

国外转子发动机技术资料之二

缸体型面磨损因素 缸体型线修正技术

长春汽车研究所编

第一机械工业部情报所

目 录

国外转子机缸体型面波状磨损的诸因素·····	西安东风车辆厂 刘竞秀(1)
转子机润滑油与磨损的研究·····	(法国) B.Brandone J.du Jeu (14)
缸体型面的波状磨损·····	上海材料研究所 冯国光(28)
缸体型线的温度修正及其仿形加工法·····	(西德) Walter froede(31)
缸体内壁形状的改变·····	(西德) W.D.Bensinger(33)
缸体型线的加工与修正·····	(苏联)《Ротолоршневые Двигатели》(35)
808 余摆线磨床及余摆线修正量·····	(日本)《应用机械工学》(38)
西德 KM914 风冷转子机缸体型线的测量 ·····	中国科学院力学研究所 葛满初 马重芳(41)
缸体型线的检验装置·····	(西德) W.Gerhard Sachs(44)
国外几种余摆线加工磨床与铣床的性能参数表 ·····	(美国)《Automotive Industries》(46)

国外转子机缸体型面波状磨损的诸因素

西安东风车辆厂 刘竞秀

一、问题的提出

转子机的寿命涉及到很多问题,如发动机整体设计(其中有主要零件选材、冷却系统、润滑系统是否合理)、零部件的加工精度、发动机的装配(如主要件间的配合间隙大小)、附件的选择以及正确的使用维护等等,都从不同角度或多或少地影响着它的寿命和使用的可靠性。

国外在研制过程中,曾遇到一种通病,就是转子机运转一定时间后,缸体型面上出现波状磨损,严重时如洗衣板状,如图1所示,国外一度称之为“魔鬼的爪痕”。因之,提高使用寿命,就迫切要求对缸体波状磨损进行认真的分析并提出具体的解决方法,现根据国外的转子机技术资料,结合我们自己的认识综合分析如后。



图1 缸体火花塞区之波纹磨损

二、转子机摩擦付工作的特殊性

在选用一定材质配付的情况下,影响缸体型面和刮片磨损的主要因素是:刮片的滑动速度和刮片压向缸壁的压力,润滑油的数量与质量,温度状况以及加工精度等。

转子机的刮片和缸体这一对摩擦付的工作条件与一般机械摩擦付的工作条件有其相似之处,也有不同之处,因此在研究时,还应分析其特殊性。

(一) 刮片的滑动速度

刮片在缸体型面上滑动速度的变化如图2所示,刮片的滑动速度在长轴处达到最大,而在短轴处为最小,其公式为:

最大滑动速度: (当 $\alpha = 0.3\pi$)

$$V_{\text{最大}} = \frac{\pi n}{90} (K + 3) \cdot e$$

最小滑动速度: (当 $\alpha = \frac{3\pi}{\alpha}, \frac{9\pi}{\alpha}$)

$$V_{\text{最小}} = \frac{\pi n}{90} (K - 3) \cdot e$$

与往复机中类似,在衡量刮片与缸体之间的磨损指标,一般用算术平均值表示,其公式为:

$$V_{\text{算术平均值}} = \frac{\pi}{90} \cdot \frac{n}{1000} \cdot K \cdot e$$

式中 n ——发动机转速(转/分)

K ——型线参数

e ——偏心距(毫米)

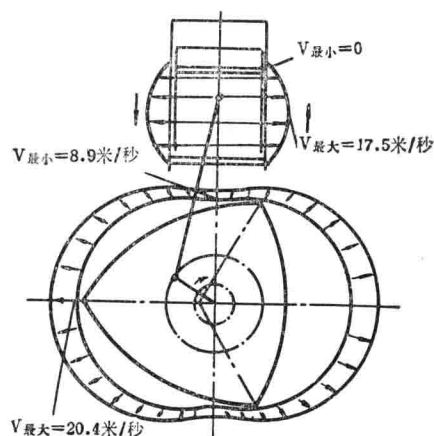


图2 KKM520机在转速 $n = 5000$ 转/分时刮片滑动速度的变化(图上的速度方向与实际方向相差 90°)

依所列公式对国外现有几个典型转子机刮片的滑动速度进行了计算，结果列入表 1。

表 1 国外几个机型的刮片滑动速度

型 号	型线 参数 K	轴矩 参数 B/e	偏心距 e	滑 动 速 度 V 算术平均值 (米/秒) ($n = 1000$ 转/分)	额定转速 (n_H) (转/分)	滑 动 速 度 (米/秒) V 算术平均值 ($n = n_H$)	最大滑动速度 $V_{\text{最大}}$ (米/秒)		最大摆 动 角 ($\phi_{\text{最大}}$)
							$n = 1000$ (转/分)	$n = n_H$	
KKM502	7.14	4.78	14	3.5	5000 (6000)	17.5 (21)	4.95	29.7	$\pm 24.8^\circ$
KKM612	7.14	4.78	14	3.5	5500	19.3	4.95	27.2	$\pm 24.8^\circ$
KM37	6.27	2.45	11	2.4	3000 (5500)	7.2 (13.2)	3.58	19.7	$\pm 28^\circ 30'$
KM48	6.27	3.36	11	2.4	3000 (4800)	7.2 (11.55)	3.58	17.2	$\pm 28^\circ 30'$
KM914	6.04	6.21	11.6	2.44	4500 (5000)	11 (12.2)	3.66	18.3	
10A	6.73	4	15	3.5	7000	24.5	5.2	36.4	$26^\circ 30'$
12A	6.73	4.66	15	3.5	6500	22.7	5.2	33.8	$26^\circ 5'$
13A	6.63	3.43	17.5	4.05	6000	24.3	6	36	$26^\circ 50'$
R220	7.15		10.5	2.62	6000	15.8	4.22	25.3	
R450	6.71	4.57	14	3.26	6000	19.6	4.75	28.5	$26^\circ 33'$
*RC1-60	6.4	4.3	19.07	4.25	5000	21.3	6.25	31.2	28°
*KKM250	7.63	4.7	11	2.92	5000 (5500)	14.6 (16)	4.05	20.4	23°

* 未投产。

表 1 计算结果表明：转子机中，缸体型面与刮片间的滑动速度极高，其中平均滑动速度值最高达 24.5 米/秒。比一般机械及往复机中的摩擦付平均滑动速度大得多。图 3 是往复机中平均滑动速度与转子机中平均滑动速度以及一般机械中摩擦付允许滑动速度的比较。

由图 3 可以看出，转子机中平均滑动速度上限是往复机中平均滑动速度上限的 1.7 倍，是一般机械中摩擦付所允许的滑动速度的 3 倍。缸体和刮片工作于这样高的滑动速度下（最大滑动速度高达 36.4 米/秒），是非常容易引起磨损的。

（二）刮片的受力情况

在发动机工作时，在刮片上作用的有：气体力、惯性力、摩擦力、哥氏力以及弹簧力。刮片受力情况如图 4 所示。其中惯性力和哥氏力随转角的变化如图 5 所示：左边示出刮片槽壁所受哥氏力 F （旋转 90° 后画出），右边示出径向惯性力 J_L 。除弹簧力以外，其它作用力都是随发动机转角的变化而变化其力的大小和方向。

下面简单说明各个力的作用，以便分析。

1) 气体力与惯性力

当刮片处于 A 和 B （见图 4）的位置时，刮片所受的惯性力的径向分力 J_L 和气体力的

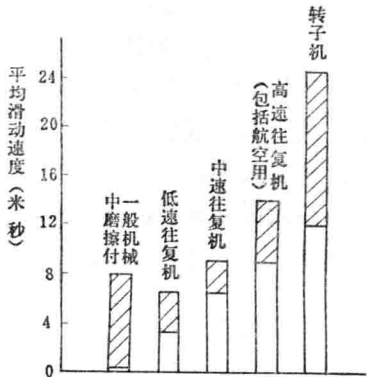


图 3 几种摩擦付平均滑动速度比较

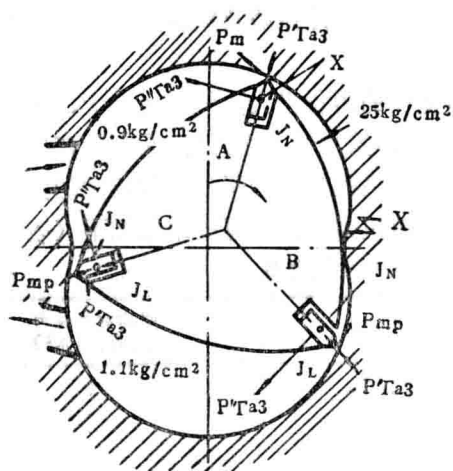


图4 刮片上的作用力

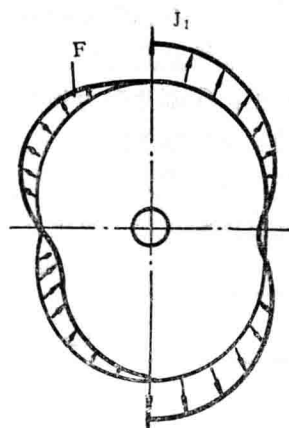


图5 刮片上径向惯性力和刮片槽壁上哥氏力的变化

径向分力 $P'\Gamma a_3$ 作用在同一方向, 并将刮片压向缸体工作型面, 保证了密封的可靠性。对于工作室排量为 750 毫升的转子机 (刮片质量 15 克), 当主轴转速 6000 转/分 (活塞 转速 2000 转/分) 时, 作用力的大小如下:

A 位置: $J_L = 16$ 公斤,

$P'\Gamma a_3 = 56$ 公斤 (假定刮片背面气体压力为工作室压力的 70%)

B 位置: $J_L = 7.3$ 公斤

$P'\Gamma a_3 = 56$ 公斤

当刮片处于 C 位置时, 两个径向分力的方向相反, $P'\Gamma a_3$ 仍向缸体型面方向, 而 J_L 则向活塞中心。当活塞转速 2000 转/分时, $J_L = 2.44$ 公斤, 而 $P'\Gamma a_3 = 2.46$ 公斤。作用在刮片上的这二力几乎相等, 在此情况下, 刮片是靠弓形弹簧力压向缸体型面而密封工作室的。正常情况下弹簧力的大小和方向是不变的。

气体力的切向分量 $P''\Gamma a_3$, 当刮片侧面积为 12 厘米², 工作室平均气体压力为 25 公斤/厘米² 时, 则 $P''\Gamma a_3 = 300$ 公斤 (瞬时值可达 500 公斤)。在 A 位置时, 刮片在 $P''\Gamma a_3$ 作用下压向片槽的后壁面上 (按转向看)。在 B 位置时, 则将刮片压向片槽的前壁面上。惯性力的切向分力 J_N 较之 $P''\Gamma a_3$ 小得多, 在 A、B 位置 $J_N = 9.5$ 公斤 (活塞转速为 2000 转/分时), 因此不会引起刮片移动。

2) 摩擦力

摩擦力 P_m , 作用在旋轮线工作表面和刮片的接触点上, 沿着旋轮线的切线方向, 并且与活塞转向相反。

P_m 的大小随着惯性力、气体压力以及润滑条件和其它一系列因素的变化而变化。

发动机工作时, 在气体压力和摩擦力的作用下, 在刮片上形成倾复力矩, 使刮片在槽中倾倒移动, 引起刮片侧面与槽壁的磨损。

3) 弹簧力

刮片通过旋轮线工作面的负曲率区域时, 离心力改变方向, 并力图使刮片向活塞中心移动, 所以在刮片背面采用弓形弹簧片, 防止这种脱离位移。此外, 这种弓形弹簧还能保证低速时, 特别是起动时工作室的密封。

刮片背后弹簧在稳定条件下工作，可以防止或缓冲刮片振动及减少疲劳，从而提高密封系统的工作可靠性及其寿命。

由上可见：①刮片受力相当复杂，压向缸体型面的力相当大，气体力最大，惯性力次之（在目前的使用转速下），弹簧力较小（装配条件下弹簧力约 3 公斤）。②刮片压向缸壁力的大小随惯性力和气体力的变化而变化，它取决于发动机的转速和平均有效压力的大小。

依据现有试验参数，对国外几个机型的平均有效压力进行计算的结果如下（表 2）。

表 2 国外几个机型的平均有效压力值

机 型	平均有效压力 (公斤/厘米 ²)	机 型	平均有效压力 (公斤/厘米 ²)
KKM612	9.8/3500	KKM250	9
L10A	8.51/3500	KKM400	9.7
M10A	8.65/3500	KKM125	8.9
13A	8.4/3500	KKM150W	7.8

一般说，转子机的平均有效压力高于往复机。转子机中和往复机中一样，平均有效压力越高，则发动机功率也越大。当平均有效压力增高，将使发动机的机械负荷与热负荷都增加，而发动机寿命将下降。

（三）缸体型面的温度状况及油膜

由于转子机各工作过程在缸体不同部位分别进行的特点，其缸体温度分布很不均匀，温差较大，变形不均匀(见图 6)，最高温度出现在热弧区。目前铸铁缸体温度可达 350℃，而铝合金壳体壁面温度在 200℃以下（在滑动面下 1 毫米深处测得）。

一般认为缸体内壁面温度高于 200~350℃时，缸体型面的润滑油膜就会破坏，因而会出现刮片与缸体型面在高温下的半干摩擦，这对缸体和刮片的寿命是很不利的。

图 7 示出不同工况下的铝合金缸体壁面温度分布，工作转速提高，壁面温度亦增高，润滑变差，这时摩擦付工作条件变坏。

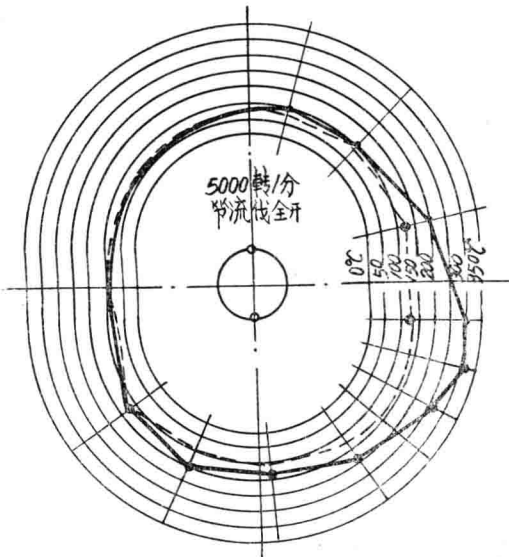


图 6 铸铁缸体与铝合金缸体表面温度的比较
——灰铸铁缸体 --- 铝缸体

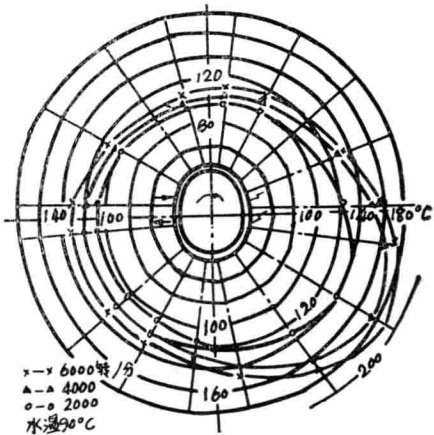


图 7 不同转速下铝合金缸体的温度分布

综上所述, 转子发动机中刮片和缸体型面是经受强烈磨损的一对摩擦付, 其间的滑动速度非常大, 在全负荷工况下, 刮片压向缸体型面的压力也相当大。同时, 由于缸壁温度高(油膜易被破坏)和难于润滑, 又使刮片与缸体之间处于接近半干摩擦的极劣条件下工作, 它们的工作条件比往复机恶劣得多, 为了使这对摩擦付具有足够的耐久性, 就需要采用耐磨性好的新材料和其他措施, 以适应这样一种工作情况。

三、因素分析

基于对转子机中的摩擦付工作条件的特殊性的认识和实际工作对推迟出现波纹的迫切需要, 根据国外的一些技术和资料以及我们实际工作中的认识, 分析讨论如后。

(一) 摩擦付的影响

一些试验结果表明, 由于摩擦付选用材质不一样, 可使缸体寿命差别好多倍, 摩擦付对推迟缸体出现波纹影响很大。

如果选用摩擦付不合适, 发动机运转几小时后, 型面上就开始出现波纹, 加快了刮片的磨损; 选用摩擦付得当, 发动机甚至工作几百小时以上, 型面上也无波纹生成, 刮片磨损也小。

(1) 碳精刮片与镀铬缸体配对之摩擦付

碳精刮片能耐高温和高压, 在难于润滑的高速滑动中摩擦系数小, 并且与缸体型面不会发生胶结现象。这种具有自润性和吸振能力的碳精刮片与镀铬缸体配对, 具有良好的耐磨性。

KKM502 机采用了上述摩擦付, 当转速为 5000 转/分, 平均有效压力为 7.03 公斤/厘米^2 的工况下, 碳精刮片寿命已达 600 小时以上, 按里程计算, 相当于 10 万公里, 已能满足某些机型的要求而实际使用。该机缸体镀铬层为 0.2 毫米, 在台架使用 3000 小时后, 型面仍无明显波纹。

10A、12A、13A 型机采用铝合金缸体(镀硬铬层厚 0.15 毫米, 硬度要求达维氏 800~900 度, 以提高耐磨性)与浸铝合金碳精刮片配对。10A 转子机经过 1000 小时模拟道路试验, 缸体后火花塞孔附近磨损最多, 为 0.009 毫米, 刮片磨损为圆弧面 0.5~0.8 毫米, 长度方向 0.04~0.07 毫米, 缸体无明显波纹。

这组摩擦付, 开始试验使用时, 刮片出现了不少问题, 经不断研究改进, 而发展到实用转子机采用的程度, 其发展与改进情况见附录一。

(2) 合金铸铁刮片与硅镍镀层缸体组成之摩擦付

一九六七年西德生产的 KKM612 机中采用了这对摩擦付, 发动机经 80500 哩道路试验后, 缸体镀层磨损量为 0.05 毫米, 刮片磨损量为 1.5 毫米。图 8 示出缸体型面硅镍镀层的磨损速率。图 9 示出与上述缸体配对的刮片的磨损速率。

一九六七年投产的 KM914 机缸体也采用了镀硅镍层型面, 并配用普通热处理钢制的整体式刮片。此种摩擦付, 在推迟出现波纹方面也是有效的。

选择合适的摩擦付的实例表明, 它可以大大推迟缸体波纹的出现, 可使缸体足以满足工程应用要求的使用寿命。

上述几种典型摩擦付, 都是在缸体型面上进行表面处理与保护的方法, 使其滑动表面具有极硬的喷镀层去与合适的刮片配付, 从而克服波纹的早期出现。

但是, 它们并不是唯一的有效摩擦付, 他们也有缺点, 而且成本较贵, 加工不易。

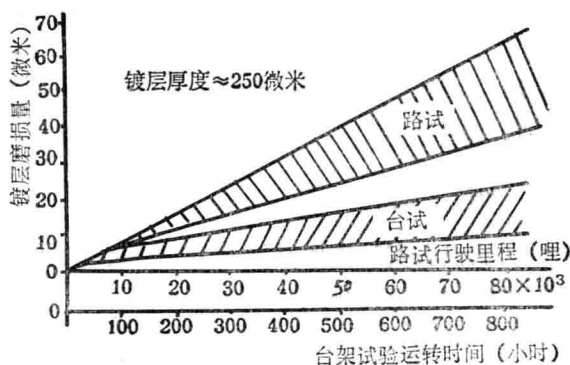


图8 缸体面硅镍镀层的磨损速率

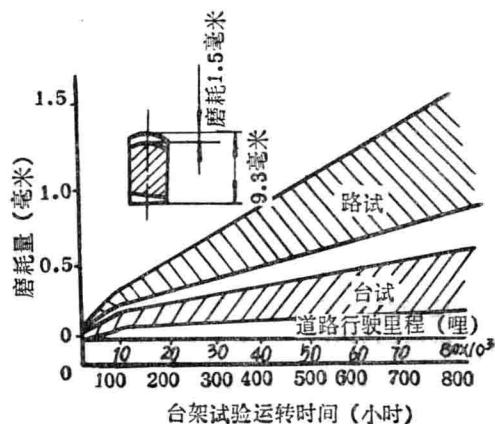


图9 与硅镍镀层缸体相配付的
活塞环铸铁刮片的磨损率

(二) 使用条件的影响

KKM612 机曾用 IKA 合金铸铁刮片与镀硅镍层缸体配付, 使用结果并不令人满意, 特别是所装汽车经常在市区长程“时驶一时停”的条件下使用时, 刮片低温磨损严重。据说: 把冷却水控制在 $30\sim 50^{\circ}\text{C}$ 模拟城市条件试验时, 这种刮片磨损量要比 80°C 正常水温时的磨损量大好几倍。1970年以后选择一种含有碳化钛和铁的金属陶瓷烧结材料(RC65)与硅镍层型面缸体配付效果良好。发动机在 80°C 左右的正常水温情况下工作时, 它的磨损量要比 IKA 刮片磨损量减少66%, 而发动机在 40°C 的较低水温下工作时, 它的磨损量甚至比 IKA 刮片磨损量减少94%, 图10为两种材质刮片的磨损量受冷却水温影响的变化情况。这种刮片的磨损量不但小 ($0.5\sim 1$ 微米/小时), 而且几乎不受发动机工作温度的影响。

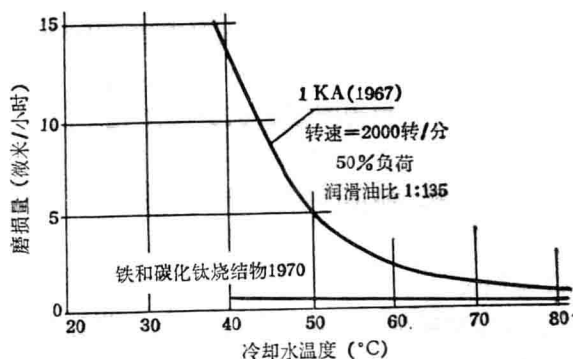


图10 铁与碳化钛的烧结物刮片与 IKA 刮片
磨损量受发动机冷却水温影响而变化的比较

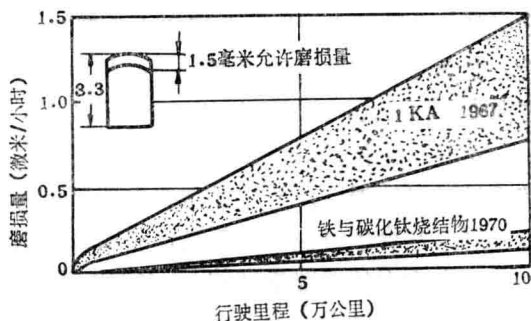


图11 两种不同材质刮片10万公里
道路试验磨损量的比较

用铁与碳化钛的烧结物刮片与硅镍层缸体配付, 所作的10万公里耐久性试验表明, 这种刮片的磨损量不超过允许磨损量的15%。图11为10万公里道路试验后这种刮片与 IKA 刮片磨损量的比较。

另外, 炭素浸渍铝合金刮片与铸铁缸体配付具有良好的耐磨性, 它特别宜于减少在城市交通条件下的低温磨损。目前碳精刮片在发动机突爆情况下运转时, 容易断裂。据说, 曾在试验台上, 在粗暴的连续爆震试验条件下, 比较活塞环合金铸铁(高铬合金铸铁)刮片与碳

精刮片的可靠性,前者寿命为10小时,后者10秒钟后即断裂。

由上可见:1)转子机汽车如系做市郊区中短程行驶使用,发动机处于频繁的“停车——起动——运行”(低温工作)的工况时,宜选用炭素刮片与镀铬缸配付或者铁和碳化钛烧结物刮片与镀硅镍层缸体配付。

2)转子机在恶劣使用条件下(包括山区或使用中易引起不正常燃烧等),宜选用金属刮片配付,在可靠性方面将优于炭素刮片。日本现在也开始采用特殊铸铁刮片了。

3)摩擦付的选择,应根据发动机的用途、运转情况、所要求寿命、成本和不同使用场合等等来考虑。

(三) 刮片材料、形状的影响

将镀铬铝制鼓筒与实心铸铁刮片,有交叉孔的铸铁刮片(如图12所示)以及实心碳精刮片分别组为三对摩擦付进行运转试验。这三种不同材料、形状的刮片分别压紧在旋转的镀铬鼓筒上进行滑动摩擦振动特性试验,它们的摩擦系数和摩擦振动振幅间的关系如图13所示,滑动面镀铬与碳精相组合的摩擦付,其摩擦系数、摩擦振动振幅最小(其摩擦系数仅为铸铁的1/2)。

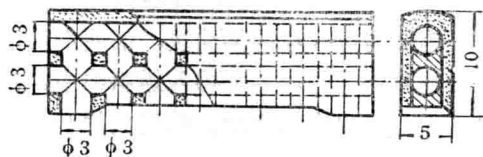


图12 交叉孔铸铁刮片

另外,还可以看到交叉孔型铸铁刮片比实心铸铁刮片的摩擦振动振幅小。

给这三种刮片以20千周的高频振动,测得其衰减特性如图14所示,其中碳精刮片为最好,实心铸铁刮片最差。图14中也表现了这三种不同刮片压紧在镀铬转筒上滑动时产生的波纹程度,碳精刮片为最小,交叉孔铸铁刮片居中,实心铸铁刮片最大。

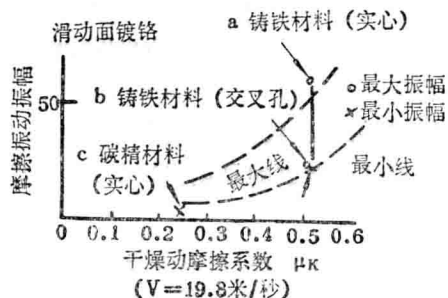


图13 摩擦系数与摩擦振动振幅间的关系

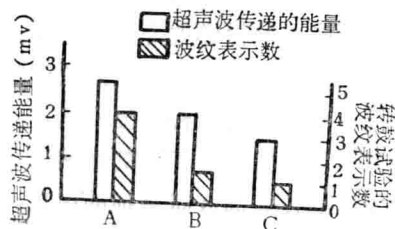


图14 三种刮片超声波传递能量与波纹的关系

碳精刮片(碳精浸渍金属处理后其比重为2~2.3克重/厘米³)与镀铬缸的配对,经耐久试验后,缸体几乎无波纹,根据试验,这是较好的一组摩擦付。根据最新资料,日本东洋工业公司的转子机又放弃碳精材料刮片,而选用其它材料了,这是有待注意的新动向。

采用塑料材料制作刮片,国外作过不少工作,西德采用塑料刮片在KKM200与KKM502型机上进行过试验,发现刮片尖角上有烧损与断裂现象。已作的一些试验表明,所用的塑料材料刮片,热强度低,不能承受极苛刻的机械负荷与特殊的热负荷。这方面的工作,有待进一步的研究与试验。

(四) 润滑的影响

发动机的耐久性的达到,各滑动部分的充分润滑,尤其缸体型面和刮片的润滑是不可少的。在铸铁缸体型面上,首先在热弧区,特别是在油膜破坏的部位产生波纹,可见润滑对波

纹产生的影响。

用金属刮片在连续大负荷运转时，两金属材料直接滑动摩擦，应特别注意润滑问题。如采用像 10 A 型机那样，在汽化器中喷入若干润滑油来润滑还是需要的。在采用碳精刮片与镀铬缸体配付时，即使在干摩擦条件下，摩擦系数也较低，型面磨损较小，但仍需要供给适当的润滑油，否则碳精刮片磨损较快。

无论何种摩擦付，都需要合适的润滑油，目前供油的方式有多种，如：

- (1) 使用混合燃料（小功率发动上用的较普遍）；
- (2) 单独向进气管供油（由计量泵向汽化器供润滑油，如日本的 10 A 机）；
- (3) 向燃料系作混合供油（由计量泵把机油供给燃料泵，如 KKM502 机）；
- (4) 向缸体与刮片间供油（用一个小柱塞泵按发动机的转速，把少量的润滑油打入与进气口同心的套筒缝里，并由刮片从这里带走）。

第 2 与第 3 项的供油法，都使用润滑油计量泵，它可以根据转速和节流阀开度按比例供应润滑油到汽化器，将之掺入燃料油中，当燃料蒸发时，被分离出来而润滑。碳精刮片与镀铬缸体配付时，燃料与机油的比例范围为 150:1~250:1，使用金属刮片时为 50:1~120:1。下例可充分说明燃料同润滑油比例的影响。试验中燃料同润滑油的比例由 75:1 到 370:1 范围内变化。刮片磨损变化示于图 15。由图可见，当润滑油进入燃料室较多时，磨损较少。缸体型面磨损具有同样关系。不过把润滑油过多地引入燃烧室会产生提前点火的倾向。同时，使密封零件和火花塞积碳以及活塞包络面积碳，这就会使发动机出现功率下降、油耗增加等不良后果。

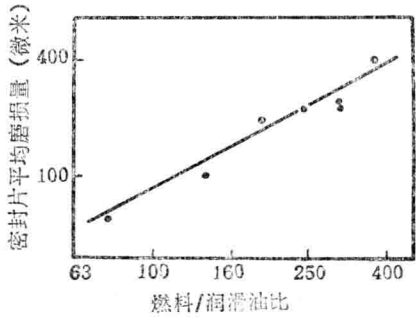


图 15 燃料与润滑油比例对刮片磨损的影响

另一方面改善润滑油质量，增强润滑能力，对减轻缸体波纹磨损是有益的。

总之良好的润滑条件（提高润滑油的质和量），对推迟波纹的早期出现是有一定效果的。

（五）发动机运转工况的影响

转子机缸体型面波状磨损的出现，并非任何运动条件都一样，它在高速全负荷运转时特别容易产生，如连续在此工况工作，波状磨损将发展得愈益严重，而中、低负荷与中等转速下，它出现得较晚，发展得也不会那么严重。

一般说来，在下列运转条件下，波纹现象显得严重。

- (1) 全负荷高速运转；

表 3 KKM250 型转子机缸体寿命试验结果（1969）

摩 擦 付	转 速 (转/分)	负 荷 (马力)	缸体寿命 (小时)	备 注
铸铁表面氮化与 特殊铸铁刮片配付	5500	(最大马力的 70%) 22	2000	汽油——机油比为 50:1
	5500	最大马力 31	1000	
铝合金镀铬面与 特殊铸铁刮片配付	5500	(最大马力的 70%) 22	1400	
	5500	最大马力 31	700	

试验表明：在同一转速下，发动机负荷减少百分之二十九（约三分之一），可使缸体寿命增加二倍。

(2) 滑动面温度高, 油膜被破坏, 润滑不佳和引起积碳。

下面举例, 加以说明:

(1) KKM 250 转子机试验 (表 3)

(2) KM-37 型转子机试验 (表 4)

表 4 KM-37型转子机试验结果

摩 擦 付	转速 (转/分)	滑动速度 (米/秒)	寿命(小时)	备 注
型面为一种钢与青铜的混合涂层 与铸铁刮片配付	3000	7.2	1500	刮片寿命 1000~2000小时
	4500	10.08	1000	

试验结果表明: 工作转速减少三分之一, 发动机寿命可提高一点五倍。

由上可见, 转子机使用寿命在很大程度上取决于它的负荷和速度工况, 其它热力机也是如此。

根据不同机型的实际情况和应用场合、范围以及耐久性考虑, 应合理选定其额定状态和耐久性验收标准, 并应规定允许的最高转速, 不至往往因超转速连续工作而引起耐久性的缩短。

(六) 轴距参数 B/e 值和型线参数 $K = R/e$ 对刮片滑动速度的影响

由数学关系分析已知, 刮片滑动速度随着参数 K 的增加和 B/e 的减少而增加, 可见发动机的设计参数与波状磨损现象密切相关。因此, 为了减少刮片的滑动速度和刮片与气缸壁的磨损, B/e 值应该选择较大的值, 而 K 应该选得接近于最小值。目前选 K 与 B/e 值的趋势正是如此。在转子机中, 刮片在缸体型面上, 一边滑动, 一边作摆动。随着参数 K 的减小, 摆动角 ϕ 最大值增大, 又会使刮片的磨损减小。因为, 活塞和壳体在不同的相对位置时, 刮片相对于长短辐旋轮线的法线作摆动运动。在高速滑动试验台上所进行的试验表明: 这种摆动运动可以减小摩擦, 对于减小磨损和提高寿命均有利。在摆动中, 缸体和刮片间的接触线则在刮片的圆型顶端上移来移去。由此看来, 刮片厚度选宽一些是有益的。现在有作这样选择的。摆动角与转角的关系如图 16 所示。

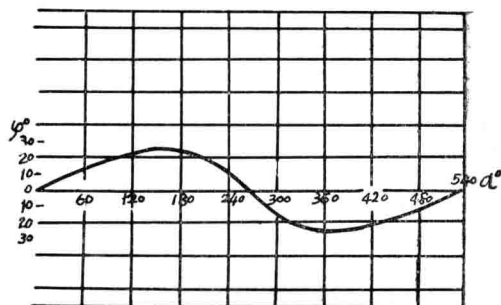


图 16 刮片摆动角 ϕ 与转角 α 的变化关系

一般 B/e 值范围为 4~7, 合理值为 4.5~6 (小风冷机还可以小)。而 K 值范围为 6~9, 应尽可能选的接近最小值。

(七) 燃烧对耐久性的影响

关于转子机燃烧过程的研究, 还刚刚开始。爆燃和反常燃烧对耐久性的影响需进一步试验研究, 下面仅讨论实际使用中遇到的问题及其影响。

在车辆实际运行中, 当断电器触点白金磨损后, 点火提前很多, 会使发动机发生爆震, 或者由于所使用汽油牌号低 (辛烷质较低) 也可能产生爆震。碳精刮片, 在爆震条件下运转时, 往往容易出现断裂现象。

火花塞好坏, 对发动机影响很大, 若其质量差, 不能适应, 它的耐热性一降低, 就会在

高速负荷工作时引起反常燃烧,严重损害发动机的性能和耐久性。另外由于火花塞故障而造成间断跳火或者由于冷却不良而引起“炽热”燃烧,都会使点火时间混乱,就会带来输出功率下降,燃料消耗增加,并且将引起发动机过热和反常燃烧而缩短发动机的耐久性。

为了从各方面保证发动机的耐久性,应重视下列几个问题:

(1) 选用合适的火花塞与解决附件配套;

(2) 缸体火花塞孔座应予良好的冷却;

(3) 选用合适的润滑油;

(4) 选用合适的辛烷值汽油;

(5) 根据火花塞质量及具体使用场合,规定出清除积碳和更换期,火花塞要定期进行更换不应勉强使用;

(6) 注意点火提前角的调整,不得当时也会造成反常燃烧,影响发动机耐久性;

(7) 注意检查断电器触点白金磨损,及时排除故障。

(八) 结构设计和工艺对耐久性的影响

结构设计和工艺(主要零件加工精度和装配质量等)包括很广,影响复杂,这里仅讨论几个具体问题。

(1) 缸体选材

目前选用缸体基体材料,不外铸铁和铝合金两种(一般小型机缸体用铝合金)。在设计时亦应注意加以比较选择。为了改善冷却效果和减轻重量,保持油膜,一般就采用导热性好的铝合金材料作缸体。但铝合金缸体基体上直接镀铬,操作比较困难,要做到镀层薄而且稳定,也是不容易,往往因镀层结合不良,发动机运转一定时间后,常有镀铬层掉块和剥落现象。

为了使镀铬层和铝基体具有良好的结合力,先在铝基体型面上喷一层碳钢,然后再镀铬,对改善镀层质量是有效的。目前,还有采用“移植涂层法”的,它是在铝基体和镀铬层之间,加上一层中间介层(即先在型芯上喷涂一层碳钢,浇铸铝合金后,此涂层被移植到缸体内壁上),以便加硬基体,保证耐磨层与基体的结合良好,不易脱落,同时冷却性能也有所提高(与采用双金属浇注法注入铸铁缸套相比)。在钢涂层上电镀铬层,操作方便,镀层较薄(0.06~0.08毫米),可缩短电镀工时,降低成本。

铸铁成本低、刚性好,其不足之处在于导热性能欠佳,容易引起火花塞孔附近的局部温度过高(见图6)。通过改进冷却设计,采用薄壁缸体,火花塞孔镶套等措施,缸体内壁温度可以降低,同时它还可以减少由于缸体与刮片膨胀差异大而引起的泄漏现象。

综合上述,在选缸体材质时,对冷却系统设计(要有充分合理的冷却措施),降低热应力以及热疲劳等方面要给予重视。

2) 缸体型线的修正补偿缸体温差变形的缸体型面加工法

由于发动机缸体型面受热不均匀(冷热弧区之间温差约有 $150^{\circ}\sim 250^{\circ}\text{C}$),引起冷、热区膨胀不同,如一台长轴尺寸为200毫米的发动机中,热弧区在热态较冷态膨胀差距约为0.3毫米左右。这样使旋轮线的等距曲线成了不等距曲线,就会引起刮片径向移动和带来磨损,同时使密封性下降。

为避免这种现象,可以根据缸体工作时同样的不同温度分布的受热情况,加热靠模板,在加热状况下来加工旋轮线等距曲线型面。以后再用此靠模来加工缸体型面,所加工出的型面,在发动机工作时将得到设计要求的旋轮线等距型线。这样,消除了刮片的径向窜动,减

磨损,并使密封可靠。

3) 加工工艺

从理论上讲,刮片相对于活塞是没有相对运动的。但是,由于缸体型面加工误差、工作时型面受热不均而引起变形膨胀、活塞上密封销孔和刮片槽的加工误差以及齿轮加工精度等,都会引起刮片的径向移动,从而引起滑动磨损。

因此,缸体型线、活塞上密封销孔和刮片槽等应保证一定的加工精度要求(并保证缸体型面和刮片圆弧面具有一定光洁度);严格加工工艺和装配质量并确保装配间隙合理是非常重要的。

四、结 论

综合以上分析,结合我们情况,提出下面几点看法。

(1) 缸体波状磨损出现迟早和严重程度取决于很多因素,诸影响因素中,影响最大的是摩擦付材质的选配。

(2) 在发动机摩擦付选定后,影响缸体和刮片磨损的主要因素是刮片滑动速度、它们之间的接触压力、润滑油的数量和质量以及温度状况等。

(3) 根据不同机型的实际情况和应用场合、范围以及耐久性和成本等方面考虑,应合理确定其设计特点和常用工况,并提出相应的耐久性验收标准。

(4) 对发展载重汽车用转子机来说,暂时降低若干高速、高功率指标,而致力于改善其低速性能,以达到较高的耐久性和较好的扭矩特性是有现实意义的。

(5) 因某种条件所限,在摩擦付选择尚不理想时,如作为过渡阶段使用或某种需要而小批生产时,宜以保缸而舍刮片的原则来选择摩擦付材质,因为刮片工作表面在极限范围内的磨损,不会使工作室密封遭到破坏而影响性能。通常,刮片允许的极限磨损量为1.5-2.5毫米。即使是几百小时后更换一次刮片,也是简单易行的(随机多带几套刮片即可),若缸体过早出现严重波纹,则迫使机子返厂大修。

(6) 从目前对缸体波纹的认识和已提出多种推迟出现波纹的办法来看,采用恰当的摩擦付并给予适当的润滑,保证一定的加工精度和光洁度,保证最佳的装配间隙,选择合适的工况等措施,可以使转子机缸体和刮片获得足够的使用寿命,并保持其结构简单的优越性。

(7) 随着转子机的发展和使用范围的扩大,在发挥其转速高,升功率大,体积小,重量轻等长处的应用场合下(为直升飞机上应用转子机)就得相应采用合适的耐磨性好的摩擦付,以满足使用寿命的要求。在作单程使用动力机时,转子机的优点将能得到更大的发挥。

(8) 今后应注意耐磨性好并具有一定强度的更廉价的摩擦付,以避免采用贵重金属,降低制造成本。

(9) 研究缸体波纹问题,应从长远(包括理论探讨)和工程应用两方面考虑,两方面看手研究,它们是相辅相成的。

转子机是一种新型动力机,正处于发展的时期,还有许多问题有待于通过大量实践去认识,随着发展,转子机技术也必然会提高到一个新阶段。

五、附 录

附录一 碳精刮片的发展与改进

初期,在所研制的转子机上一般都是安装金属刮片,试验发现:表面不加镀层和处理的铸

铁缸体型面上很快就出现波纹，极大地限制了缸体寿命。后来出于“保缸”提出采用碳精刮片代替金属刮片的方案。采用碳精刮片与镀铬铁缸体配对，实际运转表明：缸体基本上不发生波纹。而刮片磨损极快，30~40小时磨损达1毫米，而且容易断裂。这时，又提出了新的问题。普通的碳质材料在强度和耐磨性方面能不能适应其苛刻的工作条件？图1表示出国外用碳精材料所制刮片的发展情况。

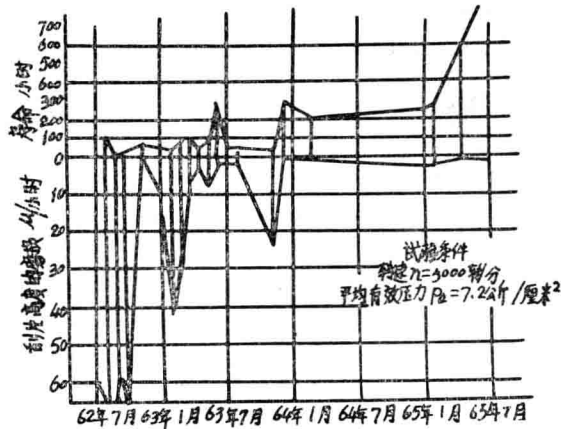


图1 碳精刮片的磨损及耐久性试验结果

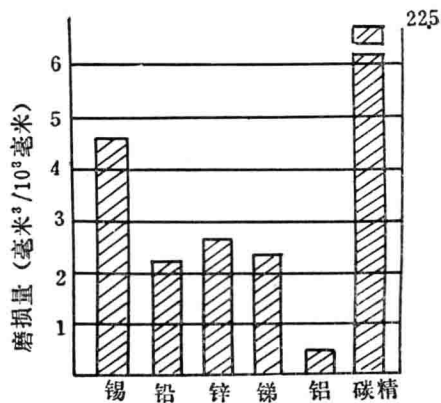


图2 碳精浸渍几种金属后其磨损量比较
(试验条件：滑动速度20米/秒，压力2.8公斤，无润滑)

1962年7月，当第一次应用时，刮片磨损很快，使用寿命不到50小时。而且碳精刮片经常发生断裂、剥落掉块等现象。

经过一段时间的研究和改进，1964年刮片使用寿命达200小时。

1965年刮片使用寿命达到600小时水平。尔后装机使用，其磨损率达到小于1微米/小时的水平。

在发展碳精刮片的过程中，为了改进质量和提高强度方面，曾采用了下面一些主要措施。

①在制作碳精过程中，有效控制碳精中空洞的形状、数量和分布情况，由于压制工艺的改进，保证使之达到最佳强度状况。

②刮片厚度由用金属材料的2毫米增加到5~6毫米，以提高强度，并可以获得较高的耐磨性。

③分析碳精材料强度低的主要原因是材料中存在许多孔洞，它构成了缺口。因而提出将碳精放于熔化的金属液中浸渍，使碳精中的孔洞尽可能的封住，这样可大大地提高强度，增加其耐磨能力。

在浸渍几种不同金属的碳精刮片磨损试验中，以浸铝的碳精片磨损量最小，其次为铅、锑、锌、锡，以浸锡的碳精刮片磨损量为最大，试验结果如图2所示。

开始，碳精材料是浸锑——锡合金的，其抗弯强度为1200公斤/厘米²，以后改为浸铝合金溶液，随着浸渍工艺的不断完善(浸渍均匀、精确)其抗弯强度提高到1650~1850公斤/厘米²，冲击值提高5%。

因此，碳精材料浸渍铝合金的刮片得到了实际应用。

④将碳精片镶于金属托座上，组成的刮片。由于转子机在发生爆燃工作时，激烈的气体压力变化所引起的冲击，会使碳精刮片破裂，而且在碳精刮片直接与活塞刮片槽相接触情况下，会使碳精刮片二侧出现严重的磨损。为了进一步提高它的可靠性，就把碳精刮片镶在铸铁托座内以改善刮片强度。

⑤采用了非破坏性检查碳精质量法(NDI)，以鉴别刮片质量，保证装机刮片毫无缺陷，质量稳定。

附录二 国外转子机耐久性试验部分情况

RC1-60 曾作过 1500 小时耐久试验，已达到往复机的水平。耐久试验工况：75~80% 负荷，在最大转速下运行 600 小时，其余 900 小时则在不超过 60% 的负荷工况下运行。

KKM 502 在台试及使用试验中确定了一些最重要零件的使用寿命。刮片可顺利地工作 1000 小时而不更换。缸体零件能在 2000~3000 小时之内仍保持工作能力。发动机大修前的寿命约 1000 小时（即行车 10 万公里）。

KM-37 机能工作 1000~1200 小时，不需更换任何零件。如日夜 24 小时连续工作，能运行六个星期不停。使用 1000 小时后高为 5.5 毫米的刮片磨损 0.2 毫米（0.2 微米/小时）。

附录三 国外投产机型所用摩擦付

现将国外已投产转子机的缸体和刮片材料配付情况列于下表，供大家分析。

型 号	缸 体 材 料	刮 片 结 构	刮 片 材 料	备 注	年 月
KKM502	高硅铝合金，镀铬 0.3 毫米	三片组合式厚度 5 毫米	中间片：碳精 角片：活塞环合金铸铁		1964
KKM612	高硅铝合金，镀硅镍 镀层 0.2~0.3 毫米	三片组合铰槽式	含有碳化钛和铁的陶瓷 烧结料(Rc65)		1970
KM37	铝合金，镀铬 0.7 毫米	整片式厚度 1.5 毫米	IK A 牌号铸铁	大修期 1000~1200 小时	
KM48	同上	整片式厚度 3 毫米	同上		
KM914	铝合金，镀硅镍镀层 0.25 毫米	同上	热处理钢		1967
10A, 12A, 13A	铝合金，镀铬 0.15 毫米	整片式厚度 6 毫米	碳精(浸铝合金)		
R220 R450	铝合金，镀铬	整片式	碳精(镶在铸铁托座内)		
莱特公司 RC 系列	铝合金，喷碳化钨或 镀铬	三片组合式	高铬合金铸铁	未正式投产	

目前，国外已投产机型上使用的刮片形式主要是整体式、三片组合式和三片组合铰槽式三种。所用刮片材料有浸金属的碳精、铁与碳化钛烧结料、活塞环合金铸铁和普通热处理钢。缸体用铝合金或硅铝合金，型面镀铬，镀硅镍镀层或喷涂碳化钨。据称，这几组摩擦付基本上消除了波状磨损。他们现时的注意力已有很大一部分移到如何更好地改善经济性，降低燃料消耗量以及降低制造成本上去了。

[参考资料从略]

转子机润滑油与磨损的研究

法国 B. Brandone 与 J. du Jeu

这是一九七二年十月廿日在法国汽车工程师学会上宣读的一篇试研研究报告,全文发表在法国《ingénieurs du pétrole》,1973年3月号上,文章介绍了润滑油与转子机缸体型面及刮片的磨损关系,附录中还介绍了几个试验规范,特译出供大家参考。文后还附有一个答疑,多系正文中观点与结果的重复阐述,已略去。

——编者

现今转子机汽车还不多,最著名的是 NSU Ro80、马兹达 RX100 与 RX2 以及雪铁龙 M35。不过,目前大多数汽车公司都购买了转子机专利。美国最大的通用汽车公司对转子机的材料与工艺作了大量的研究工作。

转子机的发展也受到油耗的限制,在欧美高速公路上高速行驶时油耗就更大。但转子机运转无振动、具有大的功率/重量比、功率/容积比,排气中氧化氮很少,又可用低辛烷值汽油、无铅汽油,这样就成了为满足污染法规而选中的汽车动力。同时,从批量生产看,型面加工虽需要较高的投资,但转子机零件少,并可借多缸连接而制造不同功率的机型,这就可因标准化与高度自动化而降低制造成本[1]。尽管现在大家还不十分有把握[5、6、7],但转子机未来的发展似乎仍是可观的。这就说明我们为什么要开展转子机润滑油的研究。

一、研究目的

西德 NSU 机比日本马兹达机更适宜于检验润滑油质量,它具有较高的性能并对润滑油质量敏感。不少人认为日本机也可用往复机用的 APISD 油。

仔细检查的试验样机的零件如下(见图1与2):

——转子瓦与主轴承;

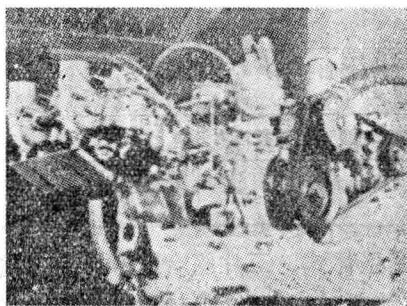


图 1

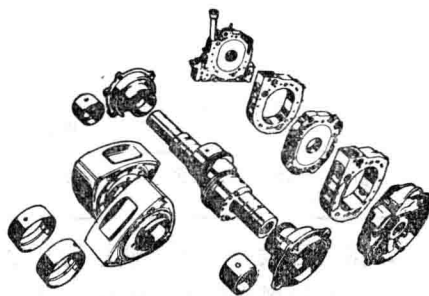


图 2

——缸体型面与端盖平面;

——刮片与密封条。

检查结果如下:

1. 转子机轴承(图2)均采用铜铅(Cupro-Plomb)复盖薄壁轴瓦。

2. 型面上有三种磨损:

——刮片摩擦引起的镀层磨损(图3);

——镀层表面波纹生成(图4),这实非磨损,而是型面的“替代”(remplacement de



图 3

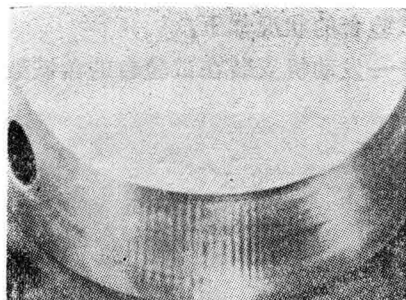


图 4

trochoïde)。因为即使在早燃情况下长期工作后，也不产生此现象，这就不仅是燃烧问题了〔10〕，还是基体/镀层的机械强度问题(主要因素)；

——镀层的碎裂(图 5)，主要因机械疲劳与热疲劳所致，仅提高润滑油的耐磨性，不能完全解决这问题〔5〕。

此外，还有刮片的严重磨损，可使刮片脱出，从而很快损坏型面。

3. 端盖用铸铁喷钼，比氮化处理的中隔板耐磨，后者在低温条件下继续试验就有严重磨损(图 6)。

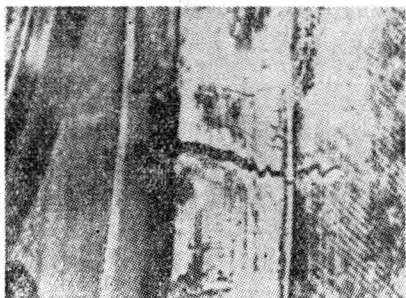


图 5

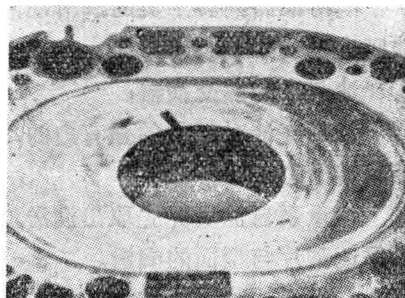


图 6

4. 刮片(图 7)，磨损过大就起动不了(压力不足)。

5. 密封条(图 8)，如果油环工作正常，它是不会发生问题的。

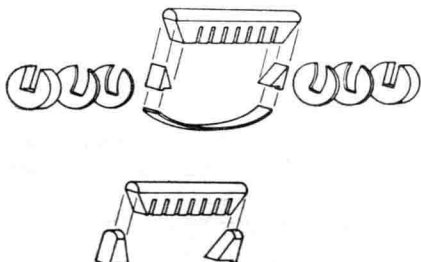


图 7

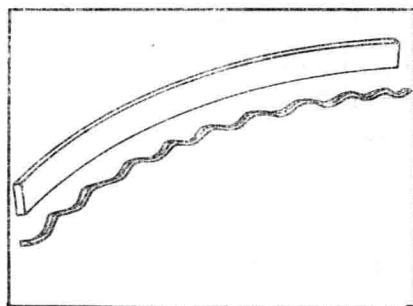


图 8

二、试 验 方 法

1. 可靠性(fiabilité)

我们研究了多种检验润滑油质量的方法。