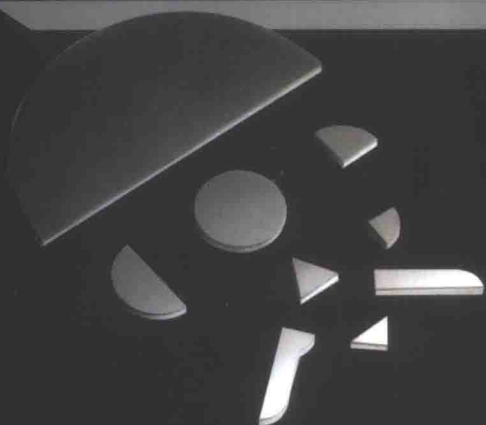




**PDC** • 邓福铭 陈启武 著

# 超硬复合刀具 材料及其应用

Manufacturing, Properties  
and Applications of PDC  
Cutting Tool Material



化学工业出版社  
材料科学与工程出版中心

# **PDC 超硬复合刀具材料及其应用**

## **Manufacturing, Properties and Applications of PDC Cutting Tool Material**

邓福铭 陈启武 著

**化学工业出版社**

材料科学与工程出版中心

• 北 京 •

(京) 新登字 039 号

图书在版编目 (CIP) 数据

PDC超硬复合刀具材料及其应用/邓福铭,陈启武著.  
北京:化学工业出版社,2003.1  
ISBN 7-5025-4061-X

I. P... II. ①邓...②陈... III. 刀具(金属切削)-硬质  
合金-金属复合材料 IV. TG704

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2002) 第 106570 号

---

PDC 超硬复合刀具材料及其应用

Manufacturing, Properties and Applications  
of PDC Cutting Tool Material

邓福铭 陈启武 著

责任编辑:白艳云

责任校对:李 林

封面设计:于 兵

\*

化 学 工 业 出 版 社 出版发行

材料科学与工程出版中心

(北京市朝阳区惠新里 3 号 邮政编码 100029)

发行电话:(010) 64982530

<http://www.cip.com.cn>

\*

新华书店北京发行所经销

北京管庄永胜印刷厂印刷

三河市宇新装订厂装订

开本 850 毫米×1168 毫米 1/32 印张 8 字数 207 千字

2003 年 1 月第 1 版 2003 年 1 月北京第 1 次印刷

ISBN 7-5025-4061-X/TQ·1600

定 价: 30.00 元

---

版权所有 违者必究

该书如有缺页、倒页、脱页者,本社发行部负责退换

# 序 一

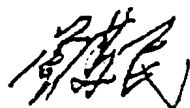
PDC 超硬复合刀具材料是在硬质合金基底上，通过超高压高温烧结一层  $0.3\sim 0.7\text{mm}$  厚的金刚石微粉，使它既具有硬质合金的韧性和强度，又具有金刚石的硬度和耐磨性，而且便于焊接。它采用复合材料的道路，第一次使刀具材料发展中存在的要提高材料的硬度和耐磨性就要降低其强度和韧性这样一个矛盾得到适当的解决，大大提高了 PDC 超硬复合刀具的使用性能。

作为一种高技术新型刀具材料，它的应用一开始就与航空航天、电子、军工等高新技术领域密切相关。铝及铝合金，由于其强度高、轻质、耐腐蚀，在航空航天工业中得到了广泛使用。PDC 超硬复合刀具是加工铝合金，特别是硅铝合金最有效的刀具材料。不仅可用作车刀和镗刀，而且还可作铣刀、铰刀和齿轮刀具等；用在电子工业中印刷电路板作钻头使用，具有直径小，精度高，钻速快的特点；在军事方面，主要是可作为各种军械零件的切削刀具，可以加工上万件而无尺寸变化，确保产品的精度和一致性。除此之外，PDC 超硬复合刀具还可用于其他高技术产品如计算机磁盘基片、金属反光镜、精密陶瓷的精密及超精密切削加工。随着现代工业发展，其应用范围将越来越广泛。

陈启武、邓福铭是我国在科研第一线直接从事国产六面顶超高压合成技术研究的专家，潜心研究 PDC 超硬复合刀具材料近十年，积累了丰富的经验并获得了一些较高水平的研究成果。本书是作者在大量收集、分析和综合了国内外大量文献资料的基础上，结合作者多年从事 PDC 超硬复合刀具材料研究工作，从 PDC 超硬复合刀具材料的超高压合成与加工过程中的关键技术入手对 PDC 超硬复

合刀具材料的制备与加工，PDC 超硬复合刀具的制造、刃磨及其应用进行了全面介绍，是一本学术价值与实用价值都较高的学术专著，因此，本书的出版对从事超硬材料及刀具研究的科研人员以及从事实际超硬刀具应用的工程技术人员都有重要的参考价值。

中国工程院院士



2002 年 11 月 18 日

## 序 二

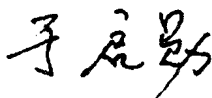
在金属机械加工中，切削加工是最基本而又可靠的精密加工手段，在机械、电机等传统产业和航空、航天、电子、核能等现代高技术产业部门中起到了重要的作用，尽管近年来无切削加工技术，如精密铸造、精密锻造、精密挤压成形等技术发展较快，然而切削加工仍占主导地位，其人力、财力的耗费仍然是很大的。据统计，切削加工的劳动量约占全部机械制造劳动量的 30%~40%，约 70% 的各种零件需用切削刀具来加工。特别是近十几年来非金属材料切削耗费呈上升趋势。用传统刀具材料加工上述非金属材料时，刀具耐用度和切削加工效率往往很低，有时甚至无法加工，必须采用新型刀具材料。对于有色金属及其合金的精密和超精密加工，传统刀具材料也难以胜任。此外，随着现代化制造业愈来愈多地使用自动机床、数控机床，也迫切要求有耐用度更高、加工精度和加工效率更高、性能更稳定的刀具材料。在硬质合金基体上超高压高温烧结一层聚晶金刚石的 PDC (Polycrystalline Diamond Compact) 超硬复合刀具材料正是适合上述切削刀具性能要求的理想刀具材料之一。

20 世纪 70 年代初，美国 GE 公司成功研制 PDC 超硬复合刀具材料 Compax 以来，由于其优异的刀具切削性能，它已广泛应用于高速下对有色金属及其合金；预烧结硬质合金毛坯；耐磨的非金属材料如陶瓷、石材、玻璃、碳质和石墨， $Al_2O_3$  木基复合地板及各种纤维或颗粒增强复合材料的精密切削加工。这种新型刀具材料的使用，不仅大大提高了其刀具的耐用度、切削加工的效率 and 加工精度，明显改善加工件的表面质量，而且还解决了许多其他难加工材

料的加工问题，大大扩充了切削加工的使用范围。

PDC 超硬复合刀具尽管已经历了近三十年的发展，其应用市场已开始进入成熟期，但在 PDC 超硬复合刀具材料制备的理论与工艺，PDC 刀具的磨损规律与机理，PDC 刀具应用扩展诸方面的研究还很不完善，不系统，还有待于更多、更深、更广的研究。邓福铭、陈启武在多年研究成果基础上撰写了《PDC 超硬复合刀具材料及其应用》一书，首次对上述有关问题进行了全面的论述与介绍，这无疑是一件非常有意义的工作。我相信本书不仅对从事刀具材料及刀具的研究与开发的研究人员以及刀具制造厂和使用厂家的工程技术人员都是一本有较高学术价值和实用价值的参考书，而且它对于提高我国超硬材料，机械行业的加工技术水平也有一定的促进作用。

中国高校切削与先进制造技术研究会副理事长  
北京理工大学教授

A handwritten signature in black ink, appearing to read '邓福铭' (Deng Fuming), written in a cursive style.

2002 年 11 月 18 日

## 前 言

PDC (Polycrystalline Diamond Compact) 超硬复合刀具材料, 由于其在实践中的实用价值促使其迅速发展。美国 GE 公司和英国 DeBeers 公司在该项技术上一直处于领先水平, 其产品在国际市场上占垄断地位。尽管国内外有关 PDC 材料的文献很多, 但大多数文献涉及的是其性能与应用, 涉及其制造核心技术的文献不多且大部分是有关 PDC 钻头用复合体的制造技术。作为刀具材料用的 PDC, 由于其刀具性能要求不同决定了其制造方法和工艺的特殊性。而恰恰在这一方面文献资料很少, 这或许是基于商业上的考虑造成的。本书就有关上述问题, 结合自己多年有关科研工作的认识试图进行全面论述, 旨在抛砖引玉, 以期引起国内同行专家的共同探讨, 促进我国 PDC 超硬复合刀具材料的应用与发展。

本书在收集、分析、综合国内外大量的有关文献资料的基础上, 结合作者多年从事超硬材料研究工作成果, 从 PDC 超硬复合材料的复合途径, 超高压烧结的关键技术入手, 对 PDC 超硬复合刀具材料的高压烧结规律与机理; D-D 结合型金刚石聚晶界面结构及其生长模式; 聚晶金刚石异常晶粒生长与抑制; PDC 材料的超高压液相烧结过程及其机理; 以及大直径 PDC 超硬复合刀具材料的均匀烧结与聚晶金刚石的物理力学性能等问题进行了全面的论述。对 PDC 超硬复合刀具材料的研磨抛光工艺; PDC 刀具的制造技术; PDC 刀具的磨损规律及机理; 以及 PDC 刀具在工业中的应用作了较详尽的介绍。我们相信作为一种较理想的新型刀具材料, 随着研究工作和应用开拓的不断深入, PDC 超硬复合刀具材料必将对机械加工业产生重要的影响。



本书的大多数内容直接取材于作者在国内期刊上发表的学术论文, 这些研究工作曾得到冶金工业部地勘局“九·五”重点课题、湖南省自然科学基金项目以及国防科工委预研基金项目等基金的支持, 也曾得到长沙矿冶研究院和中南工业大学的许多专家学者的大力协助与支持。同时本书中的部分研究成果直接产生于与河南新郑超硬材料有限公司和深圳市长城金刚石刀具厂进行的有关方面产业化的合作开发, 在此作者向他们以及一切支持这项工作的人们致以真诚地感谢!

本书中还引用了一些国内外学者和科技工作者的论文或成果, 在此我们也表示衷心地感谢!

中国工程院院士、著名金属压力加工专家曾苏民院士和中国高校切削与先进制造技术研究会副理事长、北京理工大学于启勋教授给予了我们热情支持和鼓励, 并在百忙之中抽空为本书作了序, 在此我们表示衷心地感谢!

由于 PDC 材料的制备过程涉及超硬材料、粉末冶金、超高压技术、电火花放电特种加工技术等学科领域, 其理论体系和应用都有待于进一步完善, 同时还由于作者专业知识和水平有限, 因此, 本书在取材和论述方面必然存在不少错误, 敬请广大读者提出批评指正。

邓福铭

陈启武

2002 年 11 月 18 日

于中国矿业大学(北京校区)

## 作者简介

**邓福铭** 1963年10月生，湖南省桂阳县人，博士，中国矿业大学（北京校区）材料科学与工程系副教授。多年从事超硬刀具材料、纳米材料及其复合材料的研究。曾主持国家和省（部）级项目2项，参加国家和省部级项目11项，其中2项获省（部）级科技进步二等奖。已在国内外重要学术刊物上发表论文近30篇，其中SCI收录6篇，EI检索4篇，2篇分别获省、市级优秀自然科学论文三、一等奖。

**陈启武** 1936年11月生，湖北省武汉市人，教授，博士生导师。1962年毕业于清华大学数学力学系。曾任原冶金部长沙矿冶研究院副院长，现任湖南省特种材料研究所所长，国家科委冶金新材料专家组特邀专家，全国超硬材料协会副理事长、专家技术委员会主任，湖南省超硬材料协会理事长，中国有色金属学会理事，中国金属学会湖南省委员会主任，中南大学、中国矿业大学北京校区兼职教授。曾主持国家和省（部）级项目10多项，获国家和省（部）级科技进步奖共12项。

## 内 容 提 要

本书从 PDC 超硬复合刀具材料的复合途径,超高压烧结的关键技术入手,对 PDC 超硬复合刀具材料的高压烧结规律与机理;D-D 结合型聚晶金刚石的界面结构及其生长模式;聚晶金刚石异常晶粒生长与抑制,PDC 材料的超高压液相烧结过程及其机理,以及大直径 PDC 超硬复合刀具材料的均匀烧结与聚晶金刚石的物理力学性能等问题进行了全面的论述。对 PDC 超硬复合刀具材料的研磨抛光工艺,PDC 刀具的制造技术,PDC 刀具的磨损规律及机理,以及 PDC 刀具在工业中的应用作了较详尽的介绍。

本书内容涉及超硬材料、超高压技术、粉末冶金、电火花放电特种加工以及机械切削加工等学科领域,可供相关领域的研究人员和工程技术人员阅读参考,也可作为高等院校相关专业研究生从事超硬刀具研究的教学参考书。

# 目 录

|                                                 |    |
|-------------------------------------------------|----|
| 第一章 绪论 .....                                    | 1  |
| 1.1 刀具材料的发展简史 .....                             | 1  |
| 1.2 超硬刀具材料研究进展 .....                            | 4  |
| 1.3 超硬刀具材料的发展特点 .....                           | 12 |
| 1.4 超硬刀具材料的主要品种、性能特点及其适用范围 .....                | 13 |
| 1.4.1 天然和人工合成大单晶金刚石 .....                       | 13 |
| 1.4.2 聚晶金刚石 (PCD) 和聚晶金刚石复合刀片 (PDC) .....        | 14 |
| 1.4.3 CVD 金刚石 .....                             | 15 |
| 1.4.4 聚晶立方氮化硼 (PCBN) .....                      | 16 |
| 1.4.5 CVD 立方氮化硼涂层 .....                         | 17 |
| 1.5 对超硬刀具材料的综合评价 .....                          | 18 |
| 参考文献 .....                                      | 22 |
| 第二章 PDC 刀具材料的复合途径、关键技术与制造方法 .....               | 23 |
| 2.1 PDC 材料的复合途径及问题 .....                        | 23 |
| 2.2 PDC 材料烧结中的关键技术 .....                        | 25 |
| 2.2.1 粘结金属 Co 的均匀扩散渗透 .....                     | 25 |
| 2.2.2 特殊界面结构问题 .....                            | 27 |
| 2.2.3 抑制异常晶粒成长问题 .....                          | 29 |
| 2.3 PDC 刀具材料的制造方法及分类 .....                      | 29 |
| 2.3.1 金刚石固相烧结法 .....                            | 32 |
| 2.3.2 钴扩散浸渍烧结法 .....                            | 35 |
| 2.3.3 加少量结合剂的混合烧结法 .....                        | 38 |
| 2.4 国产六面顶超高压设备合成大直径 PDC 材料的发展前景、<br>问题及对策 ..... | 39 |
| 参考文献 .....                                      | 42 |

|                                                            |     |
|------------------------------------------------------------|-----|
| <b>第三章 钴扩散浸渍法金刚石超高压烧结过程及其规律</b>                            | 45  |
| 3.1 金刚石粉末超高压挤压破碎规律                                         | 45  |
| 3.2 超高压高温烧结中金刚石表面石墨化                                       | 51  |
| 3.2.1 金刚石表面石墨化的表征                                          | 51  |
| 3.2.2 超高压高温烧结中金刚石表面石墨化过程                                   | 54  |
| 3.3 金属钴在金刚石层中的扩散浸渍过程                                       | 60  |
| 3.3.1 钴扩散浸渍过程的实验观察分析                                       | 60  |
| 3.3.2 金属钴在金刚石层中的扩散熔迁推移机制                                   | 64  |
| 3.4 钴扩散浸渍法金刚石超高压烧结过程                                       | 71  |
| 3.4.1 金刚石超高压液相烧结过程的 X 射线实验研究                               | 71  |
| 3.4.2 金刚石超高压液相烧结过程                                         | 75  |
| 参考文献                                                       | 77  |
| <b>第四章 超高压烧结中聚晶金刚石晶粒异常生长及其抑制机制</b>                         | 79  |
| 4.1 金刚石晶粒异常生长现象观察                                          | 79  |
| 4.2 聚晶金刚石晶粒异常生长抑制机制                                        | 83  |
| 参考文献                                                       | 87  |
| <b>第五章 D-D 结合型金刚石聚晶晶界结构及其生长模式</b>                          | 88  |
| 5.1 PCD 层 D-D 结合界面特征 SEM 观察分析                              | 88  |
| 5.2 D-D 结合型聚晶晶界生长模式                                        | 94  |
| 5.2.1 再结晶金刚石搭接生长模式                                         | 94  |
| 5.2.2 原始金刚石接触面外延生长模式                                       | 95  |
| 参考文献                                                       | 95  |
| <b>第六章 <math>\phi 25\text{mm}</math>PDC 超硬复合刀具材料的超高压烧结</b> | 97  |
| 6.1 大腔体烧结 PDC 材料的问题与对策                                     | 97  |
| 6.2 高压烧结实验程序和测试方法                                          | 101 |
| 6.3 $\phi 25\text{mm}$ PDC 复合刀具材料的组成、结构和性能                 | 102 |
| 参考文献                                                       | 107 |
| <b>第七章 PDC 材料超高压液相烧结机理</b>                                 | 109 |
| 7.1 对前人有关聚晶金刚石超高压烧结机理的分析与评价                                | 109 |
| 7.2 钴熔体对金刚石(石墨)的浸润性及其相互作用规律                                | 113 |

|                                     |            |
|-------------------------------------|------------|
| 7.3 石墨、金刚石在钴熔体中的熔解过程及其作用方式 .....    | 116        |
| 7.4 碳原子及其原子团在钴熔体中的相互作用与扩散 .....     | 118        |
| 7.5 金刚石再结晶成核与聚晶生长热力学条件 .....        | 119        |
| 7.6 金刚石超高压烧结过程动力学特征 .....           | 122        |
| 7.7 聚晶金刚石超高压液相烧结机理 .....            | 124        |
| 参考文献 .....                          | 128        |
| <b>第八章 聚晶金刚石的物理力学性能 .....</b>       | <b>130</b> |
| 8.1 聚晶金刚石的力学性能 .....                | 130        |
| 8.1.1 抗弯强度 (TRS) .....              | 133        |
| 8.1.2 沿直径方向的压缩试验 (抗张强度) .....       | 138        |
| 8.1.3 压缩强度 .....                    | 140        |
| 8.1.4 断裂韧性 .....                    | 140        |
| 8.1.5 冲击强度 .....                    | 143        |
| 8.1.6 弹性模量 .....                    | 143        |
| 8.1.7 硬度 .....                      | 145        |
| 8.2 PDC 材料的耐磨性 .....                | 146        |
| 8.3 PDC 材料的耐热性 .....                | 148        |
| 8.4 PDC 材料的导热性 .....                | 153        |
| 参考文献 .....                          | 157        |
| <b>第九章 PDC 刀具材料的磨削与研磨加工技术 .....</b> | <b>159</b> |
| 9.1 金刚石砂轮磨削加工工艺 .....               | 159        |
| 9.1.1 聚晶金刚石的磨削加工机理 .....            | 159        |
| 9.1.2 聚晶金刚石的磨削规律 .....              | 160        |
| 9.2 电火花磨削加工工艺 (EDM) .....           | 163        |
| 9.2.1 基本原理及加工规范的选择 .....            | 163        |
| 9.2.2 影响因素 .....                    | 164        |
| 9.3 聚晶金刚石的研磨抛光工艺 .....              | 166        |
| 9.3.1 树脂结合剂金刚石砂轮研磨抛光工艺 .....        | 166        |
| 9.3.2 用高速钢盘研磨加工聚晶金刚石 .....          | 171        |
| 参考文献 .....                          | 176        |

|                           |     |
|---------------------------|-----|
| <b>第十章 PDC 刀具制造技术</b>     | 177 |
| 10.1 PDC 刀具的制造过程          | 177 |
| 10.2 PDC 刀具的设计            | 180 |
| 10.2.1 PDC 刀具材料的选择        | 180 |
| 10.2.2 PDC 刀具的结构及几何参数设计   | 181 |
| 10.3 专用金刚石砂轮刃磨工艺及其特点      | 183 |
| 10.3.1 刃磨设备               | 183 |
| 10.3.2 PDC 刀具刃磨用专用金刚石砂轮   | 184 |
| 10.3.3 冷却液                | 186 |
| 10.3.4 砂轮的修整              | 186 |
| 10.3.5 PDC 刀具的刃磨工艺参数与要求   | 186 |
| 10.3.6 刃磨质量检查             | 187 |
| 10.4 电火花刃磨加工技术 (EDG)      | 188 |
| 10.5 PDC 复合刀具的使用          | 191 |
| 参考文献                      | 192 |
| <b>第十一章 PDC 超硬复合刀具的应用</b> | 193 |
| 11.1 概况                   | 193 |
| 11.2 加工非铁金属时 PDC 刀具的切削性能  | 195 |
| 11.2.1 加工铝合金              | 195 |
| 11.2.2 加工铜合金              | 209 |
| 11.2.3 加工硬质合金             | 211 |
| 11.2.4 加工其他有色金属及合金        | 212 |
| 11.3 加工非金属时 PDC 刀具的切削性能   | 213 |
| 11.3.1 加工木材及木基复合材料        | 213 |
| 11.3.2 加工玻璃钢及耐磨填充塑料       | 215 |
| 11.3.3 加工工程陶瓷             | 217 |
| 11.3.4 加工碳质材料             | 221 |
| 11.4 用 PDC 刀具进行超精密切削      | 221 |
| 11.4.1 PDC 刀具超精密切削的原理     | 222 |
| 11.4.2 PDC 刀具超精密切削试验      | 225 |

|                                     |            |
|-------------------------------------|------------|
| 参考文献 .....                          | 228        |
| <b>第十二章 PDC 超硬复合刀具磨损机理与规律 .....</b> | <b>229</b> |
| 12.1 PDC 刀具的磨损形态 .....              | 229        |
| 12.2 PDC 刀具磨损机理 .....               | 232        |
| 12.3 PDC 刀具磨损规律 .....               | 234        |
| 12.4 结束语 .....                      | 236        |
| 参考文献 .....                          | 237        |



# 第一章 绪 论

## 1.1 刀具材料的发展简史

从人类使用工具开始，便开始了人类发展的历史。最初人们懂得将存在于身边的东西折断或弯曲，这已经是“变形加工”的雏形。不久，又有了物质的软硬的“概念”，知道用硬的东西可以切削软的东西。在远古时代所谓的“切削”，开始是“去除加工”。那时，硬的东西首先是石头，把石头弄碎、磨光作为工具。后来随着铁的发现，制作出比石头更锋利的刃具。良好的切削刃具，使人们能更容易地制造出生产工具和生活用具。可以说工具的发展是人类文明进步的永恒动力。

现代的切削刀具材料经历了从碳素工具钢到高速工具钢、硬质合金、陶瓷刀具和超硬刀具材料的一百多年的发展历史。18 世纪后半叶，最初的刀具材料主要是碳素工具钢。因为在当时它是作为可以加工成切削刀具的最硬的材料。然而，由于其耐热温度很低（低于  $200^{\circ}\text{C}$ ），碳素工具钢在高速切削时，存在由于切削热而立刻完全变钝的缺点，切削范围受到限制。因此期待着出现在高速下也能切削的刀具材料。反映这一期待而出现的材料是高速钢。

高速钢也称锋钢，是在 1898 年由美国的 F.W. 泰勒 (F.W. Taylor) 和 M. 怀特 (M. White) 研制的。与其说它的含碳量比碳素工具钢少，不如说加入了钨。由于其中硬质碳化钨的作用，使之在高温条件下硬度也不降低，而且由于可以用远比碳素工具钢切削速度（切钢  $6\sim 10\text{m/min}$ ，切铸铁  $3\sim 5\text{m/min}$ ）高的速度进行切削，故命名为高速钢。最初的高速钢含钨 8%、铬 3.6%，