

秘密资料

编号:

提高低速大扭矩液压马达的性能(2)

柱塞材料对钢球与柱塞之间
摩擦性能的影响

第一机械工业部情报所

目 录

1. 绪言	1
2. 柱塞材料的影响	2
2.1 实验方法	2
2.1.1 实验装置	2
2.1.2 试件	3
2.1.3 使用的油	4
2.1.4 测试方法	4
2.2 实验结果	6
2.2.1 受压直径为 50 毫米时的情况	7
2.2.2 受压直径为 72 毫米时的情况	10
2.3 对实验结果的研究	13
3. 钢球表面损伤的影响	14
3.1 实验方法	14
3.1.1 实验装置	14
3.1.2 实验条件及实验方法	14
3.1.3 试样	14
3.2 实验结果及研究	14
3.2.1 损伤大小的影响	14
3.2.2 柱塞材料的影响	23
4. 工作油液中粉尘的影响	23
4.1 实验方法	23
4.1.1 实验装置	23
4.1.2 实验条件及实验方法	23
4.1.3 粉尘	23
4.2 实验结果及研究	24
5. 结语	30

1. 绪 言

低速大扭矩液压马达，工作时转速低、扭矩大、体积小、重量轻，已在工程机械上获得应用。图1为其示意图。从液压转换阀导入的液压，使柱塞通过钢球向定子凸轮盘加压，转子受其反作用力的作用而旋转。

柱塞和钢球构成一付球面轴承，但因此部位的滑动条件严苛，有可能产生摩擦扭矩过大，或卡死等现象。因此，曾对球面轴承的形状和润滑方法等进行过各种试验，以期提高摩擦性能和防止卡死。目前已基本上获得满意的成果。

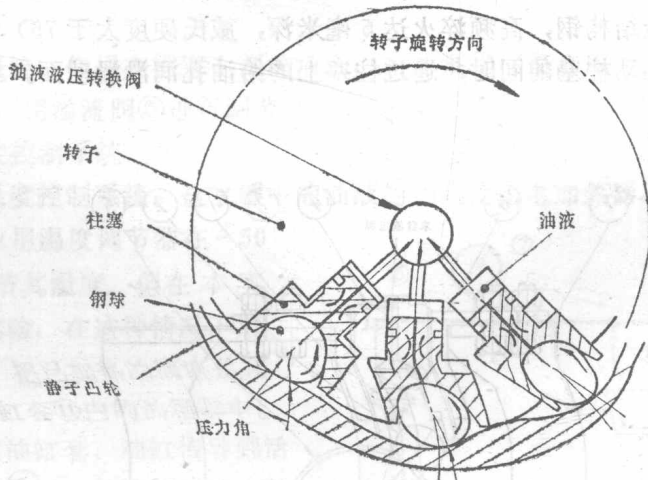


图1 低速大扭矩压液马达示意图

为了进一步提高这种球面轴承的性能和稳定性而研究了活塞的材料。实验用的材料主要是根据小试样的摩擦、磨损实验的结果挑选的。首先是一种形状与样机柱塞相同（活塞上部受压直径为50毫米）的活塞，研究铝—锡合金（样机用的）、铝—硅合金、以及在这些合金上镀有软金属的柱塞的滑动性能。其次，向滑动部位施加压力并增大负载，为使实验条件更加严苛，把受压直径改为72毫米（见图7），其载荷约为受压直径50毫米柱塞的两倍。此外，还研究了在上述柱塞材料中添加铜合金后的滑动性能。

柱塞球面卡住的原因，估计有下述几条：（1）由于负载增大或滑动速度变慢等原因使油膜变薄或被破坏，而使柱塞球面卡死；（2）球面上有粉尘而使球面卡死；（3）此粉尘使钢球表面损伤。或者由于某种原因，使钢球与定子凸轮盘表面之间产生相对滑动而损伤钢球，此损伤又将活塞划伤而卡死。

迄今为止所进行的种种实验主要都是针对第（1）种情况的，而本报告进一步对第（2）（3）种情况进行了试验。即在工作油液中掺入粉尘，改变粉尘颗粒的大小与数量，研究了钢球和柱塞上的损伤情况以及钢球与柱塞之间的滑动性能。此外，采用已经损伤了的钢球，研究了钢球损伤的数量、大小和种类会给柱塞球面造成何种损伤。

2. 柱塞材料的影响

2.1 实验方法

2.1.1 实验装置

(1) 球面试验机

图2为球面试验机示意图。在供给油缸的液压作用下，将插入油缸④中的柱塞①向下推动。用密封环③将液压油密封，柱塞台肩部保持在受大气压的作用下。柱塞下部是一个球面座，钢球②（滚珠轴承用的钢球，直径63.5毫米）放在其中。转子⑤（转动面直径：205毫米；材料：铬铝合金结构钢，高频淬火达5毫米深，威氏硬度大于75）带动该钢球旋转，供给油缸的液压油在推动柱塞的同时，通过柱塞上的给油孔润滑滑动面。靠油缸套的横向移动来改变压力角 θ 。

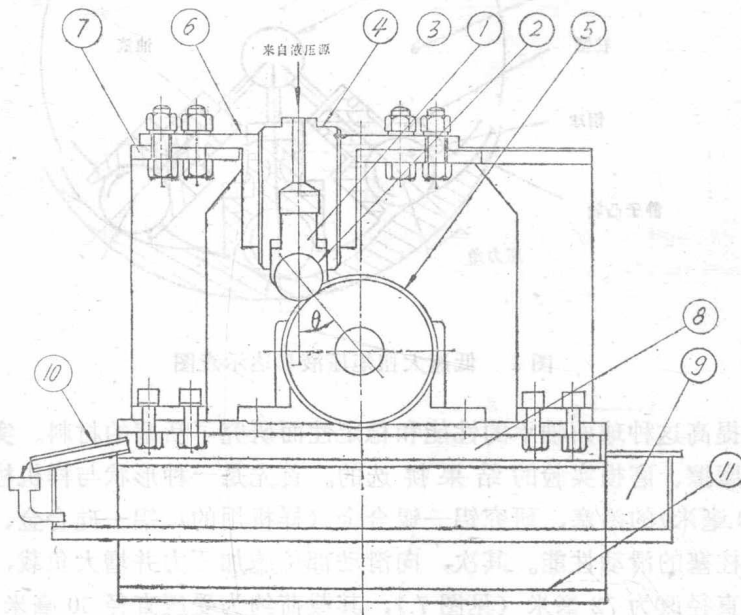


图2 球面试验机

- 1—柱塞 2—钢球 3—密封环 4—油缸 5—转子 6—油缸套 7—框架
8—1号油池 9—2号油池 10—漏油量测定管 11—机座

(2) 驱动系统

图3表示驱动系统。整流子马达（转速70~1650转/分）的动力，通过V形皮带传递到减速器（7级变速，减速比1.04:1~7.5:1），再经过2对同步皮带（每对的减速比为3:1，2对为9:1）和限制转矩联轴器传递到转子。转子可在1~200转/分的范围内（此时钢球的转速约为3~650转/分）连续改变转速。

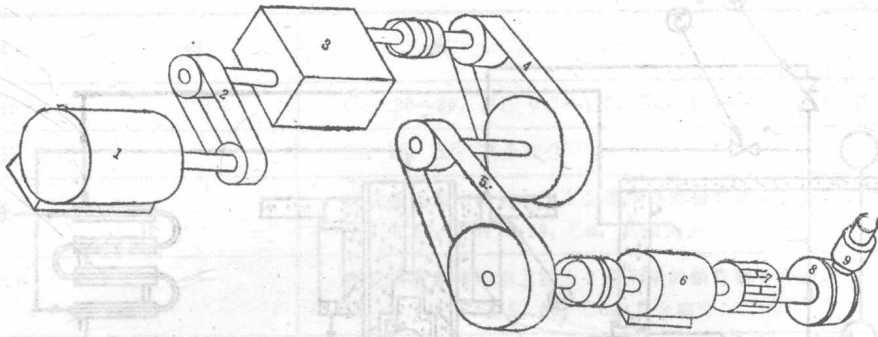


图3 驱动系统

1—整流子马达 (1.1~11千瓦, 165~1650转/分) 2—V形皮带 3—减速器 4、5—同步皮带
6—扭矩传感器 7—限制扭矩联轴器 8—转子 9—柱塞

(3) 液压系统

图4表示液压系统。作用在柱塞上部的液压，由油泵④（最高压力：500公斤/厘米²，额定流量：5升/分）供给，用溢流阀⑤进行调节。

(4) 柱塞温度控制系统

图5表示柱塞温度控制系统。盐水槽中的油液的加热使用电加热器，冷却时使用液化二氧化碳气体。故可以用温度调节器在-50~100°C之间任意调节其温度。但在本实验中只进行过加热实验，在这种情况下用马达①带动油泵②，把已加热的油液送入设在球面试验机油缸缸套⑪内的油箱⑩中。工作油液的热通过油缸套、油缸传导到活塞，使活塞加热。同时，从油箱里出来的热油，通过双层管返回到盐水槽中。从油源来的高压油用该双层管加温后供给柱塞上部。柱塞的温度可以用控制盐水槽油温以及通过开关旁通阀③或溢流阀④的办法进行调节。

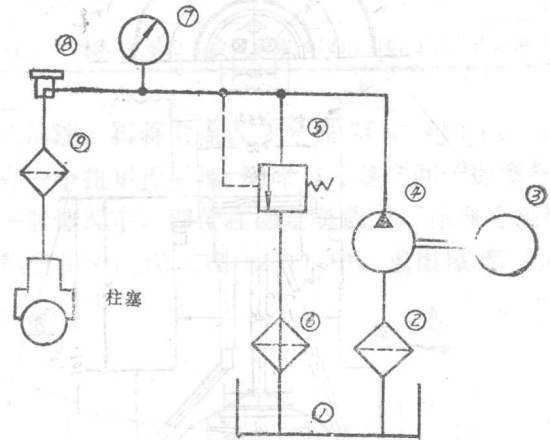


图4 液压系统

1—油箱 2—吸入式粗油滤 3—马达 4—液压泵
5—溢流阀 6—滑油冷却器 7—波尔洞管压力计
8—同力传感器 9—管道油滤 (10μ)

2.1.2 试件

(1) 柱塞形状

实验用活塞的形状如图6所示。其形状与样机所用的活塞基本相同。球面上有5个给油孔，通过节流器进行强制润滑。所用的节流器也与样机所用的相同。为要严格实验条件，增加滑动部位的压负载，在上部安装一个如图7所示的环，对增大受压直径后的柱塞也进行了实验。

(2) 柱塞材料

实验中采用过的活塞材料列于表1。在小试件的自然润滑下、平面与平面之间滑动摩擦的实验中，所用的柱塞材料主要是铝合金、铜合金及软金属镀层。但由于铜合金有气孔和加工性差等原因，故实际能用的铜合金只有两种铅青铜铸件。Al—Sn合金是样机用的材料，

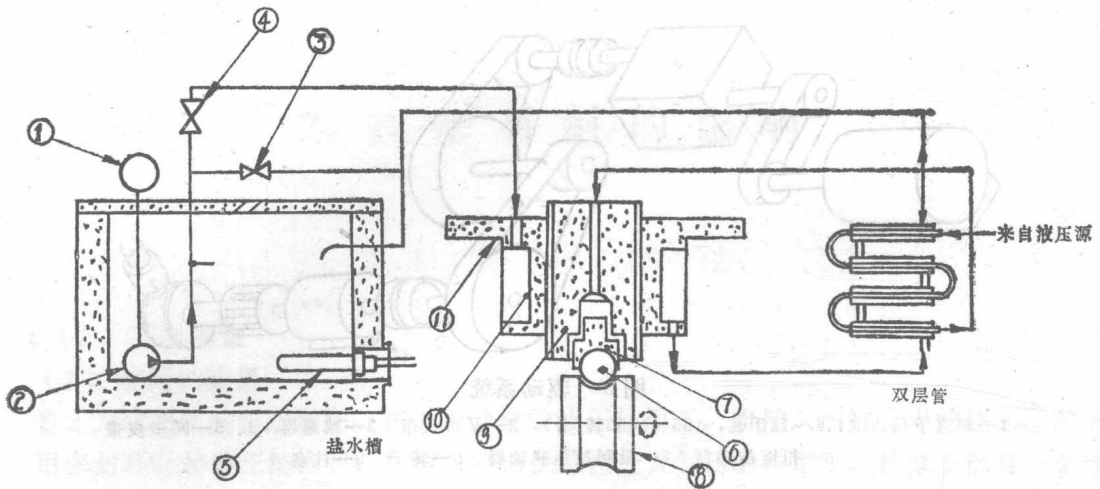


图5 柱塞温度控制系统示意图

- 1—马达 2—串联油泵 3—旁通阀 4—断流阀 5—加热器 6—钢球
7—柱塞 8—转子 9—油缸 10—油箱 11—油缸套

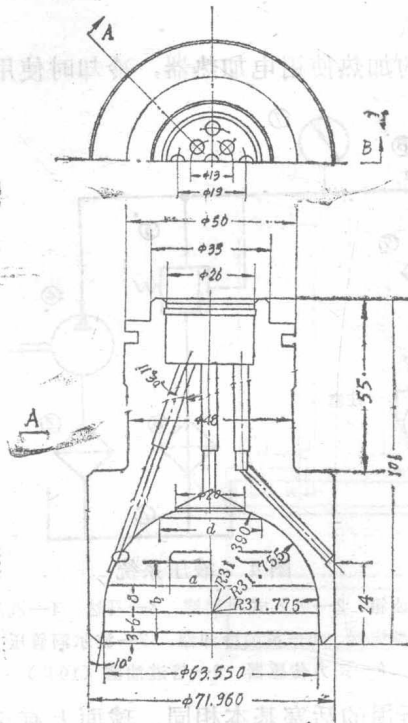


图6 柱塞形状 (受压直径50毫米)

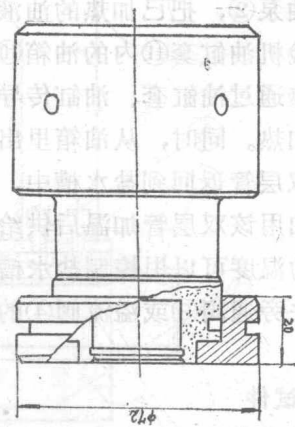


图7 柱塞 (受压直径72毫米)

是轴承用的一种铝合金铸件。

2.1.3 使用的油

实验用的工作油液为52号瑞香液压油，与实际液压马达用的油液相同。

2.1.4 测试方法

(1) 摩擦系数

表 1 柱塞材料

材 料	成 分
Al—Sn	Cu: 20~30, Ni: 0.7~1.3, Sn: 4.5~6.0, Al: 其余部分
Al—Si	Si: 20, Al: 其余部分
铅青铜 5	在优质碳素结构钢上挂上 2 毫米厚的铅青铜 5 合金, Sn: 5.05, Pb: 9.88, Cu: 其余部分
铅青铜 6	在优质碳素结构钢上挂上 2 毫米厚的铅青铜 6 合金, Sn: 5.74, Pb: 22.05, Cu: 其余部分
在 Al—Sn 合金上电镀 2 μ 厚的 Sn	对毛坯进行 Zn 置换反应, 随后触击电镀 Cu, 再电镀 Sn, 整个镀层厚 2 μ
在 Al—Sn 合金上电镀 5 μ 厚的 Sn	对毛坯进行 Zn 置换反应, 随后触击电镀 Cu, 再电镀 Sn, 整个镀层厚 5 μ
在 Al—Sn 合金上电镀 5 μ 厚的 Pb	对毛坯进行 Zn 置换反应, 随后触击电镀 Cu, 再电镀 Pb, 整个镀层厚 5 μ
在 Al—Sn 合金上电镀 5 μ 厚的 (Pb + Sn)	对毛坯进行 Zn 置换反应, 随后触击电镀 Cu, 再复一层 Ni, 在其上面电镀 90% Pb 和 10% Sn 的合金, 整个镀层厚 5 μ
在 Al—Sn 合金上化学镀 5 μ 厚的 Sn	对毛坯进行化学镀锡 5 μ (用置换法)
在 Al—Sn 合金上化学镀 5 μ 厚的 Sn	对毛坯进行化学镀锡 5 μ (用置换法)
在 Al—Si 合金上化学镀 5 μ 厚的 Sn	对毛坯进行化学镀锡 5 μ (用置换法)
在 Al—Si 合金上喷镀巴氏合金	在 Al—Si 合金上喷镀 2 mm 厚左右的巴氏合金 (Pb: 0.025, Sb: 7.5, Cu: 3.5, Sn: 其余部分)
在 Al—Si 合金上喷镀青铜熔液	在 Al—Si 合金上喷镀 2 mm 厚左右的青铜熔液 (Zn: 10, Cu: 其余部分)

所示的油盘, 用该油盘接收从油缸壁上漏出的油液, 再将它泄入 2 号油箱中 (图 2 ⑨)。从

如图 3 所示, 在同步皮带和转子之间装有一个扭矩传感器, 钢球与柱塞之间的擦摩扭矩, 通过动应变仪用描记笔式示波器进行记录。一般情况下, 即使在固定负载下, 擦摩扭矩也要经过一段时间的变化后才达到稳定值, 把此稳定扭矩值代入式 (2.1) 中, 求出擦摩系数。

$$\mu = \frac{T \cos \theta}{R A_0 P} \quad (2.1)$$

式中 μ —— 擦摩系数

T —— 擦摩扭矩 公斤·米

R —— 转子半径 厘米

A_0 —— 柱塞顶部受压面积 厘米²

P —— 液压 公斤/厘米²

θ —— 压力角 (本实验中 $\theta = 35^\circ$)

(2) 柱塞温度

如图 8 所示, 柱塞的温度, 用插在柱塞中的铝—镍铬热电偶连续记录在冷接点箱和描记笔式示波器上。同时为了使传热良好, 在热电偶头部注入水银。

(3) 柱塞球面的漏油量

供给柱塞的油液, 分别流入柱塞的球面和油缸壁两处, 进行润滑。因此, 为了单独测定从柱塞球面漏出的漏油量, 在油缸壁上安装一个如图 9

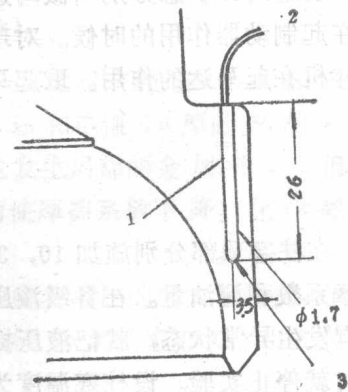


图 8 柱塞温度测定位置

1—胶接剂 2—热电偶 3—水银

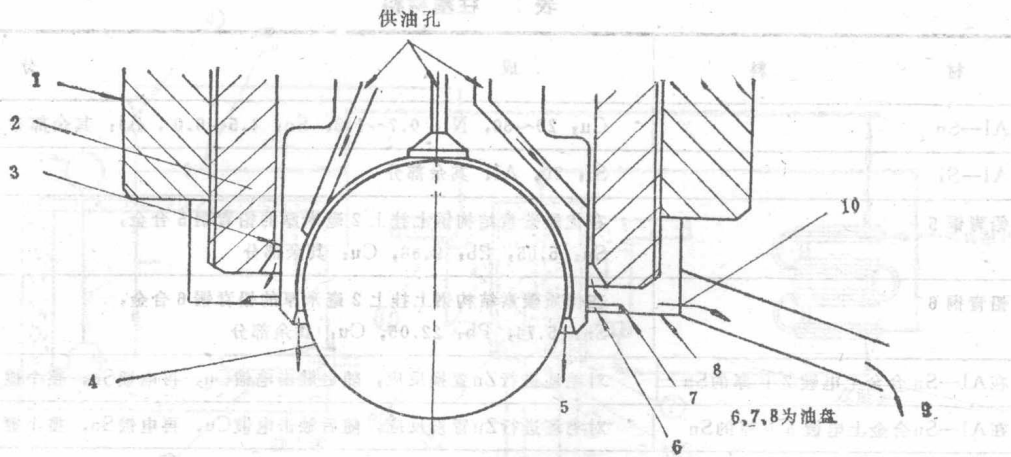


图9 油盘

1—外壳；2—油缸；3—柱塞；4—钢球；
5—球面的漏油（流入2号油箱）；9—流入1号油箱；10—柱塞的漏油

球面漏出的漏油被1号油箱接收（图2⑧），通过漏油量测定管用秒表和量筒来测定漏油量。

（4）液压的测定

经图4所示溢流阀⑤调定的液压用一个安装在油缸入口处的压力传感器（电阻丝应变片式）⑧检测出来，用静应变仪进行测定。

（5）钢球的旋转速度

先用转速表测定转子的转速，再根据此测定值计算出钢球的旋转速度。

把样机当作马达工作时，只要在柱塞顶部稍一施加油液压力，柱塞就逐渐从油缸里被推出，钢球便从定子凸轮盘凸出部向下滚动。反之，钢球正在朝着凸出部往上滚动的过程中，如在柱塞顶部稍一施加油液压力，就会阻止旋转。上述两种状态分别叫做马达在起马达作用的时候，以及在起制动器作用的时候。对球面试验机来说，钢球与转子沿图10所示方向旋转时，相当于样机在起马达的作用。取起马达作用时的转速为正，取起制动器作用时的转速为负。

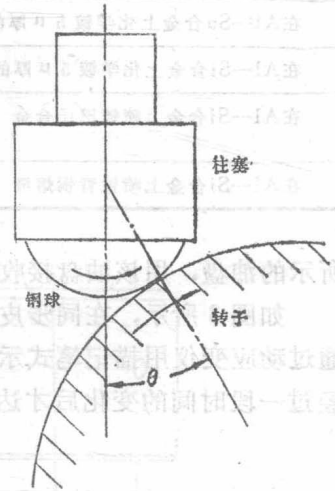


图10 钢球旋转方向与压力角的关系

2.2 实验结果

在柱塞顶部分别施加 10, 35, 70~280 公斤/厘米² 等数级液压值，求出各个给定液压下的摩擦系数和漏油量。在各级液压值下持续的时间，要超过 5 分钟，如果摩擦扭矩和柱塞温度没有发生异常状态，就把液压提高到下一级，如果摩擦扭矩很快上升，当其值超过 20 公斤·米时就停止实验。设柱塞温度为 65~70℃，钢球转速为 388 转/分（相当于样机的额定转速—60 转/分）和 97 转/分（相当于样机的额定转速—15 转/分，迄今为止的实验中，这是最严苛的滑动条件），压力角为 35°。

实验结果示于图11，图12和图15取横轴为润滑特性值 ZN/P ，（ Z ——活塞温度下的油

的粘度，厘泊； N —钢球转速，转/分； P —油压，公斤/厘米²），取纵轴为钢球和活塞之间的摩擦系数。图中的曲线从右到左表示当油压分别为10，35，70~280公斤/厘米²时的测定值。

2.2.1 受压直径为50毫米时的情况

图11，12表示铝合金以及经过表面处理的铝合金柱塞与钢球之间的滑动性能。当钢球的转速为388转/分、液压为10~105公斤/厘米²时随着液压的增大铝—锡合金的摩擦系数下降。估计在该范围内形成了完全的流体润滑膜。在液压大于140公斤/厘米²的范围内，摩擦系数则增大。估计这是由于负载增加，油膜变薄，发生了局部的金属接触的结果。

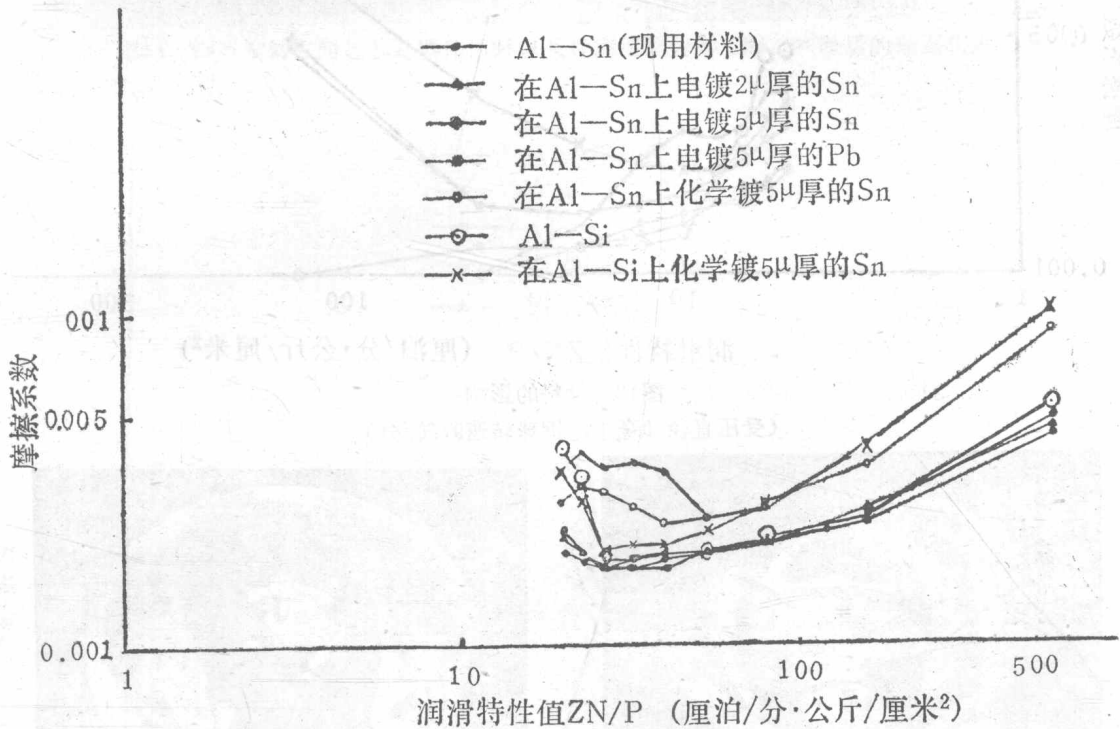


图11 材料的影响
(受压直径50毫米，钢球转速388转/分)

在Al—Sn合金上电镀5 μ 厚的Sn的柱塞，其摩擦系数全部比没有经过电镀的柱塞的低，液压达到210公斤/厘米²以前呈下降的倾向。电镀2 μ 厚的Sn和电镀5 μ 厚的Pb的柱塞也具有与此大体相同的特性。估计其原因可能是，即使钢球也发生局部的金属接触，但因Sn和Pb镀层较软，而且产生流动，故形成一层流体润滑膜而使摩擦系数下降。化学镀Sn时，滑动性能比未镀Sn柱塞的好，但比电镀Sn柱塞的差。

液压达到210公斤/厘米²以前，Al—Si合金柱塞的摩擦系数随着液压的增大而降低，但从210公斤/厘米²开始，摩擦系数急剧增加。在Al—Si合金上化学镀Sn的活塞亦表示出大体相同的倾向。

当钢球转速为97转/分时，出现了两种情况，即摩擦系数随着液压的增大而增大，以及开始时摩擦系数减少，随后增加。但当液压大于105公斤/厘米²时，各种材料的滑动性能的好坏与钢球转速为388转/分时的情况一致。

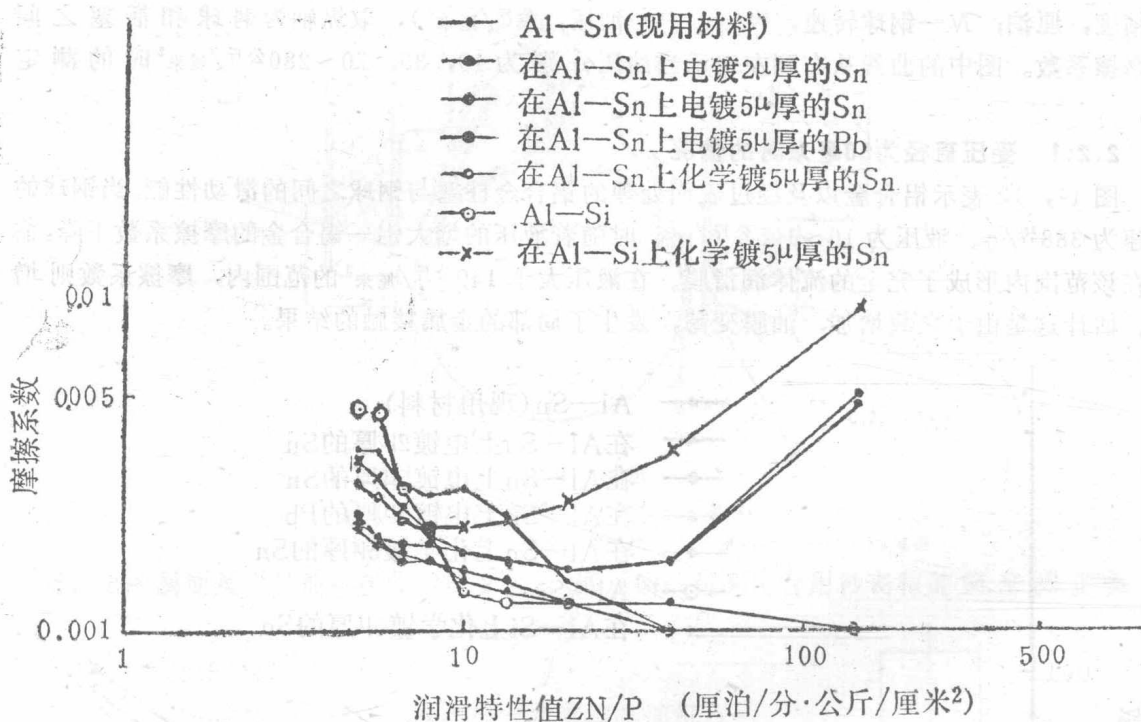


图12 材料的影响
(受压直径50毫米, 钢球转速97转/分)

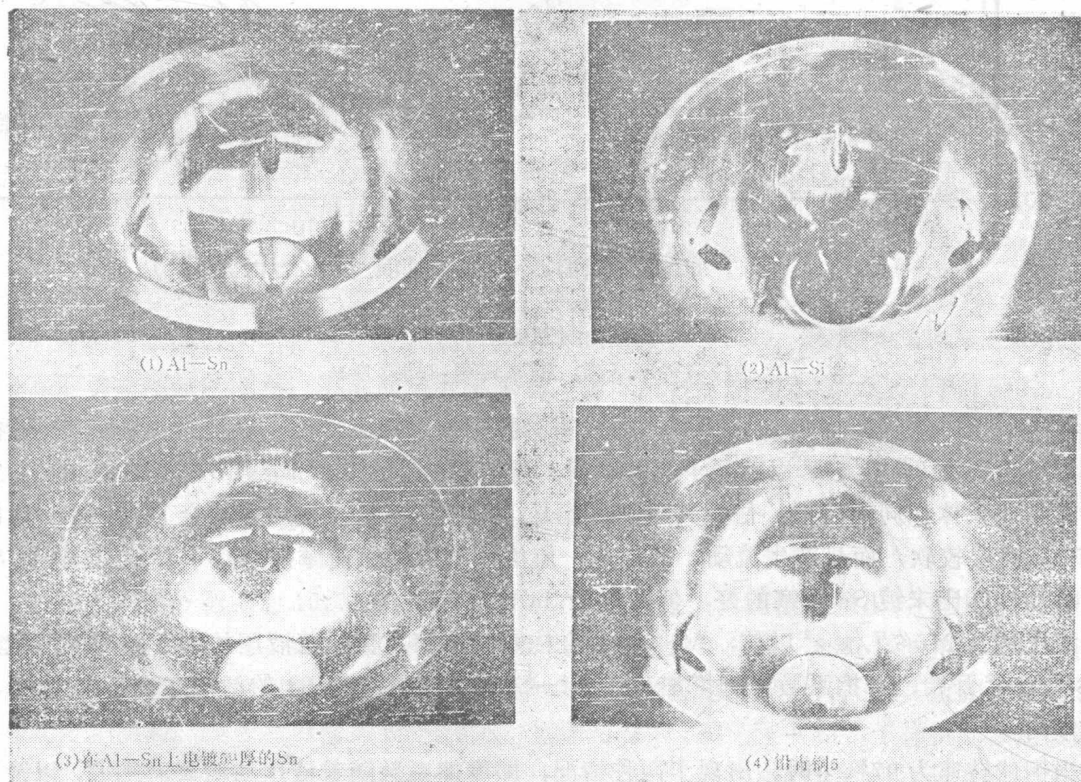


图13 实验后球面的表面状态
(受压直径50毫米)

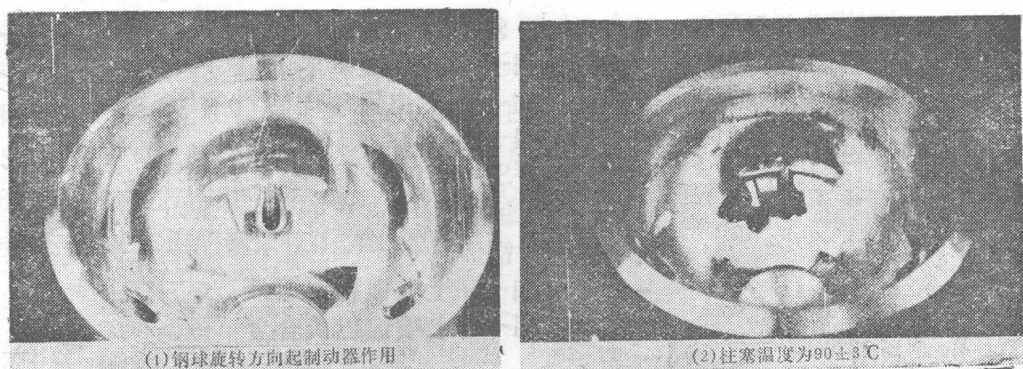


图14 钢球旋转方向起制动器作用时以及柱塞温度为90°C时，实验后的球面状态

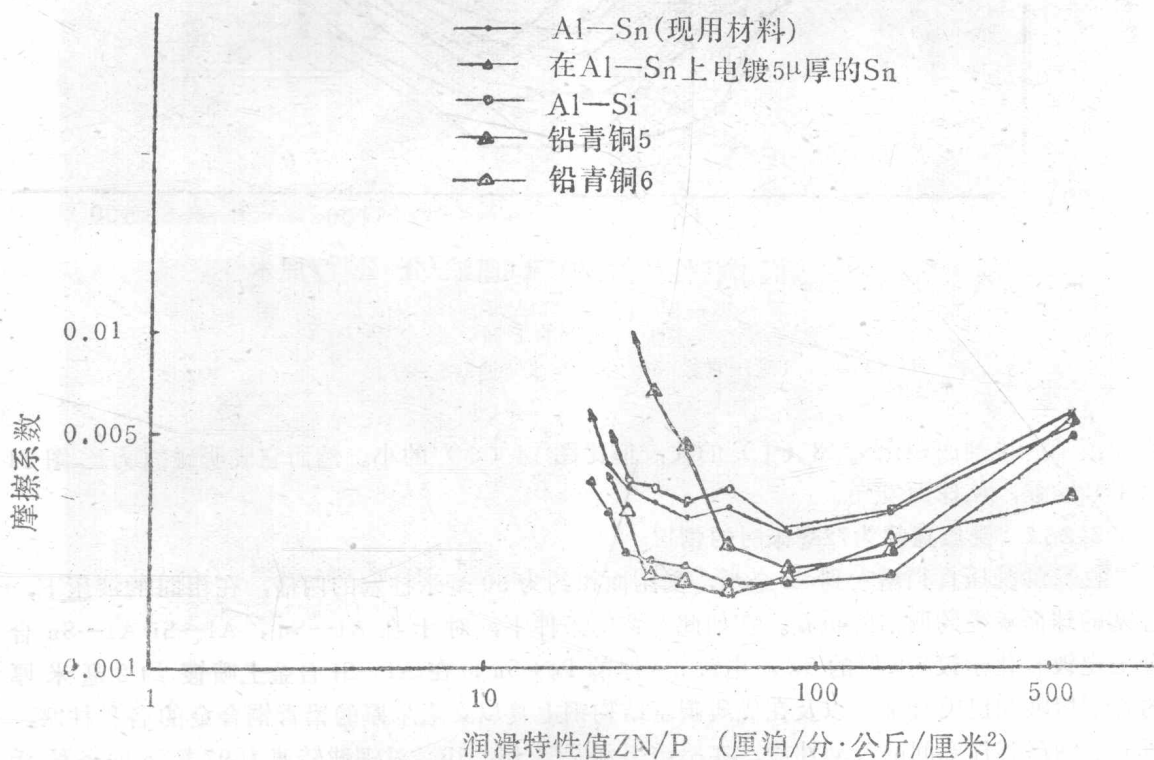


图15 材料的影响

(受压直径72毫米，钢球转速388转/分)

柱塞球面的漏油量，不管是哪一种柱塞，在液压210公斤/厘米²时都是390~490厘米³/分。对Al-Sn，Al-Si，Al-Sn合金上电镀5μ厚的Sn的柱塞，每种抽两个(同一批的)分别进行了实验，所获得的结果是，同一材料的滑动性能大致相同。

实验后的柱塞球面状态如图13所示。此外，在只是钢球的旋转方向相反(速度-388，-97转/分)，而其它条件都相同的情况下，用Al-Sn合金柱塞做实验后的球面状态示于图14(1)。与图13(1)比较，发现整个压紧面与坚硬的钢球发生较大面积的接触。同时，只使柱塞的温度升高到90±3°C，而其它条件都相同时，实验后的球面状态示于图14(2)。

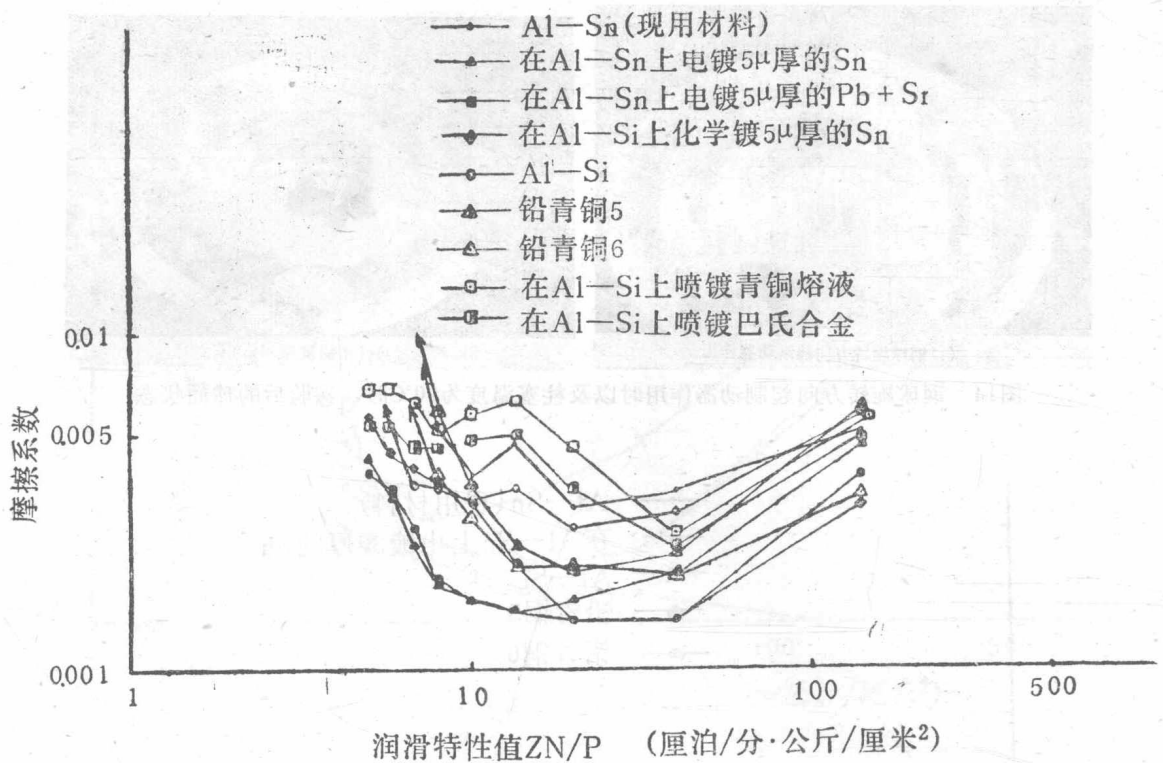


图16 材料的影响
(受压直径75毫米, 钢球转速97转/分)

它和滚子的接触面积比图 13 (1) 的大, 但比图 14 (1) 的小。然而它表明碰撞力比图 14 (1) 的强, 使球面发亮。

2.2.2 受压直径为72毫米时的情况

柱塞的受压直径增大到 72 毫米, 受压面积约为 50 毫米柱塞的两倍, 在相同的液压下, 柱塞的球面承受约两倍的负载。在如此严苛的条件下, 对于在 Al-Sn, Al-Si Al-Sn 合金上电镀和化学镀 5μ 厚的 Sn, 电镀 5μ 厚的 Pb+Sn; 在 Al-Si 合金上喷镀约 2 毫米厚的青铜熔液和巴氏合金, 以及在优质碳素结构钢上复以 2 毫米厚的铅青铜合金的各种柱塞, 研究了钢球和柱塞间的滑动性能。实验结果示于图 15, 16。对钢球转速为 97 转/分时各种活套材料的滑动性能进行比较的结果是, 在 Al-Sn 合金上电镀和化学镀 Sn 及电镀 Pb+Sn 的柱塞, 在低于 280 公斤/厘米² 的各液压值下工作稳定。与受压直径为 50 毫米柱塞的情况相同, 化学镀的柱塞, 其摩擦系数比电镀柱塞的要高。电镀 Sn 和 Pb+Sn 的柱塞, 当液压超过 70 公斤/厘米² 时, 它们的摩擦系数值大致相同。在 Al-Si 合金上喷镀青铜熔液和巴氏合金的柱塞, 其摩擦系数要比电镀柱塞的高, 在液压低于 280 公斤/厘米² 时能稳定地工作。当液压低于 280 公斤/厘米² 时, Al-Sn, Al-Si, 铅青铜 5、铅青铜 6 的柱塞摩擦系数和温度迅速上升 (图中的箭头表示, 在曲线左方逐渐降低压力时产生这种状态), 出现卡死的倾向。这时的摩擦系数大于 0.012。

柱塞球面的漏油量为受压直径 50 毫米的 1/3~1/2。

实验后的柱塞球面状态如图 17 所示。对两个 Al-Sn 柱塞进行了实验。在钢球转速为

67转/分的条件下，第一个活塞，当液压为 210公斤/厘米²时，摩擦扭矩急剧增加，出现了卡死的倾向，但球面没有划伤（图 17（1））。另一个活塞当液压上升到 245公斤/厘米²时，摩擦扭矩急剧增加，钢球上出现较大面积的损伤，柱塞也被完全卡住（图 17（5））。

图 18 表示实验后钢球表面损伤的大小（细的线状划伤）。用表面光洁度测量仪测试了 10 个划伤较深的部位，该图所示为其中伤痕最深的划伤。划伤深度基本上不随柱塞材料而变，但用电镀 Sn 柱塞用的钢球时损伤比较小。

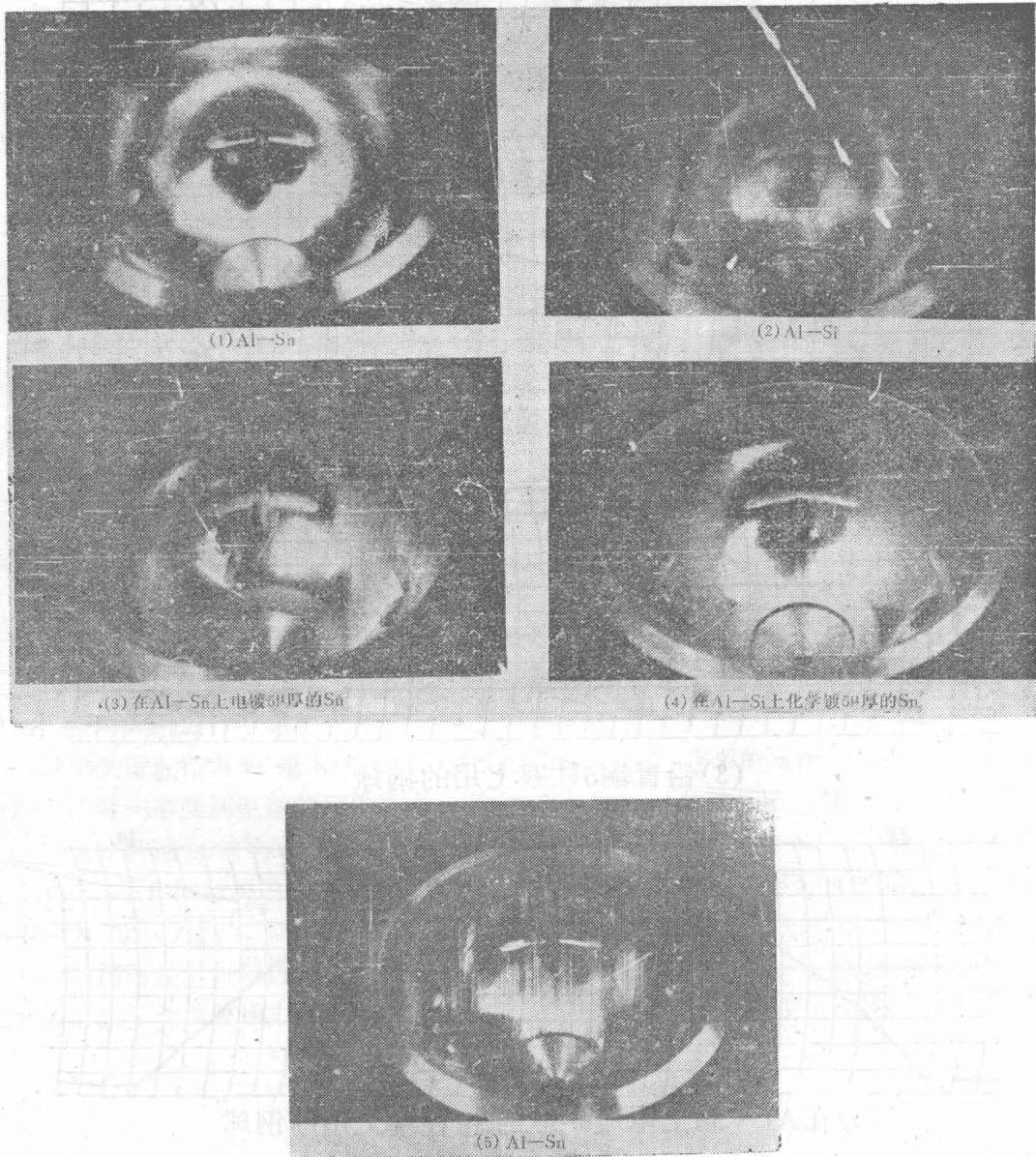
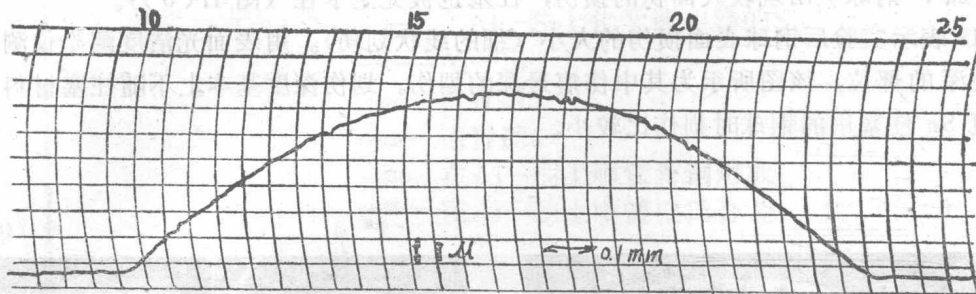
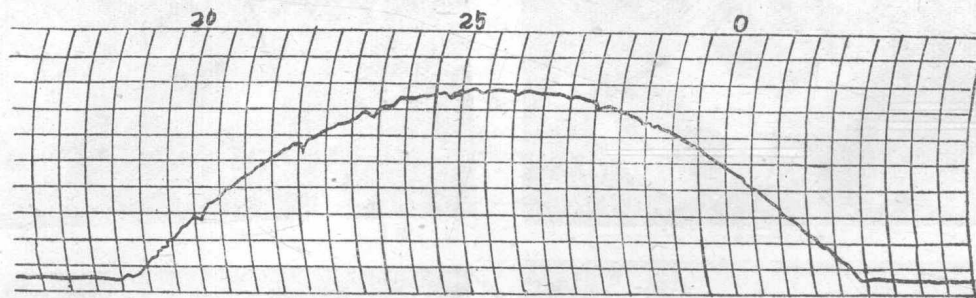


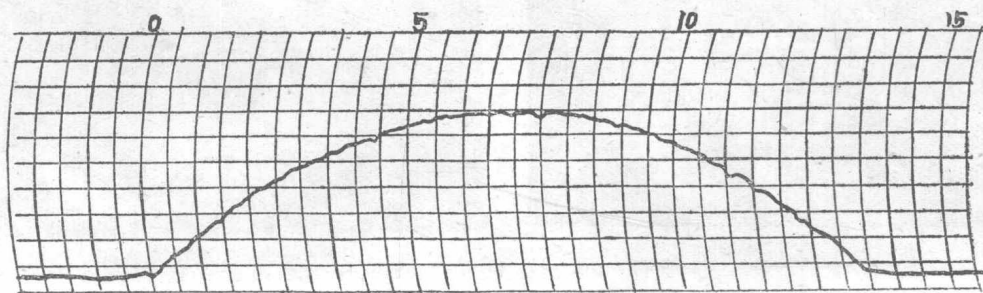
图 17 实验后球面的表面状态
(受压直径72毫米)



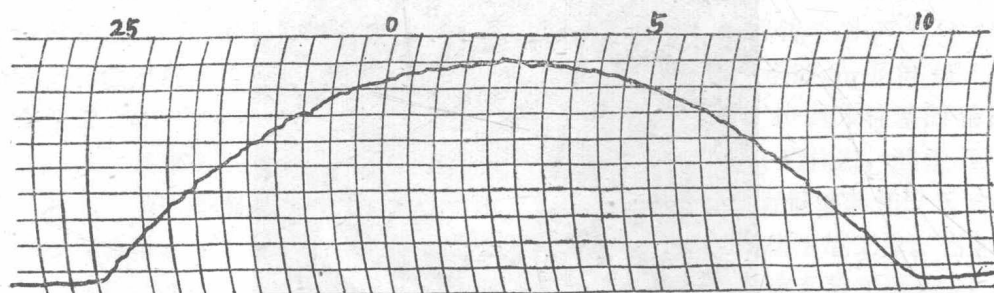
(1) 在Al—Sn柱塞上用的钢球



(2) 在Al—Si 柱塞上用的钢球



(3) 铅青铜5柱塞上用的钢球



(4) 在Al—Sn上电镀5 μ 厚的Sn柱塞上用的钢球

图18 实验后钢球表面损伤的大小
(受压直径72毫米)

2.3 对实验结果的研究

从实验结果可知,在 Al—Sn 合金上电镀 Sn 或 Pb + Sn 的柱塞,其摩擦性能最佳。众所周知在轴承合金的表面复上一层薄的软金属复层,就能改善磨合性,提高了卡死限度,可广泛地应用于汽车轴承等。这种方法对于解决柱塞球面的卡死问题也是极为有效的。但必须对镀软金属的方法、镀层的厚度和光洁度等进行深入的研究,同时,在实际应用时,最好用样机进行充分的寿命试验。

通过小试件的实验,对 Al—Sn 合金和 Al—Si 合金性能进行比较的结果是,两种合金在耐烧伤性方面无多大区别,但 Al—Si 合金的耐磨性要好一些;铅青铜合金的耐烧伤性和耐磨性都比 Al—Sn, Al—Si 合金好得多。可是就柱塞的摩擦性能来讲,从实验结果中看不出此三者之间的明显差别。

柱塞承受油缸和钢球的作用力。由于柱塞壁较薄,当然要考虑柱塞因这些力所引起的变形。铅青铜 5 和铅青铜 6 的柱塞是在 35 号钢上复一层厚约 2 毫米合金的柱塞,所以它们的变形量比 Al—Sn、Al—Si 合金的变形量要小。做完了受压直径 72 毫米柱塞的实验后,观察球面,并将铅青铜 5、铅青铜 6 与 Al—Sn, Al—Si 合金的柱塞作了比较,发现铅青铜 5 和铅青铜 6 柱塞和钢球的接触面积要比 Al—Sn、Al—Si 合金柱塞的小,约为它的 $1/2 \sim 2/3$ 左右,即铅青铜 5 和铅青铜 6 的接触面压力比 Al—Sn 合金的大,从而推测钢球与柱塞之间的滑动性能差不多,但对于这一点,今后还有必要进行研究。估计这可能是由于电镀软金属层的柱塞以及在 Al—Si 合金上喷镀青铜熔液或巴氏合金的柱塞,其基体变形的缺点,与金属复层滑动性能良好的优点,二者间相互抵消,故液压达到 280公斤/厘米^2 时,仍能使它保持稳定的工作。

当对受压直径为 72 毫米的 Al—Sn 合金柱塞进行实验后,在该柱塞圆柱面($\phi 72$ 的圆柱部分)上出现了可能是被油缸强烈挤压的塑性变形的痕迹,故担心在高负荷下此材料是否嫌软。

面对液压马达的高压化,柱塞材料的选择应该从材料的硬度、强度等机械性能和所需的滑动性能两方面进行考虑。

对于受压直径为 72 毫米的柱塞,假设半径为 31.755 毫米的球面(和钢球直接接触的球面)上,有一半受到钢球的反作用力,则在 175公斤/厘米^2 的液压下,球面压力达到 250公斤/厘米^2 。钢球转速为 97 转/分(圆周速度最大为 64.5厘米/秒)时,Al—Sn 合金柱塞的摩擦系数是 0.005。用相同材料的小试件做摩擦实验时,在滑动速度为 80厘米/秒 的情况下,摩擦烧伤极限约为 70公斤/厘米^2 ,此时的摩擦系数高达 0.012。其原因可能是,钢球与柱塞之间因球面上开有油槽通过节流器进行加压供油而产生了静油膜压力,同时,又因油膜的形状和钢球的旋转而产生了动油膜压力,故使球面直接支承钢球的球面压力减少的缘故。

3. 钢球损伤的影响

对钢球和柱塞之间的滑动性能曾进行过各种试验。实验中所用的钢球都是新的、无损伤的钢球。样机性能试验结束后拆开来一看，发现钢球上有无数细小的线状划伤。此外，还有一些较大的损伤，估计这可能是发生故障的液压马达的钢球上曾有过的因凸轮圈和钢球之间发生滑动而引起的损伤。在本章的实验中，把事先就有损伤的钢球安装在柱塞上，研究其对柱塞球面以及钢球和柱塞之间的摩擦性能的影响。

3.1 实验方法

3.1.1 实验装置

采用“2. 柱塞材料的影响”中所用的实验装置。

3.1.2 实验条件及实验方法

给定的柱塞温度是 $50\sim 80^{\circ}\text{C}$ ，压力角是 35° ，钢球转速是97转/分，约在30秒以内用溢流阀使柱塞顶部的油压升至 210公斤/厘米^2 ，保持2~30分钟。随后测定在此期间钢球和柱塞之间的摩擦扭矩。实验完毕后，观察柱塞球面有无损伤。

3.1.3 试件

所用的柱塞是受压直径为50毫米的Al—Sn合金柱塞(现用的，参照图6)；所用的钢球有三种，即做过性能试验的油马达上的带伤的钢球，实验中受损伤的钢球以及新的没有伤的钢球。

3.2 实验结果及研究

3.2.1 损伤大小的影响

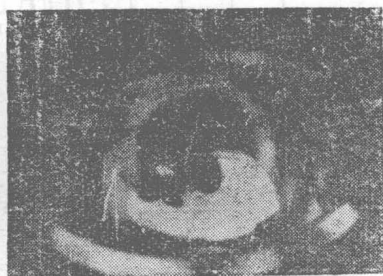
表2~9表示：所用钢球的损伤性质；使用这种钢球时钢球和柱塞之间摩擦扭矩的变化；实验后的球面状态。对于损伤大小为凸起 0.5μ 线状损伤(2号钢球)的钢球，其实验后的球面状态和使用新钢球时的一样，几乎没有产生损伤。凹陷 1.0μ 线状损伤的钢球，有时产生损伤。有时则没有。用砂纸摩擦钢球表面造成损伤的情况下(5号，6号，7号钢球)可观察到，若球面的损伤范围增大，损伤数目增多，则钢球与柱塞之间的摩擦扭矩增大，接触面的磨损也变大。球面的表面状态还表明，虽然发生了有细线状划伤的强力接触，但没有啃削状的损伤。用砂纸擦出48条线状划伤的钢球(7号钢球)，即使持续一小时实验，其摩擦扭矩也都保持在1公斤·米左右的一定值上，没有发生卡死现象。如果继续进行实验，使磨损达到球面的油膜压力失去均衡的程度的话，摩擦扭矩就可能增大而发生卡死现象。使用有凸起块状损伤的钢球(8号钢球)时，钢球与柱塞之间的摩擦扭矩，在液压为 140公斤/厘米^2 时为4公斤·米，在 210公斤/厘米^2 时增大到13公斤·米，振幅也大。同时，球面在整个压紧面上出现了啃削状损伤。钢球的这种损伤可能是由于样机中钢球和凸轮圈发生滑移而引起的，然而，不管怎样也应该避免这种损伤，故必须搞清产生这类损伤的原因并采取措。

表2 钢球损伤的影响 (无损伤的1号钢球)

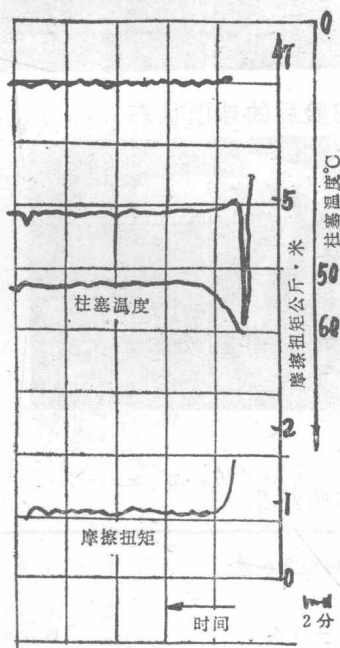
(1) 钢球损伤的性质

损伤性质	损伤凹凸的大小	损伤的数目与大小	来源
无损伤		无	新钢球

(2) 实验后的球面状态:



(3) 摩擦扭矩的变化



(4) 实验结果

实验时间和次数	实验后的球面状态
2分钟——2次	三次实验都是球面上几乎无损伤。正中位置球面的下部发现细而轻微的与钢球相接触的痕迹
15分钟——1次	

表3 钢球损伤的影响 (钢球有凸起的线状划伤, 2号钢球)

(1) 钢球损伤的性质

损伤性质	损伤凹凸大小	损伤数目和大小	来源
凸起的线状划伤	0.5 μ	在4毫米的宽度内约有10条引人注目的损伤, 另外还有无数条线状划伤, 但很小。线状划伤绕钢球一周。	采用样机中使用过的。

(2) 损伤的大小

