

机械加工  
工艺手册

第2卷

机械工业出版社

# 第13章 磨 削

- 主 编** 薄 宵  
**编 写** 薄 宵 南京汽车制造厂  
白 锋 南京汽车制造厂  
程伦锡 南京汽车制造厂  
周鑫森 南京汽车制造厂  
吴勇发 南京汽车制造厂  
李龙天 南京汽车制造厂  
周德生 第二汽车制造厂
- 主 审** 钱帷圭 郑州磨料磨具磨削研究所  
曹硕生 广西大学  
郑焕文 东北工学院  
黄 仁 东南理工大学  
赵芝眉 东南理工大学
- 责任编辑** 张斌如

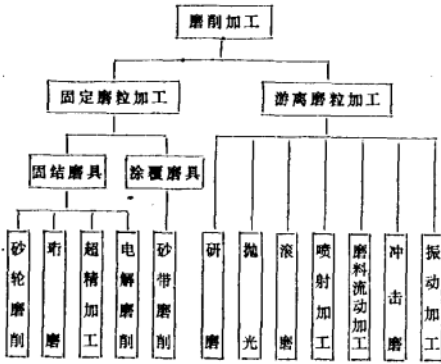


# 第1节 磨削加工 方法及机理

## 1 磨削加工方法分类

磨削加工是指用磨料来切除材料的加工方法，根据工艺目的和要求不同，磨削加工已发展为多种形式的加工工艺。通常按工具类型进行分类，可分为使用固定磨粒的和游离磨粒的两大类(表 13·1-1)。各种加工形式的用途、工作原理和加工运动情况有相当大的差别，但都存在摩擦、微切削和表面化学反应等现象，只是形式和程度不同而已。

表13·1-1 磨削加工分类

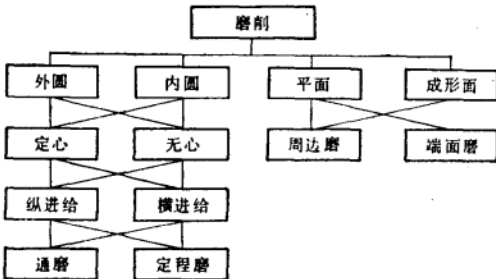


通常所谓“磨削”，主要指用砂轮进行磨削。砂轮磨削方式可以有多种划分方法。

一般按照加工对象可分为外圆、内圆、平面及成形磨削；

旋转表面按照夹紧和驱动工件的方法，又可分为定心磨削与无心磨削；

表13·1-2 常用砂轮磨削方式和方法



按照进给方向相对于加工表面的关系，可分为纵向进给与横向进给磨削；

考虑磨削行程之后，砂轮相对工件的位置，又区分为通磨与定程磨；

考虑砂轮的工作表面类型，又分为周边磨削、端面磨削和周边-端面磨削。

以上所列的大部分磨削方式，在生产实践中并不总是同时存在的，许多磨削方式可以由这些个别特征结合产生，最常用的结合方式见表13·1-2。

上表所示磨削方式和方法，应根据具体条件采用。如磨平面，既可采用端面磨削，也可采用周边磨削，应视设备、加工条件和加工习惯来决定。

## 2 磨削机理

### 2.1 磨削加工特点

磨削加工本质上属切削加工。一般将砂轮看作很多刀齿的铣刀，磨削就是利用这些刀齿进行超高速铣削，但是与通常的切削加工相比又有以下显著特点：

(1) 切削刃不规则 切削刃的形状和分布均处于不规则的随机状态，其形状、大小各异。

砂轮磨粒切削刃的几何参数见图13·1-1。磨粒切削刃的切削角 $\delta_g$ 和前角 $\gamma_g$ 、刃口楔角 $\beta_g$ 、磨粒刃端圆半径 $r_\beta$ ，它们影响着砂轮的锋锐程度和切削能力。

根据测量结果 $\ominus$ (见图13·1-2)， $\beta_g = 80^\circ \sim 145^\circ$ ， $r_\beta = 3 \sim 28 \mu\text{m}$ ，切削时为很大的负前角。刚玉砂轮修整后， $\gamma_g$ 平均为 $-65^\circ \sim -80^\circ$ ，经磨削一段时间后，还会进一步增大至 $-85^\circ$ 。说明磨粒切削刃上的负前角远大于一般切削刀具的负前角，

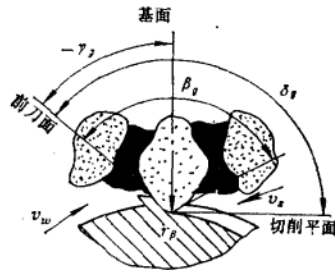


图13·1-1 砂轮的磨粒切削刃参数

$\ominus$  苏联Л. Б. Ваксеп测量结果。





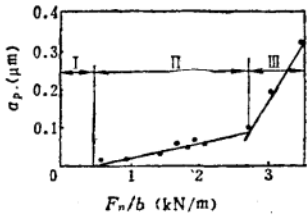


图13-1-5 法向磨削力与磨削深度的关系  
 工件材料：中碳钢铬钢，硬度 HRC53~55；  
 砂轮：WA80MV，砂轮等效直径53mm；  
 $v_s = 39 \text{ m/s}$   $v_w = 165 \text{ m/min}$   
 $F_n$ —法向切削力  $b$ —磨削宽度  $a_p$ —磨削深度

可看到典型过程三个阶段的转折点十分鲜明。

由于磨削深度不同、磨粒分布不均匀等原因，三个阶段的比例是变化的。例如，磨削深度越大，切削作用所占比例也越大；磨粒在砂轮上分布不均匀，两相邻磨粒越近，则后一磨粒的工作状况主要为弹性摩擦和变形。

磨粒切下的切屑非常细小（重负荷磨削除外），一般分为带状切屑、碎片状切屑和熔融的球状切屑<sup>⊖</sup>。

### 2.3 磨削基本参数

与磨削运动有关的参数见图13-1-6。

(1) 砂轮速度  $v_s$

$$v_s = \frac{\pi d_s n_s}{1000 \times 60} \text{ m/s}$$

式中  $d_s$ —砂轮直径 mm

$n_s$ —砂轮转速 r/min

(2) 工件速度  $v_w$

$$v_w = \frac{\pi d_w n_w}{1000} \text{ m/min}$$

式中  $d_w$ —工件直径 mm

$n_w$ —工件转速 r/min

(3) 轴向进给量  $f$

粗磨钢件  $f_s = (0.3 \sim 0.7) b_s$

粗磨铸件  $f_s = (0.7 \sim 0.8) b_s$

精磨  $f_s = (0.1 \sim 0.3) b_s$

式中  $b_s$ —砂轮宽度 mm

进给速度  $v_f$

$$\text{内、外圆 } v_f = \frac{f_s n_w}{1000} \text{ m/min}$$

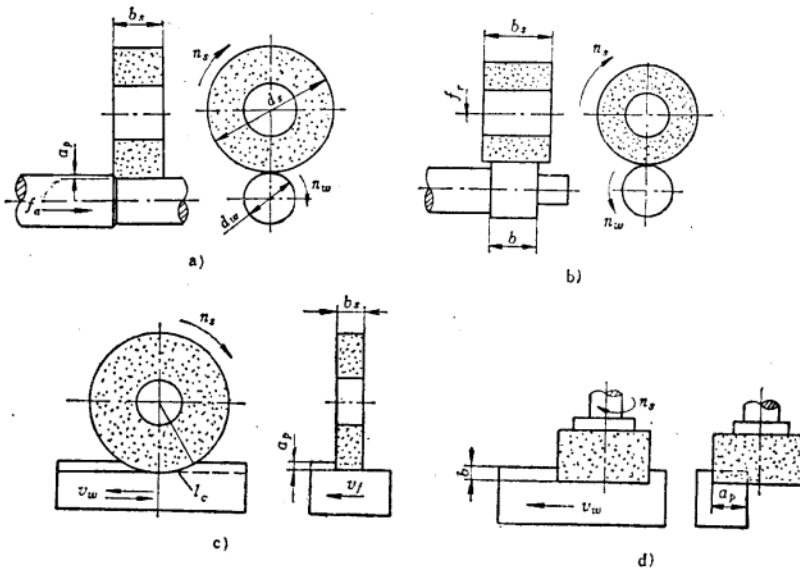


图13-1-6 磨削运动参数

a) 纵进给外圆磨 b) 切入磨 c) 圆周平面磨 d) 端面平面磨

⊖ 也有将切屑分成五种类的，即：带状、剪切型、挤裂型、积屑瘤型及熔球型。

(4) 磨削深度  $a_p$ , mm或径向进给量  $f_r$ , mm/s, mm/min, mm/r(5) 砂轮与工件的接触弧长  $l_c$  (参考图13-1-6c)

$$l_c \approx \sqrt{a_p d_s} \quad \text{mm}$$

$l_c$  的大小表明磨削热源的大小、冷却及排屑的难易, 砂轮是否出现堵塞等现象。一般内圆磨削接触弧最长, 其次是平面磨削, 外圆磨削最小。

(6) 未变形切屑厚度  $a_{cg}$ 

$$a_{cg\max} = \frac{2v_w}{v_s} l_c \sqrt{\left(\frac{d_w \pm d_s}{d_w - d_s}\right) f_r}$$

式中  $v_w/v_s$  值越小,  $a_{cg\max}$  越小, 所以高速磨削比一般速度磨削更为有利;  $a_{cg\max}$  与  $\sqrt{f_r}$  成正比, 当  $f_r$  增加一倍时,  $a_{cg\max}$  只增加40%左右。从增加生产率着眼, 增加  $f_r$  (如深磨法) 比增加  $v_w$  有利, 连续刃距  $l_c$  较小,  $d_s$  增加及  $d_w$  增加可使  $a_{cg\max}$  减小。

(7) 金属切除率  $Z$ 

$$Z = 1000 v_w f_w a_p \quad \text{mm}^3/\text{min}$$

(8) 单位砂轮宽度金属切除率  $Z'$ 

$$Z' = \frac{Z}{b} = \frac{1000 v_w f_w a_p}{b} \quad \text{mm}^3/(\text{mm} \cdot \text{min})$$

式中  $b$  —— 砂轮磨削宽度 mm $Z'$  表示砂轮的磨削性能和生产率的高低。(9) 磨削比  $G$ 

$$G = \frac{Z}{Z_s}$$

式中  $Z_s$  —— 表示每分钟内砂轮磨损的体积

$G$  大, 表示砂轮的切削性能好, 生产率高, 经济效果好。

(10) 磨耗比  $G_s$ 

$$G_s = \frac{Z_s}{Z}$$

 $G_s$  小, 说明砂轮耐用度高, 经济效果好。

(11) 比磨削能  $\bar{u}$ 。磨除单位体积 (或重量) 金属所消耗的能量称为比磨削能。单位  $\text{N} \cdot \text{m}/\text{mm}^3$  或  $\text{J}/\text{mm}^3$ 。

$\bar{u}$  是估算磨削力和功率常用的量,  $\bar{u}$  越小, 材料的可磨性好, 相对金属切除率高。

## 2.4 磨削力和功率

## 2.4.1 磨削力

磨削时作用于工件和砂轮之间的力称为磨削力, 在一般外圆磨削情况下, 磨削力可以分解为互相垂直的三个分力, 见图13-1-7。

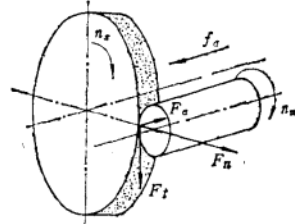


图13-1-7 外圆磨削力

 $F_t$  —— 切向磨削力 (砂轮旋转的切线方向), $F_n$  —— 法向磨削力 (砂轮和工件接触面的法线方向), $F_w$  —— 轴向磨削力 (纵向进给方向)。

切向磨削力  $F_t$  是确定磨床电动机功率的主要参数, 又称主磨削力; 法向力  $F_n$  作用于砂轮的切入方向, 压向工件, 引起砂轮轴和工件的变形, 加速砂轮钝化, 直接影响工件精度和加工表面质量; 轴向磨削力  $F_w$  作用于机床的进给系统, 但与  $F_t$  和  $F_n$  相比数值很小, 一般可不考虑。

在磨削中  $F_n$  大于  $F_t$ , 其比值  $F_n/F_t$  约等于 1.5~4, 这是磨削的一个显著特征。  $F_n$  与  $F_t$  的比值随工件材料、磨削方式的不同而不同, 见表13-1-3。从表中可以看出磨削方式的不同对比值的影响不大, 而工件材料不同则影响较大。重负荷荒磨  $F_n/F_t$  比值比其他磨削方式高。缓进给平面磨削磨削力的比值受磨削深度  $a_p$  的影响, 与一般磨削有所区别。

磨削力的计算, 现在还很不统一, 下面介绍外圆磨削磨削力的实验公式:

$$F_t = C_F a_p^\alpha v_s^{-\beta} v_w^\gamma f_r^\delta b^\epsilon \quad \text{N}$$

式中指数根据国内外学者实验研究汇总于表13-1-4, 以供参考。另外, 有关平面磨削的切向力提出了如下实验公式, 其中指数值见表13-1-5。

$$F_t = C_F a_p^\alpha v_s^{-\beta} v_w^\gamma$$

从表中可看出, 各个指数值因研究者不同而有

表13.1-3 不同磨削方式  $F_n/F_t$  的比值

磨削方式	外圆磨削			60 m/s 高速外圆磨削	平面磨削	缓进给平面磨削	内圆磨削			重负荷荒磨	砂带磨削
	被磨材料	45钢	GCr15	W18Cr4V	45钢淬火	SAE52100钢 (HRC43)	In-738	45钢未淬火	45钢淬火	1Cr18Ni9Ti	GCr15
$F_n/F_t$	~2.04	~2.7	~4.0	2.2~3.5	1.75~2.13	1.8~2.4	1.8~2.06	1.98~2.66	平均 5.2	1.7~2.1	

表13.1-4 外圆磨削力实验式的指数值

研究者	$\alpha$	$\beta$	$\gamma$	$\delta$	$\epsilon$	$C_F$		备注
						淬硬钢	22	
И. И. Ямернухи	0.6	—	0.7	0.7	—	未淬硬钢	21	$v_s = 20 \text{ m/s}$ $b_s = 40 \text{ mm}$
						铸 铁	20	A46KV5
Arzimauritch	0.6	—	0.4	0.37	—	—	—	
Koloreuritch	0.5	0.9	0.4	0.6	—	—	—	
Babtschinizer	0.6	—	0.75	0.6	—	—	—	
Norton Co	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	—	—	
渡 辺	0.88	0.76	0.76	0.62	0.38	—	—	

差别，但从中可看出各个加工条件对磨削力的大致影响。即磨削力随磨削深度  $a_p$ 、工件速度  $v_w$  及进给量  $f_s$  的增大而增大，随砂轮速度  $v_s$  的增大而减小。

表13.1-5 平面磨削力实验式的指数值

材 料	$\alpha$	$\beta$	$\gamma$	$F_t/F_n$
淬火钢	0.84	—	—	0.49
硬 钢	0.87	1.03	0.48	0.57
软 钢	0.84	0.70	0.45	0.55
铸 铁	0.87	—	0.61	0.35
黄 铜	0.87	—	0.60	0.45

由于磨削过程很复杂，影响磨削力的因素多，因此在生产中也常用测力仪或测力装置来测定。也可根据电动机实际输入功率来计算切向力  $F_t$ ：

$$F_t = \frac{P_E \cdot \eta_E}{\pi n_s d_s} \times 10^3 \text{ N}$$

式中  $P_E$ ——磨头电动机实测输入功率 kW  
 $\eta_E$ ——电动机传动效率  
 $n_s$ ——砂轮转速 r/s  
 $d_s$ ——砂轮直径 mm

这种方法适用于各种磨削方式，但只能测出切向磨削力的平均值，不能测得磨削力的瞬时值。

### 2.4.2 磨削功率

磨削功率  $P_m$  计算是磨床动力参数设计的基础。由于砂轮速度很高，功率消耗很大。主运动所消耗的功率为：

$$P_m = \frac{F_t v_s}{1000} \text{ kW}$$

式中  $F_t$ ——切向磨削力 N  
 $v_s$ ——砂轮速度 m/s

砂轮电机功率  $P_A$  由下式计算：

$$P_A = \frac{P_m}{\eta_m}$$

式中  $\eta_m$ ——机械传动总效率，一般取0.7~0.85

磨削功率也可参照图表来确定。图13.1-8和图13.1-9分别为切入外圆磨削、平面磨削的单位磨削功率图，可分别从图中查出单位磨削功率  $P_g$  (kW/( $\text{cm}^3 \cdot \text{min}^{-1}$ ))，再乘上金属切除率  $Z$  ( $\text{mm}^3/\text{min}$ )，即可得主运动所需的磨削功率。再除以机械传动效率 ( $\eta_m$ )，即可得砂轮电动机功率：



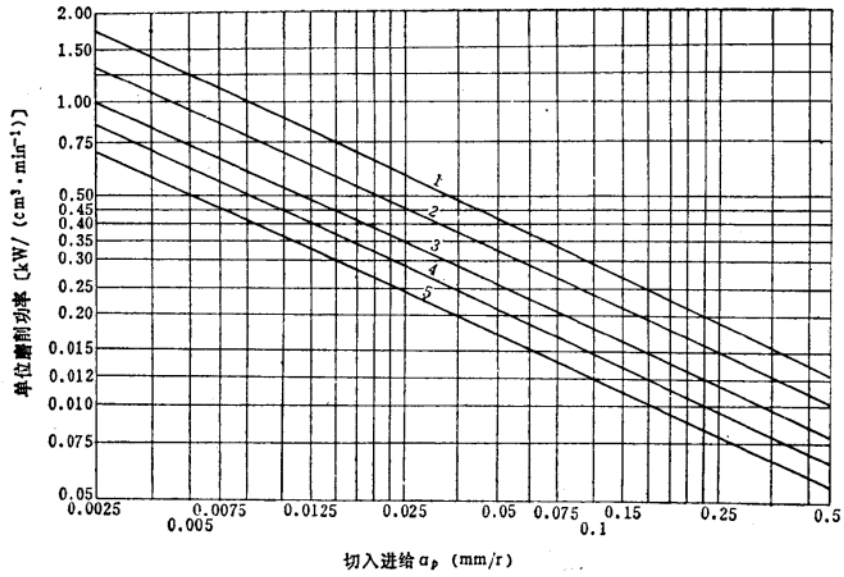


图13-1-8 外圆切入磨削单位磨削功率

- 1—低碳镍铬钼钢 (170HB) 2—铸铁 (250HB) 3—硬级砂轮磨中碳铬钼钢  
4—中硬级砂轮磨中碳铬钼钢 5—中软级砂轮磨中碳铬钼钢

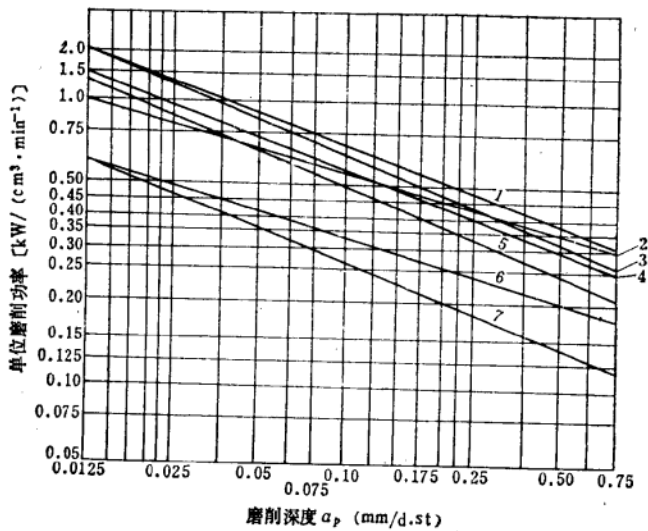


图13-1-9 平面磨削单位磨削功率

- 1—工具钢 (HRC67) 2—钛合金 (300HB) 3—镍基高温合金 (340HB) 4—低碳钢 (110HB)  
5—铸铁 (215HB) 6—铝 (80HB) 7—铝 (150HB)

$$P_A = \frac{P_f Z}{1000\eta_m} \text{ kW}$$

2.4.3 比磨削能 $\bar{u}$ 。

图13-1-10为比磨削能 $\bar{u}$ 与切削厚度的关系。图中不同的切削厚度分别与车削、铣削及磨削相对应。由图可见，随着切削厚度的减小， $\bar{u}$ 值逐渐增大。磨削时切削厚度比车、铣时薄得多，因此 $\bar{u}$ 值也大得多，这种现象称之为金属切除的尺寸效应。

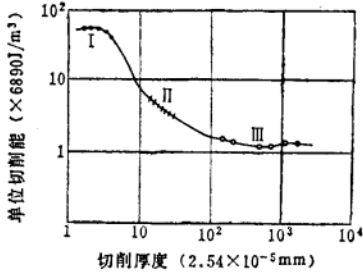


图13-1-10 比磨削能与切削厚度的关系  
I—磨削 II—铣削 III—车削

图13-1-11为比磨削能随 $v_s$ 及金属切除率 $Z$ 而变化。 $Z$ 越大， $\bar{u}$ 值越低； $v_s$ 越高， $\bar{u}$ 值也越高。在相同条件下，磨削两种不同的材料，比磨削能 $\bar{u}$ 值低的材料容易磨削。

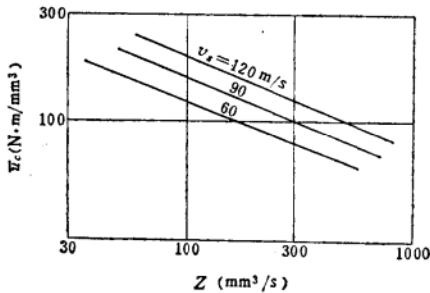


图13-1-11 比磨削能与 $v_s$ 及 $Z$ 的关系

2.5 磨削热和磨削温度

磨削过程与其他切削过程相比，单位磨削力大，磨削速度很高，因此，其比磨削能比其他切削方法大很多倍，这些能量绝大部分转化为热能。而这些热能的分配与其他切削有很大的不同，约有80%传入工件（车削约3~9%），切屑带走约4~8%，

砂轮带走约10~16%，另有少部分以传导和辐射形式散出。由于磨削速度高，热量来不及传入工件深处，而瞬时集聚在很薄的表层，形成表层中极大的温度梯度。磨粒磨削点的温度可达1000℃以上，而表层下1mm处只有几十度。当局部温度很高时，加工表面就会出现种种热损伤及热变形，影响加工表面质量与加工精度。因此，控制与降低磨削温度是保证磨削质量的重要环节。

2.5.1 磨削温度

一般所说的磨削温度是指磨削区的温度，但磨削区附近的温度高低差别甚大，一般将磨削温度分为：

(1) 磨粒磨削点温度 磨粒切削刃与切屑接触点的温度，是磨削中温度最高的部位，其值瞬时可达1000℃以上。它不仅影响加工表面质量，而且影响磨粒的破碎、磨损，与切屑粘附熔着等现象有关。

(2) 磨削区温度 砂轮与工件接触区的平均温度，一般约有500~800℃。它影响磨削表面残余应力、烧伤及裂纹等（详见第4章第7节）。

(3) 工件平均温度 指磨削热传入工件，使工件总体温度升高，一般只有几十摄氏度，它直接影响工件的形状和尺寸精度。

2.5.2 降低磨削温度的途径

(1) 合理选择磨削用量

1) 砂轮速度 $v_s$ 增高，磨削温度相应上升，越易发生烧伤。

2) 磨削深度 $a_p$ 越大，工件表面温度越高，因此宜选较小的 $a_p$ ，但 $a_p$ 过小时，则导致磨削时滑擦与刻划的能量增加，反而易引起表面烧伤。

3) 工件速度 $v_w$ 增高，产生的热量增加，但随着 $v_w$ 增加，磨削热源在工件表面上移动的速度加快，散热的条件改善，故烧伤情况减轻。

在生产实践中较有效果的措施是减小磨削深度 $a_p$ ，适当减小 $v_s$ 及增加 $v_w$ 来减少工件表面烧伤和裂纹。

(2) 正确选择砂轮 选用较粗的磨粒，采取粗修整，降低砂轮的硬度，控制砂轮磨损和防止砂轮粘着与堵塞，均能有效地降低磨削温度。其中砂轮硬度的合理选择对磨削表面烧伤影响很重要，在磨导热性差的材料、空心薄壁零件，工件与砂轮接触弧较长时，都应选较软的砂轮，以发挥砂轮的自

表13-1-6 低应力平面磨削与其他磨削主要参数比较

磨 削 方 式	低应力磨削	普通磨削	高应力磨削	缓进给磨削
砂 轮	A 46(G或H) V	A 46KV	A 46M V	A 46HV
砂轮速度 (m/s)	10~15	20	20	20~25
径向进给量 (mm/d.st)	0.0015~0.005	0.025	0.05	1~20 (mm)
纵向进给速度 (m/min)	12~15	27	36	0.3
磨削液	硫化油, 极压乳化液	乳 化 液	干 磨	乳 化 液

砺作用。

磨料的选择也有很大影响。如磨硬质合金零件, 采用碳化硅砂轮, 多数零件都出现烧伤现象。若选金刚石砂轮磨削, 则磨削力小, 干磨时摩擦系数小, 故磨削区发热量小。

在产生磨削热多和砂轮与工件接触面积大的情况下, 可采用大气孔砂轮或表面开槽砂轮。这种砂轮具有不易堵塞、切削能力强和散热快等优点。

(3) 提高冷却润滑效果 (见本章第4节)

(4) 及时修整砂轮

(5) 采用低应力磨削工艺 采用低应力磨削, 工件表面可获得低的残余拉应力, 减少表面烧伤与裂纹。所谓低应力磨削, 即在表面0.025mm以下深度时, 残余应力小于120MPa。图13-1-12所示为低应力磨削与普通磨削产生的残余应力相比较。

低应力磨削砂轮速度要低, 砂轮硬度要软, 径向进给量较小, 表13-1-6为低应力平面磨削主要参数。

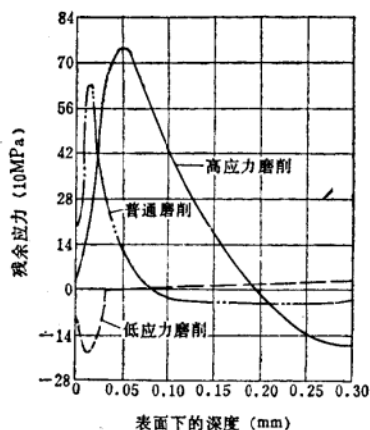


图13-1-12 不同磨削方式对残余应力的影响

低应力磨削适于磨削高强度和高温合金等精密零件, 但磨削效率低。因此, 磨削余量要小, 一般余量取0.25mm, 其中先以 $f_r = 0.01 \sim 0.02$  mm/st 切除0.2mm余量, 后再以 $0.005 \sim 0.01$  mm/st 切除剩下的余量。近来采用CBN砂轮, 由于能较长时间保持锋利的切削刃, 磨削效率有所提高。

## 第2节 磨料与磨具

磨料, 有天然磨料与人造磨料两大类。

天然磨料包括: 石英、石榴石、天然刚玉与天然金刚石等。

人造磨料包括: 刚玉系和碳化物系等普通磨料; 人造金刚石、立方氮化硼等超硬磨料以及硬度较低的磨料氧化铬、氧化铁、玻璃粉等。

现代磨具制造业主要选用人造磨料来制造磨具。各种磨料主要物理性能见表13-2-1。

磨具, 系指用结合剂或粘接剂将磨料按一定要求粘接而成的砂轮、油石、砂纸、砂带等以及用油料、水剂调合而成的研磨膏等用于磨削的工具。其大致分类见表13-2-2。

表13-2-1 各种磨料的主要物理性能

磨 料	显微硬度 (HV)	抗弯强度 (MPa)	抗压强度 (MPa)	热稳定性 (°C)
金 刚 石	天然	210~490	2000	700~800
	人造	8600~10600		
立方氮化硼	7300~9000	300	800~1000	1250~1350
碳化硼	4150~9000	300	1800	700~800
碳化硅	3100~3400	155	1500	1300~1400
刚 玉	1800~2450	87.2	757	1200

表13-2-2 磨具大致分类

分类方法	类别	内容
按磨具基本形状分类	固结磨具 涂覆磨具 游离磨粒	砂轮、砂瓦、磨头、油石等 砂布、砂纸、砂带等 研磨粉、研磨膏等
按磨料性能分类	普通磨料磨具 超硬磨料磨具	刚玉系和碳化物系磨料磨具 金刚石磨具、立方氮化硼磨具
按突出特点分类		细粒度、高硬度、高速、大气孔、超薄片状砂轮等
按专门用途分类		玉石雕琢、牙医用磨具、磨钢球、纸浆、磨米等专用磨具，以及代用金刚石修整磨具等

烧使之具有一定的形状和强度；气孔则在磨削中起容纳切屑、磨削液和散逸磨削热的作用。固结磨具的结构示意图见图13-2-1。

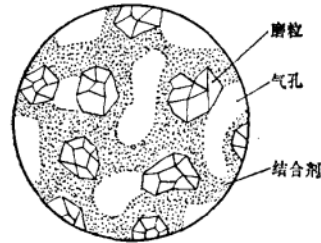


图13-2-1 固结磨具结构示意图

为改善磨具性能，可用浸渍剂浸充于气孔之内，如浸硫、浸石蜡等，以增加磨具的润滑性。也有人把浸充物质称为固结磨具的第四要素。

### 1 普通磨料磨具

普通磨料的固结磨具，由磨粒、结合剂和气孔三部分组成。磨粒以其裸露在表面部分的棱角作为切削刃；结合剂将磨粒粘接在一起，经加压与焙

#### 1.1 普通磨料及其选择

##### 1.1.1 普通磨料的品种、代号、特性及其应用范围 (表13-2-3)

表13-2-3 普通磨料品种、代号及其应用范围

系类	名称	代号	特性	应用范围
刚玉系	棕刚玉	A(GZ)	呈棕褐色，硬度较高，韧性较大，价格相对较低	适于磨削抗拉强度较高的金属材料，如碳钢、合金钢、可锻铸铁、硬青铜等
	白刚玉	WA(GB)	呈白色，硬度比棕刚玉高，韧性较棕刚玉低，易破碎，棱角锋利	适于磨削淬硬钢、合金钢、高碳钢、高速钢以及加工螺纹及薄壁件等
	单晶刚玉	SA(GD)	呈淡黄或白色，单颗粒球状晶体，强度与韧性均比棕、白刚玉高，具有良好的多棱多角的切削刃，切削能力较强	适于磨削不锈钢、高钒钢、高速钢等高硬、高韧性材料及易变形、烧伤的工件，也适用于高速磨削和低粗糙度磨削
	微晶刚玉	MA(GW)	呈棕黑色，磨粒由许多微小晶体组成，韧性大，强度高，工作时呈微刃破碎，自锐性能好	适于磨削不锈钢、轴承钢、特种球墨铸铁等较难磨材料，也适于成形磨、切入磨、高速磨及镜面磨等精加工
	铬刚玉	PA(GG)	呈玫瑰红或紫红色，韧性高于白刚玉，效率高，加工后表面粗糙度较低	适于刀具、量具、仪表、螺纹等低粗糙度表面的磨削
	锆刚玉	ZA(GA)	呈灰褐色，具有较高的韧性和耐磨性，是Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> 和ZrO <sub>2</sub> 的复合氧化物	适用于对耐热合金钢、钛合金及奥氏体不锈钢等难磨材料的磨削和重负荷磨削
	黑刚玉	BA(GH)	呈黑色，又名人造金刚砂，硬度低，但韧性好，自锐性、亲水性能好，价格较低	多用于研磨与抛光，并可用来制做树脂砂轮及砂布、砂纸等

(续)

系类	名 称	代 号	特 性	应 用 范 围
碳 化 物 系	黑色碳化硅	C(TH)	呈黑色, 有光泽, 硬度高, 但性脆, 导热性能好, 棱角锋利, 自锐性优于刚玉	适于磨削铸铁、黄铜、铅、锌等抗张强度较低金属材料, 也适于加工各类非金属材料, 如橡胶、塑料、矿石、耐火材料及热敏性材料的干磨等, 也可用于珠宝、玉器的自由磨粒研磨等
	绿色碳化硅	GC(TL)	呈绿色, 硬度和脆性均较黑色碳化硅为高, 导热性好, 棱角锋利, 自锐性能好	主要用于硬质合金刀具和工件、螺紋和其他工具的精磨, 适于加工宝石、玉石、钟表宝石轴承及贵重金属、半导体的切割、磨削和自由磨粒的研磨等
	立方碳化硅	SC(TF)	呈黄绿色, 晶体呈立方形, 强度高于黑碳化硅, 脆性高于绿碳化硅, 棱角锋利	适于磨削而粘的材料, 如不锈钢、轴承钢等, 尤适于微型轴承沟槽的超精加工等
	铈碳化硅	CC(TS)	呈暗绿色, 硬度比绿碳化硅略高, 韧性较大, 工件不易烧伤	适用于加工硬质合金、钛合金以及超硬高速钢等材料
	碳化硼	BC(TP)	呈灰黑色, 在普通磨料中硬度最高, 磨粒棱角锐利, 耐磨性能好	适于硬质合金、宝石及玉石等材料的研磨与抛光

注: 根据 GB 2476-83《磨料代号》第1号修改单(刊载于《中国标准化》1987年第1期), 括号内为旧代号, 括号外为更改后新代号, 自1987年1月1日起实施。

### 1.1.2 磨料选择应注意的问题

1) 须考虑被加工材料的性质。抗张强度较高的材料, 应选用韧性大的磨料; 硬度低、延伸率大的材料, 应选用较脆的磨料; 对高硬材料则应选择硬度更高的磨料。磨料对工件材料的适应性见表13-2-4。

2) 须注意选用不易与工件材料产生化学反应的磨料, 以减少磨具的消耗。普通磨料与某些工件材料的化学反应情况见表13-2-5。

3) 磨料在加工过程中, 会遇到不同介质, 在一定温度范围内, 会受到侵蚀、产生化学反应以至完全分解。因此, 必须在磨料选用时予以注意。刚玉和碳化物系在一定介质中和不同温度下产生化学变

表13-2-4 磨料对工件材料的适应性

材料 磨料	按 材 料 性 能						按 材 料 种 类											
	硬 度 (HRC)			延 伸 率		抗 张 强 度		碳 素 钢	碳 素 工 具 钢	淬 火 结 构 钢	合 金 钢	轴 承 钢	高 速 钢	不 锈 钢	铸 铁	球 墨 铸 铁	有 色 金 属	硬 质 合 金
	<25	25~55	>55	大	小	>70	<70											
棕刚玉	△			△	△		△	△		△	△				△	△	△	
白刚玉		△	△	△		△		△	△	△	△	△					△	
单晶刚玉			△	△	△	△		△	△	△	△	△					△	
微晶刚玉	△	△		△	△	△	△	△	△	△	△	△			△	△		
熔刚玉		△	△	△		△				△	△	△						
熔刚玉				△		△					△	△						
黑碳化硅	△	△			△		△								△	△	△	
绿碳化硅		△	△		△		△						△	△		△		△
碳化硼			△		△		△											△

注: △表示磨料对加工材料适应。

表13·2-5 普通磨料与材料的化学反应

工 作 材 料	刚 玉 系			碳 化 物 系		
	反 应	熔 着	磨 耗	反 应	熔 着	磨 耗
低 合 金 钢	无	无	小	大	有	大
镍	无	无	小	大	有	特 大
不 锈 钢	无	无	中	中	有	特 大
纯 铁	小	小	小	大	大	大
铸 铁(含Si1.4%, C2.4%)	小	小	小	中	无	小
铸 铁(含Si2.4%, C2.8%)	小	小	小	特 小	无	小
钛	大	大	大	大	大	中

注：1. SiC受磨削区高温影响，分解生成FeSi与Fe<sub>3</sub>C，故不适于加工钢材，但适于加工高Si与高C铸铁，更适合加工非铁金属Zn、Pb、Cu和非金属材料。  
 2. 刚玉与Fe不发生化学反应，故适于加工铁金属，但与SiO<sub>2</sub>反应生成3Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>·2SiO<sub>2</sub>（莫来石），故不适于加工玻璃、陶瓷等硅酸盐类材料。

表13·2-6 磨料在不同介质中化学变化的趋势

介 质	刚 玉 系	碳 化 物 系
O <sub>2</sub>	不受侵蚀	在2200℃时分解为石墨
H <sub>2</sub>	不受侵蚀	在2500~2700℃内不分解
Cl <sub>2</sub>	在C和CO存在下，生成AlCl <sub>3</sub>	600℃下安全，在1200℃下受侵蚀
S, H <sub>2</sub> S	起反应，生成Al <sub>2</sub> S <sub>3</sub>	S在1000℃以上，受侵蚀
N <sub>2</sub>	高温下与C共存，起反应	
H <sub>2</sub> O		在1300~1400℃时，与水蒸汽作用分解
酸	HF、HCl高温下受侵蚀	安定不受侵蚀
碱	溶于熔融碱	在高温下不熔融，在NaOH及KNO <sub>3</sub> 混合液中700℃时可完全分解
金属氧化物	与NiO、CaO、FeO在高温下起反应	在1000℃时，受CaO、MgO侵蚀；在1100~1300℃时，与Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> 、Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> 作用分解；在1500℃时与NiO、MgO、CaO化合；有时与金属硅酸生成CO

化的趋势见表13·2-6。

1.2 普通磨料粒度及其选择

粒度，系表示磨料的颗粒尺寸，其大小用粒度号表示，并按尺寸大小分为41个粒度号。其中4°~240°的27个号用筛选法分级，并以1in长度上有多少个筛孔来表示。如：12°粒度，是指1in长度上

有12个筛孔。用符号W表示的磨粒称为微粉，其粒度是用微粉的基本尺寸表示的。如W40，其粒度的实际尺寸为40~28μm之间。自W63~W0.5之间，共有14个粒度号。微粉是应用水力按不同沉降速度进行分选的。

磨料粒度的基本尺寸范围，分别见表13·2-7和表13·2-8。

表13·2-7 粒度号及其基本尺寸 (GB2477—83)

		μm			
粒度号	基本尺寸	粒度号	基本尺寸	粒度号	基本尺寸
4°	5600~4750	20°	1180~1000	70°	250~212
5°	4750~4000	22°	1000~850	80°	212~180
6°	4000~3350	24°	850~710	90°	180~150
7°	3350~2800	30°	710~600	100°	150~125
8°	2800~2360	36°	600~500	120°	125~106
10°	2360~2000	40°	500~425	150°	106~75
12°	2000~1700	46°	425~355	180°	90~63
14°	1700~1400	54°	355~300	220°	75~53
16°	1400~1180	60°	300~250	240°	75~53



表13-2-8 微粉粒度号及其基本尺寸

(GB 2477-83)  $\mu\text{m}$

粒度号	基本尺寸	粒度号	基本尺寸
W63	63~50	W7	7~5
W50	50~40	W5	5~3.5
W40	40~28	W3.5	3.5~2.5
W28	28~20	W2.5	2.5~1.5
W20	20~14	W1.5	1.5~1.0
W14	14~10	W1.0	1.0~0.5
W10	10~7	W0.5	0.5及更细

表13-2-9 不同磨削条件选择

磨料粒度的趋势

粗	←	粒 度	→	细
大	←	加工余量	→	小
粗	←	加工粗糙程度	→	精
软、粘	←	工件材质	→	硬、脆
宽	←	加工时接触面积	→	窄
大	←	砂轮直径	→	小
粘	←	结合剂性质	→	脆

粒度的选择应考虑加工工件尺寸、几何精度、表面粗糙度、磨削效率以及如何避免某些磨削缺陷的产生等因素。一般说，要求工效高、表面粗糙度较高、砂轮与工件接触面大、工件材料韧性大和延伸性较大以及加工薄壁工件时，应选择粗一些的粒度；反之，加工高硬脆、组织紧密的材料，精磨、成形磨或高速磨削时，则应选择较细的粒度。按磨削条件和磨削方式选择磨料粒度分别见表13-2-9和图13-2-2。

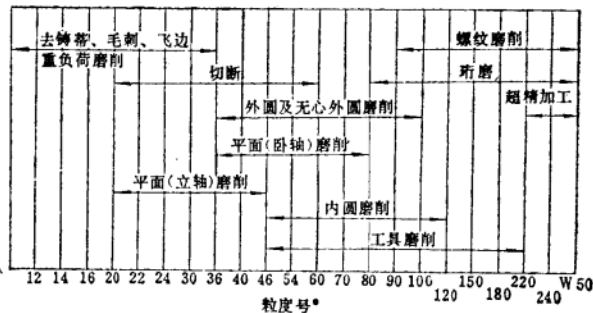


图13-2-2 不同磨削方式选用磨料粒度的范围

图13-2-2中未能表达的微粉范围：W40主要用于螺纹磨、珩磨、精磨及超精磨；W28~W7主要用于精磨、超精磨及制造研磨剂；W5及更细粒度主要用于超精磨、镜面磨和制造研磨剂等。

1.3 普通磨具硬度及其选择

磨具硬度是指磨具工作时在外力作用下磨粒脱落的难易程度。磨粒易脱落，则磨具硬度低，反之，硬度就高。

1.3.1 磨具硬度等级及代号 (表13-2-10)

表13-2-10 磨具硬度等级及其代号

硬 度 等 级 名 称		代 号	
大 级	小 级	GB 2484-84	GB 2484-81
超 软	超 软	D, E, F	CR
软	软 1~3	G, H, J	R1~3
中 软	中 软 1~2	K, L	ZR1~2
中	中 1~2	M, N	Z1~2
中 硬	中 硬 1~3	P, Q, R	ZY1~3
硬	硬 1~2	S, T	Y1~2
超 硬	超 硬	Y	CY

1.3.2 磨具硬度的选择

不同磨削条件选择磨具硬度的趋势见表 13.2-11。

表13.2-11 不同磨削条件选择磨具硬度的趋势

软 ←	硬 度	→ 硬
硬、脆 ←	工件材质	→ 软、粘
宽 ←	加工时接触面积	→ 窄
高 ←	砂轮速度	→ 低
低 ←	工件转速	→ 高
良好 ←	机床精度	→ 不良
熟练 ←	操作者熟练程度	→ 不熟练

此外，还应注意：

- 1) 加工导热性能差的金属材料及树脂、橡胶等有机材料，磨削薄壁件，采用深切缓进给磨削，选择磨具硬度应低些，镜面磨削选择超软磨具；
- 2) 工件材料相同，加工外圆比加工平面、内孔，成形磨削比一般磨削，应选择硬度高些的磨具；
- 3) 高速、高精密、间断表面磨削，钢坯荒磨、

工件去毛刺等，应选择较硬磨具；

4) 用砂瓦和筒形砂轮端面加工平面，砂瓦的硬度可选择高一些；

5) 工作时自动进给比手动进给，湿磨比干磨，树脂结合剂砂轮比陶瓷结合剂砂轮，选择硬度均应高些。

不同切削方式选择磨具硬度范围见图13.2-3。

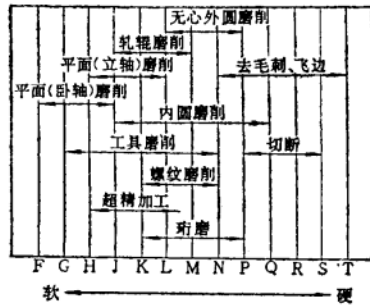


图13.2-3 不同切削方式选择磨具硬度范围

1.4 普通磨具结合剂及其选择

结合剂的代号、性能及其适用范围见表 13.2-12。

表13.2-12 结合剂代号、性能及其适用范围

类别	名称及代号 (GB 2484—84)	原 料	性 能	适 用 范 围
无机结合剂	陶瓷结合剂 V(A)	粘土、长石、硼玻璃、石英及滑石等	化学性能稳定，耐热，抗酸、碱，气孔率大，磨损小，强度较高，能较好保持磨具的几何形状，但脆性较大	适用于内、外圆、无心、平面、螺纹及成形磨削以及刃磨、珩磨及超精磨等；适于对碳钢、合金钢、不锈钢、铸铁、有色金属以及玻璃、陶瓷等材料进行加工
	菱苦土结合剂 Mg(L)	氧化镁及氯化镁等	工作时发热量小，其结合能力次于陶瓷结合剂，有良好的自锐性，强度较低，且易水解	适于磨削热传导性差的材料及磨具与工件接触面较大的工件，还广泛用于石材加工和磨米
有机结合剂	树脂结合剂 B(S)	酚醛树脂或环氧树脂等	结合强度高，具有一定的弹性，能在高速下进行工作，自锐性能好，但其耐热性、坚固性较陶瓷结合剂差，且不耐酸、碱	适用于荒磨、切断和自由磨削，如磨削铸钢，打磨铸、锻件毛刺等；用来制造高速、低粗糙度、重负荷、薄片切断砂轮，以及各种特殊要求的砂轮
	橡胶结合剂 R(X)	合成及天然橡胶	强度高，弹性好，磨具结构紧密，气孔率较小，磨粒钝化后易脱落，但耐酸、耐油及耐热性能较差，磨削时有臭味	适于制造无心磨砂轮，精磨、抛光砂轮，超薄型切割用片状砂轮以及轴承精加工用砂轮

注：括号内代号为旧代号，见GB 2484—81。

1.5 普通磨具组织及其选择

磨具的组织是表示磨具中磨料、结合剂和气孔三者之间不同体积的比例关系。当前两者占据的体积增大时，气孔所占体积就小，组织就紧密，反之，组织就较疏松。

磨具组织的表示方法有两种，

一是以磨具中气孔的数量和大小——气孔率来表示的，见表13·2-13。

表13·2-13 以气孔率表示的磨具组织

松紧程度	高密度	中等密度	大气孔
气孔率(0/00)	趋于0	20~40	40~60或更高

二是以磨料在磨具体积中所占百分比——磨粒率来表示的。此法间接地反映了磨具的松紧程度，也反映了磨具工作部位的单位面积上可参加切削的磨粒数目的多少。磨粒率的大小，一般是通过工艺配方进行控制的。以磨粒率表示磨具组织及其适用范围见表13·2-14。

在组织号14以外，还发展了大气孔砂轮。即在

表13·2-14 以磨粒率表示的磨具组织(GB 2484—84)及其应用范围

组织号	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	
磨粒率(%)	62	60	58	56	54	52	50	48	46	44	42	40	38	36	34	
适用范围	重负荷磨削，成形、精密磨削，间断磨削及自由磨削，或加工硬脆材料等				无心磨、内、外圆磨和工具磨，淬火钢工件磨削及刀具刃磨等				粗磨和磨削韧性大、硬度不高的工件，机床导轨和硬质合金刀具磨削，适合磨削薄壁、细长工件，或砂轮与工件接触面大以及平面磨削等				磨削热敏性较大的钨钼合金、钛钢、有色金属以及塑料、橡胶等非金属材料			

表13·2-15 砂轮自身因素对其强度的影响

砂轮自身的因素	砂轮强度		砂轮自身的因素	砂轮强度	
	较高	较低		较高	较低
磨料(对陶瓷结合剂而言)	WA、SA	A、MA	孔径与外径比	小	大
粒 度	细	粗	厚 度	厚	薄
硬 度	硬	软	形 状	平 形	异 形
组 织	紧	松	不平衡值	小	大
结 合 剂	有 机	无 机	补强措施	有	无

砂轮工艺配方中加入一定数量的精萘或碳粒，经焙烧挥发后形成大气孔。

1.6 普通磨具强度及其选择

磨具强度系指磨具在高速旋转中离心力的作用下，抵抗其自身破碎的能力。为确保磨具在工作时不致破碎，就要求其破碎速度和工作速度保持一定的比例关系。这种关系用安全系数  $f_{..}$  来表示。砂轮最高工作线速度  $v_{..}$  在60 m/s 及以下时， $f_{..}=2$ ； $v_{..}$  为80 m/s 时， $f_{..}=1.8$ 。

砂轮出厂前检验速度  $v_0$  为砂轮最高工作线速度  $v_{..}$  乘以检验系数  $f_0$ ，即：

$$v_0 = v_{..} \times f_0$$

$f_0$  的数值略低于  $f_{..}$ ， $v_0$  在35~80 m/s 内， $f_0$  均为1.6。

影响砂轮强度的因素很多，除在使用时应严格遵守操作规程外，砂轮自身的各种因素，对强度也有很大影响，见表13·2-15。

国家对各类磨具的最高工作线速度作了明确规定，见表13·2-16。此表适用于最高工作线速度不小于15 m/s 的各类型磨具。