钛合金热等静压粉末冶金技术的发展现状

张绪虎　　徐桂华　　孙彦波

（航天材料及工艺研究所，北京　100076）

文　摘　钛合金在航空航天领域有广泛的应用前景，钛合金热等静压粉末冶金技术的发展为解决大型钛合金复杂构件的制备难题提供了一种新的技术途径。本文较为系统的介绍了该技术的特点、起源和研究现状，以及航天材料及工艺研究所在该技术领域所做的研究工作，并对该技术在型号中的应用做了简要的介绍。

关键词　钛合金，热等静压，粉末冶金

中图分类号：TG146　　DOI：10.3969/j.issn.1007-2330.2016.06.002

Research Progress of Ti Products Fabricated by Hot Isostatic Pressing(HIP)

ZHANG Xuhu　　XU Guihua　　SUN Yanbo

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

Abstract　Due to its amazing properties, Ti alloys are widely used in aerospace and aerial industry. HIP powder metallurgy process, which is suspected to a proposal approach to solve Ti alloys' fabrication problem, is investigated throughout the world. In this paper, it's character, orgination and development is introduced. Meanwhile, the investigation, approvemnet and practical application of the process of Aerospace Research Institute of Materials & Processing Technology is also introduced.

Key words　Ti alloy, Hot isostatic press, Powder metallurgy

0　引言

钛合金在航空航天领域有广泛的应用前景，但其合金熔点高、加工难度大、成本高的特点制约了其应用范围。为解决这一问题，世界各国的研究人员进行了不懈的努力，并提出了一系列的成形工艺方法，如精密铸造、模锻、注射成型、增材制造、热等静压粉末冶金等[1-4]。

热等静压(HIP)技术早期主要用于核燃料的制备；1972 年，美国和瑞典实现了高速工具钢的大批量热等静压制备；20 世纪 80 年代，美国空军材料实验室将该工艺扩展到了制造镍基高温合金和钛合金的预成形坯[5]。

钛合金热等静压粉末冶金是热等静压技术的进一步发展，是一种典型的材料-工艺一体化技术。其工艺过程为：首先根据产品外形计算设计出产品的模具(包套)，随后充填金属粉末，再经真空抽气后进行热等静压，得到全致密的金属零部件，最后采用少量机加工或化学腐蚀的方法去除包套，即可获得力学性能与锻件相当、尺寸精度可达 0.2 mm 的复杂结构件。

与传统工艺相比，该技术具有以下优点。

(1)化学成分稳定

通过粉末成分和包套洁净度的控制，可以很好的控制所制备构件的化学成分；

(2)各向同性的力学性能

所制备构件在成形过程中承受各向同性气压作用，在各个方向受力均匀，因而成形后的性能也是各向同性且均匀的；

(3)结构适应性好

成形用芯模可采用分体式设计，能够满足各类不同形状产品的需求，具有较高的柔性；

(4)成本较低

该工艺具有较高的材料利用率和成品率，能够在提高效率的同时显著降低了生产成本。

由于上述特点，钛合金热等静压粉末冶金技术被认为是钛合金构件成形的最有效方法之一，受到世界各国研究人员的关注，开展了大量的理论研究和成形

收稿日期：2016-06-20；修回日期：2016-08-10

作者简介：张绪虎，1966 年出生，博士，研究员，主要研究金属材料及工艺。E-mail：ghxu0507@163.com

试验,并在型号中得到广泛应用[6-7]。本文较为系统的介绍了钛合金热等静压粉末冶金技术的特点、起源和研究现状等。

1 国外钛合金热等静压粉末冶金技术的研究进展

钛合金热等静压粉末冶金技术是西方国家率先发展起来的。经过多年的研究,该技术已经有了长足的进展,并形成了完整的技术体系以及多种工艺路线。

1.1 热等静压粉末冶金技术的发展

在技术方面,西方国家已经实现了钛合金材料性能优化,并把研究重点转移至成形过程的致密化机理、致密化规律、复合构件的制备中。

为便于研究,对粉末颗粒体系有以下三个基本假设和共识[8]。

(1)二相混合

从宏观上看,粉末体是由大量微粒组成的不连续体系,服从一般统计规律。但从微观上看,这一体系由性质完全不同的粉末颗粒相和空隙相混合组成。粉末致密化的实质是空隙相减小直至消失的过程,粉末颗粒的表面能是其致密化行为的主要驱动力。

(2)质量守恒

致密化过程中,粉末体发生明显的体积收缩,因粉末颗粒本身不可收缩,其整体的减小等于气孔体积的降低,而粉末体的质量保持不变。在致密化过程中,粉末体相对密度的增大等于其相对体积的减小。

(3)宾汉姆(Bingham)体变形模型。

晶体粉末在高温高压下变形时,其行为不服从纯牛顿粘性流体的流变规律,而是接近一种非牛顿流体-宾哈姆体的塑性流动特征。在热等静压粉末体时,当粉末粒子接触面上承受的切应力超过其临界切应力的时候,粉末将产生塑性流动。同时粉末整体发生收缩,致密度提高。

通过对热等静压致密化机理的研究,把致密化过程的作用机制分为三类,即粒子靠近重排机制、塑性变形机制和扩散蠕变机制,并认为这三种机制相互影响,在不同收缩阶段,由不同机制占主导地位[9]。其中,塑性变形机制是高温高压下粉体致密化的最主要机制,而粉末颗粒重排和扩散蠕变机制只对致密化过程的前期和后期起到较为显著的作用,这已得到了广泛的认可,并应用于指导热等静压过程的分析和工艺参数设置[10]。

在研究致密化机理的同时,西方国家也开展了致密化规律的研究,其目的是揭示钛合金粉末坯在热等静压过程中的收缩变形规律,为净成形制造奠定基础。但粉体的致密化规律是非常复杂的,涉及复杂的非线性力学过程:

(1)其模型不同于流体,也不同于致密体;

(2)热等静压过程属于大应变、非线性变化过程;

(3) 成形过程中粉末与粉末、粉末与模具之间处于动态的接触过程中;

(4) 粉末固结和能量迁移机制复杂,难以应用数学解析法求解。

在研究初期,研究人员主要依靠经验数据,通过反复试验的方法来优化包套结构,这种方法需要消耗大量的人力物力,且周期较长。

近年来,随着计算机技术的发展,以及 PRO/E, SolidWorks, Marc 等 CAD/CAE 软件的日益完善,通过对有限元建模,并采用计算机运算的方式对 HIP 过程进行模拟成为研究热点。该方法以工程经验和材料热物理参数为基础,通过产品本构方程运算来优化产品包套设计和工艺参数选择,缩短了周期,并极大的降低了研制费用,该技术的发展为钛合金热等静压粉末冶金的工程化和实用化奠定了基础[11]。

HIP 过程的模拟运算可以归纳为微观和宏观两种方法:微观方法是利用材料属性和工艺参数建立速率解析方程,以预测 HIP 过程中的变化规律和金属零件的最终成形质量;宏观方法则是对经典塑性理论进行适当修正,建立适合粉末材料的应力应变方程。Helle 采用微观方法,在考虑蠕变和扩散条件下,对粉末的致密化机理进行了研究,并针对不同的致密情况分别提出了相应的致密化速率方程[12];Ales Svoboda 等人把粉末体假设为连续介质模型,在此基础上提出了一种黏-弹塑性本构方程,并采用此模型对金属粉末的成形过程进行了模拟[13];Abouaf 等人对粉末压缩过程进行了细微的研究,并提出了 Abouaf 黏弹塑性本构方程[14];Haggblad 与 Li 提出了一种基于连续介质理论的热等静压微观模型,并对两种典型零件的成形过程进行了数值模拟,预测结果与实际情况较为吻合[15];据报道,伯明翰大学的研究人员已经将钛合金净成形构件的成形精度控制在 2%以内,并通过该技术实现了航空发动机用钛合金外涵缩比件的研制[7, 16]。

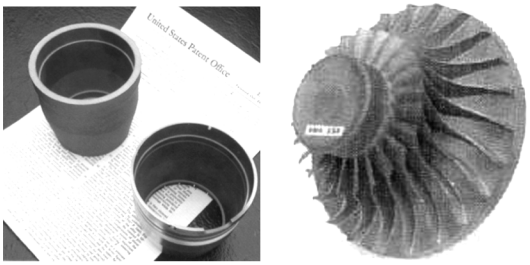
1.2 热等静压粉末冶金技术的工程化

作为一种重要的材料制备及成形技术,钛合金热等静压粉末冶金技术在国外已有广泛的应用,是材料研制与处理,提高材料性能的一种先进生产工艺与手段,并已成为高性能材料生产中一项不可或缺的实用技术。随着该技术的成熟,该技术在西方国家的研究和应用主体已经由科研院所转移到相应的公司进行,并已经在多家公司实现了工程化应用。

从工艺路线来说,该技术在西方国家主要有两种

典型工艺路线:(1)先热等静压致密,然后通过等温锻造或超塑性锻造成形的方式实现构件制备;(2)直接热等静压成形。第一种工艺主要被美、英、法等国家采用。第二种方法主要被俄罗斯所采用。

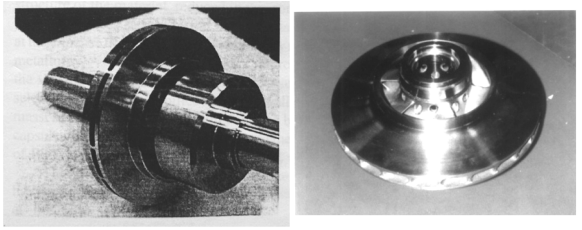
早在 1956 年,美国通用电器公司就采用热压海绵钛的方法,生产出 GET73 涡轮喷气发动机轴承座毛坯,其成本与锻件制品降低约 25%[17]。美国格鲁曼宇航公司用陶瓷膜生产了 F-14 战斗机的钛合金内支撑杆托构件,材料利用率由铸锻工艺的 20%左右提高到 50%以上[18]。近年来,随着该技术的成熟,美国的 Bodycote、Crucible、ADMA、Pratt and Whitney 等公司已应用该技术生产出各种导弹武器用钛合金部件,如 Sidewind 导弹粉末钛合金头罩、F107 巡航导弹发动机粉末钛合金叶轮等(图 1)。俄罗斯和法国用粉末冶金技术生产氢氧发动机用高性能钛合金氢泵转子(图 2)。



(a) 头罩 (b) 叶轮

图 1 Sidewind 导弹粉末钛合金头罩和 F107 巡航导弹发动机粉末钛合金

Fig.1 The Ti alloy bow cap of Sidewind missle and impeller of F107 cruise missile



(a) Vinci 发动机转子 (b) VT5-1 kt 转子

图 2 Vinci 发动机用和 VT5-1 kt 合金制造的粉末钛合金氢泵转子

Fig.2 Ti alloy hydrogen pump rator

此外,由于粉末冶金技术在大尺寸复杂形状构件制备方面的优势,国外也开展了大量的研究,并已经实现了工程化的应用。例如,美国 Crucible 公司研制生产的 F-14A 驾驶舱框架,整体尺寸达到了 1 m×1.2 m,该技术的突破为解决传统工艺设备的制造能力低、成本高的问题提供了一种可行的途径。同时,该技术也已实现了发动机外涵的整体制备(图 3)。

前苏联早在 20 世纪 70 年代就开展了粉末钛合金技术的研究,并实现了整体复杂形状的粉末钛合金氢泵涡轮,并在 RD-0120 发动机上得到了应用。此外,该技术也应用于整体 VT5-1KT 合金燃料供给倒流装置中,其性能和可靠性均优于传统工艺。

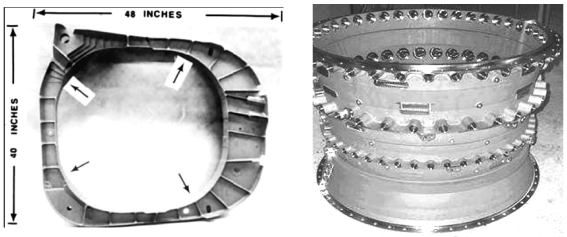


图 3 F-14A 驾驶舱框架及发动机机匣

Fig.3 The cockpit frame of F-14A and the crankcast

2 国内钛合金热等静压粉末冶金技术的研究现状

国内在热等静压技术及应用方面发展较晚,与国外还有较大差距。近几十年来,由于型号需求的牵引和推动,国内多家单位对钛合金热等静压粉末冶金技术也进行了大量的研究,如华中科技大学、中科院沈阳金属研究所、北京航空航天大学、航天材料及工艺研究所等单位。

华中科技大学的史玉升等通过热等静压技术尝试了 Ti6Al4V 整体叶盘样件的制备,对样件的组织分布、性能指标、尺寸精度等进行了探讨,认为该技术在难加工构件制备方面具有明显的经济优势和技术优势[19];北京航空航天大学的郎利辉等人通过 Marc 软件模拟了钛合金成形过程中的密度分布和压力分布情况,对包套设计进行了结构优化,探讨了最佳的成形工艺参数,并实现了高致密度样件的制备,对比试验结果表明,模拟运算的结果与实际结果相近,可以此为依据指导产品工艺方案设计[20-21];中科院金属所的徐磊等人对钛合金粉末的热等静压过程进行了分析,对成形件的组织、包套的影响进行了讨论,并制备了汽车连杆、薄壁壳体典型样件[22]。

航天材料及工艺研究所在粉末冶金技术领域开展了多年的研究。在十五、十一五、十二五等课题的支持下,通过型号牵引,在技术储备和生产能力建设方面均实现了跨越式发展。对原材料制备、选用、检测、热等静压工艺参数优化、复杂结构件近净成形技术等方面都开展了较为系统的研究,并取得突破,逐步掌握了高品质钛合金预合金粉末的制备技术、优化了粉末钛合金的性能,突破了粉末冶金构件的变形控制技术,建立了详细的企业标准,制定了完善的工艺规程,实现了各类构件的制备和型号中的批量应用。

2.1 原材料粉末的选用和优化

预合金粉末是粉末冶金工艺的基础,但国内尚未形成相应的技术标准。为此,航天材料及工艺研究所开展了系统的粉末制备及选用研究,所制备粉末如图 4 所示。通过工艺方法对比和成形性能验证,明确了

预合金粉末的成分控制、夹杂物控制、粒径分布等关键因素,掌握了粉体洁净度和力度分布对材料性能的影响规律,形成了热等静压粉末冶金用粉末技术标准,并应用于型号的研制生产中。

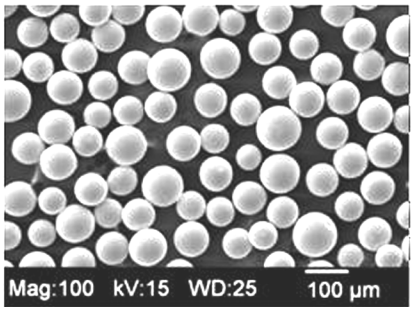


图 4 高品质钛合金粉末

Fig.4 High-quality Ti alloy powder

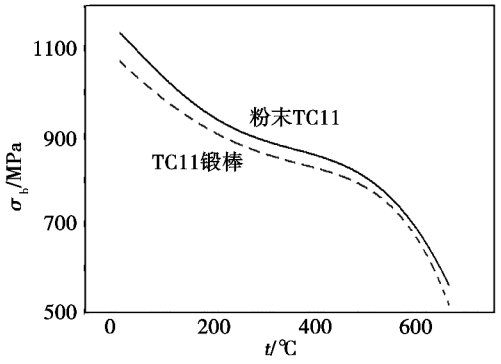
2.2 热等静压粉末冶金结构件的性能

目前,航天材料及工艺研究所已经实现了全致密钛合金构件的制备,完成了粉末钛合金组织和性能的优化,材料的力学性能全面达到锻件水平(表 1)。图 5 为粉末钛合金与锻造钛合金的强度及模量的对比。

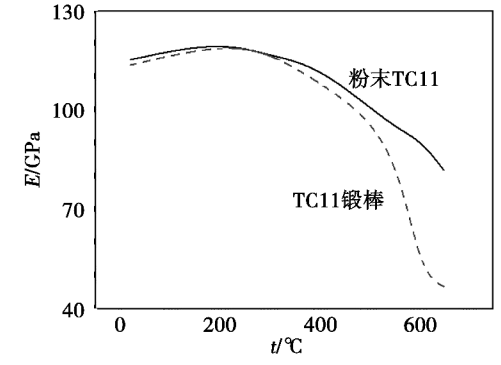
表 1 材料的力学性能

Tab.1 Mechanical behavior of PM alloys

材料	σ_b/MPa	$\sigma_{0.2}$/MPa	δ_5/%	ψ/%
精铸:GJB2896A—2007	≥ 835	≥ 765	≥ 5	≥ 12
锻棒:GB/T2965—1996	≥895	≥825	≥10	≥25
粉末 TC4	965	890	18.0	43.5



(a) 强度



(b) 弹性模量

图 5 材料强度及弹性模量的对比

Fig.5 Comparation of strength and modulus

从图中可以看出,在材料服役的各个温区,粉末钛合金的强度和弹性模量均比锻造钛合金要高。在温度高于 500℃后,材料弹性模量的对比差距更加明显,这有利于保持材料在高温区间的维形能力。

2.3 近净成形及其工程应用

针对型号结构件的需求,完成了成形过程的变形控制、芯模快速去除技术、产品批量化生产等技术的研究,实现了该技术在型号中的大规模应用。目前,热等静压粉末钛合金已经形成了舵翼骨架类、舱体类和异型结构类三大产品体系,部分产品实现了大规模批生产。

舵翼骨架类零件结构如图 6 所示,该工艺已经能够制备 2 400 mm 量级产品的生产,产品筋条部位均为净成形,极大提高了产品的材料利用率,已经应用该技术实现了数千件产品的生产。

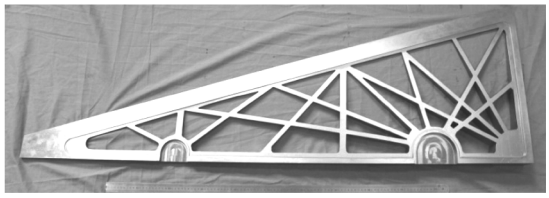


图 6 粉末钛合金骨架类零件

Fig.6 PM Ti alloy frame of rudder

热等静压粉末冶金工艺能够制备具有各种复杂内部结构的舱体类零件,如图 7 所示。该技术有利于实现构件的整体成形。与传统工艺相比具有尺寸精度高、结构适应性好的优点。

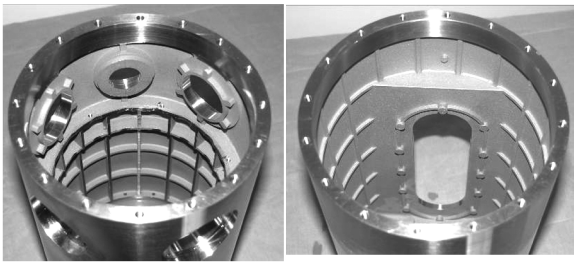


图 7 粉末钛合金舱体类零件

Fig.7 PM Ti alloy of cabin product

此外,粉末冶金工艺也被应用于各种异形、复杂结构构件的制备中,如图 8 所示的各类叶轮、支架和喷管。对于这类零件,该工艺能够克服传统工艺所存在精度低、变形量大等问题,实现产品的净成形,成形精度可达±0.2 mm。这些构件的力学性能可全面达到锻件指标,且尺寸精度可达到优于±0.2 mm 的水平。目前,航天材料及工艺研究所的粉末冶金结构件产品已经在国内率先实现了该技术的突破,形成了舵翼骨架类、舱体类和异型结构类三大产品体系,并实现了部分产品的大规模批生产,广泛应用在航空、航天和航海的多个型号中。

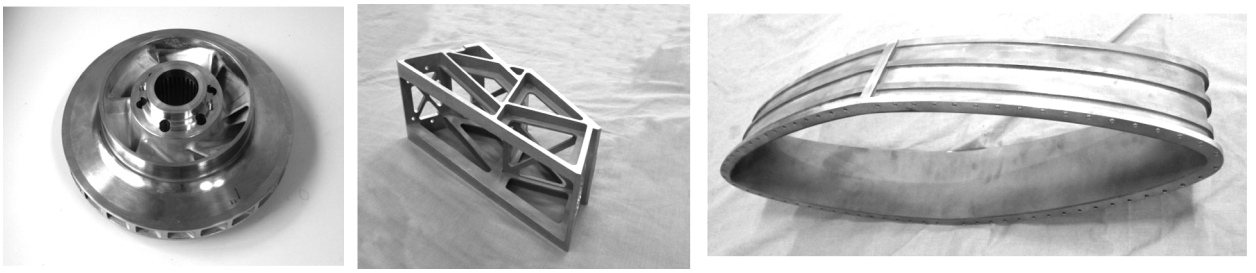


图 8　钛合金叶轮、支架和喷管

Fig.8　Ti alloy cabin, impeller and nozzle fabricated by HIP

3　结语

综上所述,由于制造难度大、费用高等问题,钛合金的制造技术受到各国研究人员的重视。热等静压粉末冶金技术被认为是解决这一问题的可行途径受到研究人员的广泛关注。

西方国家起步较早,在这一领域已经有多年的研究经验,在理论基础、工程应用方面都走在世界前列,其研究重心已转移至构件的净成形,并取得了一系列的成果,实现了该技术的工程化应用。

近年来,国内多家单位也开始追赶西方的脚步,展开了该领域的研究。其中,航天材料及工艺研究所已经取得了部分突破,并在多个型号中得到应用。

参考文献

[1] ANOSHKIN, DEMCHENKOV. Material science and technological aspects of rapidly solidified titanium alloy production [J] .Materials Science and Engineering A,1998(243):263~268.

[2] D, E. Development in titanium alloy casting technology [J].Journal of Metals,1983(2):56-63.

[3] ARCELLA F G. Producing titanium aerospace components using laser forming[J].Journal of Metals,2000,52:28-30.

[4] YANG C.Microstructures and tensile properties of hot isostatic pressed Ti4522XD powders[J]. Materials Science and Engineering A,2012,534:268-276.

[5] 周科朝, 黄伯云, 刘咏, 粉末冶金陶瓷模-热等静压技术的研究[J].粉末冶金材料科学与工程, 1998,3(1):14-17.

[6] LOGRASSO B K.Densification of Titanium powder during Hot Isostatic Pressing[J].Metallurgical and Materials Transactions,1988,A19:1767-1773.

[7] YUAN W X.Computer modelling and tooling design for near net shaped components using hot isostatic pressing[J].Journal of Materials Processing Technology.Journal of Materials Processing Technology,2007,182:39-49.

[8] 肖志瑜.粉末冶金温压的致密化机理[J].粉末冶金材料科学与工程, 2006,16: 85-90.

[9] JAMES. Isostatic pressing technology[J]. Applied Science Publishers,1983:239-250.

[10] DELO D P.Early stage consolidation mechanisms during hot isostatic pressing of Ti-6Al-4V powder compacts[J].Acta Materialia,1999,47:2841-2852.

[11] DELO D P, R E D.Modeling of hot isostatic pressing and hot triaxial compaction of Ti-6Al-4V powder[J].Acta Materialia,1999,47:3159-3167.

[12] A S, H.Hot isostatic pressing diagrams[J].Acta Materialia,1985,33:2163-2174.

[13] SVOBABA A.The effective stress function algorithm for pressure-dependent plasticity applied to hot isostatic pressing[J]. Journal of Number Meth Engineering,1998,43:587-606.

[14] ABOUAF M.Finite element simulation of hotisostatic pressing of metal powders[J].International journal for numerical methods in engineering.1988,25:191-212.

[15] HAGGBLAD H.A micromechanical based constitutive model for finite element simulation of hot isostatic pressing of powder[J].Computing Methods Application,1995,128:191-198.

[16] HUANG A.The influence of pressure on solid-state transformations in Ti-46Al-8Nb[J].Scripta Materialia, 2007, 56:253-256.

[17] FHSF M Q.Titanium powder metallurgy science[M].in Technology and applications,2015.

[18] EYLON D.Titanium powder metallurgy components for advanced aerospace applications[P].1983.

[19] 吴言.Ti6Al4V 合金整体叶盘热等静压近净成形研究[J].稀有金属材料与工程, 2012,44:360-364.

[20] 郎利辉.钛合金热等静压模拟本构关键参数确定及工艺优化[J].塑性工程学报, 2011,18:34-38.

[21] 喻思.TC11 钛合金粉末涡轮盘热等静压成形数值模拟研究[J]. 锻压技术, 2015,40:115-121.

[22] 徐磊.Ti-5Al-2. 5Sn 合金粉末热等静压压坯的致密化行为及性能[J].钛工业进展,2011,28:19-23.