

高聚物的摩擦和磨损

鲁德曼〔美〕

（根据讲学记录整理，未经本人审阅）

摘 要

高聚物的摩擦数据变化甚大，作者认为其主要原因是高聚物的粘弹性。利用弹簧-粘盘的力学模型描述了高聚物的粘弹性，根据高聚物的动态力学性能论述了高聚物摩擦性能与粘弹性的关系。并指出，当材料的摩擦系数随滑动速度的提高而下降时，摩擦体系将会发生振动、噪音和粘-滑现象。

在材料手册中至今尚无高聚物的磨损数据。目前设计者对PV值较感兴趣，作者认为手册中的PV值不能真实地表示材料的性能，只有在确定温度条件下的PV值才有意义。同时介绍了摩擦表面上温度升高值的经验公式和几种测量摩擦温度的方法，并对高聚物的磨损特性作了论述。

前 言

人们研究摩擦和磨损是为了控制它们。对于摩擦，在多数情况下希望它最小；也有一些场合要求它增大，如刹车片、防滑材料等。磨损则往往是不受欢迎的损耗。摩擦和磨损通常是由相互有关的机理引起的，所以，人们总是将它们关联起来研究。高聚物的摩擦和磨损具有与其他材料不同的特性，下面将它们作简要介绍。

一、高聚物的摩擦

工程设计人员希望能在材料手册或有关资料中找到摩擦数据符合某工程要求的所需材料，但是，在查找高聚物材料的摩擦数据时发现，高聚物的摩擦数据变化很大(图1)。这给设计者带来极大的困难。高聚物摩擦系数变化如此之大的原因主要是它的粘弹性能。为了便于叙述，先从聚合物的粘弹性说起。

1. 高聚物的粘弹性

高聚物材料在受外力作用时，既表现出弹性形变的性质又表现出粘性形变的性质，这种双重性称之为粘弹性。它是高聚物力学性质的一个重要特征。

高聚物的粘弹性可用弹簧和盛有粘性液体的“粘盘”组合体系的力学模型来描述。图2

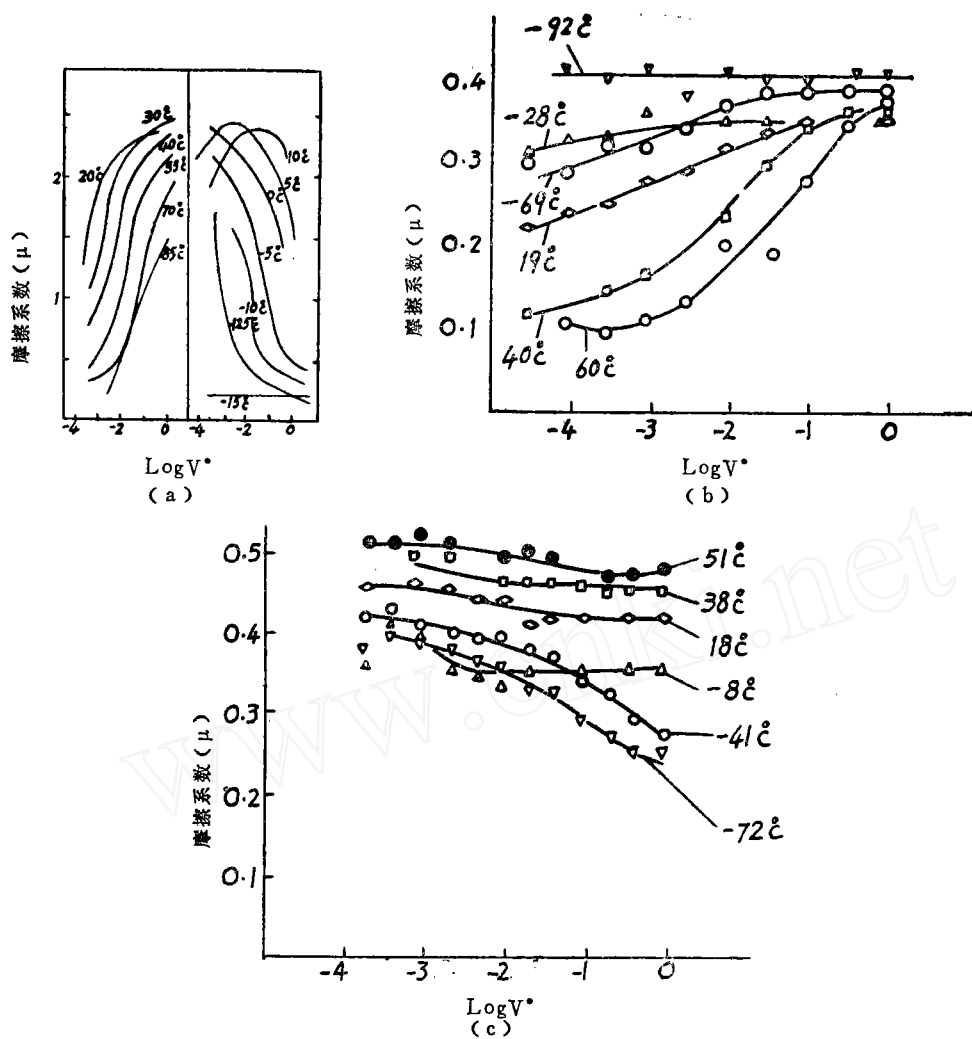


图1 高聚物的摩擦系数随温度和速度的变化

(a) 一丁腈橡胶; (b) 一聚乙烯; (c) 一尼龙66

注释*滑动速度

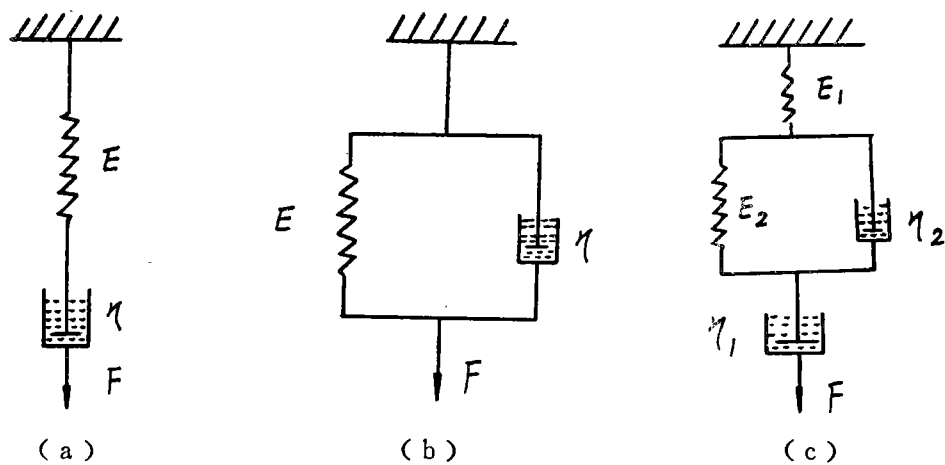


图2 高聚物粘弹性模型示意图

是弹簧与粘盘的二元串联和并联以及四元复合联结的高聚物粘弹性模型示意图。

现以图 2 (a) 和 (b) 为例进行描述：在二元串联模型即图 2 (a) 中，当体系受外力 F 作用时，弹簧 E 首先有一定的形变，然后粘盘缓慢地被拉开，使粘盘产生一定的形变。如果维持体系的形变一定，粘盘形变慢慢地增大使弹簧放松，其拉力逐渐减少直至最后完全消失。这就是应力松弛过程。其应力与时间的关系如图 3 (a) 所示。

在二元并联模型即图 2 (b) 中，当体系受外力 F 作用时，开始时，弹簧和粘盘同时产生一个形变，然后，粘盘在应力的作用下仍会继续形变（拉开），但由于弹簧的限制，使体系的形变逐渐缓慢，这就是高聚物的蠕变过程。其形变与时间的关系如图 3 (b) 所示。高聚物的粘弹性主要表现为应力松弛和蠕变等这些力学弛豫现象。所以它的力学行为必须考虑应力、应变与时间、温度的关系。

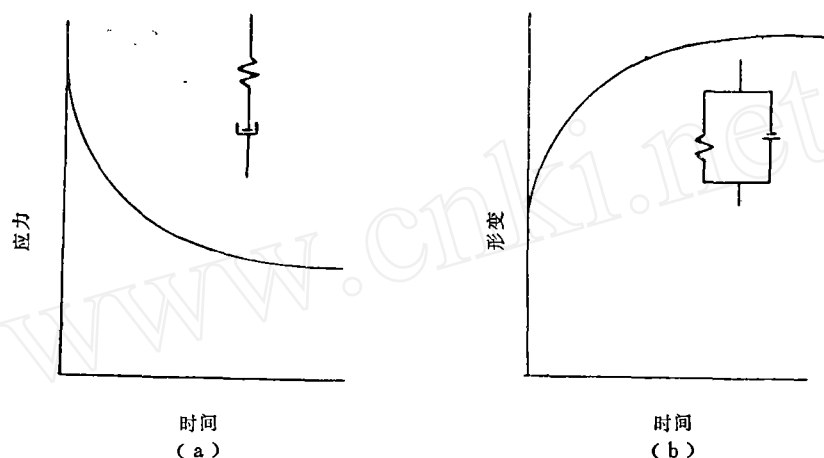


图 3 高聚物粘弹性的应力、形变与时间的关系

2. 高聚物的力学性能

高聚物的粘弹性使它在拉伸试验的拉伸过程中，其应力-应变按图 4 中曲线 1 的形状变化，在解除外力后，其应力-应变不按曲线 1 的形状回复，而按曲线 2 的形状变化，并且往往不能完全回复到形变前的状态。图 4 中曲线 1 与 2 之间阴影部分的能量就是由于高聚物的力学弛豫所引起的能量损失，这部分能量被储存在高聚物内部变为热量，使高聚物的温度升高。汽车轮胎经行车后发热就是一个很好的例子。

高聚物的动态力学试验更明显而全面地说明其力学弛豫特性。一个交变应力作用于高聚物时，如果应力的交变频率 (ω) 固定，即外力作用的时间固定，改变温度则改变了形变的性能。当温度 (T) 很低时 ($T \ll T_g$ (玻璃化温度))，高分子运动的松弛时间 (τ) 很长 ($\tau \gg \frac{1}{\omega}$)，在外力作用的时间内，高分子链段的构象来

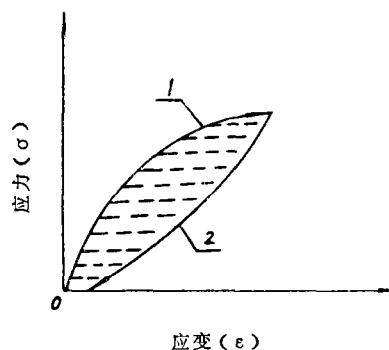


图 4 高聚物的应力-应变图

不及改变到适应外力作用下的平衡状态，因此，高聚物只能产生很小的形变，这时，其模量

很大, 能量损耗很小(图 5); 当温度升高使 τ 减小到与 $\frac{1}{\omega}$ 同一数量级时($\omega \cdot \tau = 1$), 高分子链段的构象转变可以完成, 形变就增加, 但形变随时间的变化与应力随时间的变化之间有一个相位差, 形变比应力总要落后一个相位。

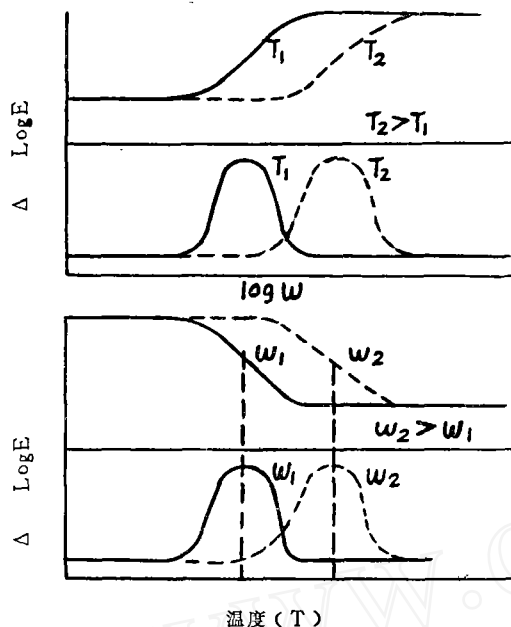


图 5 高聚物动态力学试验结果

应变与应力的滞后现象最严重, 力学内耗或力学阻尼最明显, 并且有一个最大值即内耗曲线的峰高点。在任何情况下, 该点相应于模量变化曲线的中点位置, 它们所对应的温度为高聚物的玻璃化温度。对于内耗(阻尼损失), 文献中的表示符号有: Δ 、 δ 、 $\tan \delta$ 和 $\frac{E''}{E'}$ 等。

橡胶球的反弹高度(表 1)较为直观地说明了高聚物的这种内耗随温度的变化情况。

表 1 橡胶球反弹高度试验结果

温度 $^{\circ}\text{C}$	-196	-70	室温	100	210
反弹高度	原高	较低	更低	原高	较低

损失的一部分。

高聚物的粘弹性主要表现为它的力学弛豫, 也就是说, 粘弹性使高聚物在受外力作用时的能量损失随温度和外力作用速度而变化(因为高聚物的力学弛豫随温度和外力作用速度而变化), 因此, 高聚物的摩擦系数(摩擦阻力——能量损失的来源之一)与粘弹性有密切关系。

由图 1(b)和(c)中的曲线表明, 聚乙烯(PE)的摩擦系数 μ 随滑动速度的增大而上升, 而尼龙-66的摩擦系数 μ 随滑动速度的增大而下降, 这种变化趋势相反的主要原因是两种材料的粘弹性不同。在图 1 较窄的实验条件下, 它们的阻尼损失的变化范围具有相反的趋势。

换句话说, 形变的变化总是落后于应力的改变, 就出现所谓滞后现象, 这时的温度 $T \approx T_g$, 并呈现出玻璃化转变, 其模量变化大, 能量损耗最大; 当温度继续升高到 $T \gg$

T_g 时, 松弛时间很短($\tau \gg \frac{1}{\omega}$), 高分子链段的构象改变总跟得上应力变化, 所以形变很快达到极限值, 形变与应力又是同相位, 其能量损耗不大。图 5 以内耗和模量对温度或交变应力的频率作图, 获得了相似的结果。这是因为固定温度则 τ 不变, 改变频率就是改变外力作用时间, 所以, 提高频率和降低温度对形变的影响是等效的, 对内耗的影响显然也等效。

图 5 中的曲线明显地给出了上述三种温度区域的模量和内耗情况。在转变区域, 其

3. 高聚物的摩擦系数

摩擦阻力是能量损失的来源之一。在高聚物的摩擦过程中, 高聚物滑块接触点附近的材料产生形变, 这种形变因力学弛豫引起阻尼损失(内耗), 摩擦阻力就是这种阻尼

当材料的摩擦系数随滑动速度的提高而下降时,该摩擦体系将会发生振动、噪音和粘-滑等现象。例如,食品厂面包烤炉的导轨,当采用尼龙-66材料时,在传送面包的过程中烤炉发生剧烈的振动和严重的噪音,工厂采取了很多措施未能很好改善,而将尼龙-66的导轨改用聚乙烯材料后,振动和噪音现象彻底消除,其原因就在于图1(b)和(c)中曲线所示的摩擦系数随滑动速度的变化趋势不同。

二、高聚物的磨损

在材料手册中至今还没有高聚物的磨损数据,只有高聚物的极限PV值(P是负荷,V是速度,两者的乘积即为PV值)。美国杜邦公司就以极限PV值给高聚物进行分类。所以,工程设计人员对高聚物的PV值较感兴趣。其实,手册中的PV值不能表示高聚物的性能,尤其是磨损性能,因此,它的实用价值不大。这是因为它没有指明温度和外力作用时间。高聚物的动态力学试验表明,温度或外力作用时间对高聚物的力学性能影响很大。所以,只有在确定温度或外力作用时间的条件下PV值才有意义。然而,摩擦面上的温度测量至今仍是一件极端困难的事,下面介绍几种测温的方法。

1. 摩擦面上的温度测量

为了获得摩擦面上的真实温度,Blok、Tabor、Jaeger、Ling等人总结了计算摩擦面上温度升高值的方程式,其一般形式是:

$$\Delta T = \frac{\mu w V}{J(K_1 + K_2) \cdot \text{几何形状因子}}$$

式中 ΔT 为温度升高值, μ 为摩擦系数, w 为负荷, V 为滑动速度, $J(K_1 + K_2)$ 为常数。虽然他们所用的试验机构不同,但所得的方程式相似,在Tabor的公式中,几何形状因子为 $2a$ (a 是接触半径)。 $\mu w = (F \text{ 摩擦力})$, $FV \approx \text{能量}$, $\frac{w}{A} = P$ (A 是接触面积),所以 ΔT 与PV成正比关系,杜邦公司的高聚物PV值实际上意味着表面上的温度升高。

在上面的方程式中,几何形状因子或接触半径无法测量,因此,实际的温度升高值无法获得。目前仍注重于实际测量,作者曾用过如下方法:

(1) 红外法

红外法测量摩擦面温度的装置示意图如图6所示。图6(a)是将红外测量仪的红外线对准刚滑过的摩擦面,由此测量该面的温度。这种测量,只有当滑块滑过后的面才可测量,所以,测得的温度低于摩擦面上的实际温度。图6(b)是在(a)的基础上,在不动的摩擦件(金属块)上打一小孔,将红外仪对准小孔使红外线穿过小孔,由此来测量滑块滑过小孔位置时的摩擦面温度,在滑块运动到小孔位置时,滑块存在未与下试块接触摩擦的间隙,所以,测得的温度亦偏低。

(2) 热电偶测温法

这是人们熟知的测温方法,热电偶不能测量热点或凸峰处的温度,它只可测量试块的平均温度,所以,该温度不能代表摩擦面的真实温度。

(3) 质谱法

质谱法测量温度的装置示意图如图7所示。摩擦时,摩擦面的温度使材料放气。该法首

先由质谱仪测定不同条件下摩擦试验时真空室内的气体成份及其含量，然后，加热旁管中已放置的与摩擦块相同的材料，并由质谱仪测定不同温度下真空室内的气体成份及其含量，比

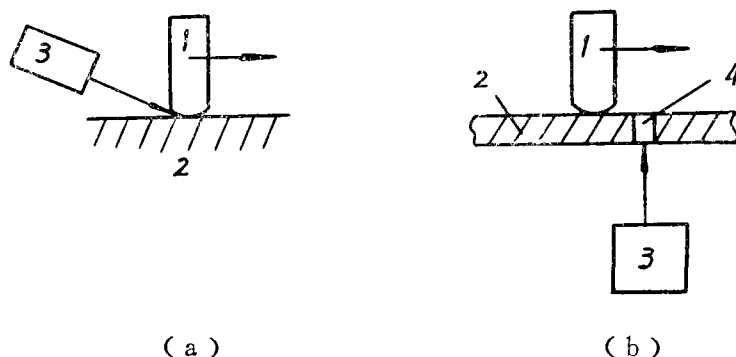


图6 红外测温法示意图

1—高聚物滑块；2—金属对摩片；3—红外测量仪；4—小孔

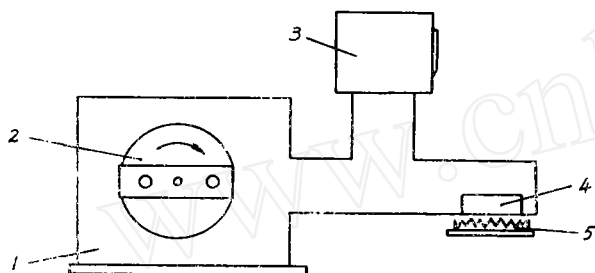


图7 质谱测温法示意图

1—真空室（ 10^{-6} 托）；2—摩擦试验机；3—质谱仪；
4—与摩擦块同种的高聚物；5—加热器

较这两种情况下所测定的结果，相似者表示旁管的加热温度与某条件下摩擦试验时摩擦面上的温度相当。该方法测得尼龙严重磨损时的温度为该尼龙的熔融温度+50℃的温度值，这与人们所公认的当温度为熔融温度+50℃时高聚物出现严重磨损的事实相一致，这表明该测温法是可信的。

2. 高聚物的磨损

高聚物的磨损是以转移膜的形式进行的，它属粘着磨损范畴，其磨损程度主要取决于摩擦面上转移膜的形成及其牢固程度。当高聚物与清洁的钢表面摩擦时，它们之间就发生粘着，粘结点的剪切通常发生在摩擦偶件中内聚能较弱的材料中而不发生在接触面间。所以，高聚物被剪切后在钢表面上形成牢固的转移膜。如果高聚物在已形成转移膜的钢表面继续摩擦，则成为高聚物之间的摩擦，其磨损很小。当高聚物与不清洁（即有污染物）的钢表面摩擦时，由于污染物的存在使高聚物在钢表面形成的转移膜很不牢固或形不成转移膜。在高聚物滑块第二次滑过时，滑块的前沿将上一次的转移物刮去成为磨屑，继后又在钢表面上留下新的粘结不牢的转移物，如此反复进行使高聚物的磨损很大。当高聚物始终在清洁的钢表面上摩擦时，其磨损程度与高聚物对不清洁的钢表面摩擦时的磨损程度相似。

高聚物的磨损行为可用磨损与摩擦程度间的关系描述〔摩擦程度以负荷与速度的乘积（ $w \cdot v$ ）表示〕，其关系如图8中的折线所示。在缓和摩擦时（AB区），磨损较高。由观察磨痕状态表明，在缓和摩擦过程中，由于摩擦面温度低，转移膜易疲劳磨损，所以，材料磨损较大；在较严重的摩擦条件下（CD区），摩擦面温度上升，材料韧性好，转移膜几乎不被磨掉，所以，材料的磨损极小；随着摩擦程度的加大，摩擦温度不断上升，当摩擦温度达到高聚物熔点+50℃的温度附近时，高聚物将出现严重磨损（DE区）。这是由于摩擦面上的

高聚物被熔融成液体，液态高聚物很难润湿钢表面，它将聚集成油滴似的液态小球粘附于钢表面，其直径远大于几百埃（ $\text{\AA}$ ）的转移膜厚度，而往往可达10微米，当滑块第二次滑过，

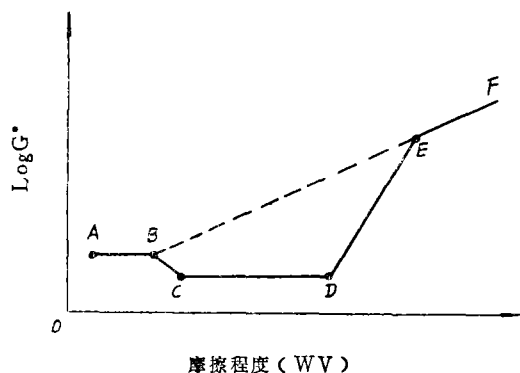


图8 高聚物的磨损与摩擦程度的关系
*G为磨损率

滑块的前沿极易将小球状的粘附物刮掉形成磨屑，继后又重新形成新的液态小球状粘附物，如此反复，造成高聚物严重磨损。EF为高聚物始终与清洁的钢表面摩擦时的磨损情况，其磨损极为严重，将B、E相连，BEF应成一直线，该直线表示高聚物与清洁的钢表面摩擦时磨损情况，即其磨损与摩擦程度成线性关系。

在高聚物与金属相互摩擦时，人们早已发现某些软金属（如铝、银等）被高聚物磨掉的现象。作者在摩擦试验中曾发现较硬的

不锈钢也会被高聚物磨损的现象。对此，作者研究了九种高聚物与不锈钢的磨损情况。结果表明，凡使不锈钢磨损的高聚物，其剪切强度均大于9500磅/时²，剪切强度低于9200磅/时²的高聚物不磨损不锈钢。使用X射线能量色散分析仪（EDAX）对高聚物摩擦栓的摩擦面进行了分析，凡磨损钢的高聚物摩擦面均具有Cr和Fe元素，不磨损钢的则无Cr和Fe元素。不锈钢的硬度为40Rc，屈服应力大于160000磅/时²，通常它是不会被高聚物磨损的，然而，事实又是已被磨损，这可能是由于高聚物磨掉了钢表面的氧化物所致。在摩擦条件下，钢的摩擦表面上不断地氧化形成氧化物，该氧化物被下一次的的高聚物滑块磨损并继续形成新的氧化物，如此反复，导致不锈钢磨损。这是一种推测的磨损过程，尚待研究证实。

Friction and Wear of Polymers

K.C.Ludema

University of Michigan, U. S. A.

(A Summary of lecture in China)

Abstract

The coefficient of friction of polymers may vary within a wide range. The speaker believes that it is largely owing to visco-elastic property, which is described with a spring-dash model. The relationship between friction behavior and visco-elasticity of polymers is discussed upon their dynamic mechanical behavior. As coefficient of friction of the material decreases with an increase in sliding velocity, vibration, noise and stick-slip will occur in the tribosystem.

So far, reliable wear data of polymers could not be found in material handbooks. Designers often take much interest in PV value. This value, however does not truly represent the material wear behavior. The PV value

钢领磨损机理的探讨

张 志 乾

(陕西省第二纺织机械厂)

摘 要

本文研究了钢领和钢丝圈在干摩擦下,以35~42公尺/秒的高速滑动下的磨损过程。结果表明,钢领的磨损表现为三种形式:疲劳磨损、“热疲劳磨损”和粘着磨损。导致钢领失效的原因主要是前两者。

钢领(20*钢渗碳或碳氮共渗、淬火、低温回火,硬度 $\geq$ HRA81.5)是细纱机上的重要零件,量大面广易损。它与钢丝圈构成一对纯滑动干摩擦副,相对滑动速度35~42公尺/秒。作者曾讨论过这一对摩擦副的接触情况^[1],并显微观察得出钢领的主要损坏方式是疲劳磨损即接触疲劳剥落^[2],将接触应力与渗碳淬火20*钢纯滑动时的接触疲劳极限相比较,从强度理论上证明钢领的确会发生疲劳磨损;同时指出钢领上还存在着粘着磨损^[3]。桑维厚等^[4]列举事实,说明钢领确实发生了粘着磨损。本文将论述钢领在高速干摩擦条件下的磨损机理:疲劳磨损、“热疲劳磨损”和粘着磨损,以及它们的区别、相互关系、各自对钢领失效的作用等问题。

一、钢领的“热疲劳磨损”

对使用过的钢领口部观察可见到如图1所示的一类凹坑。坑间断分布,外形不规则。坑深一般为0.01毫米左右,最深者约0.02毫米。坑底比较平坦光滑,两侧面和表面的夹角一大一小(在钢丝圈运动方向的一侧较大)。

1.1 钢领和钢丝圈间的瞬时接触温度

剖面观察钢领口部可看到如图2所示的现象:与钢丝圈相对磨的最外表面有零点几至数

*咸阳纺织工业学校赵明山参加了金相试验工作

~~~~~  
(接上页)

should be considered seriously only for a condition with a definite temperature. The speaker also introduces an empirical equation for flash temperature at rubbing surface and several temperature measurement methods. The wear behavior of polymers is discussed.