

# 目 录

前 言	
第一章 无心外圆磨削的概念及其力学基础 .....	1
一、无心外圆磨削的概念 .....	1
二、无心外圆磨削的特点 .....	3
三、无心外圆磨削的工作方法 .....	5
四、无心外圆磨削速度及作用力分析 .....	9
五、无心外圆磨削的滑动 .....	23
六、工件的运动过程及导轮单独驱动工件运动的条件 .....	29
第二章 导轮曲面形状及其修整 .....	35
一、以圆柱面作导轮工作面 .....	35
二、以单叶回转双曲面作导轮工作面及导轮工作面的 修整方法 .....	36
三、导轮修整后的形状 .....	41
四、导轮以单叶回转双曲面作工作面时与工件圆柱面的 干涉 .....	46
五、导轮理想工作曲面 .....	50
六、导轮近似理想工作曲面及其修整参数的计算 .....	54
七、现有导轮修整参数计算方法的分析 .....	60
八、导轮与工件的接触线 .....	69
第三章 无心外圆磨削的成圆理论 .....	74
一、工件的不圆度误差及其数学表示方法 .....	74
二、成圆过程的简化理论 .....	81
三、成圆过程的详细理论 .....	104

## IV

四、工件的修磨过程 .....	113
五、工件成圆理论的计算举例及实验结果 .....	120
六、不圆度误差的测量 .....	147
<b>第四章 无心外圆磨削质量分析 .....</b>	<b>161</b>
一、无心外圆磨削的质量问题 .....	161
二、工件的不圆度误差 .....	162
三、工件的不柱度 .....	173
四、工件外圆与端面的不垂直度 .....	178
五、工件的表面缺陷 .....	181
<b>第五章 无心外圆磨削的调整 .....</b>	<b>187</b>
一、无心纵磨时磨削区域的调整 .....	187
二、磨削区域补充调整的理论分析 .....	190
三、磨削砂轮的形状 .....	207
四、托板及侧导板的调整 .....	210
五、工件中心高的调整 .....	214
<b>附录 基础数学知识及一些较复杂公式的证明 .....</b>	<b>219</b>
一、单叶回转双曲面 .....	219
二、一般三次、四次代数方程式的解法及理想导轮曲面 方程式的证明 .....	225
三、富里哀级数及任意封闭图形的方程式 .....	231
四、无心外圆磨削工件成圆过程几何理论的证明 .....	233
<b>参考文献 .....</b>	<b>251</b>

# 第一章 无心外圆磨削的概念 及其力学基础

## 一、无心外圆磨削的概念

图 1-1 是无心磨削 $\ominus$ 加工原理图。工件  $W$  放在导轮及托板之间, 以导轮与托板的工作面(点  $B$ 、 $C$ )定位。借助于横向送进运动  $S_t$ , 使工件与磨轮 $\ominus$ 接触, 进行磨削。

从工件入口一端看, 磨轮、导轮均按顺时针方向回转。工

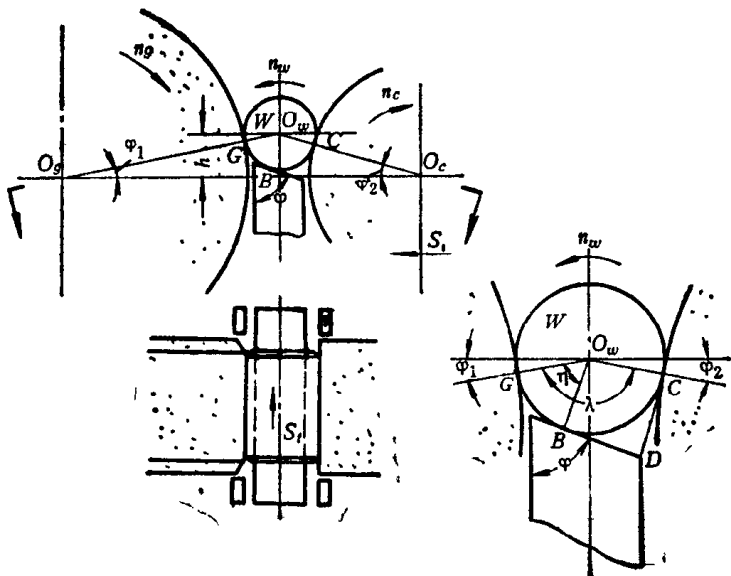


图 1-1 无心磨削加工原理

- $\ominus$  无心外圆磨削的简称, 下同。
- $\ominus$  磨削砂轮的简称, 下同。因导轮也是一个砂轮, 故用磨轮以示区别。送进运动  $S_t$  可由导轮架或磨轮架实现, 也可由导轮架、磨轮架两者实现。

件磨削点线速度的方向和磨轮接触点  $G$  的线速度方向一致，进行顺向磨削。在一般情况下，工件运动是磨轮和导轮联合作用的结果。当工件与磨轮接触之前，因工件与导轮间没有

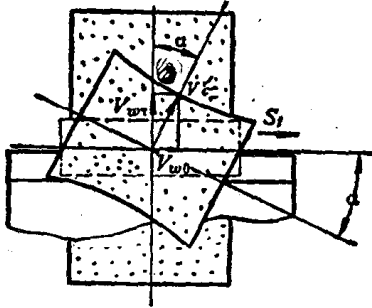


图 1-2 工件速度向量

足够的正压力，导轮与工件间的摩擦力矩小于托板与工件间的摩擦力矩，导轮不能单独带动工件回转。当工件与磨轮接触之后，工件承受了由磨削力所形成的力矩，同时工件与导轮间的正压力加大，于是工件在磨轮及导

轮的联合作用下回转。工件的速度向量图如图 1-2 所示。工件的线速度与导轮线速度在工件切线方向的分速度大致相等。当导轮轴线相对于工件轴线倾斜  $\alpha$  角之后，工件便可获得纵向（轴向）送进运动  $S_t$ 。工件纵向送进速度与导轮线速度在工件轴向的分速度大致相等。若不考虑工件与导轮间的滑动，工件速度与导轮速度之间的关系如下：

$$\begin{cases} V_{w0} = V_c \sin \alpha \\ V_{wt} = V_c \cos \alpha \end{cases} \quad (1-1)$$

式中  $V_c$ ——导轮线速度；

$V_{wt}$ ——工件线速度；

$V_{w0}$ ——工件轴向速度；

$\alpha$ ——工件与导轮轴线间夹角。

在一定条件下，如托板顶角  $\varphi$  较小（ $\varphi$  角见图 1-1），采用倾斜式结构无心磨床如 M10400，则工件与导轮间正压力加大，导轮也可以不依靠磨轮而单独驱动工件回转。

为了提高磨削精度，工件在磨削过程中应尽量能满足下

列要求:

- (1) 工件中心位置变化最小。
- (2) 工件中心沿一条与磨轮轴线平行的直线运动<sup>⊖</sup>。
- (3) 工件可靠地、连续地与导轮、托板工作面接触。
- (4) 工件运动速度均匀。

假如导轮为圆柱面,在倾斜 $\alpha$ 角之后,与工件只能是点接触,就不能满足上述要求。为了保证工件与导轮可靠地接触,无心磨削都采用单叶回转双曲面作为导轮工作曲面。从本书附录的证明可见,单叶回转双曲面是直纹曲面,且其直母线与其轴线倾斜 $\alpha$ 角。一般认为,如果使导轮轴线相对于工件轴线倾斜 $\alpha$ 角,那么就可能使工件(圆柱面)的直母线与导轮(单叶回转双曲面)直母线完全接触<sup>⊖</sup>,这样既保证了工件与导轮间的连续接触,使工件沿一条与磨轮中心线平行的直线运动,又使工件获得回转运动及轴向送进运动。

如图 1-1 所示,过磨轮中心 $O_g$ 、工件中心 $O_w$ 及导轮中心 $O_d$ 作剖面(图 1-1 的顶视图),该图形称为“磨削区域”。磨轮、导轮的几何形状及工件所处的空间位置(工件中心高度 $h$ ),决定了磨削区域的形状。磨削区域的形状应满足上述要求,它与磨削精度、磨削生产率有着十分密切的关系。无心磨削调整的主要任务之一,就是要获得正确的磨削区域形状。

## 二、无心外圆磨削的特点

无心磨削是工件不定中心的磨削。与一般外圆磨削(定中心磨削)比较,工件不用顶针或其他定心夹具夹持,而是“自由”地放置在导轮与托板之间。在一般情况下,工件的磨削表

⊖ 本书以讨论无心纵磨为主。

⊖ 从第二章的证明可知,这是不可能的。

面(外圆)就是磨削定位基面。

实现无心磨削和外圆磨削一样, 工件应正确地安装、定位, 与磨轮间获得相对速度(磨削速度)进行磨削。先看一个外圆磨削的例子(图 1-3)。

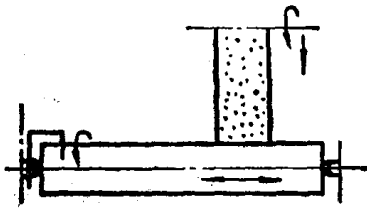


图 1-3 外圆磨削示意图

表面(外圆)相对于磨轮的位置。应该注意, 定位面中心孔不是在本工序或本工步加工的表面, 其定位精度仅与定位基面及定位工具的精度有关, 与被磨削表面的原始

精度及工件表面的磨削过程无关。磨轮与工件间的相对运动由机床传动机构决定, 不受(或很少受)具体磨削过程的影响。

再看无心磨削的情况(参看图 1-1)。导轮切面  $\overline{CD}$  与托板工作面  $\overline{BD}$  构成了一个“V”形定位装置, 工件的磨削面(外圆)就是定位面。工件由磨轮和导轮带动, 在这个“V”形夹具中回转, 在  $G$  点进行磨削。

无心磨削与外圆磨削比较, 具有下列特点:

(1) 工件“自由”地放置于定位夹具中, 磨削过程中工件中心不定。

(2) 工件的磨削面就是定位基面, 所以工件磨削表面的原始误差及磨削后的误差, 都会反映为定位误差, 因而影响到工件正在磨削部分的形状尺寸, 从而反映为加工误差。从磨削原理上讲, 没有正确的调整以及工件磨削过程不充分, 无心磨削是得不到真圆的。而外圆磨削则不然, 只要定位基面(如中心孔)准确, 机床有足够的精度, 工件可以磨得很圆。

假若不采取一定的工艺措施, 无心磨削很难保证磨削面与其他表面的相对位置精度。如阶梯轴各档外圆的不同轴度、

工件内外圆的不同轴度、工件外圆对端面的不垂直度等,在无  
心磨削时很难得到保证。

(3) 工件运动是由磨轮、导轮共同控制的。工件运动的  
稳定性、均匀性,不仅取决于机床运动传动链,还与工件、导轮  
及托板的实际情况(如工件形状、重量;导轮及托板的材料、表  
面状态;机床形式等)以及采用的磨削用量和磨削工艺参数  
(如工件中心高 $h$ 、托板顶角 $\varphi$ 等)有关。而外圆磨削时的工  
件运动仅取决于机床传动链。

(4) 在无芯磨削过程中,工件中心位置连续变化,其变化  
的大小取决于工件的原始误差、磨削用量、工艺系统刚性及磨  
削工艺参数。外圆磨削时,工件中心位置取决于工件中心孔  
及机床顶针的精度。

(5) 一般情况下,工件的磨削为顺向磨削。

(6) 无心磨削易实现强力磨削、高速磨削、宽砂轮及多砂  
轮磨削,并易实现磨削过程的自动化。

(7) 工件由全部磨削面承受磨削力,支承刚性好。在相  
同条件下,磨削余量比外圆磨削可以小些。

### 三、无心外圆磨削的工作方法

常见的无心磨削方法有纵磨(贯穿磨)、横磨(切入磨)及  
定程磨。

#### 1. 纵磨法

纵磨法的特点如下:

(1) 导轮轴线相对于工件轴线倾斜 $\alpha$ 角,工件作纵向送  
进,贯穿磨削区域。

(2) 一批工件可以相继连续地通过磨削区域,易于实现  
流水作业和自动化,生产效率高。

(3) 在一次磨削过程中,除由于砂轮磨损需进刀补偿外,磨轮与托板、导轮间的相对位置不变。

纵磨适于磨削光轴、棒料、轴承套圈,其长度可以大于或小于磨削区域长度。使用上下料机构支撑工件,纵磨工件长度可以说没有限制。阶梯轴的最大轴颈也可以纵磨,不过其重心应位于被磨削轴颈范围之内。磨削重心不在被磨削轴颈范围内且较短的工件时,如磨削圆锥滚子轴承内圈大档边外圆(图 1-4),可以使工件靠在一起,形成一个整体,进行无心纵磨。对于圆锥面和成型回转面,可将导轮、磨轮修整成一定形状进行无心纵磨(图 1-5、图 1-6)。但这种方法只有在批量

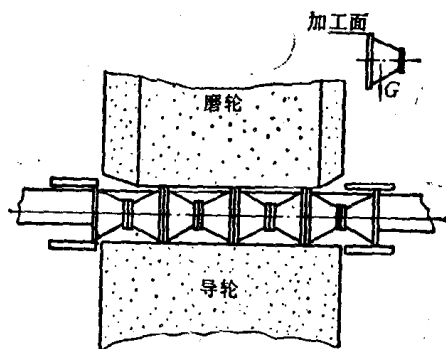


图 1-4 无心纵磨圆锥滚子轴承内圈大档边外圆

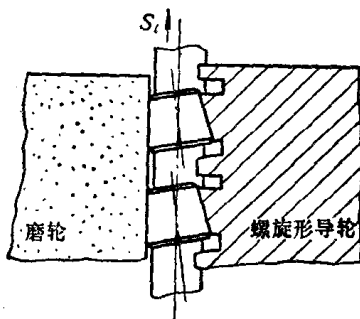


图 1-5 无心纵磨圆锥滚子



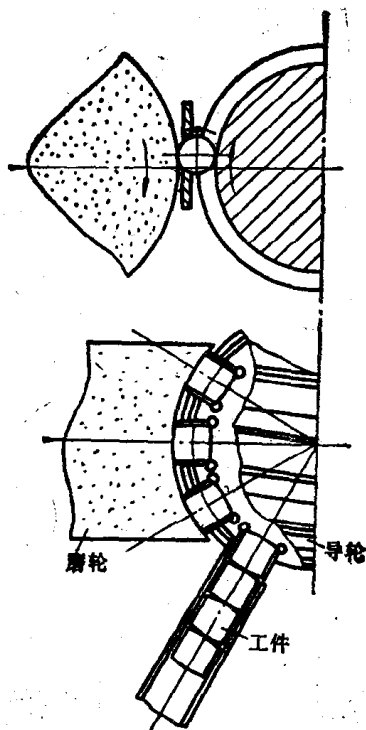


图 1-6 无心纵磨球面滚子

较大时才是经济的。

## 2. 横磨法

横磨法的特点如下：

(1) 工件只作横向送进，因此磨削过程是间断的。横磨法可使用自动上下料机构，实现加工循环自动化，因此生产率也很高。

(2) 磨削过程中，磨轮与导轮、托板间的相对位置连续变化。

(3) 导轮轴线可与工件轴线平行。为了防止磨削时工件

轴向窜动,一般都将导轮倾斜一个不大的角度( $\alpha \approx 0.5^\circ$ )。

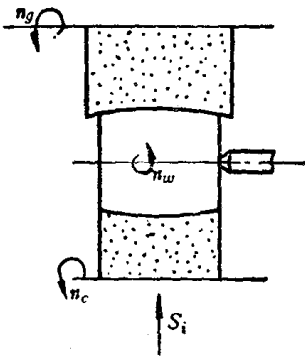


图 1-7 无心横磨成型面

横向磨削主要用于受形状限制而无法进行纵磨的成型表面及复杂的阶梯轴等(图 1-7)。

### 3. 定程磨法

定程磨法是纵磨法的一种。工件在磨削时进行纵磨,但不完全通过磨削区域,而用一个挡块限止工件的轴向位置。这种方法适于磨削阶梯轴、锥销或其他受

形状限制而不适于纵磨的工件(图 1-8)。为了提高磨削生产率,无心磨床附有推料机构。推料机构一方面起挡块作用,一方面在工件磨削完后自动将工件推出磨削区域。

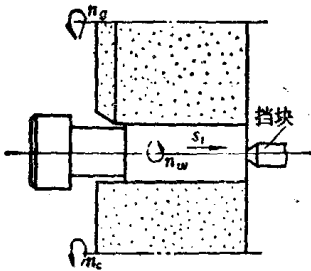


图 1-8 无心定程磨法

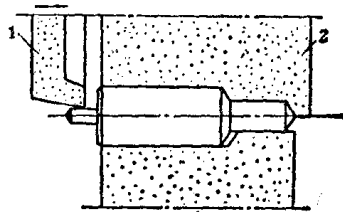


图 1-9 无心横磨同时磨削端面

1—磨端面砂轮 2—磨外圆砂轮

无心磨削除有纵磨、横磨及定程磨三种基本方法外,还有复合磨法,如纵磨—横磨、横磨—纵磨等。也可以在磨轮轴上安装端面砂轮,在磨削工件外圆的同时磨削工件端面(图 1-9)。

另外,为了保证阶梯轴各档外圆的不同轴度、工件内外圆

的不同轴度，定中心无心外圆磨削及内支撑无心外圆磨削已得到应用。

### 四、无心外圆磨削速度及作用力分析

#### 1. 无心外圆磨削速度分析

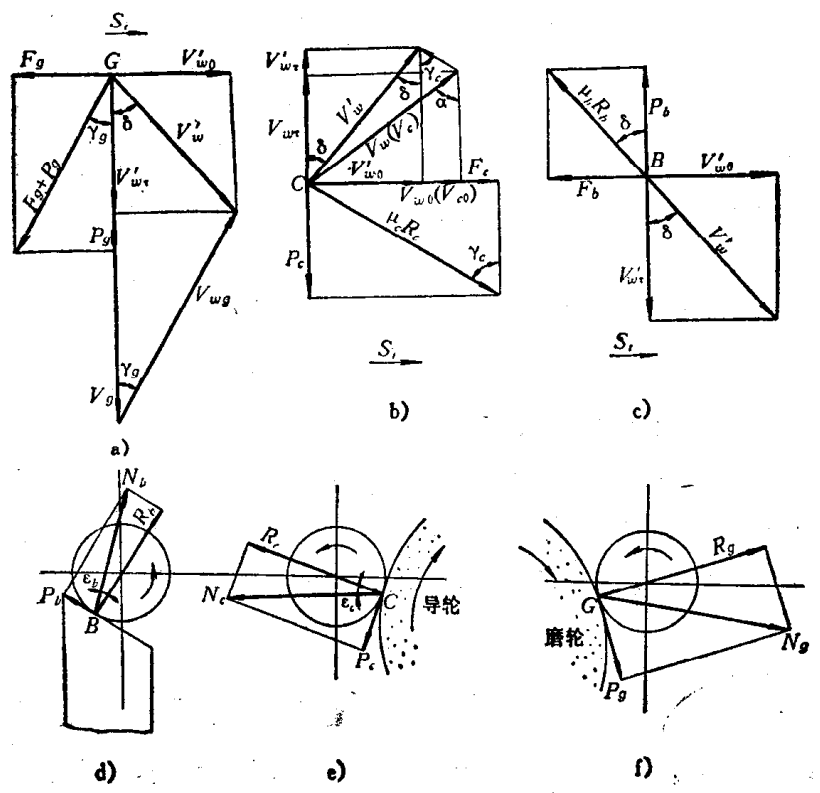


图 1-10 工件、磨轮、导轮速度及作用力

- a) 磨削点 G 处速度及作用力
- b) 接触点 C 处速度及作用力
- c) 接触点 B 处速度及作用力
- d) 接触点 B 处托板对工件的作用力
- e) 接触点 C 处导轮对工件的作用力
- f) 磨削点 G 处磨轮对工件的作用力

各速度的计算方法如下(参看图 1-10):

$$V_g = \frac{\pi D_g n_g}{1000 \times 60} \text{ (m/s)}$$

式中  $V_g$ ——磨轮线速度(m/s);  
 $D_g$ ——磨轮直径(mm);  
 $n_g$ ——磨轮转速(r/min)。

一般  $V_g = 25 \sim 35 \text{ m/s}$ , 高速无心磨削可达  $60 \sim 80 \text{ m/s}$  以上。大部分无心磨床磨轮主轴由电动机通过一级三角皮带轮直接带动。为了维持磨削速度, 机床备有两套皮带轮。当磨轮用到一定程度时, 改变速比, 提高主轴转速, 可维持磨削速度。

$$V_c = \frac{\pi D_c n_c}{1000} \text{ (m/min)}$$

式中  $V_c$ ——导轮线速度(m/min);  
 $D_c$ ——导轮直径(mm);  
 $n_c$ ——导轮转速(r/min)。

导轮速度应根据具体工艺条件选取, 一般为磨轮速度的  $\frac{1}{60}$  左右。根据工件精度要求、直径大小,  $V_c$  为  $20 \sim 80 \text{ m/min}$ 。小型无心磨床采用电感应式转差离合器无级调速; 中型、大型无心磨床采用硅整流直流电机无级调速。

由于导轮工作面是单叶回转双曲面, 所以导轮各点的直径  $D_c$  并不相同, 各点速度  $V_c$  也不相同。当工件中心高  $h > 0$  时, 导轮是一个近似锥形的回转曲面(单叶回转双曲面的一部分), 其速度分布如图 1-11 所示。当导轮喉截面直径  $2a = 350 \text{ mm}$ 、导轮宽度  $L = 200 \text{ mm}$ 、 $\alpha = 4^\circ$  及  $h = 10 \text{ mm}$  时, 则导轮前后端面直径差  $\Delta D_c = 1.598 \text{ mm}$  (详见第二章表 2-3)。

$$\Delta V_c = \frac{\pi \Delta D_c n_c}{1000} \text{ (m/min)}$$

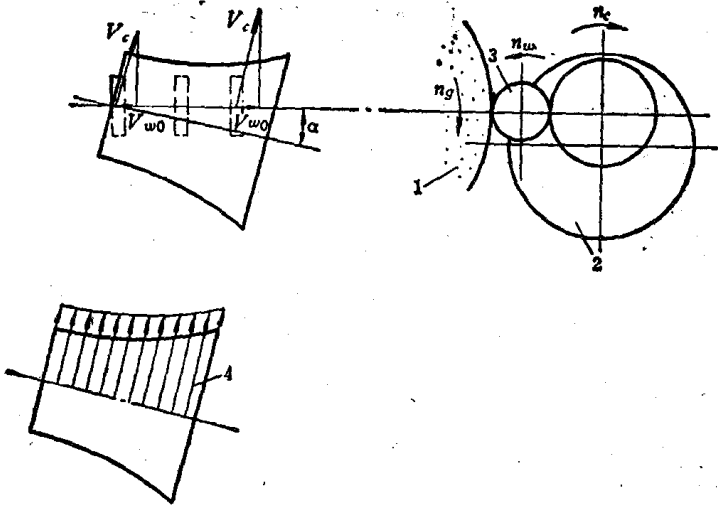


图 1-11 导轮速度分布

1—磨轮 2—导轮 3—工件 4—导轮速度分布图

式中  $\Delta V_c$ ——导轮线速度差 (m/min)。

当  $n_c = 50 \text{ r/min}$  时,  $\Delta V_c = 0.25 \text{ m/min}$ 。

$$\begin{cases} V_{w\tau} = V_c \cos \alpha \\ V_{w0} = V_c \sin \alpha \end{cases}$$

式中  $V_{w\tau}$ ——工件计算切向速度 (m/min);

$V_{w0}$ ——工件计算轴向速度 (m/min)。

$$\begin{cases} V'_{w\tau} = K_\tau V_{w\tau} = K_\tau V_c \cos \alpha \\ V'_{w0} = K_0 V_{w0} = K_0 V_c \sin \alpha \end{cases}$$

式中  $V'_{w\tau}$ ——工件实际切向速度 (m/min);

$V'_{w0}$ ——工件实际轴向速度 (m/min);

$K_\tau$ —— $K_\tau = 1 - f_\tau / 100$ ;

$K_0$ —— $K_0 = 1 - f_0 / 100$ ;

$f_\tau$ 、 $f_0$ ——工件切向及轴向滑动系数。

$$\therefore \begin{cases} \mathbf{V}_w = \mathbf{V}_{w\tau} + \mathbf{V}_{w0} \\ \mathbf{V}'_w = \mathbf{V}'_{w\tau} + \mathbf{V}'_{w0} \end{cases}$$

式中  $\mathbf{V}_w$ ——工件计算速度 (m/min);

$\mathbf{V}'_w$ ——工件实际速度 (m/min)。

工件实际速度  $\mathbf{V}'_w$  是不断变化的, 可以看成工件轴向坐标的函数。在一般情况下,  $\mathbf{V}'_{w\tau} > \mathbf{V}_{w\tau}$ ,  $\mathbf{V}'_{w0} < \mathbf{V}_{w0}$ 。所以图 1-10b 中  $\mathbf{V}'_w$  与  $\mathbf{V}'_{w\tau}$  之间的夹角  $\delta$ , 小于  $\mathbf{V}_w$  与  $\mathbf{V}_{w\tau}$  之间的夹角  $\alpha$ 。

工件与导轮之间的相对速度:

$$\mathbf{V}_{wc} = \mathbf{V}'_w - \mathbf{V}_c$$

工件与托板之间的相对速度:

$$\mathbf{V}_{wb} = \mathbf{V}'_w - \mathbf{V}_b = \mathbf{V}'_w$$

式中  $\mathbf{V}_b$ ——托板速度,  $\mathbf{V}_b = 0$ 。

工件与磨轮之间的相对速度:

$$\mathbf{V}_{wg} = \mathbf{V}'_w - \mathbf{V}_g$$

故实际磨削速度为  $-\mathbf{V}_{wg}$ 。

根据两摩擦件之间的相对速度方向与摩擦力方向相反的原则, 从图 1-10 可见:

磨轮对工件轴向作用力  $\mathbf{F}_g$ 、切向作用力  $\mathbf{P}_g$  的合力  $\mathbf{F}_g + \mathbf{P}_g$ , 其方向与  $\mathbf{V}_{wg}$  方向相反。

导轮对工件轴向作用力  $\mathbf{F}_c$ 、切向作用力  $\mathbf{P}_c$  的合力  $\mathbf{F}_c + \mathbf{P}_c$ , 其方向与  $\mathbf{V}_{wc}$  方向相反。

托板对工件轴向作用力  $\mathbf{F}_b$ 、切向作用力  $\mathbf{P}_b$  的合力  $\mathbf{F}_b + \mathbf{P}_b$ , 其方向与  $\mathbf{V}'_w$  方向相反。

由图 1-10:

$$\operatorname{tg} \gamma_g = \frac{\mathbf{F}_g}{\mathbf{P}_g}$$

由正弦定理:

$$\frac{V'_w}{V_g} = \frac{\sin \gamma_g}{\sin(\gamma_g + \delta)}$$

$$\therefore \operatorname{tg} \gamma_g = \frac{F_g}{P_g} = \frac{\frac{V'_w}{V_g} \sin \delta}{1 - \frac{V'_w}{V_g} \cos \delta} \quad (1-2)$$

式中  $\delta = \operatorname{tg}^{-1} \frac{V'_{w0}}{V'_{w\tau}}$ 。

又

$$\left\{ \operatorname{tg} \varepsilon_b = \frac{P_b}{R_b} = \frac{\mu_b R_b}{R_b} \cos \delta = \mu_b \cos \delta \quad (1-3) \right.$$

$$\left. \operatorname{tg} \varepsilon_c = \frac{P_c}{R_c} = \frac{\mu_c R_c}{R_c} \cos \gamma_c = \mu_c \cos \gamma_c \quad (1-4) \right.$$

$$\left. \operatorname{tg} \gamma_c = \frac{V_c \sin \alpha - V'_w \sin \delta}{V'_w \cos \delta - V_c \cos \alpha} = \frac{\frac{V_c}{V'_w} \sin \alpha - \sin \delta}{\cos \delta - \frac{V_c}{V'_w} \cos \alpha} \quad (1-5) \right.$$

式中  $\mu_c$ ——导轮与工件间的摩擦系数;

$\mu_b$ ——托板与工件间的摩擦系数。

## 2. 无心外圆磨削作用力分析

工件在进行无心纵磨时,磨轮、导轮、托板对工件的切向作用力、径向作用力如图 1-12 所示。各作用力分布于整个磨削表面上。以下分析的作用力,看成是这些作用力的合力。如:

$$P_g = \int_0^l p_g(l) dl$$

式中  $p_g(l)$ ——工件单位长度上的作用力(kg/mm),是工件长度  $l$  的函数。

工件在等速运动时,这些力处于平衡状态(工件在开始磨

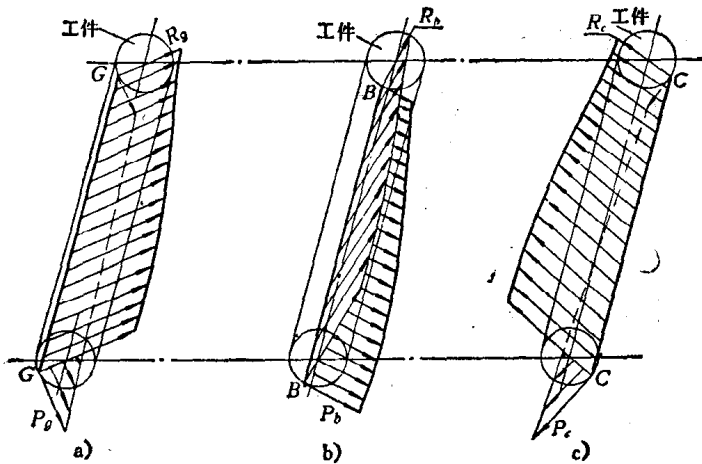


图 1-12 磨轮、导轮、托板对工件的作用力

- a) 磨轮对工件的作用力    b) 托板对工件的作用力  
c) 导轮对工件的作用力

削及磨削终了时,或在磨削过程中某一瞬时,这些作用力可能不平衡,因而使工件产生加速度)。首先讨论垂直于工件中心截面上诸力的关系(图 1-13)。为了简化起见,假定导轮垂直于工件中心线截面为圆,列出力的平衡方程式(公式中上面的符号代表工件中心高  $h > 0$  的情况,下面的符号代表工件中心高  $h < 0$  的情况):

$$\begin{aligned} \Sigma X = R_g \cos \varphi_1 - R_c \cos \varphi_2 + R_b \cos \varphi + P_g \sin \varphi_2 \\ \pm P_g \sin \varphi_1 - P_b \sin \varphi = 0 \end{aligned} \quad (1-6)$$

$$\begin{aligned} \Sigma Z = \pm R_g \sin \varphi_1 \pm R_c \sin \varphi_2 + R_b \sin \varphi - P_g \cos \varphi_1 \\ - P_c \cos \varphi_2 + P_b \cos \varphi - G = 0 \end{aligned} \quad (1-7)$$

$$\Sigma M_y = (P_g - P_c - P_b) R_w = 0 \quad (1-8)$$

式中  $P_g, R_g$ ——磨轮对工件的切向、径向作用力;  
 $P_c, R_c$ ——导轮对工件的切向、径向作用力;  
 $P_b, R_b$ ——托板对工件的切向、径向作用力;



$\varphi$ ——托板顶角；

$\varphi_1$ 、 $\varphi_2$ ——工件中心与磨轮中心、导轮中心连线与水平线之间的夹角，它反映了工件中心高度；

$R_w$ ——工件半径；

$G$ ——工件重量。

在一定磨削条件下  $P_g$  为已知，且  $R_g = AP_g$ （一般  $A = 1.5 \sim 3.0$ ）。由公式(1-3)可知， $P_b = \mu_b R_b \cos \delta_0$ 。在上述三

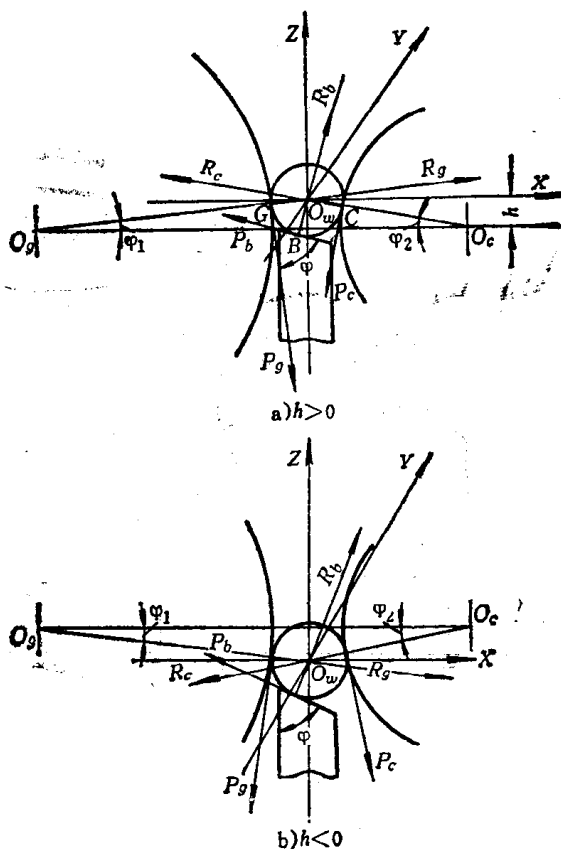


图 1-13 作用于工件上的平衡力系