

# 单元一

## 刀具材料



### 单元导读

刀具材料是决定刀具切削性能的根本因素,对加工效率、加工质量、加工成本以及刀具耐用度的影响很大。使用碳素工具钢及合金工具钢作为刀具材料时,刀具的切削速度只有 10 m/min 左右。20 世纪初出现了高速钢刀具材料,使刀具的切削速度提高到每分钟几十米。20 世纪 30 年代出现了硬质合金刀具材料,使刀具的切削速度提高到每分钟一百多米至几百米。陶瓷刀具材料和超硬刀具材料的出现,使刀具的切削速度提高到 1 000 m/min 以上。此外,被加工材料的发展也大大地推动了刀具材料的发展。



### 相关知识

## 学习情境一 刀具材料应具备的性能

性能优良的刀具材料是保证刀具高效工作的基本条件。刀具切削部分在强烈摩擦、高压、高温下工作应具备如下的基本性能。

### 1. 高硬度和高耐磨性

刀具材料的硬度必须高于被加工材料的硬度才能切下金属,这是刀具材料必备的基本性能。现有刀具材料硬度都在 60 HRC 以上。通常刀具材料的硬度越高,其耐磨性越好,刀具切削时能保持合理几何形状的时间越长(即磨损缓慢)。但由于切削条件较复杂,因而刀具材料的耐磨性还取决于它的化学成分和金相组织的稳定性。

### 2. 足够的强度与冲击韧性

刀具强度是指刀具抵抗切削力的作用而不致使刀刃崩碎与刀杆折断所应具备的性能。一般用抗弯强度来表示。

冲击韧性是指刀具在间断切削或有冲击的工作条件下保证不崩刃的能力。一般硬度越高,冲击韧性越低,材料越脆。

刀具切削时,不仅要承受很大的弯曲作用力,还要承受一定的冲击振动,如果强度和冲击韧性不能满足要求,刀具很可能迅速折断或崩刃。

### 3. 高耐热性

耐热性又称为红硬性或热硬性,是衡量刀具材料性能的主要指标。它综合反映了刀具材料在高温下保持硬度、耐磨性、强度、抗氧化、抗黏结和抗扩散的能力。

#### 4. 好的导热性和小的膨胀系数

导热性越好,刀具传出的热量越多,有利于降低切削温度和提高刀具的使用寿命。膨胀系数小,有利于减小刀具的热变形。

#### 5. 良好的工艺性和经济性

为了便于制造,刀具材料应具有良好的工艺性,如锻造、热处理及磨削等加工性能。目前超硬刀具材料及涂层刀具材料的费用都较高,但其使用寿命很长,在成批量生产中,分摊到每个零件中的费用反而有所降低。因此,在选用刀具材料时一定要综合考虑。

选择刀具材料时,很难找到各方面的性能都最佳的刀具材料,因为其性能之间是相互制约的,所以只能根据工艺需要保证主要需求的性能。如粗加工锻件毛坯,需保持有较高的强度与韧性,而加工超硬刀具材料需有较高的硬度等。

## 学习情境二 碳素工具钢及合金工具钢

### 1. 碳素工具钢

按照 GB/T 13304.1—2008,碳素工具钢属于特殊质量非合金钢。由于碳素工具钢在切削温度高于 250~300 °C 时,马氏体分解,因而使其硬度降低。另外,它具有碳化物分布不均匀、淬火后变形较大、易产生裂纹、淬透性差、淬硬层薄等缺点。因此,碳素工具钢只适用于制造手工用和切削速度很低的刀具,如锉刀、手用锯条、丝锥和板牙等。

用作切削刀具的碳素工具钢的常用牌号有 T8A、T10A 和 T12A。其中,以 T12A 用得最多,其含碳量为 1.15%~1.2%,淬火后硬度可达 58~64 HRC,热硬性可达 250~300 °C,允许切削速度可达 5~10 m/min。

### 2. 合金工具钢

合金工具钢是在碳素工具钢中加入 Mn、Si、Ni、Cr、W、Mo、V 等合金元素的钢。加入 Mn 和 Cr 合金元素可提高合金工具钢的淬透性和回火稳定性,细化晶粒,减小变形。可根据要求,有选择地加入或同时加入其他元素(加入总量一般不超过 5%),形成一系列的合金工具钢。

合金工具钢的热硬性可达 325~400 °C,允许切削速度可达 10~15 m/min。其淬硬性、淬透性、耐磨性和冲击韧性均比碳素工具钢的高。其按用途大致可分为刀具、模具和量具用钢。常用合金工具钢的牌号、化学成分、硬度及用途见表 1-1。

表 1-1 常用合金工具钢的牌号、化学成分、硬度及用途

牌 号	化学成分/(%)						硬度/HRC	用 途
	C	Mn	Si	Cr	W	V		
9Mn2V	0.85~0.95	1.7~2.0	≤0.035	—	—	0.1~0.25	≥62	丝锥、板牙、铰刀等
9SiCr	0.85~0.95	0.3~0.6	1.2~1.6	0.95~1.25	—	—	≥62	丝锥、板牙、钻头、铰刀等
CrW5	1.26~1.5	≤0.3	≤0.3	0.4~0.7	4.5~5.5	—	≥65	车刀、铣刀、刨刀等
CrMn	1.3~1.5	0.45~0.75	≤0.35	1.3~1.6	—	—	≥62	量规、块规
CrWMn	0.9~1.05	0.8~1.1	0.15~0.35	0.9~1.2	1.2~1.6	—	≥62	板牙、拉刀、量规等

## 学习情境三 高速钢

高速钢是一种加入了较多的 Mn、Cr、W、V 等合金元素的高合金工具钢。其制造工艺简单,容易刃磨成锋利的切削刃,锻造、热处理变形小。因此,目前其在复杂刀具,如丝锥、麻花钻、拉刀、齿轮刀具和成形刀具的制造中,仍占有主要地位。

高速钢是综合性能较好、应用范围最广的一种刀具材料。其热处理后的硬度可达 62~66 HRC,抗弯强度约为 3.3 GPa,耐热性约为 600 ℃。但是高速钢的热处理工艺较为复杂,必须经过退火、淬火、回火等一系列过程。高速钢的使用约占刀具材料总量的 60%~70%。总体上,高速钢可分为通用型高速钢、高性能高速钢和粉末冶金高速钢。

### 一、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,约占高速钢总量的 75%。它按钨、钼含量不同可分为钨系高速钢和钨钼系高速钢。

#### 1. 钨系高速钢

钨系高速钢最常用的为 W18Cr4V,它具有较好的综合性能,在 600 ℃时其高温硬度为 48.5 HRC,可以制造各种复杂刀具。它具有淬火时过热倾向小、含钒量小、磨削加工性好、碳化物含量高、塑性变形抗力大等优点。但其碳化物分布不均匀,影响薄刃刀具或小截面刀具的耐用度,强度和韧性显得不够,热塑性差,不适用于热成形方法制造刀具(如热轧钻头)。由于我国钨资源丰富,钨系高速钢在我国应用较普遍,但又因钨价高,所以其在国内和国外的使用逐渐减少。

#### 2. 钨钼系高速钢

钨钼系高速钢就是将钨系高速钢中的一部分钨以钼代替而得到的,较常见的牌号有 W6Mo5Cr4V2。它具有较好的综合性能,目前已被各国广为应用。由于钼(一份钼可代替两份钨)的作用,因而使钢中的合金元素减少,降低了钢中碳化物的含量及分布的不均匀性。钨钼系高速钢中碳化物的分布细小均匀,具有良好的机械性能,抗弯强度比钨系高速钢的高 10%~15%,韧性比钨系高速钢的高 50%~60%,可用于制造尺寸较小,承受冲击力较大的刀具。由于它的热塑性好,因而更适用于制造热轧钻头等。此外,其磨削加工性也很好。但这种刀具材料具有脱碳敏感性大、淬火温度范围窄、较难掌握热处理工艺等缺点。

W9Mo3Cr4V 是我国自行研制的钨钼系高速钢,其硬度、强度、热塑性略高于 W6Mo5Cr4V2,具有较好的硬度和韧性,并且易轧、易锻、热处理温度范围宽,脱碳敏感性小,成本更低。

通用型高速钢广泛用于制造各种复杂刀具。其切削速度一般不太高,切削普通钢料时为 40~60 m/min。

### 二、高性能高速钢

高性能高速钢是在通用型高速钢的基础上,通过调整化学成分和添加其他合金元素,使

性能比通用型高速钢更好的一种新型高速钢。如 W12Cr4V4Mo,就是在通用型高速钢中再增加一些含碳量、含钒量及添加 Co、Al 等合金元素冶炼而成的。它的耐用度为通用型高速钢的 1.5~3 倍,具有更高的硬度、红硬性。当其切削温度达到 650 °C 时,硬度仍可保持在 60 HRC 以上。高性能高速钢主要用于高温合金、钛合金、高强度钢和不锈钢等难加工材料的切削加工中。其包括高碳高速钢、高钒高速钢、钴高速钢和铝高速钢。

### 1. 高碳高速钢

高碳高速钢的含碳量为 0.9%~1.05%。其典型牌号为 95W18Cr4V。由于含碳量的提高,使高碳高速钢中的合金元素全部形成碳化物,从而提高了其硬度、耐磨性和耐热性,但其强度和韧性略有下降。用高碳高速钢制造的刀具在切削不锈钢、耐热合金等难加工材料时,寿命显著提高,但由于其抗弯强度为 3 000 MPa,冲击韧性较低,因而对热处理工艺要求严格。

### 2. 高钒高速钢

高钒高速钢的含钒量为 3%~5%,由于它同时加大了含碳量,因而形成 VC 与 V<sub>4</sub>C<sub>3</sub>。其典型牌号为 W6Mo5Cr4V3。由于碳化钒的含量增加,因而使高钒高速钢得到了高的硬度和耐磨性,一般用于切削高强度钢。但其刃磨加工性差,导热性差,冲击韧性较低,因此,不宜用于制造复杂刀具。在高钒高速钢中也可加入适量的钴,形成高钒含钴高速钢。

### 3. 钴高速钢

在通用型高速钢中加入钴,可以促进回火时从马氏体中析出钨、钼、碳化钨,以提高钢的弥散硬化效果,从而提高钢的热稳定性,常温、高温硬度以及耐磨性。增加钴含量还可改善钢的导热性,降低刀具、工件间的摩擦系数,提高钢的高温硬度和抗氧化能力。钴高速钢的典型牌号为 W2Mo9CrVC<sub>8</sub>。它有良好的综合性能,热处理硬度可达 67~70 HRC,可用于切削高温合金、不锈钢等难加工材料。钴高速钢在国外使用较多,由于我国钴原料价格较贵,因而用量不多。我国自行研制成功的低钴含硅高速钢 Co5Si 性能优越,价格低于国外的高钴韧性高速钢 M42 和 HSP-15,但由于 Co5Si 的含钒量达 3%,因而其刃磨加工性较差,不宜用于制造刃形复杂的刀具。

### 4. 铝高速钢

铝高速钢是在通用型高速钢中加入少量的铝。铝能提高钨、钼在钢中的溶解度,从而产生固溶强化,由于铝化合物在钢中能起到“扎钉”的作用,因而可提高钢的耐热性、耐磨性、强度及韧性。

铝高速钢是我国独创的新型高速钢。我国研制出无钴、廉价、含铝量高的高性能高速钢 501(M2Al),其中含铝量约为 1%,具有良好的综合性能。它达到了钴高速钢的切削性能,可加工性好,价格低廉,与通用型高速钢的价格接近,但其刃磨性差,热处理工艺要求较严格。

## 三、粉末冶金高速钢

粉末冶金高速钢的制造工艺于 20 世纪 60 年代后期在瑞典开发成功。它是通过高压惰性气体或高压水雾化高速钢水而得到细小的高速钢粉末,然后压制或热压成形,再经烧结而成的高速钢。该工艺可在高速钢中加入较多合金元素而不会损害刀具材料的强韧性或耐磨性。

粉末冶金高速钢与通用型高速钢相比,硬度更高(温度达到 550~600 °C 时,硬度仍可保持 60 HRC 以上),韧性更好(提高 30%~40%),更耐磨损,热处理变形小,磨削加工性能好,材质均匀,质量稳定可靠,刀具使用寿命长(提高 2~3 倍),可以切削各种难加工材料,适用于制造高切除率加工、断续切削加工的刀具及各种精密刀具和形状复杂的刀具,如精密螺纹车刀、拉刀、切齿刀具等。

粉末冶金高速钢的缺点是价格较高,约为通用型高速钢的 2~5 倍(不同牌号有所差异)。对于小型复杂刀具而言,由于材料费用只占刀具总成本的一小部分,因而采用粉末冶金高速钢十分经济。而对于大尺寸简单刀具而言,选用粉末冶金高速钢前,须仔细斟酌。

## 学习情境四 硬质合金

硬质合金由 Schroter 于 1926 年首先发明。它是由 WC、TiC、TaC、NbC、VC 等难熔金属碳化物以及作为黏结剂的铁族金属用粉末冶金方法制备而成的。经过几十年的不断发展,硬质合金的硬度已达 89~93 HRA,其在 1 000 °C 的高温下仍具有较好的红硬性,且耐用度是高速钢的几倍到几十倍。

### 一、硬质合金性能分析与性能特点

#### 1. 硬质合金性能分析

硬质合金具有硬度高、耐磨、强度和韧性较好、耐热、耐腐蚀等一系列优良性能,特别是它的高硬度和耐磨性,即使在 500 °C 下也基本保持不变,在 1 000 °C 时仍有很高的硬度。硬质合金广泛用作刀具材料,用来切削铸铁、有色金属、塑料、化纤、石墨、玻璃、石材和普通钢材,也可以用来切削耐热钢、不锈钢、高锰钢、工具钢等难加工的材料。如今新型硬质合金刀具的切削速度是碳素钢刀具切削速度的数百倍。由于硬质合金具有良好的综合性能,因而在刀具行业得到了广泛应用,目前国外 90% 以上的车刀和 55% 以上的铣刀采用硬质合金来制造。

#### 2. 硬质合金性能特点

##### 1) 硬度

由于硬质合金碳化物 WC、TiC 等的硬度很高,因而硬质合金整体也就具有高硬度,其硬度一般为 89~93 HRA。硬质合金的硬度随其碳化物的性质、数量和粒度的变化而变化,随黏结剂含量的增加而降低。当黏结剂含量相同时,WC-TiC-Co 硬质合金的硬度高于 WC-Co 硬质合金。

此外,硬质合金的硬度又随温度升高而降低。在 700~800 °C 时,一部分硬质合金保持着相当于高速钢在常温时的硬度。硬质合金的高温硬度仍取决于其碳化物在高温下的硬度,因此,WC-TiC-Co 硬质合金的高温硬度比 WC-Co 硬质合金高些。添加 TaC(NbC) 也能提高硬质合金的高温硬度。

##### 2) 抗弯强度

常用硬质合金的抗弯强度为 0.90~1.50 GPa。其黏结剂含量越高,抗弯强度也就越高。当黏结剂含量相同时,WC-TiC-Co 硬质合金的抗弯强度总是低于 WC-Co 硬质合金,并

随 TiC 的含量增加而降低。

## 二、硬质合金的种类和牌号

硬质合金按 GB/T 2075—2007 规定可分为 P 类硬质合金、M 类硬质合金和 K 类硬质合金。它们后面的阿拉伯数字表示其性能和加工时承受载荷的情况或加工条件。阿拉伯数字越小,表示其硬度越高,韧性越差。

### 1. P 类硬质合金

P 类硬质合金主要用于加工长切屑的黑色金属,用蓝色(包括 P01~P50)作为标志。它相当于我国原钨钛钴类合金(我国牌号为 YT,是高合金化的硬质合金)。其成分为 5%~40% TiC 和 TaC(NbC),其余为 WC+Co。

### 2. M 类硬质合金

M 类硬质合金主要用于加工黑色金属和有色金属,用黄色作为标志,又称为通用硬质合金。它相当于我国原钨钛钽钴类合金(我国牌号为 YW),主要成分为 WC+TiC+TaC(NbC)+Co。

### 3. K 类硬质合金

K 类硬质合金主要用于加工短切屑的黑色金属、有色金属和非金属材料,用红色(包括 K10~K40)作为标志。它相当于我国原钨钴类合金(我国牌号为 YG,是单纯 WC 的硬质合金牌号)。其成分为 90%~98%WC 和 2%~10%Co,个别牌号含约 2%的 TaC(NbC)。

每一种硬质合金中的各个牌号分别以一个 01~50 的数字表示从最高硬度到最大韧性之间的一系列合金,以供各种被加工材料的不同切削工序及加工条件选用。根据需要使用,在两个相邻的分类牌号之间,可插入一个中间牌号,如在 P10 和 P20 之间可插入 P15,在 K20 和 K30 之间可插入 K25 等,但不能多于一个。在特殊情况下,P01 分类牌号可再细分,即在其后再加一位数字,并以一个小数点隔开,如 P01.1、P01.2 等,以便在这一用途小组作精加工时能进一步区分不同程度的耐磨性与韧性。

## 三、其他硬质合金

硬质合金还包括涂层硬质合金、添加稀土元素的硬质合金和梯度硬质合金。

### 1. 涂层硬质合金

涂层硬质合金是 20 世纪 60 年代出现的新型刀具材料。它采用化学气相沉积(CVD)工艺,在硬质合金表面涂覆一层或多层(5~13  $\mu\text{m}$ )难熔金属碳化物。涂层硬质合金具有较好的综合性能,基体强度韧性较好,表面耐磨、耐高温。但其刃口锋利程度与抗崩刃性不及普通硬质合金,因此,多用于普通钢材的精加工或半精加工。

涂层硬质合金允许采用较高的切削速度,与未涂层硬质合金相比,能减小切削力,降低切削温度,改善已加工表面质量,提高通用性。涂层硬质合金不能用于焊接结构,不能刃磨,主要用于制造可转位刀片。近 20 年来,涂层硬质合金刀具有了很大发展,在工业先进国家的可转位刀具中已占 50%甚至 60%以上。

### 2. 添加稀土元素的硬质合金

添加少量稀土元素,可有效地提高硬质合金的韧性和抗弯强度,使其耐磨性得到进一步

提高。这类硬质合金最适用于粗加工刀具,也可用于半精加工刀具,已在矿山工具、顶锤、拉丝模用硬质合金中有着广阔的发展前景。我国稀土元素资源丰富,在硬质合金中添加稀土元素的研究领先于世界其他国家。P类硬质合金、M类硬质合金和K类硬质合金都已研制出添加稀土元素的牌号。

### 3. 梯度硬质合金

梯度硬质合金主要是针对传统硬质合金存在硬度高而韧性低的缺点而研发出来的新品种。其各层成分可根据需要加以调节。所谓梯度组织或梯度结构合金是指其金相组织在断面的不同部位呈现有规律差别的一种合金。这些差别是由它们的化学成分有规律的不均匀分布所造成的。

功能梯度硬质合金正在发展成为当前硬质合金领域的重要研究内容之一。为了提高硬质合金刀具的切削性能和使用寿命,可在硬质合金的表面涂上一薄层高硬度的耐磨材料。由于不同材料的热膨胀系数不同,涂层材料在冷却过程中可能因热应力而产生裂纹。由于涂层材料的脆性,通常裂纹更容易在涂层表面产生并向基体中扩展。为了防止由于裂纹扩展而导致材料失效,可对基体进行梯度处理,使基体表面区域形成立方相碳化物和碳氮化物的韧性区域,此区域的黏结剂含量高于基体的名义黏结剂含量。当涂层表面形成的裂纹扩展到该区域时,由于其有良好的韧性,可以吸收裂纹扩展的能量,因而能有效地阻止裂纹向硬质合金基体中扩展,以提高硬质合金刀具的使用性能。

## 学习情境五 其他刀具材料

### 一、陶瓷刀具材料

与硬质合金相比,陶瓷刀具材料具有更高的硬度、红硬性和耐磨性。因此,加工钢材时,陶瓷刀具的耐用度为硬质合金刀具的10~20倍,红硬性比硬质合金刀具高2~6倍,且在化学稳定性和抗氧化能力等方面均优于硬质合金。陶瓷刀具材料的缺点是脆性大、横向断裂强度低、承受冲击载荷能力差,这也是近几十年来人们不断对其进行改进的重点。

陶瓷刀具材料可分为氧化铝基陶瓷刀具材料、氮化硅基陶瓷刀具材料和氮化硅—氧化铝复合陶瓷刀具材料。

#### 1. 氧化铝基陶瓷刀具材料

氧化铝基陶瓷刀具材料通常是在 $\text{Al}_2\text{O}_3$ 基体材料中加入TiC、WC、ZrC、TaC、 $\text{ZrO}_2$ 等成分,经热压制成复合陶瓷刀具材料,其硬度可达93~95 HRC,为提高韧性,常添加少量Co、Ni等合金元素。

#### 2. 氮化硅基陶瓷刀具材料

常用的氮化硅基陶瓷刀具材料为 $\text{Si}_3\text{N}_4$ -TiC-Co复合陶瓷刀具材料。其韧性高于氧化铝基陶瓷刀具材料,而硬度与氧化铝基陶瓷刀具材料相当。

#### 3. 氮化硅—氧化铝复合陶瓷刀具材料

氮化硅—氧化铝复合陶瓷刀具材料又称为赛阿龙(sialon)陶瓷刀具材料,其化学成分为

77% $\text{Si}_3\text{N}_4$ 、13% $\text{Al}_2\text{O}_3$  和 10% $\text{Y}_2\text{O}_3$ ，硬度可达 1 800 HV，抗弯强度可达 1.20 GPa。氮化硅—氧化铝复合陶瓷刀具最适合切削高温合金和铸铁。

陶瓷刀具的切削效率和工作寿命高于硬质合金刀具和涂层硬质合金刀具，用其加工出的工件表面粗糙度小。由于陶瓷与钢的黏结性较低，因而用陶瓷刀具取代涂层硬质合金刀具加工钢制工件时，切屑形成较稳定，在自动化加工中不易发生切屑缠绕现象，且加工出的零件棱边基本无毛刺。陶瓷刀具材料的缺点是抗热震性较差，易碎裂，因此，使用范围有限。

## 二、超硬刀具材料

人造金刚石、立方氮化硼等具有高硬度的材料统称为超硬刀具材料。

### 1. 人造金刚石

金刚石是世界上已知的最硬物质，其具有高导热性、高绝缘性、高化学稳定性、高温半导体特性等多种优良性能，可用于铝、铜等有色金属及其合金的精密加工，特别适合加工非金属硬脆材料。1955 年，美国 GE 公司采用高温高压法成功合成了人造金刚石，1966 年又研制出人造聚晶金刚石复合片 PCD，自此人造金刚石作为一类新型刀具材料得到迅速发展。但由于人造金刚石中的碳在高温下易与铁元素作用而迅速溶解，因而人造金刚石刀具不适合加工铁基合金，从而大大限制了人造金刚石在金属切削加工中的应用。

### 2. 立方氮化硼

立方氮化硼 CBN 是硬度仅次于人造金刚石的超硬刀具材料。虽然 CBN 的硬度低于人造金刚石，但其氧化温度却高达 1 360 °C，且与铁磁类材料具有较低的亲和性。因此，虽然目前 CBN 还是以烧结体形式进行制备，但其仍是适合钢类材料切削且是具有高耐磨性的优良刀具材料。由于 CBN 具有高硬度、高热稳定性、高化学稳定性等优异性能，因而特别适合加工高硬度、高韧性的难加工金属材料。例如，采用 CBN 可转位刀片干式精车淬硬齿轮，每个齿轮的加工成本可降低 60%；采用配装球形 CBN 刀片的立铣刀精铣大型硬质磨具，磨削时间可比传统工艺减少 80%。CBN 的不足之处是韧性较差的问题尚未解决。

超硬刀具主要包括人造金刚石刀具和立方氮化硼刀具，其中以人造聚晶金刚石复合片 PCD 刀具及立方氮化硼复合片 PCBN 刀具占主导地位。超硬刀具大部分用于汽车零部件的切削加工。其中，PCD 刀具的 60% 用于汽车制造业，约 30% 用于木工刀具（至 20 世纪 90 年代末期，PCD 木工刀具的份额已占 40%）；PCBN 刀具的 50% 用于汽车制造业，约 20% 用于重型设备（如轧辊等）的加工。

近年来，随着数控机床加工技术的迅猛发展以及数控机床的普遍使用，可实现高效率、高稳定性、长寿命加工的超硬刀具的应用也日渐普及，同时引入了许多先进的切削加工概念，如高速切削、硬态加工、高稳定性加工、以车代磨、干式切削等。超硬刀具已成为现代切削加工中不可缺少的重要工具。



### 思考与练习

- 1-1 刀具材料应具备哪些性能？
- 1-2 碳素工具钢适合制造何种刀具？为什么？





- 1-3 合金工具钢中加入 Mn 和 Cr 后起了什么作用?
- 1-4 什么是高速钢? 高速钢有何优缺点?
- 1-5 高速钢可分为哪几种?
- 1-6 粉末冶金高速钢与通用型高速钢的差异有哪些?
- 1-7 硬质合金都有哪些性能特点?
- 1-8 硬质合金可分为哪几种? 它们分别适用于加工什么类型的材料?
- 1-9 陶瓷刀具材料可分为哪几种? 各有什么特点?
- 1-10 超硬刀具材料可分为哪几种?
- 1-11 总结本章内容, 试阐述一下刀具材料的发展方向。

## 单元二

# 金属切削的基本知识

### 单元导读

金属切削加工的形式虽然有多种,但它们在切削运动、切削用量、切削刀具及切削过程中产生的物理现象,有着共同规律。这些规律揭示了金属切削加工的实质,是学习和研究各种加工方法,合理选择刀具及其切削部分几何参数和切削用量,充分发挥刀具切削效能,保证加工质量,提高机械加工生产率的理论基础。

### 相关知识

## 学习情境一 切削运动与切削用量

### 一、切削运动

在机床上切削工件,工件与刀具之间要有相对运动,这个相对运动称为切削运动。如图 2-1 所示为车削外圆时的切削运动和加工表面示意图。外圆的母线沿直导线运动时就形成了工件上的外圆表面,故工件的旋转运动和车刀的纵向直线运动就是车削外圆时的切削运动。

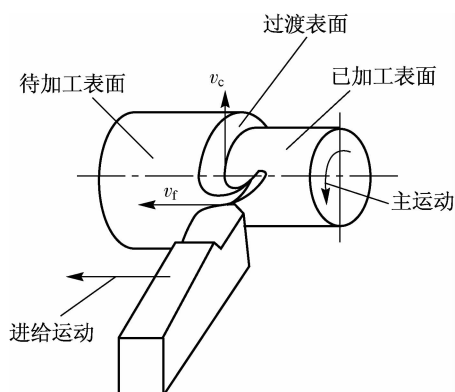


图 2-1 车削外圆时的切削运动和加工表面示意图

切削运动分为主运动和进给运动。如图 2-2 所示为切削运动简图。

#### 1. 主运动

主运动是使工件与刀具产生相对运动以进行切削的最基本运动。主运动的速度最高,

所消耗的功率也最大。换句话说,主运动就是从工件上切除金属所必需的运动。在切削运动中,主运动只有一个。它可以由工件完成,也可以由刀具完成;可以是旋转运动,也可以是直线运动。例如,车床上工件的旋转运动;龙门刨床刨削时,工件的直线往复运动;牛头刨床刨刀的直线往复运动;铣床上铣刀的旋转运动;钻床上钻头的旋转运动;磨床上砂轮的旋转运动等,都是切削加工时的主运动。

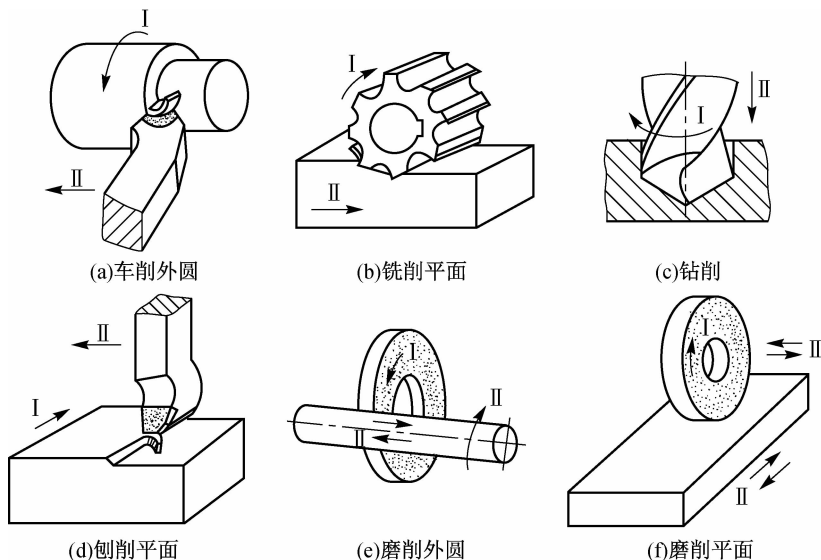


图 2-2 切削运动简图  
I—主运动; II—进给运动

## 2. 进给运动

进给运动是不断地把被切削层投入切削,以逐渐切削出整个表面的运动。也就是说,没有进给运动,就不能连续切削。进给运动一般速度较低,消耗的功率较少,可由一个或多个运动组成,可以是连续的,也可以是间断的。

## 二、切削用量

切削用量是切削速度、进给量(或进给速度)和背吃刀量三者的总称,这三者可称为切削用量三要素。

### 1. 三种表面

在切削加工过程中,工件上会形成三种表面,它们是待加工表面、已加工表面和过渡表面,如图 2-1 所示。

#### 1) 待加工表面

待加工表面是指即将切去的表面。

#### 2) 已加工表面

已加工表面是指切削后得到的表面。

#### 3) 过渡表面

过渡表面是指正在被切削的表面。

## 2. 切削用量三要素

如图 2-3 所示为切削用量三要素。

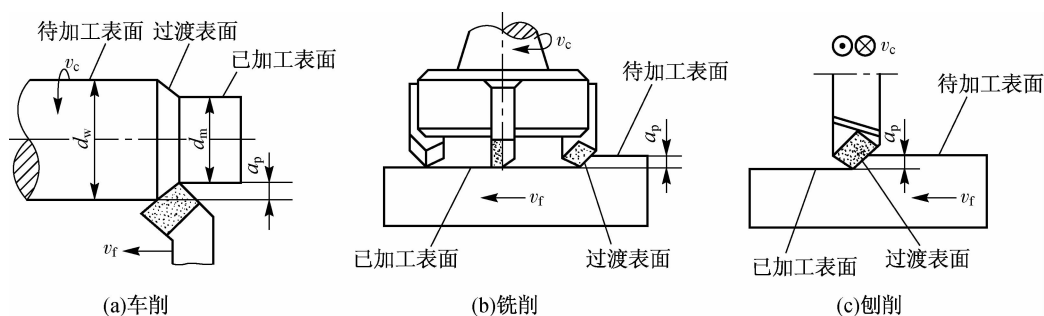


图 2-3 切削用量三要素

### 1) 切削速度

切削刃上选定点相对于工件沿主运动方向的瞬时线速度称为切削速度,用符号  $v_c$  表示,单位为 m/s 或 m/min。

若主运动为旋转运动(如车削、铣削等),切削速度(m/min)一般为其最大线速度。其计算公式为

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

式中,  $d_w$  为工件待加工表面的直径(mm);  $n$  为工件的转速(r/min)。

### 2) 进给量

进给量也称为走刀量,一般是指切削加工中工件或刀具每旋转一周(如车削)或刀具往返一次(称为双行程,如刨削)时,工件或刀具的相对移动距离,用符号  $f$  表示,单位为 mm/r(每转进给量)或 mm/st(每行程进给量)。当用多齿刀具(如铣刀)加工时,也可用进给运动的瞬时速度即进给速度来表示,其符号为  $v_f$ ,单位为 mm/s 或 mm/min。

### 3) 背吃刀量

在通过切削刃上选定点并垂直于该点主运动方向的切削层尺寸平面中,垂直于进给运动方向测量的切削层尺寸,称为背吃刀量,用符号  $a_p$  表示,单位为 mm。

当车外圆时,  $a_p$  的计算公式为

$$a_p = \frac{d_w - d_m}{2} \quad (2-2)$$

式中,  $d_m$  为工件已加工表面的直径(mm)。

当钻孔时,  $a_p$  的计算公式为

$$a_p = \frac{d_m}{2} \quad (2-3)$$

## 学习情境二 刀具切削部分的基本定义

### 一、刀具切削部分的构成要素

刀具种类很多,但它们却有共同的特征,都具有楔形的切削部分。不论刀具的构造如何

复杂,它们的切削部分总是近似地以外圆车刀的切削部分为基本形态。因此,以普通外圆车刀为代表来确定刀具切削部分的基本定义。

如图 2-4 所示为典型外圆车刀切削部分的组成。图中车刀由刀杆和刀头两部分组成。刀头由刀面、切削刃和刀尖组成。

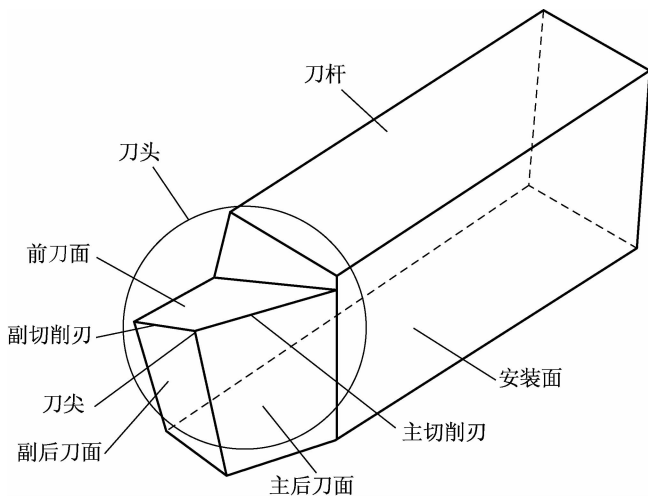


图 2-4 典型外圆车刀切削部分的组成

### 1. 刀面

刀面包括前面和后面。

#### 1) 前面

前面又称为前刀面,是刀具上切屑流过的表面,用符号  $A_f$  表示。

#### 2) 后面

后面又称为后刀面,可分为主后刀面和副后刀面。主后刀面是指与工件过渡表面相对的刀面,用符号  $A_a$  表示。副后刀面是指与工件已加工表面相对的刀面,用符号  $A'_a$  表示。

### 2. 切削刃

切削刃是指前刀面上直接进行切削的边锋。切削刃可分为主切削刃和副切削刃。

#### 1) 主切削刃

主切削刃是指前刀面与主后刀面的交线,用符号  $S$  表示。

#### 2) 副切削刃

副切削刃是指前刀面与副后刀面的交线,用符号  $S'$  表示。

### 3. 刀尖

刀尖是指主切削刃与副切削刃的交点或主切削刃与副切削刃间的过渡弧(也称为过渡刃)。刀尖的类型主要有切削刃交点、圆弧刀尖、倒棱刀尖等,如图 2-5 所示。

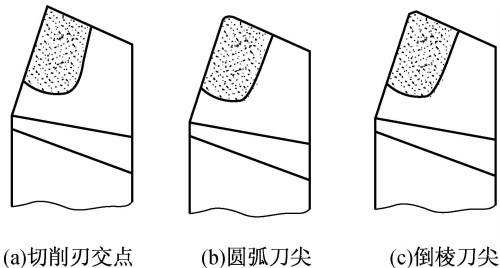


图 2-5 刀尖的类型

## 二、刀具角度参考系

要确定刀面和切削刃的空间位置,可用刀具的几何角度来表示,而要定义刀具的几何角度则需参照平面,由这些参照平面组成的平面系称为参考系。用于确定刀具角度的参考系可分为静态参考系和动态参考系。静态参考系是定义刀具标注角度的参考系,而动态参考系可用来确定刀具在运动中角度的基准,是定义刀具工作角度的参考系。

参考系和刀具角度都是对切削刃上某一点而言的,切削刃上不同的点应建立各自的参考系,表示各自的刀具角度。下面主要介绍车刀正交平面参考系,如图 2-6 所示。

车刀正交平面参考系由基面、切削平面和正交平面组成。

### 1. 基面

通过切削刃上某选定点,与假定的主运动方向垂直的平面称为基面,用符号  $P_r$  表示。基面是刀具制造、刃磨、测量时的定位基准。

### 2. 切削平面

通过切削刃上某选定点,包含主切削刃或与主切削刃相切并垂直于基面  $P_r$  的平面称为切削平面,用符号  $P_s$  表示。通过切削刃上某选定点,包含副切削刃或与副切削刃相切并垂直于基面  $P_r$  的平面称为副切削平面,用符号  $P'_s$  表示。

### 3. 正交平面

通过切削刃上某选定点,同时垂直于基面  $P_r$  与切削平面  $P_s$  的平面称为正交平面,用符号  $P_o$  表示。由此可知,正交平面垂直于主切削刃在基面上的投影。通过切削刃上某选定点,同时垂直于基面  $P_r$  与副切削平面  $P'_s$  的平面称为副正交平面,用符号  $P'_o$  表示。

对于形状复杂的刀具(或考虑切削条件的影响),有时用基面、切削平面和其他平面组成的参考系来测量刀具角度要方便一些,这样就形成了其他参考系。如基面、切削平面与法平面(用符号  $P_n$  表示)组成的法平面参考系,基面、切削平面与假定进给平面(用符号  $P_f$  表示)组成的假定进给平面参考系,基面、切削平面与背向平面(用符号  $P_b$  表示)组成的背向平面参考系等。

## 三、刀具的标注角度

刀具的标注角度是刀具的重要几何参数,直接关系到刀具的性能、强度和耐用度等。下面以车刀为例,说明正交平面参考系中各标注角度的含义,如图 2-7 所示。

### 1. 前角

前刀面与基面之间的夹角称为前角,用符号  $\gamma_o$  表示。它是在正交平面  $P_o$  中测量的。当前刀面与切削平面之间的夹角小于  $90^\circ$  时,前角为正;当前刀面与切削平面之间的夹角大于  $90^\circ$  时,前角为负;当前刀面与切削平面垂直时,前角为零。

### 2. 后角

主后刀面与切削平面之间的夹角称为后角,用符号  $\alpha_o$  表示。它也是在正交平面  $P_o$  中测量的。当主后刀面与基面的夹角小于  $90^\circ$  时,后角为正;当主后刀面与基面的夹角大于  $90^\circ$

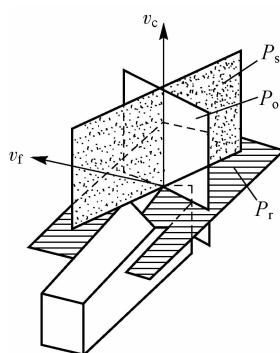


图 2-6 车刀正交平面参考系

时,后角为负。在实际切削中,后角必须大于 $0^\circ$ 。

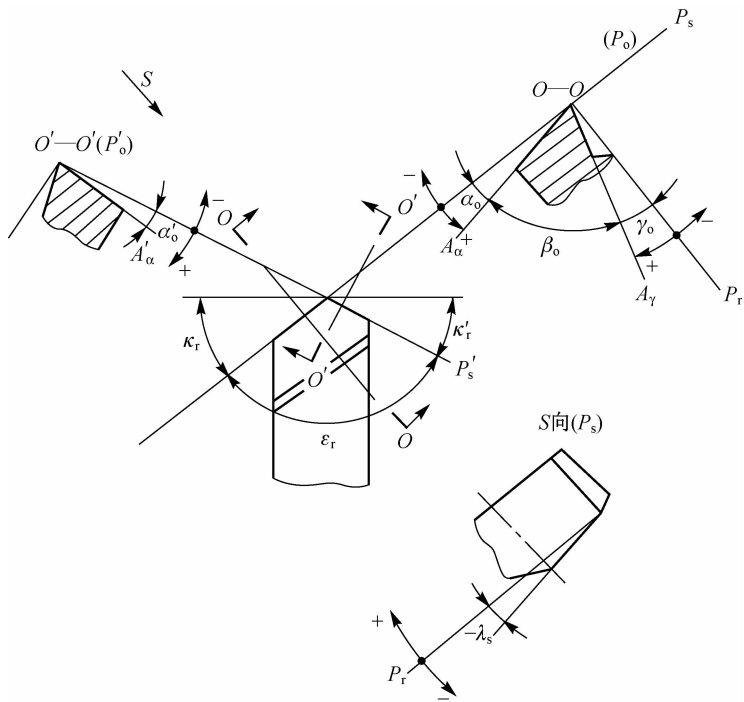


图 2-7 车刀的标注角度

### 3. 主偏角

切削平面与假定进给运动方向之间的夹角称为主偏角,用符号 $\kappa_r$ 表示。它是在基面 $P_r$ 中测量的。

### 4. 副偏角

副切削平面与假定进给运动反方向之间的夹角称为副偏角,用符号 $\kappa'_r$ 表示。它也是在基面 $P_r$ 中测量的。

### 5. 刃倾角

主切削刃与基面之间的夹角称为刃倾角,用符号 $\lambda_s$ 表示。它是在切削平面 $P_s$ 中测量的。当刀尖是切削刃上最高点时,刃倾角为正;当刀尖是切削刃上的最低点时,刃倾角为负;当主切削刃与基面重合或平行时,刃倾角为零。

刀具前、后角及刃倾角的正、负判断法,如图 2-8 所示。

### 6. 副后角

副后刀面与副切削平面之间的夹角称为副后角,用符号 $\alpha'_o$ 表示。它是在副正交平面 $P'_o$ 中测量的。

### 7. 楔角

前刀面与主后刀面之间的夹角称为楔角,用符号 $\beta_o$ 表示。它也是在正交平面 $P_o$ 中测量的。其计算公式为

$$\beta_o = 90^\circ - (\alpha_o + \gamma_o) \quad (2-4)$$

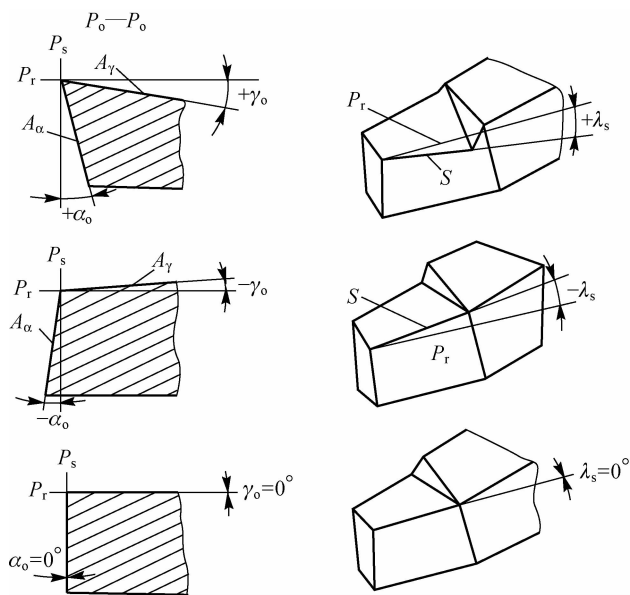


图 2-8 刀具前、后角及刃倾角的正、负判断法

### 8. 刀尖角

切削平面与副切削平面之间的夹角称为刀尖角,用符号  $\epsilon_r$  表示。它也是在基面  $P_r$  中测量的。其计算公式为

$$\epsilon_r = 180^\circ - (\kappa_r + \kappa'_r) \quad (2-5)$$

上述八个角度中,前六个为刀具的基本角度,其余均为派生角度。

## 四、刀具角度的换算

### 1. 法平面与正交平面内前、后角的关系

法平面即为通过切削刃上某选定,与切削刃垂直的平面。正交平面参考系能较好地反映刀具的切削性能,是使用较多的一种参考系,而法平面参考系能较好地反映螺旋切削刃、大刃倾角刀具的切削性能,因此,常需在它们之间进行角度的换算。法平面与正交平面内前、后角的关系如图 2-9 所示。

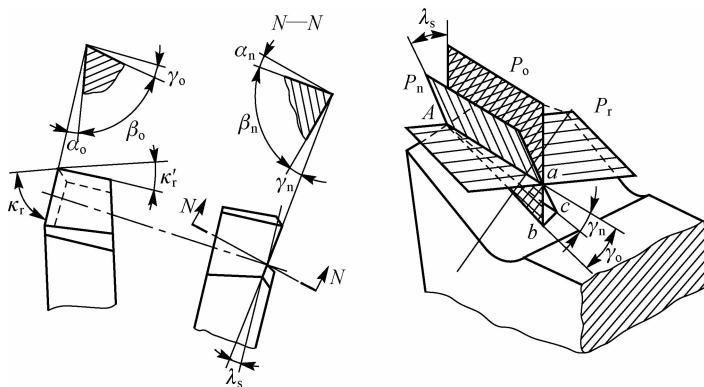


图 2-9 法平面与正交平面内前、后角的关系



图 2-9 中刃倾角  $\lambda_s$  为正值,  $\tan \gamma_o = ab/Aa$ , 经推导, 得法向前角与前角的关系为

$$\tan \gamma_n = \frac{ac}{Aa} = \frac{ab \cos \lambda_s}{Aa} = \tan \gamma_o \cos \lambda_s \quad (2-6)$$

式中,  $\gamma_n$  为法向前角( $^\circ$ )。

当  $\lambda_s = 0^\circ$  时, 正交平面与法平面重合,  $\gamma_o = \gamma_n$ ; 当  $\lambda_s \neq 0^\circ$  时,  $\gamma_o > \gamma_n$ 。将式(2-6)中的  $\gamma_o$ 、 $\gamma_n$  换成  $\alpha_n$ 、 $\alpha_o$ , 即得法向后角和后角的关系

$$\cot \alpha_n = \cot \alpha_o \cos \lambda_s \quad (2-7)$$

式中,  $\alpha_n$  为法向后角( $^\circ$ )。

### 2. 任意平面与正交平面内前、后角的关系

求任意平面内前、后角是为了进一步求得其他平面内的角度。这里所谓的任意平面是指过车刀主切削刃上选定点所作的垂直于基面的平面, 用符号  $P_i$  表示。如图 2-10 所示为任意平面与正交平面内前、后角的关系。

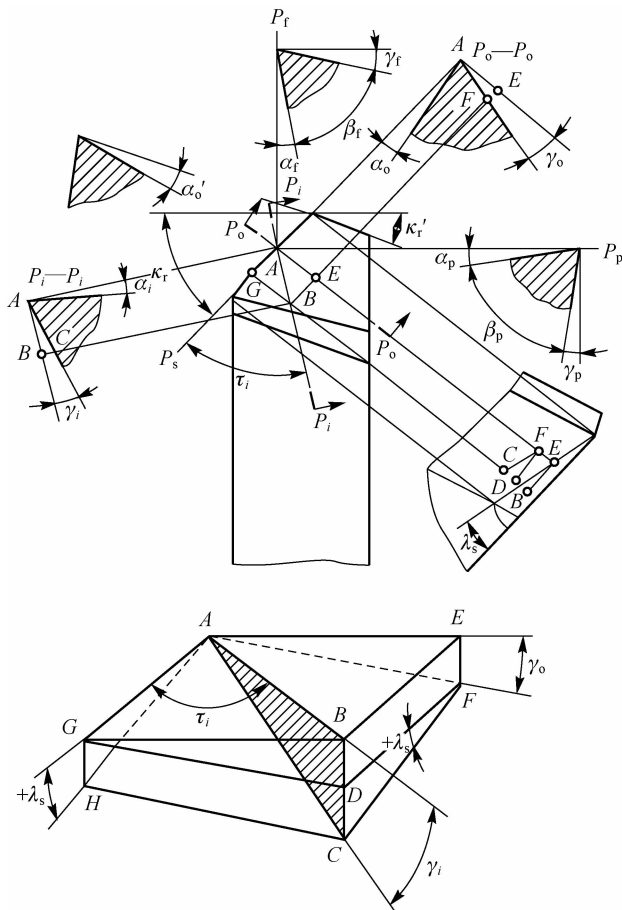


图 2-10 任意平面与正交平面内前、后角的关系

$AGBE$  为过主切削刃上选定点  $A$  的基面,  $P_o$  为过主切削刃上选定点  $A$  的正交平面,  $P_p$  和  $P_f$  为过主切削刃上选定点  $A$  的背向平面和假定进给平面, 刀具在背向平面和假定进给平面中的角度除基面上表示的角度外, 前角、后角和楔角是分别在背向平面和假定进给平面内

标出的,故有背向前角  $\gamma_p$ 、背向后角  $\alpha_p$ 、背向楔角  $\beta_p$  和侧前角  $\gamma_f$ 、侧后角  $\alpha_f$ 、侧楔角  $\beta_f$  的角度。与主切削刃在内的切削平面  $P_s$  的夹角为  $\tau_i$ ;  $AHCF$  为前刀面,  $AH$  为主切削刃, 根据图 2-10 中元素的几何关系, 可得任意平面  $P_i$  内的前角  $\gamma_i$  与正交平面内前角  $\gamma_o$  的关系式为

$$\begin{aligned}\tan \gamma_i &= \frac{BC}{AB} = \frac{BD+DC}{AB} = \frac{EF+DC}{AB} \\ &= \frac{AE \tan \gamma_o + DF \tan \lambda_s}{AB} \\ &= \tan \gamma_o \frac{AE}{AB} + \tan \lambda_s \frac{DF}{AB} \\ &= \tan \gamma_o \sin \tau_i + \tan \lambda_s \cos \tau_i\end{aligned}\quad (2-8)$$

(1) 当  $\tau_i = 0^\circ$  时, 任意平面  $P_i$  到了切削平面  $P_s$  的位置, 此时

$$\tan \gamma_i = \tan \lambda_s$$

则

$$\gamma_i = \lambda_s$$

(2) 当  $\tau_i = 90^\circ - \kappa_r$  时, 可得背向平面  $P_p$  内的前角  $\gamma_p$ , 即

$$\tan \gamma_p = \tan \gamma_o \cos \kappa_r + \tan \lambda_s \sin \kappa_r\quad (2-9)$$

(3) 当  $\tau_i = 180^\circ - \kappa_r$  时, 可得假定进给平面  $P_f$  内的前角  $\gamma_f$ , 即

$$\tan \gamma_f = \tan \gamma_o \sin \kappa_r - \tan \lambda_s \cos \kappa_r\quad (2-10)$$

同理, 可求出任意平面  $P_i$  内的后角  $\alpha_i$  与正交平面内后角  $\alpha_o$  的关系式为

$$\cot \alpha_i = \cot \alpha_o \sin \tau_i + \tan \lambda_s \cos \tau_i\quad (2-11)$$

(1) 当  $\tau_i = 90^\circ - \kappa_r$  时, 可得背向平面  $P_p$  内的后角  $\alpha_p$ , 即

$$\cot \alpha_p = \cot \alpha_o \cos \kappa_r + \tan \lambda_s \sin \kappa_r\quad (2-12)$$

(2) 当  $\tau_i = 180^\circ - \kappa_r$  时, 可得假定进给平面  $P_f$  内的后角  $\alpha_f$ , 即

$$\cot \alpha_f = \cot \alpha_o \sin \kappa_r - \tan \lambda_s \cos \kappa_r\quad (2-13)$$

## 五、刀具的工作角度

刀具的工作角度是刀具在工作参考系中定义的一组角度。在切削过程中, 由于刀具安装位置和进给因素的影响, 使刀具的工作角度(即刀具的实际切削角度)不同于其在静态参考系中的角度。

### 1. 刀具工作角度的含义

刀具工作角度是刀具在工作时的实际切削角度, 即在考虑刀具的具体安装情况和运动影响的条件下而确定的角度。在大多数情况下, 普通车削、镗孔、端面铣削等, 由于进给速度远小于主运动速度, 因而刀具工作角度与刀具标注角度相差无几, 两者差别可不予考虑。但当切削大螺距丝杠和螺纹、铲背、切断以及钻孔分析钻心附近的切削条件, 或刀具被特殊安装时, 需要计算刀具的工作角度, 其目的是使刀具工作角度得到最合理值, 据此换算出刀具标注角度, 以便于制造或刃磨。

### 2. 刀具工作参考系

刀具工作参考系包括工作正交平面参考系、工作法平面参考系和工作背向平面参考系。下面主要介绍正交平面参考系, 该参考系由工作基面、工作切削平面和工作正交平面组成。

1)工作基面

通过切削刃上选定点并与合成切削速度方向相垂直的平面称为工作基面,用符号  $P_{re}$  表示。

2)工作切削平面

通过切削刃上选定点与切削刃相切并垂直工作基面的平面称为工作切削平面,用符号  $P_{sc}$  表示。

3)工作正交平面

通过切削刃上选定点并与工作基面和工作切削平面相垂直的平面称为工作正交平面,用符号  $P_{oe}$  表示。

3. 进给量对刀具工作角度的影响

以切断刀加工为例,设切断刀主偏角  $\kappa_r=90^\circ$ ,前角  $\gamma_o>0^\circ$ ,后角  $\alpha_o>0^\circ$ ,安装时刀尖对准工件的中心高。不考虑进给运动时,前角  $\gamma_o$  和后角  $\alpha_o$  为标注角度。当考虑横向进给运动后,切削刃上选定点相对于工件的运动轨迹,是主运动和横向进给运动的合成运动轨迹,即阿基米德螺旋线,如图 2-11 所示。其合成运动方向  $v_c$  为过切削刃上选定点的阿基米德螺旋线的切线方向。因此,工作基面  $P_{re}$  和工作切削平面  $P_{sc}$  相对  $P_r$  和  $P_s$  相应地转动了一个角度  $\mu$ ,结果引起了切断刀的角度变化,其值分别为

$$\gamma_{oc} = \gamma_o + \mu \tag{2-14}$$

$$\alpha_{oc} = \alpha_o - \mu \tag{2-15}$$

$$\tan \mu = \frac{v_f}{v_c} = \frac{f}{\pi d} \tag{2-16}$$

式中,  $f$  为工件每转一周刀具的横向进给量(mm/r);  $d$  为工件切削刃上选定点的瞬时过渡表面直径(mm)。

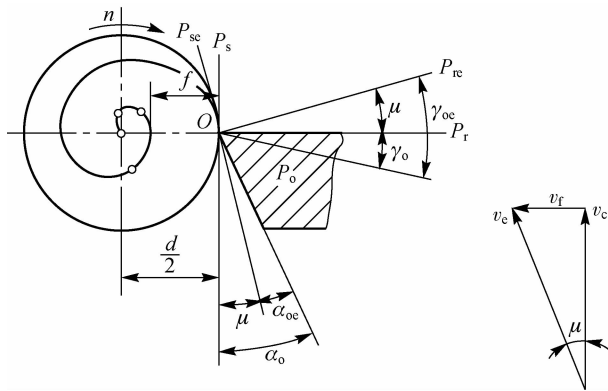


图 2-11 横向进给运动对工作角度的影响

由式(2-14)、式(2-15)和式(2-16)可知,在横向进给切削或切断工件时,随着进给量  $f$  的增大和加工直径  $d$  的减小,  $\mu$  值不断增大,工作前角不断增大,工作后角不断减小。当刀尖接近工件中心位置时,工作后角的减小特别严重,很容易因后刀面和工件过渡表面剧烈摩擦使切削刃崩碎或使工件挤断。因此,切断工件时不宜选用过大的进给量  $f$ ,在切断接近结束时,应适当减小进给量或适当增大工作后角。

对于纵向外圆车削,同样随着进给量  $f$  的增大和加工直径  $d$  的减小,  $\mu$  值不断增大,工作前角不断增大,工作后角不断减小。但由于纵向外圆车削过程中,工件直径基本不变,进给量又较小,一般可忽略不计,因而不必进行刀具工作角度的计算。当进给量很大,如车螺纹(尤其是大导程或多头螺纹)时,其刀具工作角度与刀具标注角度相差很大,必须进行刀具工作角度的计算。

4. 刀具安装位置对其工作角度的影响

1) 刀具安装高低的影响

在外圆横向车削时,忽略进给运动的影响,并假定  $\kappa_r = 90^\circ, \lambda_s = 0^\circ$ ,当刀尖安装高于工件中心时,工作切削平面  $P_{sc}$  和工作基面  $P_{re}$  将转动  $\theta$  角,使工作前角增大,工作后角减小,如图 2-12 所示。刀具工作角度与刀具标注角度的换算关系如下

$$\gamma_{oe} = \gamma_o + \theta \quad (2-17)$$

$$\alpha_{oc} = \alpha_o - \theta \quad (2-18)$$

$$\tan \theta \approx \frac{2h}{d} \quad (2-19)$$

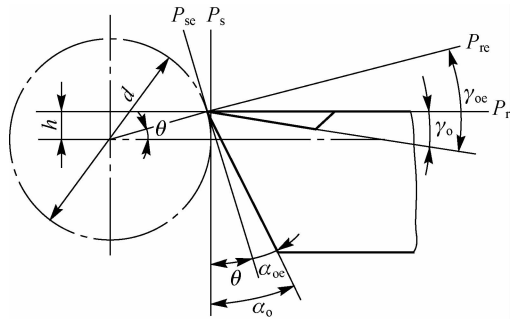


图 2-12 刀具安装高低的影响

式中,  $h$  为切削刃高于工件中心的距离(mm);  $d$  为工件上选定点的直径(mm)。

当刀尖安装低于工件中心时,刀具工作角度的变化则相反,如内孔镗削时刀具工作角度的变化情况恰好与外圆车削时刀具工作角度的变化情况相反。

2) 刀杆轴线与进给运动方向不垂直的影响

如图 2-13 所示,当刀杆轴线与进给运动方向不垂直时,若刀杆右斜,则使工作主偏角  $\kappa_{re}$  增大,使工作副偏角  $\kappa'_{re}$  减小;若刀杆左斜,则使工作主偏角  $\kappa_{re}$  减小,使工作副偏角  $\kappa'_{re}$  增大。车削锥面时,进给方向与工件轴线不平行,也会使实际的主偏角和副偏角发生变化。

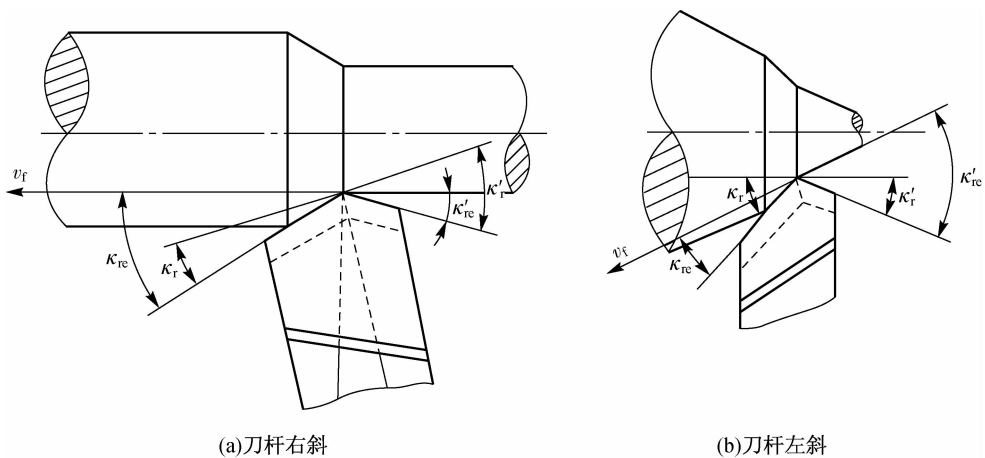


图 2-13 刀杆轴线与进给运动方向不垂直的影响

以上讨论的刀具工作角度是单独考虑一个因素的影响,实际工作中的刀具可能既有安装的高低或偏斜,又有进给运动的影响,这时应综合考虑。

## 学习情境三 切削层参数与切削方式

### 一、切削层参数

切削层是指切削过程中,由刀具切削部分的一个单一动作(如车削时工件转一圈,车刀主切削刃移动一段距离)所切除的工件材料层。

切削层参数是指切削层的截面尺寸,它决定刀具所承受的负荷和切屑的尺寸大小。它通常需要在过切削刃上选定点并与该点切削速度向量垂直的基面内观察和度量。

切削层参数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。现以外圆车削为例来说明切削层参数。如图 2-14 所示,车削外圆时,工件每转一周,车刀沿工件轴线移动一个进给量  $f$  的距离,主切削刃及其对应的工件切削表面也连续由位置 II 移至 I,因而 I、II 之间的一层金属被切下。

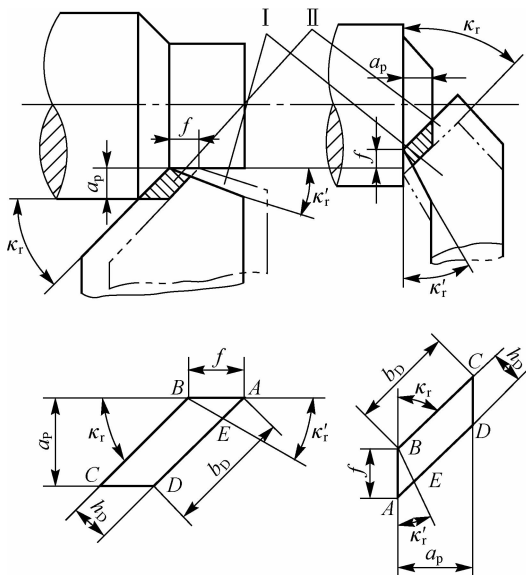


图 2-14 切削层参数

#### 1. 切削层公称横截面积

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,用符号  $A_D$  表示,单位为  $\text{mm}^2$ 。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下有规则的刀纹,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。

#### 2. 切削层公称宽度

切削层公称宽度是指沿切削刃方向测量的切削层的截面尺寸,用符号  $b_D$  表示,单位为  $\text{mm}$ 。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

切削层公称厚度是指垂直于切削刃方向测量的切削层的截面尺寸,用符号  $h_D$  表示,单位为 mm。

当主切削刃为直线且过渡刃圆弧半径很小时,由图 2-14 可知

$$b_D = \frac{a_p}{\sin \kappa_r} \quad (2-20)$$

$$h_D = f \sin \kappa_r \quad (2-21)$$

$$A_D = b_D h_D = a_p f \quad (2-22)$$

由式(2-20)、式(2-21)和式(2-22)可知,由于主偏角值的不同,引起切削层公称宽度与切削层公称厚度的变化,从而对切削过程的切削机理产生了较大的影响。

## 二、切削方式

切削方式是指加工时刀具相对工件的运动方式,包括直角切削和斜角切削、自由切削和非自由切削。

### 1. 直角切削和斜角切削

直角切削是指切削刃垂直于合成切削运动方向的切削方式,如图 2-15(a)所示。当采用直角切削时,刃倾角  $\lambda_s = 0^\circ$ ,切屑流出方向在切削刃法平面内。斜角切削是指切削刃不垂直于合成切削运动方向的切削方式,如图 2-15(b)所示。当采用斜角切削时,刃倾角  $\lambda_s \neq 0^\circ$ ,切屑流出方向不在切削刃法平面内。

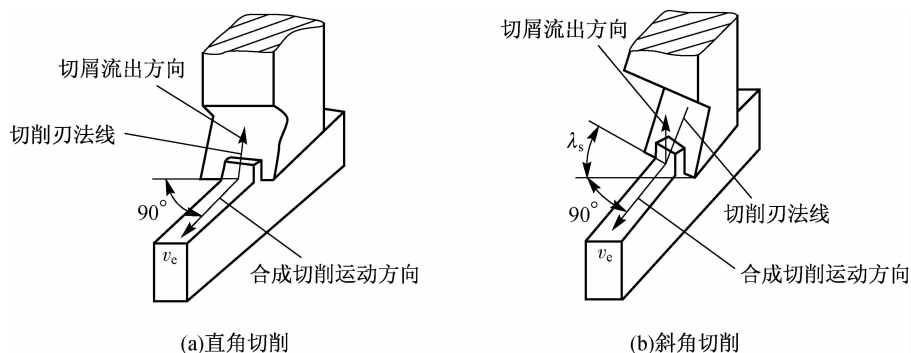


图 2-15 直角切削和斜角切削

### 2. 自由切削和非自由切削

自由切削是指只有一条直线切削刃参与的切削方式。其特点是切削刃上各点切屑流出方向一致,且金属变形在二维平面内。反之,若刀具上的切削刃为曲线或折线,或有几条切削刃(包括主切削刃和副切削刃)同时参加切削,并同时完成整个切削过程,这种切削称为非自由切削。它的主要特征是各切削刃交会处切下的金属互相影响和干涉,金属变形更为复杂,且发生在三维空间内。例如,外圆车刀切削时除主切削刃外,还有副切削刃同时参加切削,所以它属于非自由切削方式。

在实际生产中,切削方式通常多属于非自由切削。为了简化条件常采用直角自由切削研究金属变形。

## 技能实训

### 车刀角度的测量

#### 1. 实训目的

- (1) 熟悉车刀切削部分的构造要素, 根据车刀角度的定义对其进行测量。
- (2) 了解车刀测角仪的结构, 学会使用车刀测角仪测量车刀角度。

#### 2. 实训要求

- (1) 加深理解车刀角度参考系。
- (2) 根据测量结果绘制车刀工作图。
- (3) 进一步熟悉各平面之间的角度关系。

#### 3. 车刀测角仪的结构与工作原理

测量刀具几何角度的量具很多, 如万能量角器、摆针式重力量角器、车刀测角仪等。车刀测角仪是测量车刀角度的专用测角仪, 有多种形式, 本实训采用的是既能测量车刀正交平面参考系的基本角度, 又能测量车刀法平面参考系的基本角度的一种车刀测角仪, 其结构如图 2-16 所示。

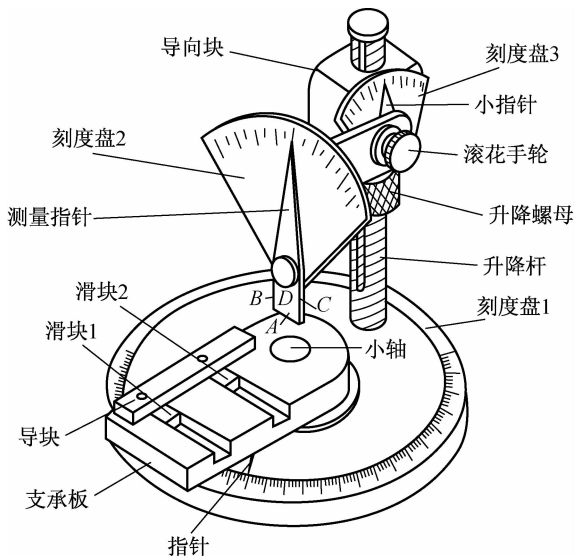


图 2-16 车刀测角仪的结构

图 2-16 中圆形底盘的周边刻有从  $0^\circ$  起, 顺、逆时针两个方向量程各为  $100^\circ$  的刻度盘 1。其上面的支承板可绕小轴转动, 转动的角度由固连于支承板上的指针指示出来。支承板上的导块和滑块 1、2 固定在一起, 滑块 1、2 能在支承板的滑槽内平行滑动。升降杆固定安装在圆形底盘上, 其上面的升降螺母可以使导向块沿升降杆上的键槽上、下滑动。导

向块上面用小螺钉固定装上一个刻度盘 3, 在刻度盘 3 的外面用滚花手轮将角铁的一端锁紧。当松开滚花手轮时, 角铁以滚花手轮为轴, 可以沿顺、逆时针两个方向转动, 其转动的角度用固定在角铁上的小指针在刻度盘 3 上指示出来。在角铁的另一端固定安装扇形刻度盘 2, 其上安装着能转动的测量指针, 可在刻度盘 2 上指示出转动的角度。

当支承板上的指针、小指针和测量指针都处于  $0^\circ$  时, 测量指针的前面  $D$  和侧面  $B$ 、 $C$  均垂直于支承板所在平面, 而测量指针的底面  $A$  平行于支承板所在平面。测量车刀角度时, 就是根据被测角度的需要转动支承板, 同时调整支承板上车刀的位置, 再旋转升降螺母使导向块带动测量指针上升或下降而处于适当的位置。然后用测量指针的前面  $D$ 、侧面  $B$ 、 $C$  和底面  $A$ , 与构成被测角度的面或线紧密贴合, 从刻度盘 2 上读出测量指针指示的被测角度值。

#### 4. 实训方法及步骤

(1) 校准车刀测角仪的原始位置。用车刀测角仪测量车刀角度前, 必须先将车刀测角仪支承板上的指针、小指针和测量指针全部调整到零位, 然后将车刀平放在支承板上, 其侧面紧贴导块侧面, 这种状态下的车刀测角仪的位置称为测量车刀标注角度的原始位置。

(2) 主偏角  $\kappa_r$  的测量。从测量车刀标注角度的原始位置起, 顺时针转动支承板使车刀主切削刃和测量指针前面  $D$  紧密贴合(旋转升降螺母使导向块沿升降杆上的键槽上、下滑动, 带动测量指针上下移动至合适位置), 此时支承板指针在底盘上所指示的刻度值即为主偏角  $\kappa_r$  的数值。

(3) 刃倾角  $\lambda_s$  的测量。测量完主偏角  $\kappa_r$  后, 此时测量指针位于切削平面内, 转动测量指针使其底面  $A$  与车刀主切削刃紧密贴合, 则测量指针在刻度盘 2 上所指示的刻度值即为刃倾角  $\lambda_s$  的数值。测量指针在  $0^\circ$  左边时, 刃倾角为  $+\lambda_s$ ; 测量指针在  $0^\circ$  右边时, 刃倾角为  $-\lambda_s$ 。

(4) 副偏角  $\kappa_r'$  的测量。参照主偏角  $\kappa_r$  的测量方法, 逆时针方向转动支承板, 使车刀副切削刃与测量指针的前面  $D$  紧密贴合, 此时支承板指针在底盘上所指示的刻度值即为副偏角  $\kappa_r'$  的数值。

(5) 前角  $\gamma_o$  的测量。前角  $\gamma_o$  的测量是在主切削刃的正交平面内进行的, 首先将车刀测角仪调整到测量主偏角  $\kappa_r$  的位置上, 使支承板逆时针转动  $90^\circ$ , 也可以使支承板指针从底盘  $0^\circ$  逆时针转动  $90^\circ - \kappa_r$ 。此时, 主切削刃在基面上的投影恰好垂直于测量指针的前面  $D$ , 然后用测量指针底面  $A$  与通过主切削刃上选定点的前刀面紧密贴合, 则测量指针在刻度盘 2 上所指示的刻度值即为前角  $\gamma_o$  的数值。测量指针在  $0^\circ$  右边时, 前角为  $+\gamma_o$ ; 测量指针在  $0^\circ$  左边时, 前角为  $-\gamma_o$ 。

(6) 后角  $\alpha_o$  的测量。后角  $\alpha_o$  的测量也是在主切削刃的正交平面内进行的, 因此, 在测量完前角  $\gamma_o$  后支承板不需要调整, 只需平移导块和车刀, 使测量指针的侧面  $C$  与通过主切削刃上选定点的后刀面紧密贴合, 此时测量指针在刻度盘 2 上所指示的刻度值即为后角  $\alpha_o$  的数值。测量指针在  $0^\circ$  左边时, 后角为  $+\alpha_o$ ; 测量指针在  $0^\circ$  右边时, 后角为  $-\alpha_o$ 。

(7) 法向前角  $\gamma_n$  和法向后角  $\alpha_n$  的测量。测量法向前角  $\gamma_n$  必须在测量主偏角  $\kappa_r$  和刃倾角  $\lambda_s$  之后进行。测量法向前角  $\gamma_n$  是在主切削刃的法平面内进行的, 所以必须使测量指针位于法平面内。首先逆时针转动支承板  $90^\circ - \kappa_r$ , 使测量指针位于主切削刃的正交平面内, 然后松开滚花手轮, 转动角铁使小指针在刻度盘 3 上指示刃倾角的角度值。此时测量指针位于主切削刃的法平面内, 然后再按如前所述测量前角  $\gamma_o$  和后角  $\alpha_o$  的方法, 便可测量出车刀法向前角  $\gamma_n$  和法向后角  $\alpha_n$  的数值。



(8) 副后角  $\alpha'_o$  的测量。副后角  $\alpha'_o$  的测量是在副切削刃的副正交平面内进行的, 所以首先使测量指针位于副切削刃的副正交平面内, 其做法是先将车刀测角仪位于测量副偏角  $\kappa'_r$  的位置, 顺时针转动支承板  $90^\circ$  使测量指针位于副切削刃的副正交平面位置, 然后用测量指针的侧面  $B$  和通过副切削刃上选定点的副后刀面紧密贴合, 测量指针在刻度盘 2 上所指示的刻度值即为副后角  $\alpha'_o$  的数值。

(9) 将测量结果  $\kappa_r$ 、 $\lambda_s$ 、 $\kappa'_r$ 、 $\gamma_o$ 、 $\alpha_o$ 、 $\gamma_n$ 、 $\alpha_n$ 、 $\alpha'_o$  记录下来。

(10) 绘制外圆车刀和切断刀的工作图。

### 5. 实训注意事项

(1) 实训前必须详细阅读实训说明书, 明确实训目的、要求及方法。

(2) 测量车刀角度时要注意安全, 同时要爱护刀具和车刀测角仪, 防止碰伤及损坏仪器。

(3) 车刀工作图按 1:1 绘制。

### 6. 车刀角度参考系

车刀角度参考系如图 2-17 所示。

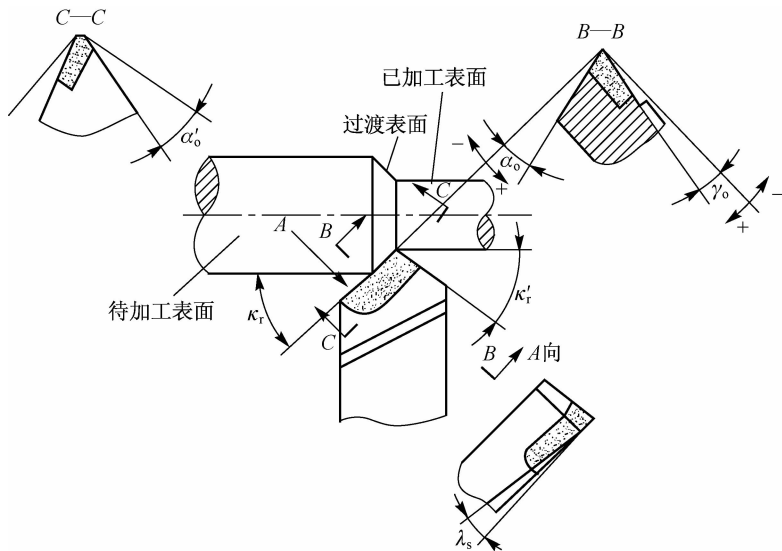


图 2-17 车刀角度参考系



### 思考与练习

2-1 什么是主运动?

2-2 何谓切削用量三要素?

2-3 在切削加工过程中, 工件上会形成三种表面, 试画图说明这三种表面。

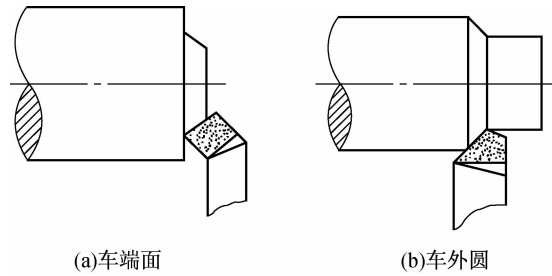
2-4 什么是刀具切削部分的构成要素?

2-5 什么是刀具的标注角度?

2-6 如图题 2-6 所示为车削工件的示意图, 试在图中进行以下标注:

(1) 主运动、进给运动和背吃刀量。

- (2) 待加工表面、已加工表面和过渡表面。
- (3) 基面、切削平面和正交平面。
- (4) 刀具前角、后角、主偏角、副偏角和刃倾角。



图题 2-6

- 2-7 试举例说明进给量对刀具工作角度的影响。
- 2-8 刀具安装高低对刀具工作角度有何影响？
- 2-9 切削层参数有哪些？它们的含义分别是什么？
- 2-10 切削方式有哪些？它们有何不同之处？

## 单元三

# 金属切削过程



### 单元导读

金属切削过程是指从工件表面切除多余金属形成已加工表面的过程。在切削过程中,工件受到刀具的推挤,通常会产生变形,形成切屑。伴随着切屑的形成,将产生切削力、切削热、刀具磨损、积屑瘤和加工硬化等现象,这些现象将影响到工件的加工质量和生产效率,因此,有必要对工件的变形过程加以研究,找到规律,以便提高工件的加工质量和生产效率。



### 相关知识

## 学习情境一 切屑的形成

### 一、金属切削过程的变形

切屑是金属切削过程中切削层金属经过刀具的作用而形成的,金属切削过程的一切物理变化和化学变化都是因为形成切屑而引起的。因此,了解金属切屑的形成过程,对理解切削规律及其本质是非常重要的。下面以塑性金属材料为例,来说明金属切削过程变形区的划分和切屑的形成过程。

#### 1. 金属切削过程变形区的划分

在金属切削过程中,切削层金属受刀具前刀面挤压要产生一系列变形,通常将其划分为三个变形区,如图 3-1 所示。

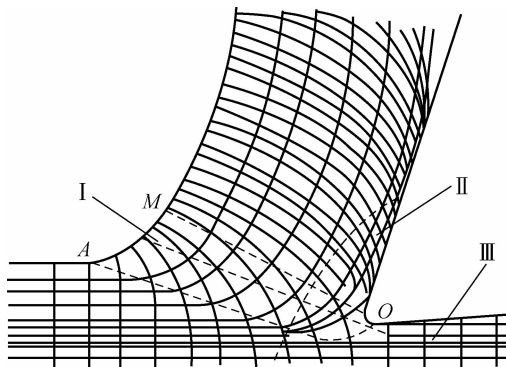


图 3-1 金属切削过程三个变形区的示意图

### 1) 第一变形区

图 3-1 中 I (AOM) 为第一变形区。在第一变形区内, 当刀具和工件开始接触时, 工件材料内部产生切应力和弹性变形, 随着刀具切削刃和刀具前刀面对工件材料的挤压作用增强, 工件材料内部的切应力和弹性变形逐渐增大。当切应力达到工件材料的屈服强度时, 工件材料将沿着与走刀方向呈  $45^\circ$  的剪切面滑移, 即产生塑性变形; 当切应力超过工件材料的屈服强度极限时, 切削层金属便与工件材料基体分离, 从而形成切屑沿刀具前刀面流出。由此可以看出, 第一变形区变形的特征是沿滑移面的剪切变形, 以及随之产生的加工硬化。

实验证明, 在一般切削速度下, 第一变形区的宽度仅为  $0.02 \sim 0.2 \text{ mm}$ , 切削速度越高, 宽度越小, 故它可看成一个平面, 即剪切面  $OM$ 。这种单一的剪切面切削模型虽不能完全反映塑性变形的本质, 但简单实用, 因而在切削理论研究和实践中应用较广。

### 2) 第二变形区

图 3-1 中 II 为第二变形区。切屑底层(与刀具前刀面接触层)在沿刀具前刀面流动过程中受到刀具前刀面的进一步挤压与摩擦, 使靠近刀具前刀面处的切削层金属纤维化, 即产生了第二次变形, 其变形方向基本上与刀具前刀面平行。

### 3) 第三变形区

图 3-1 中 III 为第三变形区。刀具后面与已加工表面间的挤压和摩擦, 产生以加工硬化和残余应力为特征的滑移变形, 使已加工表面产生变形, 造成纤维化和加工硬化, 构成了第三变形区。

完整的金属切削过程包括上述三个变形区, 它们汇集在刀具切削刃附近。该处的应力比较集中而且复杂, 切削层金属就在该处与工件材料分离, 一部分变成切屑, 另外很小一部分留在已加工表面上。这三个变形区互有影响, 密切相关。

## 2. 切屑的形成过程

切屑是被切材料受到刀具前刀面的推挤, 沿着某一斜面剪切滑移形成的。金属切削过程是切削层金属受到刀具前刀面的挤压后, 产生以剪切滑移为主的塑性变形而形成切屑的过程。如图 3-2 所示, 切屑形成是在第一变形区内完成的, 当切削层移近  $OA$  面时, 切削层金属在正压力  $F_N$  与摩擦力  $F_f$  的合力  $F_r$  作用下产生弹性变形, 进入  $OA$  面后则产生塑性变形, 亦即  $OA$  面上切应力  $\tau$  达到材料的屈服强度  $\tau_{0.2}$  而发生剪切滑移。

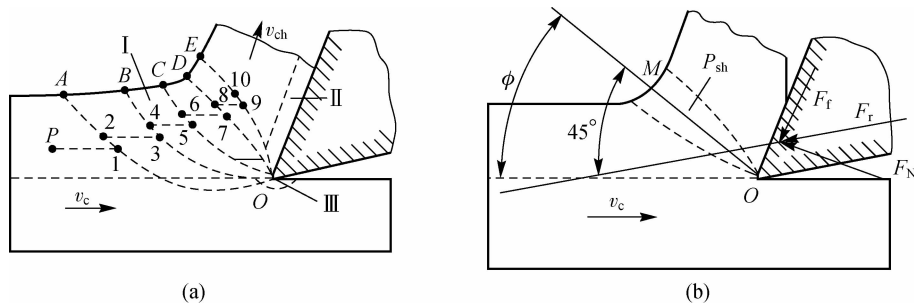


图 3-2 切屑形成过程及材料切削受力情况

图 3-2(a)中以质点  $P$  为例, 进入  $OA$  面后, 由点 1 剪切滑移至点 2, 由点 2 继续移至点 3, 再由点 3 继续滑移至点 4。随着质点  $P$  的移动, 剪切滑移量和切应力逐渐增大, 达到  $OE$  面时, 质点  $P$  滑移至点 10, 此时, 切应力最大, 剪切滑移结束, 切削层金属被刀具切离, 形成

了切屑。通常  $OA$  面称为始滑移面,  $OE$  面称为终滑移面, 两个滑移面间很窄, 故剪切滑移时间很短, 切屑形成过程极快。

图 3-2(b) 中第一变形区可用一个剪切平面  $P_{sh}(OM)$  表示。剪切平面  $P_{sh}(OM)$  与合力  $F_r$  间夹角为  $45^\circ$ , 剪切平面  $P_{sh}(OM)$  与切削速度  $v_c$  的方向夹角为剪切角  $\phi$ 。

## 二、切屑的形态

由于工件材料性质和切削条件不同, 切削层变形程度也不同, 因而产生的切屑形态也多种多样, 归纳起来主要包括带状切屑、节状切屑、粒状切屑和崩碎切屑四种类型, 如图 3-3 所示。

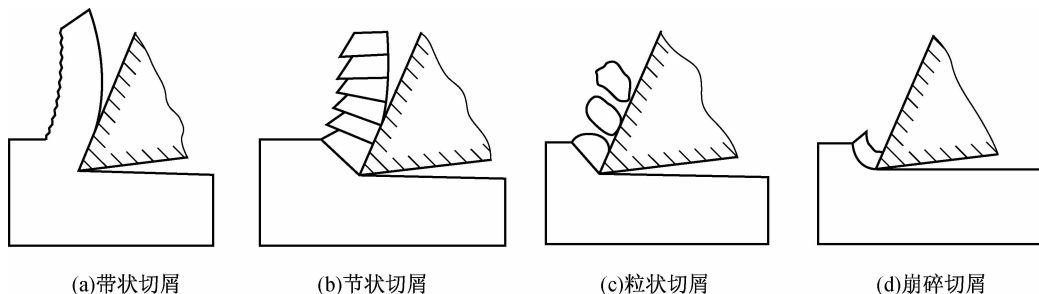


图 3-3 切屑形态

### 1. 带状切屑

图 3-3(a) 为带状切屑。切屑延续呈较长的带状, 这是一种最常见的切屑形态。一般情况下, 当加工的塑性材料(如软钢、铜、铝)切削厚度较小, 切削速度较高, 刀具前角较大时, 往往会产生带状切屑。此类切屑底层表面光滑, 上层表面毛茸。形成此类切屑时, 切削过程比较平稳, 切削力波动较小, 加工表面质量高, 但形成时要注意加以处理(如断屑、排屑), 以免对工作环境和工人安全造成危害。

### 2. 节状切屑

图 3-3(b) 为节状切屑, 又称为挤裂切屑。此类切屑底层表面仍较光滑, 有时有裂纹, 而上层表面呈明显锯齿状, 这是在形成切屑的过程中, 由于它的第一变形区较宽, 因而在剪切滑移过程中剪切滑移量较大, 由滑移变形所产生的加工硬化使剪应力增加, 在局部地方达到材料的断裂强度。

节状切屑大多在加工塑性较低的金属材料(如黄铜), 切削速度较低、切削厚度较大、刀具前角较小时产生。特别是当工艺系统刚性不足和加工碳素钢材料时, 更易得到此类切屑。形成此类切屑时, 切削过程不太稳定, 切削力波动也较大, 已加工表面质量较低。

### 3. 粒状切屑

图 3-3(c) 为粒状切屑, 又称为单元切屑。当切削塑性材料, 剪切面上剪应力超过工件材料的破裂强度时, 节状切屑便被切离成粒状切屑。当采用较小的前角, 切削速度较低, 进给量较大时, 易产生此类切屑。

以上三种切屑均是在切削塑性材料时产生的, 只要改变切削条件, 三种切屑形态是可以相互转化的。

#### 4. 崩碎切屑

图 3-3(d)为崩碎切屑。在加工铸铁等脆性材料时,由于脆性材料抗拉强度较低,刀具切入后,切削层金属只经受较小的塑性变形就被挤裂,或在拉应力状态下脆断,形成不规则的崩碎切屑。工件材料越脆,切削厚度越大,刀具前角越小,越容易产生此类切屑。

### 三、切屑变形程度的度量 and 计算

研究切屑的变形规律,首先需要了解下面两种度量切屑变形程度的方法。

#### 1. 切屑变形系数

金属切削过程类似于金属的挤压,这表现在切削前后的切削层尺寸的变化上,即切屑长度减小,厚度增大,如图 3-4 所示。根据这一事实来衡量切屑的变形程度,就得出切屑变形系数  $\xi$  的概念。

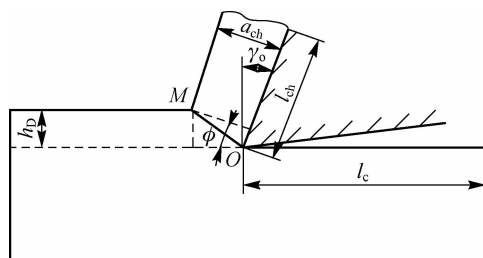


图 3-4 切屑变形系数

切屑厚度  $a_{ch}$  与切削层厚度  $h_D$  之比称为切屑厚度变形系数,用符号  $\xi_a$  表示;而切削层长度  $l_c$  与切屑长度  $l_{ch}$  之比称为切屑长度变形系数,用符号  $\xi_l$  表示,即

$$\xi_a = \frac{a_{ch}}{h_D} \quad (3-1)$$

$$\xi_l = \frac{l_c}{l_{ch}} \quad (3-2)$$

根据体积不变的原理,即

$$h_D b_D l_c = a_{ch} b_{ch} l_{ch}$$

在一般情况下,工件上切削层宽度  $b_D$  与切屑宽度  $b_{ch}$  的区别很小,可认为两者相等。故

$$\xi_a = \xi_l = \xi \quad (3-3)$$

切屑变形系数  $\xi$  是大于 1 的有理数,它能直观地反映切屑的变形程度,且容易测量。用切削的加工方法进行实验时,切削层长度  $l_c$  可以在工件上预先固定下来,如果工件不长,切削层长度  $l_c$  就可取工件长度。切屑长度  $l_{ch}$  可用细铜丝绕在切屑上直接测量出来。显而易见,切屑变形系数  $\xi$  越大,表示切屑越厚、越短,标志着切屑变形越大。

用切屑变形系数  $\xi$  来反映切屑变形程度的方法很简便,但也很粗略,有时不能反映切屑变形的真实情况。因为切屑变形系数  $\xi$  的物理意义是切削层的平均挤压程度,这是根据纯挤压观点得出的,而金属切削过程主要是剪切滑移变形,因此,切屑变形系数  $\xi$  只能在一定条件下反映切削层金属的变形程度。在要求较高时,采用相对滑移  $\epsilon$  作为衡量切屑变形程度的指标较为合理。

## 2. 相对滑移

如图 3-5 所示,当刀具向前移动时,切削层单元,即平行四边形  $OHNM$  产生剪切变形,变为  $OGPM$ ,那么它的相对滑移为

$$\epsilon = \frac{\Delta s}{\Delta y}$$

式中,  $\Delta s$  为滑移量(mm);  $\Delta y$  为滑移层的厚度(mm)。

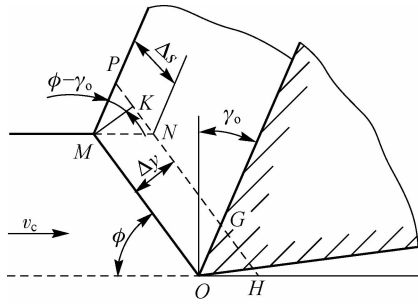


图 3-5 剪切面上的变形

在切削过程中,这个相对滑移可以近似地看成是发生在剪切平面  $NH$  上。当刀具向前移动时,剪切平面  $NH$  被推到  $PG$  的位置,所以,此时的相对滑移应为

$$\epsilon = \frac{\Delta s}{\Delta y} = \frac{NP}{MK} = \frac{NK + KP}{MK}$$

则

$$\epsilon = \cot \phi + \tan(\phi - \gamma_0) \quad (3-4)$$

或

$$\epsilon = \frac{\cos \gamma_0}{\sin \phi \cos(\phi - \gamma_0)} \quad (3-5)$$

由式(3-5)可知,当剪切角  $\phi$  与前角  $\gamma_0$  在通常范围内( $\phi = 5^\circ \sim 30^\circ$ ,  $\gamma_0 = -10^\circ \sim 30^\circ$ )时,剪切角  $\phi$  改变引起  $\sin \phi$  的变化比  $\cos(\phi - \gamma_0)$  的变化要大,因此,剪切角  $\phi$  越大,相对滑移  $\epsilon$  越小。

计算相对滑移  $\epsilon$  比较复杂,必须通过切屑变形系数  $\xi$  求出剪切角  $\phi$  的数值,因此,用相对滑移  $\epsilon$  表示切屑变形程度时,必须求出切屑变形系数  $\xi$ 。

由式(3-1)和图 3-4 可以推出  $\xi$  和  $\phi$  的关系为

$$\xi = \frac{a_{ch}}{h_D} = \frac{OM \sin(90^\circ - \phi + \gamma_0)}{OM \sin \phi} = \frac{\cos(\phi - \gamma_0)}{\sin \phi} \quad (3-6)$$

由式(3-6)可知,当剪切角  $\phi$  与前角  $\gamma_0$  在通常范围内时,剪切角  $\phi$  改变引起  $\sin \phi$  的变化比  $\cos(\phi - \gamma_0)$  的变化要大,因此,剪切角  $\phi$  越大,切屑变形系数  $\xi$  越小。经变换后,得

$$\tan \phi = \frac{\cos \gamma_0}{\xi - \sin \gamma_0} \quad (3-7)$$

将式(3-7)代入式(3-4)并化简得

$$\epsilon = \frac{\xi^2 - 2\xi \sin \gamma_0 + 1}{\xi \cos \gamma_0} \quad (3-8)$$

式(3-8)表示了  $\epsilon$  与  $\xi$  的函数关系。这个关系可用曲线表示,如图 3-6 所示。只有在  $\gamma_0 = 0^\circ \sim 30^\circ$ ,  $\xi \geq 1.5$  的范围内,  $\xi$  越大,  $\epsilon$  也越大,此时两者的比值较为接近,所以在这个范围内,  $\xi$

在一定程度上能反映相对滑移  $\epsilon$  的大小;当  $\gamma_0 < 0^\circ$  或很大,  $\xi < 1.5$  时,  $\epsilon$  与  $\xi$  的值相差很大,因而就不能用  $\xi$  来表示切屑的变形程度。

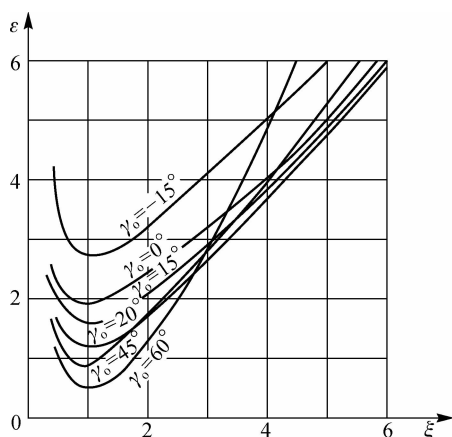


图 3-6  $\epsilon$  与  $\xi$  的函数关系

## 学习情境二 刀具前刀面的摩擦

### 一、刀具前刀面与切屑接触面间的摩擦

切屑从工件上分离流出时与刀具前刀面接触时产生摩擦,接触长度为  $l_f$ ,如图 3-7 所示。在近切削刃长度  $l_{f1}$  内,由于摩擦与挤压作用产生高温和高压,使刀具前刀面与切屑的接触面之间形成黏结,也称为冷焊,黏结区或冷焊区内的摩擦称为内摩擦,是刀具前刀面摩擦的主要区域。在黏结区或冷焊区外的长度  $l_{f2}$  内的摩擦称为外摩擦。

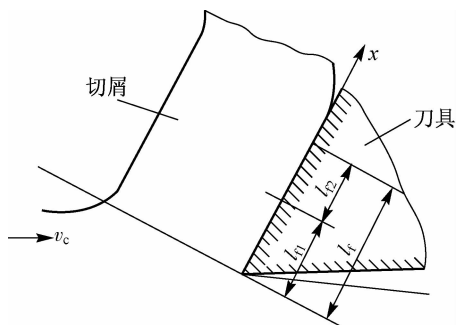


图 3-7 刀具前刀面与切屑接触面间的摩擦

内摩擦力使黏结材料较软的一方产生剪切滑移,使得切屑底层很薄的一层金属晶粒出现拉长的现象。由于摩擦对切削变形、刀具寿命和加工表面质量有很大影响,因而在生产中常采用减小切削力、缩短刀具前刀面与切屑接触长度、降低加工材料屈服强度、选用摩擦系数较小的刀具材料、提高刀面刃磨质量和浇注切削液等方法来减小摩擦。



## 二、积屑瘤

### 1. 积屑瘤现象

在切削塑性工件材料时,如果在刀具前刀面的摩擦系数较大、切削速度不高且又能形成带状切屑的情况下,常会在切削刃上黏附一个硬度很高的鼻形或楔形硬块,这种硬块称为积屑瘤。如图 3-8 所示,积屑瘤包围着刃口,将刀具前刀面与切屑隔开,其硬度是工件材料的 2~3 倍,可以代替切削刃进行切削。

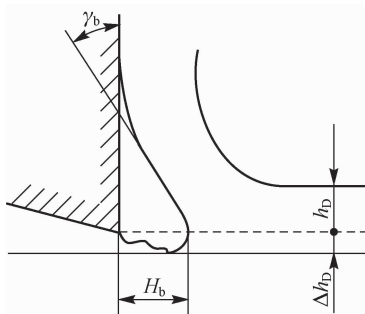


图 3-8 积屑瘤

### 2. 积屑瘤的形成

在切削过程中,由于刀具前刀面与切屑间的摩擦,使刀具前刀面和切屑底层一样都是刚形成的新鲜表面,它们之间的黏附能力较强。因此,在一定切削条件(压力和温度)下,与刀具前刀面接触的切屑底层金属流动较慢,而切屑上层金属流动较快。流动较慢的切屑底层称为滞流层。显然,滞流层金属产生的塑性变形比切屑上层金属产生的塑性变形大得多,其晶粒纤维化程度很高,纤维的方向几乎与刀具前刀面平行。如果温度与压力适当,滞流层金属的流速接近于零,与刀具前刀面黏结成一体,形成积屑瘤。随后,新的滞流层金属在此基础上逐层积聚、黏结,使积屑瘤的高度  $H_b$  逐步增大,直到该处的温度和压力不足以产生黏结为止。

### 3. 积屑瘤的作用

积屑瘤对切削过程有积极的影响,也有消极的影响。

#### 1) 保护刀具

图 3-8 中积屑瘤包围着切削刃,同时覆盖着一部分刀具前刀面。积屑瘤一旦形成,它便代替切削刃和刀具前刀面进行切削。于是,切削刃和刀具前刀面都得到积屑瘤的保护,从而减少了刀具磨损。

#### 2) 增大刀具前角

图 3-8 中积屑瘤黏附在刀具前刀面上,增大了刀具的实际前角,当积屑瘤最高时,刀具前角  $\gamma_b$  可达  $30^\circ$ ,从而减小了切屑变形,降低了切削力。

#### 3) 增大切削厚度

积屑瘤前端伸出于切削刃外,伸出量为  $\Delta h_D$ ,由于有积屑瘤时的切削层厚度比没有积屑瘤时的切削层厚度增大了  $\Delta h_D$ ,因而影响了工件的加工尺寸。

#### 4) 增大已加工表面粗糙度

积屑瘤之所以使已加工表面粗糙度增大,是因为它的产生、成长与脱落是一个带有一定周期性的动态过程(每秒钟几十至几百次),从而导致了切削层厚度不断变化,并有可能因此而引起振动。由于积屑瘤的顶部很不稳定,因而容易发生破裂,即一部分积屑瘤黏附于切屑底部而排出,一部分积屑瘤留在已加工表面上,形成鳞片状毛刺。由于积屑瘤黏附在切削刃上,因而使实际切削轨迹呈现不规则的曲线,导致切削刃在已加工表面上沿着主运动方向刻划出一些深浅和宽窄不同的纵向沟纹。

积屑瘤的产生与大小是周期性变化的。积屑瘤的周期性变化对工件的尺寸精度和表面

质量影响较大,因此,在精加工时应避免积屑瘤的产生。

#### 4. 影响积屑瘤的因素

由于积屑瘤对切削加工有利有弊,为了取利去弊,就必须掌握影响积屑瘤的主要因素,以便控制。

##### 1) 切削速度

切削速度对积屑瘤的影响是通过切削温度和摩擦系数来实现的。加工一般材料时,当  $v_c \approx 0.33 \text{ m/s}$  时,切削温度约为  $300^\circ\text{C}$ ,此时,摩擦系数最大,积屑瘤可达到最大高度。当低速切削,即  $v_c < 0.03 \text{ m/s}$  时,由于切削温度不高,切屑与刀具前刀面不产生黏结现象,也就不产生积屑瘤。当切削速度较高,即在  $0.33 \sim 1.33 \text{ m/s}$  时,随着切削速度的提高,切屑底层变软,使得摩擦系数减小,积屑瘤高度也随之减小。当高速切削,即  $v_c > 1.33 \text{ m/s}$  时,切削温度约为  $560^\circ\text{C}$ ,此时,滞流层随切屑流出,积屑瘤消失。

##### 2) 切削层厚度

当切削层厚度增大时,刀具前刀面与切屑接触面处的温度上升,因此,产生积屑瘤的临界切削速度会低些。切削层厚度越大,刀具前刀面与切屑的接触长度越大,积屑瘤的高度越高。

##### 3) 前角

若增大刀具前角,则切削力减小,刀具前刀面与切屑的接触面的温度下降,切屑变形减小,这时产生积屑瘤的临界切削速度较高。当前角达到  $40^\circ$  时,一般不易产生积屑瘤。

##### 4) 工件材料

工件材料塑性越大,刀具前刀面与切屑接触面间的摩擦系数和接触长度越大,越容易生成积屑瘤。

切削实验和生产实践表明,在中速情况下切削中碳素钢,当温度在  $300 \sim 380^\circ\text{C}$  时,积屑瘤的高度最大;当温度在  $500 \sim 600^\circ\text{C}$  时,积屑瘤消失。

## 学习情境三 已加工表面的形成与加工硬化

第三变形区,即刀具后刀面与已加工表面接触区,决定了已加工表面质量(如表面粗糙度、残余应力与加工硬化),对零件使用性能影响很大。

在分析第一变形区和第二变形区时,假定刀具的切削刃是绝对锋利的,但实际上切削刃不可避免会磨钝。此外,刀具开始切削后不久,其后刀面就会因磨损而形成一段后角为  $0^\circ$  的棱带。

### 一、已加工表面的形成

如图 3-9 所示为已加工表面的形成过程,当切削层金属逼近切削刃时,产生剪切变形及摩擦,最终沿刀具前刀面流出而形成切屑。但由于有刃口半径的作用,使整个切削层厚度  $h_D$  中,将有一薄层切削层金属  $\Delta a$  无法沿剪切面  $OM$  方向滑移,而是从切削刃钝圆部分  $O$  点下面挤压过去,即切削层金属在  $O$  点处分离。 $O$  点以上部分形成切屑沿刀具前刀面流出, $O$  点以下部分经过切削刃挤压留在已加工表面上。该部分切削层金属经过切削刃钝圆部分  $B$  点后,又受到

刀具后刀面上后角为  $0^\circ$  的一段棱带  $VB$  的挤压与摩擦,随后开始弹性恢复(假定弹性恢复的高度为  $\Delta h$ ),则已加工表面在  $CD$  段继续与刀具后刀面摩擦。切削刃钝圆  $OB$  部分、 $BC$  部分、 $CD$  部分构成刀具后刀面上的接触长度,这种接触状况对已加工表面质量有很大影响。

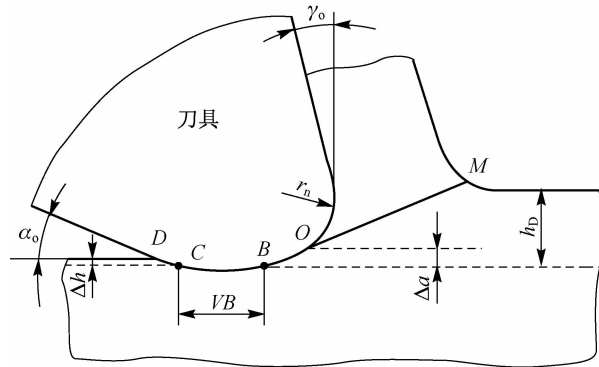
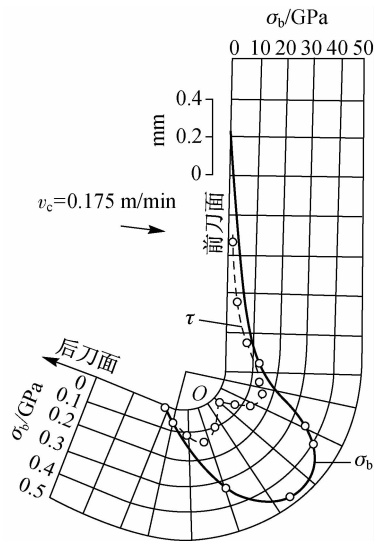


图 3-9 已加工表面的形成过程

已加工表面的形成及金属材料的变形过程可通过对切削刃区域附近的工件材料进行应力分析得以验证。如图 3-10 所示为刃前区的应力分布。由图可知,  $O$  点以上部分,即刀具前刀面部分,在垂直刃口方向上有正应力  $\tau$ ,刃口切线方向上受张力  $\sigma_b$ ;而在  $O$  点以下部分,靠近  $O$  点处受正应力  $\tau$ ,远离  $O$  点处受张力  $\sigma_b$ 。



刀具:光弹材料,  $\gamma_0 = 10^\circ$ ,  $a_p = 10 \text{ mm}$ ,  $r_n = 0.2 \text{ mm}$

工件材料:铅,  $h_D = 0.235 \text{ mm}$ ,自由切削

图 3-10 刃前区的应力分布

## 二、已加工表面的加工硬化

切削加工后,已加工表面将产生加工硬化。材料变形程度越大,已加工表面的加工硬化程度越高,硬化层的深度也越大。加工硬化将给后续工序加工增加困难,更重要的是影响零

件已加工表面质量。它在提高工件表面耐磨性的同时也增大了表面层的脆性,从而降低了零件表面的抗冲击能力。

产生加工硬化的原因是在已加工表面的形成过程中表面层经受了复杂的塑性变形,金属晶格被拉长、扭曲与破碎,阻碍了进一步塑性变形而使金属强化。此外,切削温度有可能引起的相变也可导致加工硬化。已加工表面的加工硬化就是这种强化、相变的综合结果。

加工硬化通常用硬化层深度  $h_d$  及硬化程度  $N$  表示。 $h_d$  为已加工表面至未硬化处的垂直距离,其单位为  $\mu\text{m}$ 。 $N$  为已加工表面的显微硬度增加值与原基体金属的显微硬度比值的百分数,其计算公式为

$$N = \frac{H - H_0}{H_0} \times 100\% \quad (3-9)$$

式中, $H$  为已加工表面的显微硬度( $\text{N}/\text{mm}^2$ ); $H_0$  为原基体金属的显微硬度( $\text{N}/\text{mm}^2$ )。

一般硬化层深度  $h_d$  可达几十到几百微米,硬化程度  $N$  可达  $120\% \sim 200\%$ 。

工件材料的塑性越大,强化系数越大,已加工表面的加工硬化越严重。切削速度对已加工表面的加工硬化的影响是双重的,当切削速度增大时,硬化层深度减小,但硬化程度不一定减小。当进给量增大时,硬化程度及硬化层深度均有所增大。

## 学习情境四 影响切屑变形的主要因素

影响切屑变形的因素固然很多,但归纳起来有三个方面,即工件材料、刀具几何参数及切削用量。

### 1. 工件材料的影响

工件材料的强(硬)度越高,刀具前刀面上的法向应力越大,摩擦系数  $\mu$  越小,剪切角  $\phi$  越大,切屑变形越小。如图 3-11 所示为工件材料强(硬)度与切屑变形系数的关系曲线。

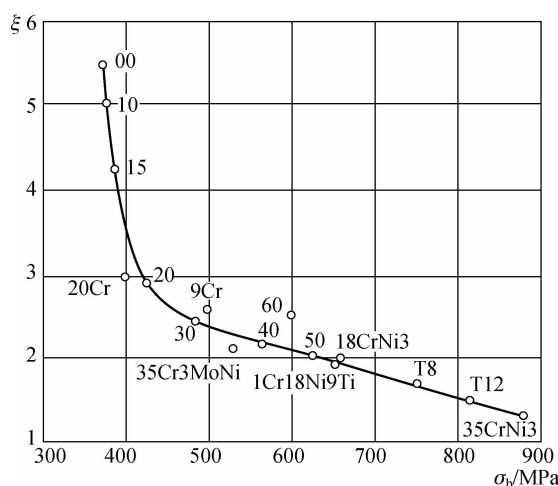


图 3-11 工件材料强(硬)度与切屑变形系数的关系曲线

## 2. 刀具几何参数的影响

刀具几何参数中影响切屑变形最大的是刀具前角  $\gamma_0$ 。刀具前角  $\gamma_0$  越大, 剪切角  $\phi$  就越大, 切屑变形越小。这是刀具前角  $\gamma_0$  对切屑变形的直接影响。

此外, 刀具前角  $\gamma_0$  还通过摩擦角  $\beta$  间接影响切屑变形, 即刀具前角  $\gamma_0$  越大, 作用在刀具前刀面上的法向应力越小, 摩擦角  $\beta$  越大, 剪切角  $\phi$  就越小, 切屑变形越大。但刀具前角  $\gamma_0$  的直接影响远大于间接影响, 故刀具前角  $\gamma_0$  增大, 切屑变形还是减小。

## 3. 切削用量的影响

### 1) 切削速度的影响

在无积屑瘤的切削速度范围内, 切削速度  $v_c$  越高, 切屑变形系数  $\xi$  越小, 如图 3-12 所示为切削速度与切屑变形系数的关系曲线。

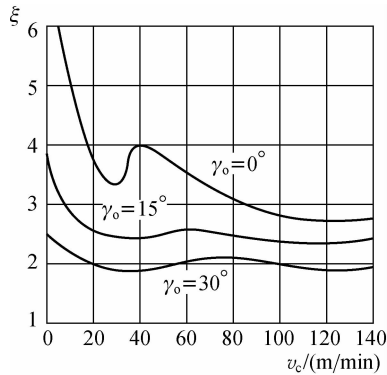


图 3-12 切削速度与切屑变形系数的关系曲线

切削速度影响切屑变形的原因有以下两点：

(1) 切削塑性材料, 当切屑变形速度低于切削速度时, 切屑塑性变形区变窄, 金属在始滑移面上还没来得及变形就流动到  $OA'$  线上, 使得剪切角  $\phi$  增大, 切屑变形系数  $\xi$  减小, 如图 3-13 所示。

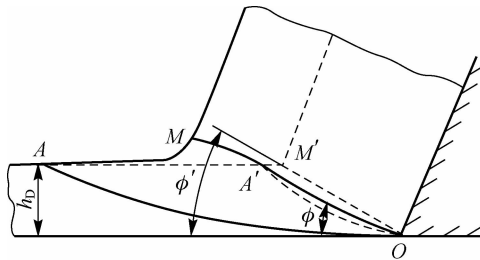
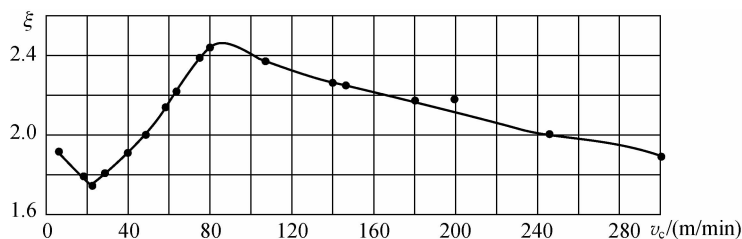


图 3-13 切削速度对剪切角的影响

(2) 随着切削速度  $v_c$  的提高, 切削温度升高, 切屑底层金属的剪切屈服强度  $\tau_s$  减小, 摩擦系数  $\mu$  减小, 摩擦角  $\beta$  减小, 剪切角  $\phi$  增大, 切屑变形系数  $\xi$  减小。

在能形成积屑瘤的切削速度范围内, 切削速度  $v_c$  是通过积屑瘤形成的积屑瘤前角  $\gamma_b$  (即

实际工作前角)来影响切屑变形系数  $\xi$  的,如图 3-14 所示。在积屑瘤生长区( $v_c < 22$  m/min),随着切削速度  $v_c$  提高积屑瘤逐渐长大,使得积屑瘤前角  $\gamma_b$  增大,当积屑瘤前角  $\gamma_b$  达到最大值时,使剪切角  $\phi$  达到最大值,切屑变形系数  $\xi$  达到最小值;在积屑瘤消退区( $22$  m/min  $\leq v_c \leq 84$  m/min),若切削速度  $v_c$  再提高,则积屑瘤逐渐脱落,积屑瘤前角  $\gamma_b$  逐渐减小,直至积屑瘤完全消失。当  $\gamma_b = \gamma_0$  时,切屑变形系数  $\xi$  达到最大值;在积屑瘤无瘤区( $v_c > 84$  m/min)时,切削速度  $v_c$  提高,剪切屈服强度  $\tau_s$  减小,摩擦系数  $\mu$  减小,剪切角  $\phi$  增大,切屑变形系数  $\xi$  减小。



工件材料:40 钢

图 3-14 切削速度与切屑变形系数的关系曲线

## 2) 进给量的影响

在无积屑瘤情况下,进给量  $f$  是通过切削层厚度  $h_D$  来影响切屑变形的,而切削层厚度  $h_D$  又完全是通过摩擦系数  $\mu$  来影响切屑变形的。进给量  $f$  越大,就意味着切削层厚度  $h_D$  增大,刀具前刀面上的法向应力增大,摩擦系数  $\mu$  减小,摩擦角  $\beta$  减小,剪切角  $\phi$  增大,切屑变形系数  $\xi$  减小。

## 3) 背吃刀量的影响

背吃刀量  $a_p$  对切屑变形系数  $\xi$  基本无影响。



# 切屑变形的测量

## 1. 实训要求

- (1) 了解切屑形成过程。
- (2) 掌握切屑长度的测量方法。
- (3) 掌握切屑变形的计算方法。
- (4) 分析不同刨削条件下切屑的变形情况。

## 2. 实训设备

45 钢、细铜丝、游标卡尺、平面刨刀、牛头刨床。



### 3. 实训步骤

- (1) 刨削工件的六个表面,得到规则的工件形状及理想的表面质量,并选择工件较长的尺寸方向,用游标卡尺测量得到其长度  $l_c$ 。
- (2) 在牛头刨床上装夹并找正工件,使其较长的尺寸方向平行于刨削方向。
- (3) 牛头刨床的刨削速度  $v_c = 35 \text{ m/min}$ ,切削层厚度  $h_D = 1.5 \text{ mm}$ ,采用这些参数刨削工件的上表面。
- (4) 往返刨削几次后,停止刨削运动,并拆卸工件。
- (5) 在切屑中挑选比较连续完整的切屑,将切屑放平,并用细铜丝获得其长度,用游标卡尺测量其长度为  $l_{ch}$ 。
- (6) 由式(3-2),计算切屑长度变形系数  $\xi_1$ 。
- (7) 改变工件的刨削速度及切削层厚度,重复以上操作,获得几组不同切屑变形数据,填写表 3-1。

表 3-1 切屑变形测量实验数据表

测量次数	刨削速度 $v_c/\text{mm}$	切削层厚度 $h_D/\text{mm}$	切削层长度 $l_c/\text{mm}$	切屑长度 $l_{ch}/\text{mm}$	切屑长度变形系数 $\xi_1$

- (8) 比较不同刨削条件下切屑的变形情况。

### 4. 注意事项

- (1) 45 钢工件在刨削获得切屑前需要得到较为理想的表面质量,以保证刨削的平稳。
- (2) 刨削加工时,刨削方向应与初测尺寸方向一致。
- (3) 选取适当的刨削速度,以保证切屑的连续性。
- (4) 测量切屑时,应尽量挑选连续、变形均匀的切屑。
- (5) 用细铜丝测量切屑时,应注意尽可能将细铜丝拉直,将切屑放平以获得精确的尺寸。



### 思考与练习

- 3-1 金属切削过程的实质是什么?
- 3-2 画图表示切削塑性工件材料时,金属变形区是如何划分的? 各变形区中的变形情况如何?
- 3-3 切屑形态有几种主要类型?
- 3-4 什么是切屑变形系数和相对滑移? 为什么说度量切屑变形时用相对滑移比用切

屑变形系数更为精确？而通常为什么多用切屑变形系数来度量切屑的变形程度？

- 3-5 在生产中常采用什么方法来减小刀具前刀面的摩擦？
- 3-6 什么是积屑瘤？它是怎样形成的？
- 3-7 积屑瘤对切削过程有什么影响？
- 3-8 已加工表面是怎样形成的？
- 3-9 简述刀具前角对切屑变形的影响规律。
- 3-10 简述切削速度影响切屑变形的原因。