

对提高空间机械用滚动轴承 寿命研究的展望

刘 承 烈

(长春光机所)

摘要 本文首先谈到空间机械用滚动轴承寿命的重要性的如何确定轴承寿命。本文对国内外近年研究发展情况进行了综述,在文中第一部分叙述了滚动轴承寿命与轴承材料的关系,例举了研究减少钢中含氧量和夹杂物来提高滚动轴承寿命以及白色组织、蝶状组织和寿命的关系的研究成果等。在第二部分对滚动疲劳剥落的机理和表面质量影响滚动轴承寿命的研究成果进行了阐述。其中指出表面层是负残余应力时有助于提高滚动轴承疲劳寿命已成定论。在第三部分叙述了滚动轴承寿命与润滑的关系,特别是强调了表面润湿性的重要性,列举了由于采取磷酸三甲酚脂等表面处理改善表面润湿性,采用溅射二硫化钼和碳化钛涂层等办法提高了轴承寿命的研究成果。最后提出了在提高空间机械用滚动轴承寿命的研究方向上的见解。

滚动轴承寿命是一个很重要的问题。轴承寿命往往决定一个机器的寿命,尤其在空间的飞行器、人造卫星上用的轴承一旦失效,由于不能更换,往往导致整个卫星失效。实际上卫星的寿命往往取决于轴承的寿命。在火箭或一般发动机上也往往由于轴承失效而造成失败引起很大伤亡事故。在所有的机器上都希望轴承寿命长,能长时间可靠运行。在空间机械上更希望如此。空间机械多用滚动轴承。因此,研究提高空间机械用滚动轴承寿命是一个长远性的有实际意义和学术意义的研究课题。在美国,欧洲,日本的有关空间研究部门中都有专门研究空间机械的轴承及润滑方面的研究室。例如:美国宇航局(NASA)的路易斯研究中心(Lewis Reserch Center简称LRC);欧洲空间摩擦学研究室(European Space Tribology Laboratory简称ESTL);日本科学技术厅的航空宇宙研究所润滑研究室;日本东京大学宇宙航空研究所润滑研究室等。他们都不断有新的研究发展。现在就近几年国内外在提高空间机械用滚动轴承寿命研究方面的研究发展情况进行综述并提出对今后研究提高空间机械用滚动轴承寿命的意见。

一般认为滚动轴承的寿命是指滚动轴承发生滚动疲劳剥落的运行总转数或总时间而言,但也并非完全都如此来确定寿命。如何确定一个轴承的寿命,要看其主机性能的要求来定。当然,一般工业机器上用的滚动轴承寿命是可以按发生滚动疲劳剥落的时间来决定,可以按其负载和转速来计算出滚动轴承的额定寿命。但也有些机器、仪器上的轴承由于要求的性能指标不尽相同,则不能一律按此计算来确定轴承寿命。有些仪器上的轴承是要求摩擦力矩不能大于某一数字;有的用振动,噪音和精度等技术指标衡量轴承是否失效来确定轴承寿命。这样的轴承寿命不是能简单计算来确定,往往是要经过长时间大量的实际运行实验来决定的。所以在提高轴承寿命方面的对策是要针对主机不同要求采取不同措施。空间机械用的滚动轴承要在真空环境或高低温条件下和失重状态下工作,更是要根据其所以使用的环境条件和

主机性能要求来具体分析确定寿命和采取提高寿命的措施。

(一)

滚动轴承寿命与其轴承材料的性能关系很密切。因此采用优质性能好的钢材是提高滚动轴承寿命的首要的问题。虽然多年来各国很多都采用定型的轴承钢作为轴承材料,但也因用途要求不同,有一部分在采用不锈钢和高速钢等钢材。近年也发展了粉末冶金和硬质合金以及陶瓷或金属陶瓷等材料来制造高温或特殊用途方面的轴承。

对于轴承钢近年主要是针对提高其滚动疲劳剥落寿命在进行研究。剥落也有两种情况。一种是由表面发生的,另一种是由表面层下面发生的,也就是成为剥落起点的微裂纹是发生在接触表面下的剪应力最大之处。在材料方面影响滚动疲劳剥落寿命的因素很多。上述两种剥落情况是不同因素引起的结果。从表面剥落的往往是由于外在因素如润滑油不洁净或加工上的损伤等引起。从表面层下发生微裂纹引起表面层剥落一般是因材料本身内在因素所致。材料中的夹杂物及缺陷影响寿命很显著。一般在炼钢过程中因原材料中的杂质和脱氧剂或铁与溶钢中、空气中的氧等相结合,作为氧化物和其他化合物在钢中残存下来,或者因为炉衬的耐火材料的破片和渣渣混入钢水之中。在钢水冷却后这些作为非金属夹杂物或缺陷残存在钢材中。这样的钢材当受力时,在夹杂物和气孔附近产生了应力集中,在该处发生微裂纹的情况较多。虽然从有些研究结果⁽¹⁾⁽²⁾⁽³⁾知道了夹杂物影响滚动疲劳剥落的情况,但至今对滚动疲劳剥落和非金属夹杂物之间的关系作定量的研究还没有。非金属夹杂物之中氧化物之类(Al_2O_3 、 SiO_2 等)的硬度高,受力时基体的金属即使产生变形,它也很难变形,所以与基体之间形成空隙,成为应力集中根源,则影响滚动疲劳剥落。硫化物由于硬度低容易产生变形,则不易与基体金属之间构成空隙。所以对滚动疲劳剥落影响小些。气体之中的氢成为脆性破坏的原因,氧与其氧化物夹杂的多少有直接关系。因此,尽量去除钢中的不纯物和气体以求延缓滚动疲劳剥落,提高滚动轴承寿命。为此,采用了真空去除气体的轴承钢和真空熔炼的轴承钢来提高滚动轴承寿命。高田浩年⁽⁴⁾曾用三滚轮滚动疲劳试验机研究了真空脱氧钢的滚动疲劳寿命,结果表明经脱氧后的寿命普遍提高,后来日本精工(NSK)都用脱氧钢。真空熔炼轴承钢比真空脱氧钢更能大大减少夹杂物,所以滚动疲劳寿命提高得更显著。如果再多次进行真空熔炼,还可以进一步提高滚动疲劳寿命,但其提高程度并不与再熔炼次数按比例提高很大。虽然真空熔炼一次的价格也要比真空脱氧钢贵三倍以上,但要求可靠性高的空间机械方面用的轴承钢都是在采用它。实践表明降低含氧量对轴承钢和渗碳钢都能延长轴承寿命,并且渗碳钢的寿命增长率比较高。渗碳钢在滚动疲劳中产生的裂纹发展速度比轴承钢要慢,并且具有不易破坏的特点。各国主要在采用Ni—Cr—Mo钢为滚动轴承渗碳钢⁽⁵⁾。美国Timken公司对电子束熔炼的渗碳钢SAE4620钢的滚动轴承寿命进行试验结果,得到了和真空熔炼钢相同程度的寿命⁽⁶⁾。日本精工(NSK)公司尽量使渗碳钢降低含氧量,现在已研制成功了含氧量小于百分之二十的低含氧量渗碳钢,从而提高了滚动疲劳寿命⁽⁷⁾。D. Scott⁽⁸⁾认为除了氧之外氮也是对滚动疲劳寿命有重要影响的因素,他做出一些试验结果,但尚无结论。

J. A. Martin⁽⁹⁾在滚动疲劳时发生的组织变化方面看到在接触应力大的部分出现与夹杂物无关的白色组织。在白色组织和基体的边界处有透镜状的碳化物,但在白色组织之中并没有看到碳化物。这个白色组织随着反复应力次数增加而增加。并且破裂是沿着基体和白色

组织的边界处发生，所以这个边界处容易发生破坏。如果试片腐蚀严重则很难分出白色组织和基体。古村等⁽¹⁰⁾关于在夹杂物周围由于滚动疲劳产生的一种蝶状组织对夹杂物和寿命的关系进行了研究，结果得知蝶状组织是在夹杂物为氧化铝时出现，夹杂物越大，蝶状组织也越大。硫化物之类的夹杂物是包络着氧化铝的形态时则不产生蝶状组织。他们的结论是：作为提高材料的滚动疲劳寿命的方向应该是减少钢中的含氧量，减少氧化铝的含量，并且使氧化铝等夹杂物微细化才好。他们实际上使含氧量降低到百万分之二十以下时，将现有的轴承钢及渗碳钢的寿命延长了三倍。不过在实际应用中看到很多情况下，从表面发生的疲劳剥落比表面层下内部发生的滚动疲劳剥落更为重要。他们通过实践认为在实际应用中提高滚动轴承的寿命，最重要的是要学会怎样控制表面疲劳剥落的产生。

我国哈尔滨工大，哈尔滨轴承厂共同研究了碳化物细化对GCr15钢的性能影响⁽¹¹⁾。他们认为对于碳化物平均粒度要求在0.5微米的水平时可选用高温回火，等温退火工艺，对于粒度在0.4微米以下时，则以低温二次淬火—高温回火为宜。如此不仅有利于防止高碳马氏体微裂纹的产生，并且得到碳化物细匀，切削性能良好的预备组织。欲达到相同的淬火硬度（与马氏体含碳量）经碳化物细化处理的GCr15钢的淬火温度比常规压低10~20℃。因为细匀而弥散分布的碳化物具有较快的固溶速度，所以使其基体浓度差与组织均匀性得到明显改善。具有不同碳化物粒度的原始组织，通过淬火工艺的调整，在控制淬火硬度与马氏体含碳量基本相同条件下，碳化物细化及其对GCr15钢组织均匀性的改善，使各项性能均有不同程度的提高，其中对滚动疲劳性能的作用尤为显著。

我们研究所也对GCr15轴承钢中碳化物的细化处理进行了两种方法的研究，对经过了 $1045^{\circ} \pm 5^{\circ}\text{C}$ 保温30分钟迅速冷却到 $420^{\circ} \sim 430^{\circ}\text{C}$ 保温1小时后空冷，之后进行一般的淬回火和 $1045^{\circ} \pm 5^{\circ}\text{C}$ 保温30分钟迅速冷却到 $640^{\circ} \sim 650^{\circ}\text{C}$ 保温30分钟后空冷之后进行一般的淬回火的两种方法处理后的金相组织与常规处理后的金相组织等进行了一些探讨⁽¹²⁾。

世界最大的轴承制商SKF公司经理T.W. Morrison⁽¹³⁾在一九六九年预测下一代具有更高可靠性的轴承材料有电子束熔炼钢、烧结钢、还有高硅渗碳钢的高温材料和奥氏体，镍合金的耐腐蚀材料的轴承用钢。一九七六年该公司中央研究所的T.E. Tallian⁽¹⁴⁾也又提出预测认为下一代的轴承钢应着眼于能够压成型接近最后轴承形状的材料，减少大量的切削加工，成本很低的粉末冶金和烧结锻造钢材，并且应实现在烧结后施以高温塑性加工使其高密度化，增加滚动疲劳寿命。

关于从苏联先发展起来的电渣溶炼钢（ESR钢）日本也看到它比真空溶炼钢的价格稍便宜所以也在注意采用它作为优质钢⁽¹⁵⁾。并且认为电渣熔炼的ESR轴承钢和真空熔炼轴承钢和真空熔炼轴承钢的钢锭相比没有部位上不同的差别，碳化物分布也均匀⁽¹⁶⁾。

陶瓷轴承最初是用 Al_2O_3 或 Zr_2O_3 等氧化物，但最近判明氮化物者更好，特别是 Si_3N_4 ，用高温静水压烧结过的结果最好⁽¹⁷⁾。它的滚动疲劳寿命要比氧化铝或碳化硅者好得多，比高速钢M50也寿命长。

(二)

滚动轴承的寿命常常是根据发生滚动疲劳剥落的数据来计算。因此搞清滚动疲劳剥落的机理，才能有计算的依据。关于滚动疲劳剥落的机理至今有静的最大剪应力学说，动的最大剪应力学说，切线力的影响学说，也有表面微裂纹学说，油膜撕裂学说，热应力学说，表面

屈曲学说等。现在比较多的人一般同意并运用动的最大剪应力学说。这个学说主要是着眼于表面下动的剪应力,认为与滚动方向平行的剪应力的最大振幅的反复是导致材料的滚动疲劳微裂纹的产生而发生剥落。如此,滚动疲劳剥落与表面的应力状态有密切关系。

滚动轴承经过淬火回火后要存在残余应力,并且又要经过磨削,研磨,超级加工等加工也要产生表面残余应力。如果最大剪应力部位的残余应力是压应力(负的)时,最大剪应力因为有所减小,所以对表面下发生微裂纹的滚动疲劳剥落是有抑制作用。由于热处理或精加工使表面层形成压应力时,则能提高轴承寿命。但实验结果表明压应力过大并不比一定程度的压应力时的寿命长。压应力在20~30公斤/毫米²时寿命最大^[18]。不过有的实验结果表示超过这个数值,寿命仍继续增加^[19]。D. P. Koistinen^[20]根据压应力的效果,对轴承轨道面进行氮化使表面下马氏体变态点下降,造成表面下形成负残余应力区域来延长轴承寿命。也有添加其他元素使表面产生负残余应力的方法。

一般认为滚动轴承的接触面的硬度越高,轴承寿命越长,但这只能说由于改变回火温度来改变硬度时是这样情况。如果由于改变材料中的含炭量来改变硬度时,硬度虽然高,但寿命不一定长^[21]。因此,硬度只能看作是一种现象量。E. V. Zaretsky^[22]研究表明滚动接触的两个面的最初的硬度的差是与寿命有一定关系。应力重复次数多的一侧的表面硬度小 $RC1\sim 2^\circ$ 时寿命最长。这是因为较软的一方的表面由于滚动产生加工硬化,在最大剪应力位置附近形成负残余应力,从而提高滚动疲劳寿命。当然,上述的关系是一般滚珠轴承的硬度在 $RC58\sim 64^\circ$ 之范围内成立的。如果硬度低于这个范围,寿命是下降的。

上述滚动疲劳的理论都是按干接触时的表面下应力分布情况来考虑的,并没考虑润滑的影响。在滚动接触部分形成的弹性流体润滑膜对表面下应力分布的影响方面的试验研究描绘出动的弹性流体润滑油膜改变干接触时静的接触应力分布图形的情况^[23]。标志油膜厚度的油膜参数 $\lambda = \frac{h}{\sigma}$ (h: 油膜厚度; σ : 表面光洁度)为零时,是干接触,油膜参数接近无限大时,则接近两刚体圆柱的完全流体力学解的压力分布状态。随着这个油膜参数值变大,压力峰值也越高,其位置要向滚动接触入口处移动。非常高速时,常数值很大,压力峰值要减小,最大垂直压力比最大接触压力要小。油的粘度指数大时压力峰值和压力分布的那个常数增大具有同样效果。温度对压力分布峰值的影响不大^[24]。由于润滑油的粘度效果的关系,这个峰值也减少很多。如此,高速时局部的压力峰值是比较大,但关于应力集中对滚动疲劳所给予的实际影响还与实际的滚动疲劳剥落的经验不一致。如前所述,由于有峰值减少的倾向,所以可能应力集中得到缓和。

(三)

滚动轴承的寿命与润滑有密切关系。尤其对于要求摩擦力矩低的轴承来说,润滑成为轴承寿命的决定性因素。即使是滚动疲劳剥落的寿命也是与润滑状态有密切关系。润滑油的粘度与轴承寿命之间有一定的关系,用压粘系数大的油润滑时,轴承的寿命就长。表面光洁度差也缩短滚动疲劳寿命。由于应用了弹性流体润滑的理论,对这些问题更进一步明确了。润滑的基本作用是排除发生的热和靠形成油膜来分开两个接触面。这样可减少接触压力峰值和切线力,来缓和局部的应力集中和冲击载荷来防止接触表面和表面下的损坏。相反,如果润滑油膜难以形成时,金属互相发生接触,由于表面损伤或切线力和接触压力增大,则导致疲劳寿命缩短。因此,形成的最小油膜厚度对接触表面的表面光洁度的比值大小可看作是润滑

状态好否即决定油膜形成的程度的重要参量。*P. H. Dowson*首先提出弹性流体润滑时油膜形成的程度和滚动疲劳寿命之间的关系。*T. E. Tallian*⁽²⁵⁾通过实验得到了油膜参数和轴承的滚动疲劳寿命的关系。*T. C. Skurka*⁽²⁶⁾用25种约700个轴承在各种载荷条件下进行了寿命试验,结果得出了油膜参数的关系。油膜参数小于2时,轴承寿命要缩短,3.5以上时,充分形成油膜,寿命可稳定地延长。如此,油膜参数与轴承寿命密切相关。如果能知道实际用的轴承的油膜参数值是很有意义的。关于这一点*T. A. Harris*⁽²⁷⁾提出了一个查图表的简便方法。*J. I. McCool*⁽²⁸⁾针对润滑状态不同,提出了加上一个大于或小于1的系数的新的轴承寿命计算公式。*F. G. Rounds*⁽²⁹⁾针对各种钢材,各种添加剂的润滑油做了25种试验结果得知基油粘度大的轴承寿命长是一般规律,但情况是各种各样的,有的钢材的轴承寿命受粘度影响很大,有的钢材的轴承寿命则几乎没有影响。添加剂对轴承寿命的影响比基油粘度变化的影响大得多。添加剂的效果取决于添加剂和材料的匹配。由于匹配不同,轴承寿命可差四、五倍之多。

对于提高滚动轴承寿命来说,滚道表面的润湿性是很重要的因素。对于要求保持润滑性能好的轴承,润湿性应作为最终检验项目之一。为了改善轴承表面的润湿性,美国麻省理工学院仪表研究室研究指出,把滚珠轴承的金属零件放在磷酸三甲酚脂中进行处理后,可使滚珠轴承寿命增加很多,而且摩擦可减半⁽³⁰⁾。他们采用*Teresso V78*油或*Kendall 80*油作精密陀螺马达轴承的润滑剂比用其它润滑油能得到更长的寿命。经过抛光的轴承是难以用润滑剂润湿的。它的寿命比较短,因为抛光或研磨时,有可能在表面上嵌入微粒,容易使很薄的弹性流体润滑膜破坏。为了确保适当的油膜润滑,对滚动轴承必须进行仔细处理,彻底清洗是很重要的。已研究出了多工序工艺过程来清洗所有的残余东西。我们研究所也在研究改善表面润湿性,提高摩擦磨损性能,找出了用磷酸三甲酚脂适当处理工艺,看到表面润湿性得到明显的改善情况⁽³¹⁾。

美国一项专利⁽³²⁾将制造好的轴承零件在氟化气氛中进行处理,使滚动轴承接触表面更加坚韧,并具有自润性,从而使轴承更加抗摩,并已降低了摩擦阻力,延长了寿命。这种气氛和轴承表面的各种合金形成氟化物的复合体,遍布表面层。形成氟化物表面层不超过0.025毫米,其硬度可达到 $RC64\sim 66^\circ$ 。这样,它的抗摩性就能显著改善,而且减少了摩擦阻力,最外层的氟化物表面层下面的氮化物是很微小的,一般显微镜观察不到,但遍布表面层。这就大大加强了抵抗轴承零件表面蠕变的能力。而且氮化物下面的原有金属晶粒的硬度也可达 $RC64^\circ$,这样抵抗集中负荷的变形能力也就加强了。形成的表面层虽然很薄,但不会出现通常会发生的碎裂现象,也不会产生微小裂纹。这种热处理方法也不会出现采用氮化处理时常有的氢空洞现象。

美国明尼阿波利斯的先进工艺公司为宇宙飞行和工业应用研制出一种用炭氟树脂渗透金属以减少摩擦的新方法⁽³³⁾。其摩擦比未处理的减少90%。这种工艺的关键是将滑溜的炭氟树脂转化成气态,然后使之渗入基底金属中,金属表面需经专门的预先处理,以使其接受渗透并不降低金属性能。

采用密封防止润滑油流出,可起增加滚动轴承寿命的作用。为此,有采用一种氟化物(*PolyIH*)的2%溶液涂在轴承平面,造成一层薄膜。使轴承表面的湿润临界表面张力小于使用的润滑油的表面张力,以防润滑油溢出。由于在微型轴承用油量少,所以产生的重力比油的表面张力小,这个薄膜则产生防止溢油的效果,可提高轴承寿命十倍⁽³⁴⁾。滚动轴承在氦等惰性气体中运行也可提高寿命十倍之多。

在真空状态下用的滚珠轴承，采用镀金或镀银的办法有一定效果。宫川行雄⁽³⁵⁾研究结果认为对钢球、轴承内外圈用离子镀来镀上一层厚度为 400 \AA 的金在无保持架滚珠轴承，因为钢球，内外圈都有镀金，金则容易从钢球向内外圈转移，由于在内外圈形成局部厚的金转移膜的关系，只试验20小时摩擦就急剧增加，轴承就不能很好圆滑回转。如果只对钢球进行镀金，而内外圈不镀金时比较好。镀银和镀铅也是同样情况。金在真空下润滑的结果分散度大，可靠性差。在真空下用银润滑时，分散度很小。用金润滑在3000转/分的状态下试验时，仅用八小时摩擦力矩就急增以致不能回转。可是用银润滑时，即使在4000转/分时也没有发生异常情况。用银润滑比用金润滑时摩擦力矩小，而且轴承温度也非常低，波动也较少。不过宫川行雄后来又研究表明在滚珠轴承上溅射1微米左右的二硫化钼膜的方法比较好⁽³⁶⁾。虽然膜薄，但强度大，用在滚动轴承时，并不需太厚的膜。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。尤其预先溅射0.1微米厚的 Cr_3S_2 然后再在那上面溅射0.6微米厚的 MoS_2 的膜时，轴承寿命可大大提高。二硫化钼比铅、金、银来说，最适用于滚动轴承在真空下的润滑。

在宇宙飞船的可见红外线旋转扫描辐射计 (*VISSR*)等气象测定仪器上的万向节轴承最初采用人工涂复 MoS_2 进行润滑，并使用添有聚四氟乙烯和二硫化钼的保持架。但若转移膜过厚，便在 10° 行程的两端，球与沟道上产生楔形堆积现象，致使力矩增大到不能符合要求。后来实验发现溅射 700 \AA 厚的二硫化钼时才达到了要求⁽³⁷⁾。

我们研究所研制了自由烧结和热压成型两种方法制成聚脲亚胺等塑料多孔性保持架改善了供油和储油情况，有助于延长轴承寿命⁽³⁸⁾。

近来 *H. E. Hintermann*⁽³⁹⁾ 的研究结果表明在滚动轴承表面上施以碳化钛涂层之后，不但在空气中使用而且在真空环境中使用时都大大提高了寿命。他介绍 *RMB* 的对经碳化钛涂层的和无涂层的轴承在 10^{-7} 托的真空环境下，在 250°C 的情况下，经过八个月试验结果表明，虽然最初在空气中两种轴承的摩擦力矩是一样的，但经八个月真空试验后，无涂层的轴承的摩擦力矩变化很大，以致有的地方发生冷焊，但有碳化钛涂层的轴承在八个月试验后仍保持原来的很低的摩擦力矩。他指出有碳化钛涂层的轴承用在2400转/分的陀螺上，在油润滑情况下，经过3年试验后也未见失败。

今后的研究方向

根据上述的研究发展趋势和进一步发展的需要，我认为在提高空间机械用滚动轴承寿命研究方面应该开展下列研究：

1. 进一步研究滚动轴承材料、创造出新品种轴承材料。
2. 对现有材料从微观来研究改进，如研究晶粒细化和一些组织变化。
3. 研究新的表面处理和热处理方法。
4. 研究改进精加工后的表面质量，特别是研究掌握精加工后的表面残余应力的状态，使其有利于提高轴承寿命。
5. 研究革新精加工工艺和表面处理方法以求改善轴承表面润湿性提高轴承寿命。
6. 研究创造新的润滑油及其添加剂。
7. 研究发展新型保持架用的复合材料。

参 考 文 献

- [1] J. A. Martin, Trans. ASME ser. D, 1967, 932.
- [2] T. E. Tallian, ASLE. trans. 1962, №5, 347.
- [3] 黑田昌夫; 日本机械学会志, 1950, 1442.
- [4] 高田浩年; NSK Bearing Journal 1969, №.623, 25.
- [5] 喜熨斗政夫; NSK Bearing Journal 1971, №.628, 45.
- [6] R. L. Widner; Trans. ASME. ser. F, 1972, №.2, 174.
- [7] 国外轴承1979, №5, 10.
- [8] D. Scott; Wear1975, №.3, 227.
- [9] J. A. Martin; Trans. ASME ser. D, 1968, №.1, 61.
- [10] 古村恭三郎; NSK Bearing Journal, 1979, №.4, 1.
- [11] 哈工大, 哈轴; 轴承, 1980, №.1, 1.
- [12] 杨满蓉; 长春光机所第四届学术报告会报告, 1981年3月, 44.
- [13] T. W. Morrison; Metal progress, 1969, №.4, 174.
- [14] T. E. Tallian; Mechanical Engineering, 1976, №.6, 53.
- [15] 喜熨斗政夫; 机械の研究, 1977, №.1, 128.
- [16] 加藤刚志; 电气制钢, 1975, №.3, 155.
- [17] D. Scott; Wear, 1973, №.1, 61.
- [18] 曾田范宗; 轴承 257.
- [19] 喜熨斗政夫; NSK Bearing Journal, 1971, №.628, 43.
- [20] D. P. Koistinen; Trans. ASME, 1964, 581.
- [21] 喜熨斗政夫; NSK Bearing Journal, 1957, №, 607, 22.
- [22] E. V. Zaretsky; ASME. ser. F, 1967, 47.
- [23] 山本精穗; NSK Bearing Journal, 1972, №.631, 32.
- [24] H. S. Cheng; ASLE trans, 1965, №.4, 8.
- [25] T. E. Tallian; ASLE trans, 1967, №.10, 418.
- [26] J. C. Skurka; Trans. ASME. ser. F. 1970, 281.
- [27] T. A. Harris; Production Engineering, 1965, №.8, 76.
- [28] J. I. McCool; Trans. ASME ser. F, 1970, №.1, 16.
- [29] F. G. Rounds. Trans. ASME ser. F, 1971, №.2, 236.
- [30] NASA CR—113572, 1975.
- [31] 贾林贤等; 长春光机所第四届学术报告会报告, 1981年3月, 32.
- [32] 国外轴承, 1978, №.5, 55.
- [33] Engineer Design, 1976, №.6, 33.
- [34] V. G. Fitzsimons; Lubrication Engineering, 1968, №.1 35.
- [35] 宫川行雄; 日本航空宇宙研究所报告TR—505, 1977年7月.
- [36] 宫川行雄; 日本润滑技术协会报告1979年5月.29.
- [37] Lubrication Engineering, 1978, №, 8, 437.
- [38] 沙肇恒等; 长春光机所第四届学术报告会报告1981年3月, 42.
- [39] H. E. Hintermann; Tribology International, 1980, Dec, 267.