

doi: 10.3969/j.issn.2095-1744.2021.06.006

感应等离子球化钽粉制造研究

许贞元^{1,2,3}, 原 慷^{1,2,3}, 彭浩然^{1,2,3}, 陈星宇⁴, 张 鑫^{1,2,3}

(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. 北矿新材科技有限公司, 北京 102206;

4. 泰克纳等离子体系统(苏州)有限公司, 苏州 215000)

摘 要:研究对比了两套不同功率的 TEKNA 感应等离子球化设备进行钽粉球化制造的情况。重点分析了送粉速率对钽粉球化效果及生产效率的影响。结果表明, 钽粉送粉速率的选择与设备使用功率、粉末原料流动性等多因素相关。在保障钽粉球化效果前提下, 80 kW 设备对钽粉处理效率远高于 15 kW。大功率设备不仅在粉末处理速度上占据优势, 而且粉末球化效果及成品率也相应提升。同时还论述了钽粉球化过程中出现的气化损耗、杂质去除等机理。

关键词:感应等离子; 球化; 钽粉; 熔化; 气化

中图分类号: TG142.1; TG178

文献标志码: A

文章编号: 2095-1744(2021)06-0029-07

Study on the Process of Sphero Tantalum Powders by Inductive Plasma Process

XU Zhenyuan^{1,2,3}, YUAN Kang^{1,2,3}, PENG Haoran^{1,2,3}, CHEN Xingyu⁴, ZHANG Xin^{1,2,3}

(1. BGRIMM Technology Group, Beijing 100160, China;

2. Beijing Engineering Technology Research Center of Surface Strengthening and Repairing of Industry Parts, Beijing 102206, China;

3. BGRIMM Advanced Materials Science & Technology Co., Ltd., Beijing 102206, China;

4. TEKNA(Suzhou) Co., Ltd., Suzhou 215000, China)

Abstract: In this paper, two TEKNA inductive plasma sphero systems with different powers were used to manufacture sphero tantalum powders. The influence of powder feeding rate on the powder sphero effect and manufacture efficiency was particularly analyzed. The results indicate that the selection of the powder feeding rate was related to factors both equipment power and powder flowability. On the condition of achieving good sphericity of tantalum powders, the manufacturing efficiency of 80 kW equipment was several times than that of 15 kW. The high-power equipment showed advantages not only on manufacture rate, but also on the sphero effect and manufacture yield. The elemental gasification and impurity cleaning mechanism in the sphero process were also discussed in this study.

Key words: crack inductive plasma; sphero; tantalum powder; melting; gasification

收稿日期: 2021-03-11

基金项目: 西城区财政科技专项(XCSTS-TI2021-33); 矿冶科技集团有限公司科研基金项目(XC055)

Fund: Supported by Xicheng District Financial Science and Technology Project(XCSTS-TI2021-33); BGRIMM Company Project(XC055)

作者简介: 许贞元(1988—), 女, 硕士, 工程师, 主要从事材料检测研究。

通信作者: 原 慷(1987—), 男, 博士, 高级工程师, 主要从事 3D 打印难熔金属粉末及热障涂层研究。

引用格式: 许贞元, 原 慷, 彭浩然, 等. 感应等离子球化钽粉制造研究[J]. 有色金属工程, 2021, 11(6): 29-35.

XU Zhenyuan, YUAN Kang, PENG Haoran, et al. Study on the Process of Sphero Tantalum Powders by Inductive Plasma Process[J]. Nonferrous Metals Engineering, 2021, 11(6): 29-35.

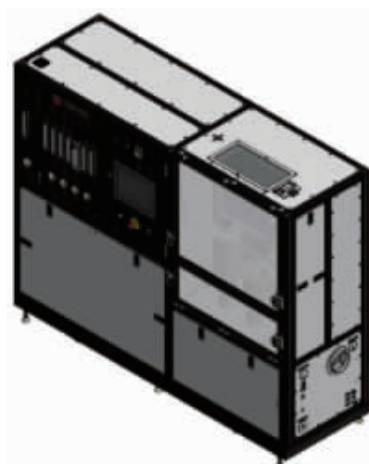
随着 3D 打印增材制造、热喷涂等行业的快速发展,高品质金属、合金、陶瓷球形粉末市场需求旺盛,应用领域涵盖航空航天、汽车、医疗、电子等行业^[1-5]。近年来,随着精准医疗、高端电子行业的快速发展,对于 3D 打印、喷涂靶材用高纯球形钽粉的制造成为了研究和应用热点之一^[6-9]。钽属于稀有难熔金属体系,具有熔点高(约 3 000 ℃)、热膨胀系数小、抗浓酸腐蚀、化学稳定性强等特点。在骨科医学中,由于钽元素还具有可快速诱导骨组织生长且与人体组织相容性好等特点,钽骨科植入物也成为了医疗领域的研究热点^[6-8,10-11]。在电子行业,钽在集成电路、电容装备中有着广泛应用^[9,12-13]。

工业上,冶金钽粉主要采用钠热还原法制备,通过氟钽酸钾与钠发生氧化还原反应制备钽粉;其他方法还包括均相还原法、电子间接还原法、氧化钽氯化钙钠还原法、熔融盐电脱氧法等^[14-15]。由于形状不规则、流动性差,这些冶金钽粉不能直接应用于如 3D 打印、热喷涂等领域。为提高钽粉流动性,任萍等^[16]采用氢化破碎技术制备类球形钽粉,这种钽粉粒度分布范围集中,但球形度依然较差。近年来,随着射频感应等离子球化技术的兴起,难熔金属球化制造得到了快速发展^[17-19]。梁栋等^[20]采用射频感应等离子球化技术对不规则状冶金级钽粉进行了球化处理研究,获得了高球形度钽粉。尚福军等^[21]采用感应等离子工艺制备了纳米级电容器钽粉,获得的纳米钽粉成球形。采用感应等离子球化技术可以制备球形钽粉,但其品质及粉末生产效率则与设备功率及工艺控制参数有关。目前,这方面的研究报道较少,本文将重点研究不同功率设备对球形钽粉品质和生产效率的影响,同时研究球形钽粉损耗和杂质去除机理。

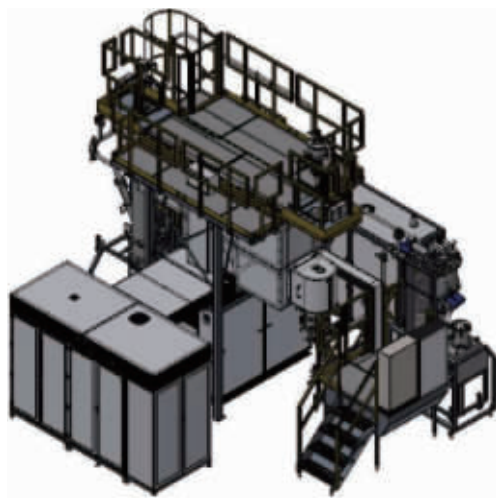
1 实验

使用矿冶科技集团有限公司购自加拿大的 TEKNA 感应等离子球化设备进行钽粉球化制造研究。图 1 展示了所使用的两套不同功率的 TEKNA 设备结构示意图(设备功率分别是 15 kW 和 80 kW,设备的结构介绍见文献^[22])。15 kW TEKNA 感应等离子球化系统使用 PFV100 型振动送粉器,其工作原理是通过送粉器输入约一百多 Hz 的机械振动波,使粉末在一定振幅能量的带动下不断分散移动。这种粉末分散移动被限制在送粉器中设计的螺旋式轨道中,因此粉末将在振动能量

的带动下螺旋自下而上流动,最终在出口处由载气带动被输送至等离子火炬中。80 kW 型 TEKNA 感应等离子球化系统使用 PFD-403 转盘式送粉器,其工作原理是通过转盘转动将落到转盘上的粉末送入喂料口,转盘转速可以控制送粉速率。该转盘上方的漏料管外部还安装超声振动器,这有利于粉末更流畅的流动和输送。PFD-403 送粉器的容量要远大于 15 kW 系统的 PFV100 送粉器。



(a) 15 kW system



(b) 80 kW system

图 1 TEKNA 感应等离子球化设备结构示意图

Fig. 1 Schematic diagram of TEKNA inductive plasma spherulization equipments

本研究使用的钽粉原料为冶金还原钽粉,具有不规则形状,且流动性差。粉末经过球化处理后使用日立 SU5000 型扫描电子显微镜(SEM)进行样品显微形貌观察。用 ThermoCalc 软件进行碳-氢二元体系的热力学计算,使用 TCFE9 数据库,进行 3 500 ℃(超过钽的熔点)下不同摩尔比氢含量时相组成计算,用以解释氢对碳杂质去除的作用。

2 结果与分析

2.1 感应等离子球化研究

15 kW TEKNA 系统使用的 PFV100 型振动送粉器中粉末的传输速度由多种因素影响,主要包括振动频率、振幅、粉末总量、粉末流动性等。一般地,振动频率是相对固定值,因为这和送粉器总体质量相关。振幅是可用于调节送粉速率的重要参数,振幅越大,送粉越快。由于粉末被加入送粉器后,也将为送粉器总体质量提供贡献,因此影响送粉速率。对于 15 kW 设备用 PFV100 振动送粉器,当加入粉量 < 100 g 时,粉末总量对送粉速率的均匀性影响不大。但当加入几百 g (对于如钽等高密度粉末,该送粉器最高可容纳超过 1 kg 粉量) 时,如图 2 所示,粉末送粉速率会明显呈现动态变化规律。在开始送粉过程中,由于粉末总量大,振动负荷大,因此送粉速率偏低;送粉速率随着时间会缓慢升高,这是因为粉末总量不断减小、振动负荷不断下降引起的。当送粉接近尾声时,送粉器振动负荷明显下降,此时的送粉速率会明显加快。对于粉末球化工艺控制而言,需要特别注意该送粉尾端段的粉末,因为这一现象会造成粉末整体球化率的下降;一般需要在送粉尾端将振幅值下调,以降低此过快送粉速率,提高粉末球化稳定性。球化工艺还要求粉末具有较好的流动性,否则会影响粉末输送的流畅性和稳定性。

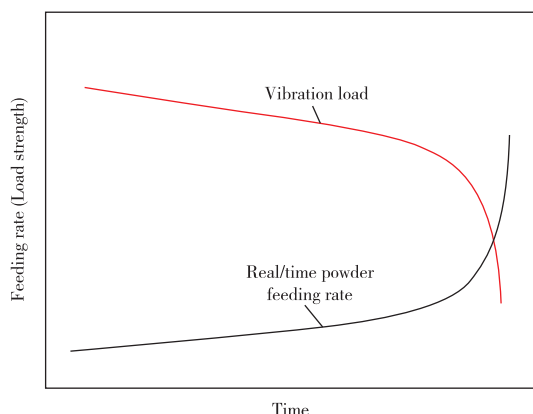


图 2 15 kW 设备中送粉速率演变

Fig. 2 The powder feeding rate evolution in 15 kW equipment

图 3 给出了 15 kW 设备不同熔点粉末在极限参数条件下的典型送粉速率。所谓“极限参数”是指使用设备推荐的最大功率(即 15 kW),同时载气流量尽可能低(以不堵粉为下限)。对于钽粉,如果使

用 $-75\ \mu\text{m}$ 原料,在保障球形度 $> 90\%$ 条件下,最大送粉速率为几十 g/min,折换成小时产率为公斤级。但极限参数的应用会大幅增加现场生产的难度,例如可能发生送粉不连续甚至堵粉现象。因此,实际球化工艺会参考极限参数,但采用相对保守的工艺参数,以保障生产过程的稳定性和粉末品质的稳定性。图中也给出了陶瓷粉末在极限参数条件下的送粉速率。由于陶瓷热导率明显低于金属,在等离子球化过程中陶瓷粉末中热量自外向内传输速率偏低,这也导致了同等熔点的陶瓷粉末需要在更低送粉速率下方能达到球化效果。当然,粉末的球化效果还和很多因素有关,比如原料粉末的状态,一般情况下内部密实的粉末更容易球化,比如烧结破碎型粉末比团聚造粒或冶金不规则粉末更容易球化,这是因为内部孔隙一定程度上对热量传输和粉末熔融起阻隔作用。

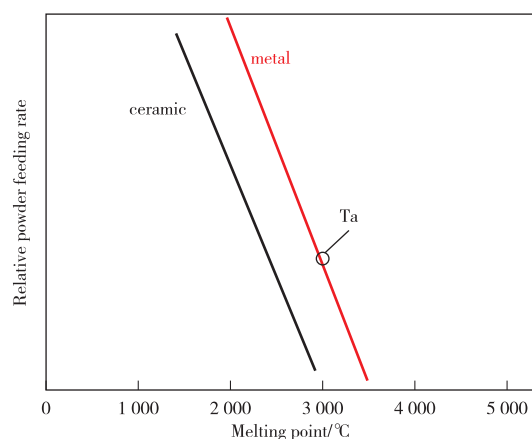


图 3 15 kW 设备不同熔点粉末的相对送粉速率

Fig. 3 The relative powder feeding rates of materials with different melting points in 15 kW equipment

图 4 给出了 15 kW 设备在不同送粉速率下球形钽粉的外观形貌。在较低送粉速率下粉末的球化率很高(甚至可以达到 99%),粉末基本全部呈现规则球形;当送粉速率较高时,部分原料钽粉在等离子体中未完全熔化,因此球化后的粉末中还含有许多不规则颗粒。如果这种球化率不高的钽粉被用于 3D 打印,可能会引起打印缺陷,影响制品的使用性能。但对于热喷涂技术(比如等离子喷涂、激光熔覆),即使在球化率不高的情况下,因为粉末的流动性已经大幅提升,这些经过球化后的钽粉可以展现良好的喷涂适应性,制备高致密涂层。典型的球化钽粉物理性能如表 1 所示。其中粉末氧含量取决于原料钽粉的氧含量,一般经过球化处理后氧含量会降低,降幅一般在 40% 以上,这主要和高温氢还原

作用有关。粉末纯度也和原料钽粉品质有关,但是感应等离子球化确实可以对低熔点金属或易挥发非

金属元素具有去除效应,因此经过球化后的粉末纯度也会提升。

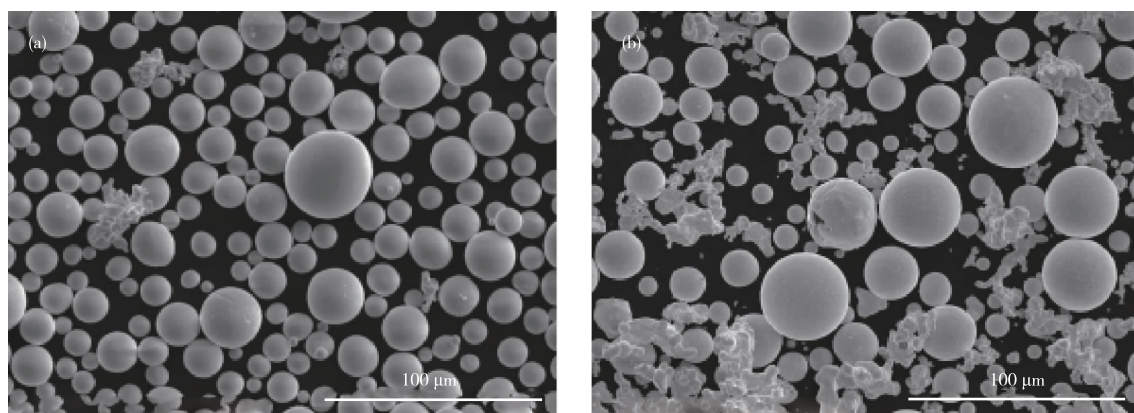


图 4 15 kW 设备在(a)较低送粉速率与(b)较高送粉速率下制备的球形钽粉形貌

Fig. 4 The tantalum powder morphology at (a) Lower feeding rate and (b) Quicker feeding rate in 15 kW equipment

表 1 球化钽粉基本物理性能

Table 1 Basic physical properties of sphero tantalum powder

Projects	Properties
Purity/%	>99.99
Oxygen content	Decrease>40% than raw material, usually $<10^{-3}$
Spherical ratio/%	>95
Flow ability/ $[s \cdot (50 g)^{-1}]$	<10
Apparent density/ $(g \cdot cm^{-3})$	>8.5

80 kW 型 TEKNA 感应等离子球化系统使用 PFD-403 转盘式送粉器。转盘转速、漏料管与转盘之间间隙的高度(简称管盘高度)都会影响送粉状态。一般地,对于流动性好的粉末,管盘高度应该尽量小,否则容易出现粉末在重力作用下直接进入喂料口及火炬(无需转盘带动)。对于钽粉,也需要依据原料粉末的流动性确定管盘高度。实际生产前,首先通过试运行送粉功能,尤其是确认送粉速率与

转盘转速之间的关系尤其重要。另外,80 kW 系统送粉器还具有粉末质量实时监控功能,技术工人可以在操作屏上直接读取和控制粉末送料速度。由于设备功率和用气量的放大,也使得 80 kW 系统对粉末处理能力大幅提升。图 5 展示了用于球化的原料(图 5a)和球化后钽粉(图 5b)的扫描电镜形貌。80 kW 系统展现了更强大的钽粉球化效果,在粉末处理速度、粉末收得率、成品率等方面均优于 15 kW。

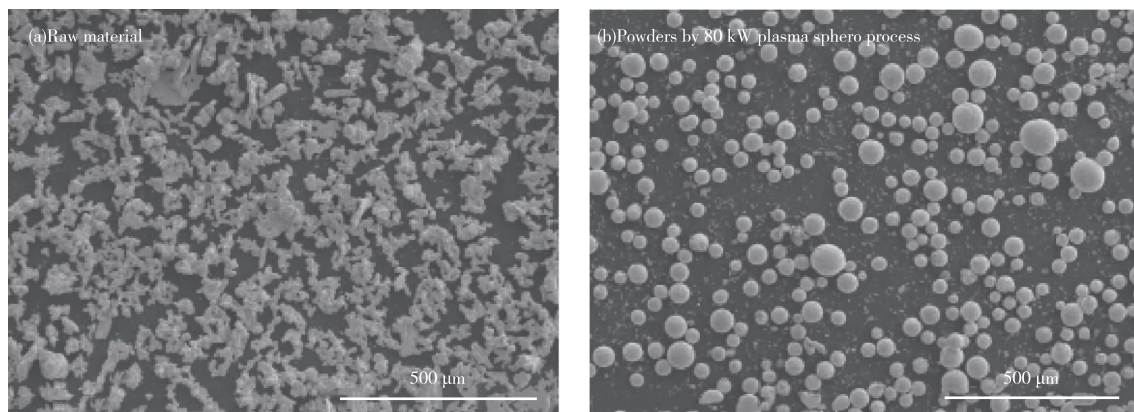


图 5 80 kW 感应等离子球化钽粉形貌

Fig. 5 The morphology of tantalum powders by 80 kW equipment

2.2 感应等离子球化微观机理分析

图6展示了钼粉在高温感应等离子体中由原始不规则形态到球形形态转变过程中形状演变过程。不规则的原始粉末包含硬连接骨架(图中“原始态”1所示)、软连接颗粒(图中“原始态”2所示)和孔洞(图中“原始态”3所示)。其中硬连接骨架在受到等离子体加热时热量能够快速传导,因此可以整体软

化及熔化(图中“中间态”1所示)。而对于软连接的附着颗粒,则可能由于热量无法与其他大体骨架进行传递,造成过热后气化(图中“中间态”2所示)。随着连接骨架软化及熔化,原始态中存在的孔洞也会被排出,通过合理控制工艺可以完全消除气孔。最终,经过熔化的钼液滴在表面张力作用下形成球形,并经冷却后形成固态致密球体(图中“最终态”)。

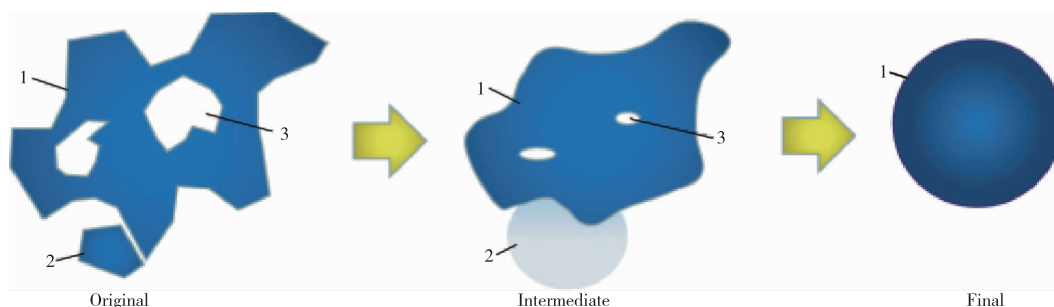


图6 等离子球化过程粉末形态演变原理图(“1”:硬连接骨架或固体,“2”:软连接颗粒;“3”:孔洞)

Fig. 6 Schematic drawing of the powder shape development in plasma sphero process(“1”:Hard connecting bones or solid, “2”:Soft connecting particle, “3”:Pores)

在等离子体中,一些细小的钼颗粒会在等离子体中气化。这种气化后的钼蒸汽在离开等离子体冷却过程中会形成纳米颗粒,并附着在球化钼粉表面,需要借助清洗工艺去除。典型的球化后粉末表面出

现黏附微-纳米颗粒形貌如图7所示,这些纳米颗粒直径为十几至几十 nm。同时,附着颗粒还有一些是微纳米尺寸。

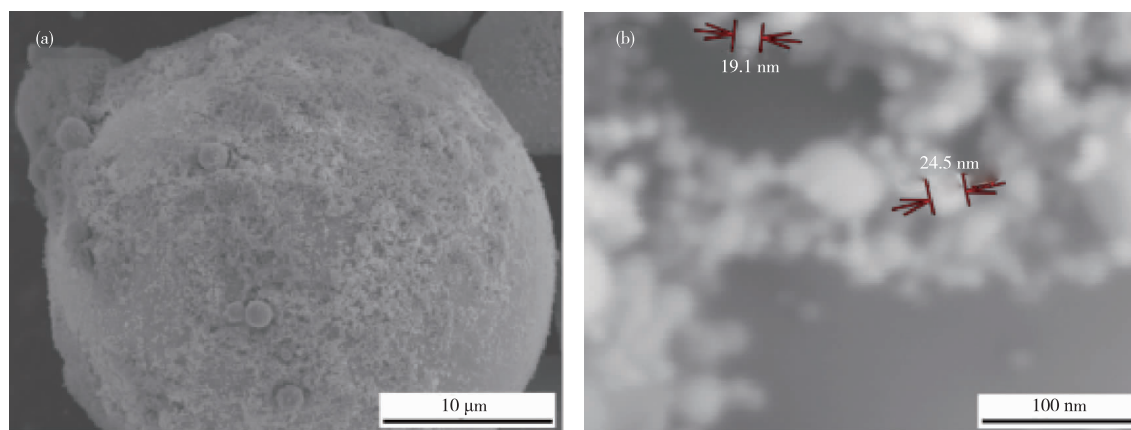


图7 球化后粉末表面出现黏附微-纳米颗粒形貌

Fig. 7 The morphology of micro-nano particles adsorbing at the surface of sphero powders

由于等离子体是一种上万度高热量介质,理论上可以熔化并气化任何已知元素。但是由于粉末在等离子体中停留时间有限,通过合理控制工艺(如送粉速率、载气流量和送粉针位置)可以实现对粉末的熔化整形,同时尽量减少气化损耗。然而,纯金属元素粉末在整形时,即使使用最优化工艺,也可能面临损耗大的风险。这种损耗风险和该元素的熔沸点差有很大关系。图8展示了不同元素的熔点和沸点(按熔点由大到小排列)。对于本文重点关注的钼,

它属于高熔点难熔金属体系,其沸点也很高,因此相对而言不属于易气化损耗元素。但是如铬和锰,虽然两者的熔点也很高,但它们的熔沸点之差低于 $1\,000\text{ }^{\circ}\text{C}$,在等离子焰流中更容易达到沸点而气化,因此这些元素的等离子球化工艺更难控制。对于熔点更低($<1\,000\text{ }^{\circ}\text{C}$)的元素,熔沸点之差多数是 $<1\,000\text{ }^{\circ}\text{C}$ (图8b)。一般情况下,感应等离子技术很少被用来球化处理熔点低于 $1\,000\text{ }^{\circ}\text{C}$ 的材料。对于如钼这种难熔金属,在超过 $3\,000\text{ }^{\circ}\text{C}$ 粉末熔化时

也同时达到了一些低熔点金属的沸点,这时这些低熔点元素可以被气化,从而起到粉末纯化效果。除了低熔点金属杂质,一些非金属元素如磷、硫等也会被气化去除。气化后的这些杂质元素会更多地进入微纳米颗粒内,通过后续清洗处理后,最终成品粉中杂质含量会降低。

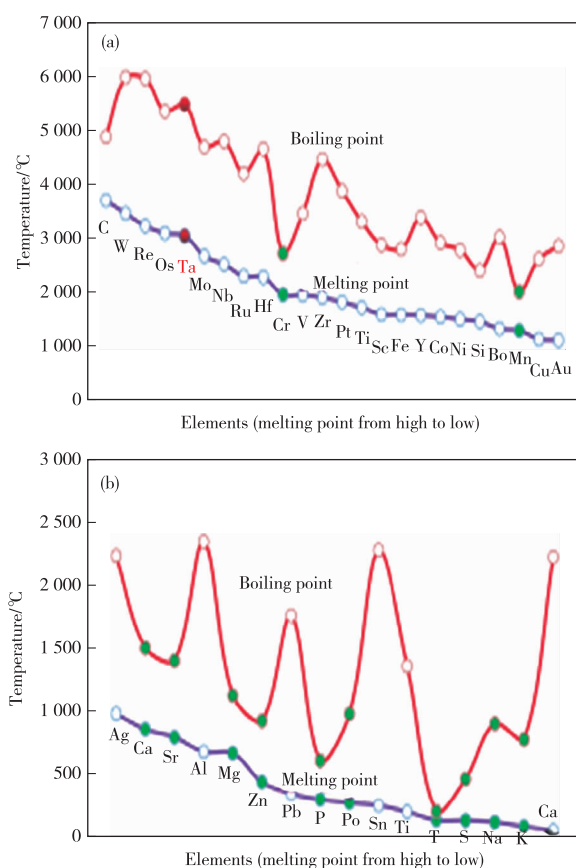


图 8 元素熔点与沸点统计分析(高损耗元素标绿,即熔沸点之差低于 1 000 °C 的元素)

Fig. 8 Statistical analyzing of the elements' melting and boiling points(the easily lost elements are green marked whose melting and boiling points' mismatch is less than 1 000 °C)

在非金属元素中,氧和碳的有效去除则更多和等离子体中氢含量有关。常规气氛中,高温下金属氧化物是稳定存在的;但是在氢气气氛中,氢气起到还原作用,因此可以将氧从粉末中置换出来,起到降氧含量效果。对于钽粉,感应等离子球化后的粉末相比原料氧含量降低幅度可以达到 40% 以上。碳的去除也和等离子气氛有关。图 8(a)结果显示,碳本身(此处以石墨为例)的熔点超过钨(金属中熔点最高的元素),沸点也接近 5 000 °C,因此碳的去除并非仅依赖高温。图 9 展示了一种可能的解释,即碳-氢二元体系下的气、固相随着氢含量增加的变化。当氢含量较低时,碳主要以固态存在(石墨);但是随

着氢比例增加,碳会按线性规律进入气相。从热力学角度看,当氢含量达到一定数值时,固体碳不再稳定,因此碳将全部进入气相。因此,高温下,氢气与碳的气相反应可能成为降低碳含量的重要方式。这种可能性的机理需要未来更深入实验论证研究。

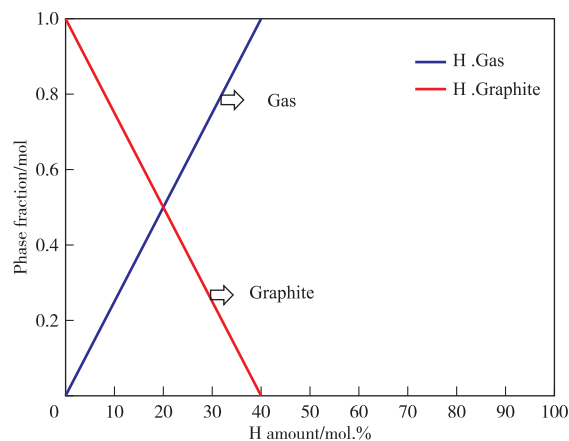


图 9 随着氢含量增加 C-H 二元体系相组成变化
(计算温度:3 500 °C, 气压:10⁵ Pa)

Fig. 9 C-H binary phase constitute under H amount changing
(temperature:3 500 °C, pressure:10⁵ Pa)

3 结论

本文采用两套不同功率的 TEKNA 感应等离子球化设备进行钽粉球化制造研究,分析了不同送粉器的送粉效果。结果表明,钽粉送粉速率的选择与设备使用功率、粉末原料流动性等多因素相关。80 kW 设备的钽粉处理效率更高,大功率设备不仅在粉末处理速度上占据优势,而且粉末球化效果及成品率也相应提升。钽粉球化过程中会出现元素损耗现象,这和细小颗粒过热气化有关。一些金属杂质以及非金属杂质可以在等离子球化过程中利用其低熔点/沸点或可能的氢反应原理去除或减少。

参考文献:

- [1] 韩寿波,张义文,田象军,等. 航空航天用高品质 3D 打印金属粉末的研究与应用[J]. 粉末冶金工业,2017,27(6):44-51.
HAN Shoubo,ZHANG Yiwen,TIAN Xiangjun,et al. Research and application of high quality 3D printing metal powders for aerospace use[J]. Powder Metallurgy Industry,2017,27(6):44-51.
- [2] 覃思思,余勇,曾归余,等. 3D 打印用金属粉末的制备研究[J]. 粉末冶金工业,2016,26(5):21-24.
QIN Sisi,YU Yong,ZENG Guiyu,et al. Research on

- the preparation of metal powder for 3D printing[J]. Powder Metallurgy Industry, 2016, 26(5): 21-24.
- [3] 高超峰, 余伟泳, 朱权利, 等. 3D打印用金属粉末的性能特征及研究进展[J]. 粉末冶金工业, 2017, 27(5): 59-64.
- GAO Chaofeng, YU Weiyong, ZHU Quanli, et al. Performance characteristics and research progress of metal powders for 3D printing[J]. Powder Metallurgy Industry, 2017, 27(5): 59-64.
- [4] 张艳红, 董兵斌. 气雾化法制备3D打印金属粉末的方法研究[J]. 机械研究与应用, 2016, 29(2): 203-205.
- ZHANG Yanhong, DONG Bingbin. Study on the method of gas atomization for production of 3D printing metal powders[J]. Mechanical Research & Application, 2016, 29(2): 203-205.
- [5] 张学军, 唐思熠, 肇恒跃, 等. 3D打印技术研究现状和关键技术[J]. 材料工程, 2016, 44(2): 122-128.
- ZHANG Xuejun, TANG Siyi, ZHAO Hengyue, et al. Research status and key technologies of 3D printing[J]. Journal of Materials Engineering, 2016, 44(2): 122-128.
- [6] 杨柳, 王富友. 医学3D打印多孔钽在骨科的应用[J]. 第三军医大学学报, 2016, 44(2): 122-128.
- YANG Liu, WANG Fuyou. Progress of 3D printed porous tantalum in orthopedics[J]. Journal of Third Military Medical University, 2016, 44(2): 122-128.
- [7] 李洋. 激光增材制造(3D打印)制备生物医用多孔金属工艺及组织性能研究[D]. 苏州: 苏州大学, 2015.
- LI Yang. Study on the process and microstructure of porous biomedical metal preparation by laser addition manufacturing (3D printing) [D]. Suzhou: Suzhou University, 2015.
- [8] 叶雷. 一种采用三维打印成型制备多孔钽医用植入材料的方法: CN201210022122.1[P]. 2012-10-02.
- YE Lei. One kind of using 3D printing preparation of porous tantalum method of medical implant material: CN201210022122.1[P]. 2012-10-02.
- [9] 张磊, 田东斌, 伍权, 等. 基于多材料打印制备梯度结构电解电容器阳极块[J]. 稀有金属材料与工程, 2020, 49(11): 3909-3913.
- ZHANG Lei, TIAN Dongbin, WU Quan, et al. Fabrication of gradient electrolytic capacitors anode pellet based on multi-material printing[J]. Rare Metal Materials and Engineering, 2020, 49(11): 3909-3913.
- [10] 吴昊, 郭征. 3D打印多孔钽与钛合金及多孔钽骨科植入物的性能比较及应用展望[J]. 中华创伤骨科杂志, 2020, 22(10): 916-920.
- WU Hao, GUO Zheng. Comparison of orthopedic implants 3D printed with porous titanium versus porous tantalum and prospects of their applications[J]. Chinese Journal of Orthopaedic Trauma, 2020, 22(10): 916-920.
- [11] 郭敏, 郑玉峰. 多孔钽材料制备及其骨科植入物临床应用现状[J]. 中国骨科临床与基础研究杂志, 2013(1): 47-55.
- GUO Min, ZHENG Yufeng. Manufacture technique and clinical application of porous tantalum implant in orthopaedic surgery[J]. Chinese Journal of Clinical and Basic Orthopaedic Research, 2013(1): 47-55.
- [12] 高福兰. 浅谈超高可靠电容器钽粉的研制[J]. 稀有金属材料与工程, 1985, 26(5): 22-26.
- GAO Fulan. Development of tantalum powder for ultra high reliability capacitor[J]. Rare Metal Materials and Engineering, 1985, 26(5): 22-26.
- [13] 窦健敏. 电容器钽粉的生产[J]. 稀有金属, 1987, 10(6): 40-41.
- DOU Jianmin. Production of tantalum powder for capacitor[J]. Rare Metals, 1987, 10(6): 40-41.
- [14] 胡小锋, 许茜, 吴艳. 钽粉制备工艺研究进展[J]. 材料导报, 2005, 19(10): 105-107.
- HU Xiaofeng, XU Qian, WU Yan. Research progress tantalum powder production technology [J]. Materials Review, 2005, 19(10): 105-107.
- [15] 任萍, 杨国启, 程越伟, 等. 低氧冶金级钽粉的生产工艺及产品性能[J]. 有色金属(冶炼部分), 2018(8): 60-63, 73.
- REN Ping, YANG Guoqi, CHENG Yuewei, et al. Manufacturing technique and performance of metallurgical grade tantalum powder with low oxygen[J]. Nonferrous Metals (Extractive Metallurgy), 2018(8): 60-63, 73.
- [16] 任萍, 周慧琴, 陈学清, 等. 球形/类球形钽粉的制备[J]. 有色金属(冶炼部分), 2018(12): 43-46.
- REN Ping, ZHOU Huiqin, CHEN Xueqing, et al. Preparation of spherical or near spherical tantalum powder[J]. Nonferrous Metals (Extractive Metallurgy), 2018(12): 43-46.
- [17] 古忠涛, 叶高英, 刘川东, 等. 射频等离子体球化钛粉的工艺研究[J]. 粉末冶金技术, 2010(2): 120-124.
- GU Zhongtao, YE Gaoying, LIU Chuandong, et al. Study on the titanium powders spheroidization by using RF induction plasma[J]. Powder Metallurgy Technology, 2010(2): 120-124.
- [18] 叶高英, 古忠涛, 刘川东. 用于粉末材料球化的射频等离子体系统[C]//北京: 中国核学会2009年学术年会论文集, 2009: 3833-3836.

(下转第117页, Continued to P117)