


GAOXINGNENG DAOJU JI
TUCENG DAOJU CAILIAO DE QIEXIAO XINGNENG

高性能刀具及 涂层刀具材料的切削性能

■ 赵时璐 著

 冶金工业出版社
Metallurgical Industry Press

高性能刀具及 涂层刀具材料的切削性能

赵时璐 著

聚隆(CIP)自磨超硬车削

京

材料
五金市
ISBN
D. I.
轴研
中国

地址 北京市东城区... 电话 (010) 64023252
网址 www.cip.com.cn 电子邮箱 vip@cip.com.cn

聚隆(CIP)自磨超硬车削

北京
冶金工业出版社
2015

内 容 提 要

本书介绍了高速钢切削刀具、硬质合金切削刀具、陶瓷切削刀具、金刚石切削刀具及立方氮化硼切削刀具的切削性能,同时介绍了各系列涂层刀具,包括单一涂层刀具、多元复合涂层刀具及多元多层复合涂层刀具的切削性能以及不同刀具涂层的制备技术。全书共分13章:第1章介绍了各种高性能切削刀具的特点及综合性能;第2~6章分析了高速钢切削刀具、硬质合金切削刀具、陶瓷切削刀具、金刚石切削刀具及立方氮化硼切削刀具的切削性能;第7~8章介绍了涂层刀具的特性、研究进展及应用;第9~12章分析了单一涂层刀具、多元复合涂层刀具及多元多层复合涂层刀具的切削性能及刀具涂层的各种制备技术;第13章探讨了我国涂层刀具存在的问题及解决对策。

本书可供从事切削加工技术及刀具材料生产的科技工作者阅读,也可供高等院校材料类、机械类、表面工程类专业的本科生和研究生参考。

图书在版编目(CIP)数据

高性能刀具及涂层刀具材料的切削性能/赵时璐著. —北京:
冶金工业出版社, 2015. 5

ISBN 978-7-5024-6891-0

I. ①高… II. ①赵… III. ①刀具(金属切削) — 切削性能 ②涂层刀具 — 切削性能 IV. ①TG71

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2015) 第 074579 号

出版人 谭学余

地 址 北京市东城区嵩祝院北巷39号 邮编 100009 电话 (010)64027926

网 址 www.cnmp.com.cn 电子信箱 yjcb@cnmp.com.cn

责任编辑 杨盈园 美术编辑 杨帆 版式设计 孙跃红

责任校对 禹蕊 责任印制 李玉山

ISBN 978-7-5024-6891-0

冶金工业出版社出版发行;各地新华书店经销;中煤涿州制图印刷厂北京分厂印刷
2015年5月第1版,2015年5月第1次印刷

169mm×239mm; 15.5印张; 300千字; 235页

48.00元

冶金工业出版社 投稿电话 (010)64027932 投稿信箱 tougao@cnmp.com.cn

冶金工业出版社营销中心 电话 (010)64044283 传真 (010)64027893

冶金书店 地址 北京市东四西大街46号(100010) 电话 (010)65289081(兼传真)

冶金工业出版社天猫旗舰店 yjgycbs.tmall.com

(本书如有印装质量问题,本社营销中心负责退换)

前 言

在机械加工中，切削加工是最基本而又可靠的精密加工手段，而目前机械制造业的竞争，实质是精密切削技术的竞争。随着高强度整体铸造床身、高速运算数控系统及主轴动平衡等新技术的应用，以及各种刀具材料的不断发展，现代切削技术正朝着高速、高精度和强力切削方向发展。刀具材料、刀具结构及刀具几何形状是决定刀具切削性能的三要素，其中刀具材料的性能起着关键性的作用，而刀具材料的切削性能直接影响到我国制造业的生产效率和经济效益。

本书研究了各类高性能切削刀具及涂层刀具的切削性能，以及不同刀具在切削加工中的应用现状，具体介绍了高速钢切削刀具、硬质合金切削刀具、陶瓷切削刀具、金刚石切削刀具及立方氮化硼切削刀具的切削性能，以及单一涂层刀具、多元复合涂层刀具、多元多层复合涂层刀具的切削性能和刀具涂层的各种制备技术，同时分析了我国切削刀具存在的问题与对策。高性能及其涂层刀具可有效地延长刀具的使用寿命，使刀具获得良好的综合机械性能，从而大幅度提高其机械加工效率。

本书的出版得到了沈阳大学硕士生导师张钧教授的支持和鼓励，张钧教授在百忙之中审阅了书稿，提出了宝贵的意见，在此表示衷心的感谢。

本书的完成得益于沈阳大学先进材料制备技术辽宁省重点实验室，

沈阳大学表面改性技术与材料研究所的老师和研究生的有益讨论和大力支持。国内外相关文献的应用，也丰富了本书的内容，在此向文献的作者致以深切的谢意。同时，更要感谢沈阳市科技计划项目（F14-231-1-19）和辽宁省自然科学基金项目（2014020096）对本书的资助。

由于作者水平有限，本书若有不妥之处，敬请读者批评指正。

作者

2015年1月

目 录	
1 高性能切削刀具概述	1
1.1 高速钢切削刀具	1
1.1.1 通用型高速钢切削刀具	1
1.1.2 高性能高速钢切削刀具	1
1.2 硬质合金切削刀具	3
1.2.1 通用型硬质合金切削刀具	3
1.2.2 添加钽、铌的硬质合金切削刀具	3
1.2.3 添加稀土元素的硬质合金切削刀具	4
1.3 陶瓷切削刀具	4
1.3.1 氧化铝系陶瓷切削刀具	5
1.3.2 氮化硅系陶瓷切削刀具	5
1.3.3 复合氮化硅—氧化铝系陶瓷切削刀具	5
1.4 金刚石切削刀具	7
1.5 立方氮化硼切削刀具	7
1.6 人造切削刀具的制造方法	8
1.6.1 热压法	8
1.6.2 化学气相沉积法	9
2 高速钢切削刀具切削性能	11
2.1 通用型高速钢切削刀具	11
2.2 高碳高速钢切削刀具	11
2.3 高钴高速钢切削刀具	12
2.4 高钒高速钢切削刀具	12
2.5 含铝高速钢切削刀具	12
2.6 高速钢切削刀具切削试验	13
2.7 高速钢切削刀具的选用	13
2.7.1 高速钢刀具材料的选用原则	13
2.7.2 高速钢刀具切削不同材料的工艺参数	16

3	硬质合金切削刀具切削性能	24
3.1	通用型硬质合金切削刀具	24
3.2	添加钽、铌的硬质合金切削刀具	24
3.2.1	添加钽、铌的硬质合金切削刀具概述	24
3.2.2	添加钽、铌的硬质合金切削刀具切削试验	27
3.3	添加稀土元素的硬质合金切削刀具	28
3.3.1	添加稀土元素的硬质合金刀具切削原理	28
3.3.2	添加稀土元素的硬质合金刀具切削试验	29
3.4	硬质合金切削刀具的选用	32
4	陶瓷切削刀具切削性能	35
4.1	陶瓷切削刀具切削性能	35
4.1.1	陶瓷切削刀具切削范围	35
4.1.2	陶瓷切削刀具切削性能	35
4.2	陶瓷切削刀具切削试验	36
4.3	陶瓷切削刀具的选用	38
5	金刚石切削刀具切削性能	48
5.1	金刚石切削刀具切削性能	48
5.1.1	金刚石切削刀具切削范围	48
5.1.2	金刚石切削刀具切削性能	48
5.2	金刚石切削刀具切削试验	50
5.2.1	切削纯钨、纯钨	50
5.2.2	切削硬质合金	51
5.2.3	切削复合材料	52
5.2.4	断续切削	53
5.2.5	施用切削液切削	53
5.2.6	超精密切削	54
5.3	金刚石切削刀具的选用	55
6	立方氮化硼切削刀具切削性能	61
6.1	立方氮化硼切削刀具切削性能	61
6.1.1	立方氮化硼切削刀具切削范围	61
6.1.2	立方氮化硼切削刀具切削性能	61

6.2	立方氮化硼切削刀具切削试验	62
6.2.1	切削淬硬钢	62
6.2.2	车削冷硬铸铁	63
6.2.3	切削硬质合金	63
6.2.4	切削工程陶瓷	64
6.2.5	切削工业玻璃	64
6.2.6	切削复合材料	65
6.2.7	施用切削液切削	66
6.3	立方氮化硼切削刀具的选用	67
7	涂层刀具概述	73
7.1	涂层刀具的问世及意义	73
7.2	涂层刀具的特性	73
7.2.1	涂层刀具的优点	73
7.2.2	涂层刀具的缺点	74
7.3	涂层刀具的应用	74
7.4	涂层刀具应用的影响因素	76
7.4.1	工件材料的影响	76
7.4.2	刀具基体材料的影响	77
7.4.3	刀具涂层材料的影响	78
7.4.4	切削速度的影响	79
7.4.5	机床刚度的影响	80
7.4.6	其他参数的影响	80
8	涂层材料研究进展	81
8.1	涂层材料概述	81
8.1.1	涂层材料特点	81
8.1.2	涂层材料分类	81
8.2	涂层材料研究进展	84
8.2.1	单一涂层材料	85
8.2.2	多元复合涂层材料	86
8.2.3	多元多层复合涂层材料	89
9	单一涂层刀具切削性能	90
9.1	TiC 系涂层刀具	90

9.1.1	TiC 系涂层刀具切削性能	90
9.1.2	TiC 系涂层刀具切削试验	91
9.1.3	TiC 系涂层刀具的选用	99
9.2	TiN 系涂层刀具	100
9.2.1	TiN 系涂层刀具切削性能	100
9.2.2	TiN 系涂层刀具切削试验	101
9.2.3	TiN 系涂层刀具的选用	106
9.3	Al ₂ O ₃ 系涂层刀具	107
9.3.1	Al ₂ O ₃ 系涂层刀具切削性能	107
9.3.2	Al ₂ O ₃ 系涂层刀具切削试验	108
9.3.3	Al ₂ O ₃ 系涂层刀具的选用	111
9.4	其他 XN 系涂层刀具 (X=Cr, Zr, Hf 等)	111
9.4.1	CrN 系涂层刀具	111
9.4.2	ZrN 系涂层刀具	112
9.4.3	HfN 系等其他涂层刀具	112
10	多元复合涂层刀具切削性能	113
10.1	Ti (C, N) 系涂层刀具	113
10.2	(Ti, Al) N 涂层刀具	114
10.2.1	(Ti, Al) N 系涂层刀具切削性能	114
10.2.2	(Ti, Al) N 系涂层刀具切削试验	115
10.2.3	(Ti, Al) N 系涂层刀具的选用	121
10.3	(Ti, X) N 系涂层刀具 (X=Cr, Zr, Si 等)	121
10.4	(Ti, Al, X) N 系涂层刀具 (X=Cr, Zr, Si, Y 等)	122
10.5	其他非 Ti 基涂层刀具	123
11	多元多层复合涂层刀具切削性能	125
11.1	有限层数涂层刀具	125
11.1.1	双层涂层刀具	125
11.1.2	多层涂层刀具	126
11.2	纳米级多层涂层刀具	129
12	刀具涂层制备技术	131
12.1	真空镀涂层技术概述	131
12.2	真空镀涂层技术分类	133

12.2.1	真空蒸发镀技术	133
12.2.2	真空溅射镀技术	134
12.2.3	真空离子镀技术	135
12.2.4	束流沉积技术	137
12.2.5	化学气相沉积技术	139
12.3	多弧离子镀技术概述	140
12.3.1	离子镀技术发展	140
12.3.2	多弧离子镀技术特点	141
12.3.3	多弧离子镀技术原理	141
12.4	磁控溅射技术概述	143
12.4.1	磁控溅射技术发展	143
12.4.2	磁控溅射技术原理	145
13	我国涂层刀具存在问题与对策	149
13.1	我国涂层刀具存在问题分析	149
13.2	对策建议	150
附录		152
附录 A	金属材料牌号对照表	152
附录 B	硬质涂层高速钢刀具技术条件	167
附录 C	氮化钛涂层高速钢刀具技术规范	171
附录 D	整体硬质合金涂层刀具检测方法	173
附录 E	金刚石涂层硬质合金刀具技术条件	176
附录 F	真空镀膜设备通用技术条件	178
附录 G	真空技术 术语	185
参考文献		230

切削刀具材料学 1-1 表

材料	牌号	化学成分 (%)	硬度 (HRC)	切削速度 (m/min)	应用
高速钢	W18Cr4V	W: 18, Cr: 4, V: 1	63~66	25~40	通用型
高速钢	W6Mo5Cr4V2	W: 6, Mo: 5, Cr: 4, V: 2	63~66	25~40	通用型
高速钢	W9Mo3Cr4V	W: 9, Mo: 3, Cr: 4, V: 1	63~66	25~40	通用型
高速钢	W10Cr5Mo2	W: 10, Cr: 5, Mo: 2	63~66	25~40	通用型
高速钢	W10Cr5Mo2Co	W: 10, Cr: 5, Mo: 2, Co: 1	63~66	25~40	通用型
高速钢	W10Cr5Mo2Co2	W: 10, Cr: 5, Mo: 2, Co: 2	63~66	25~40	通用型
高速钢	W10Cr5Mo2Co3	W: 10, Cr: 5, Mo: 2, Co: 3	63~66	25~40	通用型
高速钢	W10Cr5Mo2Co4	W: 10, Cr: 5, Mo: 2, Co: 4	63~66	25~40	通用型
高速钢	W10Cr5Mo2Co5	W: 10, Cr: 5, Mo: 2, Co: 5	63~66	25~40	通用型
高速钢	W10Cr5Mo2Co6	W: 10, Cr: 5, Mo: 2, Co: 6	63~66	25~40	通用型
高速钢	W10Cr5Mo2Co7	W: 10, Cr: 5, Mo: 2, Co: 7	63~66	25~40	通用型
高速钢	W10Cr5Mo2Co8	W: 10, Cr: 5, Mo: 2, Co: 8	63~66	25~40	通用型
高速钢	W10Cr5Mo2Co9	W: 10, Cr: 5, Mo: 2, Co: 9	63~66	25~40	通用型
高速钢	W10Cr5Mo2Co10	W: 10, Cr: 5, Mo: 2, Co: 10	63~66	25~40	通用型
高速钢	W10Cr5Mo2Co11	W: 10, Cr: 5, Mo: 2, Co: 11	63~66	25~40	通用型
高速钢	W10Cr5Mo2Co12	W: 10, Cr: 5, Mo: 2, Co: 12	63~66	25~40	通用型
高速钢	W10Cr5Mo2Co13	W: 10, Cr: 5, Mo: 2, Co: 13	63~66	25~40	通用型
高速钢	W10Cr5Mo2Co14	W: 10, Cr: 5, Mo: 2, Co: 14	63~66	25~40	通用型
高速钢	W10Cr5Mo2Co15	W: 10, Cr: 5, Mo: 2, Co: 15	63~66	25~40	通用型
高速钢	W10Cr5Mo2Co16	W: 10, Cr: 5, Mo: 2, Co: 16	63~66	25~40	通用型
高速钢	W10Cr5Mo2Co17	W: 10, Cr: 5, Mo: 2, Co: 17	63~66	25~40	通用型
高速钢	W10Cr5Mo2Co18	W: 10, Cr: 5, Mo: 2, Co: 18	63~66	25~40	通用型
高速钢	W10Cr5Mo2Co19	W: 10, Cr: 5, Mo: 2, Co: 19	63~66	25~40	通用型
高速钢	W10Cr5Mo2Co20	W: 10, Cr: 5, Mo: 2, Co: 20	63~66	25~40	通用型



高性能切削刀具概述

刀具是切削加工中不可缺少的重要工具，无论是普通机床，还是先进的数控机床（NC）、加工中心（MC）和柔性制造系统（FMC），都必须依靠刀具才能完成切削加工，所以刀具的发展对于提高生产率和加工质量具有直接的影响作用。本章重点介绍高速钢切削刀具、硬质合金切削刀具、陶瓷切削刀具、金刚石切削刀具及立方氮化硼切削刀具等硬质材料刀具。

1.1 高速钢切削刀具

1.1.1 通用型高速钢切削刀具

19 世纪高速钢材料问世，其主要化学成分是 Fe、C 和其他合金元素，如 W、Mo、Cr、V 等，形成碳化铁与复合碳化物，且具备切削刀具所需的优良性能。通用型高速钢的典型牌号是 W18Cr4V 和 W6Mo5Cr4V2，它们是最早开发并且广泛应用的钢种。随后，在这两种材料的基础上，又发展了 W9Mo3Cr4V 等牌号高速钢。该通用型高速钢热处理后，硬度可达 63~66HRC，可用于制造各种机加工用的常规刀具，加工件的硬度一般不大于 280HB，切削速度不高于 25~40m/min。而低合金高速钢是一种经济型的高速钢，W、Mo、Cr 和 V 等贵金属元素总含量不高，红硬性比 W18Cr4V、W6Mo5Cr4V2 和 W9Mo3Cr4V 高速钢要差。

目前，在国内高速钢切削刀具市场上，其应用比例分别为 W18Cr4V 切削刀具约占 20.5%，W6Mo5Cr4V2 切削刀具约占 65%，W9Mo3Cr4V 切削刀具约占 11%，而低合金高速钢切削刀具约占 3.5%^[1]。

1.1.2 高性能高速钢切削刀具

在现代化切削加工中，随着人们对加工效率和加工质量的要求日益提高，通用型高速钢切削刀具的性能已嫌不足。在 20 世纪后期，市场上逐步出现了许多高性能高速钢切削刀具。高性能高速钢是在普通高速钢基础上，通过调整基本化学成分并添加其他合金元素而成，常用的有高碳、高钴、高钒和含铝等几类。这类高速钢切削刀具的硬度、抗回火软化能力、常温和高温耐磨性能等均显著优于通用型高速钢。目前国内外市场上，高性能高速钢切削刀具的使用量已经超过普通高速钢 25%~30%。表 1-1 列出了国内外代表性的高性能高速钢切削刀具的化学成分及力学性能^[2]。

表 1-1 高性能高速钢切削刀具的化学成分及力学性能

高速钢 牌号	化学成分 (质量分数)/%										常温 硬度 HRC	600℃ 高温硬 度 HRC	抗弯 强度 /GPa	冲击 韧性 /MJ·m ⁻²
	C	W	Mo	Cr	V	Co	Mn	Si	Al	其他				
95W18 Cr4V	0.9~ 1	17.5~ 19	≤0.3	3.8~ 4.4	1.0~ 1.4	—	≤0.4	≤0.4	—	—	67~ 68	52	3	0.17~ 0.22
W6Mo5 Cr4V2Al (501)	1.05~ 1.2	5.5~ 6.75	4.5~ 5.5	3.8~ 4.4	1.75~ 2.2	—	≤0.4	≤0.6	0.8~ 1.2	—	68~ 69	54~ 55	3.5~ 3.8	0.2
W12Mo3 Cr4V3N (V3N)	1.1~ 1.25	11~ 12.5	2.5~ 3.5	3.5~ 4.1	2.5~ 3.1	—	—	—	—	N, 0.04~ 0.1	67~ 70	55	2~ 3.5	0.15~ 0.4
W12Mo3 Cr4V3 Co5Si (Co5Si)	1.2~ 1.25	11.5~ 13	2.8~ 3.4	3.8~ 4.4	2.8~ 3.4	4.7~ 5.1	≤0.4	0.8~ 1.2	—	—	69~ 70	54	2.4~ 2.7	0.11
W10Mo4 Cr4V3Al (5F6)	1.3~ 1.45	9~ 10.5	3.5~ 4.5	3.8~ 4.5	2.7~ 3.2	—	≤0.5	≤0.5	0.7~ 1.2	—	68~ 69	54	3.1	0.2
W6Mo5 Cr4V5 SiNbAl (B201)	1.55~ 1.65	5~ 6	5~ 6	3.8~ 4.4	4.2~ 5.2	—	≤0.4	1~ 1.4	0.3~ 0.7	Nb, 0.2~ 0.5	66~ 68	51	3.6	0.27
W6Mo5 Cr4V5 Co3Si- NbAl (B211)	1.6~ 1.9	6	6	4	5	3	—	1~ 1.4	1	Nb, 0.35	—	—	—	—
W18Cr4 V4Si- NbAl (B212)	1.48~ 1.58	17.5~ 18.5	—	3.8~ 4.4	3.8~ 4	—	—	1~ 1.4	1~ 1.6	Nb, 0.1~ 0.2	67~ 69	51	2.3~ 2.5	0.11~ 0.22
110W1.5 Mo9.5 Cr4VCo8 (M42)	1.05~ 1.15	1~ 2	9~ 10	3.8~ 4.4	0.8~ 1.5	7.5~ 8.5	≤0.4	≤0.4	—	—	67~ 69	55	2.7~ 3.8	0.23~ 0.3
W9Mo3 Cr4 V3Co10 (HSP-15)	1.2~ 1.3	8.5~ 10	2.9~ 3.5	3.8~ 4.4	2.8~ 3.4	9~ 9.4	—	—	—	—	67~ 69	56	2.4	0.15

1.2 硬质合金切削刀具

1.2.1 通用型硬质合金切削刀具

由于高速钢切削刀具只能承受 600℃ 以下的温度，其受耐热性的限制，所以该刀具切削速度不能过高，仅为 20~25m/min 左右，其切削效率尚处于较低水平。而且高速钢刀具的硬度约为 63~66HRC，所以不能切削淬硬钢和冷硬铸铁。而硬质合金切削刀具能实现高速切削与硬切削，该刀具材料的问世，使切削加工水平出现了飞跃性的进步。

硬质合金是以高硬度、难熔融的 WC、TiC 和 NbC 等金属碳化物为主要成分，以 Co、Mo 和 Ni 等做黏结剂，经粉末冶金方法压制烧结而成的一种硬质刀具材料。硬质合金刀具比高速钢刀具具有更高的硬度和耐磨性，硬度可达 89~93.5 HRA，抗弯强度可达 4300MPa 以上，红硬性也远远超过高速钢，在 800~1000℃ 的高温下，仍能保持优异的切削性能。由于这些特点，硬质合金刀具被誉为“工业牙齿”。

通常，国际上将硬质合金材料按照用途分为 P、M 和 K 类，用于加工黑色、有色或者长屑、短屑类金属。与此相对应，国内将其分为 YT、YW 和 YG 类，表 1-2 列出了几种常见牌号硬质合金刀具的物理力学性能^[3]。

表 1-2 常见牌号硬质合金刀具的物理力学性能

硬质合金牌号	硬度 HV	晶粒度/ μm	抗弯强度/ $\text{N} \cdot \text{mm}^{-2}$
YG6X	≥ 1710	≥ 0.9	≥ 1372
YG6	≥ 1478	≥ 0.9	≥ 1421
YG8	≥ 1400	≥ 0.9	≥ 1470
YT5	≥ 1478	≥ 0.9	≥ 1372
YT14	≥ 1633	≥ 0.9	≥ 1176

1.2.2 添加钽、铌的硬质合金切削刀具

硬质合金中添加 TaC 和 NbC 后，能够有效地提高常温硬度、高温硬度和高温强度，有效地提高抗扩散和抗氧化磨损能力，从而提高刀具的耐磨性。另外，该硬质合金刀具还能增强抗塑性变形能力、抗冲击能力及使用中的通用性。因此，使用添加钽、铌的硬质合金切削刀具，其切削性能得到大幅度改善。

添加钽、铌的硬质合金切削刀具分为两大类：WC+Ta(Nb)C+Co 类，即在 YG 类合金的基础上加入了 TaC 或 NbC；WC+TiC+Ta(Nb)C+Co 类，即在 YT 类合金的基础上加入了 TaC 或 NbC。

1.2.3 添加稀土元素的硬质合金切削刀具

在 WC 基的硬质合金中, 添加少量铈 (Ce)、钇 (Y) 等稀土元素, 可以改善硬质合金刀具的性能。在化学元素周期表中, 稀土元素共有 17 个, 其中一部分不仅可用于刀具材料, 而且在矿山工具、模具、顶锤用硬质合金中也有很好的发展前景。我国稀土元素的资源极为丰富, 故稀土硬质合金切削刀具的开发和研制在世界上处于领先地位。

自“八五”以来, 我国工厂和研究院所已研制出诸多牌号的稀土硬质合金刀具, 如 YG8R、YG6R、YC11CR、YW1R、YW2R、YT5R、YT14R、YT15R 和 YS25R 等。

在 P 类、M 类和 K 类硬质合金中各选一个牌号, 用稀土硬质合金 YG8R (相当于 K30)、YT14R (相当于 P20)、YW1R (相当于 M10) 与未加稀土元素的普通硬质合金 YG8、YT14、YW1 对比, 经测试其机械物理性能列于表 1-3 中。添加稀土元素后, 硬质合金的断裂韧性与抗弯强度有明显增加, 硬度也有少许提高^[4]。

表 1-3 稀土硬质合金与普通硬质合金的性能

牌 号	硬度 HRA	抗弯强度/GPa	断裂韧性/ $\text{MPa} \cdot \text{mm}^{\frac{1}{2}}$	密度/ $\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$
YG8R	90.1	2.563	15.48	147.77
YG8	89.6	2.292	12.76	14.7
YG14R	91	1.726	14.22	11.59
YG14	90.8	1.479	11.83	11.53
YW1R	92.5	1.559	13.77	13.28
YW1	92	1.379	10.69	13.27

1.3 陶瓷切削刀具

20 世纪中叶, 高速钢和硬质合金是应用最广泛的金属切削刀具材料。随后, 又出现了以氧化物和氮化物为主要成分的切削刀具材料, 即陶 (Ceramics)。早在古代, 陶瓷在人类生活中已得到了广泛应用。20 世纪前期, 人们开始研制作为刀具材料的陶瓷, 其硬度尚可但太脆, 难以真正付诸应用。20 世纪 50 年代, 前苏联和中国掀起了应用陶瓷刀具的热潮, 当时用“冷压法”制造, 硬度达 91~92HRA, 抗弯强度仅为 0.40~0.45GPa, 进行切削加工时“打刀”与“崩刃”现象较为严重。不久这个热潮便宣告停止, 仅在少数场合坚持应用。经过长期的努力, 陶瓷刀具材料的制造技术不断改进, 力学性能大幅度提高。20 世纪 80 年代, 陶瓷切削刀具硬度达 91~95HRA, 抗弯强度达 0.70~0.95GPa。虽然陶瓷的抗弯

强度和断裂韧性仍不如硬质合金，但已能满足某些切削加工的要求，于是应用范围又逐渐广泛起来。

目前，陶瓷刀片的制造主要有热压法，即将粉末状原材料在高温高压下压制成饼状，然后切割成刀片；另一种方法是冷压法，即将粉末状原材料在常温下压制成坯，经烧结成刀片。热压法制品质量好，因此是目前陶瓷刀片的主要制造方法。

陶瓷刀具材料的种类，按化学成分可以分为氧化铝系、氮化硅系和复合氮化硅—氧化铝系三大类。

1.3.1 氧化铝系陶瓷切削刀具

在陶瓷刀具材料中，应用最早的是纯氧化铝陶瓷，其成分几乎全是 Al_2O_3 ，仅添加了少量 0.1%~0.5% 的 MgO 、 Cr_2O_3 或 TiO_2 等，经冷压制成刀片。这种陶瓷刀片的硬度为 91~92HRA，但抗弯强度较低，仅及 0.4~0.45GPa。20 世纪 50 年代曾用过这种刀片，但难以推广。

随后，人们采用了氧化铝—碳化物复合陶瓷，即以 Al_2O_3 为基加入 TiC、WC、SiC 和 TaC 等成分，经热压成复合陶瓷。其中，以 Al_2O_3 -TiC 复合陶瓷应用最多，加入的 TiC 在 30%~50% 之间，有的还在 Al_2O_3 -TiC 陶瓷中再添加少量的 Mo、Ni、Cr、W 和 Cr 等金属。 Al_2O_3 -TiC 复合陶瓷的硬度可达 93~95HRA，其抗弯强度可达 0.7~0.9GPa，若添加少量的 Mo、Ni、Cr、W 和 Cr 等金属后，其抗弯强度有所提高，但硬度有所下降。

氧化铝也与氧化锆组合成为 Al_2O_3 - ZrO_2 复合陶瓷刀具。与 Al_2O_3 -TiC 复合陶瓷刀具相比， Al_2O_3 - ZrO_2 刀具的硬度较低，约为 91~92HRA，抗弯强度仅及 0.7GPa，仅仅断裂韧性有所提高，所以 Al_2O_3 - ZrO_2 陶瓷刀具不如 Al_2O_3 -TiC 陶瓷刀具应用广泛。另外， Al_2O_3 -Zr 复合陶瓷刀具，硬度可达 93.2HRA，抗弯强度可达 0.8GPa。除此之外，还有 Al_2O_3 -TiC- ZrO_2 与 Al_2O_3 - TiB_2 等复合陶瓷刀具。

1.3.2 氮化硅系陶瓷切削刀具

在氮化硅系陶瓷刀具中，仅添加少量其他成分的纯氮化硅陶瓷，其应用较少。 Si_3N_4 -TiC-Co 复合陶瓷刀具的力学性能较好，其韧性和抗弯强度优于 Al_2O_3 基陶瓷刀具，硬度也不下降，而且导热系数亦高于 Al_2O_3 基陶瓷刀具。目前， Si_3N_4 -TiC-Co 复合陶瓷刀具在实际生产中应用非常广泛。

1.3.3 复合氮化硅—氧化铝系陶瓷切削刀具

Si_3N_4 - Al_2O_3 - Y_2O_3 复合陶瓷又称为赛阿龙 (Sialon)，是近些年研制成功的一种新型复合陶瓷。例如，美国 Kennametal 公司的 Sialon 牌号 KY3000，其成分为

Si₃N₄77%、Al₂O₃13%、Y₂O₃10%，硬度可达1800HV，抗弯强度可达1.2GPa，其韧性优于其他陶瓷。美国Greeleaf公司研制的Gem4B和瑞典Sandvik公司研制的CC680也都是Sialon陶瓷。表1-4列出了国内外主要陶瓷刀片的牌号、成分及主要性能。

在Al₂O₃或Si₃N₄基体中，可形成“晶须增韧陶瓷”，这种陶瓷刀片的断裂韧性有显著的提高。在表1-4中也列出了晶须增韧陶瓷的国内外牌号及其性能指标^[5]。

表 1-4 国内外主要陶瓷刀片的牌号、成分及主要性能

牌 号	成 分	压制方法	硬度 HRA	抗弯强度/GPa
SG4	Al ₂ O ₃ -(W, Ti) C	热压	94.7~95.3	0.79
LT35	Al ₂ O ₃ -TiC 加金属	热压	93.5~94.5	0.88
LT55	Al ₂ O ₃ -TiC 加金属	热压	93.7~94.8	0.98
JX-1	Al ₂ O ₃ -SiC 晶须	热压	94~95	0.85
AG2	Al ₂ O ₃ -TiC 加金属	热压	93.5~95	0.79
AT6	Al ₂ O ₃ -TiC 加金属	热压	93.5~94.5	0.88~0.93
HDM1	Si ₃ N ₄ 基	热压	92.5	0.93
HDM2	Si ₃ N ₄ 基加 SiC 晶须	热压	93	0.98
HDM3	Si ₃ N ₄ 基	热压	92.5	0.83
HDM4	Al ₂ O ₃ 基	热压	93	0.8
FD-0.1, 0.2, 0.3	Si ₃ N ₄ 基	热压	93	0.8
FD-11, 12	Al ₂ O ₃ 基	热压	95	0.7
P1	Al ₂ O ₃	热压	96.5	0.4~0.5
P2	Al ₂ O ₃ +ZrO ₂	热压	96.5	0.7~0.8
T2	Al ₂ O ₃ +TiC+ZrO ₂	热压	90~100	0.9~1
N5	Si ₃ N ₄ 基	热压	97~98	0.65~0.8
CC650	Al ₂ O ₃ -Ti(C, N)	热压	98	0.6
CC680	Si ₃ N ₄ -Al ₂ O ₃ -Y ₂ O ₃	热压	99	0.6
KY3000	Si ₃ N ₄ -Al ₂ O ₃ -Y ₂ O ₃	热压	100	0.6
CC670	Al ₂ O ₃ 加 SiC 晶须	热压	94~94.5	0.78
KY250	Al ₂ O ₃ 加 SiC 晶须	热压	93.5~94	0.8

1.4 金刚石切削刀具

在现代刀具材料中,高速钢、硬质合金和陶瓷的主要硬质成分为碳化物、氮化物和氧化物。例如,高速钢是加入了W和Mo等合金成分的碳化铁;硬质合金主要是碳化物、氮化物和碳氮化物;陶瓷则是氧化物和氮化物。这些化合物的硬度最高达3000HV,加入黏结物质其总体硬度在2000HV以下。对于现代工程材料的加工,在某些情况下上述刀具材料的硬度已不敷使用,于是超硬刀具材料便应运而生。超硬材料的化学成分及其结构与其他刀具材料不同,因而具有高硬度。金刚石由碳元素转化而成,其晶体结构与立方氮化硼相似,其硬度大大高于前面所述的切削刀具材料。

在几千年前,人类就已经发现和使用天然金刚石,而人造金刚石的制造和应用则在20世纪。在20世纪后期,人造金刚石超硬材料得到了飞跃的发展。

人造金刚石通常在高温和高压(热压法)条件下形成,称为PCD。PCD人造金刚石的研究始于1940年,1954年美国正式宣告此种金刚石研制成功,1957年开始工业生产。到1961年,全世界人造金刚石产量为4000万克拉,当时天然金刚石年产量为4400万克拉。1963年,中国宣告PCD人造金刚石制造成功。1996年,中国人造金刚石产量达2.4亿克拉,出口6~8.5千万克拉。20世纪90年代末,中国年产量达5亿克拉,居全世界首位。近年,又以化学气相沉积法(CVD)制成人造金刚石。

金刚石分为天然金刚石和人造金刚石。人造金刚石有PCD单晶粉,用于制作磨具;PCD单晶粒,可做刀具;PCD聚晶片及聚晶复合片,用于制作刀具及其他工具;CVD金刚石涂层及厚涂层,可用于制作刀具及其他工具,并可作为光学和电子高科技的原材料。

1.5 立方氮化硼切削刀具

在20世纪后期,人造立方氮化硼超硬材料得到了飞跃的发展。1957年,美国CE公司压出立方氮化硼CBN单晶粉;70年代初,制成聚晶的PCBN刀具;1972年,苏联也制成PCBN刀具;1966年,中国研制成功单晶CBN,稍后制成PCBN。

立方氮化硼是非金属的硼化物,晶体结构为面心立方体,其硬度大大高于高速钢和硬质合金切削刀具。立方氮化硼是人造的,立方氮化硼的主要种类有CBN单晶粉,用于制作磨具;还有PCBN聚晶片及PCBN聚晶复合片,用于制作刀具及其他工具。

目前,立方氮化硼刀具在国外应用相当普及,特别适用于切削难加工材料,但在我国还处于发展阶段,在汽车、轴承、工具等领域的应用也才刚刚起步。随