



粉末冶金/热等静压(PM HIP)零件的 生产工艺与设计准则

韩凤麟

摘要: 热等静压(HIP)经过几十年发展,现已成为一种用各种金属和/或陶瓷制造形状复杂的、高性能零件的、竞争性制造技术。这些零件现已用于许多对环境要求高的产业部门,例如:航空航天、近海油与气田、能源及医疗等。这篇评述主要讲述关于在金属包套中压制金属粉末的 HIP 工艺过程,即所谓的 PM HIP 零件的生产工艺、设计准则及其应用。

关键词: 粉末冶金;热等静压;粉末冶金/热等静压。

The PM HIP parts process and design guidelines

Han Fenglin

Abstract: HIP has established itself in the past decade as a competitive and proven manufacturing process for the production of complex and highly specified components made from a wide range of metals and/or ceramics. These components are currently being used in a number of industry sectors that have highly demanding environments for example: aerospace, offshore, energy and medical. In this review which is aimed at users or potential users of HIP parts, and focus on HIP technology for the compaction metal powders in a metal container and design guidelines.

Key words: powder metallurgy; HIP; PM HIP.

1 概述

热等静压(HIP)是一种在炉(图1)中,于高压(100-200MPa)与高温(900-1250℃)下,使粉末或烧结件及铸件(诸如,钢与高温合金)致密化的制造技术^[1,2]。由于气体压力是从各个方向施加的,因此,可使被处理的材料形成各向同性的性能与100%致密化。在许多应用中,HIP具有许多优势^[3],现已发展成一种可替代诸如锻造、铸造及切削加工等常用工艺的,富有生命力的高性能产品制造工艺。

热等静压和MIM(金属注射成形)、常规粉末冶金压制-烧结工艺或叠层制造(Additive Manufacturing)工艺相结合时,不但可使生产的产品致密化,而且可生产半精加工的棒材或板坯。

用热等静压可制造各种类型的零件,诸如重量高达30t的油与天然气零件、直径大到1m的最终形涡轮等大型与整体近终形金属零件,同时,也可制造小的粉末冶金高速钢切削工具,诸如由粉末冶金/热等静压(PM HIP)半精加工产品制造的重量小于100g的丝锥或钻头,甚至,像牙托架之类很微小的MIM零件。

因此,近年来,热等静压(HIP)已发展成一种可生产许多金属(或陶瓷)零件的、高性能、高质量及价格可行的制造工艺。

图2示PM HIP(粉末冶金/热等静压)与其他工艺的比较

2 粉末冶金/热等静压(PM HIP)生产工艺

在这里所讲的PM HIP是于金属包套中压制金

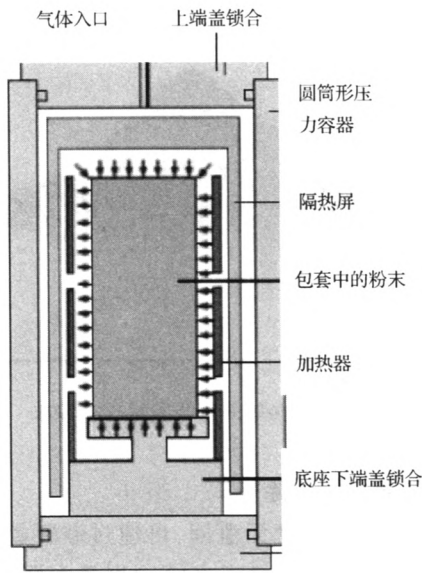


图 1 热等静压 (HIP) 炉简图

属粉末的 HIP 工艺。在这种情况下,是在温度可保证使粉末颗粒间接触表面间的扩散,一直进行到所有空心空间闭合下,用压力压制粉末的。

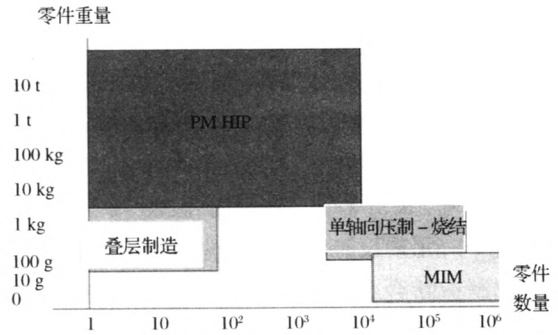


图 2 PM HIP 工艺和其他工艺的比较

和常规粉末冶金工艺比较起来,PM HIP 工艺较精益与较短。近 20 年来,HIP 的能源与材料费用减少了 65%。

PM HIP 的主要生产工序如下:

- (1) 粉末制造;
- (2) 包套制造;
- (3) 用粉末充填包套与密封;
- (4) 热等静压制;
- (5) 除去包套;
- (6) 后续加工作业。

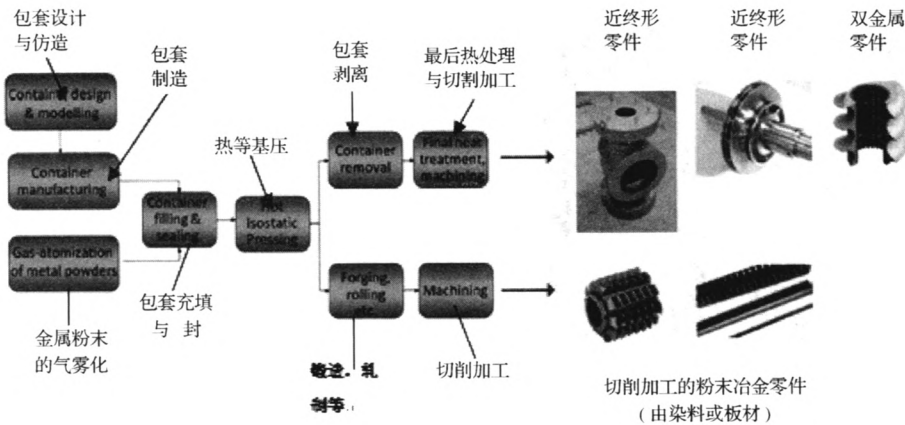


图 3 PM HIP 的生产路线图

注 原图见附录的图 3。

2.1 粉末生产

大部分适用于 HIP 的金属粉末都是用惰性气体(诸如,氮气或氩气)气雾化生产的,这是因为:

- 球形粉末颗粒形状完美;
- 球形颗粒与其粒度分布的充填密度高;

· 粒度分布的再现性好,可保证变形性状的均一性与可预测性;

· 凝固速率高,可生产的合金范围大。

附注:气雾化和水雾化或离心雾化都是物理方法,这和化学或机械粉碎方法不同。

适用于热等静压的金属粉末是各种各样的。除了标准的或定制的钢、镍基与钴基合金组成外,可用于热等静压的,还有诸如钛、铜、铅、锡、镁及铝合金等多种粉末。PM HIP 工艺另外一个优势是,由于凝固速率高,可考虑不能用铸造或锻造生产的新合金组成。的确,在等静压时,由于温度低于熔点($\sim 0.8T_{固相线}$),元素没有时间像铸造那样进行偏聚。对于研发制造新合金,这是十分难得的。例如,在下列情况下:

- 耐磨性或耐热性较高的工具钢;
- 在严酷环境中使用的耐蚀性高的不锈钢;
- 复合材料,例如耐磨金属与陶瓷复合材料。

表 1. 示用于热等静压的一些标准粉末合金的例子。

表 1 用于热等静压的一些标准粉末合金的例子

不锈钢	工具钢	高速钢	镍基合金	钴基合金
17-4 PH	D2	PM23	Ni 625	Co 6
304L, 316L	D7	PM30	Ni 690	Co 12
410, 420, 440	H13	PM60	Ni 718	Co F
2205, 2507		A11	Astroloy	
254 SMO@		M4		
654 SMO@		T15		
S31254				

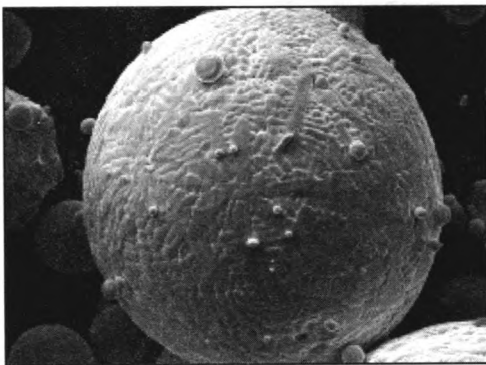


图 4 气雾化粉末的 SEM 照片

2.2 包套制造

包套制造的工序如下:

- (1) 包套板材的切割与成形;
- (2) 用钨极惰性气体保护(电弧)焊(TIG)将钢板与附加管件及金属镶嵌件进行组装;
- (3) 用抽空包套与在压力下通入氩气进行泄漏检验。发现与查出泄漏时,及时修复。

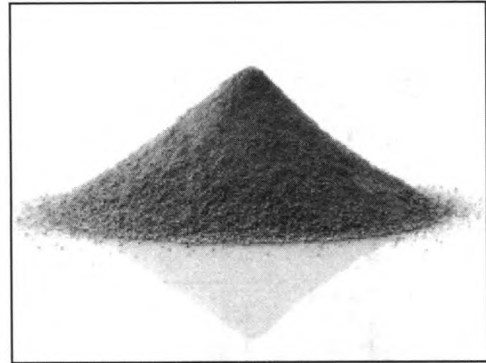


图 5 热等静压用的气雾化粉末

2.3 包套充填与除气

一旦确定包套无泄漏,可通过装料管将粉末装入包套中。为了使粉末充填达到最大限度与均匀,采用了振动台,以保证可预测的均一收缩。振动将使粉末能较好地充填狭小空间与细小部位。在特殊情况下,诸如关键的航空航天应用,为了将粉末的污染减小到最小限度,充填作业是在惰性气体或真空中进行的。

下一道工序是抽空除气以除去吸附的气体与水汽。除气之后,将充填管焊死,密封包套。这时,无泄漏是关键。否则,对 HIP 容器加压时,氩气会进入包套内,并被截留于粉末材料中,形成充满氩气的孔隙,导致材料的力学性能恶化。

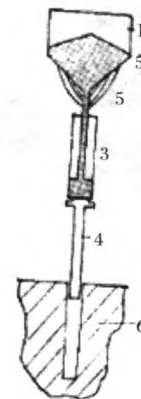


图 6 装料机构^[2]

2.4 热等静压过程

进行热等静压时,温度、氩气与压力及保压时间都将因材料种类不同而异。在充填与密封后要将热



图 7 带装料与除气管的包套结构例^[1]

- 1 - 料仓; 2 - 粉末; 3 - 包套; 4 - 升降装置; 5 - 输粉支管;
- 6 - 振动台

等静压容器进行排空,以清除空气。然后,在升温时,使容器内的氩气压力增高。达到设计的压力之后,会由于气体的热膨胀,完成压力增高。在保压期间,气体的压力与温度都要保持恒定。之后,进行快速冷却,同时,压力与温度减低。

- 选择的温度要低于约 $0.8 \times T_{\text{固相线}}$ 以免出现液相;

- 一般使用的气体为氩气,但在特殊应用中,可以使用其他气体或混合气体;

- 压力的升高是用压气机进行的;

- 在容器内部气体压力是相等的,而外部是隔热屏的。但是,因为容器外部的隔热屏比内部的温度低,所以外部的密度较高。

现代 HIP 装置的特点是采用均一快速冷却 (URC),其是在可控速率高达 $100^{\circ}\text{C}/\text{min}$ 下,用温度较低的气体进行循环冷却。由于将冷却阶段缩减了 80%,从而大大缩短了淬火的周期时间。同时,还可将热处理与 HIP 合并为一道工序来完成。均一快速冷却限制了零件的晶粒长大与热变形,同时由于采用的是高纯氩气,避免了表面污染。

HIP 处理的周期时间通常是,从 8 h 延长到 24 h。

HIP 装置(图 1)主要由压力容器、加热系统与氩气系统组成。HIP 现在有不同的结构:

- 有或无框架(对于压力大于 100 MPa 与 HIP 直径大于 90 mm 的装置,为了安全,要选用有框架结构);

HIP 周期: 常规冷却与 URC 的比较
温度, $^{\circ}\text{C}$ 红色
压力, bar 绿色

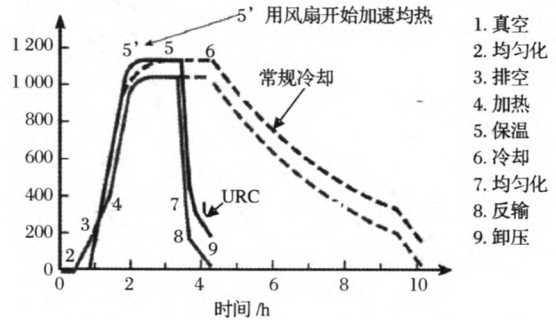


图 8 常规与均一冷却 (URC) 的典型 HIP 处理周期

- 有或无端盖螺纹锁紧装置;
- 有各种不同的加热系统。

对于温度高达 1350°C 的,可使用钼加热炉,而对于温度高达 2200°C 的,使用碳石墨/钨加热炉。内部是压力容器和用隔热屏(陶瓷纤维与钼片)来防止钢压力容器受热和保持隔热屏内的高温。底部、盖与压力容器都是用水冷却的,以防止密封环与容器受热。

大型 HIP 装置,直径可达到 2 200 mm 与高度大于 4 000 mm,生产能力高达 30 t。

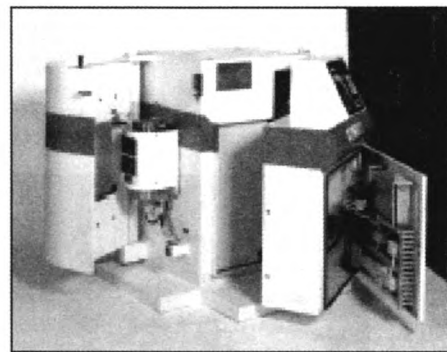


图 9 实验室规模 HIP

2.5 包套剥离

HIP 处理之后,可用下列方法剥去包套(当包套不再用时):

- 切削加工;
- 酸浸蚀;
- 脱出。

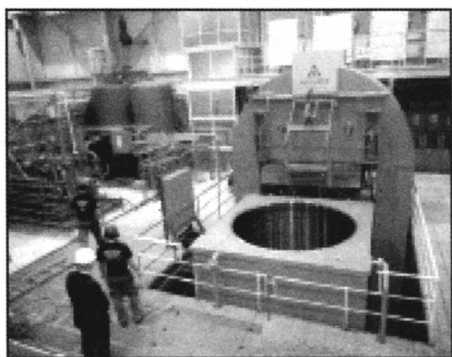


图 10 大型 HIP 装置

表 2 剥去包套的各种方法的优、缺点

方法	优点	缺点	条件
切削加工	尺寸精确	费时间与昂贵	若可加工时(工具的可达性)
酸浸蚀	不需要切削加工	专用的酸洗池,同时要保护环境	仅只用于不锈钢零件与低碳钢包套
滑脱出	不需要切削加工	隔离层的费用	玻璃包套或需要隔离层

2.6 后续处理作业

- 热处理;
- 切削加工;
- 精磨削加工;
- 表面处理;
- 组装。

2.7 质量与检验

依据制造的零件大小与价值,要进行各种质量检验。最常用的二种检验方法是超声检验与差色渗透检验。对于关键性的高价值应用,也进行 X 射线计算机断层扫描。

3 PM HIP 零件的显微结构

PM HIP 由于冷却速率高,可得到细小、规则的显微结构,同时强度值和锻件相似。

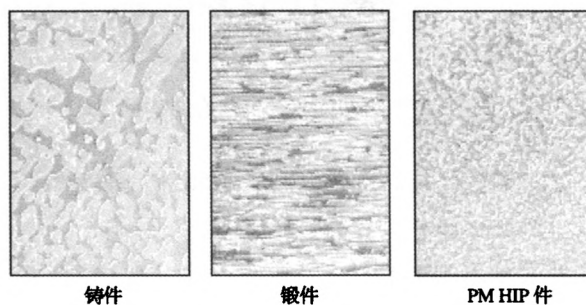


图 11 双相不锈钢的铸件、锻件及 PM HIP 件的显微结构

下面的二个例子突出表明了这种细小、各向同性的显微结构可提供的主要好处。

3.1 不锈钢

用 HIP 生产的不锈钢零件的性能特点有:

- 优异的综合韧性与强度;
- 各向同性的力学性能;
- 力学性能比锻件好或相同;
- 耐蚀性和锻件相比,相同或较好

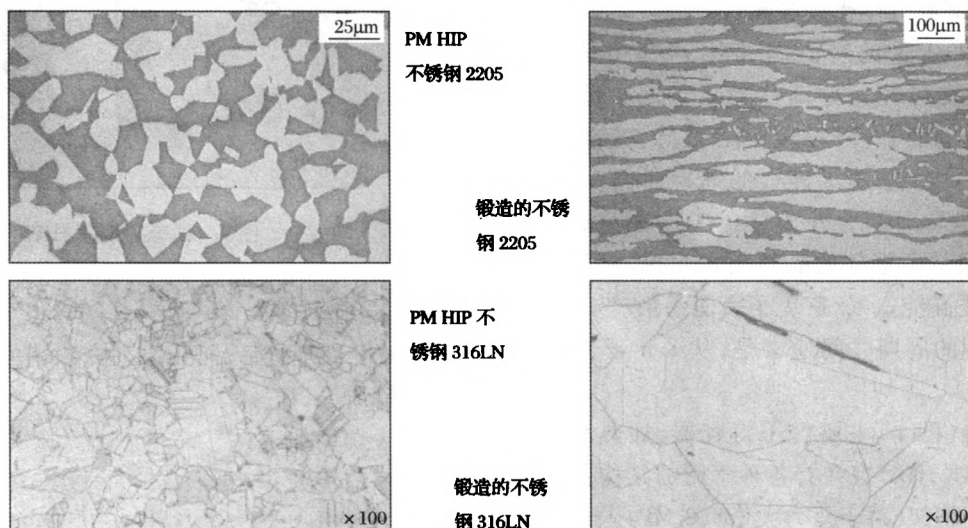


图 12 HIP 的与锻造的不锈钢的显微结构

3.2 高速工具钢

HIP 工具钢的性能特点有:

- 工具寿命较长;

- 工具寿命较可靠;
- 疲劳强度较好;
- 由于碳化物含量较高,耐磨性较好。

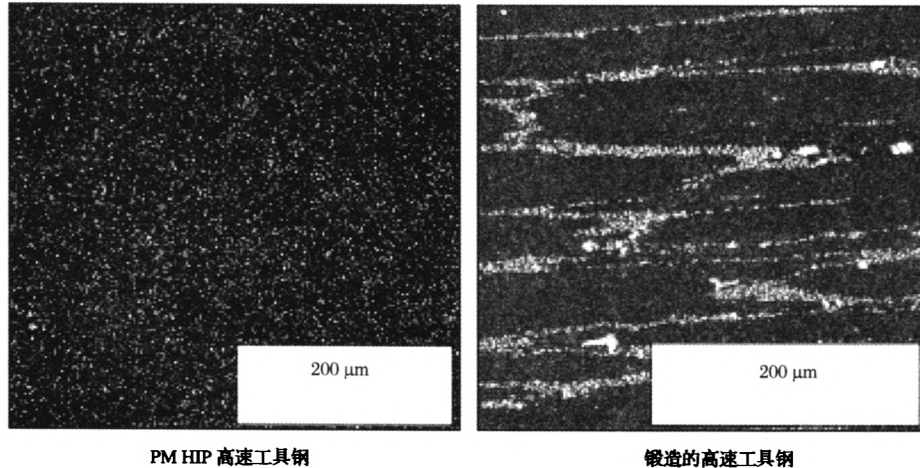


图 13 HIP 的与锻造的高速工具钢的显微结构

4 设计准则

4.1 概述

为了使读者对 PM HIP 技术感兴趣,对这项技术的应用与特殊问题能有较多了解,兹对 PM HIP 零件设计与制造的一些须知事项概括地予以说明。

在考虑 PM HIP 技术时,零件设计者可在以下四种情况中进行选择:

- 简单形状,诸如圆形、管状或扁条等,他们都需要进一步或者切削加或者锻造与轧制;
- 近终形(Near-net-shapes),其可减少切削加工与焊接;



图 14 设计 PM HIP 零件时的可能选择

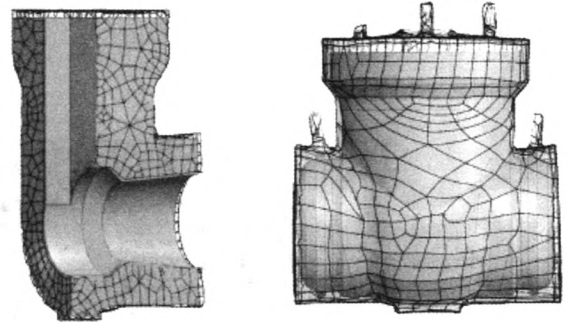
- 复杂的最终形 (Net-shapes), 其不需要对零件的功能部位进行切削加工。这为设计不能削加工的零件与几何形状提供了较大的自由度。

- 双金属或复合结构, 在这些场合, 可作为替代离子喷涂或喷涂的技术, 将金属粉末 HIP 到常用的金属基片上。

4.2 计算机仿造

将用计算机仿造 (modelling) 和 HIP 设计工程师的经验相结合, 可精确模拟粉末的致密化与收缩性状, 并可得到最佳的包套几何形状与尺寸。

计算机仿造可使 HIP 工艺最佳化, 特别是对于复杂的几何形状。其还使设计师可达到尽可能精确的最终形状, 从而可省掉昂贵的切削加工作业或可避免发生任何零件尺寸过小的危险。

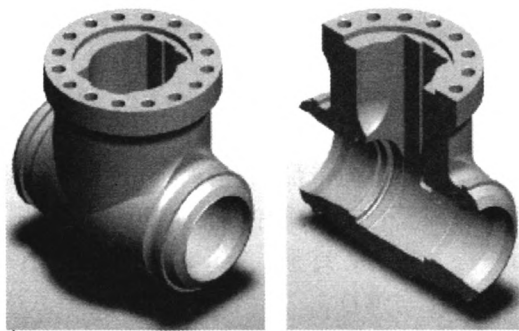


FEA 预测的与 HIP 目标的比较 HIP 后的与最终切削加工的比较

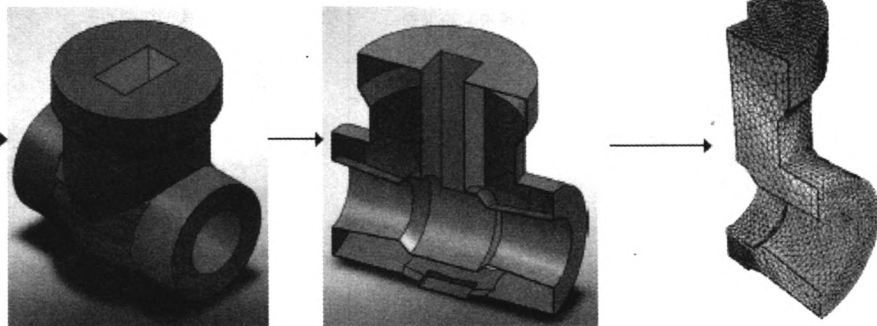
图 15. HIP 零件仿造例

注: FEA-有限元分析

计算机仿造在转角半径小的场合特别有用, 因为这时包套的厚度不同, 或者是对于形状复杂的最终形零件。



切削加工的与锻造的泵体的 CAD 照片



零件简化几何形状 (HIP 对象) 根据 HIP 对象几何形状的外壳设计 用 FEA 仿造预测的最终形状

图 16. PM HIP 零件的设计步骤

4.3 包套材料

在设计 PM HIP 零件时, 包套的材料与厚度都是重要的参数。

包套材料必须满足下列条件:

- 必须足够强固, 以在 HIP 之前与 HIP 期间能保持形状与控制尺寸;
- 在 HIP 温度下, 必须柔软并具有韧性;
- 必须和被加工的粉末相容, 而且, 既不会渗

人,也不会与粉末材料发生反应;

- 在低压与高压下必须不发生泄漏;
- 为了密封可靠和 HIP 后可剥离,必须是可焊接的。

最常用的包套材料是低碳钢或不锈钢。可是,在特殊场合,对于压制难熔材料,包套可用像钛之类高温材料或玻璃制造。正常的包套厚度在 2-3 mm 之间。

表 3 不同包套材料的比较(一)

包套	费用	变形		起始压力	可焊性
		<800℃	>800℃		
低碳钢	优	中等	好	<100 bar	好
不锈钢	中等	好	好	>50 bar	好
高温材料	高	差	中等	<100 bar	差
玻璃	好	差	好	<100 bar	中等

* 为避免包套开裂

表 3(续) 不同包套材料的比较(二)

包套材料	加工	开裂的危险	包套剥离		
			分离	酸浸蚀	切削加工
低碳钢	好	低	差	好	好
不锈钢	好	低	差	差	好
高温材料	差	高	差	差	差
玻璃	不好	中等	优	差	差

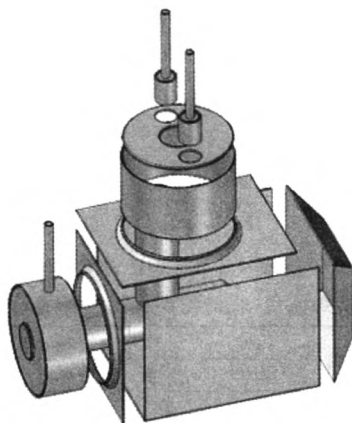


图 17 最终形包套结构例

4.4 包套收缩

在热等静压的过程中,包套的收缩不是各向同性的,而是取决于许多参数的,诸如:

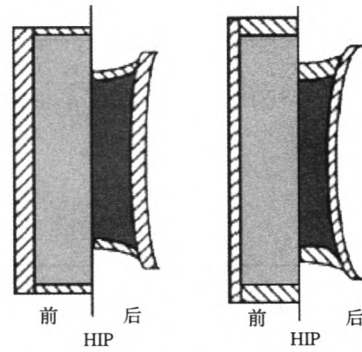


图 18 在 HIP 包套设计中板料厚度的影响

- 包套材料;
- 包套的总体几何形状;
- 包套厚度;
- 包套焊接的位置;
- 包套内粉末充填密度的变化。

例如直圆柱体包套的端面板的径向收缩程度将与圆柱截面不同。这会造成所谓的《象脚》或《砂漏》的端面效应(见图 18)。

4.5 包套焊缝的位置

包套上焊缝位置对热等静压时变形的性状有重大影响。在设计 PM HIP 零件时,这是必须注意的,在表 4 中说明了每一种方法的优、缺点。

方法 3 的主要好处是变形规则和焊接工作较少。在方法 4 中,由于气体压力是施加于二个侧面,结果可减小作用于焊缝的应力。因此,和设计方法 1 与 2 相比,通常更愿意采用设计方法 3 与 4。

表 4 各种不同焊缝位置的比较

	优点	缺点	变形
方法 1	结构简单	开裂的危险。角太坚硬。焊接工作量大。	中心强
方法 2	焊接工作较少	角有开裂的危险。需要将板材成形为 U 型。	中心强
方法 3	变形规则。焊接工作较少与开裂的危险较小。	需要将板材成形为带半径的 U 型。	收缩规则
方法 4	开裂的危险较少	焊接工作较多。角较坚硬	中心强

4.6 包套变形

HIP 后,包套会发生变形。这种变形也取决于选择的结构与包套内装的材料,见图 20。

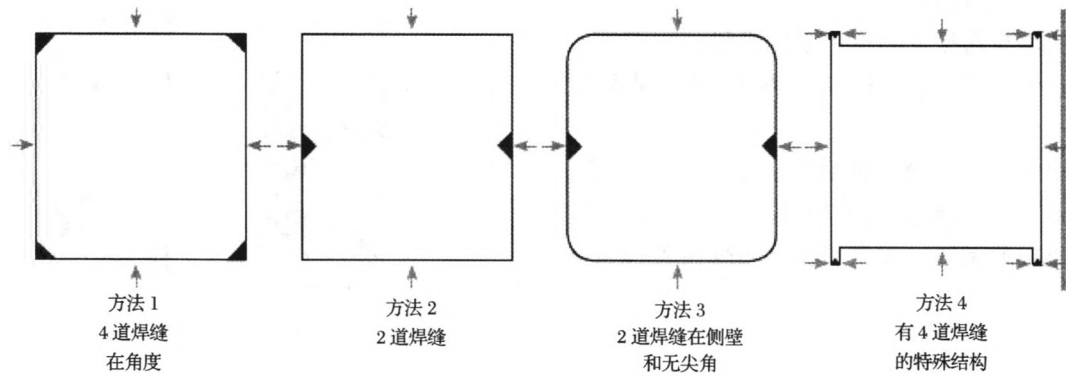


图 19 各种不同包套结构的选择

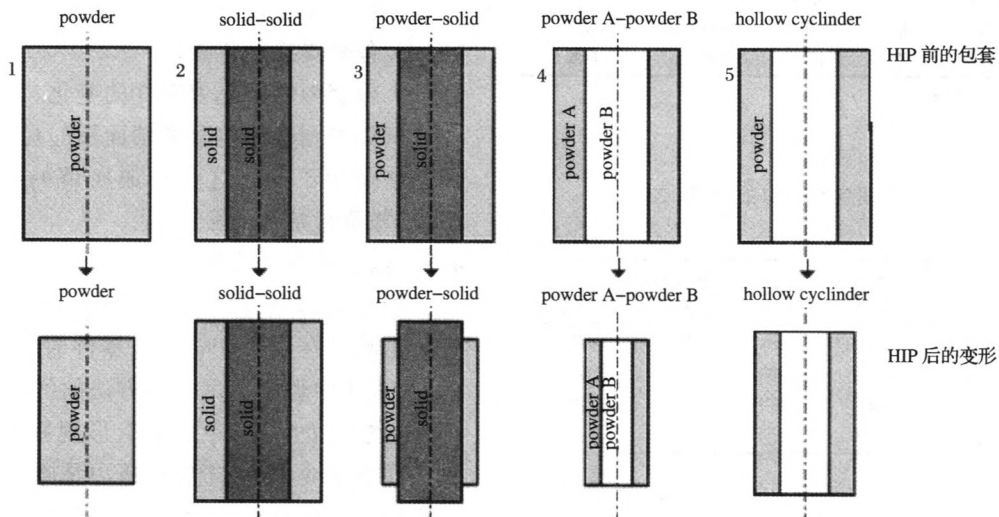


图 20 HIP 后包套的变形取决于所选择的结构

注: powder—粉末 solid—固体

就包套内的填充料来看,主要有五种方式可以选择:

1. 100% 粉末:用粉末充填包套;
2. 固体—固体:二种不同固体材料的复合体(扩散粘结);
3. 粉末—固体:粉末与固体芯棒的复合体;
4. 粉末—粉末:二种粉末的复合体;
5. 用粉末充填的中空包套。

所选择的充填方式对直径与长度收缩的影响见表 5。

4.7 PM HIP 零件的公差

在 HIP 之前,包套中粉末充填的体积密度约为

74%。

表 5 通常收缩取决于 PM HIP 零件的类型。可是,在特殊场合,收缩的性状可能有所不同。

选择的方式	收缩	
	直径	长度
100% 粉末	是	是
粉末—固体	仅只粉末	仅只粉末
粉末—粉末	二者	二者
固体—固体	不	不

HIP 时,将产生收缩与变形,和 PM HIP 零件的公差将取决于许多参数,诸如:

- 粉末充填密度;
- 粉末的颗粒形状;

- 粉末的粒度分布;
- 粉末粒度分布的均一性;
- 焊接的数量;
- 焊接的位置;
- 包套材料;
- 包套厚度;
- 固体材料的几何形状;
- 包套的几何形状;
- 最终零件的几何形状;
- 起始压力;
- 充填装置。

5 PM HIP 技术的优势与主要用途

5.1 PM HIP 技术的主要优势

PM HIP 技术在下列关键方面具有许多优势:

(1) 零件质量与使用性能

· 由于显微结构细小与各向同性,可改进零件的材料性能;

- 可减少复杂形状零件的焊接数量;
- 致密,无偏聚。

(2) 设计适应性

- 近终形、最终形或双金属结构;
- 可使用复合材料;
- 零件大小与生产批量的灵活性。

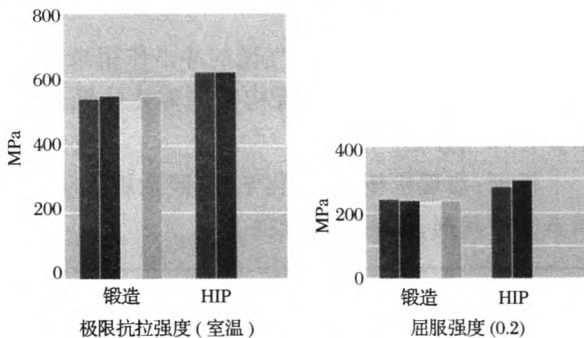


图 21 用锻造与 HIP 制造的 316L 不锈钢的各种试样的性能比较

(3) 减低生产成本

- 精致的制造路线,导致生产的研制周期较短;
- 在以前需要几个零件的地方,可改为生产一个零件;

· 需要的 NDT(无损检验)较少和较容易 NDT。

(4) 可减少对环境的影响

在近终形与最终形零件在场合,材料的回收率比常规冶金优异。

鉴于以上原因,质量高与价格可行的 PM HIP 技术可替代铸造、锻造及切削加工工艺。

5.2 PM HIP 的用处与应用

本文以上讲的主要是压制金属包套内金属粉末的 PM HIP 技术。可是,热等静压也广泛地用于以下方面:

- 使铸件致密化;
- 使诸如硬质合金或陶瓷之类烧结粉末零件致密化;
- 使 MIM 零件致密化
- 金属零件的扩散粘结。

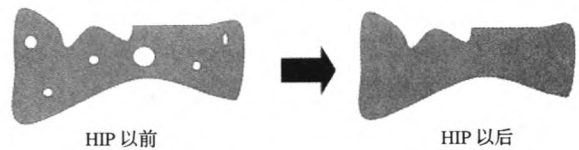


图 22 利用将压力与温度相结合的热等静压,使残留的内部孔隙闭合

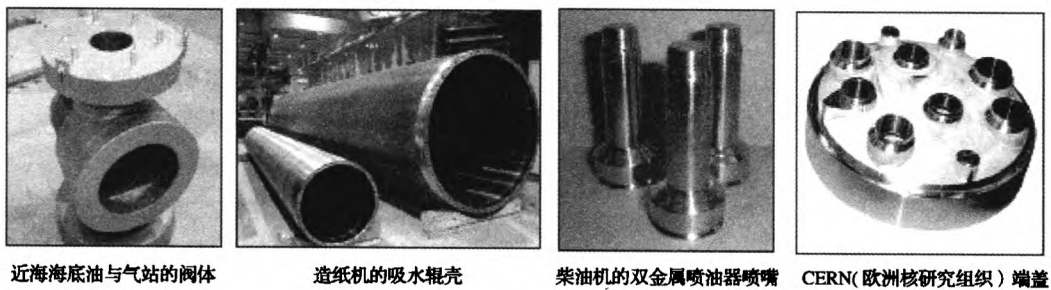
鉴于使用范围这样广泛,现在用 HIP 制造的,往往都是许多产业部门使用的关键性部件与在腐蚀性环境中使用的零件。其中的一些例子如:

- 能源;
- 制造产业与工具;
- 运输与航空航天;核能与科学研究;
- 石油与天然气。

5.3 和其他制造工的比较

往往用 PM HIP 技术替代常规制造工艺(诸如锻造与铸造)。特别是,由于 PM HIP 具有下列特点:

- 由于显微结构细小与各向同性,可改进材料性能;
- 由于可扩大合金化范围,可改进耐磨性与耐腐蚀性;
- 可减少焊接的数量和相关费用及检验问题;
- 通过选择近终形,可将二个单独焊接在一起的零件改为用一步生产;
- 由于选择双金属,可将昂贵的材料仅用于零件功能部分;
- 由于选择近终形或最终形,可减少切削加工费用;



近海海底油与气站的阀体

造纸机的吸水辊壳

柴油机的双金属喷油器喷嘴

CERN(欧洲核研究组织)端盖

图 23 在每一种场合, HIP 在关键性应用中都是首选的加工方法

· 对于用切削加工难以或不能形成的内部的复杂形状空腔, 提供了新解决方法。

和铸造或锻造零件相比, PM HIP 技术还有一些好处, 特别是在下列情况下:

- 由于可制造成近终形或最终形, 可使用高价值材料诸如合金钢或镍基与钴基合金;
- 可生产小批量的大型与复杂形状零件;
- 在加工费用高的地方, 可将多道作业(诸如切削加工, 焊接及检验)合并为一道工序进行。

总之, PM HIP 可提供创新的解决方法, 来缩短制造的周期时间和生产小批量零件。

表 6 各种制造工艺的比较

	焊接	锻造*	铸造	PM HIP**
三维显微组织(各向同性的显微组织)	差	差	好	优异
均一性	差	差	好	优异
无偏聚	差	好	中等	优异
三个方向的强度性能(各向同性)	差	差	好	优异
强度性能水平	低	中等	低	高
近终形	中等	低	优异	中等
大批量或重复需要	中等	好	优异	中等
需要模型/包套	不	不	是	是
材料回收率	高	低	高	高
需要模型	不	不	是	不
价格竞争性—大批量	中等	中等	高	中等
价格竞争性—小批量或单件批量	中等	高	高	中等
交付时间—大批量	中等	低	低	中等
交付时间—小批量	中等	高	高	中等

* 无模锻造(即。既不是开式也不是合模锻造)

** PM HIP 近终形零件。在 PM HIP 最终形零件的场合, 形状精度与可再制性优异, 和铸造一样。

参考文献

- [1] www.epma.com.
 [2] 马福康. 等静压技术. 北京, 冶金工业出版社, 1992.
 [3] 张义文. 热等静压技术新进展, 粉末冶金工业, 2009, 19(4):

机械合金化

机械合金化是将金属和金属粉末在高温球磨机中通过粉末颗粒和球磨之间的长时间的激烈冲击, 碰撞, 使粉末颗粒反复产生冷焊、断裂, 促进粉末中原子的扩散从而获得合金化粉末的一种制备法。

机理过程: 转子搅动球体产生相当大的加速度并传给物料, 因而对物料有较强烈的研磨作用。同时, 球体的旋转运动在转子中心轴的周围产生漩涡作用, 对物料产生强烈的环流, 使粉末研磨得很均匀。

二流雾化

借助于高压水流或是气流的冲击作用来击碎液流, 由雾化介质与金属液流构成的雾化体系。包括水雾化和气雾化。

机理: 物理机械、物理化学、破碎金属液动力、金属液的冷却剂, 能量热量交换。

优选粉末冶金的基本原则:

- 1、自润滑性零件: 含油轴承类零件, 件小量大
- 2、同一品种大批量的各种结构件: 形状复杂, 不加工和少加工

粉末冶金和其他传统机械加工工艺生产零件的材料利用率和能耗					
加工工艺	铸造	冷成型	锻造	机械切削加工	粉末冶金
材料利用率/%	80~95	80~90	75~85	<50	95~98
能耗/MJ·kg ⁻¹	40	40	50	80	30