



教育部高等学校
材料科学与工程教学指导委员会规划教材

F_{enmo} 粉末冶金材料

Yejin Cailiao

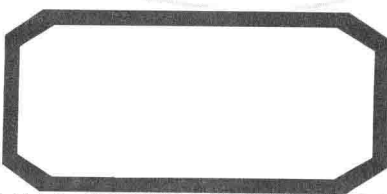
主编 易健宏



中南大学出版社
www.csupress.com.cn



教材



校
教材

Fenmo Yejin Cailiao

粉末冶金材料

主编 易健宏



中南大学出版社
www.csupress.com.cn

内容提要

全书共分 12 章,内容包括:铁基粉末冶金结构材料,粉末冶金铜基结构材料,粉末冶金铝基、钛基复合材料,粉末冶金高温合金,粉末冶金减摩耐磨材料,粉末冶金摩擦材料,难熔金属与合金,硬质合金,粉末冶金超硬材料,磁性材料,粉末冶金电工材料、粉末冶金多孔材料。

本书既可供粉末冶金、金属材料及非金属材料、机械工程等相关专业的师生作教学用书,还可供从事相关专业的科研人员、工程技术人员参考。

图书在版编目(CIP)数据

粉末冶金材料/易健宏主编. —长沙:中南大学出版社,2016.7

ISBN 978 - 7 - 5487 - 2364 - 6

I. 粉... II. 易... III. 粉末冶金 IV. TF12

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2016)第 161667 号

粉末冶金材料

主编 易健宏

☐责任编辑 周兴武

☐责任印制 易红卫

☐出版发行 中南大学出版社

社址:长沙市麓山南路

邮编:410083

发行科电话:0731-88876770

传真:0731-88710482

☐印 装 长沙德三印刷有限公司

☐开 本 787 × 1092 1/16 ☐印张 25.75 ☐字数 656 千字

☐版 次 2016 年 7 月第 1 版 ☐印次 2016 年 7 月第 1 次印刷

☐书 号 ISBN 978 - 7 - 5487 - 2364 - 6

☐定 价 68.00 元

图书出现印装问题,请与经销商调换

前 言

在新材料的研究与开发中,粉末冶金技术既具有材料设计与控制的灵活性与精确性,也具有生产与制备过程的环境友好性与成本控制的经济性,已成为新材料领域的一个重要领域。各类粉末冶金材料在机械制造、交通运输、电器仪表、办公器械和家用电器以及航空、航天、兵器、船舶与核工业等领域得到了广泛的应用,在国民经济和国防工业中起到了重要作用。

为了满足粉末冶金专业以及相关专业人才培养和科学技术人员研究开发的需要,促进粉末冶金材料的发展,中南大学、北京科技大学、合肥工业大学、北京航空航天大学 and 昆明理工大学等高校根据教育部材料科学与工程教育指导委员会的要求与安排,多次进行了协商讨论,决定共同编写《粉末冶金材料》一书。

本书结合国内外粉末冶金材料的研究成果,系统介绍了主要粉末冶金材料体系的制备技术、材料性能与应用。在主要粉末冶金材料体系的选择上,本书主要结合考虑了行业现有的发展情况与材料体系的系统性,没有将目前研究较多的纳米材料与能源材料单独成章。同时,在粉末冶金技术中,粉末本身是粉末冶金材料的原料,有时也直接作为产品;但考虑到粉末种类较多,且已有相关书籍论述,本书也未单独成章介绍。本书既可作为高校材料、冶金与机械等相关专业的教材,也可作为从事新材料的研究、开发与管理的工程技术人员的参考书。

本书由易健宏教授编制全书的大纲,易健宏教授、程继贵教授和赵慕岳教授审定了主要章节;参加编写的有程继贵教授(第1章)、尹延国教授(第2章)、黄劲松教授(第3章)、刘彤教授和马朝利教授(第4章)、张兆森教授(第5章)、姚萍屏教授(第6章)、范景莲教授(第7章)、张立教授(第8章)、郝俊杰教授(第9章)、易健宏教授(第10章)、袁铁锤教授(第11章)和贾成厂教授(第12章)。

在写作过程中,编著者参考和引用了大量国内外科技工作者的文献资料和研究成果,在此表示衷心感谢。粉末冶金材料涉及的知识范围十分广阔,且发展迅速,书中难免出现疏漏和不妥之处,恳请各位专家和广大读者不吝批评指正。

编 者

2016年7月

目 录

第1章 铁基粉末冶金结构材料	(1)
1.1 概述	(1)
1.1.1 铁基粉末冶金结构材料的特点	(1)
1.1.2 铁基粉末冶金零件的应用	(2)
1.2 典型铁基粉末冶金零件材料体系	(3)
1.2.1 烧结钢中合金元素	(3)
1.2.2 烧结碳钢	(6)
1.2.3 烧结低合金钢	(11)
1.2.4 烧结不锈钢	(17)
1.3 铁基粉末冶金结构零件的制造工艺	(19)
1.3.1 粉末预处理	(19)
1.3.2 压坯密度的控制及压制缺陷形成机理与控制	(24)
1.3.3 铁基粉末冶金零件的烧结行为	(27)
1.4 铁基粉末冶金零件的烧结后处理	(30)
1.4.1 整形与精整	(30)
1.4.2 热处理	(32)
1.4.3 蒸气处理	(34)
1.5 高性能铁基粉末冶金结构零件的制造技术	(36)
1.5.1 复压-复烧	(36)
1.5.2 渗铜工艺	(38)
1.5.3 粉末锻造	(40)
1.5.4 温压技术	(42)
1.5.5 粉末高速压制	(44)
1.5.6 组合烧结	(46)
1.5.7 烧结硬化	(47)
第2章 粉末冶金铜基结构材料	(50)
2.1 概述	(50)
2.2 铜及铜合金粉的制备方法	(51)
2.2.1 电解法	(51)
2.2.2 雾化法	(52)
2.2.3 氧化还原法	(54)

2.2.4	机械合金化法	(55)
2.3	粉末冶金铜基结构零件制备方法	(56)
2.3.1	工艺流程	(56)
2.3.2	粉末料的准备	(56)
2.3.3	压制成形	(57)
2.3.4	烧结工艺	(58)
2.3.5	常见的烧结缺陷及消除方法	(58)
2.4	粉末冶金铜基结构材料及其应用	(59)
2.4.1	粉末冶金纯铜材料	(60)
2.4.2	粉末冶金青铜材料	(60)
2.4.3	粉末冶金黄铜材料	(63)
2.4.4	粉末冶金白铜材料	(67)
2.4.5	弥散强化粉末冶金铜基材料	(68)
第3章	粉末冶金铝基、钛基复合材料	(74)
3.1	粉末冶金铝合金、铝基复合材料	(74)
3.1.1	铝及铝合金粉的粒度与形状、物理与化学性能	(74)
3.1.2	铝及铝合金粉的成形、致密化工艺	(74)
3.1.3	粉末冶金铝合金的性能及应用	(76)
3.1.4	粉末冶金铝基复合材料	(77)
3.2	粉末钛合金	(83)
3.2.1	钛合金体系	(83)
3.2.2	粉末制备	(85)
3.2.3	致密化工艺	(88)
3.2.4	粉末钛合金的性能和应用	(90)
3.2.5	粉末钛基复合材料	(93)
第4章	粉末冶金高温合金	(95)
4.1	概述	(95)
4.2	非弥散强化粉末冶金高温合金	(95)
4.2.1	非弥散强化粉末高温合金成分设计	(95)
4.2.2	非弥散强化粉末冶金高温合金的制备	(97)
4.2.3	非弥散强化粉末冶金高温合金的性能及应用	(110)
4.2.4	非弥散强化粉末冶金高温合金的发展方向	(115)
4.3	氧化物弥散强化(ODS)粉末冶金高温合金	(116)
4.3.1	氧化物弥散强化高温合金的成分设计	(117)
4.3.2	ODS 高温合金的制备	(118)
4.3.3	ODS 高温合金的性能	(127)
4.3.4	ODS 高温合金的应用	(129)

第5章 粉末冶金减摩耐磨材料	(131)
5.1 概述	(131)
5.1.1 粉末冶金减摩耐磨材料的特点和发展	(131)
5.1.2 粉末冶金减摩耐磨材料自润滑机理	(132)
5.2 粉末冶金减摩耐磨材料的组成及应用	(133)
5.2.1 粉末冶金减摩耐磨材料的分类	(133)
5.2.2 粉末冶金减摩耐磨材料的组成	(134)
5.3 典型粉末冶金减摩耐磨材料及生产工艺	(135)
5.3.1 多孔含油轴承	(135)
5.3.2 钢背双金属减摩材料	(139)
5.3.3 铝基减摩材料	(141)
5.3.4 金属/非金属复合减摩材料	(142)
5.3.5 其他减摩材料	(142)
5.3.6 特殊环境下的粉末冶金减摩耐磨材料	(142)
5.3.7 粉末冶金减摩耐磨材料生产过程	(143)
5.4 粉末冶金减摩耐磨材料的发展与应用	(144)
5.4.1 无铅化减摩耐磨材料	(144)
5.4.2 高温减摩耐磨材料	(145)
5.4.3 宽温减摩耐磨材料	(147)
5.4.4 其他减摩耐磨材料	(148)
5.5 粉末冶金减摩耐磨材料的检测与评价	(148)
5.5.1 疲劳强度测试	(148)
5.5.2 承载能力测试	(149)
5.5.3 抗咬合性测试	(149)
5.5.4 结合强度测试	(150)
5.5.5 机械强度测试	(150)
5.6 粉末冶金铜基含油轴承生产示例	(151)
5.6.1 铜基含油轴承产品图的确定	(151)
5.6.2 原辅材料的选择	(151)
5.6.3 铜基含油轴承生产工序	(152)
第6章 粉末冶金摩擦材料	(154)
6.1 概述	(154)
6.1.1 引言	(154)
6.1.2 粉末冶金摩擦材料的特点	(154)
6.1.3 粉末冶金摩擦材料的分类	(155)
6.2 粉末冶金摩擦材料组成及其作用	(156)
6.2.1 基体组元	(156)

6.2.2	润滑组元	(158)
6.2.3	摩擦组元	(162)
6.3	粉末冶金摩擦制造工艺及性能	(165)
6.3.1	粉末冶金摩擦材料常用成分	(165)
6.3.2	粉末冶金材料的制造工艺	(171)
6.3.3	粉末冶金摩擦材料的性能及检测方法	(174)
6.3.4	粉末冶金摩擦材料摩擦磨损性能的检测	(177)
6.3.5	粉末冶金摩擦材料的显微组织结构	(178)
6.4	粉末冶金摩擦材料摩擦磨损理论及其应用	(178)
6.4.1	粉末冶金摩擦材料摩擦机理	(178)
6.4.2	影响摩擦系数的因素	(179)
6.4.3	粉末冶金摩擦材料的磨损	(182)
第7章	难熔金属与合金	(184)
7.1	引言	(184)
7.1.1	难熔金属及其合金的特点与应用	(184)
7.1.2	难熔金属的发展及其特点	(185)
7.2	钨及钨合金	(186)
7.2.1	概述	(186)
7.2.2	钨合金制备的理论基础	(188)
7.2.3	钨合金制备工艺与材质研究	(190)
7.2.4	钨合金的破坏机理	(193)
7.2.5	钨合金的形变强化	(194)
7.2.6	钨合金的制备新技术	(196)
7.3	钼及钼合金	(198)
7.3.1	概述	(198)
7.3.2	钼及钼合金的性能与用途	(198)
7.3.3	钼的合金化与强化	(201)
7.3.4	TZM 钼合金及其应用	(201)
7.3.5	钼合金的形变加工与时效	(203)
第8章	硬质合金	(206)
8.1	引言	(206)
8.1.1	硬质合金的定义与分类	(206)
8.1.2	硬质合金的主要发展历史进程	(207)
8.1.3	硬质合金的生产工艺	(209)
8.2	硬质合金材料设计基础	(210)
8.2.1	概述	(210)
8.2.2	润湿性、合金组元的功能与特性	(211)

8.3 WC-Co 硬质合金	(213)
8.3.1 概述	(213)
8.3.2 合金的控碳问题	(213)
8.3.3 超细晶粒硬质合金	(215)
8.3.4 超粗晶与特粗晶硬质合金	(231)
8.3.5 原位激发自润滑功能硬质合金	(233)
8.4 WC-Ni 与 WC-Co-Ni 硬质合金	(235)
8.5 WC-TiC-Co 与 WC-TiC-Ta(Nb)C-Co 硬质合金	(236)
8.6 TiC/Ti(C, N)基硬质合金	(238)
8.7 功能梯度硬质合金	(240)
8.8 涂层硬质合金	(242)
8.9 钢结硬质合金	(246)
8.10 其它特殊硬质合金	(248)
8.10.1 Cr ₃ C ₂ 基硬质合金	(248)
8.10.2 无金属黏结剂硬质合金	(249)
第9章 粉末冶金超硬材料	(251)
9.1 概述	(251)
9.2 金属黏结剂及合金元素	(252)
9.2.1 常见金属黏结体系	(252)
9.2.2 黏结剂中元素的行为	(255)
9.2.3 骨架元素和化合物	(257)
9.2.4 特种元素的行为	(258)
9.3 金属和合金对金刚石的润湿	(259)
9.3.1 润湿的概念	(259)
9.3.2 金属(或合金)对金刚石的润湿	(261)
9.3.3 高温固相金属与金刚石的作用	(263)
9.4 金刚石表面金属化	(264)
9.4.1 金刚石表面金属化的技术	(264)
9.4.2 金刚石表面金属化的热力学	(267)
9.4.3 金刚石表面金属化的发展历程	(267)
9.5 超硬材料烧结体	(268)
9.5.1 金刚石聚晶及复合片的生产方法	(268)
9.5.2 金刚石聚晶及复合片的生产工艺	(271)
9.5.3 超硬材料烧结体性能检测	(273)
9.5.4 金刚石复合片主要缺陷及产生的原因分析	(275)
9.6 电镀超硬工具材料	(280)
9.6.1 基体表面镀前处理	(280)
9.6.2 金属电沉积	(281)

9.6.3 超硬材料与金属的复合电镀	(285)
第10章 磁性材料	(291)
10.1 概述	(291)
10.1.1 物质的磁性	(291)
10.1.2 铁磁性物质的特性	(291)
10.1.3 磁性材料的分类	(293)
10.1.4 磁性材料的基础	(294)
10.2 粉末冶金软磁材料	(297)
10.2.1 粉末冶金金属软磁材料	(297)
10.2.2 磁粉芯	(301)
10.3 粉末冶金金属永磁材料	(304)
10.3.1 烧结铝镍钴永磁材料	(304)
10.3.2 烧结稀土永磁材料	(305)
10.4 黏结永磁材料	(318)
10.4.1 黏结永磁的分类及特点	(318)
10.4.2 黏结永磁体的制备工艺	(318)
10.4.3 黏结永磁体的性能及应用	(322)
10.5 铁氧体磁性材料	(323)
10.5.1 铁氧体的晶体结构和内禀磁特性	(325)
10.5.2 永磁铁氧体	(327)
10.5.3 软磁铁氧体	(330)
第11章 粉末冶金电工材料	(335)
11.1 概述	(335)
11.2 粉末冶金电触头材料	(335)
11.2.1 电触头的工作特性和要求	(336)
11.2.2 触头材料的组成与分类	(340)
11.2.3 粉末冶金电触头的制造方法	(341)
11.2.4 粉末冶金电触头材料的性能与应用	(350)
11.3 粉末冶金电刷材料	(357)
11.3.1 电刷材料	(357)
11.3.2 电刷材料的制造	(358)
11.3.3 粉末冶金电刷的特点和应用	(359)
11.4 其他粉末冶金电工材料	(361)
11.4.1 焊接电极材料	(361)
11.4.2 阴极材料	(364)
11.4.3 电热材料	(369)
11.4.4 热电偶材料	(371)

11.5 粉末冶金电工材料的发展趋势	(376)
第12章 粉末冶金多孔材料	(377)
12.1 概述	(377)
12.2 粉末冶金多孔材料的制备方法	(378)
12.2.1 粉末的制备	(378)
12.2.2 模压成形与烧结	(380)
12.2.3 等静压成形	(381)
12.2.4 松装烧结	(381)
12.2.5 粉末轧制	(381)
12.2.6 粉末增塑挤压	(382)
12.2.7 注浆成形	(382)
12.2.8 注射成形	(382)
12.2.9 三维打印成形技术	(384)
12.2.10 激光快速成形技术	(384)
12.2.11 电子束快速成形技术	(385)
12.3 粉末冶金多孔材料的性能	(387)
12.3.1 孔隙特性	(387)
12.3.2 透过特性	(389)
12.3.3 力学性能	(390)
12.3.4 其他性能	(391)
12.4 粉末冶金多孔材料的主要体系	(391)
12.4.1 粉末冶金不锈钢多孔材料	(391)
12.4.2 粉末冶金镍多孔材料	(392)
12.4.3 粉末冶金钛多孔材料	(392)
12.4.4 粉末冶金铜多孔材料	(392)
12.4.5 粉末冶金金属间化合物多孔材料	(392)
12.4.6 粉末冶金耐高温多孔材料	(394)
12.4.7 粉末冶金泡沫金属	(394)
12.5 粉末冶金多孔材料的应用	(395)
主要参考文献	(398)

第1章 铁基粉末冶金结构材料

1.1 概述

1.1.1 铁基粉末冶金结构材料的特点

结构材料主要应用于参与机械运转,并在运转中承受拉伸、压缩、扭曲、冲击等综合应力,或与对偶零件发生相互摩擦等作用的零部件中。铁基粉末冶金结构材料及其制品是以铁粉及其合金粉末为主要原料,通过粉末冶金工艺制造的一类材料及制品。此类材料及制品要求具有较高的密度和力学性能,并能通过渗碳、淬火、调质等热处理手段,进一步提高强度、刚性、硬度和抗磨性能。与其他制造铁基零件的方法相比,粉末冶金技术生产铁基结构零件具有明显的特点:

首先,通过粉末冶金技术制成的铁基零件精度高,表面粗糙度小。通过调节粉末原料配比和设计铁基原料粉末,经模压成形、烧结,以及通过粉末锻造等新技术可以达到很高的尺寸精度。

其次,通过粉末冶金技术制造的铁基零件不需或只需少量切削加工,可以节省材料,生产效率高。在零件重量不超过400~500 g的情况下,铁基粉末冶金无论在材料利用率上,还是在能源消耗上都具有优势。从表1-1粉末冶金法和其他生产加工工艺的材料利用率和加工能耗的对比中,可以看出铁基粉末冶金技术省材节能的技术经济效果。

表1-1 粉末冶金法与其他制造方法的原材料利用率和能耗(数据来源:EPMA)

原材料利用率/%	加工工艺	生产每千克最终零件的能耗/MJ
95	粉末冶金	29
90	铸造	30~38
85	冷、热挤压	41
75~80	锻造	46~49
40~50	机加工	66~82

另外,通过铁基粉末冶金技术生产零件成本的构成要素主要是原料费、模具费、设备折旧费、烧结费,以及生产过程中劳动工资成本等,而当大量生产时,除了模具费用与产品产量相关外,其他因素与产量几乎无关。因此,铁基粉末冶金零件生产产量越大,经济优势越突出。图1-1是粉末冶金法与机械加工法生产链轮零件的生产成本与产量的关系。图中视机械加工1000件的成本为1,并以之为基准,用对比数值来表示。可以看出,只有链轮的生产

量大于 3000 件时, 粉末冶金法与机械加工法相比才是经济的, 并且批量越大, 粉末冶金工艺的经济效率越好。

需指出的是, 由粉末冶金工艺制造的铁基结构材料及零件, 因显微结构中存在一定的孔隙, 其力学性能要低于相应的致密材料。这也是制约其在要求高性能场合下应用的主要原因之一。正因如此, 提高铁基粉末冶金结构材料的致密度一直是铁基粉末冶金制品开发和研究的课题之一。自 20 世纪 70 年代以来, 通过原料铁及其合金粉末性能的改善、成形和烧结工艺的改进和新技术的开发等, 有效地提高了铁基结构零件的致密化程度, 从而显著提高了铁基粉末冶金的技术水平。

1.1.2 铁基粉末冶金零件的应用

铁基粉末冶金的发展与机械装备制造业, 特别是汽车工业的发展密不可分。铁基粉末冶金零件最主要的应用领域是汽车等交通运输机械。过去十多年里, 全球粉末冶金制品大部分应用于汽车领域, 汽车用粉末冶金制品一直占粉末冶金零件总产量的 60% ~ 70%, 而其中大部分又为铁基粉末冶金零件和制品。粉末冶金在汽车上的应用, 几乎涉及汽车的所有部件, 如汽车制动器零件、发动机曲轴、连杆、活塞环等, 但比较集中于汽车的心脏——发动机。在新型的汽车引擎和同步机构中, 包括如链轮、带轮、齿轮、轴承盖, 气门导管, 进、排气阀座圈等, 均采用粉末冶金零件。此外, 转向装置中的转子、凸轮、齿条, 润滑用齿轮泵中的内外转子、油泵齿轮, 以及刮水器、变速箱、空调等也大量使用铁基粉末冶金零件。

据统计, 目前国外每辆汽车使用粉末冶金零件已达 10 kg 重, 美国每辆汽车中使用粉末冶金零件则重达 20 kg 左右, 预计未来 10 年每部汽车中使用粉末冶金零件可能重达 25 kg。而目前国产汽车平均每辆约使用 5 kg 重的粉末冶金零件, 与国外相比仍有较大差距, 这也反映出我国粉末冶金工业结构零件的生产水平仍相对落后。但是, 随着中国汽车工业的快速发展, 这一差距将很快缩小。以桑塔纳轿车为例, 每辆车用粉末冶金件仅 15 种, 重约 3 kg, 而在国内市场投放的、以美国技术生产的别克轿车则每辆用粉末冶金件 35 种, 重 12.5 kg。根据统计数据, 我国汽车产量 2012 年已突破 1900 万辆。因此, 国内汽车用粉末冶金零件具有很大的市场需求, 汽车工业的发展仍将是推动铁基粉末冶金发展的主要动力。

铁基粉末冶金零件在摩托车上也得到了应用。一辆摩托车的各种齿轮、链轮、齿环、变速凸轮、活塞、进排气门座、油泵内外转子等采用的粉末冶金零件的数量可能达 30 多个品种。

除了在交通运输车辆中大量使用外, 内燃机中也使用相当数量的铁基粉末冶金零件。单缸内燃机的基本结构与汽车发动机有许多相似之处, 因此, 汽车发动机中使用的粉末冶金零件, 对于单缸内燃机的设计和应用有许多可借鉴之处。

此外, 铁基粉末冶金制品在家用电器、电动工具、文体休闲器材等领域中也得到了广泛

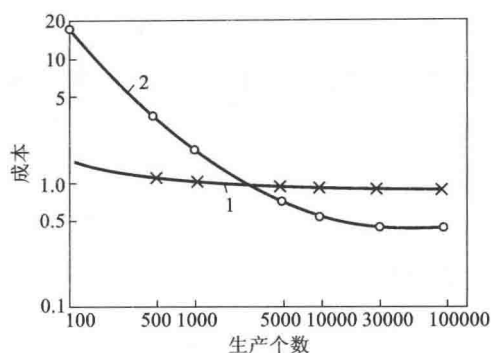


图 1-1 机械加工与粉末冶金法制造链轮的成本对比

1—机械加工; 2—粉末冶金

的应用。20世纪80年代开始,家用电冰箱、空调的需求量快速增长,其主机中的核心部分制冷压缩机中大量使用铁基粉末冶金零件,如往复式压缩机中的连杆、活塞,旋转式压缩机中的缸体、缸套、平衡块等。表1-2列举了常规铁基粉末冶金零件的应用实例。

表1-2 常规铁基粉末冶金零件的应用实例

应用领域	用途
通用机械	播种机中的浮动凸轮、36齿从动链轮;条播机的槽式强制下种组合件的供种子滚筒与闭合器,行星齿轮组件;拖拉机中的油泵齿轮;195柴油机中的平衡齿轮、调速齿轮、凸轮轴齿轮、起动齿轮、曲轴正时齿轮
家用电器	家用冰箱与空调压缩机中的连杆、活塞、阀板、进、排气阀导管、上下轴承、平衡块、缸体、叶片;洗衣机、干燥机之类设备中使用的偏心齿轮和齿条齿轮;洗涤机中的水泵叶轮
电动工具	电动工具中使用的凸轮、杆件、平衡块、轴承、轴承座、离合器、转子、缸套、侧板、叶片及卡盘夹爪;手电钻、线锯、修剪机、冲击改锤中的直齿轮、伞齿轮、端面齿轮、小齿轮、螺旋齿轮、齿轮组件、棘轮
其他应用	液压件,诸如各种齿轮泵、转子泵、轴向柱塞泵、叶片泵,扭矩马达等中的许多齿轮,次摆线内、外转子,月牙形齿轮;轴向柱塞泵的缸体、压板、球座及滑靴;叶片泵的阀板、凸轮环等

1.2 典型铁基粉末冶金零件材料体系

在粉末冶金结构零件中,铁基结构零件的应用面最广,数量和品种也最多。这主要是因为铁基结构零件材料可以通过合金化技术、热处理技术等来改善和提高其力学性能和物理性能。随着成形技术和材料科学方面的不断发展和创新,铁基粉末冶金结构零件的综合优势和低成本的市场竞争力将更加突出,成为粉末冶金结构零件最为重要的组成部分。

铁基粉末冶金零件的材料体系很丰富,包括烧结碳钢、低合金钢、不锈钢、高耐磨的高合金钢、易切削钢、烧结硬化钢等。不同的材料体系和不同密度的组合,加上选用烧结后处理工艺的差别,使铁基结构零件的性能呈现多样化,从而可以满足不同的使用要求。

1.2.1 烧结钢中合金元素

通过添加合金元素来提高铁基粉末冶金结构零件的力学性能有两种主要途径:一是通过熔点较低的金属或合金烧结熔化来充填孔隙,以提高制品的致密度,进而提高其力学性能;另一是通过与熔铸钢有相似强化原理的合金强化来实现,如通过碳和其他一些合金元素对钢的固溶强化、沉淀强化作用,通过改变铁碳相图中相区的位置而产生强韧化作用,通过强碳化物形成元素的颗粒强化,通过合金元素对热处理时相变和组织转变的影响而发生淬火强化、时效强化、弥散强化作用等。

下面简要叙述一些常用合金元素对铁基粉末冶金结构材料性能的影响。

1. 碳(C)

以碳为合金元素的铁基粉末冶金结构材料称为烧结碳钢。碳是烧结钢中的重要元素,通常以石墨的形式加入。当混料中加入的石墨在烧结时未能全部溶入铁中,就会出现游离石墨,降低烧结钢的强度。一般烧结钢中的化合碳含量控制在0.3%~0.9%范围内。碳可溶入铁中形成间隙固溶体,还可与铁生成 Fe_3C 而改变材料的显微组织,因而有很好的强化作用。当化合碳含量达1.0%时,会聚集在晶界处形成渗碳体,使材料强度降低。当化合碳含量达到1.2%时,则可能形成网状渗碳体,明显降低强度。

烧结钢中的化合碳含量还和烧结温度有关。当烧结温度低于850℃时,混入的石墨基本不溶入铁中,全部以游离石墨形式存在。而当烧结温度达到1000℃时,石墨绝大部分可溶于铁中。此外,由于混合料中石墨分布不均匀,烧结钢中化合碳的含量也可能不均匀,因此,即使亚共析成分的烧结钢,也可能出现少量的游离渗碳体。故一般烧结钢的显微组织除空隙和夹杂外多为珠光体+铁素体+少量游离渗碳体。

2. 铜(Cu)

对于熔铸钢而言,铜会使钢脆化,被认为是一种有害元素。但是,在铁基粉末冶金结构材料中,铜常是一种有益的合金元素。铜的加入显著地增加了材料的强度,也降低材料的冲击韧性(图1-2)。铜在铁中的溶解度随温度变化较大。在1094℃时,铜在 $\gamma\text{-Fe}$ 中的溶解度为7.5%~8.5%,835℃时约为3.5%,而室温下铜在铁中的溶解度只有0.2%,因此铜对烧结钢有一定的固溶强化作用。另外,也可利用铜在铁中的溶解度随温度的急剧变化,对烧结合金进行时效强化处理。需要注意的是,铜的添加量多时,烧结时零件的尺寸胀大,而且由于液相量多,零件的烧结变形大,从而降低零件的尺寸精度。

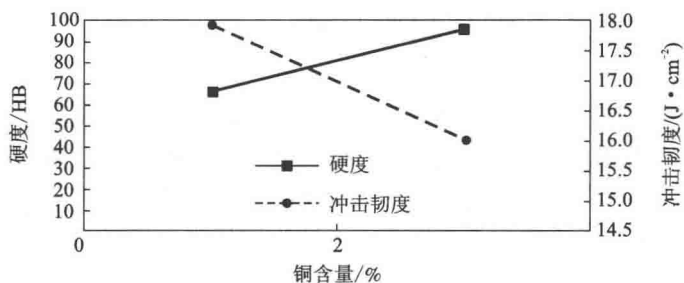


图1-2 Fe-Cu合金的硬度和冲击韧性与铜含量的关系

3. 钼(Mo)

钼也是烧结钢中常用的合金元素,它可溶于铁中起固溶强化作用,但主要作用是细化晶粒,提高淬透性和防止回火脆性。中等密度(6.5 g/cm^3)以上的结构零件和粉末锻钢材质体系中基本上都有钼。

钼在烧结铁基结构材料中加入量通常为0.4%~0.6%,在烧结硬化钢中,钼的加入量可提高到0.8%~1.0%。钼是强碳化物形成元素,在烧结钢中优先形成碳化物,比渗碳体 Fe_3C 更稳定,并具有高硬度、高熔点和高分解温度。形成碳化物的直接作用是弥散强化,提高钢的强度、硬度和耐磨性。碳化物还具有间接强化作用,即阻碍钢的奥氏体晶粒长大而起到细晶韧化作用。钼的另一个显著作用是提高回火稳定性,降低回火脆性。回火稳定性是指淬火

钢对回火时发生组织转变和硬度下降的抵抗力。强碳化物形成元素可使回火马氏体组织维持到相当高的回火温度,这使钢的韧性得到大大改善。同时,钼具有抵制第二类回火脆性的作用,而含 Cr、Ni、Mn、Si 等元素的合金钢对第二类回火脆性非常敏感,加入适量的钼(约 0.5%)能有效地抵制这类回火脆性。

4. 镍(Ni)

镍可稳定铁的 γ 相区并稳定奥氏体,镍与铁可互溶起到固溶强化作用。镍可使 Fe-C 相图上的共析点 S 向左下方移动,从而得到较多且细小的珠光体组织,同时珠光体中铁素体含量也较大,因而烧结镍钢在一定含镍范围内,强度提高而塑性和韧性不降低。镍还可以降低钢的临界转变温度和钢中合金元素的扩散速度,从而提高钢的淬透性。研究表明,镍原子有可能偏聚在铁粉颗粒边界,形成一层富镍奥氏体,为铁原子在颗粒之间的快速扩散提供通道。另一方面,铁、镍之间的互扩散还使得铁颗粒烧结颈处过剩空位浓度增高,增加铁颗粒的烧结活性。上述两方面的共同影响,使颗粒之间的铁原子通过偏聚层快速扩散,从而强化了铁粉颗粒之间的烧结。由于铁原子可以无限固溶于镍晶格中,因此,在烧结保温期间,上述强化烧结过程可持续进行,最终使烧结体收缩率明显增加。含镍的镍钢材料的耐候性和耐蚀性均比碳钢要好。

5. 锰(Mn)

锰在烧结钢中,除起固溶强化作用外,还可提高烧结钢的淬透性,从而提高制品的强度。在 Fe-C 系中加入锰,可使材料的耐磨性提高 70% 以上。主要原因是锰在烧结过程中能够与铁形成固溶体,提高了铁素体的强度;同时锰又是碳化物形成元素,生成含锰渗碳体。由于锰是弱碳化物形成元素,因此含锰烧结钢的耐磨性低于含钼烧结钢。但锰可以降低钢的临界转变温度,降低钢共析点的碳含量,这样可使基体中铁素体量减少,增加珠光体含量,所以仍可以显著提高材料的耐磨性。锰与氧的亲合力强,在一般烧结气氛下,锰表面易生成氧化物,且难以被还原,因而不利于合金均匀化和烧结过程。故一般以 Mn-Fe 中间合金粉或母合金(Master alloy)粉的形式将锰加入混合料中。

6. 铬(Cr)

铬对铁基粉末冶金结构材料的微观组织、烧结密度和硬度有很大影响。随着铬添加量的增加,烧结组织得到细化,同时硬度增加。铬的加入除可以提高机械强度外,还可改善钢的抗氧化性能和抗腐蚀性能。钢中所含少量铬主要是通过稳定过冷奥氏体,改善组织而起到强化作用。粉末锻钢中加入少量铬对提高强度和韧性有一定的效果。铬可以以铬粉、Cr-Fe 粉、 σ 相或预合金粉的形式加入配合料中。其中,以 σ 相粉加入效果最好,而从合金均匀化考虑,最好是用预合金粉。烧结 Fe-Cr-Cu 合金具有优异的力学性能。如烧结 Fe-2Cu-9Cr 合金的极限抗拉强度可达 85 MPa,延伸率可达 3%。而当铬以 Cr_3C_2 形式加入时,烧结 Fe-Cr-C 合金的极限抗拉强度可达 90 MPa,热处理后,极限抗拉强度可达 140 MPa,延伸率为 2%。

7. 磷(P)

一般优质钢的含磷量皆低于 0.03%。因为磷溶于铁素体中会使其塑性显著降低,故一般炼钢时,除磷钢之类的特殊钢种外,皆将磷看作有害元素而设法除去。烧结钢中加入合金元素磷能活化烧结过程,提高密度、改变孔隙形状,也提高了铁基材料的强度和韧性。因此,适当加入磷可提高材料的机械性能、稳定试样尺寸。磷对提高材料的减摩性能也有较好的作

用。磷的加入量增高时,材料密度增高,但冲击强度减低,同时烧结收缩增大,这与添加铜的情况正好相反。可以利用这一特性调节零件烧结时的尺寸变化。磷与碳同时加入时,可进一步提高烧结材料的力学性能。

磷对烧结材料的强化作用可归纳为下述三个方面:

(1) Fe-P 系在 1050℃ 有共晶反应,产生液相,活化烧结,提高材料的烧结密度,从而提高材料的力学性能,但磷的加入量不得高于 0.8%;

(2) P 对铁有一定的固溶强化作用,效果比 Mn、Ni、Cr、Mo 都强得多;

(3) P 可以缩小 γ -Fe 相区,而铁原子在 α -Fe 中的扩散速度比在 γ -Fe 中的扩散速度高得多,因而能显著活化铁基材料的烧结,提高其力学性能。

磷以磷铁合金粉(Fe_3P),或 Cu_3P 粉形式加入为宜,这是因为 Fe_3P 容易研磨成细粉,且其硬度不高,不会严重磨损模具。也可以用磷酸及磷酸铵的形式加入磷。直接使用磷粉加入磷会使烧结损失难以准确控制,且烧结收缩变形严重,材料脆性大。

1.2.2 烧结碳钢

1.2.2.1 材料成分设计

设计铁基粉末冶金结构材料的成分应以其性能要求为依据。一般铁基结构零件主要由铁粉加入石墨粉以及其他金属元素粉或合金粉,有时也采用预合金粉末制得。

以结构零件为主要应用对象的烧结碳钢,以共析钢和亚共析钢成分为主,其中以化合碳含量小于 0.3% 的接近烧结铁材料、含 0.3% ~ 0.6% 碳的亚共析钢和含 0.6% ~ 0.9% 碳的共析钢三种材料成分居多,并以不同密度组成碳钢系列材料。含碳量低的烧结碳钢可用于制造受力小的零件或焊接件,含碳量高者经化学热处理后可用于制造有一定强度或耐磨性要求的零件。表 1-3 和表 1-4 分别列出了国内 (GB/T 14667.1—1993) 和国际标准化组织 (ISO 5755: 2000(E)) 有关烧结碳钢材料的技术标准。

表 1-3 粉末冶金烧结碳钢技术标准 (GB/T 14667.1—1993)

类别	钢种	牌号	化学成分 /%	密度 ($\geq$) /($\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$)	机械性能(不小于)				主要特点与 应用举例
					σ_b /MPa	δ /%	冲击韧性/ ($\text{N} \cdot \text{m} \cdot \text{cm}^{-2}$)	表观硬度 /HB	
第 1 类	烧结铁	FTG10-10	$C_{\text{化合}} \leq 0.1$, 其他 ≤ 1.5 , Fe 余量	6.3	100	3.0	5	40	塑性、韧性、焊接性与导磁性能好,适于制造受力极低,要求翻铆或焊接以及要求导磁的零件。例如:垫片、尺框、接铁、磁筒、极靴等
		FTG10-15	$C_{\text{化合}} \leq 0.1$, 其他 ≤ 1.5 , Fe 余量	6.8	150	5.0	5	50	
		FTG10-20	$C_{\text{化合}} \leq 0.1$, 其他 ≤ 1.5 , Fe 余量	7.0	200	7.0	20	60	