

国外热等静压发展概况

申 林

124.32

冶金工业部有色金属研究总院

1980.4

目 录

一、国外热等静压工艺发展概况	(1)
1、迅速发展的热等静压工艺	(1)
2、热等静压的概念和特点	(2)
3、最近热等静压方面的科研动向	(4)
4、热等静压的发展前景	(7)
二、热等静压在粉末冶金中的应用	(8)
1、钛合金	(8)
2、铍	(12)
3、硬质合金	(14)
4、超级合金	(16)
三、用热等静压处理铸件	(17)
1、铸件的热等静压处理工艺	(19)
2、铝合金	(19)
3、钛合金	(20)
4、超级合金	(21)
5、热理铸件要注意的问题	(25)
四、热等静压焊接	(25)
1、核反应堆制件	(27)
2、燃气涡轮制件	(27)
3、其它制件	(29)
五、热等静压使用设备	(30)
1、热等静压机的组成	(32)
2、辅助设备	(39)
3、2000公斤/厘米 ² 热等静压机	(41)
4、10000 公斤/厘米 ² 热等静压机	(44)
六、附表	(50)
附表1 美国热等静压机	(50)
附表2 日本热等静压机	(52)
附表3 英国热等静压机	(53)
附表4 瑞典国内使用的热等静压机	(53)

附表 5	美国巴蒂尔研究所热等静压机.....	(54)
附表 6	瑞典艾西 (ASEA) 公司生产的QUINTUS系列 QIH 型 热 等 静 压 机.....	(54)
附表 7	瑞典艾西公司生产的QUINTUS系列QIC型冷等静压机.....	(55)
附表 8	日本生产的热等静压机系列.....	(55)
七、主要参考文献.....		(56)



一、国外热等静压工艺发展概况

热等静压工艺是近二十多年来发展起来的一种金属成形和热处理的新工艺。它已走出了试验室的大门，发展成为工业生产规模的一种工艺，开始一炉只能处理数斤重的材料，现在每炉装料量已高达七吨多。

热等静压工艺继承和发展了粉末冶金和冷等静压成形的优点，将粉末成形和烧结两步作业合并成一步作业，克服了烧结温度高的缺点，使产品性能提高，成本降低，工艺过程缩短，燃料消耗减少。

热等静压目前主要用于粉末成形、铸件处理和制件焊接。但其应用潜力很大，将来还可能应用于金属复杂形状件的加工，新合金的制备，非晶态材料和复合材料的处理和金属表面涂层等。

1. 迅速发展的热等静压工艺

1955年，美国巴蒂尔研究所的萨勒、戴顿、帕普劳克和霍奇发明了热等静压。发展初期，这种技术处于保密状态，后来在一份加拿大的公开文献中泄露了该技术的主要内容。研制工作的早期，热等静压又称为“气体压力粘接”。顾名思义，研究的目的是将它用作一种扩散粘接工艺来粘接核燃料的包套。60年代初，在美国宾夕法尼亚州的希平波特压水堆和陆军活动核电站的燃料元件包套中，热等静压首先获得工业应用。

60年代中期，气体雾化法生产粉末研制成功对热等静压的大规模发展起了重要作用，在此期间用热等静压法已能生产高速工具钢，各种超级合金，粉末压块经过

热等静压处理及压力加工可获得优异的特性和显微结构。过了不多久，美国堪培公司为生产高速工具钢提供了热等静压设备，显著地改善了这种工艺的可靠性。

70年代左右巴蒂尔研究所和美国空军材料实验室，使用热等静压工艺制作的粉末Ti-6Al-4V钛合金件的性能与锻件的性能大致相等。为了提高材料利用率，降低成本，美国大力资助对接近成品形状零件制作方法的研究。在新研究的方法中，热等静压是最有希望的一种工艺。已经证实，热等静压制件在飞机发动机和机身中可以用作承载构件。

1965年，美国铝业公司开始研究用热等静压处理狄赛尔发动机铸造铝合金件将疲劳性能提高了一个数量级。后来发现这种工艺能提高许多种金属铸件的性能，将铸件的性能提高到锻件的水平。铸造工艺师开始将热等静压作为铸造工艺中不可缺少的一部分。

热等静压技术使用的设备主要是热等静压机，其主要技术指标是最高压力、最高温度和炉子有效尺寸。各种材料需要的压力和温度如下：碳化物硬质合金固结——70—100兆帕（约（下同）700—1000公斤/厘米²），1250—1450℃；金属粉末固结——70—100兆帕（700—1000公斤/厘米²）1000—1250℃；陶瓷固结——70—200兆帕（700—2000公斤/厘米²）；1200—2200℃；铸件处理——70—200兆帕（700—2000公斤/厘米²），1000—1250℃；碳、石墨及难成形材料——150兆帕（1500公

斤/厘米²) 以上, 2000—2700℃^[1]。

据估计, 目前世界上共有热等静压机 100 台以上, 主要分布于美、日、英、瑞典、苏、法等国, 美国有 24 台, 日本 16 台, 英国 12 台, 瑞典 9 台。绝大多数的设备的技术指标为: 工作压力, 700—2000 公斤/厘米²; 温度, 1000—1500℃。工作压力在 2000 公斤/厘米² 以上的设备是供研究和发展使用的, 也有少数设备工作压力达到 10000 公斤/厘米², 温度最高达 2700℃, 以石墨作发热体。已经投入生产的最大热等静压机, 工作室直径 1.2 米, 高 3 米, 直径高达两米的热等静压机正在建造中。

目前世界上热等静压机的生产能力近两万吨。硬质合金约为 10000 吨, 粉末固结和铸件处理为 6000 吨, 其它为 3000 吨^[1]。

瑞典艾西公司生产的预应力钢丝缠绕式热等静压机具有结构紧凑、体积小、重量轻、安装方便、容易制成大型设备、使用安全可靠等优点。因而他们生产的热等静压机畅销全世界, 受到用户的好评。

瑞典和日本都已建立了生产热等静压机的工厂和车间, 生产定型的热等静压机的全套设备。美国有四家设备生产公司, 供应各种类型的设备。在美国已专门建立了用热等静压法生产发动机涡轮盘的车间和定型的九步作业法^[2]。美国坩埚有限公司与瑞典艾西公司使用热等静压共同建立 ASEA—Stora 工艺生产不锈钢和工具钢, 已能生产 10 种成分的合金品种。

1977 年全世界热等静压方面的贸易额为两亿美元, 其中包括热等静压的产品, 设备, 研究和发展以及设备的补充和维修。估计到 1985 年这方面的贸易额将翻七

翻达到 15 亿美元^[3]。

最近有关热等静压的文献报道日益增多, 学术活动频繁。

1978 年 9 月 19 日—21 日在英国拉夫巴勒 (Loughborough) 的拉夫巴勒工学院, 召开了第一届国际等静压会议, 有 19 个国家的 210 名代表参加, 共宣读论文 31 篇, 热等静压方面的文章有 9 篇。出版了会议文集。会议中还有展览会, 展出了美国热等静压公司的自动热等静压机, 瑞典艾西公司制造的世界最大的等静压机, 工作室直径两米, 能力为 8 万吨。还展出了各种泵、压力工具及热等静压产品等^[4]。

1979 年 1 月在英国敦提 (Dundee) 召开了热等静压会议, 会议由戈勒姆国际有限公司 (Gorham Intern、Inc) 组织, 交流了热等静压方面的有关技术和目前工业生产方面的情报。

在近几年召开的国际性粉末冶金会议、高温合金会议、铍的会议和钛合金会议上, 都有热等静压方面的报告。

2、热等静压的概念和特点

热等静压一语英文称作 “Hot Isostatic Pressing” 或 “Hot Isostatic Compraction”, 简称为 HIP 或 HIC。

等静压技术包括冷等静压和热等静压使用的基本原理为帕斯喀原理。即在一封闭的容器内, 作用在液体部分界面上的外力所产生的水静压力, 将均匀地传递到液体中的每一点上去。在工业生产中, 冷等静压使用乳化液或油作压力介质; 热等静压一般用惰性气体氩或者氦作压力介质。当工件置于压力介质中施加高压时, 工件被压实并产生一定的形变, 工件受力的大小与受压表面积成正比。

热等静压的原理示于图 1 中。即在高压缸内放置一加热炉, 将物体或工件放在炉内, 处理时一边加压力, 一边加热。也

就是成形和烧结同时进行，因之有人认为它是一种特殊的热压技术。高压高温作

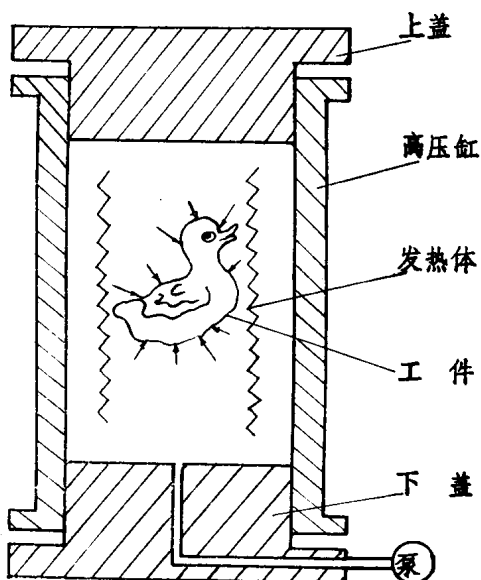


图1 热等静压原理示意图

用，能使工件结构的内部缺陷得到愈合，使粉末完全达到固结。热等静压的压力环境能造成等压的应用条件，不会使粉末或物体产生不均匀的应力，一般在各个方向上能产生均匀的变形，均匀的晶粒结构和均匀的物理机械性能。

一般热等静压的基本工艺过程如下：首先将粉末用模压、冷等静压、爆炸成形等方法预压成一定密度的压坯，将压坯装入金属或非金属包套中（或者直接将球形粉末装入包套中），抽出包套和压坯中的空气并密封好。再将袋模装入热等静压机中处理。最后用机械法或化学法除去包套，即可得到制品。

热等静压工艺在工业生产中有许多特点，归纳起来主要有以下几个方面：

第一，在成型方面保持了冷等静压的优点。压坯受周围均匀应力的压缩，而不受模壁摩擦的影响，故产品各部位的密度

均匀。一般热模压制品，压力因受模壁摩擦的影响而减损，距冲头越远部位的压力越小，所以制品的密度不均匀，这种现象产品愈长愈严重。热等静压与普通热模压不同，它一次可以压制成很长的产品，有利于生产管状，棒状等长而细的产品，如直径40毫米，长1.6米的硬质合金轧辊。热等静压力比一般热压的大得多，可达3000公斤/厘米²，而1000℃以上的普通热压，只能采用石墨模，一般石墨模的抗弯强度为160公斤/厘米²左右，高强石墨也不过300—500公斤/厘米²[5]。

第二、热等静压能制作复杂形状的产品

热等静压同冷等静压相同，在制作各种形状产品时具有极大的灵活性，它不像一般热模压需要一套较大而贵的模具。热等静压需要的包套，无论是金属的或非金属的都比较便宜和简单得多。热等静压工艺对于产品的形状，可以说是没有限制的，它不仅能制作各种外形复杂的产品，而且还能制作具有内腔复杂形状的产品和薄壁结构的产品。这方面的典型产品如铍无缝压力容器，外形为圆球形中空的，或者呈东瓜状中空的。像这种产品用其它方法制作将是困难的或者是不可能的[6]。

第三、热等静压能制作近成品形状的产品

制作近成品形状产品，是热等静压的一个突出优点。与一般工艺相比，它可以将材料利用率由10—20%提高到50%，这样缩短了工艺流程，省去了大量的机械车削，使成本降低50—80%。

一个先进的高温合金涡轮盘成本的一半以上是加工废料所造成的直接结果。通常锻造10公斤重的涡轮盘就需要100公斤真空自耗电极坯料，废料高达90%。一个高温合金涡轮盘的成本分配情况如下：采

用普通锻造方法——材料 21%，锻造 12%，机加 55%，检验 12%；而采用热等静压法——材料 24%，热等静压 44%，检验 32%。热等静压工艺使成本节省 50%^[7]。

第四、热等静压能获得很致密的产品

热等静压压制品比一般热压的更加致密。对于难致密的难熔金属材料，采用热等静压法得到高的密度。即使容易致密的硬质合金，用一般生产方法不可避免地存在着显微孔隙或由夹杂形成的空洞。而采用热等静压法生产的制品的显微孔隙几乎等于零。一般方法生产的硬质合金的体积孔隙度为 0.05—0.20%，热等静压可使孔隙度降低到 0—0.0001%，因之对硬质合金解决了难以克服的问题。如用一般生产方法生产的硬质合金轧辊，因表面有孔隙，合格率不超过 5%；而热等静压的轧辊的合格率可达 90%，经过一定的研磨合格率可达 99%。高压下使用硬质合金，从破损理论来看，即使是很微小的孔隙，也将成为破裂的起点。所以减少孔隙或显微孔隙是提高制品寿命的关键。实践证明，用热等静压法生产的模具，比用一般生产方法生产的寿命提高四倍以上。

第五、热等静压材料具有精细的结构和优异的性能

热等静压使用的温度低于一般烧结温度和热压的温度。通常难熔金属的热压温度为熔点的百分之七十左右，热等静压的温度只是熔点的一半左右。处理温度低可以得到细晶粒的结构或者与原料粒度相似的结构。

钨粉末约在 1909℃ 温度下进行烧结。热等静压时，如果压力 1000 公斤/厘米²，温度 1482—1659℃，完全可以得到致密的金属。如果热等静压之前采用爆炸法预成形，这种材料可在 1260℃ 达到固结，晶

粒也不会长大。钛粉末在 1482℃ 的温度下也不能烧结成完全致密的金属，而在 954℃ 温度下用热等静压法可制成具有致密结构和大截面的材料。

用热等静压系统地研究了铀合金、不锈钢、铂—铱合金、铍、超级合金、钨、钼、钛等材料，在所有情况下获得的性能等于加工和退火材料的性能。制件的性能均匀，零件各个部位的性能无差异。

第六、热等静压将引起铸造业革命

铸件的缺陷很多如缩孔、气孔和夹杂等，严重影响制件的性能。铸件在热等静压炉中处理之后，性能发生重大变化。如铝合金的疲劳寿命能提高一个数量级。超级合金和钛合金的疲劳性能提高了 3—10 倍，其断裂寿命提高 2 倍。还能降低铸件性能的分散程度，因而使成品率提高，简化模子设计等。

综上所述，热等静压工艺具有许多优越性，其局限性也不少，主要是生产周期过长，工件需要包套，包套问题比较复杂。其次是设备比较昂贵，一台直径 1.2 米热等静压机值 1000 万美元，即使一台小型工厂用生产设备也需 75000 美元。产品的精密度和表面光制较差，有待改进。

3、最近热等静压方面的科研动向

近十年来，在热等静压工艺中主要围绕着粉末的包套和缩短生产周期两个问题进行了研究，其中一些问题已获得解决，另一些问题还在研究中，分述如下：

①热等静压需要特殊的粉末

粉末的填装性能对于压件的最终形状至关重要。粉末按颗粒形状可分为两种，一种是用机械研磨法生产的粒度分布很广的多角形粉末，另一种是用各种能使熔化金属滴自由凝固技术生产的球形或准球形粉末。

多角形粉末一般适宜于振动填料，因

为它的流动性差, 尽管选择一定的粒度和添加剂能改善流动性。由于粉末缺乏流动性, 在形状复杂制件中常常产生拱桥现象或不均匀填装。这样的预成形件在热等静压机中固结, 形变不均匀, 产品形状不稳定, 再现性很差。

另外球形粉末不宜于预压和预烧结, 因它具有优异的流动性和高的疏装比重。这种粉末在复杂形状制件中能达到密实地填装, 并且具有极好的形状再现性。因而球形粉末经热等静压可获得预计的形变和良好的形状再现性。

目前供热等静压使用的粉末, 最广泛的生产方法有气体雾化法制造的超级合金和高速工具钢粉末, 施转电极法用来生产钛及其合金粉末。

美国凯尔西—海斯公司在生产超级合金涡轮盘中使用了惰性气体雾化法生产的粉末。在粉末成形前, 将粉末在轧机中进行冷加工, 使它成为小圆片状, 加工率大约60%, 称作“应变增能”。这样处理的粉末能降低热等静压的温度, 提高成品的性能^[2]。

②粉末预成形及包套问题

热等静压之前预先将粉末压成一定的形状, 这种形状通常是最终产品形状的放大毛坯, 目前研究的方法有冷等静压、金属包套、玻璃容器、陶瓷模等。

冷等静压的优点是其形状不受限制, 对于任何形状都容易采用, 宜于用作热等静压的成形方法。压坯中密度无变化, 具有足够的初生强度, 并能承受一定量的切削。其缺点是生产速度和精度不如硬模成形。

金属包套是最早的预成形方法, 适于生产简单形状的制件, 其再现性好, 容易生产操作, 便于大量生产。缺点是成本比较高, 在热等静压过程中焊缝容易损坏。

简单的圆桶形制件长度达2.7米, 外径610毫米, 重1360公斤和大型超合金涡轮盘直径810毫米, 使用了金属包套。

玻璃容器为制作优质产品提供了一个很好的方法, 它为制品在热等静压过程中进行无约束变形提供了可能性。这种容器容易密封, 在热等静压过程很少漏气, 因而生产率很高。容器的自脱落方式对于连续生产作业是一种有益的特性, 容器制造成本低廉, 最大缺点是在连续生产时容易产生破裂, 要采取预防措施。

美国凯尔西、海斯公司使用玻璃容器时考虑它的柔软性、变形性、透气性、成形性与金属的相容性。目前研究主要集中在使用熔融硅玻璃, 这些容器由熔融玻璃料滑铸和烧制成各种形状。

石英玻璃对于超级合金是一种合适的容器材料。壁厚达数毫米的容器制作方法, 可以采取将细的毛玻璃渣以熟石膏的形式的膏剂进行铸造而制成^[8]。

美国坩埚材料研究中心研究了陶瓷模工艺用于钛合金和超级合金中。陶瓷模对于精密铸件很有效果。陶瓷模对于制件形状的固定来说具有最佳的潜力, 在陶瓷模外放一层金属模, 两种模子中间填入陶瓷粉末作为压力传递介质。其缺点是有漏气的可能性, 除气的时间太长。

最近也有人提出无包套热等静压法, 工艺过程简单, 适于大量生产^[9]。

③缩短热等静压的生产周期

热等静压工艺的一个主要缺点是生产周期过长, 根据要处理材料的性质、尺寸和处理温度, 一般一个生产周期需要4—8小时, 有时长达16小时, 甚至24小时^[10]。大部分时间是加热到一定温度和处理后材料在炉内冷却所需要的时间, 许多文献报道, 热等静压工艺的一个主要研究方向是减少生产周期所需要的时间^[11]。

在某种程度上,增加高压缸的尺寸可以缩短生产周期。虽然炉子的尺寸在理论上没有限制,但在实际中却有限制。目前具有最大工作体积的热等静压机正在美国巴蒂尔研究所运行,100吨重的高压缸的有效工作尺寸为直径1.2×高2.7米^[12]。

除了增加高压缸尺寸之外,也可以在热等静压机上增加机械化和自动化装卸料设备以及采用预热法来缩短生产周期。

预热法即热装料法,压坯进入热等静压机之前,先在一台普通加热炉内加热到一定温度,然后再将热的压坯装入热等静压机炉内,保温一定时间,热料出炉,在炉外进行冷却,这样热料装炉和热料出炉,节省压坯在热等静压机中升温 and 冷却的时间,缩短了生产周期,提高了热等压机的能力。为了保护加热元件,装炉和出炉的温度不得超过1260℃。

在生产中,将预热炉和热等静压机安装在一条生产作业线上,通常一台热等静压机需要数台预热炉。

对于热装料来说,一般采用底装料更为有利,底装料的优点能保持住惰性气体在高压缸内。同样工作室体积,比顶装料能处理更大尺寸的压坯,无需强度大的料架,在装料时不会产生大摆动和歪斜。

巴蒂尔研究所的人员在实验室使用15分钟的时间完成了一个热等静压的生产周期,他们预言,在生产中可以实现30分钟的生产周期,而大部分的研究者则认为,目前的标准生产周期需要8小时。

目前,在工业生产中,热装料用于超级合金和高速工具钢的粉末固结;冷装料在生产中被用于硬质合金、钛和陶瓷的粉末固结以及铸件处理中。

1978年9月在第一届等静压国际会议上,有人提出无需预热,直接冷装炉同样

可以缩短生产周期,以美国坩埚公司1.2米直径的热等静压机为例,该设备已经运转250个周期,装料量为7.5吨,达到1200℃,压力1000公斤/厘米²,升温升压不到3个小时,保温4小时。每天最少可以进行两个生产周期。他们主要在炉子结构方面进行了一些改革,如将主加热元件与热屏蔽连接在一起。压坯在放入高压缸之前先安装在一个支架上,安装时将压坯和热电偶连接在一起并通过端盖与外部连接。先将压坯装入在高压缸内,再将加热元件与热屏蔽安放在压坯的周围。这样有助于提高设备的生产率,在美国至少已有两台这样结构的热等静压机投入生产^[13]。

④热等静压机日益大型化、自动化和多样化

在发展初期,缺乏精良的设备,成为热等静压工业化的严重障碍。原始设备的特点是生产周期长,工作室的尺寸有限,性能不稳定,效率低和要求操作者具有较高的技术水平。因之,在相当长的时间内,认为热等静压工艺只能处理极为特殊的材料。

设备发展的第一个阶段是博耶(Boyer)对炉子的改进而获得了专利权。在高压缸中的较大体积内开辟了可控的和稳定的热区。革新的第二阶段是有关高速炉生产能力设备的研制,在美国第一个接受定货的厂家是坩埚公司,采用预热法装炉。这种方法为高速生产低成本材料创造了条件。第三发展阶段提高了设备的能力,1972年巴蒂尔研究所建造并安装直径1.2米热等静压机,将设备的能力提高了一个数量级,自投产以来已使用了180个周期,炉装料量为6.0吨^[14]。

现在世界上热等静压机的生产水平,已经由小型和工作周期长的实验室设备,

发展成为高效率的大型设备^[15]。

热等静压机有两种结构，一种是整体带螺纹盖式结构，另一种是钢丝缠绕结构，使用这两种结构都可制造成小型和大型设备。在不久的将来，如果有需要，会出现工作室直径2—3米，高9—12米的热等静压机。

在瑞典和日本已能生产成套热等静压机，如瑞典生产的昆塔斯机列，型号为QIH，温度1450℃，压力有1000、1600和2000公斤/厘米²，工作室直径225—1200毫米的各种热等静压机，见附表6^[16]。日本生产的热等静压机系列KIP，温度1250℃，1400℃，压力1000，2000公斤/厘米²，工作室直径100—500毫米，见附表8^[17]。

美国有四个厂家能生产热等静压机。巴蒂尔研究所是研究单位，先后制造并拥有10台热等静压机，工作室直径最小64毫米，最大1200毫米；温度最低1260℃，最高2700℃；压力最低700公斤，最高3515公斤/厘米²，见附表5^[18]。在最大的1.2米设备上安有电子计算机进行自动控制。

美国毫梅特公司为了处理铸件，特殊设计了一台热等静压机，工作室直径560毫米，高1730毫米，温度1260℃，最高压力2000公斤/厘米²，装有气体分析仪，保证设备在极低污染水平下进行作业。

最近美国科纳韦设备公司制造了一种供实验室使用的小型热等静压机(mini-HIPer)，全套设备重不过680公斤，移动很方便，安装时间不超过1天，操作成本低，工作室直径90毫米，高150毫米。使用两种炉子，一种为1500℃，另一种为2000℃，最高工作压力2000公斤/厘米²，加热和冷却速度大于200℃/分，全部用手工操作，在最高压力和温度下需要0.98米³的标准气体^[19]。

4、热等静压的发展前景

目前，热等静压已经成为粉末冶金和铸造业中的一种生产工艺。五十年代它主要作为一种粘接技术，六十年代主要发展了在粉末冶金中的应用。七十年代以来，用它处理铸件变成了一种热门工艺。它的应用领域还将日益扩大。但归根结底，它主要用于粉末成形，成形材料的名目繁多，过去仅限于成形钨、铀、锆、铍等稀有金属，现在主要用于成形高速工具钢，超级合金、钛、硬质合金及陶瓷等材料。

有些新型合金，由于产生严重偏析，不能使用普通的熔铸法制作。采用热等静压粉末成形的温度较低，能克服熔铸法中偏析问题，在合金中还允许添加高压的组分。因之，热等静压工艺是创制新型合金有希望的工艺，它给合金研制和工业生产带来的变化将不亚于真空电弧熔炼铸造工艺。

设备中的高应力零件的寿命往往是有限的，原因是在零件内部有各种缺陷，这些缺陷是产生大小事故的祸根。热等静压能消除零件中的缺陷，使零件恢复青春，因而，热等静压处理零件是延长零件寿命不可缺少的一种工艺。美国空军材料实验室估计，八十年代在飞机发动机中更换涡轮盘的成本将超过8000万美元。

由于热等静压优异的工艺特性，能制成无疵的形状复杂的陶瓷材料，不久将会出现用陶瓷制成的涡轮件和热交换器。热等静压也可能成为形状复杂零件加工和表面涂层的一种有效方法。

目前正在大力研究的复合材料和非晶态材料是未来很有发展前途的材料。21世纪将是复合材料的黄金时代，非晶态材料能使材料的性能提高一个数量级。这些材料的成形，加工和处理都将离不开热等静压。

在成型技术方面,国外正着重研究用热等静压提高结构的整体性,如带叶片的整体涡轮盘和带轴的盘件等。据美国空军材料实验室预测,今后10年内,喷气发动机上将有25%左右的高度完整的整体结构件,是由粉末热等静压工艺制成的。

采用粉末热等静压技术,可以实现航空特殊需要的“配制结构”,即按零件各部位不同性能要求设计和配制不同的材料。如涡轮叶片,耐高温的叶身部分和抗疲劳的叶根部分,可配制不同的合金成分;飞机龙骨连接板,可采取选择性局部纤维强化,提高刚性,减轻重量。

二、热等静压在粉末冶金中的应用

六十年代初热等静压在粉末冶金中应用开始于稀有金属。最早研究钨的成形,球状钨粉太硬太滑,即使使用10吨/厘米²的压力也不能冷压成形。但是在1590℃的等压条件下,只需上述十分之一的压力,即可得到99%以上的理论密度。曾使用1300—1500℃,压力700—1500公斤/厘米²的热等静压条件制成的火箭喷管,经受住了3600℃的火焰温度试验^[20]。可能由于经济上的原因,钨的热等静压没有收到工业上的效果。后来证明铌、锆、氧化铀、铍和金属氧化物陶瓷适用于热等静压成形。热等静压的硬质合金具有理想的结构是陶瓷相有规律分布的结果,成为热等静压生产最多的材料。七十年代初由于雾化法制粉的成功和大型热等静压机的建造,工具钢和超级合金成为热等静压应用注意的中心。不久钛也加入了这个行列。下面仅就钛、铍、硬质合金和超级合金的热等静压粉末成形工艺,分述如下:

1、钛合金

采用热等静压法制作具有完全加工性能的结构材料,首先在钛合金中得到证明。

航空工业是钛合金的主要用户,虽然使用钛有明显的优越性,但它在航空结构中的使用未达到所希望的水平,其主要原

因是成本太高。成本高的一个主要原因是原材料的成本高,另一个主要原因是钛的锻造和车削困难。长期使用钛的经验表明,材料的利用率非常低,根据不同的设计材料利用率仅为10—20%,个别制件竟低至5%左右。这就意味着生产钛成品制件需要大量的车削。因之钛的主要成本是原材料和车削的费用。

为了提高钛材的利用率从而降低成本,如何生产成品形状或者近成品形状的钛制件,目前已成为钛合金加工工艺的一个中心研究课题。国外现在正在研究生产近成品形状钛件的途径有铸造、等温锻造、粉末的压型和烧结、粉末锻造、热压和热等静压等。粉末的压型和烧结的优点是成本较低和能得到近成品形状,缺点是这种材料的密度较低(为理论密度的95%左右),其性能较低,仅可在非关键部位上使用。等温锻造的成本有很大的降低,生产的水平稳定器扭力肋用于F-15飞机上,虽然在使用寿命和模具成本方面存在一些问题,将有很大的发展前途。铸造法可获得所需制件的形状,但在性能、尺寸和复杂形状方面有一定的限制,目前铸造工艺有很大的发展,其使用量将有所提高。热压生产钛粉末制件具有完全加工的性质,具有很大的竞争能力。热等静压对

于制造近成品形状的钛件具有极大的吸引力，这种工艺能克服传统粉末冶金法的弱点，生产完全致密的产品，并具有完全加工钛的机械性能和极复杂的形状。

制粉——钛属于高活泼金属，用一般的机械研磨法，由于粉碎这样坚硬的金属需要大量的机械加工会引起粉末的严重污染。生产钛粉要采取特殊的技术才能生产高质量预合金粉末。目前正在研究和使用的方法有：旋转电极法，氢化物脱氢法，离心注射铸造法和电子束旋转盘法。

尽管旋转电极法在工艺中存在一些问题，但是到目前为止，旋转电极法是供全部发展计划用的钛粉末的标准制造技术。这种制粉技术同其它制粉工艺相比能生产纯度较高的粉末，粉末不会受到穿透性污染，仅有的污染是来自钨电极。旋转电极法制粉的成本比较高，因为这种方法是一种小熔池工艺并要求将圆棒加工成高精度的尺寸。美国核子金属公司认为，如果生产足够数量的粉末时，制钛粉的成本可以降到每公斤4.42美元。有人估计小量生产成本为33美元/公斤，大量生产可降为22美元/公斤，即使钛粉成本为55美元/公斤，使用热等静压工艺也是一个明显的节约^[21]。

氢化物脱氢法是目前生产钛粉唯一的机械研磨法。将钛屑氢化变成为极脆的材料，研磨成很细的粉末，再将粉末脱氢制成高纯多角粉末。这种方法是适用于冷压的预合金粉末的唯一制备方法，未出现穿透性污染，大量生产成本不算高。

英国原子能研究公司发展了离心注射铸造方法。将自耗电极对着一个冷却铜坩埚起弧，熔化的合金小滴由坩埚边缘离心地射出并在氢气室飞溅凝固。目前这种方法正处于试验阶段，可以生产高质预合金粉末。

西德的莱保尔德—海拉斯公司(Leybold—Heraeus)发展了电子束旋转圆盘法。该法是将熔化的电极滴入旋转的圆盘并被喷射入真空室成形。调正旋转圆盘的速度即可生产由光头形状到球形多种颗粒形状的粉末。此种工艺对于制备无污染钛合金粉末具有最大的潜力，但是由于经验太少不能作出正确的经济分析，美国卡维基铍工业公司已经取得使用这种工艺生产粉末的专利权。

成形工艺——钛的活性大，成形时必须仔细选择包套材料，包套材料有金属包套、陶瓷模包套和玻璃包套。到目前为止公布的大多数研究成果强调使用金属包套和陶瓷模包套。

在早期钛粉末冶金研究中，有许多工件用金属包套成形。最早研究应用热等静压的例子是供直升飞机转子翼梁用的圆锥管件。热等静压件用作静液挤压二次加工的毛坯，研究了表面光制对加工性能的影响。在钢包套中装入球形粉末所造成颗粒状表面对挤压性能是有害的，而车削的热静压件具有良好的加工性能。在该项研究中，进一步扩大了旋转电极法制钛粉的钨夹杂问题。

美国通用电气公司和巴蒂尔所为空军材料试验室研究了热等静压可用作Ti-6Al-4V钛合金锻造预成形件的一种加工方法。采用了两种传统的锻造方法，一种是将盘状预成形件经过单次封闭模的锻造生产成最终产品，另一种是在锻造之前，金属包套成形的毛坯要经过车削加工。比较了热等静压产品和热等静压并经锻造材料的性能和工艺的经济问题。热等静压并锻造的材料性能与传统加工材料的性能不差上下，热等静压产品在成本方面较为有利。

美国坩埚公司大力研究过的近成品形

状工艺。首先用Ti-17制成的短轴经过四次重复加工制成可再现的几何形状。供F-15机身用的Ti-6Al-4V龙骨联接结构用相同的技术加工成。这两种零件都列入现行空军材料试验计划。还加工了F-14阻力支撑用的Ti-6Al-6V-2Sn深槽构件。制作这些零件的共同特点是节省原材料,减少车削量,经济上具有显著的优越性。

工艺的经济效果——热等静压钛制件已有足够的生产经验,也能计算出热等静压的工艺成本。钛粉末的成本对热等静压制品的成本有明显的影 响,对于超级合金,一般采用近成品形状生产工艺能使成本降低50%以上,其生产工艺都以粉末冶金法为基础。钛合金的粉末冶金法主要依靠热等静压工艺,将来有可能使用真空热压工艺作为辅助工艺。使用钛粉末冶金工艺的目的和超级合金的相似,主要不是为了改善产品的性能,而是为了降低成本。钛合金近成品形状的产品将来能否变为生产现实,钛粉的生产成本是决定性因素。

如果钛粉末的生产问题解决,市场又能以合适的价格供应时,热等静压工艺在经济上是很吸引人的。估计J-79发动机圆盘使用热等静压和锻造方法,使制造成本降低5—15%。成本的降低主要是投入原材料的降低和锻造次数的减少。若钛粉价格适中,将三种圆盘采用近成品形状工艺,可使成本降低30—40%,全部使用粉末冶金工艺,成本可降低50%。经济分析认为,钛粉成本为33.55美元/公斤时,热等静压工艺将获得明显的经济效益。

BO105直升飞机的Ti-6Al-4V尾翼转子轴用热等静压法制成,需要车削量很少,比现行工艺的成本节约20—

30%〔22〕。

坩埚公司为F-15飞机用热等静压法研制的Ti-6Al-4V龙骨联接接头仅重1.0磅,锻件重4.67磅,成品零件为0.4磅见图2,成本可节约50%,比多次锻造工艺所需能源低20%〔23〕〔24〕。该公司又使用了陶瓷模和氧化铝球形粉末为传递气体压力的介质,并用旋转电极法制成Ti-6Al-6V-2Sn预合金粉末为F-14飞机制



图2 钛合金(Ti-9Al-4V)龙骨联接头
(左-锻件,中热等静压件,右-成品)

作了机身曲柄,这种零件为高肋低槽设计,用一般加工方法具有典型高的成本。使用热等静压工艺比锻造法节省成本在40%以上〔25〕。

B-1轰炸机上的F-101发动机的Ti-17压缩机短轴重约5公斤,由77.01公斤的锻件制成,材料利用率仅为15.4:1,这意味着有72公斤的锻件变成了废屑。坩埚公司用热等静压成形,工件重13.6公斤,将材料利用率提高到2.7:1〔21〕。

热等静压钛合金的性能——妨碍热等静压钛粉末件广泛应用的因素,除了钛粉成本高以外就是产品的性能不一致,通常这个问题是由于污染造成的。

美国空军材料试验室对Ti-6Al-4V进行了全面研究。对热等静压材料,热等静压并锻造的零件进行了性能检验。在热等静压并锻造的情况下,进行 $\alpha+\beta$ 锻造和 β 锻造,检验了各种机械性能,室温下和315℃下的拉伸,断裂韧性,高低周期疲

劳，蠕变和应力断裂等性能。其全部性能中最低的数据也不小于规范中规定的数字。突出的优异的断裂韧性可能是由

于粉末中氧含量很低的关系。拉伸性能见表1。在试样的断裂表面没有发现明显的夹杂。

表1 热等静压 Ti-6Al-4V 粉末冶金锻件的拉伸性能

试 样 条 件	室 温				315℃			
	拉伸强度	屈服强度	延伸率	面缩	拉伸强度	屈服强度	延伸率	面缩
	兆帕	兆帕	%	%	兆帕	兆帕	%	%
热等静压 + 705℃ - 2小时	868	806	15	42.7	634	503	17.2	51.6
α + β 锻造 + 705℃ - 2 小时	944	896	14.8	48.0	710	599	14.0	53.9
β 锻造 + 705℃ - 2 小时	937	854	14.5	41.7	682	551	13.6	48.8

在巴蒂尔新的研究中，认为热等静压 Ti-6Al-4V 粉末件的性能可以同加工产品的相比。使用的粉末为核子金属公司供应的旋转电极法制成的粉末，杂质水平保持在间隙元素特低 (ELI) 技术条件规

定之内。数据表明 (列于表2内)，热等静压处理的、退火的和固溶时效处理的材料拉伸性能是很有利的。这些数据表明，热等静压的钛粉材料能接受热加工并能提高性能。

表2 热等静压 Ti-6Al-4V 的拉伸性能

试 样 条 件	拉伸强度 公斤/毫米 ²	屈服强度 公斤/毫米 ²	延伸率 %	面缩 %	断裂韧性 KIC, 兆牛顿米 ^{-3/2}
退火的典型加工的性能	84.4—105.5	84.4—84.9	10—20	20—30	60.43
热等静压	97—98.4	91.4—93.5	13—19	19—28	
热等静压 + 真空退火	94.9	89.3	19	37	71.2
固溶处理 + 时效					
典型固溶时效加工性能	108.9—120.9	102.6—113.9	7—11	25—30	49.4
热等静压 + 固溶时效 (482℃)	123—124.4	113.9—118.1	5—8	9—11	
空军材料试验室	109.7	102.7	18	29	61.98
旋锻热等静压材料	96.3	91.4	18	55	
热等静压 + 18% 旋锻 + 真空退火					
锻造热等静压材料	105.5	99.1	22	44	
热等静压 + 40% 锻粗 + 固溶时效 (593℃)					

值得注意的是美国空军材料试验室的断裂韧性数值,退火的和固溶时效的热等静压材料明显地高于铸造的和加工的 Ti-6Al-4V。其疲劳数值与加工的材料相似^[26]。

也有人认为热等静压+锻造的 Ti-6Al-4V 的性能和通常加工的相等。

坝塌公司等单位为 F-15 飞机研制的龙骨联接件可以作为关键机身件的一个代表,提出全面检验结果并预示使用寿命。其疲劳寿命等于传统加工锻件的性能。研究的结果认为,热等静压工艺可用于大型机身构件中。

2、铍

铍是用热等静压法加工的第一种结构材料。使用这种方法的目的为了加工形状复杂的铍制件,另一个目的是为了消除制件内部的缺陷。

铍是一种脆性材料,等向结构的工业材料的延性在 2% 以下。热加工铍的结构有改善,其延伸率在一个或两个方向上有所改善;而在其它方向上有所降低。企图用合金化的方法改善铍的延性,由于除了 Cu, Co, Ni 和 Ag 外的其它元素在铍中的溶解度都很低,没有获得好的成果。1972 年以来,使用提高铍粉纯度和减少氧化物含量的方法,在热等静压坯块的任何方向可得到 3% 以上的拉伸延伸率。

自从铍用作结构材料,使用粉末冶金法制作铍件。采用铍铸件,因需要大量车削,浪费很大,工业上使用很有限。目前使用的几乎全部铍件是由大的真空热压铍块经车削而成。由于铍是一种昂贵材料,要设法利用近成品形状的制品来降低成本。在这方面热等静压技术的发展起着重要的作用。

早期研究使用热等静压制作铍件,发现强度很高,而延伸性能较低,固结后经

过热处理可提高延性。还可以用粉末的预处理克服这一问题。目前,热等静压的全部粉末在 650℃ 于热等静压容器中进行热动力除气,使粉末获得最佳的性能,并消除了以后热处理中产生鼓泡问题。

生产铍粉主要有两种方法,机械研磨法和冲击研磨法。机械研磨法生产冷作的多角粉末,这种粉末的表面高度分裂。从显微结构观察其中含有大量的金属间化合物并在结构中生成第二相。实际上没有一种热等静压材料使用这种粉末。

冲击研磨法能提高铍粉的性能,用此法生产粉末的特点是粉末的颗粒较圆,粉末的表面较少冷作和破裂。用此种粉末生产的材料的显微结构清晰并呈等轴状,无论是用热等静压或真空热压制成材料的机械性都有显著的提高。机械研磨法趋向于将杂质(一般为金属间化合物)研磨成粉末,其粗糙的表面容易吸附气体和坚硬的杂质。而冲击研磨机能吹掉污染的微粒,粉末颗粒的光滑表面更适合于纯度的控制。已经证明铍粉的制备技术对于产品性能影响甚大。

美国卡维基铍工业有限公司研制成了一种高纯电解屑铍制成的粉末。用冲击研磨法将高纯铍制成高纯电解粉屑,此粉末是生产规模纯度最高的并使铍制品的延伸率提高到 4.25%^[26]。

铍的热等静压程序是:在心模与橡皮包套之间装粉,抽真空与密封,冷等静压,除去橡皮包套,装入钢包套,加热脱气,热等静压,除去钢包套得到铍锭。冷等静压使用的压力为 4000—4500 公斤/厘米²,热等静压所用温度为 900—910℃,压力为 1000 公斤/厘米²。在粒度 8—11 微米,氧化铍含量 0.4—0.5% 的条件下,延伸率可达 7.3%;而粒度为 5 微米,氧化铍含量为 1.3% 时,延伸率稍有降低,为

6.4%，拉伸强度达到 57 公斤/毫米²，屈服强度为 38 公斤/毫米²。即使采用普通纯度的热还原金属制得的铍粉，热等静压铍锭的机械性能也比真空热压法要高得多，其延伸率由 1.5% 提高 4.9% (27)。

冷压铍粉末的一种特性是在压力固结之后能够接受粘接。单个的冷等静压制件在热等静压过程能连接起来，没有明显的界面，界面的性能与母体金属相等。在冷压铍件上振动填装粉末，然后再进行热等静压，也得到相似的结果。用这种方法可以制成形状复杂的铍件。

在热等静压时，使用各种技术能制作内部有空腔的制件。通常将铍粉装在心模的周围，成形后心模不能抽出时，可采取一种与铍在机械性能方面相适应的可浸出的心模。

浸出心模使用过两种方法，最简单的使用一个坚硬的铜心模，心模上有涂层以防被铍浸出。可用于无缝压力瓶结构，见图 3。这种方法适用于均匀间隔的凹槽形

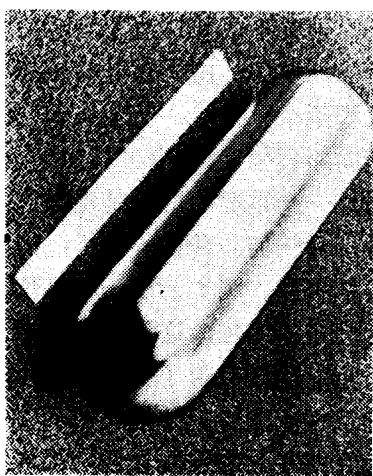


图 3 围绕可浸出铜模用热等静压将铍粉压成无缝压力瓶

铍件上。如图 4 示出了铍镜基座，将铍粉振动填入规则排列的心模间，将初生压制板安放在粉末装置一侧或心模一侧，热等静压后通过结构背面孔将心模浸出。

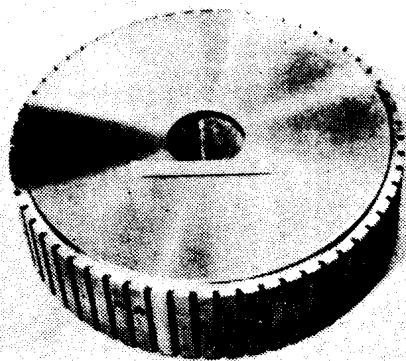


图 4 热等静压铍镜基座

成形内部孔腔使用另一种技术是可变形的心模技术。在这种情况下，内部孔腔为不均匀分布。如果使用坚硬心模，在热等静压时能引起严重的畸变。在形状复杂的铍陀螺制件（如图 5）时，使用了可变形心模技术。将多孔的铜心模和疏装的铍粉末放在石墨模中进行无压烧结。在冷热等静压过程心模的形变与铍粉相同，这种零件全部尺寸的再现性为 $\pm 1\%$ 。

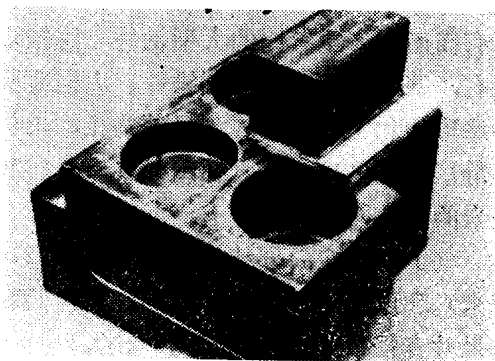


图 5 使用可变形心模成形的铍陀螺制件

为了制造外部形状复杂的铍件，研究了许多方法，当零件具有一个旋转的表面

时,问题比较简单,当形状不规则时需要特殊处理。在某些铍件的早期研究中,在不规则的铍件与规则的包套间使用一种压力传递介质。例如制作铍陀螺套时,见图6。将氯化钠放在形状复杂铍件和圆筒的中间,在热等静压过程,氯化钠将作用力

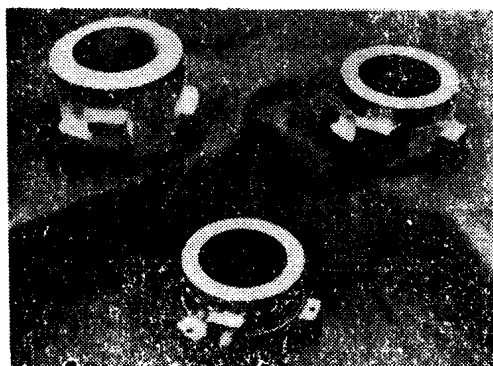


图6 热等静压铍陀螺空气轴承套三种状态
热等静压件,粗车件,精车件

由圆筒传递给铍件,待热等静压之后,将氯化钠溶解于水极易除去。图中示出的铍陀螺空气轴承套的热等静压件,粗车件及精车件三种状态,明显的比较示出采取这种工艺使这种昂贵金属的车削量大大减少。

大型铍件的热等静压,已加工许多种具有高面积/重量比的大型铍件,这些形状有薄壁圆锥件,厚壁圆锥件,大型薄壁半球形件和大的镜盘。到目前为止,用热等静压工艺已生产了直径510毫米,长1020毫米的铍件,这些制件有:

(1) 具有内部结构的薄壁 (<2.5 毫米) 和厚壁 (13毫米) 的圆锥件,其轮廓尺寸直径410毫米,长1020毫米。

(2) 半球形件,直径510毫米,壁厚13毫米。

(3) 带有蛋形格栅结构的整块铍盘,轮廓尺寸直径为360毫米。

3、硬质合金

目前热等静压生产中应用最多的要算是硬质合金。碳化钨几乎全部由粉末冶金法制成,这种产品中经常因含有许多气孔和夹杂降低了产品的强度,由于表面不佳使产品返修率高或者报废。

碳化钨一般经液相烧结之后,含有0.01—0.001%体积的气孔。使用热等静压技术,零件中的气孔和裂纹可通过固态工艺进行闭合,使碳化钨的气孔率降低到0.00001%。

在具有一般气孔率的产品中,相应地在抛光的表面上的每一个平方厘米上有一个50微米直径的气孔。由于意外的污染更大的气孔尺寸为0.25—2.5毫米,或者出现更大的气孔。这样的气孔在一个拉丝模上,冷挤压顶头或冷轧辊的加工表面上是完全不能接受的,这种缺陷还不能用任何无损检验法检验出来,而只能在使用中发现。

气孔对碳化钨陶瓷的强度有许多影响。这些材料坚硬而又脆。产品中的气孔等缺陷和结构的不连续能产生应力集中,高度的应力集中不会出现高的强度。在低载荷下,裂纹形成并迅速蔓延,使强度降低,可靠性变坏。由于热等静压使气孔率降低大约两个数量级,使金属切割工具的平均横向断裂强度提高80%。

另外一个重要的影响是提高产品的平均强度,对任何一种检验试样,能降低强度的分散程度。图7示出一种品位碳化陶瓷强度分布的变化,这种产品用于钻探岩石,用热等静压改善了性能,消除了最低强度的试样。改善的结果,使强度平均值提高20%,在热等静压之前,损坏几率为50%,处理之后降到5%左右。这种碳化物陶瓷为冲击岩石钻品位的,含Co11%,粒度3微米[8]。