

## 等离子体技术制备纳米粉体研究现状

彭浩然<sup>1,2,3</sup>, 贾芳<sup>1,2,3</sup>, 张鑫<sup>1,2,3</sup>, 原慷<sup>1,2,3</sup>, 史天杰<sup>1</sup>

- (1. 矿冶科技集团有限公司, 北京 100160;  
2. 北京市工业部件表面强化与修复工程技术研究中心, 北京 102206;  
3. 特种涂层材料与技术北京市重点实验室, 北京 102206)

**摘要:** 纳米粉体因具有较为独特的应用性能, 其高效制备方法是材料领域研究的热点。等离子体技术是一种快速发展的新型纳米粉体制备技术, 其热源温度可达 10000 K 以上, 具有高热焓、高化学反应活性的优势, 近年来得到了国内外研究工作者的广泛关注。本文从等离子体技术及分类、不同原料介质的等离子体纳米粉体制备、等离子体主要工艺参数对纳米粉体性能的影响等几个方面简要地介绍了等离子体技术制备纳米粉体的研究现状, 阐述了等离子体制备纳米粉体的重要意义和面临的挑战。

**关键词:** 纳米粉体; 等离子体; 性能; 影响因素

中图分类号: TG174.4 文献标识码: A 文章编号: 1674-7127(2022)02-0002-6

DOI 10.3969/j.issn.1674-7127.2022.02-002

## The Research Evolution and Application of Preparation of Nano-powder by Plasma

Peng Haoran<sup>1,2,3</sup>, Jia Fang<sup>1,2,3</sup>, Zhang Xin<sup>1,2,3</sup>, Yuan Kang<sup>1,2,3</sup>, Shi Tianjie<sup>1</sup>

- (1. BGRIMM Technology Group, Beijing 100160;  
2. Beijing Engineering Technology Research Center of Surface Strengthening and Repairing of Industry parts, Beijing 102206;  
3. Beijing Key Laboratory of Special Coating Material and Technology, Beijing 102206)

**Abstract:** Nano-powder was widely used due to its unique property. Research on efficient preparation method of nanometer powder has been a hot spot in the field of material research. Plasma technology was a new type of rapid development of nano-powder preparation technology, the temperature could reach 10000 K. Due to the high heat enthalpy, high chemical reactivity, the plasma technology has received extensive attention of researchers all over the world in recent years. In this paper, the research status of plasma nano-powders preparation has been briefly introduced, including plasma technology and classification, plasma nano-powders preparation with different raw material, and the influence of plasma main process parameters on the properties of nano-powders. Additionally, the significance and challenges of preparing nanometer powders by plasma were described.

**Key Words:** Nano-powder; Plasma; Performance; Influencing factors

## 0 引言

纳米粉体因具有较为独特的应用性能,其制备方法是材料领域研究的热点<sup>[1, 2]</sup>。而等离子体制粉技术是近年来快速发展的一种纳米粉体制备技术,等离子体 (Plasma) 是气体物质存在的一种状态,在这种状态下,气体由离子、电子和中性原子组成,在宏观上呈电中性。由于具有高温、高焓、高的化学反应活性、反应气氛可控等特点,等离子体作为热源是合成超细纳米粉体的一种实用可行的技术方法,其典型原理如图 1 所示。自上世纪 60 年代初美国钛白公司首次采用等离子体气相合成法制备出粒度为 100 nm 的  $\text{TiO}_2$  粉体,世界多个国家的学者相继开展了等离子体制备微米、纳米粉体技术研究,获得了大量的研究成果,并在一些粉体制备方面实现了工业化生产,如俄罗斯原子能研究所采用直流电弧等离子体制备出了 Ni、Al、Mg、Mn、Mo、V 等金属纳米粉<sup>[3, 4]</sup>。本文对等离子体技术制备纳米粉体的研究现状进行综述,从等离子体技术及分类、不同原料介

质的等离子体纳米粉体制备、等离子体主要工艺参数对纳米粉体性能的影响等几个方面简要介绍其技术特点及国内外研究成果。

## 1 等离子体技术及分类

等离子体通过能量激发使气体组分电离,形成局部热力学平衡等离子态,其激发出的等离子焰流温度可达 10000 K 以上,具有高热焓、高化学反应活性、反应气氛可控等特点<sup>[5]</sup>,作为超高温热源非常适用于纳米粉体的合成制备。根据等离子体激发源的不同,用于制备纳米粉体的主流等离子体主要分为直流微波等离子体、直流电弧等离子体及高频感应等离子体<sup>[6]</sup>。

### 1.1 微波等离子体

微波等离子体是将微波能量转换为气体分子的内能,使之激发、电离以产生等离子体的一种放电方式<sup>[7]</sup>。在微波放电中,通常采用波导管或天线将由微波电源产生的微波耦合到放电管内,放电气体存在的少量初始电子被微波电场加速后,与气体分子发生非弹性碰撞并使之电离<sup>[8]</sup>。若微波的输出功率适当,可以使气体击穿,实现持续放电,这样产生的等离子体称为微波等离子体。微波等离子体制备粉体技术可广泛应用于制备金属纳米粉,还可广泛应用于合成氧化物、氮化物<sup>[9]</sup>等纳米颗粒,但该工艺设备较为复杂,目前多用于实验室试验研究。

### 1.2 直流电弧等离子体

直流电弧等离子是通过在圆锥形的阴极电极和圆筒形的阳极电极间打出电弧,由阴极后方导入氩气、氢气等气体,气体被电弧激发产生等离子体,形成等离子体火焰的射流<sup>[10]</sup>。电弧放电时,电流密度较大,电极被大量的高速粒子撞击,瞬间达到较高的温度。并且直流等离子体炬体积小,产生的等离子体能量密度较高。直流电弧等离子体可合成金属纳米粒子、金属-陶瓷复合纳米粒子、陶瓷纳米粒子和碳纳米管等多种纳米粉体,具有设备简单且易操作、纳米粉合成速度快、纯度高、种类多、活性强等特点,可适合于工业化批量生产制备<sup>[11]</sup>。但由于长时工作电极产生烧损,烧损后的杂质极易混入纳米粉体中污染粉体。

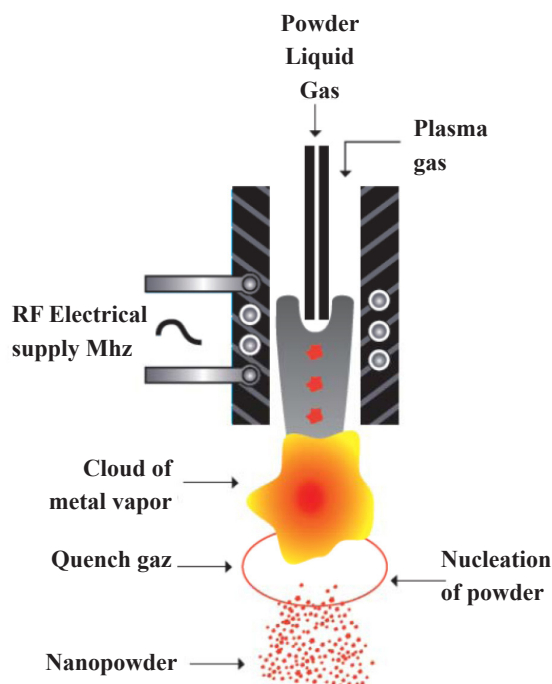
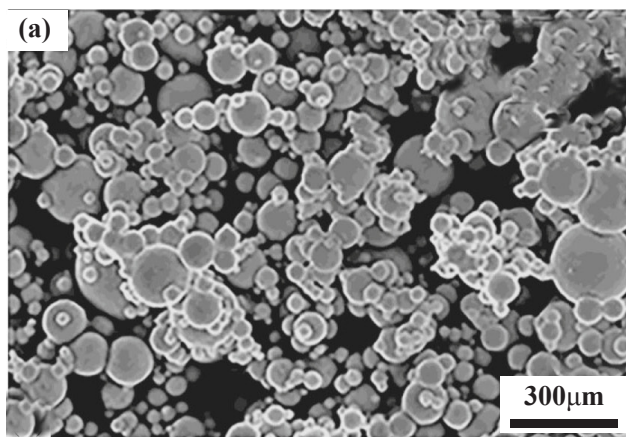


图 1 等离子体制备纳米粉体原理示意图

Fig.1 Schematic diagram of nano-powder preparation by plasma

### 1.3 高频感应等离子体

感应等离子焰是由电感线圈产生的电磁场将气体进行高能电离,典型感应等离子焰一般是在石英管外套一个金属(铜)绕制的空心线圈(内通冷却水),使外加电源供给的高频电流通过线圈所产生的磁场与放电管中的等离子体相耦合,在发生器中的工作气体一经击穿(点火)而导电的情况下,激发电流所产生的交变电场将在气体中产生电流并产生焦耳热,条件适当时放电将能长时间维持下去并不断使送入的反应器的冷工作气体被加热成为等离子体。由于气体温度突然升高到很高的温度,体积极度膨胀向外射出,形成高速高能量的电磁流体<sup>[12]</sup>。感应等离子体的主要优点是没有电极,可以有效避免电极烧损带来的污染现象,适合制备高纯纳米粉。同时,该技术还具有体积较大的高温区,而气体流速相对较小,可用来制备较高熔点材料的纳米粉。此外,该技术还可以使用多种气体( $N_2$ , Ar,  $CH_4$  或混合气)作为等离子工作气,合成纯金属纳米粉和陶瓷纳米粉如氧化物、碳化物以及氮化物纳米粉<sup>[13, 14]</sup>。



### 2 不同原料介质的等离子体纳米粉体制备

等离子体制备纳米粉体的工艺依据原料介质物理状态不同,分为固态原料、液态原料、气态原料,不同种类的原料通过高温等离子热流场时表现出不同的特点,反应的过程和生成的产物也均具有各自的特性。

#### 2.1 固相原料的纳米粉体等离子体制备工艺

采用固相原料进行的纳米粉体等离子体制备工艺原理为蒸发-冷凝法,通过利用高热焰等离子体产生的高温,固相原料经高温气化后,进一步采用高速冷却气体骤冷,控制纳米晶生长速率,从而得到纳米粉体。高跃生、王翔<sup>[15]</sup>研究了以普通微米级氧化锡粉体为原料,采用高频感应等离子体为热源制备了高纯氧化锡纳米粉体。实验表明,制备的纳米氧化锡晶型为正方晶系,中位粒径为 16.7 nm,制备的纳米  $SnO_2$  粒径细、粒径分布窄、结晶度完整。Samokhin<sup>[16]</sup>等重点研究了不同金属及其化合物在等离子体反应器中的传热特性,制备的纳米粉体包括铜粉及氧化铝粉等,粉体的粒度为 20~200 nm,制备粉体的纳米颗粒典型形貌如图 2 所示。

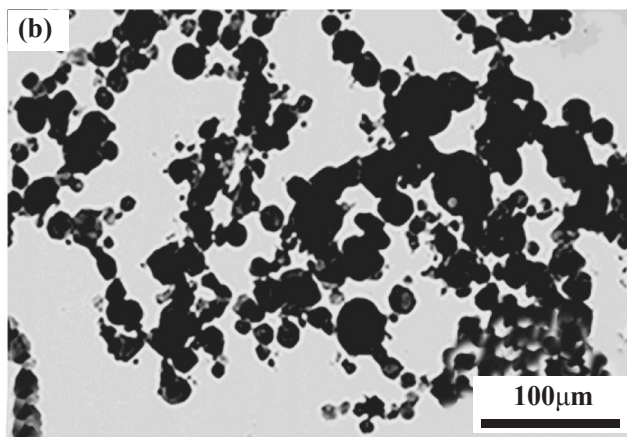


图 2 等离子体制备的典型纳米粉体形貌图:(a) 铜粉;(b) 氧化铝粉<sup>[16]</sup>

Fig.2 Morphology of typical nano-powders prepared by plasma method: (a) copper powder; (b)  $Al_2O_3$  powder<sup>[16]</sup>

Pan 等<sup>[17]</sup>采用电弧等离子法制备了纳米储氢材料 Mg-5 wt.% $TiO_2$  并对粉体的储氢性能进行了研究,经测试纳米粉体的氢化活化能可达 77.2 kJ/mol,极大的提高了材料的储氢性能。Shigeta 等人<sup>[18]</sup>深入研究了热等离子体条件下金属-硅二

元体系(Co-Si, Mo-Si 和 Ti-Si 体系)的纳米粉体的生长机理和硅质量分数对其影响。研究结果表明,所制备的纳米颗粒中硅含量与反应前相比并未出现明显变化。两种材料的饱和蒸气压差异可能是影响纳米粉体组成的重要因素,饱和压力差



小的二元体系制备的纳米粉体组分范围更为狭窄。Krasovskii 等<sup>[19]</sup>重点研究了热等离子体工艺制备的三元纳米金属粉体特性, 特别针对钨镍铁三元体系, 图 3 为钨镍铁三元粉体体系等离子体法制备过程的原理示意图, 其中组元金属在饱和蒸汽压方面差别很大并且相互溶解度较差。实验证明, 通过适宜的热等离子工艺参数控制, 可以有效的降低三元合金颗粒在微纳米尺度上的不均匀性。

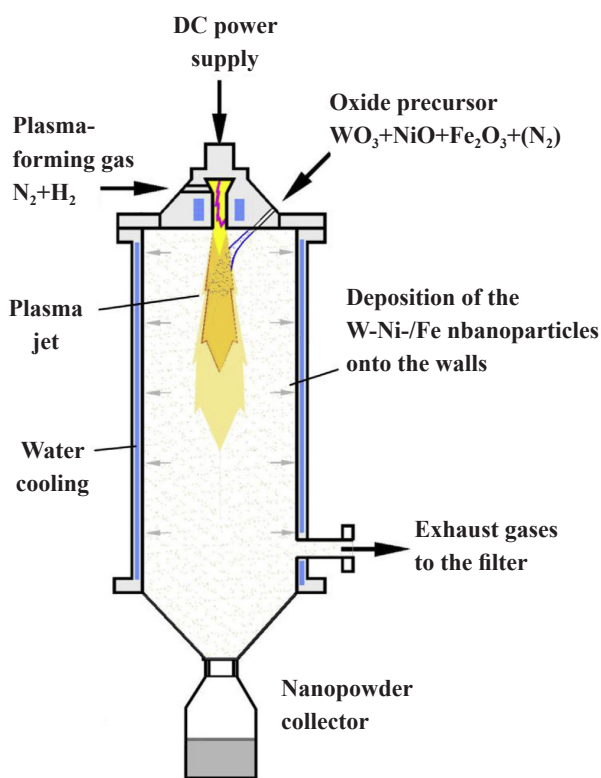


图 3 三元纳米金属粉体制备过程示意图<sup>[19]</sup>

Fig.3 Schematic diagram of preparation process of ternary nanometer metal powder<sup>[19]</sup>

## 2.2 液相原料的纳米粉体等离子体制备工艺

液相原料的等离子体纳米粉体合成工艺是近年来一种新型纳米粉体制备技术, 将配置好的原料液体通过液相送料器直接输送到等离子体焰流中心, 原料在高温下直接发生反应, 形成所需的纳米粉体。相比于传统的液相法合成制备纳米粉体工艺, 等离子体法具有工艺流程短, 反应速度快的优势, 可以快速合成制备目标纳米粉体。国外研究者<sup>[20]</sup>采用液相六甲基二硅氧烷为原料, 以氮气为载气进行了纳米二氧化硅的等离子体合成,

分别制备了 8~14 nm 和 130~260 nm 粒度的氧化硅纳米颗粒。并通过控制反应条件制备出具有低比表面积、亲水良好, 以及高比表面积、高疏松度的纳米二氧化硅粉体。

## 2.3 气相原料的纳米粉体等离子体制备工艺

气相原料的等离子体纳米粉体制备工艺通过将各类高纯气体作为原料, 单独或混合后通入高温等离子体中, 利用等离子体的高温特性促发气相化合或分解反应。相比于液相原料在反应过程中水分蒸发产生的大量能耗, 气相原料等离子体反应更为高效, 纳米粉体制备效率高。Samokhin 等<sup>[21, 22]</sup>通过以四氯化钛蒸气为原料, 在氮气氛围下, 采用等离子体合成氮化钛纳米粉体。研究表明, 制备出的氮化钛粉体为立方晶相, 通过调节控制参数, 颗粒尺寸范围为 20~150 nm, 粉体的比表面积可达 11~39 m<sup>2</sup>/g, 制备的氮化钛纳米颗粒形貌如图 4 所示, 并且该研究团队进一步研究了氮化钛等离子合成过程中的热焓能量和工艺特性。

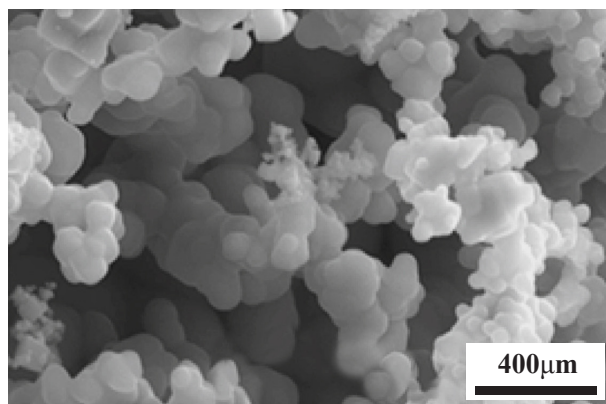


图 4 等离子体气相合成的氮化钛粉体颗粒形貌图<sup>[22]</sup>

Fig.4 Particle morphology of titanium nitride powder synthesized by plasma vapor phase<sup>[22]</sup>

## 3 等离子体主要工艺参数对纳米粉体性能的影响

等离子体纳米粉体制备工艺作为一种新型高效、快速成型的先进粉体制备技术, 在纳米粉体制备过程中, 众多的影响因素决定着纳米粉体最终的性能。其中原料状态、送料速度和等离子体工艺参数 (等离子体电流、功率、载气流量等) 等是影响纳米粉体粒度分布、纯度和相结构的主要

因素<sup>[23-31]</sup>。

### 3.1 原料性能

在等离子体制备纳米粉体的工艺中,如上一章节所述,原料的状态是影响最终产物的关键因素,原料的形态(固态、液态、气态)、熔点、反应热焓值等都决定着原料在反应过程中的速度和反应质量。He等<sup>[23]</sup>研究等离子体制备纳米硅粉工艺过程中原料硅粉颗粒对粉体气化率的影响规律,结果表明,5~50  $\mu\text{m}$ 范围内的不同硅颗粒在焰流中的停留时间没有显著差异,大部分在0.020 s到0.035 s之间。大硅粉颗粒在制备过程中的热扩散强度明显低于小颗粒,30  $\mu\text{m}$ 以下颗粒的气化的比例超过99.0%。当颗粒大于30  $\mu\text{m}$ 时,颗粒气化率大大降低。

### 3.2 送料速度

高跃生<sup>[24]</sup>采用高频等离子体为热源,以微米级氧化铈粉体为原料制备了高纯氧化铈纳米粉体,并研究了不同的加料速度对氧化铈纳米粉体纯度和粒度的影响,结果表明,随着加料量逐渐增大,制备的纳米氧化铈粉体粒径变细、粒径分布更为狭窄、松装密度呈减小趋势。过高的送料速度会导致原料气化、反应过程不充分,纳米粉体中混杂部分未完全反应的原料,纯度降低。经综合对比,加料量为10 kg/h时较为适宜,一方面保证纳米材料综合性能,另一方面有效降低单位产品的加工成本。

### 3.3 等离子体工艺参数

对于纳米粉体等离子体合成制备,等离子工艺控制参数直接决定了反应系统的能量热焓、反应气氛、冷却速度等关键反应控制因素。赵芳霞等<sup>[25]</sup>对等离子电流对纳米锌粉粒径的影响进行了研究,当其他参数恒定,工作电流从150 A增加到300 A时,超细锌粉的平均粒径从165 nm增加到596 nm。王鹏等<sup>[26]</sup>研究了等离子体制备纳米锌粉工艺过程中,氢气反应气量对产率和粒度的影响,研究结果显示,氢气的加入增加了原料的实际蒸发面积,大幅度提高纳米锌粉的产率,由先前的26.0 g/h提升至1313.1 g/h,提高近40倍,粉体的粒度并未出现明显变化。杨江海等<sup>[27]</sup>重点研究了等离子反应室内的压力控制对纳米铈粉粒

度的影响,结果表明,等离子体法制备的纳米铈粉纯度高、粒径分布窄、分散性好,颗粒呈链球状均匀分布;当电流恒定为250 A,Ar充气压力从5 kPa增加到60 kPa时,纳米铈粉的平均粒径从35 nm增加到143 nm。Gao等<sup>[28]</sup>采用直流等离子体合成SiC粉体,研究Ar气浓度与SiC相结构的关系,研究发现 $\beta$ -SiC在常规条件下较易合成, $\alpha$ -SiC则需要在Ar气浓度达到 $2 \times 10^4$  Pa(体积占比53.3%)时,更利于合成。Karpova等<sup>[29]</sup>进一步研究了等离子反应室内不同的气体压力下 $\text{Cu}_2\text{O}$ 纳米粉体粒度的分布规律。随着反应室内压力从10 Pa增至150 Pa,粉体的平均粒度出现了先减小后增大的趋势。Wang等<sup>[30]</sup>深入研究了在等离子体制备 $\text{TiO}_2$ 纳米粉体过程中,等离子功率对粉体相结构的影响,结果表明,随着等离子功率的增加, $\text{TiO}_2$ 纳米粉体的结晶度增强。在110 W功率下制备的 $\text{TiO}_2$ 纳米粉体具有最高的光催化活性、较高的比表面积( $39.4 \text{ m}^2/\text{g}$ )。对于该用途,研究获得的最佳相比为80.2 wt.%锐钛矿和19.8 wt.%金红石。Sai Karthik等<sup>[31]</sup>综合研究了射频感应等离子体制备纳米铝粉工艺过程中送粉针位置、送粉速度、等离子气体流量、冷却气流量、钝化气体流量等因素对纳米铝粉性能的影响,最终优化出了粒度在220~400 nm,最大金属Al含量为89.2 wt.%推进剂用纳米铝粉。对于关键的钝化工艺参数,当氧气流量从0.1 slpm增加到0.3 slpm时,钝化层厚度在1.8 nm到2.6 nm之间。

## 4 结语

(1) 等离子体制备纳米粉体工艺作为一种快速成型的粉体制备技术,通过国内外多年的研究取得了较大的进展,可以实现金属、陶瓷纳米粉体的高品质制备。

(2) 等离子体制备纳米粉体工艺在发展的过程中仍面临一些问题及挑战,例如对于复杂组分材料的等离子合成制备过程,产物中存在成分和物相偏析、中间相产物夹杂的问题。由于等离子体制备纳米粉体为高温瞬态处理过程,整个反应制备及冷却过程在几秒钟内完成,如涉及多元合金纳米粉体制备,由于各金属组元存在熔点、饱和

蒸气压等物理性能差异,极易导致粉体成分偏析。

(3) 等离子气相合成反应中一般采用两种或两种以上的气体作为反应原料,气体原料在等离子高温区停留时间短,难以充分完全反应,部分反应的中间产物夹杂在成品中,降低了纳米粉体的纯度。但随着等离子体纳米粉体制备技术的持续优化与深入研究,该工艺将进一步成熟应用于工业生产,有效满足各个领域用高性能纳米粉体的迫切需求。

### 参考文献

- [1] 徐国财,张立德. 纳米复合材料[M]. 北京: 化学工业出版社, 2002.
- [2] Singhal A, Skandan G, Wang A, et al. On nanoparticle aggregation during vapor phase synthesis [J]. Nanostructured Materials, 1999, 11(9): 545-552.
- [3] 邵志鹏, 江伟辉, 冯果, 等. 直流电弧等离子体法制备纳米锌粉及机理 [J]. 铸造技术, 2016, 37(1): 44-48.
- [4] 曲选辉, 盛艳伟, 郭志猛, 等. 等离子合成与雾化制粉技术及其应用 [J]. 中国材料进展, 2011, 30(7): 10-15.
- [5] 过增元, 赵文华. 电弧和热等离子体 [M]. 北京: 科学出版社, 1986.
- [6] 钟炜, 杨君友, 段兴凯, 等. 电弧等离子体法在纳米材料制备中的应用 [J]. 材料导报, 2007(S1): 14-16.
- [7] 郑国梁, 程如烟. 常压微波等离子体气相法制取纳米二氧化钛 [J]. 钛工业进展, 2001, 5: 22-24.
- [8] Chau J L, Hsu M K, Kao C C. Microwave plasma synthesis of Co and SiC-coated Co nanopowders[J]. Materials Letters, 2006, 60(7): 947-951.
- [9] Chau J L, Kao C C. Microwave plasma synthesis of TiN and ZrN nanopowders[J]. Materials Letters, 2007, 61(7): 1583-1587.
- [10] 段兴凯, 江跃珍. Bi<sub>2</sub>Te<sub>3</sub> 纳米粉末的直流电弧等离子体合成 [J]. 材料科学与工程学报, 2010, 28(05): 731-734.
- [11] 关波, 傅正义, 王皓, 等. 直流电弧等离子体制备 SnO<sub>2</sub> 纳米粉末的研究 [J]. 武汉理工大学学报, 2003(10): 4-7.
- [12] 朱清文. 高频感应等离子体动力学及其应用 [J]. 力学进展, 1982, 4: 378-390.
- [13] Yan Z Q, Xiao M, Mao X H, et al. Fabrication of spherical WC-Co powders by radio frequency inductively coupled plasma and a consequent heat treatment[J]. Powder Technology, 2021, 385: 160-169.
- [14] Orlov A, Grabis J. Plasma chemical synthesis of fine MoSi<sub>2</sub> and MoSi<sub>2</sub>-Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub> composite powders[J]. Progress in plasma processing of materials, 2011, 15(4): 299-306.
- [15] 高跃生, 王翔. 高频等离子体法制备纳米氧化锡 [J]. 广州化工, 2016, 44(6): 80-81.
- [16] Samokhin A V, Astashov A G, Alekseev N V, et al. Characteristics of heat and mass transfer to the wall of a confined-jet plasma flow reactor in the processes of nanopowder preparation from metals and their compounds[J]. Nanotechnologies in Russia, 2016, 11(2): 57-62.
- [17] Pan Y, Zuo J, Zeng X, et al. Hydrogen storage properties of Mg-TiO<sub>2</sub> composite powder prepared by arc plasma method[J]. Transactions of Nonferrous Metals Society of China, 2014, 24: 3834-3839.
- [18] Shigeta M, Watanabe T. Effect of precursor fraction on silicide nanopowder growth under thermal plasma conditions: A computational study[J]. Powder Technology, 2016, 288: 191-201.
- [19] Krasovskii P V, Samokhin A V, Fadeev A A, et al. Alloying effects and composition inhomogeneity of plasma-created multimetallic nanopowders: A case study of the W-Ni-Fe ternary system[J]. Journal of Alloys and Compounds, 2018, 750: 265-275.
- [20] Franklin C H, Cyun Y. Synthesis and characterization of silicon oxide nano-particles using an atmospheric DC plasma torch[J]. Advanced Powder Technology, 2018, 29: 220-229.
- [21] Samokhin A V, Kirpichev D E, Alekseev N V. Synthesis of titanium nitride and carbonitride nanopowders in confined-jet flow plasma reactor[J]. High Energy Chemistry, 2016, 50(6): 466-472.
- [22] Samokhin A V, Alekseev N V, Sinaiskiy M A. Equilibrium energy and technological characteristics of plasma synthesis of titanium nitride, carbide, and carbonitride from titanium tetrachloride[J]. Inorganic Materials: Applied Research, 2016, 7(3): 344-349.
- [23] He J, Bai L, Jia H, et al. Simulation and experimental observation of silicon particles' vaporization in RF thermal plasma reactor for preparing Si nano-powder[J]. Powder Technology, 2017, 313: 27-35.
- [24] 高跃生, 王翔. 高频等离子体法制备纳米氧化铋的中试研究 [J]. 广州化工, 2017, 45(3): 29-31.
- [25] 王鹏, 赵芳霞, 张振忠. 直流电弧等离子体蒸发法制备超细锌粉 [J]. 广州化工, 2011, 21(9): 2236-2240.
- [26] 王鹏, 陈银, 赵芳霞, 等. 直流电弧等离子体法制备纳米锌粉及机理 [J]. 铸造技术, 2012, 33(5): 531-533.
- [27] 杨江海, 张振忠, 赵芳霞, 等. 直流电弧等离子体法制备铋纳米粉体 [J]. 中国有色金属学报, 2009, 19(2): 334-338.

- applications[J]. Beilstein journal of nanotechnology, 2022, 13: 201-218.
- [9] Ghosh D, Shukla A K, Roy H. Nano structured plasma spray coating for wear and high temperature corrosion resistance applications[J]. Journal of The Institution of Engineers (India): Series D, 2014, 95(1): 57-64.
- [10] Turunen E, Varis T, Tom E, et al. Simo- Pekka Hannula[J], Surface Coatings and Technology, 2006, 200(16):4987-4994
- [11] 任坤, 黄晶, 贺小燕, 等. 热喷涂制备 TiO<sub>2</sub> 光催化涂层研究进展 [J]. 表面技术, 2015, 44(04): 66-73+83.
- [12] Angulo J C. Zhao, C. Young A, et al. The effects of thermal spray technique and post-deposition treatment on the photocatalytic activity of TiO<sub>2</sub> coatings[J]. Surface and Coatings Technology, 2009, 204(4): 423-427.
- [13] Guan J, Yang, C J, Li, Y Y, et al. Dominant microstructural feature over photocatalytic activity of high velocity oxy-fuel sprayed TiO<sub>2</sub> coating[J]. Surface and Coatings Technology, 2007, 202(1): 63-68.
- [14] Lima R S, Marple B R. From APS to HVOF spraying of conventional and nanostructured titania feedstock powders: a study on the enhancement of the mechanical properties[J]. Surface and Coatings Technology, 2004, 200(11): 3428-3437.
- [15] Liu Y R, Fischer T E, Dent A. Comparison of HVOF and plasma-sprayed alumina/titania coatings— microstructure, mechanical properties and abrasion behavior [J]. Surface and Coatings Technology, 2003, 203(1): 68-76.

（上接 14 页）

- [28] Gao J, Zhou L, Liang J, et al. Optical emission spectroscopy diagnosis of energetic Ar ions in synthesis of SiC polytypes by DC arc discharge plasma[J]. Nano Research, 2018, 11(3): 1470-1481.
- [29] Karpova I V, Ushakova A V, Lepesheva A A. Plasma-chemical reactor based on a low-pressure pulsed arc discharge for synthesis of nanopowders[J]. Technical Physics, 2017, 87(1): 140-145.
- [30] Wang Y, Yuan Q, Yin G, et al. Synthesis of mixed-phase TiO<sub>2</sub> nanopowders using atmospheric pressure plasma jet driven by dual-frequency power sources[J]. Plasma Chem Plasma Process, 2016, 36: 1471-1484.
- [31] Karthik P S, Chandrasekhar S B, Chakravarty D, et al. Propellant grade ultrafine aluminum powder by RF induction plasma[J]. Advanced Powder Technology, 2018, 29: 804-812.