

# 我所在润滑与轴承方面三十年来的研究概况

刘承烈

**摘要** 本文就我所在润滑与轴承方面三十年来的研究情况进行了概述。在第一部分叙述了润滑材料、流体润滑、利用放射性同位素研究摩擦磨损润滑方面的情况。在第二部分叙述了滑动轴承的材料、制造工艺、结构设计及动态性能方面的研究情况。在第三部分叙述了滚动轴承的材料、热处理、保持架、制造工艺、性能检测、表面质量和润湿性等方面的研究情况。在第四部分叙述了气体轴承的结构、设计计算方法、动性能、应用和制造工艺方面的研究情况。

我所最早五十年代初是从滑动轴承材料和制造工艺开始研究的，后来在六十年代初根据国防建设需要开展了滚动轴承和空气轴承方面的研究工作。下面分别就润滑材料、流体润滑、利用放射性同位素研究摩擦磨损润滑方面；就滑动轴承材料、制造工艺、结构设计、及动态性能方面；就滚动轴承材料、热处理、保持架、制造工艺、性能检测、表面质量和润湿性等性能方面；就静压气体轴承的结构和性能、计算和测试方法、精加工工艺和检测方面进行概述。

## 一、润滑方面

在润滑材料方面为了配合我所的研究任务的需要，七十年代后期开始进行了一些固体润滑材料方面的研究<sup>[1]</sup>。对金属塑料材料进行了研究。这是聚四氟乙烯和二硫化钨混合的悬浮液浸渍到以烧结青铜粉为骨架的材料基体内而制成的。它具备了这些材料各自优点，其摩擦系数低，工作温度范围广，膨胀系数小，强度高，耐磨性好，导热性也得到改善。还对塑料基固体润滑材料进行了研究。它是聚四氟乙烯和聚酰亚胺为基加入适量的充填剂的材料。聚四氟乙烯是一种新型结晶聚合物，其摩擦系数低，在0.13~0.16左右，使用温度范围宽在-200~+250℃之间。但耐磨性差。为改善耐磨性，则填加聚酰亚胺和二硫化钨。该试验结果表明在运转开始阶段磨损较快，随着运转时间增加，磨损量逐渐减少，以后达到平稳。增加载荷时，温度则随着转数增加而上升幅度较大，可以看出增加载荷对温升的影响大。并且在大气中和在真空中进行了不同速度运转时的温度变化的对比试验。结果是在大气中的试验温度几乎没有变化，而在真空中的试验，温度由102℃升至120℃。用这种塑料基固体润滑材料制成了几种滚动轴承保持架，经长时间试验，至今认为比较好。

在流体润滑方面，于五十年代末期王子馨等进行了天文望远镜极轴油垫轴承的设计和流体润滑的研究。该研究首先对望远镜支承部分结构型式分析比较了几种不同方案之后，选择了其特点是北端轴颈为球面带，几乎全部重量由北端油垫轴承承受，南端用调心滚珠轴承。这种型式比较容易使南北两端轴颈中心线保持一致，极轴的旋转中心线不会产生摆动。

其次对油垫表面润滑油压力分布和流量计算问题；油垫轴承运转参数之间的关系及油膜厚度控制问题；油垫轴承在油膜厚度不均匀情况下的压力分布、流量计算及油垫的自动调整作用问题进行了深入研究探讨，最后进行了模型试验。试验结果证明了计算分析中所指出的那样，当油垫表面油膜厚度不均匀时，油垫上产生不平衡力。试验结果也证明了采用形状象凹透镜的上下两层油膜的油垫轴承结构能够充分利用油垫上的不平衡力，油垫具有自动保持稳定的正常位置的作用。流体力学计算结果与试验结果是符合的。

在利用放射性同位素研究摩擦磨损润滑方面我所是从五十年代后半期建立了放射性同位素试验室，利用放射性同位素迅速地求出国产硬质合金刀具的耐用度关系<sup>[2]</sup>。结果表明利用放射性同位素研究刀具磨损的方法与以前一般的方法相比较，试验时间缩短了50倍；试验材料减少了50倍；试验误差由从前的40%减到10%。我们建立了几种利用放射性同位素研究润滑与磨损的活化零件的方法。当时在全国各地广泛研究和采用内燃机和燃油掺水，以求节约汽油和柴油，但又担心燃油掺水后会加速发动机的零件磨损和腐蚀。为此我们进行了利用放射性同位素研究解放牌汽车的汽油和汽油掺水后活塞环的磨损和柴油机经掺水后高压油泵的磨损问题<sup>[3]</sup>。试验时对活塞环镶嵌放射性钴丝，测其磨损物 Co 60 含量。直接掺水试验结果表明，随着掺水量增加活塞环的磨损量亦随之增大，掺蒸溜水和掺相同百分比的自来水时，活塞环的磨损基本一样，没有明显差别。用乳化汽油作为燃料时，活塞环的磨损情况基本上和用汽油时一样。在柴油掺水试验中是将高油泵芯活化测其磨损产物 Fe 59 含量。试验结果发现柴油和水经过低压泵后即变成乳化很好的柴油，并且磨损情况和用事先乳化好的乳化柴油的磨损情况基本相同。因此柴油掺水时，可以采用泵前掺水方法，这样不会额外增加油泵的磨损。如此利用放射性同位素测定发动机磨损是在比较短的时间测出精确的结果并且可以不停车连续测定，是一个先进的方法。

## 二、滑动轴承方面

在滑动轴承材料制造工艺方面，五十年代初根据生产需要，我所进行了铜铅轴瓦的研究<sup>[4]</sup>。这个研究是在自己设计改装的小型摇篮式离心铸造机上进行的。研究结果表明增加冷却速度能使偏析倾向大为减少，合金成为铜铅错杂树枝状组织，急速冷却又能使合金组织更加细密。含铅量在30%以下的合金。硬度较大，对疲劳破坏抵抗力强，容易使轴磨损。含铅量较多的合金其强度较低，对疲劳破坏抵抗力弱，但摩擦系数较小，不易使轴磨损。含铅40%时合金是细微的共晶组织。对添加元素的影响也进行了探讨，其结果表明加镍能使合金的树枝状组织更为明显，在同一冷却速度下，则较为细密，加镍2%以下时对合金的机械性能似无影响。加银能使合金组织均匀，其效果较加镍尤为显著。加锡最能增加合金强度。加硫最大作用在于除氧，使合金组织分布均匀的效果也好。

在五十年代中研究了“评定轴承合金摩擦磨损性能的新的实验室方法”<sup>[5]</sup>，并利用这个实验方法对25种铜基减摩合金摩擦磨损性能进行了鉴定<sup>[6]</sup>，为简化和标准化我国机械制造业所用的轴承减摩铜合金提供科学依据。这个研究的重点是鉴别这些材料的摩擦磨损性能，进行了磨合性能和承载能力试验，以及粘着性能和摩擦系数的测定。研究结论认为：

1. 在中等工作条件下，Бройс 6—6—3 (104号) 是一种较理想的合金，它具有较好的摩擦磨损性能。Бройс 6—6—3 来代替其他四种牌号。

2. 含磷的锡青铜硬度较高，用它作轴承时要求轴颈有更高的硬度，它的磨合性又较差，

摩擦系数又稍高，所以一般用作滑动轴承时，表面还需涂复一层较软的合金，以改善其减摩性能。

3. 成分相近的合金，完全有可能简化。如：Брой 102 和 Брой 11—3 从各方面来看，其性能都很相近。又如六种 Брос 类合金性能也都差不多。完全可以用一、二种性能较好的代替其他几种。

4. Брс 18、Брс 30 和 Брсн 60—2.5 都是很好的轴承材料，可以应用在较重的工作条件下，以便大量代替价格较高的锡青铜。

在五十年代后期，结合我国南方特产的竹材生长期短，产量大，有较高的物理机械性能和减摩性能，开展了竹材塑料的研究，并将竹层压塑料在轧钢机轴承中应用<sup>[7]</sup>。此研究报告详细叙述了竹材塑料的制造过程，机械强度、吸水性、摩擦磨损性能以及在轧钢机上实际运行试验的结果。研究表明，这种塑料的机械强度基本上与夹布胶木和木层压塑料相同，吸水膨胀性极小，摩擦系数很低，在无润滑条件下仍能在一定负荷下工作一段时间而不发生突然的粘着破坏，在水润滑的条件下有很高的耐磨性。在轧钢机上初步试验结果表明，该塑料的耐磨性要比原来采用的夹布胶木好，其寿命高一倍左右，因此它是一种很有希望的塑料。该文最后也指出了该塑料尚存在一些缺点，以便继续研究改进。

五十年代末研究了对于解决大量生产汽车拖拉机轴承有着重要意义的钢—铝基轴承合金双金属板轧制<sup>[8]</sup>。该研究系统地研究了低碳钢和铝基轴承合金双金属板的轧制过程和各种因素对于粘结质量的影响。温度、压下率和表面状态都是影响粘结的主要因素。一般规律是：在同一压下率下，温度愈高，粘结得愈牢固；在同一温度下压下率愈大，粘结亦愈良好。钢板表面是以磨光后的粘结为最好。但热轧和酸洗后，又经冷轧和最后经钢丝轮刷净的钢板亦可以得到良好的粘结。

该文还对粘结的基本问题进行了讨论，并对于一定的条件下计算双金属原始坯料厚度提供了必要的实验结果。

一九五八年胡国良等进行了，三峡水轮发电机组大型推力轴承的研究，对 100 万千瓦水轮发电机组大型推力轴承设计和运行可能性进行了论证。与哈尔滨工业大学共同提的论证报告中，考虑了轴承油膜侧隙泄漏的影响，对大型流体动力润滑推力轴承一般设计计算公式进行了修正，并对轴承参数的选择和结构进行了分析，为大型推力轴承设计和试验研究打下了基础。一九五九年与哈工大、哈尔滨电机厂共同设计和制造了大型推力轴承试验台，以研究大型推力轴承的起动力矩、油膜厚度、油膜比压、滑动速度等参数与设计参数、轴承结构、冷却方式等因素的关系。一九六〇年对古田水电站水轮发电机组推力轴承运行状态进行了测试。测定了起动力矩、油膜厚度、油膜温度和循环润滑油油温分布，对轴承温升高的原因进行了分析。该报告对掌握正在运行的水轮发电机组推力轴承起动和运行情况以及改善轴承温升有很大参考价值。

### 三、滚动轴承方面

在滚动轴承材料及热处理方面，由六十年代初开始了滚动轴承钢尺寸稳定性的研究<sup>[9]</sup>，主要研究了不同热处理条件对滚珠轴承钢残留奥氏体量及其稳定性的影响，室温时效和应力时效条件下的尺寸稳定性，以及在不同组织与应力状态下滚珠钢的微量塑性形变抗力。探讨了应变回火的作用，并对尺寸稳定性研究中的若干重要问题进行了讨论，结果表明滚珠钢在

马氏体转变温度到室温区间内的所有温度梯级等温淬火时，均会引起随后冷却时发生转变滞后的稳定化现象。但在 150~180℃ 的温度短时间保温后继续冷却到 -198℃ 时，残留奥氏体量并不多于直接淬火及冷处理的钢，由于稳定化而损失的马氏体，在冷处理过程中得到了恢复。主张用于轻负荷的精密轴承，应在淬火后立即进行低于马氏体转变温度的冷处理，以减少残留奥氏体。七十年代末期进行了 GCr15 轴承钢中碳化物的细化处理和“ZGCr15 轴承钢的滚动接触塑性变形抗力。”研究了细化处理和常规热处理后的金相组织，并分别测定了其硬度与残留奥氏体，探讨了出现的细状碳化物。后者对 ZGCr15 轴承钢经过五种规程热处理后，在不同接触应力下的塑性变形抗力进行了测定，结果认为在高接触应力下该钢的塑性变形抗力主要决定于硬度；在低接触应力下，主要决定于残留奥氏体，而与硬度无对应关系。在低接触应力下工作的轴承，采用低硬度 (Rc58~60) 比采用高硬度 (Rc61 以上) 为佳。从七十年代末期开展了“GCr15 钢的激光复合热处理”<sup>[10]</sup> 的研究。对球化退火及不同热处理工艺规范处理的 GCr15 钢进行了激光局部表面淬火。测定了激光淬火后的表面硬度及硬化层深度，比较了金相组织的变化，并用  $\alpha$  射线衍射法测定了残留奥氏体含量的变化。结果表明经激光复合处理后对提高表面层硬度有明显效果，残留奥氏体含量接近或稍高于原基体的含量，但远低于直接淬火回火的奥氏体含量。

在滚动轴承保持架等方面，从六十年代初对作为保持架材料的多孔尼龙的减摩及润滑性和聚脲亚胺基的材料<sup>[11]</sup>进行了研究，前者研究的结论是多孔性尼龙在摩擦过程中，由于内部贮油受热渗出在摩擦界面间，则起到润滑作用，因此减摩性能好，含油率为 10% 的试样已能达到良好的润滑和减摩的效果。含油率过高，不仅不能进一步改善其减摩性能，反而使其它性能变坏。严国荣等还用光弹性方法研究了保持架的应力分布。用应力“冻结”法对在离心力作用下的保持架进行了分析，确定了最大应力的数值及位置，沿孔边及两个危险截面的应力分布，导出了计算保持架应力集中系数的方法。

在滚动轴承加工方面，从六十年代初期进行过 GCr15 钢球毛坯成型研制工作，用真空冶炼的材料制出直径为 5 毫米左右的钢球毛坯。熊仪淑等还对精密钢球的研磨和抛光、进行了研究。探索了研磨压力、速度对研球质量的影响，稳定研出高质量的零级钢球。此外于五十年代中用碳酸钙为磨料用串桶抛光得到高质量的钢球，为哈尔滨轴承厂解决了当时急需解决的问题<sup>[11]</sup>。还对精密滚珠轴承套圈进行了磨削和研磨的研究\*。主要是针对解决套圈 14 项摆差达到 0.5 微米的高精度、通过分析加工误差采取了特殊办法进行了磨削和研磨，这个工艺方法虽然生产率较低，但能够磨削和研磨出 0.5 微米的超高精度的轴承环。

此外，为了解决磨削轴承环的表面质量也还深入研究了磨削的一些基本问题和新工艺。曾研究磨削到十级以上光洁度时各种因素的影响<sup>[12]</sup>。还对砂轮磨钝与磨削后的工件表面质量<sup>[13]</sup>。和用国产高速砂轮磨削后的表面质量<sup>[14]</sup>。进行了研究，也还研究了内冷却磨削及双冷却磨削<sup>[15]</sup>。和电解磨削<sup>[16, 17]</sup>。在六十年代前期深入研究了磨削表面残余应力<sup>[18, 19]</sup>。

在陀螺的精密滚珠轴承的等弹性等特殊性能问题方面邓树森等进行研究，阐明了预载与接触角使轴承达到等弹性所起的作用，研究了轴承非线性与滚珠离心力对等弹性的影响，导出了一系列计算滚珠轴承刚性公式。由预载轴承付的线性刚度引起与加速度平方有关的干扰力矩，而其刚度的非线性则引起与加速度四次方有关的干扰力矩。当预载轴承付的刚度比  $K_c = 1$  时，可消除有关的干扰力矩。对陀螺转子轴承预载的决定及轴承接触角的一些影响因素进

\* 余沪生、张杰、董魁武、张秀兰、邓玉新、叶慧珠等；参加此项工作。

行了分析, 得出满足预载对等弹性条件的接触角数值为 $35^{\circ}16'$ , 对微型滚珠轴承变形与接触角进行了试验。

在提高滚动轴承的寿命方面从70年代末期开展了研究工作。为了保证高精度陀螺马达轴承寿命, 使轴承滚道和整个滚珠表面很好形成一层膜层, 则采用磷酸三甲酚酯和磷化处理, 改善表面润湿性。为直观地衡量试件不同处理表面润湿程度采取了润湿角和润湿油滴直径的测定。根据磷酸三甲酚酯处理前后的试件表面应力、硬度, 耐磨性、金相等实验结果找出合适的处理工艺改善了表面润湿性, 使表面容易形成一层流体动力润滑油膜。对经过磷酸三甲酚酯处理与未经处理的一般轴承的摩擦磨损性能、振动、噪音等作了对比试验, 探讨了陀螺精密滚珠轴承的润湿性的作用。

## 四、气体轴承方面

在气体轴承结构设计计算方法方面于60年代初开展了流体静力润滑球轴承的电比拟研究\*, 用电比拟求解了喷孔式流体静力润滑的球轴承在偏心比等于零时的压力分布。由此得到喷孔数, 喷孔位置中心角和球心孔三者对球轴承压力分布和承载系数间的定量关系。把用电比拟得到的结果与理论计算作了比较, 结果极为一致, 可作设计依据, 可用电比拟确定流体静力润滑球轴承的承载能力和流量。由此决定了获得最大承载能力和最小流量的最佳喷孔设计, 并讨论了球心孔的影响。认为电比拟分析在考虑润滑膜厚度有变化时, 有电阻纸或电解槽底面厚度要相应化的困难。因此分析只限于润滑膜是等厚度的情况, 其优点在于对流体静力轴承, 不管润滑剂是液体还是气体, 它可以很简单迅速地给出评定和预计轴承工况的可靠资料。试验结果表明, 喷孔数目增加时, 喷出的压力值向出口边降低的速度缓慢, 如球心不存在出口孔, 则高压区压力值也随着喷孔数增加, 因此, 承载能力增大。但喷孔数超过8以后, 承载能力增加的缓慢, 为得到最大承载能力有一最佳喷孔中心角 $\theta$ 值。不论球心孔直径是多大,  $\theta$ 值都接近 $45^{\circ}$ 。在没有球心孔的情况下, 流量随着孔数增多和 $\theta$ 角增大而增大。如有球心孔, 则获得最小流量的喷孔中心角在 $30^{\circ}\sim 45^{\circ}$ 之间。如没有球心孔, 喷孔内边形成高压区, 使承载能力大大增加。球心孔使流量也增大。

在空气轴承性能方面, 从六十年代初郭德申等开展了空气静压喷孔式密合球型止推轴承的性能研究。研究了喷孔位置, 个数和直径对承载能力, 流量和刚性的影响。试验证明空气静压喷孔式密合球型止推轴承不能利用一般的流体静力润滑理论计算。在喷孔出口至轴承间隙入口的过渡区域中流动情况很复杂, 发现有压力突降。喷孔数和位置对压力分布和承载能力的影响不大。故喷孔式密合球型止推轴承可以设计成单喷孔轴承以便于加工。喷孔个数和直径减小时使刚性增加。供压增加使刚性增加。在轻载和接近极限负荷时刚性减少。还研究了无气室的双列喷孔式气体静压轴颈轴承性能。试验结果得到承载系数、流量系数与内外流阻比、偏心比之间的关系。列出了在各种供应压下满足承载能力最大和气耗量最小条件的轴承间隙与喷孔直径的关系曲线, 给设计提供了依据, 有实用价值。也指出了应该进一步研究这种轴承受偏心载荷时的情况。也对环形狭缝进气节流式的气体静压轴颈轴承进行了试验研究。讨论了狭缝宽度与径向间隙的比值、偏心比和供压等参数对于承载能力以及气膜刚度对供压变化的敏感性能的影响, 并测定了压力分布。把试验结果与已有的理论近似计算作了比

\* 包可人、任庆华、吕韵翎等参加此工作。

较, 提供设计参考。

在应用气体轴承方面, 于60年代前半期进行了高速摄影机的高速转镜的空气轴承的研究, 达到了20万转/分, 后来由于十年内乱停止了研究。由1965年开始了姿态控制模拟试验用气浮转台的研制, 但因十年内乱停顿了许多年, 于1978年又根据需要进行三轴气浮转台的研究工作, 正在试验和设计。还开展了静压空气轴承在冲击加速度校准装置上的应用的研究。高 $g$ 值大速度冲击加速度校准装置, 由于应用空气轴承的结果带来了四处改进提高。1. 所产生的冲击加速度波形是一个光滑的基本无陡坡的近似半正弦波形。2. 所产生的多普勒波形是一个完整的脉冲较宽的波形。3. 提高了测试精度。4. 对于进口或国产加速度传感器, 轴承靶体反映都灵敏, 无论是高、低 $g$ 值波形和精度都较好。在轴承结构上对两种结构进行了分析和计算。通过实验, 采取了能量释放原理的机械结构。这种结构, 性能良好, 稳定可靠, 经久耐用, 为空气轴承在冲击装置上的应用, 研究出了一种特殊的结构和使用方法。此外还对空气过滤设备与空气中的含油进行了定性和定量分析。

在气体轴承制造工艺方面对 $\phi 120$ 毫米大球和球座的研磨和检测进行了研究试验<sup>[20, 21]</sup>。在自己设计制造的研磨装置上研出了 $\phi 120$ 毫米大球, 其不球度达到0.2微米, 光洁度达到12级;  $\phi 120$ 毫米球座的中心区的不圆度达到0.1微米, 座边缘的不圆度达到0.6微米, 光洁度达到12级, 试验结果认为研磨环的材质和尺寸很重要, 要严加控制; 研磨剂的配比和润滑液要选择适当; 研磨压力对研磨质量有很大作用要很好注意。在工序中检测是采取了用光学样板的检测。

#### 参 考 文 献

- [1] 沙肇恒等; 光学机械, 1981年6期。
- [2] 熊大章、何维诚等; 机械工程学报1959年10月。
- [3] 刘承烈等; 长春市机械电机学会1961年会论文报告。
- [4] 佟绍文等; 东北科学研究所汇报, 1950年2期。
- [5] 胡绍衣、孙致魁; 机械工程学报1961年第九卷第1期。
- [6] 胡绍衣、孙致魁; 中国科学院光学精密机械研究所集刊, 第2集, 机械制造特辑(1), 1964年。
- [7] 胡绍衣、马长吉; 中国科学院光学精密机械研究所集刊, 第2集, 机械制造特辑(1), 1964年。
- [8] 张作梅、林陶; 中国科学院光学精密机械研究所集刊第2集机械制造特辑(1), 1964年。
- [9] 蔡安原等; 轴承, 1965年11期。
- [10] 关振中等; 东北三省热处理学会报告, 1980年。
- [11] 刘承烈等; 长春汽车拖拉机学院学报, 1957年1月。
- [12] 刘承烈、王子馨; 机械制造工艺, 1957年11期。
- [13] 刘承烈等; 机械工程学报, 1958年2期。
- [14] 刘承烈、龚幼容; 金工工艺, 1959年9月。
- [15] 刘承烈; 在郑州召开的全国磨削学术报告会报告, 1960年。
- [16] 刘承烈、董魁武; 机械工程学报, 1959年1期。
- [17] 刘承烈、董魁武; 长春市机械电机学会1961年年会论文报告。
- [18] 刘承烈; 余沪生、张杰; 在沈阳召开的全国机械加工学术报告会报告1963年10月。
- [19] 刘承烈等; 在洛阳召开的全国磨削学术报告会报告, 1965年9月。
- [20] 刘文铎; 长春市机械加工学术报告会报告, 1980年11月。
- [21] 刘学贵; 长春市机械加工学术报告会报告, 1980年11月。