

# 低温复杂结构件特种成形工艺

李圣刚 吕宏军 何士桓 王琪 黄思原

(航天材料及工艺研究所,北京 100076)

**文 摘** 研究了等离子旋转电极制备低温钛合金球形粉末的特性,采用热等静压成形工艺,制备低温钛合金粉末冶金材料,并对比分析了组织与性能。以低碳钢为材质,加工装配专用芯模,开展粉末冶金 TA7ELI 钛合金构件净成形技术研究,实现了大尺寸、薄壁、半封闭式火箭发动机低温转子高性能、高可靠性的整体净成形。结果表明:等离子旋转电极制备的低温钛合金球形粉末,具有非常高的球形度和振实密度,粒径分布可依据需求控制在一定范围内,非金属夹杂含量每千克不超过 20 个;粉末冶金低温钛合金材料性能全面达到同批次锻件性能水平,微观组织呈等轴状;粉末冶金低温钛合金氢泵叶轮已通过了发动机型号低温全程试车考核。

**关键词** 等离子旋转电极,粉末冶金,低温钛合金,热等静压

## Special Forming Process of Cryogenic Complicated Structural Parts

Li Shenggang Lü Hongjun He Shihuan Wang Qi Huang Siyuan

(Aerospace Research Institute of Materials & Processing Technology, Beijing 100076)

**Abstract** Characters of spherical powders which were manufactured by plasma rotating electrode process (PREP) were investigated. Microstructure and performance of cryogenic titanium alloy which was manufactured by hot iso-static pressing (HIP) have been analyzed. Researches on powder metallurgy TA7ELI alloy near net-shape process with appropriate mold was made and assembled by mild steel has been developed, and the high performance and high dependability rotor with large dimension, thin-walled, semi-closed which was used for cryogenic rocket engine have been manufactured by near net-shape process technology. Cryogenic titanium alloy powders which were manufactured by PREP has very well sphericity shape, high tap-density, better granularity distribution, and nonmetallic impurity is lower than 20 per kilogram. Powder metallurgy titanium alloy has the same level performance with the forged material, and the microstructure of the powder metallurgy is equiaxial grain. Powder metallurgy cryogenic titanium alloy impeller which is used for hydrogen pump has past the engine test.

**Key words** Plasma rotating electrode process, Powder metallurgy, Cryogenic titanium alloy, Hot iso-static pressing

### 0 引言

先进的材料和特种制造工艺是火箭发动机大幅度提高工作寿命和可靠性的技术保障。火箭发动机大量使用的低温转子其结构多为复杂、薄壁式,而且对尺寸和形位精度、低温(-253℃)环境下的性能要求极高,高性能粉末冶金特种制造技术成为了火箭发动机低温转子首选成形工艺。钛合金粉末冶金技术与传统的铸、锻工艺相比:具有材料性能均匀且不低于锻件性能水平、各向同性、成分可控、全致密内部无缺陷、残余应力小等特点<sup>[1-2]</sup>,产品尺寸稳定、加工成本低、工序少,可实现近净成形复杂结构件<sup>[3-5]</sup>。

Ti-5Al-2.5SnELI 钛合金是一种中等强度  $\alpha$  型钛合金,因其在低温下具有较好的韧性、热导率低、高

的强度以及缺口敏感性小等特点,作为在低温(液氢)条件下使用的工程材料,已经在航天领域中得到广泛应用,成为运载器低温容器、结构管道、发动机低温转子等耐低温结构件的首选材料<sup>[6-9]</sup>。目前新型大推力液体火箭发动机对轻质耐低温结构件的需求增多,且工况条件更加恶劣,低温钛合金的制备工艺成为研究热点。本文对 TA7ELI 钛合金的粉末特性、微观组织及室温/低温性能进行了研究分析,并对火箭发动机用大尺寸复杂、薄壁低温钛合金构件净成形技术进行研究。

### 1 实验

#### 1.1 材料

原材料母合金为国产 TA7ELI 超低间隙钛合金

收稿日期:2011-11-21

作者简介:李圣刚,1978 年出生,硕士,工程师,主要从事钛合金粉体制备、粉末冶金材料及工艺研究工作。E-mail:lsg257@sina.com

棒材,经(780±10)℃退火处理,合金组成为:Ti-5.3Al-2.6Sn。

用于粉末冶金热等静压成形低温转子的芯模材质为低碳钢。

## 1.2 试验方法

采用等离子旋转电极(PREP)工艺,将TA7ELI钛合金棒材制备成钛合金球形粉末,并对粉末的特性进行分析研究,测试球形粉末的化学成分,用筛分机检测粒径分布,使用自制的除杂设备去除夹杂,选用扫描电镜观察颗粒形貌。

采用粉末冶金热等静压成形工艺,制备出具有复

表1 TA7ELI钛合金球形粉末的化学成分

Tab.1 Chemical composition of TA7ELI spherical powder

类别	Al	Sn	Fe	C	N	O	H	Ti
PREP球形粉末	5.31	2.62	0.04	0.024	0.015	0.086	0.0024	
GB/T3620.1—2007	4.50~5.75	2.0~3.0	≤0.25	≤0.05	≤0.035	≤0.12	≤0.0125	余量

由成分测试结果可知,经等离子旋转电极工艺制备的钛合金球形粉末元素含量完全满足标准要求。特别是对低温钛合金材料性能影响较大的间隙元素C、N、O、H等含量都实现精确的控制,确保钛合金的纯度大大提高,而且没有受到钨电极污染。

### 2.1.2 粒径分布

等离子旋转电极制备工艺所得的粉末粒径分布如图1所示。

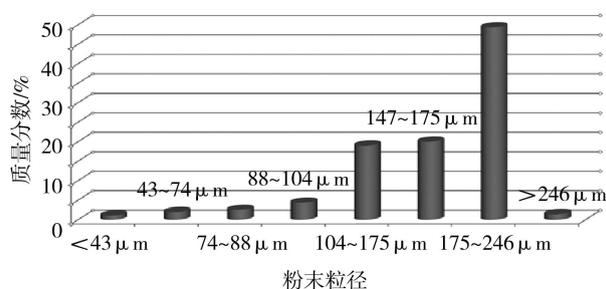


图1 PREP球形粉末粒径分布

Fig.1 Granularity distribution of spherical powder made by PREP

由图1可知,经等离子旋转电极工艺制备的低温钛合金球形粉末粒径多集中在104~246 μm,含量接近89%,小于104 μm的细粉收得率比较低。从图1中看出,等离子旋转电极工艺制备的粉末粒径分布较窄,这样有利于根据需求将粒径控制在一定的范围内,通过振实密度测定,这样的粒径配比振实密度高达65%。

### 2.1.3 粉末中的夹杂

钛合金粉末中的夹杂直接影响着固结后的合金低周疲劳等力学性能,会成为合金的裂纹萌生源<sup>[3,10]</sup>。PREP工艺制备的粉末颗粒中的夹杂物主要有异金属和非金属夹杂,异金属夹杂都具有磁性,主要来自于等离子旋转电极雾化室,试验中采用磁选装置即可去除;非金属夹杂一部分来自于母合金的陶

宇航材料工艺 <http://www.yhclgy.com> 2012年 第1期

杂、薄壁结构的钛合金试验件。通过机械加工和电解腐蚀,去除包套和芯模,获得的试验件内部具有扭曲的薄壁结构。

采用MTS RT/50和SANS电子万能实验机对拉伸试样在室温和低温环境下进行力学拉伸实验;采用LEICA DMRM光学显微镜对金相试样进行组织观察;采用LEICA S440扫描电镜对拉伸断口进行观察。

## 2 结果与讨论

### 2.1 TA7ELI钛合金粉末特性

#### 2.1.1 化学成分

表1所示为TA7ELI钛合金球形粉末的化学成分。

瓷和熔渣<sup>[11]</sup>,另外一部分来自于制粉设备的密封装置,选用自制镜面弹跳设备可基本去除,最终合格产品每千克粉末中夹杂物不超过20个,达到了国外的优选等级。

#### 2.1.4 粉末颗粒形貌

PREP粉末颗粒的形貌如图2所示。PREP工艺制备的均匀规则球形粉末颗粒,使粉体间的几何结构变得相对简单。

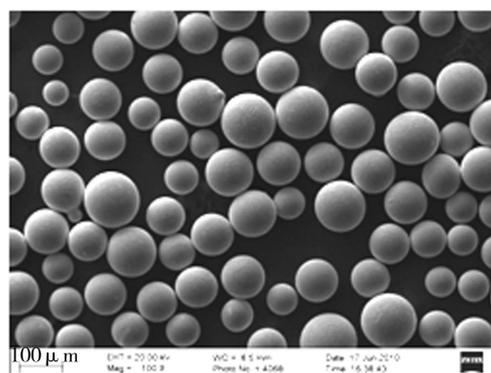


图2 PREP粉末颗粒形貌

Fig.2 Shape of spherical powder made by PREP

由图2所示可知,PREP粉末颗粒表面光亮、洁净,而且规则的球形粉末含量大于98%,规则的外形使其具有优良的物理工艺性能,这种粉末的振实密度高,流动性非常好,易于填充到复杂模具型腔的每个位置,保证了粉末在固结致密化过程中的最小收缩量,为合金体达到全致密提供了有利的保障。

### 2.2 粉末冶金TA7ELI低温钛合金材料的性能与组织

#### 2.2.1 力学性能

粉末冶金TA7ELI低温钛合金材料热等静压态以及相同冶炼批次TA7ELI锻棒的室温和-253℃的拉伸性能如表2所示。

表 2 TA7ELI 粉末钛合金及锻棒的拉伸性能

Tab. 2 Tensile properties of powder metallurgy TA7ELI and forge material

温度/℃	材料状态	$\sigma_b$ /MPa	$\sigma_{0.2}$ /MPa	$\delta_5$ /%	$\psi$ /%
20	热等静压态	848	789	15.3	30.1
	锻棒	823	789	14.3	27.5
-253	热等静压态	1456	-	12.9	24.7
	锻棒	1450	-	11	19

由表 2 可以看出,随着试验温度的降低,粉末冶金 TA7ELI 低温钛合金材料的强度有较大幅度的提升,而塑性也有较明显的降低。在室温条件下,TA7ELI 钛合金粉末冶金材料抗拉强度优于锻件的性能,而屈服强度和在 -253℃ 的抗拉强度基本相同。对于伸长率和断面收缩率,无论是在室温还是在 -253℃,TA7ELI 粉末冶金材料都明显强于相同冶炼批次锻件的性能水平。从这些数据综合来看,粉末冶金 TA7ELI 低温钛合金材料的性能已经达到了很高的性能水平,甚至超过了锻件的性能水平。

### 2.2.2 微观组织

图 3 所示为粉末冶金 TA7ELI 低温钛合金材料的微观组织。

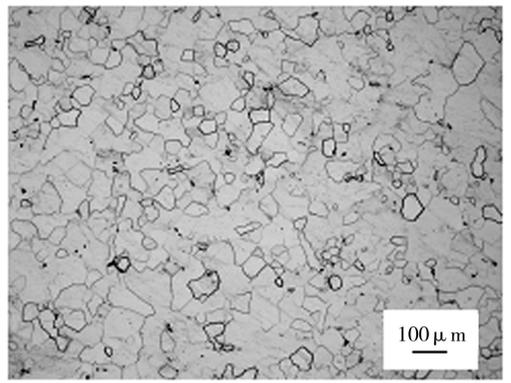
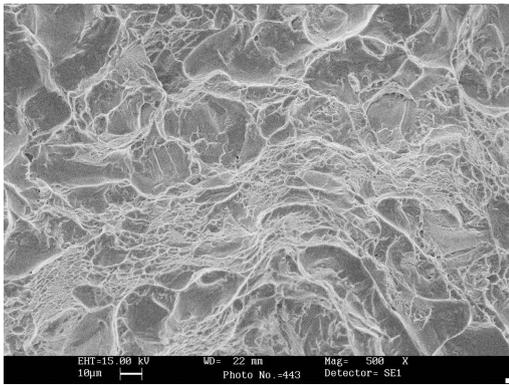


图 3 粉末冶金 TA7ELI 低温钛合金微观组织

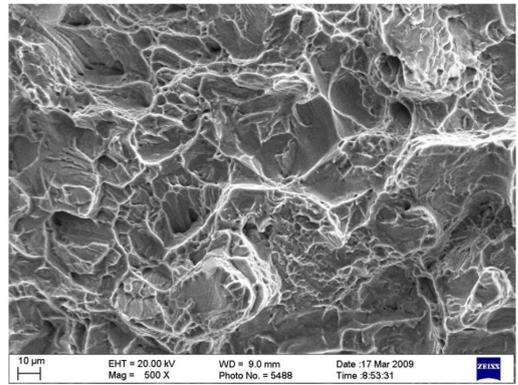
TA7ELI 在平衡状态为单相的  $\alpha$  合金,由图 3 可看出,粉末冶金钛合金工艺制备出的低温钛合金微观组织为等轴状的组织,粉末颗粒完全发生了塑性变形,原始颗粒边界已经消失,部分细小晶粒是在原始粉末颗粒边界上生长出来的。等轴状组织往往具有高的塑性和疲劳强度,还易于进行超塑性变形<sup>[12]</sup>。

### 2.2.3 断口形貌分析

图 4 所示为粉末冶金 TA7ELI 低温钛合金在室温和低温(-253℃)拉伸断口的微观形貌。



(a) 室温



(b) 低温

图 4 粉末 TA7ELI 钛合金的拉伸断口形貌

Fig. 4 Fracture morphology of powder metallurgy processed TA7ELI

由图 4 可以看出,同一种材料在不同温度下的拉伸断口都是韧窝,断裂属于韧性断裂,而且断口形貌的微观组织都是等轴状的,正如前所述。图 4(a) 所示室温环境下的拉伸断口韧窝大小分布比较均匀,发达的细小韧窝比较多,大韧窝比较深,呈等轴状,这种组织塑性较好。图 4(b) 所示 -253℃ 条件下的断口局部有穿晶断裂,形貌是等轴组织,断口表面有较大的起伏,韧窝尺寸不均匀,能量较高的大尺寸韧窝这种组织相对室温的塑性要稍差。

### 2.3 粉末冶金 TA7ELI 低温钛合金转子净成形

以低碳钢为材质,加工装配专用芯模,采用热等静压成形工艺制备火箭发动机低温转子,应用电解腐蚀技术去除芯模,进行粉末钛合金 TA7ELI 构件净成形技术研究。为满足发动机型号的需求,实现了粉末

冶金低温钛合金大尺寸、薄壁、半封闭式构件的高可靠性整体净成形,图 5 所示为粉末冶金低温钛合金氢泵叶轮构件毛坯。该粉末冶金构件最大外径 240 mm,内部流道有三种不同类型的双扭曲薄壁叶片,叶片最薄处接近 1 mm。经过超声波探伤、X 射线以及荧光检测均未发现表面和内部有任何缺陷,流道的尺寸/形位精度和表面粗糙度全部达到了设计的使用要求。

粉末冶金低温钛合金氢泵叶轮通过了发动机型号低温全程试车考核,转速达到 34 000 r/min,累计考核时间 3 000 s,有力地支撑了航天型号的发展。该构件的研制成功,使得粉末冶金钛合金技术在制备高性能、高可靠性产品中,充分展示了其独特的优越性。

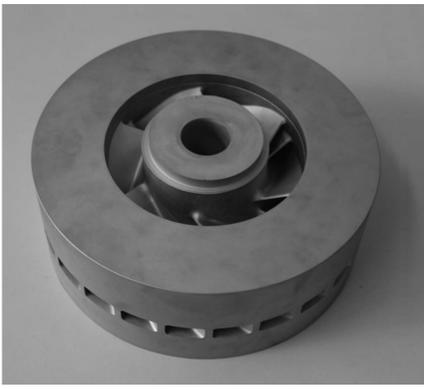


图5 粉末冶金低温钛合金氢泵叶轮构件毛坯

Fig.5 As prepared of powder metallurgy cryogenic titanium alloy impeller

### 3 结论

(1) 等离子旋转电极工艺制备的钛合金球形粉末间隙元素含量低、纯度高, 粒径分布比较窄、可依据生产需求控制在一定范围, 夹杂物可基本去除, 规则球形粉末含量不低于98%。

(2) 粉末冶金 TA7ELI 钛合金材料强度达到相同冶炼批次锻件的性能水平, 塑性超过锻件; 其微观组织细小均匀, 呈等轴状组织。

(3) 粉末冶金低温钛合金构件可实现高性能、高可靠性的净成形, 粉末冶金钛合金低温转子已通过发动机热试车考核。

### 参考文献

[1] Baccino R, Moret F, Pellerin F, et al. High performance and high complexity net shape parts for gas turbines; the ISOPREC

powder metallurgy process [J]. Materials and Design, 2000, 21: 345-350

[2] Guichard D, Laithier F, Fournier J P. Development of powder metallurgy impellers for vinci hydrogen turbopump [J]. AIAA, 2000, 2000-3831

[3] Anoshkin N F, Demchenkov G G. Material science and technological aspects of rapidly solidified titanium alloy production [J]. Materials Science and Engineering, 1998, A243: 263-268

[4] Eylon D, Froes F H, Parsons L D. Titanium PM components for advanced aerospace applications [J]. Met. Powder Rep., 1983, 38(10): 567-571

[5] Froes F H. Prealloyed titanium powder metallurgy—barriers to use [J]. Int. J. Powder Metall., 1987, 23(4): 267-269

[6] 张忠, 赵立中, 涂志华, 等. 超低间隙钛合金低温动态力学性能[J]. 实验力学, 1994, 9(3): 209

[7] 陈鼎, 黄培云. 钛和钛合金在低温下的力学性能[J]. 矿冶工程, 2002, 22(3): 111-114

[8] 史昆, 谢华生. 低温 Ti-5Al-2.5SnELI 的研究现状及应用[J]. 铸造, 2008, 157(8): 763-767

[9] 刘伟, 杜宇. 低温钛合金的研究现状[J]. 稀有金属快报, 2007, 26(9): 6-9

[10]. 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艺的研究[J]. 航空工程与维修, 1999(5): 44-46

[11] 张莹, 李世魁, 陈生大. 用等离子旋转电极法制取镍基高温合金粉末[J]. 粉末冶金工业, 1998, 8(6): 17-22

[12] (德) 莱因斯 C, 皮特尔斯 M 编. 陈振华, 等译. 钛与钛合金[M]. 北京: 化学工业出版社, 2005: 11-15

(编辑 李洪泉)

## 《宇航材料工艺》2012 年征订启事

中国科技论文统计源用刊 中国中文核心期刊

国际航空文摘 (IAA)、美国化学文摘 (CA)、金属文摘 (METADDEX) 收录核心期刊

· 《宇航材料工艺》创刊于 1971 年, 是国内外公开发行的国家级技术类期刊

· 由航天材料及工艺研究所主办

· 入《中国学术期刊(光盘版)》、中国期刊网及万方数据资源系统数字化期刊群等

· 在第二届国家期刊奖评比活动中获百种重点期刊奖

· 主要报道我国材料及工艺的科技进展、科研成果和工程实践

· 主要栏目有: 专论、综述、计算材料学、新材料新工艺、测试分析、工程实践、知识窗、科技信息、成果简介以及会议信息等

· 适合于航空航天、冶金、石油化工、机械电子、轻工、汽车、造船等部门, 从事材料工艺研究生产的科研技术人员、管理人员及高校师生阅读。

· 刊号 CN 11—1824/V, 国际标准刊号 ISSN 1007—2330, 双月刊 80 页, 国际大 16 开本, 激光照排, 逢双月出版, 每期 15.00 元, 全年 90.00 元, 还未订阅的朋友请从速订阅。

本刊参加了天津半导体杂志社的联合征订, 可汇款至天津半导体杂志社, 邮编 300220, 注明“订阅《宇航材料工艺》, 代号 9769”。也可直接在编辑部订阅。

信汇开户行: 北京市工商银行东高地支行

户名: 航天材料及工艺研究所

账号: 0200006509008800374 (务必将订单与银行回执复印件寄回)

邮汇地址: 100076 北京市 9200 信箱 73 分箱 18 号《宇航材料工艺》编辑部

电话: 010-68383269; E-mail: 703@china.com

《宇航材料工艺》网址: <http://www.yhclgy.com>