

# 摩擦磨損物理的若干問題\*

吉林大学(原东北人民大学)物理系金屬物理教研室

## 提 要

本文介紹了我們金屬物理教研室在摩擦磨損方面所做的一部分工作,強調了研究這一現象和各種物理因素的聯繫的重要性。文中介紹了關於金屬材料的相組織和顯微組織,金屬的晶體結構與摩擦磨損的聯繫,在實驗結果的基礎上提出了具有較高耐磨性的鐵素體-馬氏體鐵基減摩材料。另一方面文中着重研究了邊界滑潤的規律,觀察了滑潤劑粘度、表面活性物質、溫度、外振動等因素的影響。詳細地觀察外加電流的影響,發現電流對摩擦磨損的加強效應和在某種條件下反而減少磨損的可能性。

## 一. 引 言

摩擦磨損現象在日常生活中到處可見,而機器中的摩擦磨損則尤為重要。大多數機器的報廢往往是由於個別零件的磨損所引起。因此,解決磨損問題是解決延長機器壽命和提高其工作質量的重要途徑之一。近代發展的原子能、噴氣發動機、火箭等技術更提出了一系列新的問題。在這些領域內,摩擦磨損過程往往還伴隨著高溫、腐蝕性介質、高溫高速氣流沖刷等條件,這些條件使現象更加複雜化,對材料的要求也更高。總之,重大的及尖端的生產和科學任務催促摩擦磨損科學迅速發展。

摩擦磨損是一個十分複雜的物理和化學問題。然而過去相當長時間內,這方面的工作僅僅停留在現象的表面上,其實質至今尚了解得很少。為了解決某些實際問題,往往必須做一些純粹經驗性的工作,這種情況顯然不符合生產迅速發展的要求。為了從根本上解決生產上所提出的問題,我們認為應該將摩擦磨損問題作為一個重要的物理現象來研究,應該研究和掌握這一現象的規律以及各種物理因素——例如材料的結構、組織、機械的和物理化學的性質,外部條件等——與其內在聯繫。當然,在此同時,也應該並且是大量地進行經驗性的工作,以解決生產上急待解決的問題。

摩擦磨損是一個複雜的包含多方面問題的領域。我們在這方面的工作主要是研究有滑潤的摩擦磨損。一方面,研究了金屬的組織、結構與摩擦磨損的關係;另一方面,研究了邊界滑潤層的結構、性質及外界條件的影響。這兩方面又相互聯繫着。在這些研究的基礎上,也試圖在使用材料,改善工作條件方面提出對實際有益的建議。

## 二. 實驗方法

現在通用的磨損試驗機上,被磨物和磨物之間多是以平面或圓柱面相互接觸的。在

\* 1958年12月10日收到。

一次实验中负荷一定, 接触面上的法向比压力也一定。这样大的接触面积在实际上常常难以保证均匀的接触, 往往引起负荷的不均匀分布。而且, 每次实验或者实验中每次装卸样品接触情况都有所不同, 加以测量方法的误差很大, 常常使磨损实验结果的重复性很坏。例如, 常用的 Amsler 机的重复误差有时就大到 40—50%。此外, 通常的磨损实验费时很长, 例如为了决定某一材料的  $(p \cdot v)_{\max}$  值 (即在一定条件下, 对一定的相对速度  $v$ , 材料所能承受而不致发生磨损的最大比压力和速度  $v$  的乘积), 就必须用各种负荷做多次实验, 直到找出不引起磨损的最大负荷值, 如此一个实验就需要十几天。假如要求各种速度下的  $(p \cdot v)_{\max}$  那就要更久了。

我们采用圆柱形样品和转子磨盘, 样品和盘接触的一端为锥形 (视样品材料硬度不同而取不同的张角  $120-160^\circ$ ) 或半球形<sup>[1]</sup>。

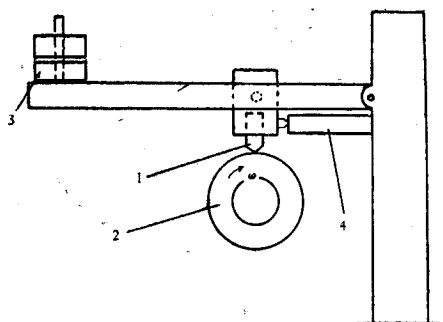


图 1 磨损机简图

1—样品; 2—磨盘; 3—负荷;  
4—电阻形变仪发送物

方法简图如图 1 所示。样品以总负荷  $P$  的压力压在转盘上, 而盘则以速度  $\omega$  绕水平轴旋转。接触处的相对滑动速度  $v = \omega \times \pi d$  ( $d = 40$  毫米, 为盘的直径)。

在摩擦开始的瞬间, 接触面积异常小, 比压力  $p$  很大, 样品的磨损速度很大。由于磨损的结果, 样品底面上形成一个近似椭圆形的磨痕, 面积逐渐增大。随着接触面积的扩大, 比压力渐小, 磨损速度也渐减。磨痕面积可用显微镜测量 (只要将装样品夹子翻过来,

不必卸下样品, 因而不改变其位置) 或用千分表测样品高度的变化 (可连续测量) 而换算得到。

为了表示磨损过程, 可以作椭圆面积~时间及相应的比压力~时间曲线。当椭圆颇小, 而且不必精确计算  $p$  时, 可以简单以  $d \sim \tau$  (与摩擦方向垂直的直径~时间) 或  $h \sim \tau$  (样品锥体高度~时间) 曲线表示磨损过程。以下我们称此为磨损曲线。

在无滑润条件下,  $d \sim \tau$ ,  $p \sim \tau$  曲线原则上是一直延伸发展的 (如果样品的球面很大或锥面很高), 不会与时间轴平行。也就是说, 磨损永远进行, 只是开始时迅速, 随比压力的减少愈来愈缓慢 (如图 2 的 1)。在滑润油供给充足的条件下, 当  $p$  减少到某一定值  $p_{\max}$  以后, 摩擦表面之间建立起足够厚度的边界滑润层, 于是磨损停止。因此, 滑润条件下的磨损曲线在一段时间后就转为和时间轴平行, 即到达稳定 (如图 2 的 2)。

我们看到, 当  $v$  一定时, 用这种方法所得到的  $p_{\max}$  正是一定滑润剂和一定摩擦对在速度  $v$  下所能承受而不发生磨损的极限比压力。同时, 材料的磨合性 (即遇到过荷时能迅速磨掉而使负荷均匀分布, 使磨损重又停止的能力) 也很容易决定: 到达稳定的时间即磨

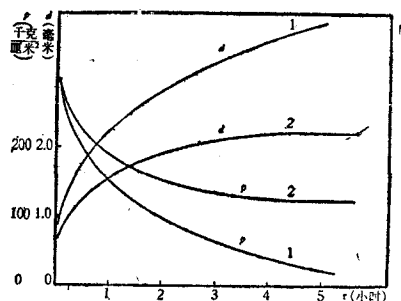


图 2 巴比合金 B83 的磨损曲线  
1—干摩擦; 2—有滑润

合時間。在我們工作中，一次實驗大約只需 2—3 小時或 7—8 小時，而其效率几十倍地高于 Amsler 方法。而且，如果保證磨盤表面光潔度、滑潤油粘度、溫度等相同的話，同一樣品的實驗結果的重复誤差可小于 10%。

除磨損外我們還利用電阻形變儀或壓電效應測量摩擦力。在一般情況下，摩擦系數隨  $p$  的減小而連續降低。

本文中所敘述的磨損實驗都是用此方法進行的。

### 三. 組織與摩擦磨損

在有滑潤條件下，具有什麼樣顯微組織的材料有更好的耐磨性和減摩性？這個問題至今尚未有統一的想法。最早薩爾比提出，減摩材料必須有多相組織——硬塊分布在軟基底上<sup>[2]</sup>。這種組織在工作時，硬塊支撐住負荷，摩擦力小且不致抓傷軸頸，而范性基底則使得軸承（減摩材料）容易和軸頸貼合而避免局部過荷。在蘇聯都稱這些條件為薩爾比定則。薩爾比定則概括了絕大多數減摩材料的組織的特點，以後創造新材料也都遵循此定則而得到良好的結果<sup>[3]</sup>。儘管在解釋硬塊軟底的作用上有許多分歧的意見，但誰也不否認此定則對創造減摩材料的重大的指導意義。很久以來，它是解釋減摩組織的唯一理論。

我們在工作中曾多次地驗證多相組織的優越性。在 [4] 工作中我們比較了含銅 69.31% 及 62.58% 兩種黃銅的磨損，前者為單相  $\alpha$  固溶體，後者為  $\alpha$  固溶體及 CuZn ( $\beta$  相) 兩相混合物。實驗說明，在各種條件下，雙相組織總是比單相組織好：磨合快，最大比壓力  $p_m$  大。

另一個重要的結果是關於組織模擬的研究<sup>[5]</sup>。

大家熟知，各種錫基和鉛基巴比合金是很好的減摩材料。以 B83 為例，其組織中有范性的  $\alpha$  相 (Sb 在 Sn 中的固溶體) 基底，硬的方塊  $\beta$  相 (化合物 Sn Sb) 及少量的  $\eta$  相 ( $Cu_3Sn$ ) 和  $\epsilon$  相 ( $Cu_3Sn$ )，滿足薩爾比定則。但是這種材料多含錫，價錢昂貴，而且其工作條件一般是慢速低載荷，不能使用於更高溫度。例如 B6 最大容許的  $p \cdot v$  為 40 千克/厘米<sup>2</sup>·米/秒，B16—60 千克/厘米<sup>2</sup>·米/秒，而最優良的 B83 也不過 150 千克/厘米<sup>2</sup>·米/秒。

根據組織模擬的觀點，我們注意到鐵-碳系統中可以經過特殊熱處理得到符合薩爾比原則的組織。

亞共析鋼的淬火規程通常為加熱到  $A_3$  以上，保溫後迅速冷卻。如果加熱的溫度高于  $A_1$  而低于  $A_3$ ，則在淬火時將有一部分鐵素體保留下來，得到鐵素體-馬氏體組織。將不同成分的亞共析鋼在  $A_1$  與  $A_3$  之間的不同溫度下淬火，可以得到不同比例數量和不同顯微硬度的鐵素體-馬氏體組織。這種組織有硬塊-軟基底的特點，改變加熱和冷卻的速度，可以改變硬塊的形狀。

根據上述方法用 20 號碳鋼製備了如表 1 中所列六種樣品。

採用不同硬度的磨盤，磨損實驗的結果如圖 3, 4, 5 所示。由圖 3 可見，當磨盤較軟時，鐵素體-馬氏體組織還不如常化的鐵素體-珠光體組織。磨損雖然開始不大，然而緩慢而卻不斷地增加，最後反而超過 0 號樣品，磨痕也粗糙不平。可見，組織中仅有的 25% 馬氏體就足以抓傷磨盤。（馬氏體多的更為嚴重，因此實驗沒繼續做下去。）

對於硬的盤，則鐵素體-馬氏體組織有顯著的優點。例如以馬氏體的 45 號鋼為盤時

表 1

样品编号	铁 素 体		马 氏 体	
	数量 %	硬度 $H\mu_{20}$ 千克/毫米 <sup>2</sup>	数量 %	硬度 $H\mu_{20}$ 千克/毫米 <sup>2</sup>
1	~75	265	~25	996
2	~65	261	~35	903
3	~50	258	~50	820
4	~35	253	~65	781
5	0	—	100	540
0	~75	162	~25	266
(常化组织)				(珠光体)

(图5), 1号样品比0号样品的  $p_m$  大了 2.5 倍, 而磨合时间则少了 4.5 倍。增加马氏体含量稍稍增大  $p_m$ , 但数量不大, 而磨合时间却显著增加了。从图上看似乎 5 号样品  $p_m$  最大; 其实磨盘上有抓伤痕迹, 不能认为是最好的。

以托氏体 45 号钢为盘时(图 4)情况就更明显, 其中 1 号样品最佳。

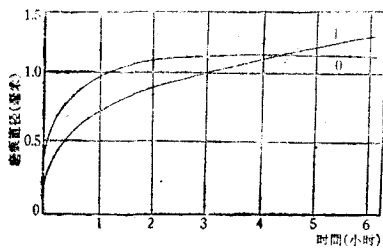


图 3 索氏体盘(硬度  $\cong 28R_C$ )

因此, 我们得出结论: 当采取硬度较高的磨盘时, 铁素体-马氏体组织有比常化组织更好的耐磨性。同时, 在实验的范围内, 以含 25% 马氏体的为最佳, 它综合了高极限比压力和磨合时间短两方面的优点。此种组织与常化组织及标准巴比合金的比较如表 2 所示。

因此, 这种材料可以承受高负荷和高速度, 有应

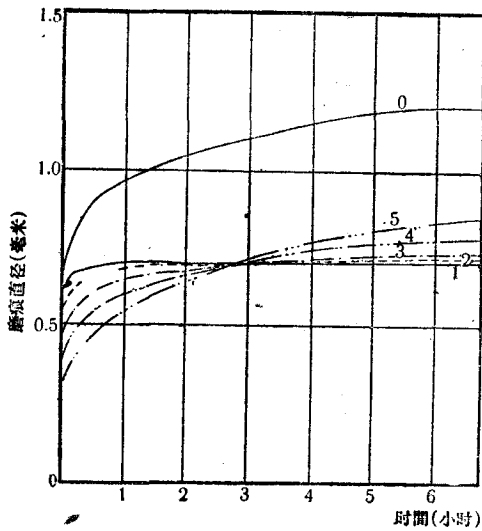


图 4 托氏体盘(硬度  $\cong 40R_C$ )

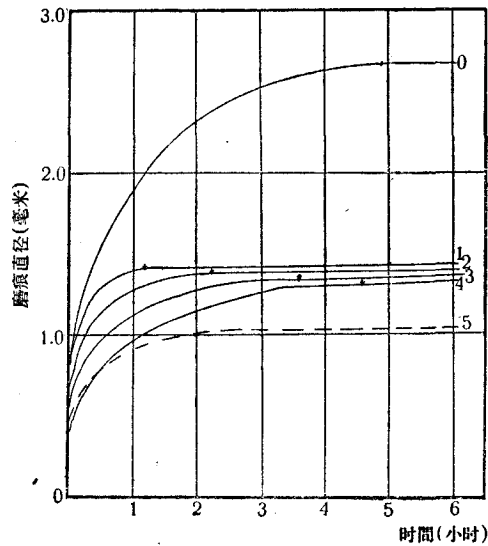


图 5 马氏体盘(硬度  $60R_C$ )

表 2 (相对綫速度  $v=1.07$  米/秒)

样品编号	組 織	磨 盤	$p_m$ (千克/厘米 <sup>2</sup> )	磨合時間(小时)
Б83	73% $\alpha$ + 17% $\beta$ + 10% $s$	45号鋼常化	139	>4
0	75%鐵素体 +25%珠光体	45号鋼托氏体組織	429	>5
1	75%鐵素体 +25%馬氏体	45号鋼托氏体組織	1250	$\approx 1$

用于若干工作条件繁重的机件的可能性。例如在某些情况下,可能代用青銅軸承材料或用于噴气发动机做較高温的減摩材料。

此外,这种材料的組織特点及其数量关系——25—35% 硬相馬氏体——再次証實了減摩材料的多相組織理論。

在显微組織方面我們还观察过晶粒大小的影响<sup>[6]</sup>。在澆鑄巴比合金时改变鑄模的温度可以改变晶粒大小。我們发现,在該滑潤条件下有一个最佳晶粒度(硬块大小約 0.025 毫米直徑),过大或过小都不好。

#### 四. 結構与摩擦磨損

金屬在接触摩擦时,表面层之間相互作用,并与周圍介質作用。决定这些作用的最根本的因素應該認为是金屬表面层的結構——原子的电子云結構,晶格类型、大小等等。

有若干工作指出,当異类金屬相互摩擦时,摩擦对兩金屬元素的亲和力有重要影响。<sup>[7,8]</sup>一般,亲合力愈小,靜态摩擦力愈小,动态摩擦时愈少粘連,磨損愈少。

И. В. Крагельский 在研究速度对同类金屬磨損的影响的工作<sup>[9]</sup>中发现不同的晶格类型有不同的情况。其中所有材料可分成三类:

1. 非立方的复杂晶格: Sn、淬火鋼 V8 (四方晶格)、石墨(六方晶格、层狀)。这类材料在各种速度和变化的負荷下都沒有观察到深的拉痕(вырывание),磨損小,磨損产物是极細的粉末狀的金屬或氧化物。

2. 立方面心晶格: Ni, Cu, Al, Pb。这类材料在所有条件下(該实验所涉及的)都观察到拉痕。磨損大,表面发生粘連,破坏很严重。

3. 立方体心晶格及多相合金: W, Ta, Mo, Fe 及常化的 V8 鋼。这类材料有所謂临界速度,在此速度以下如第 2 类,以上如第 1 类。

Крагельский 虽然提到上列金屬的磨損与其晶格类型似有联系,但并未明确指出,也沒解釋这联系的内在原因。

我們認为,金屬在摩擦磨損时的表現与其晶格类型应有着有机的联系,虽則它不是很簡單和一目了然的。这方面值得进行系統性的实验,深入探討。在此思想基础上我們做了如下簡單的試探实验。

我們采用異类金屬間的滑潤摩擦。以淬火鋼 V8 为标准磨盤,取强度相差不远但晶格类型不同的 X18H9T, X20H80(面心立方)与 Армко 鉄及鉄-錫-硅合金 No.7(体心立方,

关于铁-钨-硅合金，详见本刊另一文：研究耐热合金的一个新方向——铁-钨-硅合金系统)做比较。其磨损实验结果如图 6, 7 所示。为和强度对比，列出各样品的硬度如表 3。

表 3

样 品	Армко Fe	X18H9T	X20H80	Fe-W-Si № 7
硬度 $H_V$ 千克/毫米 <sup>2</sup>	148	239	280	311

(表中为负荷为 200 克的显微硬度值，比真正的维氏硬度值要高些。)

实验中观察到，Армко 铁和铁-钨-硅合金的磨损小得多，而且在摩擦过程中摩擦力很均匀，磨盘表面没有涂抹或深拉的痕迹。

与前者相反，X18H9T 和 X20H80 的磨损则很大。在摩擦过程中，摩擦力跳动不停，磨盘表面出现许多深沟和凸起，在实验时可听到很响的咔嚓声。

上述结果很难用强度(或硬度)来解释。硬度最低的 Армко Fe 却有着比硬度高得多的镍铬奥氏体钢及镍铬合金显著好的耐磨性。而铁-钨-硅合金虽然硬度较高，但其相对耐磨性(与镍铬钢或镍铬合金相比)也与相对的硬度不符。

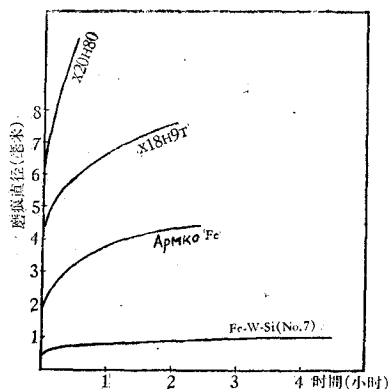


图 6 磨损曲线  
 $p=4.83$  千克;  
 $v=1.07$  米/秒

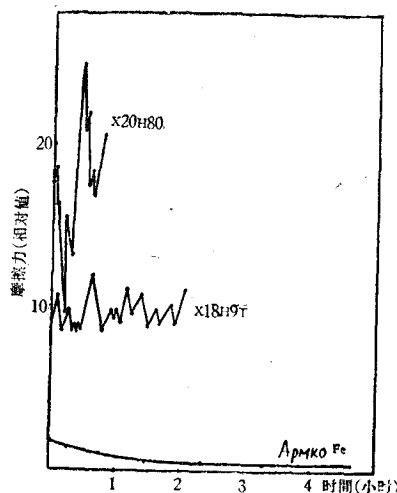


图 7 摩擦力与时间的关系

由此可见，在有滑润条件下，即使是异类金属间的摩擦，耐磨性也与晶体结构有联系：对于同一磨盘(淬火钢 Y8)，体心立方晶格的铁及铁合金和面心立方晶格的镍铬钢及镍铬合金相比有显著好的耐磨性。

关于这种联系的实质目前还很难提出肯定的看法。估计，这和“金属性”的强弱，等价滑移面数目的多少，以及与此有关的导电性，范性等因素在表面粘连时所起的作用有关。我们认为，应该进一步研究大量金属材料，才能总结出更一般的规律。上述的工作一方面提出了一个重要的物理问题，另一方面进一步肯定了我們研究铁素体型合金的方向。因为在保证耐热性的同时，这种合金在耐磨性方面也有绝对的把握。

## 五. 关于边界滑潤

由于滑潤条件的不同, 固体間的摩擦主要有: 液体摩擦、边界摩擦和干摩擦三类。头尾两类是极端情形, 过去研究得也比较系統成熟。边界摩擦在实际中极常遇到, 但这方面的工作却比较少。

液体滑潤条件下, 摩擦表面被很厚的滑潤层(不小于  $5\mu$ ) 所隔絕, 磨損几乎不存在, 摩擦力极小。这种条件可以完全用粘滯液体的流体动力学来描述, 与摩擦表面对滑潤层的作用关系不大。在边界滑潤条件下, 摩擦表面之間的縫隙很小(約  $0.1-1\mu$ ), 它們仅隔着一个边界层相互接触。在这种条件下, 固体表面与边界层的相互作用就起着决定性的作用<sup>[10,11]</sup>。

現在已經了解<sup>[12,18]</sup> 在边界层中, 由于固体表面层的原子或分子的电磁场的作用, 滑潤油的長分子形成了定向排列的层狀結構, 有极大的抗压强度和一定的极限剪切应力(或极限滑动应力)。随着层的厚度的增加, 远离固体表面的分子列有序度就更少, 抗压强度愈小, 而边界层沿此分子列滑动的阻力就愈小。在  $10^{-5}-10^{-6}$  厘米以外, 分子排列就和正常液体中一样。边界层的結構和性質和固体很相近, 所以有时称为准固体。

我們分析了在压力逐渐减小的磨損过程中摩擦系数, 金屬表面层硬度, 接触間电阻的相应变化(其中摩擦系数及电阻变化見图 8, 9), 認為磨損过程正相当于边界滑潤层的建立过程。当比压很大时, 金屬表面間只可能存在极少数的分子层。由于表面场的强作用, 少分子层与金屬表面的結合及其强度可能大到这样程度, 以至于摩擦时滑移更容易沿摩擦对中較軟的金屬的表面层内进行。于是軟金屬表面层发生极大的范性形变, 而且被边界层拉削下来, 造成磨損。随着接触面积扩大, 比压减小, 边界层厚度增加, 极限滑动应力减小。当比压降到  $p_{max}$  以下时, 层达到这样的临界厚度, 在此以上, 其极限滑动应力小于較軟金屬的抗切强度, 因此滑动主要沿边界层内进行, 而边界层則失去其“拉削”金屬的作用, 磨損即停止, 达到稳定。

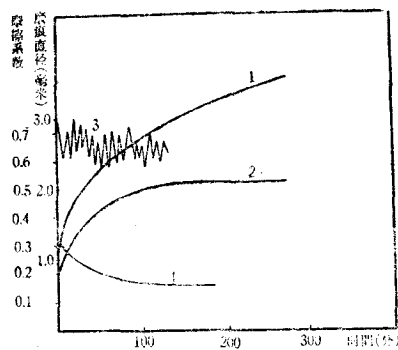


图 8 磨損过程中摩擦系数的变化  
(B83-45 号鋼)

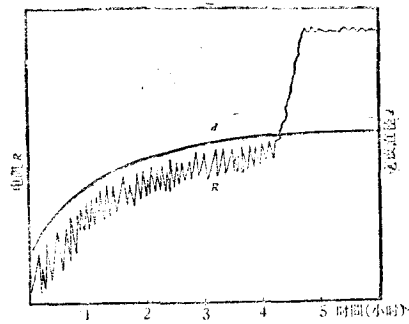
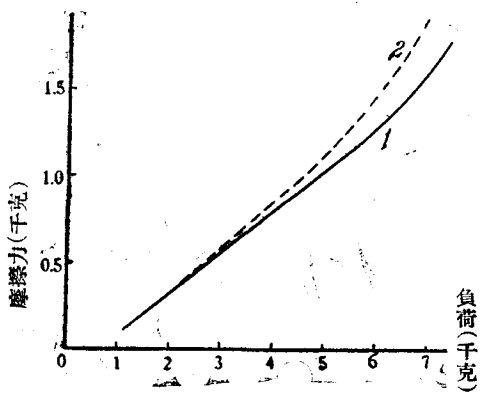


图 9 磨損过程中电阻的变化  
(鋅-45 号鋼)

更有力証明“稳定”后的条件仍是边界滑潤的是摩擦力与負荷关系曲线。大家知道, 边界滑潤最主要的特征是摩擦力与負荷成正比而与速度关系很小。相反的, 液体滑潤时摩擦力正比于速度梯度而与負荷沒有直接的关系。我們用一定負荷  $P_0$  磨到稳定后, 將



1—无电流作用；2—在电流作用下。

图 10

負荷除去, 然后从最小負荷起逐步增加, 測量各种負荷下的摩擦力, 实验中并控制使无明显的磨損, 所得的結果如图 10。我們看到在  $P < P_0$  ( $= p_m \times \text{面积}$ ) 的一大区域内, 摩擦力正比于負荷, 而且摩擦系数  $\approx 0.20$  相当大, 然而仍比干摩擦小些, 証明的确实现了边界滑潤的条件。負荷大于  $P_0$ , 則曲綫逐渐弯折向上, 显然相应于边界层的破坏, 而过渡到單分子层及表面直接接触等的条件。当負荷減到很小时, 曲綫也轉为渐趋平行于橫軸, 相当于向液体滑潤过渡。

总之, 我們看到錐形 (或半球形) 样品磨損

到“稳定”正相当于边界层达到一定的临界厚度——失去“拉削”軟金屬能力的厚度。因此  $p_{max}$  (当  $v = \text{const}$ ) 值是既反映金屬材料的强度, 也反映边界层的結構与强度的物理量。

边界层的結構与强度和金屬材料本身的組織、結構、表面的狀況, 滑潤剂的成分、性質以及温度……等一系列外界条件有关。因此  $p_{max}$  值和材料的强度沒有單值的关系。例如图 11 所表示的在其他条件完全相同时几种金屬的磨損曲綫。其中, 强度最低的巴比合金, 其  $p_{max}$  ( $v = 1.07$  米/秒) 比錫大 2.7 倍, 比鋁大 4 倍, 比鋅大 5 倍, 仅次于鋼。这是与其組織的特点有关的。

我們观察了一系列因素例如滑潤油的粘度, 表面活性物質, 温度, 振动以及外加电流等因素的影响, 証明  $p_{max}$  值对这些因素是很敏感的。

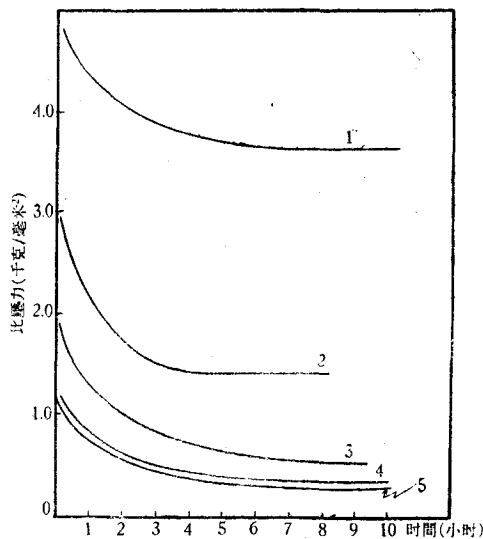


图 11 各种材料的磨損曲綫

1—ArmkroFe; 2—B83; 3—Cd; 4—Al; 5—Zn

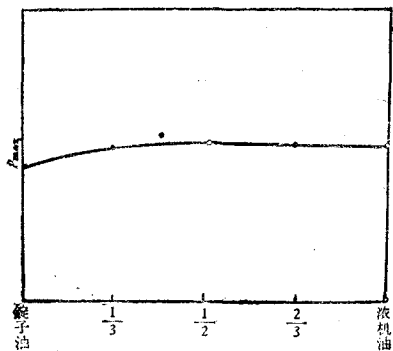


图 12  $p_{max}$  与粘度的关系 (样品 B16)

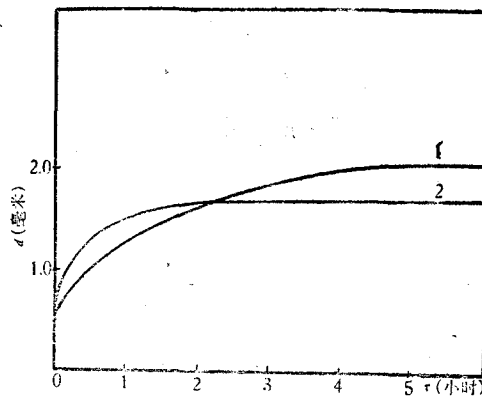


图 13 油中加入极性物質的影响 (錫-45 号鋼)

1—锭子油; 2—锭子油 + 0.2% 油酸



如图 12 所示, 同一材料的  $p_{\max}$  随滑潤剂粘度的增加而增大<sup>[6]</sup>。

图 13 表示油中加入少量极性物質的影响。由于极性分子促进边界层分子列的建立, 所以磨合時間縮短, 而  $p_{\max}$  值却增大。

温度和振动的影晌是类似的, 它們促使边界层无序化, 从而降低  $p_{\max}$  值 (如图 14, 15)<sup>[4,6]</sup>。

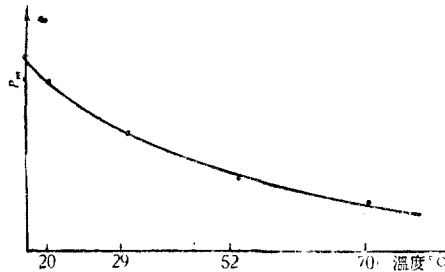


图 14 温度的影响

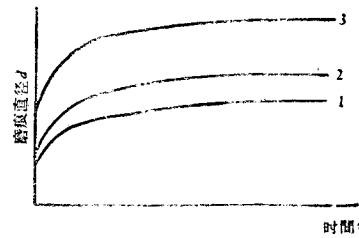


图 15 外加振动的影晌  
1—总負荷为  $P$ ; 2—总負荷为  $P+\Delta P$ ;  
3—負荷在  $P$  上下振动, 振幅为  $\Delta P$

最后我們詳細地研究了通过兩摩擦物体接触面加电流的影响<sup>[14]</sup>。

首先, 实验指出, 在摩擦物体間加一定方向的电位差会改变摩擦力, 在大多数情况下增加摩擦力。电位差愈大时影响愈大。电作用的效应在比压力大时尤其显著 (如图 10 的虛綫)。

其次, 是对磨損的影响。在正常条件下建立了“稳定”条件, 磨損停止后, 外加一定方向的电流能使磨損重又进行 (如图 16)。电流愈大, 此加强磨損的作用愈显著 (如图 17)。值得注意的是不同方向的电流, 其加强作用不同。以鋅-鋼(盤)摩擦对为例, 当鋅为正极, 鋼为負极时, 加强作用比反过来时为大。电流大时, 正負方向的差别較不显著。

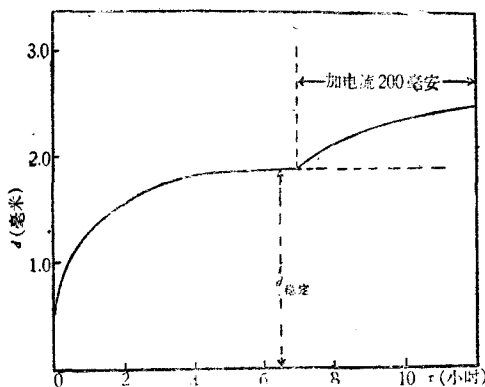


图 16 样品: 鋅  $P=930$  克,  $v=1.07$  米/秒

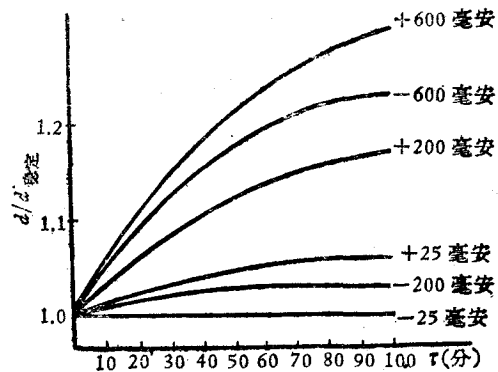


图 17 不同方向及大小的电流的作用

对于其他金屬, 电流同样在不同程度上产生影响, 但其影响的特点及大小各不相同。例如对鋁效应則比对鋅大, 鎳次于鋅, 銅、鉄、巴比合金 B83 等則相对地小。对于鎳, 电流方向的影响与鋅同, 而鋁、銅、鉄、巴比合金則相反 (如图 18)。

观察样品磨痕表面的情况, 发现在一定的小电流作用下 (正負方向相应的电流值不同), 表面的粗糙不平被抛光了。电流再大, 則又重新产生粗糙的磨痕。

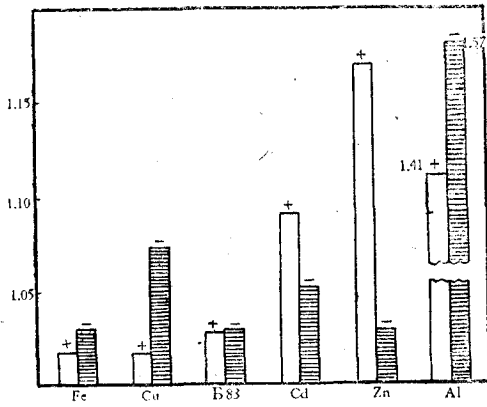


图 18 电流对各种金属磨损的影响  
 电流  $I=200$  毫安; 作用时间 2 小时; 接触面积: Fe— $0.66$  毫米<sup>2</sup>, Cu— $0.90$ , B83— $3.4$ , Cd— $4.6$ , Zn— $3.1$ , Al— $2.9$  毫米<sup>2</sup>

20), 对于锌-钢对, 正电流(样品为正)总是使磨损高于无电流作用的正常条件下的磨损, 而且不断进行; 在较大负电流下, 磨损同样比正常条件下厉害, 但是存在着一定范围的小电流值, 在这种电流作用下, 磨损反而比正常条件下略小, 在较短的时间及较大比压下达到稳定。

这一实验事实是顶有趣的。我们看到, 对于实际应用的许多在电流作用下精密的摩擦元件, 一方面应该注意电作用对磨损的加强作用, 研究并采用换向的方法以减少磨损; 另一方面, 有可能加一定方向和一定量的小电流以略减少磨损。

关于电作用对摩擦磨损影响的机构还值得进一步探讨。我们仅提出两种可能的解释。

1. 外加电场引起金属表面电磁场的变化, 使之加强或某种程度的减弱。其结果一方面可能改变边界层分子的定向排列, 另一方面还改变边界层分子与金属表面的结合力。因此, 在多数情况下, 外加电场增加边界层定向, 加大其强度, 增加边界层对软金属的拉削作用。但是, 当所加外场恰好能够削弱软金属表面场的的作用时, 由于某种程度的无定向化, 使得沿边界层内进行滑动变得更容易, 磨损则反而减少。

2. 在电场作用下, 金属离子和带电荷

边界层电阻的测量说明, 当作用的电流逐渐增大时, 边界层的电阻急剧降低。在不同方向的电流作用下, 其下降的趋势不同。当锌为正极时的电阻时刻总是比为负极时小如(图 19)。

也观察到交流电对于摩擦力及磨损的加强作用。其程度随电流强度的增加而增大。就其效应与直流电比较来看, 介乎正负两方向的作用之间。

既然, 在建立了临界厚度的边界滑润层以后, 外加电流会使磨损重又进行, 那么如果从比压力无限大的开始时刻就加上电流, 它将如何改变磨损的过程呢? 实验指出(如图

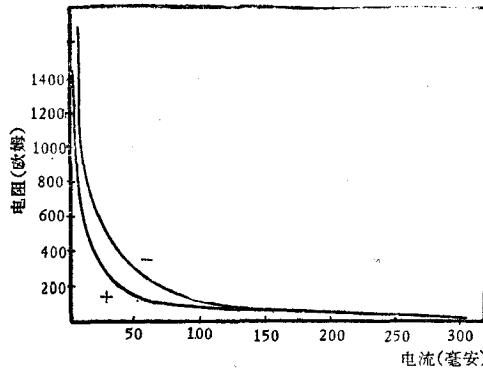


图 19 不同方向电流对边界层电阻的影响  
 ( $p=p_{max}$ , 样品: 锌)

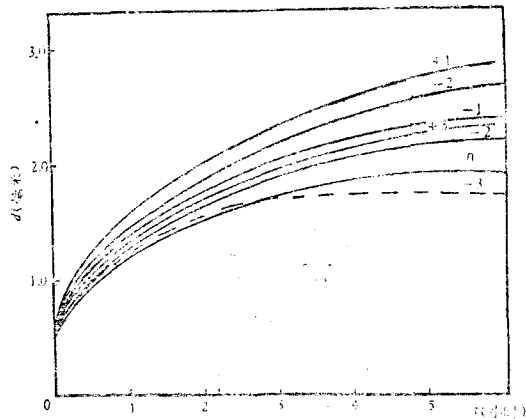


图 20 电作用对磨损曲线的影响(锌)  
 0—无电流作用;  $\pm 1$ —起始电流 $\pm 160$ 毫安;  
 $\pm 2$ —起始电流 $\pm 40$ 毫安;  $\pm 3$ —起始电流 $\pm 5$ 毫安

屬顆粒的迁移也是可能的。

尽管上述解釋可能完全不对，但电流的影响所提供的資料对于解决关于边界滑潤层結構和性質的問題不是完全无益的。

最后我們曾經附帶地研究了边界滑潤层的电阻，以及比压力，外电场强度、交变頻率等对电阻的影响，发现在电性能方面，边界层条件下的滑潤油和一般情况下的介电質油相比有許多特点，值得进一步探討。

## 六. 結 論

1. 从生产和科学发展的要求来看，我們認為應該广泛而且深入地研究摩擦磨損物理。首先是积累摩擦磨損过程的規律，研究一方面是摩擦物体(如金屬材料)的組織、結構和性質，另一方面是介質(如滑潤剂)的結構和性質，以及這兩者的相互作用相互影响，与摩擦磨損現象的联系，外界条件的作用，等等。当然，与此同时，應該重視生产所提出的个别問題的解决和不断將研究結果应用到實踐中去。

2. 我們提出了新的磨損試驗方法，其主要特点是利用錐形(或半球形)样品在滑潤磨損时比压随時間下降而达到自动稳定的規律可以迅速决定材料的  $(p, v)_{\max}$  和磨合時間。在研究工作上便于研究边界滑潤。

3. 我們研究了金屬材料的組織、結構对磨損的影响，認為：体心立方結構的單相金屬或合金比面心立方結構的有較高耐磨性；多相組織优于單相組織。在此基础上，我們証明了鉄素体型合金底耐磨性方面的优点。根据模拟的思想提出了鉄素体-馬氏体材料，这种材料和較硬的材料配对可作为在高負荷高速度下工作的減摩材料，有可能代替青銅等昂貴的合金。

4. 在分析磨損过程的基础上我們提出了工艺上采用的  $(p, v)_{\max}$  值的物理含义。指出这是既反映金屬材料强度，同时也反映边界层的結構和强度的物理量。而后者又与金屬的組織、結構相联系。

5. 我們研究了滑潤油的粘度，表面活性介質以及温度，外加机械振動等外界条件对边界滑潤的影响。前兩者是增大  $p_{\max}$ ，后兩者是降低。其原因可用对边界层結構的影响来解釋。

6. 我們曾做了較多的实验观察外加电流对边界滑潤的影响。在大多数情况下，电流加剧磨損，但是对各种材料，不同方向的电流不同。有意思的是对于鋅-鋼摩擦对，发现有一定大小和一定方向的电流可以使磨損反而减小。电流作用的事实可做为了解边界层結構性質以及边界滑潤条件下的磨損機構的有益資料，同时也提出一种减少磨損的途徑，在实际中不无价值。

## 参 考 文 献

- [1] М. Г. 莫洛卓夫, 王佩璇, 研究金屬耐磨性的新方法, 东北人民大學自然科學學報, 1957 年第 2 期.
- [2] Хрущёв, М. М., Трение и износ в машинах. сб VI, 1950.
- [3] Шпагин, А. И., Антифрикционные сплавы, 1956, Металлургиядат.
- [4] М. Г. 莫洛卓夫, 王宗濬, 銅基合金的耐磨性, 东北人民大學自然科學學報, 1957 年第 2 期.
- [5] М. Г. 莫洛卓夫, 王佩璇, 鐵素體-馬氏體鋼的抗磨性, 东北人民大學自然科學學報, 1957 年第 2 期.
- [6] М. Г. 莫洛卓夫, 朱定華, 組織和外界條件對巴比合金抗磨性的影響.
- [7] Костецкий, Б. И., Повышение износостойкости срока службы машин. Машгиз киев-м., 1953.
- [8] Coffin, L. F., Перев. сб. "Машиностроение" № 11 (1956).
- [9] Крагельский, И. В., Швецова Е. М., Трение и износ в машинах сб X, 1955.
- [10] Дерягин, Б. В., Труды II всесоюз. конференции по трению и износу в машинах, т. 4 (1951).
- [11] Дерягин, Б. В., Развитие теории трения и изнашивания, 1957. Труды совещания по вопросам теории трения и изнашивания (15-17 ноября 1954 г.).
- [12] Ахматов, А. С., 同 [10].
- [13] Ахматов, А. С., 同 [11].
- [14] М. Г. 莫洛卓夫, 王佩璇, 電流對邊界摩擦的影響, 东北人民大學自然科學學報, 1958 年第 1 期.

## НЕКОТОРЫЕ ВОПРОСЫ ФИЗИКИ ТРЕНИЯ И ИЗНОСА

ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ КОЛЛЕКТИВ ПО МЕТАЛЛОФИЗИКЕ ФИЗ. ФАКУЛЬТЕТА СВНУ.

## Резюме

В статье представлена работа нашего коллектива по трению и износу. Подчеркивается важность исследования связи этого явления с разными физическими факторами. Приведены результаты исследований по связи трения и износа со структурой и кристаллическим строением, на основании которых выдвинут новый антифрикционный материал на железной основе (структура феррит-мартенсита). В работе также подробно исследованы закономерности граничной смазки. Было обнаружено влияние вязкости смазки, добавки поверхно-активных веществ, температуры, внешнего колебания и электротока на граничное трение. В частности, замечены усиление износа внешним электротоком вообще и, в известном случае, уменьшение износа током определенного направления и определенной величины.