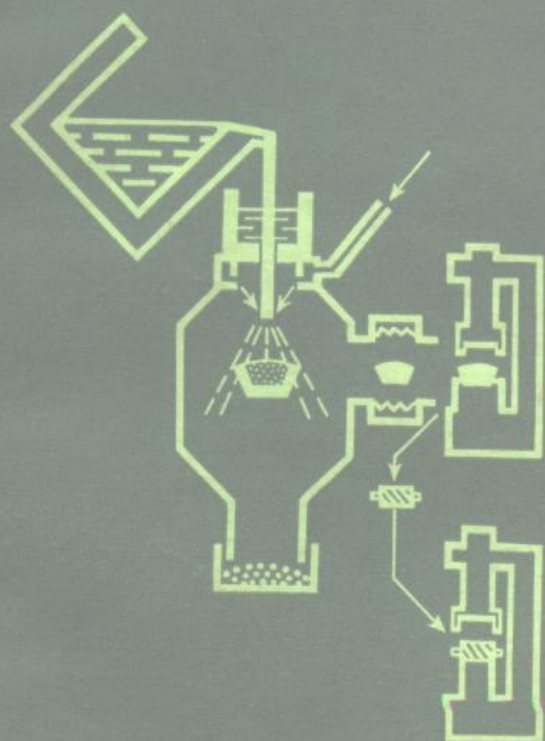


粉末冶金新技术

FENMO
YEJIN
XINJISHU

粉末热锻

FEN
MO
RE
DUAN



冶金工业出版社

粉末冶金新技术

粉末热锻

姜振春 编

冶金工业出版社

内 容 简 介

粉末热锻是粉末冶金领域近年来发展起来的一门新技术。本书概括地介绍了粉末热锻用预合金粉末的制取方法及其物理性能和工艺性能；根据粉末热锻工艺的特点，扼要叙述了粉末原料的预处理、预成形坯的制备、烧结、加热锻造以及锻制品的热处理；还介绍了粉末热锻结构钢、高速钢、不锈钢、磁性材料以及钛合金、铝合金、镍基高温合金的制造工艺及其物理机械性能。

粉末冶金新技术

粉 末 热 锻

姜振春 编

*

冶金工业出版社出版

新华书店北京发行所发行

冶金工业出版社印刷厂印刷

*

787×1092 1/32 印张 4 3/8 字数 94 千字

1981年3月第一版 1981年3月第一次印刷

印数 00,001~4,000 册

统一书号: 15062·3481 定价 0.37 元

前 言

随着我国社会主义建设的发展，对于粉末冶金这项少切削、无切削工艺提出了新的更高的要求，为了改善普通粉末冶金材料的材质，提高制品的物理机械性能，近年来，国内外采用了粉末热锻这项新技术制取高性能的材料和制品。

粉末热锻工艺综合了粉末冶金和精密锻造的优点和长处，把普通粉末冶金与精密锻造工艺结合起来，使粉末冶金材料的密度提高到理论密度的98%以上。粉末热锻制品既具有相当于或高于普通熔铸制品的物理机械性能，又具有普通粉末冶金制品所具备的形状复杂、表面精度高等特点，而且还具有生产率高，材料利用率高，模具寿命长等经济效果。

粉末热锻这项新技术的出现为粉末冶金开辟了一个新的领域，扩大了粉末冶金材料和制品的应用范围。粉末热锻零件在农业机械、矿山机械、冶金机械、汽车和船舶等运输制造业、机床以及轻工业等方面得到了广泛应用；粉末热锻工具材料和高温合金等也在推广使用。实践证明，粉末热锻工艺是一项多快好省的新工艺。

为了普及粉末热锻新工艺，特编写了《粉末热锻》一书，供粉末冶金工作者参考。在编写本书的过程中得到了不少同志的帮助，在此一并表示感谢。由于编者知识所限，难免出现错误和不妥之处，请批评指正。

编 者

一九七八年七月

目 录

前 言

第一章 概论	(1)
第一节 粉末热锻及其特点	(1)
第二节 粉末热锻变形原理概述	(3)
第二章 热锻用金属粉末	(7)
第一节 热锻用金属粉末的选择	(7)
第二节 雾化粉末	(13)
第三节 铁—钼共还原粉末	(20)
第三章 预成形坯的制备	(24)
第一节 预成形坯设计	(24)
第二节 预成形坯的烧结	(33)
第四章 粉末热锻工艺参数	(38)
第一节 粉末热锻工艺参数	(38)
第二节 预成形坯锻前加热及锻模预热和润滑	(45)
第五章 粉末及粉末锻件热处理	(48)
第一节 粉末热处理	(48)
第二节 粉末热锻材料热处理	(52)
第六章 感应加热及加热气氛	(62)
第一节 感应加热	(62)
第二节 加热气氛及其控制	(64)
第七章 闭模锻造成形模具的设计	(72)
第一节 模具设计要点	(72)
第二节 模具材料的选择	(74)

第八章 粉末热锻机械及其自动化·····	(78)
第一节 粉末热锻机械·····	(78)
第二节 粉末热锻自动化·····	(80)
第九章 粉末热锻钢铁材料及其应用·····	(83)
第一节 粉末热锻结构钢及其应用·····	(83)
第二节 粉末热锻工具钢·····	(97)
第三节 粉末热锻不锈钢及磁性材料·····	(106)
第十章 粉末热锻高温合金及其应用·····	(111)
第一节 粉末热锻钛合金·····	(111)
第二节 粉末热锻铝合金·····	(117)
第三节 粉末热锻镍基高温合金·····	(120)
结束语·····	(131)
附表 1 国外常用粉末热锻钢的化学成分(%)·····	(133)
附表 2 国外粉末热锻高温合金的化学成分(%)·····	(133)

第一章 概 论

第一节 粉末热锻及其特点

普通粉末冶金制品由于存在着一定数量的孔隙，强度不高，使其应用范围受到了限制。为使粉末冶金制品能在较高负荷条件下使用，必须降低或消除其孔隙，提高粉末冶金制品的密度。实践证明，采用粉末热锻工艺能使粉末冶金材料或制品的密度达到或接近其理论密度。

粉末热锻工艺的基本流程如图1所示。由图1可以看出，粉末热锻工艺基于两种类型，一类是粉末预成形坯未经

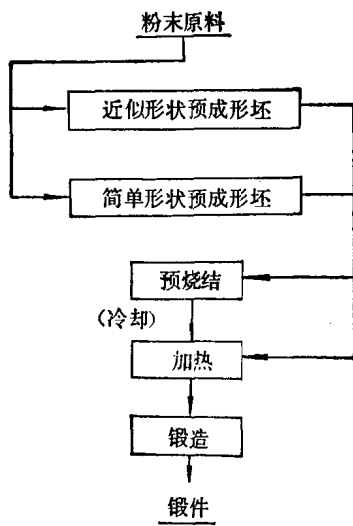


图1 粉末热锻工艺基本流程

预烧结而进行热锻，叫粉末锻造；另一类是粉末预成形坯经过预烧结然后进行热锻，叫粉末烧结锻造。目前多采用粉末烧结锻造，其工艺流程是，把金属粉末压制成一预成形坯，并在保护气氛中进行预烧结，使其具有一定的强度，再将预成形坯加热到锻造温度，保温后，迅速地移到热锻模腔里进行锻打。通常锻打一次即可锻成合乎设计规格的锻件。

粉末热锻工艺与普通锻造工艺相比较，一方面，它吸取了普通锻造工艺的特点，将粉末预成形坯通过加热锻造的途径，提高了粉末冶金制品的密度，从而使粉末冶金制品的性能提高到接近甚至超过同类熔铸制品的水平，如图 2 所示。另一方面，粉末热锻工艺又保持了粉末冶金工艺的特点，粉末预成形坯由于含有 80% 左右的孔隙，其锻造流动应力比普通熔铸材料要低得多，因而可在较低的锻造能量下锻造成形；同时

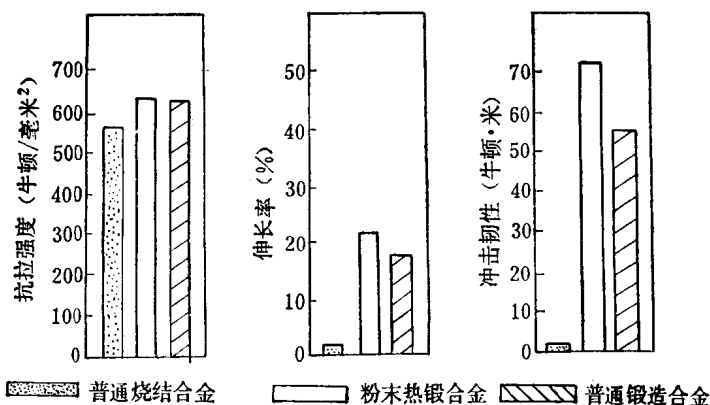


图 2 普通烧结合金、普通锻造合金与粉末热锻合金材料性能比较

可通过合理设计预成形坯的形状和尺寸以及准确控制其重量，实行无飞边或少飞边锻造，提高了材料利用率。一般而

言，粉末热锻材料利用率达80%以上，而普通锻造材料利用率通常为50%左右。与普通锻造制品相比，粉末热锻制品具有尺寸精度高、组织结构均匀、无成分偏析等特点。粉末热锻除了工艺的经济效果和^①提高普通粉末冶金材质的质量以外，还有一个重要特点，即可以锻造那些一般称为不可锻的金属或合金，例如，难变形的高温铸造合金可通过粉末热锻工艺锻制成材或锻制成形状比较复杂的制品。

第二节 粉末热锻变形原理概述

粉末热锻与普通金属模锻一样，预成形坯受力的作用而产生变形。预成形坯在变形过程中，受到的外力有作用力、反作用力和摩擦力。预成形坯所受的作用力是由锻造设备的机械动作产生的，借助于模具传递给预成形坯。作用力使预成形坯产生金属流动变形且充满模腔。反作用力是由模具对预成形坯产生的压力，且与模具的工作面或模腔壁相垂直，起阻止金属流动的作用。摩擦力是由于模腔壁具有某种程度的粗糙不平，当变形金属流动时，必然产生一个与金属流动方向相反的阻力，模腔壁越粗糙，摩擦力越大。为了减少摩擦力，增加金属的流动，模腔壁需用润滑剂进行润滑。

预成形坯在锻造过程中，金属受外力作用引起变形时（或者由于在锻造过程中发生相变）金属内部会产生内应力，当预成形坯变形终止后，残存在锻件内部的应力（称为残余应力）会使锻件发生变形，甚至导致锻件产生裂纹而报废。为了防止锻件的变形和损坏，需要及时消除残余应力。

分析热锻预成形坯的变形过程，主要是塑性变形过程。由于预成形坯存在着大量的孔隙，因而可以看成颗粒或颗粒团之间相对流动的结果。可以根据最小阻力定律确定其流动

方向，借此能够设计出比较合理结构的锻造模具等装备。

在普通锻造过程中，坯料的横向伸展是锻造过程中的重要基本特性，在坯料经受纯压缩（无摩擦影响）时，这种特性通常以波松比来表示：

$$\nu = \frac{-\text{横向应变}}{\text{轴向应变}}$$

对于致密材料，其数值为 0.5，这相当于在塑性变形时没有发生体积变化。对于粉末热锻来说，预成形坯经压缩成致密体，波松比应小于 0.5。在预成形坯的变形过程中，同时发生致密和横向流动，当密度增加时，横向流动速度增大，在数量上可以导出无摩擦单轴压缩中的密度和应变的关系，用微分式表示如下：

$$-d\rho/\rho = (1 - 2\nu)d\varepsilon$$

式中 ρ ——孔隙度；

ν ——波松比；

ε ——应变。

考虑到波松比的不断变化，这个微分式可用数字积分，当 $\rho \rightarrow 100\%$ 时，其密度的增量小得可以忽略。因此，在无摩擦状态下，要达到全致密的程度，需要无限的压缩应变。在实际锻造过程中，应变与致密化的关系如图 3 所示。由图 3 可以看出，在致密化过程中，预成形坯的高应变 ε 对锻件的最终密度有明显的效果。摩擦和不均匀变形对致密化不均匀性的影响可在锻件金相组织中看到。摩擦造成的应力不均匀，能使锻件在拉应力的作用下遭到破裂。这种破裂与预成形坯在变形过程中抵抗流动应力所引起锻件破裂的能力有密切关系，安泰斯 (Antes) 认为热锻预成形坯的流动应力可

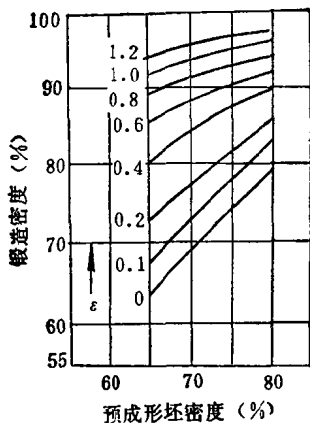


图3 不同应变对致密化的影响

用下式来表示:

$$\sigma = \left[\frac{(1 - v_p)}{(1 - v_p - 2v_p^2)} \right]^{\frac{1}{2}} \cdot \sigma_{uc}$$

式中 σ_{uc} ——单轴压缩的流动应力;

v_p ——某孔隙度时的波松比。

σ_{uc} 与平面应变的流动应力 σ_p 有关, 其关系式为:

$$\sigma_{uc} = (1 - v_p)^{\frac{1}{2}} \cdot \sigma_p$$

米赛斯 (Mises) 在粉末热锻试验中发现平面流动应力可用下式来表示:

$$\sigma_p = 1.15(\sigma_{p0} + K\rho^{\frac{2}{3}})$$

式中 σ_{p0} ——致密金属的屈服应力;

K——常数;

ρ ——预成形坯的孔隙度。

可以看出，热锻预成形坯的流动应力的大小与材料的屈服应力和预成形坯的密度有关系。因此，在设计预成形坯时，要考虑到预成形坯在变形过程中抵抗其流动应力而引起锻件破裂的能力，例如，预成形坯的形状、尺寸等结构因素。预成形坯的合金成分组成及锻造温度等因素也与流动应力有密切关系。由图4可以看出，材料的流动应力随温度的升高而降低；随着锻造温度的升高，铁素体钢具有较低的流动应力，奥氏体钢在高温时其流动应力比较高，固溶强化铁素体钢在高温下锻造时才具有较低的流动应力。

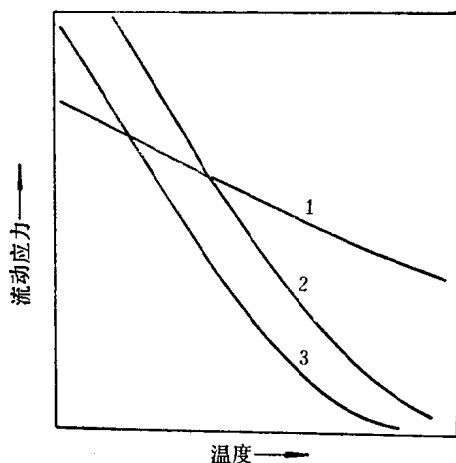


图4 材料的组织结构与流动应力的关系

1—奥氏体钢；2—固溶强化铁素体钢；3—铁素体钢

第二章 热锻用金属粉末

第一节 热锻用金属粉末的选择

热锻用粉末原料对锻造工艺和锻制品的性能有重要的影响，须对粉末原料进行选择。

一、纯度

粉末热锻材料对粉末原料纯度的要求比普通粉末冶金材料严格。普通粉末冶金制品由于孔隙的存在，少量杂质对材料或制品的性能影响不太明显。粉末热锻材料或制品由于其密度已接近于材料的理论密度，因此，杂质的影响就显得十分明显。由图 5 可以看出，杂质含量，特别是氧化物含量对热锻材料的抗拉强度、延性、及冲击韧性的影响非常显著。为了提高粉末热锻材料或制品的性能，必须提高粉末原料的纯度。然而，粉末原料纯度与粉末生产方法有密切关系。用不同方法生产的铁粉、合金钢粉制成的粉末热锻材料性能比较见表 1 和表 2。由精铁矿或氧化铁鳞用还原法生产的铁粉中尚残存一些未还原的氧化物，如 SiO_2 、 Al_2O_3 等杂质，其热锻材料的性能比较低。退火状态的水雾化铁粉的机械性能比还原铁粉好。电解铁粉纯度高，因而用其制作的材料性能比较高。但由于电解铁粉成本高，不适宜作热锻粉末原料。对于热锻用粉末原料，无论是还原粉末还是雾化粉末，其氧含量均须低于 0.1%。

W.F.佛茨森 (W.F.Fossen) 的实验结果指出，粉末颗粒表面的氧含量高其热锻材料的断裂韧性 K_{Ic} 值低，因为粉末表面的氧化膜对粉末颗粒间的结合起隔断作用。为了降

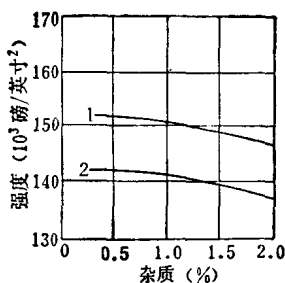


图 5a 杂质含量对抗拉强度的影响

1—抗拉强度；2—屈服强度

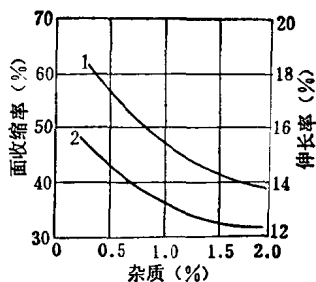


图 5b 杂质含量对延性的影响

1—伸长率；2—面收缩率

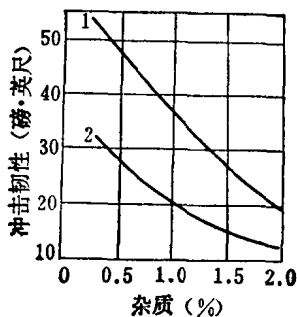


图5c 杂质含量对冲击韧性的影响

1—4630 钢 (HRC32)；

2—4630 钢 (HRC36)

低粉末的氧含量，粉末原料在制成预成形坯之前需进行还原处理。

不同类型的铁粉热锻材料的性能

表1

铁粉类型	粉末粒度 (目)	锻材密度 (克/厘米 ³)	锻 造 状 态		退 火 状 态	
			抗拉强度 (公斤/毫米 ²)	伸长率 (%)	抗拉强度 (公斤/毫米 ²)	伸长率 (%)
还原铁粉	-100+150	7.76	35	18.6	28	25.0
	-270+325	7.78	33	19.0	29	22.3
电解铁粉	-100+150	7.78	34	14.0	28	35.7
	-270+325	7.81	35	9.0	30	44.5
雾化铁粉	-100+150	7.80	32	19.5	29	33.5
	-270+325	7.81	36	13.4	28	31.5

不同类型的合金粉末热锻材料的性能

表2

合金粉末类型	化 学 成 分 (%)					密度 (克/厘米 ³)	抗拉强度 (公斤/毫米 ²)	伸长率 (%)	冲击韧性 (公斤·米/厘米 ²)	硬度	备注
	C	Ni	Mo	Mn	Fe						
电解铁粉	0.4	2.0	0.3	0.3	余	7.8	68~72	11~14	5~6	HRC 25	混合粉末
镀镍电解铁粉	0.15	2.0			余	7.8	99	10.5	15.5	HRC 27	
还原铁粉	0.5	2.0			余	7.5	60	12	5.0	HV150	混合粉末
	0.5	2.0	0.5		余	7.5	80	8	5.0	HV170	混合粉末
雾化预合金粉	0.27	1.90			余	7.8	68	15.9	1.40	HV240	
	0.25	0.26	0.20	Cr 0.26	余	7.8	67	14.9	7.0	HV210	
	0.31	1.6	0.4		余	7.8	71	15.3	8.7	HV237	

续表2

合金粉末类型	化学成分(%)					密度 (克/厘米 ³)	抗拉强度 (公斤/毫米 ²)	伸长率 (%)	冲击韧性 (公斤·米/厘米 ²)	硬度	备注
	C	Ni	Mo	Mn	Fe						
雾化预合金钢粉	0.32						80	6~10	5~10	HV250~290	锻造状态
	~	1.9	0.6	0.18	余	7.8	900~100	7~13	7~15	HV300~360	淬火、600℃回火
	0.65						150~160	2~6	2~9	HV440~520	淬火、350℃回火

二、合金化粉末

粉末热锻材料或制品由于密度接近于材料的理论密度，其性能主要受材料冶金结构的影响。粉末热锻用粉末原料可以是合金元素的混合粉末，也可以是合金化粉末。采用前者做原料时，合金元素分布是不十分均匀的，而且成形后需在高温下长时间烧结才能使合金元素充分扩散形成合金。然而粉末热锻工艺一般在较低温度和较短时间内烧结锻造，因此，选用合金化粉末原料比较适宜。特别是含合金元素较高的钢如高速钢、不锈钢、耐热钢等选用合金化粉末尤为适宜。

粉末热锻碳素合金钢的合金化粉末常用的有两种类型，一类是钢的全元素合金化粉末，例如 AISI4640 钢粉，另一类是不含碳元素的部分合金化粉末，碳元素按其需要量以混合的方式后加入，例如 AISI4600 + 0.4% 碳。钢的全元素合金化粉末其成分分布均匀，但成形性不佳。不含碳的部分元素合金化粉末其成形性优异，这是粉末热锻碳素合金钢多采用不含碳的部分元素合金化粉末的原因之一。另外，雾化碳素钢粉，特别是雾化高碳钢粉，在雾化过程中由于碳的物理化学作用往往出现一些空心颗粒，作为热锻用粉末原料也

是不适宜的。

雾化法可以生产各种成分的合金化粉末。通过调整雾化工艺参数能获得不同形状、粒度组成和一定组织结构的合金化粉末，而且成分均匀、纯度高。因此，雾化合金化粉末是热锻用的主要粉末原料。

三、低流动应力的合金粉末

根据粉末热锻的变形原理，预成形坯变形时的流动应力与锻造工艺有密切关系。粉末的合金元素组成或材料的组织结构是决定材料流动应力高低的一个重要因素。近年来研究出一种低流动应力的修改后的 4600 系钢，由图 6a 可以看

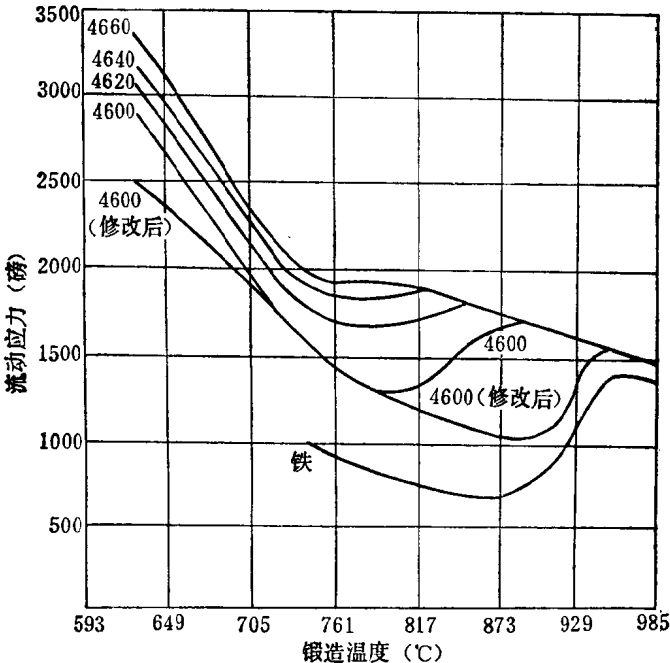


图 6a 4600系钢流动应力（压缩0.1时所需要的力）与锻造温度的关系