

第 1 章

机械加工方法

机械加工是指通过一种机械设备对工件的外形尺寸或性能进行改变的过程。随着现代机械加工的快速发展,对制造技术提出了更高的要求,逐渐涌现出许多先进的机械加工技术方法。本章对零件的成形原理、传统机械加工方法(如车、铣、刨、磨等)做了介绍,同时介绍了一些特种加工方法,如电火花加工、电解加工、超声波加工及激光加工等。

1.1 零件的成形原理

机器或设备中的零件要完成一定的功能,首先应该具备一定的形状。这些形状可以通过不同的成形原理来完成。不同的零件有不同的成形原理,按照零件由原材料或毛坯制造成零件的过程中质量 m 的变化,零件的成形原理可以分为以下三种。

1.1.1 材料成形工艺($\Delta m=0$)

进入工艺过程的物料的初始质量近似等于加工后的最终质量,即 $\Delta m=0$ 。铸造、压力加工、粉末冶金、注塑成形等方法多用于毛坯制造,但也可以直接成形成零件。材料成形工艺举例见表 1-1。

表 1-1 材料成形工艺举例

铸 造	原理:将液态金属浇注到型腔中来获得毛坯
	类型:砂型铸造、金属型铸造、压力铸造、离心铸造、熔模铸造
	特点:形状复杂,适应性广,成本低
锻 造	原理:对加热后的金属施加外力,使之产生塑性变形
	类型:自由锻、模锻、胎模锻、轧制和挤压等
	特点:力学性能高
粉末冶金	原理:金属、非金属粉末经模具压制、烧结等制成制品
	类型:等静压成形粉末冶金、金属喷射成形粉末冶金、压力烧结粉末冶金等
	特点:材料利用率高,生产率高,精度高

1.1.2 材料去除工艺($\Delta m<0$)

零件的最终几何形状是通过去除毛坯上的一部分材料,减少一部分质量达到的,即 $\Delta m<0$ 。常规加工方法如切削与磨削,特种加工如电火花加工、激光加工及电解磨削等。材料去除工艺举例见表 1-2。

表 1-2 材料去除工艺举例

切削加工	原理:刀具切削工件毛坯上的多余金属
	类型:车削、铣削、刨削、钻削、镗削等常规机械加工方法
	特点:生产效率高,切削过程平稳,刀具简单
磨削加工	原理:砂轮磨去工件上多余的金属
	类型:内外圆磨削、平面磨削、成形磨削等
	特点:加工精度高,表面质量好,可加工淬硬表面
特种加工	原理:利用电能、热能、化学能、光能、声能等去除工件材料
	类型:电火花加工、电解加工、激光加工、超声波加工、水喷射加工、电子束加工、离子束加工等
	特点:以柔克刚

1.1.3 材料累积工艺($\Delta m > 0$)

传统的材料累积方法有焊接、铆接、电镀等,通过这些不可拆卸联接使物料结合成一个整体,形成零件($\Delta m > 0$),称为材料累积工艺。近几年发展起来的快速成形制造技术(RPM),是材料累积工艺的新发展。

以上工艺特点不同,适用场合不同。

1.2 传统机械加工方法

采用传统的机械加工方法获得零件形状,是通过机床利用刀具将毛坯上多余的材料切除获得的。根据机床运动的不同和刀具的不同,可分为不同的加工方法,主要有车削、铣削、刨削、钻削、镗削、齿面加工、复杂曲面加工、磨削等。本节对这些主要加工方法进行介绍。

1.2.1 车削

1. 车削的定义

车削是以工件旋转为主运动、车刀移动为进给运动,刀尖的运动轨迹在工件回转面上,切除一定的工件材料,从而形成所要求的工件形状的加工方法。

2. 车削的特点

车削的主要特点如下:

(1)易于保证各加工面的位置精度和同轴度。车削时,工件绕某一固定轴回转,各表面具有相同的回转轴线,所以,各加工表面的位置精度容易控制和保证。

(2)易于保证端面与轴线的垂直度要求。

(3)切削过程比较平稳,避免了惯性力与冲击力,允许采用较大的切削用量,高速切削利于生产率提高。一般情况下车削过程是连续的,当刀具几何形状和进给量一定时,切削层的截面尺寸稳定不变,切削面积不变,切削过程比较稳定。又由于车削的主运动为回转运动,避免了惯性力和冲击的影响,所以,车削允许采用较大的车削用量,进行高速切削或强力切削,有利于生产率的提高。

(4)适用于有色金属零件的精加工。有色金属零件表面粗糙度(Ra 值)大,当 Ra 值要求较小时,不宜采用磨削加工,需要用车削或铣削等。用金刚石车刀进行精细车时,可达较高质量。

(5) 刀具简单, 刀具的制造、刃磨和安装都比较方便。车削加工的精度一般为 IT8~IT7, Ra 值为 $6.3 \sim 1.6 \mu\text{m}$ 。精车时, 加工精度可达 IT6~IT5, Ra 值可达 $0.4 \sim 0.1 \mu\text{m}$ 。

3. 车削加工的范围

车削加工的范围如图 1-1 所示。

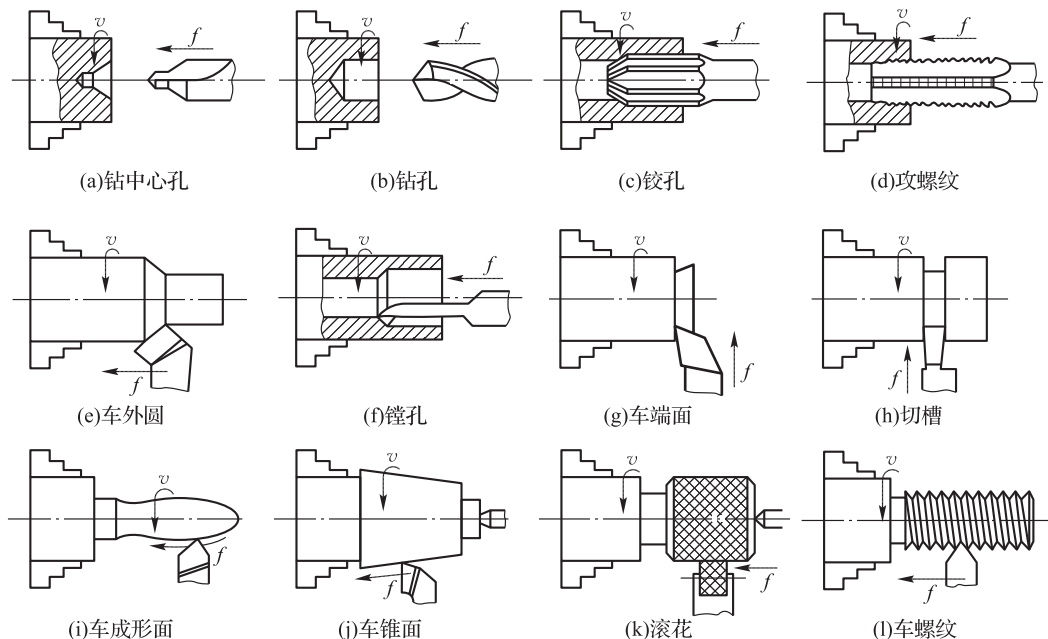


图 1-1 车削加工的范围

4. 车削的实际应用

车削常用来加工单一轴线的零件, 如直轴和一般盘、套类零件等。若改变工件的安装位置或将车床适当改装, 还可以加工多轴线的零件(如曲轴、偏心轮等)或盘形凸轮。在单件小批生产中, 各种轴、盘、套类等零件多选用适应性广的卧式车床或数控车床进行加工; 直径大而长度短的大型零件, 多用立式车床加工。在成批生产外形较复杂, 具有内孔及螺纹的中小型轴、套类零件时, 应选用转塔车床进行加工。在大批量生产形状不太复杂的小型零件, 如螺钉、螺母、管接头、轴套类等时, 多选用半自动和自动车床进行加工。

1.2.2 铣削

1. 铣削的定义

铣削是指使用旋转的多刃刀具切削工件, 是高效率的加工方法。工作时刀具旋转形成主运动, 工件移动做进给运动, 工件也可以固定, 但此时旋转的刀具还必须移动(同时完成主运动和进给运动)。如图 1-2 所示, 用分布于铣刀端平面上的刀齿进行的铣削称为端铣, 用分布于铣刀圆柱面上的刀齿进行的铣削称为周铣。

2. 铣削的特点

铣削的主要特点如下:

(1) 生产率较高。铣刀是典型的多刃刀具, 铣削时有几个刀刃同时参加工作, 总的切削宽度较大导致切削力大, 但加工精度较低。铣削的主运动是铣刀的旋转, 有利于采用高速铣削, 所以, 铣削的生产率一般比刨削高。

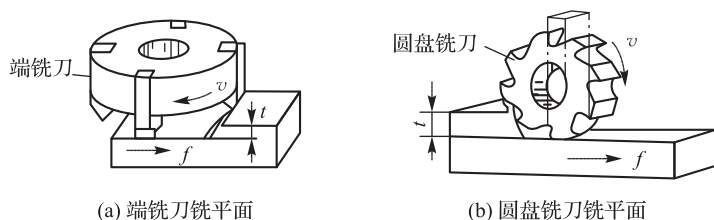


图 1-2 端铣和周铣

(2)容易产生振动。在切削时,铣刀的刀刃在切入和切出时会与工件产生冲击,并引起同时工作刀刃数的变化;在切削过程中,每个刀刃的切削厚度在切出时是变化的,这将使切削力发生变化。因此,铣削过程不平稳,容易产生振动。铣削过程的不平稳性,限制了铣削加工质量,影响了生产率的进一步提高。

(3)散热条件较好。铣刀刀刃间歇切削,排屑顺利,也易于冷却液进入,可以得到一定的冷却,因而散热条件较好。但是,切入和切出时热的变化、力的冲击,将加速刀具的磨损,甚至可能引起硬质合金刀片的碎裂。

(4)加工成本较高。由于铣床自身结构比较复杂,铣刀的制造和刃磨也较困难,因此,加工动力和刀具的费用较大。

3. 逆铣和顺铣

铣刀进入工件时切削速度的方向与工件的进给方向相反,称为逆铣[见图 1-3(a)]。逆铣时,切削厚度从零开始逐渐增大,因而切削刃开始经历一段在切削硬化的已加工表面上的挤压滑行阶段,会加剧刀具的磨损;同时,铣削力有将工件上抬的趋势,容易引起振动。

铣刀进入工件时切削速度的方向与工件的进给方向相同,称为顺铣[见图 1-3(b)]。顺铣时,铣削力的水平分力方向与工件的进给方向相同,而工作台进给丝杠与固定螺母之间一般有间隙存在,因此,切削力容易引起工件和工作台一起向前窜动,使进给量突然增大,容易引起打刀。且在顺铣铸件等表面有硬度的工件时,铣刀齿首先接触工件的硬皮,加剧了刀具的磨损。

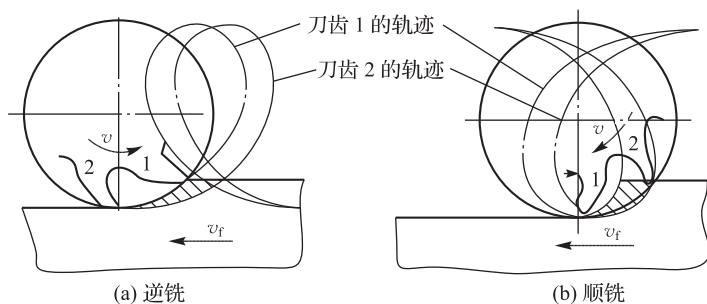


图 1-3 逆铣和顺铣

4. 铣削的范围

铣削的加工精度一般为 IT8~IT7,表面粗糙度值为 $6.3 \sim 0.8 \mu\text{m}$ 。普通铣削一般可以加工平面或者凹槽面等;用成形铣刀也可以加工出特殊曲面,如铣削齿轮等;数控铣床可以通过数控系统控制几个轴按一定关系联动,铣出复杂曲面来。铣削的加工范围如图 1-4 所示。

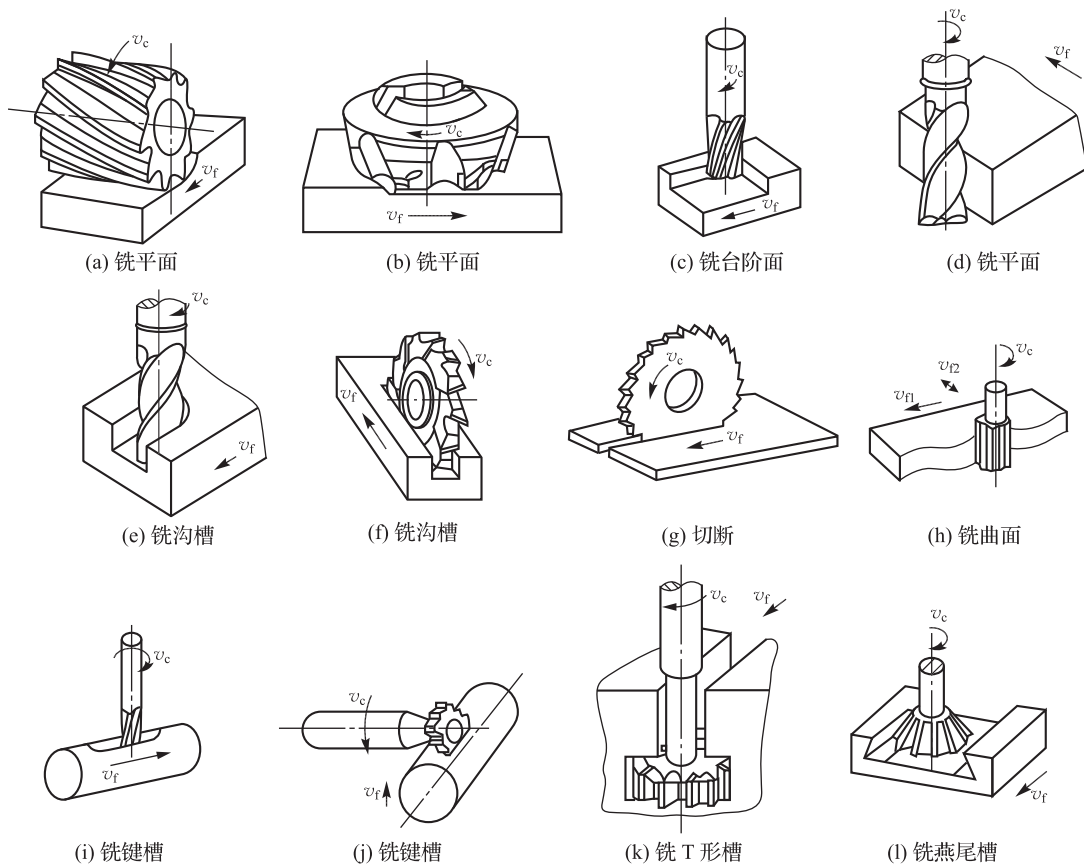


图 1-4 铣削的加工范围

1.2.3 刨削

刨削加工是用刨刀对工件做水平相对直线往复运动的切削加工方法,主要用于零件的外形加工。

1. 刨削加工的工艺特点

刨削加工如图 1-5 所示,其工艺特点如下:

(1)通用性好,可加工垂直、水平的平面,还可加工 T 形槽、V 形槽、燕尾槽及窄长的平面。

(2)生产率低,往复运动,惯性大,限制速度,单次加工,但狭长表面加工时效率不比铣削低。

(3)加工精度不高,精度为 IT8~IT7, R_a 值为 $6.3 \sim 1.6 \mu\text{m}$;但在龙门刨床上用宽刀细刨时, R_a 值为 $0.8 \sim 0.4 \mu\text{m}$ 。刨削加工是一个断续切削的过程,在刨刀开始切入时有冲击,切削不平稳。刨床结构简单,调整、操纵方便;刨刀制造、刃磨、安装容易,加工精度低;刨削加工切削速度低,加之空行程所造成的损失,生产率一般较低。

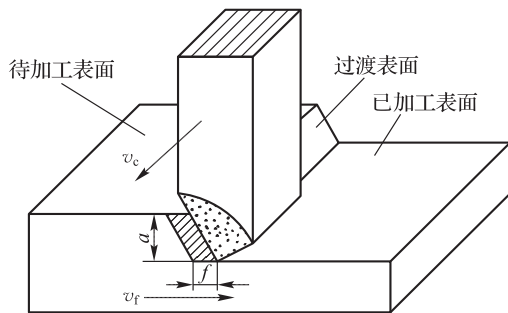


图 1-5 刨削加工

2. 刨削的应用

由于刨削的特点,刨削主要用在单件、小批生产中,在维修车间和模具车间应用较多。刨

削主要用来加工平面(包括水平面、垂直面和斜面),也广泛地用于加工直槽,如直角槽、燕尾槽和 T 形槽等。如果进行适当的调整和增加某些附件,刨削还可以用来加工齿条、齿轮、花键和母线为直线的成形面等。

1.2.4 钻削

钻削通常用于加工尺寸较小,精度要求不太高的孔。钻削可完成钻孔、扩孔、铰孔、攻螺纹、铰孔等孔的加工,如图 1-6 所示。钻床主要包括立式钻床、台式钻床、摇臂钻床、坐标镗钻床、深孔钻床、卧式钻床、铣钻床和中心钻床,其中使用最广泛的是立式钻床和摇臂钻床。钻孔常见缺陷分析及安全防范要求如下:

(1)孔径大于规定尺寸。钻头两主切削刃长短不等、顶角与钻头线不对称、钻头摆动(钻床主轴本身摆动、钻头夹装不正确和钻头弯曲)等因素引起钻削孔径大于规定尺寸。

(2)钻孔偏移。画线不准确、钻孔时开始未对正、工件装夹不稳固、钻头横刃太长、移动孔距不准确等因素引起钻孔偏移。

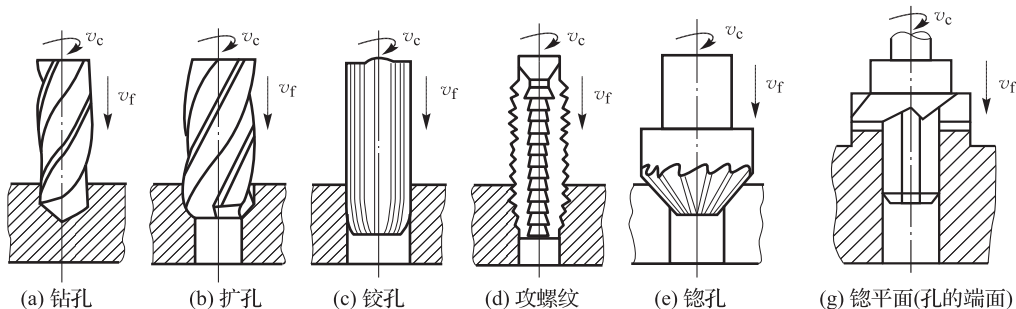


图 1-6 钻床加工方法

1.2.5 镗削

1. 镗削的定义

镗削是一种用刀具扩大孔或其他圆形轮廓的内径车削工艺,其应用范围一般从半粗加工到精加工,所用刀具通常为单刃镗刀(镗杆)。

镗削加工通常作为大直径和箱体零件上的孔的半精加工或精加工工序,其切削运动由刀具回转来实现,进给运动可通过工件或刀具的移动来完成。在卧式镗床上可以完成钻、镗孔、车外圆、车螺纹、车端面、铣平面、斜面、各类槽、内孔、孔端面、平行面、倒角、钻孔、同轴孔等。

2. 镗削加工的特点

镗削运动时,镗刀随镗杆一起转动形成主切削运动,而工件不动。

用镗刀对已有的孔进行再加工,称为镗孔。对于直径较大的孔($D > 80 \sim 100 \text{ mm}$)、内成形面或孔内环槽等,镗削是唯一合适的加工方法。

一般镗孔精度达 IT8~IT7,表面粗糙度值为 $1.6 \sim 0.8 \mu\text{m}$ 。

精细镗时,精度可达 IT7~IT6,表面粗糙度值为 $0.8 \sim 0.1 \mu\text{m}$ 。镗孔可以在多种机床上进行,如图 1-7 和图 1-8 所示。

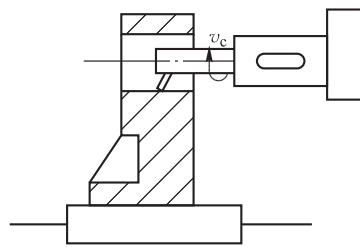


图 1-7 镗床镗孔

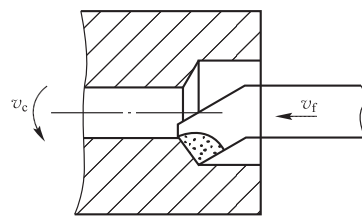


图 1-8 车床镗孔

回转体零件上的孔多在车床上加工,箱体类零件上的孔或孔系(要求相互平行或垂直的若干个孔)则常用镗床加工。本节介绍的主要是在镗床上镗孔。

1.2.6 齿形加工

齿轮齿形比较复杂,因此加工起来较为困难。加工齿轮齿形的时候,应根据其精度要求确定好齿轮加工工艺过程。

按齿形形成的原理不同,齿形加工可以分为两类方法:一类是成形法,用与被切齿轮齿槽形状相符的成形刀具切出齿形,如拉齿和成形磨齿等;另一类是展成法,齿轮刀具与工件按齿轮副的啮合关系做展成运动,工件的齿形由刀具的切削刃包络面形成,如滚齿和插齿。

滚切直齿圆柱齿轮时的运动如图 1-9 所示。

(1)主运动为滚刀的旋转。

(2)展成运动为保持滚刀与被切齿轮之间啮合关系的运动。这一运动使滚刀切削刃的切削轨迹连续,包络形成齿轮的渐开线齿形,并连续地进行分度。

(3)轴向进给运动是为了在齿轮的全齿宽上切出齿形,滚刀需沿工件轴向做进给运动。

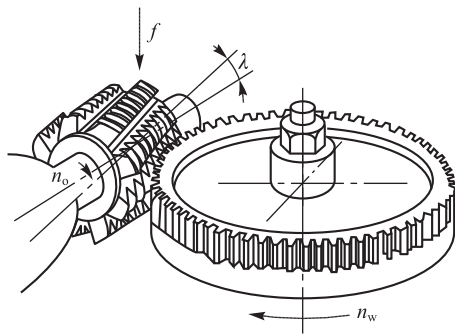


图 1-9 滚切直齿圆柱齿轮时的运动

1.2.7 复杂曲面加工

1. 复杂曲面加工的定义

除前面讨论过的外圆、内孔表面(同属旋转表面)的加工及平面加工以外,在机械制造中,曲面加工也占有一定比例。螺旋桨的表面、涡轮叶片表面、复杂模具型腔面等,其表面形状比较复杂,不能用基本立体要素(如棱柱、棱锥、球等)描述,通常称为复杂曲面。

2. 常用加工方法及其特点

随着数控加工技术的发展及数控加工设备的普及,特别是随着 CAD/CAM 和计算机辅助编程技术的发展,数控铣削现在已经成为复杂曲面切削加工最主要的方法。在数控铣床或加工中心上加工曲面时,由加工程序控制机床运动,使球头铣刀逐点按曲面三维坐标加工,被加工曲面是球头铣刀刃形在各点切削时形成的包络面。

曲面加工程序,一般情况下,可由 CAD/CAM 集成软件包(大型商用 CAD 软件都有 CAM 模块)自动生成;特殊情况下,还要二次开发。

采用数控加工中心的优点是:加工中心上有刀库,配备十几把刀具,对于曲面的粗、精加工及凹曲面的不同曲率半径的要求,都可以选到合适的刀具;同时,通过一次装夹可完成各主要表面及辅助表面(如孔、螺纹、槽等)的加工,有利于保证各加工表面的相对精度。

1.2.8 磨削

1. 磨削的定义

磨削是指用磨料、砂轮及其他磨具切除工件上多余材料的加工方法。磨削加工是应用较为广泛的切削加工方法之一。在磨削中,磨粒本身也会由尖锐逐渐磨钝,使切削能力变差、切削力变大。当切削力超过黏结强度时,磨钝的磨粒会脱落,露出一层新的磨粒,这就是砂轮的自锐性。如图 1-10 所示,磨削时,加工对象不同其所需运动也不同,归结起来一般有四个运动,即主运动、径向进给运动、轴向进给运动和工件运动。

砂轮表面的磨粒在切入工件时,其作用大致可分为滑擦阶段、刻划阶段和切削阶段。由于砂轮表面磨粒高低分布不均,每个磨粒的切削厚度也不相同,因此,有些磨粒切削工件形成切屑,有些磨粒只在工件表面刻划、滑擦,从而产生很高的温度,引起工件表面的烧伤及裂纹。磨粒的切削过程如图 1-11 所示。

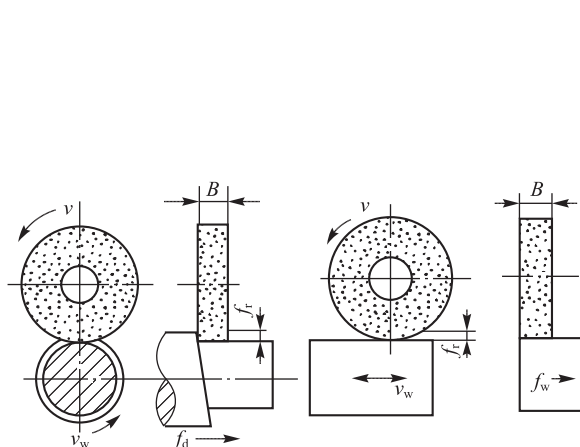


图 1-10 磨削时的运动

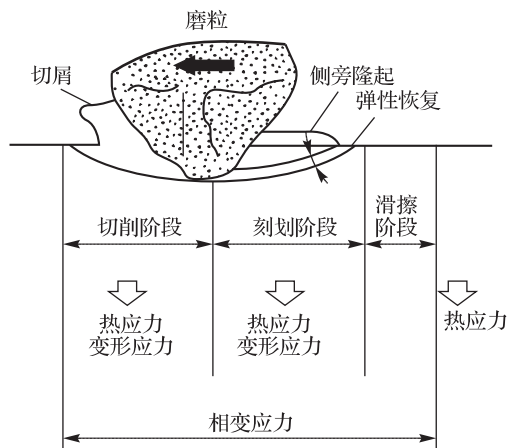


图 1-11 磨粒的切削过程

2. 磨削加工的特点

磨削与其他切削加工方式如车削、铣削、刨削等比较,具有以下特点:

- (1)磨削速度很高,可达 30~50 m/s;磨削温度较高,可达 1 000~1 500 °C;磨削过程历时很短,只有万分之一秒左右。
- (2)磨削加工可以获得较高的加工精度和很小的表面粗糙度值。
- (3)磨削不但可以加工软材料,如未淬火钢、铸铁等,而且可以加工淬火钢及其他刀具不能加工的硬质材料,如瓷件、硬质合金等。
- (4)磨削时的切削深度很小,在一次行程中所能切除的金属层很薄。

3. 磨削加工的方法

磨削加工可按不同的方法进行不同的划分:

- (1)按磨削精度,磨削加工可分为粗磨、半精磨、精磨、镜面磨削和超精加工。
- (2)按进给形式,磨削可分为切入磨削、纵向磨削、缓进给磨削、无进给磨削、定压研磨和定量研磨。
- (3)按磨削形式,磨削可分为砂带磨削、无心磨削、端面磨削、周边磨削、宽砂轮磨削、成形磨削、仿形磨削、振荡磨削、高速磨削、强力磨削、恒压力磨削、手动磨削、干磨削、湿磨削、研磨、珩磨等。
- (4)按加工表面,磨削可分为外圆磨削、内圆磨削和平面磨削。

除此之外,磨削加工还有多种划分方法,如按磨削中使用的磨削工具的类型可分为固结磨粒磨具的磨削和游离磨粒的磨削,固结磨粒磨具的磨削主要包括砂轮磨削、珩磨、砂带磨削、电解磨削等。

4. 磨削加工的范围

磨床能加工硬度较高的材料,如淬硬钢、硬质合金等;也能加工脆性材料,如玻璃、花岗石。磨床能做高精度和表面粗糙度值很小的磨削,也能进行高效率的磨削,如强力磨削等。

1.3 特种加工

传统的机械加工方法的本质是“以硬克软”,即由“硬”的刀具对“软”的被加工表面施以机

械力,使之变形和分离,以达到加工的目的。从本质中可以看出,刀具材料的硬度必须大于零件材料的硬度,要靠机械能把零件上多余的金属材料切除;但是许多工业部门,尤其是国防及尖端科学研究部门的高、精、尖、新的产品不断涌现,产品的特殊结构越来越多,必须找到以柔克刚的加工方法——特种加工来完成难切削材料、具有特殊复杂表面和特殊要求的零件加工。

特种加工也称为非传统加工,它指的是直接借助化学能、光能、电能、热能、电化学能及特殊机械能等方法对材料进行加工的工艺方法。特种加工具有以下优点:

(1)特种加工主要不使用机械能,而是利用其他能量(化学能、光能、电能、声能、热能、电化学能等)加工材料。

(2)加工范围不受材料的限制,可以加工任何硬的、脆的、耐热的或高熔点的金属或非金属材料。

(3)在特种加工过程中,工件与工具之间没有明显的机械切削力,因而适合于加工薄壁件、弹性件,更适合于进行高精度和微细加工。

(4)特种加工可以很方便地解决各种微孔、异形孔、窄缝、各种模具上的特殊型腔和孔槽等具有特殊或复杂表面零件的加工。

特种加工的方法有很多,一般按照能量来源和作用形式及加工原理来进行划分。常用特种加工方法见表 1-3。

表 1-3 常用特种加工方法

特种加工方法		能量来源及形式	作用原理	主要适用范围
电火花加工	电火花成形加工	电能、热能	熔化、汽化	各种冲压锻模及三维成形曲面加工
	电火花线切割加工	电能、热能	熔化、汽化	各种冲模及二维曲面成形切割
电化学加工	电解加工	电化学能	金属离子阳极溶解	锻模及各种二维、三维成形表面加工;硬质合金等难加工材料的磨削
	电解磨削	电化学能、机械能	阳极溶解、磨削	
	电解研磨	电化学能、机械能	阳极溶解、研磨	
	电铸	电化学能	金属离子阴极沉积	
	涂镀	电化学能	金属离子阴极沉积	
激光加工	激光切割、打孔	光能、热能	熔化、汽化	精密加工小孔、小缝及成形切割等
	激光打标	光能、热能	熔化、汽化	
	激光处理、表面改性	光能、热能	熔化、相变	
电子束加工	切割、打孔、焊接	电能、热能	熔化、汽化	精密加工小孔、小缝及成形切割等
离子束加工	蚀刻、镀覆、注入	电能、动能	原子撞击	表面超精加工、蚀刻
等离子弧加工	切割(喷镀)	电能、热能	熔化、汽化(涂覆)	各种材料的切割
超声波加工	切割、打孔、雕刻	声能、机械能	磨料高频撞击	石英、玻璃、半导体、硬质合金的加工
化学加工	化学铣削	化学能	腐蚀	零件表面减薄、异形孔、抛光和光刻加工
	化学抛光	化学能	腐蚀	
	光刻	光能、化学能	光化学腐蚀	

1.3.1 电火花加工

电火花加工又称为放电加工,是使用最广泛的一种特种加工方法,在 20 世纪 40 年代开始研究并应用于生产中。

1. 电火花加工的工作原理

电火花加工是指在一定电解质溶液中,将工具电极和零件分别接于电源的两极,并在其间施加脉冲电压,通过工具电极与零件电极之间不断产生的脉冲性火花放电,瞬时产生高温,把零件电极表面的金属局部熔化,甚至汽化蒸发而被蚀除掉。这样一种对零件进行加工的方法称为电火花加工。其工作原理示意图如图 1-12 所示。

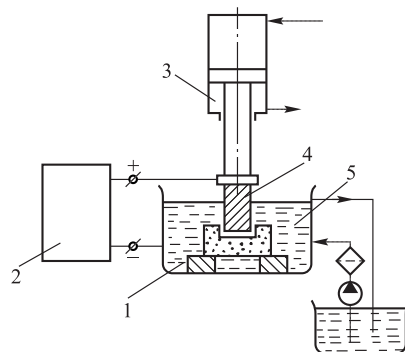


图 1-12 电火花加工工作原理示意图

1—零件；2—脉冲电源；3—自动进给调节装置；
4—工具电极；5—工作液

电火花加工在专用的电火花加工机床上进行,工件固定在机床工作台上,脉冲电源为加工提供所需要的能量,电源两极分别接在工具电极和工件上。当工具电极和工件相互靠近时,极间电压击穿间隙产生火花放电,释放大量的热,工件表层吸收热量以后达到很高的温度,局部材料因为熔化而被蚀除,形成一个微小的凹坑。多次放电的结果是工具电极的轮廓形状被“复印”到工件上。

2. 电火花加工的特点

电火花加工是靠局部的热效应实现加工的。与切削加工相比,其具有以下特点:

(1)电火花加工不受零件材料的力学性能限制,可加工任何硬、脆、韧、软、高熔点、高强度的导电材料。

(2)加工时,电源两极不直接接触,不存在显著的机械力,不会造成零件受力变形。电火花加工适用于加工小孔、薄壁、窄槽及各种复杂截面的型孔和型腔等,且加工质量好。

(3)脉冲参数调整方便,在同一台机床上可连续进行粗加工、半精加工和精加工。精加工时精度可达 $\pm 0.01 \text{ mm}$,表面粗糙度值可达 $1.25 \sim 0.8 \text{ } \mu\text{m}$;微精加工时精度可达 $0.004 \sim 0.002 \text{ mm}$,表面粗糙度值可达 $0.16 \sim 0.05 \text{ } \mu\text{m}$ 。

(4)加工时不受热影响。由于电火花加工时的脉冲能量是间歇地用极短的时间作用在材料上,而工作液又是流动的,能起到散热的作用,因而保证了加工时不受热变形的影响。

(5)电火花加工不需要复杂的切削运动便可以加工形状复杂的零件表面,易于实现加工的自动化。

(6)电火花加工需要制造精度高的电极,且在加工过程中存在一定的电极损耗,增加了加工成本,降低了加工精度。电火花加工只能对导电材料进行加工,限制了它的应用范围。

3. 电火花加工的应用

电火花加工有以下应用:

(1)电火花穿孔加工。电火花穿孔常用于加工冷冲模、拉丝模、喷嘴和喷丝孔等零件上的各种孔(圆孔、方孔、多边孔、异形孔等),如图 1-13 所示。

(2)电火花型腔加工。电火花型腔加工主要用于锻模、压铸模、挤压模、注塑模等的型腔加工,以及叶轮、叶片等曲面的加工。

(3)电火花线切割加工。如图 1-14 所示,电火花线切割加工简称线切割加工,利用移动着

的细金属丝(钼丝或黄铜丝)做工具电极,零件为阳极,对零件进行脉冲火花放电,按预定的轨迹进行切割加工,切割各种复杂型孔(或裁模),也可加工零件或工具。

(4)能进行电火花磨削内孔。

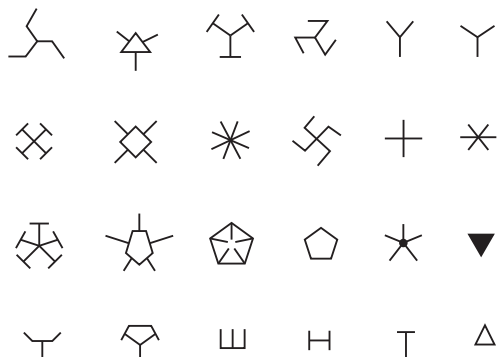


图 1-13 电火花可加工的异形孔的径向截面

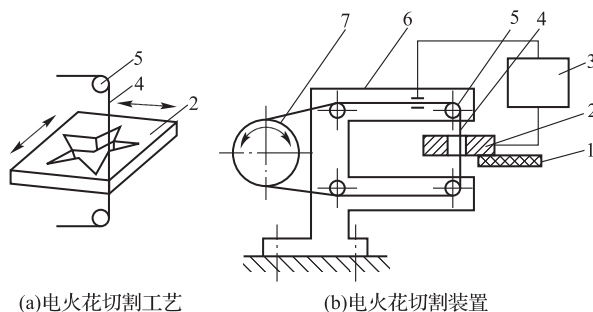


图 1-14 电火花线切割加工工作原理

1—绝缘底板; 2—零件; 3—脉冲电源; 4—电极丝;
5—导向轮; 6—支架; 7—储丝筒

1.3.2 电解加工

电解加工属于电化学加工,目前主要在枪炮、航空、汽车、拖拉机等制造工业和模具制造行业应用较广泛。

1. 电解加工的工作原理

电解加工是利用金属零件在电解液中产生阳极溶解的电化学原理来对零件进行成形加工的一种方法。图 1-15 为电解加工过程示意图。加工时,零件接直流电源(10~20 V)的正极作为阳极,工具接电源的负极作为阴极,通过工具电极缓慢地向零件进给,两极之间保持一较小的间隙(0.1~0.8 mm),工作时通以 5~20 V 的工作电压和 5~200 A/mm² 的大工作电流;在间隙中高速流过(5~60 m/s)具有一定压力(1~3 MPa)的电解液。在加工过程中,零件上与工具阴极相对的表面的金属材料不断地进行阳极溶解。这些溶解产物不断地被高速流动的电解液冲走,使阳极溶解不断进行。

图 1-16 为电解加工成形原理示意图。图中的细竖直线表示通过工具和零件电极之间的电流,竖线的疏密程度表示电流密度的大小。在加工刚开始时,工具电极凸出部位与零件的被加工表面之间的距离较近,通过此处的电流密度就大

[见图 1-16(a)],电解液的流速也较高。根据法拉第定律可知,金属阳极的溶解量与通过的电量成正比,所以,零件阳极处的溶解速度较快。随着工具阴极不断向零件阳极进给,零件不断按工具型面的形状溶解,电解产物不断被电解液冲走,直到零件表面形状与工具工作面基本相似为止,从而达到成形加工的目的,如图 1-16(b)所示。

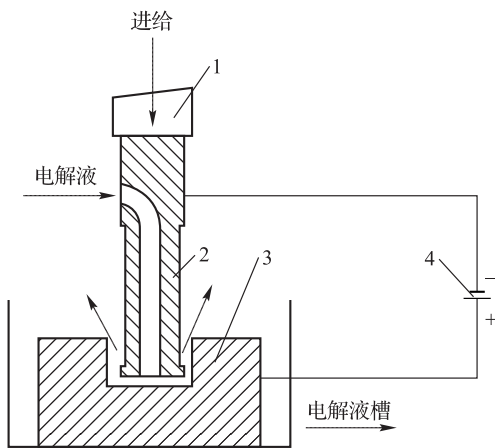


图 1-15 电解加工过程示意图

1—电极进给机构; 2—工具(阴极);
3—零件(阳极); 4—直流电源

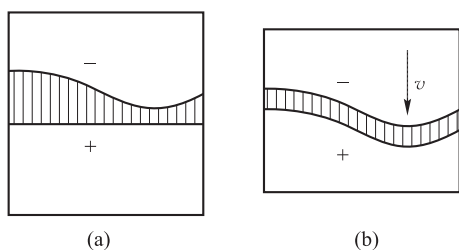


图 1-16 电解加工成形原理

2. 电解加工的特点及应用

电解加工具有以下特点及应用：

(1)加工范围广,不受金属材料本身的硬度、强度等力学性能的影响,能加工硬质合金、淬火钢、耐热合金等各种高强度、高硬度、高韧性的金属材料,加工各种模具的复杂型腔,加工各种孔(花键孔、六方孔、内齿轮、深孔等),加工各种型面(汽轮机、航空发电机的叶片等)。

(2)加工质量好。由于电解加工过程中不存在机械切削力和切削热,因此不会产生由切削力所引起的残余应力和变形,加工表面没有飞边和毛刺,能获得较好的加工精度,其表面粗糙度可达 $1.25 \sim 0.2 \mu\text{m}$,平均尺寸精度可达 IT9~IT8。

(3)在加工过程中,工具电极基本上没有损耗,这对保持工具型面和工件型面的精度是非常重要的。

(4)只能加工能电解的金属材料,加工不出棱边、棱角。

(5)由于影响电解加工的参数很多且很难控制,因此不易达到较高的加工精度和加工稳定性。

电解加工的主要缺点是:设备投资大,耗电量大;电解液有腐蚀性,需对设备采取防护措施,对电解产物也需妥善处理,以防止污染环境。一般在加工难加工材料、型面复杂、批量大的零件时才采用电解加工。

1.3.3 超声波加工

1. 超声波加工的工作原理

超声波加工是利用做超声频振动的工具端面,带动零件与工具之间的磨料悬浮液,冲击和抛磨加工硬脆材料的一种成形方法。其加工原理如图 1-17 所示。加工时,将液体(普通水或煤油)与磨粒(碳化硅、氧化铝、碳化硼或金刚石粉)混合的磨料悬浮液,在压力作用下注入工具与零件之间的加工区内,并让工具头以很小的加工力轻轻压在零件上。超声波发生器将工频交流电能转变为有一定功率输出的超声频电振荡,通过能量转换器将其转变为超声频机械振动。但此时振动的幅度很小,不能直接用来对零件进行加工,需通过振幅扩大棒将振幅放大到 $0.05 \sim 0.1 \text{ mm}$,驱动工具端面做超声频振动($16 \sim 25 \text{ kHz}$),从而迫使工作液中悬浮的磨粒以很大的速度和加速度不断冲击、抛磨被加工表面,把被加工表面的材料粉碎成很细的微粒,从零件上被打下来;同时,当工具端面以很大的加速度向上运动离开工作表面时,加工间隙中的工作液由于负压和局部真空的作用形成了许多微空腔,当工具端面再以很大的加速度向下运动接近零件表面时,空腔闭合,产生压力极大的液压冲击波,这种现象称为“超声空化”。在高频、交变的液压正负冲击波和超声空化作用下,工作液钻入被加工材料的微裂缝处,加剧了机械破坏作用。随着工作液的循环流动,磨料不断更新并带走被粉碎下来的零件材料微粒。工具不断进给,逐步深入到零件中。最后,工具的形状便复印在零件上。因此,超声波加工过程

是磨粒在工具端面的超声振动下,以机械撞击和抛磨为主,以超声空化为辅的综合作用过程。

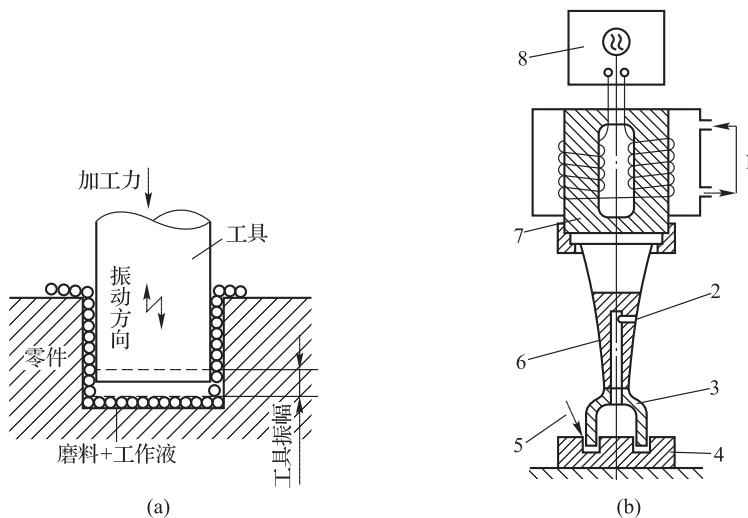


图 1-17 超声波加工原理示意图

1—超声波发生器; 2—磨料悬浮液进口; 3—工具; 4—零件; 5—磨料悬浮液;
6—振幅扩大棒; 7—能量换能器; 8—电源

2. 超声波加工的特点及应用

超声波加工具有以下特点及应用:

- (1)加工范围广,适合加工各种硬而脆的金属或非金属材料。
- (2)加工精度好,其表面粗糙度可达 $0.8 \sim 0.1 \mu\text{m}$,尺寸精度可达 IT6~IT5。
- (3)超声波可用于孔、型腔加工等各种类型的零件,如图 1-18 所示。
- (4)超声波还可用于切割硬脆的半导体材料加工。

超声波加工不但能加工硬质合金、淬火钢等硬脆导电材料,而且更适合加工玻璃、陶瓷、宝石、金刚石和半导体等不导电的硬脆非金属材料。超声波加工零件的类型如图 1-18 所示。

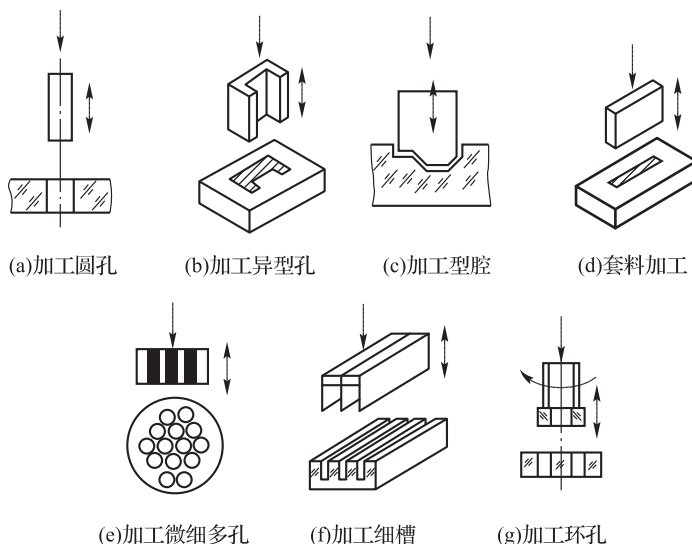


图 1-18 超声波加工零件的类型

1.3.4 激光加工

激光是一种亮度高、方向性好、单色性好的相干光。激光加工因不需要加工工具,具有加工速度快、效率高、表面变形小、可以加工各种硬脆和难溶的材料等特点,所以应用非常广泛。

1. 激光加工的工作原理

激光加工是指利用光能经过透镜聚焦后,形成功率密度极高的激光束,照射在零件的加工表面上,依靠光热效应来加工各种材料的一种加工方法。

当把激光束照到零件的加工表面时,光能被零件吸收并迅速转化为热能,温度高达 $10\,000\text{ }^{\circ}\text{C}$ 以上,使材料瞬间(千分之几秒或更短的时间)熔化甚至汽化而形成小坑。随着激光能量的不断吸收和热扩散,小坑周围的材料也熔化,材料小坑内的金属蒸气迅速膨胀,压力突然增大而产生微型爆炸,在冲击波的作用下将熔融材料喷射出去,并在零件内部产生一个方向性很强的反冲击波,于是在零件加工表面打出一个具有一定锥度(上大下小)的小孔。图 1-19 为固体激光加工原理示意图。

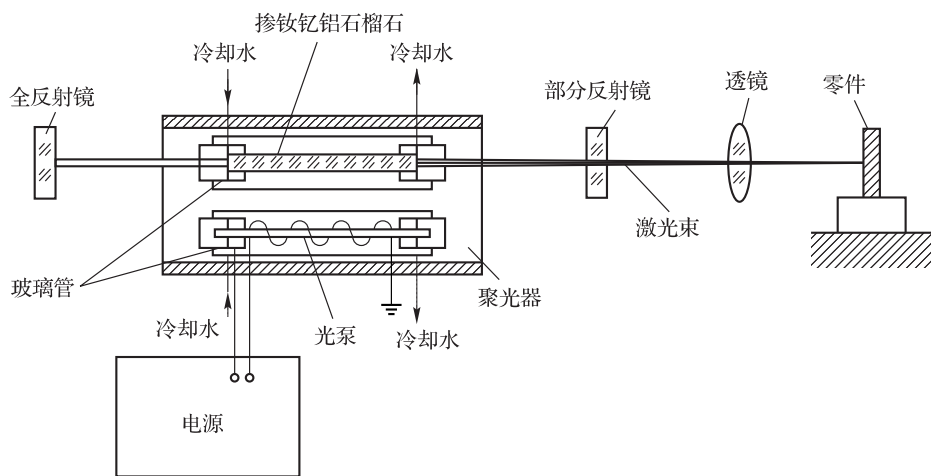


图 1-19 固体激光加工原理示意图

2. 激光加工的特点及应用

激光加工具有以下特点及应用:

(1)加工范围广。由于激光加工的功率密度高,几乎可以加工各种金属和非金属材料。其特别适用于加工高熔点材料、耐热合金、陶瓷、石英、金刚石、硬质合金、宝石等硬脆材料。

(2)激光可以通过聚焦后形成微米级的光斑,又可以调节输出功率的大小,所以可用于精密微细加工,如加工直径为 0.01 mm 的小孔和窄缝切割加工等。

(3)激光加工是高能束流的非接触加工,所以无明显的机械力,也没有工具损耗。其加工速度快(打一个孔只需 0.001 s),热影响区小,易实现加工过程自动化。

(4)加工性能好,零件可以离开加工机进行加工,激光能通过透视窗孔对隔离室或真空室内的零件进行加工。

(5)激光加工可进行激光打孔、切割、焊接及表面热处理。

目前,激光加工存在的主要问题是:设备价格高,更大功率的激光器还处于实验研究阶段;不论是激光器本身的性能质量,还是操作员的技术水平都有待进一步提高。

1.3.5 电子束和离子束加工

1. 电子束加工

电子束加工是近几年得到较大发展的新型特种加工技术,尤其是在微电子领域应用较多。

(1)电子束加工的工作原理。图 1-20 为电子束加工原理及结构,它由高压电源、电子枪系统、真空系统和控制系统等组成。在真空条件下,利用电子枪系统中的电子发射阴极经电流加热发射电子束,通过控制栅极初步聚焦后,由加速阳极加速,再通过透镜聚焦系统进一步聚焦,就得到了能量密度极高($10^6 \sim 10^9 \text{ W/cm}^2$)的电子束。电子束以极高的速度冲击到零件表面的极小区域上(直径为 $5 \sim 10 \mu\text{m}$),其能量大部分转变为热能,使被冲击点处产生瞬时高温(在几分之一微秒时间内,温度急剧上升到几千摄氏度),从而引起材料的局部熔化或汽化直至蒸发,被真空系统抽走,以达到加工的目的。

(2)电子束加工的特点。

①电子束加工是一种精密微细的加工方法,可用来加工微细深孔、窄缝和半导体、集成电路等。

②加工材料范围广,加工速度快,生产效率高。

③其加工质量与电火花加工、电解加工相当,优于激光加工。

④电子束可高速打孔及对型面进行加工,在微电子器件上能进行电子束刻蚀。

(3)电子束加工的应用。电子束加工已广泛用于不锈钢、耐热钢、合金钢、陶瓷和玻璃等难加工材料的圆孔、异形孔和窄缝的加工;还可以用来焊接难熔金属、化学性能活泼的金属,以及碳钢、不锈钢、铝合金、钛合金等。

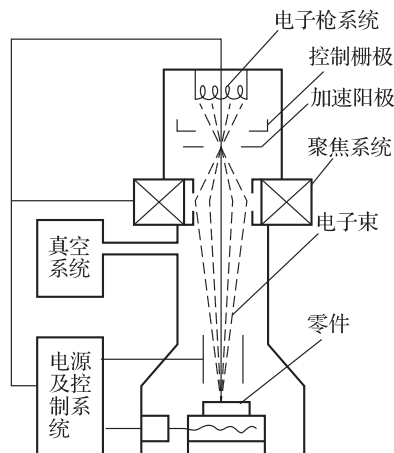


图 1-20 电子束加工原理及结构

2. 离子束加工

(1)离子束加工的工作原理。图 1-21 为考夫曼型离子束加工原理及结构。离子束加工的原理和电子束加工的原理基本相似。其工作原理是在真空条件下,先由电子枪产生电子束,然后引入已抽成真空且充满惰性气体的电离室中,使低压惰性气体离子化。由负极引出的阳离子经加速、集束等步骤,最后射入工件表面。两者不同的是离子带正电荷且质量比电子大数千倍,所以一旦使离子的速度加到较高,离子束比电子束具有更大的撞击动能。离子束是微观的机械撞击能量,而不是像电子束那样靠动能转化为热能加工零件的。

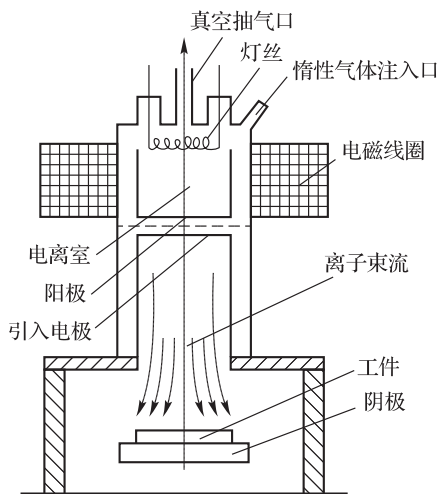


图 1-21 考夫曼型离子束加工原理及结构

(2)离子束加工的特点。

①离子束加工可以加工任何材料。

②离子束加工是特种加工方法中最精密、最细微的加工方法。

③由于在真空条件下加工,因此其产生污染少,特别适用于易氧化金属、合金材料和高纯度半导体材料。

④加工应力和加工变形非常小,对材料适应性强。

⑤设备费用高,成本高,加工效率低。

(3)离子束加工的应用。

①蚀刻加工。离子束蚀刻用于加工陀螺仪空气轴承和动压马达上的沟槽,分辨率高,精度、重复一致性好。离子束蚀刻应用的另一个方面是蚀刻高精度图形,如集成电路、光电器件和光集成器件等电子学构件。离子束蚀刻还应用于减薄材料,制作穿透式电子显微镜试片。

②离子束镀膜加工。离子束镀膜可镀材料范围广泛,不论金属、非金属表面上均可镀制金属或非金属薄膜,各种合金、化合物或某些合成材料、半导体材料、高熔点材料均可镀覆。

离子束镀膜技术可用于镀制润滑膜、耐热膜、耐磨膜、装饰膜和电气膜等。

复习思考题

- 1-1 查阅书籍,总结出零件的成形原理。
- 1-2 传统机械加工包括哪些方法? 总结出各自的适用范围。
- 1-3 何谓特种加工? 请说明特种加工的分类和特点。
- 1-4 电火花加工的工作原理及应用范围是什么? 影响电火花加工生产率的因素有哪些?
- 1-5 电火花加工与电火花线切割加工有何异同?
- 1-6 电解加工的工作原理、特点和应用范围是什么?
- 1-7 简述激光加工的特点和应用范围。
- 1-8 简述超声波加工的特点和应用范围。
- 1-9 高能束加工包括哪几种类型?

第 2 章

金属切削原理与刀具

金属切削加工是运用机床和刀具,按照预定的加工要求,从坯件上切去多余金属的加工方法,其目的是使被加工零件的尺寸、形状和位置精度,以及其表面质量达到设计和使用要求。在金属切削过程中,始终伴随着刀具切削工件和工件材料抵抗切削温度两种情况,并产生一系列的物理现象,这些物理现象包括刀具的磨损与刀具的寿命等。

金属切削原理与刀具是研究金属切削的基本规律与刀具设计、使用的一门学科,是机械制造专业的重要课程。因此,本章主要介绍金属切削加工的基础知识、刀具的结构和材料,以及金属切削加工过程中的物理现象和规律。

2.1 金属切削加工的基础知识

2.1.1 切削运动

切削加工时,为了获得各种形状的零件,刀具与工件之间必须具有一定的相对运动,即切削运动,切削运动按运动在切削中所起的作用不同可分为主运动和进给运动。

1. 主运动

主运动是切下切屑所需的最基本的运动。其特点是速度最高,消耗功率最大。车削时,主运动是工件的回转运动,如图 2-1 所示;牛头刨床刨削时,主运动是刀具的往复直线运动,如图 2-2 所示。

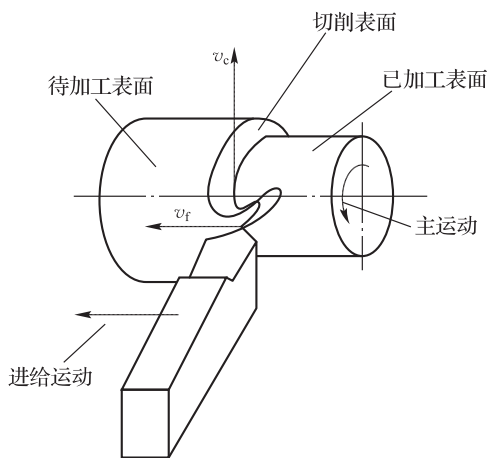


图 2-1 车削运动和工件上的表面

2. 进给运动

进给运动是使被切金属层不断地投入切削,以加工出具有所需几何特性的已加工表面的运动。车削外圆时,进给运动是刀具的纵向运动;车削端面时,进给运动是刀具的横向运动。牛头刨床刨削时,进给运动是工作台的移动。

主运动的运动形式可以是旋转运动,也可以是直线运动;主运动可以由工件完成,也可以由刀具完成;主运动和进给运动可以同时进行,也可以间歇进行;主运动通常只有一个,而进给运动可以有一个或几个。

3. 合成切削运动

当主运动和进给运动同时进行时,切削刃上某一点相对于工件的运动为合成运动,常用合成速度向量 v_c 来表示,其等于主运动切削速度 v_c 和进给速度 v_f 的矢量和,即 $v_c = v_c + v_f$,如图 2-3 所示。

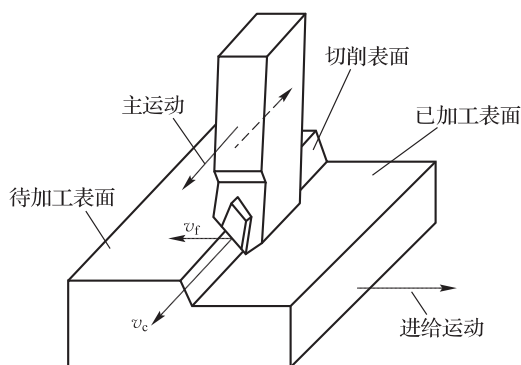


图 2-2 刨削运动和工件上的表面

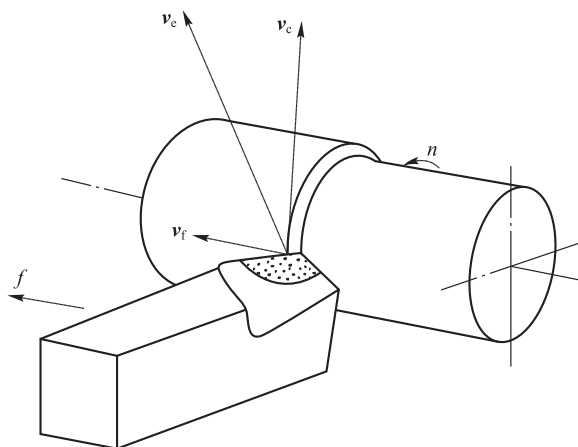


图 2-3 合成速度

2.1.2 切削表面

在切削加工过程中,工件上有三个依次变化着的表面,它们分别是待加工表面,即将被切除金属层的表面;切削表面(过渡表面),即切削刃正在切削的表面;已加工表面,即已切除多余金属形成的新表面,如图 2-1 和图 2-2 所示。

2.1.3 切削用量

切削用量是表示主运动及进给运动参数的数量。它是切削速度 v_c 、进给量 f 和背吃刀量 a_p 三者的总称。切削用量是调整机床,计算切削力、切削功率和工时定额的重要参数,如图 2-4 所示。

1. 切削速度 v_c

切削速度即切削刃上的选定点相对于工件的主运动的瞬时速度,单位为 m/s 或 m/min 。当主运动为旋转运动时,其计算公式为

$$v_c = \frac{\pi d_w n}{1\ 000} \quad (2-1)$$

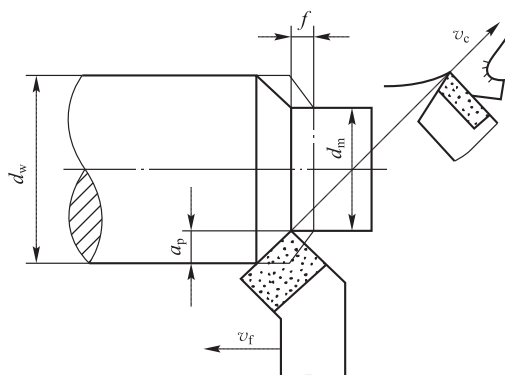


图 2-4 切削用量三要素

式中, d_w 为工件待加工表面的直径, mm; n 为主运动的转速, r/s 或 m/min。

显然, 当转速 n 一定时, 选定点不同, 切削速度也不同。实际生产中考虑刀具的磨损和切削功率等, 在确定切削速度 v_c 时一律以刀具或工件进入切削状态的最大直径作为计算依据。

若主运动为往复直线运动(如刨削), 则常用其平均速度 $\bar{v}$ 作为切削速度, 即

$$\bar{v} = \frac{2Ln_r}{1\,000}$$

式中, L 为往复直线运动的行程长度, mm; n_r 为主运动每秒钟的往复次数, 次/秒。

2. 进给量 f

进给量即刀具在进给运动方向上相对于工件的位移量, 可用刀具或工件每转(主运动为旋转运动时)或每行程(主运动为直线运动时)的位移量来表达和测量, 单位为 mm/r(用于车削、镗削等)或 mm/行程(用于刨铣、磨削等)。

切削刃上的选定点相对工件的进给运动的瞬时速度称为进给速度(v_f), 单位为 mm/s。它与进给量之间的关系为

$$v_f = n f \tag{2-2}$$

式中, f 为车刀每转进给量, mm/r; n 为工件转速, r/s。

3. 背吃刀量 a_p

背吃刀量是在与主运动和进给运动方向相垂直的方向上测量的已加工表面与待加工表面之间的距离, 即切削深度, 单位为 mm。外圆车削的背吃刀量为

$$a_p = \frac{d_w - d_m}{2} \tag{2-3}$$

式中, d_w 为工件待加工表面的直径, mm; d_m 为工件已加工表面的直径, mm。

2.1.4 切削层参数

切削层是指刀具的切削刃正在切削的金属层。为简化计算, 切削层参数是在与主运动方向相垂直的平面内度量的切削层截面尺寸, 包括切削层公称横截面积、切削层公称宽度和切削层公称厚度, 如图 2-5 所示。

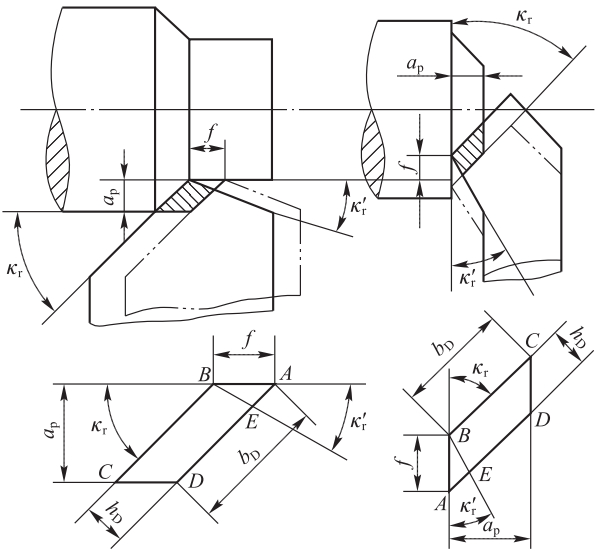


图 2-5 车削加工时的切削运动及切削层参数

1. 切削层公称横截面积 A_D

切削层公称横截面积是指给定瞬间切削层在与主运动方向相垂直的平面内度量的实际横截面积。

实际上,由于刀具副偏角的存在,经切削加工后的已加工表面上常留有规则的刀纹,这些刀纹在切削层尺寸平面里的横截面积 ABE 称为残留面积,残留面积的高度直接影响已加工表面的表面粗糙度值。

2. 切削层公称宽度 b_D

切削层公称宽度是指沿切削刃方向测量的切削层截面尺寸,单位为 mm。它大致反映了主切削刃参加切削工作的长度。

3. 切削层公称厚度 h_D

切削层公称厚度是指垂直于切削刃方向上测量的切削层截面尺寸,单位为 mm。

当主切削刃为直线且刀尖圆弧半径很小时,由图 2-5 可见:

$$b_D = a_p / \sin \kappa_r \quad (2-4)$$

$$h_D = f \sin \kappa_r \quad (2-5)$$

$$A_D = b_D h_D = a_p f \quad (2-6)$$

式中, κ_r 为车刀的主偏角($^\circ$)。

由上述公式可知,主偏角值的不同,引起切削层厚度与切削层宽度的变化,从而对切削过程的切削机理产生了较大的影响。

2.2 刀具结构和刀具材料

切削刀具的种类有很多,如车刀、刨刀、铣刀和钻头等。它们的几何形状各异,复杂程度不等,但它们的切削部分的结构和几何角度具有许多共同的特征。车刀和刨刀是最常用、最简单和最基本的切削工具,因而最具有代表性,其他刀具都可以看作是由普通外圆车刀切削部分的变形或组合而成的,如图 2-6 所示。

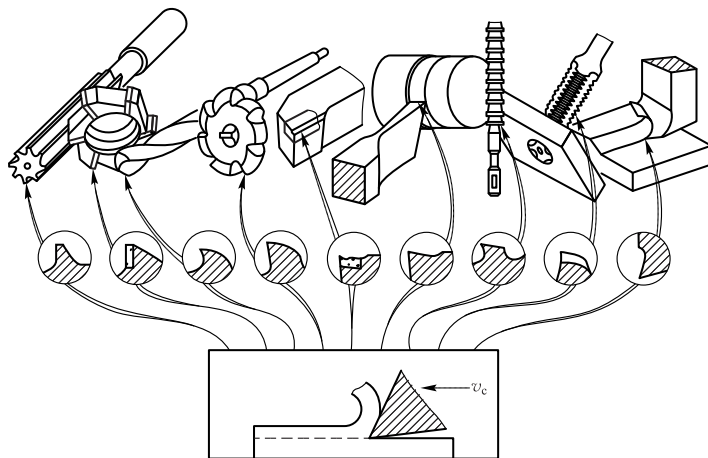


图 2-6 各种刀具切削部分的形状

因此,在刀具结构的分析和研究中,通常以普通外圆车刀为范例进行,在掌握其分析方法后,就可以将这种方法推广到其他复杂刀具。本节将以外圆车刀切削部分为例,介绍刀具结构及几何参数的定义。

2.2.1 常见刀具类型及刀具的结构

1. 刀具的分类

按加工工艺和用途,刀具可分为车刀、铣刀、镗刀、刨刀、钻头、铰刀、螺纹刀具和齿轮刀具等。其中,车刀又可分为外圆车刀、偏刀、切断刀、镗孔刀等;铣刀又可分为圆柱铣刀、盘铣刀、立铣刀等。

按结构形式,刀具可分为整体式刀具、焊接式刀具和机夹式刀具等。

按刀具的刃型和数量,刀具可分为单刃刀具、多刃刀具和成形刀具等。

按国家标准,刀具可分为标准刀具(标准螺距的螺纹丝锥、板牙、标准模数的齿轮滚刀、插齿刀等)和非标准刀具(非标准螺距的螺纹丝锥、非标尺寸及精度的铰刀等)。

2. 常见的刀具

(1)车刀。车刀是金属切削加工中应用最广的一种刀具。它可以在车床上加工外圆、端平面、螺纹、内孔,也可用于切槽和切断等,如图 2-7 所示。车刀在结构上可分为整体车刀、焊接装配式车刀和机械夹固刀片的车刀。机械夹固刀片的车刀又可分为机床车刀和可转位车刀,如图 2-8 所示;还有成形车刀,如图 2-9 所示。

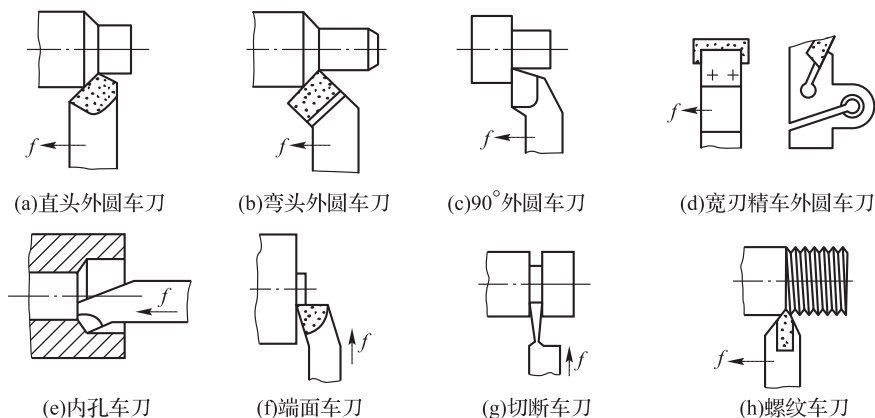


图 2-7 常用车刀的形式

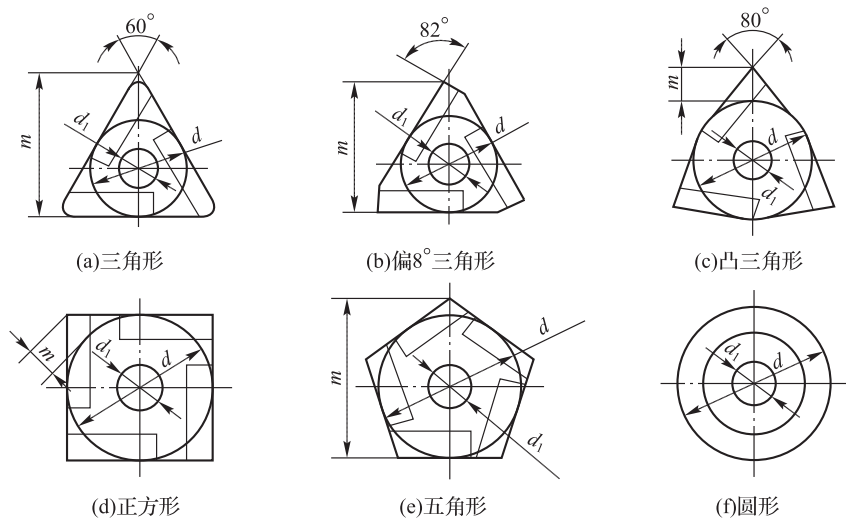


图 2-8 硬质合金可转位车刀的常用形状

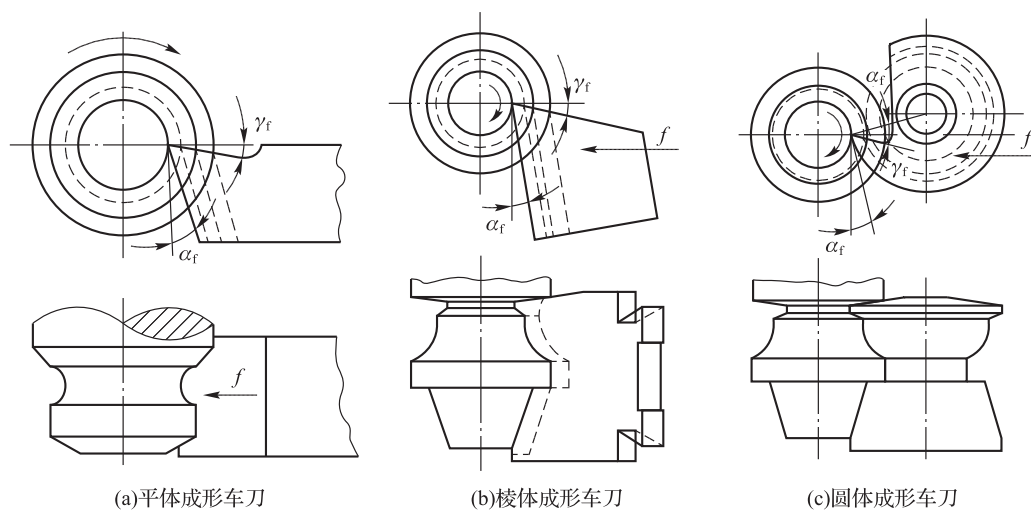


图 2-9 成形车刀

(2) 孔加工刀具。孔加工刀具一般可分为两大类：一类是从实体材料上加工出孔的刀具，常用的有麻花钻、中心钻和深孔钻等；另一类是对工件上已有孔进行再加工的刀具，常用的有扩孔钻、铰刀及镗刀等。

① 扁钻。扁钻是使用最早的钻孔刀具，如图 2-10 所示。其特点是结构简单、刚性好、成本低、刃磨方便。

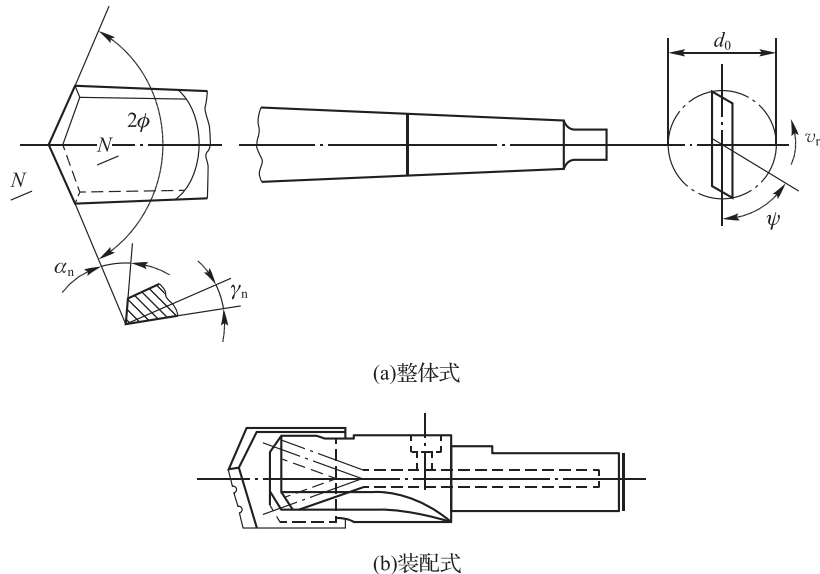


图 2-10 扁钻

② 麻花钻。麻花钻是应用最广泛的孔加工刀具，图 2-11 所示为标准高速钢麻花钻的结构。麻花钻的工作部分(刀体)包括切削部分和导向部分。前端为切削部分，承担主要的切削工作；后端为导向部分，起引导钻头的作用，也是切削部分的后备部分。它特别适用于直径在 30 mm 以下的孔的粗加工，有时也用于扩孔。麻花钻属于粗加工刀具，尺寸公差等级为 IT13~IT11，表面粗糙度为 25~12.5 μm 。

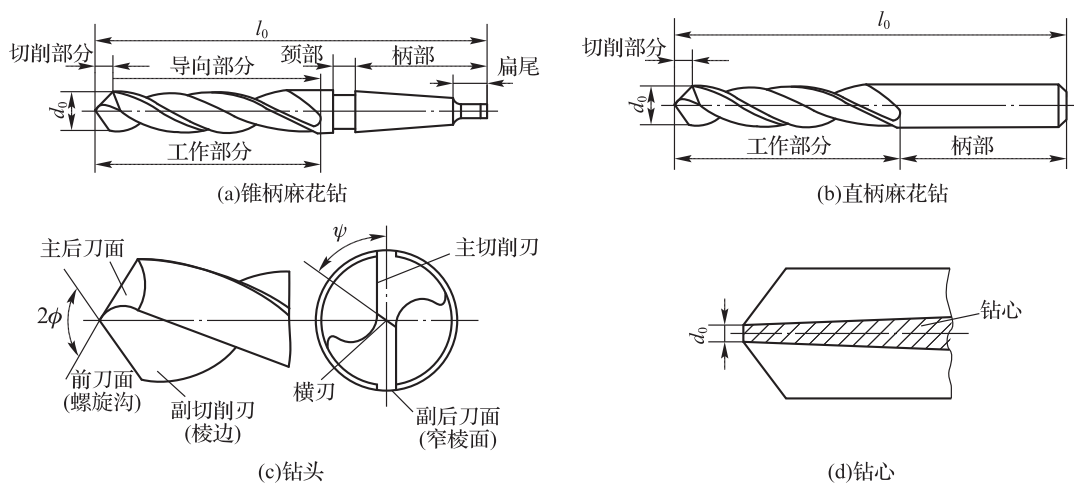


图 2-11 标准高速钢麻花钻的结构

③中心钻。中心钻是用来加工轴类零件中心孔的刀具,如图 2-12 所示。钻孔时,先打中心孔,有利于钻头的导向,防止钻偏。其结构主要有三种形式,即带护锥中心钻、无护锥中心钻和弧形中心钻。

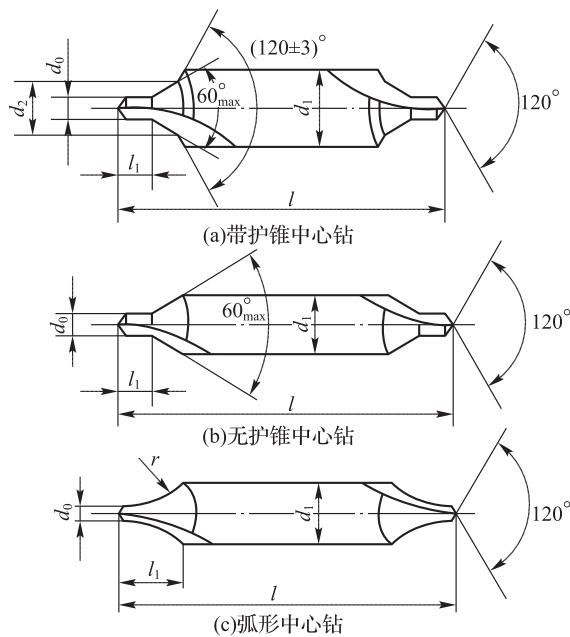


图 2-12 中心钻

④深孔钻。通常把孔的长度与孔的直径比大于 10 的孔称为深孔,加工深孔所用的钻头称为深孔钻,如图 2-13 所示。由于孔深与孔径之比大,钻头细长,强度和刚度均较差,工作不稳定,因此易引起孔中心线的偏斜和振动。为了保证孔中心线的直线性,必须很好地解决导向问题;由于孔深度大,容屑及排屑空间小,切屑流经的路程长,切屑不易排除,因此必须设法解决断屑和排屑问题;深孔钻头是在封闭状态下工作的,切削热不易散出,必须设法采取措施确保切削液的顺利进入,充分发挥冷却和润滑作用。

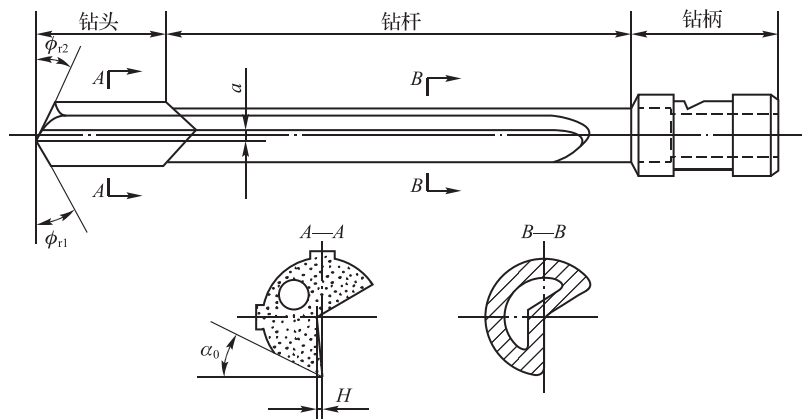


图 2-13 深孔钻

⑤扩孔钻。扩孔钻专门用来扩大已有孔,如图 2-14 所示。它比麻花钻的齿数多($Z>3$),容屑槽较浅,无横刃,强度和刚度均较高,导向性和切削性较好,加工质量和生产效率比麻花钻高。

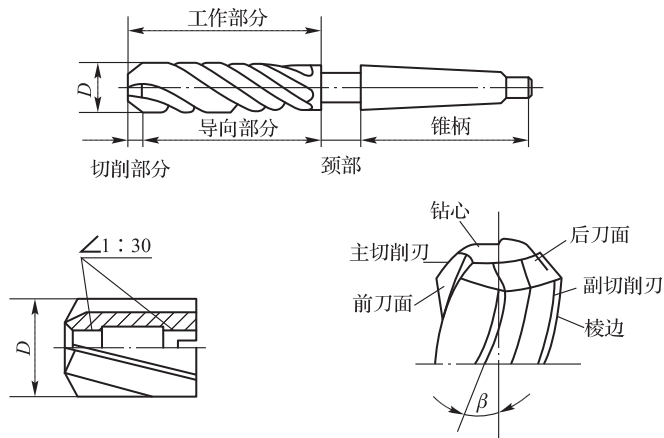


图 2-14 扩孔钻

⑥铰钻。铰钻用于加工各种埋头螺钉沉孔、锥孔和凸台面等,如图 2-15~图 2-18 所示。常见的铰钻有三种,即圆柱形沉头铰钻、锥形沉头铰钻和端面凸台铰钻。

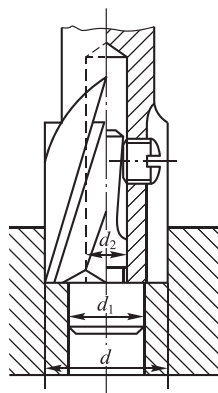


图 2-15 带导柱平底铰钻

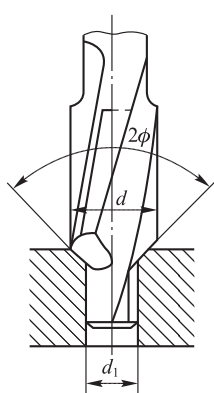


图 2-16 带导柱 90°锥面铰钻

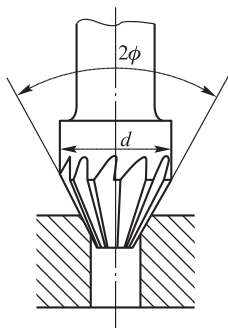


图 2-17 不带导柱锥面铤钻

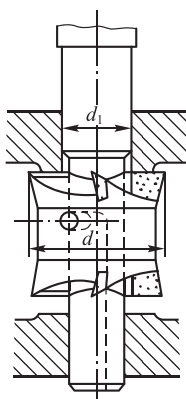


图 2-18 端面铤钻

⑦铰刀。铰刀常用来对已有孔进行最后精加工,也可对要求精确的孔进行预加工,如图 2-19 所示。其加工精度可达 IT8~IT6,表面粗糙度值达 $1.6\sim 0.2\ \mu\text{m}$ 。铰刀可分为手用铰刀和机用铰刀。

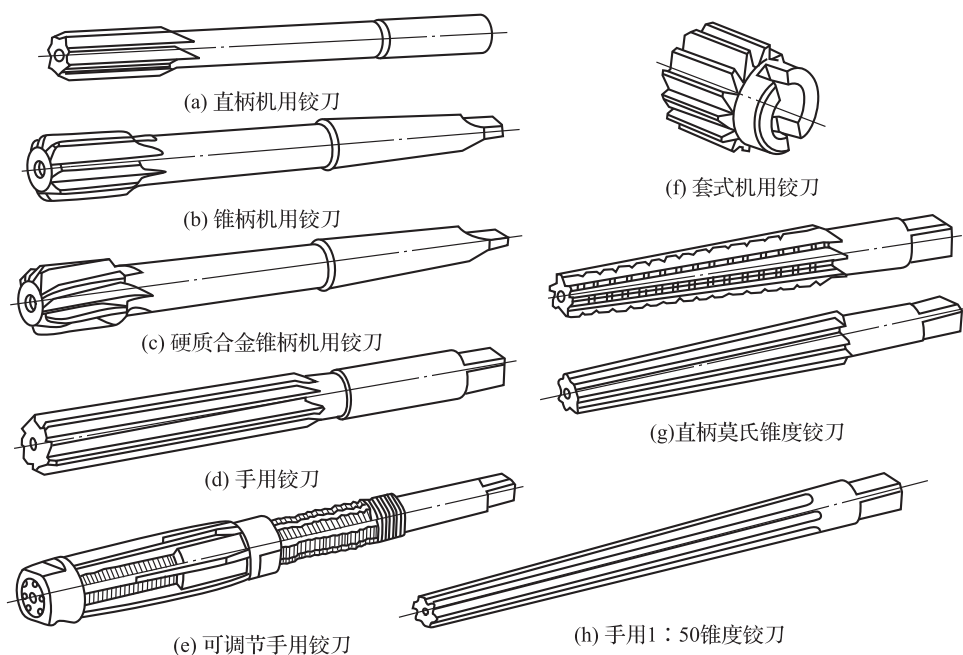


图 2-19 不同种类的铰刀

⑧镗刀。镗刀是对已有的孔进行再加工的刀具。镗刀可在车床、镗床或铣床上使用,可加工精度不同的孔,加工精度可达 IT7~IT6,表面粗糙度值达 $6.3\sim 0.8\ \mu\text{m}$ 。一般分为单刃镗刀和双刃镗刀。

a. 单刃镗刀(见图 2-20)。

单刃镗刀结构简单,制造容易,通用性好,故使用较多。常用的单刃镗刀有盲孔镗刀和透孔镗刀。

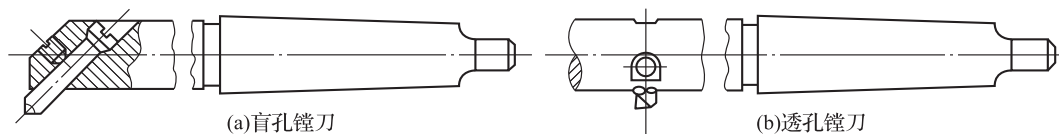


图 2-20 单刃镗刀

b. 双刃镗刀(见图 2-21)。

双刃镗刀的两边都有切削刃,工作时可以消除径向力对镗杆的影响,工件的孔径尺寸和精度由镗刀径向尺寸保证。镗刀上的两个刀片的径向可以调节,因此可加工一定尺寸范围的孔。双刃镗刀多采用浮动连接式,镗刀片插在镗杆的槽中,依靠作用在两个切削刃上的径向力自动平衡其位置,可消除因镗刀安装误差或镗杆偏摆引起的加工误差。

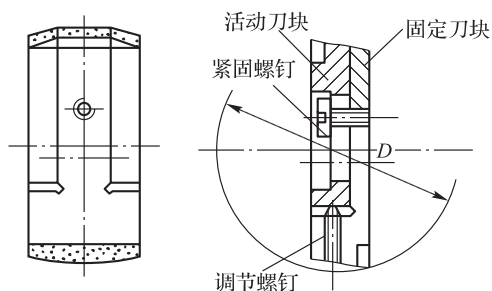


图 2-21 双刃镗刀

(3) 铣刀。铣刀为多齿回转刀具,其上的每个刀齿就相当于一把车刀固定在铣刀的回转面上。带孔铣刀和带柄铣刀分别如图 2-22 和图 2-23 所示。铣刀按用途可分为加工平面用铣刀、加工沟槽用铣刀和加工成形面铣刀三大类。

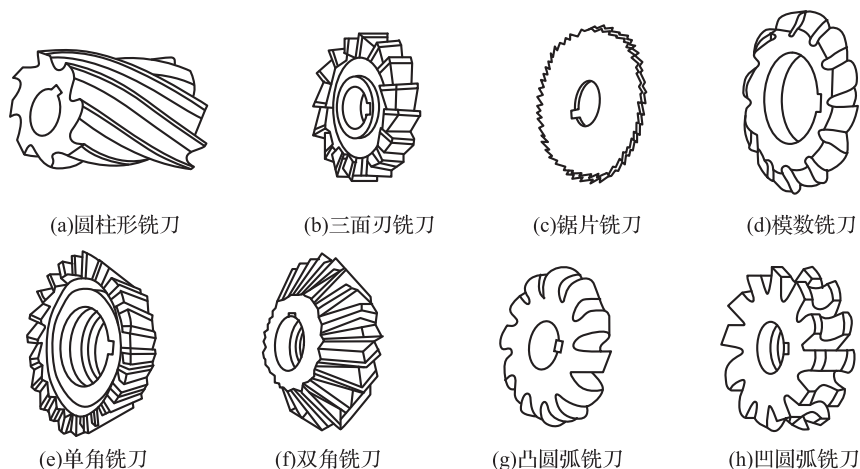


图 2-22 带孔铣刀

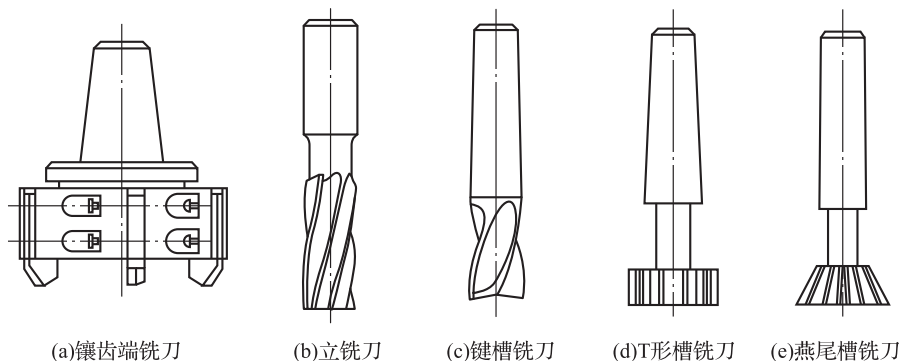


图 2-23 带柄铣刀

①圆柱形铣刀。圆柱形铣刀用于卧式铣床上加工平面。刀齿分布在铣刀的圆周上,圆柱形铣刀按齿形分为直齿和螺旋齿两种。圆柱形铣刀按齿数分粗齿和细齿两种。螺旋齿粗齿铣刀齿数少,刀齿强度高,容屑空间大,适用于粗加工;细齿铣刀适用于精加工。

②三面刃铣刀。三面刃铣刀用于加工各种沟槽和台阶面,其两侧面和圆周上均有刀齿。

③角度铣刀。角度铣刀用于铣削成一定角度的沟槽,有单角铣刀和双角铣刀两种。

④锯片铣刀。锯片铣刀用于加工深槽和切断工件,其圆周上有较多的刀齿。为了减少铣切时的摩擦,刀齿两侧有 $15' \sim 1^\circ$ 的副偏角。

⑤立铣刀。立铣刀用于加工沟槽和台阶面等,刀齿在圆周和端面上,工作时不能沿轴向进给。当立铣刀上有通过中心的端齿时,可轴向进给运动。

⑥键槽铣刀。键槽铣刀主要用于加工圆头封闭键槽。它的形状类似立铣刀。键槽铣刀有两个刀齿,端面切削刃是主切削刃,圆周切削刃是副切削刃,故工作时能沿轴线做进给运动。

⑦T形槽铣刀。T形槽铣刀类似于三面刃槽铣刀,主切削刃分布在圆周上,副切削刃分布在两个端面上,主要用于加工T形槽。

⑧成形铣刀。切削刃廓形根据工件廓形设计的铣刀称为成形铣刀。它和成形车刀一样,可以保证被加工工件的尺寸精度、形状一致和较高的生产率。成形铣刀在生产中应用比较广泛,尤其在涡轮机叶片加工中的应用更为普遍。成形铣刀按照它的齿背形式,可分为尖齿成形铣刀和铲齿成形铣刀两种。

(4)拉刀。拉削是用拉刀加工内、外成形表面的一种加工方法。拉刀是多齿刀具,如图2-24所示。拉削时,利用拉刀上相邻刀齿的尺寸变化来切除加工余量,使被加工表面一次成形,因此,拉床只有主运动,无进给运动,进给量是由拉刀的齿升量来实现的。

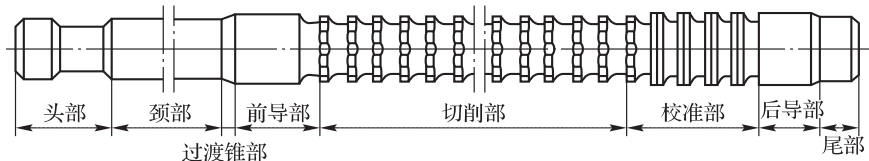


图 2-24 常见的拉刀

(5)刨刀。刨削是平面加工的主要方法之一。常见的刨刀有平面刨刀、偏刀、角度刀及成形刨刀,如图2-25所示。刨削属于断续切削,切削时冲击很大,容易发生“崩刃”和“扎刀”现象,因而刨刀刀杆截面比较粗大,以增加刀杆的刚性;而且往往做成弯头,使刨刀在碰到硬点时可适当产生弯曲变形而缓和冲击,以保护刀刃。

(6)插刀。插削与刨削基本相同,只是插削是在垂直方向进给,主要用来加工工件的内表面,如键槽、花键槽等;也可用于加工多边形孔,如四方孔、六方孔等。插削特别适于加工盲孔或有障碍台阶的内表面。插削时为了避免刀杆与工件相碰,插刀刀刃应该突出于刀杆,如图2-26所示。

(7)齿轮刀具。齿轮刀具是用于加工齿轮齿形的刀具,按照刀具的工作原理,齿轮刀具可以分成成形齿轮刀具和展成齿轮刀具。常见的成形齿轮刀具可以分为盘形齿轮铣刀和指形齿轮铣刀。常用的展成齿轮刀具具有插齿刀、滚刀和剃齿刀等。

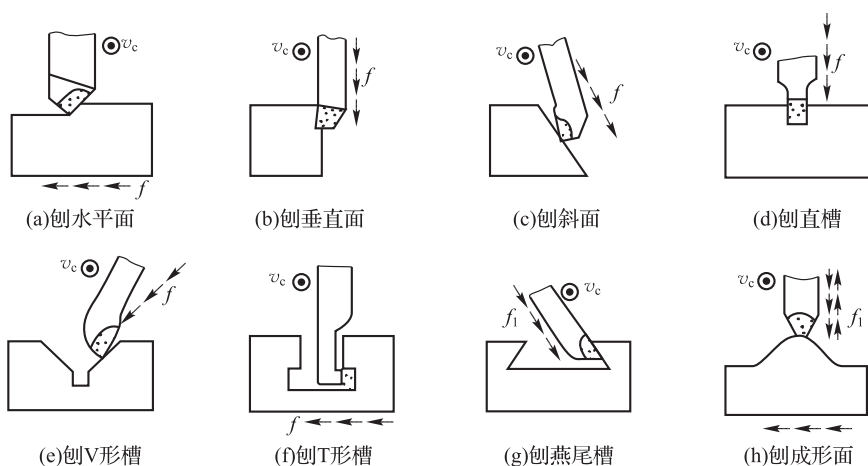


图 2-25 常见的刨刀

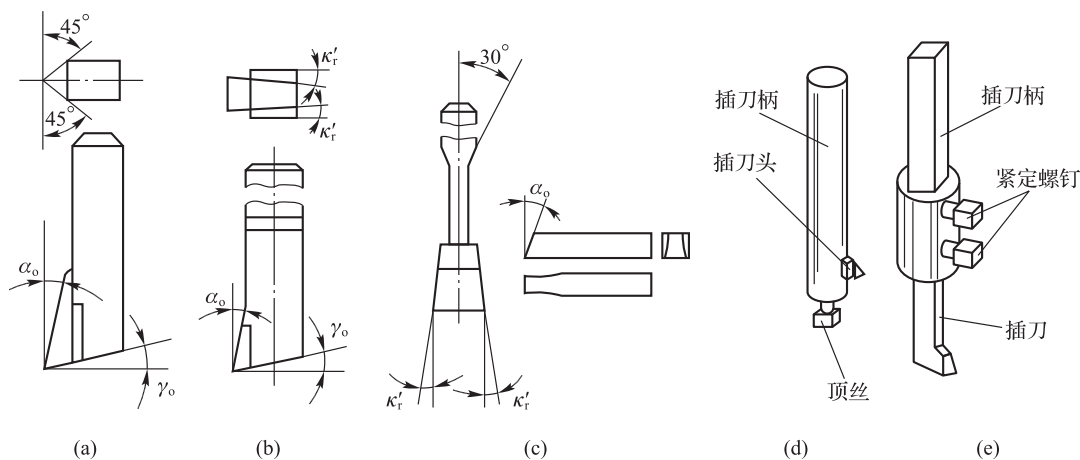


图 2-26 常见的插刀

①盘形齿轮铣刀。盘形齿轮铣刀是一把铲齿成形铣刀,可加工直齿轮和斜齿轮,如图 2-27 所示。工作时,铣刀旋转并沿齿槽方向进给,铣完一个齿后进行分度,再铣第二个齿。

②指形齿轮铣刀。指形齿轮铣刀是一把成形立铣刀,如图 2-28 所示。工作时,铣刀旋转并进给,工件分度。这种铣刀适用于加工大模数的直齿轮和斜齿轮,并能加工人字齿轮。指形齿轮铣刀工作时相当于一个悬臂梁,几乎整个刃长都参加切削,因此切削力大,刀齿负荷重,宜采用小进给量切削。

③齿轮滚刀。滚刀相当于一个开有容屑槽的、有切削刃的蜗杆状的螺旋齿轮,如图 2-29 所示。滚刀与齿坯的啮合传动比由滚刀的头数与齿坯的齿数决定,在展成滚切过程中切出齿轮齿形。滚齿可对直齿轮或斜齿轮进行粗加工或半精加工。

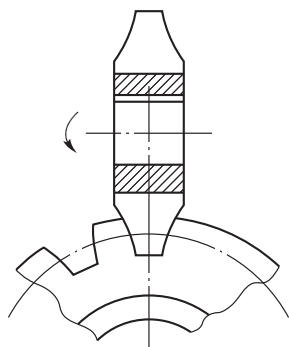


图 2-27 盘形齿轮铣刀

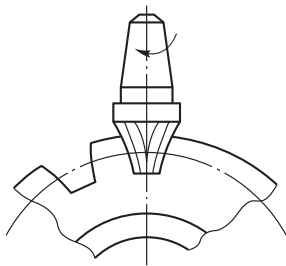


图 2-28 指形齿轮铣刀

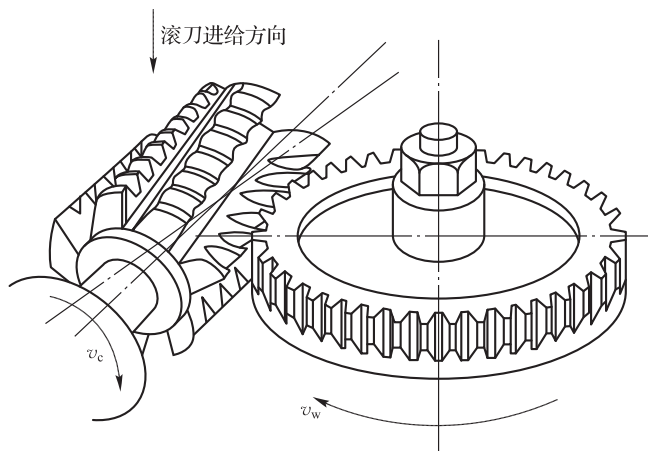
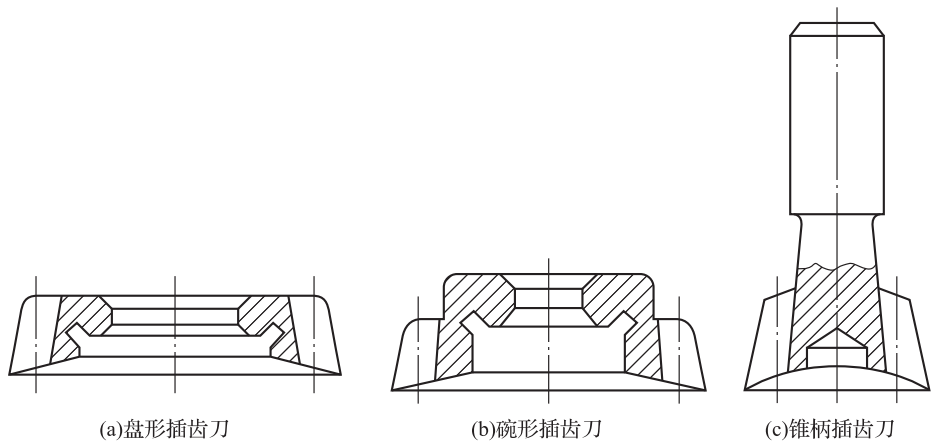


图 2-29 滚刀

④插齿刀。插齿刀相当于一个有前后角的齿轮，如图 2-30 所示。插齿刀与齿坯的啮合传动比由插齿刀的齿数与齿坯的齿数决定，在展成滚切过程中切出齿轮齿形。插齿刀常用于加工带台阶的齿轮，如双联齿轮、三联齿轮等，特别能加工内齿轮及无空刀槽的人字齿轮，故在齿轮加工中应用很广。



(a)盘形插齿刀

(b)碗形插齿刀

(c)锥柄插齿刀

图 2-30 插齿刀

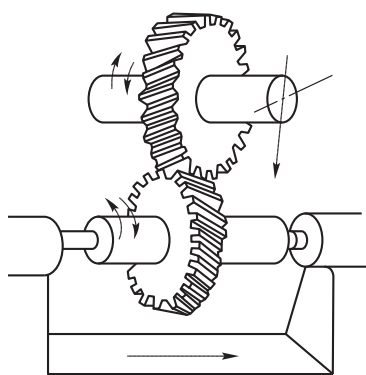


图 2-31 剃齿刀

⑤剃齿刀。剃齿刀相当于齿侧面开有屑槽形成切削刃的螺旋齿轮,如图 2-31 所示。剃齿时剃齿刀带动齿坯滚转,相当于一对螺旋齿轮的啮合运动。在一定啮合压力下,剃齿刀与齿坯沿齿面的滑动将切除齿侧的余量,完成剃齿工作。剃齿刀常用于未淬火的软齿面的精加工。

(8)螺纹刀具。在各种传动机构中,紧固零件和测量工具等都广泛应用了螺纹。由于它的用途不同,其形状、精度和表面粗糙度也各有要求。按照加工螺纹的方法,螺纹刀具可以分为丝锥、板牙、螺纹铣刀等几类。

①丝锥。丝锥本质上是一个带有纵向容屑槽的螺栓,具有切削刀刃和几何角度,是加工圆柱形和圆锥形内螺纹的标准刀具之一,因其结构简单,使用方便,故应用广泛。

图 2-32 所示为最常见的三角牙形丝锥,它的工作部分由切削锥和校准部分组成。切削锥磨出锥角 2ϕ ,以便使切削负荷分配在几个刀齿上。校准部分有完整齿形,控制螺纹尺寸参数并引导丝锥沿轴向运动。柄部方尾与机床连接,或通过扳手传递扭矩。丝锥轴向开槽以容纳切屑,同时形成前角。切削锥顶刃及齿形侧刃经铲磨形成后角。丝锥心部留有锥心,其直径约为外径的一半,以保证丝锥的强度。

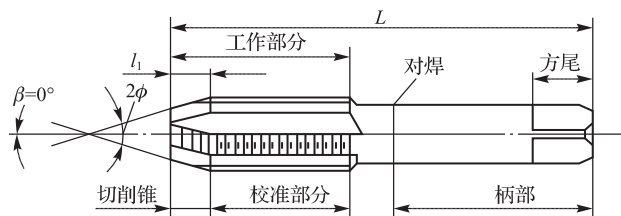


图 2-32 三角牙形丝锥

②板牙。板牙实质上是具有切削角度的螺母,端面上制出容屑孔以形成刀刃,是加工与修整外螺纹的标准刀具。如图 2-33 所示,板牙两端面上都磨出切削锥角,齿顶经过铲磨形成后角。使用时将板牙放在板牙套中并用螺钉紧固。一端切削锥磨钝后可掉头使用。中间部分为校准齿。

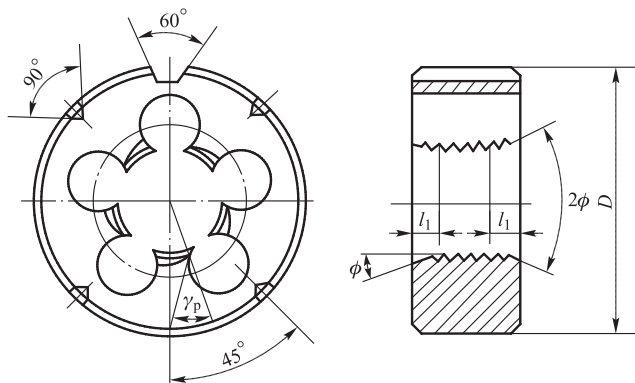


图 2-33 板牙

③螺纹铣刀。螺纹铣刀有盘形螺纹铣刀、梳形螺纹铣刀和铣刀盘三种,多用于螺纹的粗加工,生产效率高,此处介绍前两种。

a. 盘形螺纹铣刀用于粗切蜗杆或梯形螺纹,如图 2-34(a)所示。铣刀与工件轴线交错 φ 角(φ 等于工作螺纹升角)。盘形螺纹铣刀是加工螺旋槽的成形铣刀,为减少铣槽时的干涉,其直径应尽可能设计小些;为保证铣削的平稳性,齿数应尽可能多。为此,盘形螺纹铣刀多设计成尖齿结构。为改善切削条件,刀齿两侧做成错齿结构,以增大侧刃容屑槽,但每把铣刀应保留一个完整的齿,以便检验齿形。

b. 梳形螺纹铣刀是由若干个环形齿纹构成的,其宽度大于工件长度,一般做成铲齿结构,用在专用铣床上加工螺距不大、长度较短的三角形螺纹,如图 2-34(b)所示。工件旋转一周,铣刀相对于工件沿轴线移动一个导程,即可全部铣出螺纹。

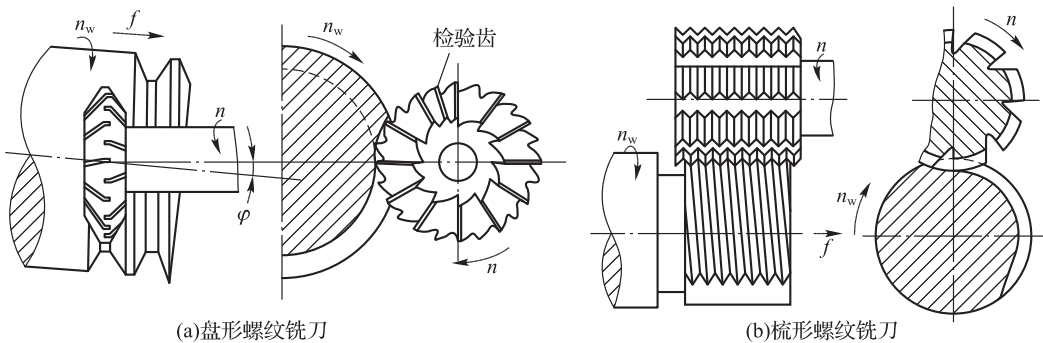


图 2-34 螺纹铣刀

3. 刀具的结构

上面介绍的切削刀具种类繁多,其结构也是多种多样。外圆车刀是最基本、最典型的切削刀具,它由切削部分和刀柄组成。切削部分承担切削加工任务,刀柄用于装夹。切削部分是由一些面和切削刃组成的。

(1) 刀具切削部分的组成。常用的外圆车刀是由一个刀尖、两条切削刃和三个刀面组成的,如图 2-35 所示。

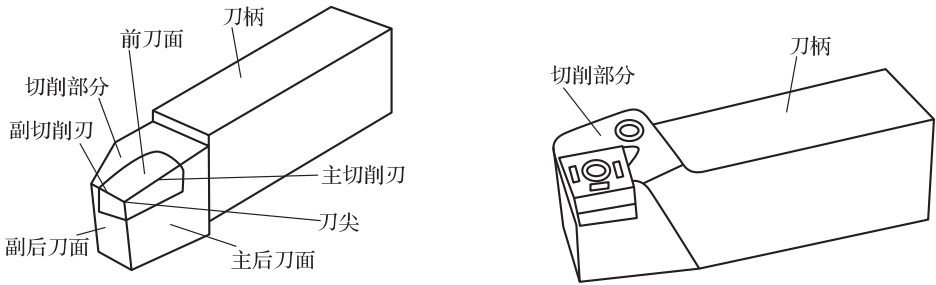


图 2-35 外圆车刀的组成

刀尖是主、副切削刃相交的一点,实际上该点不可能磨得很尖,而是由一段折线或微小圆弧组成的。微小圆弧的半径称为刀尖圆弧半径,用 r_e 表示,如图 2-36 所示。主切削刃是前刀面与主后刀面的交线,承担主要的切削工作;副切削刃是前刀面与副后刀面的交线,承担少量的切削工作;前刀面为刀具上切屑流过的表面,主后刀面为与工件上的切削表面相对的刀面,副后刀面为与已加工表面相对的刀面。

(2) 刀具的几何参数。为了确定和测量车刀的几何角度,需要选择几个辅助平面作为基准面,如图 2-37 所示。

① 切削平面。切削平面是指通过切削刃上某一选定点,切于工件加工平面的平面,用符号 P_s 表示。

② 基面。基面是指通过主切削刃选定点并与工件过渡表面相切,且垂直于切削平面的平面,用符号 P_r 表示。

③ 正交平面。正交平面是指通过主切削刃选定点且垂直于主切削平面和基准面的平面,用符号 P_o 表示。

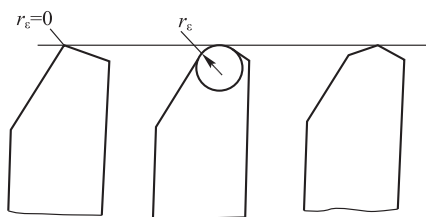


图 2-36 刀尖形状

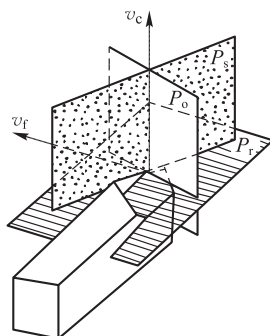


图 2-37 辅助基准面

当主切削刃与水平面平行时,切屑流出的方向正接近于这一平面所处的位置,因此,车刀上的主要切削角度都在正交平面上进行测量,如前角、后角的测量。

(3) 车刀的切削角度。车刀的切削角度主要有六项,用于表示切削部分的几何形状,并可在主截面和上述三个基准面内度量,如图 2-38 所示。

① 前角。前角是车刀前刀面与基面之间在正交平面投影的角度,用符号 γ_o 表示。它是车刀切削部分的一个主要工作角度,直接影响车刀主切削刃的锋利度和刃口强度。加大前角 γ_o ,可以减小切屑的变形和摩擦,从而降低切削力和切削热,切削起来较快;但前角过大,会削弱刀尖强度,减少散热能力,加剧刀具磨损。

② 后角。后角是车刀副后刀面与基面之间在正交平面的投影角度,用符号 α_o 表示。它影响主后刀面与过渡表面之间的摩擦情况。

③ 主偏角。主偏角是主切削刃与进给方向在基面上投影的夹角,用符号 κ_r 表示。它影响主刀刃参加工作的长度,并影响切削力的大小。

④ 副偏角。副偏角是副切削刃与进给方向在基面上投影的夹角,用符号 κ'_r 表示。它影响已加工表面的粗糙度及副刀刃参加工作的长度。

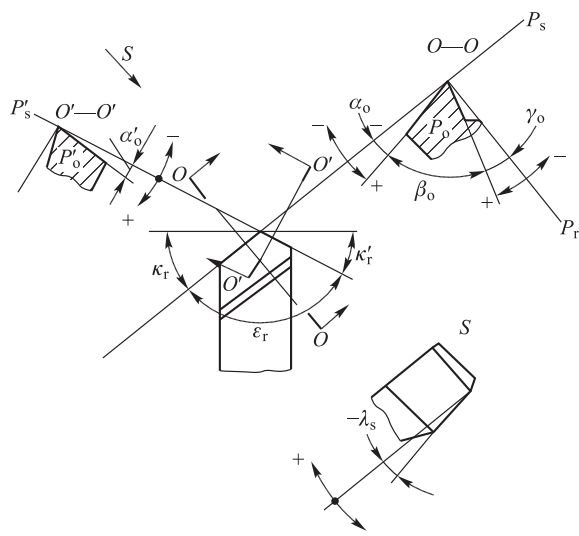


图 2-38 车刀的切削角度

⑤刀尖角。刀尖角为主、副切削刃在基面上投影的夹角,用符号 ϵ_r 表示。刀尖角的大小影响刀尖的强度及传热性能。

⑥楔角。楔角是前刀面与后刀面间的夹角,用符号 β_0 表示。

(4)刀具的工作角度。在切削过程中,由于刀具的安装位置、刀具与工件间相对运动情况的变化,实际起作用的角度与标注角度有所不同,人们称这些角度为工作角度。现在仅就刀具安装位置对角度的影响叙述如下:

①车刀安装高低对角度的影响。车刀刀尖应装得与工件中心线一样高,这时车刀角度没有变化。要做到这一点,可以用床头顶针尖作为标准,或先在工件端面车一印痕就可知道中心,也可以记住车床中拖板滑块平面与工件中心线的距离,用钢尺测量其高低。

如果刀尖高于工件中心,这时切削平面位置改变,基面也随着改变,结果造成前角增大,后角减小,导致车刀切入工件困难。相反,若刀尖低于工件中心,则前角减小,后角增大。

②车刀安装偏斜对角度的影响。车削时,一般车刀总是与工件中心线垂直安装,这样,主偏角和副偏角不会改变。如果车刀刀头向左倾斜,主偏角将增大,副偏角则减小;相反,如果车刀刀头向右倾斜,主偏角将减小,副偏角则增大;此外,在安装车刀时,还应避免车刀伸出太长,造成车削振动,影响表面粗糙度,甚至折断。一般车刀伸出长度不超过刀杆高度的1.5倍。

车刀下面垫片要平整,同时要尽可能用厚垫片代替薄垫片,刀架上的螺丝要拧紧。

2.2.2 刀具材料的性能要求和常用刀具材料

1. 刀具材料的性能要求

在切削加工过程中,刀具切削部分承受高温,高压,强烈的摩擦、冲击和振动,所以,切削刀具部分材料的性能应满足以下基本要求。

(1)高硬度和耐磨性。要实现切削加工,刀具材料必须具有比工件材料高的硬度,刀具材料的硬度应在60 HRC以上,并要求耐磨性好。

(2)足够的强度和韧性。要使刀具在切削力作用下不致产生破坏,就必须具有足够的强度。同时,还要具备足够的韧性,以承受着各种应力、冲击载荷和振动的作用,避免出现崩刃和折断。

(3)良好的耐热性和导热性。切削过程中一般都会产生很高的温度,刀具材料必须具有一定的耐热性,以保证在高温下仍然具有所要求硬度的性能。要有良好的导热性,以利于切削热的传导,降低切削区的温度,延长刀具的寿命。

(4)良好的工艺性和经济性。为了便于制造,刀具切削部分材料应具有良好的锻造、焊接、热处理和磨削加工等性能。刀具材料应便于刀具的制造,资源丰富,价格低廉。

2. 常用刀具材料

刀具切削部分材料主要有碳素工具钢、合金工具钢、高速钢、硬质合金、陶瓷和超硬刀具材料等,各种刀具材料的物理力学性能见表2-1。

表 2-1 各种刀具材料的物理力学性能

材料种类	硬度	密度 /(g·cm ⁻³)	抗弯强度 /GPa	冲击韧性 /(kJ·m ⁻²)	热导率 /[W·(m·K) ⁻¹]	耐热性 /℃
碳素工具钢	63~65 HRC	7.6~7.8	2.20	—	41.8	200~250
合金工具钢	63~66 HRC	7.7~7.9	2.40	—	41.8	300~400
高速钢	63~70 HRC	8.0~8.8	1.96~5.88	98~588	16.7~25.1	600~700
硬质合金	89~94 HRA	8.0~15.0	0.90~2.45	29~59	16.7~87.9	800~1 000

续表

材料种类	硬度	密度 ($\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$)	抗弯强度 /GPa	冲击韧性 ($\text{kJ} \cdot \text{m}^{-2}$)	热导率 /[$\text{W} \cdot (\text{m} \cdot \text{K})^{-1}$]	耐热性 /°C
陶瓷	91~95 HRA	3.60~4.70	0.45~0.80	5~12	19.2~38.2	1 200
立方氮化硼	8 000~9 000 HV	3.44~3.49	0.45~0.80	—	19.2~38.2	1 200
金刚石	10 000 HV	3.47~3.56	0.21~0.48	—	19.2~38.2	1 200

其中,碳素工具钢和合金工具钢耐热性差,但抗弯强度高,焊接和刃磨性能好,故广泛用于中、低速切削的成形刀具,不宜高速切削,生产中使用最多的是高速钢和硬质合金。

(1)高速钢。高速钢是在合金工具钢中加入了较多的钨、铬、钼、钒等合金元素的高合金工具钢。高速钢具有较高的硬度(热处理硬度可达 63~66 HRC)和耐热性(600~650 °C),切削中碳钢的速度一般不高于 50~60 m/min。高速钢具有高的强度(抗弯强度为一般硬质合金的 2~3 倍)和韧性,能抵抗一定的冲击振动。它具有较好的工艺性,可以制造刃形复杂的刀具,如钻头、丝锥、成形刀具、拉刀和齿轮刀具等。

高速钢按切削性能,可分为通用型高速钢和高性能高速钢;按制造工艺方法,可分为熔炼高速钢和粉末冶金高速钢。

①通用型高速钢。通用型高速钢工艺性能好,能满足通用工程材料的切削加工要求。常用的种类有以下两种。

a. 钨系高速钢。钨系高速钢最常用的牌号是 W18Cr4V,它具有较好的综合性能,可制造各种复杂刀具和精加工刀具,在我国应用较普遍。

b. 钼系高速钢。钼系高速钢最常用的牌号是 W6Mo5Cr4V2,其抗弯强度和冲击韧性都高于钨系高速钢,并具有较好的热塑性和磨削性能,但热稳定性低于钨系高速钢,适合制作抵抗冲击刀具及各种热轧刀具。

②高性能高速钢。高性能高速钢是在普通型高速钢中加入钴、钒、铝等合金元素,以进一步提高其耐磨性和耐热性等。

常见高速钢的力学性能和应用范围见表 2-2。

表 2-2 常用高速钢的力学性能和应用范围

类 型		硬度 /HRC	抗弯强度 /GPa	冲击韧性/ (MJ · m ⁻²)	600 ℃ 时硬度 /HRC	主要性能 和适用范围
通用型 高速钢	W18Cr4V	63~66	3.0~ 3.4	0.18~ 0.32	48.5	综合性能好,通用性强,可磨削,适用于加工轻合金、碳素钢、合金钢、普通铸铁的精加工刀具和复杂刀具,如螺纹车刀、成形车刀、拉刀等
	W6Mo5Cr4V2	63~66	3.5~ 4.0	0.30~ 0.40	47.0~ 48.0	强度和韧性略高于 W18Cr4V,热硬性略低于 W18Cr4V,热塑性好。其适用于制造加工轻合金、碳钢、合金钢的热成形刀具及承受冲击、结构薄弱的刀具
	W14Cr4VMnRe	64~66	~4.0	~0.31	50.5	切削性能与 W18Cr4V 相当,热塑性好,适用于制作热轧刀具

续表

类 型		硬度 /HRC	抗弯强度 /GPa	冲击韧性 (MJ·m ⁻²)	600℃ 时硬度 /HRC	主要性能 和适用范围
高性能高速钢	95W18Cr4V	66~68	3.0~3.4	0.17~ 0.22	51.0	属高碳高速钢,常温硬度和高温硬度有所提高,适合加工普通钢材和铸铁,耐磨性要求较高的钻头、铰刀、丝锥、铣刀和车刀等,但不宜受大的冲击
	W6Mo5Cr4V3	65~67	~3.2	~0.25	51.7	属高钒高速钢,耐磨性很好,适合切削对刀具磨损较大的材料,如纤维、硬橡胶、塑料等,也用于加工不锈钢、高强度钢和高温合金等
	W2Mo9Cr4VCo8	67~69	2.7~ 3.8	0.23~ 0.30	55.0	属含钴高速钢,有很高的常温和高温硬度,适合加工高强度耐热钢、高温合金、钛合金等难加工材料,可磨性好,适于做精密复杂刀具,但不宜在冲击切削条件下工作
	W6Mo5Cr4V2Al	67~69	2.84~ 3.82	0.23~ 0.30		属含铝高速钢,其切削性能与W2Mo9Cr4VCo8相当,适宜制造铣刀、钻头、铰刀、齿轮刀具和拉刀等,用于加工合金钢、不锈钢、高强度钢和高温合金

(2)硬质合金。硬质合金是由硬度和熔点很高的金属碳化物(碳化钨、碳化钛、碳化钽、碳化铌等)的微粉和金属黏结剂(钴、镍、钼等)以粉末冶金法烧结而成的。硬质合金的硬度高达78~82 HRC,能耐800~1 000℃的高温,具有良好的耐磨性。其允许的切削速度比高速钢高4~10倍,可达100 m/min以上,能加工包括淬火钢在内的多种材料,因此获得广泛应用。但硬质合金抗弯强度低,冲击韧性差,制造工艺性差,不易做成形状复杂的整体刀具。在实际使用中,一般将硬质合金刀片焊接或机械夹固在刀体上使用。

国际标准化组织[ISO 513—1975(E)]规定,将切削加工用硬质合金分为三大类,分别用K,P,M表示。

①K类。K类适用于加工短切屑的黑色金属、有色金属和非金属材料,相当于我国的YG类硬质合金,外包装用红色标志。

②P类。P类适用于加工长切屑的黑色金属,相当于我国的YT类硬质合金,外包装用蓝色标志。

③M类。M类适用于加工长、短切屑的黑色金属和有色金属,相当于我国的YW类硬质合金,外包装用黄色标志。

常用硬质合金牌号及用途见表2-3。

表 2-3 常用硬质合金牌号及用途

牌 号		化学成分/%				性能比较	适用场合
ISO (相近)	国产	ω_{WC}	ω_{TiC}	ω_{TaC} (ω_{NbC})	ω_{Co}		
K01	YG3X	96.5	—	<0.5	3	硬度、耐磨性、切削速度 $\uparrow$ 抗弯强度、韧性、进给量 $\downarrow$	铸铁、有色金属及合金的精加工,也可用于合金钢、淬火钢等的精加工,不能承受冲击载荷
K10	YG6X	93.5	—	<0.5	6		铸铁、冷硬铸铁、合金铸铁、耐热钢、合金钢的半精加工、精加工
K20	YG6	94	—	—	6		铸铁、有色金属及合金的粗加工、半精加工
K30	YG8	92	—	—	8		铸铁、有色金属及合金、非金属的粗加工,能适应断续切削
P01	YT30	66	30	—	4	硬度、切削速度 $\uparrow$ 抗弯强度、韧性、进给量 $\downarrow$	碳钢和合金钢连续切削时的精加工
P10	YT15	79	15	—	6		碳钢和合金钢连续切削时的半精加工、精加工
P20	YT14	78	14	—	8		碳钢和合金钢连续切削时的粗加工、半精加工、精加工或断续切削时的精加工
P30	YT5	85	5	—	10		碳钢和合金钢的粗加工,也可用于断续切削
M10	YW1	84	6	4	6	硬度、切削速度 $\uparrow$ 抗弯强度、韧性、进给量 $\downarrow$	不锈钢、耐热钢、高锰钢及其他难加工材料及普通钢料、铸铁的半精加工和精加工
M20	YW2	82	6	4	8		不锈钢、耐热钢、高锰钢及其他难加工材料及普通钢料、铸铁的粗加工和半精加工

(3)其他刀具材料。

①陶瓷材料。陶瓷材料是以氧化铝为主要成分,经压制成形后烧结而成的一种刀具材料。它有很高的硬度和耐磨性,硬度达 78 HRC,耐热性高达 1 200 ℃ 以上,化学性能稳定,故能承受较高的切削速度。但陶瓷材料的最大弱点是抗弯强度低、冲击韧性差,主要用于钢、铸铁、有色金属、高硬度材料及大件和高精度零件的精加工。

②金刚石。金刚石分天然和人造两种,天然金刚石由于价格昂贵,应用很少。金刚石是目前已知的最硬物质,其硬度接近 10 000 HV,是硬质合金的 80~120 倍,但韧性差,在一定温度下与铁族元素的亲和力大,因此不宜加工黑色金属,主要用于加工有色金属,以及非金属材料的高速精加工。

③立方氮化硼(CBN)。立方氮化硼由氮化硼在高温高压作用下转变而成。它具有仅次于金刚石的硬度和耐磨性,硬度可达8 000~9 000 HV,耐热性高达1 400 ℃,化学稳定性好,与铁族元素的亲和力小,但强度低、焊接性差,主要用于淬硬钢、冷硬铸铁、高温合金和一些难加工材料。

④涂层刀具材料。根据涂层刀具基体材料的不同,涂层刀具分为硬质合金涂层刀具、高速钢涂层刀具及在陶瓷和超硬材料上的涂层刀具。

硬涂层刀具是在韧性较好的刀具基体上,涂覆一层耐磨性好的难熔金属化合物,这既能提高刀具的耐磨性,又不降低其韧性。常用的涂层材料有碳化钨(WC)、碳化钛(TiC)、氧化铝(Al_2O_3)及其复合材料等。

2.3 金属切削过程

2.3.1 金属切削层的变形

以切削塑性金属为例,切削层金属转变为切屑而与母体分离的本质,是工件表层材料在加工过程中,受到刀具切削刃和前面的强烈挤压,连续发生弹性变形—塑性变形—断裂破坏,使切削层不断被变成切屑从前面流出。图 2-39 为低速切削时形成的三个变形区情况。

1. 第一变形区

当刀具前面以切削速度 v_c 挤压切削层时,切削层中的某点沿 OA 面开始产生剪切滑移,直到其流动方向开始与刀具前面平行,才不再沿 OM 面滑移,切削层形成的切屑沿刀具前面流出。从 OA 面开始发生塑性变形到 OM 面晶粒的剪切滑移基本完成,这一区域称为第一变形区。第一变形区的主要特征是沿滑移面的剪切滑移变形及随之产生的加工硬化。

2. 第二变形区

当剪切滑移形成的切屑在刀具前面流出时,切屑底层进一步受到刀具的挤压和摩擦,使靠近刀具前面处的金属再次产生剪切变形,称为第二变形区。

3. 第三变形区

工件与刀具后面接触的区域,受到刀具刃口与刀具后面的挤压和摩擦,造成已加工表面变形,称为第三变形区。这是由于在实际切削中刀具的刃口不可避免地存在钝圆半径 r_0 ,使被挤压层再次受到刀具后面的拉伸、摩擦作用,进一步产生塑性变形,使已加工表面变形加剧。

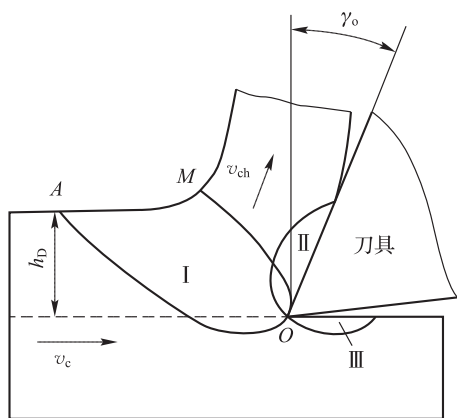


图 2-39 低速切削时形成的三个变形区

2.3.2 切屑的种类

加工材料性质不同,切削条件不同,切削过程中的变形程度也不同。根据切削过程中变形程度的不同,形成了以下四种不同形态的切屑。

1. 带状切屑

带状切屑连续成带状,底面光滑,背面无明显裂纹,呈微小锯齿形,如图 2-40(a)所示。一般加工塑性金属材料(如低碳钢、铜、铝),采用较大的刀具前角 γ_0 、较小的切削层公称厚度 h_D

和较高的切削速度 v_c 时,最易形成这种切屑。形成带状切屑时,切削力波动小,切削过程比较平稳,已加工表面粗糙度较小,但需采取断屑措施来保证正常生产,尤其是自动生产线和自动机床生产。

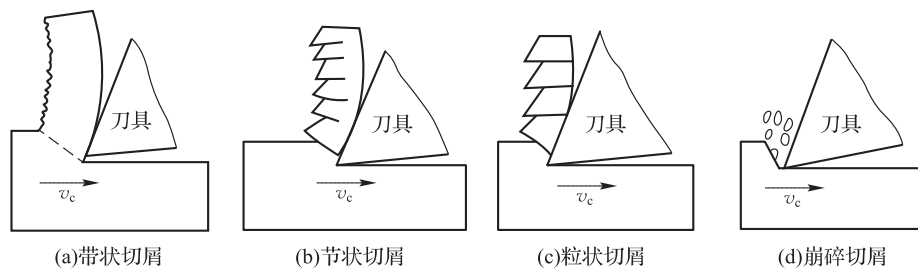


图 2-40 切屑的种类

2. 节状切屑

节状切屑又称挤裂切屑,这种切屑背面有较深的裂纹,呈较大的锯齿形,如图 2-40(b)所示。一般加工塑性较低的金属材料(如黄铜),在刀具前角 γ_0 较小、切削层公称厚度 h_D 较大和切削速度 v_c 较低,或加工碳素钢材料在工艺系统刚性不足时,易形成这种切屑。形成节状切屑时,切削力波动较大,切削过程不太稳定,已加工表面粗糙度较大。

3. 粒状切屑

粒状切屑又称单元切屑。切削塑性材料时,若整个剪切面上的切应力超过了材料断裂强度,则当所产生的裂纹贯穿切屑断面时,挤裂呈粒状切屑,如图 2-40(c)所示。当采用小前角或副前角,以极低的切削速度 v_c 和大的切削层公称厚度 h_D 切削时,会形成这种切屑。形成粒状切屑时,切削力波动大,切削过程不平稳,已加工表面粗糙度大。

4. 崩碎切屑

切削铸铁、青铜等脆性材料时,切削层通常在弹性变形后未经塑性变形就被挤裂,形成不规则的碎块状的崩碎切屑,如图 2-40(d)所示。工件材料越脆硬,刀具前角 γ_0 越小,切削层公称厚度 h_D 越大,越易产生崩碎切屑。形成崩碎切屑时,切削力波动大,且切削层金属集中在切削刃口碎断,易损坏刀具,加工表面也凹凸不平,已加工表面粗糙度增大。

2.3.3 积屑瘤

1. 积屑瘤的形成

在切削速度不高而又能形成连续性切屑的情况下,加工钢料或其他塑性材料时,常在切削刃口附近黏结一块很硬的金属堆积物,它包围着切削刃且覆盖刀具部分前面,这就是积屑瘤。

积屑瘤的形成主要是切削加工时,在一定的温度和压力作用下,切屑与刀具前面发生强烈摩擦,致使切屑底层金属流动速度降低而形成滞流层。如果温度和压力合适,滞流层就与刀具前面黏结而留在其上,由于黏结层经过塑性变形硬度提高,当连续流动的切屑从黏结层上流动时,又会形成新的滞留层,使黏结层在前一层的基础上积聚,这样一层又一层地堆积,黏结层越来越大,最后长成积屑瘤。当积屑瘤生成时或生成后,在外力、振动等的作用下,会局部断裂或脱落;另外,当切削温度超过工件材料的再结晶温度时,由于加工硬化消失,金属软化,积屑瘤也会脱落和消失。由此可见,产生积屑瘤的决定因素是切削温度,加工硬化和黏结是形成积屑瘤的必要条件。

积屑瘤的化学成分与工件材料相同,它的硬度是工件材料的 2~3.5 倍,与刀具前面黏结牢固,能担负实际切削工作,但不稳定,时生时灭,时大时小。

2. 影响积屑瘤的主要因素与控制

要抑制积屑瘤的生成和发展,必须有效控制切屑底层与刀具前面的黏结和加工硬化。

(1)通过热处理降低工件材料塑性,提高其硬度,可抑制积屑瘤的生成。

(2)切削速度是通过切削温度和摩擦系数来影响积屑瘤的。低速切削时,切屑流动较慢,切削温度较低,切屑与刀具前面摩擦系数小,切屑与刀具前面不易发生黏结,不会形成积屑瘤,因此用高速钢刀具低速车削或铰削,可获得较小的表面粗糙度值;高速切削时,切削温度高,切屑底层金属软化,加工硬化和变形强化消失,也不会生成积屑瘤,因此,选择耐热性好的刀具材料进行高速切削,也可获得较小的表面粗糙度值;中速切削时,切削温度为 $300\sim 400\text{ }^{\circ}\text{C}$,是形成积屑瘤的适宜温度,此时摩擦系数最大,积屑瘤生长得最高,因而表面粗糙度值最大。

(3)减小进给量、增大刀具前角、减小刀具前面的粗糙度值、合理使用切削液等,可使切削变形减小、切削力减小、切削温度下降,都可抑制积屑瘤的生成。

2.4 切削力与切削功率

在切削过程中,切削力直接影响切削热、刀具磨损与耐用度、加工精度和已加工表面质量。在实际生产中,切削力又是计算切削功率,设计机床、刀具和夹具时进行强度、刚度计算的主要依据。因此,研究切削力的变化规律,对于分析切削过程和实际生产都有重要意义。

2.4.1 切削力的来源与分解

金属切削时,工件材料抵抗刀具切削时所产生的阻力称为切削力。它与刀具作用在工件上的力大小相等,方向相反。切削力来源于两方面:一是三个变形区内金属产生的弹性变形抗力和塑性变形抗力;二是切屑与前面、工件与后面之间的摩擦力。

切削时的总切削力一般为空间力,其方向和大小受多种因素影响而不易确定。为了便于分析切削力的作用、测量及计算其大小,便于生产实际的应用,一般把总切削力(F)分解为三个互相垂直的切削分力 F_c 、 F_p 和 F_f ,如图 2-41 所示。

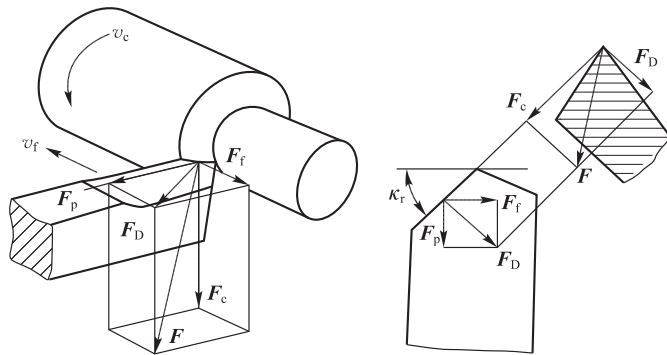


图 2-41 切削合力和分力

1. 主切削力 F_c

主切削力是总切削力在主运动方向上的分力。它与主运动方向一致,垂直于基面,是三个切削分力中最大的,所以称为主切削力。主切削力作用在工件上,并通过卡盘传递到机床主轴箱,它是设计机床主轴、齿轮和计算机床切削功率,校核刀具、夹具的强度与刚度,选择切削用量等的主要依据。

2. 背向力 F_p

背向力是总切削力在吃刀方向上的切削分力,在内、外圆车削中又称径向力,单位为 N。由于在背向力方向上没有相对运动,因此,背向力不消耗切削功率,但它作用在工件和机床刚性最差的方向上,易使工件在水平面内变形,影响工件精度并易引起振动。背向力是校验机床刚度的主要依据。

3. 进给力 F_f

进给力是总切削力在进给运动方向上的切削分力,在外圆车削中又称轴向力,单位为 N。进给力作用在机床的进给机构上,是校验机床进给机构强度和刚度的主要依据。

2.4.2 单位切削力和切削功率

单位切削力是指单位切削面积上的主切削力,用 p 表示,单位为 N/mm^2 。可按式(2-7)进行计算

$$p = \frac{P_c}{A_D} = \frac{F_c v_c}{a_p f} \quad (2-7)$$

式中, P_c 为切削功率, kW; F_c 为主切削力, N; A_D 为切削层面积, mm^2 ; v_c 为切削速度, m/min; a_p 为背吃刀量(切削深度), mm; f 为车刀每转进给量, mm/r。

单位切削力 p 可在《切削用量手册》中查到。

切削功率是在切削过程中消耗的功率,它等于总切削力的三个分力消耗的功率总和,用 P_c 表示,单位为 kW。由于进给力 F_f 所消耗的功率占比例很小(为 1%~1.5%),通常略去不计。背向力 F_p 方向的运动速度为零,不消耗功率,所以,切削功率为

$$P_c = \frac{F_c v_c \times 10^{-3}}{60} \quad (2-8)$$

式中, P_c 为切削功率, kW; F_c 为主切削力, N; v_c 为切削速度, m/min。

根据切削功率选择机床电机功率时,还应考虑机床的传动效率。机床电机功率为

$$P_E \geq \frac{P_c}{\eta} \quad (2-9)$$

式中, P_E 为机床电机功率, kW; η 为机床的传动效率,一般为 0.75~0.85。

2.4.3 影响切削力的主要因素

1. 工件材料的影响

工件材料的强度、硬度越高,材料的剪切屈服强度越高,切削力越大。工件材料的塑性、韧性好,加工硬化的程度高,由于变形严重,故切削力也增大。

2. 切削用量的影响

在切削用量中,背吃刀量与进给量对切削力影响较大。当 a_p 或 f 加大时,切削层的公称横截面积增大,变形抗力和摩擦阻力增加,因而切削力随之加大。实训证明,当其他条件一定时,背吃刀量 a_p 增大一倍时,切削力也增大一倍;进给量 f 增加一倍时,切削力增加 70%~80%。在生产实践中,切削层的横截面积相同时,选择大的 f 的切削力比选择大的 a_p 的切削力要小,如强力切削法就是基于这个原理。

3. 刀具几何角度的影响

前角 γ_o 加大,切削层易从刀具前面流出,切削变形减小,因此切削力下降。

主偏角 κ_r 对三个分力都有影响,但对主切削力 F_c 的影响较小,对进给力 F_f 和背向力 F_p 的影响较大。当 κ_r 增大时, F_f 增大, F_p 减小。

刃倾角 λ_s 对主切削力的影响较小,对进给力 F_f 和背向力 F_p 的影响较大。当 λ_s 逐渐由正值变为负值时, F_f 增大, F_p 减小。

2.5 切削热与切削温度

切削热和切削温度是影响刀具磨损和加工精度的重要原因。高的切削温度使刀具磨损加剧,耐用度下降;机床的热变形,工件和刀具受热膨胀都会导致工件精度达不到要求。

2.5.1 切削热的产生与传散

在切削过程中,三个变形区因变形和摩擦所做的功绝大部分转变为热能,称为切削热。切削热来源于切削时切削层金属发生弹性和塑性变形做功转变的热;刀具前面与切屑、刀具后面与工件表面摩擦产生的热,其中,切削塑性金属时,切削热主要来源于剪切区变形和刀具前面与切屑的摩擦所消耗的功。切削脆性材料时,切削热主要来源于刀具后面与工件的摩擦所消耗的功。总的来说,切削塑性材料产生的热量要比切削脆性材料产生的热量多。

切削区域的热量由切屑、工件、刀具及周围的介质向外传散。各部分传出热量的百分比,随工件材料、刀具材料、切削用量、刀具几何参数及加工方式的不同而变化。在一般干切削的情况下,大部分切削热由切屑带走,其次传至工件和刀具,周围介质传出的热量很少。

例如,车削加工时,切屑带走的切削热为 50%~86%,车刀传出的切削热为 10%~40%,工件传出的切削热为 3%~9%,周围的介质传出的切削热为 1%。切削速度越大或切削厚度越大,切屑带走的热量越多。

又如,钻削加工时,切屑带走的切削热为 28%,刀具传出的切削热为 14.5%,工件传出的切削热为 52.5%,周围的介质传出的切削热为 5%。

2.5.2 影响切削温度的因素

切削温度的高低一方面取决于单位时间内产生热量的多少,另一方面取决于单位时间内传散热量的多少,所以,切削温度是产生热量与传散热量的综合结果。

1. 工件材料的影响

工件材料的强度越大、硬度越高,切削时消耗的功越多,产生的切削热越多,切削温度升高。工件材料的热导率大,热量容易传出,若产生的切削热相同,则热容量大的材料切削温度低。工件材料的塑性越好,切削变形越大,切削时消耗的功越多,产生的切削热越多,切削温度升高。

2. 切削用量的影响

在切削用量中,切削速度对切削温度影响最大。

(1) 切削速度 v_c 。切削速度 v_c 增加,切削的路径增长,切屑底层与刀具前面发生强烈摩擦,从而产生大量的切削热,切削温度显著升高。

(2) 进给量 f 。随着进给量的增大,单位时间内金属的切除量增加,消耗的功率增大,切削热增大,切削温度上升。

(3) 背吃刀量 a_p 。随着背吃刀量的增加,切削层金属的变形与摩擦成正比例增加,产生的热量按比例增加。但由于切削刃参加工作的长度也成比例增长,改善了刀头的散热条件,最终切削温度略有增高。

3. 刀具几何参数的影响

刀具几何参数对切削温度影响较大的是前角和主偏角。

前角 γ_0 增大,切削变形及切屑与刀具前面的摩擦减小,产生的热量小,切削温度下降。反之,切削温度升高。实训证明,当前角从 10° 增大到 25° 时,切削温度约降低 25%。但前角太大,刀具的楔角减小,散热体积减小,切削温度反而升高。

主偏角 κ_r 增大,刀具主切削刃工作长度缩短,刀尖角 ϵ_r 减小,散热面积减少,切削热相对集中,从而提高了切削温度;相反,主偏角减小,切削温度降低。

4. 刀具磨损的影响

在后刀面的磨损值达到一定数值后,对切削温度的影响增大,切削速度越高,影响越显著。合金钢的强度越大,热导率越小,所以,切削合金钢时刀具磨损对切削温度的影响比切削碳素钢时大。

5. 切削液的影响

切削液对切削温度的影响与切削液的导热性能、比热容、流量及切削液本身的温度有很大的关系。从导热性能来说,油类切削液不如乳化液,乳化液不如水基切削液。如果采用乳化液代替油类切削液,加工生产效率可提高 50%~100%。

切削液流量越大,带走的热量越多,对切削温度越有利。切削液的温度越低,就越能降低切削温度。如果将 20°C 的切削液降低到 5°C ,则刀具的寿命可提高 50%。

2.6 刀具磨损与刀具耐用度

刀具在切削过程中与切屑、工件之间产生剧烈的挤压、摩擦,从而产生磨损。刀具磨损会缩短刀具的使用时间,降低表面质量,增加刀具材料的损耗。因此,刀具磨损是影响生产效率、加工质量和成本的一个重要因素。

2.6.1 刀具磨损的形式

刀具磨损可分为正常磨损和非正常磨损两类。

1. 刀具的正常磨损

正常磨损是指刀具在设计与使用合理、制造与刃磨质量符合要求的情况下,在切削过程中逐渐产生的磨损,如图 2-42(a)所示。刀具的正常磨损主要包括以下三种形式。

(1)前刀面磨损。在切削塑性材料、切削速度较高和切削厚度较大的情况下,当刀具的耐热性和耐磨性稍有不足时,切屑在前刀面上经常会磨出一个月牙洼。月牙洼产生的地方是切削温度最高的地方。前刀面磨损量的大小,用月牙洼的宽度(KB)和深度(KT)表示,如图 2-42(b)所示。

(2)后刀面磨损。由于工件表面与刀具后面之间存在强烈的挤压、摩擦,在后刀面上毗邻切削刃的地方很快被磨出后角为零的小棱面,这就是后刀面磨损。在切削速度较低、切削厚度较小的情况下,切削塑性金属及加工脆性金属时主要发生这种磨损。在后刀面磨损带中间部位(B区),磨损比较均匀,平均磨损带宽度以 VB 表示,最大磨损宽度以 $VB_{\max}$ 表示,如图 2-42(c)所示。

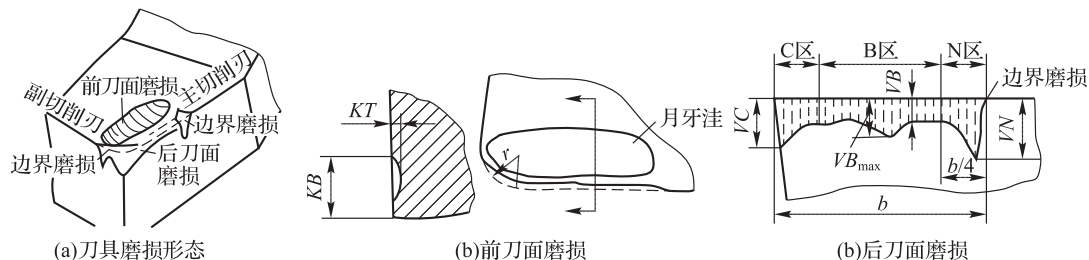


图 2-42 刀具的正常磨损形式

(3)前、后刀面同时磨损。这种磨损形式是指切削之后,刀具上同时出现前刀面和后刀面磨损。在切削塑性金属、采用大于中等切削速度和中等进给量时,常出现这种磨损形式。

2. 刀具的非正常磨损

非正常磨损亦称刀具破损,一般属于非正常失效,刀具破损大多与使用不当有关。刀具破损主要是切削过程中的冲击、振动、热应力等造成刀具切削刃突然崩刃碎裂、折断、卷刃或出现热裂纹等。在研究刀具磨损时,一般只研究刀具的正常磨损。

2.6.2 刀具的磨损过程及磨钝标准

1. 刀具的磨损过程

生产中,较常见到的是刀具后面磨损。在正常磨损情况下,刀具磨损量随切削时间的增加而逐渐加大。其磨损过程分为三个阶段,如图 2-43 所示。

(1)初期磨损阶段(OA 段)。在开始切削的短时间内,磨损较快。这是新刃磨的刀具表面粗糙不平或表面组织不耐磨(如烧伤、裂纹等)等原因造成的。另外,新刃磨的刀具比较锋利,与工件接触面积小,应力大,因此,刀具后面很快被磨出一个窄的棱面。

(2)正常磨损阶段(AB 段)。经初期磨损,刀具后面被磨出一条狭窄的棱面,接触面积增大,应力减小,故磨损量随时间的增加而均匀增长,磨损比较缓慢、稳定。这一阶段是刀具工作的有效阶段。

(3)急剧磨损阶段(BC 段)。在磨损量达到一定值后,切削刃变钝,切削力增大,切削温度升高,刀具的强度、硬度降低,磨损急剧加速。此时刀具如果继续工作,不但不能保证加工质量,而且刀具材料消耗多,成本增加,故应当避免刀具发生急剧磨损,即在正常磨损即将告终前,应及时换刀刃磨。

2. 刀具的磨钝标准

在使用刀具时,应该控制刀具在产生急剧磨损前必须重磨或更换新切削刃。这时刀具的磨损量称为磨钝标准或磨损限度。由于后刀面磨损最常见,且易于控制和测量。因此,规定后刀面上均匀磨损区平均磨损量允许达到的最大值 VB 作为刀具的磨钝标准。

实际生产中磨钝标准应根据加工要求制定。精加工,主要保证加工精度和表面质量,因此,磨钝标准 VB 定得较小。粗加工时,为了减少磨刀次数,提高生产率,磨钝标准 VB 定得较大。车刀的磨钝标准 VB 值见表 2-4,供使用时参考。

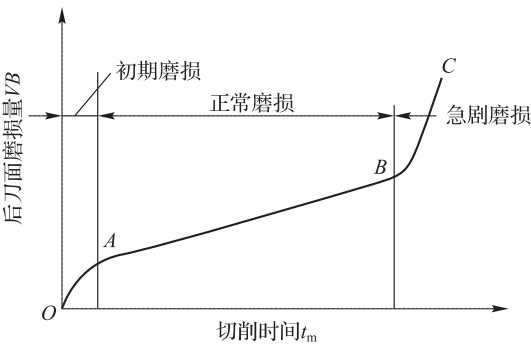


图 2-43 刀具磨损典型曲线

表 2-4 车刀的磨钝标准 VB 值 单位: mm

加工方式	加工条件			
	刚性差	钢件	铸铁件	钢、铸铁大件
精车	0.1~0.3			
粗车	0.4~0.5	0.6~0.8	0.8~1.2	1.0~1.5

实际生产中,操作工人也可以根据观察到的现象,如工件上是否出现亮点和暗点、加工表面粗糙度的变化情况、切屑形状和颜色的变化、是否出现振动或不正常的声音等,判断刀具是

否达到磨钝标准。

2.6.3 刀具耐用度

按磨钝标准鉴定刀具能否继续正常工作,需要停机测量,这在生产现场是难以实现的。为了更加方便、快捷、准确地判断刀具的磨损情况,一般用刀具耐用度来间接地反映刀具的磨钝标准。在柔性加工设备上,也常使用切削力的数值作为刀具的磨钝标准,从而实现对刀具磨损状态的自然监控。

1. 刀具耐用度的定义

刃磨后的刀具从开始切削到磨损量达到磨钝标准为止的总切削时间称为刀具耐用度,用 T 表示,单位为 min 。刀具耐用度为切削时间,不包括对刀、测量等非切削时间。

刀具耐用度的大小表示刀具磨损的快慢,刀具耐用度大,表示刀具磨损慢;刀具耐用度小,表示刀具磨损快。另外,刀具耐用度与刀具寿命是两个不同的概念。刀具寿命是指一把新刀从投入使用到报废为止总的切削时间,刀具寿命等于刀具耐用度乘以刃磨次数。

生产实践中经常遇到的技术问题之一,就是根据工件材料选定刀具材料之后,如何正确选择切削用量 v_c, f, a_p 。一般是先选定背吃刀量、进给量和其他参数后,根据已确定的刀具寿命的合理数值 T 来计算切削速度,称为刀具耐用度下允许的切削速度,用 v_{cT} 表示。 v_{cT} 是生产中选用切削速度的依据。

2. 刀具耐用度合理数值的确定

根据刀具的耐用度方程,当刀具耐用度一定时,为了提高生产率,应首先考虑增大背吃刀量,其次是增大进给量,最后根据耐用度、已定的背吃刀量和进给量确定切削速度。这样既能保持刀具耐用度,发挥刀具切削性能,又能提高生产率。由于刀具耐用度确定得太低和太高都会使生产率降低,因此,刀具耐用度存在一个合理数值。

确定刀具耐用度的合理数值的方法一般有两种:一是根据加工一个零件花费时间最少的观点来制定刀具耐用度,称为最大生产率耐用度;二是根据加工一个零件的成本最低的观点来制定刀具耐用度,称为最低成本耐用度。生产中常采用最低成本耐用度,只有当生产任务紧急或生产中出现不平衡环节时,才选用最低生产率耐用度。

表 2-5 中推荐的某些工厂刀具耐用度数值,可供选用时参考。生产中还可参考有关手册资料确定刀具耐用度。

表 2-5 刀具耐用度数值 单位: min

刀具类型	耐用度	刀具类型	耐用度
高速钢车刀、刨刀、镗刀	30~60	硬质合金面铣刀	90~180
硬质合金焊接车刀	15~60	齿轮刀具	200~300
硬质合金可转位车刀	15~45	组合机床、自动线刀具	240~480
高速钢钻头	80~120		

2.7 切削用量和切削液

2.7.1 切削用量

切削用量的大小对切削力、切削功率、刀具磨损、加工质量、生产率和加工成本等均有显著

的影响。在切削加工中,采用不同的切削用量会得到不同的切削效果,为此必须合理选择切削用量。所谓合理选择切削用量,就是指在保证工件加工质量和刀具耐用度的前提下,充分发挥机床、刀具的切削性能,使生产率最高,生产成本最低。

1. 切削用量的选择原则

(1)粗加工时切削用量的选择原则。首先,根据工件的加工余量,选择尽可能大的背吃刀量 a_p ;其次,根据机床进给系统及刀杆的强度和刚度等的限制条件,选择尽可能大的进给量 f ;最后,根据刀具耐用度确定最佳的切削速度 v_c ,并且校核所选切削用量是机床功率允许的。

(2)精加工时切削用量的选择原则。首先,根据粗加工后的加工余量确定背吃刀量 a_p ;其次,根据已加工表面粗糙度的要求,选取较小的进给量 f ;最后,在保证刀具耐用度的前提下,尽可能选择较高的切削速度 v_c ,并校核所选切削用量是机床功率允许的。

2. 切削用量的选择方法

(1)背吃刀量 a_p 的选定。背吃刀量应根据加工余量确定,粗加工时应尽量用一次走刀切除全部加工余量。当加工余量过大、机床功率不足、工艺系统刚度较低、刀具强度不够、断续切削及切削时冲击振动较大时,可分几次走刀。当切削表面层有硬皮的铸、锻件时,应尽量使背吃刀量大于硬皮层的厚度,以保护刀尖。

半精加工和精加工的加工余量一般较小,可一次切除。当为保证工件的加工质量时,也可二次走刀。

多次走刀时,应将第一次的背吃刀量取大些,一般为总加工余量的 $2/3 \sim 3/4$ 。在中等切削功率的机床上,粗加工背吃刀量可达 $8 \sim 10$ mm,半精加工背吃刀量可取 $0.5 \sim 2$ mm,精加工背吃刀量可取 $0.1 \sim 0.4$ mm。

(2)进给量 f 的选定。粗加工时,由于对工件表面质量没有太高的要求,这时主要考虑机床进给系统及刀杆的强度和刚度等限制因素。在工艺系统的强度和刚度允许的情况下,可选用较大的进给量 f ,可根据工件材料、刀杆尺寸、工件直径和已确定的背吃刀量查阅切削用量等相关手册确定。

半精加工和精加工时,由于进给量 f 对工件的已加工表面粗糙度影响较大,进给量 f 取得比较小,通常按照工件的表面粗糙度值要求,可根据工件材料、刀尖圆弧半径、切削速度等条件查阅切削用量等相关手册来选择进给量 f 。

(3)切削速度 v_c 的选定。根据已选定的背吃刀量和进给量,按照一定刀具耐用度下允许的切削速度公式来确定切削速度 v_c 。粗加工时,背吃刀量和进给量都较大,切削速度受刀具耐用度和机床功率的限制,一般较低。精加工时,背吃刀量和进给量都取得较小,切削速度主要受加工质量和刀具耐用度影响,一般较高。

在选择切削速度 v_c 时,还应考虑工件材料强度和刚度及工件的切削加工性等因素的影响:

- ①应尽量避免开屑瘤产生的切削速度区域。
- ②断续切削、加工大件、细长件、薄壁工件时应选用较低的切削速度。
- ③加工合金钢、高锰钢、不锈钢等材料的切削速度应比加工普通中碳钢的切削速度低 $20\% \sim 30\%$ 。
- ④在易发生振动的情况下,切削速度应避开自激振动的临界速度。
- ⑤加工带外皮的工件时,应适当降低切削速度。

2.7.2 切削液

1. 切削液的作用

合理地选用冷却润滑液(切削液),可以有效地减少切削过程中刀具与切屑、工件加工表面

的摩擦,从而降低切削力和功率的消耗及由此而转化的切削热量;同时,通过冷却润滑液的循环,及时地吸收并带走切削区域中释放的热量。因此,冷却润滑液减少切削热量的产生和及时带走切削热量,从而提高了刀具的寿命和已加工表面的质量,有效地提高了生产率。切削液的具体作用包括以下四个方面。

(1)冷却作用。切削液一般以液体的形式浇注在切削区内,一方面,它能从切削区带走大量的切削热,使切削温度降低,起到冷却作用;另一方面,切削液使刀具、切屑、工件间的摩擦减小,使产生的切削热减少。

(2)润滑作用。切削液能渗入刀具的前面、后面与工件表面间,形成一层很薄的油膜,可减少它们之间的摩擦,减少黏结及刀具磨损量,提高加工表面质量。

(3)排屑与清洗作用。在磨削、钻削、深孔加工和自动线等生产中,利用浇注或高压喷射切削液来排除切屑或引导切屑流向。切削液的流动可以冲走切削区域和机床上的细碎切屑,并可冲洗黏附在机床、刀具和夹具上的细碎切屑和磨粒细粉,以防止划伤已加工表面和机床导轨面,并减少刀具磨损。

(4)防锈作用。在切削液中加入防锈剂,可在金属表面形成一层保护膜,对工件、机床和刀具都能起到防锈的作用。

2. 切削液的种类

常用的切削液分为三大类,即水溶液、乳化液和切削油。

(1)水溶液。水溶液是以水为主要成分并加入防锈添加剂和油性添加剂的切削液。水溶液主要起冷却作用,同时由于其润滑性能较差,因此主要用于粗加工和普通磨削加工中。

(2)乳化液。乳化液是由乳化油加 95%~98%的水稀释成的一种切削液。乳化油由矿物油和乳化剂配制而成。添加乳化剂使矿物油与水乳化,形成稳定的切削液。

(3)切削油。切削油是以矿物油为主要成分,少数情况采用动植物油或复合油,并加入一定添加剂而构成的切削液。切削油主要起润滑作用。

3. 切削液的选择

切削液应根据工件材料、刀具材料、加工方法和技术要求等具体情况进行选择。

(1)粗加工时切削液的选择。因为粗加工所用的加工余量、切削用量较大,所以会产生大量的切削热。在采用高速钢刀具切削时,由于高速钢刀具耐热性较差,需要采用切削液,这时使用切削液的主要目的是降温冷却,减少刀具磨损,因此应采用 3%~5%的乳化液;硬质合金刀具由于耐热性较高,一般不用切削液,若要使用切削液,则必须连续、充分地浇注,以免处在高温状态的硬质合金刀片产生巨大的内应力而出现裂纹。

(2)精加工时切削液的选择。精加工要求工件表面粗糙度值较小,一般应采用润滑性能较好的切削液,如高浓度的乳化液或含极压添加剂的切削油。采用高速钢刀具精加工时,可用 15%~20%的乳化液,以降低刀具磨损,改善工件加工表面质量。

(3)根据工件材料的性质选用切削液。切削塑性材料时需用切削液,切削铸铁等脆性材料时一般不加切削液,以免崩碎状切屑黏附在机床的运动部件上。切削铜合金和有色金属时,一般不得使用含硫化添加剂的切削液,以免腐蚀工件表面。切削铝、镁及其合金时,不得使用水溶液或水溶性乳化液。在贵重精密机床上加工工件时,不得使用水溶性切削液及含硫、氯添加剂的切削油。

综上所述,正确选用切削液,可以在减少切削热和加强热传散两个方面抑制切削温度的升高,从而提高刀具耐用度和工件已加工表面质量。实践证明,合理使用切削液是提高金属切削加工效益既经济又简便的有效途径。

2.8 金属材料的切削加工性

工件材料的切削加工性是指将其切削加工成合格零件的难易程度。某种工件材料加工的难易程度,不仅取决于工件材料本身,还取决于具体的加工要求及切削条件。因此,研究工件材料切削加工性的目的就是找出改善材料切削加工性的途径。

2.8.1 衡量材料切削加工性的指标

根据加工要求和生产条件的不同,评定材料切削加工性的指标也不相同,常用的指标有以下几种。

1. 刀具耐用度 T

在一定刀具耐用度下,允许的切削速度指标在相同切削条件下加工不同工件材料时,若一定切削速度下刀具耐用度 T 较大,或一定刀具耐用度下切削速度 v_{cT} 较大的材料,其加工性较好;反之,其工件材料的加工性较差。

在切削普通金属材料时,通常用刀具耐用度 $T=60\text{ min}$ 时,某种材料所允许的最大切削速度 v_{c60} 的高低来评定材料切削加工性的好坏。难加工材料用 v_{c20} 来评定。

此外,经常使用相对加工性指标,即以 $\sigma_b=0.637\text{ GPa}$,正火状态的45钢的 v_{c60} 作为基准,记作 v_{o60} ,其他材料的 v_{c60} 与 v_{o60} 之比 K_r 称为相对加工性,即

$$K_r = \frac{v_{c60}}{v_{o60}} \tag{2-10}$$

凡 K_r 大于1的材料,其切削加工性比45钢好; K_r 小于1的材料,其切削加工性比45钢差。常见工件材料的相对加工性 K_r 分为八级,见表2-6。

表 2-6 常见工件材料的相对加工性指标

加工性等级	名称及种类		相对加工性 K_r	代表性材料
1	很容易切削材料	一般有色金属	>3.0	5-5-5 铜铅合金、铝镁合金、9-4 铝铜合金
2	容易切削材料	易切削钢	2.5~3.0	退火 15Cr、自动机钢
3		较易切削钢	1.6~2.5	正火 30 钢
4	普通材料	一般钢及铸铁	1.0~1.6	45 钢、灰铸铁、结构钢
5		稍难切削材料	0.65~1.0	调质 2Cr13、85 钢
6	难加工材料	较难切削材料	0.5~0.65	调质 45Cr、调质 65Mn
7		难切削材料	0.15~0.5	1Cr18Ni9Ti、调质 50Cr、某些钛合金
8		很难切削材料	<0.15	铸造镍基高温合金

2. 已加工表面质量指标

将材料是否容易保证得到所要求的已加工表面质量,作为评定材料切削加工性的指标。一般精加工零件可用表面粗糙度值来评定工件材料的切削加工性。

3. 切削力和切削温度指标

在相同的切削条件下,凡切削力大、切削温度高的材料,其加工性差;反之,其切削加工性

就好。在粗加工或机床动力不足时,常以此指标来评定材料的切削加工性。

4. 切屑控制指标

在自动机床或自动生产线上,常用切屑控制的难易程度来评定工件材料的切屑加工性。凡是切屑容易被控制或容易折断的材料,其切屑加工性就好;反之,其切屑加工性就差。

一种工件材料很难在各方面都能获得较好的切削加工性。在实际生产中,只能根据需要选择一项或几项作为衡量工件材料切削加工性的指标。在一般生产中,常用保证一定刀具耐用度所允许的切削速度作为衡量切削加工性的指标。

2.8.2 影响材料切削加工性的因素

在切削加工中,主要是下列因素影响工件材料的切削加工性。

1. 工件材料的物理、力学性能

工件材料的强度、硬度、塑性、韧性、导热率等都会影响其切削加工性。工件材料的强度和硬度越高,则切削力越大,切削温度越高,刀具磨损越快,故切削加工性越差;工件材料的塑性越大,切削时塑性变形大,切削温度高,刀具容易黏结,且加工表面粗糙,故切削加工性差。

2. 工件材料的化学成分

除了金属材料中含碳量的多少以外,材料中加入 Mn、Si、Cr、Ni、Mo、V 等元素时,都将不同程度地影响工件材料的强度、硬度、韧性和塑性,从而影响工件材料的切削加工性。

3. 工件材料的金相组织

金属材料经过淬火处理后得到马氏体组织,由于硬度高、强度大,易使刀具磨损,切削加工性差;奥氏体不锈钢,虽然硬度不高,但韧性大、塑性好、加工硬化严重,因此,切削加工性也较差;冷硬铸铁表面渗碳体多,硬度相当高,很难切削。

2.8.3 改善材料切削加工性的途径

1. 采用热处理改善材料切削加工性

实际生产中,改善工件材料切削加工性的最常见的方法是对工件进行适当的热处理,通过改变工件材料的金相组织,使工件材料的切削加工性得到改善。例如,将硬度较高的高碳钢、工具钢等材料进行退火处理,降低其硬度,从而改善切削加工性;低碳钢可通过正火、冷拔等处理,降低塑性,提高硬度,从而改善切削加工性;中碳钢也可通过正火、调质等热处理方法,使其金相组织与材料硬度均匀,达到改善材料切削加工性的目的。

2. 选用切削性好的材料改善材料切削加工性

在保证零件的使用性能的前提下,设计时应选择切削加工性好的材料。例如,含有 S、P 等元素的易切钢和含有促进石墨化的元素(Si、Al、Ni 等)的铸铁切削加工性较好;低碳钢的切削加工性不好,而冷拔钢的切削加工性得到改善,中碳钢以部分球化的珠光体组织的切削加工性最好;高碳钢以完全球化退火状态易于切削加工;锻造毛坯余量不均匀,且表层有硬皮,不如冷拔或热轧毛坯的切削加工性好。

3. 采用特种加工及其他加工方法改善材料切削加工性

改进难加工材料切削加工性的一项有效措施是采用特种加工,以及振动切削、高温切削等加工方式。

另外,选用合适的刀具材料,确定合理的刀具角度和切削用量,安排适当的切削加工方法和加工顺序,采用切削液等,都可改善工件材料的切削加工性能。

2.9 高速切削及刀具

切削加工是制造技术的主要基础工艺,而高速切削是当今世界机械制造业中的一项高新技术。在现代工业发达的国家,高速切削作为一种新的切削加工技术正进入以发展高速切削、开发新的切削工艺和加工方法、提供成套的技术为特征的新阶段。

2.9.1 高速切削理论的提出及高速切削的定义和特征

1. 高速切削理论的提出

高速切削理论最早是由德国物理学家 Carl J. Salomon 在 1931 年 4 月提出,并发表了著名的 Salomon 曲线,如图 2-44(a)所示。

高速切削理论的主要内容是:在常规切削速度范围内,切削温度随着切削速度的提高而升高,但在切削速度提高到一定值后,切削温度不但不升高反而会降低,如图 2-44(b)所示,且该切削速度值与工件材料的种类有关。

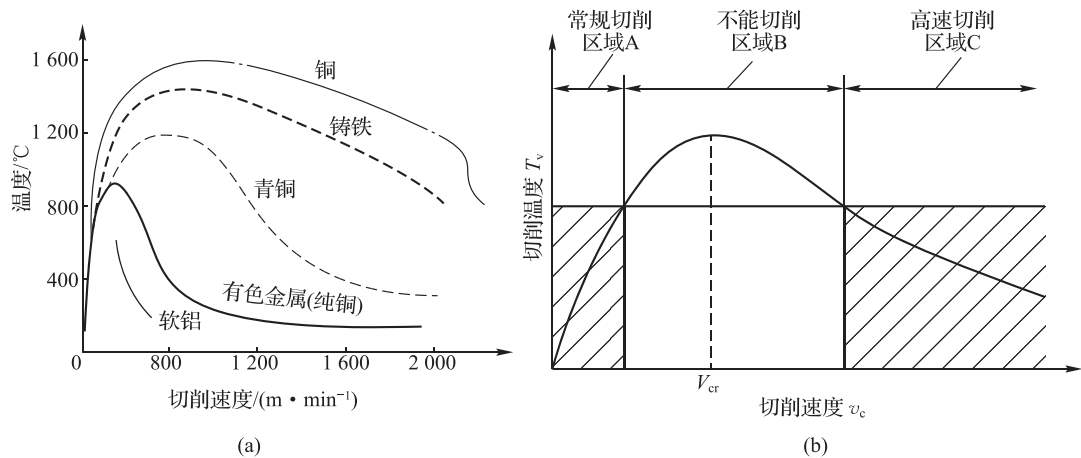


图 2-44 切削温度变化曲线

2. 高速切削的定义

目前高速切削技术比较普及的定义为 1992 年国际生产工程学会(CIRP)年会主题报告的定义:高速切削通常指切削速度超过传统切削速度 5~10 倍的切削加工。机床主轴转速在 10 000~20 000 r/min 以上,进给速度通常达 15~50 m/min,最高可达 90 m/min。

实际上,高速切削是一个相对概念,它包括高速铣削、高速车削、高速钻孔与高速车铣(绝大部分应用是高速铣削)等不同的加工方式,根据被加工材料的不同及加工方式的不同,其切削速度范围也不同。

目前,不同的加工材料的切削速度范围见表 2-7。

表 2-7 不同的加工材料的切削速度范围							单位:m/min
被加工材料	铝合金	铜合金	铸铁	钢	耐热镍基合金	钛合金	纤维增强塑料
切削速度范围	1 000~7 500	900~5 000	900~5 000	500~2 000	500	150~1 000	2 000~9 000

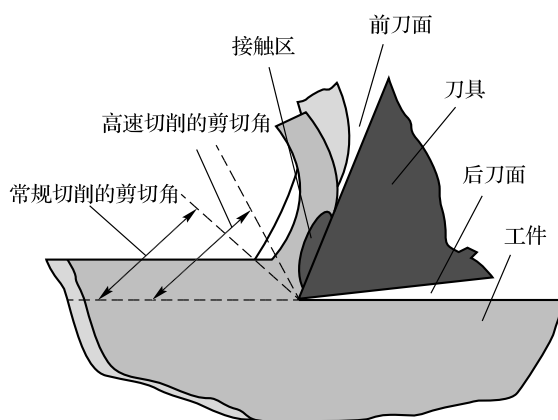


图 2-45 高速切削简化模型

3. 高速切削的特征

现代研究表明,高速切削时,切屑变形所消耗的能量大多数转变为热,切削速度越高,产生的热量越大,基本切削区的高温有助于加速塑性变形和切屑形成,而且大部分热量都被切屑带走。

高速切削变形过程的显著特征为:第一变形区变窄,剪切角增大,变形系数减小,如图 2-45 所示;第二变形区的接触长度变短,切屑排出速度极高,前刀面受周期载荷的作用。所以,高速切削的切削变形小,切削力大幅度下降,切削表面损伤减轻。

2.9.2 高速切削加工的特点

与传统切削加工相比,高速切削加工的切屑形成、切削力学、切削热与切削温度、刀具磨损与破损等基础理论有其不同的特征,高速切削的切削机理发生了根本性的变化,从而切削加工的结果也发生了本质的变化,表现出很多优点。

1. 加工效率高

高速切削具有高切削率、高进给率,可显著提高切削速度,其材料去除率通常可达传统切削的 3~5 倍以上。以瑞士 MIKRON 公司生产的 HSM-700 高速铣床为例,其最高转速可达 42 000 r/min,是普通铣削转速的几十倍,其加工效率自然远远高于普通铣削加工。

2. 切削力小

与传统切削相比较,高速切削的切削力小,振动频率低,可降低切削力 30%~90%,径向力降低更明显,利于薄壁零件加工。国外采用数控高速切削加工技术加工铝合金和钛合金薄壁零件的最小壁厚可达 0.005 mm。

3. 切削热对工件影响小

高速切削中 90% 的切削热被切屑带走,工件受热影响小,大大提高了工件的尺寸精度和形位精度。实验证明,当切削速度超过 600 m/min 后,切削温度的上升在大多数情况下不会超过 3℃,故高速切削特别适合加工易产生热变形的零件。

4. 加工精度高

高速旋转时刀具切削的激励频率远离工艺系统的固有频率,不会造成工艺系统的受迫振动,保证了好的加工状态,从而可获得较高的表面加工质量,而且残余应力较小。在加工过程中,切削力的降低对减小振动和偏差非常重要。这使工件在切削过程中的受力变形显著减小,有利于提高加工精度。加工时可将粗加工、半精加工和精加工合为一体,全部在一台机床上完成,减少了机床台数,避免由于多次装夹使精度变差。特别对于大型框架件、薄板件和薄壁槽形件的高精度高效加工,高速铣削是很有效的方法。

5. 可实现绿色加工

高速切削中刀具的红硬性好,刀具切削寿命能提高 70%,可不用或少用冷却液,实现绿色加工。以洛克希德·马丁公司的铝合金高速铣削为例,当主轴转速从 4 000 r/min 降低到 2 000 r/min 时,切削力下降 30%,而材料切除率增加 3 倍。由于切除率高、能耗低,工件在制

的时间段短,提高了能源和设备的利用率,降低了切削加工在制造系统资源总量中的比例。

6. 可加工各种难加工材料

在加工难切削材料时,采用高速切削技术,使用乳化切削液,采用油雾轻度润滑和冷却,不但能改善材料的切削状况,减小切削力,减少刀具的磨损,延长刀具的使用寿命,而且能减少工件的热变形与加工硬化,提高工件的表面质量,大大提高劳动生产率。

2.9.3 高速切削加工的应用领域

随着制造技术的快速发展,高速切削加工的应用领域越来越广泛。常用的加工领域如图 2-46 所示。

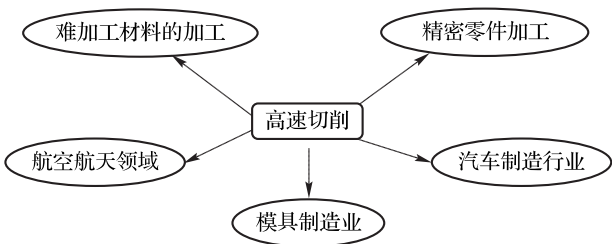


图 2-46 常用的加工领域图

1. 航空航天工业铝合金零件的加工

高速切削主要用于铣削高强度铝合金整体构件和薄壁类零件。飞机上的零件通常采用“整体制造法”,其金属切除量相当大(一般在 70%以上,有的高达 98%),成品壁厚只有 1 mm。采用高速切削可以大大缩短切削时间,又保证了零件的质量。另外,飞机的蜂窝结构件必须采用高速铣削技术才能保证质量。

2. 模具制造业

型腔加工同样有很大的金属切除量,过去一直为电加工所垄断,其加工效率低。电火花加工工件表面粗糙度达不到要求,一般还要进行抛光或研磨,生产周期长。模具的传统加工工艺流程如图 2-47(a)所示。

大部分模具均适用于高速铣削技术,高速切削可加工硬度达 50~60 HRC 的淬硬钢,因而可取代大部分电火花加工。在模具行业,高速切削采用的是典型的高转速、多速进给、低切深的加工方法,这可以大大简化工艺过程,缩短生产周期。高速切削加工工艺流程如图 2-47(b)所示。

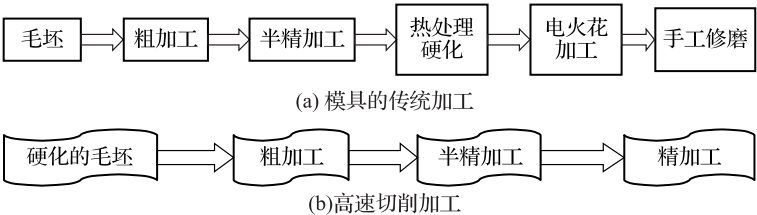


图 2-47 模具的传统加工与高速切削加工工艺流程

3. 汽车制造行业

对技术变化较快的汽车零件,如汽车发动机机体、缸盖、汽车覆盖件模具,采用高速加工(过去多用组合机加工,柔性差)。

4. 难加工材料的加工

难加工材料如镍基高温合金和镍合金。所有的高速切削研究成果均表明:在高速切削条件下,普通高速钢刀具可切削高强度钢,加工合金材料的脆性失效现象并没有发生,工件的表面质量明显提高。

5. 精密零件加工

由于高速切削具有切削平稳、不易产生颤振、热变形小等优点,因此能高效地加工出精度高、表面质量佳的零件,如天文望远镜的光学镜头等。

2.9.4 高速切削的机理

1. 切削力

在常速切削时,通常随切削速度的提高,切削力也增大,但在高速切削时,随切削速度增加,切削温度升高,摩擦因数减小,剪切角增大,切削力反而降低。

高速切削时,假设定为单一剪切面。 γ_o 为前角, φ 为剪切角,带状切屑,切削厚度为 a_c ,切屑厚度为 a_{ch} 。切削时,剪切面上发生形变所需要的力必须由刀具的前面通过切削传递到剪切面上,其中主要为剪切力 F_s ,切削层材料经过剪切面时,沿着剪切面滑移,以致造成动量的改变,需要加一作用力 F_m 。

一般情况下,当切削速度 v_c 低于 1 500 m/min 时,与 F_s 相比, F_m 很小,可视为零。另外,作用力 F_m 与切削速度 v_c 的平方成比例增大,当高速切削时, F_m 会增加很大。该 F_m 需要在刀具前面增加作用力 F_a 与 N_a ,如图 2-48 所示。合力 R_a 的方向取决于前角 γ_o 与前面摩擦因数 μ ,而摩擦因数 μ 是切削速度 v_c 和刀具-切屑接触面的法向力的函数。因此,其值大小取决于 F_s 和 F_m 。

另外,要求出切削力,还必须知道剪切角 φ 与前面摩擦因数 μ (摩擦角 $\beta, \mu = \tan \beta$)、前角 γ_o 之间的关系,即 $\varphi = f(\beta, \gamma_o)$ 。受到发生及其剧烈变形的剪切面上的弹塑性力学问题和前面上在很高压力下发生的摩擦现象和切削速度等的影响。

若工件材料、切削面积 A_c 和刀具前角 γ_o 一定,则切削力主要由 φ, β 而定,但它们又受切削速度的影响。当然对一定的工件材料,其动态抗剪强度 S_s 随切削温度变化也有改变。因此,切削速度直接影响切削力的大小。从前面的分析可知,切削开始时,随切削速度提高,摩擦因数 μ 增加,剪切角 φ 减小,切削力增加;但在高速切削范围内,随切削速度提高,摩擦因数 μ 减少,剪切角 φ 增大,切削力降低。

另外,根据高速切削试验,当用氧化铝陶瓷刀具高速切削调质钢时,在 150~300 m/min 区间内,随切削速度增加,主切削力和径向切削力增加,从 300 m/min 左右开始,随切削速度提高,切削力显著降低,至 500 m/min 左右以后,切削力无明显变化。轴向力在整个试验速度范围基本没有变化。高速车削试验结果表明,在高速范围内,随切削速度提高,切削力有明显降低的趋势。

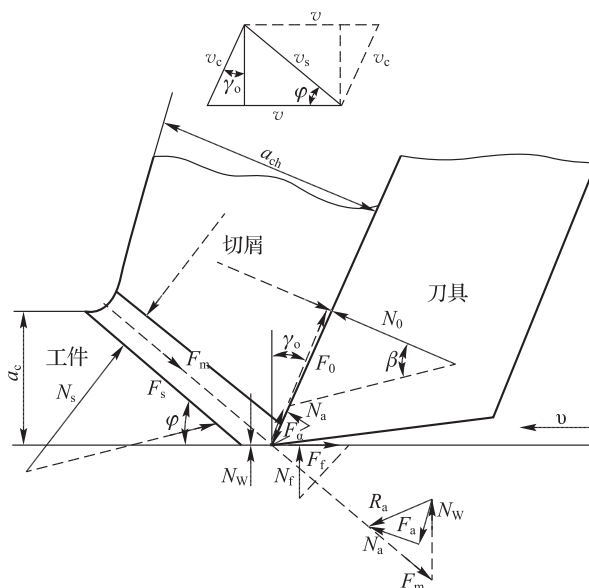


图 2-48 直角切削时剪切角和前面受力简图

另外,高速铣削的试验结果亦是如此。可见,在刀具材料和机床许可情况下,尽可能提高切削速度是有利的。在高速切削范围内,随切削速度增加,切削温度升高,摩擦因数减小,剪切角增大,切削力降低。

2. 切削热

切削热也是研究切削过程的一个重要因素,高速切削时,总的切削功消耗在以下几方面。

(1)形成已加工表面和切削底面两个新生表面所需要的能量,其值等于物体该表面的表面能。切削单位体积材料表面能大致为 $0.02 \text{ N} \cdot \text{cm}$ 。与切削时消耗的总能量相比,它实际上是很小的,成为工件和切削所增加的内能。

(2)剪切区的剪切变形功。

(3)前、后面与切屑、工件的摩擦功。

(4)切削层材料经过剪切面时,由于动量改变而消耗的功。

剪切变形功和动量改变所消耗的功大部分将变为剪切变形区(第一变形区)的热量,一小部分形成两个新生表面的表面能以内能形式储存于加工表面和切屑中。前后面的摩擦功将全部变为第二、第三变形区的热量。因此,单位时间内产生的总热量为三者之和。干切削时,切削热量主要由切屑、工件和刀具传出,周围介质传出的极少,可略去。

切削面上包括剪切区的剪切变形功和切削层材料经过剪切面时,由于动量改变而消耗的功转变的热量。剪切面上产生的热量大部分传给切屑,一部分传入工件。设前一部分热量的比例为 H_1 ,单位时间内单位面积上在剪切面、前面和后面产生的热量分别为 Q_1 、 Q_2 和 Q_3 ,于是单位时间传入切屑的热量为 $H_1 Q_1 H_D b_D \csc \varphi$ (H_D 为切削厚度, b_D 为切屑厚度, φ 为剪切角),单位时间传入工件的热量为 $(1-H_1) Q_1 H_D b_D \csc \varphi$ 。随着切削速度的提高, H_1 增大,即切削速度越高,被切屑带走的热量越多,切屑温度升高,而切削(刀具)温度相应升高较小。

前面接触区产生的热量一部分传入切屑,另一部分传入刀具。设前面接触区产生的热量比例为 H_2 ,于是从热源传入切屑的热量为 $H_2 Q_2$,传入刀具的热量为 $(1-H_2) Q_2$ 。因为前面接触区的热源与刀具连接在一起,是固定不动的,而切屑以速度流出,所以,热源与切屑底面之间有相对运动,属于移动热源。

刀具后面与工件(刀-工)接触区产生的热量一部分流入刀具,另一部分流入工件。设前者的比例为 H_3 ,则传入刀具的热量为 $H_3 Q_3$,传入工件的热量为 $(1-H_3) Q_3$,刀-工接触区的热源随切削进行而移动,属于移动热源。

根据试验得出随切削速度增加,总热量急剧上升,传入切屑热量也增加很大,传入工件的热量稍稍增加,而传入刀具的热量增加很少。传入切屑的热量比传入工件与刀具的热量多几倍。切削速度越高,切屑带走的热量越多,而传入工件和刀具的热量越少,相应的切削温度升高很少。另外,用陶瓷刀具 SG-4 高速端铣 T-10A 淬硬钢(58~65 HRC)的试验结果也表明,随切削速度提高,切屑带走的热量增多,而切削(刀具)的切削温度相应地提高就少得多,但逐步升高到刀具材料允许的极限。

因此,只要工件材料与刀具材料合理匹配(每类工件材料与不同刀具材料匹配均有一个临界切削速度),在高至刀具材料允许的极限切削温度内进行高速切削(当然机床条件要许可)是完全可行的。因此,在高速切削范围内,根据切削力和切削温度的变化规律与特征,在刀具材料和机床条件许可情况下,尽可能提高切削速度是有利的。

2.9.5 高速切削的刀具

在高速切削中,刀具系统的设计、制造是其关键技术之一。高速切削时的一个主要问题是刀具磨损。与普通切削相比,高速切削时刀具与工件的接触时间减少,接触频率增加,由此减

少了切屑的皱褶,切削过程中产生的热量更多地向刀具传递,磨损机理与普通切削有很大的区别。高速切削对刀具材料有更高的要求,具体表现在以下几个方面:

- (1)高硬度、高强度和高耐磨性。
- (2)韧性高,抗冲击能力强。
- (3)高的热硬性和化学稳定性。
- (4)抗热冲击能力强等。

另外,受高速切削时离心力和振动的影响,刀具必须具有良好的平衡状态和安全性能。设计刀具时,必须根据高速切削的要求,综合考虑磨损、强度、刚度和精度等方面的因素。

1. 刀具材料

高速切削中对刀具材料、刀具结构、刀柄系统、刀具几何参数等要求较高,尤其要求刀具材料与加工材料的化学亲和性要小,并具有优异的机械性能和热稳定性,以及抗冲击、耐磨损的能力。

近年来,用于高速加工的刀具材料有金刚石、立方氮化硼、陶瓷刀具、金属陶瓷、硬质合金涂层刀具、超细晶粒硬质合金刀具等,以镀膜的和未镀膜的硬质合金、金属陶瓷、氧化铝基或氮化硅基陶瓷、聚晶金刚石、聚晶立方氮化硼为主。刀具的发展主要集中在以下两个方面:

(1)研制新的镀膜材料和镀膜方法,以提高刀具的抗磨损性。采用不同镀膜(氮化钛或氮化钛铝)的硬质合金铣刀可达到刀具的寿命。采用适宜的镀膜可成倍地提高刀具的使用寿命,潜在的经济效益十分可观。此外,刀具的材料与工件的材料相适应也是提高刀具寿命的重要因素。如加工合金钢 40CrMnMo7 时,最佳的刀具材料为表面处理过的金属陶瓷;而加工合金铸铁 GG25CrMo 时,立方氮化硼刀具的使用寿命最长。

(2)开发新型的高速切削刀具,特别是那些形状比较复杂的刀具。长期以来,高速切削麻花钻都采用整体硬质合金的结构,聚晶金刚石和立方氮化硼只能用来制作直刃刀具。由聚晶立方氮化硼制成的麻花钻已经开始使用。形状更为复杂的聚晶金刚石刀具仍在研究中。

2. 刀柄结构

刀柄是高速切削时的一个关键件,其作用主要体现在传递机床精度和切削力两个方面。刀柄的一端是机床主轴,另一端是刀具。高速切削时既要保证加工精度,又要保证很高的生产效率,所以,高速切削时刀柄必须满足下列要求:

- (1)很高的几何精度和装夹重复精度。
- (2)很高的装夹刚度。
- (3)高速运转时安全可靠。

3. 刀具与刀柄的连接

刀具与刀柄间的接装有多种形式,常用的锥形夹头具有灵活性好的优点,适用于不同的刀具直径。它的缺点是传递的转矩有限且装夹精度很低。

要提高装夹精度和刚度需采用其他方法,常用的方法有收缩夹头、液压膨胀夹头和力膨胀夹头。

(1)收缩夹头。利用材料热胀冷缩原理,把刀具装入刀柄时,先用辅助系统把刀柄孔加热,使之膨胀,待刀具插入刀柄后进行冷却,刀具就被稳固地夹持在刀柄上。这种夹头的优点是精度高、刚性大;缺点是操作不方便,每次装夹须对刀柄进行加热和冷却,引起刀柄的热疲劳和变形。

(2)液压膨胀夹头。刀柄孔的周围是一个液压腔,刀具插入刀柄后,用螺栓推动油腔顶部的活塞使刀柄孔内径膨胀,从而夹紧刀具。其优点是精度高、刚性大、操作方便;缺点是对刀具的尺寸公差要求较严,过松时可能达不到应有的夹持力。

(3)力膨胀夹头。刀柄的孔呈三棱形,在装夹刀具时,先用辅助装置在三棱孔的三个定点施加预先调整好的力,使刀柄孔变成圆形,然后把刀具插入刀柄,再除去变形外力,刀柄孔弹性恢复,刀具就被加持在孔内。这种夹头的优点在于装夹精度高、操作简单、结构紧凑、造价较低,缺点是需备有一个辅助的加力装置。

2.9.6 高速切削的关键技术

高速切削的关键技术如图 2-49 所示。

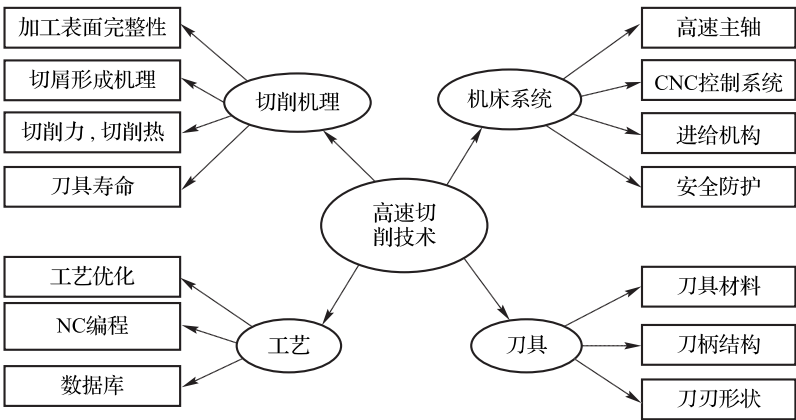


图 2-49 高速切削的关键技术

1. 高速切削机床系统

高速切削机床不仅要有良好的刚性、优良的吸振特性和热稳定性,还必须具有高速旋转的主轴部件,快速的进给系统,优良的机床动态特性,稳定的机床结构等。其中的关键是高速机床主轴和直线电机进给驱动系统。

(1)高速机床主轴。高速机床主轴是高速切削加工的最重要的关键技术,国外高速机床主轴转速在 10 000~20 000 r/min 的加工中心越来越普及,转速高达 100 000 r/min、200 000 r/min 和 250 000 r/min 的实用高速机床主轴正在研究开发之中。高速机床主轴主要有电主轴、气动主轴和水动主轴三种类型,目前高速机床中采用电主轴居多(见图 2-50)。但最高主轴转速受限于主轴轴承,目前较多使用热压氮化硅陶瓷轴承、液体动静压轴承及空气轴承,或磁力极佳的磁力轴承。液体静压轴承的回转误差在 0.2 μm 以下,空气静压轴承的回转误差在 0.05 μm 以下。

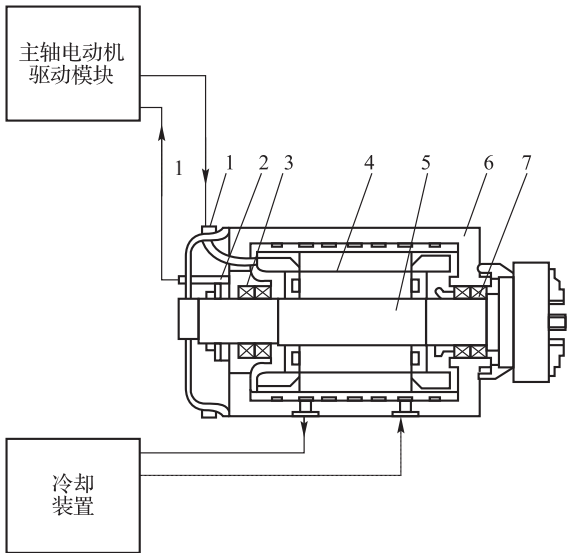


图 2-50 高速电主轴结构简图

1—电源接口；2—电动机反馈；3—后轴承；4—无外壳主轴电动机；
5—主轴；6—主轴箱体；7—前轴承

(2)直线电机进给驱动系统。如果采用通常的伺服电机+滚珠丝杠副的轴向直线进给系

统,提高轴向进给速度和加速度将受到传统结构的限制,不能满足高速切削加工的要求,只能采用直线伺服电机高速驱动系统,它是高速机床设计的一个重要发展趋势。直线电机可实现无接触直接驱动,避免了滚珠丝杠、齿轮和齿条传动中的反向间隙、惯性、摩擦力和刚度不足等缺点,提高了进给速度、加速度、刚度和定位精度。

2. 刀具

刀具与机床历来是相辅相成的,只有将高性能的切削机床与加工刀具相结合,高速切削才能获得良好的应用效果。

3. 高速切削数控系统

用于高速切削加工的 CNC 控制系统必须具有快速的数据处理能力和高精度,以及快速响应的伺服控制,以满足高速度及复杂型腔的加工要求。目前,高速加工机床上的控制系统大多采用较先进的多 CPU 结构,主要采用的是 32 位 CPU,甚至多个 32 位 CPU,具有高速插补与程序块处理及有效的超前处理能力。较强的超前处理能力用于预防刀具轨迹偏移和避免高速下突发事件。

4. 数据库

在已建立的切削数据库中,当属 CUTDATA(美国)和 NIFOS(德国)最著名。

(1)世界上的第一个金属切削数据库是 1964 年美国金属切削联合研究所和美国空军材料研究所建立的,即美国空军加工性数据中心(AFMDC)。

(2)成都工具研究所在 1987 年建成我国第一个实验性车削数据库 TRN10。

(3)南京航空航天大学开发了一个通用型切削数据库软件系统——NAIMDS 和 KBMDBS 切削数据库系统。

(4)北京理工大学建立了一个面向硬质合金刀具材料生产厂家的切削数据库系统 BIT-NCDBS。

(5)山东大学首次提出了基于实例推理的高速切削数据库系统 HISCUT。最近,山东大学正在研究开发混合智能推理高速切削数据库系统、模具高速切削数据库。

国际上最近对切削数据库的研究主要是使原有数据库具有智能化功能,即在智能刀具选择系统方面。

复习思考题

2-1 切削运动时,工件表面上有什么变化?

2-2 试分析切削用量的三个要素。

2-3 什么是主运动?什么是进给运动?各自有何特点?

2-4 分别画出车外圆、车端面及在车床上镗内孔的示意图,并在图上标注以下内容:

(1)主运动、进给运动和背吃刀量。

(2)刀具的角度。

(3)已加工表面、加工表面和待加工表面。

2-5 简述前角、后角的改变对切削加工的影响。

2-6 车刀的切削角度有哪些?什么是工作角度?

2-7 切削层参数指的是什么?分别与背吃刀量和进给量有何关系?

2-8 背吃刀量和进给量对切削力和切削温度的影响是否一样?为什么?如何运用这一定律指导生产实践?

2-9 在金属切削过程中,影响切削力的主要因素有哪些?切削力经验公式是如何通过实

验得到的？

- 2-10 切削热的主要来源是什么？切屑热是如何传递的？会产生什么影响？
- 2-11 切削温度的含义是什么？常用的测量切削温度的方法有哪些？其测量原理是什么？
- 2-12 刀具磨损形态有哪几种？各有什么特征？
- 2-13 简述刀具磨损与刀具耐用度之间的关系。
- 2-14 何为刀具磨钝标准？它与刀具使用寿命有何关系？磨钝标准制定的原则是什么？
- 2-15 刀具材料应具备哪些基本性能？
- 2-16 刀具材料有哪几种？常用的牌号有哪些？性能如何？其常用于何种刀具？如何

选用？

- 2-17 选择切削用量的原则是什么？
- 2-18 切削用量三要素对切削温度的影响是否相同？为什么？试通过与切削用量对切削力的影响对比加以说明。
- 2-19 从切削处理角度如何划分切削类型？在何种情况下容易产生切屑？如何控制切屑？
- 2-20 简要分析积屑瘤的产生原因及其对工作表面质量的影响。
- 2-21 切削液的主要作用有哪些？如何合理选择切削液？
- 2-22 试分析各种因素对切削变形的影响。
- 2-23 试画图说明切削过程的三个变形区及各自产生的关系。
- 2-24 试分析金属材料的切削加工性。
- 2-25 改善材料切削加工性的途径有哪些？

第 3 章

金属切削机床

金属切削机床是用切削的方法将金属毛坯加工成机器零件的一种机器,人们习惯上简称为机床。由于切削加工仍是机械制造过程中获取具有一定尺寸、形状和精度的零件的主要加工方法,因此,机床是机械制造系统中最重要的组成部分,它为加工过程提供刀具与工件之间的相对位置和相对运动,为改变工件形状和质量提供能量。因此,本章主要介绍金属切削机床的基本知识,以及有关车床、磨床、钻床、其他通用机床和加工中心、高速切削机床等内容。

3.1 概述

3.1.1 机床的分类

1. 按加工性质和所用刀具分类

机床按加工性质和所用刀具分类是一种主要的分类方法。目前,按这种分类方法,我国将机床分为十二大类,即车床、钻床、镗床、磨床、齿轮加工机床、螺纹加工机床、铣床、刨(插)床、拉床、特种加工机床、锯床及其他机床。

在每类机床中,又按工艺范围、布局形式和结构等分为若干组,每组又细分为若干系列。除上述基本分类法以外,还有其他分类方法。

2. 按通用程度分类

对于同类型的机床,按其使用上的通用性程度和应用范围可分为以下三种:

(1)通用机床。通用机床是用于加工多种零件的不同工序的机床,加工范围较广,但结构比较复杂,主要适用于单件、小批生产。通用机床如卧式车床、万能升降台铣床、牛头刨床等。

(2)专门化机床。专门化机床用于加工形状类似而尺寸不同的工件的某一工序的机床。它的工艺范围较窄,适用于成批生产。专门化机床如精密丝杠车床、凸轮轴车床等。

(3)专用机床。专用机床是用于加工特定零件的特定工序的机床。它的生产率较高,工艺范围最窄,适用于大批量生产。专用机床如用于加工某机床主轴箱的专用镗床,汽车、拖拉机制造中使用的各种组合机床等。

3. 按精度分类

同一类型机床按工作精度的不同,可分为三种精度等级,即普通精度机床、精密机床和高精度机床。精密机床是在普通精度机床的基础上,提高了主轴、导轨或丝杠等主要零件的制造精度。高精度机床不仅提高了主要零件的制造精度,而且采用了保证高精度的机床结构。以上三种精度等级的机床均有相应的精度标准,其允差若以普通精度级为 1,则大致比例为 1 : 0.4 : 0.25。

4. 按自动化程度分类

机床按自动化程度(加工过程中操作者参与的程度)可分为手动机床、机动机床、半自动机

床和自动机床。

5. 按质量与尺寸分类

机床的质量和外形尺寸与被加工零件的质量和尺寸密切相关,被加工产品小至仪器、仪表,大到大型工程机械等,都需要与之相适应的制造设备。因此,机床又可分为仪表机床、中型机床(称为一般机床,最常用)、大型机床(质量在 10 t 以上的机床或工件回转直径 $D_{\max} \geq 1\,000\text{ mm}$ 的普通车床等)、重型机床(质量在 30 t 以上的机床或加工直径 $D_{\max} \geq 3\,000\text{ mm}$ 的立式车床、回转直径 $D_{\max} \geq 1\,600\text{ mm}$ 的普通车床等)和超重型机床(质量在 100 t 以上的机床)。

6. 按机床主要工作部件数目分类

机床主要工作部件数目,通常是指切削加工时,同时工作的主运动部件或进给运动部件的数目。机床按此可分为单轴机床、多轴机床、单刀机床和多刀机床。

通常,机床型号的编制是按加工性质分类(如车、铣、钻、刨、磨等),然后加上一些辅助特征进行描述。如多轴自动机床,就是以机床为基本分类,加上“多轴”“自动”等辅助特征,以区别于其他种类的机床。

3.1.2 机床的基本组成

由于机床的运动形式、刀具及工件类型的不同,机床的构造和外形有很大区别。但归纳起来,各种类型的机床都应由以下几个主要部分组成。

1. 主传动部件

主传动部件是用来实现机床主运动的部件,它形成切削速度并消耗大部分动力。例如,带动工件旋转的车床主轴箱;带动刀具旋转的钻床或铣床的主轴箱;带动砂轮旋转的磨床砂轮架;刨床的变速箱;等等。

2. 进给传动部件

进给传动部件是用来实现机床进给运动的部件,它维持切削加工连续不断地进行。例如,车床的进给箱、溜板箱;钻床和铣床的进给箱;刨床的进给机构;磨床工作台的液压传动装置;等等。

3. 工件安装装置

工件安装装置用来安装工件。例如,车床的卡盘和尾座;钻床、刨床、铣床和平面磨床的工作台;外圆磨床的头架和尾座;等等。

4. 刀具安装装置

刀具安装装置用来安装刀具。例如,车床、刨床的刀架;钻床、立式铣床的主轴;卧式铣床的刀杆轴;磨床的砂轮架主轴;等等。

5. 支承件

支承件是机床的基础部件,用于支承机床的其他零部件并保证它们的相互位置精度。支承件如各类机床的床身、立柱、底座、横梁等。

6. 动力源

动力源是提供运动和动力的装置,是机床的运动来源。普通机床通常采用三相异步电机做动力源(无须对电机进行调整,连续工作);数控机床的动力源采用的是直流或交流调速电机、伺服电机和步进电机等(可直接对电机调速,频繁起动),以及液压传动系统的液压泵和液压马达等。

7. 其他系统

冷却系统用于对加工刀具、加工的工件进行冷却;润滑系统用于对机床的运动进行润滑,以减少摩擦、磨损;排屑装置用于把加工完成的金属屑排出去。

3.1.3 机床的技术性能指标

1. 机床的工艺范围

机床的工艺范围是指机床上加工的工艺类型和尺寸,能够加工完成的工序,使用的刀具等。不同机床的工艺范围不同。例如,通用机床具有较宽的工艺范围,在同一台机床上就可以满足较多的加工需要,适用单件小批生产;专用机床是为特定零件的特定工序而设定的,自动化程度较高,生产率较高,但是加工范围较窄;数控机床则既具有较宽的工艺范围,又能满足零件较高精度的要求,还可以实现自动化。

2. 机床的技术参数

机床的主要技术参数包括尺寸参数、运动参数和动力参数,见表 3-1。

表 3-1 各类主要机床的主参数和第二参数

机 床	主 参 数	第二参数
卧式车床	床身上最大回转直径	最大工件长度
立式车床	最大车削直径	最大工件高度
摇臂钻床	最大钻孔直径	最大跨距
卧式镗铣床	镗轴直径	—
坐标镗床	工作台面宽度	工作台面长度
外圆磨床	最大磨削直径	最大磨削长度
内圆磨床	最大磨削孔径	最大磨削深度
矩台平面磨床	工作台面宽度	工作台面长度
齿轮加工机床	最大工件直径	最大模数

尺寸参数具体反映机床的加工范围,包括主参数、第二参数和与加工零件有关的其他参数。

运动参数指机床执行中的运动速度,包括主运动的速度范围、速度列表和进给量的范围、进给数列及空行程速度等。

动力参数指机床电动机的功率。

3.1.4 机床的精度

机床精度分为机床加工精度和机床静态精度。机床加工精度是指被加工零件达到的尺寸精度、形态精度和位置精度,机床静态精度是指机床的几何精度、运动精度、传动精度、定位精度等在空载条件下检测的精度。

1. 几何精度

机床的几何精度是指机床上某些基础零件工作面的几何精度,它指的是机床在不运动(如主轴不转、工作台不移动)或运动速度较低时的精度,它规定了决定加工精度的各主要零部件间及这些零部件的运动轨迹之间的相对位置允差。例如,床身导轨的直线度、工作台面的平面度、主轴的回转精度等。

在机床上加工的工件表面形状,是由刀具与工件之间的相对运动轨迹决定的,而刀具和工件是由机床的执行件直接带动的,所以,机床的几何精度是保证加工精度最基本的条件,是评价机床质量的基本指标。它主要取决于结构设计、制造和装配质量。

2. 运动精度

运动精度是指机床空载并以工作速度运动时主要零部件的几何位置精度,如高速回转主轴的回转精度。对于高精密机床,运动精度是评价机床质量的一个重要指标,它与结构设计及

制造等因素有关。

3. 传动精度

机床的传动精度是指机床内联系传动链末端件之间的相对运动精度。这方面的误差称为该传动链的传动误差。例如,在做切割加工时,由于在 X,Y 运动轴之间的传动链中的丝杠、轴承及联轴器加工或安装误差不一致,X,Y 轴的实际移距与要求的移距之间有了误差,这个误差将直接造成工件的外形误差。

为了保证工件的加工精度,不仅要求机床有必要的几何精度,还要求内联系传动链有较高的传动精度。影响机床传动精度的主要因素是传动系统的设计、传动元件的制造和装配等。

4. 定位精度

定位精度是指机床的定位部件运动到达规定位置的精度。定位精度直接影响被加工工件的尺寸精度和形位精度。机床构件和进给控制系统的精度、刚度及其动态特性,机床测量系统的精度都将影响机床定位精度。

5. 工作精度

工作精度是指零件加工后的实际几何参数(尺寸、形状和位置)与理想几何参数的符合程度。符合程度越高,加工精度越高。

加工规定的试件,用试件的加工精度表示机床的工作精度,它是几何精度和定位精度在实际加工条件下的综合反映。工作精度是各种因素综合影响的结果,是衡量机床性能的一项重要指标。影响机床加工精度的因素有很多,包括机床本身的精度、刚度、热变形和刀具等,还有因机床及工艺系统变形、加工中产生振动、机床的磨损及刀具磨损等因素的影响。在上述各因素中,机床本身的精度是一个重要的因素。

6. 精度保持度

在规定的工作期间内,保持机床所要求的精度,称为精度保持度。影响精度保持度的主要因素是磨损。磨损的影响因素十分复杂,如结构设计、工艺、材料、热处理、润滑、防护、使用条件等。

3.1.5 机床型号的编制

通过型号能更好地识别机床的各种用途,国家制定了推荐标准《金属切削机床 型号编制方法》(GB/T 15375—2008),对机床的型号进行了规定,用于表明机床类型、通用和结构特性、主要技术参数等。机床型号各部分的含义如图 3-1 所示。

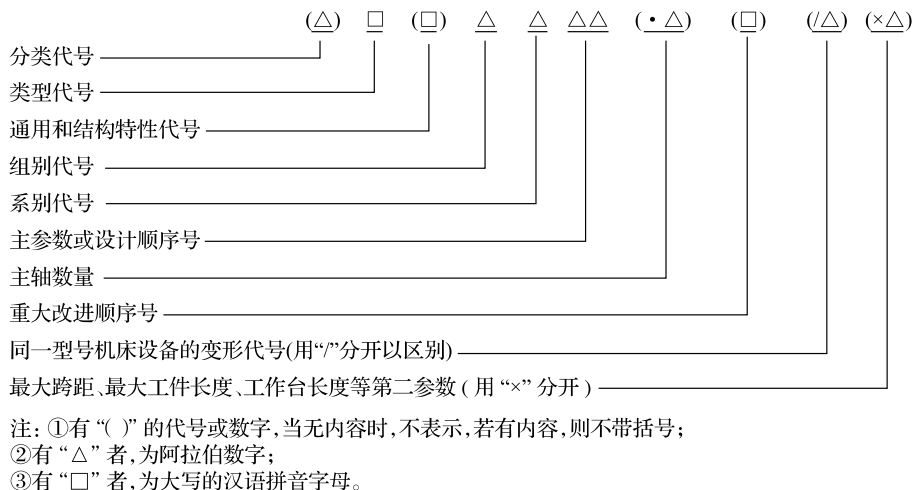


图 3-1 机床型号各部分的含义

1. 通用机床的型号编制

(1)机床的类别代号。用大写的汉语拼音字母来代表机床的类别,按汉语拼音读。有的机床的种类较多,可以在字母前加阿拉伯数字来表示分类代号。机床的类别代号见表 3-2。

表 3-2 机床的类别代号

类别	车床	钻床	镗床	磨床	齿轮加工机床	螺纹加工机床	铣床	刨、插床	拉床	锯床	其他机床
代号	C	Z	T	M	Y	S	X	B	L	G	Q
读音	车	钻	镗	磨	牙	丝	铣	刨	拉	割	其

(2)机床的特性代号。对同类的机床,为区别除主参数以外的其他特性,在型号中加特性代号予以区别,每类机床的结构特征不尽相同,是根据各类机床的实际情况分别制定的。机床的通用特性代号见表 3-3。

表 3-3 机床的通用特性代号

通用特性	高精度	精密	自动	半自动	数控	加工中心	仿形	轻型	重型	经济型	数显	柔性加工单元
代号	G	M	Z	B	K	H	F	Q	Z	J	X	R
读音	高	密	自	半	控	换	仿	轻	重	简	显	柔

(3)结构特性代号。为了区别主参数相同但结构不同的机床,通常在型号中用汉语拼音字母区分。不同的代号表示不同的结构。例如,CQ6140 型卧式机床型号中的 Q,可以理解为这种机床在结构上与 C6140 型机床存在着差别。

(4)机床的组别、系别代号。机床的组别、系别代号用两位阿拉伯数字表示,前者表示组,后者表示系。每类机床划分为 10 个组,每组又划分为 10 个系。在同一类机床中,凡主要布局或使用范围基本相同的机床,即为同一组。凡在同一组机床中,若其主参数相同、主要结构及布局形式相同的机床,即为同一系。

(5)机床的主参数、设计顺序号和第二参数。

机床主参数:代表机床加工规格的大小,在机床型号中用数字给出主参数的折算数值(1/10 或 1、100 或 1/150)。

设计顺序号:当无法用一个主参数表示时,则在型号中用设计顺序号表示。

第二参数:一般是主轴数、最大跨距、最大工作长度、工作台面长度等,它也用折算值表示。

(6)机床的重大改进顺序号。当机床性能和结构布局有重大改进时,在原机床型号尾部加重大改进顺序号(A,B,C 等)。

(7)其他特性代号。其他特性代号用汉语拼音字母或阿拉伯数字或两者的组合来表示。其主要用于反映各类机床的特性,如对于数控机床,可反映不同的数控系统;对于一般机床,可反映同一型号机床的变型等。

2. 专用机床的型号编制

(1)设计单位代号。当设计单位为机床厂时,用机床厂所在城市名称的大写汉语拼音字母及该机床厂在该城市建立的先后顺序号,或机床厂名称的大写汉语拼音字母表示;当设计单位为机床研究所时,用研究所名称的大写汉语拼音字母表示。

(2)组代号。专用机床的组代号用一个阿拉伯数字表示,放在设计单位代号之后,并用“-”分开。专用机床的组,由各机床厂和机床研究所根据产品的情况自行确定。

(3)专用机床的设计顺序号,按各机床厂和机床研究所的设计顺序排列,放在专用机床的组代号之后。

例如,北京第一机床厂设计制造的第 100 种专用机床为专用铣床,其型号为 B1-100。

3.2 金属切削机床部件

3.2.1 机床的传动系统

机床的传动系统一般由动力源、传动装置及执行件,以及开停、换向和制动控制机构等部分组成。机床的各种运动和动力都来自动力源,并由传动装置将运动和动力传递给执行件来完成各种要求的运动。

1. 主传动系统

主传动系统的分类如下:

(1)按照驱动主传动的电动机类型,主传动系统分为交流电动机驱动和直流电动机驱动。交流电动机驱动又可分为单速交流电动机驱动和调速交流电动机驱动。调速交流电动机驱动又有多速交流电动机驱动和无级调速交流电动机驱动。

(2)按传动装置类型,主传动系统分为机械传动装置、液压传动装置、电气传动装置及它们的组合。

(3)按照变速的连续性,主传动系统分为分级变速传动和无级变速传动。分级变速传动方式有滑移齿轮变速、交换齿轮变速和离合器变速。无级变速传动有机械摩擦无级变速器、液压无级变速器和电气无级变速器。

分级变速传动在一定的变速范围内只能得到某些转速,变速级数一般不超过 30 级。这种传动方式因其功率大、变速范围广、传动比准确、工作可靠而广泛地运用在通用机床上,尤其是中小型通用机床。分级变速传动的缺点是有速度损失,不能在运转中变速。

无级变速传动可以在一定的变速范围内连续改变转速,以便得到最有利的切削速度;能在运动中变速,以实现自动化;能在负载作用下变速,便于车削大端面时保持恒定的切削速度,以提高生产效率和加工质量。各类无级变速器的特点和应用见表 3-4。

表 3-4 各类无级变速器的特点和应用

类 型	特 点	应 用
机械摩擦无级变速器	结构简单,使用可靠	中小型车床、铣床等的主传动
液压无级变速器	传动平稳,在运动换向冲击下易于实现直线运动	磨床、拉床、刨床等机床的直线运动的主传动
电气无级变速器	易于实现自动变速、连续变速和负载下变速	数控机床

2. 进给传动系统

不同类型的机床实现进给运动的传动类型也不同。根据加工对象、成形运动、进给精度、运动平稳性和生产率等因素的要求,机床进给传动主要有机械进给传动、液压进给传动和电气

伺服进给传动等。由于数控机床的广泛应用,电气伺服进给传动用得较多。

电气伺服进给传动系统是数控装置和机床的联系环节,是以机械位置或角度作为控制对象的自动控制系统,其作用是接收来自数控装置发出的进给脉冲,经交换或放大后驱动工作台按规定的速度和距离移动。

(1)电气伺服进给传动系统的控制类型。电气伺服进给传动系统按照有无检测和反馈装置分为开环、闭环和半闭环系统。

①开环系统。开环系统采用步进电动机,其对工作台实际位移量没有检测和反馈装置。数控装置根据控制介质的指令,经过控制运算,把一定数量的脉冲信号输送给伺服驱动装置,驱动工作台移动一定的距离。

由于开环系统没有检测和反馈装置,对移动部件实际位移量与指令位移量不能进行比较,因此这类系统的定位精度较低,一般在 $\pm 0.01 \sim \pm 0.02 \text{ mm}$,但开环系统结构简单,调试方便,成本低,适用于精度要求不高的中小型机床。开环系统的组成如图 3-2 所示。

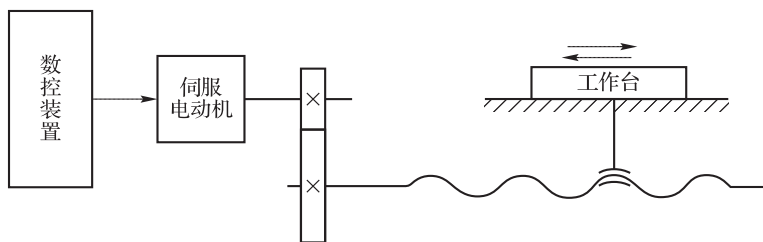


图 3-2 开环系统的组成

②闭环系统。在闭环系统中安装了直线位移检测装置,它将检测到的实际位移反馈到数控装置中进行比较,用比较后的差值控制移动部件做补充位移,直到差值消除。

这种系统定位精度高($-0.01 \sim 0.01 \text{ mm}$),调节速度快;但机床结构较复杂,调试维修困难,成本高,多用于高精度数控机床。闭环系统的组成如图 3-3 所示。

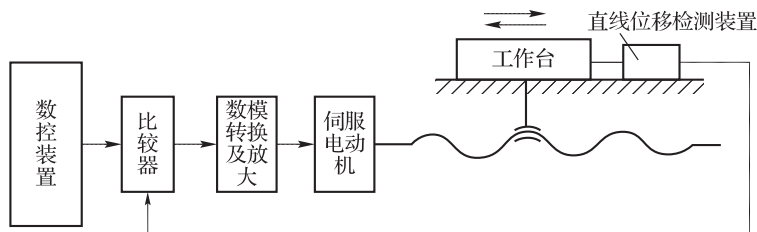


图 3-3 闭环系统的组成

③半闭环系统。半闭环系统是在开环系统的滚珠丝杠上安装角位移检测装置,通过检测滚珠丝杠转角来间接检测移动部件的位移,然后反馈到数控装置与原输入指令位移进行比较,用比较后的差值进行控制,使位移部件补偿一定的位移,直到差值消除为止。

由于反馈量是间接获取的,而非工作台的实际位移量,机床工作台未包含在闭环之内,因此称为半闭环系统。因此,半闭环系统的精度比闭环系统差。由于惯性较大的工作台在闭环之外,因此系统的稳定性好。与闭环系统相比,半环系统结构简单,调整容易,价格低,目前应用较多。半闭环系统的组成如图 3-4 所示。

总之,对伺服进给传动系统的要求是稳定性好,精度高,快速响应性好,定位精度高。影响机床电气伺服进给传动系统的因素有机床运动部件的振动、摩擦,机床的刚度和抗振性,系统

的质量和惯量,低速下的平稳性,有无爬行现象。

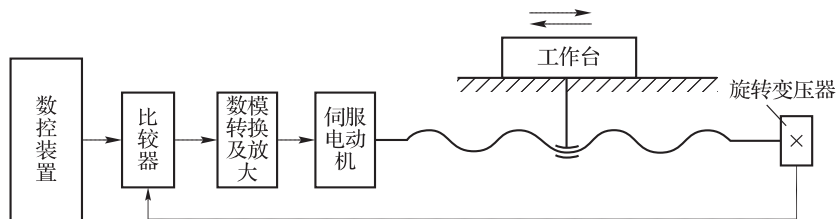


图 3-4 半闭环系统的组成

(2)电气伺服进给传动系统的驱动部件。伺服电机是电气伺服进给传动系统中一个重要的组成环节,其性能决定了伺服进给传动系统的性能。它由伺服驱动部件和机械传动部件组成。伺服驱动部件有步进电机、直流伺服电动机、交流伺服电动机、直线伺服电动机等。

①步进电机。步进电机是一种将电脉冲信号转化为角位移的执行机构。步进电机的类型有三种:永磁式步进电机一般为两相,转矩和体积较小,步进角一般为 7.5° 或 15° ;反应式步进电机一般为三相,可实现大转矩输出,步进角一般为 1.5° ,但噪声和振动都很大,在欧美等发达国家于 20 世纪 80 年代已被淘汰;混合式步进电机混合了永磁式和反应式的优点,分为两相和五相,两相步进角一般为 1.8° ,而五相步进角一般为 0.72° 。

步进电机的优点是无须反馈控制,电路简单,易于与微机连接,且没有积累误差,停止时有自锁能力;另外,维修方便,制造成本低。其缺点是效率低,容易失步(脱调),尤其是在低频时易发生振荡。

②直流伺服电动机。直流伺服电动机广泛应用于闭环或半闭环控制的伺服系统中,其优点是:响应迅速,精度高,调速范围宽,负载能力大,转矩和转速容易控制。其缺点是:由于电刷和换向器的存在,其在寿命、噪声等方面存在不足。

③交流伺服电动机。交流伺服电动机的转子惯量比直流伺服电动机小,动态响应好;容易维修,制造简单,适合在较恶劣环境中使用,易于向大容量、高速度方向发展,性能优异,已达到或超过直流伺服系统,其已在数控机床中得到广泛应用。

④直线伺服电动机。直线伺服电动机是指可以直接产生直线运动的电力驱动装置。

(3)电气伺服进给传动系统的机械传动部件。电气伺服进给传动系统的机械传动部件主要有齿轮(或同步齿轮带)和丝杠螺母传动副。电气伺服进给传动系统中,传动部件的移动靠脉冲信号来控制,要求传动部件动作灵敏,惯量低,定位精度高,具有适当的阻尼比,传动机构不能有反向间隙。

①带传动。如图 3-5 所示,带传动是利用带与带轮之间的摩擦作用,将主动带轮的转动传到

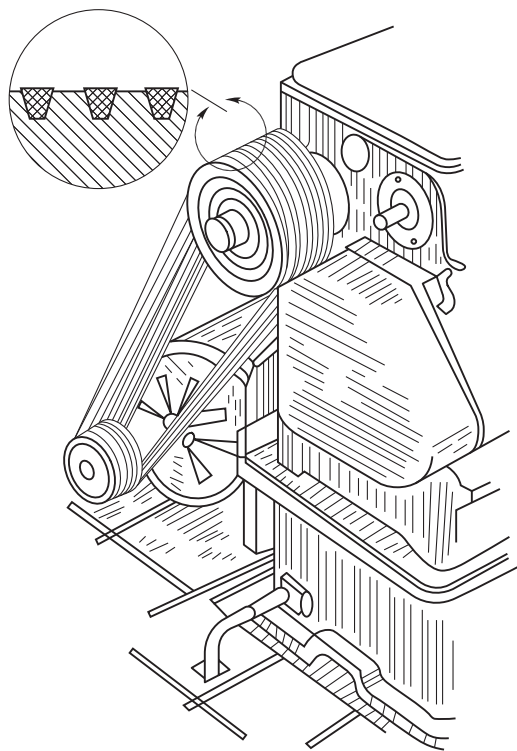


图 3-5 机床的带传动

从动带轮。目前,在机床传动中,一般用 V 形带传动。带传动的优点是传动平稳;两轴之间的

距离可以较大;结构简单,制造和维修方便;过载时带与带轮之间打滑,避免造成机器损坏。其缺点是传动中有打滑现象,无法保证准确的传动比,有摩擦损失,传动效率较低。

②齿轮传动。齿轮传动是机床上应用最多的一种传动方式。齿轮的种类很多,有直齿轮、斜齿轮、锥齿轮、人字齿轮等,其中最常用的是直齿圆柱齿轮传动,如图 3-6 所示。齿轮传动的优点是结构紧凑,传动比准确,可传较大的圆周力,传动效率高。其缺点是制造复杂,当精度不高时传动不够平稳。

③滚珠丝杠螺母传动。如图 3-7 所示,滚珠丝杠螺母传动用来将旋转运动变为直线运动,常用于进给运动的传动机构中。若将螺母沿轴向剖分成两半,即形成对开螺母,可随时闭合和打开,从而使运动部件运动或停止,车削螺纹时的纵向进给运动即采用这种方式。滚珠丝杠螺母传动平稳,无噪声,若制造得精确可提高传动精度,但传动效率低。

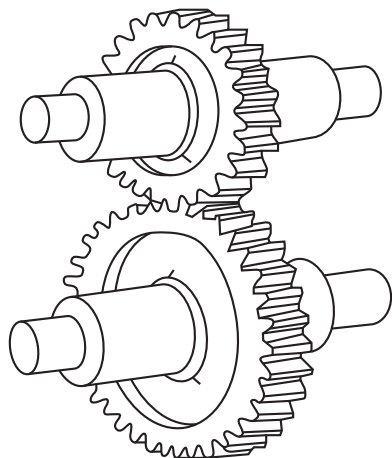


图 3-6 直齿圆柱齿轮传动

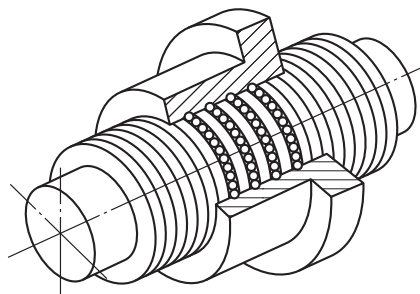


图 3-7 滚珠丝杠螺母传动

3.2.2 主轴部件

主轴部件是机床的主要部件之一,是机床的执行件。其功能是支撑并带动工件或刀具旋转进行切削,承受切削力和驱动力等载荷,完成表面加工运动。主轴部件由主轴及其支撑轴承、传动件、密封件及定位元件等组成。

1. 对主轴部件的基本要求

主轴部件需要满足以下基本要求:

(1)旋转精度。主轴的旋转精度是指装配后,在无载荷、低速转动的条件下,主轴安装工件或刀具部位的径向和轴向跳动。它是机床的一项重要精度指标,影响被加工零件的几何精度和表面粗糙度。影响旋转精度的因素有各主要件(主轴、轴承、壳体孔等)的制造、装配和调整精度。

(2)刚度。主轴部件的刚度(主轴部件刚度)是指主轴部件抵抗静态外载荷的能力,通常以主轴前端产生单位位移的弹性变形时,在位移方向上所施加的作用力来定义。

(3)抗振性。主轴部件的抗振性是指主轴受到交变切削载荷时,能够平稳地运转而不发生振动的能力。在切削加工过程中,主轴部件不仅受静态载荷作用,同时受冲击载荷和交变载荷的干扰,使主轴产生振动。主轴部件的振动会直接影响工件的表面质量和刀具耐用度,并降低主轴轴承的寿命及产生噪声。

影响抗振性的因素有主轴部件的静刚度、质量分布(重心偏移)及阻尼(特别是主轴前轴承的阻尼)。主轴的固有频率应远大于激振力的频率,使它不易发生共振。

(4)温升和热变形。温升和热变形是指机床工作时,各相对运动处的摩擦生热,其损耗的能量转化为热,造成温升,使主轴部件在形状和位置上产生畸变,造成主轴部件的热变形。主轴部件的热变形会使润滑油的黏度下降,使润滑脂熔化流失,影响轴承的工作性能;而且会引起主轴伸长,造成轴承间隙变化;尤其是主轴箱的热膨胀使主轴偏离正确位置,更甚者如果前后轴承温度不同,还将使主轴倾斜。影响热变形的因素有轴承的类型、配置及间隙的调整方式,润滑和密封方式,散热条件等。

2. 主轴部件的传动方式

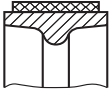
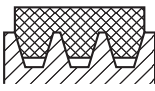
主轴部件的传动方式主要有齿轮传动、带传动、电动机直接驱动等。根据主轴的转速、传递的转矩、运动的平稳性和结构紧凑性、维修方便性等选择主轴的传动方式。

(1)齿轮传动。齿轮传动的结构简单、紧凑,能够适应变转速、变载荷工作,能传递较大的转矩,线速度 $v \leq 12 \sim 15 \text{ m/s}$,不如带传动平稳。对齿轮传动有以下要求:

- ①主轴上不能有滑移齿轮或其他活装零件。
- ②齿轮的精度:影响传动平稳性的第Ⅱ公差组精度取 5~6 级,齿轮须淬硬,齿面须磨削。
- ③若齿轮位于前、后轴承之间,则齿轮应尽量靠近前轴承。
- ④为使主轴运转平稳,可采用斜齿轮,螺旋倾角 $\leq 15^\circ \sim 20^\circ$ 。

(2)带传动。常见的带有平带、V 形带、多楔带和同步齿形带等。带传动的特点是靠摩擦力传动,结构简单,制造容易,成本低,特别适用于中心距较大的两轴间传动。其因具有弹性可以吸振、传动平稳、噪声小而适用于高速传动的场合。其缺点是有滑动,不能用在传动比要求较高的场合。常见带传动的结构、特点和应用场合见表 3-5。

表 3-5 常见带传动的结构、特点和应用场合

类型	平带	V 形带	多楔带	同步齿形带
结构				
特点	结构最简单,易于制造	传递摩擦力大,传动比大,结构较紧凑	传动功率大,摩擦力大,柔性好	传动比准确,轴向压力小,但安装和制造要求高
应用场合	传动中心距较大	应用广泛	传递功率较大,结构要求紧凑,承受变载荷或冲击	线速度高,可达 50 m/s

(3)电动机直接驱动。如果主轴转速不高,可采用普通的异步电动机直接带动主轴;如果主轴转速过高,可将主轴和电动机制成一体,称为主轴单元,如图 3-8 所示。电动机转子轴就是主轴,电动机底座就是主轴单元的壳体。此类形式的主轴单元结构大大简化,有效地提高了主轴部件的刚度,降低了噪声和振动,且调速范围宽,驱动功率大。因此,其广泛用于精密机床、高速加工中心和数控车床中。

3. 主轴部件的机构

(1)主轴的支承形式。多数机床的主轴采用前、后两个支承(两支承方式)。这种方式结

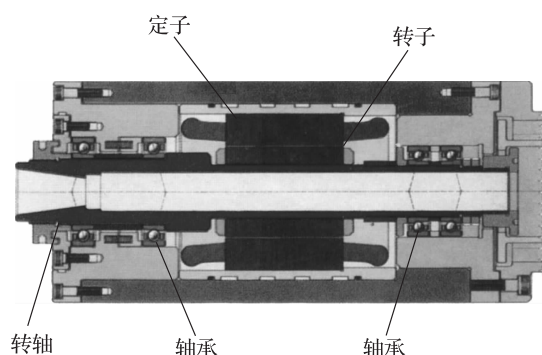


图 3-8 主轴单元

构简单,制造装配方便,容易保证精度。为提高主轴部件的刚度,前后支承应消除间隙或预紧。

为提高刚度和抗振性,有的机床主轴采用三个支承。三个支承中可以前、后支承为主要支承,中间支承为辅助支承;也可以前、中支承为主要支承,后支承为辅助支承。三支承方式对三支承孔的同轴度要求较高,制造装配较复杂。主要支承也应消除间隙或预紧,辅助支承则应保留一定的径向游隙或选用较大游隙的轴承。由于三个轴颈和三个箱体孔不可能绝对同轴,三个轴承不能都预紧,以免发生干涉,

恶化主轴的工作性能,使空载功率大幅度上升和轴承温升过高。

在三支承主轴部件中,采用前、中支承为主要支承的较多。

(2) 主轴的构造。主轴的构造和形状主要决定于主轴上所安装的刀具、夹具、传动件、轴承等零件的类型、数量、位置和安装定位方法等。设计时还应考虑主轴加工工艺性和装配工艺性。主轴一般为空心阶梯轴,其前端径向尺寸大,中间径向尺寸逐渐减小,尾部径向尺寸最小。

主轴的前端形式取决于机床类型和安装夹具或刀具的形式。主轴头部的形状和尺寸已经标准化,应遵照标准进行设计。机床主轴简图如图 3-9 所示。

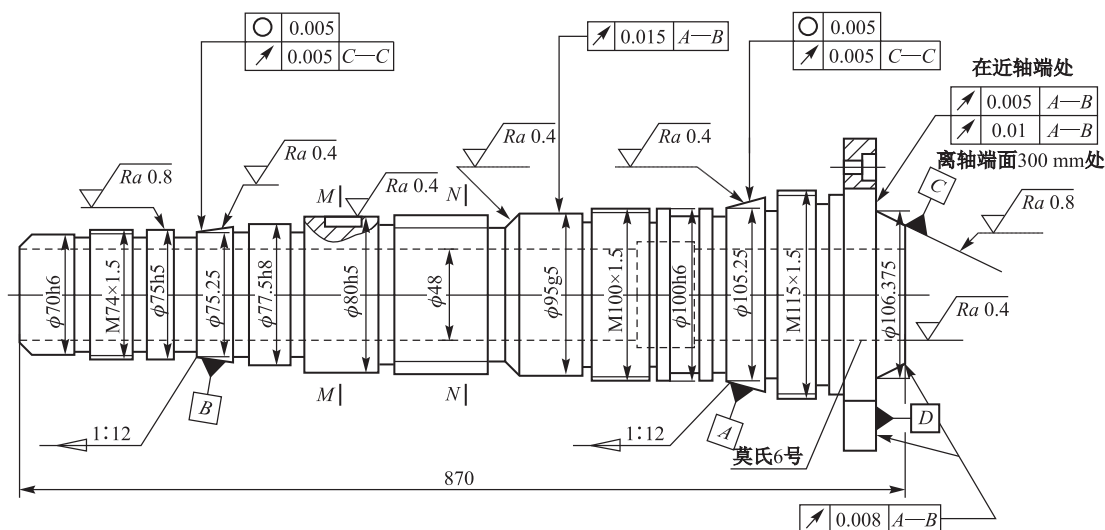


图 3-9 机床主轴简图

(3) 主轴的材料和热处理。主轴的材料,主要应根据耐磨性、热处理方法、热处理后的变形等情况进行选择。常用的主轴材料可根据以下情况进行选择:普通机床的主轴,主要为提高强度和韧性,采用 45 钢,调质 T235 到 220~250 HBS;主轴头部的锥孔、定心锥面、轴颈等部位高频淬硬至 50~55 HRC;精密机床的主轴,要求精度高、精度保持性好,热处理后残余应力小,采用 40Cr、20Cr 等渗碳,淬硬至 60 HRC 以上;要求耐磨性很高的主轴,采用渗碳钢,如 38CrMoAlA 渗碳处理;对于高速高效高精度的机床主轴部件,可以使用目前出现的名为玻璃陶瓷(微晶玻璃)的材料作为主轴部件的理想材料。

(4) 主轴轴承。主轴部件最重要的组件是轴承。轴承的类型精度、结构配置形式、润滑冷

却等状况都影响着主轴部件的工作性能。

机床上常用的主轴轴承有滚动轴承、液体动压轴承、液体静压轴承、空气静压轴承等。主轴部件主支承常用滚动轴承有角接触轴承、双列圆柱滚子轴承、圆锥滚子轴承、推力轴承、陶瓷滚动轴承等。

滚动轴承在运动过程中,滚动体与轴承滚道间会产生滚动摩擦,产生热量而使轴承温度升高,因此改变了轴承的间隙,引起振动和噪声。润滑的作用是降低摩擦,降低温升,并与密封装置在一起,保护轴承不受外物的侵入,防止腐蚀。润滑剂和润滑方式的选择主要取决于轴承的类型、转速和工作负荷。常见的润滑剂有以下两种。

①润滑脂。润滑脂是由基油、稠化剂和添加剂在高温下混合而成的一种半固体状润滑剂。其使用方便,不存在漏油问题,使用期限长。因此,其常被用在转速不太高又不需要冷却的场合,特别是立式主轴或者装在套筒中可以伸缩的主轴,如钻床、镗床、数控机床的加工中心等。

因此,应尽量使用润滑脂,特别是在速度较低时、立式主轴或可伸缩主轴中。润滑脂的填充量不宜超过轴承内部空间体积的30%。

②润滑油。速度较高时,用润滑油较好。主轴的润滑油方式有飞溅润滑、滴油润滑(油量为1~5滴/分钟)、循环润滑、油雾润滑和喷射润滑。

滚动轴承密封的作用是防止切削液、切削灰尘、杂质等进入轴承,并使润滑剂无泄漏地保持在轴承内,保证轴承的使用性能和寿命。密封的方式主要有以下两种。

①接触式密封。由于旋转件与密封件之间有摩擦,发热量大,因此,接触式密封不宜用于高速主轴,如毛毡、密封圈、碗式密封装置等。

②非接触式密封。非接触式密封发热少,密封件寿命长,能适应各种转速的主轴,如间隙式密封、挡油圈、油沟、迷宫式密封等。

3.2.3 机床支承件

机床的支承件是床身、立柱、横梁、摇臂、底座、刀架、工作台、箱体和升降台等尺寸及质量较大的零件相互固定连接成机床的基础和框架。机床上的其他零部件可以固定在支承件上,或工作时在支承件的导轨上运动。支承件的主要功能是支撑机床各部件,承受切削力、重力、惯性力、摩擦力等静态力和动态力,并保证各部件之间的相对位置精度和运动部件的相对运动轨迹的准确关系。因此,机床支承件是机床设计的重要部件之一。

以机床为例,支承件是床身,固定连接着床头箱、进给箱和三杠(丝杠、光杠和操纵杠);大刀架与溜板箱沿着床身导轨运动。床身不仅承受这些部件的质量,而且承受切削力、传动力和摩擦力等,在这些力的作用下,不应产生过大的变形和振动;还要保证大刀架沿床身导轨运动的直线度和相对主轴轴线的平行度;受热后产生的热变形不应破坏机床的原始精度;床身导轨应有一定的耐用度等。

1. 对支承件的基本要求

支承件需满足以下基本要求:

(1)足够的静刚度和较高的刚度/质量比。要求在规定的最大载荷作用下,支承件的变形量不得超过一定的数值,质量占机床总质量的80%以上,应尽量减轻支承件的质量。

(2)良好的动态特性。良好的动态特性包括较大的动刚度和阻尼;与其他部件相配合,使整机的各阶固有频率不致与激振频率重合而产生共振;不会发生薄壁振动而产生噪声;等等。

(3)应具有较好的热变形特性,使整机的热变形较小或热变形对加工精度的影响较小。由于摩擦热、切削热等产生热变形和热应力,在铸造、焊接和粗加工过程中,会形成内应力,使支承件变形。热变形和内应力都将破坏部件间的相互位置关系和相对运动轨迹,影响加工精度。

(4)应该排屑畅通、吊运安全,并具有良好的工艺性,以便于制造和装配。

2. 支承件的结构

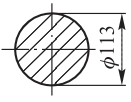
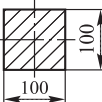
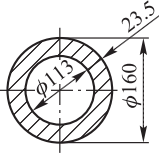
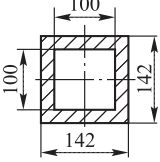
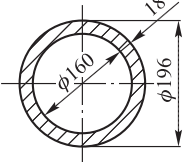
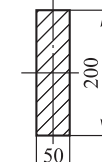
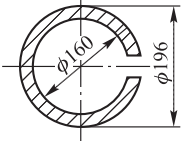
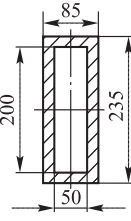
支承件是机床的一部分,因此在设计支承件时,应首先考虑所属机床的类型、布局及常用支承件的形状。在满足机床工作性能的前提下,综合考虑其工艺性。还要根据其使用要求,进行受力和变形分析,再根据所受的力和其他要求(如排屑、吊运、安装其他零件等)进行结构设计,初步决定其形状和尺寸。然后,可以利用计算机进行有限元计算,求出其静态刚度和动态特性,再对设计进行修改和完善,选出最佳结构形式,既能保证支承件具有良好的性能,又能尽量减轻质量,节约金属。支承件的形状基本上可以分为以下三类:

- (1)箱形类。支承件在三个方向上的尺寸都相差不多,如各类箱体、底座、升降台等。
- (2)板块类。支承件在两个方向上的尺寸比第三个方向大得多,如工作台、刀架等。
- (3)梁类。支承件在一个方向的尺寸比另两个方向大得多,如立柱、横梁、摇臂、滑枕、床身等。

3. 支承件的截面形状和选择

支承件结构的合理设计是应在最小质量条件下具有最大静刚度。静刚度主要包括弯曲刚度和扭转刚度,均与截面惯性矩成正比。支承件截面形状不同,即使同一材料、相等的截面积,其抗弯和抗扭惯性矩也不同。截面积近似皆为 $10\,000\text{ mm}^2$ 的八种不同截面形状的抗弯和抗扭惯性矩的比较见表 3-6。

表 3-6 截面积近似皆为 $10\,000\text{ mm}^2$ 的八种不同截面形状的抗弯和抗扭惯性矩的比较

序号	截面形状/mm	惯性矩计算值/ mm^4		序号	截面形状/mm	惯性矩计算值/ mm^4	
		抗弯	抗扭			抗弯	抗扭
1		$\frac{800}{1.0}$	$\frac{1\,600}{1.0}$	5		$\frac{833}{1.04}$	$\frac{1\,400}{0.88}$
2		$\frac{2\,412}{3.02}$	$\frac{4\,824}{3.02}$	6		$\frac{2\,555}{3.19}$	$\frac{2\,040}{1.27}$
3		$\frac{4\,030}{5.04}$	$\frac{8\,060}{5.04}$	7		$\frac{3\,333}{4.17}$	$\frac{680}{0.43}$
4			$\frac{108}{0.07}$	8		$\frac{5\,860}{7.325}$	$\frac{1\,316}{0.82}$

由表 3-6 的比较可知:

- (1)无论支承件的截面是方形、圆形或矩形,空心截面的刚度都比实心的大,而且同样的断