EIGA 雾化法制备激光 3D 打印用 TC4 合金粉末工艺研究

谢 波

(钒钛资源综合利用国家重点实验室,攀钢集团研究院有限公司,四川 攀枝花 617000)

摘 要: 采用电极感应熔炼气雾化法(EIGA)制备激光 3D 打印用 TC4 合金粉末(15~45 μm)。采用扫描电镜(SEM)、X 射线衍射分析仪(XRD)、激光粒度分析仪(LPS)、粉体特性综合测试仪等设备,对粉末的形貌、物相组成、粒度分布、松装密度及流动性进行表征,同时研究了雾化气体压力和熔体温度对激光 3D 打印 TC4 合金粉末收得率影响。结果表明:采用 EIGA 制备得到 TC4 合金粉末形貌为近规则球形,粉末表面存在少量"卫星球",粉末由 α′-Ti 相组成。TC4 合金粉末收得率随着雾化气体压力和熔体温度的升高先增加后减小。最佳雾化工艺参数为:雾化气体压力 5 MPa,熔体温度 1 800 ℃,此条件下平均粒径 D_{50} 为 81.2 μm,15~45 μmTC4 钛合金粉末收得率为22.3%,流动性为 42.5 s,松装密度为 2.83 g/cm^3,氧含量 1 260×10^{-6},符合激光 3D 打印用 TC4 钛合金粉末特征要求。

关键词: TC4 合金粉末; EIGA; 3D 打印; 收得率; 球形粉末
中图分类号: TF823,TG146.2 **文献标志码:** A **文章编号:** 1004-7638(2019)03-0007-06
DOI: 10.7513/j.issn.1004-7638.2019.03.002 **开放科学(资源服务)标识码(OSID):**

听语音 聊科研 与作者互动

Preparation of TC4 Alloy Powders Used for Laser 3D Printing via EIGA Method

Xie Bo

(State Key Laboratory of Vanadium and Titanium Resources Comprehensive Utilization,Pangang Group Research Institute Co.,Ltd.,Panzhihua 617000,Sichuan,China)

Abstract: The preparation of TC4 alloy powders for laser 3D printing (15~45 μm) via electrode induction melting gas atomization (EIGA) method was studied in this paper.The morphologies,phase compositions,particle size distributions,apparent densities and flowabilities of the powders were characterized by scanning electron microscopy (SEM),X-ray diffraction (XRD),laser particle size analyzer (LPS) and powder comprehensive characteristics tester,respectively.Meanwhile,the effects of gas atomization pressure and melt temperature on the yield of TC4 alloy powders were studied.The results indicate that the TC4 alloy powders have nearly regular spherical morphology,with a small amount of satellite balls adhering on the surface.The powder is α′-Ti of a single phase solid solution.With the increase of atomizing gas pressure and melt temperature,the yield of TC4 alloy powders increases first and then decreases.The optimum parameters are gas atomization pressure of 5 MPa,melt temperature of 1 800 ℃.Under the optimized conditions,the average particle size D_{50} is 81.2 μm,the yield of 15~45 μm powders is 22.3%,the flowability is 42.5 s (50 g),the apparent density is 2.83 g/cm^3 with oxygen content of 1 260×10^{-6},which meet the requirements for laser 3D printing.

Key words: TC4 powders,EIGA,3D printing,yield,spherical powders

收稿日期: 2019-03-02
基金项目: 四川省重点研发项目(2018GZ0145)资助。
作者简介: 谢 波(1989—),男,湖北孝感人,硕士研究生,主要从事球形金属粉末、多孔金属材料制备技术研究。E-mail: yunzangsuiyue@163.com。

0 引言

3D 打印技术具有精度高、周期短、省材料、能制备复杂一体成型零件等优点，已成为国内外最新关注的研究重点[1-2]。对于金属激光 3D 打印，金属粉末是实现快速成型打印件的物质基础，粉末的形貌、氧含量、流动性、松装密度、粒径直接决定 3D 打印件的最终性能。TC4 合金因其比强度高、耐蚀性好、耐热性高、生物相容性好，广泛应用于航空航天和生物医疗领域，例如发动机风扇、压缩机盘、座舱窗户结构框、飞机结构梁、骨关节、牙齿修复材料等[3-4]。由于国产 TC4 合金粉存在球形度低、氧含量高、粒度大等缺陷，目前高端球形 TC4 合金粉主要依靠进口，严重制约国内 3D 打印产业的发展，因此掌握高性能球形 TC4 合金粉制备技术是提升我国 3D 打印粉末自主化的关键。

目前，用于激光 3D 打印的 TC4 合金粉末的制备方法主要有真空感应熔炼气雾化法(VIGA)[5]、电极感应气体雾化法(EIGA)[6]、超声雾化法(UA)[7-8]、感应等离子体球化法(PS)[9]、等离子旋转电极雾化法(PREP)[10]和等离子丝材雾化法(PAT)[11]等。真空感应熔炼气雾化法钛合金在熔炼的过程中，钛液与坩埚、导管接触受污染，导致制备的粉末杂质含量高[12]；等离子旋转电极制备的粉末具有优良的球形度，但受电极旋转速度的限制，难以制备-45 μm 金属粉末[13]；射频等离子球化粉末的粒径和成分受原始粉末的影响，且粉末氧含量高，不适合航天航空、生物医疗领域的 3D 打印[14]；等离子丝材雾化法制备的粉末具有很好的球形度，且粒度小，但钛丝成本较高。电极感应气雾化法制备的粉末具有纯度高、球形度高、粒度分布窄、冷却速度快、环境污染小等优点，已成为制备 TC4 合金粉末的主流方法。

影响电极感应气雾化制粉的主要参数有喷盘的喷嘴角度、喷嘴环缝宽度[15]；雾化气体的进气压力、气流速度[16]；金属液流的性质、过热度等[17]。目前气雾化制粉存在细粉(-45 μm)收得率低的问题，导致制备粒度在 15~45 μm 范围内满足激光 3D 打印 TC4 钛合金粉末成本较高，无法大批量工业化生产。因此，笔者主要研究氩气压力和熔体温度对可打印 TC4 粉末收得率的影响，以期为激光 3D 打印 TC4 合金粉末的工业化生产提供参考。

1 试验部分

1.1 试验原料

以 TC4 钛合金棒为原料，钛合金棒的一端加工为锥形，锥度为 60°，用细砂纸打磨其表面除氧化物，用酒精清洗其表面除油脂。TC4 合金成分见表 1。雾化气体为高纯氩气(纯度 99.999%)。

表 1 TC4 钛合金的化学成分(质量分数)

Table 1 Chemical compositions of TC4 titanium alloy (mass fraction) %

C	N	H	O	Al	V	Ti
0.036	0.003	0.010	0.051	3.97	6.19	剩余

1.2 试验方法

采用沈阳真空所生产的 VIPF-5 型电极感应熔炼气雾化制粉设备，其工作原理是将钛合金棒卡在自动送料机上，合金棒低速旋转进入感应水冷铜线圈中，在高频感应电流的作用下电极棒被熔化，液滴落入放置于下面的雾化喷嘴中心，经过雾化喷盘加速的氩气，与下落的钛合金液滴相互作用形成流场，在流场中钛合金液滴在下滴过程中被击碎并冷却凝固成固态粉末，通过控制合金棒下降速度和旋转速度，使雾化过程持续进行，如图 1 所示。在雾化喷盘为紧耦合喷嘴情况下，研究氩气压力和熔体温度对可打印 TC4 粉末收得率的影响，分析最佳工艺条件下 TC4 合金粉末的物相组成、组织形貌、粒径分布、松装密度、流动性和氧含量。

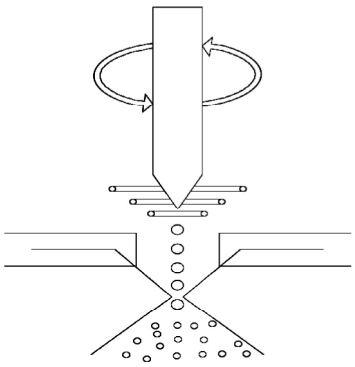

图 1 EIGA 法制备 TC4 粉末示意

Fig.1 Schematic diagram for preparation of TC4 powders by EIGA method

1.3 样品表征

通过振动筛对粉末颗粒进行分级，使用扫描电

子显微镜(MLA650F,美国) 观测制得粉末颗粒的表面形貌,采用 X 射线衍射仪(Empyrean,荷兰) 进行物相分析,采用激光粒度仪(ZS90,英国马尔文公司) 对粉末的粒度大小及粒度分布进行分析,通过氧氮氢分析仪(TC600,美国) 测量粉末的氧含量,使用粉体特性综合测试仪(BT-1000,中国) 测粉末的流动性和松装密度。

2　结果与讨论

2.1　雾化气体压力对可打印粉末收得率影响

雾化气体压力决定气体的流量 M 和流速 ν,一般雾化介质流体冲击金属液流的动能越大,破碎效果越好。根据流体动力学原理,流体的动能 N 表达式[15] 为:

$$N=\frac{1}{2}M\nu^2 \tag{1}$$

式中,M 为气体的流量,ν 为气流与溶体接触时的速度,由式(1) 可知,增大流速和提高流量都能提高流体的动能 N,但是 $N\propto\nu^2$,提高流速对破碎效果影响更为显著。

当粉末粒径在 15 ~ 45 μm 范围时可满足激光 3D 打印要求,粉末粒径在 15~45 μm 的质量占总粉末质量比例为可打印 TC4 粉末收得率[16] 。图 2 为可打印 TC4 粉末收得率与雾化气体压力的关系曲线。由图 2 可知,随着雾化气体压力的增加,可打印 TC4 粉末收得率增加,当雾化气体压力由 3 MPa 增加到 5 MPa,可打印 TC4 粉末收得率显著增加; 当雾化气体压力由 5 MPa 增加到 6 MPa,可打印 TC4 粉末收得率增加幅度不明显。当雾化气体压力小于 5 MPa,雾化气体流速小于本试验所用雾化喷盘的设计速度,气流的速度经过喷盘被加速,由亚音速状态达到超音速状态,这使可打印 TC4 粉末收得率急剧上升。而当雾化气体压力高于 5 MPa 后,雾化气体流速接近于本试验所用雾化喷盘的设计速度,随着雾化气体压力继续增大,雾化气体流速也不会增加,可打印 TC4 粉末收得率不会明显增加。当雾化气体压力为 6 MPa,可打印 TC4 粉末收得率最高为 18.1%,当雾化气体压力为 5 MPa,可打印 TC4 粉末收得率为 17.8%。

2.2　熔体温度对可打印粉末收得率影响

图 3 为可打印 TC4 粉末收得率与熔体温度的关系曲线,当雾化气体压力为 5 MPa 时,随着熔体温度的增加,合金熔体的温度上升,即金属熔体过热度变大,可打印 TC4 粉末收得率呈增大趋势,当熔体温度为 1 800 ℃时,可打印 TC4 粉末收得率为22.3%。雾化过程中,TC4 合金粉末粒径与熔体的表面张力和黏度值有紧密的联系。金属熔体的表面张力 σ 与温度的关系可用 Ramsay-Sheilds 公式[19] 表示:

$$\sigma=K(T_c-T-6)V_m^{-2/3} \tag{2}$$

式中,σ 为熔体的表面张力,K 为经验常数,T_c 表面张力为零的临界温度,T 为合金液实际温度,V_m 为合金液的摩尔体积。

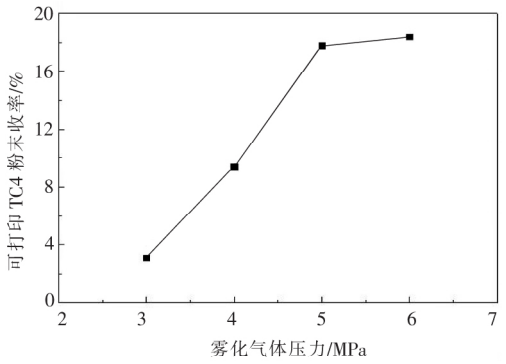

图 2　不同雾化气体压力可打印 TC4 粉末收得率曲线

Fig.2　Production rate of printable TC4 powders under different atomization gas pressures

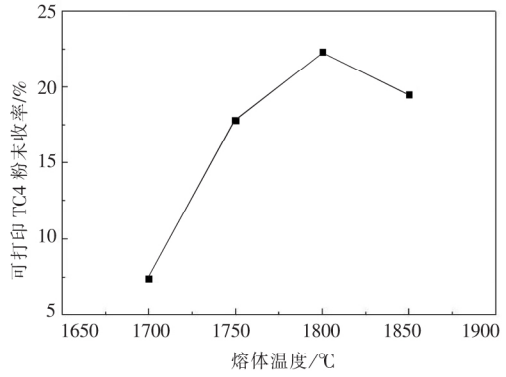

图 3　不同熔体温度可打印 TC4 粉末收得率曲线

Fig.3　Production rate of printable TC4 powders under different melt temperatures

金属熔体黏度与温度的关系为

$$\eta=Ae^{E/(kT)} \tag{3}$$

式中,η 为熔体的黏度,A 为常数,E 为活化能,k 为玻尔兹曼常数,T 为合金液实际温度。提高合金液的温度可以降低黏度。

从公式(2) 和(3) 可以看出,随着熔体温度增

加，合金液温度上升，合金液表面张力和黏度都会下降，容易破碎得到更细的粉末，但温度上升对设备的材质、冷却系统要求高，而且温度过高，增加金属液滴凝固时间，一方面造成粉末氧含量会上升，另一方面粉末在随气流流动过程中，会相互黏接，出现黏接团聚现象。造成可打印 TC4 粉末收得率下降。而温度过低，会造成颗粒的凝固时间小于球化时间，颗粒来不及球化就已经凝固，得到不规则形状的颗粒。

2.3　最佳雾化工艺

根据雾化气体压力和熔体温度的分析可知，为了获得更多满足激光 3D 打印 TC4 粉末，雾化时应适当增加雾化压力和熔体温度。但考虑到设备硬件、生产成本和安全等因素。当雾化气体压力为 5 MPa，可打印 TC4 粉末收得率为 17.8%，继续增大雾化气体压力，可打印 TC4 粉末收得率增加不明显，而且还会增加耗气量，增加成本，因此认为 5 MPa 为最佳雾化气体压力。为了获得低氧、高球形度的 TC4 粉末，1 800 ℃为最佳熔体温度。

钛有两种同素异构体，一种是低温密排六方结构(HCP)的相，一种是高温体心立方(BCC)的相，两种相转变温度为 882.5 ℃。图 4 为最佳雾化参数下 TC4 粉末的 XRD 衍射图谱，对照标准的钛卡片可知，EIGA 法制备的 TC4 合金粉末为密排六方结构的相。TC4 合金液滴被高速氩气击碎后，经过球化、凝固得到球形颗粒，此过程时间非常短，在快速冷却过程中，体心立方的 β 相通过无扩散相变过程转变为密排六方结构的 α 相，最后生成亚稳状态 HCP-α′相。

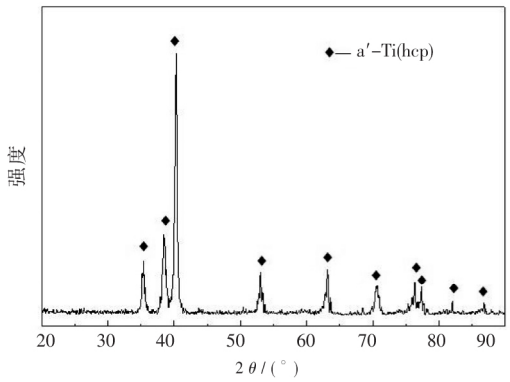

图 4　最佳雾化参数下 TC4 粉末的 XRD 图
Fig.4　XRD pattern of TC4 powders at optimum parameters

图 5 为最佳雾化参数下 TC4 粉末的表面 SEM 形貌，可以看出大部分 TC4 粉末球形度好，表面比较光滑，说明钛液在凝固之前已经充分球化。有些大颗粒表面上黏附少量小球形颗粒，称为卫星球。因为大液滴在受到氩气冲击时破碎成无数小的液滴，粒径小的液滴比表面积大，冷却速度快，首先凝固为固体颗粒，粒径大的液滴比表面积小、能量高，冷却速度慢，液滴在飞行过程中，首先凝固的固体小颗粒受到气流冲击黏附在未凝固大颗粒表面，形成卫星球。

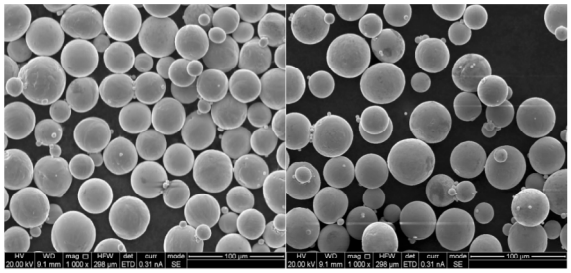

图 5　最佳雾化参数下 TC4 粉末的表面 SEM 形貌
Fig.5　SEM of TC4 powders at optimum parameters

图 6 为最佳雾化参数下 TC4 粉末的累积粒度分布和微分粒度分布曲线，由累积粒度分布曲线可以看出制备的 TC4 合金粉末粒度主要分布在 15～180 μm。粉末的微分粒度分布曲线呈单峰，且近似为正态分布。与陈岁元[16]等人采用 EIGA 法制备 TC4 合金粉末平均粒径 D_{50} 为 100 μm 相比，本试验制备的 TC4 粉末的平均粒径 D_{50} 降到 81.2 μm。

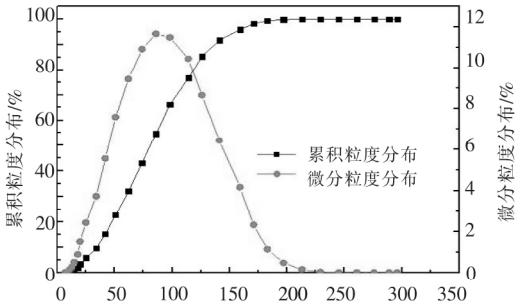

图 6　最佳雾化参数下 TC4 粉末粒度分布
Fig.6　Particle size distribution of TC4 powders at optimum parameters

粉末的氧含量、流动性、松装密度是检测粉末质量的重要指标之一，粉末中氧含量将直接影响 3D 打印件的使用性能。粉末流动性是指 50 g 金属粉末颗粒流过规定孔径的量具所需要的时间，单位为

s,一般通过粉体特性综合测试仪测量,数值越小说明该粉末的流动性越好。流动性是一个与形貌、粒度分布及松装密度相关的综合性参数。流动性将影响打印过程中铺粉和送粉过程的均匀性、稳定性。

3D 打印所需的 TC4 钛合金粉末要求流动性好,松装比大。本试验用粉体特性综合测试仪分别测量 5 次 50 g 粒度分布在 15~45 μm 粉末全部流失所需的时间,取平均值。用粉体特性综合测试仪测量粒度分布在 15~45 μm 粉末的松装密度 5 次,取平均值。用氧氮氢分析仪检测粉末的氧含量。测试结果如表 2 所示。

表 2　TC4 粉末的物理性能
Table 2　Physical properties TC4 powders

粒径/μm	氧含量×10^6	松装密度/($g \cdot cm^{-3}$)	流动性/s
15~45	1 260	2.83	42.5

粒度在 15~45 μm TC4 钛合金粉末松装密度为 2.83 g/cm^3,标准 TC4 钛合金棒材密度为 4.43 g/cm^3,即松装密度比 63.88%,达到了激光 3D 打印 TC4 钛合金粉末松装密度比大于 50%的要求。粒度在 15~45 μmTC4 钛合金粉末的氧含量为 1 260 × 10^{-6},TC4 钛合金棒氧含量为 510×10^{-6},增氧量为 850×10^{-6},满足激光 3D 打印钛合金粉末氧含量小于 1 300×10^{-6}的要求[20]。

3　结论

1) 随着雾化气体压力增加,可打印 TC4 粉末收得率增加,当雾化气体压力大于 5 MPa,雾化气体压力增加对可打印 TC4 粉末收得率影响不大。适当提高熔体温度使可打印 TC4 粉末收得率增加。

2) EIGA 法制备 TC4 合金粉末形貌为近规则球形,粉末表面存在少量"卫星球"颗粒,粉末的粒度呈单峰正态分布,粉末由 α′-Ti 相组成。

3) 本试验最佳雾化工艺参数为: 雾化气体压力 5 MPa,熔体温度为 1800 ℃,此条件下 15 ~ 45 μmTC4 钛合金粉末收得率为 22.3%,平均粒径 D_{50} 为 81.2 μm,流动性为 42.5 s,松装密度为 2.83 g/cm^3,氧含量 1 260×10^{-6},符合激光 3D 打印用 TC4 钛合金粉末特征要求。

参考文献

[1] Singh S,Ramakrishna S,Singh R.Material issues in additive manufacturing: A review [J].Journal of Manufacturing Processes,2017,25: 185-200.

[2] Liao Xianjie,Lai Qi,Zhang Shuli.Current situation and development prospect of preparation technologies for spherical titanium and titanium alloy powders [J].Iron Steel Vanadium Titanium,2017,38(5):1-8.
(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.)

[3] Seifi M,Salem A,Beuth J,*et al*.Overview of materials qualification needs for metal additive manufacturing [J].JOM,2016,68(3):747-764.

[4] Lu Liangliang,Zhang Shaoming,Xu Jun,*et al*.Review on advanced preparation technology of spherical titanium powders [J].Chinese Journal of Rare Metals,2017(1):94-101.
(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(1):94-101.)

[5] Wang Qi,Li Shenggang,Lv Hongjun,*et al*.Research on high quality titanium alloy powder production by atomization technology [J].Titanium Industry Progress,2010,27(5):16-18.
(王琪,李圣刚,吕宏军,等.雾化法制备高品质钛合金粉末技术研究 [J].钛工业进展,2010,27(5):16-18.)

[6] Zhang Tao.OSAKA Titanium technologies introduced GA titanium powder specially for additive manufacturing TILOP64 [J].Iron Steel Vanadium Titanium,2016,37(6):50.
(张涛.日本大阪钛推出专用于增材制造的气雾化钛粉 TILOP64 [J].钢铁钒钛,2016,37(6):50.)

[7] Zhang Shuguang,Yang Bicheng,Yang Bo,*et al*.A novel ultrasonic atomization process for producing spherical metal powder [J].Acta Metallurgica Sinaca,2002,38(8):888-892.
(张曙光,杨必成,杨博,等.新型超声雾化技术制备球形金属粉末 [J].金属学报,2002,38(8):888-892.)

[8] Wu Shengju,Wang Zhigang,Ren Jinlian,*et al*.Experimental study of ultrasonic atomization method for manufactruing titanic metallic powder [J].Piezoelectrics & Acoustoo Ptics,2001,23(6):490-492.
(吴胜举,王志刚,任金莲,等.功率超声雾化制备钛金属粉末的实验研究 [J].压电与声光,2001,23(6):490-492.)

[9] Wei W H,Wang L Z,Chen T,*et al*.Study on the flow properties of Ti-6Al-4V powders prepared by radio-frequency plasma spheroidization [J].Advanced Powder Technology,2017,28(9):2431-2437.

[10] Chen G,Zhao S Y,Tan P,*et al*.A comparative study of Ti-6Al-4V powders for additive manufacturing by gas atomization,plasma

rotating electrode process and plasma atomization [J]. Powder Technology, 2018, 333: 38-46.

[11] Lu Liangliang, Liu Xuefeng, Zhang Shaoming, *et al*. A combinatorial technique incorporating high frequency inductive heating and gas atomization for preparing spherical titanium powders from titanium wires [J]. Material Review, 2018, 32(8): 1267-1270.
(陆亮亮,刘雪峰,张少明,等.高频感应熔化金属丝气雾化制备球形钛粉[J].材料导报,2018,32(8):1267-1270.)

[12] Zhao Shaoyang, Chen Gang, Tan Ping, *et al*. Characterization of spherical TC4 powders by gas atomization and its interstitial elemental control [J]. The Chinese Journal of Nonferrous Metals, 2016, 26(5): 980-987.
(赵少阳,陈刚,谈萍,等.球形 TC4 粉末的气雾化制备、表征及间隙元素控制[J].中国有色金属学报,2016,26(5):980-987.)

[13] Yin J O, Chen G, Zhao S Y, *et al*. Microstructural characterization and properties of Ti-28Ta at.% powders produced by plasma rotating electrode process [J]. Journal of Alloys & Compounds, 2017, 713: 222-228.

[14] Sheng Yanwei, Guo Zhimeng, Hao Junjie, *et al*. Preparation of micro-spherical titanium powder by RF plasma [J]. Rare Metal Materials and Engineering, 2013, 42(6): 1291-1294.
(盛艳伟,郭志猛,郝俊杰,等.射频等离子体制备球形钛粉[J].稀有金属材料与工程,2013,42(6):1291-1294.)

[15] Hu Chunlian, Hou Shanglin. Effect of atomizing nozzle structure on properties of spray-welded alloy powder [J]. Materials Protection, 2002, 35(12): 53-54.
(胡春莲,侯尚林.雾化喷嘴结构对喷焊合金粉末性能的影响[J].材料保护,2002,35(12):53-54.)

[16] Chen Suiyuan, Dong Huanhuan, Liu Changsheng, *et al*. TC4 alloy powder prepared by electrode induction melting gas atomization for laser 3D printing [J]. Journal of Northeastern University, 2017, 38(4): 497-501.
(陈岁元,董欢欢,刘常升,等.EIGA 法制备激光 3D 打印用 TC4 合金粉末[J].东北大学学报(自然科学版),2017,38(4):497-501.)

[17] Guo Kuaikuai, Liu Changsheng, Chen Suiyuan, *et al*. Effect of EIGA power parameter on characteristics of TC4 alloy powder for 3D printing [J]. Materials Science and Technology, 2017, 25(1): 16-22.
(郭快快,刘常升,陈岁元,等.功率对 EIGA 制备 3D 打印用 TC4 合金粉末特性的影响[J].材料科学与工艺,2017,25(1):16-22.)

[18] Le Guomin, Li Qiang, Dong Xianfeng, *et al*. Fabrication techniques of spherical-shaped metal powders suitable for additive manufacturing [J]. Rare Metal Materials and Engineering, 2017(4): 1162-1168.
(乐国敏,李强,董鲜峰,等.适用于金属增材制造的球形粉体制备技术[J].稀有金属材料与工程,2017(4):1162-1168.)

[19] Cherevko A G. The independent scale of critical clusters as a basis for the calculation of surface tension of elementary substances [J]. High Temperature, 2009, 47(6): 920-923.

[20] Zhang Ning, Chen Suiyuan, Yu Xiao, *et al*. Preparation of TC4 alloy powder for laser 3D printing [J]. Journal of Materials and Metallurgy, 2016, 15(4): 277-284.
(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.)

编辑 杨冬梅

攀钢实现低品位钛铁矿高效回收

5 月 24 日,从攀钢矿业公司设计研究院获悉,由该院完成的“低品位橄辉岩型钛铁矿选矿工艺及装备产业化集成技术研究”项目,日前通过四川省金属学会技术评价,认为总体技术处于国际先进水平。

据了解,四川省金属学会评价委员会在听取了项目技术研究报告、查阅了相关资料、进行质询讨论后认为,该项目开发了多项关键技术,实现了低品位橄辉岩型钛铁矿的高效回收,对低品位钛铁矿高效回收起到了示范作用,加快了国内低品位钛铁矿回收步伐。

白马矿属于橄辉岩性矿体,选铁尾矿中钛品位较低,加上矿物组成复杂,造成采用常规流程对选铁尾矿中钛铁矿回收成本高。白马铁矿投产后,每年产生的平均钛铁矿品位 4.40%选铁尾矿直接排入尾矿库,没有进行综合利用。

2011 年 5 月,矿业公司设计研究院与白马选矿厂组建项目组,对低品位橄辉岩型钛铁矿高效回收进行专题研究。项目组从流程指标、产物分析、药剂成本及浮选操作难易度等方面综合考虑,进行了研究。通过大量实验室试验探索和工业验证,最终确定了低品位钛铁矿回收最优流程,形成了白马原生钛铁矿高效回收成套技术。

截至目前,低品位橄辉岩型钛铁矿高效回收示范线已在白马选矿厂稳定运行一年多,年产铁含量 52.73%的铁精矿 26 万 t 以上、钛含量 47%的钛精矿 17 万 t 以上,创造了显著的经济效益。

http://www.pzhsteel.com.cn/NewsCenter/readnews.aspx NewsID=020607785