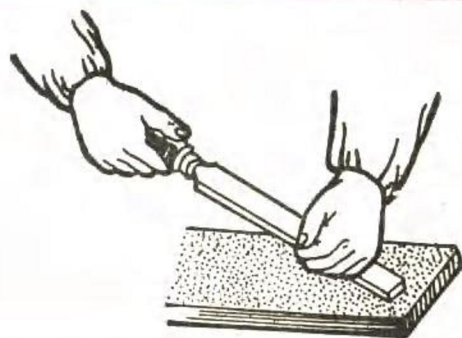


机械工人学习教材

JIXIE GONGREN XUEXI CAILIAO

研 磨

金 令 诚 编 著



机械工业出版社

机械工人学习材料

研 磨

金令诚 编著

钳 工

机械工业出版社

目 次

一 概述.....	(1)
1 研磨的分类(1)——2 研磨机理(2)——3 研磨的特点(5)——4 研磨用量(7)——5 材料的研磨性和研磨余量(9)	
二 研磨剂.....	(12)
1 磨料(12)——2 研磨辅料(17)——3 研磨剂(22)	
三 研磨工具.....	(27)
1 要求(27)——2 材料(27)	
四 平板研磨法.....	(29)
1 平板的研磨(29)——2 压砂(35)——3 打砂(37)——4 零件研磨操作法(38)——5 典型零件的手工研磨(39)——6 机械研磨(55)	
五 专用研具研磨法.....	(67)
1 圆柱面和圆锥面的研磨(67)——2 中心孔的研磨(77)——3 小平面和成型面的研磨(78)——4 球面的研磨(80)	
六 对研法.....	(85)
1 精密配合件(85)——2 多环导轨(93)——3 端齿盘(94)	
七 抛光.....	(97)
八 特种研磨.....	(101)
1 振动研磨(101)——2 液体抛光(105)	
九 研磨常用的测量方法.....	(107)
1 自准直光管测量法(107)——2 技术光波干涉法(115)——3 光隙量法(121)	

一 概 述

用研磨工具和研磨剂从工件表面上磨去一层极薄的金属，使工件表面达到精确的尺寸、准确的几何形状和很高的表面光洁度。这种精密加工的方法，叫做研磨。

经研磨后工件的尺寸精度可达 $0.001\sim 0.005$ 毫米，表面光洁度可达 $\nabla 10\sim \nabla 14$ ，并能使两个工件的接触面达到精密的配合。

1 研磨的分类 研磨的分类方法很多，可按被加工表面的形状分(如平面研磨、外圆研磨、内孔研磨等)，按被加工工件的材料分(如黑色金属研磨、有色金属研磨等)，按操作方式分(如手工研磨、机械研磨等)；按加工工序分(粗、细、精等研磨)等等。

研磨按加工方法来分类可分为干研磨、湿研磨和抛光。现将它们的特点分别介绍如下：

一、干研磨 又叫嵌砂研磨、压砂研磨。这种研磨方法既能获得极高的加工精度，又能得到优良的表面光洁度。但研磨效率较低。主要应用于黑色金属的最后精加工。

干研磨的主要特点，是把磨料嵌入研磨工具表面，使之具有切削能力。当零件在上面作相对滑动时，露出研具表面的微刃就起切削作用。

研磨零件之前，首先应将按一定比例配制的研磨混合剂均匀地涂在研具表面上。当两互相吻合的研具，在一定压力的作用下，以一定的运动轨迹作相对滑动时，磨料在两者之间

滑动、滚动，於是产生摩擦、挤压和搓动作用，迫使磨料嵌入研具表面。其中的研磨辅料促进了这一过程的进行。

二、湿研磨 又叫敷料研磨。湿研磨不但具有较高的研磨效率，而且能加工各种形状的零件，因而应用广泛。

由于湿研磨的整个研磨过程中，不断而充分地添加研磨剂，因而经常有新的锋利的磨料加入，从而得到有力的研削作用。钝化了的磨料和研屑，可以从旁边流出或被清除。因此，研磨量和研磨时间基本上成正比关系，即单位时间内的研磨量是一个常数。

虽然，湿研磨的生产率很高，但被研表面容易产生塌边、变凸、划痕、光亮度差等缺陷。这是由于研磨剂的尖劈作用所致。如果经常改变研磨方向，被研表面就容易产生球面。尤其是粘滞的研磨剂层，影响更加明显。

湿研磨一般用于粗加工和要求不高的零件。如果操作得当，湿研磨也能得到良好的研磨质量，因而它也用于精加工。

三、抛光 作为零件最后一道微量的光整加工。研磨量很小，主要用于提高被研表面的光洁度。抛光一般不能提高精度，有时甚至降低精度。由于抛光可以得到十分理想的光洁度，因而广泛得到了采用。

抛光一般用纺织品作研具材料。随着新工艺不断地涌现，出现了液体抛光、化学抛光、电化学抛光等、适合于形状复杂零件加工的工艺。

抛光除了作为最后精加工外，还可以作为镀铬、镀镍之前的准备工序。

2 研磨机理

一、切削理论 因为磨料比零件具有更高的硬度，当零

件在一定压力的作用下，在磨料上相对滑动时，其尖刃就起切削作用。无数颗砂粒的切削作用，就构成了研磨加工。

二、化学作用理论 零件的光洁表面，在化学活性物质（空气中的氧气）的作用下，覆盖着一层极薄的氧化膜，保护着金属不再进一步被化学反应。研磨剂中的磨料将所有凸起部分的保护膜破坏了，露出了材料的新鲜面，露出的地方又重新开始化学作用，将所有的表面又覆盖上一层均匀的薄膜。接着保护膜又被磨料剥去。这样反复的作用，就使表面达到平整光洁。

暴露在空气中的金属表面，在氧化作用下所生成的氧化膜，具有以下特点：

- （1）膜很薄，只有14~20埃（1埃=0.0001微米）；
- （2）形成很快，在钢铁表面生成只需0.05秒钟；
- （3）有很高的耐腐性，保护着金属不再进一步被氧化；
- （4）具有强烈的吸附能力；
- （5）容易脱落，用较软的磨料就能去除。

实验证明，在氧化力强的气体中，抛光效率就高，反之就低。

三、塑性变形理论 研磨的过程是塑性变形的过程。零件与研具表面峰谷相间，当互相推搓摩擦时，金属结构产生滑移，波峰补平波谷。因此，砂粒不仅是微小的切削刃，而且也是“小滚子”。

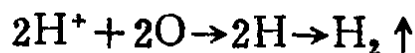
四、热熔理论 粗糙表面在研磨过程中，互相摩擦而产生热量，使极薄的表层在一瞬间熔化，微量不平度的波峰补平波谷。实验证明，研磨表面的温度很高，足以使金属熔化。

五、电化学反应 金属具有从原子状态变为离子状态，

并以离子状态进入溶液的性质，因此，当金属和研磨剂接触之后，金属以离子状态进入研磨剂，而在金属表面留下一定数量的电子。这样一来，金属表面上的电子和进入研磨剂中的金属离子，发生了静电吸引力，金属离子被吸附在电子周围，形成了双电层，并在金属与研磨剂之间产生了电位差。如果没有外界因素的作用，上述反应就会很快达到平衡（图1）。假如在研磨剂中加入一些吸收金属电子的研磨辅料，那末

金属表面由于电子的丧失，金属离子会因失去静电吸引力而脱离金属表面跑到研磨剂中去。磨料的切削作用和相互摩擦作用，加速了这一过程。例如，油酸里的

氢离子，吸收金属表面的电子变成氢气，并在金属表面放出：



下面结合实践，简要地谈一下研磨的基本原理。

干研磨，主要是嵌入平板表面的砂粒起切削作用。当零件在研磨压力的作用下，在嵌有砂粒的平板上相对滑动时，砂粒对被研表面的高点产生压缩作用，由于内应力的增大而产生弹性变形。当应力超过屈服点后，就进入塑性变形，晶粒和晶粒之间产生滑移，随着变形的增大，最后失去联系而破裂，这就是所谓的研屑。研磨辅料的存在，改善了切削条件，促进了研磨质量和效率的提高。当然，在切削作用的同时，还存在着其它一些辅助作用。如氧化膜的形成和去除；砂粒挤压产生的塑性变形作用；摩擦和切削所引起的热熔作用；这些作用随着磨料粒度的细化而增强。

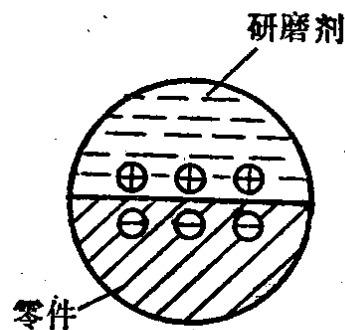


图1 研磨中的电化现象

湿研磨，由于不间断地添加研磨剂，不但有新砂粒参加研削，而且砂粒的各个微刃变换切削，使各个锋刃都发挥了作用，同时冷却润滑条件良好。随着研磨剂中活化辅料的增加，化学作用和电化学反应也随之增强。这是使之成为高效率研磨方法的主要原因。

抛光是一个十分复杂的加工过程。研磨剂中品种繁多的活化物质大量增加，化学作用十分活跃频繁，磨料只起到破坏氧化膜的作用。同时，某些磨料的本身就起着化学作用。如氧化铬中的游离硫磺蒸气与金属表面起化学作用，形成了一层很薄的强度很低的硫化膜，它对硬脂酸和氧化铬起吸附作用。当零件与研具相对滑动时，吸附在零件表面的氧化铬将高点的硫化膜破坏，重新露出新鲜金属，复而又形成硫化膜，就这样反复不断地对零件的波峰进行光整加工。

由于研具用极柔软的材料制成，砂粒在抛光过程中，往往存在于软基体之中，因而在一定范围内，磨料的粒度对抛光效果影响不很明显。

3 研磨的特点

一、提高了零件的加工精度

1. 尺寸精度高：研磨采用极细的磨料作刀具，同时又伴有化学反应等十分复杂的作用过程，因此研削作用极微小（对零件进行以0.1微米，甚至0.01微米微量切削）；同时可以随时中断加工进行测量。长度尺寸精度可达0.025微米。

2. 形位精度高：由于研削极微，研磨运动极为复杂，而且又不受运动精度的影响，因此可以得到很高的形状精度。平面度精度可达0.03微米；标准球圆度精度可达0.025微米；圆柱体圆度精度可达0.1微米；就是工艺性较差的内孔，也能得到0.3微米，甚至更高的圆度精度。

研磨对平面位置精度的提高是十分有效的，如平行度、垂直度、倾斜度、对称度、端面跳动等。对两通孔的同轴度也有着良好的作用。如微分螺杆螺距精度可达0.3微米；多齿分度台分度精度可达 $0.1''$ ；72面棱体分度精度可达 $1''$ ；两孔同轴度精度可达0.3微米。

3. 无表面波度：由于研磨运动没有强制性的导引，机床——工具系统的振动对研磨没有任何影响，因此不存在表面波度。这是研磨表面具有良好质量的主要原因之一。

4. 表面光洁度高：研磨可以得到光泽夺目的镜面，这是其它加工方法很难达到的十分可贵的特点。

二、改善了零件表面的性质

1. 使摩擦系数及磨损减少：虽然磨削是精加工的主要方法，但是由于磨削在大负前角下切削，零件表面存在着被磨粒划破、刮削、剪移等现象，表面的结晶组织遭受了严重的破坏。这种表层（俗称软皮）是不耐磨的。而研磨所用的砂粒微小，速度很低，刮削过程十分轻微。同时无振动痕迹，无塑性变形所引起的显微裂缝、撕破等现象。由于研磨可以得到高的表面质量，使摩擦系数减小，实际有效接触面积增大，耐磨性提高。

2. 使配合性质改善、工作精度提高：由于研磨表面具有很高的光洁度、极小的形位误差、准确的尺寸精度，因而配合间隙均匀，局部磨损减少，振动和噪声减轻，迴转精度提高，使用寿命延长。同时提高了配合的密封性。

3. 使表面强度得到提高：零件的表面状况直接影响对应力的敏感性。如磨削的淬硬钢表层存在残余拉应力，这种表面容易产生密致的显微裂纹，或在承受交变负荷时发生裂纹。而研磨表层存在的是残余压应力，这种应力有利于提高

零件表面的疲劳强度。

4. 使耐腐蚀性增强：由于研磨表面光洁度很高，又没有显微裂纹，水分、灰尘等有害物质的积聚能力差，因而不易生锈。

5. 表面美观：研磨有时作为增加零件表面美观性的一种手段。

6. 使其它物理性能得到改善：研磨可提高零件表面的反光系数；电的物理性能。如激光腔、无线电零件的抛光。

三、工艺特点

1. 设备简单、制造方便：研磨所需的工具简单，可以因地制宜就地取材。研磨机的精度要求不高，易于采用自制设备改装。

2. 适应性好：研磨不但适宜单件小批生产，也适合大批大量生产；不但适宜平面加工，也适合复杂形状表面的精加工；不但适宜设备简单、工艺水平低的小厂，也适合设备良好、工艺水平高的大型企业。而且能加工黑色金属、有色金属和非金属。

3. 其它工艺特点 磨料粒度细，研磨速度低，研磨压力小，加工余量少。研具材料的硬度一般比零件低；研具在研磨过程中也同时受到研削与磨损。易于实现机械化。

4 研磨用量

一、研磨速度(v) 在一定的范围内，研磨作用随着研磨速度的提高而增强(图2)。但是，过高的研磨速度会造成发热现象，甚至烧焦被研表面；由于离心力增大，会使研磨剂飞溅流失；被研零件受到冲击作用，运动平稳性显著下降；研磨剂尖劈作用增大，使被研表面形状精度降低；加快了研具不均匀的磨损。

研磨速度很低,通常为10~150米/分,手工研磨和高精度零件研磨为0.5~30米/分。抛光时采用较高的研磨速度,不但能提高研磨效率,而且给质量带来有益的影响。

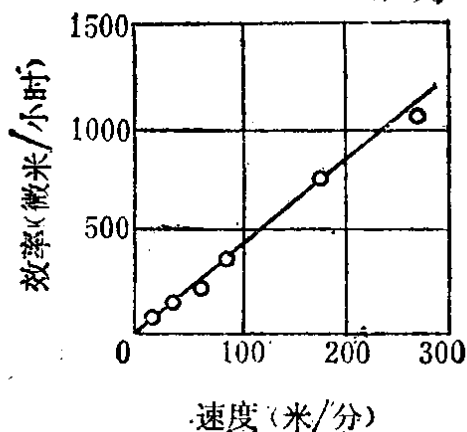


图2 研磨速度对效率的影响
工具钢(HRC63)试件;刚玉W10~W28和油配成的研磨剂;研磨压力0.85公斤/厘米²。

度零件研磨为0.5~30米/分。抛光时采用较高的研磨速度,不但能提高研磨效率,而且给质量带来有益的影响。

二、研磨压力(P_0) 研磨表面单位实际接触面积所承受的压力称为研磨压力。可按下式计算:

$$P_0 = \frac{P}{NS} \quad (\text{公斤力/厘米}^2)$$

式中 P ——总的压力 (公斤力);

N ——每次研磨的零件数 (个);

S ——每个零件实际接触面积 (厘米²)。

研磨过程中,研磨压力是一个变值。这是由于刚开始研磨时,零件表面粗糙、形状误差大,零件和研具的接触面积较小(图3a)。随着研磨的进行,被研表面和研具的实际接触面积逐渐增大,研磨压力 P_0 随之降低,直至接近理论值 P_0 时才稳定下来(图3b,曲线1)。为了弥补 P_0 在研磨过程中的剧烈变化,应不断改变总的压力 P ,使曲线变得缓和一些(图3b,曲线2)。

手工研磨平面时,由于人的体力是有限的,随着接触面积的增大,研磨压力逐渐降低(图4)。

研磨压力 P_0 过小,研磨效率显著下降; P_0 过大,研具不均匀的磨损加快,研磨表面光洁度降低。通常研磨硬材料比软材料高;湿研磨比干研磨高;粗研磨比精研磨高。一般研磨压力为0.1~3公斤力/厘米²。

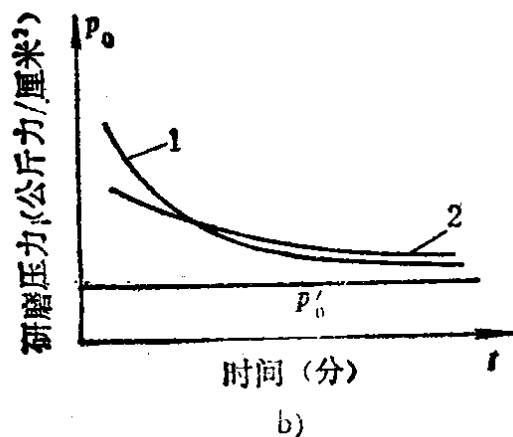
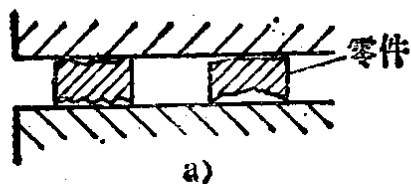


图3 研磨过程中研磨压力 p_0 的变化

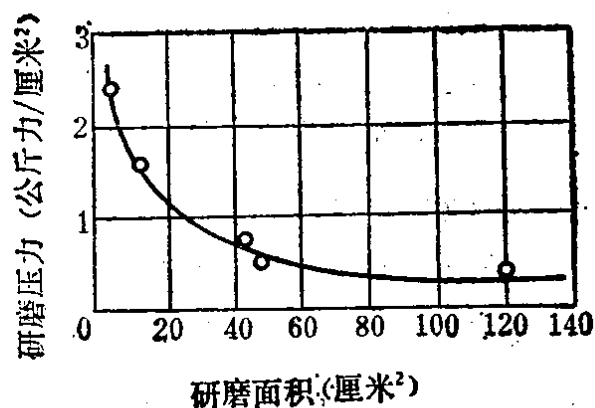


图4 手工研磨压力和研磨面积的关系

三、研磨运动 研磨运动直接影响研磨质量和研具的使用寿命。研磨运动应满足以下几点要求：

(1) 研磨运动不能在力的作用方向，以及研削方向有强制性的外力导引，被研零件和研具应处于浮动的自由状态。

(2) 研磨运动的方向应不断地改变，保证砂粒经常从新的方向上起研削作用。这样研磨纹路纵横交错不会重复，粗细深浅相互抵消。

(3) 当研具理想形状需要通过研磨达到时，研磨运动应保证研具获得理想形状，并尽可能长久地使其保持不变。

(4) 研磨运动尽可能使零件接近理想的几何形状。

(5) 研磨运动应平稳一致。

5 材料的研磨性和研磨余量

一、材料的研磨性（即材料的加工性） 按被研材料的硬度可分硬材料、软材料和特硬材料。

硬材料：经淬火(HRC50~65)的碳素工具钢、合金工具钢、滚动轴承钢、渗碳钢等，这类材料具有高的硬度和良好的耐磨性，理想的强度，足够的尺寸稳定性，且研磨性良好。广泛应用于量具、量仪以及各种精密零件的制造。

软材料：有色金属及未经淬火的钢、铸铁等，这类材料硬度低，研磨性好，但精度和光洁度不容易提高。有色金属抛光性较好，可以得到理想的镜面。因材料软，容易嵌入砂粒，所以它们不适宜于湿研磨。

特硬材料：包括硬质合金、玛瑙、刚玉、碳化硼、氮化钢等，它们具有极高的硬度和良好的耐磨性，性脆，研磨性很差，磨料极易钝化，研磨效率低。

二、研磨余量(Δ) 研磨所必需的余量为：

$$\Delta = \Delta_1 + \Delta_2 + \Delta_3 + \Delta_4$$

式中 Δ_1 ——前道工序最大的形状误差；

Δ_2 ——零件最大的尺寸差；

Δ_3 ——被研表面存在的缺陷（划痕、碰伤、烧焦等）；

Δ_4 ——提高精度和光洁度必须的研磨量。

通常确定研磨余量有以下两种方法：

一种是加大研磨余量，降低预加工的精度和光洁度要求，以粗研磨代替精磨。研磨余量一般为0.02~0.05毫米。适合于研磨机械化程度高，成批大量生产。

另一种是减少研磨余量，提高预加工精度。适用于精度要求高，研磨性差或单件生产。

三、零件的结构形状 材料的研磨性和零件的结构形状有着密切的联系。因为零件和研具必须作相对运动，图5a中的形状就没有满足这一要求，需将其结构加以改进(图5b)，

同时零件的刚性要好，尽量避免薄壁表面。

四、研磨工时 初研阶段研磨压力 P_0 大,砂粒锋利,余量去除快,研磨量和时间是幂函数的关系。精研阶段压力降低并较稳定,砂粒细化,研磨效率低,研磨量 Δ 和研磨时间 t 的关系近似于线性函数(图6)。即:

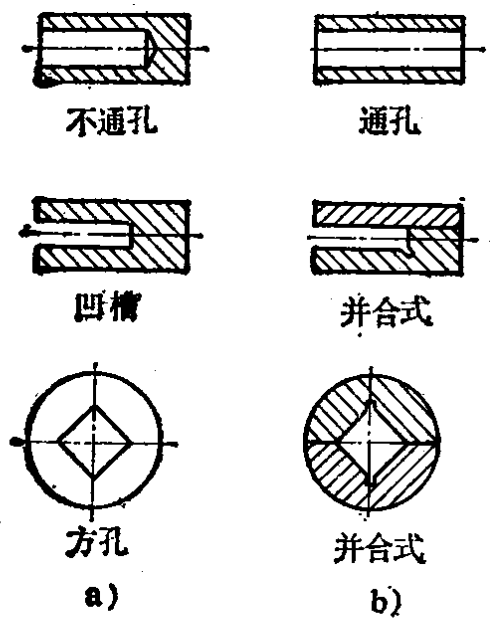


图5 零件的结构形状

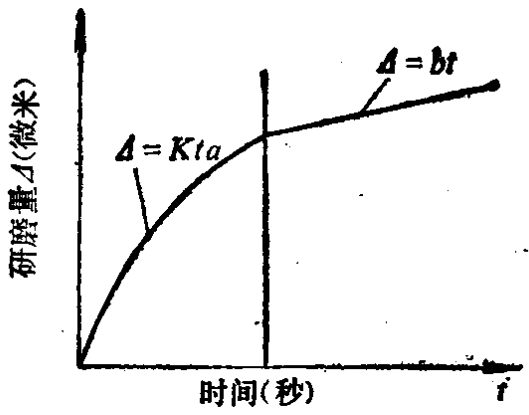


图6 研磨余量和研磨时间的关系

$$\Delta_{初} = Kta$$

$$\Delta_{精} = bt$$

式中 K ——初研效率系数;
 a ——初研幂指数常数;
 b ——精研效率系数。

系数 K 与 b , 可由 $\Delta-t$ 关系的实验结果, 在重对数坐标纸上作图求得, 也可用量纲分析法求得。 K 值的大小表明研磨效率的高低, 在不影响质量的前提下, 尽可能提高 K 值。影响 K 值的主要因素有研磨压力、研磨速度、零件的形状误差和位置误差, 特别是磨料的粒度及研磨剂的成分。 b 值的大小根据研磨质量的要求, 由试验法确定。 b 值过大, 利少弊

多。

二 研 磨 剂

研磨剂是由磨料和研磨辅料配制而成的混合物。

1 磨料

一、种类和性质 磨料按硬度可分为硬磨料和软磨料。按其来源可分为天然磨料和人造磨料。

常用的磨料一般有以下几种：

1. 金刚石：它是一种同素异晶体，硬度最高，但很脆。金刚石分人造金刚石（代号JR）和天然金刚石（代号JT）。硬度：莫氏硬度10；显微硬度8000~10060公斤/毫米²，洛氏硬度14000。比重约3.5。研削性能优良，但价格昂贵，主要用于特硬材料的研磨，如碳化硼、硬质合金、宝石及淬火钢的精加工。

2. 碳化硼：代号为TP。莫氏硬度为9.3~9.6，显微硬度为4500~6350公斤/毫米²。比重2.48~2.52。性脆，易分裂成锋利的小颗粒，能保持良好的研削性能，但价格较贵。适用于玛瑙、宝石、硬质合金、硬铬、淬火钢等高硬度零件的研磨。它是金刚石的代用品。

3. 碳化硅：分黑色碳化硅（代号TH）和绿色碳化硅（代号TL）。莫氏硬度为9.13~9.75，显微硬度为2840~3220公斤/毫米²。比重3.12~3.22。黑色碳化硅的研削刃锋利，但韧性低，适用于研磨抗拉强度低、性脆的金属和非金属。如铸铁、黄铜、玻璃、非金属材料。绿色碳化硅比黑色碳化硅具有更高的硬度、更大的脆性、更强的研磨能力，用于研磨硬质合金、淬硬钢等硬而脆的材料。

4. 刚玉：又叫氧化铝(Al_2O_3)、金刚砂。莫氏硬度9~9.2；显微硬度 2000~2600 公斤/毫米²；洛氏硬度 1000。比重3.2~4.0。它具有高的硬度和好的韧性，因而得到了广泛地应用。

刚玉分天然和人造两种。天然刚玉由于成分不纯，研磨能力差，已被人造刚玉代替。

(1) 普通刚玉 $\ominus$ (代号G)：灰褐色、暗蓝色、棕色晶体，一般 Al_2O_3 含量在95%以上。晶体呈菱形；韧性好，能承受很大的压力，研磨能力较低。适用于铸铁、钢及合金、有色金属、玻璃等各种材料的研磨。

(2) 白刚玉(代号GB)：又叫白色氧化铝。颜色由白色到浅玫瑰色。白刚玉中 Al_2O_3 含量占98.5~99%。它具有高的硬度和好的韧性。研磨时颗粒不易破碎，往往钝化后接近于球形。所以不但具有高的研磨能力，而且能获得良好的光洁度。适用于淬硬钢、铸铁、有色金属、宝石、玻璃等各种材料的研磨。特别适用于淬硬钢的精加工。

(3) 铬刚玉(代号GG)：颜色为粉红色、玫瑰色、紫红色等。强度很好，韧性较高。适用于光洁度要求较高的钢及合金的研磨。

(4) 单晶刚玉(代号GD)：颜色为棕色、浅黄色，且透明多棱。硬度高，强度大，韧性好。颗粒呈球形。适用于有色金属、不锈钢的研磨。

(5) 棕刚玉(代号GZ)：棕褐色。硬度次于白刚玉，韧性好，颗粒锋利。适用于研磨碳钢、合金钢、铸铁、硬青铜等。

$\ominus$ 普通刚玉：在磨料标准JB1181—71中未作规定。

(6) 微晶刚玉(代号GW): 颜色与棕刚玉近似。强度高、韧性好、自锐性好。颗粒由微小晶体组成。具有良好的切削性能和耐用度。适用于研磨淬硬钢、不锈钢、特种球墨铸铁。

刚玉中 Al_2O_3 含量愈多, 硬度就越高, 韧性稍有降低。

5. 氧化铬(Cr_2O_3): 莫氏硬度7~7.5, 显微硬度1120~1220公斤/毫米², 洛氏硬度20。比重5.21。颜色有深绿色、绿色、草绿色三种。深绿色的硬度最高, 绿色的中等, 草绿色的最低。在氧化铬中含有适量的硫(不超过5%), 可以提高研磨质量。氧化铬主要用来配制研磨膏。适用于黑色金属和有色金属的研磨, 具有良好的抛光性能。

6. 氧化铁(Fe_2O_3): 又叫红丹粉、铁红粉、红粉。莫氏硬度4~7; 显微硬度1089~1120公斤/毫米²。比重5.24。由于焙烧温度不同, 颜色由红至深红、黄红、紫色等。适用于抛光玻璃、有色金属、水晶、钢及合金。但抛光效率低, 抛光表面易出现白点, 放久后色泽黯淡。

7. 氧化铈(CeO_2): 莫氏硬度7~8。比重约7.3。由于制造工艺和氧化铈含量不同, 它的颜色有白色、淡黄色、棕黄色等。抛光效率是氧化铁的1.5~2倍。主要用于硬脆材料抛光, 如玻璃、单晶硅等。

8. 其它磨料: 氧化镁: 白色粉末, 性质软而细。主要用于硬脆材料的抛光, 如单晶硅等。礬土: 呈深绿色和绿色。是氧化铬的代用品, 适用于研磨钢及软金属。抛光表面可长久保持光泽。石英粉: 天然磨料, 由无定形(非晶形)的氧化硅(SiO_2)构成。莫氏硬度7; 显微硬度1000~1100公斤/毫米²。比重2.6。主要用于制造研磨膏。其它还有维也纳石灰粉、石榴石、浮石粉、锡粉、玛瑙粉等。