

等静压技术

马福康 主编

冶金工业出版社

76.13-1
JH-1

等 静 压 技 术

马福康 主编

3K497/32



(京) 新登字036号

内 容 提 要

本书系统地介绍了等静压技术的基本概念、工艺特性、发展历史,以及该技术在有关领域中的应用,同时也介绍了等静压设备的结构、设计、制造、安装及使用。本书可供从事粉末冶金、陶瓷工艺、铸件生产和机械制造等专业的工程技术人员和科研人员阅读,也可供高等院校有关专业的师生参考。

等 静 压 技 术

马福康 主编

*

冶金工业出版社出版发行

(北京北河沿大街嵩祝院北巷39号)

新华书店总店科技发行所经销

冶金工业出版社印刷厂印刷

*

850×1168 1/32 印张 16 字数 424 千字

1992年3月第一版 1992年3月第一次印刷

印数00,001~1,500册

ISBN 7-5024-0909-2

TG·133 定价13.10元

前 言

等静压技术是现代粉末冶金学的重要组成部分，也是粉体成型和铸件处理的重要手段。因等静压技术在工艺上有独特的优越性，该技术正日益受到人们重视，发展也很快，目前已成为制造高性能材料和特种性能制件的实用方法。

本书共分五章，分别介绍了等静压技术的概念、工艺优点、发展渊源和趋势；冷等静压技术和热等静压技术的成型原理、所用包套和模具、工艺和应用；等静压设备的设计、构造、安装和使用等。

编写本书是为了系统汇集和反映国内外等静压技术的进展和最新成果，以推进我国等静压技术的发展和應用。编写过程中，我们力求做到兼顾国外文献和国内实践的综述，兼顾基本原理和工艺技术的说明，同时兼顾应用实例和设备设计安装调试的介绍。希望通过本书给出有关等静压技术的较为完整的概念。

我们相信，本书对我国从事新型材料生产的工程技术人员、科学研究人员和大专院校的教師、学生将有较大的参考价值。

本书由北京有色金属研究总院马福康同志主持编写。参加编写的有宋兴海（第一章第一节～第四节、第二章）、申林（第一章第五节、第三章第一节、第四节一～四、第六节和第七节）、邓凤翔（第三章第二节）、马福康（第三章第三节、第五节六）、廖郁英（第三章第四节五）、高兆祖（第三章第五节一～五）和苏达增（第四章、第五章）。此外，冯涤王希坤同志也参加了本书编写的准备工作，分别为高温合金粉末固结和等静压设备的有关章节提供了部分文稿。全书经马福康、申林二同志审阅。

由于我们的水平有限，书中错误和不妥之处在所难免，敬请读者不吝指正！

编 者

一九九一年八月

目 录

第一章 总论	1
第一节 基本概念和分类	1
第二节 等静压技术的历史沿革	6
第三节 等静压技术的优点和应用领域	11
第四节 我国等静压技术发展简况	15
第五节 等静压技术发展趋势	16
第二章 冷等静压技术	25
第一节 概述	25
第二节 粉末成型机理	27
一、粉末压制过程	27
二、压力-密度关系曲线	33
三、粉末成型期间的摩擦	46
四、压坯的弹性后效	52
五、影响成型过程的因素	54
第三节 包套和模具	70
一、包套和模具的作用和种类	70
二、包套和模具的组成	73
三、包套和模具的设计步骤	78
四、包套和模具的设计主要因素	80
五、包套材料的选择	99
第四节 冷等静压成型工艺	105
一、干袋法冷等静压成型工艺	105
二、湿袋法冷等静压成型工艺	107
三、冷等静压压坯的形状尺寸和性能	126

第五节 冷等静压技术的应用	134
一、冷等静压技术应用的特点	134
二、冷等静压技术的应用领域	144
 第三章 热等静压技术	151
第一节 概述	151
第二节 热等静压粉末致密化理论	154
一、研究现状	154
二、粉末体及其致密化的几点假设	155
三、粉末致密化速率方程	158
四、粉末致密化速率理论方程的验证及修正	165
五、粉末致密化的微观机制	174
第三节 包套和模具	177
一、包套技术	177
二、包套焊接	190
三、包套检漏	202
四、包套的充填	205
五、包套的抽空及封焊	208
六、包套的装炉及支撑	210
第四节 热等静压工艺	213
一、一般热等静压工艺周期	213
二、热等静压工艺种类	214
三、热等静压工艺参数和选择	219
四、压力介质	222
五、氩气中杂质的测定	230
第五节 热等静压粉末固结（热等静压技术应用之 一）	241
一、高速钢粉末固结	241
二、硬质合金热等静压	252
三、高温合金粉末固结	258
四、钛合金粉末固结	271
五、陶瓷材料粉末固结	283

六、 粉末固结	289
第六节 热等静压铸件处理 (热等静压技术应用之	
二)	298
一、工艺效用和使用设备	298
二、高温合金铸件处理	305
三、铝合金铸件处理	314
四、钛合金铸件处理	320
五、其它铸件处理	324
第七节 热等静压粘结 (热等静压技术应用之三)	326
一、粘结工艺	327
二、粘结工艺的应用	328
三、同种金属粘结	333
四、异种金属 (合金) 粘结	334
五、金属与金属氧化物的粘结	337
六、金属基纤维复合材料的制备	339
第四章 等静压设备	340
第一节 冷等静压设备的主要组成部分	340
一、高压缸 (简称冷缸)	341
二、高压发生装置	343
三、辅助设备	346
第二节 冷等静压设备的主要类型	349
一、湿袋法和干袋法冷等静压机	349
二、螺纹式和框架式冷等静压机	352
三、圆盖式冷等静压机	364
第三节 冷等静压机的主要承载件的设计	367
一、螺纹式冷等静压缸的设计	367
二、单层缸的设计	370
三、双层缸的设计	374
四、绕丝缸体的设计理论及其应用	376
五、叠板框架的设计	396
六、绕丝框架的设计原理及其应用	397

第四节 热等静压设备发展概况	426
第五节 热等静压设备的主要组成部分及其结构类型	433
一、高压缸	434
二、热等静压炉	439
三、气体加压系统	447
四、电器系统	455
五、辅助装置	459
第六节 设计热等静压设备时所考虑的主要问题	461
一、热等静压设备对产品成本的影响	461
二、热等静压炉的结构设计与热计算	464
三、热等静压缸的设计	470
四、安全措施	475
第五章 等静压设备的安装和安全使用	477
第一节 等静压设备的安装和调整	477
一、等静压设备的安装	477
二、等静压设备的调整	481
三、管道的安装	483
第二节 等静压设备的安全使用规程	487
一、冷等静压设备的安全使用规程	487
二、热等静压设备的安全使用规程	488
三、等静压设备的检查	490
附表	492
参考文献	495

第一章 总 论

等静压是粉末冶金领域的一种技术，已有70多年的历史。传统的粉末冶金方法通常使用的机械压力成型技术存在着压力不均和由此引起的产品性能不均等问题。等静压技术的出现为克服这些问题和制作性能更佳的产品开辟了新的途径。在现代工业生产中，等静压技术主要用于粉料的成型和固结。近几十年来，随着科学技术的进步，特别是热等静压技术的发展，等静压技术不再只是粉末冶金的专用技术，它的应用已经扩大到原子能工业、陶瓷工业、铸造工业、工具制造、塑料和石墨等生产部门。随着应用范围的日益扩大，作用和经济效益的不断提高，等静压技术开始越来越受到人们的重视。

第一节 基本概念和分类

在粉末冶金技术领域内，“等静压”(isostatic pressing)一词的实际意义是指在各个方向上对表面密闭的物料同时施加相等的压力的状态。根据帕斯卡原理，在一个封闭的容器内，作用在静态液体或气体上的外力所产生的静压力，将均匀地在各个方向上传递，在其所作用的表面上所受到的压力与表面的面积成正比^[1]。其中，静态液体或气体均属普通的流体。在等静压技术中，作为传递压力的介质，必须与待压工件的外轮廓有一个互不渗漏的分界面。只有在这个分界面存在的条件下，采用等静压技术才能达到成型与固结密实的目的。由此可见，流体介质各向同时均等传递压力是等静压技术的基础，而确立被压物料与压力介质之间互不渗漏的分界面是等静压技术的关键。

将密封于塑性包套中的被压物料或已具备密闭外壳的固体工

件置于充满流体压力介质的高压缸中，利用高压设备对缸中的压力介质施加一定的压力，通过压力介质将压力各向均等地传递到塑性包套或工件的界面上（界面上所受压力的大小与其面积成正比），使被压物料或工件在等静压力的作用下发生一定的体积变形，从而实现等静压制。如果被压制的物料为粉末状物质，当压力均等地作用于塑性包套的表面时，包套内的粉末将均匀地被压缩并致密化，而其外形小于和相似于塑性包套的型腔^[1]。图1-1为等静压制的基本概念示意图。

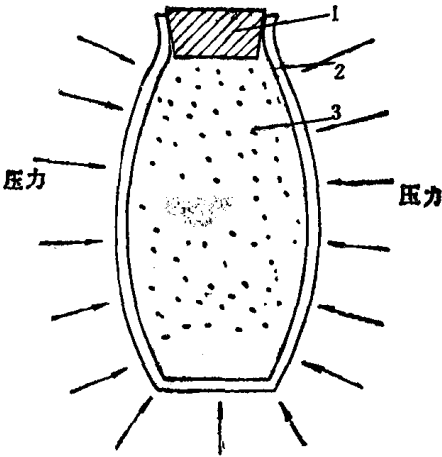


图 1-1 等静压制的基本概念示意图
1—塞子；2—包套；3—粉末

等静压制在生产中的工艺步骤为：待压物料准备→装入包套→包套抽真空并密封→等静压制→包套剥离→压坯检验^[2]。

表 1-1 等静压技术分类

等静压技术	设 备	压制温度	压力介质	包套材料
冷等静压	冷等静压机	常 温	水乳液或油	橡胶、塑料
温等静压	温等静压机	80~120℃ ^[3]	油	橡胶、塑料
热等静压	热等静压机	1000~2000℃	气 体	金属、玻璃

等静压技术按其成型和固结时温度的高低，通常划分为冷等静压 (cold isostatic pressing, CIP)、温等静压 (warm isostatic pressing, WIP) 和热等静压 (hot isostatic pressing, HIP)。从表1-1可以看出，由于实施等静压的温度不同，这三种等静压技术各自采用了相应的设备、压力介质和包套模具材料。

一、冷等静压技术

冷等静压是在常温下实现等静压制的技术，通常以橡胶或塑料作为包套模具材料，以液体或弹性体（塑料、橡胶等）为压力介质。当压力介质为液体时称为液等静压。其中，以含有防锈剂的水为压力介质的称为水等静压，以油为压力介质的称为油等静压；压力介质为弹性体（如塑料、橡胶等）时称为均衡压制、软模压制或厚壁模压制^[4,5]。冷等静压技术基本原理如图1-2所示。

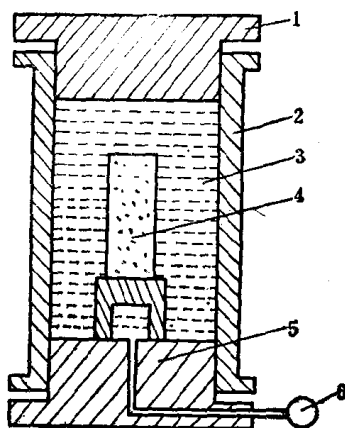


图 1-2 冷等静压技术基本原理示意图

1—上盖；2—高压缸；3—液体压力介质；4—工件；5—下盖；

6—泵

冷等静压主要用于粉状物料的成型压制，为进一步烧结、锻造或热等静压等工序提供预成型坯料。由于所采用成型模具的不同，冷等静压又可分为“湿袋”式（或称“自由”模式）等静压

和“干袋”式（或称“固定”模式）等静压（见图1-3）^{〔1〕}，并相应采用湿袋式等静压机或干袋式等静压机。

湿袋式等静压是将粉料先放入成型模具（即包套）内，经密封后再置于高压缸中进行压制，在湿袋式等静压制过程中，包套完全浸入液体，与压力传递介质直接接触。干袋式等静压是将成型模具（即包套）永久地固定在高压缸内，将粉料直接填入高压缸中的包套内进行压制。湿袋等静压机适用性强，尤其适合用于实验研究和少量生产。其主要优点是可同时在一个高压缸内压制两种以上不同形状的制件，并能生产大型的 和 形状复杂的制件，而且生产流程短和成本低廉。干袋式等静压机适用于简单形状制件的大批量生产。这种设备专业性较强，并便于自动化。

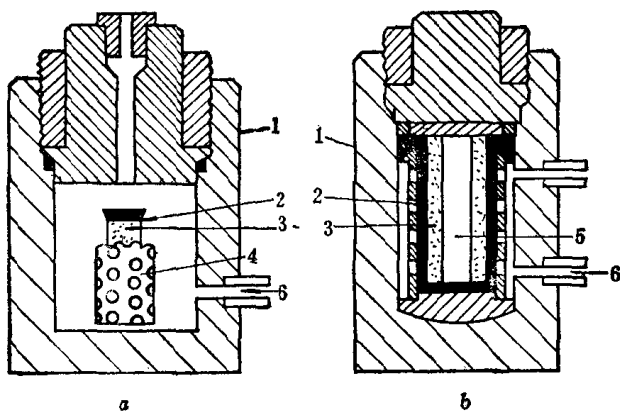


图 1-3 冷等静压模具示意图

a—湿袋式模具；*b*—干袋式模具

1—高压缸；2—包套；3—粉末；4—支撑；5—模芯；6—压力

冷等静压选用的压力根据待压粉料的种类、状态以及压坯的随后处理等要求而定，一般为100、200、300、400MPa，有时也使用600MPa的压力。

二、温等静压技术

从60年代开始，国外对中等温度下的等静压制进行了开发。

这种技术称作温等静压技术。温等静压制一般在 $80\sim 120^{\circ}\text{C}$ 温度下进行，也有在 250°C ，甚至在 450°C 下进行。温等静压制使用特殊的液体或气体作为压力传递介质，一般使用的压力为 300MPa 左右，使用的设备与湿袋等静压机大致相同，在一般温度（ $80\sim 120^{\circ}\text{C}$ ）下使用油作压力传递介质。介质可在高压缸外（即在供油罐中）加热，当要求精确控制温度时，也可在高压缸内用发热体加热。通常将已在供油罐中加热的油抽入高压缸内，用发热体使油温保持在一个稳定的温度水平上，或根据工艺要求进行升温 and 降温^[3]。温等静压技术基本原理示意图见图1-4。当粉状物料在室

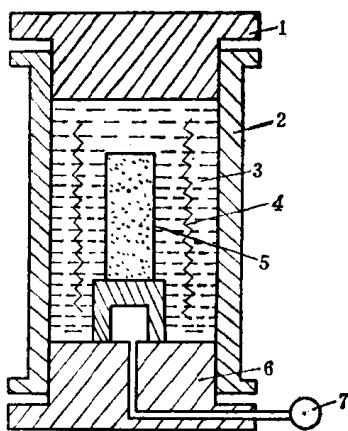


图 1-4 温等静压技术基本原理示意图

1—上盖，2—高压缸，3—液体，4—发热体，5—工件，6—下盖，

7—泵

温条件下不能成型时，可选用温等静压方法，如用于压制和处理石墨^[3]、聚酰胺^[1]和橡胶等材料^[6]，并可在粉末中掺加一种粘合剂，以使能在升高的温度下获得坚实的粉末体。

三、热等静压技术

热等静压技术是一种在高温和高压同时作用下使物料经受等静压制的工艺技术。它不但用于粉末体的固结，使传统粉末冶金工艺的成型与烧结两步作业合并成一步作业，而且还用于工件的

扩散粘结、铸件缺陷的消除和复杂形状零件的制作等。在热等静压制中，一般采用惰性气体（氩、氦）作压力传递介质。因氩较氦价廉，于同样循环中电耗较低，近年来使用氩的趋势日益增大。也可采用液体金属或固体颗粒作热等静压制的压力传递介质，此时也可称为是均衡压制。热等静压包封待压物料用的包套通常用金属或玻璃制备。实现热等静压制的主要设备是热等静压机，其基本原理示意图见图1-5。

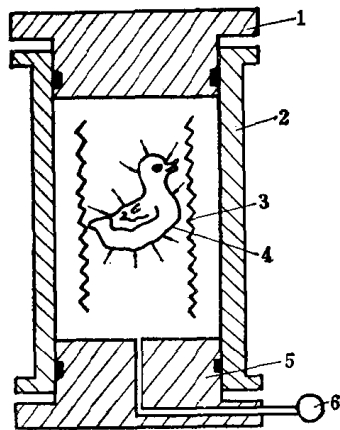


图 1-5 热等静压技术基本原理示意图

1—上盖；2—高压缸；3—发热体；4—工件；5—下盖；6—泵

现代大多数热等静压机为冷壁式结构，即将加热器安放在高压缸内，工作温度一般为 $1000\sim 2200^{\circ}\text{C}$ ，若采用石墨作发热体，其最高温度可达 2600°C 。工作压力通常为 $100\sim 200\text{MPa}$ ，实验装置的最高压力达到 1000MPa ^[7]。热等静压机曾为热壁式，但因高压缸受热产生蠕变，严重影响使用温度和压力，温度一般限制在 1000°C 以下，压力也不超过 100MPa ^[8]。

第二节 等静压技术的历史沿革

20世纪初期，为满足电灯用灯丝的需要，难熔金属钨和钼的材料生产有了迅速的发展。当时采用传统的机械模压成型工艺，

虽然也能将塑性差的细粒钨粉和钼粉压制成小型的坯条，但是遇到了一些难以克服的问题，如裂纹、分层、性能分布不均和压坯强度过低等。马登（H.D.Madden）利用等静压技术解决了这些问题，并在1913年获得了用冷等静压方法成型钨、钼坯条的专利权。美国宾夕法尼亚州的西屋灯泡公司在采用了这项技术后，因制作的钨钼坯条密度均匀，无分层，并具有足以经受后道工艺处理的强度，从而使成品率大大提高^[1]。

随后，库利奇（W.D.Coolidge）和弗斯蒂尔（Pfannstiehl）分别于1917和1919年，取得了用等静压方法压制钨钼管材的专利。菲斯（Fehse）于1928年也撰文论述了湿袋式等静压制钨管的工艺，使难熔金属粉末的等静压技术有了一定的发展^[9]。

在陶瓷工业中，麦克尼尔（Mcneil）于1915年用等静技术获得了以膨胀式塑性包套为内模，金属外壳为型模，成型中空制件的专利。他所使用的原料与常规的原料相比，含水量很低，具有较好的流动性，又具有足够的成型性，并且成型后的压坯由于含水量低，可立即进行烧制。

美国优质陶瓷公司（密执安州、底特律）的杰弗里（A.Jeffrey）于1932年获得了一种成型陶瓷零件的工艺和设备的专利权。在该专利中，他首次应用干袋式等静压机成型了火花塞、研磨球、管坯、卷筒形零件和浅盘形零件。杰弗里早期主要从事薄壁外支撑干袋式模具的研究，于1942年取得第一台半自动干袋式等静压机的专利。在此专利中，他通过对陶瓷料的等静压制、粉浆浇铸和常规模压的对比，比较全面地论述了等静压成型工艺的优越性，同时还指出了等静压成型能同样适用于碳化钨粉末和石墨电极的压制，而石墨电极的电阻可以通过调整粒度、静压成型压力或者加入一定比例的金属粉末来控制。

在同时期，费斯勒（Fessler）和拉塞尔（Russell）取得了利用等静压技术直接成型火花塞的专利，并且论证了等静压成型具有速度快、废品率低、设备简单等优越性^[9]。

在第二次世界大战期间，人们对炸药、特殊金属和陶瓷材料

所进行的等静压成型技术研究，使这一技术从实验室进入了工业化生产。但直到1960年，这项技术才在原子能、冶金、陶瓷和硬质合金等领域中得到应用。

为了克服“干袋”式模等静压机在成型过程只有径向压缩的弱点，人们改用了不与压力介质直接接触的弹性模垫来成型压坯（见图1-6）。这种弹性模垫可以从各方向上传递固定模产生的径向压缩力，从而可获得与“湿袋”式模等静压成型相同的效果。

“干袋”式模的这一改进也有利于该技术实现自动化。

1971年出现了“干袋”式模等静压成型的另一种革新——三向压制。这是一种径向加压与上下两个冲头加压相结合的成型方法（见图1-7）。通过轴向与径向压力的适当匹配，压坯可以得到更高的密度和强度〔2〕。

近年来，已经出现了压制小型且形状简单的陶瓷零件的全自动“干袋”式模等静压机，半自动湿模式等静压机也投入了生产〔20〕。

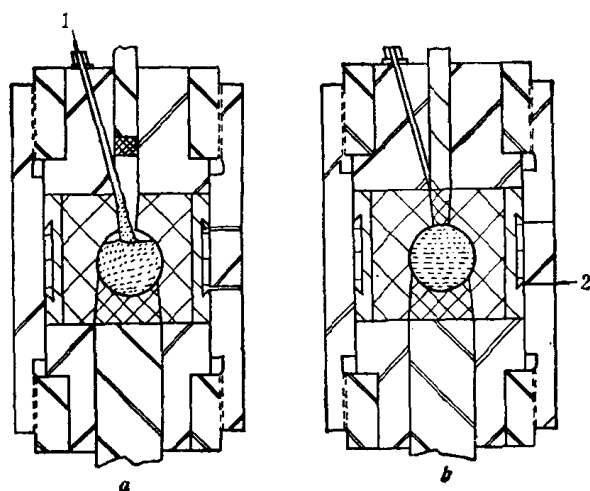


图 1-6 采用弹性模垫的干袋式方法

a—装料；b—压制

1—粉末充填；2—液体压力介质

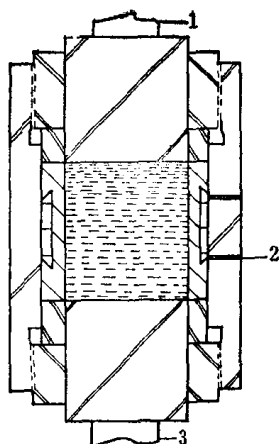


图 1-7 三向压制干袋式模技术

1—上加压冲头；2—液体压力介质；3—一下加压冲头

在粉粒物料的等静压成型过程中，为了改进物料中添加剂的状态，提高成型效果，从1960年开始出现了温等静压成型技术。起初是在高压缸外部加热，温度一般可达 250°C 。后来为了成型聚酰胺，曾建造了温度高达 450°C 的温等静压机。为了使成型温度稳定和均匀，最后出现了加热器置于高压缸内部的内热式装置，加热温度一般为 $80\sim 120^{\circ}\text{C}$ 〔1〕。

热等静压技术，包括早期所谓的“高温气压粘结”方法，是自本世纪50年代中期开始研制和迅速发展起来的。该技术的开拓者是美国巴特尔哥伦比亚实验室(Battelle's Columbus Laboratories)的萨勒(Saller)和戴顿(Dayton)等人。该实验室在1955年为美国原子能委员会试制核燃料元件时探索了这种热等静压扩散粘结工艺，并于1956年建造了第一台热等静压机。60年代，采用这种工艺，成功地将锆合金和不锈钢等材料包复在二氧化铀上，同时实现了粘结和致密化，获得了良好的效果，这是热等静压技术在工业中的首次应用。

60年代中期，气体雾化法生产粉末的研制成功，对热等静压技术的迅速发展起了重要的作用。在此期间，运用这种技术已能