

润滑剂承载能力测定法(四球法)

Lubricants—determination of load-carrying capacity (four balls method)

本方法适用于在四球极压试验机上评定润滑剂的承载能力,包括最大无卡咬负荷  $P_B$ , 烧结负荷  $P_D$ , 综合磨损值  $ZMZ$  三项指标。在实际应用中,可根据润滑剂的各种不同用途选用不同的评定指标。

注: ① 最大无卡咬负荷俗称  $P_K$  点(代表油膜强度)。

② 综合磨损值  $ZMZ$  又称综合磨损指标,平均赫芝负荷,负荷-磨损指数。

1 方法概要

在四球机中四个钢球按等边四面体排列着。上球在 1400~1500 转/分下旋转。下面三个球用油盒固定在一起,通过杠杆或液压系统由下而上对钢球施加负荷。在试验过程中四个钢球的接触点都浸没在润滑剂中。每次试验时间为 10 秒,试验后测量油盒内任何一个钢球的磨痕直径。按规定的程序反复试验,直到求出代表润滑剂承载能力的评定指标。

2 定义

2.1 赫芝直径和赫芝线:在某静负荷 ( $P$ ) 下钢球弹性变形所形成的凹入面直径 ( $D_h$ , 毫米)称为该压力下的赫芝直径。

$$D_h = 8.73 \times 10^{-2} (P^{\frac{1}{2}}) \dots\dots\dots (1)$$

式中:  $P$ ——静负荷(实际负荷),公斤。

在负荷-磨损直径双对数坐标图中  $D_h$  与  $P$  的关系是一条直线,称赫芝线。

2.2 补偿线和补偿直径:在存在润滑剂而又不发生卡咬的条件下,在下面的三个球上产生光亮的圆斑状磨痕;由下球的平均磨痕直径对所加的负荷,在双对数坐标图中作出的一条直线称为补偿线。补偿线上相应于某一负荷的磨痕直径称为该负荷下的补偿直径。不同润滑剂的补偿线是接近的,可以用一条代表平均斜度的补偿线来表示,如图 1 所示。

2.3 磨损-负荷曲线:在双对数坐标上,由不同负荷下钢球的平均磨痕直径所作出的一条曲线(参看图 2 中曲线  $ABCD$ )。图 2 中标明了磨损-负荷曲线各部分的意义。

2.4 最大无卡咬负荷  $P_B$  (公斤):在试验条件下不发生卡咬的最高负荷(公斤)。它代表油膜强度。在该负荷下测得的磨痕直径不得大于相应补偿线上数值的 5%。

2.5 烧结负荷  $P_D$  (公斤):在试验条件下使钢球发生烧结的最低负荷(公斤)。它代表润滑剂的极限工作能力。

2.6 校正负荷  $P_{\#}$  (公斤):是对所加的实际负荷  $P$  的修正:

$$P_{\#} = P \cdot D_h / D \dots\dots\dots (2)$$

式中:  $D_h$ ——赫芝直径,毫米;

$D$ ——实测磨痕直径,毫米。

2.7 综合磨损值  $ZMZ$ :是润滑剂抗极压能力的一个指数。它等于若干次校正负荷的数学平均值:

$$ZMZ = \frac{A+B/2}{10} = \frac{A_1+A_2+B_2/2}{10} \dots\dots\dots (3)$$

或一般油脂用  $ZMZ = \frac{A_1 + A_2 + B}{2}$

式中：A——当  $P_D$  大于 400 公斤时，A 为 315 公斤及小于 315 公斤的 9 级校正负荷的总和；当  $P_D$  小于或等于 400 公斤时，A 为 10 级校正负荷的总和；

B——当  $P_D$  大于 400 公斤时，B 为从 400 公斤开始直至烧结以前的各级校正负荷的算术平均值，当  $P_D$  小于或等于 400 公斤时，B 为零；

$A_1$ —— $P_D$  点以前，即补偿线上的那部分校正负荷的总和，由表 3 查得；

$A_2$ —— $P_D$  点以后，315 公斤以前的那部分校正负荷的总和。

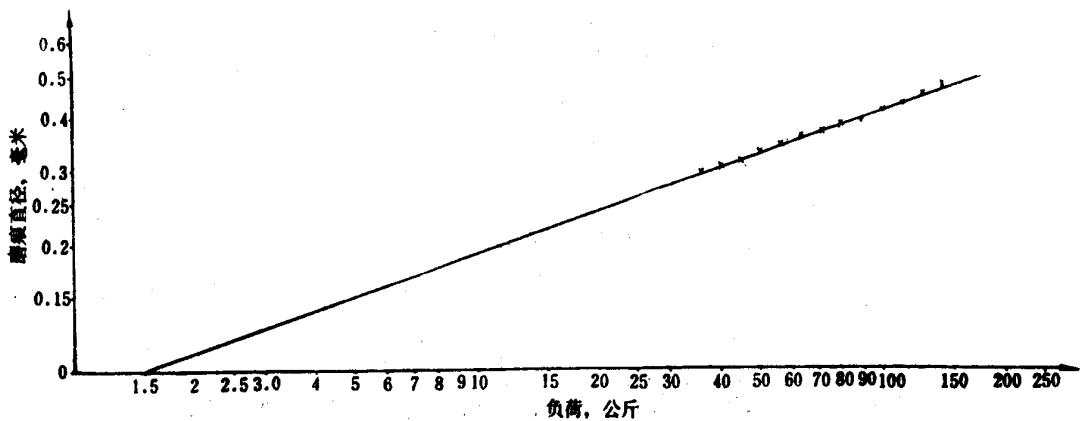


图 1 四球机的补偿线

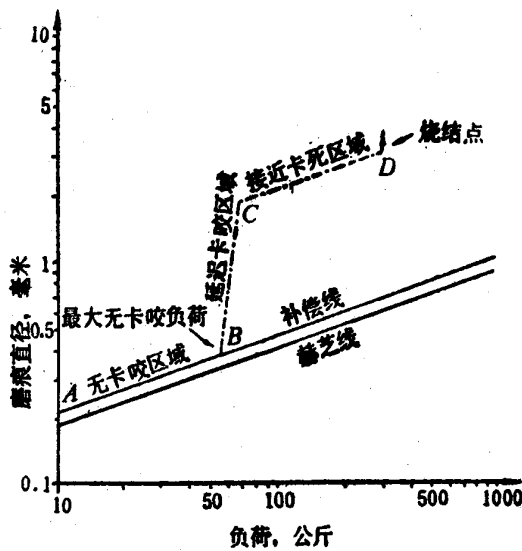


图 2 磨损-负荷曲线

### 3 仪器与材料

#### 3.1 四球极压试验机

四球极压试验机的核心部位如图 3 所示。四球极压试验机的结构和安装要求如下：

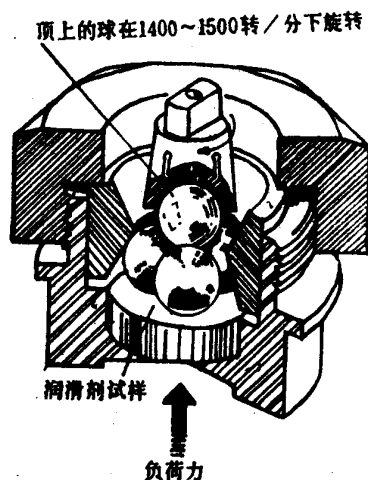


图 3 四球极压试验机示意图

四球机的主轴转速为  $1450 \pm 50$  转/分，负荷范围为 6~800 公斤。

四球机应有钢性耐震结构。四球机摩擦部件（上部钢球）的径向摆差，在离钢球最低点 3.5 毫米处测得的数值不超过 0.02 毫米。

最好不要在同一台四球机上既做极压试验又做磨损试验，以免影响磨损试验的灵敏度。

3.2 显微镜：装有测微计，读数值为 0.01 毫米。

3.3 秒表：分度为 0.1 秒。

3.4 钢球：符合 GB 308《钢球》要求的Ⅰ级轴承钢球，直径为 12.7 毫米，材料为 GCr15。

注：符合上述要求的钢球可从上海钢球厂买到。

#### 4 试剂

4.1 直馏汽油或溶剂汽油。

4.2 石油醚：60~90℃。

#### 5 准备工作

5.1 启动电机空转 2~3 分钟。

5.2 用溶剂汽油清洗钢球，油盒，夹具及其他在试验过程中与试样接触的零部件，再用石油醚洗两次，然后吹干，清洗后的钢球应光洁无锈斑（每种试样试验结束后，都要重复上述步骤为下次试验作准备）。

#### 6 试验步骤

6.1 将钢球分别固定在四球机的上球座和油盒内。把试样倒入油盒中，让试样盖过钢球而到达压环与螺帽的接合处。如果是试验润滑脂，则先在油盒中放上足够数量的润滑脂，把球嵌入润滑脂中，放上压环，拧紧螺帽固紧油盒，抹平表面的润滑脂并调整到压环与螺帽的接合处。试样中不能有空穴存在。

6.2 把装好试样和球的油盒正中地安放在上球座下面，在油杯和导向柱中间放上圆盘架，放出加载杠杆并把规定的负荷加到球上。加载时应避免冲击。油压加载的四球机可根据说明书的要求，进行加载。

6.3 加载后，启动电动机同时按下秒表，从启动到关闭的试验时间为 10 秒。

6.4 每次试验后，测量油盒内任何一个钢球的纵横两个方向的磨痕直径。

6.5 关于最大无卡咬负荷  $P_B$  的测定：测定  $P_B$  时要求在最大无卡咬负荷  $P_B$  下的磨痕直径，不得大于相应的补偿线上的磨痕直径（即补偿直径）的5%。如果测得某负荷下的磨痕直径比相应的补偿线上的磨痕直径大5%。则下次试验就在较低的负荷下做，继续这种操作，直到确定最大无卡咬负荷为止。

为简化试验程序，本方法提供了用以判断  $P_B$  点的  $P \sim D_{\text{补偿}} (1+5\%)$  表（表1）。表1中  $D_{\text{补偿}}$  表示与负荷  $P$  相应的补偿直径。例如：某油在80公斤负荷下测得磨痕直径为0.47毫米，查表1知道在80公斤负荷下  $D_{\text{补偿}} (1+5\%)$  为0.44毫米，则可断定该油的  $P_B$  点小于80公斤。

对  $P_B$  点测定的要求如下： $P_B$  在40公斤以下，测准至2公斤； $P_B$  在41~80公斤，测准至3公斤； $P_B$  在81~120公斤，测准至5公斤； $P_B$  在121~160公斤，测准至7公斤； $P_B$  在160公斤以上，测准至10公斤。

6.6 关于烧结负荷  $P_D$  的测定：一般从80公斤负荷开始，按表2注明的负荷级别进行试验，直至烧结发生为止。要求重复一次，若两次均烧结，则试验时采用的负荷就作为烧结负荷。如果重复试验不发生烧结，则需要用较大的负荷进行新的试验和重复试验。

发生烧结时应及时关闭电动机，否则会引起严重的磨损，钢球与夹头甚至与上锥座烧结在一起。下列现象可帮助判断是否发生了烧结：

- a. 摩擦力记录笔尖有一个剧烈的横向运动；
- b. 电动机噪音程度增加；
- c. 油盒冒烟；
- d. 加载杠杆臂突然降低。

某些极压性能很强的润滑油还未达到真正烧结，钢球磨痕直径已达到极限值，则把产生最大磨痕直径4毫米的负荷作为烧结点，有的润滑剂在极高的负荷下都不烧结，就做到机器的极限负荷800公斤为止。

注：经试验经验说明，测定烧结负荷时把油盒拧紧到扭矩为8.5公斤是适宜的，试验中下球不滚动，且可提高  $P_D$  点的再现性。

6.7 关于综合磨损值  $ZMZ$  的测定：先确定试样的  $P_B$  点在表2中属于那一级，然后从比  $P_B$  点高一级的负荷开始，逐级加大载荷直到烧结为止，查补偿线上校正负荷总和表（表3），并按公式（3）求出综合磨损值。

## 7 计算与报告

- 7.1 最大无卡咬负荷  $P_B$ ：报告最大无卡咬负荷  $P_B$  的公斤数。
- 7.2 烧结负荷  $P_D$ ：报告烧结负荷  $P_D$  的公斤数。
- 7.3 综合磨损值  $ZMZ$ ：根据公式（3）计算并报告综合磨损值。

## 8 精密度

用以下数值来判断结果的可靠性（95%置信率）。

### 8.1 重复性

- 8.1.1 测定  $P_B$  时，同一操作者在同一台机器上重复测定，两次结果间的差数不大于平均值的15%。
- 8.1.2 测定  $P_D$  时，同一操作者在同一台机器上重复测定，两次结果间的差数不大于一个负荷等级。
- 8.1.3 测定  $ZMZ$  时，同一操作者在同一台机器上重复测定，两次结果间的差数不大于平均值的10%。

### 8.2 再现性

- 8.2.1 测定  $P_B$  时，两个实验室对同一试样进行测定的差数不应大于平均值的30%。
- 8.2.2 测定  $P_D$  时，两个实验室对同一试样进行测定的差数不应大于一个负荷等级。
- 8.2.3 测定  $ZMZ$  时，两个实验室对同一试样结果间的差数不应大于平均值的25%。





**附录 A**  
**四球机准确度的检验**  
**(补充件)**

四球机准确度的检验每年至少进行一次，方法如下：

用标准测力环检验四球机的负荷精度。

测定四种参考油脂的最大无卡咬负荷  $P_B$ ，烧结负荷  $P_D$  及综合磨损值  $ZMZ$ 。参考油脂的数据列于表 A1。

表 A1 四球机的参考试样

试样号	试样名称	最大无卡咬负荷 $P_B$ 公斤	烧结负荷 $P_D$ 级别	综合磨损值 $ZMZ$
1	8号航空润滑油，兰州炼油厂生产	42.5	14	18.5
2	20号航空润滑油加3%硫化烯烃	106.5	18	52.3
3	18号双曲线齿轮油，抚顺石油一厂生产	165.3	20.5	85.5
4	7057脂，石油化工研究院研制		16	22.0





B.1.4 由表 B3 提供的校正负荷值, 算出对应于每一组  $P_B$ ,  $P_D$  补偿线上的校正负荷总和, 即  $A_1$  的数值, 作出补偿线上校正负荷总和表 (见本方法表 3)。例如表 3 中  $P_B=50$  公斤,  $P_D=500$  公斤, 交叉点格子中的  $A_1$  值查表 B3 得  $P=50$  公斤的校正负荷值 45.48。又如  $P_B=63$  公斤,  $P_D=500$  公斤交叉点格子中的  $A_1$  值查表 B3 得  $P=50$  公斤,  $P=63$  公斤, 这两级校正负荷加起来:  $45.48+56.78=102.26$ 。再如  $P_B=80$  公斤,  $P_D=500$  公斤, 交叉点格子中的  $A_1$  值查表 B3 得  $P=50$  公斤,  $P=63$  公斤,  $P=80$  公斤, 这三级校正负荷之和:  $45.48+56.78+72.66=174.92$ , 依此类推, 作出整个补偿线上校正负荷总和表。

表 B3

负 荷 级 别	负荷 $P$ , 公斤	$P \cdot D_1$ 系数	补偿直径 $D$ 毫米	校 正 负 荷 $P_{校}$ 公斤
1	6	0.96	0.176	5.40
2	8	1.40	0.194	7.22
3	10	1.88	0.208	9.04
4	13	2.67	0.228	11.72
5	16	3.52	0.244	14.43
6	20	4.74	0.263	18.02
7	24	6.05	0.279	21.68
8	32	8.37	0.305	29.08
9	40	11.96	0.330	36.24
10	50	16.10	0.354	45.48
11	63	21.86	0.385	56.78
12	80	30.08	0.414	72.66
13	100	40.5	0.446	90.81
14	126	55.2	0.481	114.8
15	160	75.8	0.521	145.5
16	200	102.2	0.561	182.2
17	250	137.5	0.600	229.2
18	315	187.1	0.648	288.7

## B.2 测定双齿-1 油的 $P_B$ , $P_D$ 及 $ZMZ$ 值

具体方法如下:

B.2.1 双齿-1 油是高级压齿油, 因此不一定从 80 公斤开始作, 可从 160 公斤开始作, 测得磨痕直径  $D$  为 0.54 毫米, 查本方法表 1 可知未超过  $P_B$  点。将负荷升高一级, 做  $P=200$  公斤, 测得磨痕直径  $D$  为 1.19 毫米, 显然已超过  $P_B$  点, 可见  $P_B$  点在 160~200 公斤之间, 再做 165 公斤, 测得磨痕直径  $D$  为 0.62 毫米, 查表 1 得知已超过  $P_B$  点, 断定精确的  $P_B$  点为 160 公斤。

B.2.2 接着做 250 公斤、315 公斤、400 公斤、500 公斤, 直至到 620 公斤才发生烧结, 重复一次也发生烧结, 就停止试验。

查本方法表 3 中  $P_B=160$  公斤与  $P=620$  公斤的交点, 得  $A_1=526$ , 再依本附录表 B4 的数据, 则  $A=A_1+A_2=526+(85.88+86.48+95.46)=793.82$ 。

注: 查表 3 时, 应特别注意  $P_B$  的靠级, 例如  $P_B=165$  公斤, 则靠  $P_B=160$  公斤这一级。如果  $P_B=158$  公斤, 则应靠  $P_B=126$  公斤这一级。

表 B4

试验编号:                    机型: 吉山                    委托单位:  
 试样名称: 双齿-1            转速: 1420 rpm            操作人员:  
 试样配方:                    钢球: 湖北球              校对人员:  
                                   室温: 20℃                    试验日期: 1980. 8. 10

负 荷 级 别	负 荷 $P$ 公斤	磨 痕 直 径 $D$ , 毫米			$P \cdot D$ 系 数	校正负荷 $P_{校}$ 公斤	备 注
		$d_1$	$d_2$	$d_{平均}$			
1	6				0.95		
2	8				1.40		
3	10				1.88		
4	13				2.67		
5	16				3.52		$A_1 = 526$
6	20				4.74		
7	24				6.05		
8	32				8.87		
9	40				11.96		
10	50				16.10		
11	63				21.86		
12	80				30.08		
13	100				40.5		$A_1 = 267.82$
14	126				55.2		
15	160	0.53	0.54	0.54	75.8		
16	200	1.18	1.20	1.19	102.2	85.88	
17	250	1.58	1.60	1.59	137.5	86.48	
18	315	1.95	1.97	1.96	187.1	95.46	总 $A = 793.82$
19	400	2.20	2.28	2.24	258	115.18	
20	500	2.30	2.32	2.31	347	150.22	
21	620				462		
22	800				649		$B/2 = 66.35$
	165	0.64	0.59	0.62		试验结果	$P_B = 160$ 公斤 $P_D = 620$ 公斤 $ZMZ = 86.02$

$$B/2 = \frac{115.18 + 150.22}{2 \times 2} = 66.35$$

$$ZMZ = \frac{A + B/2}{10} = \frac{793.82 + 66.35}{10} = 86.02$$

如果不要求测定双齿-1 的精确的最大无卡咬负荷  $P_B$ , 而只要求测定  $P_D$  及  $ZMZ$  时,  $P=165$  公斤这一点不必做。

极个别的油测定  $P_B$  时在二个负荷之间出现反常现象, 这可能是操作中有错误, 但也有可能是润滑剂本身固有的特性。在这种情况下应在较高的一级负荷下重复一次, 以排除疑问。如当  $P=160$  公斤时油膜破了, 但做  $P=200$  公斤时油膜反而不破。这时应重复做一次  $P=200$  公斤, 若破了则断定  $P_B < 160$  公斤, 若不破则肯定  $P_B > 200$  公斤。但应注意油膜的破与不破在较小的负荷范围内反反复复是正常现象。

象，不必做重复试验。

---

**附加说明：**

本标准由中华人民共和国石油工业部提出。由石油化工科学研究院归口。

本标准由石油化工科学研究院负责起草。

本标准主要起草人韦淡平。

自本标准实施之日起，原石油部标准 SY 2665—77《润滑剂承载能力测定法（四球法）》作废。