

第 4 章 磨损原理

磨损是伴随摩擦而产生的必然结果，它是相互接触的物体在相对运动时，表层材料不断发生损耗的过程，或者产生塑性变形的现象。因此，磨损不仅是材料消耗的主要原因，也是影响机器使用寿命的重要因素。材料的损耗，最终反映到能源的消耗上，减少磨损是节约能源不可忽视的重要环节。在现代工业自动化、连续化的生产中，某一零件的磨损失效，就会影响整个生产过程。故对磨损进行研究，掌握其机理，控制因磨损而造成的生产损失，具有较大的经济意义。

4.1 磨损过程

当两表面相互接触时，表面上的微凸体首先发生接触，当发生相对滑动时，接触点的结合受到破坏。在接触点结合的不断形成又不断受到破坏的过程中，由于机械的作用、摩擦所产生的热作用以及与周围介质发生的物理或化学作用，使材料表层发生变化，如发生变形、氧化、软化、强度减弱等现象，结果引起表面的损坏和材料的脱落。

试验结果表明，一般磨损过程大致可分为 3 个阶段，如图 4-1 所示。

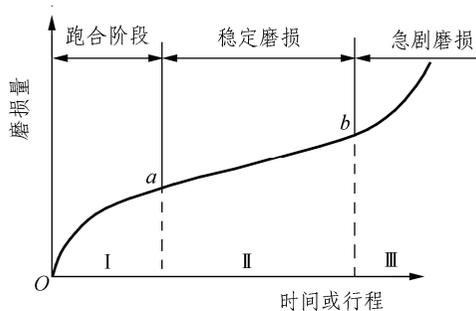


图 4-1 典型磨损过程

1. 跑合阶段

在一定载荷作用下，摩擦表面逐渐磨平，实际接触面积逐渐增大，磨损速度开始很快，然后减慢，如图中的 Oa 线段所示。

2. 稳定磨损阶段

经过跑合，摩擦表面相互适应，表面微凸体相撞碰的概率减少，摩擦降低，磨损较稳定，磨损量减小，如图中 ab 线段所示。

3. 急剧磨损阶段

金属物体经稳定阶段的长期磨损后，表面性质发生变化，表面强度降低、表面层裂纹扩展迅速，引起了金属表面的急剧磨损。这时机械效率下降，精度降低，出现异常的噪声及振动，常常是导致机器零件工作失效的主要原因。

从磨损过程的变化来看，机器零部件的正常工作往往是在稳定磨损阶段。所以，要提高使用寿命，应尽量延长稳定磨损阶段。

根据大量统计表明，有 75% 的机器零件是由于磨损而损坏的，磨损是引起机器失效的主要原因，故磨损通常是有害的，应尽可能减少。同摩擦现象一样，磨损并非都是有害的，对人类也有其有利一面，如研磨、金属的成形加工（如切削、锉等工艺），就是利用磨损来提高表面光洁度。所以，研究磨损规律是为了掌握并控制磨损，使其为人类更好地服务。

4.2 磨损的基本类型

磨损是多因素相互影响与作用的复杂过程。由于磨损致使物质表面层破坏的机理不同，所以磨损的微观机理不可能用一种定式来包括几种特性。常常是进行分类，以便能更加清晰地分析磨损机理。

一般磨损的分类要考虑 3 方面的作用影响：

(1) 表面的作用：如机械运动的形式是滑动还是滚动、表面分子作用形式等。

(2) 表层的变化：物理性能的变化，如硬度等；化学性能的变化，如化学膜的作用变化；表层的结构变化，有变形还是无变形等；以及组织成分的变化，如钢的表层含碳量等。

(3) 破坏的形式：主要是磨屑形式和表面磨损形式。

根据上述因素，比较常用的分类方法是把磨损分为 5 类：黏着磨损、磨粒磨损、表面疲劳磨损、腐蚀磨损及微动磨损。

4.2.1 黏着磨损

当摩擦副接触时，由于表面不平，发生的是点接触。在相对滑动和一定载荷作用下，在接触点发生塑性变形或剪切，使其表面膜破裂，摩擦表面温度升高，严重时表层金属会软化或熔化，此时，接触点产生黏着。然后出现黏着—剪断—再黏着—再剪断的循环过程，这就

形成黏着破坏（或黏着磨损）。

有油的表面，要在油膜破裂后才可能发生黏着。无油的表面，也只有表面污染膜失效后，金属才能直接黏着。

根据黏着程度的不同，黏着磨损类型也不同。若剪切发生在黏着结合面上，表面转移的材料极轻微，则称“轻微磨损”，如缸套-活塞环的正常磨损。当剪切发生在软金属浅层里面，转移到硬金属表面上，称为“涂抹”，如重载蜗轮副蜗杆的磨损。若剪切发生在软金属接近表层的地方，硬表面可能被划伤，称为“擦伤”，如内燃机铝活塞壁与缸体摩擦的“拉伤”。当剪切发生在摩擦副的一方或两方金属较深的地方，称为“撕脱”，如在主轴-轴瓦摩擦副的轴承表面可见到这种现象。若摩擦副之间咬死，不能相对运动，则称为“咬死”，如不锈钢螺栓与不锈钢螺母在拧紧过程中就常常发生这种现象。

图 4-2 所示为黏着磨损的模型。若摩擦面上方为硬的材料，下方为软的材料，当摩擦面接触时，则硬的材料微凸体压向软的材料。

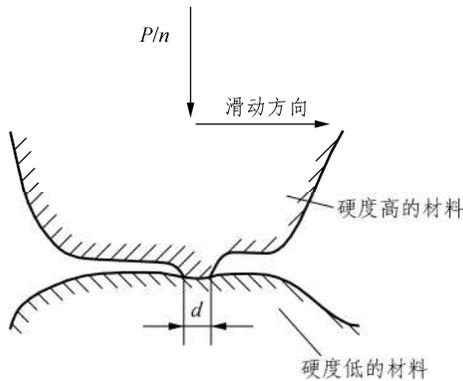


图 4-2 黏着磨损的模型

设摩擦面上有 m 个微凸体相接触，其中一个微凸体以屈服压力 P_r 与另一方相接触，若微凸体是圆锥形，其接触面的平均直径为 d ，则全载荷 P 为

$$P = m \cdot \frac{\pi d^2}{4} \cdot P_r \quad (4-1)$$

若一个微凸体受到了磨损，新的微凸体又会接触。设不断有 m 个接触点存在，则在单位距离上，接触微凸体（以直径为单位）总计受到 $m \times (1/d)$ 次的摩擦。若一微凸体每摩擦一次，直径 d 的半球状（体积摩擦 $\pi d^3 / 12$ ）摩擦微粒由于黏着的结果便脱落掉，这时滑动距离 L 之间的总磨损量是

$$W = \frac{1}{12} \pi d^3 \cdot m \frac{1}{d} \cdot L \quad (4-2)$$

将 P 代入，则

$$W = \frac{1}{3} \cdot \frac{PL}{P_r} \quad (4-3)$$

式(4-3)表明总的磨损量与载荷及滑动距离成正比,而与屈服压力成反比(或者说与软材料的硬度成反比)。显然,上述公式只作为研究滑动摩擦时定性分析磨损的参考,因为还有许多重要因素没有包括在内。

按照磨损的严重程度,黏着磨损可分为以下几种。

(1) 轻微黏着磨损。当黏结点的强度低于摩擦副两金属的强度时,剪切发生在结合面上。此时虽然摩擦系数增大,但是磨损却很小,材料迁移也不显著。通常在金属表面具有氧化膜、硫化膜或其他涂层时发生轻微黏着磨损。

(2) 一般黏着磨损。黏结点的强度高于摩擦副中较软金属的剪切强度时,破坏将发生在离结合面不远处软金属表层内,因而软金属黏附在硬金属表面上。这种磨损的摩擦系数与轻微磨损差不多,但磨损程度加剧。

(3) 擦伤磨损。当黏结强度高于两金属材料强度时,剪切破坏主要发生在软金属表层内,有时也发生在硬金属表层内。迁移到硬金属上的黏着物又使软表面出现划痕,所以擦伤主要发生在软金属表面。

(4) 胶合磨损。如果黏结点强度比两金属的剪切强度高得多,而且黏结点面积较大时,剪切破坏发生在一个或两个金属表层深的地方。此时,两表面都出现严重磨损,甚至使摩擦副之间咬死而不能相对滑动。高速重载摩擦副中,由于接触峰点的塑性变形大以及表面温度高,使黏着结点的强度和面积增大,通常产生胶合磨损。相同金属材料组成的摩擦副中,因为黏着结点附近的材料塑性变形和冷作硬化程度相同,剪切破坏发生在很深的表层,胶合磨损更为剧烈。

除润滑条件外,影响黏着磨损的主要因素是载荷、速度、表面温度和摩擦副材料性能。

1. 载荷与速度

苏联学者 BHHOTPAИIOBA 系统地研究了产生胶合的影响因素,她发现:在一定速度下,当表面压力达到一定临界值,并经过一段时间的运行后,才会发生胶合。通过观察不同材料的试件在四球机实验中磨痕直径的变化,可以反映出胶合磨损的情况。在一定速度下,当载荷达到一定值时,若磨痕的直径骤然增大,则这个载荷称为胶合载荷,如图 4-3 所示。

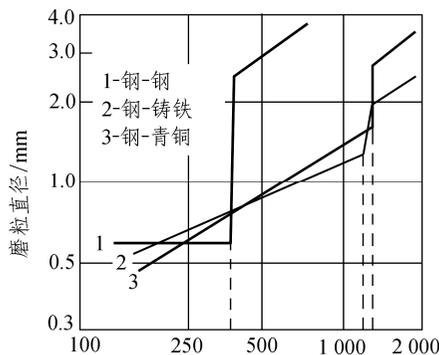


图 4-3 四球机实验曲线

但是，实验发现各种材料的临界载荷值随滑动速度的增加而降低，这说明速度也对黏着磨损（特别是胶合）的发生起着重要作用。因此，仅载荷或者速度本身并不是直接导致黏着磨损的唯一原因，两者的影响是相关的。

实验表明：当速度与载荷的乘积（即 pv 值）达到一定值时，就会产生黏着磨损，如果它们的乘积很大则会发生严重的黏着磨损——胶合。载荷与速度的乘积与摩擦副间传递的功率成正比，因此可以认为，材料一定的摩擦副传递的功率是有限的。工程中常常要限制摩擦副的 pv 值。

2. 表面温度

pv 值与摩擦副传递的功率成正比，也就是与摩擦损耗的功率成正比。 pv 越大，摩擦副间耗散的能量就会越多，因此摩擦过程中这些能量产生的热使表面温度升高。但是，产生的热量在接触表面间不是均匀分布的，大部分的热量产生在表面接触点附近，形成了半球形的等温面。在表层内一定深度处各接触点的等温面将汇合成共同的等温面，如图 4-4 所示。

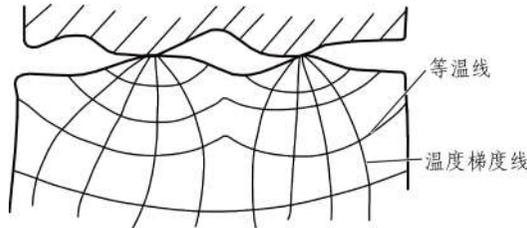


图 4-4 表层内的等温梯度线

图 4-5 所示为温度沿表面深度方向的分布。摩擦热产生于最外层的变形区，因此表面温度 θ_s 最高，又因热传导作用造成变形区非常大的温度梯度。变形区以内为基体温度 θ_v ，变化平缓。

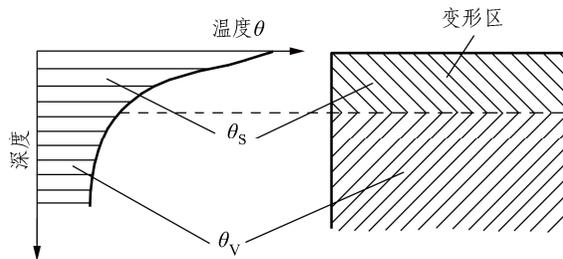


图 4-5 表层内的等温线

表层温度特性对于摩擦表面的相互作用和破坏影响很大。表面温度可使润滑膜失效，而温度梯度引起材料性质和破坏形式沿深度方向变化。

图 4-6 所示为 Rabinowicz 采用放射性同位素方法测量金属迁移量后给出的实验结果。从图中可以看出，当表面温度达到临界值（约 $80\text{ }^\circ\text{C}$ ）时，磨损量和摩擦系数都急剧增加。

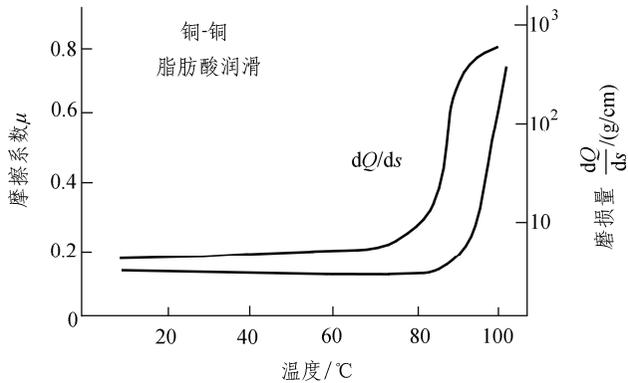


图 4-6 温度对胶合磨损的影响

影响温度特性的主要因素是表面压力 p 和滑动速度 v ，其中速度的影响更大，因此限制 $p v$ 值是减少黏着磨损和防止胶合发生的有效方法。根据实验和计算分析得出的表面温度场与速度和压力的关系见表 4-1。

表 4-1 表面温度场与速度和压力的关系

温度场	接触状态			
	塑性接触		弹性接触	
	压力 p	滑动速度 v	压力 p	滑动速度 v
表面温度 θ_s	—	\sqrt{v}	p^n	\sqrt{v}
温度梯度	—	v	p^n	v
基体温度 θ_v	p	v	p	v

3. 摩擦副材料

脆性材料的抗黏着磨损的能力比塑性材料高。塑性材料形成的黏着节点的破坏以塑性流动为主，它发生在离表面一定的深度处，磨屑较大，有时长达 3 mm，深达 0.2 mm。而脆性材料黏着节点的破坏主要是剥落，损伤深度较浅，同时磨屑容易脱落，不堆积在表面上。根据强度理论：脆性材料的破坏由正应力引起，而塑性材料的破坏取决于剪应力。表面接触中的最大正应力作用在表面，最大剪应力却出现在离表面一定深度处，所以材料塑性越高，黏着磨损越严重。

相同金属或者互溶性大的材料组成的摩擦副黏着效应较强，容易发生黏着磨损。异性金属或者互溶性小的材料组成的摩擦副的抗黏着磨损的能力较强。而金属和非金属材料组成的摩擦副的抗黏着磨损能力高于异种金属组成的摩擦副。从材料的组织结构而论，多相金属比单相金属的抗黏着磨损能力高。

通过表面处理方法在金属表面上生成硫化物、磷化物或氯化物等的薄膜将减少黏着效应，同时表面膜也限制了破坏深度，从而提高抗黏着磨损能力。

此外，改善润滑条件，在润滑油或脂中加入油性和极压添加剂，可以提高摩擦副抗黏着

磨损的能力。

由于可选用热传导性高的摩擦副材料或加强冷却以降低表面温度，所以金属材料的 p_v 值一般都远大于非金属材料。

改善表面形貌以减小接触压力等也可以提高抗黏着磨损的能力。

4.2.2 磨粒磨损

对于粗糙硬表面把软的工作表面划伤，或者两接触面受外界硬拉划伤工作表面，都属于磨粒磨损。在农业机械、工程机械、矿山机械、建筑机械和运输机械中，许多机械零件与泥沙、矿石或灰渣等直接摩擦会发生不同形式的磨粒磨损。据统计，因磨粒磨损而造成的损失，占整个工业范围内磨损损失的 50%。

同样，对于磨粒磨损的分类也很多，可以根据硬的颗粒是整体的还是自由松散的程度来分。现介绍以磨损体相互位置来分，如图 4-7 所示为二体及三体磨粒磨损示意图。

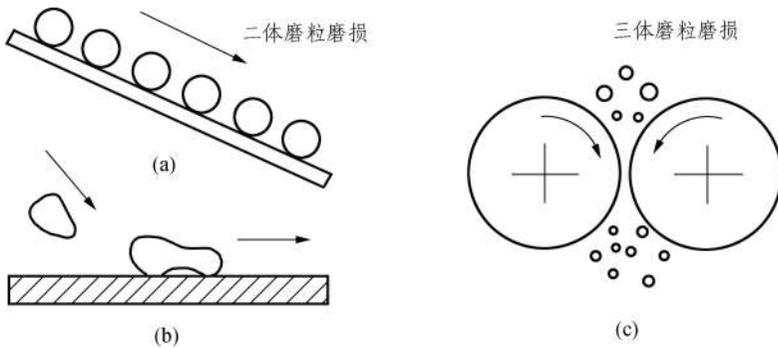


图 4-7 二体与三体磨粒磨损示意图

二体磨粒磨损包括凿削式磨粒磨损和低应力擦伤磨粒磨损。前者如挖掘机的斗齿、破碎机锤头等零件的表面破坏，在这种情况下，磨粒对材料表面产生高应力碰撞，使金属表面磨出较深的沟槽，并从材料表面凿削下大颗粒的金属。后者如犁铧、运输槽板及机械零件被沙尘污染的摩擦表面，这时磨料作用于表面的应力不超过磨粒的压溃强度，使材料表面产生擦伤或轻微的切削痕迹。

三体磨粒磨损包括高应力碾碎式磨粒磨损，如球磨机衬板与钢球、轧碎机滚筒等零件的表面破坏。这时磨料与金属表面接触处的最大应力大于磨粒的压溃强度，使金属表面被拉伤。对于韧性材料，则表面产生塑性变形或疲劳；而对于脆性材料，则产生碎裂或剥落。

对磨粒磨损的机理有几种看法。一些人认为，磨粒磨损是磨粒对金属表面进行微量切削的过程。另一些人认为，由于磨粒的颗粒作用，使表面层受交变接触应力和变形，使材料表面疲劳破坏。在某些情况下，对塑性较大的材料来说，因磨粒颗粒在力的作用下，压入材料表面而产生压痕，从表面层上挤压出剥落物。总的来说，磨粒磨损机理是属于磨粒的机械作用。这种机械作用在很大程度上与磨粒的形状及尺寸大小、固定的程度以及载荷作用下磨粒

与被磨表面的机械性能有关。

图 4-8 所示为磨粒磨损简化模型。其中一个表面是由一系列具有半角为 θ 的硬圆锥形粗糙微凸体所组成，而另一表面是由较软而平坦的材料构成。

设一单独粗糙微凸体在软表面上划出一条痕迹，在移动一个单位距离时，其转移的材料体积为 rd 。由于 $d = r \cot \theta$ ，因此一个粗糙微凸体在单位移动距离内转移的材料体积等于 $r^2 \cot \theta$ 。

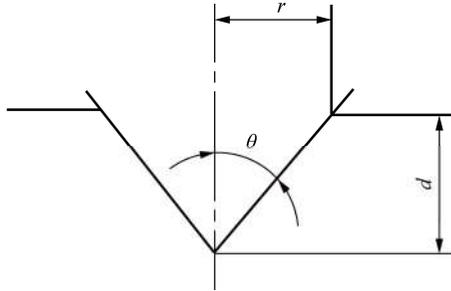


图 4-8 圆锥形硬微凸体所引起的磨粒磨损

假设材料在法向载荷下屈服，于是每个粗糙微凸体支承的载荷为 $m^2 P_r / 2$ ， P_r 是软材料的屈服压力。

如果有 n 个粗糙微凸体进行接触，则总的法向载荷为

$$P = \frac{\pi r^2 P_r}{2} \cdot n \quad (4-4)$$

单位移动距离内材料的总转移体积为

$$W_n = n \cdot r^2 \cdot \cot \theta \quad (4-5)$$

消去 n 后便得

$$W_n = \frac{2P \cot \theta}{\pi P_r} \quad (4-6)$$

式 (4-6) 是根据极其简单的模型推导出来的，对于粗糙微凸体的高度和形状的分布简化了，如果以 H 代替 P_r ，以 $K_a = \frac{2}{\pi} \cdot \cot \theta$ ，则 (4-6) 式可变为

$$W_n = \frac{K_a P}{H} \quad (4-7)$$

式中， H 为软材料的硬度； K_a 为磨粒磨损系数。

从式 (4-6) 和式 (4-7) 可以看出，磨粒磨损与黏着磨损有一些相似之处，即磨损量 W 与载荷成正比，与软材料屈服压力或硬度成反比。因而式 (4-7) 可作为分析磨粒磨损定性时的参考。

上面的推导可适用于二体磨粒磨损。在松散磨粒微粒使摩擦表面产生磨损时，即在三体磨粒磨损情况下也适用同一形式的方程，只是 K_a 值较低，这是由于在这种情况下许多微粒往

往是滚动的而不是滑动的。

当磨粒磨损进行时，硬的粗糙微凸体或破碎微粒将在一定程度上变钝，因此磨损率就会降低。但是，脆性的磨粒颗粒可能碎裂，使微粒边缘变得锐利，因而磨损率又可能增高。

对磨粒磨损机理的解释主要有下面几种观点：

(1) 微观切削：认为由法向载荷将磨粒压入摩擦表面，而滑动时的摩擦力通过磨粒的犁沟作用使表面剪切、犁皱和微量切削，产生槽状磨痕。

(2) 挤压剥落：对于塑性较大的材料，磨料颗粒在载荷的作用下嵌入摩擦表面而产生压痕，从表面层上挤压出剥落物。

(3) 疲劳破坏：由于磨料的颗粒作用，摩擦表面层在循环接触应力的作用下，表面材料因疲劳而剥落。磨粒磨损机理属于磨料的机械作用。

最简单的磨粒磨损计算方法是根据微观切削机理得出的，如图 4-9 所示。

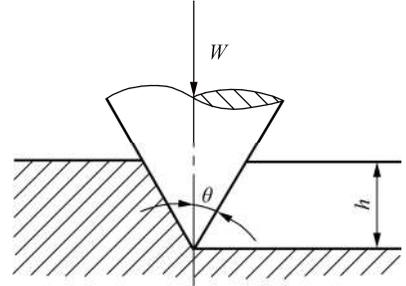


图 4-9 微观切削磨粒磨损模型

设磨粒为形状相同的圆锥体，半角为 θ ，压入深度为 h ，则压入部分的投影面积为 $A = \pi h^2 \tan^2 \theta$ 。

如果被磨材料的受压屈服极限为 σ_s ，每个磨粒承受的载荷为 W ，则

$$W = \sigma_s A = \sigma_s \pi h^2 \tan^2 \theta \quad (4-8)$$

当圆锥体滑动距离为 s 时，被磨材料移去的体积为 $V = sh^2 \tan \theta$ 。若定义单位位移产生的磨损体积为体积磨损率 dV/ds ，则磨粒磨损的体积磨损率为

$$\frac{dV}{ds} = h^2 \tan \theta = \frac{W}{\sigma_s \pi \tan \theta} \quad (4-9)$$

由于受压屈服极限 σ_s 与硬度 H 有关，故

$$\frac{dV}{ds} = K_a \frac{W}{H} \quad (4-10)$$

式中， K_a 为磨粒磨损常数，根据磨粒硬度、形状和起切削作用的磨粒数量等因素决定。

应当指出，上述分析忽略了许多实际因素，例如，磨粒的分布情况、材料弹性变形和滑动前方材料堆积产生的接触面积变化等，因此式 (4-10) 近似地适用于二体磨粒磨损。在三体磨损中，一部分磨粒的运动是沿表面滚动的，它们不产生切削作用，因而式 (4-10) 中的 K_a 值应当适当降低。

影响磨粒磨损的主要因素有以下几点：

1. 材料的硬度

苏联学者 Хрушов 等对磨粒磨损进行了系统研究，指出硬度是表征材料抗磨粒磨损性能

的主要参数，并得出结论：对于纯金属和各种未经热处理的钢材，耐磨性与材料硬度成正比关系。

对磨粒磨损来说，通常采用相对耐磨性 R 来衡量材料的抗磨损能力，相对耐磨性的定义为

$$R = \frac{E_s}{E_f} \tag{4-11}$$

式中， E_s 为试件材料的耐磨性，按磨掉率的倒数计算得到； E_f 为基准耐磨性，它是以硬度 $H_0 = 22.46 \text{ GPa}$ 的钢玉为磨料时的含铈铅锡合金材料的耐磨性。

如图 4-10 所示，由于退火钢的硬度与含碳量成正比，因此钢的磨粒磨损耐磨性与含碳量按线性关系增加，并可表示为

$$R = 13.74 \times 10^{-2} H \tag{4-12}$$

式中， H 为材料的硬度。

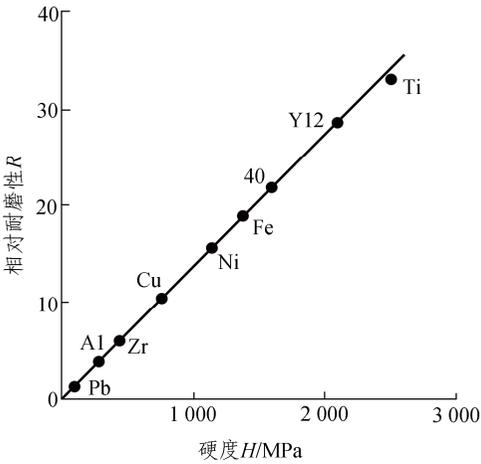


图 4-10 相对耐磨性与材料硬度的关系

用热处理方法可以提高钢的硬度，也可提高钢的耐磨性。如图 4-11 所示，图中每条直线代表一种钢材，含碳量越高，直线的斜率越大，而交点表示该钢材未经热处理时的耐磨性。可明显看出：采用热处理增加耐磨性的效果较弱，变化的斜率明显较含碳量的直线平缓。

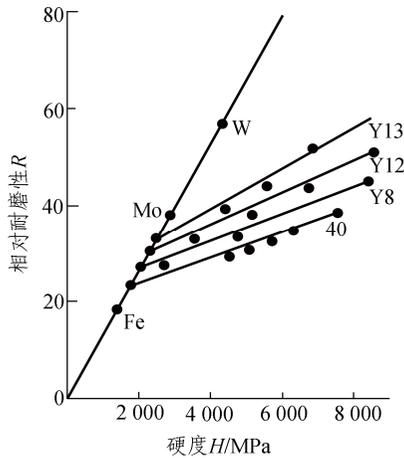


图 4-11 热处理对耐磨性的影响

热处理对钢材耐磨性的影响可以表示为

$$E = E_p + C(H - H_p) \quad (4-13)$$

式中， H_p 和 E_p 为退火状态下钢材的硬度和耐磨性； H 和 E 为热处理后的硬度和耐磨性； C 为热处理效应系数，其值随含碳量增加而增加。

综上所述，提高钢材硬度可采用改善材料成分、热处理或冷作硬化等 3 种方法。而材料的抗磨粒磨损能力与冷作硬化方法有关，所以必须根据各种提高硬度的方法考虑耐磨性与硬度的关系。

2. 相对硬度

磨料硬度 H_0 与试件材料硬度 H 之间的相对值对磨粒磨损的影响规律如图 4-12 所示。从图中可以看出：当磨料硬度明显低于试件材料硬度，即 $H_0 < (0.7 \sim 1.3)H$ 时，不产生磨粒磨损或仅产生轻微磨损。而当磨料硬度超过材料硬度后， $H_0 > (0.7 \sim 1.3)H$ ，磨损量随磨料硬度迅速增加。如果磨料硬度远高于材料的硬度，将产生严重磨损，之后磨损量不再随磨料硬度变化。

由图 4-12 可以看出：为了防止磨粒磨损，材料硬度应高于磨料硬度。通常认为， $H_0/H \leq 0.7$ 时只发生轻微的磨粒磨损。

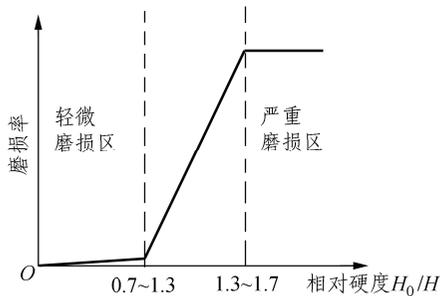


图 4-12 相对硬度的影响

3. 其他影响因素

金属硬度大于磨料硬度时也会被磨损，这是由于磨料压入金属的能力不仅取决于相对硬度，同时与磨粒的形状有关。例如，固体平面可以被相同材料而具有球形、尖锥形或其他尖刃形的颗粒压入形成压痕。所以讨论磨粒磨损性能时，除材料的硬度和材料与磨粒的相对硬度之外，还应考虑以下因素的影响。

1) 磨粒尺寸

磨损量与磨料的颗粒大小成正比，但颗粒大到一定值以后，磨粒磨损量不再与颗粒大小有关。另外，磨粒的形状和尖锐程度对磨损也有明显影响。

2) 载 荷

外载荷对各种材料的磨粒磨损有显著影响。图 4-13 说明线磨损率与表面压力成正比。当压力达到转折值 p_c 时，线磨损率随压力的增加变得平缓，这是由于磨粒磨损形式转变的结果。各种材料的转折压力值是不同的。

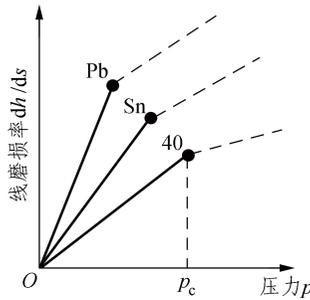


图 4-13 线磨损率与表面压力的关系

3) 重复摩擦次数

图 4-14 所示为重复摩擦次数与线磨损率的关系。在磨损刚发生时，由于磨合作用使线磨损率随摩擦次数的增加而下降，同时表面粗糙度得到改善，随后磨损趋于平缓。

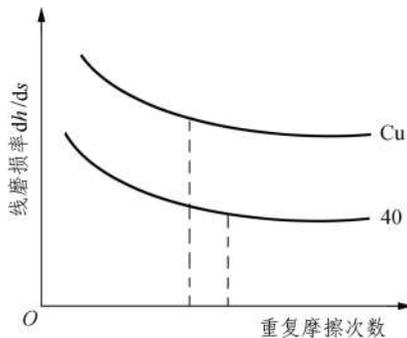


图 4-14 线磨损率与重复摩擦次数的关系

4) 滑动速度

如果滑动速度不大，不至于使金属发生退火、回火效应时，线磨损率将与滑动速度无关。