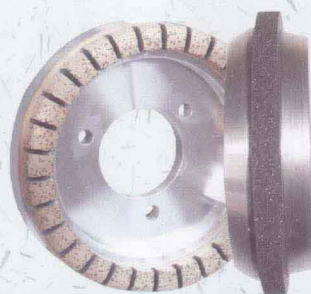


“十一五”国家重点图书

CHAOPYING CAILIAO

超硬材料



制造与应用技术

ZHIZAO YU YINGYONG JISHU

王光祖 主编

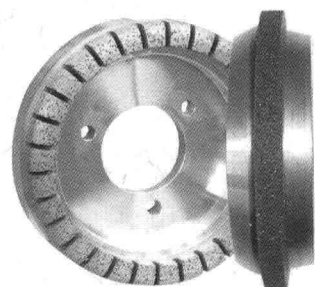


郑州大学出版社

“十一五”国家重点图书

CHAORYING CAILIAO

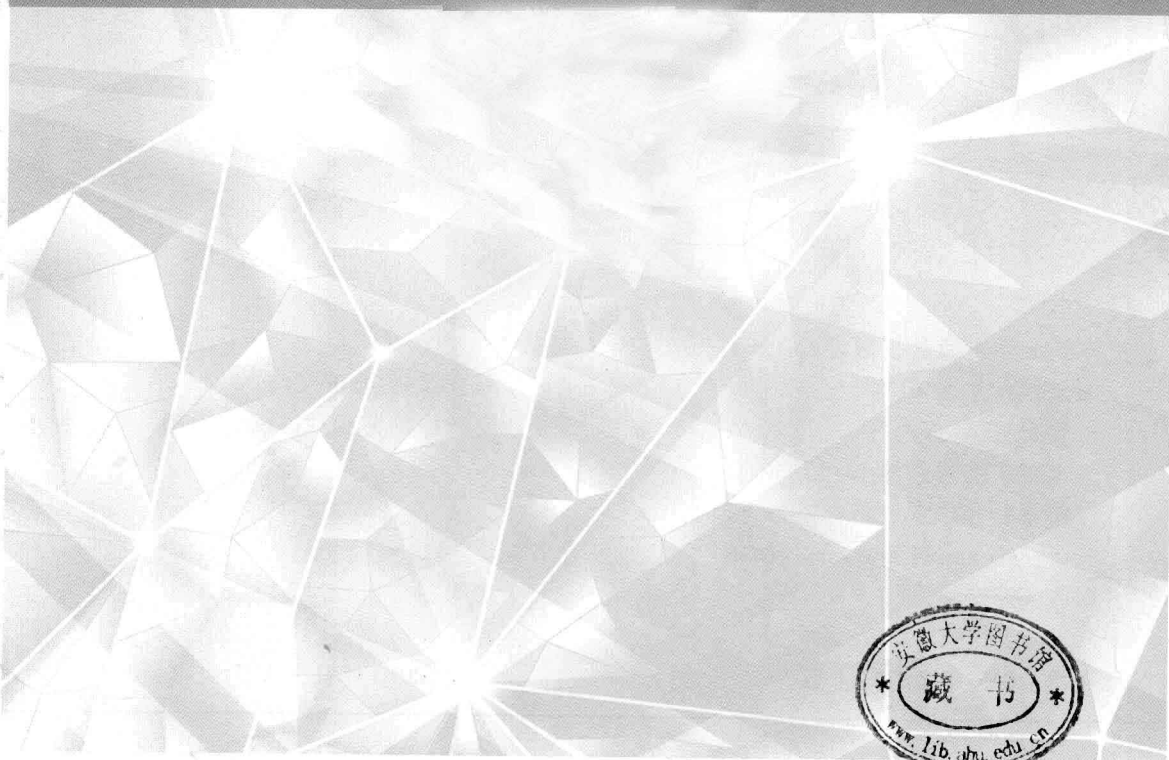
超硬材料



制造与应用技术

ZHIZAO YU YINGYONG JISHU

王光祖 主编



郑州大学出版社  
郑州

图书在版编目(CIP)数据

超硬材料制造与应用技术/王光祖主编. —郑州:  
郑州大学出版社, 2013. 9  
ISBN 978-7-5645-1513-3

I. ①超… II. ①王… III. ①超硬材料-研究  
IV. ①TB39

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2013) 第 154934 号

郑州大学出版社出版发行

郑州市大学路 40 号

出版人:王 锋

全国新华书店经销

河南省瑞光印务股份有限公司印制

开本:890 mm×1 240 mm 1/16

印张:69.75

字数:2270 千字

版次:2013 年 9 月第 1 版

邮政编码:450052

发行部电话:0371-66966070

彩页:4

印次:2013 年 9 月第 1 次印刷

---

书号:ISBN 978-7-5645-1513-3

定价:198.00 元

本书如有印装质量问题,请向本社调换

## 主编简介



王光祖教授,男,汉族,江西鄱阳人,1933年出生。1956年毕业于武汉大学化学系。1957—1959年,在苏联车里雅宾斯克和查波罗什学习电刚玉和碳化硅冶炼及其制粒技术。1960年起在郑州磨料磨具磨削研究所一直从事超硬材料研究及其人才培养工作,著名超硬材料专家,享受国务院政府特殊津贴。

**主要业绩** 王光祖教授是研制人造金刚石“121”课题的主要成员,中国第一颗人造金刚石的创始人之一,第一台铰链式六面顶压机合成工艺的开拓者之一,创造性地解决了其压控的高压密封技术难题,为中国人造金刚石的产业化奠定了技术基石。他是中国第一家金刚石生产厂(第六砂轮厂)工艺设计的主要参与者,是中国首家设置超硬材料课程高校的第一任授课者,是中国单晶大颗粒人造金刚石研制的先驱,六面顶压机合成腔体大型化的倡导者和践行者。1978年获全国科学大会奖、机械工业部科技大会奖和河南省科学大会奖,1988年获机械电子工业部科技进步一等奖,1989年获国家科技进步二等奖。进入21世纪,他又指导组建了河南第一条纳米金刚石生产线,填补了河南静态高压高温法生产金刚石大省没有纳米金刚石生产的空白。

**主要专著** 《超硬材料制造工艺学》《超硬材料》《立方氮化硼合成与应用》《金刚石合成系统工程问与答》《人造金刚石探秘—王光祖论文集》《纳米金刚石》《超硬材料译文集》(共11集,近百万字)《中国超硬材料工业五十年》等。

**主要兼职** 国家超硬材料及制品工程技术中心技术顾问,国家郑州高新技术开发区顾问,中国超硬材料网顾问,荥阳市超硬材料及制品新材料产业发展专家顾问,中南钻石股份有限公司和深圳金刚源科技有限公司高级顾问,杭州高发磨料磨具(集团)公司总工程师,《矿冶工程》《金刚石与磨料磨具工程》《超硬材料工程》等核心期刊编委。

主 编 王光祖

副主编 华 丽 崔仲鸣

编 委 (以姓氏笔画为序)

王光祖 王裕昌 方莉俐 左宏森

华 丽 吴志英 宋 城 张 奎

张相法 罗 俊 崔仲鸣 鲁占灵

## 序

超硬材料(金刚石、立方氮化硼)由于其优异的性能,成为当之无愧的“宝石”,在工业领域得到广泛的应用。随着对超硬材料研究的不断深入,超硬材料的应用价值不断提升,应用领域不断拓展。超硬材料的科学及应用研究与工业化水平成为人类物质文明程度的标志,亦成为国家竞争实力的体现之一。

中国超硬材料行业的发展已走过了50年的历程,从无到有,由小而大,由弱趋强,中国超硬材料产业从超硬材料及制品、原辅材料与专用设备仪器的产业群体到相对完善的产学研创新体系,已发展成为在世界超硬材料产业中具有重大影响的特色产业。中国超硬材料产业已经改变了世界超硬材料产业格局,成为世界超硬材料领域举足轻重的一极。中国超硬材料行业的发展对中国经济的发展起到了重要的促进作用,也为世界经济的发展做出了应有的贡献。在50年发展历程中,行业领域各时期仁人志士付出了汗水、心血和智慧,造就了欣欣向荣的中国超硬材料行业。在这一过程中,对超硬材料及其制品的研究、实践、认识、总结之体会显得弥足珍贵。

王光祖教授是中国超硬材料行业发展的开拓者、探索者和见证者。自20世纪60年代初从事超硬材料研究迄今,他对超硬材料行业的专注、热忱、倾心,以及他对行业的贡献为业内公认。他勤奋笔耕,身体力行,出版了多部专著,对行业的发展起到了积极作用。这部由王光祖教授主编的《超硬材料制造与应用技术》,是对王光祖教授多年研究心得及行业各领域专家研究成果的集大成之作,系统地阐述超硬材料及制品制造与应用技术,知行合一、转知成智。因此,本书的出版,相信会对超硬材料行业的各方面人士起到开卷有益的重要参考作用,进而促进行业企业的发展,加快我国超硬材料行业大而又强的时代到来。

我有幸为本书作序,我也热忱地向行业众多技术人员与管理人员推荐本书,希望本书的启迪与借鉴,进一步提升我们的能力与水平,通过我们的共同努力,实现我们共同的追求与梦想:让中国超硬材料产业成为中国工业领域一颗熠熠生辉的钻石,让中国超硬材料产业率先成为掌握国际话语权的中国工业产业之一。

朱峰

## 前 言

金刚石是极为稀有的一种矿物。大约公元前 3000 年首粒金刚石在印度被发现,在很长的一段时间内,金刚石的结构、组成和性质一直是个谜。直到 18 世纪后期,科学家发现了金刚石和石墨的组成元素是一样的。通过科学探索和工程应用,人们知道金刚石是一种集力、电、光、热、声等众多特性于一体的材料,是其他任何材料不可比拟的。今天人造金刚石的应用已经涉及众多领域,可以毫不夸张地说,没有人造金刚石便没有现代工业。

人工合成金刚石一直是科学家不懈追求的目标,20 世纪 50 年代科学家在超高压高温同时存在的条件下成功地将石墨转变为金刚石。1946 年,美国杰出物理学家 P. W. Bridgman 创建的大质量支承超高压高温装置,为超高压高温技术奠定了基础。1953 年,在美国通用电气公司的 H. T. Hall 设计的年轮式(或称 Belt)两面顶超高压高温装置上,实现了用人工方法制取金刚石,从而拉开了深入研究金刚石的生产工艺技术、生长机制的序幕,开创了工业大规模应用金刚石的新纪元。

立方氮化硼(CBN)是继金刚石后又一人工合成晶体。它首先由美国通用电气公司在 20 世纪 50 年代利用人工方法在高温高压条件下合成,其硬度仅次于金刚石而远远高于其他材料,但热稳定性远高于金刚石,对铁系金属元素有较大的化学稳定性。它与金刚石统称为超硬材料。

超硬材料作为新材料经过近二三十年的工业化应用,已成为最重要的工程材料之一。超硬材料不但在工业的各个重要领域得以应用,还极大地促进了各行业的发展。如金刚石半导体的研制成功,电子业将迎来单晶硅时代后更为辉煌的金金刚石时代;纳米金刚石膜在摩擦磨损、光学涂层、场发射等领域有着广泛的用途,是高速飞行器(如飞弹)的理想视窗,更是追热飞弹、鼻锥罩的不二选材料;超硬磨料磨削是高速磨削、高效磨削和精密超精密磨削等先进磨削技术的基础,依靠 CBN 磨料实现了高速磨削,目前 200 m/s 的高速磨削已在工业生产中得到应用,采用金刚石微粉砂轮的精密超精密磨削达到 0.01  $\mu\text{m}$  精度和 0.0025  $\mu\text{m}$  的表面粗糙度;聚晶立方氮化硼(PCBN)刀具是发展干式切削、硬态加工和高速切削相结合的具有效率高、能耗低、节约资源、减少污染的绿色切削的主要工具。

我国从 1963 年成功合成第一颗人造金刚石至今,超硬材料发展已经历了整整 50 年,在超硬材料制造和应用领域取得了辉煌的成绩,已经成长为世界超硬材料生产大国,并且正向超硬材料强国迈进。超硬材料的制造和应用是一门

综合性的学科,涉及物理学、化学、力学、材料学和机械学等方面的知识。为了使广大科研工作者能够方便学习和了解超硬材料制造与应用中的相关知识,为了总结超硬材料制造与应用学科领域所取得的成果,更好地促进超硬材料制造与应用学科领域的发展,笔者特组织行业相关专家编著了《超硬材料制造与应用技术》一书。这是一部集当今国内外广大科学技术工作者智慧结晶之大成,反映了超硬材料及其应用发展的时代特征与最新、最高水平,内容丰富、翔实,数据准确,信息量大的专业图书。本书可供从事超硬材料及其制品与应用领域的研究人员和工程技术人员作为技术参考书,也可以作为相关专业高校本科生和研究生的学习参考书。

本书分为 18 章,内容包括:金刚石的分类与性能、石墨-金刚石平衡线及其合成机制、静(动)态超高压高温装置、超硬材料合成原辅材料、磨料级金刚石合成与处理技术、立方氮化硼制造技术、聚晶金刚石制造技术、金刚石薄膜沉积制备与应用、宝石级单晶金刚石的培育技术、纳米金刚石的制造、金刚石微粉制造与应用技术、金刚石镀覆技术、预合金粉、金刚石研磨工具、超硬磨料磨具修整技术、金刚石钻具、金刚石锯切工具、超硬材料刀具等。

本书由我国著名超硬材料专家曾工作在郑州磨料磨具磨削研究所的王光祖教授主编,河南工业大学华丽教授、崔仲鸣教授任副主编,参加编写的老师还有:河南工业大学左宏森教授、宋城高工,黄河旋风股份有限公司王裕昌博士,郑州大学鲁占灵博士,中原工学院方莉俐教授,中南杰特超硬材料有限公司张奎总经理和张相法总工程师,卡斯通科技有限公司吴志英总经理,洛阳理工学院材料科学与工程系罗俊。编者的编写分工如下:第 1 章,鲁占灵;第 2 章的 2.1 至 2.3 节及第 7 章,张奎;第 2 章的 2.4 至 2.21 节及第 5 章,左宏森;第 3 章的 3.1 至 3.3 节、第 16 章的 16.4 节、第 17 章的 17.1 至 17.3 节及第 8 章,王光祖;第 3 章的 3.4、3.5 节、第 16 章的 16.1 节及第 4 章,宋城;第 6 章,张相法;第 9 章,王裕昌;第 10 章的 10.1 至 10.4 节、10.6、10.7 及第 12 章,华丽;第 10 章 10.5,罗俊;第 13 章,吴志英;第 17 章 17.4 至 17.6 及第 14 章,方莉俐;第 16 章 16.2、16.3 及第 15 章、第 18 章,崔仲鸣。全书主审由《金刚石与磨料磨具工程》原主编,磨料磨具协会原秘书长卫凤午高级工程师担任。本书在出版中得到了中南钻石股份有限公司、郑州华晶金刚石股份有限公司和河南四方达超硬材料股份有限公司的资助,在此表示衷心的感谢。

限于编者水平,且内容又是发展很快的新技术,不当之处谨祈读者斧正。

王光祖

2012 年 11 月 于郑州



# 目录

1 金刚石的分类与性能	1
1.1 金刚石的分类	1
1.1.1 金刚石的一般分类	1
1.1.2 金刚石的物理性质分类	1
1.1.3 金刚石的晶体形态分类	2
1.1.4 金刚石的应用分类	4
1.1.5 世界超硬材料产品品种一览	7
1.2 金刚石单晶的性质	12
1.2.1 金刚石单晶的结构	12
1.2.2 金刚石的晶体形态	13
1.2.3 金刚石的力学性能	19
1.2.4 金刚石的热学性能	23
1.2.5 金刚石的光学性能	28
1.3 CVD 金刚石薄膜的性质	36
1.3.1 金刚石薄膜的力学性能	36
1.3.2 金刚石薄膜的电学性能	37
1.4 纳米金刚石的性质	38
1.4.1 纳米金刚石的晶体特性	38
1.4.2 纳米金刚石的化学成分	43
1.4.3 纳米金刚石的表面特性	44
1.4.4 纳米金刚石的破碎特性	47
1.4.5 纳米金刚石的热稳定性	50
1.4.6 纳米金刚石的氧化特性	52
1.4.7 纳米金刚石的磁性性质	52
2 石墨-金刚石平衡线及其合成机制	55
2.1 静压下金刚石相变的基本条件	55
2.2 结构直接转变模型下的活化能	60
2.2.1 石墨与金刚石的结构	61
2.2.2 石墨碳原子借助热运动相变为金刚石的两种振型	61
2.2.3 谐振子的振幅和间距	62
2.2.4 活化能模型	63

2.2.5	石墨转变为金刚石的形核活化能 $\bar{U}_g$ .....	64
2.2.6	形成金刚石共价单键的活化能 $U_*$ .....	64
2.2.7	生长活化能 $\bar{U}$ .....	65
2.2.8	残余温度与金刚石的石墨化 .....	65
2.2.9	理论计算结果和实验数据的比较 .....	66
2.3	动高压下金刚石的相变动力学及石墨全部转变成聚晶金刚石的激波条件 .....	69
2.3.1	吉布斯自由能与临界晶核半径 .....	69
2.3.2	激波作用下石墨转变金刚石的动力学过程 .....	72
2.4	石墨-金刚石的平衡曲线 .....	74
2.4.1	热力学数据的计算 .....	74
2.4.2	石墨-金刚石平衡曲线的计算 .....	76
2.5	金刚石晶体的 V 形生长区 .....	80
2.5.1	石墨-金刚石平衡线 .....	80
2.5.2	晶粒的临界半径 .....	83
2.6	人造金刚石晶体生长机制 .....	84
2.6.1	溶剂说 .....	84
2.6.2	溶剂催化剂说 .....	84
2.6.3	固相转化说 .....	87
2.6.4	配位活化催化说 .....	88
2.6.5	金刚石涂层形成机制 .....	88
2.7	人造金刚石晶体生长与压力、温度的关系 .....	92
2.7.1	压力 .....	92
2.7.2	温度 .....	92
2.8	金刚石合成参数引入过程 .....	93
2.9	金刚石成核过程的工艺控制 .....	104
2.9.1	压力、温度与金刚石的成核 .....	104
2.9.2	预处理时间与金刚石的成核 .....	105
2.9.3	碳源特性与金刚石的成核 .....	106
2.9.4	添加物特性与金刚石的成核 .....	107
2.10	片状块、粉末块金刚石合成腔体内温度场分析 .....	108
2.10.1	电学场分析 .....	108
2.10.2	温度场分析 .....	109
2.11	Mn-Ni-C 系合金与金刚石晶体生长关系 .....	110
2.11.1	Mn-Ni-C 系合金的熔点与显微结构特性 .....	110
2.11.2	Mn-Ni-C 系合金中镍含量与金刚石合成生产率和单晶率的关系 .....	111
2.11.3	Mn-Ni-C 系合金中碳原子的质量分数对金刚石合成过程和性质的影响 .....	112
2.12	铁基催化剂合成金刚石单晶的表观活化能计算 .....	114
2.13	Fe、Ni 粉末催化剂配比对合成金刚石质量的影响 .....	117
2.13.1	Fe、Ni 粉末催化剂主要成分 .....	117
2.13.2	所用粉末催化剂合成棒的具体配方 .....	117
2.13.3	不同配比的粉末催化剂合成棒所得金刚石的粒度分布 .....	117
2.13.4	不同配比催化剂合成金刚石的平均抗压强度 .....	118

2.13.5	不同配比催化剂合成金刚石的 TI、TTI 值 .....	118
2.14	铁基金属包覆膜的微观结构分析 .....	119
2.15	添加剂铜对铁基催化剂合成金刚石的影响 .....	120
2.16	碳片厚度及合成时间对铁基催化剂合成金刚石的影响 .....	121
2.17	不同金属催化剂对金刚石中氮含量的影响 .....	124
2.18	导电金刚石的高温高压合成 .....	125
2.18.1	Ni 70Mn 25Co 5合金做催化剂 .....	125
2.18.2	Fe 70Ni 30合金做催化剂 .....	126
2.19	石墨粉中添加 TiN 合成金刚石的颜色与热稳定性 .....	128
2.20	石墨粉中添加含硼化合物合成金刚石的颜色与热稳定性 .....	130
2.21	人造金刚石晶体中的包裹体 .....	131
2.21.1	结晶条件对人造金刚石晶体中包裹体浓度的影响 .....	131
2.21.2	人造金刚石晶体中包裹体的结构形式与组成 .....	132
2.21.3	人造金刚石晶体中包裹体对其强度的影响 .....	133
2.21.4	高温下包裹体对人造金刚石强度的影响 .....	133
2.21.5	人造金刚石中包裹体含量与其磁性间的关系 .....	134
<b>3</b>	<b>静(动)态超高压高温装置 .....</b>	<b>137</b>
3.1	金刚石合成专用压机 .....	137
3.1.1	专用压机类型 .....	137
3.1.2	两面顶机架 .....	145
3.1.3	主油缸的密封结构 .....	147
3.1.4	压机的副机结构 .....	149
3.2	Belt 高压模具设计 .....	150
3.2.1	年轮模具 .....	150
3.2.2	各层环尺寸的确定 .....	150
3.2.3	各层环的应力计算 .....	151
3.2.4	高压模具压装技术要求 .....	156
3.3	铰链式六面顶压机的设计 .....	160
3.3.1	设计思路、原则与模型 .....	160
3.3.2	铰链梁与工作缸的结构形式 .....	161
3.3.3	铰链梁窗口尺寸的计算 .....	164
3.4	压力与温度控制系统 .....	165
3.4.1	概述 .....	165
3.4.2	大腔体压机液压系统设计中应注意的几个问题 .....	165
3.4.3	两面顶压机的液压系统 .....	167
3.5	硬质合金顶锤与压缸 .....	178
3.5.1	等静压工艺制作硬质合金的特性 .....	179
3.5.2	影响硬质合金顶锤使用寿命的因素 .....	188
3.5.3	硬质合金顶锤锥角的选择 .....	190

4	超硬材料合成原辅材料	193
4.1	传压介质	193
4.1.1	合成金刚石对包裹试样的容器材质的要求	193
4.1.2	叶蜡石的性质	194
4.1.3	其他传压介质	202
4.1.4	叶蜡石块的制备	203
4.2	石墨	206
4.2.1	天然石墨和人造石墨	206
4.2.2	石墨的主要性能	211
4.2.3	石墨材料与金刚石晶体生长的关系	221
4.2.4	石墨材料的选择原则	225
4.3	催化剂	226
4.3.1	合成金刚石的催化剂	226
4.3.2	合成 CBN 的催化剂	238
4.4	六方氮化硼	238
4.4.1	几种 HBN 的特性	238
4.4.2	氮化硼选择原则	239
5	磨料级金刚石合成与处理技术	242
5.1	金刚石合成块的组装	242
5.1.1	合成金刚石时石墨和催化剂的组装方式	242
5.1.2	合成高品级金刚石的关键	243
5.1.3	金刚石合成的加热方式	243
5.2	调整不当所造成的试棒变形	244
5.3	合成棒中压力与温度的分布规律	246
5.4	金刚石的双面生长	250
5.5	厚度比的合理选择	251
5.6	合成棒高径比的合理选择	253
5.7	金刚石合成工艺	253
5.7.1	压力与温度对晶形合成的影响	253
5.7.2	几种金刚石的合成工艺	256
5.7.3	SMD 系列金刚石合成工艺	256
5.8	粉末催化剂合成金刚石	258
5.8.1	粉末催化剂合成金刚石的特征	258
5.8.2	粉末催化剂与金刚石品质的关系	261
5.8.3	金刚石合成柱的纯化工艺	264
5.8.4	大型压机应用粉末催化剂合成优质高产金刚石新工艺的研究	266
5.8.5	粉末催化剂合成棒中金刚石在石墨中的裸露现象	266
5.9	粉末催化剂工艺合成金刚石的电解提纯	273
5.10	金刚石的选型	277
5.11	金刚石磁选	279

5.11.1	磁选机的分类	279
5.11.2	三种磁选机的分析比较	280
6	立方氮化硼制造技术	282
6.1	氮化硼的结构和性质	282
6.1.1	六方氮化硼和菱方氮化硼的结构	282
6.1.2	立方氮化硼的性质	285
6.1.3	立方氮化硼的颜色与其内部杂质的关系	291
6.2	立方氮化硼静态高压催化剂合成方法	294
6.2.1	HBN-CBN 平衡曲线	294
6.2.2	镁参与下 CBN 生长的 $p-T$ 平衡曲线	295
6.2.3	氮化物参与下 CBN 生长的 $p-T$ 区	296
6.2.4	$\text{Li}_3\text{BN}_2$ -HBN 体系 $p-T$ 区	297
6.2.5	$\text{B}_2\text{O}_3$ 和 B 与 $\text{Li}_3\text{N}$ 合成 CBN	298
6.3	静态高压催化剂法的影响因素	298
6.3.1	六方氮化硼的影响	298
6.3.2	高压下结晶完整程度不同的氮化硼的多型转变	300
6.3.3	高压和高温对热解氮化硼的影响	300
6.3.4	不同催化剂的影响	305
6.3.5	添加物的影响	310
6.4	冲击压缩法合成氮化硼	321
6.5	立方氮化硼大单晶的培育	327
6.5.1	高压高温下 $\text{BN-Li}_3\text{BN}_2$ 体系中立方氮化硼晶体的生长	327
6.5.2	高压高温下立方氮化硼晶体生长的过饱和效应	328
6.5.3	采用多个生长室培育立方氮化硼大单晶的方法	330
6.5.4	立方氮化硼薄膜制备	331
6.5.5	立方氮化硼系列产品	343
7	聚晶金刚石制造技术	348
7.1	金刚石表面净化处理	348
7.1.1	化学净化法	348
7.1.2	真空加热净化法	348
7.1.3	真空阳离子轰击净化法	348
7.2	烧结型聚晶制造工艺	349
7.2.1	工艺流程	349
7.2.2	原材料选择	349
7.2.3	组装方式	351
7.2.4	烧结温度和压力范围	352
7.2.5	几类聚晶的制造方法	355
7.3	生长-烧结型聚晶制造工艺	357
7.4	金刚石复合片的界面形态、性能特点及残余应力分析	358
7.4.1	金刚石复合片的界面形态、性能特点	358

7.4.2	不同界面结构 PDC 热残余应力分析	363
7.5	PCD 磨耗比与磁性的关系	366
7.6	复合片的 XPS 和 X 射线衍射分析	368
7.7	石油天然气钻采用 PDC 切削齿的最新发展	373
7.7.1	PDC 钻头的使用效果和指标	373
7.7.2	提升 PDC 品质的若干思路	376
7.8	聚晶质量检测	377
7.8.1	相对耐磨性检测	378
7.8.2	热稳定性检测	380
7.8.3	抗冲击性检测	380
7.8.4	PCD 界面结合整体性的超声波检测	381
<b>8</b>	<b>金刚石薄膜沉积制备与应用</b>	<b>382</b>
8.1	金刚石薄膜的沉积方法	382
8.1.1	化学气相沉积法	382
8.1.2	等离子体化学气相沉积法	383
8.1.3	火焰燃烧法	384
8.1.4	物理气相沉积法	384
8.1.5	化学气相输运法	384
8.2	非平衡热力学与形成机制	385
8.2.1	非平衡热力学耦合模型	385
8.2.2	低压激活金刚石膜生长中的反应势垒	391
8.2.3	低压激活气相生长的驱动力	392
8.2.4	超平衡氢原子的特殊作用	393
8.3	过渡层及其附着力	394
8.3.1	钛过渡层与金刚石薄膜附着力	395
8.3.2	复相过渡层与金刚石膜附着力	397
8.3.3	WC 过渡层与金刚石膜附着力	399
8.3.4	Si 与硬质合金涂层附着力	400
8.3.5	渗硼和施铜处理与涂层附着力	401
8.3.6	高钴含量硬质合金的两步法处理	404
8.4	高速大面积沉积金刚石膜装置	405
8.4.1	大面积沉积金刚石膜装置简介	405
8.4.2	快速大面积沉积的直流等离子射流技术	410
8.4.3	添加 H <sub>2</sub> O 对大面积金刚石膜生长的研究	412
8.4.4	两步生长法制备大面积金刚石薄膜	413
8.5	金刚石薄膜生长的主要因素	414
8.5.1	金刚石膜的主要沉积方法	414
8.5.2	工艺参数对金刚石形核的影响	416
8.5.3	金刚石膜生长及其性能与各工艺参数的关系	419
8.5.4	沉积主要参数对金刚石生长过程的影响	423
8.6	金刚石薄膜的特性及其测量与表征	435

8.6.1	金刚石薄膜的形貌分析 .....	435
8.6.2	3D-MCM 散热性能分析 .....	437
8.6.3	CVD 金刚石膜散热仿真分析 .....	440
8.6.4	拉曼散射与荧光光谱分析 .....	442
8.6.5	反应气体与显微力学特性 .....	444
8.6.6	薄膜基界面强度的测量 .....	446
8.6.7	CVD 金刚石膜的力学测量 .....	447
8.6.8	磨损比的测定 .....	448
8.6.9	等离子体刻蚀技术 .....	450
8.6.10	金刚石膜的冲蚀磨损 .....	450
8.7	类金刚石涂层 .....	452
8.7.1	类金刚石涂层的相结构 .....	452
8.7.2	DLC 膜的性能与表征 .....	452
8.7.3	DLC 膜的制造方法和相关工艺 .....	459
8.7.4	DLC 薄膜制备技术及其产物特性 .....	460
8.7.5	类金刚石涂层的生长机制 .....	464
8.7.6	质量检测 and 结构检测 .....	465
8.7.7	DLC 膜的应用领域 .....	467
8.8	CVD 金刚石的特性与应用 .....	472
8.8.1	机械性能应用 .....	472
8.8.2	光学窗口应用 .....	475
8.8.3	高温、高频半导体材料应用 .....	477
8.8.4	声学应用 .....	478
8.8.5	加工碳纤维复合材料 .....	480
8.8.6	在拉拔模具中的应用 .....	480
8.8.7	在煤液化设备——阀座和阀芯中的应用 .....	482
8.8.8	自支撑金刚石膜的冲击磨损 .....	484
8.8.9	CVD 膜的电蚀加工 .....	485
9	宝石级单晶金刚石的培育技术 .....	491
9.1	天然金刚石 .....	491
9.1.1	金刚石名之初与含义 .....	491
9.1.2	天然金刚石的形成与发现 .....	491
9.1.3	宝石美之王 .....	493
9.1.4	世界五大天然金刚石生产国 .....	494
9.1.5	世界著名的宝石级金刚石 .....	495
9.2	静态高温高压法培育的宝石级金刚石 .....	497
9.2.1	薄膜生长法 .....	497
9.2.2	温度梯度法 .....	499
9.3	金刚石大单晶的生长及其规律性 .....	502
9.3.1	碳源扩散不均匀性的影响 .....	502
9.3.2	温度生长速度与晶体品位的关系 .....	504

9.3.3	快速生长的晶体中连晶、包裹体及自发成核现象	506
9.3.4	碳素扩散场对晶体生长的影响	506
9.3.5	宝石级金刚石的多晶种法合成	507
9.3.6	再结晶石墨对单晶生长的影响	508
9.3.7	宝石级金刚石的生长表面特征	510
9.3.8	温度与晶体形貌	511
9.4	CVD 法生长大单晶金刚石及其形貌特征	513
9.4.1	CVD 法生长大单晶金刚石	513
9.4.2	金刚石生长的三维(3D)几何模型	515
9.4.3	影响晶体形貌的主要因素	516
9.4.4	3D 生长模型应用实例	518
9.5	宝石级金刚石的鉴证	519
<b>10</b>	<b>纳米金刚石的制造</b>	<b>522</b>
10.1	纳米金刚石合成的研发历史	522
10.2	纳米金刚石合成的理论研究	523
10.2.1	相变模型	523
10.2.2	尺寸限制机制	523
10.2.3	爆轰过程及碳的状态	524
10.2.4	反应区的认识	524
10.3	纳米结构金刚石的表征	524
10.3.1	化学成分的表征	524
10.3.2	纳米金刚石的 X 射线衍射分析	525
10.3.3	电子显微镜分析技术	529
10.3.4	红外光谱和拉曼光谱	531
10.4	纳米材料的测试技术	532
10.4.1	纳米测量装置的原理与结构	532
10.4.2	纳米材料的粒度分析	538
10.4.3	纳米材料的形貌分析	542
10.4.4	纳米材料的成分分析	543
10.4.5	纳米材料的结构分析	544
10.4.6	纳米材料表面与界面分析	547
10.5	爆轰产物法制备纳米金刚石	551
10.5.1	生产工艺过程及其技术要求	551
10.5.2	爆轰合成效果的一般规律	557
10.5.3	爆轰合成纳米金刚石的理论研究	562
10.6	纳米金刚石的团聚与分散	565
10.6.1	纳米粉体颗粒的形态和团聚机制	565
10.6.2	悬浮液的特征	566
10.6.3	固体颗粒的表面特性及其与液体的作用	568
10.6.4	固体颗粒的表面改性	570
10.6.5	纳米金刚石的分散原理与技术	571



10.6.6	纳米金刚石的解团聚与分散研究	573
10.7	纳米金刚石的应用	590
10.7.1	纳米金刚石在润滑技术中的应用	590
10.7.2	纳米金刚石颗粒对薄膜润滑性能的影响	591
10.7.3	纳米金刚石改性发动机油的应用特性	592
10.7.4	不同添加剂润滑特性对比	594
10.7.5	纳米金刚石在生物医学中的应用	595
11	<b>金刚石微粉制造与应用技术</b>	619
11.1	原料的破碎	619
11.1.1	气流磨粉碎的基本原理	619
11.1.2	球磨粉碎的基本原理	621
11.2	微粉分级前处理	622
11.2.1	酸碱处理	622
11.2.2	超声波处理	622
11.3	金刚石微粉的分选方法简述	623
11.3.1	自然沉降法与离心沉降法	623
11.3.2	水析沉积法	624
11.4	自然沉降法和离心沉降法分级工艺	624
11.4.1	自然沉降法与离心沉降法分级原理	624
11.4.2	沉降分级工艺	626
11.4.3	沉降分级工艺参数	627
11.4.4	沉降分级工艺流程	630
11.5	立方氮化硼微粉的生产方法	632
11.6	微粉的质量检测	632
11.6.1	金刚石微粉和 CBN 微粉的品种和粒度组成	633
11.6.2	金刚石微粉和 CBN 微粉粒度组成的检测方法	636
11.6.3	杂质检验	639
11.7	爆炸法合成金刚石微粉	639
11.7.1	爆炸法使用的装置	640
11.7.2	爆炸法使用的原材料	641
11.7.3	爆炸法工艺流程	641
11.7.4	爆轰法合成纳米金刚石简介	643
11.8	超硬材料微粉的应用	644
11.8.1	用于生产金刚石研磨膏	645
11.8.2	可制造高精磨磨具	645
11.8.3	可提高金属涂层耐磨性和做耐磨材料	645
11.8.4	用作减摩材料	646
11.8.5	用作生长金刚石晶体的“籽晶”材料	646
11.8.6	用作场发射材料	646
11.8.7	在功能材料中的应用	647
11.8.8	其他方面的应用	647