

现代数控机床刀具 及其应用

浦艳敏 牛海山 衣娟 编著

XIANDAI

面向岗位实际需要

SHUKONG

切削理论系统详实

JICHUANG

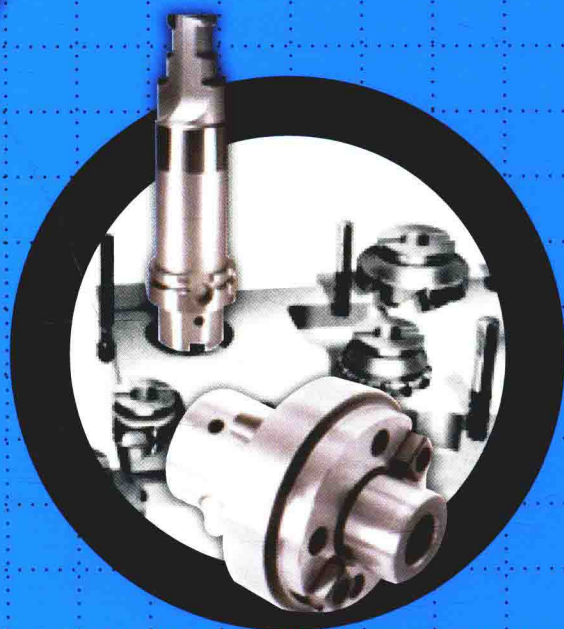
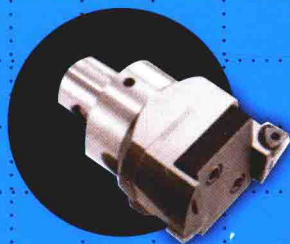
刀具工艺有机融合

DAOJU

提高加工效率质量

JIQI

YINGYONG



化学工业出版社

现代数控机床刀具 及其应用

▶▶▶ 浦艳敏 牛海山 衣娟 编著



化学工业出版社

· 北京 ·

图书在版编目 (CIP) 数据

现代数控机床刀具及其应用/浦艳敏, 牛海山, 衣娟
编著. —北京: 化学工业出版社, 2018.1
ISBN 978-7-122-30170-3

I. ①现… II. ①浦… ②牛… ③衣… III. ①数控
刀具 IV. ①TG729

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2017) 第 165384 号

责任编辑: 王 焯 项 激
责任校对: 王 静

文字编辑: 吴开亮
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: 高教社 (天津) 印务有限公司
787mm×1092mm 1/16 印张 11½ 字数 304 千字 2018 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: 49.00 元

版权所有 违者必究

前言

目前,随着我国数控机床用量的增加,现代切削加工朝着高速、高精度和高强度切削方向发展。数控机床刀具与工具系统的性能、质量和可靠性以及刀具管理系统的水平,直接影响到我国制造业数百万台昂贵的数控机床生产效率的高低和加工质量的好坏,也影响到整个机械制造业的生产技术水平和经济效益。本书正是在这样的背景下,经过反复的实践与总结,在收集国内外大量现代数控刀具最新技术发展成果的基础上编写的。

现代数控机床刀具、工具系统和刀具管理系统是发挥数控机床加工效率、保证加工质量的基础。只有先进的数控机床,没有与之相配套的先进刀具、工具系统和刀具管理系统,或者没有掌握刀具的合理使用技术,数控机床的效能就得不到充分发挥。本书正是从数控加工生产实际的角度出发,以基本的切削理论为基础,以掌握数控机床刀具合理使用技术、发挥数控机床效能为目标,首先介绍了现代数控机床的发展、种类特点和工作的可靠性;再介绍了数控机床刀具材料的种类、性能和选用;然后分析了数控车削刀具、数控孔加工刀具和数控铣削加工刀具的种类、特点及合理使用技术等;同时,结合国内外数控工具系统的最新发展成果,介绍了数控工具系统。

本书以实用性为主,兼顾系统性,具有信息量大、内容全面等突出特点,可供机械制造业的机械加工工艺人员和生产一线的技术人员使用,也可供有关专业的工程技术人员和工科院校师生参考。

本书由辽宁石油化工大学浦艳敏、牛海山、衣娟编著。其中,浦艳敏编写第1~第3章,牛海山编写第4、第5章,衣娟编写第6、第7章。另外李铁石、龚雪、郭玲、李晓红、何立、姚乐、高晶晶、郭庆梁、王春蓉、闫兵、王宏宇、于水、杨伟等为本书的编写提供了帮助。

由于水平有限,加之时间仓促,书中难免有不妥之处,敬请读者批评指正。

编著者

目录

第1章 概述	1
1.1 数控刀具发展状况	1
1.1.1 我国数控刀具技术的现状	1
1.1.2 数控刀具技术的发展	2
1.1.3 数控加工对刀具的要求	3
1.2 数控刀具的种类及特点	4
1.2.1 数控刀具的种类	4
1.2.2 数控刀具的特点	5
1.3 数控刀具的失效形式及可靠性	6
1.3.1 数控刀具的常见失效形式及其解决方法	6
1.3.2 刀具失效在线检测方法	7
1.3.3 数控刀具的可靠性	8
1.3.4 数控刀具的选择原则	8
第2章 数控刀具材料	9
2.1 数控加工对刀具材料的要求	9
2.2 高速钢	10
2.2.1 通用型高速钢	10
2.2.2 高性能高速钢	11
2.2.3 高速钢的选用	13
2.3 硬质合金钢刀具材料	14
2.3.1 硬质合金	14
2.3.2 硬质合金性能特点	14
2.3.3 钨钴类硬质合金	16
2.3.4 钨钛钴 (WC-TiC-Co) 类硬质合金	19
2.3.5 含碳化钽 (碳化铌) 的硬质合金	21
2.3.6 碳化钛 TiC 基硬质合金	22
2.4 金刚石刀具材料	23
2.4.1 金刚石刀具材料的种类	23
2.4.2 金刚石的性能特点及其应用	24
2.5 立方氮化硼刀具材料	24
2.5.1 立方氮化硼刀具材料的种类	24
2.5.2 立方氮化硼刀具材料的性能、特点	24
2.6 陶瓷刀具材料	25
2.6.1 陶瓷刀具材料的种类及应用	25
2.6.2 陶瓷刀具材料的性能、特点	26
2.7 涂层刀具材料	26
2.7.1 涂层刀具	26

2.7.2	涂层工艺	27
2.7.3	涂层种类	28
2.7.4	刀具涂层的选择	28
2.7.5	涂层高速钢刀具	29
2.7.6	涂层硬质合金刀具	30
2.7.7	刀具的重磨与再涂层	30
第3章 数控车削刀具 32		
3.1	数控车削刀具的类型	32
3.1.1	按车刀用途分类	32
3.1.2	按切削刃形状分类	32
3.1.3	根据车刀结构分类	33
3.1.4	常用数控车刀的刀具参数	33
3.2	机夹车刀	35
3.3	可转位车刀	36
3.3.1	可转位车刀的组成及特点	36
3.3.2	机夹可转位式车刀的夹紧方式	36
3.3.3	可转位车刀使用注意事项	37
3.3.4	可转位车刀表示方法	38
3.3.5	可转位车刀几何角度的选择	43
3.3.6	可转位车刀的选用	44
3.4	机夹可转位式外圆车刀	47
3.4.1	机夹可转位式外圆车刀的 ISO 代码	47
3.4.2	复合压紧式可转位外圆车刀	48
3.4.3	螺钉压紧式可转位外圆车刀	48
3.5	机夹可转位式内孔车刀(镗刀)	49
3.6	机夹可转位式螺纹车刀	51
3.6.1	螺纹车刀分类及应用范围	51
3.6.2	螺纹车刀结构形式及基本尺寸	51
3.6.3	机夹可转位式螺纹车刀代码	52
3.6.4	机夹式螺纹车刀切削用量的选用	55
3.7	切断(槽)刀	56
3.7.1	切断(槽)刀的功能与分类	56
3.7.2	使用注意事项	57
3.8	数控车削加工中的装刀与对刀技术	58
3.8.1	车刀的装夹步骤和装夹要求(以外圆刀为例)	58
3.8.2	数控车床常用的刀架	59
3.8.3	机夹可转位车刀的安装	59
3.8.4	对刀方法	61
3.9	加工不同材料工件车刀的选择	62
3.9.1	淬火钢的车削	62
3.9.2	不锈钢的车削	63
第4章 数控加工中孔加工刀具 67		
4.1	钻削过程及其基本原理	67
4.2	孔加工刀具的分类和用途	68

4.2.1	在实体工件上加工出孔的刀具	68
4.2.2	对工件上已有孔进行再加工的刀具	69
4.3	麻花钻	70
4.3.1	高速钢麻花钻	70
4.3.2	群钻	74
4.3.3	硬质合金麻花钻	74
4.4	深孔钻	75
4.4.1	深孔加工的特点	75
4.4.2	深孔钻的分类及其结构特点	76
4.5	铰刀	78
4.5.1	铰刀的分类	78
4.5.2	铰削特点	78
4.5.3	高速钢铰刀	79
4.5.4	硬质合金铰刀	82
4.5.5	铰刀的使用技术	83
4.6	镗刀	83
4.6.1	粗镗刀	84
4.6.2	精镗刀	84
4.6.3	多刃镗刀	86
第5章 数控铣削刀具		87
5.1	概述	87
5.1.1	铣刀的种类及用途	87
5.1.2	铣刀的几何参数	92
5.1.3	数控铣刀的基本特点	95
5.1.4	数控铣刀的基本要求	95
5.2	铣削原理	96
5.2.1	铣削方式	96
5.2.2	铣削要素和切削层参数	97
5.2.3	铣削力和铣削功率	100
5.3	数控加工中常用铣刀及代码	102
5.3.1	数控可转位铣刀刀片及铣刀代码	102
5.3.2	面铣刀	104
5.3.3	立铣刀	110
5.3.4	其他铣刀	114
5.4	可转位铣刀的合理选用	118
5.4.1	可转位铣刀的结构	119
5.4.2	可转位铣刀的角度选择	119
5.4.3	可转位铣刀的齿数(齿距)	120
5.4.4	可转位铣刀的直径	121
5.4.5	刀片牌号的选择	121
第6章 数控复合刀具		123
6.1	数控复合刀具的分类形式	123
6.1.1	数控复合刀具的概念	123

6.1.2	数控复合刀具的分类	125
6.2	数控复合刀具材料	127
6.2.1	数控复合刀具刀体的材料	127
6.2.2	数控复合刀具切削部分的材料	127
6.2.3	数控复合刀具中的新技术	131
6.3	数控复合刀具的应用	132
6.3.1	数控复合刀具的设计原则	132
6.3.2	数控复合刀具的切削加工特点	132
6.3.3	在加工中心上使用数控复合刀具加工箱体零件	133
6.3.4	使用攻丝-倒角数控复合刀具加工螺纹孔	134
6.3.5	使用数控复合刀具加工差速器壳体零件	134
6.3.6	使用数控钻-铰复合刀具加工汽车制动鼓	135
6.3.7	使用车螺纹-平端面数控车削复合刀具加工石油套管	136
第7章	数控机床工具系统	137
7.1	概述	137
7.2	机床与工具系统的接口及其标准	137
7.2.1	镗铣类数控机床与工具系统的接口及其标准	137
7.2.2	车削类数控机床与工具系统的接口及其标准	143
7.3	镗铣类数控机床用工具系统 (TSG)	143
7.3.1	TSG 工具系统图	144
7.3.2	TSG 工具系统中的工具型号命名规则	144
7.3.3	TSG 系统的镗孔类工具	146
7.3.4	TSG 系统的装铣刀工具	147
7.3.5	TSG 系统的装莫氏柄工具	148
7.3.6	TSG 系统的装圆柱柄工具	149
7.3.7	TSG 系统的钻孔攻螺纹工具	150
7.4	镗铣类模块式工具系统 (TMG)	151
7.4.1	TMG 名称代号及模块型号表示规则	151
7.4.2	TMG21 模块系统图	153
7.4.3	TMG21 的主柄模块	154
7.4.4	TMG21 的中间模块	156
7.4.5	TMG21 的工作模块	157
7.4.6	国外的 TMG 工具系统	161
7.4.7	镗铣类工具系统的选用	162
7.5	数控车床工具系统	163
7.5.1	通用型数控车削工具系统	163
7.5.2	更换刀具头部的数控车削工具系统	166
7.6	数控刀具的预调及在线检测	167
7.6.1	刀具预调仪	167
7.6.2	刀具的预调方法	168
7.6.3	刀具管理系统	169
7.6.4	数控刀具的在线检测	170
参考文献	173

第1章

概述

1.1 数控刀具发展状况

美、德、日等世界制造业发达的国家无一例外都是刀具工业先进的国家。先进刀具不但是推动制造技术发展进步的重要动力，还是提高产品质量、降低加工成本的重要手段。刀具与机床一直是相互制约又相互促进的。今天先进的数控机床已经成为现代制造业的主要装备，它与同步发展起来的先进刀具一起共同推动了加工技术的进步，使制造技术进入了数控加工的新时代。

现代数字化制造技术的蓬勃发展，以“高精度、高效率、高可靠性和专用化”为特点的数控机床和加工中心等高效设备应用日渐普及，在航空航天、汽车、高速列车、风电、电子、能源、模具等装备制造业的空前发展推动下，切削加工已迈入了以高速、高效和环保为标志的高速加工发展的新时期。高速切削、干切削和硬切削作为当前切削技术的重要发展方向，其重要地位和角色日益凸显。这些先进切削技术的应用，不仅使加工效率成倍提高，也推动了刀具技术的发展。随着各种新型材料刀具的出现，如聚晶金刚石刀具（PCD）、聚晶立方氮化硼刀具（PCBN）、CVD金刚石刀具、纳米复合刀具、纳米涂层刀具、晶须增韧陶瓷刀具、超细晶粒硬质合金刀具、TiC（N）基硬质合金刀具、粉末冶金高速钢刀具等，使先进的数控机床加工设备与高性能的数控刀具相配合才发挥了巨大的效能，取得了良好的经济效益。

数控刀具是指与数控机床（如加工中心、数控车床、数控镗铣床、数控钻床、自动化生产线及柔性制造系统等）相配套使用的各种刀具的总称，是数控机床不可缺少的关键配套产品，数控刀具以其高效、精密、高速、耐磨、寿命长和良好的综合切削性能取代了传统刀具。

1.1.1 我国数控刀具技术的现状

由于我国机床工具行业对现代金属切削刀具与传统刀具的差别缺乏足够的认识，长期以来重主机、轻工具，在发展战略上数控刀具与数控机床的发展严重脱节，使我国数控刀具制造与国外先进水平存在很大差距。国产数控刀具与国外进口刀具相比，质量、精度、寿命相对较差，品种少。

在我国数控机床取得长足进步的同时，数控刀具制造与国外先进水平存在很大差距，且数控刀具的发展落后于机床。众多大型跨国工具公司（如 Sandvik、Kennametal、Walter、Seco、Widia、ISCAR、Mitsubishi、Igetalloy、Carboloy 等）已占有越来越明显的技术、资源、信息、服务等综合优势，占领了中国数控刀具 90% 以上的市场份额。随着我国加入 WTO，国外公司看好中国制造业对高性能刀具的大量需求，纷纷在中国投资建厂或设立销售网点。我国汽车产业、军工产业对高性能刀具的需求将持续增长，且世界模具制造业有向亚洲及我国转移的趋势，我国已成为数控刀具的最大潜在用户。

国内有些工厂企业仍然习惯性地按普通机床用刀具模式来选择数控刀具材料，造成切削加工生产率低下、切削加工成本增加，致使对数控机床大量投资并未达到预期效果。如国内超细晶

粒硬质合金刀具和高性能高速钢刀具牌号少, 专用牌号几乎没有, 可转位刀片的精度与模具的开发能力低, 涂层技术也远远落后于国外工具厂, 目前尚无 TiC (N) 商业牌号, 更谈不上 TiAlN、MoS₂ 等新型涂层和纳米级涂层, 使涂层这个至今覆盖面最广、可最有效提高刀具性能的技术得不到充分利用。国内应用最多的还是普通高速钢刀具和通用硬质合金刀具。形成这一状况的原因如下。

① 对数控刀具没有引起应有的重视, 忽视了数控刀具的重要性。

② 对现代数控刀具高水平、大投入、规模化、国际化、人才密集、技术密集的特点缺乏认识, 长期以来重主机、轻工具。在发展战略上, 数控刀具与数控机床的发展严重脱节, 使我国数控刀具的发展与现代制造业的要求相距甚远。

③ 刀具企业自身缺乏创新能力。国外工具厂的刀具产品及技术创新速度非常快, 只要有需求, 就成为开发新刀具产品的动力。

1.1.2 数控刀具技术的发展

(1) 数控刀具材料的新发展

进入 21 世纪以来, 随着制造技术的全球化趋势, 制造业的竞争更加激烈, 对制造技术必然带来巨大的挑战, 首当其冲的是切削刀具的变化。为了适应高精化、高速化、自动化、多功能化、高生产率化、缩短交货期等要求, 要求切削刀具材料的强度和韧性要高, 具有寿命长、高可靠性、耐高温、耐磨损、抗氧化和抗冲击等特点。特别为适应当前对环境保护的要求, 提出了条件苛刻的干式切削。切削刀具的设计和制造等方面也是日新月异, 不断推陈出新, 相应也推动了其他技术的发展。数控刀具材料的发展主要体现在刀具的切削性能大幅度提高, 以适应高速、高效、高精密度、多功能、硬质和干式切削等技术要求。

(2) 数控刀具结构的发展

① 数控工具系统 数控工具系统是针对数控机床要求 (与之配套的刀具必须换刀速度快和切削高效) 而发展起来的, 是刀具与机床的接口。它除了刀具本身外, 还包括实现刀具快换所必需的定位、夹紧、抓拿及刀具保护等机构。20 世纪 70 年代, 工具系统以整体结构为主; 80 年代初, 开发出了模块式结构的工具系统 (分车削、镗铣两大类); 80 年代末, 开发出了通用模块式结构 (车、铣、钻等万能接口) 的工具系统。模块式工具系统将工具的柄部和工作部分分割开来, 制成各种系统化的模块, 然后经过不同规格的中间模块, 组成一套套不同规格的工具。目前, 世界上模块式工具系统有几十种结构, 其区别主要在于模块之间的定位方式和锁紧方式不同。模块式工具系统是数控刀具结构的一个重要特点, 通过不同模块的组合, 用尽可能少的模块组成一个功能全、柔性好的工具系统, 采用高精度、高刚性并能快换的连接结构, 可以显著提高数控机床的利用率。

② 高速旋转刀具的新型刀柄及相关技术 刀柄是高速切削加工的一个关键部件, 传统的刀柄与机床主轴的连接方式是 7:24 的锥柄 (如 BT、ISO 等), 这种连接结构已不能适应高速加工的要求。为此, 德国开发了 HSK 空心短锥刀柄。HSK 短锥刀柄采用 1:10 的锥度, 它的锥体比标准的 7:24 锥柄短, 可实现法兰端面 and 锥柄的同时接触, 具有很高的连接精度和刚度。与 7:24 锥柄相比, HSK 空心短锥刀柄有如下优点:

- a. 重量减少约 50%。
- b. 重复使用时, 装夹和定位精度高。
- c. 刚度高, 并可传递大的力矩。
- d. 装夹力随转速升高而增大, 所允许的最高转速为 30000r/min。

③ 多功能及专用刀具的开发应用 多功能刀具是指用一把刀就能实现多把刀才能实现的加工, 即实现一次安装多次走刀完工的要求。对复杂零件的加工, 要求在一次装夹中进行多工

序的集中加工,并淡化传统的车、铣、镗、螺纹加工等不同切削工艺的界限。发展这样的刀具可有效避免频繁换刀和对刀,节省换刀时间,减少辅助时间,减少刀具的数量和库存量,便于刀具管理和降低制造成本,提高生产率和加工精度。为了发挥以车削加工中心和镗铣类加工中心为代表的数控机床的优势,开发多功能刀具是当前数控刀具结构发展中的一个趋势。目前,多功能刀具有:车刀、铣刀、镗铣刀、钻-铣刀、钻-铣螺纹-倒角等刀具。有的多功能刀具可将零件的加工时间降至原来的1/10以下,效果十分显著。如多功能的车刀发展了拥有车端面、外圆、仿形、切精、切断和倒角等多种加工功能和带有过中心端刃的多功能立铣刀。借助数控机床螺旋插补、圆周插补或曲线插补等编程方法,可以加工各种内外成形轮廓面、台阶、凹面,甚至代替孔加工刀具钻孔。复合孔加工数控刀具集合了钻头、铰刀、扩(铤)孔刀的功能,用于加工箱体上螺纹孔的多功能刀具,一把刀就可以完成钻孔、攻螺纹、倒角三种工序,单刃微调精密镗刀正被多刃扩孔刀、铰刀及复合孔加工专用数控刀具替代。

由于高速、超高速切削的发展,切削热成为研究对象,从而带冷却孔的切削刀具应运而生。这对降低切削温度,特别是在钻孔的条件下十分有利,并且为更好排屑创造了前提,同时这类技术在小直径刀具上应用,可以使切削液到达不易到达的部位。现在于加工中也有应用场合,可以利用切削液孔通冷却气体以降低切削温度。为了适应硬切削的需求,立铣刀采用大螺旋槽的相当多;为了加强排屑性能,将刀槽加宽,甚至将刀背去除。立铣刀采用大前角能明显降低切削力,改善了排屑性能,在精密加工中能提高加工表面的质量。当前的立铣刀端齿中有一个端刃采用过中心,使立铣刀功能扩大,不用预钻孔,直接向下切削。

④ 硬质合金刀具的整体化 近年来大力发展硬质合金刀具的整体化,小直径刀具的刚度显著提高,甚至复杂刀具,如齿轮、螺纹刀具等也采用整体硬质合金制造。整体式硬质合金立铣刀圆周刃采用大螺旋升角结构,立铣刀头的过中心端刃往往呈弧线形、负刃倾角,增加切削刃长度,提高了切削平稳性、工件表面精度及刀具寿命。

1.1.3 数控加工对刀具的要求

数控加工具有高速、高效和自动化程度高等特点,数控刀具是实现数控加工的关键技术之一。为了适应数控加工技术的需要,保证优质、高效地完成数控加工任务,对数控加工刀具提出了比传统加工用刀具更高的要求,它不仅要求刀具耐磨损、寿命长、可靠性高、精度高、刚性好,而且要求刀具尺寸稳定、安装调整方便等。数控加工对刀具提出的具体要求如下。

(1) 刀具材料应具有高的可靠性

数控加工在数控机床或加工中心上进行,切削速度和自动化程度高,要求刀具应具有很高的可靠性,并且要求刀具的寿命长、切削性能稳定、质量一致性好、重复精度高。

解决刀具的可靠性问题,成为数控加工成功应用的关键技术之一。在选择数控加工刀具时,除需要考虑刀具材料本身的可靠性外,还应考虑刀具的结构和夹装的可靠性。

(2) 刀具材料应具有高的耐热性、抗热冲击性和高温力学性能

为了提高生产效率,现在的数控机床向着高速度、高刚性和大功率发展。切削速度的提高,往往会导致切削温度的急剧升高。因此,要求刀具材料的熔点高、氧化温度高、耐热性好、抗热冲击性能强,同时还要求刀具材料具有很高的高温力学性能,如高温强度、高温硬度、高温韧性等。

(3) 数控刀具应具有高精度

在数控加工生产中,被加工零件要求在一次装夹后达到其加工精度的要求。因此,要求刀具借助专用对刀装置或对刀仪,调整到所要求的尺寸精度后,再安装到机床上应用。这样就要求刀具的制造精度要高。尤其在使用可转位结构的刀具时,刀片的尺寸公差、刀片转位后刀尖空间位置尺寸的重复精度,都有严格的精度要求。

(4) 数控刀具应能实现快速更换

数控刀具应能与数控机床快速、准确地接合和脱开，并能适应机械手和机器人的操作，并且要求刀具互换性好、更换迅速、尺寸调整方便、安装可靠，以减少因更换刀具而造成的停顿时间。刀具的尺寸应能借助于对刀仪在机外进行预调，以减少换刀调整的停机时间。现在的加工中心多采用自动换刀装置。

(5) 数控刀具应系列化、标准化和通用化

尽量减少刀具规格，以利于数控编程和便于刀具管理，降低加工成本，提高生产效率，建立刀具准备单元，进行集中管理，负责刀具的保管、维护、预调、配置等工作。

(6) 数控刀具大量采用机夹可转位刀具

由于机夹可转位刀具能满足耐用、稳定、易调和可换等要求，目前，在数控机床及加工中心等设备上，广泛采用机夹可转位刀具结构。机夹可转位刀具在数量上已达到整个数控刀具的30%~40%。

(7) 数控刀具大量采用多功能复合刀具及专用刀具

为了充分发挥数控机床的技术优势，提高加工效率，对复杂零件加工要求在一次装夹中进行多工序的集中加工，并淡化传统的车、铣、镗、螺纹加工等不同切削工艺的界限，是提高数控机床效率、加快产品开发的有效途径。因此，对数控刀具提出了多功能（复合刀具）的新要求，要求一种刀具能完成零件不同工序的加工，减少换刀次数，节省换刀时间，减少刀具的数量和库存量，便于刀具管理。如镗铣刀、钻铣刀等，使原来需要多道工序、几种刀具才能完成的工序在一道工序中由一把刀完成，不仅提高了生产效率，保证了加工精度，而且明显减少了刀具数量。

(8) 数控刀具应能可靠地断屑或卷屑

为了保证自动生产的稳定进行，数控加工对切屑处理有更高的要求。切削塑性材料时，切屑的折断与卷曲，常常是决定数控加工能否正常进行的重要因素。因此，数控刀具必须具有很好的断屑、卷屑和排屑性能。要求切屑不能缠绕在刀具或工件上，不影响工件的已加工表面、不妨碍后续工序进行。数控刀具一般都采取了一定的断屑措施（如可靠的断屑槽、断屑台和断屑器等），以便可靠地断屑或卷屑。

(9) 数控刀具材料应能适应难加工的材料和新型材料加工的需要

随着科学技术的发展，对工程材料提出了越来越高的要求，各种高强度、高硬度、耐腐蚀和耐高温的工程材料越来越多地被采用。它们中多数属于难加工的材料，目前难加工材料已占工件的40%以上。因此，数控加工刀具应能适应难加工的材料和新型材料加工的需要。

1.2 数控刀具的种类及特点

1.2.1 数控刀具的种类

近年来，快速发展的数控加工工艺技术促进了数控刀具结构基础科研和新产品的研发。世界各大厂商生产的数控机床用刀具种类、规格繁多，数量庞大，往往令人眼花缭乱，不得要领。一般情况下，数控加工刀具可分为常规刀具和模块化刀具两大类。模块化刀具是发展方向。其主要优点：其一，提高刀具的标准化，加快换刀及安装时间，减少停机时间，提高生产加工时间；其二，扩大刀具的利用率，充分发挥刀具的性能，提高刀具的管理及柔性加工水平，有效地消除刀具测量工作的加工中断现象。随着模块化刀具的发展，数控刀具已形成了三大系统，即车削刀具系统、钻削刀具系统和镗铣刀具系统。具体使用中，数控刀具根据不同原则的分类如下。

(1) 从结构上分

① 整体式 是指刀具切削部分和夹持部分为一体结构的刀具。

② 镶嵌式 又可分为焊接式和机夹式。机夹式根据刀体结构不同,分为可转位和不转位。

③ 减振式 当刀具的工作臂长度与直径之比较大时,为了减少刀具的振动,提高加工精度,多采用此类刀具。

④ 内冷式 切削液通过刀体内部由喷孔喷射到刀具的切削刃部。

⑤ 特殊形式 如复合刀具、可逆攻螺纹刀具等。

(2) 从切削工艺上分

① 车削刀具 常规车削刀具分外圆、内孔、外螺纹、内螺纹、切槽、切端面、切端面环槽、切断等刀具。数控车床一般使用标准的机夹可转位刀具,机夹可转位刀具的刀片和刀体都有标准,刀片材料采用硬质合金、涂层硬质合金及高速钢。从切削方式上分为三类:圆表面切削刀具、端面切削刀具和中心孔类刀具。

② 铣削刀具 铣削刀具是用于铣削加工的、有一个或多个刀齿的旋转刀具。工作时各个刀齿依次间歇地切去工件的余量。铣刀主要用于在铣床上加工平面、台阶、沟槽、成形表面和切断工件等。常用的有面铣刀、立铣刀、三面刃铣刀等刀具。

面铣刀(也叫端铣刀)是圆周表面和端面上都有切削刃的铣刀,端部切削刃为副切削刃,结构形式有套式镶齿结构和刀片机夹可转位结构,刀齿材料为高速钢或硬质合金,刀体多为40Cr。立铣刀是数控机床上用得最多的一种铣刀,它的圆柱表面和端面上都有切削刃,可同时进行切削,也可单独进行切削,结构有整体式和机夹式等。三面刃铣刀通常在卧式铣床上使用,其外圆和两个端面靠近外圆的部位都有切削刃(像宽锯齿状),所以称为三面刃铣刀。铣削时主要利用刀具周边的切削刃进行切削,常用于铣槽和切断。铣削刀具除上面提到的三种外,还有模具铣刀、键槽铣刀、鼓形铣刀、成形铣刀等其他种类。

③ 孔加工刀具 孔加工刀具分为孔粗加工、孔精加工、螺纹加工等刀具,可在数控车床、车削中心、数控镗铣床和加工中心上使用。它的结构和连接形式有直柄、锥柄、螺纹连接、模块式连接(圆锥或圆柱连接)等多种。

1.2.2 数控刀具的特点

近几年来,数控机床的制造及使用已有很大的发展。为适应数控机床加工精度高、加工效率高、加工工序集中及零件的装夹次数少等要求,数控机床对所用的刀具有许多性能上的要求,只有达到这些要求才能使数控机床真正发挥起作用。数控机床上所使用刀具应具有以下特点。

(1) 刀具有很高的切削效率

由于所使用的机床设备昂贵,所以要提高加工效率。机床向高速、高刚度和大功率等方向发展,所以现代刀具必须具有能够承受高速切削和强力切削的性能。一些发达工业国家在数控机床上使用涂层硬质合金刀具、超硬刀具和陶瓷刀具所占的比例不断增加。据报道,在美国数控机床上陶瓷刀具应用的比例已达20%,涂层硬质合金刀具已达40%。现在辅助工时因自动化而大大减少。刀具切削效率的提高,将使产量直接提高并明显降低成本,因此在数控加工中应尽量使用优质高效刀具。

(2) 数控刀具有高的精度和重复定位精度

现在,高精密加工中心的加工精度可以达到 $3\sim 5\mu\text{m}$,因此刀具的精度、刚度和重复定位精度必须和这样高的加工精度相适应。另外,刀具的刀柄与快换夹头间或与机床锥孔间的连接部分有高的制造、定位精度。所加工的零件日益复杂和精密,这就要求刀具必须具备较高的形状精度,对数控机床上所用的整体式刀具也提出了较高的精度要求。有些立铣刀其径向尺寸精度高达 $5\mu\text{m}$,以满足精密零件的加工需要。

(3) 刀具有很高的可靠性和耐用度

在数控机床上为了保证产品质量,对刀具实行强迫换刀或由数控系统对刀具寿命进行管

理，所以刀具工作的可靠性提高为选择刀具的关键指标。为满足数控加工及对难加工材料加工的要求，数控机床上所用刀具的材料应具有高的切削性能和很好的刀具耐用度，不但其切削性能要好，而且一定要性能稳定，同一批刀具在切削性能和刀具寿命方面不得有较大差异，以免在无人看管的情况下，因刀具先期磨损和破损造成加工工件的大量报废甚至损坏机床。

(4) 可实现刀具尺寸的预调和快速换刀

刀具结构应能预调尺寸，以达到很高的重复定位精度。如果数控机床采用人工换刀，则使用快换夹头。对于有刀库的加工中心，则实现自动换刀。

(5) 具有一个比较完善的工具系统及刀具管理系统

模块化工具系统能更好地适应多品种零件的生产，且有利于工具的生产、使用和管理，能有效地减少使用厂的工具储备。配备完善的、先进的工具系统是用好数控机床的重要一环。

加工中心和柔性制造系统出现后，刀具管理相当复杂，刀具数量多，要对全部刀具进行自动识别，记录其规格尺寸、存放位置、已切削时间和剩余切削时间等数据，还需要管理刀具的更换、运送，刀具的刃磨和尺寸预调等。

(6) 应有刀具在线监控及尺寸补偿系统

其作用是解决刀具损坏时能及时判断、识别并补偿，防止工件出现废品和意外事故。

1.3 数控刀具的失效形式及可靠性

1.3.1 数控刀具的常见失效形式及其解决方法

数控刀具的主要失效形式是磨损和破损，其损坏原因随刀具材料和工件材料的不同而不同，主要以磨损为主，但有的则是以破损为主，或者是磨损的同时伴有微崩刃损坏。随着切削速度的提高，切削温度升高，磨损的机理主要是黏结磨损和化学磨损（氧化和扩散）。脆性大的 PCD、CBN 和陶瓷刀具高速断续切削高硬材料时，通常是切削力和切削热综合作用下造成的崩刃、剥落和碎断形式的破损。对于以磨损为主而损坏的刀具，可按磨钝标准，根据刀具磨损寿命与切削用量和切削条件之间的关系，确定刀具磨损寿命。对于以破损为主而损坏的刀具，则应按刀具破损寿命分布规律，确定刀具破损寿命与切削用量和切削条件之间的关系。

在切削过程中，刀具磨损到一定限度，切削刃崩刃或破损，切削刃卷刃（塑变）时，刀具丧失其切削能力或无法保障加工质量，则称之为刀具失效。刀具破损的主要形式及产生原因和对策如下。

(1) 后面磨损

由机械应力引起的出现在后面上的摩擦磨损，如图 1-1 所示。

由于刀具材料过软，刀具的后角偏小，加工过程中切削速度太高、进给量太大，造成后面磨损过量，使得加工表面尺寸精度降低，增大摩擦力。应该选择耐磨性高的刀具材料，同时降低切削速度，减小进给量，增大刀具后角。这样才能避免或减少后面磨损现象的发生。

(2) 边界磨损

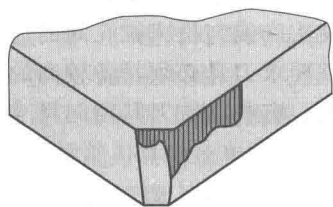


图 1-1 后面磨损

主切削刃上的边界磨损常见于与工件的接触面处。主要原因是工件表面硬化、锯齿状切屑造成的摩擦，影响切屑的流向并导致崩刃。只有降低切削速度和进给速度，同时选择耐磨刀具材料并增大前角使切削刃锋利。

(3) 前刀面磨损（月牙洼磨损）

在前刀面上由摩擦和扩散导致的磨损称为前刀面磨损。

前刀面磨损主要由切屑和工件材料的接触以及对发热区域

的扩散引起。另外，刀具材料过软，加工过程中切削速度太快，进给量太大，也是前刀面磨损产生的原因。前刀面磨损会使刀具产生变形、干扰排屑、降低切削刃强度。主要采用降低切削速度和进给速度，同时选择涂层硬质合金材料，来减少前刀面的磨损。

(4) 塑性变形

切削刃在高温或高应力作用下产生的变形称为塑性变形。

切削速度、进给速度太快以及工件材料中硬质点的作用，以及刀具材料太软和切削刃温度过高等现象是产生塑性变形的的主要原因。它将影响切屑的形成质量，有时也可导致崩刃。可以采取降低切削速度和进给速度。选择耐磨性高和热导率高的刀具材料，以减少塑性变形磨损的产生。

(5) 积屑瘤

工件材料黏附在刀具上的现象称为积屑瘤。

积屑瘤降低了加工表面质量并会改变切削刃形状最终导致崩刃。采取的对策有提高切削速度，选择涂层硬质合金或金属陶瓷等与工件材料亲和力小的刀具材料，并使用切削液。

(6) 刃口剥落

切削刃上出现一些很小的缺口，而非均匀的磨损。主要由于断续切削，切屑排除不流畅造成。应该在开始加工时降低进给速度，选择韧性好的刀具材料和切削刃强度高的刀片，就可以避免刃口剥落现象的产生。

(7) 崩刃

崩刃将损坏刀具和工件。主要原因是刃口的过度磨损和较高的应力，也可能由于刀具材料过硬，切削刃强度不够及进给量太大造成。应选择韧性好的合金材料，加工时减小进给量和切削深度，另外选用高强度或刀尖圆角较大的刀片。

(8) 热裂纹

热裂纹是断续切削时温度变化产生的垂直于切削刃的裂纹。热裂纹可降低工件表面质量并导致刃口剥落，应选择韧性好的合金材料，同时减小进给量和切削深度，并进行干式冷却或在湿式切削时有充足的冷却液。

1.3.2 刀具失效在线检测方法

在数控加工中，进行刀具失效的在线检测，可及时发出警报、自动停机并自动换刀，避免刀具的早期磨损或破损导致工件报废，防止损坏机床，减少废品的产生。

近年来国内外在刀具失效的在线检测方面做了大量的工作，发展了不少新的检测预报方法，有些方法已开始应用于生产。刀具失效的在线监测方法很多，有直接检测和间接检测，也有连续检测和非连续检测。在刀具切削过程中进行连续检测，能及时发现刀具损坏，但不少刀具很难实现在线连续检测，而在刀具非工作时间则容易检测，因此需要根据具体情况选择合适的刀具失效的在线监测方法。表 1-1 给出了当前刀具磨损破损检测方法，检测的特征量和所使用的传感器及应用场合。刀具磨损失效的在线监测是一项正在研究发展中的技术。

表 1-1 刀具磨损破损检测方法

检测方法		信号	特征量或处理方法	使用传感器	应用场合
直接检测	测切削刃形状、位置	光	将摄像机输出的图像数字化，然后进行计算等	工业电视、光传感器等	在线非实时监视多种刀具
	测切削力	力	切削力变化量或切削分力比率	测力仪	车、钻、镗削
间接检测	测电动机功耗	功率电流	主电动机或进给电动机功率、电流变化量或波形变化	功率计、电流计	车、钻、镗削等
	测刀杆振动	加速度	切削工程中的振动振幅变化	加速计	车、铣削等
	测声发射	声发射信号	刀具破损时声发射信号特征分析	声发射、传感器	车、铣、钻、拉、镗、攻螺纹

续表

检测方法		信号	特征量或处理方法	使用传感器	应用场合
间接检测	测切削温度	温度	切削温度的突发增量	热电偶	车削
	测工件质量	尺寸变化、表面粗糙度变化	加工表面粗糙度变化、工件尺寸变化	测微仪、光、气、液压传感器等	各种切削工艺

1.3.3 数控刀具的可靠性

提高刀具的可靠性，是数控加工对刀具最突出的要求。到目前为止，我国的刀具标准中只规定刀具的技术性能指标，而没有提出可靠性要求。由于材料性能的分散，制造工艺条件控制不严，有相当比例的刀具性能远低于平均性能，可靠性差。这不能适应现代技术发展的要求，更不能适应数控加工的要求。

使用刀具的首要问题是刀具的使用寿命（耐用度），它限制了切削用量的提高，限制了生存率的提高。由于刀具材料和工件材料性能的分散性，刀具制造工艺和工作条件的随机性，刀具耐用度有很大的随机性和分散性。所谓“刀具可靠性”是指刀具在规定的切削条件和时间内，完成额定工作的能力。刀具可靠性既有一定的平均数量特性，又有随机性的特点。因此研究刀具可靠性都采用数理统计和概率分析方法，通常用“可靠度”或“可靠耐用度”来作为刀具可靠性的评价指标。刀具可靠度是指刀具在规定的切削条件和时间内，能完成额定工作的概率，也就是刀具在已确定工作条件和切削规范下能完成预定的切削时间（耐用度）而刀具未损坏的概率。常用 $R(t)$ 来表示刀具的可靠度，用 $F(t)$ 表示相应的刀具损坏概率或不可靠度，有

$$R(t) + F(t) = 1 \quad (1-1)$$

刀具可靠度 t_r 是指刀具能达到规定的可靠度 r 时的耐用度（切削时间），即 $R(t_r) = r$ ，常用 t_r 来表示刀具的可靠度。

$$t_r = R^{-1}(r) \quad (1-2)$$

对于多刃刀具，只要有一齿损坏就认为刀具损坏，所以多齿刀具的可靠度 $R_Z(t)$ 低于单齿刀具的可靠度，表示为

$$R_Z(t) = [R(t)]^Z \quad (1-3)$$

使用上述公式可以进行刀具可靠度的评价和计算。

现今生产中刀具可靠耐用度的制定，大多数是根据过去长期生产积累的统计资料数据，初步确定某一可靠度和可靠耐用度，到时强制换刀，进行生产验证，再进行修改，最终确定实际采用的可靠耐用度。

1.3.4 数控刀具的选择原则

数控机床与普通机床相比，对刀具提出了更高的要求，不仅要求精度高、刚性好、装夹调整方便，而且要求切削性能强、耐用度高。因此，数控加工中刀具选择是非常重要的内容。刀具选择合理与否不仅影响机床的加工效率，而且还直接影响加工质量。

选择刀具通常要考虑机床的加工能力、工序内容、工件材料等多种因素。选用机床种类、型号、工件材料的不同以及其他因素的差异而造成的加工效果是不相同的。选择刀具时应考虑的因素如下。

- ① 被加工工件的材料及性能。如金属、非金属等不同材料，其硬度、耐磨性和韧性等。
- ② 被加工工件的几何形状、零件精度、加工余量等因素。
- ③ 切削工艺的类型。车、钻、铣、镗或粗加工、半精加工、精加工、超精加工等。
- ④ 要求刀具能承受的背吃刀量、进给速度、切削速度等切削参数。
- ⑤ 其他因素如生产的状况（操作间隔时间、振动、电力波动或突然中断等）。

第2章

数控刀具材料

先进的加工设备与高性能的数控刀具相配合，才能充分发挥其应有的效能，取得良好的经济效益。正确选择刀具材料是设计和选用刀具的重要内容之一，特别是对某些难加工材料的切削，刀具材料的选用显得尤为重要。随着刀具材料迅速发展，各种新型刀具材料，其物理、力学性能和切削加工性能都有了很大的提高，应用范围也不断扩大。

刀具材料不仅是影响刀具切削性能的重要因素，而且它对刀具耐用度、切削用量、生产率、加工成本等都有着重要的影响。因此，在机械加工过程中，不但要熟悉各种刀具材料的种类、性能和用途，还必须能根据不同的工件和加工条件，对刀具材料进行合理地选择。

近代刀具材料从碳素工具钢、高速钢发展到今天的硬质合金、陶瓷刀具和超硬材料，使切削速度从每分钟几米跃至千米的水平。刀具材料是决定刀具切削性能的根本因素，对于加工效率、加工质量、加工成本以及刀具耐用度有着重大的影响。要实现高效合理的切削，必须有与之相适应的刀具材料。

近年来，数控刀具材料基础科研和新产品的成果集中应用在高速、超高速、硬质（含耐热、难加工）、干式、精细、超精细数控机加工领域。刀具材料新产品的研发在超硬材料（金刚石、表面改性涂层材料、TiC基类金属陶瓷、立方氮化硼、 Al_2O_3 、 Si_3N_4 基类陶瓷），W、Co类涂层和细颗粒（超细颗粒）硬质合金基体及含Co类粉末冶金高速钢等领域进展速度较快。尤其是超硬刀具材料的应用，导致产生了许多新的切削理念，如高速切削、硬切削、干切削等。数控刀具的材料主要有高速钢、硬质合金、陶瓷、立方氮化硼和金刚石五类。

2.1 数控加工对刀具材料的要求

刀具材料是指刀具切削部分的材料。它的性能优劣是影响加工表面质量、切削效率、刀具寿命的重要因素。选用新型刀具材料不但能有效地提高切削效率、加工质量和降低成本，而且往往是解决某些难加工材料的工艺关键。切削加工时，刀具切削部分直接和工件及切屑相接触，承受着很大的切削压力和冲击，并受到工件及切屑的剧烈摩擦，产生很高的切削温度。也就是说，刀具切削部分是在高温、高压及剧烈摩擦的恶劣条件下工作的。因此，刀具材料应具备以下基本性能。

(1) 高硬度

刀具材料的硬度必须要高于被加工工件材料的硬度，否则在高温高压下，就不能保持刀具锋利的几何形状，这是刀具材料应具备的最基本特征。目前，切削性能最差的刀具材料——碳素工具钢，其硬度在室温条件下也应在62HRC以上；高速钢的硬度为63~70HRC；硬质合金的硬度为89~93HRA。

HRC和HRA都属于洛氏硬度，HRA硬度一般用于高值范围（大于70）。HRC硬度值的有效范围是20~70。60~65HRC的硬度相当于81~83.6HRA和687~830HV维氏硬度。