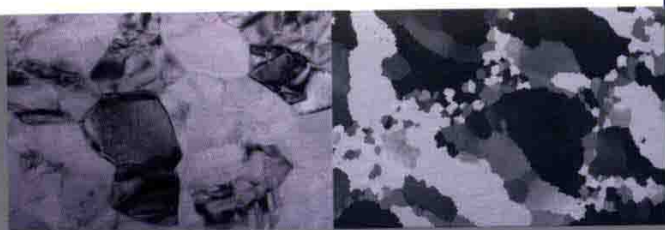


粉末冶金材料学

邹俭鹏 编著



科学出版社

粉末冶金材料学

邹俭鹏 编著

科学出版社

北 京

内 容 简 介

本书系作者在多年讲授“粉末冶金材料学”课程的基础上编著而成的,内容力图结合粉末冶金材料和材料科学基础相关知识,突出粉末冶金材料的基本概念和基本原理,系统阐述粉末冶金材料的体系、制备技术、科学基础、内在规律等,主要内容涉及粉末冶金材料的强韧化、铁基粉末冶金结构材料、硬质合金与工具材料、粉末冶金摩擦材料、粉末冶金减摩材料、粉末冶金多孔材料、粉末冶金先进陶瓷材料、粉末冶金高温合金、难熔金属材料、粉末冶金磁性材料和粉末冶金原子能工程材料等。

本书内容较丰富、难度适中,适合我国广大从事粉末冶金材料教学、研发、生产、应用的科技工作者以及粉末冶金专业和相关学科专业的学生阅读。

图书在版编目(CIP)数据

粉末冶金材料学/邹俭鹏编著. —北京:科学出版社,2017.10

ISBN 978-7-03-054862-7

I. ①粉… II. ①邹… III. ①粉末冶金-材料科学 IV. ①TF12

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2017)第 254987 号

责任编辑:杨向萍 陈 婕 纪四穗 / 责任校对:桂伟利

责任印制:张 伟 / 封面设计:陈 敬

科学出版社 出版

北京东黄城根北街 16 号

邮政编码:100717

<http://www.sciencep.com>

北京中石油彩色印刷有限责任公司印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

2017 年 10 月第 一 版 开本:720×1000 1/16

2017 年 10 月第一次印刷 印张:22

字数:420 000

定价:138.00 元

(如有印装质量问题,我社负责调换)

作者简介



邹俭鹏,1976年9月生,中南大学粉末冶金研究院教授、博士生导师,长期从事粉末冶金材料领域的教学与研究。主讲“粉末冶金功能材料”研究生课程和“粉末冶金材料学”本科生课程,在粉末冶金新材料、纳米材料、薄膜材料等应用基础研究领域取得了一系列创新成果;主持国家自然科学基金2项、中国博士后基金特别资助1项、国家国际科技合作专项项目子课题1项、企业横向项目1项;

参与国家重点研发计划、总装备部预研重点项目、863项目等4项;曾获中国有色金属工业科技进步奖二等奖1项、湖南省科技进步奖三等奖1项;以第一作者或通讯作者发表高水平论文60余篇,获国家授权发明专利3项。

前 言

当代,粉末冶金科学与技术迅猛发展。粉末冶金以其特有的少切削、无切削、节能、节材、环保等优势不断推动新的制粉、成形、烧结技术的发展,使得一批性能优异的新材料被研制出来。很多粉末冶金新材料是铸锭冶金方法无法制取的,或者具有铸锭冶金材料无法达到的高性能,因此令世人刮目相看。时至今日,粉末冶金材料对我国国民经济发展和国防建设具有重要意义,尤其是为我国航空航天、核工业、装备制造、交通运输、地矿开采、资源加工等工业的发展做出了积极而重大的贡献。

鉴于粉末冶金材料日益得到人们广泛关注,为便于从事粉末冶金材料的教学、研究、开发、生产和应用的广大科技工作者更加系统而全面地掌握粉末冶金材料的体系、生产技术、科学内涵及应用现状,作者编著了本书,以飨读者。

本书是在作者多年讲授“粉末冶金材料学”课程的基础上编著而成的,其内容力图结合粉末冶金材料和材料科学基础相关知识,突出粉末冶金材料的一些基本概念和基本原理,使读者熟悉并了解各类粉末冶金材料及其中蕴含的科学原理。书中系统介绍了粉末冶金材料的强韧化、铁基粉末冶金结构材料、硬质合金与工具材料、粉末冶金摩擦材料、粉末冶金减摩材料、粉末冶金先进陶瓷材料、粉末冶金多孔材料、粉末冶金高温合金、难熔金属材料、粉末冶金磁性材料、粉末冶金原子能工程材料等。本书可作为材料科学领域各专业及其相关专业的高年级本科生和研究生学习“粉末冶金材料学”课程的参考书籍。

在撰写本书过程中,中南大学粉末冶金研究院八十岁高龄的赵慕岳教授逐字逐句地对本书认真修改了两稿,提出了大量宝贵意见,为本书的完善和定稿起到了关键作用,在此,对赵慕岳教授严谨的学术态度与深厚的学术造诣致以崇高的敬意和衷心的感谢。同时,感谢2014级博士生李红超、2013级硕士生唐宁馨、2014级硕士生杨洪志、2015级硕士生易琛琦、2016级硕士生高迪等为本书做的大量校对工作。此外,作者在撰写本书过程中参阅了大量的文献资料,引用了部分内容,虽在每章末尾列出文献出处,但这些参考文献仅为其中的一部分,在此特对所有文献作者致以诚挚的谢意!

限于作者水平,书中难免存在疏漏与不足,恳请同行专家和读者批评、指正。

邹俭鹏
于中南大学
2017年7月

目 录

前言

第 1 章 概论	1
1.1 粉末冶金技术的优点与特点	1
1.1.1 定义	1
1.1.2 粉末冶金技术的优点	2
1.1.3 粉末冶金技术的特点	2
1.2 粉末冶金技术的发展	4
1.2.1 粉末冶金技术发展历程	4
1.2.2 粉末冶金技术发展的三个重要标志	6
1.3 粉末冶金发展趋势与学科前沿	7
1.3.1 发展趋势	7
1.3.2 学科前沿	7
1.4 粉末冶金材料的应用	8
思考题	9
第 2 章 粉末冶金材料的强韧化	10
2.1 固溶强化	10
2.2 热处理强化	15
2.2.1 马氏体相变	15
2.2.2 时效强化	19
2.2.3 主要热处理方式	20
2.3 弥散强化	22
2.3.1 弥散强化的机理	22
2.3.2 影响弥散强化材料强度的因素	26
2.3.3 弥散强化材料的性能	29
2.3.4 典型弥散强化材料	33
2.4 颗粒强化	37
2.4.1 颗粒强化的机理	38
2.4.2 颗粒强化铝基复合材料	39
2.5 纤维强化	40
2.5.1 纤维强化的机理	40

2.5.2 影响纤维强化材料强度的因素	44
2.5.3 纤维强化材料的性能	49
2.6 晶界强化	52
2.7 形变强化	53
2.8 韧化	54
2.8.1 相变韧化	54
2.8.2 弥散韧化	56
2.8.3 微裂纹韧化	57
2.9 展望	57
思考题	58
参考文献	58
第3章 铁基粉末冶金结构材料	60
3.1 机械结构零部件制造方法比较	62
3.2 铁碳相图	65
3.3 铁基粉末冶金结构材料提高密度的方法	67
3.3.1 复压复烧	67
3.3.2 熔浸	68
3.3.3 粉末冶金热锻	68
3.3.4 温压	69
3.4 烧结碳钢	69
3.5 铁-铜系材料	73
3.5.1 铁-铜-碳系材料——烧结铜钢	73
3.5.2 其他铁-铜系材料	78
3.6 铁-镍系材料	81
3.6.1 烧结铁-镍合金	82
3.6.2 烧结镍钢	83
3.6.3 烧结镍铜钢和镍铝粉末锻钢	86
3.6.4 烧结镍铜铝钢和镍铜铝粉末锻钢	87
3.7 铁-锰系材料	88
3.8 铁-铬系材料	90
3.9 铁-磷系材料	92
3.10 粉末冶金不锈钢	96
3.10.1 合金元素的作用	97
3.10.2 不锈钢粉及粉末冶金不锈钢的制备	98
3.11 粉末冶金高速钢	100

3.11.1 高速钢的牌号	101
3.11.2 合金元素的作用	101
3.11.3 铸态高速钢的组织特点及热处理	103
3.11.4 粉末冶金高速钢的性能	104
3.11.5 粉末高速钢制造工艺	105
3.11.6 粉末高速钢的热处理特性	112
3.12 展望	114
思考题	115
参考文献	115
第4章 硬质合金与工具材料	117
4.1 碳化钨基硬质合金	118
4.1.1 碳化钨与复式碳化物的制造	121
4.1.2 碳化钨基硬质合金的制造工艺和性能	130
4.1.3 硬质合金的成分、相与组织	144
4.1.4 硬质合金的力学性能	146
4.2 碳化钛基金属陶瓷	147
4.2.1 概述	147
4.2.2 碳化钛基金属陶瓷的制造工艺	148
4.3 不重磨刀片与涂层硬质合金	159
4.4 钢结硬质合金	164
4.4.1 钢结硬质合金的成分与组织	164
4.4.2 钢结硬质合金的热处理	166
4.4.3 钢结硬质合金的力学性能	169
4.5 超硬工具材料	171
4.5.1 金刚石	171
4.5.2 立方氮化硼	173
4.6 陶瓷工具材料	174
4.6.1 Al_2O_3 陶瓷的特性	175
4.6.2 Al_2O_3 陶瓷的发展趋势	177
4.7 展望	178
思考题	178
参考文献	179
第5章 粉末冶金摩擦材料	181
5.1 粉末冶金摩擦材料的分类	182
5.1.1 按材质分类	182

5.1.2 按工况分类	183
5.2 摩擦材料摩擦、磨损的理论基础	183
5.2.1 干摩擦理论	183
5.2.2 摩擦副摩擦时表面层中发生的过程	185
5.2.3 粉末冶金摩擦材料摩擦磨损机理	185
5.3 粉末冶金摩擦材料的基体、润滑组元和摩擦组元	187
5.3.1 基体组元	187
5.3.2 润滑组元	190
5.3.3 摩擦组元	194
5.4 粉末冶金摩擦材料的制造工艺	198
5.5 液体润滑粉末冶金摩擦材料	200
5.6 粉末冶金摩擦制品对偶材料	202
5.6.1 钢	202
5.6.2 铸铁	203
5.7 改善粉末冶金摩擦材料性能的途径	203
5.7.1 改善干式摩擦材料性能的途径	203
5.7.2 改善湿式摩擦材料性能的途径	206
5.8 展望	206
思考题	208
参考文献	208
第6章 粉末冶金减摩材料	210
6.1 铜基粉末冶金减摩材料	210
6.1.1 多孔青铜	211
6.1.2 青铜-石墨材料	212
6.1.3 铅青铜	213
6.1.4 合金化青铜	214
6.1.5 烧结黄铜	215
6.1.6 铜-石墨材料	215
6.2 铁基粉末冶金减摩材料	217
6.2.1 多孔铁	217
6.2.2 铁-石墨材料	218
6.2.3 铁-铜-石墨材料	220
6.2.4 铁-铜-石墨-磷材料	221
6.2.5 含硫、硫化物和硒化物的铁基减摩材料	222
6.2.6 铁-石墨-钼减摩材料	224

6.2.7 含氟化物的铁基减摩材料	226
6.2.8 硫化和硼化不锈钢减摩材料	226
6.2.9 用铬、镍、钴和其他元素合金化的铁基减摩材料	227
6.3 带钢背的双金属减摩材料	227
6.4 聚合物基减摩材料	230
6.4.1 钢背加强的金属氟塑料减摩材料	231
6.4.2 浸渍氟塑料的多孔骨架的减摩材料	232
6.4.3 填充型聚合物减摩材料	233
6.5 特殊用途的复合减摩材料	234
6.5.1 在流体润滑条件下工作的材料	235
6.5.2 真空和惰性气体中无润滑减摩材料	240
6.5.3 在较高温度条件下工作的减摩材料	242
6.5.4 高滑动速度下工作的减摩材料	245
6.5.5 在水中和腐蚀介质中工作的减摩材料	246
6.5.6 端面 and 径向密封材料	249
6.6 展望	252
思考题	253
参考文献	253
第7章 粉末冶金多孔材料	255
7.1 粉末冶金多孔材料的特点	255
7.2 粉末冶金多孔材料的成形	256
7.2.1 模压成形	257
7.2.2 等静压制	257
7.2.3 粉末轧制多孔带材	258
7.2.4 多孔管材的增塑挤压	259
7.2.5 无压成形	260
7.3 多孔材料的烧结	262
7.3.1 多孔材料烧结过程的一般特点	263
7.3.2 烧结方法	264
7.3.3 烧结工艺	267
7.4 高孔隙度材料的制备	269
7.4.1 添加造孔剂制取高孔隙度材料	269
7.4.2 添加造孔强化剂制取高孔隙度材料	272
7.4.3 其他制取高孔隙度材料的方法	273
7.5 微孔材料的制取方法	274

7.5.1 粉浆挤压及粉末轧制法	274
7.5.2 在多孔体表面涂覆细粉末颗粒和浸渍合成树脂的方法	275
7.5.3 在多孔体中添加弥散质点的方法	277
7.5.4 利用有机化合物分解的方法	277
7.6 粉末冶金多孔材料的应用	278
7.7 展望	279
思考题	281
参考文献	281
第8章 粉末冶金先进陶瓷材料	283
8.1 氧化物先进陶瓷材料	283
8.1.1 氧化铝陶瓷	283
8.1.2 氧化锆陶瓷	285
8.2 难熔化合物先进陶瓷材料	287
8.2.1 难熔化合物的性能	288
8.2.2 难熔化合物合金	289
8.2.3 非金属难熔化合物	290
8.2.4 难熔化合物先进陶瓷材料的制备	292
8.2.5 难熔化合物先进陶瓷材料的应用	294
8.3 展望	296
思考题	297
参考文献	297
第9章 其他粉末冶金材料	299
9.1 粉末冶金高温合金	299
9.1.1 沉淀强化粉末高温合金	300
9.1.2 弥散强化粉末高温合金	304
9.2 难熔金属材料	305
9.2.1 钨及钨合金	306
9.2.2 钼及钼合金	308
9.3 粉末冶金电工材料	310
9.3.1 触头材料	310
9.3.2 电刷材料	313
9.4 粉末冶金磁性材料	315
9.4.1 软磁金属材料	315
9.4.2 硬磁金属材料	318
9.4.3 铁氧体	320

9.5 粉末冶金原子能工程材料	322
9.5.1 原子能工程结构材料	322
9.5.2 控制材料与屏蔽材料	323
9.5.3 原子能工程包套材料	323
9.6 展望	323
思考题.....	324
参考文献.....	324
思考题答案要点.....	326

第 1 章 概 论

1.1 粉末冶金技术的优点与特点

1.1.1 定义

粉末冶金技术是一门制造金属粉末、合金粉末、非金属粉末、化合物粉末和以上述粉末为原料经过成形、烧结制造材料或制品的科学技术。

粉末冶金材料是用粉末冶金技术制得的近全致密或多孔材料(包括制品),如图 1-1 和图 1-2 所示。

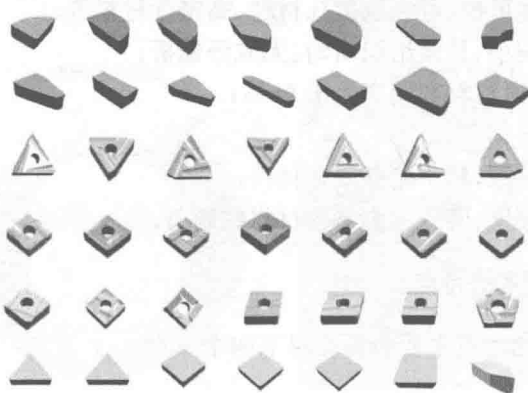
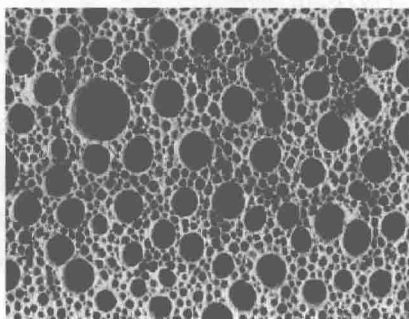


图 1-1 粉末冶金致密材料举例(硬质合金刀具)



(a) 青铜过滤器



(b) 多孔材料孔隙结构

图 1-2 粉末冶金多孔材料举例

1.1.2 粉末冶金技术的优点

粉末冶金技术在现代科学技术与国民经济中占据重要地位,主要表现在以下两个方面:

(1) 现代科学技术发展中所需要的许多特殊材料只能用粉末冶金技术制造,例如,电子与电灯工业中不可缺少的三种最重要的难熔金属——W、Mo、Ta,机械加工工业中广泛应用的硬质合金与工具材料,高压输配电中的关键零件——Cu-W触头,原子能工业中的核心零件——浓缩铀分离膜,洲际导弹等用的钨渗铜材料等。因此,从科学技术发展的角度来看,粉末冶金技术作为一种制造特种材料的技术,对科学技术发展做出重要贡献。

(2) 粉末冶金技术是一种机械零部件的少、无切削制造技术。从国民经济发展的角度来看,粉末冶金技术是一种节材、省能、投资少、见效快、无污染且适合于大批量生产的绿色加工技术。

粉末冶金技术的优点体现在如下方面:

- (1) 材料致密度可控,可制取多孔材料、高密度材料等;
- (2) 材料晶粒细小、显微组织均匀、无成分偏析;
- (3) 近净成形,原材料利用率大于 95%;
- (4) 少、无切削;
- (5) 材料组元可控,利于制备复合材料;
- (6) 利于难熔金属、陶瓷材料与核材料的制备。

1.1.3 粉末冶金技术的特点

粉末冶金技术的特点主要表现在以下四个方面。

1) 技术多样性

粉末制备技术包括雾化法、还原法、机械合金化、气相沉积法、溶胶-凝胶法、自蔓延燃烧反应合成法、电解法等。

成形技术包括模压、喷射沉积、注射成形、挤压成形、粉末轧制、温压成形、冷等静压及特种固结技术等。

烧结技术包括固相烧结、液相烧结、微波烧结、反应烧结、超固相线液相烧结、热压、热等静压、垂熔自阻烧结、熔渗、电火花烧结等。

2) 工艺复杂性

制粉:各种制粉技术都具有较大的制备工艺复杂性。例如,雾化法所制备粉末的形貌、品质、纯度等与雾化嘴的形状、气体流量、金属固溶度等工艺参数密切相关。

成形:各种成形技术都具有较大的工艺复杂性。以最简单的模压为例,压坯强

度等压坯性能取决于压制压力、压制速度、保压时间、脱模速度等工艺参数。

烧结:各种烧结技术都具有工艺复杂性。仅以固相烧结为例,烧结材料的性能与烧结气氛、升温曲线、烧结温度、保温时间等工艺参数紧密相连。

后处理:烧结后处理工艺也比较复杂,包括精整、机加工、热处理(淬火、回火和化学处理)和电镀等。

3) 所得材料性能具有优越性

粉末冶金材料具有特殊结构和性能,是熔炼方法所无法生产的材料,如硬质合金、摩擦材料、多孔材料、钨铜假合金、钨钼难熔金属制品等,如图 1-3 所示。

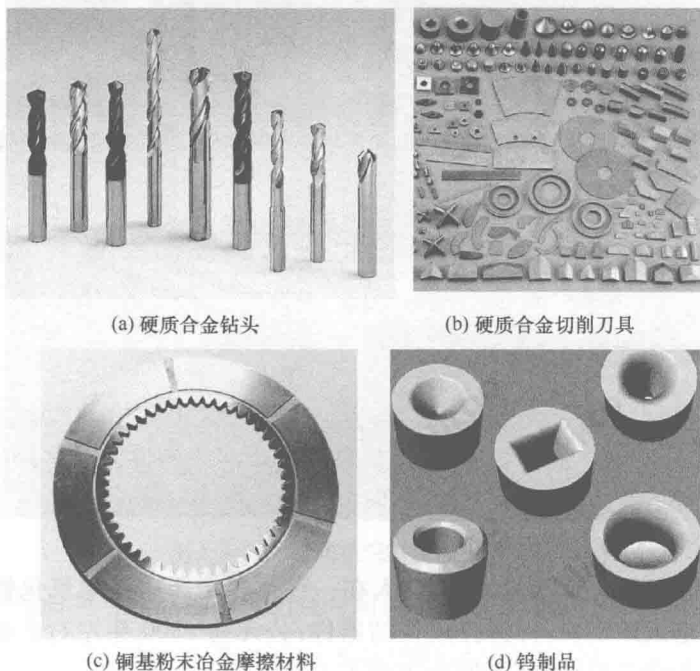


图 1-3 熔炼方法无法生产的粉末冶金材料举例

粉末冶金技术与熔炼法相比能制造性能更优越的材料,如粉末高速钢、粉末超合金可避免成分的偏析,保证合金具有均匀的组织 and 稳定的性能。同时,这种合金具有细晶粒组织,这使热加工性大为改善,如图 1-4 所示。

4) 所得零件形状和结构具有复杂性

粉末冶金工艺生产的零件孔隙度可控,例如,可生产各种多孔材料、多孔含油轴承。零件的形状、结构复杂,选择合适的模具和精整模具,特别是采用粉末注射成形技术可生产形状、结构与成品零件相近的产品。与锻件相比,大大减少了切削加工量,节约了原材料的使用量,可以显著降低成本。



图 1-4 较熔炼法性能更为优越的粉末冶金材料举例(粉末高速钢耐磨件)

1.2 粉末冶金技术的发展

1.2.1 粉末冶金技术发展历程

粉末冶金技术的发展源远流长。20 世纪 60 年代,苏联专家曾说过,粉末冶金技术既像埃及金字塔一样古老,也像现代喷气技术一样先进。现在,可以这么说,粉末冶金技术既像埃及金字塔一样古老,也像纳米技术一样先进。

粉末冶金技术的发展历程如下:

(1) 公元前 3000 年以前,古埃及人在一种风箱中用碳还原氧化铁得到海绵铁,经高温锻造成致密块,再锤打成铁的器件;公元前 2300 年左右出现块炼铁技术,即采用固相碳还原铁矿石($800\sim 1000^{\circ}\text{C}$)。

(2) 我国西汉(公元前 113 年)的刘胜墓出土的错金书刀标志着高温锻焊技术的出现。公元 300 年左右,印度以高温锻焊技术为基础制造了“德里”铁柱(Dehli Pillar),重 6t(图 1-5)。

(3) 1910 年, Coolidge 发明了电灯钨丝,给人类带来了光明,奠定了近代粉末冶金技术的基础。

(4) 1914 年, WC、MoC 粉末出现(德国)。

(5) 1923 年,德国人施勒特尔(K. Schroter)用粉末冶金法成功研制钨钴硬质合金。1927 年,德国 Krupp 公司使用该技术生产硬质合金,使切削加工速度成 10 倍提高,引发金属切削技术的革命。

(6) 1930 年, Hoganas 公司开始用固相还原法生产海绵铁。

(7) 1956年后,大量铁基、铜基零件上市,推动了机械制造业、汽车工业的飞速发展。

(8) 20世纪80年代后,粉末冶金制品如涡轮引擎零件广泛应用于航空航天工业。

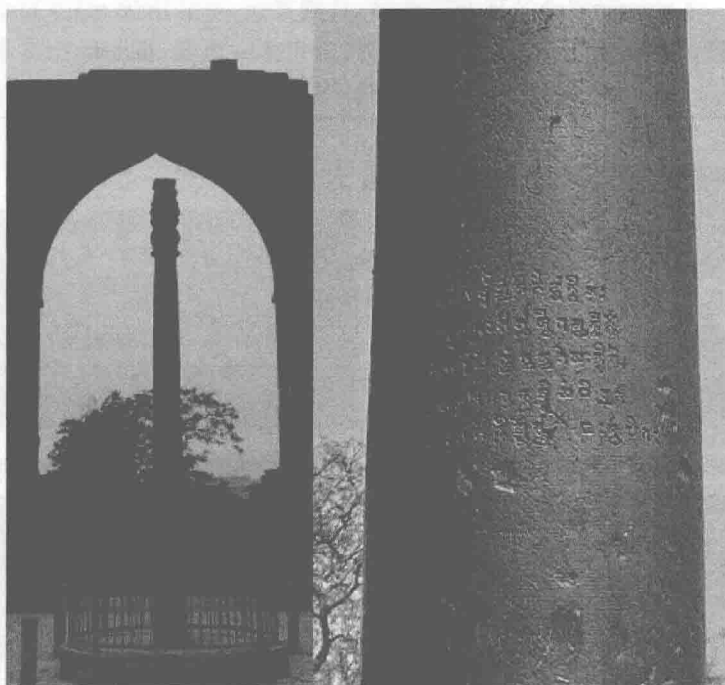


图 1-5 印度“德里”铁柱(Dehli Pillar)

粉末冶金材料与制品的具体出现时间见表 1-1,其中部分材料如图 1-6 所示。

表 1-1 粉末冶金材料与制品的具体出现时间

粉末冶金材料与制品	出现时间
钨丝	1910 年
难熔碳化物	1914 年
电触头材料	1917~1920 年
WC-Co 硬质合金	1923~1927 年
烧结摩擦材料	1929 年
青铜轴承	1921~1930 年
WC-TiC-Co 硬质合金	1929~1932 年
烧结磁铁	1936 年
多孔铁轴承	1936 年