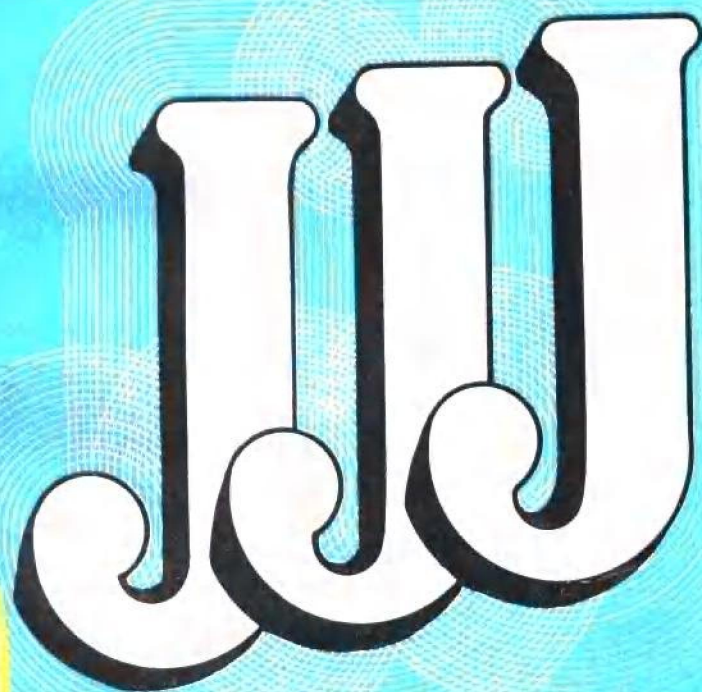


国家机械工业委员会统编

中级磨工工艺学

机械工人技术理论培训教材

JIXIE GONGREN JISHULILUN PEIXUN JIAOCAI



机械工业出版社

本书内容包括：磨削新工艺及精密量具、中等复杂零件的磨削、磨床及液压传动等。

本书由上海市机电工业学校薛源顺、宋秋云编写，由上海机床厂王开元、陆早发、上海市机电工业学校范崇洛审稿。

中级磨工工艺学

国家机械工业委员会统编

*

责任编辑：杨溥泉 版式设计：乔玲

封面设计：林胜利 方芬 责任校对：李广孚

*

机械工业出版社出版（北京阜成门外百万庄南里一号）

（北京市书刊出版业营业许可证出字第117号）

机械工业出版社印刷厂印刷

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 144 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—20,200 · 定价：2.55元

*

ISBN 7-111-01029-9/TG·239

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148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

第一章 磨削新工艺及精密量具.....	1
第一节 磨削新工艺	1
第二节 特种材料磨削	34
第三节 砂带磨削	38
第四节 精密量具的结构	42
复习题	48
第二章 中等复杂零件的磨削.....	50
第一节 复杂成形面的磨削	50
第二节 薄壁零件的磨削	61
第三节 薄片零件的磨削	66
第四节 偏心零件的磨削	69
第五节 花键轴磨削	73
第六节 螺纹磨削	82
第七节 复杂刀具的刃磨	86
第八节 细长轴磨削	96
第九节 其它特形零件磨削	100
第十节 典型零件工艺分析	113
复习题	133
第三章 磨床	135
第一节 液压传动基本知识	135
第二节 M1432A型万能外圆磨床	160
第三节 磨床的常见故障及其排除方法	195
复习题	204

第一章 磨削新工艺及精密量具

第一节 磨削新工艺

一、超精密磨削与镜面磨削

工件表面粗糙度低于 $Ra0.20\mu\text{m}$ 的磨削工艺，通称为低粗糙度磨削。低粗糙度磨削包括精密磨削、超精密磨削和镜面磨削三大类。工件表面粗糙度在 $Ra0.20\sim Ra0.10\mu\text{m}$ 的称精密磨削；工件表面粗糙度在 $Ra0.05\sim Ra0.025\mu\text{m}$ 的称超精密磨削；工件表面粗糙度为 $Ra0.012\mu\text{m}$ 的称为镜面磨削。其中镜面磨削在实际生产中应用极少，精密磨削已广泛地应用于航空、精密机械以及电子等工业。随着机械制造精度的不断提高，超精密磨削工艺在近期有了飞速发展，超精密磨削较之研磨或超精加工等方法具有生产率高、几何形状精度高和加工范围广等优点。适于超精密磨削的国产磨床有 MG1432 A、MG1432 B、MG7132 等。MG7132 型高精度平面磨床有降温措施并采用静压轴承，砂轮垂直进给采用滚珠丝杠，工作台十字导轨有较高刚性。MG1432 B 为 MG1432 A 的改进型，采用许多新型结构。头架和砂轮架均采用动静压轴承。头架主轴由直流电机驱动作无级调速。工作台采用塑料导轨。工作台运动速度最小为 $0.02\text{m}/\text{min}$ 并由数字显示装置显示。尾架采用十字交叉滚动导轨，顶尖移动灵活，刚性好。横进给采用丝杆全螺母结构，并备有磨削指示仪。

1. 超精密磨削和镜面磨削的原理 通常磨削表面的形成是一个非常复杂的过程。砂轮作为一种多刃的特殊刀具其

圆周面具有数十万切削微刃。每个微刃的切削是在高速、高温条件下瞬间交替进行而复盖整个磨削表面。较粗大的微刃有一定的切削作用，细小的微刃则以摩擦抛光作用为主。在微刃与工件接触的瞬间，工件的表层将发生不同程度的弹性变形和塑性变形。因此低粗糙度表面的形成必须具备两个基本条件：良好的极细微的微刃和较低的磨削应力。

(1) 经精细修整的砂轮，其圆周表面上每一磨粒都产生许多极细微的锯齿形微刃，其微刃顶端处于同一圆周面上，一般称为微刃的等高性。低粗糙度表面的获得是依靠等高的微刃的极细微的切削（刻划）和强烈的摩擦抛光作用所致。按误差复映规律，可以认为工件表面的微观轮廓已不单是砂轮表面微观轮廓的某种复印。

(2) 低粗糙度磨削时，微刃以极小的压力和热冲击作用而使磨削表面的塑性变形为最小值。但由于微刃的强烈摩擦作用，磨削区域的瞬时温度和伴随摩擦而产生的自激振动有可能使工件表面产生波纹度误差。在低粗糙度磨削时须特别加以注意。

2. 超精密磨削和镜面磨削的切削用量

(1) 在普通磨削时，砂轮圆周速度的提高一般对降低工件表面粗糙度是有利的。由图 1-1 可见，当砂轮圆周速度提高

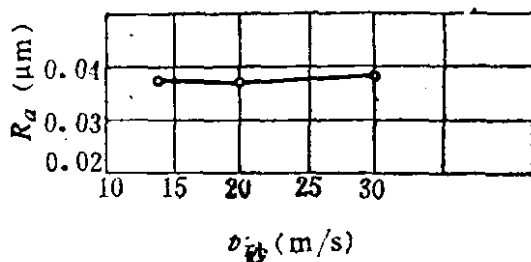


图1-1 砂轮圆周速度对工件表面粗糙度的影响

到一定范围时，它对工件表面粗糙度已无显著影响。在低粗糙度磨削时，砂轮速度偏高，则易造成工艺系统振动，使工件表面产生多角形、螺旋形和烧伤等缺陷。故宜采用较低的

砂轮速度进行磨削，一般选用 19 m/s 左右。

(2) 工件速度在一定范围内对工件表面粗糙度无显著影响，通常选用 15 m/min 为宜。当工件速度过低时工件表面因散热慢易烧伤和产生螺旋走刀痕迹；当工件速度过高时则易产生振动，并加深工件表面波纹的深度（图 1-2）。每种工件都有其固有的振动频率，因此也具有振动的敏感速度，磨削时要注意避免工件的敏感速度，以防止产生波纹度误差。

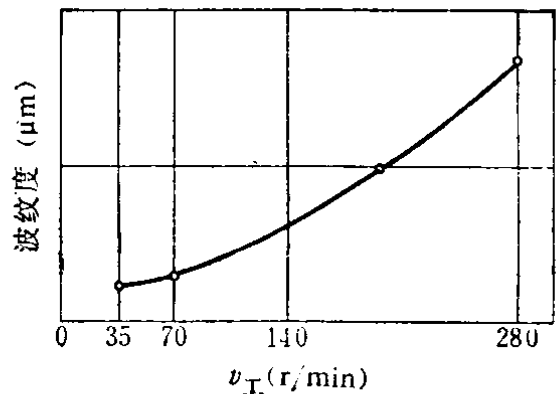


图1-2 工件速度对波纹度的影响

(3) 工件纵向进给量直接影响工件表面粗糙度。当增大纵向进给时，磨削力和磨削热随之增大，工件表面易产生螺旋形走刀痕迹。通常取 80

$\text{mm/min} \sim 200\text{ mm/min}$ 为宜。为进一步减小工件表面粗糙度，可增加光磨次数。图 1-3 的曲线表示磨削的周期：当砂轮与工件接触时，工件与砂轮间产生适当的压力，但由于工艺系统的弹性变形，实际磨削深度小于名义磨削深度，其磨削深度与光磨次数的关系如图 1-3 中 AB 曲线所示；当工艺系统弹性变形终止，实际磨削深度等于名义磨削深度。此时每次走刀的磨削深度基本相等（图 1-3 中 BC 曲线）。由于砂轮与工件表面间仍维持一定的压力，微刃的摩擦抛光作用良

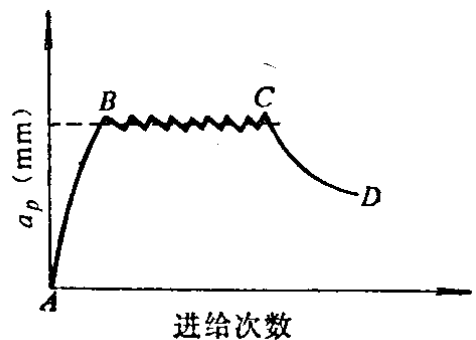


图1-3 磨削周期

好，最后几次走刀由曲线 CD 表示，它对工件表面粗糙度有决定性的影响，可选用较小的纵向进给量进行磨削。一般需8~10个行程就可达到粗糙度 $Ra0.1\mu\text{m}$ ，镜面磨削需30~40个光磨过程。

(4) 磨削深度对工件表面粗糙度的影响较大。一般取 $a_p \leq 2\mu\text{m}$ 。以外圆超精密磨削为例，其磨削余量通常为5~10 μm ，若再将超精磨划分成粗、精超精磨两个工步，则实际余量仅为2.5~5 μm 。因此超精磨削的横向进刀次数为1~3次。

3. 砂轮特性的选择 低粗糙度磨削对砂轮特性有较高要求，有时还须配制特殊的砂轮。如镜面磨削选用砂轮的粒度在W10以下，同时还需加入石墨作填料，以加强其摩擦抛光作用。

(1) 磨料的选择。磨料分刚玉、碳化硅和超硬磨料三大类。一般淬硬钢或合金钢超精密磨削常用白刚玉、铬刚玉、微晶刚玉和单晶刚玉四种。白刚玉与铬刚玉的特性相似，经精细修整后均能形成等高性良好的微刃。单晶刚玉对各种材料的超精密磨削均较适用，能获得较低的工件表面粗糙度。普通刚玉为多晶体，裂纹最易发生在晶界处，而单晶刚玉磨料是由单一的接近等轴形的晶体组成，颗粒的形状近似球状，在颗粒内部不含杂质或裂纹，故具有极高的机械强度。在经受同样大小的磨削力作用下其微刃不易碎裂。单晶刚玉是目前使用的刚玉中最佳的一种。微晶刚玉由微小晶体组成，机械强度也极好，在超精密磨削中有较广泛的应用。

(2) 粒度的选择。超精密磨削时选用细粒度砂轮，以获得较细的表面粗糙度。较粗的粒度，磨粒间的粘结强度较低，同时空隙也较大，砂轮表面经精细修整后，会残留少量

半脱落的磨粒，致使在磨削时脱落划伤工件表面。例如以100*粒度代替60*粒度做试验，工件表面的划痕数量从多而深长变为少而短浅。粗粒度砂轮与细粒度比较，其表面的磨粒数和微刃数均少，所以砂轮的耐用度和加工质量均较差。通常精密磨削选用100*~240*粒度，超精密磨削选用240*~W20，镜面磨削选用W14~W10。

(3) 硬度的选择。低粗糙度磨削时不允许磨粒从结合剂中整颗的脱落，因此要有适当的硬度。但硬度不能太高，因为磨削过程中，较小的磨削力集中在微刃的尖端上，微刃借助砂轮的弹性发挥其摩擦抛光作用，并防止出现烧伤和螺旋形缺陷。较软的砂轮有一定的弹性，一般以硬度K为最理想等级。镜面磨削则选用超软级砂轮使微刃有较大的退让性，增强摩擦抛光的效果。超精密磨削和镜面磨削对砂轮硬度的均匀性也有严格要求。

(4) 结合剂的选择。超精密磨削应用最多的结合剂是陶瓷结合剂，其次是树脂结合剂。镜面磨削常用树脂结合剂，树脂结合剂具有较高的强度和良好的弹性。

超精密磨削主要由微刃起切削作用而形成工件的光滑表面。陶瓷结合剂砂轮经精细修整后能获得高的微刃。树脂结合剂具有适当的弹性，可防止磨削时的烧伤和螺旋形缺陷。

在镜面磨削时常用W10以下的粒度，这样细的粒度用陶瓷结合剂制作砂轮在工艺上有许多困难，同时陶瓷的弹性又差于树脂结合剂。为保证镜面磨削的磨削压力和微刃的摩擦抛光作用，宜采用树脂结合剂砂轮。

(5) 组织的选择。低粗糙度磨削应选用均匀和较紧密的砂轮。

4. 砂轮的修整 金刚石合理的顶角和锐利的尖锋是保

证获得微刃的重要条件之一。金刚石顶角不宜太大，一般取 $70^{\circ}\sim 80^{\circ}$ 。在修整过程中要经常保持尖角的锋利。金刚石修整器的安装高度对砂轮修整质量有影响。当金刚石高于砂轮中心时，砂轮作用在金刚石上的力较大，金刚石尖锋有嵌入砂轮的趋势，并产生振动。如金刚石低于砂轮中心，作用在金刚石上的力较小，但由于机床本身精度影响，往往使修出的砂轮单面接触工件表面而产生螺纹痕缺陷。所以一般金刚石尖锋应低于砂轮中心 $0.5\sim 1\text{ mm}$ 为宜。

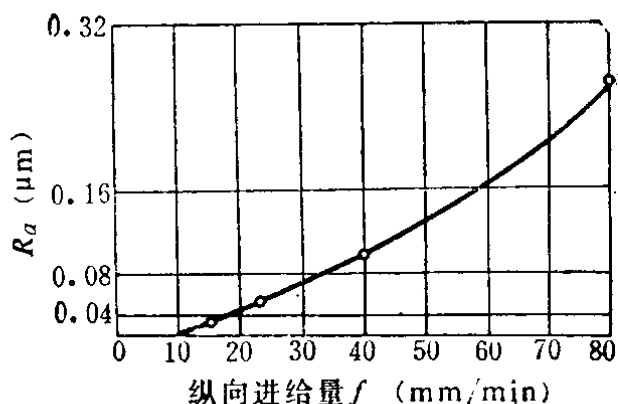
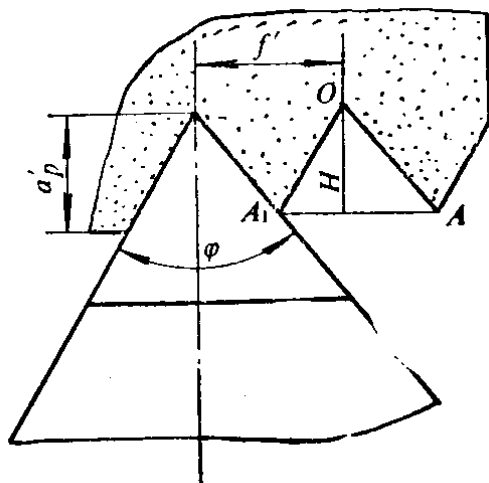
金刚石修整器的安装角在 $5^{\circ}\sim 10^{\circ}$ 之间变化时，对工件表面粗糙度无显著影响。

金刚石修整器在砂轮架横向移动的安装位置，应根据机床精度情况而定。如机床精度高，则可以任意选择。但如果砂轮架导轨扭曲精度较差，则应使金刚石修整器位置与磨削位置相近。一般高精度磨削修整砂轮时取此位置。如果砂轮修整的横向位置变化太大，就可能由于砂轮架导轨扭曲，而使砂轮在磨削时出现单面接触，引起螺旋形磨削缺陷。砂轮修整用量由纵向进给量 f' 和修整深度 a_p 组成。

超精磨削磨粒的微刃性和微刃的等高性与修整纵向进给量 f' 有密切关系。 f' 与工件表面粗糙度的关系见图1-4。由图可知随着 f' 减小，工件表面粗糙度下降。这是由于修整时金刚石按其本身的几何形状，把砂轮表面切削成螺纹状，当 f' 减小时，砂轮表面修整螺距也减小，因而砂轮表面残留面积也减小。从而产生较多的等高性好的微刃（图1-5）。

砂轮表面的螺纹深度 a_p 与 f' 有以下关系：

$$H = \frac{f'/2}{\operatorname{tg}\frac{\varphi}{2}} = \frac{f'}{2\operatorname{tg}\frac{\varphi}{2}} \quad (1-1)$$

图1-4 f' 与 R_a 的关系图1-5 修整用量对砂轮
表面轮廓的影响

式中 f' ——砂轮每转工作台纵向移动量 (mm);

φ ——金刚石顶角 ($^\circ$)。

$\triangle AOA_1$ 的面积为:

$$\triangle AOA_1 = \frac{1}{2} f' H = \frac{1}{4} \cdot \frac{f'}{\tan \frac{\varphi}{2}} \quad (1-2)$$

当砂轮转速与工件转速之比等于整数时, 工件表面形状即为砂轮形状。此时 $\triangle AOA_1$ 的面积, 也就是工件表面的残留面积。这个残留面积愈小, 工件表面粗糙度就愈低。三角形 AOA_1 的面积与 f' 的平方成正比。

f' 要根据工件加工要求, 砂轮切削性能和机床性能等条件选择。机床在低速运动时, 不应产生爬行现象。超精磨削 f' 可选用 0.008~0.012mm 镜面磨削可取 $f' < 0.008\text{mm}$ 。

工作台修整速度可用下式计算:

$$v = f' \cdot n_{\phi} \quad (1-3)$$

式中 v ——工作台纵向速度 (mm/min);

f' ——修整纵向进给量 (mm);

$n_{\text{砂}}$ ——砂轮主轴转速 (r/min)。

若取 $f' = 0.008\text{mm}$, 砂轮主轴转速为 $n_{\text{砂}} = 1670\text{ r/min}$, 则工作台修整速度为 13.36mm/min 。修整深度 a_p' 与粗糙度的关系见图 1-6。

当 a_p' 减小时, 修整力也减小, 从而使磨粒和结合剂产生极细微剥落形成数量多, 等高好的微刃。

在超精密磨削时, 选择修整深度 a_p' , 除了考虑工件表面粗糙度外, 还应注意对砂轮切削性能的影响。当

a_p' 减小时, 砂轮的切削性降低, 磨削时容易使工件烧伤, 砂轮耐用度也降低。超精磨削一般取 $a_p' = 0.0025\text{mm}$ 。

每次修整砂轮的总量以能恢复切削能力和纠正由于砂轮不均匀磨损所造成的工作面形状误差为依据。精密磨削砂轮磨损比较小, 由砂轮硬度不均匀磨损所造成的形状误差也比较小, 所以修整总量主要是由使砂轮恢复切削能力来决定。

砂轮磨钝是由于磨粒切刃被磨损而出现的小平面。一般砂轮半径上修去 0.05mm 就可以使砂轮恢复切削能力。

在精修砂轮时无横向进给纵向走刀修整是必要的, 这是由于在砂轮修整过程中, 在砂轮工作面上有个别微粒凸出或被金刚石打松了而又没有脱落。如果不把这些凸出的微粒和未脱落的微粒修去, 则在磨削时容易产生划伤和拉毛。另一方面, 由于工艺系统的弹性变形, 会使修出的砂轮不平直。在磨削时影响工件与砂轮的接触, 甚至产生单角接触。通过

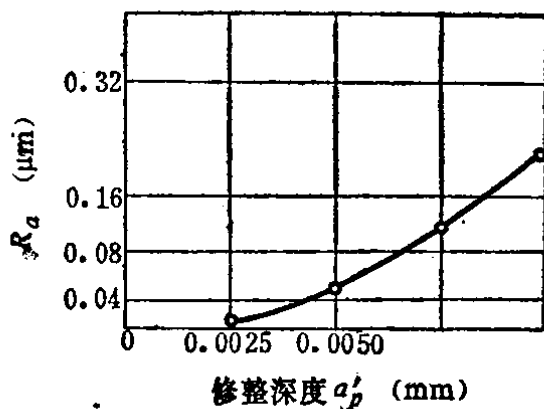


图1-6 a_p' 与 R_a 关系

光修整可以消除这方面的影响。超精磨削和镜面磨削均需光修。但光修次数不宜多，光修一次即可。各种磨削工艺参数可参见表 1-1，表 1-2，表 1-3。

5. 低粗糙度磨削对机床的要求

表1-1 外圆磨削工艺参数

类别 工艺参数	精密磨削	超精磨削		镜面磨削
砂 轮 粒 度	60*~80*	80*~320*	W20~W10	小于W14
砂 轮 圆 周 速 度 (m/s)	17~35	15~20	15~20	15~20
修整时工作台速度 (mm/min)	15~50	10~15	10~25	6~10
修整时横向进给量 (mm)	≤0.005	0.002~0.003	0.002~0.003	0.002~0.003
修整时横向进给次数 (一次/单行程)	2~4	2~4	2~4	2~4
光 修 次 数 (单行程)		1	1	1
工 件 圆 周 速 度 (m/min)	10~15	10~15	10~15	10以下
磨削时工作台速度 (mm/min)	80~200	50~150	50~200	50~100
磨削时横向进给量 (mm)	0.002~0.005	<0.0025	<0.0025	<0.0025
磨削时横向进给量 (每单行程进给一次)	1~3	1~3	1~3	1
光 磨 次 数 (单行程)	1~3	4~6	5~15	30~40
磨前零件的要求	R _a 0.8	R _a 0.4	R _a 0.20	R _a 0.10

(1) 磨床的几何精度。磨床的几何精度主要包括主轴的运动精度 (径向跳动和轴向窜动), 工作台及砂轮架移动时的直线性, 头尾架中心连线对工作台移动在水平面和在垂直面内的不平行, 各个部件之间的相互位置精度 (平行度、垂直度、同轴度) 以及各个部件结合面的精度等。

由于床身纵向导轨不直或不平行, 使工作台运动时在水平面内和垂直面内产生不直。工件与砂轮的相对位置便发生

表1-2 内圆磨削工艺参数

类别 工艺参数	精密磨削	超精密磨削	备 注
砂 轮 转 速 (r/min)	10000~20000	10000~20000	磨具精度高, 可选偏大些
修整时横向进给量 (mm)	不大于0.005	不大于0.005	
修整时工作台速度 (mm/min)	30~50	10~20	
修整时横进给次数	2~3	2~3	指砂轮经粗修后的精修次数
光 修 次 数	1	1	
工 件 圆 周 速 度 (m/min)	7~9	7~9	
磨削时工作台速度 (mm/min)	120~200	60~100	
磨削时横进给量 (mm)	0.005~0.01	0.005	
磨削时横进给次数	1~4	1~2	
光磨次数(单行程)	4~8	10~12	横向进给量大, 磨削余量多光磨次数取大值

变化。床身纵向导轨不直不仅影响工件母线直线性，而且还使工作台面运动的摩擦阻力加大，摩擦阻力的变化容易使台面产生爬行，从而影响砂轮微刃的等高性。床身纵向导轨在水平面内不直，还使砂轮对工件的切入量发生变化，当切削量增大时会产生烧伤、螺旋形缺陷。

表1-3 平面磨削工艺参数

工艺参数 \ 类别	精密磨削	超精磨削	镜面磨削
砂 轮 粒 度	60 [°] ~80 [°]	80 [°] ~320 [°]	W10~W5
砂 轮 圆 周 速 度 (m/s)	17~35	15~20	15~20
修整时磨头移动速度 (mm/min)	20~50	10~20	6~10
修整时垂直进给量 (mm)	0.003~0.005	0.002~0.003	0.002~0.003
修整时垂直进给次数	2~3	2~3	2~3
光 修 次 数 (单 程)	1	1	1
工 作 台 速 度 (m/min)	15~20	15~20	12~14
磨削时垂直进给量 (mm)	0.003~0.005	0.002~0.003	0.001~0.002
磨削时垂直进给次数	2~3	2~3	1
光 磨 次 数 (单 程)	1~2	2	3~4
磨 削 前 零 件 要 求	Ra0.8	Ra0.4	Ra0.05
磨头周期进给量 (mm)	0.2~0.25	0.1~0.2	0.05~0.1

床身横向导轨不直或扭曲,使砂轮主轴中心线的方向发生偏斜,砂轮母线与工作台移动方向就不平行,使砂轮与工件单边接触产生螺旋形痕迹。

头架和尾架的中心连线对工作台移动方向在垂直面内不平行对磨削影响较大。当装在顶尖上的工件在垂直面内倾斜一个角度时,工件会形成两头大中间小的细腰形。如果顶尖与工件顶尖孔不是线接触,而是在顶尖锥面的大头端有一段锥面接触,则当工件转动时,工件中心线有摆动,使工件产生较大的圆度误差。

当砂轮主轴中心线在垂直面内对工作台移动方向不平行时,金刚石将会把砂轮圆周面修成凹形。

砂轮主轴旋转精度是指主轴前端的径向跳动和轴向窜动大小,它直接影响工件的表面质量和表面缺陷,如直波形、螺旋形等。通常采用三个措施来提高主轴旋转精度:

1) 选择合理的轴承结构,常用轴承有整体多油楔式滑动轴承以及静压轴承、动静压轴承。动静压轴承能达到极高的主轴旋转精度,采用一般滑动轴承时,合理调整间隙很重要,但间隙不能过小。

2) 提高主轴加工精度。

3) 控制主轴轴向窜动。

另外横进给机构应有较高微进给精度,以满足修整砂轮和磨削的要求,进给的灵敏性差会使砂轮突然切入烧伤工件表面或因横向进给量太小而无法建立砂轮与工件之间一定的磨削压力。

(2) 工作台的运动性能主要是指工作台低速运动时的稳定性。低粗糙度磨削均采用低速修整砂轮,以获得砂轮工作表面的微刃性和等高性。