

高性能粉末冶金译文集

A.劳莱、艾伦 劳利 等著

李月珠、周水生 编译

国防工业出版社

内 容 简 介

本书汇编了高性能粉末冶金材料的制造工艺及应用。内容包括生产合金粉末的工艺及原理、粉末冶金烧结机理、粉末锻造和热等静压技术、粉末轧制、冷挤和热挤等新工艺,以及高性能粉末冶金材料的性能和在各方面的用途。可供从事这方面研究、生产及教学的专业人员参考。

高性能粉末冶金译文集

A. 劳莱、艾伦 劳利 等著

李月珠、周水生 编译

*

国防工业出版社 出版

新华书店北京发行所发行 各地新华书店经售

国防工业出版社印刷厂印装

*

850×1168¹/₃₂ 印张 12¹³/₁₆ 327 千字

1982年2月第一版 1982年2月第一次印刷 印数: 0,001—1,600册

统一书号: 15034·2205 定价: 1.60元

译者序

在解决高合金材料的成分偏析、加工困难等问题，以及发展普通冶金方法不能生产的特殊材料方面，粉末冶金有着巨大的潜力。

六十年代以来，各种制粉、成形和致密化方法不断涌现。特别是合金粉末及热成形技术的发展尤为迅速，从而为粉末冶金制取高性能材料奠定了坚实的基础。John J. Burke 和 Volker Weiss 所编的 “Powder Metallurgy for High-Performance Application” 文集，有代表性地汇总了上述发展情况，关于各种工艺的原理、影响因素及设计原则和作为粉末冶金基础的烧结理论，都占有一定的篇幅。此外，还介绍了高性能粉末冶金材料的制造和应用。本译文集选用了其中大部分文章，同时增选了近几年发表的论文十篇。

由于本文集的各篇文章是由不同作者独自完成的，因此连贯性不强，风格也不一致，甚至内容也或多或少有重复之处。为此，本文集中的每篇文章后面都附有相当数量的参考文献，为需要详细了解某一工艺或材料的读者提供了方便。

由于粉末冶金所涉及的科学技术领域十分宽广，加上我们的外文水平有限，谬误和不当之处恐怕不少，希读者给予指正。

目 录

第一篇 绪 言

- 1 粉末冶金中的新工艺.....3

第二篇 粉末生产工艺的进展

- 2 粉末雾化方法和原理的综述23
 3 高压水雾化46
 4 金属的高压气体雾化76
 5 生产高纯金属粉末的熔滴技术87

第三篇 烧结机理的近况

- 6 烧结基础理论99
 7 烧结早期阶段的机理.....117
 8 烧结动力学分析的近况.....137

第四篇 粉末锻造和热等静压

- 9 粉末预成形坯锻造的基本原理.....151
 10 粉末锻件的生产和性能.....167
 11 一些喷雾锻造航空和宇航用合金的结构和性能.....207
 12 高性能材料的热等静压.....215

第五篇 其他新成形技术

- 13 弥散强化镍的冷轧.....239
 14 铁粉预成形坯热轧带材的性能.....263
 15 铝粉的冷挤.....281
 16 复杂的高温合金型材.....296
 17 高能速成形钛合金预成形坯的结构和性能.....310

第六篇 高性能材料的应用

- 18 粉末冶金生产的高性能合金.....321
 19 粉末冶金高速工具钢.....333

20	关于旋转电极法粉末预成形坯经热等静压加锻造制成 Ti-6Al-2Sn-4Zr-6Mo 圆盘的评价.....	346
21	热等静压镍基高温合金 APK1	364
22	粉末冶金法制造的高温工程陶瓷 (Si_3N_4)	376
23	粉末冶金超导体.....	382
24	氢气-真空烧结 316 型不锈钢试样的强度	396

第一篇

绪言

1 粉末冶金中的新工艺

A. 劳 莱

宾西法尼亚州费城德雷克塞尔大学

提 要

粉末冶金在高性能应用方面的地位,推动了粉末的生产、压制、烧结和变形方法等工艺的发展。同样,对所包含的一些基本现象也有了深刻的理解。为了成功地生产具有较高强度、延展性、抗冲击和抗疲劳等综合性能的全致密结构件,就要求所有的生产环节之间建立起有机的联系。本文的主要目的是提供一个基础,以便对下述章节的工艺概貌有所了解,特别是热等静压和粉末预成形坯的锻造。对结构特征的重要性也进行了讨论。

绪 言

本文的主要目的是为以后的各篇文章提供一个基础,论述了一些与本文集有关的基本原理。作为本文集的题目,简要地讨论一下粉末冶金,特别是高性能应用方面的粉末冶金是很适宜的。概括并澄清分散在当前粉末冶金文献中的若干工作定义、术语和语义方面的问题也是必要的。

在粉末冶金领域内,高性能的含意可能因人而异。人们可以从任何一类性能(即:物理的;电的;化学的;力学的)的综合来考虑。本文集是针对那些可作为结构件使用的高力学性能的粉末冶金零件或部件而言的。虽然力学性能一般是指强度和延展性,而在高性能粉末冶金材料中,特别关心的是疲劳行为、冲击强度

和抗蠕变性能。

传统的方法

传统的粉末冶金工艺流程（图1-1）包括多种形式的压制和后续热处理（烧结），所生产的零件有着可与熔铸材料相比的、范围宽广的拉伸强度。但在几乎所有的情况下，粉末冶金零件的特征都是延展性低；冲击强度低；抗疲劳性能也很值得怀疑。因此作为结构件的使用受到很大的限制。造成这种缺陷的主要原因是残余孔隙，一般在5~25%左右。通过复压、浸渍、后续热处理或改变孔隙的几何形状，都可使性能（疲劳、冲击、延展性）得到提高。然而，这些额外的工序提高了成本，而且就性能方面的改善来说，也很难达到与普通铸锻材料进行竞争或取代它们的水平。基于这一点，才考虑到粉末材料（即纯度、形状、大小）、压

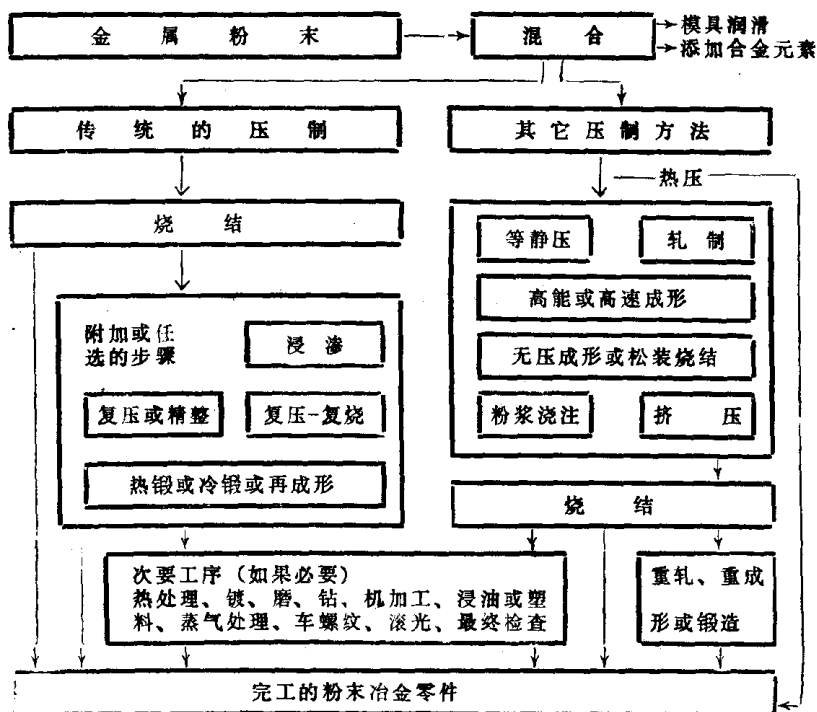


图1-1 传统粉末冶金工艺的基本步骤（由金属粉末工业联合会提供）

制工艺和设备的不断改进,使得粉末冶金的应用范围不断扩大,这是与新型粉末冶金产品的涌现密切相关的,但不包括高性能的应用。粉末冶金零件的增长率大约每年15%,其中潜力最大的是有较高密度的大零件。

目前,粉末冶金半致密零件的性能及典型的应用概括于表1-1。与五到十年前的水平相比,性能有很大的改善;高密度钢和镍钢已得到普遍应用。在这里,这些粉末冶金零件(其特征是拉伸强度 ≤ 100000 磅/英寸²,至断裂的延伸率 $\leq 5\%$)不视为高性能材料。

表1-1 粉末冶金零件的性质和应用①

铁 基 材 料						
材料	条 件	密 度		拉伸强度 (磅/英寸 ²)	延伸率 (%)	典型应用
		克/厘米 ³	% 理论			
非合金铁 99.9% Fe	烧结态	6.0	78	20000	3.0	结构件(轻载荷的齿轮)、磁性零件(马达磁电极元件)、发射传动带、自润滑轴承。
		6.5	83	30000	10	
		7.5	96	40000	20	
		7.5	96	100000 ~ 140000	0.5 ~ 20	
	碳氮共渗表面含碳0.80%, 渗层深度0.04英寸				表面	结构件、耐磨零件(小杠杆和凸轮)
铁-碳烧 结钢	烧结态含碳0.8%	6.2	79	31000	0.5	结构件(中载齿轮、杠杆、凸轮)
	烧结态含碳0.8%	6.8	87	44000	1.0	结构件(中载齿轮、杠杆和耐磨凸轮)
	热处理(大零件)	6.8	87	64000	0.5	
铁-铜-碳 合金	烧结态 5.0Cu, 0.8C	6.2	80	60000	0.8	结构件(中载齿轮、凸轮、支撑托架、杠杆和棘轮机构)——可经热处理以提高耐磨性
	浸 渗 处 理 20.0Cu, 0.8C	7.4	95	80000	0.7	
	浸渗处理热处理 20.0Cu, 0.8C	7.4	95	100000	0.5	
镍-合金 钢	热处理 4.0Ni, 1.0Cu, 0.70C	6.8	87	100000	0.5	结构件、耐磨件、高应力件(高达6马力的行星差动和传动齿轮)
	热处理 7.0Ni, 2.0Cu, 0.5C	7.4	95	175000	2.5	结构件, 高应力, 耐冲击(移动装置的突耳和离合器)
	碳氮共渗0.04英寸 4.0Ni, 1.0Cu, 0.0C(心部)	6.9	89	90000	3.5 (心部)	结构件、耐磨、高应力和要求焊接的部件(小齿轮和链轮的焊接部件)

非 铁 基 材 料						
材料	条 件	密 度		拉伸强度 (磅/英寸 ²)	延伸率 (%)	典型应用
		克/厘米 ³	% 理论			
铜-镍-锌 合金	一次压制烧结	7.3	82	28000	7	结构件, 耐非酸性介质 腐蚀(齿轮、杠杆、夹头 爪, 暴露于海洋上的零件)
		7.9	89	35000	15	
烧结黄铜	预合金化烧结	7.6	87.5	29600	10	机械零件、耐大气腐蚀零 件(编码程序的硬件、机 械装置的罩、闭锁装置的 零件、泵罩)
	整形和复烧	8.0	92	31000	24	
铝合金 (奥尔 科型 201AB)	烧结态	2.59	—	28300	2.5	轻载齿轮和棘轮机构, 摄影机零件、配电盘、散 热片、座舱构件
	烧结和整形	2.63	—	32200	3.0	
	烧结、整形、 热处理	2.63	—	49400	2.0	

① 采用 S.H. 麦格里在“金属展望”(1971年4月)发表的数据。

获得高性能的方法

显然, 对于高性能应用的粉末冶金零件来说, 直接的途径是达到全致密, 即必须消除各种形式的孔隙。在完全致密材料的研究和发展中, 主要的刺激因素是: 粉末冶金零件的生产能力非常大(对于铁粉, 能力 ≥ 3 倍的需要); 半致密材料的市场有限; 传统的生产工艺对许多复杂合金是无能为力的; 与熔锻产品有竞争能力的结构件的生产及粉末生产工艺的大幅度改进。

等静压制

等静压^[1~5], 特别是热等静压^[2~4]多半是直接把松散粉末或冷压块进行致密化的最有希望的方法。由于温度和压力的同时使用, 有可能使许多种难以加工的材料达到或接近100%的密度。高速钢、高温合金、铍和难熔金属特别适宜热等静压。为澄清术语, 下述所有的名称都视为热等静压: 热等静压制(hot isostatic compaction)、气体加压粘结(gas-pressure bonding)、气体加压压制(gas-pressure compaction)、气体加压固结(gas-pressure consolidation)和加压粘结(pressure bonding)。

虽然还缺乏足够的数据来确定力学性能之间的关系, 但往往

发现这些性能都比同样成分的铸造合金要高。在某些情况下，例如热等静压镍基高温合金可以进行冷热加工而不至破坏，它们原来都是不可加工的铸造合金。这种延展性能的改善，关键在于热等静压材料的结构均匀、各向同性、晶粒度细小。

目前在压制方面的技术革新是把单轴力和等静力结合起来，这就可以挖掘出进一步提高致密化程度的潜力^[6]。冷压的这种革新被证明可以用于高温的情况下。概括说来，用这种“混合应力状态”压制时，压块中产生的剪切应力是：

$$\tau = \frac{(\sigma_1 - \sigma_3)}{2} \quad (1-1)$$

式中 σ_1 ——轴向应力；

σ_3 ——等静应力。

图 1-2 和图 1-3 分别说明了海绵铁和铝在致密化方面提高的情况。这一方法有效地提高了压制性能，在 12000 磅/英寸² 等静压力和 30000 磅/英寸² 剪切应力下，可把海绵铁压制到 80% 的密度。如果仅仅使用等静压力，那末要达到同样的密度必须要 40000 磅/英寸² 的压力。最有意义的是可达到的密度极限。控制机理可认为是在剪切力的作用下颗粒的重排列。有趣的是这种混合应力状态的概

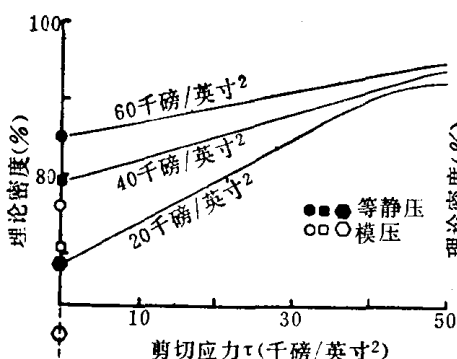


图 1-2 比较海绵铁粉经模压、等静压、混合应力状态压制的密度

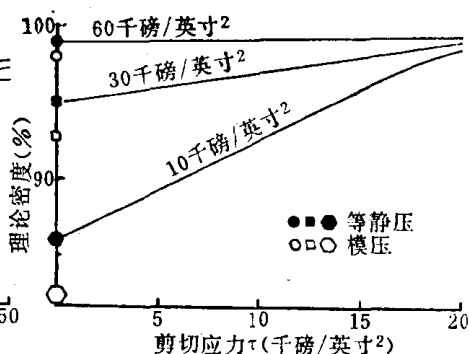


图 1-3 比较铝粉 (201AB) 经模压、等静压和混合应力状态压制后的致密化情况

念通常被用于农业机械上^[7,8]。因为试样的应力状态是完全确定的,可用莫尔(Mohr)圆表示压制所遵循的程序,从而选择最佳应力途径(即等静压力和轴向应力增加的顺序和数值)以便获得最高密度。

粉末预成形坯的变形方法

获得全致密的其它方法包括制备中等孔隙度的粉末预成形坯,然后通过冷或热加工致密化。图1-4概括地说明了生产程序。预成形坯的孔隙度根据随后的变形方法而定,高达30%;低者<1%。大多数预成形坯是通过模压、冷等静压、热等静压或联合压制法制备的。最常用的加工方法是常温或高温下的锻造、挤压或轧制。生产工具钢的通常程序包括热等静压,然后热轧或热锻到100%的密度^[9,10]。对于镍基高温合金来说,常用热挤^[11~16]或热锻^[17,18]生产,而大多数铁基合金都采用热锻^[19]。在铝合金中,重点是预成形坯的锻造^[20]或挤压^[21]。钛合金的最终致密化步骤为热挤或锻造^[22,23]。

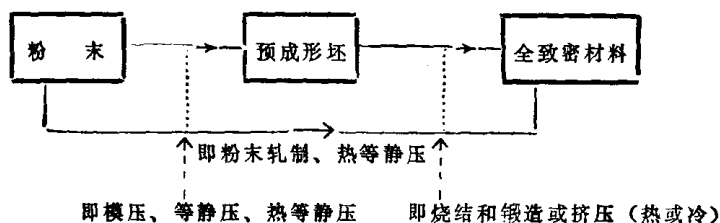


图1-4 经由粉末预成形坯制造全致密材料的基本步骤

这些生产预成形坯及对预成形坯进行锻造的工艺^[19,24],主要是为了获得具有高冲击性能的粉末冶金材料。因此应当研究性能的水平及应用范围。表1-2列举了在航空和宇宙航行及汽车工业中的一些重要应用(包括实际使用的、生产原型和计划中的应用)。表1-3摘要说明了若干材料的性能。这些性能表明已比常规压制和烧结的粉末材料有了极大的改善和提高。就铁基粉末材料而言,在全致密的情况下,具有约300000磅/英寸²的拉伸强度和12%延伸率的综合性能,在目前是很平常的。而冲击和疲劳

性能也比得上普通熔铸材料^[25]。

表1-2 预成形坯-锻造的应用

预成形坯-锻造的应用范围	
航空和宇航	
部 件	材 料
涡轮机叶片；环形耳轴；发动机的转子叶片；涡轮盘；入口导向叶片。	410 不锈钢；改型 440 不锈钢；Ti-6Al-4V；因科耐尔 718；U-700 和其它高温合金。
汽车工业	
部 件	材 料
手动传动齿轮；传动轴凸缘；连杆；侧齿轮和小齿轮；交流发电机磁极；环形齿轮。	1010、1040、1050 钢；4000、4400 低碳钢；4630、8630。

表1-3 粉末预成形坯锻造材料的力学性能

材 料	屈服强度 (千磅/英寸 ²)	拉伸强度 (千磅/英寸 ²)	延伸率 (%)	面缩率 (%)	在20°C下的冲击 (英尺·磅)
1040 钢	72	>80<	>25<	>40<	25~30
Fe-Ni-Mo	—	80~150	12~20	45~50	20~30
Fe-Mo-Ni-Cr	—	60~130	9~13	15~60	6~65
70/30 黄铜	33	55	30	—	—
铝	6.3	14	39	—	—
Ti-6Al-4V	165	—	8	—	—
因科耐尔 713C	186	—	10	—	—

解释一下有关粉末或粉末预成形坯锻造方面的术语是必要的。无论是热的或是冷的预成形坯的复压、整形、精整、二次打击等都被用于预成形坯的锻造。但这些工序主要是为了致密化，仅仅发生少量的材料流动（即在整形时的局部流动）。这些常规锻造中使用的术语是容易引起误解的，因为锻造包含有大量的金属流动。预成形坯的限模锻造和闭模锻造模仿了常规锻造。其它要说明的方法是热复压和烧结锻造。当预成形坯烧结后冷却下来，随后重新加热进行锻造时，用后一个术语是妥当的。

预成形坯锻造过程的设计要充分发挥有益的特性并克服不利的方面。因此要仔细地考虑预成形坯材料的特征与锻造变形之间的相互关系。特别是粉末特征(纯度、粒度、形状、夹杂),预成形坯(孔隙度、均匀性、结构、形状)和锻造因素(模子的设计、润滑、涂层、温度)。显然,上述考虑也适用于预成形坯的挤压或其它形式的致密化过程。在某些情况下把预成形坯看成一种由基体金属或合金与孔洞组成的两相材料是有利的;而在其它场合,必须把它视为半连续材料。显然,选择最恰当的工艺流程要求完全懂得这一密度可变体的变形机理和对应于流程各阶段的结构特征。

应用普通材料延性断裂的判据和半致密材料变形机理的定量分析,可以得到一种在预成形坯锻造时材料流动与断裂的半定量图。而且,此图可作为设计总工艺流程时的指南。

从理想上来说,预成形坯锻造研究的最终目的应该是建立一个能避免自身故障的准则^[26]。图 1-5 很好地说明了这一点,它阐明了预成形坯的设计(高 H_0 与直径 D_0 之比)与最终的锻造形状(高 H 与直径 D 之比)之间的关系。对一个给定几何形状的预成形坯而言(例如 $H_0/D_0=0.75$),该图示出了 H/D 的范围(即点 A 和 B 之间),在此范围内锻造,锻件在致密化的同时将不会出现裂纹。因此把“裂纹”和“不完全致密化”之间的面积称之为“锻造通路”。显然,这两条线的相对位置是材料和锻造条件的函数。对于每一具体情况,预成形坯的几何形状与最终锻造

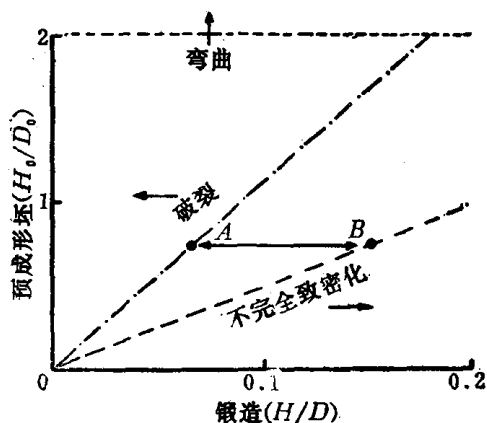


图1-5 在粉末预成形坯锻造过程中预成形坯设计的“锻造通路”

形状之间都有确定的对应关系。不完全致密化线位于裂纹线的左边是完全可能的。在此情况下, 该图给出了锻件开始出现裂纹的几何尺寸 (H/D)。到这一点必须停止变形, 而进一步的致密化应当在材料横向流动极少的复压状态下完成。将这一方法扩大到其它粉末预成形坯生产程序的设计中, 是生产高性能材料的先决条件。

结构-性能的研究

随着高密度或完全致密的产品以及可与熔铸材料性能相媲美的粉末冶金材料的发展, 对其结构进行详细的研究已变得日益重要了。历史上, 压制和烧结材料的结构特征只限于光学显微照片和观察粉末颗粒的复型。直到最近, 透射电镜也还局限于烧结体的原研究中^[27~29]。现在, 已有可能象熔铸材料那样来表征其亚结构特征。扫描电镜也已用来详细研究粉末^[30, 33]或压块^[31, 32]的表面特征。因为高密度材料的结构-性能之间的关系十分重要, 因此进行了简要的研究并得到一些新的启示。它们清楚地指明了各种工艺的地位和价值。

扫描电镜

图 1-6 说明了扫描电镜用于表征粉末颗粒形态 (例如尺寸、形状、表面结构、孔隙的详情等) 的能力。这些粉末反映了生产的方式。MH-100 是一种不规则的多孔还原铁粉, 见图 1-6(a); 图 1-6(b) 是片状的电解镍粉 (F210)。相反, 雾化的 Fe-C-Mn 粉 (图 1-6(c)) 和 Ni-Fe 预合金粉 (图 1-6(d)) 是近似于球形的粉末。

除了用于观察粉末的特征以外, 扫描电镜还能用来研究压块及烧结制品的结构。例如烧结镍和镍铁制品中, 粉末颗粒和孔洞的结构和几何形状的变化是与压缩 (墩) 应变呈函数关系的^[32]。镍压块中平行于压缩轴线方向的断面特征示于图 1-7, 使用的粉末为图 1-6(b) 那样的片状电解粉。很明显, 颗粒的尺寸在载荷

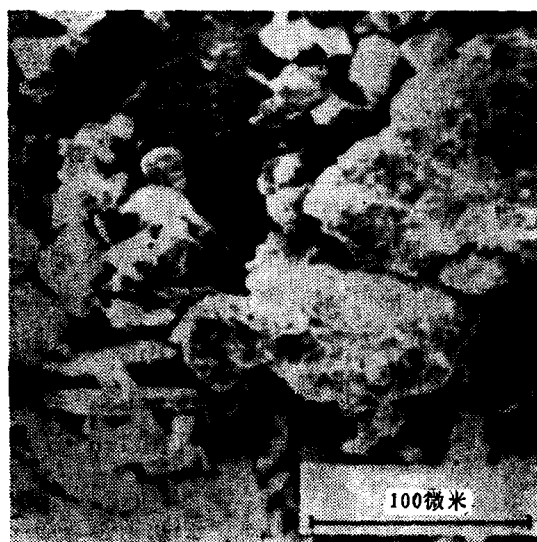
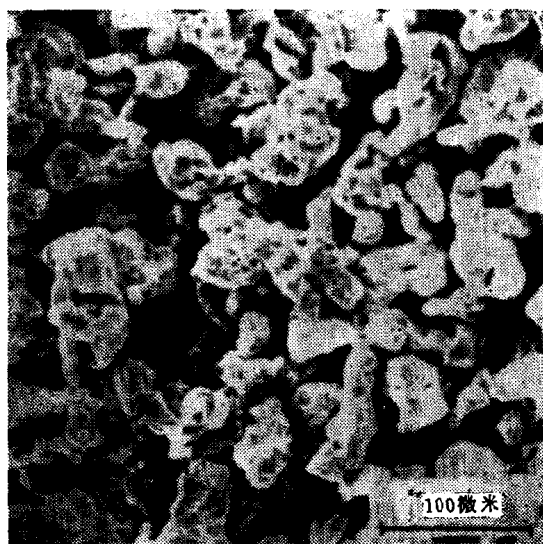


图1-6 各种金属粉
(a)还原海绵铁粉;
(b)退火电解镍粉;