

日本空间机械润滑研究近况

刘 承 烈

一、概 况

日本近几年来,对空间机械润滑(他们称为宇宙润滑,Space lubrication 或 Space tribology)越来越重视,他们组织了一个空间机械润滑研究会。东京大学宇宙航空研究所每年召开一次报告会,并出版报告汇编。参加研究会的人除了东京大学宇宙航空研究所,科学技术厅的航空宇宙研究所,宇宙开发事业团,工业技术试验院的机械技术研究所的人以外,还有京都大学、大阪大学等有关大学和企业工厂的人。近两年该研究会的报告有:

(一) 关于观测仪器的润滑问题

1. 关于气球实验中的润滑问题。
2. 气球火箭用望远镜的可动部分。
3. 红外线观测装置低温下的可动部分。
4. X线望远镜的可动部分。
5. 航天飞机关系等的润滑。

(二) 实例介绍

1. 液体火箭用的回转泵轴承和密封圈的润滑。

2. ATV 成象系统机械快门的润滑。

(三) 在宇宙空间的润滑

1. 高分子材料。
2. 层状固体润滑剂等。
3. 滚动轴承的润滑。

(四) 人造卫星,观测仪器中的润滑问题

题

1. 宇宙空间观测仪器中的润滑问题。
2. 关于在人造卫星,火箭上使用的轴

承。

(五) 外国的研究动向

关于空间机械润滑的技术水平。

(六) 在宇宙空间使用的润滑剂等的一些特性。

1. 关于硅油润滑剂。
2. 关于二硫化钼。
3. 关于路纶(有填加剂的聚四氟乙烯)的滑动特性。

(七) 在宇宙空间使用的润滑剂的基础研究

1. 各种气体对二硫化钼清净面的摩擦的影响。
2. 二硫化钼溅射膜的润滑特性。
3. 由于摩擦条件引起评价结果的差异。
4. 新复合材料的润滑机理。

二、日本与欧美的差距

他们还常派人到国外考察、研究、学习。例如:一九七八年三月派东京大学宇宙航空研究所工学博士、木村好次教授到美国和英国去考察了解,美国在空间机械润滑方面在世界于领先地位,当然由于缺乏苏联资料不能肯定苏联现状如何。木村好次教授考察英国之后认为欧洲在空间机械润滑的研究规模远远小于美国,而且水平也低,主要是欧洲空间润滑研究室(European Space Tribology Laboratory, ESTL)进行研究。这个研究机构由英国的国立润滑中心(National center of tribology)经营。根据他的考察结果认为,美国空间机械润滑

研究的问题,大致是40%得到解决,即关于宇宙空间用的润滑剂,如果根据宇宙空间工业用润滑手册(Labrication Handbook for the Space Industry)适当选择的话,大体上是可以的,但是在应用方面其技术还不一定十分成熟。当然这个手册也是根据学会报告、产品目录、MRI编写的。总之,美国是靠巨大的投资研究开发很多宇宙空间用的润滑剂和润滑方法,其中很多现在已经可以购买到手,欧洲现在是靠自己的力量一点一点地开发研究,而且欧洲还提出了一个口号“闯出美国技术框框”(Try to get away from U.S. technology)作为政策来推行。现在欧洲空间润滑研究室的研究课题,在美国已经得到解决,只要给有关单位打个电话就可以买到手的程度,所以说从学术上是几乎没有意义。尽管如此,在欧洲仍然根据那个政策,还在进行那些研究试验。所以欧洲这个政策是值得考虑的。

木村教授认为日本空间机械润滑的水平是和欧洲差不多,不过研究的方针政策还不明朗,虽然也想在美国的开发成果的基础上闯出一条路。

三、日本各卫星仪器上的润滑问题

宇宙开发事业团的牧野铁治一九七八年的报告指出,自旋稳定型的人造卫星以10~100转/分回转,为此,为了使准毫米波,毫米波的天线和可见红外辐射计(VISSR)等指向地球,必须以与卫星的自旋相同的转数反方向回转;三轴姿控的卫星上的太阳能电池帆板是以折叠状态发射出去,进入轨道后再展开;在姿态控制中有星载的飞轮。这些天线机械展开机构、可见红外辐射计、飞轮等的回转部分通常都使用滚珠轴承,要想在宇宙空间经过三至五年仍然保持它的性能,这对润滑来说是个大问题。在日本的

“向日葵号”静止气象卫星,“梅花号”实验中容量静止通信卫星,“百合花”号实验中大型广播卫星等都有这些问题。

1. 飞轮

这是三轴姿控的基本执行原件,要求在 $-35^{\circ}\text{C}\sim 77^{\circ}\text{C}$ 的温度范围工作。回转数在3,000~28,000转/分之间,使用滚珠轴承,虽然现在日本航空宇宙研究所也在研究该轴承的润滑和研制磁悬浮轴承,但尚没过关,还不能装在卫星上使用。

2. 可见红外辐射计

由于人造卫星表面的温度变化很大,所以要尽量把驱动马达和轴承部分装在卫星内部。这些是使用滚珠轴承,并且采用密闭型,在研究用固体润滑和溅射 MoS_2 膜的润滑。

3. 机械展开天线

实验中容量静止通信卫星“梅花”,技术试验卫星II型“菊花”2号的天线必须经常指向地球,为此要使它回转,所以要用滚珠轴承。

4. 各种传感器

太阳角计是为了捕获太阳,地平仪是为了捕获地球而来对人造卫星进行姿态控制,而使用驱动马达的转数为100转/分,转动部分使用滚珠轴承。

5. 磁带机

电离层观测卫星“梅花2号”等载有磁带机,人造卫星收到的数据用它记忆储存,等到达跟踪控制站的可见范围内时,把磁带机的数据再发送给地面。这里边是有轴承的。

6. 太阳能电池帆板

实验中大型广播卫星“百合花”是把太阳能电池帆板折叠起来发射的,到达所预定的轨道时则把帆板展开,所以帆板的部分和滑动部分必须按设计要求动作,因此要润滑。

7. 伸展天线

技术试验卫星1型“菊花”,电离层观测

卫星“梅花”“梅花2号”都装有观测仪器用的天线，这个天线也是在折叠状态发射出去，等进入轨道后以马达驱动，展开20米之长。天线的材料是铍铜，展开前像钢卷尺那样卷着，随即伸展成管状。如果展开方法和润滑不适当则不能按预定伸展。上述空间机械仪器的可靠性与润滑的问题主要有列各点：

1. 轴承的型号选择是否合适。
2. 部分加热影响与轴承变形。
3. 润滑方法与润滑油是否适合。
4. 轴承温度上升和机械设计时考虑热的影响。
5. 润滑油的消费率，轴承的磨损率和寿命。
6. 发生气体不纯物的影响。
7. 其他（适用法与过去的故障的关联等）轴承越靠近卫星表面受到温度的影响越大。今后卫星应用面越广泛则为达到各种测试目的的仪器的润滑问题也必然越来越多。

四、高真空下滚动轴承的润滑研究

航空宇宙研究所宫川行雄工学博士在研究超高真空下的滚动轴承润滑的报告中指出：在真空下工作的滚珠轴承的润滑剂要求剪切强度小、摩擦系数低、耐磨性好，在真空中的蒸发减量要小。最近虽然研制出来蒸汽压非常低的润滑油和润滑脂，然而真空中的蒸发减量即使在人造卫星的寿命允许范围内，但蒸发的油附着在周围的表面上造成祸害也是个问题。例如：红外地平仪的透镜表面一旦附着油则妨碍红外线的作用。油和脂污染其周围是最大缺点，但因流动性好，所以补充润滑的作用最好。为了防止油的蒸发，在滚动轴承润滑中有采用油封垫的轴承和使用真空浸油的多孔酚基树脂的保持架。如果是用润滑脂时，要使用与润滑脂的基油相同的油来浸到保持架里。由于油蒸发造成

无油状态时，则发生轴承的烧伤。不过也有在宇宙空间环境类似的条件下，R-3滚珠轴承以8,000转/分回转达到20,000小时以上的实例。

滚珠轴承可用玻璃纤维、碳纤维或陶瓷作为填充剂来加强的聚四氟乙烯保持架。随着轴承的回转，聚四氟乙烯从保持架向滚动体转移，然后从滚动体转移到内外环的轨道面上，在摩擦面上整个形成薄的润滑膜，而进行润滑。但它适于低温下的润滑，因为温度高，它的摩擦磨损都要增大，因此它适用于液氢等极低温下的轴承润滑。钢球和内外环用离子喷镀一层厚度为4000 Å的金，无保持架滚珠轴承以2,000转/分回转，推力载荷为1 kg时，只试验20小时，摩擦就急剧增加，轴承就不能很好圆滑回转，这是因为内外环都有金属膜时金容易从钢球向内外环转移，在内外环形成局部厚的金转移膜。从而只对钢球镀金，内外环不镀金，按原来的状态装在一起比较好，银和铅也是同样情况。金在真空下润滑，结果分散度大，可靠性差。其理由是钢球上的金在短时间内转移到内外环上，以后是以转移到内外环上的金属膜来润滑的缘故。金在空气中和在真空中润滑的结果都是分散度很大。

在空气中用银润滑的某滚动轴承的寿命仅2到3小时，但是在真空中却在1,000小时以上。而且用银润滑的分散度很小，有再现性。用金润滑，在3,000转/分的回转下，到8小时时，摩擦力矩急剧增加，终于不能回转。与此相对比，用银润滑时，在3,000转/分下没有发生异常情况，仍可照样回转。用银润滑比用金润滑摩擦力矩小，而且轴承温度也非常低。并且波动也较少。由于用银润滑时，银不从钢球向内外环转移，银在钢球上能够保持很长时间，所以银在真空中的润滑性比在空气中的润滑性要好。

用铅润滑也和银一样，在真空中比在空气中的润滑性好。但因为铅软，有摩擦力矩大和轴承温度高的缺点。用二硫化钼作为

滚动轴承的润滑时，把二硫化钼镀到轴承部件的方法以溅射法为宜，溅射法中的基极温度较高时，二硫化钼膜的润滑性变坏，因此，采用水冷溅射和两面溅射。水冷溅射时可能形成附着强度大的厚膜，所以适用于内外环和保持架的溅射。两面溅射由于上下有靶极，在靶极中间放基极来溅射，不能用水冷，所以膜的附着强度比水冷溅射要差，但周围回旋余地多，所以适于钢球的溅射。最近用 $52.9\% \text{WS}_2 + 11.76\% \text{Co} + 35.3\% \text{Ag}$ 复合材料保持架的内径为20毫米的球轴承试验时，以1,790转/分回转运行了60,000小时，因此，今后这个方法可能成为主要方法。内外环以水冷溅射，二硫化钼的膜厚为1微米，钢球以两面溅射的膜厚为0.5微米，虽然用化学反应形成的二硫化钼膜能够厚，但二硫化钼与金属面的吸附强度非常小，容易脱落。与此相比，溅射膜虽然薄，但吸附强度大。用在滚动轴承时并不需要太厚的膜，所以溅射的膜比较适合。用二硫化钼润滑时，载荷即使大，回转数即使高，摩擦力矩和轴承温度也很低。最近有报告报导，为了提高溅射膜的性能，并不开始就溅射二硫化钼，而是在溅射0.1微米厚 Cr_3S_2 后再溅射0.6微米 MoS_2 膜时，轴承的寿命大大增加。二硫化钼比起铅、金、银来说最适用于滚动轴承。特别是有保持架时寿命相当长。宫川行雄认为是在所实验的范围内二硫化钼性能最好的。但它在空气和氮中的性能并不好，轴承寿命很短。因为在空气中容易氧化，脱落下来的磨粒细粉不能再吸附上的缘故。总之可以说在真空中性能好的固体润滑剂，在空气中非常不好，所以使用时要十分注意。

宫川行雄也指出为了进一步提高轴承寿命，可以考虑使用复合材料作为保持架材料如：成份为 $52.9\% \text{WS}_2 + 11.76\% \text{Co}$ 的“AFSL—14”或成份为 $80\% \text{MoS}_2 + 20\% \text{Ta}$ 的“AFSL—15”等。有可能达到6~7年的寿命。所以说要更长寿命时复合材料比较合

适。

五、真空润滑复合材料及润滑剂的研究方面

航空宇宙研究所宫川行雄对液体火箭用回转泵的润滑法进行了研究。这付回转泵的轴承和密封圈要在液氧、液氢中工作，由于液氧和液氢的粘度，大致和空气粘度相等，所以不能指望它有流体润滑的效果。一般轴承在液氧中使用时，很短时间内即发生烧损。尤其是液氢要使保护表面的氧化膜还原，因此容易生成新生清净表面，这样条件更是不利。

作为这个轴承的润滑法不能使用润滑油和润滑脂，由于液氧、液氢没有润滑性，所以要用自润滑材料的保持架，现在主要用聚四氟乙烯。聚四氟乙烯摩擦系数低，热传导率小，所以在高速时，由于摩擦热引起热分解使摩擦磨损增大。不过用于极低温时非常有利。然而聚四氟乙烯的单体强度不够，所以增加15%玻璃纤维加强。为了使热传导率好，则采用添加30%的青铜粉末代替玻璃纤维。

机械技术研究所田中章浩和东京大学宇宙航空研究所木村好次教授研制了“极光”号科学卫星用的马达电刷材料 Ag 、 Ni 、 MoS_2 的复合材料。研制此材料主要从耐磨性观点进行了评价。对用圆柱环式试验机在真空中不通电和用实际电刷在马达上通电进行了试验比较，发现其磨损量是不同的，以比磨损量来比较时，实际电刷通电要大一个数量级。虽然载荷和速度等不同也对磨损有影响，但通电与否的影响相当大。过去对真空中用的电刷材料研制的也不少，但关于通电对磨损的影响的试验很少，所以情况是不十分清楚的。他们用纯金属实验分析了载荷、速度、真空压力等因素中哪一个对磨损粉末的大小和数量起主导作用，以使磨损粉末的大小和数量分别受到摩擦面作用力的大小和

材料强度的影响。对“极光号”科学卫星的马达电刷用的 $33.3\text{Ag}-16.7\text{Ni}-50\text{MoS}_2$ 复合材料的磨损受通电的影响进行了试验分析, 结果认为随着电流的增加, 磨损量也显著增加, 摩擦面变粗糙。摩擦系数虽然随着电流增加稍有增加, 摩擦力也随着电流增加而增大。如此在接触点上作用的载荷、摩擦力都增大, 在摩擦面下造成流动层变厚, 从其一部分脱落的磨损粉末变大, 对摩擦面的粗糙度发生影响。上述过程反复进行后达到在各实验条件的恒定状态。如此磨损粉末变大后, 虽然量很小, 但由于增加磨损粉末的数量而磨损量增大。这和纯金属的实验是同样结果。

东京大学宇宙航空研究所田中章浩、木村好次和东京大学理学部金田菜祐对“极光号”卫星摄影装置(ATV)的机械快门的润滑进行了研究。估计“极光”号卫星在观测中, 快门可能要求6,000回左右。快门系统要润滑的部分有快门的轴承部分, 减速机的轴承及齿轮, 使马达的回转产生逆转的微动开关。

1. 开关轴与轴承之间作用力很小, 速度也在1毫米/秒以下, 所以润滑并不特别难, 但要避免相同金属摩擦, 轴用铝材其表面作氧化处理, 轴承用聚铈亚胺(メルデイン5518)制成的轴承。

2. 蜗轮

由于作用在齿轮面上的力和周速很小, 所以从润滑来看只要避开同种金属即可, 他们采用了钢制蜗杆和黄铜制的蜗轮。并且蜗轮镀上黑镍。

3. 开关驱动马达的轴承

此马达轴承虽然可用含油烧结轴承但由于在真空中油蒸发可能污染观测仪器, 所以改用在真空中使用的小型滚珠轴承, 其保持架材料是用路纶C(有充填剂的聚四氟乙烯), 但为了运行初期磨合好则在滚动面上涂上 MoS_2 。

4. 开关驱动用马达电刷

电刷和整流子之间的作用力是20克以下, 但滑动速度是2.2米/秒, 比较大, 尤其在摩擦面上通过电流, 所以从润滑角度来看, 电刷部分是比较难的。一向是用由Ag和石墨构成的电刷和Cu—Ag合金制的整流子, 但石墨在真空中比在空气中耐磨性差, 所以改用在真空中耐磨性好的 MoS_2 和Ag制成的烧结材料的电刷。

5. 减速箱的轴承

这个部分载荷、速度都小, 仍用钢轴, 为了避开同类金属的摩擦, 轴承改用聚铈亚胺(メルデイン5518)制品, 而不用无润滑的黄铜制的滑动轴承。

6. 减速箱的齿轮

在齿面上所加的力很小, 最大周速为1.4米/秒, 润滑问题不大, 只是对惯用的钢制平齿轮的齿面施以软氮化处理。并且把 MoS_2 浸进分散成树脂溶液之后进行热处理, 使其构成润滑薄膜。

航空宇宙研究所西村允等对化学反应形成的二硫化钼的润滑特性进行了深入的研究, 他把用于反应炉中置换空气的氩添加水分时, 可以使化学反应形成的二硫化钼膜厚为3—4微米的薄膜的磨损寿命延长, 炉中残存的少量的氧对延长薄膜寿命和提高可靠性, 是起好的作用。确定了不锈钢SUS304和440C上的最适合薄膜生成条件。薄膜在1.5米/秒的滑动速度时, 不论在空气中或氮气中都是摩擦低和寿命长, 但在真空中则不同, 如果把薄膜在真空中加热到400℃时, 摩擦系数则降下来。在0.1米/秒的滑动速度时, 未经处理的薄膜, 在实验的所有气体中都摩擦比较大, 磨损速度大。薄膜用X线衍射检查结果认为是非晶性, 然而在真空中或在空气中加热处理过的薄膜是呈现接近 MoS_2 的衍射峰值。经过电子探针分析仪检查结果, 最适合反应条件下的薄膜的组成是 $\text{MoS}_{2.8-3.0}$ 。这是由于在 10^{-7} 托, 400℃的条件下加热1小时后, 硫损失掉则成为 $\text{MoS}_{2.4}$, 从此结果可得出薄膜的主成分是 MoS_3 的结

论。这样考虑时可以很好说明上述的摩擦特性。如此，这个薄膜在氮气中是寿命很长的，因此可以认为它适于在氮或惰性气体中使用。再有在真空中可以用于高速、轻载荷下的情况，现在还不能指望它用于低摩擦速度或高载荷下工作。其原因是由于薄膜的主成分 MoS_3 的结构不稳定，所以选择适当的热处理条件，使 MoS_3 转换成 MoS_2 之后，薄膜的耐磨性可以得到改善。在大气中只能温度很低的条件下使用。

六、真空润滑油的研究方面

航空宇宙研究所西村允关于环境条件对边界润滑的影响进行了研究。由于近年宇宙开发进展很快，在真空中工作的机械润滑成了问题，需要很好解决。首先是矿物系润滑油在没有氧的情况下要大大丧失能力。为此，要使用不受环境约束的合成润滑油，来作为真空润滑油，或者要使用添加些在没有氧的环境中也能工作的添加剂的矿物油。第二是润滑油在真空中的蒸发问题，要考虑密封。第三是在真空中没有对流传热带走热量润滑油温度上升，要促进蒸发，并热分解，容易发生不能润滑的情况。作为真空用润滑要求稳定性好，同时也要避开在摩擦条件恶劣的地方用润滑油来润滑。如果注意到上述各点来选择润滑油和添加剂，以及轴承设计的话，在真空中用润滑油是完全可能的。

现在作为真空用润滑油已开始用硅系合成润滑油特别是氟化硅油。氟化硅油在真空中实际使用时表示了良好性能。但它在高真空中和高载荷下的性能并不清楚。再有价格昂贵，大量使用时有经济性问题。所以他研究了环境条件对矿物油系润滑油，硅系润滑油，油性剂及极压剂的性能影响，对下列各点作了实验：

1. 用矿物系润滑油及 0.1% 硬质酸添加油润滑时，环境条件对铁及铜试样的摩擦磨损影响。

2. 用二甲基硅油润滑时环境条件对铁试样的摩擦磨损的影响。

3. 用矿物系润滑油，二甲基硅油及 0.1% 硬质酸添加剂油润滑时环境条件对其承载能力的影响。

4. 0.1% 硬质酸添加油润滑下的试样面上的水份吸附层对摩擦磨损的影响。

5. 环境条件对各种极压添加剂的承载能力的影响。

6. 环境条件对硅系合成润滑油的承载能力的影响。

他的结论是：

1. 在 90 号透平油，0.1% 硬质酸添加油润滑下的纯铁相互之间在真空中的摩擦磨损都是最小，在高真空时由于油中的氧和水分的浓度降低，它们的润滑能力都在丧失。

2. 以纯铜相互摩擦，用 90 号透平油润滑时，在大气压下的干燥空气中摩擦磨损最小，随着环境压力降低而增大，失去润滑作用，但 0.1% 硬质酸添加油在高真空中摩擦磨损小，在氧、水分的浓度低时也形成有效的吸附膜。

3. 用二甲基硅油润滑下的纯铁互相间的摩擦磨损和用 90 号透平油，0.1% 硬质酸添加油润滑的情况相反，在大气压下的干燥空气中最大，随着压力降低而减少。

4. 在轴承钢上润滑油的耐载荷性能实验表明 90 号透平油的油膜的临界载荷在大气压下的干燥空气中是 120 公斤（赫兹压力为 474 公斤/毫米²），在 10^{-5} 托时降到 15 公斤（赫兹压力 263 公斤/毫米²）。

5. 硬质酸向铜试样的吸附强度，受到表面上存在的水份吸附层的影响很大。如没有水份吸附层在表面上即使有氧和水分时吸附强度也下降。

6. 所试验的所有极压添加剂在 1×10^{-5} 托中的耐载荷性能，在速度为 0.02 米/秒时比空气中要下降。

其中有机金属系极压添加剂的下降量少，特别是二丙烯亚磷酸锌的抗载荷能力的

下降是最少。

7. 除有机金属系极压添加剂以外，磷酸三甲酚脂在真空中也有较高的抗载荷性能，其数值比二丙烯亚磷酸锌还要低得多。

8. 氟化硅油的抗载荷能力并不受氧的影响，在真空中也高，但比二丙烯亚磷酸锌添加剂油的还要低。

9. 二丙烯亚磷酸锌对于铁系材料来说

在 10^{-6} 吨， 130°C 时仍有良好的边界润滑性能，但在 150°C 时发生固化，丧失润滑性。

10. 氟化硅油对铁系材料的润滑性能根据其材料的硬度不同而不同。即高硬度材料在 10^{-6} 吨， 150°C 的情况下也表示低摩擦磨损，而硬度低的材料在 40°C 时就发生金属接触，没有润滑能力。