

机械工人学刊

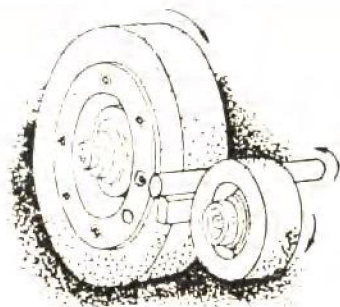
THE CHINESE JOURNAL OF MECHANICAL ENGINEERING

砂轮修整和成形磨削

何秀寿 李兆高 编著

工

G74



机械工业出版社

目 次

一	砂轮磨损、磨钝及砂轮修整	1
	1 砂轮的结构及其在磨削中的作用(1)——2 砂轮的磨损、磨钝及砂轮修整(2)——3 砂轮耐用度及其判断(10)——4 提高砂轮耐用度的措施(15)	
二	砂轮修整方法和修整工具的选择	18
	1 车削法修整砂轮及其修整工具的选择(18)——2 磨削法修整砂轮及其修整工具的选择(25)——3 滚压法修整砂轮及其修整工具(27)——4 特殊的砂轮修整方法(28)	
三	砂轮的修整用量及其选择	29
	1 金刚石修整器的安装(29)——2 粗磨修整用量及其选择(32)——3 精磨修整用量及其选择(38)	
四	成形磨削	44
	1 成形磨削及其特点(44)——2 砂轮的成形修整(45)——3 成形磨削对机床性能的要求(65)——4 成形磨削的砂轮选择(68)——5 成形磨削工艺参数的选择(71)——6 成形磨削应用实例(73)	

一 砂轮磨损、磨钝及砂轮修整

1 砂轮的结构及其在磨削中的作用 砂轮是由磨料、结合剂和气孔三部分组成的（图1）。磨粒是组成砂轮的主要部分，它在磨削过程中直接起切削作用，相当于刀刃。结合剂起粘结作用，把磨粒互相粘结成一体，同时使砂轮成一定的形状和有足够的强度，能保证砂轮在工作时不会由于离心力的作用而产生破裂。气孔是在磨粒与结合剂之间形成的空隙，它在磨削过程中可以容纳切屑，同时可以把冷却液带到磨削区，以减低磨削温度，从而改善磨削时的工件烧伤。

砂轮作为磨加工的刀具，它与其它切削刀具比较具有下列特点：

（1）切削刃数量多而且不规则的分布在工作表面上，因此要研究砂轮切削刃的切削情况就比较复杂。

（2）切削刃的形状不规则，因此研究切削刃的切削能力以及切削刃的磨损、磨钝不能像其它单刃刀具（如车刀）或多刃刀具（如铣刀）那样简单。

（3）磨削时磨粒切削刃呈大的负前角切削，切削刃在工件上摩擦严重，同时，磨粒切削刃与工件的相对运动速度大，因此，在磨削区将产生很高的温度。当磨粒切削刃通过磨削区时，在高温及切削压力的作用下，将有复杂的化学反应，磨粒切削刃将经受不同程

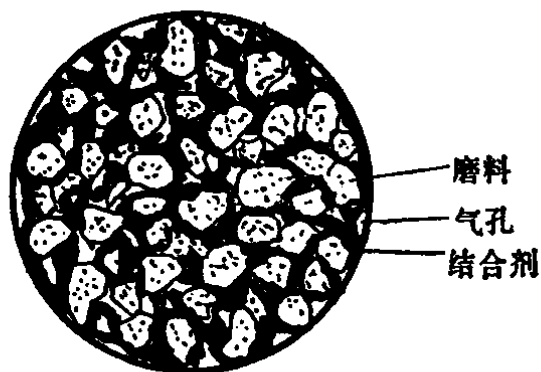


图1 砂轮结构示意图

度和不同形式的磨损。

正因为砂轮具有上述特点，致使砂轮的切削能力和在磨削过程的磨损、磨钝规律不易掌握。但是掌握砂轮的切削性能和它在磨削过程中的磨损、磨钝规律又是非常重要的，因为只有这样，才能合理的使用砂轮，从而得到好的加工效果。

2 砂轮的磨损、磨钝及砂轮修整 砂轮在磨削过程中会渐渐丧失其切削能力，我们称之为砂轮磨钝。产生砂轮磨钝的原因是很复杂的，但从宏观来看，砂轮磨钝是由于砂轮产生磨损和砂轮工作表面产生堵塞两方面原因所致。

(一) 砂轮的磨损 砂轮磨损是影响磨削生产率和工件质量的重要问题。通过选择合适的砂轮、合理选用磨削用量和冷却液以达到提高磨削效率和提高工件质量的同时，还必须掌握砂轮的磨损规律和砂轮磨损的基本知识。砂轮在磨削过程中的磨损一般如图 2 所示。该曲线分为三个阶段：第一阶段为磨削的初始阶段，砂轮磨损很快，该阶段持续时间一般较短；第二阶段为稳定磨损阶段，砂轮磨损随磨削时间而缓慢增加，这个阶段所持续的时间比较长；第三阶段是砂轮急剧磨损阶段，这时砂轮已钝化，需重新修整砂轮。

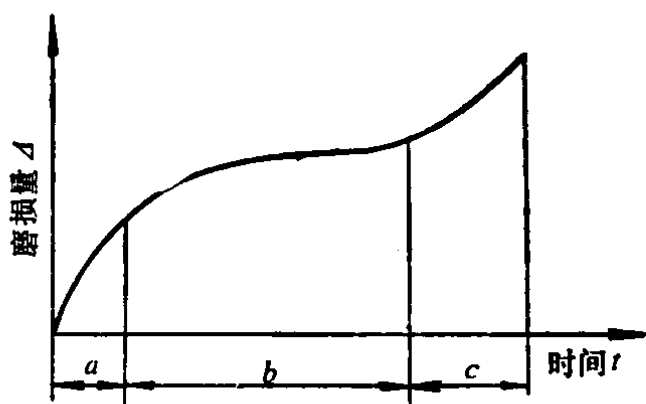


图 2 砂轮的磨损过程

a — 初始磨损阶段 b — 稳定磨损阶段
c — 急剧磨损阶段

以上所谈的砂轮磨损，只是宏观上观察砂轮尺寸的变化，没有涉及砂轮磨损的本质问题。要从本质上认识砂轮的磨损，必须首先弄清磨粒在磨削过程的磨损问题，而磨粒的磨损又是个很复

杂的过程，它与金属学、金相、物理化学和固体物理等科学的基本理论有关。下面简单介绍砂轮磨损的几种形式。一般而言，砂轮磨损存在磨耗磨损、磨粒的表面碎落、磨粒破碎和磨粒整个脱落等几种形式如图 3 所示。

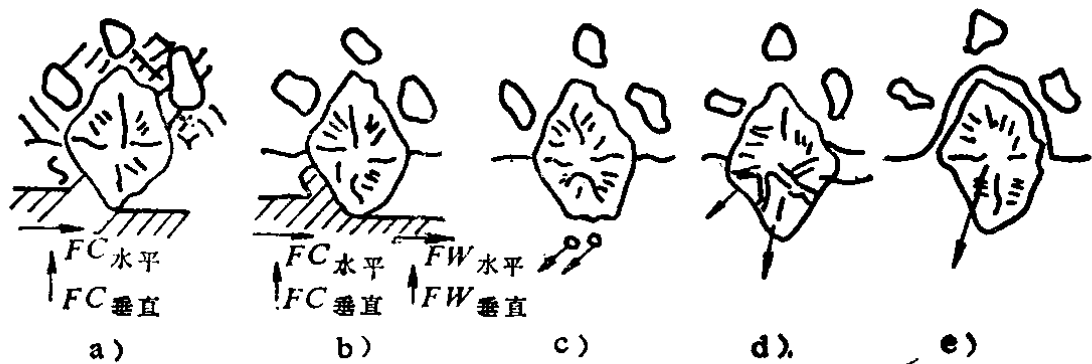


图 3 砂轮磨损形式

(1) 磨耗磨损：磨粒磨耗磨损的特征是有明显的磨损平面，表面较均匀光洁，如图 3 b 所示。在未磨损前（图 3 a），磨粒与工件接触面积较小，作用在磨粒上的切削力可分解为 $F_{c\text{水平}}$ 和 $F_{c\text{垂直}}$ 。当有了磨损后，磨粒与工件的接触面积增大，这时，除切削力外，作用在磨损平面上的摩擦力增大，并可分解为 $F_{w\text{水平}}$ 和 $F_{w\text{垂直}}$ 。随着磨损面积的增大，摩擦功也增大，因而由摩擦功而形成的热量增加，从而在磨削区形成高温。由于磨削力和磨削温度的增加，不仅促使磨耗性磨损的发展，而且也促使其它几种形式的磨损发生，所以磨耗磨损在砂轮磨损中占有主导地位。

磨耗磨损是多种因素起作用的一个复杂的磨损过程。在不同的磨料与工件材料组合、不同的磨削用量、磨削形式以及冷却液种类等不同情况下，起主要作用的磨损因素是不同的。一般而言，造成磨耗磨损有以下几种因素：

1) 化学磨损：所谓化学磨损是磨粒在磨削区的高温作用

下，由于化学作用在磨粒表面生成一层氧化膜，这层氧化膜改变了磨料原来的特性，从而使之易于磨损。如金刚石是一种高硬度的磨料，但在高温下会石墨化和氧化，使金刚石硬度大为降低，从而造成磨损增加。又如立方氮化硼磨料在高温下可以与水起化学反应，生成硼酸和氨气，为了避免发生这种情况，用立方氮化硼磨料时不宜采用水剂冷却液。为了减小由于这种化学作用造成的磨损，可以采用油剂冷却液，以隔绝磨粒与大气的接触，使氧化反应变慢。

2) 磨料机械磨损：当砂轮磨削工件时，如果工件材料中存在比磨料硬的质点，将使磨粒磨损增大。例如用氧化铝系磨料磨削铸铁，虽然铸铁硬度比氧化铝低得多，但在铸铁中存在碳化硅之类的硬质点，这些硬质点的硬度比氧化铝硬度高，因此，在磨削中使磨粒磨损很大，所以应采用硬度较高的碳化硅磨料来磨削铸铁。又如，在磨削高钒高速钢中，由于这种材料中含有碳化钒之类的硬质点，而且这些硬质点往往比氧化铝和碳化硅都硬，所以只有采用硬度高的立方氮化硼磨料来磨削才能达到好的效果。由此可见，工件材料中存在硬的质点，往往是砂轮迅速磨损的原因之一。同时也可以发现，有些材料本身的硬度虽然不高，但由于材料中含有高硬度的质点，也应采用高硬度的磨料。

3) 扩散磨损：所谓扩散磨损是由于在磨削区高温作用下，磨料与工件的相互作用致使磨料中的原子扩散到工件中去并与工件材料中的某些元素形成化合物而造成磨料的磨损，如用碳化硅磨削钢时，碳化硅中的碳原子和硅原子会扩散到钢中并与钢中的其它元素如钴、镍、铬、钨等形成硅化物和碳化物，从而使碳化硅磨损加快。而用碳化硅磨削铸铁时，由于铸铁中存在碳化物，减少了碳化硅与铸铁的反应率，这也是碳化硅砂轮适宜于磨削铸铁而不宜磨钢的理由。

4) 塑性磨损: 在磨削时, 由于在磨削区的高温作用下, 使接触表面软化。由于磨粒是热的不良导体, 而金属的导热性好, 有可能使摩擦表面所受的切向应力达到它的屈服应力 (即材料从弹性过渡到塑性的转换点处的应力), 根据磨损理论, 这时将发生塑性磨损。

(2) 磨粒表面碎落: 所谓磨粒表面碎落是指磨粒的细微脱落, 如图 1-3 c 所示。磨粒表面碎落能局部恢复它的切削性能, 由于是细微的破碎, 因此, 不致于造成砂轮工作面形状失真和工件表面光洁度的严重恶化, 因此, 一般说来, 这种表面碎落对磨削过程的不利影响较小, 反而能改善砂轮切削性能, 延长砂轮耐用度。造成这种表面碎落的原因如下:

1) 热冲击造成的表面碎落: 由于磨削时磨粒表面受到多次高温冲击, 而且要在极短的时间内 (约 10^{-6} 秒左右) 突然升高至 1000°C 以上, 而又要在冷却液作用下急冷至常温, 反复多次的急冷急热, 在磨粒表面上形成很大的热应力, 从而使表面碎落。

2) 因金属粘附在磨粒上, 形成积屑瘤, 从而使磨粒碎落。

(3) 磨粒的破碎: 这种破碎是指较大的碎块从磨粒上脱落, 如图 3 d 所示。这种破碎是由于磨粒局部损伤、有裂纹等缺陷, 在磨削力的作用下, 产生磨粒较大的破碎。粗磨时, 由于磨削力较大, 往往易发生这种破碎。当产生这种破碎时, 一方面破坏了砂轮工作型面的精度和磨粒切削刃的等高性, 从而使工件光洁度和精度变差, 但另一方面却出现新的切削刃, 改善了砂轮切削性能, 延长了砂轮耐用度, 所以在粗磨工序时, 往往期望产生这种磨粒破碎。

(4) 磨粒脱落: 当磨粒上所受的力大于砂轮结合剂的粘结

强度时，在磨削力的作用下，将破坏结合剂的结合键，使磨粒整体从砂轮中脱落，如图 3 e 所示。在普通磨削时，极少发生这种情况，只有在强力磨削和荒磨等工序时，则会发生这种形态的磨损。

生产中评价砂轮磨损时，是以砂轮的宏观尺寸磨损来表征砂轮的磨损的。但是为了要找出减少砂轮磨损的途径，就必须仔细分析以上几种磨损型式，以便找出磨粒表面碎落的主要原因。

砂轮磨损的大小与砂轮特性和磨削条件有关。一般说来，砂轮的磨料应与工件材料有好的匹配，才能使砂轮磨损减小。砂轮硬度高，磨损小。砂轮粒度细，在磨削时有更多的切削刃参加工作，作用在每个切削刃上的负荷较小，因此砂轮磨损较小，但当砂轮粒度太细时，砂轮切削性能变差，磨削力和磨削热增加，反而使砂轮磨损增大。砂轮组织越疏松，砂轮磨损越大，这是由于切削刃较少，作用于每个切削刃上的负荷较大的缘故。

砂轮的磨损与修整用量和磨削用量也有密切关系。当砂轮修整得较细密时，砂轮工作表面有较多的切削刃，所以砂轮磨损较小。磨削用量对砂轮磨损的影响更为明显。当磨削用量增大时，使砂轮磨损增大。当磨削用量增至一定值时，甚至会使砂轮强烈脱粒而造成剧烈磨损。

（二）砂轮的堵塞 在磨削过程中，可以发现砂轮表面附着一些切屑，我们称这种现象为砂轮堵塞。在磨削不同材料时，砂轮表面的堵塞情况是不一样的。砂轮的堵塞一般可分为两类：一类叫嵌入型堵塞，另一类叫粘着型堵塞。前者是指切屑嵌塞在砂轮工作面的空隙处，如图 4 a 所示。后者是指切屑熔结在磨粒及结合剂上，把磨粒切削刃覆盖，如图 4 b 所示。

在磨削过程中，总是存在堵塞现象。当砂轮堵塞到一定程度时，其切削能力下降，磨削力、磨削热增加，工件产生烧伤，光

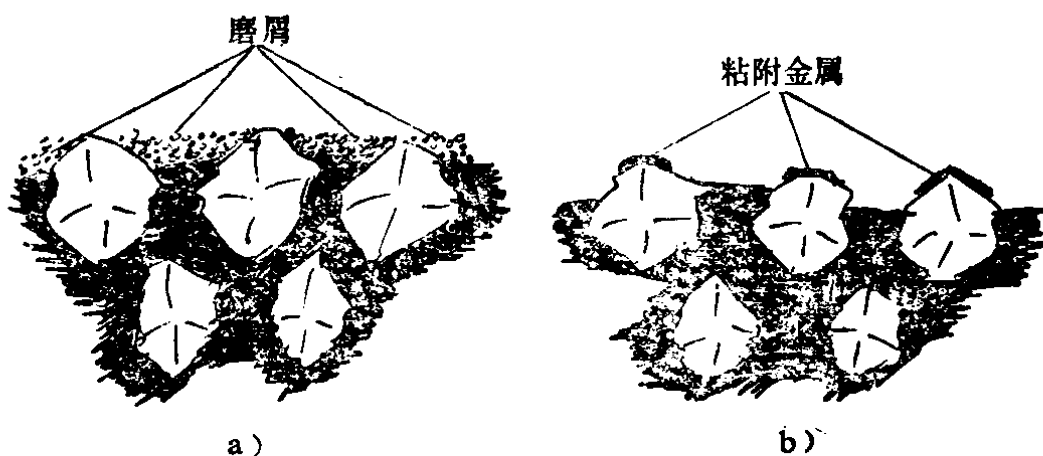


图4 砂轮的堵塞型式

a) 嵌入型堵塞 b) 粘着型堵塞

洁度变差或产生磨削振动直至磨削过程不能继续进行。但是，这两类堵塞对磨削的影响不同，嵌入型堵塞对磨削的不利影响较小，而且堵塞的过程比较缓慢，因为在磨削时，有些切屑嵌入到砂轮表面的空隙中，有些切屑从砂轮表面的空隙中由于冷却液和离心力的作用而被甩出来，因此，砂轮仍有较长的耐用度，同时，这种堵塞对生产效率的影响不太严重。此外，还必须指出，在某些情况下，仍可利用这种嵌入型堵塞来达到所需的产品要求，加在磨削铝合金活塞时，当砂轮刚修整后，由于砂轮切刃较锋利，且切刃等高性也较差，往往在工件表面产生划痕（俗称“拉毛”）。为了避免划痕，往往使砂轮表面有一定的堵塞。每修一次砂轮，可连续工作好几天而不需要修砂轮，而每重新修整一次砂轮后，往往要预磨一段时间，以造成砂轮表面有一定的堵塞后才可避免工件表面产生划痕。在超精磨削和镜面磨削时，为了得到较好的工件光洁度，也有必要使砂轮工作表面有一定的堵塞。但粘着型堵塞在任何情况下对磨削都是不利的，由于砂轮存在粘着型堵塞，砂轮很快丧失切削能力，使砂轮耐用度大为降低。这种粘着型堵塞只有在磨削过程中磨粒切刃自锐或重新修整砂轮才能

清除。许多材料之所以难磨，往往是由于发生这种粘着性堵塞而致。

磨削时砂轮堵塞的型式和堵塞的程度主要取决于工件材料的机械物理性能，其次是磨削条件。堵塞型式主要取决于加工材料的特性，例如磨削碳素钢和合金钢等发生嵌入型堵塞，磨削纯铝和钛合金等材料主要产生粘着型堵塞。据试验结果，究竟产生那种型式的堵塞是与被磨材料的结构和原子排列有关的。原子排列是体心立方晶格的材料（如结构钢、轴承钢等）容易产生嵌入型堵塞；原子排列为面心立方晶格（如不锈钢、黄铜、铝等）容易产生粘着型堵塞；对于含有形成碳化物元素的材料（如高速钢）或者象钛合金那样化学亲和力大的材料都容易产生粘着型堵塞。此外，磨削温度对堵塞型态也有重要影响，当磨削温度高时，切屑易于熔融而成为熔结物附着在磨粒切削刃上，从而形成粘着型堵塞。

磨削条件对堵塞也有重要影响，今分述如下：

（1）砂轮性能对堵塞的影响：磨料种类对堵塞的影响较大，如用单晶刚玉砂轮磨削不锈钢、高钒高速钢等材料时，砂轮表面比较不容易产生粘着型堵塞，从而有较好的磨削效果。用碳化硅砂轮磨削钛合金也较不易产生粘着型堵塞，因而有较高的砂轮耐用度和磨削比。但用碳化硅砂轮磨削碳素工具钢时，由于磨下的切屑形状小而细，因此，切屑易于嵌入空隙里，使堵塞量增长。

砂轮硬度越高，磨粒越不易脱落而形成新的切削刃，同时磨粒切削刃间距变短，而使切屑形状变小，所以堵塞量增加。

砂轮组织越密，堵塞越严重。砂轮的粒度对堵塞影响较小，一般而言，粒度细则易于堵塞。

（2）磨削用量对堵塞的影响：如砂轮速度增加，则堵塞量

表 1 各种因素与堵塞量的关系

影 响 因 素		对 堵 塞 的 影 响			
		嵌 入 型 堵 塞		粘 着 型 堵 塞	
		堵 塞 量	熔 结 物 的 产 生	堵 塞 量	熔 结 物 的 大 小
		多：少	多：少	多：少	大：小
砂 轮	磨 料	碳化硅系：刚玉系	×	碳化硅系：刚玉系	刚玉系：碳化硅系
	粒 度	细：粗	×	×	细：粗
	硬 度	硬：软	硬：软	×	硬：软
	组 织	密：疏	×	×	密：疏
	气 孔 大 小	小：大	×	×	小：大
	气孔平面形状	圆 形	×	×	×
	气孔立体形状	扁平形	×	×	×
切 屑 形 状		小：大	×	×	×
		短：长	×	×	×
砂轮磨削次数		多：少	多：少	×	多：少
修整后砂轮工作面形状		细：粗	×	×	细：粗
工件表面温升		高：低	高：低	×	高：低
干磨和湿磨		干：湿	干：湿	湿：干	干：湿
冷 却 液	清 洗 性	○	△	△	△
	冷 却 性	●	●	△	●
	渗 透 性	○	○	○	○
	(表面张力)	(大)：(小)	(大)：(小)	(小)：(大)	(大)：(小)
	润 滑 性	○	○	△	○
	供 液 方 式	○	○	△	○
	过 滤 方 式	○	△	△	△

符号说明：×—没有效果 △—效果少 ●—有效果 ○—效果显著

增加。这是因为当砂轮速度高时，磨粒最大切深减小，切屑截面减小；同时，磨削热增加，这些因素都促使堵塞量增加。当磨削时的切入进给量增加时，磨削力和磨削热增加，使切屑易于熔结，从而使堵塞加剧。但当切入进给量增至易引起磨粒剥落时，则堵塞反而可减少。当工件速度增加时，容易引起堵塞。

（3）冷却液的影响：磨削冷却液的作用是清洗、冷却和润滑，所以选用合适的冷却液可以大大改善砂轮的堵塞情况。此外，冷却液的供给方式对砂轮堵塞也有大的影响，如采用高压冷却可以改善砂轮的堵塞，提高砂轮耐用度。

由此可见，影响砂轮堵塞的因素是多方面的，各种因素对堵塞的影响也是有差别的，各种因素与堵塞量的关系可参考表 1。

（三）砂轮修整的必要性 前面谈到，由于砂轮在磨削过程中的磨损和堵塞，将使砂轮失去切削能力。为了恢复砂轮的切削性能，必须对砂轮进行修整。值得指出的是，在生产中往往发生当磨削一段时间以后，由于砂轮切削能力下降，砂轮已较钝化，这时引起工艺系统产生磨削自激振动，因此工件上会出现振纹，要消除这种振纹，应重新修整砂轮。

在成形磨削时，由于砂轮磨损不均匀，使砂轮失去正确的几何形状，为了恢复砂轮的形状精度，也必须重新修整砂轮。

3 砂轮耐用度及其判断

（一）砂轮耐用度的意义 砂轮耐用度是用来表征砂轮磨削能力的一种标志，通常用砂轮在二次修整之间的实际磨削时间或磨削零件的件数来作为相对比较。砂轮耐用度与被加工零件的质量要求、生产率要求、工件材料、砂轮特性、修整条件、磨削条件及工艺系统刚性等有关。目前还难以定出一个通用的砂轮耐用度标准，但是生产中却要求能定出一个比较合理的砂轮耐用度标准。为了使耐用度指标能更好的与加工效果联系起来，并能给人

以明确的概念，可以根据磨削工艺的差别分别制定砂轮耐用度的评定指标。磨削加工一般可分为粗磨和精磨两种工序，在粗磨时主要以去除加工余量为目标，因此，可以采用砂轮在两次修整之间的金属去除体积作为砂轮耐用度的度量指标，这在国内、外的磨削实践中已获得应用。在外圆切入式磨削时，砂轮耐用度指标是以单位长度的磨削宽度上所磨下的金属体积，即相对金属去除总量 Q' (毫米³/毫米) 来表示的。 Q' 可按下式计算：

$$Q' = q'_1 + q'_2 + \cdots + q'_n$$

$$q' = \frac{\pi}{4} (D_1^2 - D_2^2)$$

式中 q' ——磨一件工件时的相对金属去除总量 (毫米³/毫米)；

D_1 ——磨削前工件直径 (毫米)；

D_2 ——磨削后工件直径 (毫米)。

在外圆纵磨时，可以用砂轮耐用度期间所去除的总金属量来表示砂轮耐用度，并以 Q 来表示 (毫米³)。 Q 可按下式计算：

$$Q = q_1 + q_2 + \cdots + q_n$$

$q_1, q_2, \cdots, q_n$ ——分别表示磨削第一件到第 n 件工件所去除的总金属量 (毫米³)。

$$q = \frac{\pi}{4} (D_1^2 - D_2^2) \cdot L \text{ (毫米}^3\text{)}$$

式中 L ——被磨削的长度 (毫米)。

在精磨时是以获得合格的加工表面为主要指标的，因此，可以用砂轮耐用度期间所能加工的表面积 S (毫米²) 来作为砂轮耐用度的度量指标。在外圆纵磨时，加工表面积可按下式计算：

$$S = S'_1 + S'_2 + \cdots + S'_n$$

$$S' = \pi DL$$

式中 D ——工件直径 (毫米)；

L ——磨削长度（毫米）；

S' ——一件工件所加工的面积（毫米²）。

（二）砂轮耐用度的判别方法 确定了在不同磨削工序中砂轮耐用度的度量指标，还必须寻找判断砂轮耐用度的方法，这不仅具有理论意义而且在生产中有实际意义。判断砂轮耐用度的方法就是要确认砂轮什么时候钝化，需要重新修整砂轮。如果砂轮还没有钝化而提前修整砂轮，不仅增加了修整砂轮的次数，降低了生产效率，而且增加了砂轮和修整工具的消耗。如果钝化的砂轮得不到及时修整，就会降低生产率和使工件质量变差。正确判别砂轮耐用度在自动化磨床和适应控制磨削时显得更为重要。此外，在各种磨削试验中，为了判别砂轮切削性能、磨削工艺的先进性、磨床及磨削用量的合理性等等，也要涉及砂轮耐用度的正确判断。目前，国内外虽有人试验研究砂轮耐用度的问题，并已取得部分成果，但还没有简易可靠的判别砂轮耐用度的仪器，往往根据操作者的经验来判别。判别砂轮耐用度的方法，归纳起来，大致有如下两方面：

（1）根据砂轮本身的磨损规律及钝化过程来判别：砂轮的钝化与砂轮工作表面磨粒切削刃的磨损有关，随着磨削过程的延续，磨粒切削刃会磨损并出现小平面，当这小平面面积达到某一定程度时，有人就认为砂轮已磨钝，并以此作为判别砂轮耐用度的标准，但这个方法至今仍难以用于生产实际。也有人认为，砂轮的钝化与砂轮尺寸磨损有关，认为当砂轮尺寸磨损至某一数值时，则认为砂轮已钝化。在生产实际中虽然有可能实现测量砂轮尺寸磨损量，但在许多情况下，砂轮尺寸磨损的大小很难与砂轮钝化建立较可靠的函数关系。例如，在某种磨削条件下，砂轮有适当的自锐，这时虽然砂轮尺寸磨损随磨削过程不断增大，但砂轮的切削能力却因砂轮自锐而保持，砂轮并未钝化，甚至有人想

利用这种特性，达到少修或不修砂轮。也有人把砂轮的钝化与砂轮工作表面的堵塞情况联系起来，但是测量砂轮工作表面的堵塞并非易事，同时，在有些情况下当发生砂轮有较大的堵塞时，仍有令人满意的切削性能，因此，要用测量砂轮堵塞来判别砂轮耐用度，目前在生产中还难以采用。由此可见，虽然砂轮的磨钝与砂轮的磨损有直接关系，但是目前还难以找到一种可用于生产中的砂轮耐用度的判别方法。

（2）根据磨削过程中的现象及结果来判别：磨削过程出现的现象是多方面的，但是与砂轮钝化过程有关的现象主要有磨削的自激振动、磨削噪声、磨削热以及工件质量的恶化等方面，今分别介绍如下：

1）工艺系统的自激振动及磨削噪声的变化：磨削过程中，工艺系统的振动有两种：一种是由机床电动机、油泵、齿轮和砂轮等运动件不平衡而引起的振动，这类振动称之为强迫振动。这种振动只要机床开动，不磨削时也存在，一般强迫振动的频率都比较低且与其振源的频率相一致。在磨削过程中还存在另一种自激振动，这种振动只在磨削过程中存在，当磨削一停止，则该种振动自行消失。自激振动的频率较高，且自激振动的频率与工件及工艺系统刚度有关。磨削刚开始时，一般自激振动的振幅很小，随着磨削时间的增长，其振幅将会增大，特别是对于某一种特定的频率（称之为主振频率），其振幅的增大尤为明显。当砂轮接近钝化阶段时，其振幅会急剧增大，如图5所示。

磨削过程中的自激振动振幅的增加也伴随着磨削噪声的增加，而且主振频率也就是噪声的主频率。两者有近乎一致的变化规律，如图5所示。一般说来，磨削噪声的变化比振幅的变化明显。因此，在生产中多凭操作者的耳听噪声的变化来判别砂轮耐用度。但是，值得指出，用普通的噪声仪定量的判别砂轮耐用

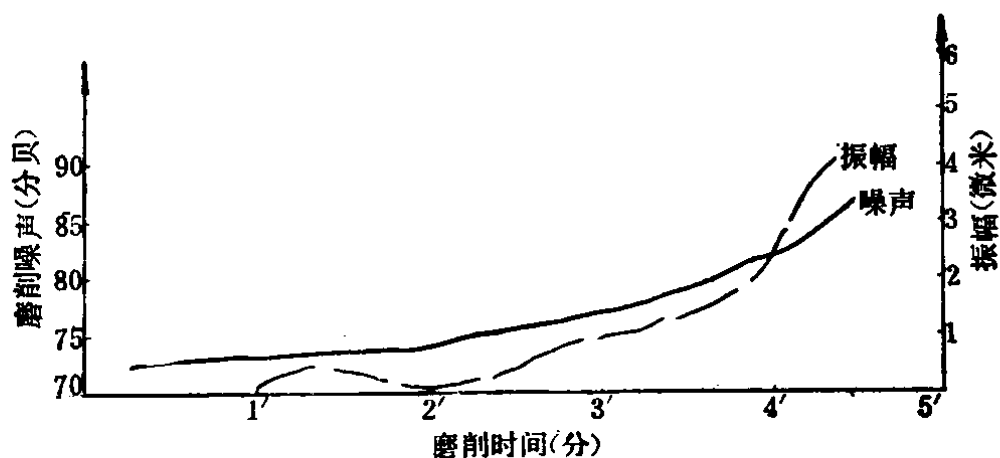


图 5 磨削振动及磨削噪声的变化

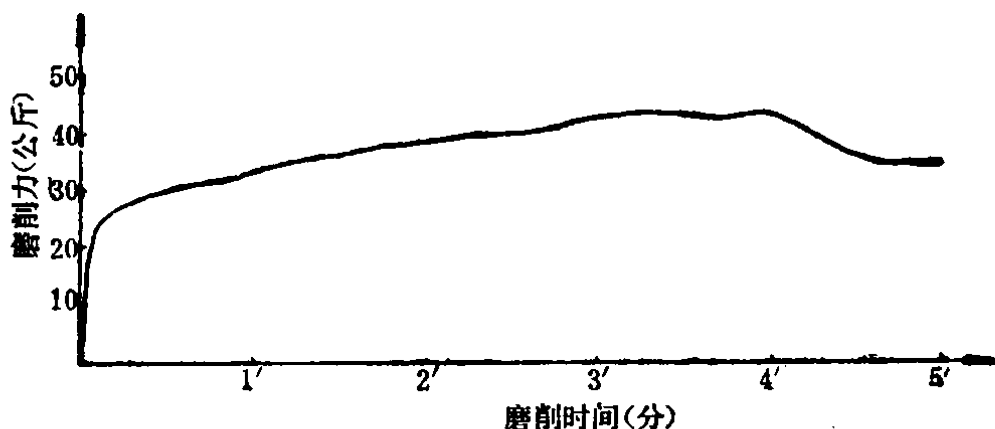


图 6 磨削力随磨削过程的变化

度却还存在不少问题，主要是规律的重复性差。

2) 磨削力和磨削功率的变化：在磨削过程中，由于砂轮切削能力随磨削时间而变化，因此，当磨削用量不变时，磨削力将发生变化，图 6 是在等速切入磨削时径向磨削力 P_r 随磨削时间的变化。由图可见，在磨削开始阶段，由于工艺系统的弹性，磨削力将有一上升过程，然后将有一缓慢的上升过程，当磨削相当时间后，磨削力反而下降，这是由于磨削力增大到足以使砂轮产生较大自锐后，使砂轮切削性能得到改善，因此磨削力将下降。

在磨削过程中，切向力也会随磨削过程而不断变化，且其变

化规律也类似于径向力的变化。磨削功率取决于切向力和磨削速度的乘积，所以，切向磨削力的变化反映了磨削功率的变化。

在磨削过程中，径向力和切向力都会变化，而且径向力与切向力之比也会变化。一般说来，当砂轮较锋利时，径向力与切向力之比值较小，而当砂轮磨钝后，这个比值就比较大。

3) 磨削热及工件磨削表面温度的变化：与磨削力随磨削时间的变化相类似，磨削区的温度将随砂轮变钝而升高，但值得指出，磨削区的温度与工件表面的平均温度是完全不一样的，工件表面的平均温度一般不高，而且当砂轮钝化后，工件表面的平均温度升高也不大。

4) 工件质量变化：工件的质量包括精度、光洁度、表面波紋度、表面层烧伤及残余应力等。在磨削过程中由于砂轮逐渐钝化，将使工件质量发生变化。根据工件质量要求来判别砂轮耐用度是目前生产中常采用的方法，特别是在精磨中，工件质量是最主要的指标。工件几何形状精度超差或光洁度恶化或出现波紋度或工件表面烧伤都说明砂轮已钝化，需重新修整砂轮。根据工件质量恶化来判别砂轮耐用度，在手工操作的精磨工序常常被采用，但在自动化磨床上，由于没有在线质量自动检验装置，所以就很难采用这个方法自动地决定何时该修整砂轮。

4 提高砂轮耐用度的措施 要提高砂轮耐用度，也就是说要减小砂轮的磨损和堵塞以减缓砂轮的磨钝，因此减少砂轮修整次数的途径与减小砂轮磨损磨钝的途径是一致的，这可以从以下几方面来考虑：

(一) 合理选择砂轮 砂轮的磨损磨钝与被磨工件材料的性质密切相关，为此，应使砂轮与工件材料有好的匹配。如当工件材料较硬时应选用较软的砂轮，这样可使砂轮有较好的自锐作用，从而保持砂轮的切削性能。又如在加工易产生粘着性堵塞