

# 固体润滑剂在航空上的应用

陈 润 斋

## 一、固体润滑剂的原理

众所周知,即使是精加工的表面,在微观上也是粗糙的。当它们相对接触时,载荷仅作用在凸峰处,其真实接触面积可以小到名义接触面积的万分之一。这些接触区的单位压力极高,会产生“冷焊”。高接触应力也引起了金属的塑性变形,增大了接触点的面积,使更多的表面原子处于强作用力的范围内。在滑动时需要作功把这些接触点剪切开,这就是摩擦的起因。摩擦的后果是表面磨损。在理想的流体润滑条件下,接触面被一层完整的流体膜(流体动力膜或流体静力膜)隔开。此时摩擦力就表现为流体的内摩擦力(以流体的粘度系数表示)。钢-钢表面在清洁状态时摩擦系数达到 $0.7\sim 0.8$ ,在边界润滑条件下(表面有氧化层及吸附了极性分子),摩擦系数为 $0.3\sim 0.15$ 。而纯粹的流体润滑仅为 $0.01\sim 0.000001$ 。

固体润滑剂是固体状态的减摩材料,通常是一些剪切强度比较低的物质。它们在金属表

面形成粘附膜,在滑动时比基体金属容易剪切开。它们的微粒填充在凹谷中,改善了表面光洁度,相应地增加了接触面积,降低了单位面积负荷及接触点的温度。所以固体润滑的实质是以固体物质自身的低摩擦代替基体金属的高摩擦。广义地说,具有低摩擦系数的固体物质均可用作润滑剂。根据使用要求的不同,摩擦系数达到 $0.25\sim 0.30$ 的物质亦可作为润滑介质。

一种优良的固体润滑剂常常具有层状的晶格构造(例如石墨和二硫化钼)或者它的分子相互间的内聚力很小(例如聚四氟乙烯),见图1。在石墨和二硫化钼的六方晶格里,每一层内相邻原子之间距离较小,且以化学键相结合,联结牢固。而层与层之间距离较大,以分子力相作用,联结薄弱,在外力作用下,极易滑动。厚度为 $0.1$ 微米的二硫化钼膜,约有 $50$ 层很容易被剪切开的S-S层,因而摩擦系数是很低的。另一方面,硫原子与金属表面吸附却很强(图2)。在摩擦时产生的高温还引起硫

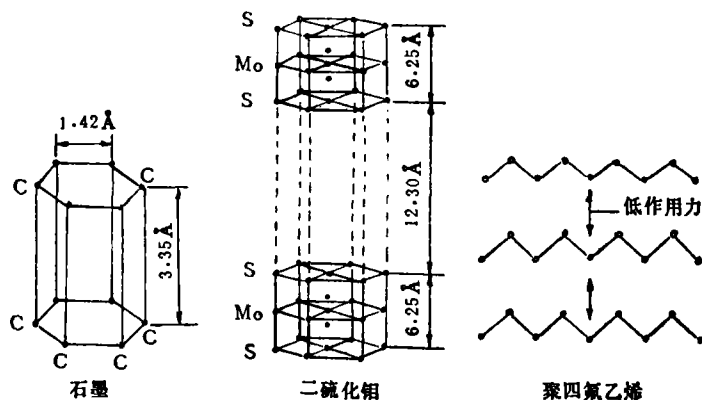


图1 石墨和二硫化钼的晶格及聚四氟乙烯分子作用力示意图

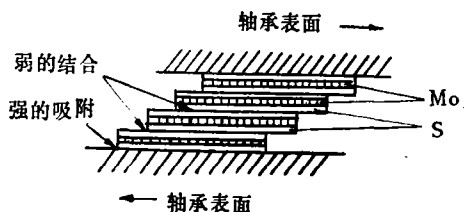


图 2 二硫化钼在金属表面的吸附

原子与金属反应，形成一层非常牢固的化学膜（如 $\text{FeS}$ ）。甚至在高达35000公斤/厘米<sup>2</sup>的压力下也不致使金属与金属相接触而发生“冷焊”。这对一般常规润滑剂来说是不易达到的。

与常规润滑剂（润滑油、润滑脂等）相比，固体润滑剂有以下一些特点：

### 1. 高承载能力

在高负荷下，液体润滑剂会从对偶表面中挤出，造成摩擦面粘合或卡死。固体润滑剂可承受高得多的载荷，对于重载下启动及螺纹联接等场合很有用。

### 2. 耐高温

常规润滑剂在200℃以上使用时，其使用寿命与承载能力剧烈降低，在300℃使用很困难。固体润滑剂可使用至650℃或更高。

### 3. 耐低温

常规润滑剂的低温使用极限为-60~-70℃。固体润滑剂可低至-200℃，即可达到液氧和液氮的低温。

### 4. 低速性好

许多固体润滑剂的静摩擦系数和动摩擦系数相差不大或相等，不致产生“粘-滑”现象。适用于周期进行“静-动-静”的低速滑动。

### 5. 抗化学性

多数固体润滑剂是化学惰性的，能耐化学溶剂、纯氧或其他化学物质。

### 6. 耐污染

在尘埃环境中，常规润滑剂易被污染而起磨料的作用。固体润滑剂不粘附尘土。

### 7. 可润滑“难于润滑”的金属

钛、铝、镁及耐热合金钢等所用常规润滑

剂，润滑效果不好，而固体润滑剂却可防止这类金属磨损。

### 8. 导电性

某些固体（如 $\text{NbSe}_2$ ）兼有良好的润滑性和导电性，体积电阻小，特别适用于低气压条件下的电接触摩擦零件。

### 9. 一次润滑

常规润滑剂往往经100~200飞行小时就要进行补充。使用固体润滑剂可把周期延长至500~1000小时，或者在一个返修期内不需补充润滑。因而适用于常规润滑剂难于达到的地方。

这些特性对于飞机简化结构、减轻重量、提高性能等方面将带来许多好处。所以，目前已成为航空用润滑剂中不可缺少的一类。

固体润滑剂的缺点主要有：

- 1) 摩擦系数比常规润滑剂高；
- 2) 由于是固体摩擦，不可避免要有磨损；
- 3) 有一定的寿命期限，期限的长短随工作条件（运动速度、载荷等）而异；
- 4) 没有冷却作用；
- 5) 使用工艺比较复杂，磨损后要按专门工序进行返修。

固体润滑剂在某些特殊条件下的工作能力高于常规润滑剂，但不能完全代替后者。在不可能使用液体或半液体润滑剂时，就可选用固体润滑剂，以作为常规润滑剂的一种补充。

## 二、几种主要的固体润滑物质

可作固体润滑剂的物质包括金、银、铅等软金属，各种硫化物、卤化物、氧化物等无机物以及含氟化合物等多种有机物。然而，从所进行过的大量研究工作来看，石墨、二硫化钼和聚四氟乙烯仍然是最主要的（表1）。在固体膜润滑剂中，90%是使用这几种材料。其他如二硫化钨、二硒化钨、氮化硼等也有不同程度的应用。

石墨的耐热性好，较易散热，抗化学性优良。二硫化钼的耐热性低些，在400℃以上氧化迅速。聚四氟乙烯在315℃以上开始少量分解，

产生毒性较大的物质。它的热膨胀系数高，容易受热翘曲，导致精密轴承的配合受到破坏；其导热性差，高速摩擦会引起过热。聚四氟乙烯的抗化学性良好。

石墨具有必要的机械强度，能制成高速摩擦的密封件。聚四氟乙烯的抗压强度低，具有冷流倾向，很少以纯物质状态制成轴承来供应。

石墨在很宽的温度范围内，摩擦系数大致保持稳定。二硫化钼在其有效的使用温度范围内，摩擦系数低于石墨。聚四氟乙烯在很低的滑动速度下，摩擦系数比前二者都小，而在速度较高时就增大；二硫化钼在高速下却是下降的。在真空及完全干燥的条件下，石墨则失去润滑能力。

聚四氟乙烯的承载能力低，易磨损，经填充其他物质（如石墨、青铜粉、玻璃纤维等）后，其PV值可提高10倍或更高。它的摩擦系数在负荷提高时下降，二硫化钼具有很高的承

载能力，并且在高负荷下摩擦系数进一步减小到0.05以下。因而常常把它加入到其他轴承材料中以提高PV值。它和石墨的承载能力还可以由同时并用这两种材料而改善。

摩擦系数值随试验机的型别及试验条件（负荷、速度、摩擦对偶材料）而不同。在纯物质状态（粉末或压制成块）时测得的数值常常较高，而制成复合材料及固体膜时，经过跑合就降到很低的值（0.03~0.04）。

表 1 三种固体润滑剂比较

	石 墨	二氧化钼	聚四氟乙烯
颜 色	黑	灰 黑	白
比 重	2.2~2.3	4.8~4.9	2.1~2.3
硬 度	莫氏1~2	莫氏1~2.5	邵氏D55
抗张强度			
公斤/厘米 <sup>2</sup>			
20°C	120		210
93°C	140		100
540°C	175		分解
抗压强度	280~590		42
公斤/厘米 <sup>2</sup>			
导热系数	80		0.21
千卡/米·小时·°C			
热膨胀系数	$2.2 \times 10^{-6}$		$5.5 \times 10^{-5}$
20°C			
体积电阻	$2.64 \times 10^{-3}$	851	$10^{17}$
欧姆·厘米			
抗化学性	优	良好	优
对金属的粘附性			
毫克，擦上	0.7	51	
对水的湿润角	50°	60°	126°
摩擦-速度特性	见图 3	见图 3	见图 3
摩擦-温度特性	见图 3	见图 3	见图 3
真空中摩擦系数	高	变化	低
低温下摩擦系数	高(0.8)	高(0.68)	低(0.04)
(液氮)			
PV值	350		70
公斤/厘米 <sup>2</sup> ·米/分			
最高连续使用温度，°C	450	350	260
最高瞬时使用温度，°C	600	400	315

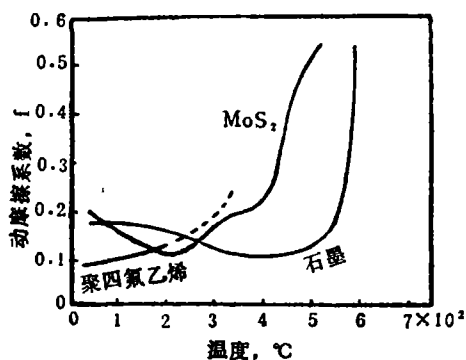
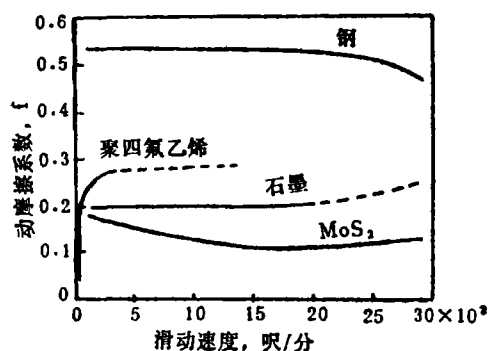


图 3 摩擦系数比较

除表 1 三种应用最多外，以下几种亦常使

用:

#### 1. 二硫化钨

它和二硫化钼非常相似,使用温度高约50℃。比重为7.4,分散性差些。

#### 2. 二硒化钨

它的摩擦系数和石墨相似,体积电阻却更小,为 $0.535 \times 10^{-3}$ 欧姆·厘米。在无湿气的条件下仍具有良好的摩擦磨损性能,是一种优良的高空电刷材料。

#### 3. 氮化硼

它具有与石墨相似的晶格,莫氏硬度为2,最高连续使用温度为700℃,瞬时可达900℃。摩擦系数较高(0.15~0.30),承载能力低,磨损寿命短。

#### 4. 氧化铅

常温下摩擦系数高,在200℃以上降至0.1。主要用作高温润滑,最高达650℃。

#### 5. 氟化钙/氟化钡共熔体

在540℃以下摩擦系数为0.25~0.40,540℃以上时为0.1~0.25。适合在400~800℃范围内使用。

### 三、固体润滑剂的使用类型

根据使用要求的不同,固体润滑剂制成以下几种类型:

#### 1. 纯润滑剂粉末

把石墨、二硫化钼粉末直接用于产品上,如用滚涂法涂在大量生产的零件(坯件、螺栓、铆钉)表面上,或用擦涂法在大零件(轴颈、轴承等)的表面擦上一薄层,用于满足“一次使用”的需要。这种类型应用较少。

#### 2. 分散体

把固体润滑剂粉末分散在液体介质中,如水、矿物油、异丙醇、挥发性有机溶剂等,制成悬浮液,常用于螺纹等处。它可以靠毛细管作用把固体润滑剂粒子分布到不规则表面及难于达到的缝隙处,溶剂挥发后,即留下一层均匀的润滑剂膜。这类产品有的做成膏状,在零件装配时涂上少许,防止磨蚀。

### 3. 固体膜润滑剂

上述两种类型的使用寿命很短,不能用于多数摩擦部件上。如果用一种粘结剂和固体润滑剂混合,在表面上涂一薄层,干燥后就成为具有润滑作用的固体膜,俗称干膜润滑剂。其使用寿命大大延长。根据粘结剂的不同性质分为以下几种:

#### 1) 树脂粘结膜

空气干燥的树脂及热固化的树脂均可用作粘结剂。前者磨损寿命短,耐热性低,抗溶剂性差,一般用于螺帽等非重要部位。后者以酚醛和环氧型应用最广,磨损寿命长,抗溶剂性及附着力均良好。有机硅膜耐热性好而耐磨寿命较短,适用于工作温度高而摩擦不严重的场合,如压气机叶片等。聚酰亚胺膜是一种较新型的材料,耐热性比环氧-酚醛高。在使用初期,膜本身有相当磨损,随后变得很光滑,摩擦系数趋于稳定,可达0.05以下。

#### 2) 无机粘结膜

用磷酸、磷酸盐、硅酸盐、 $AlO(OH)$ 等无机物作粘结剂制得的膜,其磨损寿命及防护性不及树脂膜,但耐热性则可高达650℃。在空间工业上应用较多。

#### 3) 陶瓷粘结膜

用玻璃做粘结剂,以石墨、氟化钙、氟化钡及氧化铅为润滑物质。通常用于250℃以上的工作部位,有些品种可用于800℃或更高。

在固体润滑剂的各种使用类型中,粘结型固体膜润滑剂应用最广,品种最多,因此已制定了许多军用规范来控制质量。波音公司、罗耳斯·罗伊斯公司等均已制定了相应的材料规范和工艺规程。

### 4. 自润滑衬垫

聚四氟乙烯的纤维具有很高的承载能力,织成的布可承受3000公斤/厘米<sup>2</sup>的载荷,摩擦系数约为0.03~0.07。编织的空隙还解决了热膨胀的问题。它也可和玻璃或聚酯纤维编织在一起,常用于球面轴承和轴颈轴承,也可用于动力密封、滑动件、摩擦片等,衬垫厚0.25~

0.40毫米，用胶粘剂粘结在零件上。已制定了  
几种军用标准。

5. 自润滑复合材料

这是一类自身具有润滑作用的轴承材料，  
直接制成各种零件而成为结构件的一部份，使  
用时不再加油。由聚四氟乙烯、聚亚胺、聚酰  
胺（尼龙）等塑料与玻璃纤维、青铜粉、石墨、  
二硫化钼等材料混合，经压制和烧结加工成滚  
动轴承保持器、衬垫、滑动件及惰轮装置等，  
在允许的磨损量范围内有相当长的使用寿命。  
它们的热膨胀大，轴承间隙应比金属轴承的大。

另一种复合材料是在薄的钢背衬上烧结一  
薄层多孔青铜，再浸渍一层聚四氟乙烯和铅粉  
的混合物，商品名称为DU。它兼有聚四氟乙  
烯的低摩擦系数，青铜和钢的高导热性、低热膨  
胀以及足够的机械强度。由于加入了铅粉，抗磨  
性也大为提高。连续使用的PV值可高至 5000 磅/  
英寸<sup>2</sup>·英尺/分。平均摩擦系数为0.13左右。  
主要做衬套及止推垫圈。在国外已制成  
不同规格的标准件，在飞机上已广为使用。

四、固体润滑剂在飞机上的

使用情况

早在五十年代初固体润滑剂已普遍使用  
在不直接影响飞机安全的部位。六十年代，在  
航天方面的应用大量增加。近三十年来，由于航  
空空间工业发展的需要，应用技术有了巨大进  
展，可以解决许多困难的润滑问题，例如波音  
公司在研究超音速运输机的润滑问题时，对于  
高温、寿命、防止钛合金擦伤等一系列要求，大  
量求助于固体润滑剂。北美公司在XB-70轰炸  
机上使用固体润滑剂的地方超过1000处，其中  
600处的条件是苛刻的。到目前为止，在飞机  
和发动机上可以采用固体润滑剂的部位及部件  
参见表2。

这些使用部位的特点，通常是中、低速的滑  
动摩擦，处于高比负荷、高温、间断工作，结  
构空间有限以及暴露在气流中等等。此外，还

往往用于安全装置上，这些地方的运动是有限的，  
但一旦需要，其机构必须能够工作。固体

表2 飞机和发动机上应用固体  
润滑剂的零、部件

操纵杆、拉杆、摇臂	铰链轴承
螺旋作动筒、气动作动筒	铰链销
座舱盖套管	摩擦联结件
弹射座椅	叶片
机翼整流物	花键、齿轮
各种操纵机构	紧固件
导弹架	螺纹
导轨、滑轨、托架	门臼
空气活门	检修口盖
燃油活门	滑轮
氧气系统管接头	活塞

润滑剂也用作“第二润滑剂”，在常规润滑剂失  
去工作能力或漏失时，可以维持飞机返回地面。  
在某些场合可以起一定的密封作用，如小型随  
动活门的活塞与筒壁，在磨合过程中，固体润  
滑剂随对偶件的几何形状而磨损，使配合精度  
提高，减少渗漏。在使用油脂会积聚雨水的部  
位如座舱盖滑动套管上，采用固体润滑剂又可  
解决排水问题。固体润滑剂用于减轻零件（如  
叶片、花键等）的磨蚀，效果显著。对一般摩  
擦表面有一定的防护能力。至于在减少地面维  
护，方便返修等方面的好处就更明显。

表3 列举了飞机、发动机上使用固体润滑  
剂的一些实例，可供参考。

五、设计注意事项

固体润滑剂的使用效果，除了材料自身的  
性能外，与设计的合理性及使用工艺密切有关。  
为了充分发挥其效能，必须注意以下几方面：

1. 寿命

固体润滑剂是一种消耗材料，在工作过程  
中自身被逐渐磨耗，其寿命有一定限量，并随  
负荷、速度、温度而异。实验室评价结果一般  
不能换算成实际使用寿命，要获得确切的数值，

表3 飞机和发动机使用固体润滑剂实例

飞机和发动机	使用部位	采用的固体润滑剂
XB-70	普通轴承(占95%)	塑料及陶瓷干膜润滑剂
	230°C的摩擦部件	Duroid轴承(MoS <sub>2</sub> -Teflon-玻璃纤维)
	270°C的摩擦部件	Fabroid (Teflon-玻璃纤维)
	370°C轴衬及球面轴承	陶瓷型干膜润滑剂
B-58	拉杆稳定装置等11种组合件	干膜润滑剂
B-1	可变翼枢轴轴承	聚四氟乙烯衬垫
协和号	座舱增压系统起落架通风装置	DU复合材料 DU复合材料
C-130	尾翼平衡调整片铰链	干膜润滑剂
F-14	可变翼枢轴轴承	聚四氟乙烯衬垫
F-111	可变翼枢轴轴承 机翼枢轴 铰链销 第二润滑剂	Dynalube 干膜润滑剂 干膜润滑剂 各类固体润滑剂
F-104	襟翼铰链销	干膜润滑剂
DC-8	空气涡轮活动喷嘴	干膜润滑剂
波音-707	操纵系统关节轴承	自润滑衬垫
	自锁螺帽	干膜润滑剂
	自润滑垫片	DU复合材料
	反推装置作动筒及闭锁机构	干膜润滑剂
	尾翼平衡板滑块 检修口盖	干膜润滑剂 干膜润滑剂
三叉戟	起动系统、空调系统各种活门	干膜润滑剂
CH-53A	各种摩擦部件	干膜润滑剂
超黄蜂直升机	桨毂转向铰衬套	DU复合材料
	桨毂止推垫圈	DU复合材料
	自动倾斜器球铰	Teflon
	操纵系统球面轴承	自润滑衬垫
	挠性联轴节	干膜润滑剂

续表3

陆军直升机	减速箱齿轮 抗摩轴承保持器	复合材料 复合材料
M8、M9座舱盖	滑动套管	干膜润滑剂
斯贝发动机	压气机转子叶片及导向叶片	干膜润滑剂
	压气机盘花键	干膜润滑剂
	各种活门、调节器的连杆、轴、摇臂、活塞	干膜润滑剂
	各种螺栓、螺纹	干膜润滑剂
	安装节球面轴承及各种关节轴承	干膜润滑剂
	滚轮、对开衬套	干膜润滑剂
	作动环、衬套、止推垫圈	DU复合材料
	起动机花键	干膜润滑剂
J-85	压气机叶片	干膜润滑剂
海军飞机	发动机压气机叶片	干膜润滑剂

最好在部件上实际测试。北美公司曾提出以500飞行小时作为更换或进行再润滑的最低目标。波音公司认为在紧公差部位,如铰链轴承在规定的使用期限内允许磨损量小于0.05毫米,而摇臂则允许为0.25毫米。

## 2. 摩擦系数

固体润滑剂的摩擦系数比润滑油、脂高,而在实际使用中,磨损寿命比摩擦系数更重要。通常,摩擦系数在0.15以下即可满足要求,在某些高温下工作的部件,0.35也可用。此时的目标是保持机件工作一定的寿命次数而不致引起摩擦面咬合、卡住或产生严重擦伤等。

## 3. 厚度与间隙

固体膜润滑剂的膜厚一般为0.005~0.020毫米,有的要求0.003~0.008毫米。多数人的经验认为上述厚度具有最长的磨损寿命。增加厚度会增加自由间隙,当干膜磨损后会引引起过度振动。

## 4. 底材光洁度

合适的光洁度具有最长的磨损寿命,光洁

度过高,结合力不好,寿命降低。由于配合精度的要求,目前多数采用 $\nabla 7 \sim \nabla 8$ ,有些部位可为 $\nabla 5 \sim \nabla 6$ 。

### 5. 表面处理及防护

表面经过磷化、吹砂等处理,其磨损寿命比不经处理的长得多。湿吹砂比干吹砂又长得多。吹砂后再经磷化,则效果更好。通常用220~320目(400目)氧化铝砂。如果还要求有良好的防护性,则先镀镉,再磷化。铝合金应阳极化并封闭。

### 6. 底材

二硫化钼固体膜的使用寿命随底材性质而异,可相差达20倍。较硬的底材能显著增加抗磨性,摩擦系数也低。软的底材容易弯曲,影响结合力。

### 7. 涂膜的表面

在对偶的两摩擦面上都涂膜要比只涂一面的寿命长。如果只在一个面上涂,则应涂在经常有新鲜表面暴露在压力点下的那个零件,以使磨损分布在最大的面积上,并使摩擦引起的温度降至最小(例如涂在凸轮上而不涂在随动件上)。对磨的零件不要有锐边和毛口,运动中防止边缘加载。

### 8. 跑合

跑合可增加磨损寿命,在慢速下逐渐增加负荷,膜变得更加致密而光滑,摩擦系数下降。磨下的碎屑用干燥空气吹掉,在以后的摩擦中磨下的碎屑就大为减少。

### 9. 油脂的影响

许多实验室工作表明,干膜润滑剂在润滑油中或者表面被油脂污染后,其承载能力和磨损寿命显著下降,把污染的油脂洗去,磨损寿命可以恢复。原因大概是润滑油使固体膜软化、膨胀或者油进入到膜的空隙中去,使结合力减弱,在载荷下被撕离。所以在使用时不应和油脂并用。

在国内,适合作润滑剂用的胶体石墨、胶体二硫化钼及聚四氟乙烯均已生产多年,在飞机上亦有不同程度的应用,但远未形成固体润

滑的产品系列。近年来,为了满足新机种的需要,正在研制聚四氟乙烯自润滑衬垫球面轴承,DU类型的自润滑复合轴承材料亦已完成实验室内的工作,正在向中间生产过渡;应用广泛的干膜润滑剂有多种类型在研制,有的已通过初步鉴定,有的正在产品上试用。今后,国内在这方面的研制和应用必将有新的进展。

### 主要参考文献

- [1] H.Pater Jost, et. al, "Molybdenum Disulfide-Its Use in Manufacture and Maintenance", Aircraft Production, Feb.1960.
- [2] M.E.Campbell, "Solid Lubricants-A Survey", NASA SP-5059(01), 1972.
- [3] Frank J.Williams, "High Temperature Airframe Bearings and Lubricants", L.E., 18, Jan., 1962.
- [4] L.C.Lipp, "Lubrication of Supersonic Aircraft", L.E., 24, April, 1968.
- [5] Marco Petronio, "Military Uses of Film Lubricants" ASLE Proceedings-International Conference on Solid Lubricant, 1971.
- [6] Boes,D.J., "New Solid Lubricants", IEEE Transactions on Aerospace, 2, April, 1964.
- [7] Arthur J.Stock, "Graphite, Molybdenum Disulfide and PTFE-A Comparison", L.E., 19, Aug., 1963.
- [8] Franies J.Clarses, "Solid Lubricants and Self-Lubricating Soli, 1972.
- [9] Dr.F.Wünsch, "Solid Lubricants-Theory and Practice", Engineers, digest, 36, Oct., 1975.
- [10] Lipp,L.C., "Solid Lubricants-Their Advantages and Limitation", L.E. 32, No.11, 1976.
- [11] Karki, K.A, "Solid Film Lubrication in the Aerospace Industry", NLGI Spokesman, April, 1974.
- [12] 波音飞机翻修手册
- [13] 斯贝发动机翻修资料。
- [14] 超黄蜂直升机翻修手册。
- [15] J85发动机翻修手册。
- [16] 中国科学院兰州化学物理研究所,《固体抗磨材料》, 1973。