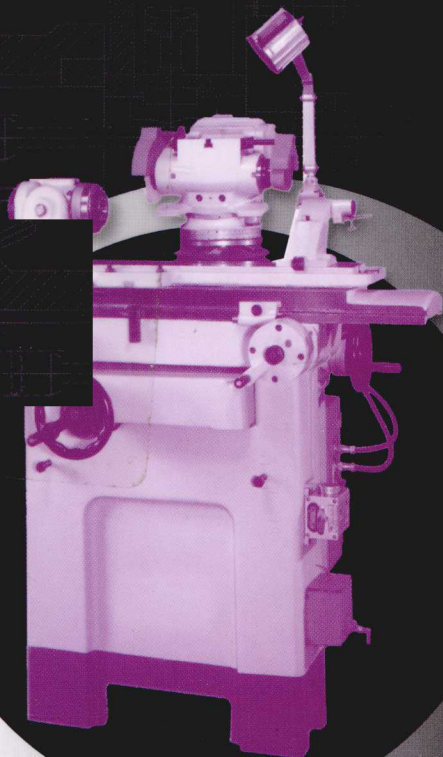


CHAOYING DAOJU MOJU YU MUJU
JIAGONG YINGYONG SHILI

超硬刀具、磨具 与模具加工应用实例

辛志杰 编著

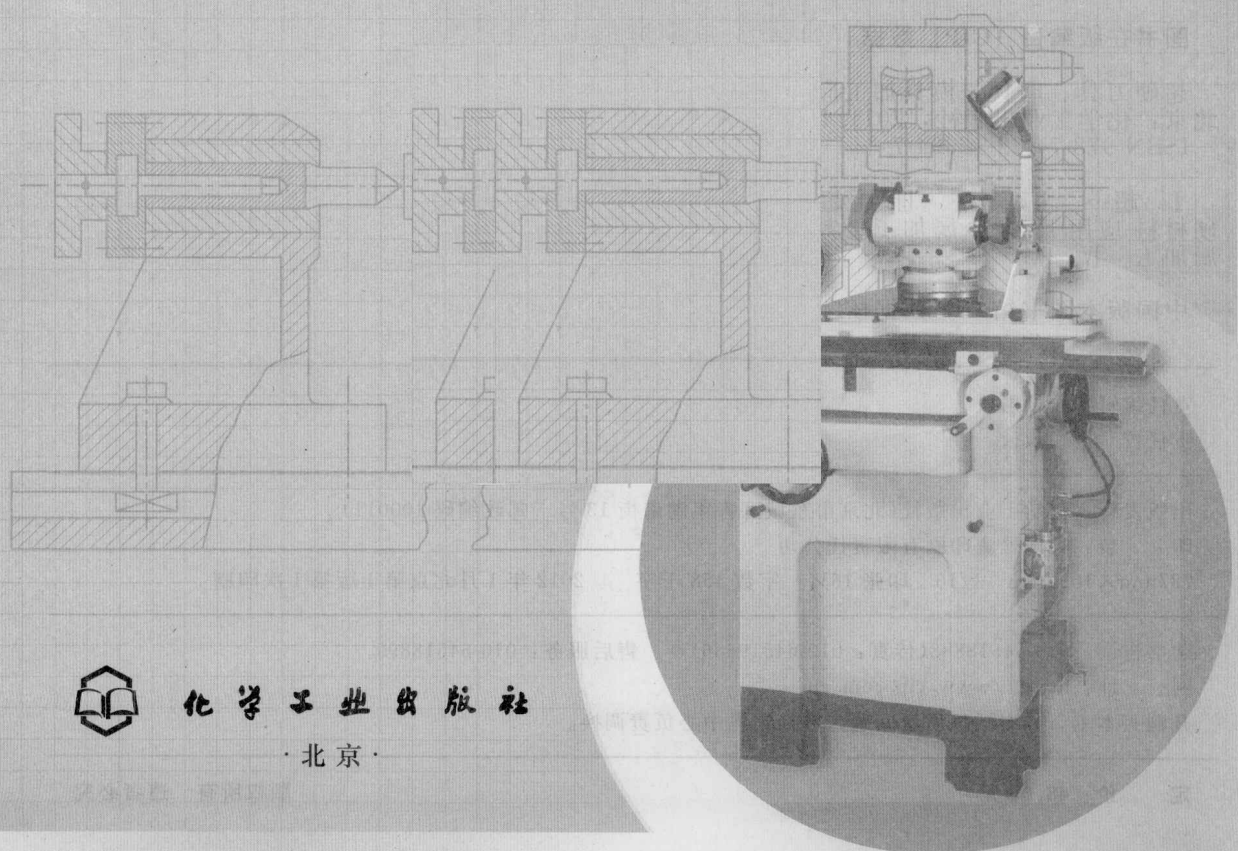


化学工业出版社

CHAoyING DAOJU MOJU YU MUJU
JIAGONG YINGYONG SHILI

超硬刀具、磨具 与模具加工应用实例

● 辛志杰 编著



化学工业出版社

· 北京 ·

超硬材料刀具、超硬材料磨具和模具加工技术是先进材料和先进制造技术中的重要领域，在众多产业部门得到广泛应用。本书主要介绍了超硬材料的发展与应用现状以及超硬材料的种类，论述了超硬材料刀具包括金刚石刀具、立方氮化硼刀具、硬质涂层刀具和超硬涂层刀具的种类、性能及用途；对金属结合剂超硬材料磨具、树脂结合剂超硬材料磨具和陶瓷结合剂超硬材料磨具的特点、应用及其制造工艺进行了阐述，还对常用模具材料包括冷作模具钢、热作模具钢和塑料模具钢的性能及最新应用技术进行了重点介绍和分析。

本书附有大量工程应用实例，具有实用性、实践性强的特点。本书可供广大机械加工、超硬材料加工企业及相关研究部门工程技术人员、技术工人学习磨具加工技术、模具加工技术使用，还可作为相关大专院校机械制造专业、材料加工专业及磨具、模具专业在校师生的教学参考用书。

图书在版编目 (CIP) 数据

超硬刀具、磨具与模具加工应用实例/辛志杰编著.
北京: 化学工业出版社, 2011. 12
ISBN 978-7-122-12394-7

I. 超… II. 辛… III. ①超硬刀具-金属加工②超硬材料-应用-磨具-金属加工③超硬材料-应用-模具-金属加工 IV. TG7

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2011) 第 198870 号

责任编辑: 朱 彤
责任校对: 顾淑云

文字编辑: 王 琪
装帧设计: 刘丽华

出版发行: 化学工业出版社(北京市东城区青年湖南街 13 号 邮政编码 100011)
印 装: 大厂聚鑫印刷有限责任公司
787mm×1092mm 1/16 印张 16 $\frac{1}{4}$ 字数 458 千字 2012 年 1 月北京第 1 版第 1 次印刷

购书咨询: 010-64518888(传真: 010-64519686) 售后服务: 010-64518899

网 址: <http://www.cip.com.cn>

凡购买本书, 如有缺损质量问题, 本社销售中心负责调换。

定 价: 48.00 元

版权所有 违者必究

前言

国民经济各部门所需求的多品种、多功能、高精度、高品质、高度自动化技术设备的开发和制造，促进了先进制造技术的发展。金属的切削加工是机械零件的主要加工方式，随着难加工材料的不断应用，特别是模具材料加工的日益增长，对超硬刀具及其材料提出了更高要求。

本书全面介绍了超硬材料刀具、磨具，重点叙述了超硬材料刀具、磨具及其在模具加工中的应用及实例；介绍了超硬材料的发展与应用现状、超硬材料的结构特征以及超硬材料的种类；阐述了超硬材料刀具包括金刚石刀具、立方氮化硼刀具、硬质涂层刀具和超硬涂层刀具的种类、性能及用途。同时，按照结合剂的不同，分别对金属结合剂超硬材料磨具、树脂结合剂超硬材料磨具和陶瓷结合剂超硬材料磨具的特点、应用及其制造工艺进行了详细论述。

本书还对常用模具材料包括冷作模具钢、热作模具钢和塑料模具钢的性能、特点、分类及应用进行了重点介绍和叙述。针对模具制造的工艺特点，阐述了模具制造的工艺规程、模具零件的毛坯选择等，分类介绍了模具成形表面的机械切削加工方法及光整加工方法，列举了大量模具典型零件的加工实例，对不同种类模具的装配工艺进行了重点分析和阐释。本书附有大量工程应用实例，具有实用性、实践性强的特点。本书可供广大机械加工、超硬材料加工企业及相关研究部门工程技术人员、技术工人学习磨具加工技术、模具加工技术使用，还可作为相关大专院校机械制造专业、材料加工专业及磨具、模具专业在校师生的教学参考用书。

本书在编写过程中，徐文峥、张阿玲、张海礁、梁艳、宋晶、赵奇等各位同仁参加了部分整理和配图等工作，在此谨致衷心感谢！

由于编者时间和水平有限，疏漏之处在所难免，敬请广大读者批评、指正。

编者

2011年11月

目录

第1章 概述	1
1.1 超硬材料的发展与现状	1
1.1.1 超硬材料的研究现状	1
1.1.2 超硬材料的发展趋势	2
1.2 材料硬度的表征方法	3
1.2.1 矿物学上硬度的分类	3
1.2.2 硬度的测量方法	4
1.3 超硬材料的结构特征	6
1.4 超硬材料的种类	7
1.4.1 金刚石	7
1.4.2 立方氮化硼	8
1.4.3 其他超硬材料	8
第2章 超硬材料刀具	10
2.1 金刚石刀具	10
2.1.1 金刚石刀具的种类	10
2.1.2 金刚石刀具的性能特点	10
2.1.3 金刚石刀具的制备	11
2.2 立方氮化硼刀具	15
2.2.1 立方氮化硼刀具的种类	16
2.2.2 立方氮化硼刀具的性能特点	16
2.2.3 立方氮化硼刀具的制备	17
2.3 硬质涂层刀具	20
2.3.1 硬质涂层刀具的种类	20
2.3.2 硬质涂层刀具的性能特点	21
2.3.3 硬质涂层刀具的制备	25
2.4 超硬涂层刀具	32
2.4.1 超硬涂层刀具的种类	32
2.4.2 超硬涂层刀具的性能特点	32
2.4.3 超硬涂层刀具的制备	34
第3章 超硬材料磨具	41
3.1 概述	41
3.2 金属结合剂超硬材料磨具	42
3.2.1 烧结金属结合剂超硬材料磨具	42
3.2.2 电镀金属结合剂超硬材料磨具	45
3.2.3 单层高温钎焊超硬材料磨具	49
3.3 树脂结合剂超硬材料磨具	51
3.3.1 树脂结合剂	52
3.3.2 树脂超硬磨具的制造工艺	54
3.4 陶瓷结合剂超硬材料磨具	57
3.4.1 超硬材料陶瓷磨具的特点及应用现状	58
3.4.2 超硬材料陶瓷磨具的原材料	59
3.4.3 超硬材料陶瓷磨具的制造工艺	61
第4章 模具材料	65
4.1 模具材料概述	65
4.1.1 我国模具材料的研究与应用现状	65
4.1.2 模具材料的分类	66
4.2 模具选材的原则及考虑因素	67
4.2.1 模具选材的原则	67
4.2.2 模具材料的使用要求	67
4.2.3 模具的失效形式	68

4.2.4 模具材料的工艺性	68	4.4.2 热作模具钢的分类	92
4.3 冷作模具钢	69	4.4.3 热作模具钢的选用	103
4.3.1 冷作模具材料的性能要求	69	4.5 塑料模具钢	104
4.3.2 冷作模具钢的分类	71	4.5.1 塑料模具材料的性能要求	104
4.3.3 冷作模具钢的选用	87	4.5.2 塑料模具钢的分类	105
4.4 热作模具钢	90	4.5.3 塑料模具钢的选用	116
4.4.1 热作模具材料的性能要求	90		

◆ 第5章 模具制造基础 117

5.1 模具制造特点及发展趋势	117	5.4 产品图样的工艺分析	120
5.1.1 模具制造的特点	117	5.4.1 模具零件的结构工艺分析	121
5.1.2 影响模具制造的主要因素	117	5.4.2 模具零件的技术要求分析	121
5.1.3 模具制造的基本要求	118	5.5 模具零件毛坯选择	122
5.1.4 模具制造技术的发展趋势	118	5.6 定位基准的选择	123
5.2 模具制造工艺过程	119	5.6.1 基准的概念	123
5.3 模具制造工艺规程制定的原则和步骤	119	5.6.2 工件的安装方式	123
5.3.1 模具制造工艺规程的作用	119	5.6.3 定位基准的选择	124
5.3.2 制定模具制造工艺规程的原则	120	5.7 零件工艺路线分析与拟定	125
5.3.3 制定模具制造工艺规程的步骤	120	5.8 加工余量与工序尺寸的确定	128
5.3.4 模具工艺文件的格式及应用	120	5.8.1 加工余量	128
		5.8.2 影响工序余量的因素	129
		5.8.3 确定加工余量的方法	129
		5.8.4 工序尺寸及公差计算	129
		5.9 工艺装备的选择	129

◆ 第6章 模具成形表面的加工 131

6.1 模具成形表面的普通机床加工	131	6.2 模具成形表面的数控加工	141
6.1.1 车削加工	131	6.2.1 数控加工	141
6.1.2 铣削加工	133	6.2.2 快速原型制造技术	144
6.1.3 刨削加工	134	6.2.3 逆向工程技术	146
6.1.4 磨削加工	135	6.3 模具成形表面的特种加工	148
6.1.5 钻削加工	139	6.3.1 电火花成形加工	148
6.1.6 镗削加工	140	6.3.2 电火花线切割加工	160
6.1.7 压印加工	141	6.3.3 激光加工	171

◆ 第7章 光整加工 174

7.1 研磨与抛光	174	7.2.2 影响电化学抛光质量的因素	182
7.1.1 研磨抛光机理	174	7.2.3 抛光方式	182
7.1.2 研磨抛光分类	175	7.3 超声抛光	183
7.1.3 研磨工艺	176	7.4 挤压研磨抛光	186
7.1.4 研磨抛光剂	178	7.5 其他光整加工	188
7.1.5 研磨抛光工具	179	7.5.1 喷丸抛光	188
7.1.6 研磨抛光工艺过程	181	7.5.2 程序控制抛光	188
7.2 电化学抛光	181	7.5.3 照相腐蚀	188
7.2.1 电化学抛光简介	181		

第8章 模具典型零件的加工实例 191

- 8.1 杆类零件的加工 191
 - 8.1.1 导柱的加工 191
 - 8.1.2 模柄与顶杆的加工 193
- 8.2 套类零件的加工 193
- 8.3 板类零件的加工 195
 - 8.3.1 板类零件加工质量的要求 195
 - 8.3.2 冲压模座的加工 195
 - 8.3.3 模板零件的装夹与找正 197
 - 8.3.4 模板零件孔的加工 198
- 8.4 滑块的加工 198
 - 8.4.1 滑块加工方案的选择 198
 - 8.4.2 滑块加工工艺过程 199
 - 8.4.3 导滑槽的加工 199
- 8.5 凸模的加工 200
 - 8.5.1 制造凸模、型芯的工艺过程 201
 - 8.5.2 凸模的刨削加工 202
 - 8.5.3 凸模、型芯的成形磨削 203
 - 8.5.4 数控成形磨削 205
 - 8.5.5 光学曲线磨削 206
- 8.6 凹模的加工 206
 - 8.6.1 型孔的压印锉修加工 207
 - 8.6.2 型孔的电火花加工 208
 - 8.6.3 镶拼型孔的加工 209
- 8.7 塑料模型腔的加工 212
 - 8.7.1 回转曲面型腔的车削 212
 - 8.7.2 非回转曲面型腔的铣削 216
- 8.8 锻模的加工 216
 - 8.8.1 锻模的结构特点及技术
要求 216
 - 8.8.2 锻模的加工 217
 - 8.8.3 锻模的加工工艺过程 217
- 8.9 压铸模的加工 218

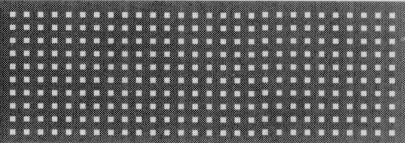
第9章 模具装配工艺 220

- 9.1 模具装配概述 220
 - 9.1.1 模具装配的内容 220
 - 9.1.2 模具装配的精度 221
- 9.2 模具装配尺寸链和装配工艺
方法 221
 - 9.2.1 装配尺寸链 221
 - 9.2.2 模具装配方法 222
- 9.3 模具工作零件的固定方法 224
 - 9.3.1 紧固件法 225
 - 9.3.2 压入法 225
 - 9.3.3 铆接法 226
 - 9.3.4 热套法 226
 - 9.3.5 焊接法 226
 - 9.3.6 低熔点合金法 227
 - 9.3.7 黏结法 227
- 9.4 模具装配间隙(壁厚)的控制
方法 228
 - 9.4.1 垫片法 228
 - 9.4.2 镀铜法 229
 - 9.4.3 透光法 229
 - 9.4.4 涂层法 229
 - 9.4.5 工艺尺寸法 229
 - 9.4.6 工艺定位器法 229
- 9.5 冲压模架的装配 230
 - 9.5.1 模架技术条件 230
 - 9.5.2 模架的装配方法 230
- 9.6 冲裁模的装配 233
 - 9.6.1 组件装配 234
 - 9.6.2 单工序冲裁模装配 235
 - 9.6.3 冲裁模的试模 237
 - 9.6.4 冲模的安装 238
- 9.7 塑料注射模的装配 239
 - 9.7.1 浇口套的装配 239
 - 9.7.2 成形零件的装配 240
 - 9.7.3 脱模机构的装配 242
 - 9.7.4 滑块抽芯机构的装配 246
 - 9.7.5 总装 248
 - 9.7.6 试模 252

参考文献 254

◆ 第1章

概述



超硬材料至今没有严格的界定，通常把金刚石和硬度接近金刚石的材料称为超硬材料，即是指以金刚石为代表的具有很高硬度的物质的总称。超硬材料主要应用于超硬材料刀具、超硬材料磨具等，它在现代工业中的应用极为广泛，包括石材矿山开采、石材加工、地质钻探、玻璃加工、陶瓷加工、木材加工、宝玉石加工及难加工金属材料的加工、汽车工业、电子信息产业和道路桥梁等混凝土工程等。由于这类材料硬度很高，因而作为加工工具和耐磨材料等方面具有特殊的应用价值，其应用范围越来越广泛，具有良好的发展前景。

1.1 超硬材料的发展与现状

1.1.1 超硬材料的研究现状

超硬材料是现代科学和技术重要的材料，它是人类已知的具有最高硬度的一些材料的集合。在这些材料中，已实现产业化的是金刚石和立方氮化硼。金刚石系列产品中，由静压法合成的金刚石单晶、聚晶以及以此为硬质点制造成的各种制品，包括金刚石锯片、钻头、刀具、砂轮等，是目前超硬材料应用的主要领域，也是超硬材料工具中开发最早、应用最为成熟的产品。超硬材料的发展历程见表 1-1。近年来，由爆炸法合成的纳米级金刚石以及用物理和化学方法沉积的金刚石和类金刚石薄膜，得到了较快的发展，产品极具发展潜力。立方氮化硼及其复合片在加工钢铁制品上具有独特优势，作为刀具材料在机械加工上得到了广泛的应用。

表 1-1 超硬材料的发展历程

时 间	超硬材料	方 法	用 途
1954 年	人造金刚石	高温高压	磨料
1957 年	立方氮化硼	高温高压	磨料
1977 年	PCD、PCBN	高温高压	刀具
1988 年	纳米金刚石	爆炸法	刀具
	人造单晶金刚石		刀具
1995 年	人造单晶 CBN		刀具
	类金刚石膜		刀具
	金刚石薄膜	CVD	刀具
	金刚石厚膜	CVD	刀具

目前,对超硬材料的研究着眼于短周期的几种轻元素,硼、碳、氮是元素周期表第二周期相邻的三种轻元素,其原子的共价半径分别为 0.82\AA 、 0.77\AA 、 0.75\AA ^①,由它们组成的共价

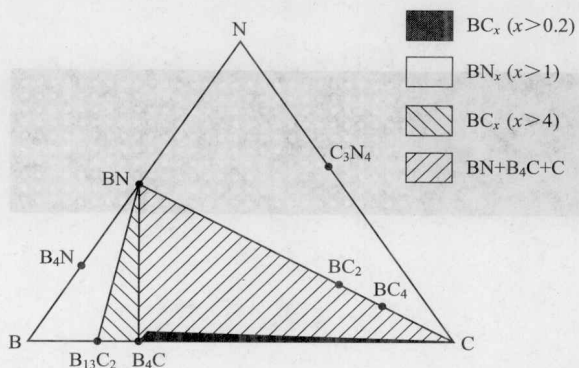


图 1-1 B-C-N 三元系相图

化合物是超硬材料的最佳候选对象。因此可以预期新型的超硬材料将可能在如图 1-1 所示的 B-C-N 三元系相图中产生,而实际上,目前已知的大部分超硬材料,如金刚石、CBN 和碳化硼 (B_4C) 以及理论上最硬的 $\beta\text{-C}_3\text{N}_4$ 均位于 B-C-N 组成的三元相图中。三角形的顶点代表纯组元,边上的点代表边界二元体系的成分,三元体系的组分由三角形内的点来确定。

在 B-C-N 三元体系中,人们熟知的石墨、六方氮化硼、金刚石、立方氮化硼、碳化硼等材料具有其他材料无法比拟、无法取代的

优异性能,不仅在机械加工和功能元器件方面发挥了重要作用,而且在人类的日常生活中扮演重要的角色。近年来,新型 B-C-N 化合物广阔的应用前景引起了科学界的广泛关注,在国际材料、物理、化学等领域也激发了人们对 B-C-N 轻元素体系的兴趣。经过几十年的努力,人们发现 B-C-N 体系的亚稳材料除了可能具有高硬度特性外,还具有许多独特的物理、化学特性,其潜在的其他性质还在进一步研究和开发中,在材料的成分、结构与其物理、化学性质的关系方面需要进行大量细致的研究工作。由 B、C、N 三种轻元素组成的新型二元或三元化合物将在机械、电子、生物、物理和化学等领域产生重要的作用。随着工业的发展,量子化学理论和计算方法取得了令人瞩目的丰硕成果,采用第一性原理计算单原子材料的结构和物性已趋于成熟;对双原子体系而言,由于两个原子间作用的复杂性,理论计算与实验测试结果存在一定的误差,尽管如此,双原子体系的理论计算在人工合成新材料中仍然起到重要的指导作用。自 A. Liu 和 M. Cohen 于 1989 年在“Science”上发表的工作从理论上预测了比金刚石还硬的 $\beta\text{-C}_3\text{N}_4$ 后,对氮化碳的研究就没有中断过。各国的科学家也利用各种手段包括 PVD、CVD 来合成新型超硬材料。近年来,科学家对氮化碳的相关材料,如 SiC_xN_y 、BCN 等材料进行理论计算和实验室合成研究,得到的结果都令人振奋。

1.1.2 超硬材料的发展趋势

随着适用于各种用途的超硬材料不断涌现,超硬材料向高质量、多品种、专用化的目标发展,这将是超硬材料今后的主要发展方向。

① 单晶合成 采用不同成分和形态的石墨或氮化硼,用不同的催化剂,不同的高温高压合成设备(如两面顶、六面顶)以及不同的工艺,合成出不同的单晶产品。

② 单晶分选 将合成的单晶产品按照颗粒形状、粒度、堆积密度、杂质含量以及强度、韧度、耐热性等性能指标的不同进行分选,从而分为不同的单晶品种。

③ 表面镀覆 经过分选的不同品种的单晶,利用化学镀、电镀、真空镀等表面镀覆方法,在其晶粒表面上镀覆不同种类、不同厚度的金属镀层(单金属或合金,单层或多层),使之成为具有不同性能和不同用途的金刚石或立方氮化硼品种。

④ 聚晶制造 利用金刚石单晶粉末或石墨粉以及适当的金属粉和非金属粉等原材料,按照适当的配方,采用相应的工艺方法(高温高压烧结法或直接生长法),制造具有不同形状、

① $1\text{\AA} = 0.1\text{nm}$ 。

规格、性能和用途的金刚石聚晶。

⑤ 薄膜生长 在低压条件下采用各种气相沉积生长法,制造具有特殊性能和较大尺寸的超硬薄膜或类金刚石薄膜,从而开辟超硬材料制造的新途径和新的应用领域。

⑥ 微晶立方氮化硼制备 通过控制晶界相手段,制备出大颗粒微晶立方氮化硼,以满足机械工业高效、精密磨削加工要求。

超硬材料在工业上获得了广泛应用。除了用来制造工具之外,超硬材料还在光学、电学、热学等方面具有一些特殊性能,现已作为一种重要的功能材料被使用,其用途正在不断地得到研究与开发。可以预见,随着科学技术的发展,超硬材料在现代工业和科学技术上必将放射出更加璀璨的光芒。

1.2 材料硬度的表征方法

随着近代科学技术尤其是航空航天技术的迅猛发展,对材料提出了越来越苛刻的性能要求。在材料的诸多性能中,硬度是其中一个非常重要的性能,它能直观地反映人们按预期性能指标设计新材料的能力,对于工程上许多大功率、高速运转的零部件,硬度同样是重要的性能指标。

与其他物理量相比,硬度是一个很难定义的物理量。对硬度不同的定义就引入了不同的硬度标度。硬度最初被定义为一种材料刻划另一种材料的能力,这个定义对应的是莫氏(Mohs)硬度。这种硬度是最不精确的,而且是非线性的。为了精确地测量硬度,人们把硬度定义为材料抵抗硬质物体压入的能力。根据压头的性质和形状可以分为布氏硬度(Brinell hardness)、洛氏硬度(Rockwell hardness)、维氏硬度(Vickers hardness)、努普硬度(Knoop hardness)、肖氏硬度(Shore hardness)等,单位是GPa,与压力的单位相同。一般来讲,布氏硬度超过40GPa的材料定义为超硬材料。

1.2.1 矿物学上硬度的分类

硬度是指材料在一定条件下抵抗另一种本身不会发生残余变形物体压入的能力。因此,材料的硬度是衡量材料力学性能优劣的主要参数之一。材料硬度可表示为显微硬度、压入硬度、研磨硬度、刻划硬度等,其数值随检测方法而异。表1-2列出了10种标准矿物的莫氏、维氏等4种硬度值。

表 1-2 不同方法测定 10 种标准矿物硬度对照表

矿物	莫氏硬度	维氏硬度/MPa	刻划硬度(以刚玉为 1000 计)	罗氏研磨硬度(以 α -石英为 100 计)
滑石	1	20	2.3	0.03
石膏	2	350	9.5	1.04
方解石	3	1720	22.5	3.75
萤石	4	2480	25.5	4.17
磷灰石	5	6100	35.5	5.42
正长石	6	9300	108	31.0
α -石英	7	11200	300	100
黄晶	8	12500	450	146
刚玉	9	21000	1000	833
金刚石	10	约 100000		11700

硬度的检测方法有好几种,其中用维氏(Vickers)静力试验测得的硬度称为维氏硬度,简称为HV。如刚玉 Al_2O_3 维氏硬度达到20GPa。金刚石的硬度达到70~100GPa,是目前已知的世界上最硬的材料。

1.2.2 硬度的测量方法

硬度是固体材料对外界物体机械作用(如压陷、刻划等)的局部抵抗能力,目前常用的硬度测量方法有布氏硬度(Brinell hardness)、洛氏硬度(Rockwell hardness)、维氏硬度(Vickers hardness)、努普硬度(Knoop hardness)、肖氏硬度(Shore hardness)等,通过硬度测量能迅速获得有关固体材料的弹性、塑性、韧性和断裂性能的定量数据。

(1) 布氏硬度(Brinell hardness, HB) 布氏硬度测量载荷为 $(1\sim3)\times 10^3$ kgf(1kgf=9.80665N),压头为淬硬钢球,直径有1mm、2mm、2.5mm、5mm、10mm等几种。压头硬度至少应为被试件硬度的2.5倍,压痕至试件边缘和至其底面的距离应为压痕直径的数倍。其计算式为:

$$HB = \frac{W}{A_0} = \frac{2W}{\pi D(D - \sqrt{D^2 - d^2})} \quad (1-1)$$

式中, W 为载荷,kgf; A_0 为接触面积, mm^2 ; D 为球体直径,mm; d 为被测试件表面上测得的压痕直径,mm。

布氏硬度值表示为:硬度数值 HB 球体直径/载荷/载荷保持时间。如120HB10/1000/30表示为用直径为10mm的钢球,在1000kgf载荷下,保持30s,测得的布氏硬度数值为120(后面的几种硬度值表达式所表示的内容与此类同)。

由于布氏硬度值取决于留在试样表面上的压痕直径大小,因而对试样表面制作要求较高,压痕直径必须在读数显微镜或投影屏上测量,其过程较麻烦,效率较低,不利于仪器的全自动化操作和测试数据的自动采集。

(2) 洛氏硬度(Rockwell hardness, HR) 洛氏硬度是目前世界上使用最频繁、应用最广泛的硬度测量方法之一。当材料硬度超过布氏硬度450以上或试样较小时,可改用洛氏硬度。根据试样可能的硬度,一般采用三种不同的标度来表示,即标度C(HRC)、标度B(HRB)、标度A(HRA)。测量时,将总载荷分为初载荷和主载荷两次施加,初载荷一般选10kgf,加至总载荷后卸去主载荷,以此时的压痕深度来衡量材料的硬度。其计算式为:

$$HR = \frac{K-h}{0.002} \quad (1-2)$$

式中, h 为塑性形变压痕深度,mm; K 为常量,其中金刚石圆锥的 K 值为0.20mm,钢的 K 值为0.26mm;0.002为压痕深度,mm。

当总载荷为100kgf,压头为直径1.588mm的钢球时,硬度范围为25~100HRB。当>100HRB时,使用HRC。当总载荷为150kgf,压头是顶角为120°的金刚石圆锥时,其硬度范围为20~67HRC;当总载荷为60kgf,压头同HRC,则硬度范围为60~85HRA。

洛氏硬度值表示为(以HRA为例):硬度数值 HRA。

洛氏硬度测量的特点是效率高,由于硬度值是以试验力作用下压痕深度的残余增量表示的,因而很容易实现测试数据数字化和自动化。但洛氏硬度试验也有其缺陷和局限,由于它使用金刚石圆锥压头或钢球压头,对组织结构较粗的材料,如铸铁、有色合金等的硬度测试,在试样表面留下的压痕偏小,压入深度过深,超出了它的适用范围,并且不能宏观反映该材料的硬度。

目前,洛氏硬度还没有一个统一的计量标准,各国都按照试验法的要求分别制造基准试验机,这给全球量值统一带来不少问题。世界有关计量机构已进行了这方面的合作,通过采用共用压头和标准硬度块来对比各实验室测得的数据,力图找出一种使用标准压头建立起世界统一的洛氏硬度标尺的方法。研究结果表明,建立一个扩展不确定度为 ± 0.2 HRC($K=2$)的世

界统一洛氏硬度标尺是可行的。

(3) 维氏硬度 (Vickers hardness, HV) 维氏硬度测量载荷有 5kgf、10kgf、20kgf、30kgf、100kgf 等几种, 压头是顶角为 136° 的金刚石正四棱锥。其计算式为:

$$HV = \frac{W}{A_0} = \frac{2W \sin\left(\frac{136^\circ}{2}\right)}{d^2} \quad (1-3)$$

式中, W 为载荷, kgf; A_0 为接触面积, mm^2 ; d 为试件表面上压痕对角线的长度, mm。

维氏硬度值表示为: 硬度数值 HV 载荷/载荷保持时间。

维氏硬度试验虽然有测试精度高, 适用于薄小试样和表面镀层试样的硬度测试等优点, 但由于采用测量压痕对角线方法效率较低, 不适于大批量测试的自动化操作。

(4) 努普硬度 (Knoop hardness, HK) 努普硬度试验的测量方法与维氏硬度试验基本相同, 但载荷很小, 以 gf 计算, 有 2gf、5gf、10gf、50gf、100gf、200gf 等几种, 压头是金刚石四棱锥 (要求两长棱夹角为 $172^\circ 30'$, 两短棱夹角为 130°), 其压痕的特征尺寸也很小, 要用读数显微镜测出。其计算式为:

$$HK = \frac{W}{A} = \frac{2W}{d^2 \cot\left(\frac{172.5^\circ}{2}\right) \times \tan\left(\frac{130^\circ}{2}\right)} \quad (1-4)$$

式中, W 为载荷, kgf; A 为压痕的投影面积, mm^2 ; d 为压痕的长对角线长度, mm。

努普硬度值表示为: 硬度数值 (HK) 载荷/载荷保持时间。

(5) 肖氏硬度 (Shore hardness, HS) 测量时, 将具有一定形状和质量并且顶端为金刚石的冲头, 从固定高度自由下落到试样表面, 测量其回跳高度。被测物越硬则冲头回跳越高, 即肖氏硬度越高。肖氏硬度有两种标度, 即标度 C (HSC) 和标度 D (HSD)。其计算式为:

$$HS = K \frac{h_2}{h_1} \quad (1-5)$$

式中, h_1 为冲头自由下落高度, mm; h_2 为冲头回跳高度, mm; K 为常数。

对于标度 C, $K = \frac{10000}{65}$, h_1 为 254mm, 冲头质量 2.6g; 对于标度 D, $K = 140$, h_1 为 19.0mm, 冲头质量 36.2g。

肖氏硬度值表示为 (以 HSC 为例): 硬度数值 HSC。

(6) 宏洛氏硬度 (HMR) 将一定直径的硬质合金球压头, 分别在初试验力 F_0 和主试验力 F_1 作用下压入试样表面, 保持规定的时间后, 卸除主试验力, 测量加、卸主试验力前后, 初试验力作用时压痕深度永久增量 h 。宏洛氏硬度计算式为:

$$HMR = 1000 - \frac{h}{0.001} \quad (1-6)$$

式中, h 为加、卸主试验力前后, 初试验力作用时的压痕深度永久增量, 测量单位为 0.001mm。由式 (1-6) 可以看出, h 越大, 宏洛氏硬度值越小。

用一定直径的硬质合金球压头和试验力组合成宏洛氏硬度试验标尺。表 1-3 列出了宏洛氏硬度试验各标尺对应的压头直径、初试验力、主试验力、总试验力和测量范围。

表 1-3 宏洛氏硬度试验各标尺、压头直径、试验力和测量范围

标尺	压头直径 ϕ/mm	初试验力 F_0/N	主试验力 F_1/kN	总试验力 F/kN	测量范围 HMR
HMR 10/3000	10	1961	27.46	29.42	250~880
HMR 10/1500	10	1961	12.75	14.71	425~940
HMR 10/1000	10	490.3	9.317	9.807	300~900
HMR 10/500	10	490.3	4.413	4.903	690~950
HMR 10/750	5	490.3	6.865	7.355	500~950
HMR 10/250	5	490.3	1.962	2.452	600~940

宏洛氏硬度试验既能反映铸、锻、压铸件试样的宏观硬度，又有利于此类试样的测试自动化，数据直观准确，减少了人为测量误差，从而使用效率大大提高。

目前，宏洛氏硬度试验方法标准已由国际标准化组织 ISO/TC164/SC3 分技术委员会以 ISO 11700: 1-3 编号发布。我国有关部门正着手制定本国的宏洛氏硬度试验方法等标准，计量机构也将建立宏洛氏硬度计量传递溯源标准。宏洛氏硬度试验将会得到普及和广泛应用。

(7) 超微压痕硬度 传统的硬度试验（显微维氏硬度和努氏硬度）采用光学显微镜测量压痕对角线，受到光学系统分辨率的限制而无法精确地测量小于 $10\mu\text{m}$ 的微小压痕。20 世纪 90 年代以来，随着微电子和高精度传感技术的突破性发展，号称“力学探针”的超显微硬度仪诞生了，它使用 $0.1\sim 1000\text{mN}$ 的试验力对材料表面特性进行评价。它采用了四棱锥维氏、努氏或三棱锥压头，既可做传统意义上的显微硬度试验，又可直观地反映试验力施加和卸除过程中压头压入被测材料表面的深度变化，由此获得压入深度和试验力加卸过程的变化曲线，除可得到材料的硬度值外，还可获知材料的弹性模量和塑变、蠕变、断裂等力学性质。

超微压痕硬度试验原理是采用一定形状的压头，将微小试验力逐渐施加至设定值，根据压头压入试样表面的压痕形状或连续测定试验力逐步施加和卸除时压入试验力与压入深度之间的关系来评定试样硬度。

虽然现在已经有了许多先进的测试材料硬度的试验方法，但人们对材料硬度的了解还远远不够，因为硬度不仅仅是一种单一性能，而是许多力学性能的综合指标。可以预计，在不久的将来，适应社会发展之需的微洛氏（micro-Rockwell hardness）、微表面洛氏（micro-supersifical Rockwell hardness）和微布氏（micro-Brinell hardness）以及用于非金属橡胶塑料测试新的硬度试验方法将会诞生。

1.3 超硬材料的结构特征

材料硬度的大小，主要取决于物质内部结构中原子间结合力的强弱。结合力越强，抵抗外力作用的强度就越大，材料的硬度就越高。材料的硬度与材料的化学键性质密切相关，材料中的化学键按其特性可分成三类，即金属键、共价键和离子键材料。一般来说，共价键材料具有最高的硬度；离子键材料具有较好的化学稳定性；金属键材料具有较好的综合性能。金属键一般不很强，故金属键结合成的材料硬度通常不高。共价键则因其键力很强，所以共价键结合成的材料均具有很高的硬度，如金刚石是世界上最硬的材料。离子键的键力较强，因而离子键材料有较高的硬度。

材料的硬度与材料的内部结构特征如离子半径、价键、配位数有关。其规律如下。

① 对于结合力类型相同的材料，其离子半径减小，键力提高，硬度也可提高。

② 离子电价高，键力提高，硬度也可提高。

③ 质点堆积越紧密，密度越大，硬度越高。

④ 阳离子配位数越高，硬度越高。

元素周期表中给出了元素的共价半径，共价半径小，材料硬度高。通过分析可以发现碳是最符合生成超硬材料的元素。

从价键的观点出发，半满键的碳，呈 4 价，它既可“捕获”4 个电子变成稳定态，也可“奉献”4 个电子而呈稳定态。因此，碳通常以共价键结合，具有很高的硬度。

从配位结构考虑，金刚石的配位数具有以下几个特征。

① 金刚石中的碳呈游离态，而且是最稳定的 4 价，因此它不可能产生极化现象。

② 金刚石中的碳原子以共价键结合，而共价键具有典型的饱和性和方向性。

③ 金刚石的配位数是 4，属于等大球堆积。由于碳达到稳定态要么“捕获”4 个电子，要

么“奉献”4个电子，也即“捕获”或“奉献”电子的能力相当。

④ 金刚石的晶体结构如图 1-2 所示。

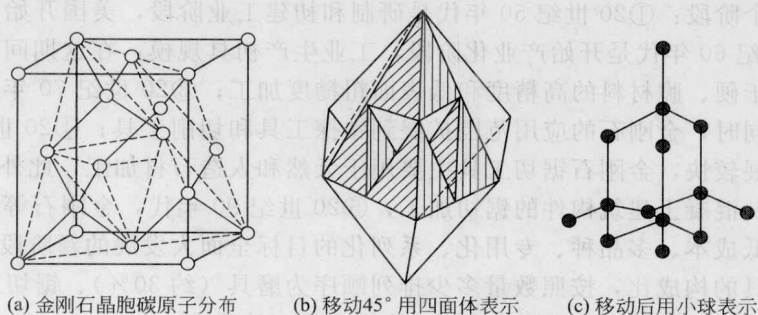


图 1-2 金刚石的晶体结构

由图 1-2 可知，这三个图形是一致的，只是视角不同，每个四面体中心有一个碳原子，它伸出四个键拉住四面体顶角四个碳原子，顶角的碳原子又可组成其他四面体的顶角。每个晶胞有四个四面体，再由晶胞构成晶体。

金刚石是世界上最坚硬的物质，这也证明它是一种特殊形式的紧密堆积，是一种有利的配位结构形式。

1.4 超硬材料的种类

1.4.1 金刚石

金刚石又名钻石，分为天然金刚石和人造金刚石两种，天然金刚石是地球上罕见的一种矿物质。金刚石所具有的卓越的物理、化学特性使其可广泛地应用于开采业、机械加工业、电子业、散热器、光学元件等诸多领域。天然金刚石和人造大单晶虽价格昂贵，却被公认为理想的精密及超精密切削工具材料，可广泛地应用于原子核反应堆及其他高技术领域的各种反射镜、导弹和火箭中的导航陀螺、计算机硬盘基片等的加工。

据报道，早在距今 6000 多年前的新石器时代，中国人就已经在使用天然金刚石加工玉器物。然而，几千年来人类一直停留在天然金刚石的开采和使用阶段。到了公元 18 世纪，人们才得知金刚石是碳的一种结晶形态，与石墨同为碳的同素异构体。随后，曾有许多人进行过各种各样的试验，试图人工制造金刚石。但在理论基础匮乏以及尚无合适的高压设备条件下，试验都不可避免地以失败告终。直到 20 世纪中期，随着合成金刚石理论基础的不断完善，由于高压装置的出现，利用高温、高压技术研制人造金刚石的工作开始展开并取得了重大突破。如在理论方面，Rossini 绘制出 1200℃ 以下石墨-金刚石平衡曲线，使得合成金刚石所需要的压力、温度条件趋于明朗化；在设备方面，1953 年，邦迪 (F. P. Bundy)、霍尔 (H. L. Hall) 等成功设计了年轮式 (Belt) 两面顶超高压装置。在这些工作的基础上，美国物理化学家霍尔于 1954 年利用 Belt 式装置，在石墨中添加陨硫铁，成功制出了第一颗人造金刚石。人造金刚石一经问世，在科学研究和工业生产上便得到迅速发展。1961 年，Decarli、Jamieson 等在 30GPa 压力下首次成功使用爆炸法合成金刚石。1962 年，邦迪在 3000~4000K 温度和 12GPa 压力条件下，实现了无催化剂存在时石墨向金刚石直接转变。1966 年，杜邦 (Dupont) 等成功研究出爆炸合成金刚石的冲击-猝灭法并应用到工业生产中。同年，霍尔研制成功 Mega 型金刚石聚晶。1970 年，温托夫等人工生长直径约 6mm、质量 1 克拉的大颗粒宝石级金刚石获得成功。20 世纪 80 年代以后，人造金刚石薄膜的研究掀起了热潮，金刚石卫星窗口材料制备

和金刚石涂覆技术已获得广泛应用。

目前,仅我国2004年金刚石产量就达到32.9亿克拉。人造金刚石在工业应用领域的发展史可以划分为五个阶段:①20世纪50年代是研制和初建工业阶段,美国开始小规模生产人造金刚石;②20世纪60年代是开始产业化阶段,工业生产初具规模,在这期间,金刚石主要用来制作磨具,用于硬、脆材料的高精度和低表面粗糙度加工;③20世纪70年代,金刚石磨具得到迅速发展,同时,金刚石的应用范围扩展到钻探工具和切削工具;④20世纪80年代,金刚石锯切工具发展较快,金刚石锯切工具主要用于天然和人造石材加工,此外,还用于高速公路、机场跑道以及混凝土建筑构件的锯切加工;⑤20世纪90年代,金刚石等超硬材料工具进入了向高质量、低成本、多品种、专用化、系列化的目标全面大发展的新阶段,在此期间,超硬材料中各类工具的构成比,按照数量多少排列顺序为磨具(约30%)、锯切工具(约30%)、切削刀具(约15%)、钻探工具(约15%)、其他工具(约10%)。

1963年,我国第一颗人造金刚石研制成功,随着金刚石合成理论的发展和合成技术与设备的进步,我国金刚石工业得到了不断的发展。目前,我国金刚石品种涵盖人造金刚石单晶、烧结体、金刚石复合体、金刚石微粉,近年还发展了纳米金刚石和金刚石薄膜[最大 $\phi 110\text{mm} \times (3 \sim 25)\mu\text{m}$]。粉末催化剂合成金刚石单产可达40~120克拉,新型高品级料可达SMD~SMD30。

1.4.2 立方氮化硼

到目前为止,在自然界中还没有发现天然立方氮化硼(CBN)的存在。人们对立方氮化硼的认识以及制备技术的研究晚于金刚石。1957年,R. H. Wentof利用类似于合成金刚石的高温、高压技术,成功地合成了立方氮化硼。立方氮化硼的制备,既可以在高压($>5\text{GPa}$)和高温($>1600^\circ\text{C}$)条件下通过金属溶液催化技术制备出来,也可以在相对较低的温度和压力下通过采用化学气相沉积(CVD)法制备。后来还发展了一些其他技术,如低压辉光放电等离子体法等。CBN的抗氧化性能好,在大气条件下其最高使用温度可达 1400°C 。CBN与金刚石有相近的高硬度和高导热性,相比两者的化学稳定性和热稳定性,CBN则要明显地优于金刚石。由于CBN的独特优良特性,广泛应用于淬硬钢的加工、铸铁的加工、热喷涂焊合金及相关材料的加工等。

1.4.3 其他超硬材料

① 氮化碳化合物(C_3N_4) Cohen认为, $\beta\text{-C}_3\text{N}_4$ 为立方晶系结构,与 $\beta\text{-Si}_3\text{N}_4$ 的结构相似,晶胞中每个 sp^3 杂化的C原子与四个N原子相连,形成畸变的四面体结构,每个 sp^2 杂化的N原子与三个C原子相连,在平面上形成三角形,每个 CN_4 四面体以顶角相连,在空间结合成三维共价键网络结构。这一理论预测引起了人们的广泛关注,纷纷尝试研制这种新型材料。早期曾使用许多方法来探索C-N固体的合成,但均未获得成功。例如,Han等用等离子体分解 CH_4 和 N_2 ,得到的产物是无定形C-N-H化合物。采用高压热解法分解含氮有机物也得到相同的产物。这些结果表明,C-H和N-H产物在上述条件下是热力学稳定相,C-H和N-H产物的形成抑制了 $\beta\text{-C}_3\text{N}_4$ 的形成。He等将碳和含氮化合物在7GPa高压和 1400°C 高温条件下,用镍基合金和钴作为催化剂进行合成,得到了 $\alpha\text{-C}_3\text{N}_4$ 和 $\beta\text{-C}_3\text{N}_4$ 微晶。

C_3N_4 的硬度与金刚石相当,但超高压条件下 $\beta\text{-C}_3\text{N}_4$ 没有金刚石稳定。非晶态 C_3N_4 容易制备,但制备 C_3N_4 晶体极为困难,因而合成晶态 C_3N_4 是目前亟待解决的技术难题。

② 碳化硼(B_4C) 非晶材料 $\alpha\text{-B}_4\text{C}$,硬度达到50GPa以上,需要用高频的等离子体CVD法制备。 B_4C 的最大特点是密度低、高温强度恒定,是最理想的空间材料和高温耐磨材料,但

它的断裂韧性低，加工性能和抗氧化能力差，特别是在 450℃以上温度时将被快速氧化。

③ 碳氮化硼 (B_xC_yN_z) 碳氮化硼 B_xC_yN_z 是碳与氮化硼之间形成的固溶体。尽管 B_xC_yN_z 和金刚石在制备方法、结构、性能等方面有许多相似之处，但有关 B-C-N 三元固溶体的报道较少，尤其是立方碳氮化硼。在 1000℃、氩气气氛下，热解氮苯硼烷可得到类石墨结构的碳氮化硼，其成分为 BC₄N，但在热解条件适当时，有可能得到立方结构的 B_xC_yN_z。Sirota 等将氮化硼和碳化硼混合物在 5GPa 和 1900~2800℃条件下反应，所获得的产物中有碳氮化硼。B-C-N 体系有很好的发展前景，如将硅或其他过渡金属元素加入 B-C-N 体系中，还可以得到一系列超硬材料。

近年来，关于 BCN 的研究越来越多，制备的方法也多种多样。已报道的制备方法主要有高温高压 (HPHT)、机械合金化、化学气相沉积 (CVD) 和物理气相沉积 (PVD) 等方法。制备的产物也不固定，按化学成分的不同分别有 BCN、BC₂N、BC₃N、B₂C₅N、B₂CN 等。

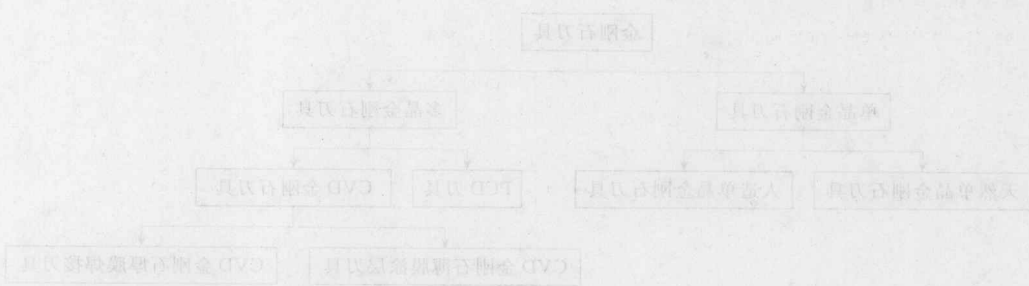
④ 低价硼氧化物 近年来，各种低价 (B/O 原子比大于 1) 硼氧化物用高温高压法合成成功。Badzian 等使不同质量比的 B 和 B₂O₃ 在 1600~2000℃、7GPa 左右的压力下发生固态反应，获得 B/O 原子比为 2.0~2.2 的一系列低价硼氧化物，其中 B₂O、B₆O 的硬度分别为 37GPa 和 38.2GPa，B_{2.2}O 的硬度接近金刚石，约为 60GPa，可用来刻划或磨损金刚石的某些晶面或棱角。

具氏石硼金 1.1.5

具氏石硼金，是一种由硼和氮元素组成的超硬材料。其硬度仅次于金刚石，约为 60GPa。它是由硼和氮元素在高温高压条件下反应生成的。具氏石硼金具有立方晶系结构，其晶格常数与金刚石相似。具氏石硼金的制备方法主要有高温高压法和化学气相沉积法。具氏石硼金在工业上主要用于制造切削工具和耐磨材料。

类金刚石具氏石硼金 1.1.5

类金刚石具氏石硼金，是一种由硼和氮元素组成的超硬材料。其硬度仅次于金刚石，约为 60GPa。它是由硼和氮元素在高温高压条件下反应生成的。类金刚石具氏石硼金具有立方晶系结构，其晶格常数与金刚石相似。类金刚石具氏石硼金的制备方法主要有高温高压法和化学气相沉积法。类金刚石具氏石硼金在工业上主要用于制造切削工具和耐磨材料。



类金刚石具氏石硼金 1.5.5图

点阵结构具氏石硼金 1.5.5

点阵结构具氏石硼金，是一种由硼和氮元素组成的超硬材料。其硬度仅次于金刚石，约为 60GPa。它是由硼和氮元素在高温高压条件下反应生成的。点阵结构具氏石硼金具有立方晶系结构，其晶格常数与金刚石相似。点阵结构具氏石硼金的制备方法主要有高温高压法和化学气相沉积法。点阵结构具氏石硼金在工业上主要用于制造切削工具和耐磨材料。

第2章

超硬材料刀具

2.1 金刚石刀具

金刚石是碳的同素异构体，它是目前世界上已经发现的最硬的一种材料。金刚石刀具具有高硬度、高耐磨性和高导热性能，在有色金属和非金属材料，例如硬质合金、陶瓷、铝和硅铝合金、耐磨塑料等加工中得到广泛的应用。尤其在铝和硅铝合金高速切削加工中，例如轿车发动机缸体、缸盖、变速箱和各种活塞等的加工中，金刚石刀具是难以替代的主要切削刀具品种。近年来，随着数控机床的普遍应用和数控加工技术的迅速发展，可实现高效率、高稳定性、长寿命加工的金刚石刀具的应用日渐普及，金刚石刀具已成为现代数控加工中不可缺少的重要工具。

2.1.1 金刚石刀具的种类

目前，金刚石刀具具有两种，即单晶金刚石刀具和多晶金刚石刀具，如图 2-1 所示。多晶金刚石刀具包括聚晶金刚石（PCD）刀具和化学气相沉积（CVD）金刚石刀具。天然金刚石由于价格昂贵等原因，用得较少。

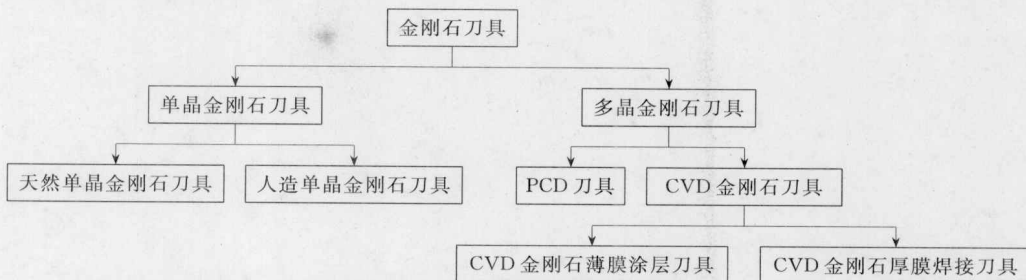


图 2-1 金刚石刀具的种类

2.1.2 金刚石刀具的性能特点

金刚石刀具的性能特点如下。

① 极高的硬度和耐磨性 天然金刚石的显微硬度达 10000HV，是自然界已经发现的最硬的物质。金刚石具有极高的耐磨性，天然金刚石的耐磨性为硬质合金的 80~120 倍，人造金刚