

• 高等学校教学用书 •

粉末冶金原理和应用

GAODENG XUEXIAO JIAOXUE YONGSHU



冶金工业出版社

高等学校教学用书

粉末冶金原理和应用

〔美〕 F. V. 莱内尔 著
殷 声 赖和怡 译

冶金工业出版社

高等学校教学用书
粉末冶金原理和应用

[美]E. V. 莱内尔 著
殷声 赖和怡 译

冶金工业出版社出版

(北京北三环中路67号)

新华书店总店科技发行所发行

冶金工业出版社印刷厂印刷

850×1168 1/32 印张17 1/4 字数45千字
1983年11月第一版 1983年11月第一次印刷

印数00,001—2,600册

ISBN 7-5024-0507-0

TG·77(课)定价4.05元

前 言

自从最近一版的英文粉末冶金教科书出版以来，十年之间，我们对粉末冶金原理及其工艺的认识都已迅速地提高了。因此，需要对这些课题进行新的论述。我讲授粉末冶金课程已三十多年，深感这一课程需要一本新的教科书。然而，在编写这本书时，我不仅把作为教科书的主要内容应具有的基本原理写入书内，而且还从工程角度出发编写了有关粉末冶金应用方面的内容。不了解粉末冶金的实际应用，就很难理解它作为一门学科的重要性。本书的主要部分不仅对于初学者有价值，而且对于从事粉末冶金行业工作的专业人员也具有价值。

许多在大学里工作，特别是在工业界工作的同事们，对于我编写这本书给予了很大的帮助。我感谢那些热情帮助过我的朋友，他们替我审查了书中的某些章节；为我提供了某些工艺方面的资料；带我参观工厂，帮助我了解了生产情况。他们是 H.D. Ambis 先生、N.A. Arnold 先生、L.W. Baum 先生、Friedrich Benesovsky 博士、Stoyan Boniff 博士、W.A. Buerkel 先生、P.C. Eloff 博士、H.E. Exner 博士、Mark Gaydos 先生、R.M. German 博士、G.H. Gessinger 博士、K.E. Grambo 博士、Ralph Handron 先生、W.T. Haswell 先生、R.W. Heckel 博士、H. H. Hirsch 先生、W.J. Huppmann 博士、G.C. Kuczynski 博士、J.O. Kwolek 先生、L.H. Mott 先生、H.S. Nayer 博士、J.W. O'Brien 先生、L.F. Pease III 博士、G. Petzow 博士、K.H. Roll 先生、F.A. Schaa 先生、Erhard Schelzke 博士、Hermann Silbereisen 先生、D.W. Smith 博士、D.N. Yoon 博士和 Gerhard Zapf 博士。

当然，书中尚存在遗漏和错误之处，这是作者本人的责任，希望批评指正。

我将在插图的说明中对热情为本书提供插图的公司致谢。我的夫人承担了本书手稿的打字工作，在此特向她致以诚挚的谢意。

F.V.Lenel

目 录

第一章	结论	1
第二章	金属粉末生产	11
	一、铁粉.....	17
	二、低合金钢粉.....	28
	三、不锈钢粉.....	28
	四、工具钢粉.....	30
	五、铜粉.....	30
	六、铜合金粉.....	35
	七、银粉.....	36
	八、镍粉.....	36
	九、镍基合金粉.....	39
	十、钴粉.....	41
	十一、锡粉.....	41
	十二、铝和铝合金粉.....	43
	十三、镁合金粉.....	43
	十四、钨粉.....	43
	十五、钼粉.....	44
	十六、钽粉.....	44
	十七、钛、锆及它们的合金粉.....	45
	十八、碳化钨、碳化钛和碳化钽.....	46
	十九、高合金材料如工具钢、高温合金 和钛合金球形粉末的特殊雾化 工艺.....	47
	二十、铍粉.....	52
第三章	粉末性能和检验	53
	一、粉末取样.....	53

二、化学检验.....	54
三、粒度、粒度分布、颗粒形状和结构及比表面.....	55
四、金属粉末工艺性能的测定.....	86
第四章 压制	92
一、金属粉末的混合.....	92
二、压力下金属粉末的行为.....	95
三、刚性压模压制的压坯中密度和应力的分布.....	100
四、压力机的吨位和冲程.....	107
第五章 自动压制	109
一、压模设计.....	109
二、压机.....	124
三、结构材料和工具组合件的公差.....	130
第六章 其他成形方法	133
一、冷等静压.....	133
二、高能高速成形和三轴向压制.....	144
三、粉末轧制和轧制成形.....	145
四、楔形压制.....	161
五、加有增塑剂的金属粉末的挤压.....	161
六、金属粉末的注射成形.....	163
第七章 烧结实践	165
一、带有保护气氛的连续式炉.....	165
二、带保护气氛的间歇式炉.....	173
三、真空烧结炉.....	174
四、烧结气氛的作用.....	177
五、烧结气氛综述.....	178
六、烧结气氛的热力学基础.....	182
第八章 金属粉末单相烧结的实验观察	193

一、压坯的密度和强度	193
二、粉末性能，压制和烧结工艺对烧结体的密度和尺寸变化的影响	194
三、烧结对显微组织的影响	206
四、烧结对机械性能的影响	214
第九章 单相金属粉末的烧结——烧结	
机构	221
一、烧结的早期阶段	223
二、烧结的中期阶段和后期阶段	237
三、在烧结过程中由于截留气体所产生的膨胀	243
第十章 金属粉末混合料压坯的固相烧结	
.....	246
一、用粉末冶金工艺制取合金	246
二、影响相互扩散的参数	247
三、相互扩散的定量分析	249
四、同时相互扩散和颈部长大	254
五、活化烧结	258
第十一章 液相烧结	261
一、重合金机构	263
二、铁和铜粉末混合料压坯的烧结	272
三、铜和锡粉末混合料压坯的烧结	277
第十二章 松装粉末的烧结，粉浆浇注和熔浸	
熔浸	282
一、松装粉末烧结	282
二、粉浆浇注	284
三、熔浸	286
第十三章 金属粉末的热固结	292
一、热压	293
二、电火花烧结	294

三、热挤压.....	295
四、热等静压.....	300
五、热锻.....	305
第十四章 难熔金属和活性金属的粉末冶金	
.....	306
一、钨丝的生产.....	307
二、其他钨产品和钨合金.....	313
三、钼.....	317
四、钽.....	319
五、钛、锆和其合金的粉末冶金.....	320
第十五章 多孔金属	325
一、自润滑轴承.....	325
二、过滤器和相似用途的多孔金属材料	
.....	333
三、多孔电极.....	341
四、绝离子发动机上的钨电离器.....	344
五、外科用多孔骨接材料.....	345
第十六章 硬质合金	347
一、硬质合金的分类.....	348
二、硬质合金的生产.....	350
三、硬质合金的成分、性能和检验.....	352
四、硬质合金的烧结机构.....	361
附录：高温应用的“金属陶瓷”.....	363
第十七章 结构零件	365
一、铁基零件的机械性能.....	368
二、对粉末冶金结构零件的技术条件的要求.....	383
三、铁基结构零件的技术条件.....	384
四、铜、铜合金、不锈钢和铝合金粉末冶金结构零件的性能和技术条件.....	386

五、辅助工序·····	401
第十八章 预成形坯的热锻和冷成形·····	409
一、预成形坯的设计·····	413
二、粉末的选择·····	419
三、压制和烧结·····	420
四、锻造·····	421
五、机械性能·····	423
六、粉末冶金预成形坯的冷成形·····	427
第十九章 粉末冶金结构零件和锻件的应 用,经济效益和能源消耗·····	429
一、粉末冶金结构零件的应用和经济 效益·····	429
二、结构件的成本分析方法及其生产 比价·····	433
三、能源消耗·····	435
四、粉末锻件现有的和潜在的应用···	437
五、粉末锻造生产零件的经济性·····	439
第二十章 金属陶瓷·····	441
一、金属摩擦材料·····	441
二、弥散型核燃料元件·····	447
三、金属粘结的金刚石工具材料·····	449
第二十一章 粉末冶金坯材产品·····	451
一、铍·····	452
二、镁合金·····	454
三、铝合金·····	454
四、粉末冶金高温合金·····	457
五、工具钢·····	460
六、弥散强化合金·····	463
第二十二章 含有液相烧结的粉末冶金应用 ·····	473

一、粉末冶金工艺制取的非多孔轴承	473
二、冷压和液相烧结的高速钢产品	477
三、补牙用银—锡汞合金	479
第二十三章 粉末冶金磁性材料	481
一、压制成型零件的软磁材料	483
二、粉末制的锻造坡莫合金	488
三、铝镍钴硬磁	489
四、钴—稀土硬磁	492
五、拉长的单畴硬磁和高频磁芯	494
第二十四章 粉末冶金电工材料	497
一、电触头材料	497
二、电阻焊电极材料	502
三、金属石墨电刷	503
四、超导材料生产中的粉末冶金	504
参考文献	507

第一章 绪 论

我们可以通过比较“熔炼冶金”和粉末冶金的特点来给粉末冶金以恰当的定义。在熔炼冶金中，金属或合金被熔化后，在模子中浇铸。铸模具有所需产品的形状，因此，铸件便可直接生产出来，或者浇铸出铸锭，然后通过轧制，锻造，挤压，拉拔和机加工等方法将铸锭制成产品。在粉末冶金中，以金属粉末，也就是分割成很细的金属作原材料，而不是采用熔炼金属。金属粉末通过固结成为具有一定形状的制品。因此，粉末生产和粉末固结是粉末冶金的基本工序。

粉末固结最一般的工序包括在模子中将粉末压制成压坯和压坯的烧结。压坯的烧结意味着将压坯加热到低于金属或合金的熔点的温度，使其具有所需的物理，机械和化学性能。象熔炼冶金一样，固结过程可以得到具有所需最终形状的零件，即相应于铸件；或者是得到坯块，它相应于铸锭，还需要进一步加工成形。

金属粉末除了用于固结外，还有许多其他用途。它们被用于颜料，油漆和油墨中，在化学工业中用做试剂，在军事工业中用做炸药，还被用做食品添加剂。在金属加工中，金属粉末可用于切割和清理表面，以及金属涂层，还可用于做电焊条。但所有这些金属粉末的应用，都不属于粉末冶金领域。

为什么生产一定形状的金属产品要从金属粉末开始，而不是从熔化金属开始呢？一个重要的原因在于经济。用粉末冶金方法生产一定形状和具有所需尺寸公差的零件，其成本要低于铸造或锻造产品。当然，粉末冶金产品，常常称为“粉末冶金结构零件”，必须具有满足所要求的性能，通常是满足使用所要求的机械性能。然而，用粉末来生产零件更主要地是由于其成本低而不是它具有特殊性能。

生产结构零件只是粉末冶金的应用之一，而并不是其最早的应用。其他方面的应用则是基于粉末冶金工艺方法可以获得特殊的性能。这些应用包括制造高熔点金属，高耐磨性材料，多孔材料，特殊摩擦材料，磁学和电学性能的产品以及其他许多方面的产品。本章的第二部分将对此进行简略的讨论。

在探讨粉末冶金的应用之前，首先从实践和理论的观点出发对金属粉末的生产和固结的工艺步骤进行讨论。某些生产金属粉末的方法，最初是用于非粉末冶金生产中的。例如，生产用作颜料的片状金属粉末的方法等。然而，一般说来，用于粉末冶金与用于其他方面的粉末的生产工艺可能没有明显的差别。粉末冶金所用粉末的所有生产方法都包括在第二章《金属粉末生产》中。制取粉末的一个重要的方法，即“雾化法”，是将熔化金属或合金的液流粉碎成液滴，然后凝固成粉末颗粒。这种方法可能被认为属于熔炼冶金，但是，在这里它被确认为是粉末冶金的一部分。其他生产金属粉末的方法则是化学反应的方法，例如，在低于金属熔点的高温下，用气体、液体或固体还原剂，还原其化合物，通常是氧化物；或者借电流在水溶液中沉积金属的还原反应。化合物，例如羰基化合物或氢化物的热离解，也可以获得金属粉末。粉碎固体金属也可以生产金属粉末，但这种方法不很普遍。

金属粉末生产出来后，必须对其进行检验并说明其特性，如第三章所述。粒度大小，粒度分布，颗粒形状和比表面等性能，在有关粉末材料的多数工艺中，都是很重要的。许多检验金属粉末的方法，都是借用了陶瓷、颜料和其他粉末材料的检验方法。

第四、第五和第六章将讨论金属粉末在室温下的加压成形。对于大多数粉末冶金产品的生产来说，加压成形是必不可少的步骤。通常是在工具钢压模中或硬质合金压模中对金属粉末进行压制，使用的压力范围为70~700MPa(约700~7000kg/cm²)。这样制得的压坯称为“生坯”，这种压坯具有足够的强度，使它能够从压模中被推出来，并能够搬运。压坯是多孔的，其密度低于相同的金属铸件或锻件。第四章介绍压制和压制理论。在压制理

论中，主要研究压制压力与密度和密度分布之间的关系。粉末冶金零件常常具有复杂的形状。为了比较经济地生产这些零件，又发展了能自动进行压制的压机和工具，第五章将叙述这些问题。第六章叙述模压法以外的其他成形方法，介绍在软模中的等静压制，粉末轧制（也称轧制压制），粉末挤压和粉末注射成形等。

粉末在室温下压制成压坯，或用粉末轧制或挤压成形时，所得到的产品的强度和韧性，在大多数应用场合来说是不够的。为了使这些坯件能够使用，必须对它们进行烧结。许多粉末冶金产品是在连续炉中进行烧结的。在连续烧结炉中，压坯被运送入炉中，要经过预热区，高温区和冷却区。运送机构有推料机，滚动炉床，循环输送带和步进梁等几种。炉内必须使用保护气氛，或者有时使用真空，以防止压坯在加热和冷却时与炉内气氛发生不期望发生的反应。第七章将介绍烧结工艺的细节。

为了了解压坯烧结的过程，必须先从实验的角度研究烧结时压坯的密度、尺寸、金相组织和机械性能等的变化，并首先研究单元金属粉末或均匀固溶体合金粉末压坯在烧结时的变化。第八章将介绍这些实验的结果。单元金属粉末压坯或者松装粉末集合体的烧结理论将在第九章进行讨论，并指出引起粉末颗粒间接触颈长大和压坯致密化的烧结驱动力，和在这些驱动力作用下的物质迁移机构。金属粉末的烧结理论同陶瓷的烧结理论很相似。目前这个领域的研究已成为固体物理学家，陶瓷工作者和粉末冶金学家的共同工作。

第十章将讨论混合金属粉末压坯在无液相形成的温度下的烧结。除了单元金属粉末压坯发生的烧结过程以外，还包括混合粉末组元之间的相互扩散机构。

混合金属粉末压坯也可能在形成一定数量液相的温度下进行烧结。液相的量要少到能被固相骨架内的毛细管力所吸引，这样，压坯就不致于发生歪曲变形，或失去原来的形状。这个过程在工艺上是很重要的，其机理也已经得到了广泛的研究。第十一章将对液相烧结过程进行讨论。

金属粉末体的固结过程，并不总是按照先压制后烧结的顺序来进行的。有时，松散的粉末体或者由金属粉末在液体介质中的悬浮物制备的粉浆浇注件也可以进行烧结。第十二章将讨论这种烧结，还将讨论低熔点金属对多孔压坯的熔浸过程、熔浸或者与烧结同时进行，或者在烧结之后进行。近年来，将压制和烧结合并成一个步骤的金属粉末热固结过程变得重要了。第十三章将讨论热固结工艺过程，热固结工艺包括在刚性压模中的热压，热等静压，热挤压和热锻。在热等静压中，金属粉末通常是装在用薄钢板制的包套中，在烧结温度下承受气体压力的压制。

本章的第二部分，根据历史的观点，从粉末冶金的前期工艺开始直到本世纪发展起来的工艺技术，来讨论粉末冶金的应用。

很早以前，粉末冶金是一种生产可锻金属产品的工艺方法，这些金属的熔点太高，在当时的工艺条件下，人们还没有办法将其熔化。这种粉末冶金工艺最先用于生产海绵铁，即在木炭炉中，用木炭还原比较纯的或纯的氧化铁矿石得到海绵铁。然后，海绵铁被锻造成固体铁。如果海绵铁不是特别纯的话，就会含有大量的非金属杂质。因为古代的铁和钢通常是很纯而无夹杂的，所以，W.D.Jones^[1]相信，这种工艺过程也许是Gardi^[2]描述的某些非洲土人使用的方法的改良。还原后的海绵铁被破碎成粉末颗粒，经洗涤，并用手尽量检出其中的矿渣和炉渣，然后，将经压制的或者以松散状烧结成多孔材料的粉末，最后锻造成材。

在1750~1850年间，当人们对精炼铂的要求提高时，粉末冶金再度引起人们的注意。因为当时还不能熔化纯铂，几种相似的生产精炼铂的工艺在西班牙，英国和俄国先后发展起来了。铂粉经压制，烧结和热锻成材。这些工艺发展并广泛应用了多年之后，才在某些科学文献中得到描述。1829年，Wollaston叙述了英国的工艺^[3]。1834年，Sobolevskiy描述了俄国的工艺^[4]。当研制出适用于熔化铂的炉子和耐火材料之后，用粉末冶金方法生产铂的工艺就不再使用了。到20世纪初，粉末冶金又进入现代

金属工艺的行列，这一发展再一次同一种无油熔化，也很难使其具有可锻性的金属有关，这种金属就是钨。研制比爱迪生碳灯丝更为稳定的白炽灯丝使人们对钨产生了兴趣。在1900至1910年间，人们研制了多种制备钨丝的粉末冶金方法，但只有William Coolidge的方法在工业上是成功的。这种工艺在1910年第一次被描述出来，并在1913年获得了专利权^[5, 6]。这些年来Coolidge的工艺过程改变不大，至今它仍然是全世界生产白炽灯丝的标准工艺方法。这种工艺是将很细的钨的氧化物粉末 WO_3 ，用氢还原成钨粉，压制成坯并在 1200°C 预烧，使之具有一定的强度以便能够用夹子夹持。预烧过的坯条通入低电压高电流密度的电流，在接近 3000°C 的温度进行最终烧结。烧结时，坯条收缩，其密度达到近固体钨密度的90%。烧结后的钨坯条在近 2000°C 才能进行加工。加热到这个温度时，钨坯条可旋锻打成圆形。随着温加工量的增加，钨的可锻性也增加了。这样，经过旋锻打的钨棒，在较低温度下便可拉拔成细钨丝。

对于生产难熔金属的可锻产品而言，粉末冶金工艺技术曾经是很重要的。如在生产其他难熔金属钼、铌、铪和易反应金属钛及锆的早期工艺中，粉末冶金都起过重要的作用。然而，大约从1940年开始，新的熔化和铸造方法，即真空电弧和电子束熔炼工艺方法的研制获得成功，因而使得所有金属不管其熔点如何，都可以被熔化铸造。但是尽管如此，至今所有的钨产品和大多数钼产品，依然是采用粉末冶金工艺生产的。

除了用作白炽灯丝的钨坯条仍然用通电流的方法来进行烧结外，其他大件压坯，如钨、钼和钨的合金，是由粉末经等静压压制，然后在钨或钨加热元件的炉子中进行烧结而成的。随后将其轧制成板，锻造或者挤压成所需要的形状。

除了纯钨和纯钼之外，某些具有特殊用途的难熔金属的合金也发展起来了。这些合金中包括用于重负荷的电触点合金材料。在电触点合金中，难熔金属钨或钼和铜或银等金属复合在一起。难熔金属钨或钼具有高硬度，并在触点开闭时具有低材料迁移