

# 热等静压在钛合金近净成形领域的发展及应用

金磊, 祝强, 赵军, 刘时兵, 丁伟, 敖广阔, 高颖, 宋照伟

(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)

**摘要:** 分析了铸造和粉末冶金等近净成形制造难点, 介绍了HIP技术在难加工材料近净成形制备等领域应用, 重点阐述了HIP技术的特点、原理及其对钛合金零部件组织改善、缺陷消除和性能影响, 总结了HIP技术和装备在钛合金近净成形领域中的最新研究进展和成果, 剖析了HIP技术在钛合金近净成形领域中面临的挑战和未来发展趋势。

**关键词:** 热等静压; 钛合金; 近净成形; 铸造; 粉末冶金

钛和钛合金因其比强度高、抗高温氧化能力和良好的耐腐蚀等性能被广泛应用于航空、航天、船舶等高端装备制造领域。随着上述装备制造领域的快速发展, 对钛合金关键零部件的本身性能、尺寸精度、可靠性要求日益严苛。为满足钛合金高强度、抗氧化、耐高温等性能要求, 成分设计中合金化程度、高熔点元素占比逐渐增高, 这就给钛合金关键零件的制备, 尤其是铸造和粉末冶金等近净成形制造技术带来了更多难题, 容易造成铸件可铸性能下降、铸造缺陷增多, 以及粉末冶金部件成形致密度不足、变形难以预测等问题<sup>[1-3]</sup>, 导致复杂结构钛合金构件整体高精度、致密化成形困难。

热等静压工艺(HIP)是一种高温高压下利用各向均等的静压力使零部件产品得以烧结和致密化的优选技术<sup>[4-5]</sup>, 较早应用于粉末热等静压近净成形, 结合模具组合设计制造技术, 实现复杂结构粉末冶金构件的整体制造<sup>[6-7]</sup>。HIP技术优点是在低于材料熔点的温度下, 通过高温、高压使构件内部孔隙弥合达到高的致密化程度要求, 因此也广泛应用于钛合金铸件中缩孔、缩松等缺陷的消除, 从而显著改善铸件成形质量和综合性能<sup>[8-9]</sup>。近年来, HIP技术在难加工材料(钛合金、高温合金等)近净成形制备领域的优势逐渐明显, 成为世界各国研究学者竞相研究的热点之一。

但是, HIP的研究起步较晚, 热等静压粉末致密化是一个复杂的热-力耦合过程并兼具复杂大变形, 对于复杂零件的控形问题, 在世界领域尚未得到良好的解决方案。国内对热等静压近净成形复杂零件制备与处理的研究较少, 尤其对于钛合金近净成形领域中的应用基础研究尚少, HIP制备工艺还尚待完善。因此, 本研究针对先进的HIP技术, 分析了其特点、原理及其对钛合金铸件和粉末冶金构件的组织改善、缺陷消除和性能影响, 总结了HIP技术和装备在钛合金近净成形领域中的最新研究进展和成果, 剖析了HIP技术在钛合金近净成形领域中面临的挑战和未来发展趋势, 以为HIP技术在钛合金近净成形领域中的应用提供参考。

## 1 HIP技术的特点和原理

1955年, 第一台热等静压设备在美国研制成功, 标志着热等静压技术的诞生。最早的热等静压设备由缸体外马弗炉对缸体进行加热, 其主要用途为核元件的扩散粘结。目前比较成熟的热等静压设备主要由高压容器、加热炉、压缩机、真空泵、冷却系统以及计算机控制系统组成。加热温度通常为1 000~2 000 ℃, 高压容器为整个设备的关键。

### 作者简介:

金磊(1983-), 男, 博士, 主要研究方向为钛合金精密成形和表面改性技术。  
电话: 024-25852311-377,  
E-mail: 13842017963@163.com

中图分类号: TG293

文献标识码: A

文章编号: 1001-4977(2019)08-0885-07

### 基金项目:

辽宁省自然科学基金(20170540891)。

### 收稿日期:

2019-03-07 收到初稿,

2019-04-30 收到修订稿。

随着科技的不断发展,近50年来,热等静压设备不断改进<sup>[10]</sup>,HIP技术不但可使传统粉末加压成型和烧结两个步骤合并成一步实现成形,还可用于同种或异种成分零部件的扩散粘结、铸件缺陷消除和性能改善等,热等静压已经逐渐用于硬质合金的烧结制备<sup>[11-12]</sup>、钛钼等合金的致密化<sup>[13-14]</sup>、大型构件的缺陷修复<sup>[15-16]</sup>、复合材料及特种材料的生产加工<sup>[17-18]</sup>等方面。不仅如此,HIP还可用于复杂结构粉末零件的制备,因此在金属构件近净成形领域发展迅速。

HIP技术用于钛合金近净成形的基本原理为:将复杂结构的铸件和粉末冶金包套体置于设备内腔,通入气体(通常为氦气或氩气)形成高压环境,并在满足工艺要求的设定温度下进行保温,从而得到内部致密的钛合金构件。高性能构件的近净成形是目前HIP技术发展的热点,且需要精密模具的设计<sup>[6]</sup>,并与有限元分析计算相结合<sup>[19]</sup>,例如火箭发动机、叶轮等高性能钛合金部件对材料性能和精度的要求极高<sup>[20]</sup>,内部型面极为复杂。法国、美国、俄罗斯等国家相继开发了产品、模具一体化的CAD/CAM技术,生产出了高性能、低成本的近净成形钛合金、高温合金叶轮、涡轮盘等零件<sup>[21-22]</sup>。

目前,HIP典型成形工艺参数:加热温度通常为金属熔点的0.7倍,设备内压通常为100 MPa以上,时间通常为2~5小时<sup>[23]</sup>。例如航空材料手册也给出的Ti-6Al-4V铸造钛合金合适的热等静压工艺为:保护气体为氩气条件下,加热温度为 $(920 \pm 10)^\circ\text{C}$ ,压力为100~140 MPa,保持时间2.5小时左右<sup>[24]</sup>。有很多研究者<sup>[25-27]</sup>对合金的热等静压工艺参数进行了细致的研究,以避免在消除铸件内部组织缺陷的同时造成组织的粗大。

HIP技术的发展与其设备能力提升紧密相关,自20世纪50年代以来,HIP设备得到了迅速的发展<sup>[28]</sup>。一是热等静压的加热方式由外部马弗炉加热逐渐发展为内加热,即冷壁式热等静压机,使热等静压温度得到了

提高;二是随着热等静压的压力提高,高压模具的承压能力逐渐增加,设备外壁由螺纹缸盖式高压缸向钢带缠绕式框架的框架式缸发展;三是加热和冷却方式由自然对流式发展为强制对流式,提高了效率和温度的均匀性。

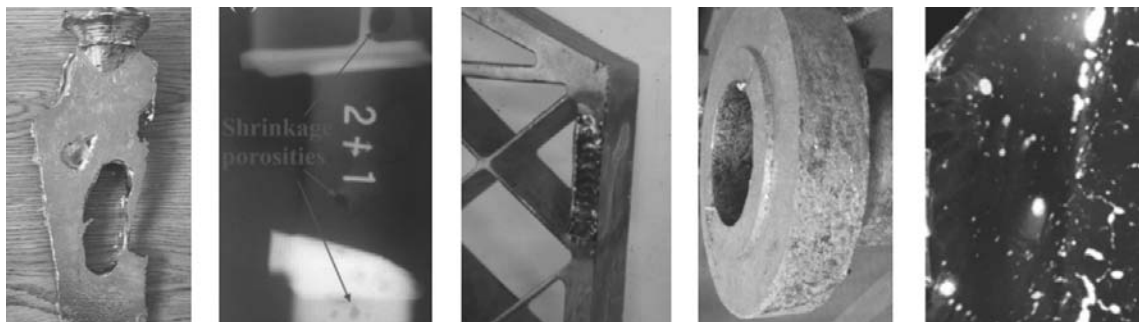
目前,美国、瑞典、俄罗斯、日本和中国都在积极研发和改进HIP设备<sup>[29-30]</sup>。其中美国的Avure公司和瑞典quintus technologies公司是HIP设备设计和制造领域的领军企业和主要设备供应商。我国在1977年由钢铁研究总院研制出中国第一台HIP设备,随着国内HIP技术的不断发展,目前,钢铁研究总院和中航工业川西机器有限责任公司基本掌握了热等静压设备制造的关键技术,主要技术指标已达到国外热等静压设备的同期水平。

## 2 HIP技术对钛铸件组织与性能的影响

随着我国航空航天等高端装备制造业的不断发展,钛合金铸件需求也朝着尺寸大型化、结构复杂化、高质量、高性能和高尺寸精度方向迈进,尽管锻造钛合金的性能优良,但是其加工成本高昂,且不适合复杂内腔构件的生产,因此采用传统铸造方法成形复杂结构零部件,仍具有不可替代的优越性。

但是,钛铸件的发展需求(如铸件尺寸增大,铸件结构复杂,壁厚差较大,铸件材料合金化元素含量增高等)将对其成形性造成极大影响,极易导致浇不足、缩孔、缩松等内部缺陷和其他表面缺陷产生,如图1所示。HIP技术对铸件内部缩孔、缩松等孔洞缺陷的弥合修复和铸件内部质量提升具有显著的作用。因此,为满足高端装备制造业对钛合金精密铸件的高要求,需要通过铸造合金成分设计、铸造工艺数值模拟、HIP工艺与设备开发、机械精密加工等多项技术共同保证。

在通过合金成分和工艺设计优化、实现钛铸件完整充型后,铸件内部和表面还是不可避免地出现微小



(a) 浇不足

(b) 孔洞

(c) 表面裂纹

(d) 冷隔

(e) 表面气孔

图1 钛合金铸件常见缺陷类型

Fig. 1 Casting defects of titanium alloy castings

孔洞缺陷,经X射线透照成像显示呈点状或絮状阴影,如图2a所示。此时就需要通过合理的HIP工艺设计,在高温高压下使铸件本体发生蠕变,使铸件内部裂纹、缩松、缩孔等缺陷弥合,从而在形状和尺寸变化很小的情况下提高铸件致密度,如图2b所示。然而,受铸件内部缺陷密集程度和缺陷形态尺寸影响,在HIP处理后也会发生内部缺陷,暴露于铸件表面或者局部变形较为严重等情况(图3),需要通过补焊和矫形等后处理工艺加以修整。

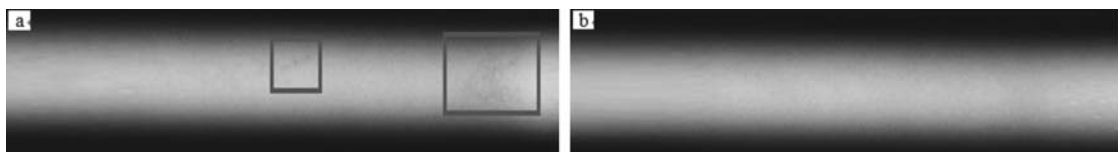
钛合金铸件经HIP处理前后的力学性能如表1所示。表中数据显示,Ti合金铸件经HIP后的抗拉强度有所下降,屈服强度没有明显变化,塑性得到明显改善。塑性提高主要由于HIP后铸件中的宏观和微观缩松、缩孔等得到焊合,并且在缺陷的焊合处由于金属的变形,产生一定程度的再结晶,使该处的部分片状等轴化,等轴晶区的各个晶粒之间彼此交叉,枝杈间的搭接牢固,裂纹不易扩展,因而塑性得到显著改善。Cai<sup>[31]</sup>等人的研究表明,经过900~930℃、压力大于100 MPa的HIP处理后制备的Ti6Al4V钛合金内部致密无缺陷,不仅合金的强度接近锻件水平,还可使材料的塑性及疲劳寿命显著增加,并使其力学性能的分散度下降,从而显著提高材料使用性能和可靠性。基于以上HIP处理后的优点,钛合金铸件在航空航天得到广泛应用。

目前,HIP技术已成为航空航天钛合金铸件生产的一道重要工序,并一般用于质量要求较严格的优质钛合金铸件。我国航空航天用钛合金铸件90%以上为Ti-6Al-4V,因而研究者对Ti-6Al-4V合金HIP工艺进行了大量研究<sup>[32-36]</sup>。赵嘉琪<sup>[37]</sup>等人研究了热等静压温度、时

间、压力等工艺参数对Ti-6Al-4V钛合金铸件力学性能的影响,并阐述了Ti-6Al-4V钛合金铸件的最佳热等静压工艺参数。叶呈武等<sup>[38]</sup>对Ti-6Al-4V合金采用改进的二次HIP工艺,研究了HIP对不同起始组织Ti-6Al-4V合金显微组织的影响,结果表明:二次HIP主要通过扩散进行组织的致密化,二次HIP的致密化过程相对较慢。两次HIP工艺均为:热等静压温度920℃,最高压力120 MPa,保温保压2 h后随炉冷却。除此之外,研究者也对其他钛合金铸件进行了HIP处理研究。陈建彬<sup>[39]</sup>针对Ti6242钛合金进行了HIP处理,表明HIP处理消除了铸造时产生的缩松、缩孔等缺陷,同时细化了晶粒,从而显著改善了合金的室温力学性能,合金的抗拉强度提高至852 MPa。戚运莲<sup>[40]</sup>等人研究了热等静压及热处理工艺对ZTi600铸造钛合金组织与性能的影响,表明HIP处理后ZTi600合金室温塑性提高了5%~6%。

目前,国内外对铸件产品的热等静压致密化机理研究不多。邵冲等<sup>[15]</sup>研究了铸件制品的热等静压致密化机理,为选择制定合适的热等静压工艺参数提供了理论参考。

钛合金铸件已经在我国航空航天、国防和武器装备等领域发挥了重要作用,许多大型航空航天机匣、扩压器等部件,已经由锻、铸件组合改进为整体精密铸造。目前,欧美等许多国家已明确要求钛合金铸件需使用热等静压技术用于清除内部缺陷,改善钛合金铸件的微观组织和性能。在军事领域,美国F-22先进战斗机上大约有54个钛合金精铸件,不仅节约了成本,而且提高和改善了铸件的性能。随着钛合金铸件和我国航空航天技术的发展,大尺寸、复杂钛合金

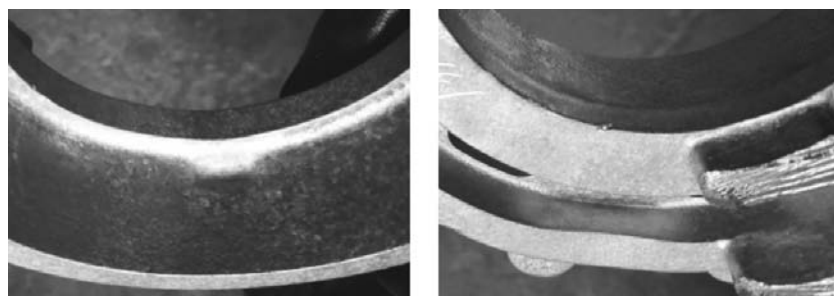


(a) HIP处理前

(b) HIP处理后

图2 钛合金铸件X射线检验照片

Fig. 2 X-ray photos of Ti castings before and after HIP



(a) 内部缺陷压合后在表面显现

(b) 薄壁部位内部缺陷压合导致局部变形

图3 HIP处理导致钛铸件内部缺陷弥合

Fig. 3 Defects healing status of titanium castings after HIP

铸件对HIP设备提出了更高的要求,其中安徽应流集团已投资建设了国内最大规格、世界水平的1600热等静压设备,其加热温度达到1 400 ℃,工作压力达到200 MPa,工作区直径1 600 mm,高度2 500 mm,为我国航空发动机机匣、核一级主泵叶轮、深海钻采工具等高性能零部件制造提供了可靠的先进技术和装备保障。

### 3 HIP技术对钛粉末近净成形的研究进展

HIP技术最早用于核材料的扩散粘结,随后其应用领域迅速发展,在各个领域(如铸件缺陷修复、粉末合金致密化、近净成形和复合扩散连接等)都有应用。在粉末冶金近净成形领域,虽然HIP技术起步较晚,但因其其在钛合金、高温合金等易氧化难熔材料制备成形,以及材料成形后的组织性能接近于锻件的显著优点,受到越来越多的关注,日渐成为国内外研究的热点领域之一。

由于采用热等静压的粉末冶金工艺可以制备大型、复杂、具有优良性能的钛合金近净成形构件,并大幅度降低原料的损耗,因而广泛应用于航空、航天等领域。美国航天飞机SSME和Atlas-3、Atlas-5等发动机、法国火神发动机、俄罗斯RD-180、RD-191、RD-0120等发动机涡轮泵单元、泵壳、阀体等多种部件均采用该技术制备并已应用<sup>[41]</sup>。

在钛合金粉末冶金近净成形领域,研究人员对其组织、性能及变形规律亦进行了大量研究。Ti-6Al-4V合金是航空航天用主要钛合金材料,也是迄今为止使用最早、用量最大的中高温钛合金之一。Reza Molaei等<sup>[42]</sup>研究了HIP对粉末层熔(PBF)工艺制备Ti-6Al-4V合金薄壁管状试样的单轴、扭转、同相和90°异相轴向扭转载荷下疲劳性能的影响,并对HIP试样的扭转疲劳性能与退火AM试样的扭转疲劳性能以及常规锻造材料的多轴疲劳性能进行了比较,表明HIP试样的疲劳破坏机制是剪切的,已经类似于锻造材料,并且疲劳性能接近于锻造态。

在高温、高损伤容限等钛合金新型材料HIP工艺对组织性能影响规律研究方面,Wang等<sup>[43]</sup>在温度910 ℃、压力120 MPa、时间约2小时的HIP工艺条件下制备出Ti6Al4V合金块体材料,系统研究了经HIP处理后合金的显微组织和热变形行为。Guo等<sup>[44]</sup>通过HIP技术制备了一种新型近净成形高温钛合金粉末压坯,并研究了粉末表面状态对热等静压粉末压坯组织和拉伸性能的影响规律,结果表明:由短期储存粉末制成的HIP粉末压坯的拉伸性能与锻造状态和商业IMI829合金相当,而长期储存的粉末不仅会增加HIP后材料微观组织结构的不均匀性,还会降低HIP粉末压坯的压延性,

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	$R_{p0.2}$ /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

并讨论了相关机理。N. Perevoshchikova等<sup>[45]</sup>采用HIP技术生产接近净形状Ti-5553钛合金构件,系统研究了HIP温度和时间对Ti-5553粉末颗粒之间结合完整性存在的显著影响,并表征了相应的拉伸和高周疲劳性能。结果表明,HIP制备的Ti-5553材料高周疲劳性能主要取决于粉末颗粒之间的结合质量和微观结构特征,通过调整HIP工艺温度和时间可明显改善颗粒结合和疲劳性能。Wang等<sup>[46]</sup>研究了HIP强化的Ti-45Al-8.5Nb-(W, B, Y)合金的显微组织和压缩性能,结果表明:HIP处理的合金具有近层状的显微组织,在高温下表现出优异的压缩性能。HIP技术对钛合金近净成形产品组织的影响不仅可以使合金中微孔等显微缺陷减少,还能够改变合金中的相组成。Li等<sup>[47]</sup>研究表明,Ti-47Al-2Cr-2Nb合金通过HIP工艺调整合金中 $B_2$ 相的形成,对合金力学性能造成了一定程度的影响。

HIP技术还被应用于钛基复合材料的研究。Cai等<sup>[48]</sup>通过HIP成功制备了钛硼化物增强的Ti-6Al-4V复合材料,发现在HIP期间,添加剂颗粒 $TiB_2$ 已经完全转变成TiB,并在固结粉末颗粒的原始颗粒边界处搭接形成网络结构。在相同的HIP条件下,随着 $TiB_2$ 添加量的增加, $TiB$ 体积分数的增加,复合材料的显微硬度增加。

由于在HIP处理过程中材料的密度、尺寸和形状均发生变化(如图4所示),因此有必要对等静压过程进行数值模拟,以更好地促进HIP技术的发展。采用有限元方法进行计算机模拟,有效预测HIP处理包套和粉末体在热等静压过程中的变形,研究表明,有限元结果强烈依赖于实施的粉末金属的本构模型<sup>[49]</sup>。

现有的热等静压计算机模拟模型可归纳总结为两类:微观模型和宏观模型<sup>[50]</sup>。依据上述两类模型,对热等静压过程进行模拟研究,对实现钛合金等难加工材料零件的热等静压近净成形具有重要意义。

目前,国内采用热等静压粉末冶金技术直接近净成形生产钛合金复杂零部件的工艺水平已接近国际领先水平。研制生产单位主要有航天材料及工艺研究所和中国科学院金属材料研究所,且航天材料及工艺研究所开发出多种航空航天部件并实现部分产品规模化

生产,如舵面骨架、水平翼骨架、筒件、叶轮等。这些构件的力学性能均接近于锻件指标,尺寸精度可达到 $\pm 0.2\text{ mm}$ <sup>[51]</sup>。中科院金属所开展此项研究尽管起步较晚,但在低温钛合金(Ti-5Al-2.5Sn ELI)、高温钛合金(Ti55、Ti60)、TiAl和Ti<sub>2</sub>AlNb合金等特种钛合金复杂结构零部件的研制上取得了极大进展,已相继开发出氢泵叶轮、薄壁异形筒件、复杂环形件等多种产品(如图5所示)<sup>[41]</sup>。沈阳铸造研究所有限公司近几年通过自主开发,已研制出内部具有复杂筋条结构的粉末冶金壳体部件(如图6所示),内部结构和成形质量经X射线检测完好,内部筋条仅为2 mm厚。

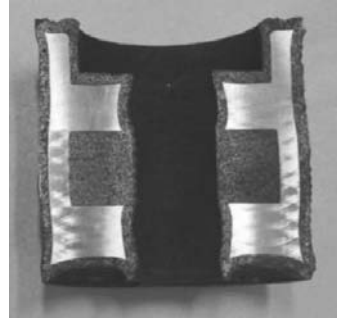
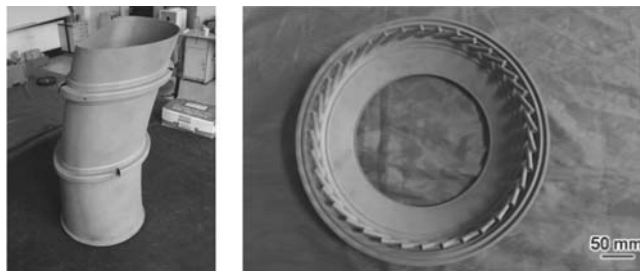


图4 经HIP处理后粉末体和包套

Fig. 4 Shielding and powder metallurgy parts after HIP treatment



(a) 薄壁异形筒体

(b) 复杂环形件

图5 薄壁异形筒体和复杂环形件

Fig. 5 Thin-wall cylinder body and complex annular parts

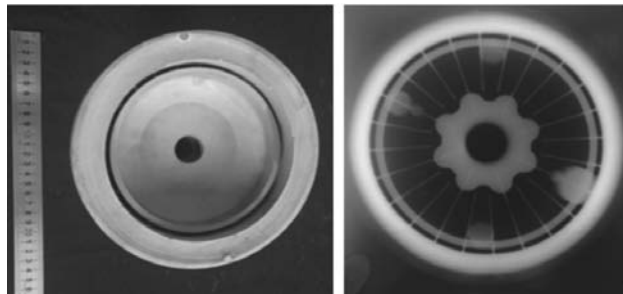


图6 带内筋结构壳体部件

Fig. 6 Shell parts with internal reinforcement ribs

## 4 总结与展望

随着HIP技术及装备的发展,HIP技术在航空、航天等高端装备制造领域大型复杂钛合金零部件铸造和粉末冶金近净成形制备过程中得到了广泛的应用,钛合金精密铸件基本已实现HIP处理全覆盖,粉末冶金构件也在快速发展中,已有部分产品实现定型生产。基于高端装备需求,为充分发挥HIP技术在钛合金近净成形领域中的应用,从长远来看,需要着眼于工艺和设备等多个方面的研究:

(1) 现有HIP设备需进一步功能优化和改进,研发更高端的HIP设备。为促进HIP技术能力的提升,需要HIP设备提供更高的温度、更大的压力,满足钛合金材料成分设计中合金化程度、高熔点元素占比逐渐增高的要求。此外,可研发具有气冷淬火等特殊性能的

HIP设备和配套工艺,调节钛合金组织形态,改善近净成形部件的整体性能。目前,国外已研制出能在5 min内使气体压力达到500 MPa的快速增压装置和冷却速率可达1 000 °C/min的快速冷却热等静压设备,HIP设备的功能有待于进一步优化和改进。

(2) 研究开发有效容积更大的热等静压设备。目前国内有效加热区直径和高度最大分别为1 600 mm和2 500 mm,有效容积的增加,将使制备更大尺寸的钛合金铸件和粉末冶金零件的整体近净成形成为可能。

(3) 与铸造技术相结合,开发新型高温、高强、钛基复合材料等零部件,采用HIP粉末冶金技术制备钛合金铸造所需的自耗电极锭料,再进行自耗熔铸,可有效避免熔炼过程中难熔金属和无机非金属过多造成的成分偏析和尖端放电击穿坩埚等问题。

(4) 将热等静压与其他处理技术相结合, 例如热氢处理 (THP) 可进一步细化钛合金铸造组织, 提升钛合金产品的性能。

(5) 加强HIP技术理论基础的研究, 例如加热/加压、降温/降压工艺对零部件组织及性能影响等。目前HIP技术的理论基础仍尚薄弱, 工艺方案尚不成熟, 无

法做到工艺因材料、因形状、因尺寸而定, 因此仍需进一步研究。

(6) 加强钛合金粉末冶金包套设计研究, 通过HIP基础实验与计算机模拟相结合的方式, 以期实现复杂结构、高尺寸精度的钛合金粉末冶金构件。

#### 参考文献:

- [1] LIU Y, LI K Y, LUO T, et al. Powder metallurgical low-modulus Ti-Mg alloys for biomedical applications [J]. *Materials Science and Engineering: C*, 2015, 56: 241–250.
- [2] ZHOU L B, YUAN T C, LI R D, et al. Densification, microstructure evolution and fatigue behavior of Ti-13Nb-13Zr alloy processed by selective laser melting [J]. *Powder Technology*, 2019, 342: 11–23.
- [3] LIN D G, SANETRNİK D, CHO H, et al. Rheological and thermal debinding properties of blended elemental Ti-6Al-4V powder injection molding feedstock [J]. *Powder Technology*, 2017, 311: 357–363.
- [4] 张义文. 热等静压技术新进展 [J]. *粉末冶金工业*, 2009, 19 (4): 32–39.
- [5] 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.
- [6] 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.
- [7] 周科朝, 黄伯云, 刘咏, 等. 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.
- [8] 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.
- [9] 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.
- [10] 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.
- [11] 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.
- [12] 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.
- [13] YU Y, CAI Y H, CHEN X H, et al. A high strength and elastic carbon containing near- $\alpha$  Ti alloy prepared by hot isostatic pressing process [J]. *Materials Science and Engineering: A*, 2016, 651: 961–967.
- [14] 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.
- [15] 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.
- [16] 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.
- [17] 李书志, 王铁军, 刘桂荣, 等. 热等静压法制备SiCp/Al复合材料的组织及性能研究 [J]. *粉末冶金工业*, 2018, 28 (3): 29–33.
- [18] 姜卓钰, 张朋, 包建文, 等. 热等静压技术在材料加工领域的应用现状 [J]. *宇航材料工艺*, 2017 (1): 13–19.
- [19] 郎利辉, 王刚, 布国亮, 等. 钛合金粉末热等静压数值模拟及性能研究 [J]. *粉末冶金工业*, 2015, 25 (3): 1–6.
- [20] 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.
- [21] SANDERS W, MELZER P, GOODIN W. Advances in net-shape power metallurgy [J]. *AFRL techn Horizons*, 2004, 5 (1): 33.
- [22] 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: 345.
- [23] 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.
- [24] 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.
- [25] 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.
- [26] 娄贵涛. 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.
- [27] 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.
- [28] KUMAR A Y, BAI Y, EKLUND A, et al. The effects of hot isostatic pressing on parts fabricated by binder jetting additive manufacturing [J]. *Additive Manufacturing*, 2018, 24: 115–124.
- [29] 尚文静. 热等静压 (HIP) 技术和设备的发展及应用 [J]. *有色冶金设计与研究*, 2010, 31 (1): 18–21.
- [30] 施辉献, 谢刚, 和晓才, 等. 热等静压技术的若干应用及发展趋势 [J]. *云南冶金*, 2013, 5: 52–58.
- [31] CAI C, SONG B, XUE P J, et al. Effect of hot isostatic pressing procedure on performance of Ti6Al4V: Surface qualities, microstructure and mechanical properties [J]. *Journal of Alloys and Compounds*, 2016, 686: 55–63.
- [32] GUNTHER J, KREWERTH D, LIPPMANN T, et al. Fatigue life of additively manufactured Ti-6Al-4V in the very high cycle fatigue regime [J]. *International Journal of Fatigue*, 2017, 94 (1): 236–245.
- [33] ROMEROC, YANG F, BOLZONI L. Fatigue and fracture properties of Ti alloys from powder-based processes-A review [J]. *International Journal of Fatigue*, 2018, 117: 407–419.
- [34] YUH C, LI F Z, WANG Z M, et al. Fatigue performances of selective laser melted Ti-6Al-4V alloy: Influence of surface finishing, hot

- isostatic pressing and heat treatments [J]. *International Journal of Fatigue*, 2019, 120: 175.
- [35] YUH C, LI F Z, WANG Z M, et al. Fatigue performances of selective laser melted Ti-6Al-4V alloy: Influence of surface finishing, hot isostatic pressing and heat treatments [J]. *International Journal of Fatigue*, 2019, 120: 175–183.
- [36] 黄俊, 薛鹏举, 魏青松, 等. Ti6Al4V合金整体零件的两步热等静压近净成形工艺探究 [J]. *中国机械工程*, 2015, 18: 2539–2543.
- [37] 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.
- [38] 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.
- [39] 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.
- [40] 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.
- [41] 徐磊, 郭瑞鹏, 吴杰, 等. 钛合金粉末热等静压近净成形研究进展 [J]. *Acta Metallurgica Sinica*, 2018, 54: 1537–1552.
- [42] MOLAEI R, FATEMI A, PHAN N. Significance of hot isostatic pressing (HIP) on multiaxial deformation and fatigue behaviors of additive manufactured Ti-6Al-4V including build orientation and surface roughness effects [J]. *International Journal of Fatigue*, 2018, 117: 352–370.
- [43] WANG M, ZHOU J X, YIN Y J, et al. Hot deformation behavior of the Ti6Al4V alloy prepared by powder hot isostatic pressing [J]. *Journal of Alloys and Compounds*, 2017, 721: 320–332.
- [44] GUO R P, XU L, CHEN Z Y, et al. Effect of powder surface state on microstructure and tensile properties of a novel near  $\alpha$ -Ti alloy using hot isostatic pressing [J]. *Materials Science and Engineering: A*, 2017, 706: 57–63.
- [45] PEREVOSHCHIKOVA N, HUTCHINSON C R, WU X. The design of hot-isostatic pressing schemes for Ti-5Al-5Mo-5V-3Cr (Ti-5553) [J]. *Materials Science and Engineering: A*, 2016, 657: 371–382.
- [46] WANG Y H, LIN J P, HE Y H, et al. Microstructures and mechanical properties of Ti-45Al-8.5Nb- (W, B, Y) alloy by SPS-HIP route [J]. *Materials Science and Engineering: A*, 2008, 489: 55–61.
- [47] LI J Z, SONG B, NURLY H, et al. Microstructure evolution and a new mechanism of B2 phase on room temperature mechanical properties of Ti-47Al-2Cr-2Nb alloy prepared by hot isostatic pressing [J]. *Materials Characterization*, 2018, 140: 64–71.
- [48] CAI C, SONG B, QIU C L, et al. Hot isostatic pressing of in-situ TiB/Ti-6Al-4V composites with novel reinforcement architecture, enhanced hardness and elevated tribological properties [J]. *Journal of Alloys and Compounds*, 2017, 710: 364–374.
- [49] ABDELHAFEEZ A M, ESSA K E A. Influences of powder compaction constitutive models on the finite element simulation of hot isostatic pressing [J]. *Procedia CIRP*, 2016, 55: 188–193.
- [50] ASHOKA G K J, ROLAND W L. Finite element simulation of hot isostatic pressing of metal powders [J]. *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering*, 1994, 114: 249–272.
- [51] 李圣刚, 吕宏军, 何士桓, 等. 低温复杂结构件特种成形工艺 [J]. *宇航材料工艺*, 2012 (1): 82–85.

---

## Development and Application of Hot Isostatic Pressing Technology in Titanium Alloy Near Net Shape Forming Field

JIN Lei, ZHU Qiang, ZHAO Jun, LIU Shi-bing, DING Wei, AO Guang-kuo, GAO Ying, SONG Zhao-wei

(Shenyang Research Institute of Foundry Co., Ltd., State Key Laboratory of Light Alloy Foundry Technology for High-End Equipment, Shenyang 110022, Liaoning, China)

### Abstract:

The paper analyzes the difficult points in producing near net shape parts using casting and powder metallurgy methods, introduces hot isostatic pressing (HIP) technologies applied to the field of near net forming of hard-to-machine materials, and expounds the characteristics and principles of HIP technology and its effects on the microstructure improvement, defect elimination and properties of titanium alloy castings and powder metallurgy components. The latest research progress and achievements of HIP technology and equipment for titanium alloy near net forming are summarized, and the development and future challenges of HIP technology in titanium alloy near net forming field are also analyzed.

### Key words:

hot isostatic pressing; titanium alloy; near net shape forming; casting; powder metallurgy