

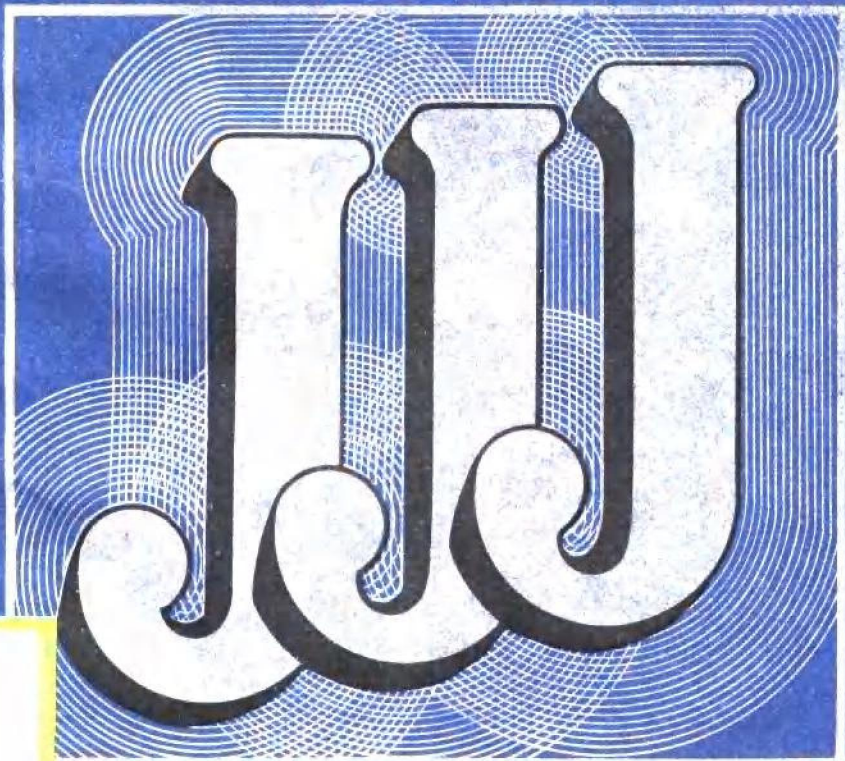
国家机械工业委员会统编

# 高级镗铣工工艺学

(镗工适用)

机械工人技术理论培训教材

JIXIE GONGREN JISHULILUN PEIXUN JIAOCAI



机械工业出版社

全书共分七章，书中对镗削机理作了较详细的分析，对先进刀具、复杂零件的镗削加工及镗削加工的精度作了全面的叙述、介绍，对镗削加工中的振动及提高劳动生产率的途径作了一定的分析和探讨，对镗床的调整和精度检验也作了介绍，同时还介绍了先进镗床和国外镗削技术的发展方向。

本书由上海第三机床厂周昌锐、俞谓权、上海公路机修厂姚玉琛等编写，由上海劳动局高琛、赵庆港等审稿。

## 高级镗铣工工艺学

(镗工适用)

国家机械工业委员会统编

责任编辑：陈 萱      责任校对：杨淑惠  
封面设计：林胜利 方芬      版式设计：霍永明  
责任印制：张俊民

机械工业出版社出版(北京惠爱门外百万庄南里一号)

(北京市书刊出版业营业许可出字第117号)

中国农业机械出版社印刷厂印刷

机械工业出版社发行·新华书店经销

开本  $787 \times 1092^{1/32}$  · 印张  $6^{5/8}$  · 字数 143 千字  
1988年10月北京第一版 · 1988年10月北京第一次印刷  
印数 00,001-17,900 · 定价：2.55元

ISBN 7-111-01124-4/TG·275

## 前 言

1981年,原第一机械工业部为贯彻、落实《中共中央、国务院关于加强职工教育工作的决定》,确定对机械工业系统的技术工人按照初、中、高三个阶段进行技术培训。为此,组织制定了30个通用技术工种的《工人初、中级技术理论教学计划,教学大纲(试行)》,编写了相应的教材,有力地推动了“六五”期间机械行业的工人培训工作,初步改变了十年动乱造成的工人队伍文化技术水平低下的状况,取得了比较显著的成绩。

鉴于原机械工业部1985年对《工人技术等级标准(通用部分)》进行了全面修订,原教学计划、教学大纲已不适应新《标准》的要求,而且缺少高级部分;编写的教材,由于时间仓促、经验不足,在内容上存在着偏深、偏多、偏难等脱离实际的问题。为此,原机械工业部根据新《标准》,重新制定了33个通用技术工种的《机械工人技术理论培训计划、培训大纲》(初、中、高级),于1987年3月由国家机械工业委员会颁发,并根据培训计划、大纲的要求,编写了配套教材149种。

这套新教材的编写,体现了《国家教育委员会关于改革和发展成人教育的决定》中对“技术工人要按岗位要求开展技术等级培训”的有关精神,坚持了文化课为技术基础课服务,技术基础课为专业课服务,专业课为提高操作技能和分析解决生产实际问题的能力服务的原则。在内容上,力求以

---

基本概念和原理为主，突出针对性和实用性，着重讲授基本知识，注重能力的培养，并从当前机械行业工人队伍素质的实际情况出发，努力做到理论联系实际，通俗易懂，具有工人培训教材的特色，同时注意了初、中、高三级之间合理的衔接，便于在职技术工人学习运用。

这套教材是国家机械工业委员会委托上海、江苏、四川、沈阳等地机械工业管理部门和上海材料研究所、湘潭电机厂、长春第一汽车制造厂、济南第二机床厂等单位，组织了200多个企业、院校和科研单位的近千名从事职工教育的同志、工程技术人员、教师、科技工作者及富有生产经验的老工人，在调查研究和认真汲取“六五”期间工人教材建设工作经验教训的基础上编写的。在新教材行将出版之际，谨向为此付出艰辛劳动的全体编、审人员，各地的组织领导者，以及积极支持教材编审出版并予以通力合作的各有关单位和机械工业出版社致以深切的谢意！

编好、出好这套教材不容易；教好、学好这些课程更需要广大职教工作者和技术工人的奋发努力。新教材仍难免存在某些缺点和错误，我们恳切地希望同志们在教和学的过程中发现问题，及时提出批评和指正，以便再版时修订，使其更完善，更好地发挥为振兴机械工业服务的作用。

国家机械工业委员会  
技工培训教材编审组

1987年11月

# 目 录

|                  |     |
|------------------|-----|
| 前言               |     |
| 绪论               | 1   |
| 第一章 镗削与先进刀具      | 3   |
| 第一节 镗削和先进镗削技术    | 3   |
| 第二节 先进镗削刀具和镗削工具  | 18  |
| 复习题              | 30  |
| 第二章 精密量具         | 31  |
| 第一节 精密量具         | 31  |
| 第二节 精密量具的维护保养知识  | 52  |
| 复习题              | 55  |
| 第三章 复杂零件的镗削加工    | 57  |
| 第一节 大型重型零件的镗削加工  | 58  |
| 第二节 复杂箱体的镗削加工    | 71  |
| 第三节 难加工材料的镗削加工   | 87  |
| 第四节 镗床的特殊加工      | 90  |
| 复习题              | 99  |
| 第四章 镗削质量分析       | 101 |
| 第一节 镗削精度的基本概念    | 101 |
| 第二节 镗削加工精度分析     | 101 |
| 第三节 提高镗削质量的途径和方法 | 113 |
| 复习题              | 115 |
| 第五章 镗削加工中的振动     | 116 |
| 第一节 镗削振动的类型和产生原因 | 116 |
| 第二节 振动对镗削加工的影响   | 120 |

|                        |     |
|------------------------|-----|
| 第三节 防止和消除振动的措施 .....   | 121 |
| 复习题 .....              | 130 |
| 第六章 提高劳动生产率的途径 .....   | 132 |
| 第一节 工时定额的基本概念 .....    | 132 |
| 第二节 提高劳动生产率的途径 .....   | 137 |
| 复习题 .....              | 148 |
| 第七章 先进镗床和镗床精度检验 .....  | 149 |
| 第一节 先进镗床 .....         | 149 |
| 第二节 镗床精度的检验 .....      | 180 |
| 第三节 镗床故障分析和镗床的调整 ..... | 188 |
| 复习题 .....              | 202 |

## 绪 论

在机械制造业中,由于镗床的多功能及万能性,镗削加工已成为机器制造业中不可缺少的切削加工,特别是近几年来由于高速精密镗削及高效自动化镗削机床的出现,使镗削技术推向更新的阶段。

自从18世纪70年代英国研制了世界上第一台卧式镗床起,到19世纪末出现了大型镗床,到1905年瑞士研制了世界上第一台坐标镗床,到1952年美国研制了世界上第一台数字程序控制机床为止,世界的镗床工业得到了飞速的发展。

我国的镗床工业开始于1954年,至70年代中期,主要生产仿苏产品,而我国的数控卧式镗床和卧式加工中心的发展开始于1973年,到1975年形成高潮。从1981年以来,由于引进国外数控系统,国内数控镗床和卧式加工中心有了新的发展,出现了第二次发展高潮,从此,我国数控卧式镗床和卧式加工中心有了新的发展,并取得了可喜的成绩。无论是生产厂家还是产品品种都得到了迅速的发展。还出现了先进的镗铣床等。

作为高级镗工,必须适应镗床工业这一迅速发展的需要,全面掌握复杂、高难度镗削加工和先进的镗削技术。使自己既具有高级的加工技术水平,又具有一定的理论分析能力,并能对大重型和复杂零件进行工艺分析,对镗削振动和劳动生产率提出卓有成效的意见。

高级镗工工艺学正是为适应这一需要而编写的，目的在于通过学习，使学员掌握更多的理性知识，开拓视野，不断创造出新的镗削工艺和先进镗削刀具，使镗削技术推向更高的阶段，使镗削工艺更加完善，为我国的镗削技术发展作出新的贡献。

# 第一章 镗削与先进刀具

## 第一节 镗削和先进镗削技术

### 一、镗削

镗削就是将工件预制孔扩大至具有一定孔径、孔形精度和表面粗糙度的切削加工。

镗削加工过程从金属切削机理来分析，实际上就是金属在切削时的变形过程。

我们知道，金属材料在切削时，在切削刃作用部位有三个变形区，见图1-1。

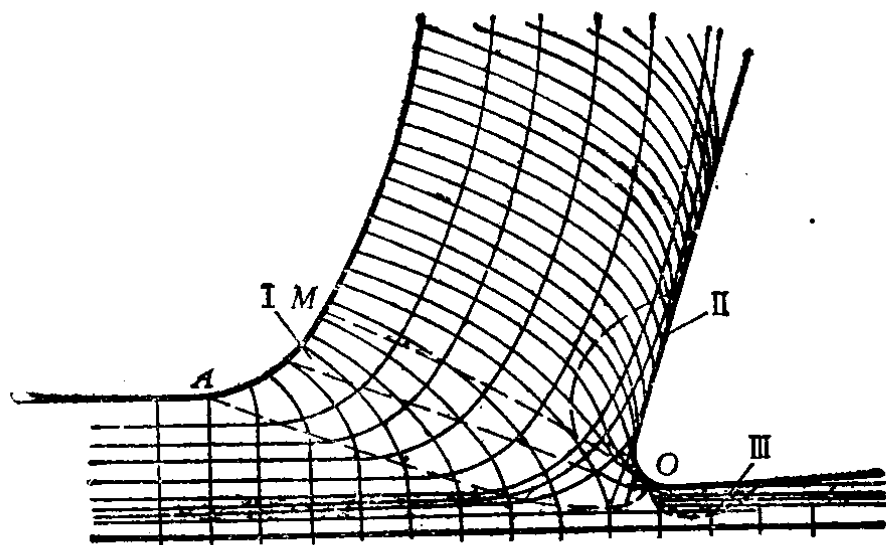


图1-1 金属切削时的三个变形区

第一变形区，以OA线开始发生塑性变形，到OM线晶粒的剪切滑移基本完成，这一区域（I）称为第一变形区。

第二变形区，在切屑从前刀面排出时，进一步受到前刀面的挤压和摩擦，使靠近前刀面处的金属纤维化，其方向基

第三变形区，已加工表面受到切削刃钝圆部分和后刀面的挤压、摩擦和回弹，造成金属的纤维化和加工硬化，这一区域（Ⅲ）称为第三变形区。

图1-2 第一变形区内金属的滑移

我们可以通过模拟示意图来进一步阐述金属切削时的变形过程，见图1-3。

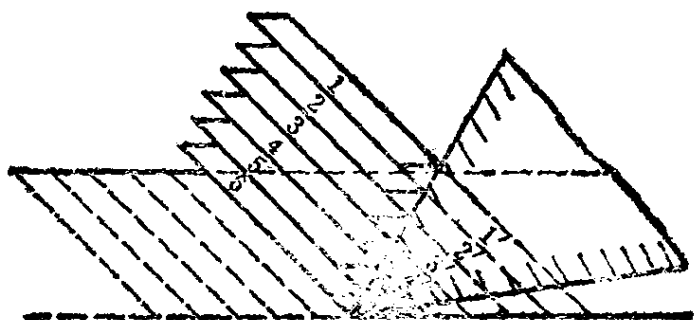


图1-3 金属切削时变形过程示意图

金属的切削层好像一叠卡片， $1'$ ， $2'$ ， $3'$ ， $4'$ ……等，当刀具切入时，这叠卡片被撂到 $1$ ， $2$ ， $3$ ， $4$ ……的位置上。卡片之间发生了滑移，这滑移的方向就是剪切面。在卡片和前刀面接触的这一端是平整的，卡片的外侧呈锯齿形或呈不明显的毛茸状。

第一变形区主要是剪切变形，但这还不是切屑形成的全过程，切屑要沿前刀面方向排出，还须克服刀具前刀面对切屑挤压所产生的摩擦力。切屑在受到前刀面挤压、摩擦过程中进一步发生变形，这就是第二变形区的变形特点，这个变形主要集中在和前刀面摩擦的切屑底面一薄层金属里。在上图1-3里，我们只考虑剪切面的滑移，把各单元比作象平行四边形的薄片，实质上，由于第二变形区的挤压和摩擦存在，这些单元的底面往往受挤压而被伸长，见图1-4。它的形状不再是象 $aAMm$ 那样的平行四边形，而是象 $bAMm$ 那样的梯形了。许多梯形叠起来，就形成了卷曲的切屑。

第三变形区主要与加工表面的形成有着密切关系。被切削的金属有很小的一部分进入第三变形区后，仍将进一步纤

维化。在这个变形区里，后刀面施加的法向力使工件产生径向的塑性变形和弹性变形，而后刀面所产生的摩擦力使加工表面产生切向的塑性变形和弹性变形。这里不作赘述。

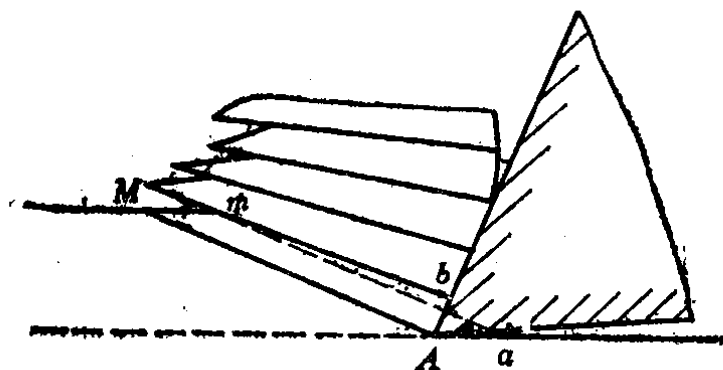


图1-4 切削卷曲的形成

总之，金属切削过程，就其本质来说，是指被切削金属层在刀具切削刃和前刀面的作用下，经受挤压而产生剪切滑移变形的过程。

从镗削加工的运动来分析，还具有下述特点：

1) 从镗削的运动来看，其表面运动轨迹的形成，由装在镗床主轴上的镗刀作回转运动来实现，它与钻削成形很相似。

2) 镗孔与车外圆相比，其切削条件较差，需要用长径比较大的刀具，刀杆悬伸距离大，切削工作的稳定性较差，且容易产生振动，故选用的切削用量比车床车削外圆时要小。

3) 镗削时，由于镗刀装在刀杆上伸入内孔进行切削，因此镗刀是处在半封闭状态下工作，故排屑困难，特别在加工塑性材料时，切屑易阻塞或缠绕刀头，以致影响已加工面的表面粗糙度，严重时可能使刀刃挤崩。因此对镗削中镗刀的几何参数及控制切屑流向等问题必须予以高度重视，并不断加以改进，以保证镗削质量。

4) 用浮动镗刀精镗，其镗削机理除了切削作用外，还有刮削和挤压作用，类似无刃铰刀的铰削，使浮动镗削能获得表面粗糙度很细的镗削表面，可达 $Ra0.8\mu m$ 。

5) 镗削过程中，不象其它切削加工那样直观，能直接观察、判定，必须依靠镗工自己的分析和判断来及时修正切削参数，故镗削的技术难度较高。

## 二、先进镗削技术

### 1. 高速精密镗削

高速精密镗削主要是在金刚镗床上加工工件的精密孔，最早只用于加工有色金属，近年来也广泛的用于加工铸铁和钢制零件，如汽缸孔等，镗孔直径范围可达 $8\sim 250mm$ 。

(1) 高速精密镗削的特点：

1) 镗削速度高，一般为 $100\sim 250\text{ m/min}$ ，主轴最高转速可达 $5000\text{ r/min}$ ，且镗削截面积小，故可获得高的加工精度和精细的表面粗糙度。加工有色金属时，其镗削速度可更高。

2) 高速精密镗削一般均采用硬质合金单刃镗刀，这种镗刀采用较大的主偏角，一般为 $45^\circ\sim 90^\circ$ 。采用较小的刀尖圆弧半径（ $r$ 为 $0.1\sim 1mm$ ，甚至更小），这样就减小了径向切削力，而且还减小了刀杆的变形，从而降低了振动，能获得很细的表面粗糙度，大大提高孔的表面质量。

3) 高速精密镗削所选用的进给量 $f$ 和切削深度 $a_p$ 都很小。通常 $f=0.02\sim 0.08mm/r$ ， $a_p=0.05\sim 0.1mm$ ，初镗时一般为 $a_p=0.3\sim 0.5mm$ 。

4) 高速精密镗削精度高。由于切削面积很小，加工表面硬化层深度就很小，而且在切削过程中所产生的切削力很小，机床刀具工艺系统不致产生明显的弹性变形，故能获得

高的尺寸精度和形状精度，镗削的精度一般能达到 IT6，用硬质合金刀加工黑色金属时，几何形状误差不大于  $0.004 \sim 0.005 \text{ mm}$ ；用金刚石镗刀加工有色金属及其合金时，其几何形状误差不大于  $0.002 \sim 0.003 \text{ mm}$ 。表面粗糙度在加工铸铁时，可达到  $Ra 1.6 \sim 0.8 \mu\text{m}$ ；加工钢时可达到  $Ra 1.6 \sim 0.4 \mu\text{m}$ ；加工有色金属时可达到  $Ra 0.4 \sim 0.1 \mu\text{m}$ ；最好时，其表面粗糙度可达到  $Ra 0.05 \mu\text{m}$ 。

5) 高速精密镗削时，一般不使用冷却润滑液。

## (2) 精密镗刀的刀具材料及几何参数的选择

在精密镗削中，广泛采用圆刀体的刀头，见图1-5。刀头切削部分材料一般采用硬质合金、金刚石、陶瓷、立方氮化硼以及热压氮化硅等。

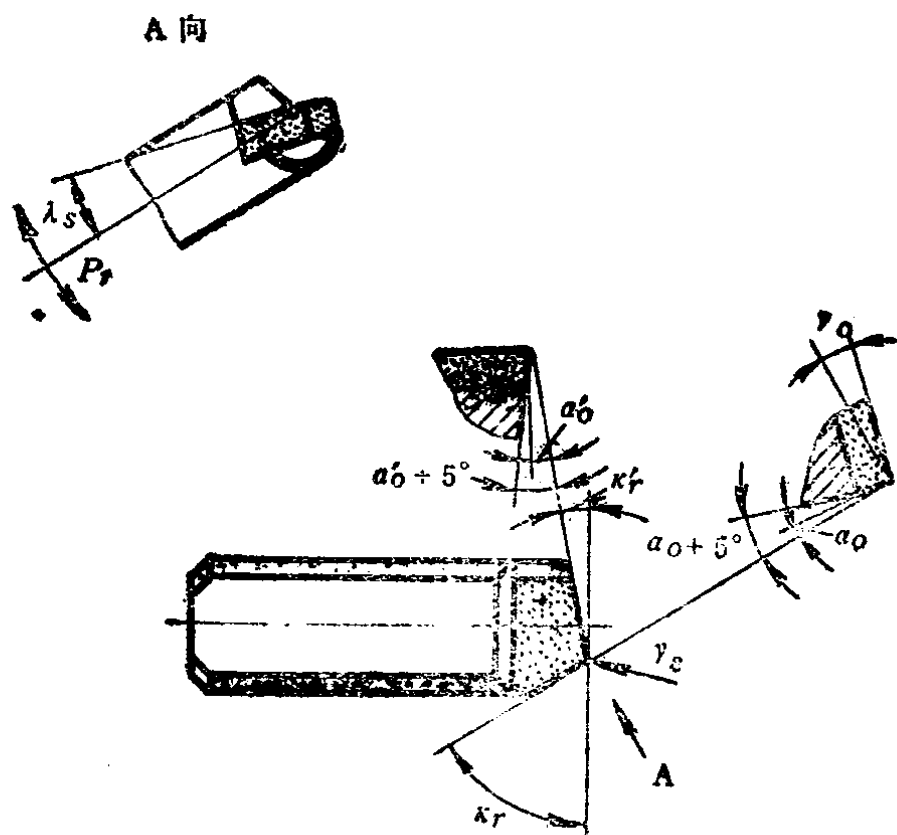


图1-5 精密镗削镗刀头的形状及几何参数

精密镗刀头切削部分的几何参数对加工精度和表面质量影响很大，一般应按加工材料及具体加工条件进行合理的选择。

加工钢时，精密镗刀切削部分几何参数的选择，按加工条件可分为下列四种情况：

1) 镗杆刚性和排屑情况较好时的镗刀（即刀头处镗杆的柔度小于 $0.05\sim 0.06\ \mu\text{m}/\text{N}$ 或 $0.5\sim 0.6\ \mu\text{m}/\text{kgf}$ ；镗杆和孔壁间有足够大的间隙，工件孔长径比 $l/d < 1$ 的通孔），取主偏角 $k_r = 45^\circ \sim 60^\circ$ ，以增加刀尖强度和耐用度；取前角 $\gamma_0 = -5^\circ \sim -10^\circ$ ，以得到较高的耐用度和加工质量，取刃倾角 $\lambda_s = 0^\circ$ ，但在断续切削的条件下取 $\lambda_s = -5^\circ \sim -15^\circ$ ；取刀尖圆弧半径 $r_s = 0.1 \sim 0.3\text{mm}$ ，对于某些钢料（例如20Cr）， $r_s$ 可以增大到1mm，这样能加大进给量，提高刀具耐用度和加工表面质量。

2) 镗杆刚性差而排屑情况尚好时的镗刀（镗杆的柔度大于 $0.06\ \mu\text{m}/\text{N}$ 或 $0.6\ \mu\text{m}/\text{kgf}$ ，其他加工条件与第一种情况相同），一般取 $k_r = 75^\circ \sim 90^\circ$ ， $r_s = 0.05 \sim 0.1\text{mm}$ ，前角 $\gamma_0 \geq 0^\circ$ ，以减小引起镗杆振动的径向分力。

3) 排屑条件较差时的镗刀（镗杆与孔壁的间隙小，长径比 $l/d > 1$ ），采用 $\gamma_0 = -5^\circ \sim -10^\circ$ ， $r_s \leq 0.3\text{mm}$ ，并沿主、副切削刃作宽度 $b_{r1} = b'_{r1} = 0.3 \sim 0.8\text{mm}$ 与前刀面成 $10^\circ \sim 15^\circ$ 的倒棱，在 $k_r = 75^\circ \sim 90^\circ$ 的条件下能可靠地卷屑，见图1-6。

4) 加工盲孔用的镗刀，采用 $k_r = 90^\circ$ 。为使切削区的切屑从镗杆和孔壁的间隙中排出，可取 $\gamma_0 = 3^\circ \sim 6^\circ$ 。为提高镗刀耐用度，可将刀尖圆弧半径加大至 $r_s = 0.5\text{mm}$ 。

至于其余参数的选择，在四种情况下基本相同，即副偏

角 $k'_r = 10^\circ \sim 20^\circ$ ，主后角 $\alpha_0 = 6^\circ \sim 12^\circ$ ，副后角 $\alpha'_0 = 10^\circ \sim 15^\circ$ 。

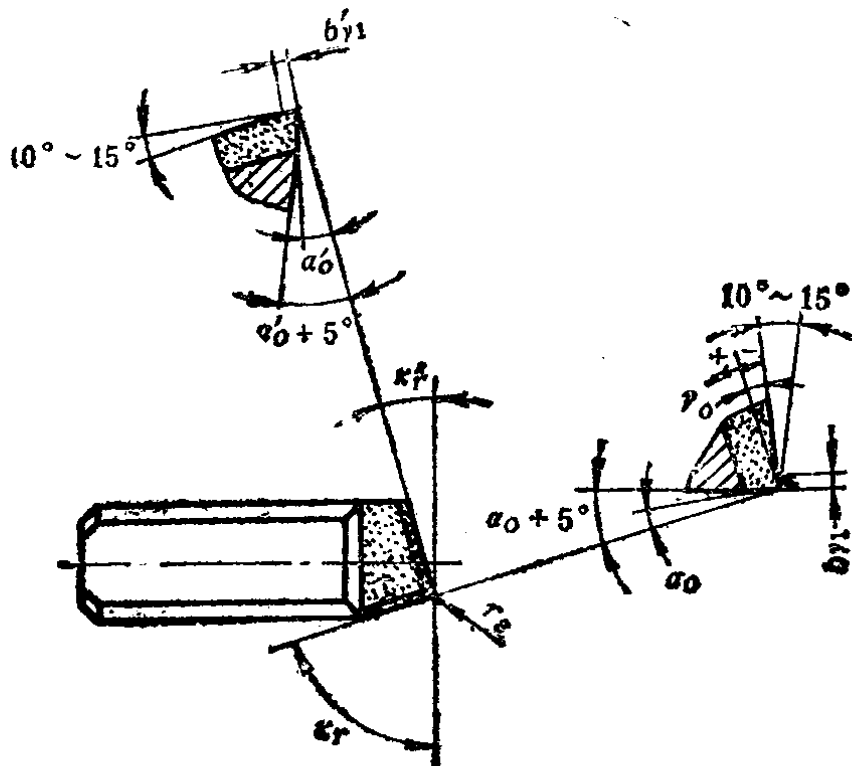


图1-6 在前刀面上带卷屑倒棱的铰刀头

加工铸铁铰刀的几何参数也按铰杆的柔度来选择。当加工中等直径和大直径的浅孔时、铰杆刚性好,采用 $\kappa_r = 45^\circ \sim 60^\circ$ ,  $r_s = 0.4 \sim 0.6 \text{ mm}$ , 可提高刀具耐用度, 使加工表面粗糙度精细。但采用 $\kappa_r < 45^\circ$ 时会引起振动, 使刀具耐用度降低。在刚性较好的条件下采用负前角 $\gamma_0 = -3^\circ \sim -6^\circ$ , 可以提高刀具耐用度。当用刚性小的加长铰杆加工深孔时, 主偏角取 $\kappa_r = 75^\circ \sim 90^\circ$ , 以减小振动, 同时取前角 $\gamma_0 = 0^\circ \sim 3^\circ$ 和较小的刀尖圆弧半径 $r_s = 0.1 \sim 0.2 \text{ mm}$ 。

精密铰削铸铁孔时, 通常取副偏角 $k'_r = 10^\circ \sim 15^\circ$ , 这样对刀具耐用度和孔的表面粗糙度有利。主后角 $\alpha_0 = 6^\circ \sim 12^\circ$ , 加工小直径孔时取较大的值, 副后角一般为 $\alpha'_0 = 12^\circ \sim 15^\circ$ , 而刃倾角对耐用度影响不大, 可有 $\lambda_s = 0^\circ$ 。

加工有色金属时镗刀的几何参数： $\gamma_0=8^\circ\sim18^\circ$ ， $k_r'=8^\circ\sim12^\circ$ ， $\alpha_0=6^\circ\sim12^\circ$ ， $\alpha'_0=10^\circ\sim15^\circ$ 。当系统刚性强时，取 $k_r=45^\circ\sim60^\circ$ 和 $r_s=0.5\sim1.0\text{mm}$ ；系统刚性差时，取 $k_r=75^\circ\sim90^\circ$ 和 $r_s=0.1\sim0.3\text{mm}$ 。

在加工各种不同材料的镗刀中，除了上述的圆弧过渡刃刀尖外，也有直线过渡刃的镗刀，见图1-7，它的 $k_{re}=0^\circ$ ， $b_s=0.2\sim0.4\text{mm}$ 。

在工作中，由于直线修光刃镗刀在制造和安装上的误差，有时因修光刃与镗孔母线不平行而使表面粗糙度变粗。但是，如果使用得当，会显著地降低表面粗糙度。为了减少修光刃在制造和安装上的误差，常把这种刀具的 $\gamma_0$ 和 $\lambda_s$ 角作成 $0^\circ$ ，同时从镗杆的结构上应考虑使镗刀在轴向平面中能方便转动的微调机构。

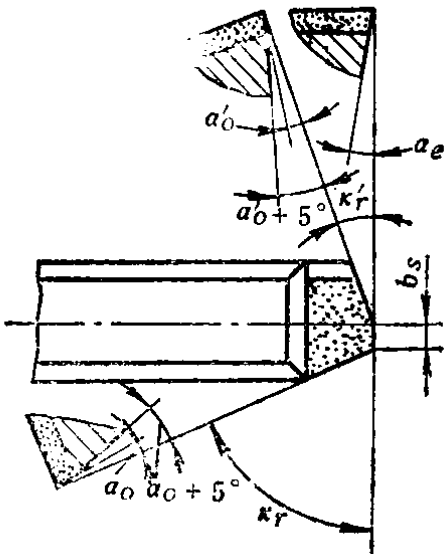


图1-7 带修光刃镗刀头

金刚石镗刀的几何参数应按加工条件来选择，作精密镗削时，可参考下列参数，见表1-1。其中主偏角一般取 $k_r=45^\circ$ ，工艺系统刚性差时 $k_r=60^\circ\sim90^\circ$ 。

表1-1 金刚石镗刀的几何参数

| 工件材料            | $\gamma_0(^{\circ})$ | $\alpha_0(^{\circ})$ | $r_s(\text{mm})$ | $K_r(^{\circ})$ | $K_r'(^{\circ})$ |
|-----------------|----------------------|----------------------|------------------|-----------------|------------------|
| 黄铜、紫铜<br>铝、耐热合金 | 0~2                  | 8~12                 | 0.2~0.8          | 45~90           | 0~10             |
| 青铜、硬铝合金、钛合金     | -3~-5                | 6~8                  | 0.2~0.8          | 45~90           | 0~10             |