

钛合金粉末热等静压技术的发展现状及展望

李欣^{1,2}, 龚焱³, 刘时兵^{1,2}, 史昆², 刘鸿羽², 李重阳²

(1. 机械科学研究总院集团有限公司, 北京 100044; 2. 沈阳铸造研究所有限公司, 高端装备轻合金铸造技术国家重点实验室, 辽宁沈阳 110022; 3. 北京航天动力研究所, 北京 100076)

摘要: 概述了钛合金粉末冶金等静压技术的发展, 简要介绍了钛合金粉末冶金的工作原理和技术流程, 阐述了国内外发展现状和已经取得的研究成果, 并总结了现有技术所遇到的问题以及可能的解决方案, 展望了未来的发展方向。

关键词: 钛合金; 铸造; 粉末冶金; 等静压技术

钛作为一种具有优良防腐性能金属, 金属钛以及钛合金广泛被应用在航空航天和船舶等领域^[1]。合金中加入金属钛可以降低其密度, 提高其比强度, 而且还可以使合金与复合材料有良好的相容性^[2]。因此, 钛及钛合金的发展备受广大科研工作者的关注^[3]。

在我国, 钛和钛合金材料已经广泛工业化应用, 而且目前的研究表明, 钛合金材料仍然有其发展进步空间, 其性能有待于进一步提高。但是, 钛合金相较于传统合金在应用方面有其局限性, 主要体现在钛合金材料原料成本较高、钛和钛合金熔点高难以冶炼、钛合金强度高难以机械加工等方面。其核心问题是钛合金的成形, 基于此, 世界各国的科学家提出了许多针对解决上述问题的工艺方法^[4]。

锻造和铸造是钛合金产品主要的传统成形工艺技术之一^[5]。通过应用铸造工艺, 钛合金可以实现一次成形, 达到和产品相近的尺寸, 只需要少量的机械加工即可达到产品要求。但是铸造工艺材料利用率太低, 近50%的材料会被浪费掉。而且钛合金铸件也存在铸造的常见缺陷, 比如疏松、缩孔、夹杂和偏析现象, 从而导致铸件难以达到理想的力学性能。而对钛合金锻造工艺来说, 虽然可以达到较高的力学性能, 但其材料利用率较铸造更低, 仅为15%左右, 而且还存在加工成本较高、生产难度大、生产周期长等缺点^[6]。

为了解决上述钛合金传统工艺所存在的问题, 广大科研工作者另辟蹊径, 提出了钛合金粉末热等静压成形技术^[7]。热等静压 (Hot Isostatic Pressing, HIP) 是一种粉末冶金的常用技术^[8]。采用粉末成形, 可以降低钛合金的成本, 提高钛合金的利用率, 从两方面解决了钛合金工艺技术所存在的问题^[9]。

粉末热等静压 (HIP) 技术是一种可以同时达到致密化和净近成形效果的方法^[10-11]。粉末热等静压 (HIP) 技术已经在很多领域得到广泛的应用, 如TiC等硬质合金的烧结制备及成形后处理^[12-13]、钛钎等高温合金的消除内缺陷处理^[14-15]、大型铸件制品的孔洞变形机制和缺陷修复^[16-17]。

采用钛合金粉末冶金的工艺技术, 可以有效解决传统钛合金加工工艺所存在的问题^[18]。对学术界而言, 钛合金粉末冶金技术可以消除缺陷, 有效提高钛合金试件力学性能, 以达到高端装备的高要求^[19]; 对企业来说, 钛合金粉末冶金技术可以降低生产成本, 提高生产效率, 在制造出高性能产品的同时创造更高的效益。

1 工作原理和技术流程

1.1 钛合金粉末冶金工作原理

钛合金粉末冶金主要采用热等静压技术, 此技术主要工作原理如下所述。

作者简介:

李欣 (1995-), 男, 硕士研究生, 主要从事钛合金铸造和粉末冶金方面的研究。电话: 18540346482, E-mail: 502144296@qq.com

中图分类号: TG172

文献标识码: A

文章编号: 1001-4977(2020)

04-0335-07

基金项目:

国家科技重大专项 (项目编号 2018ZX04044001); 辽宁省科技计划 (项目编号 2018304027)。

收稿日期:

2019-10-12 收到初稿,

2019-11-19 收到修订稿。

首先将合金制粉装入设计制作好的包套内,将包套放入热等静压机内,在封闭的环境下,通入惰性气体,并加压,在加压的同时升温,达到高温高压的效果。此时容器内的包套或者工件承受着来自各个方向均匀的压力,作用在每个表面的压力与其承压面积成正比。在高温高压的环境下,包套和工件会软化,并在压力的作用下收缩变形,消除内部缺陷,使产品变得更加致密。

通过热等静压技术处理制得的产品,除了力学性能上的优点外,还具有更好的拉伸强度和高的屈服强度。表1所示为钛合金铸态和热等静压处理后的力学性能数据,可以看出,经过热等静压处理后,其塑性有较大提升。

热等静压技术可以从合金粉末源头控制粉末尺寸和成分,对合金的烧结性能有很大的优势^[20]。钛合金化学活性高,非常容易和其他物质发生反应。因此,在热等静压过程中要严格控制容器的密封性,防止产品和空气及其他物质发生反应,从而达到高性能高质量的结果。高强度高性能结构件的热等静压成形是目前HIP技术发展的重点^[21],并结合了有限元分析模拟计算,例如火箭发动机、叶轮等高性能钛合金部件对材料性能和加工精度的要求极高,而且内部结构很复杂,较难成形。美国、法国、俄罗斯等国家陆续开发了模具CAD/CAM技术,已经生产了高性能、低成本的粉末冶金钛合金、高温合金涡轮盘等航空航天用零件^[22-23]。

1.2 钛合金粉末冶金技术工艺流程

首先制备钛合金粉末,设计制作好包套模具,再将钛合金粉末装入包套中,在振动台上振动紧实并除气,将装好粉料的包套进行加热去除水分和空气,并

进行焊接出气口密封,然后放入热等静压机进行热等静压,热等静压设备由以下各部分组成:加热炉、高压气体、真空处理设备以及水冷系统等^[24]。

研究表明, HIP成形工艺参数分别是:加热温度一般为金属熔点的0.7~0.9倍^[25],设备内三向高压通常处于90~100 MPa的范围,等静压处理时间为2~5 h^[26]。通过查阅航空材料手册^[27],得到Ti-6Al-4V铸造钛合金一般应用的热等静压工艺为:氩气氛围下,加热温度为 $(920 \pm 10)^\circ\text{C}$,压力为100~140 MPa,等静压处理时间为2.5 h左右。杨伟光^[28]、娄贵涛^[29]、黄俊^[30]等人研究了在热等静压(HIP)处理过程中的温度、时间、压力等工艺参量,发现在经过热等静压处理后,会出现不同程度的组织变化,相对于原始组织,其晶粒尺寸变大,在消除缺陷的同时,要尽量避免这些情况。

热等静压工艺完成后去除包套和模具,再进行收尾的后处理加工,即可得到成品^[31]。如图1所示,在此过程中,包套设计制作和钛合金粉末质量较为重要,通过HIP工艺,可以得到致密化的优良产品^[32]。

表1 钛合金铸态和热等静压态力学性能数据(平均值)
Table 1 Mechanical properties of as-cast and HIP treated Ti alloys

合金	状态	R_m/MPa	$R_{p0.2}/\text{MPa}$	$A/\%$	$Z/\%$
TC4	铸态	940	790	8	17
	HIP	870	780	14	21
TA7	铸态	840	750	9.5	27.0
	HIP	795	745	10.0	21.5
TA15	铸态	980	830	6.5	12
	HIP	900	815	16	32

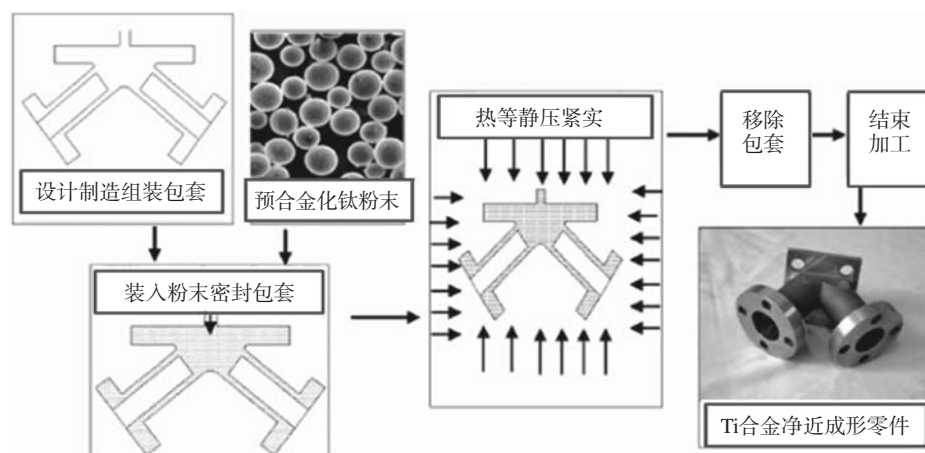


图1 高性能粉末钛合金 HIP 近净成形工艺过程

Fig. 1 Procedure of near-net shaping by using high performance titanium alloys and HIP

2 国内外研究现状

2.1 国外研究及应用发展

粉末钛合金热等静压 (HIP) 技术相较于传统钛合金加工工艺有很大优势, 因此受到国外科研工作者的重视。美国在航空航天工程和军事领域大力研发粉末钛合金的技术^[33]。相比于其他国家, 在粉末钛合金方面, 美国一直处于领先地位。

1956年, 美国通用电气公司就通过热压海绵钛粉生产了GET73涡轮喷气发动机轴承毛坯, 最终产品仅通过少量的精加工获得。与通过机械加工成相同产品的锻料相比, 其成本降低了25%~30%^[34]。

麦道公司将粉末冶金HIP成形工艺生产的F15战斗机的TC4合金龙骨接头与锻造工艺进行了比较, 结果显示, 传统的锻造工艺需要2.1 kg钛合金才能生产净重0.2 kg的龙骨接头, 粉末冶金HIP成形工艺仅需0.5 kg钛合金粉末, 材料利用率由9.5%增加到40%^[35]。

Synertech PM公司作为一家专业生产粉末钛合金航空部件的制造公司, 拥有最先进的设备, 包括真空制粉、无污染真空装粉、高性能包套制备、热等静压设备, 以及合格的质量控制过程, 并且使用计算机模拟设计, 生产了航天发动机、航空机翼、压缩机等电气化部件, 取得了净近成形高性能产品的成就, 实现了从模拟和试验到工业化生产的飞跃。图2为该公司设计制造的钛合金航天发动机叶轮, 图3为该公司生产的发动机大型框部件^[36]。

法国Safran Aircraft Engines公司为解决生产目标产品相关问题开发了ISOPREC®钛合金粉末热等静压技术, 其研究制造的钛合金低温叶轮在液氢涡轮泵中使用, 此类钛合金产品在-253℃低温环境下使用, 并且服役速度为550 m/s的高速, 通过使用钛合金粉末热等静压技术, 代替传统锻造机械加工工艺, 加工时间大大缩短^[37]。

美国Crucible公司通过HIP成形工艺, 生产制造了粉末钛合金F-18战斗机引擎固定支撑架。研究表明, 这种形状较为简单的产品成本主要取决于生产规模和粉末成本。当进行大规模生产时, 成本只有常规方法的33%^[34]。

全俄轻金属研究院研发制造了PD14民用航空发动机的压缩机第9级盘, 钛合金材料牌号为VT25UP, 其盘体采用热等静压技术进行净近成形, 尺寸较大, 所留的机械加工余量很少。经过检测得出, 其强度和塑性相对原始铸件均有较大提高。图4所示为制造过程中的包套和最终成形的样品^[38]。

钛合金粉末HIP的其他应用还有: 战斧巡航导弹F107发动机的压气机转子, PW公司F110发动机的连杆, F107巡航导弹的发动机叶轮, Stinger防空导弹的弹头壳体和Sidewind导弹发动机头罩等^[39]。

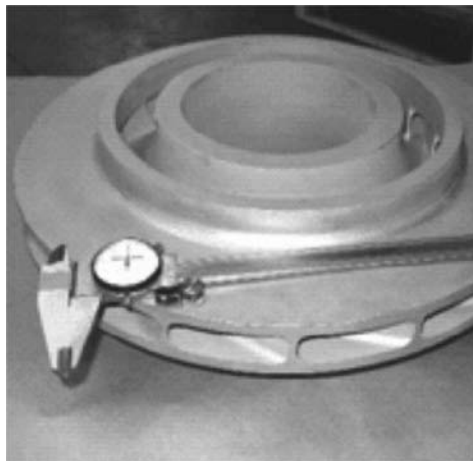


图2 Synertech PM公司生产的火箭发动机叶轮
Fig. 2 Rocket engine impeller produced by Synertech PM company



图3 Synertech PM公司开发的Ti-6Al-4V发动机大型框架部件
Fig. 3 Large engine frame parts made of Ti-6Al-4V developed by Synertech PM company

2.2 国内研究发展现状

鉴于航空航天领域对钛合金的庞大需求和高质量要求, 为了解决钛合金成本高的问题, 我国科研工作者在钛合金粉末冶金方向做了许多工作, 也取得了诸多成果。使用钛合金HIP成形技术, 在我国航空航天高端制造领域, 多种型号的产品已经研制成功且性能良好。

为了使ZTC4钛合金铸件具有更好的力学性能, 赵嘉琪^[40]等人系统地研究了热等静压温度、时间、压力等工艺参数对ZTC4钛合金力学性能的影响。结果表明, 热等静压工艺参数变化对ZTC4钛合金室温拉伸性能、弯曲性能有影响, 但对冲击性能影响不大。在选择合适的工艺参数时, 不应选择过高的压力, 时间不宜过长, 温度应该较高一些。而且得出了ZTC4钛合金的最优热等静压工艺为: 温度(920±10)℃, 压力(120±10)MPa, 时间1~2h。

叶呈武^[41]等人研究了两次热等静压对TC4钛合金显微组织的影响。结果表明, TC4钛合金主要以扩散的形式在二次HIP过程中进行组织的致密化, 在此过程中, 倾向于形成等轴块状 α 相, 并且原始组织中的片状 α 相层片间距会增大。和第一次热等静压相比, 第二次热等静压的致密化过程较为缓慢, 其内部孔洞较大的会形成不均匀组织, 应尽量在第一次热等静压时完成致密化, 以获得细小均匀的致密组织。

陈建彬^[42]在研究Ti6242高温钛合金的组织 and 性能时, 对其试样进行了热等静压处理, 相关工艺参数为: 温度(920 ± 10) $^{\circ}\text{C}$ 左右, 压力为(125 ± 5) MPa, 经过2 h的保温保压处理后冷却。检测结果表明, 铸造时产生的缩松、缩孔等缺陷在热等静压后都可以有效地消除, 而且可以起到细化晶粒的效果, 处理后组织变为均匀的魏氏组织, 极大地改善了合金的力学性能。经过处理后的合金抗拉强度为852 MPa, 最大拉应变约为6.32%。

戚运莲^[43]等人在研究ZTi600铸造钛合金的组织 and 性能时, 对合金做了热等静压处理, 结果表明, 在进行热等静压处理后, 其针状、板条状的魏氏组织有所变化, 晶粒尺寸逐渐减小, 部分组织有等轴趋势。宏观方面, 合金的塑性有很大的提高, 当温度为900 $^{\circ}\text{C}$ 时, 伸长率提高1倍, 当温度为950 $^{\circ}\text{C}$ 时, 伸长率提升2倍。由此可以得出, 热等静压温度越高, 其塑性提升越大。

华中科技大学的魏青松、薛鹏举^[44]等结合模具工艺技术, 使用钛合金粉末热等静压的方法, 一次性整体成形出了叶盘中的复杂零件, 试验结果显示其致密度达到99.5%, 同时其抗拉强度检测结果表明其性能优于普通铸造工艺生产的产品。

北京航空航天大学的薛勇、王刚^[45]等人采用Shima模型, 使用数值模拟的方法模拟了钛合金粉末HIP过

程, 针对航空航天领域各种零部件的制造, 对比不同工艺参数, 选取最佳结果, 得出了温度、压力最优工艺参数曲线。并以此为指导, 试制了实际试样, 模拟结果对比试验结果表明, 模拟仿真的结果与试验吻合良好, 可用于指导产品工艺方案设计和具体生产参考^[46]; 中国科学院金属研究所的徐磊、邬军^[47]等人使用Ti-5Al-2.5Sn合金粉末进行了热等静压处理, 研究了钛合金粉末在HIP过程中的致密化行为, 试验表明, 钛合金粉末在包套内会有不均匀变形, 在钛合金粉末的致密化过程中, 不同部位的收缩比例不同。因此, 包套和内部型芯的结构设计非常关键。

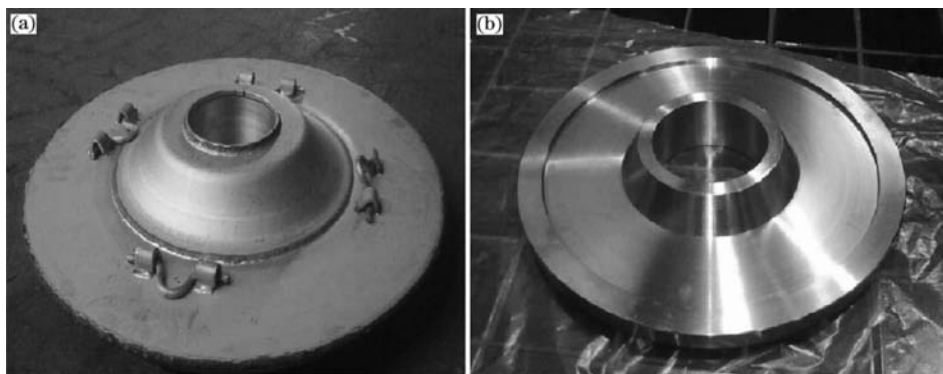
图5是沈阳铸造研究所^[48]用TA15粉末冶金包套和生产的合金锭。图6是制造完成的某结构壳体部件, 经X射线和荧光检测, 其内部结构和产品质量均较好。

3 粉末钛热等静压面临的问题和对策

3.1 面临的问题

航空航天领域对钛合金的需求很大, 而且质量要求很高。钛合金粉末冶金具有原材料利用率高、成形效率高、力学性能好等优点, 但在实际应用方面仍有许多问题需要解决。

首先, 钛合金粉末的价格比较贵, 在产品成本控制方面会有很大的限制, 尤其对于军工行业, 关键部位钛合金用量较大。其次, 在HIP工艺技术过程中, 设备的使用折旧费用很高, 为了生产制造性能最佳的钛合金粉末冶金工件, 就要使用国外进口的最新技术的热等静压机, 不仅费用较高, 而且由于国内进口机器数量比较稀少, 机器使用时间很紧张。最后, 钛合金粉末冶金在生产过程中, 钛合金粉末装入包套后, 只能通过控制包套的尺寸来间接控制产品的尺寸。然而在热等静压机中, 包套和其中成形的粉末在高温高压下都会发生收缩, 虽然理论上可以大致计算其收缩程



(a) 包套

(b) 样品

图4 全俄轻金属研究院制备的HIP压缩机盘的近净成形包套和样品

Fig. 4 Near net shape package and sample of HIP compressor disk prepared by Russia Light Metal Research Institute

度，但在实际试验和生产过程中还是很难做到精确控制产品尺寸。因此，在产品成形尺寸控制方面也有许多难题亟待研究解决。

3.2 解决问题的方向

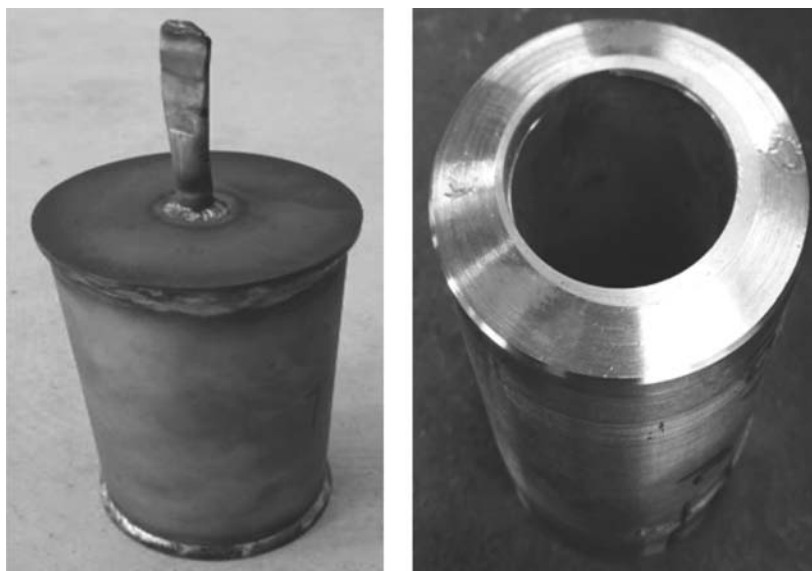
随着理论和技术的发展，钛合金粉末的制备成本较之前已经大大减少。在使用国外进口机器的基础上，优化工艺，提高生产效率，提高单位装炉量，充分利用炉体空间，HIP工艺成本就能达到可接受的水平。同时还要研发我国自己的热等静压机，达到高新技术不再受制于人的目标。对于产品成形尺寸的控制，可以从两方面入手，一是优化HIP工艺流程，建立更为符合试验和生产的理论模型，预测其收缩规律；

二是通过多次试验，精确记录数据，总结规律。通过理论计算和试验总结相结合，就可以解决产品成形尺寸的难题。

在试验和生产过程中，还应注意以下操作。

(1) 在钛合金粉末制备时，一方面尽量做到干净的环境，无污染的工艺过程，以保证钛合金粉末的纯净；另一方面要注意在控制杂质的基础上，做到控制粉末的大小和形状，确保每一批生产的钛合金粉末的均一稳定性。

(2) 包套的制作，使用电脑建模的方式，优化设计效果更好的包套模型，并提前考虑在热等静压过程中的收缩变形，做好预尺寸设计，尽量使在热等静压过程后达到精确尺寸或者接近精确尺寸。

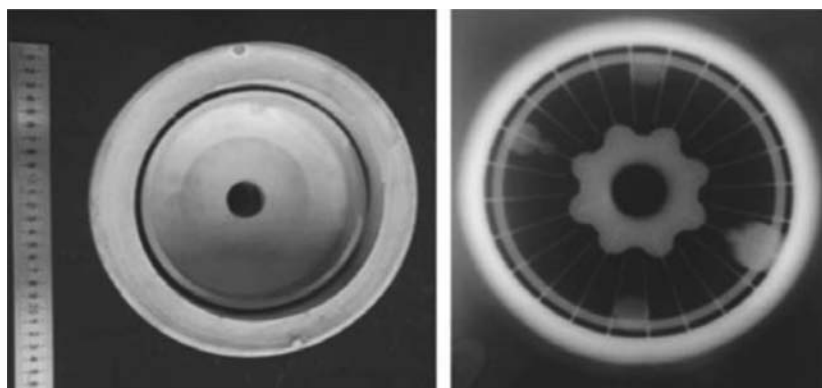


(a) 包套

(b) 合金锭

图5 TA15粉末冶金包套和合金锭

Fig. 5 TA15 powder metallurgy coating and alloy ingot



(a)

(b)

图6 带内筋结构壳体部件

Fig. 6 Shell parts with internal reinforcement ribs

- (3) 在装粉的过程中, 要保证和粉末制备时一样的干净环境, 减少外界环境的影响, 避免杂质掺杂其中。
- (4) 在包套密封时, 要保证其密封性, 用焊接的方式要保证质量。
- (5) 在热等静压过程中, 要严格遵守工艺流程, 以达到最优的性能效果。
- (6) 产品出炉后, 要再次校核产品尺寸, 确保产品尺寸的精确性。采用X射线、荧光等手段对产品进行检测, 确保产品的优质性。

4 结束语

针对钛合金粉末热等静压成形技术的特点及生产难点, 还需要在静压设备和工艺等方面进行研究改进。

(1) 设备方面: 研究改进现有热等静压设备, 生产出容积更大的热等静压炉, 从而能制备大尺寸的钛合金铸件和产品。

(2) 工艺方面: 在理论模拟和试验资料的基础上, 探索更佳的热等静压工艺参数, 使产品性能最优化, 在航空航天领域能有更多的应用。

参考文献:

- [1] 董亭义, 万小勇, 章程, 等. 磁控溅射钛靶材的发展概述 [J]. 金属功能材料, 2017, 24 (5): 57.
- [2] 李红梅, 雷霆, 方树铭, 等. 生物医用钛合金的研究进展 [J]. 金属功能材料, 2011, 18 (2): 70.
- [3] 刘超, 孔祥吉, 吴胜文, 等. 生物医用纯钛的粉末微注射成形工艺研究 [J]. 粉末冶金工业, 2017, 27 (1): 22.
- [4] 佚名. 钛合金粉末热等静压近净成形研究进展 [J]. 金属学报, 2018, 54 (11): 1537-1552.
- [5] 张志雄, 沈军. 初始组织对Ti-6Al-4V合金高温变形机制影响研究 [J]. 金属功能材料, 2017, 24 (5): 50.
- [6] 徐磊, 郭瑞鹏, 刘羽寅. 钛合金粉末热等静压近净成形成本分析 [J]. 钛工业进展, 2014, 31 (6): 1.
- [7] 张殿喜, 周士芸, 张在玉, 等. HIP技术在改善铸件致密化方面的应用 [J]. 粉末冶金工业, 2015, 25 (1): 46.
- [8] 刘慧渊, 何如松, 周武平, 等. 热等静压技术的发展和应 [J]. 新材料产业, 2010 (11): 12-17.
- [9] 张义文. 热等静压技术新进展 [J]. 粉末冶金工业, 2009, 19 (4): 32.
- [10] 王晓林, 赵志龙, 张延生, 等. TC10合金铸造缺陷在热等静压条件下的弥合机理初探 [J]. 铸造, 2011, 60 (8): 731-734.
- [11] 韩凤麟. 热等静压 (HIP) 工艺模型化进展 [J]. 粉末冶金工业, 2005, 15 (1): 12-25.
- [12] 李溪滨, 刘如铁, 赵福安. 热等静压工艺对新型TiC钢结硬质合金组织及磨损性能的影响 [J]. 润滑与密封, 2007, 32 (4): 85-87.
- [13] CHANG S H, CHANG P Y. Study on the mechanical properties, microstructure and corrosion behaviors of nano-WC-Co-Ni-Fe hard materials through HIP and hot-press sintering processes [J]. Materials Science and Engineering: A 2014, 618: 56-62.
- [14] YU Y, CAI Y H, CHEN X H, et al. A high strength and elastic carbon containing near- α Ti alloy prepared by hot isostatic pressing process [J]. Materials Science and Engineering: A, 2016, 651: 961-967.
- [15] MAJUMDARA S, SHARMA I G, RAVEENDRA S, et al. A study on preparation of Mo-0.6Ti-0.2Zr-0.02C alloy by mechanical alloying and hot isostatic pressing, and its characterization [J]. Materials Chemistry and Physics, 2009, 113 (2-3): 562-566.
- [16] 邵冲, 尹法杰, 朱小平, 等. 热等静压对铸件致密化及组织演变机理的影响研究 [J]. 粉末冶金工业, 2016, 26 (2): 63-67.
- [17] DUAN W, YIN Y J, ZHOU J X, et al. Dynamic research on Ti6Al4V powder HIP densification process based on intermittent experiments [J]. Journal of Alloys and Compounds, 2019, 771 (15): 489-497.
- [18] 曲银辉, 姚红, 车洪艳, 等. 热等静压对ZL205A壳体铸件缺陷及力学性能的影响 [J]. 铸造, 2017, 66 (9): 998-1000.
- [19] 史昆, 谢华生, 赵军, 等. 热等静压处理对超低温Ti-5Al-2.5SnELI合金铸造组织与性能的影响 [J]. 铸造, 2009, 58 (7): 659-661.
- [20] 邝泉波, 邹黎明, 蔡一湘, 等. 等离子旋转电极雾化法制备高品质Ti-6.5Al-1.4Si-2Zr-0.5Mo-2Sn合金粉末 [J]. 材料工程, 2017, 45 (10): 39-46.
- [21] 张鹏省, 毛小南, 韩栋. 航空航天用钛合金盘件的开发与应用 [J]. 钛工业进展, 2011, 28 (3): 6-8.
- [22] ANDERS W, MELZER P, GOODIN W. Advances in net-shape power metallurgy [J]. AFRL techn Horizons, 2004, 5 (1): 33.
- [23] BACCINO R, MORET F, PELLERIN F, et al. High performance and high complexity net shap parts for gas turbines: the ISO-PREC powder metallurgy process [J]. Materials Design, 2000, 21: 345.
- [24] 詹志洪. 热等静压技术和设备的应用和发展 [J]. 中国钨业, 2005, 20 (1): 44-47.
- [25] 亚历山大o莫利亚尔, 田金华, 张莎莎, 等. 氯化钛粉制备钛及Ti-6Al-4V钛合金粉末冶金工艺与性能研究 [J]. 南京航空航天大学学报, 2018, 50 (1): 100-104.
- [26] BALASUBRAMANIAN K, GOVINDARAJU M. Simplification of high temperature high pressure equipment and technique for advanced materials processing [J]. Materials Today: Proceedings, 2018 (5): 16158-16164.
- [27] 中国航空材料手册编辑委员会. 中国航空材料手册: 第4卷钛合金铜合金 [M]. 北京: 中国标准出版社, 2001: 193-202.
- [28] 杨伟光, 赵嘉琪, 南海, 等. 热等静压工艺参量对ZTC4钛合金组织的影响规律 [J]. 材料工程, 2011 (9): 25-28.
- [29] 娄贯涛. 热等静压和锻造对ZTC4钛合金组织和力学性能的影响 [J]. 中国有色金属学报, 2010 (10): 753-755.

- [30] 黄俊, 薛鹏举, 蔡超, 等. 两种热等静压工艺对Ti6Al4V合金力学性能影响的研究 [J]. 稀有金属, 2016, 40 (2): 97-103.
- [31] 马雷, 车红艳, 曹睿, 等. 初始相对密度分布对Ti6Al4V粉末热等静压致密化过程影响的数值模拟 [J]. 粉末冶金工业, 2018, 28 (6): 10-14.
- [32] 丁永根, 李萍, 薛克敏, 等. 不同加热制度下TA15钛合金变形组织及微观取向分析 [J]. 稀有金属与硬质合金, 2017 (4): 59-64.
- [33] EYLON D, FROES F, PARSON L. Titanium powder metallurgy components for advanced aerospace applications [C]// Structures, Structural Dynamics & Materials Conference. 2013.
- [34] FROES F H, EYLON D. Powder metallurgy of titanium alloys [J]. Metallurgical Reviews, 2013, 35 (1): 162-184.
- [35] SAMAROV V. Titanium powder metallurgy // fabrication of near-net-shape cost-effective titanium components by use of prealloyed powders and hot isostatic pressing [J]. Titanium Powder Metallurgy, 2015: 313-336.
- [36] 刘文彬, 陈伟, 王铁军, 等. 粉末钛合金的热等静压技术研究进展 [J]. 粉末冶金工业, 2018, 28 (2): 1-7.
- [37] BACCINO R, MORET F, PELLERIN F, et al. High performance and high complexity net shape parts for gas turbines: the ISO-PREC®; powder metallurgy process [J]. Materials & Design, 2000, 21 (4): 345.
- [38] KATUKOV S A, GARIBOV G S. Production of P/M large size VT25UP titanium alloy disks via the as-HIP technique and investigation of their quality [C] //11th International Conference on Hot Isostatic Pressing. Stockholm, 2014: 586.
- [39] 赵嘉琪, 杨伟光, 南海, 等. 热等静压工艺参数对ZTC4钛合金力学性能的影响 [J]. 材料工程, 2011 (10): 42-46.
- [40] 叶呈武, 张绪虎, 王亮, 等. 二次热等静压对TC4合金组织的影响 [J]. 材料热处理学报, 2013, 34 (6): 99-102.
- [41] 陈建彬. Ti6242高温钛合金铸件的组织和性能 [D]. 上海: 上海交通大学, 2015.
- [42] 戚运莲, 洪权, 卢亚锋, 等. 热处理对ZTi600铸造钛合金组织与性能的影响 [J]. 中国有色金属学报, 2010 (S1): 695-698.
- [43] 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.
- [44] 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.
- [45] 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.
- [46] 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.
- [47] 金磊, 祝强, 赵军, 等. 热等静压在钛合金近净成形领域的发展及应用 [J]. 铸造, 2019, 68 (8): 885-891.

Current Development and Prospects for Titanium Alloy Powder Metallurgy Hot Isostatic Pressing Technology

LI Xin^{1, 2}, GONG Yi³, LIU Shi-bing^{1, 2}, SHI Kun², LIU Hong-yu², LI Chong-yang²

(1. General Academy of Mechanical Sciences Group Co., Ltd., Beijing 100044, China; 2. Shenyang Research Institute of Foundry Co., Ltd., State Key Laboratory of Light Alloy Casting Technology for High-End Equipment, Shenyang 110022, Liaoning, China; 3. Aerospace Power Research Institute, Beijing 100076, China)

Abstract:

This paper mainly presents the development of titanium alloy powder metallurgy isostatic pressing technology. The working principle and technological process of powder metallurgy of titanium alloys are briefly described. The development status and research achievements at home and abroad are expounded. The existing technology problems encountered and possible solutions are summarized. Finally, it makes a positive outlook for the future development.

Key words:

titanium alloy; casting; powder metallurgy; isostatic pressing technology