

抗磨损件的一些设计原则

鲁德曼〔美〕

（根据讲稿整理，未经本人审阅）

摘 要

本文讨论了抗磨损设计中的一些原则。为设计者提供了一种分析方法。首先对需要改进的磨损部件进行检查，然后是估计要重新设计的机器的应力、温度、及其他运转条件。最后对抗磨材料的选择提出了一些建议。

前 言

机械部件的磨损寿命如同人的寿命一样，包含有错综复杂的影响因素。摩擦表面是由底材、氧化物、吸附气体、润滑介质、磨屑和尘埃等组成。这些组成与部件的材质、制造方法、所处环境以及运转条件密切相关。所以，部件的磨损必然受这些组成及其相关因素的影响。而且，磨损部件所涉及的范围非常广泛，例如：动物的牙齿和关节、凸轮、活塞环、轮胎、电接触件、磁头、履带、炮筒、模具、轴承、刮胡子刀片等等。它们的功能、工作条件和所处环境各不相同，所以，要使它们具有一个允许的磨损寿命，至今尚无简易而通用的设计方法，但对某些磨损件来说，还是具有一些合理的设计步骤和一些指导性原则的。为了便于磨损件的设计，下面介绍一些磨损件设计中的指导性原则。

一、磨损件的设计思想

多数磨损件是重新设计而不是首次设计，所以，设计者往往需吸取前人对原部件的设计经验。设计者，尤其是首次设计者，必须熟知材料的性能和制造方法，并精通各种磨损件的基本设计原理。

由于磨损件种类繁多，所以设计者必须根据不同工业部门中各种机械所特有的失效方式、环境条件、保养性能，经济成本等对磨损件的设计给于综合考虑。例如：由于汽车的轮胎比引擎的曲轴容易更换，在讨论车辆寿命时就不必考虑轮胎的寿命问题；在设计油井的牙钻时，必须使圆锥形齿牙与轴承在磨损过程中具有相同的磨损寿命；在核反应器中的滑动元件中不能采用润滑油脂，而元件的磨损对系统的功能非常有害，因而为了确保耐磨，使用了昂贵的金属-陶瓷涂层，制造成本就不那么重要了。

常常听到的一种减少部件磨损的简单方法是提高材料的硬度。这在某些磨损体系中是适用的，但是，它不适用的场合更多。例如，青铜齿轮与硬化钢小齿轮相配合的传动机构比单

·采用硬化钢齿轮的传动机构更有效,其理由是尘埃粒子容易嵌入青铜,避免了钢的切削或磨粒磨损;汽车引擎中的凸轮,通常将它硬化到50RC左右的硬度而不硬化到它可到达的最高硬度67RC;某些硬矿石的料库和斜槽,有时使用橡胶比使用很硬的白铸铁更好。从上述的几个例子中可以看到,部件的耐磨寿命并不是仅由材料的某一种性能所决定的,而是取决于不同性能的综合平衡作用。

二、磨损体系的检查

单凭材料的损耗速率确定机械部件的耐磨寿命是不充分的,还应考虑磨损失效的方式。例如:当汽车引擎卡死时,虽然材料的损耗极少,甚至无损耗,只有表面材料的重新分布,但它已致使引擎的功能严重丧失;金属加工的模具,其表面不允许有微小的拉伤;引擎中的套筒轴承,正常情况应针对表面疲劳磨损进行设计,但是,在某些应用中,腐蚀条件严重地加速了疲劳失效,这就首先需要选择抗腐蚀的轴承材料,而材料抗疲劳性能则成为次要的条件。所以,在磨损件设计时,首先必须对磨损体系(包括磨损表面、磨屑和润滑剂等)作全面的检查和分析。并将各种磨损型式与材料的有关性能关联起来。磨损是表面上的材料从其特定部件上损失或重新分布的过程。它主要是由于化学作用(腐蚀)、熔融和机械形变所造成的。一般说来,与磨损密切相关的材料性能有:(1)溶解;(2)氧化(腐蚀等);(3)脆性断裂;(4)韧性变形;(5)高循环疲劳;(6)低循环疲劳;(7)熔融。

对于磨损体系的检查,需要对磨损的类型、表面的形貌以及各种磨损机理有足够的了解。描述磨损类型所使用的名称很多,例如,干磨损、金属磨损、热磨损、擦伤磨损、机械磨损和冲击磨损。如果对它们作细致观察可描述为浸蚀、抛光、气蚀、腐蚀,氧化、擦伤疲劳、微动磨损和化学磨损等。更细致的观察还可定名为剥落、点蚀、分层、切削、变形、刨削、研磨、碾磨,冲刷和磨粒磨损等。磨粒磨损通常又可分成两体和三体磨粒磨损或者高应力和低应力磨粒磨损。这些磨损类型的名称,绝大部分都不代表磨损机理,而仅仅是叙述了发生磨损的条件或叙述了磨损表面的形貌。对于磨损机理,通常指磨损的微观因素,例如,磨粒磨损,粘着磨损,腐蚀磨损等。在一个给定的实际磨损体系中,往往会有几种磨损机理同时作用,而且难以将它们截然分开,这就给设计人员在分析磨损机理时带来困难。所以,有些研究者试图将磨损分成缓和磨损和严重磨损以避免上述分类法。可是,这又出现了判断缓和与严重磨损程度的标准,确定这一标准的难度也许不亚于对磨损机理的鉴别。目前尚有一些单位还在研究磨损的分类和名称问题,但进展不大。

检查磨损体系最有效的方法是采用立体显微镜,它的放大范围为物镜1~7X,目镜5X或10X。立体观察可给出一个透视性的表面形貌,如沟槽、折皱、碎片等。扫描电子显微镜(SEM)也是极有效的工具之一,由于SEM和光学设备所获得的表面图象很不一样,所以,新手使用时应与光学显微镜配合使用。SEM虽然可放大几万倍,但通常最有效的观察是在20~200倍之间。SEM的优点是可观察很粗糙的表面而不会出现如同光学显微镜中所出现的过高或过低区域不聚焦的现象。其缺点是样品小,且因为它是在真空下观察的,所以表面必须很干净。

具有相差、偏振光、干涉和暗场等装置的光学金相显微镜也很有效,但是,必须具有必要的技能才能使用它和解释结果。

为了在观察磨损表面形貌的同时,对磨损面的化学组成和底材的成分变化进行分析,可使用装有X—光色散附件的SEM仪器(EDAX等)。

三、标准磨损件的选取和运转条件的确定

一台机器或一种设备的使用寿命往往取决于其中某些机构或某几个部件的磨损寿命,他们的工作性能标志着该机器的工作能力。所以,在设计时,应正确地选取这种关键性部件作为设计中的标准件。例如:齿轮箱、离合器、轴承等。对于这类部件,都是由富有经验的设计者设计和发展起来的,并经过了很好的试验。因此,一般来说,对它再作材料的选择意义不大,而迫切需要的是建立可预示其磨损寿命精确到10%或更好的试验设备,由此来确定润滑剂的工作范围,部件连续工作的合理温度范围,负荷性质以及其他实际的运转条件。

对于某些特殊部件,还可参考手册中的资料和磨损方程式的计算数据来设计部件的耐磨寿命和各种合理的运转条件。但是,手册中所提供的数据和资料很有限,而且很少给出材料的磨损率、磨损失效方式和运转条件的极限值,所以,对一般的部件其价值不大。磨损方程的一般形式如下:

$$r = K \frac{A^a B^b C^c D^d \dots}{E^e F^f G^g H^h \dots}$$

式中, r 为磨损率, A 、 B ……是材料或运转参数, a 、 b ……为不规则指数, K 为常数。这些参数分三种类型:(1)运转参数(表面形貌、接触几何、负荷、速度、摩擦系数等);(2)材料参数(硬度、延性、断裂韧性、强度、工作硬化性、弹性模量、材料形态、表面膜类型和厚度、热性能等);(3)环境参数(润滑剂、尘土、磨屑、支持结构的刚性,环境温度、循环或连续接触、连续或间歇或往复运动、配合间隙、偶件材料等)。有些参数对磨损的影响很大,但难以定量确定,更复杂的是难以表达磨损机理和磨损率随滑动时间的变化。所以,它在实际体系中难以使用,只有一些很特殊的经验方程式,可适用于某些场合。

在设计部件的负荷、应力、温度和速度时,对于同类部件或相似环境,还可采用内插或外延的方法。

四、耐磨材料的选择

磨损件设计的主要工作在于耐磨材料的选择,按一定的步骤合理选材就可事半功倍,否则将会束手无策。下面介绍一些选材的步骤,它们不仅适用于耐磨材料,而且也适用于一般材料的选择。具体步骤如下:

1. 确定对材料是否有特殊要求

在某些工业中,考虑到经济问题或其他使用方面的原因,需要使用灰铸铁或与人体相适应的材料;在核反应器中所使用的材料中不应含钴;有些部件希望在低廉的底材上涂敷表面涂层或使用高摩擦材料等。此外,对工件的表面光洁度、制造技术或部件安装等方面有一定的要求。还需考虑在运输或储存过程中的腐蚀或表面损伤因素。

2. 确定滑动表面可承受的最高静态负荷(即不产生凹痕或过度变形的负荷)

这只需作简单的应力分析即可解决。

3. 确定工作时材料所容许的最苛刻滑动条件

衡量滑动苛刻性的因素有：接触压力或应力、环境温度、摩擦温升、滑动速度、不对准性和运动状态等。对于这些因素作如下说明：

(a) 接触应力：工业标准所容许的接触压力，其变动范围相当大。例如，青铜材质的齿轮和套筒轴承，它们平均接触压力的工业极限值为17.3公斤力/厘米²（相当于青铜屈服强度的1~4%）；对于工具钢的泵件和阀件，其接触压力的工业极限值为1428公斤力/厘米²（相当于硬质工具钢屈服强度的4~6%），但是，在实际使用中远超过这一极限。现代商业飞机着陆齿轮的套筒轴承，材料为青铜，其屈服强度为7752公斤力/厘米²，设计轴承应力为4233公斤力/厘米²，预计该轴承的应力峰值可达6324公斤力/厘米²。拉拔金属片的工具钢模具，希望模具能拉拔500,000个部件，其接触压力可达8772公斤力/厘米²，相当于工具钢屈服强度的1/2。

(b) 温度对某些滑动件的寿命影响很重要，因为高温将使很多材料变软，使润滑剂分解；低温又可使某些材料脆化，使润滑剂固化。而手册中给出的耐磨材料未说明该材料在何种温度范围其耐磨性较好。所以，对材料需进行温度下的磨损试验。

环境温度通常是容易测量的，但是，摩擦所引起的温升难以测准，而且它可能受很多因素的影响。对于一般摩擦表面的温升可由下式表示：

$$\Delta T = \frac{\mu W V}{2 a (K_1 + K_2) l}$$

式中 μ 是摩擦系数， W 为所加载荷， V 为滑动速度， $K_1 + K_2$ 为滑动材料的导热性， a 为与接触面积有关的因素。从上式可见，在某些情况下，材料的导热性是控制表面温升的重要因素，但摩擦系数 μ 是更重要的因素。

(c) 滑动速度与极限PV值：材料的最大允许负荷和滑动速度通常以“PV”极限值表示。 P 与 V 的乘积中， P 为平均接触压力（单位磅/吋²）， V 为滑动速度（单位呎/分）。 P 由 W/A 获得， A 是滑动部件间承受负荷的投影面积，因此， $PV = \frac{W V}{A}$ 。由(b)节中的 ΔT 方程式可见， $W V$ 直接影响 ΔT ，所以，PV值实际上是衡量摩擦表面温升的参数。材料磨损由缓和磨损到严重磨损的转折与该材料的极限PV值有对应关系，即当给定条件超过极限PV值时，材料发生严重磨损。因此，极限PV值是该材料的一种特性指标。

(d) 不对准性：它是一个既不明确又难以计算的因素。它起因于制造误差，系统的热畸变和部件的磨损等。例如，轴承加载不均引起的系统偏差，按装球轴承时用锤子敲打以及尘埃粒子进入轴承，使轴承局部严重损坏等因素均可引起不对准性，致使部件过早地失效。

(e) 运转状态：影响滑动系统运转状态的有冲击负荷强度，间歇运转，振动性能，化学作用，磨粒等因素，它们对材料的耐磨寿命也有一定的影响。

4. 确定部件的“跑合”过程是否需要

滑动表面的尺寸精度和光洁度很难加工到完全符合实际使用时的状态，为了使摩擦表面的精度和光洁度适合运转中的适宜状态，人们往往在极缓和条件下对部件进行“跑合”。跑合中摩擦而产生的磨损可视作机械表面的最终修整。跑合可提高机器的使用性能和延长耐磨寿命，如果不经跑合直接在设计的条件下运转，有可能使部件过早地失效。如汽车引擎，为了使它具有合理的使用寿命，在正式用车以前先谨慎地跑合几千哩。然而，有些部件不希

望跑合,如齿轮箱,希望不经跑合立即发挥作用。当然,如果经跑合的话,其能力可能大为提高。对于不希望或不允许跑合的设备,在设计时必须提高其设计指标。

5. 确定合理的磨损失效方式

在第二部分中已叙述,部件的磨损寿命并不完全决定于材料的损耗速度,还取决于磨损失效的方式,在设计中必须给予重视。

6. 在试验台或试验机上进行选材试验

由试验设备上的一些磨损试验结果,可获得如下几种结论:

- (a) 样品件的设计和材料不变,对其功能、成本以及其他因素需作适当调正。
- (b) 样品件的尺寸,润滑或冷却需作轻微变化。
- (c) 样品件的尺寸,润滑或冷却需作很大改变。
- (d) 需更换材料。

处理上述几种结论需采取的方法如下:对于(a),可使用相同设计下的几种部件予以解决,为了保证部件的合理寿命,它们均需试验并作适当调正;对于(b),在设计时只需细致从事即可完成;对于(c),必须建立新的试验设备并作充分的试验;对于(d),需在试验台或试验机上进行选材试验。

试验设备虽然比实际的机器较为简单,但它们的磨损原理应相同,也就是说,样品件在试验台或试验机上的磨损机理应与实际机器上的相似,它们的磨损率,磨损表面的形貌,转移和磨屑粒子的大小、形状、组成均应相近。因此,试验设备的设计必须与实际部件的磨损特性紧密结合。这就需要丰富的设计经验。如果在缺乏经验又无准备的情况下,购买试验台并进行材料和润滑剂的试验,则往往会花费很高的代价而效果很差。

试验台上所获得的一些明显结果在“栓-V型块”、“环-块”和“四球”等标准试验机上也可得到一些证实,所以,在上述三种标准试验机上所得的试验结果对磨损件设计具有一定的参考价值。

(朱才录整理、薛群基校对)

Some Principles in Design for Wear Resistant Parts

K.C.Ludema (U.S.A)
(A summary of Lecture in China)

Abstract

Some principles in design for wear resistance are discussed. An analytical method is given for designers to follow. The method begins with an examination of worn parts to be improved. The next step is an estimate of stresses, temperatures and likely conditions of operation of the redesigned machinery, finally a procedure is proposed for selecting materials for wear resistance.