碎，从而得到更细小的粉末。在雾化制粉过程中，二次破碎对粉末的形成起着至关重要的作用，这里存在两种常见的二次破碎模式：“袋式破碎”和“延展式破碎”。在较低的韦伯数( $W_e$  在 15 至 20 之间)时，在这种破碎模型中，液滴在表面张力和气动力的作用下形成袋状结构，最终破裂成较小的液滴，得到的颗粒分布在比较宽的范围内。随着气流压力的增加，韦伯数也随之增大。当韦伯数较高( $W_e$  达到 101)时，转变为“延展式破碎”，与“袋式破碎”不同，在这种模型中，液滴在两侧被拉扯成薄片后进行破碎，因此能获得更小的液滴[45] [46]。



**Figure 4.** Bag crushing and extension crushing models of atomization technology  
**图 4.** 雾化技术的袋式破碎和延展式破碎模型

通过等离子旋转电极技术(PREP)生产的钛粉具有一系列显著的特点和优势,比如高球形度、高致密度、低氧含量、粒径分布可控,但由于受到设备成本高、结构限制、工艺复杂性等限制,其发展前景面临挑战,虽然取得了技术突破,但这一技术是否能成为主流钛粉生产方法还未确定。等离子体雾化技术(PSAT)能够生产出高质量的钛粉,极具发展潜力。这种技术生产的钛粉具有以下特点:高球形度、高纯度、低空心率、低氧含量,但其应用受到细粉收得率、设备结构、以及材料的限制。在国内,真空感应熔炼气雾化技术(VIGA)是一种相对成熟的钛粉生产方法,但这种方法制备的钛粉存在较为明显的污染问题,所以也不是最佳的材料选择。电极感应气雾化技术(VIGA)和真空感应气雾化技术(EIGA)共同的不足在于较高的空心率和卫星粉末的产生,这会导致许多不利的影 响,产生这种现象的主要原因包括:1) 在破碎金属液流时,高超速氩气可能被包裹进液滴内,在极快的冷却速率下,氩气未能逸出,导致微细液滴直接形成金属粉末,增加了空心粉的比例;2) 在制粉过程中,由于金属液流的表面张力不均匀,可能会形成类似“伞”状的结构,导致粉末粒度分布范围较宽,小颗粒粉末黏附在大颗粒粉末的概率增大,从而产生较多的卫星粉[47]。

### 3.4. 氢化脱氢法

氢化脱氢法(HDH)是一种经济高效的钛粉制备技术,其过程首先涉及钛金属与氢气的反应,形成氢化钛,随后在高温环境下通过脱氢反应来生成钛粉。这种方法以其成本低廉和适应大规模生产的特性,成为钛粉生产中广泛采用的一种技术。此外,氢化脱氢法的操作简便性和能够产生高纯度钛粉的能力,使其在工业应用中具有重要的地位。洪艳等[48]的研究表明,在特定温度下,金属钛粉末与氢气会发生剧烈反应。当氢含量超过 2.3%时,生成的氢化钛疏松易碎,可以通过在约 700℃ 的温度下进行处理,这一步骤的目的是分解氢化钛粉,并去除钛粉中固溶的大部分氢,最终得到纯净的钛粉。研究从多个角度对氢化脱氢过程进行了深入分析,包括热力学原理、脱氢曲线、差热分析以及平衡分压与氢气的关系等。实验结果显示,随着温度的升高,钛中氢的含量逐渐减少,在达到 680℃ 时,氢化钛会出现吸热峰并迅速分解,而钛的氢化反应温度区间为 350℃~680℃。在氢化脱氢法中,钛粉中的杂质含量主要依赖于原料的纯度和原始杂质状况。通过严格控制操作流程,可以最小化氧或碳等杂质的引入。此外,研究还发现,对于使用相同原料制成的钛粉,粒度越细,其含氧量也越高。这表明在制备过程中,粉末的粒度对最终产品中氧含量有显著影响。

随着技术发展和市场需求的提升,研究者们正在积极探索该方法的技术革新,特别是在催化剂的开发和反应器设计方面[49][50]。新型催化剂的开发旨在加速氢化和脱氢的化学反应,提高反应速率,从而增加生产效率。同时,通过优化反应器的设计,可以在较低的温度下完成脱氢过程,这不仅能有效降低能耗,还能减少因高温而导致的钛粉的潜在氧化问题,进一步保证了产品的纯度和质量。

此外，氢化脱氢技术的改进不仅限于提高传统钛粉的生产效率和质量，还扩展到了新兴的能源存储领域。高纯度的钛基合金粉末已经开始被用于氢存储和电池材料的生产，这些应用在可再生能源和高效能源存储技术中展示了巨大的潜力。例如，钛基合金因其卓越的氢吸附能力而成为制造高性能氢燃料电池和其他能源存储设备的理想材料。

### 3.5. 电化学制备法

电化学制备法(ECP)是一种在钛粉生产中越来越受重视的技术，其核心在于通过在特定电解液中施加电压，从阳极析出钛元素，进而形成钛粉[51]。这一过程的一个显著优势是其在较低温度下进行，有效避免了传统高温热处理过程中钛粉可能发生的氧化问题，从而保持了钛粉的化学纯度和物理性质。

技术革新是推动电化学制备法发展的关键因素之一[52]。利用纳米技术优化电极表面结构是最近的一个重要进展，这一技术可以显著提高电化学反应的效率和钛粉的纯度。纳米结构的电极表面增加了电极与电解液的接触面积，改善了电流的分布，使得钛元素的析出更加均匀和高效。此外，通过精确调节电解液的pH值和电解参数，如电流密度和电压，可以细致控制析出的钛粉的粒径和形态，这对于满足特定应用需求至关重要。

电化学制备法的环保特性和过程的高度可控性使其在多个领域尤为有价值。在精细化学品的制备中，这种方法能够提供所需的高纯度和特定形态的钛粉，而在电子材料的生产上，精确控制的钛粉粒径和纯度是实现高性能电子产品的关键。例如，在半导体和导电涂料等应用中，均匀且纯净的钛粉能够显著提升产品的性能和可靠性。

### 3.6. 激光熔化法

激光熔化法(LM)是一种高端钛粉制备技术，通过使用高能激光直接作用于钛粉或钛金属，迅速将其熔化并冷却[53]，从而形成超细钛粉。这种技术的主要优势在于其能够非常精确地控制钛粉的粒径和形态，使其适用于那些对精度要求极高的应用场合，如精密工程和高科技制造领域。

集成先进的机器视觉和自动化控制技术使得激光熔化过程能够实现实时监控和自动调整，极大提高了钛粉的生产一致性和效率。这些技术的应用不仅优化了生产流程，还确保了产品质量的高标准和可重复性，对于生产复杂和高性能的材料尤其重要。

## 4. 烟花用钛粉发展趋势

随着技术的持续进步和市场需求的多样化，烟花用钛粉的制备技术正在向更高的效率、环保性和燃烧性能等方向发展。这一发展趋势不仅反映了行业对优化产品的追求，还体现了对环境责任的增强认识和对创新技术的积极应用。

在环保型钛粉的开发方面，这已成为烟花制造业的一大趋势。伴随环保法规的日益严格和公众对健康及环境质量的高度关注，开发低烟雾和低毒性的钛粉已成为行业发展的必然选择[54]。这一目标的实现，依赖于制备工艺的革新和新材料合成方法的探索，旨在减少生产过程中的有害排放，提升钛粉的环保标准，从而满足更为严格的环保要求[55]。此外，通过绿色化学和生物工程技术的应用，也许可以开发出全新的钛粉合成途径，这将在保证性能的同时，最大限度地降低对环境的影响。

智能化生产技术的融入则是钛粉制备工艺现代化的另一重要方向。通过集成先进的传感器和实时数据处理技术，生产过程可以实现高度自动化，大幅提高效率和产品质量的一致性。机器学习和人工智能的应用不仅优化了制造流程，减少了人为错误和材料浪费，还能根据实时市场数据和生产条件自动调整工艺参数，提高适应性和灵活性。这种技术的应用，预示着未来制造业将更加智能化和精准化，以应对

日益复杂和不断变化的市场需求。

钛粉的应用领域正逐步从烟花制造扩展到包括航空航天和 3D 打印在内的高科技行业[56], 这对钛粉的性能提出了更高的要求。为了满足这些领域对热稳定性、机械强度和化学纯度的严苛需求, 未来的研发工作将集中在利用纳米技术、合金化技术和表面改性技术等先进方法来增强钛粉的功能特性。通过这些技术的应用, 钛粉不仅能在烟花制造中继续发挥作用, 还可能在增强型复合材料、精密铸造和功能性涂层等领域展现出更大的潜力, 进而推动这些领域的技术进步和产业发展。

总体而言, 钛粉的未来发展将是一个多方面的技术革新和市场适应的过程, 涉及材料科学、环境工程和智能制造等多个领域的深度融合。通过这些努力, 钛粉的制备和应用将更加环保、高效和多功能, 以满足更广泛的工业需求和环境标准。

## 5. 结语

钛粉在烟花制造中的应用已经显示出其不可替代的独特价值。通过对其基本要求和制备工艺的深入分析, 为更好地理解如何提升其性能以满足当前和未来的需求提供了参考。随着制备技术的进步和智能化、环保化的发展趋势, 预计钛粉将在烟花产业以及其他高科技领域中发挥更大的作用。此外, 对环境影响的考虑也将驱动钛粉生产向更加绿色和可持续发展的方向发展。总之, 钛粉的未来充满了机遇和挑战, 需要行业、研究人员和政策制定者共同努力, 不断创新和改进, 以实现其在科技和工业应用中的全面潜能。

## 致 谢

在此, 作者衷心感谢所有为本文提供支持和帮助的个人和机构, 感谢相关领域的研究者们, 他们的前期研究为我提供了宝贵的参考和启示, 希望本文能够为烟花行业的可持续发展贡献一份力量。

## 参考文献

- [1] Bolzoni, L., Esteban, P.G., Ruiz-Navas, E.M. and Gordo, E. (2011) Influence of Powder Characteristics on Sintering Behaviour and Properties of PM Ti Alloys Produced from Prealloyed Powder and Master Alloy. *Powder Metallurgy*, **54**, 543-550. <https://doi.org/10.1179/003258910x12827272082623>
- [2] 王海英, 郭志猛, 芦博欣, 等. 钛合金粉末冶金工业化生产技术[J]. 钛工业进展, 2017, 34(1): 1-5.
- [3] 郭鲤, 何伟霞, 周鹏, 等. 我国钛及钛合金产品的研究现状及发展前景[J]. 热加工工艺, 2020, 49(22): 22-28.
- [4] 吴引江, 梁永仁. 钛粉末及其粉末冶金制品的发展现状[J]. 中国材料进展, 2011, 30(6): 44-50, 63.
- [5] 谭兆强, 张青, 郭学益, 等. 粉末冶金技术在汽车工业的新进展(英文) [J]. *Journal of Central South University*, 2020, 27(6): 1611-1623.
- [6] 杨芳, 李延丽, 申承秀, 等. 钛及钛合金粉末制备与成形工艺研究进展[J]. 粉末冶金技术, 2023, 41(4): 330-337.
- [7] 黄蔚官, 刘瑶, 黄蔚清, 等. 一种稻穗状烟花亮珠及其制备方法[P]. 中国专利, CN202210008209.7. 2022-05-13.
- [8] 万贺利, 徐宝强, 戴永年, 等. 钙热还原法制备钛粉过程的研究[J]. 功能材料, 2012, 43(6): 700-703, 707.
- [9] 中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局. GB/T22781-2008 烟花爆竹用钛粉关键指标的测定[S]. 北京: 中国标准出版社, 2008.
- [10] 黄寅生. 炸药理论[M]. 北京: 北京理工大学出版社, 2016.
- [11] Schmid, P., Bogdal, C., Wang, Z., Azara, V., Haag, R. and von Arx, U. (2014) Releases of Chlorobenzenes, Chlorophenols and Dioxins during Fireworks. *Chemosphere*, **114**, 158-164. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2014.03.088>
- [12] 仲倩, 项雅萱, 顾宇航, 等. 奇趣智能冷烟花的实验设计[J]. 信息化研究, 2021, 47(6): 73-78.
- [13] 顾宇航, 王梦媛, 吴迪, 等. 一种环保冷烟花及其制备方法[P]. 中国专利, CN202110653972.0. 2021-10-01.
- [14] 吴俊逸. 一种测定烟花爆竹用钛粉中钛含量的方法[P]. 中国专利, CN201610776119.7. 2017-02-01.
- [15] 郭广浩. EIGA 法钛粉制备感应熔炼数值模拟及实验研究[D]: [硕士学位论文]. 广州: 广东工业大学, 2021.

- [16] 郭广浩, 唐超兰, 楚瑞坤. 金属增材制造用钛粉制备研究[J]. 粉末冶金技术, 2022, 40(4): 340-350.
- [17] 陈莹莹, 肖志瑜, 李上奎, 等. 3D 打印用金属粉末的制备技术及其研究进展[J]. 粉末冶金工业, 2018, 28(4): 56-61.
- [18] 国为民, 陈生大, 冯涤. 等离子旋转电极法制取镍基高温合金粉末工世的研究[J]. 航空工程与维修, 1999(5): 44-46.
- [19] 孙念光, 陈斌科, 向长淑, 等. 3D 打印粉末生产用等离子旋转电极雾化制粉机[J]. 重型机械, 2019(5): 36-40.
- [20] 赵霄昊, 王晨, 潘霏霏, 等. 球形钛合金粉末制备技术及增材制造应用研究进展[J]. 粉末冶金工业, 2019, 29(6): 71-76.
- [21] 雷因芝. 等离子旋转电极雾化法制备球形金属粉末的工艺及性能研究[D]: [硕士学位论文]. 西安: 西安理工大学, 2019.
- [22] 杨彤, 尹政鑫, 邱吉尔, 等. 等离子体雾化用等离子体发生器动静特性研究[J]. 真空, 2021, 58(5): 66-71.
- [23] 廖先杰, 赖奇, 张树立. 球形钛及钛合金粉制备技术现状及展望[J]. 钢铁钒钛, 2017, 38(5): 1-8.
- [24] 梁永仁, 吴引江. 3D 打印用钛及钛合金球形粉末制备技术[J]. 世界有色金属, 2016, 41(6): 150-151.
- [25] Herzog, D., Seyda, V., Wycisk, E. and Emmelmann, C. (2016) Additive Manufacturing of Metals. *Acta Materialia*, **117**, 371-392. <https://doi.org/10.1016/j.actamat.2016.07.019>
- [26] Chen, G., Zhao, S.Y., Tan, P., Wang, J., Xiang, C.S. and Tang, H.P. (2018) A Comparative Study of Ti-6Al-4V Powders for Additive Manufacturing by Gas Atomization, Plasma Rotating Electrode Process and Plasma Atomization. *Powder Technology*, **333**, 38-46. <https://doi.org/10.1016/j.powtec.2018.04.013>
- [27] 戴煜, 李礼. 金属基 3D 打印粉体材料制备技术现状及发展趋势[J]. 新材料产业, 2016(6): 23-29.
- [28] 孙世杰. 加拿大 PyroGenesis 有限公司开发出新的生产细颗粒金属粉末的等离子雾化技术[J]. 粉末冶金工业, 2017, 27(6): 75.
- [29] 戴煜, 李礼. 等离子火炬雾化制备金属 3D 打印专用钛合金粉体技术分析[J]. 新材料产业, 2018(11): 55-60.
- [30] 刘艳, 尤齐桑, 朱红梅, 等. 电极感应气雾化法制备新型高硬度马氏体铁基合金粉末[J]. 粉末冶金技术, 2021, 39(6): 537-544.
- [31] 陆亮亮, 张少明, 徐骏, 等. 球形钛粉先进制备技术研究进展[J]. 稀有金属, 2017, 41(1): 94-101.
- [32] 王长军, 张梦醒, 陈清明, 等. 真空感应熔炼气雾化法制备高强度 PH13-8Mo 钢粉末的特性表征[J]. 材料热处理学报, 2020, 41(1): 94-101.
- [33] 高正江, 周香林, 李景昊, 等. 高性能球形金属粉末制备技术进展[J]. 热喷涂技术, 2018, 10(3): 1-9.
- [34] Zhao, S.Y., Chen, G., Tan, P., et al. (2016) Characterization of Spherical TC4 Powders by Gas Atomization and Its Interstitial Elemental Control. *The Chinese Journal of Nonferrous Metals*, **26**, 980-987.
- [35] 刘畅. 气体雾化制粉过程中金属熔体在导流管内的流动与传热机理研究[D]: [硕士学位论文]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2020.
- [36] 田操, 陈卓, 刘邦涛, 等. 增材制造用 TC4 钛合金粉末制备工艺的优化[J]. 黑龙江科技大学学报, 2020, 30(2): 214-218.
- [37] 张宁, 陈岁元, 于笑, 等. 激光 3D 打印 TC4 球形合金粉末的制备[J]. 材料与冶金学报, 2016, 15(4): 277-284.
- [38] 贺卫卫, 贾文鹏, 杨广宇, 等. TiAl 预合金粉末制备的研究进展[J]. 钛工业进展, 2012, 29(4): 1-6.
- [39] Lubanska, H. (1970) Correlation of Spray Ring Data for Gas Atomization of Liquid Metals. *JOM*, **22**, 45-49. <https://doi.org/10.1007/bf03355938>
- [40] 龙倩蕾, 吴文恒, 卢林, 等. 熔炼功率对 EIGA 制备 Ti-6Al-4V 合金粉末特性的影响[J]. 中国粉体技术, 2018, 24(4): 49-54.
- [41] Zhou, K. and Wei, B. (2016) Determination of the Thermophysical Properties of Liquid and Solid Ti-6Al-4V Alloy. *Applied Physics A*, **122**, Article No. 248. <https://doi.org/10.1007/s00339-016-9783-6>
- [42] Paradis, P.-F., Ishikawa, T. and Yoda, S. (2002) Non-Contact Measurements of Surface Tension and Viscosity of Niobium, Zirconium, and Titanium Using an Electrostatic Levitation Furnace. *International Journal of Thermophysics*, **23**, 825-842. <https://doi.org/10.1023/a:1015459222027>
- [43] Guo, K., Liu, C., Chen, S., Dong, H. and Wang, S. (2020) High Pressure EIGA Preparation and 3D Printing Capability of Ti-6Al-4V Powder. *Transactions of Nonferrous Metals Society of China*, **30**, 147-159. [https://doi.org/10.1016/s1003-6326\(19\)65187-3](https://doi.org/10.1016/s1003-6326(19)65187-3)
- [44] Soni, S.K., Kirar, P.K., Kolhe, P. and Sahu, K.C. (2020) Deformation and Breakup of Droplets in an Oblique Continuous

Air Stream. *International Journal of Multiphase Flow*, **122**, Article 103141.

<https://doi.org/10.1016/j.ijmultiphaseflow.2019.103141>

- [45] Stefanitsis, D., Strotos, G., Nikolopoulos, N., Kakaras, E. and Gavaises, M. (2019) Improved Droplet Breakup Models for Spray Applications. *International Journal of Heat and Fluid Flow*, **76**, 274-286.  
<https://doi.org/10.1016/j.ijheatfluidflow.2019.02.010>
- [46] 郑明月. 气雾化法制备增材制造用钛合金粉末研究[D]: [博士学位论文]. 北京: 北京科技大学, 2019.
- [47] 毛新华, 刘辛, 谢焕文, 等. 制备方法对 3D 打印用 Ti-6Al-4V 合金粉体特性的影响[J]. 材料研究与应用, 2017, 11(1): 13-18.
- [48] 洪艳, 曲涛, 沈化森, 等. 氢化脱氢法制备钛粉工艺研究[J]. 稀有金属, 2007, 31(3): 311-315.
- [49] 黄瑜, 汤慧萍, 吴引江, 等. 动态氢化脱氢制备低成本钛及钛合金粉末[C]//中国有色金属学会稀有金属材料与工程编辑部, 第十三届全国钛及钛合金学术交流会论文集. 2008: 826.
- [50] 黄光明, 雷霆, 方树铭, 等. 氢化脱氢制备钛粉的研究进展[J]. 钛工业进展, 2010, 27(6): 6-9.
- [51] 陈秀敏, 周杰, 张恩浩, 等. 一种电化学制备钛粉的装置及其方法[P]. 中国专利, CN202410480916.5. 2024-09-03.
- [52] 周新宇, 豆志河, 张延安, 等. 自蔓延高温合成-电化学脱氧制备低氧钛粉(英文) [J]. Transactions of Nonferrous Metals Society of China, 2022, 32(10): 3469-3477.
- [53] 张格, 王建宏, 张浩. 金属粉末选区激光熔化球化现象研究[J]. 铸造技术, 2017, 38(2): 262.
- [54] 刘吉平, 刘克普, 吉伟生, 等. 一种低感度环保烟花药剂及其制备方法[P]. 中国专利, CN201911321894.3. 2020-04-10.
- [55] 韩爱军, 叶明泉, 陈昕. 一种改变高氯酸铵分解历程消除冷光烟花燃放异味的方法[P]. 中国专利, CN201210167312.2. 2016-03-02.
- [56] 李保强, 金化成, 张延昌, 等. 3D 打印用球形钛粉制备技术研究进展[J]. 过程工程学报, 2017, 17(5): 911-917.