

国外技术参考资料译文选之四十六

陀 螺 仪 轴 承

国外造船技术资料编辑部

一九七二年九月

目 录

陀螺仪滚珠轴承现状	1
用于支承陀螺仪旋转轴的锥形气体轴承	29
第三代陀螺仪上用的对开半球气动轴承的制造	43
附录：积分速率陀螺仪的误差源及性能测试	55

陀螺仪滚珠轴承现状

摘 要

旋轉軸轴承組件是陀螺仪性能及其可靠性主要的決定因素。在数万小时的運轉中，要求可靠地达到小于1微时的长期位置稳定性。因此而采用的珠滾軸承，究竟是在彈性流体动力薄膜上成功地運轉，还是过早損坏，可能取决于是否应用現代的軸承技术。这种專門技术，在很多方面适用于其它軸承，在过去二十年內就已发展了，并在繼續提高。

現代技术水平的成就，是軸承参数及其測定方法同时发展的結果。軸承材料、几何形状、槽面形状和化学处理、潤滑、珠滾承盘、污染控制、动力性能、試驗、和各种加工全进行了改进。在減少刺破表面薄膜的毛刺、改进表面化学处理和潤滑机理方面，有特別重要的收效。关于軸承特性、寿命和在各个加工阶段性能的評定等方面总功能試驗的測量装置的发展或改进，也很显著。

在潤滑机理、軸承动力学和槽面的处理方面，所連續取得的現代成果，将进一步提高寿命和性能。应用今天的技术，在大多数情况下，能达到可靠工作数千小时的要求。

一、绪 言

陀螺仪旋轉軸滾珠軸承是独特的，在慣性制导系統的心脏中，它是性能和可靠性的主要決定因素。虽然实际上在許多方面是停留在多年前的水平上，但今天的軸承技术是二十多年发展的結果。現在，利用現有的知識可以提高軸承成品率、性能、寿命和可靠性。

1. 要 求

慣性陀螺仪旋轉軸珠滾軸承的主要要求可簡括为在所要求的性能基础上，有很长的寿命。这个可以分成两个主要部分：避免軸承組件的所有元件的物理或化学性能的降級，和保持陀螺仪元件的尺寸稳定性。損坏的标准随用途而定，可从陀螺仪性能微小的恶化到因軸

承卡住而轉子无法旋轉。

本文討論如图 1 表示的精密浮动慣性陀螺儀的軸承性能，和那些影响陀螺儀轉子組件的穩定性的因素。如图 2 所示，轉子平均定位必須穩定到小于 1 微吋，同樣也必須很精确地保持其它浮动元件的质量稳定性。

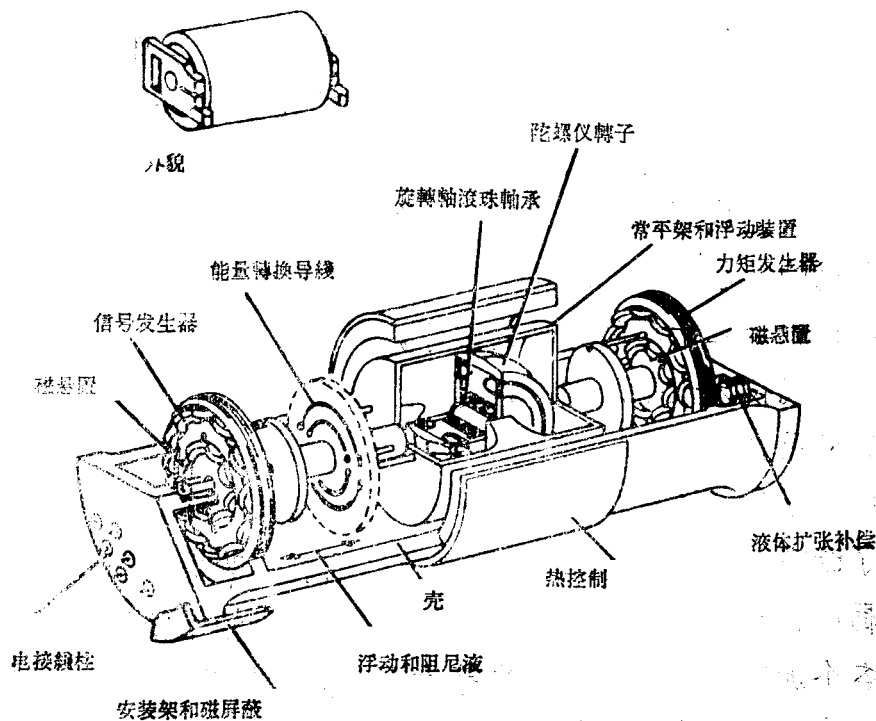
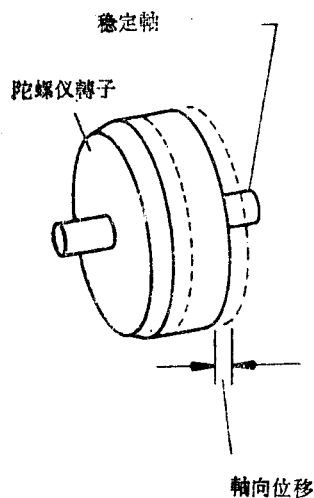


图 1 单自由度浮动陀螺仪



对地球表面每小时 1 哩的导航精度 (陀螺仪漂移速度約 0.015°/小时)	
轉子位置稳定性要求是: 0.2×10^{-6} 吋 或 50 埃	所允許的横过单軸承的 最大油滴迁移量是: 0.3 毫克 OR 直径为 0.03 吋
陀螺儀轉子: 質量 - 225 克 角动量 - 2×10^6 克 厘米 ² /秒	

图 2 在 1 个重力加速度(g)上，导航精度对稳定性的要求

为了很好地达到稳定性要求，轴承应该支承在稳定的全弹性流体动力润滑薄膜上，在旋轉期間，这个薄膜的刺破引起潤滑剂和金属表面的化学和物理性能的降級，从而影响陀螺轉子定位。这类恶化是发展的，因为高速度的金属接触产生的碎粉引起薄膜进一步刺穿。然后潤滑油泥渣集聚在压力区的旁边，象海绵一样，将油从需要保持薄膜的区域里吸回来。当这类损坏发展时，轴承轉矩变得无規律，潤滑剂消失，金属磨損，最后轉矩增至使轉子不能再以工作速度旋轉。轴承从性能开始恶化到轉子损坏，旋轉時間可能是数千小时。值得指出的是，金属的疲劳是轴承损坏的一件典型形式，但在陀螺儀轴承的损坏中却根本不起作用。

彈性流体动力薄膜的产生和保持，要求許多条件连续存在。運轉时，金属零件(座圈和滾珠)的形状必須产生所要求的彈性流体动力薄膜，在整个压力区薄膜具有容許的应力級。金属必須承受負荷，基本上沒有塑性流动或表面破坏。表面必須除去刺破薄膜的毛刺，还必须从化学方面支承低速下的边界潤滑薄膜，和工作速度下的彈性流体动力薄膜。为了使这些薄膜具有容許的力矩級、化学和热稳定性，潤滑剂必須显示一定的化学和物理性能。滾珠承盘必須維持一控制潤滑剂的油池(貯存油的)，并使潤滑剂形成全彈性流体动力膜，必須在容許的力矩級下以要求的稳定性運轉。外界条件必須在化学、物理性能和导热性方面，适应轴承組合件的要求。最后，也是极端重要的：轴承組件必須完全清除由于薄膜的刺破而引起轴承恶化的污物。

除了上面提出的这些主要与潤滑薄膜的保持有关的要求以外，轴承組合件必須具有质量稳定性所要求的其它性能。几何形状、潤滑和運轉参数的組合必須保証下述要素：

- (1) 轉子位置对加速度場的变化不太敏感；
- (2) 薄膜均匀和散装潤滑剂的稳定性；
- (3) 滾珠和承盘的稳定性；
- (4) 轴承力矩不变。

所討論的与彈性流体动力薄膜的破坏有关的第一組参数的不适当，可能导致轴承恶化和陀螺儀性能降低。与质量不稳定性有关的第二組参数，一般影响仪器质量，而在降低轴承性能的情况下，不一定会減少轴承寿命。

任何关于轴承要求的討論中，极端重要的是加工問題。轴承基本性能的达到，无疑是取决于制造过程中的质量控制，而这一点可以通过正确的工程管理来实现。这些性能的保持是其后的一个主要問題。轴承是一种精密的装置，必須如此处理。从組件到整个仪器的工艺过程，它的完整性可能被特殊的污染、化学污染、过热、座架变形、过应力、划痕、敲凹、震动、过量潤滑、潤滑不足、貯存时周圍环境的腐蝕等等因素所損害。因此，对起初达到所要求的轴承参数，和在仪器制造期間保持这些参数來說，加工变量都是极重要的。

2. 現 况

第一节所提的要求現在已經能夠稳定地实现。高质量的陀螺儀性能在累計運轉約三万小时的仪器中已得到証明。然而，以下章节将要提出，在轴承表面、潤滑及动力学的某些方面仍可继续改进。

今天的成就是二十余年发展的結果，有些发展工作至今仍在进行中，图3表示了这项工作。四十年代末期开始的一些最重要的发展成果之一，导致預載技术的改进。在轴承組件方面，嗣后的发展圍繞冶金、几何形状、潤滑、承盘、表面光洁度、表面化学处理、动力学、

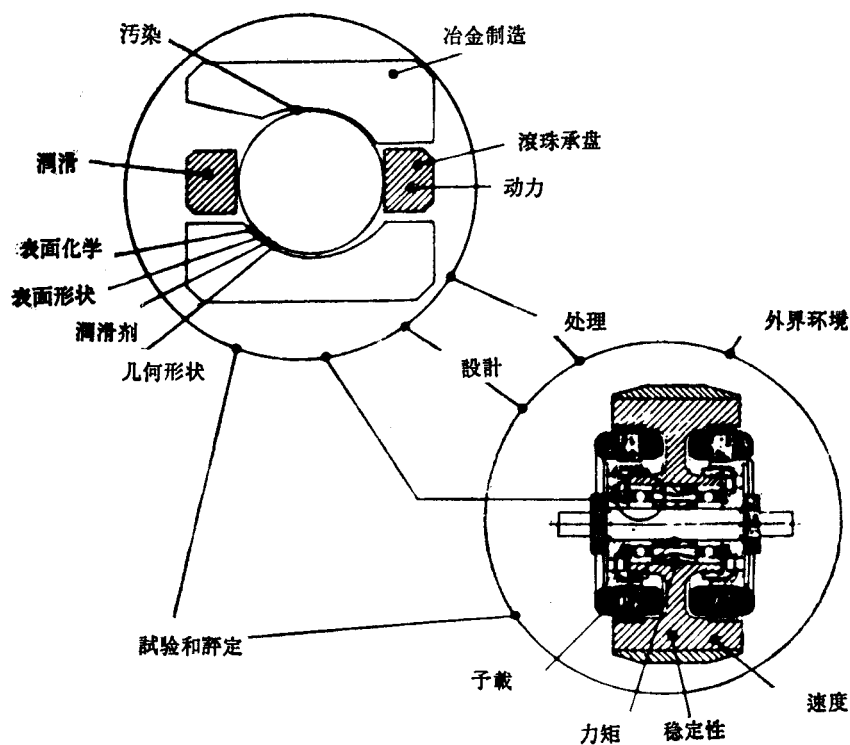


图 3 轴承发展的主要方面

污染、制造技术和加工变量方面作出了努力。

轴承鉴定方面的发展，经历了同样重要的过程。例如，转向屈服测量仪的发展，导致上述早期预载技术的改进。其它的发展包括几何测量装置、光学测量技术、低速测功计、毫瓦特计、润滑膜电阻测量仪、锥形切割、闪光观察、座圈旋转计算装置、高速力矩试验装置等等的改进。

陀螺仪本身就是一种极为有用的轴承检验装置，它能单独确定轴承对于所要求的性能级的位置稳定性。它也提供了利用加给轴承组件的已知输入和随之产生的轴承状态的精确读数的一种方便方法。

在陀螺仪设计初期和试验阶段，鉴定轴承组件是极端重要的。然而，由于短期工作，对滚珠轴承要求不严，而且往往忽略早期的降级症状。

二、结 构

陀螺仪轴承设计不仅必须考虑一般的规范，还必须考虑精密陀螺仪的那些特有的要求，诸如：微稳定性、等弹性、润滑限度、轴承动力学，以及长时期物理和化学稳定性等。这些要求，连同精密仪表的要求和结构，产生基本的轴承设计。设计的特点包括基本的尺寸和结构、材料、安装方法、预载、转速、润滑、接触角、座圈槽的曲率(槽——滚珠区配)、内或外支承面的让角、承盘的结构等等。对于大部分参数必须给定公差。

本节讨论金属和几何形状，特别着重讨论标称值的附贴性，或者公差控制。特殊结构的

設計規範不予討論，因為它們複雜並取決於該陀螺儀的要求的細節。例如，取決於陀螺儀將受到的加速度環境，取決於在加速期間(振動或穩定狀態)所要求的性能。關鍵的軸承參數可能是接觸角、滾珠數目、座圈槽曲率 and 預載。轉矩限制將著重於基本尺寸、轉速、預載、座圈槽的曲率、周圍環境、潤滑和承盤。如以上簡短的幾例表明的那樣，軸承設計是十分關鍵的，但是過於複雜，這裡不能概括。後面幾節將討論特殊的幾何變量對潤滑和軸承動力的影響。

1. 金 屬

鋼制的陀螺儀滾珠軸承的要求不同於那些用其它材料制成的載荷較重的載重軸承的要求，在某些方面更嚴格。陀螺儀軸承是典型的輕載荷軸承，它的最大赫茲應力一般接近 140 公斤/毫米² (200,000 磅/吋²)，或者更小。從製造一直到應用經過很仔細地處理以後，陀螺儀在一適度的溫度中工作，在惰性氣壓下(一般是氦)，溫度大約為 66°C (150°F)。那麼，為什麼我們關心製造這種軸承的鋼材的性質呢？

這種鋼材必須滿足兩個主要要求。第一，陀螺儀性能等級要求極高的微觀尺度穩定性，無論是在受力還是不加負荷，並且在大的溫度範圍(-65°C 至 +107°C)內，不管是處於工作熱循環中，還是貯存，均要求保持極高的微觀尺度穩定性。第二，微觀組織必須在陀螺儀軸承特殊旋轉的條件下，仍能正常的產生化學和物理性質，並保持座圈和滾珠表面的界面和彈性動力潤滑。在這一點上，清除彈性流體動力薄膜刺破所產生的碎沫是極其重要的。

52100 和 440C 都是最常使用的陀螺儀軸承鋼，已證明能滿足這些要求。另外一些鋼也可以成功地用於陀螺儀軸承，如 M-2，M-50，和 W-B-49。已有多年歷史的最常用的陀螺儀軸承鋼是 52100，十分令人滿意。但是反復出現的不可估計的腐蝕是一個問題。在過去的若干年里，440C 由於其抗腐能力和成功的應用，已獲得較大的聲望。儘管主要由於 440C 的碳化物

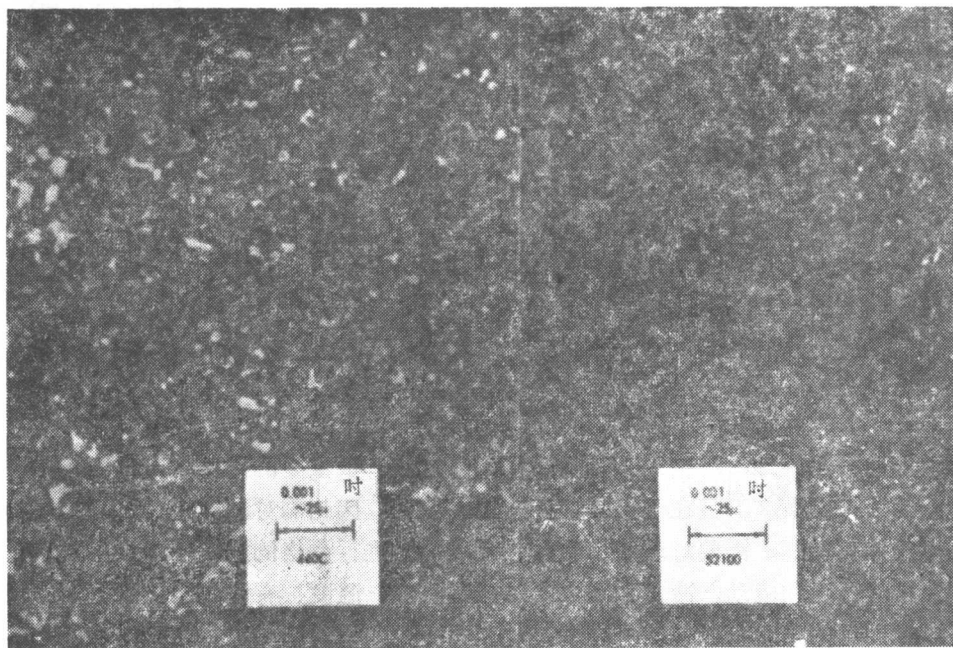


圖 4 440C 和 52100 鋼微觀結構的比較

較大引起微觀結構的差異(見圖 4)，這兩種鋼都容易製造出所要求的幾何形狀和表面光潔度。檢驗鋼時，考慮的因素包括：化學成份、微觀結構、碳化物的形狀、尺寸、分布、對熱處理的響應。最後一項包括：微觀結構、強度、硬度、殘余奧氏體、抗腐蝕力和穩定性。

儘管已証實用這兩種鋼都能成功地製造出陀螺儀軸承。但在選擇和應用 440C 和 52100 鋼時，仍需特別注意。包括：保證沒有非金屬夾雜和控制加工變量，諸如熱處理，淬硬狀態下切削金屬的各道工序。

在高應力的其它類型的軸承中，夾雜的存在是有害的，因為夾雜提供了疲勞破壞的始點。對陀螺儀軸承，夾雜也是一個嚴重的問題，而且由於不同的原因：它們限制表面產生一層完整的流體動力薄膜，並和刺破薄膜的毛刺配合作用，可能引起化學的和特殊的污染問題。這些影響將在第三節更詳細地講到。本節主要是講關於鋼的認識問題。

儘管採用了公認的測定方法，如 JK 法來檢驗鋼的鈍度，但是鋼中仍然可能存在夾雜，從而導致軸承表面粗劣，製造效率低。用一般的方法檢測鋼中的條狀夾雜尤其困難。改進鋼材鑑定方法的途徑是測定棒材區，比一般測定的小的板條截面更能代表軸承。這個方法採用機械加工的标准棒，此棒具有直徑逐漸變小的台階，這些台階代表座圈槽作用面的直徑。然後，搪磨這些台階，微觀檢查夾雜(圖 5)。用這種技術和一般的方法鑑定過的大量鋼材，已表明用搪磨的台階形棒材進行鑑定，與座圈槽表面的形狀和生產率的关系更為密切。

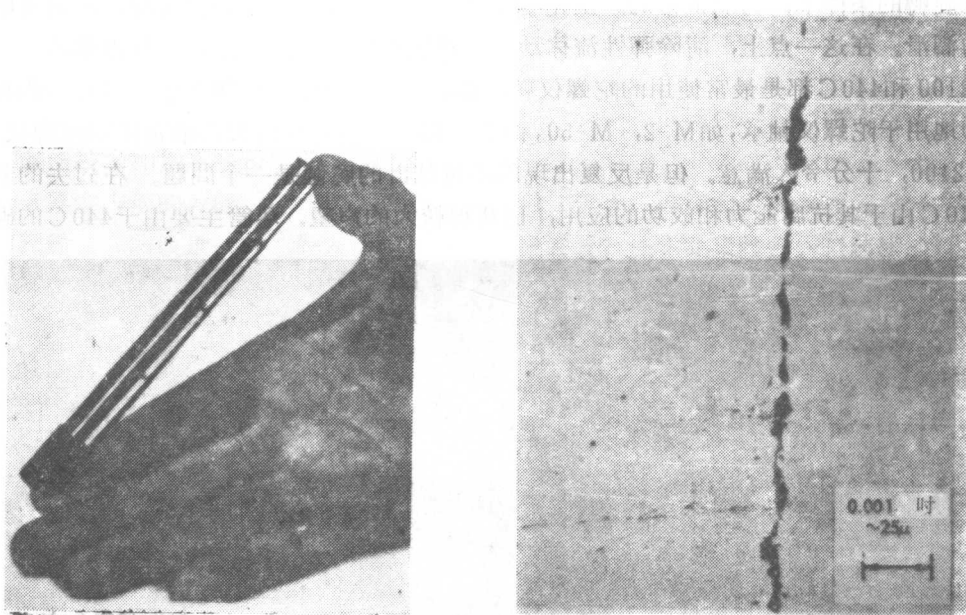


圖 5 對金屬夾雜的檢查

軸承部件的熱處理，對精加工軸承獲得上述性能有很重要的作用。其重要性不僅在於確定最佳的熱處理參數，而且在於保證符合選定的數值，因此需對試樣進行試驗。

在奧氏體化期間，需要對環境、溫度、定時更換進行嚴格的控制。淬火的要素是溫度、時間、油槽清潔度和攪動。冷卻和回火要求控制時間、溫度、有時要求控制介質。根據需要為保證質量而作的試驗可以包括：硬度、對表面變化和微觀結構進行金相檢查(圖 6)以及尺寸穩定性。



图 6 热处理表面的改进

現今，經過正确选择、試驗和处理
的鋼材，可以滿足目前陀螺仪提出的最
严格的性能要求。

2. 几何形状

标称的軸承形状及其变化对确定陀
螺仪寿命和性能起重要的作用。对于寿
命，几何形状影响应力級、分隔座圈和
滾珠的彈性流体动力薄膜的厚度和潤滑
剂的控制。对于陀螺仪性能，几何形状
影响軸承动力、潤滑稳定性、陀螺仪对
加速度場的反应。此外，几何公差級影
响陀螺仪的质量稳定性。

导致陀螺仪軸承技术出現的早期的主要因素之一是測量工具和技术以及制造方法的
发展，使几何公差从典型的 0.005 毫米(0.0002 吋)减少到 0.0005 毫米(20 微吋)的量級。这种
改进直接有利于陀螺仪质量的稳定，因为軸承和轉子、軸承和軸的配合从而可以依靠公差配
合，而不依賴选配。另外，預載可靠性提高，軸承动力特性同样获得改进。然而，軸承寿命
本身不会受到多大的影响，除非进一步改进座圈槽几何形状，从而改进槽表面特性。

彈性流体动力薄膜的厚度，显然受局部应力級的影响，而局部应力級又受座圈槽偏心率
和横向曲率的影响。槽本身的偏心率是各种几何参数的产物，这些几何参数包括：圓度、倒
角、槽对端面和端面对端面的平行度、同心度、端面对孔和端面对外径的垂直度以及安装变
形。軸承制造技术已提高到使偏心率保持 5~50 微吋的範圍內，然而，安装尺寸和力必須小
心地控制，以防止由于安装变形引起的相当大的偏心。

座圈槽横向曲率也必须严格控制。压力区彈性流体动力薄膜的厚度是局部横向曲率的函
数。預防槽和平面的連
結轉角的过于曲折是重
要的。异圓或挖圓槽之
結果，侵入压力区，并
在某些情况下影响到座
圈四周的局部曲率不均
匀。图 7 表示这种边缘
异圓的結果。

(Talyrond)圓度检
查仪和許多其它圓度測
量装置的发展，使得可
靠的測量座圈槽偏心率
和横向曲率有了可能。
因此，运用目前軸承技
术，可以获得并測量今

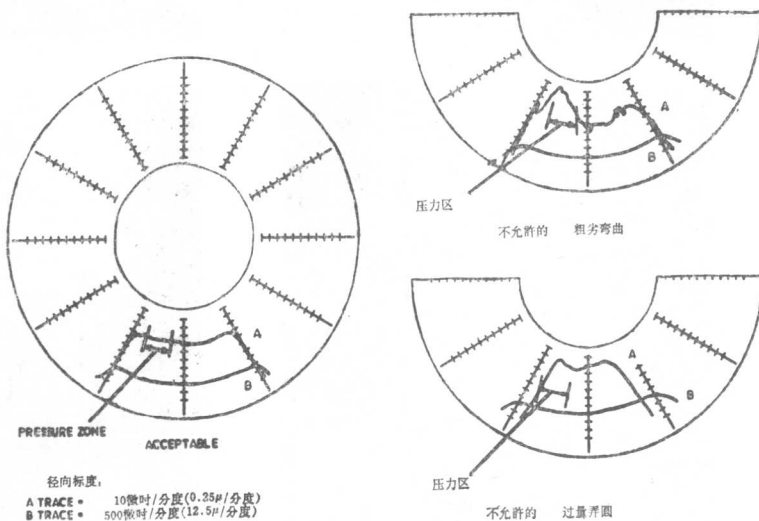


图 7 軸承座圈槽横向曲率的(Talyrond)描跡

天所要求的等級的几何形状。

三、表 面

必要的彈性流体动力薄膜的产生和保持，是座圈槽表面图形和化学性质的作用。表面必須清除刺破薄膜的毛刺，必須利用化学作用支承潤滑膜。低速边界层潤滑同样取决于这些因素。

1. 图 形

光亮还是有阴暗？平滑还是有横紋？这个关于最佳的座圈槽的表面图形的問題，是多年来經常爭論的問題之一。持平滑表面观点者希望通过减少峯谷之間的高度，在相对表面尖峯之間，保持尽可能大的彈性流体能力薄膜間距。而持条紋表面观点者的理由是在高点之間的凹处可以貯存潤滑剂。每一种观点都引用令人信服的数据，并提出各种附加的理由，証明某一种光洁度比另一种优越。

实际上，两种类型的表面都已經在最严格的陀螺仪軸承运轉的条件下，成功地工作了数

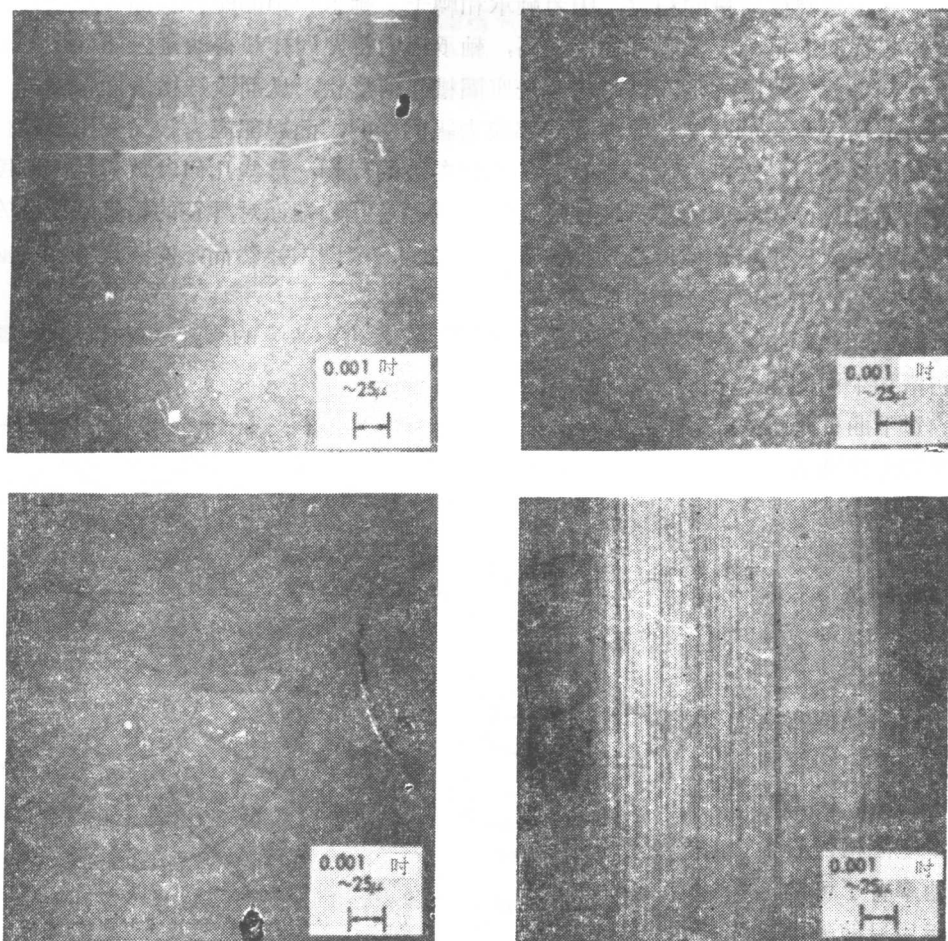


图 8 用各种方法获得的合格的座圈槽表面光洁度

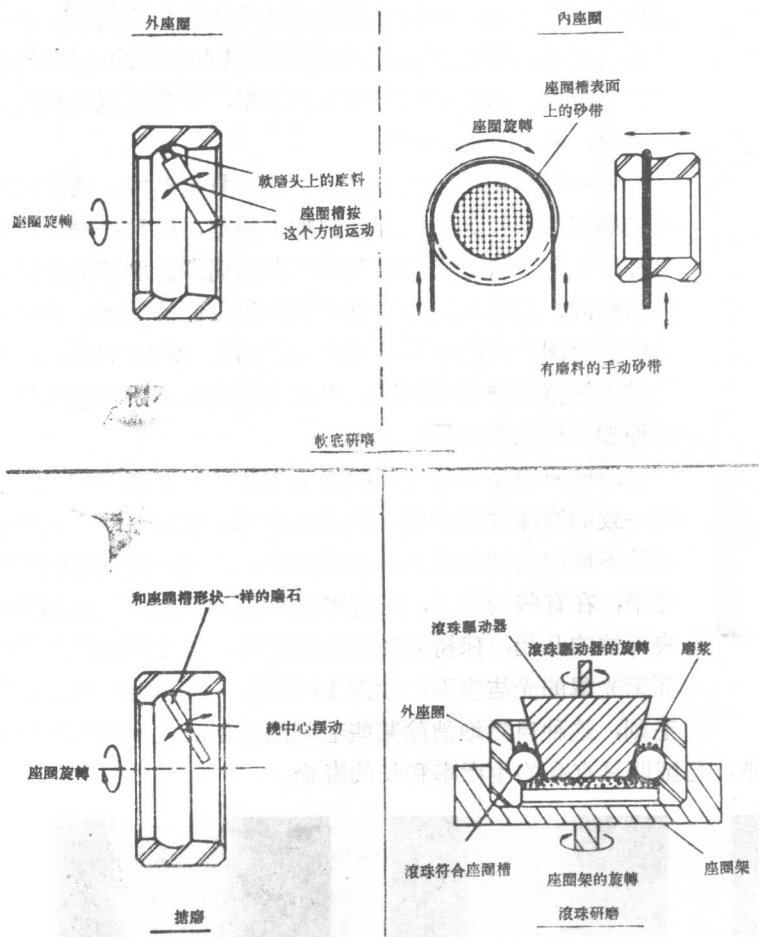


图 9 座圈槽表面光整技术

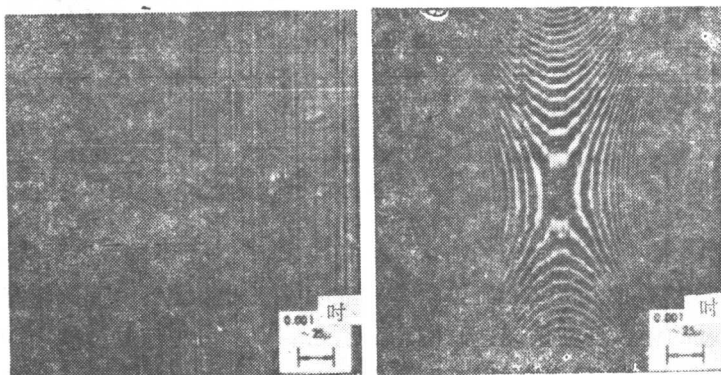
素。座圈槽圓周和橫向所要求達到的幾何形狀，以及產生無毛刺的表面，是兩個主要因素。但也必須考慮到特殊的和化學的污染、表面的完整性(包括沒有污斑)、光整痕迹的“層次”、容易檢查和經濟性。一些軸承座圈光整技術見圖 9。

大半最常用的光整技術是用磨料在繩、帶、紙、樣軸或其它衬墊物上研磨。這種方法一般可以改進磨後的圓度，但容易降低橫向凹槽幾何形狀的等級。它產生典型的有條紋的表面，並對金屬中的雜質或由於形成“慧星”狀條紋所產生的特殊污染有十分敏感的反作用(見圖10)。槽的表面紋理好象高起的“慧星”狀圖形和其它

千小時。軸承首先強加重的載荷，並浸沒在乙稀乙二醇中運轉，可以獲得鏡面座圈槽，這些軸承表面光潔度讀數小於 0.3 微吋。而表面光潔度為 3 微吋的粗研的軸承，也能很成功地運轉。用滾珠研磨和搪磨的平滑表面，也能很好地工作。這些光潔度舉示於圖 8。

從道理上講，平均的表面磨光似乎沒有特殊意義。因為突出在平均表面之上的個別的毛刺可能刺破彈性流體動力薄膜，引起損壞。反過來說，為了保持潤滑油池，需要粗糙的光潔度。而用油適當濕潤的任何表面，將保持足夠的潤滑劑厚度，以使之產生所要求的 5~15 微吋的彈性流體動力薄膜。

下面考察一下影響軸承座圈光潔度選擇的各因



10 軸承內座圈槽表面的“慧星”圖形

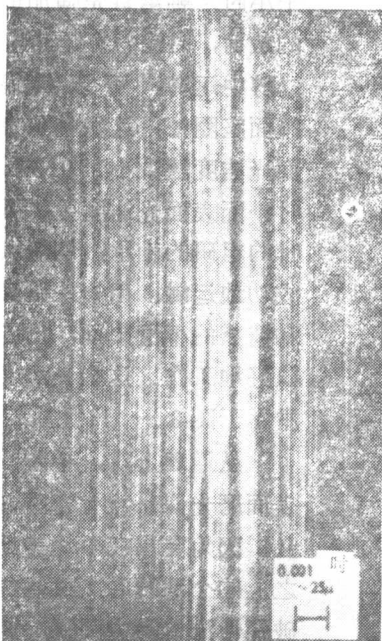


图 11 以 2400 轉/分成功的
運轉一万小时以后的
R₄ 軸承外座圈槽

圓周方向的毛刺，因此对这些特征的检查更为困难，花錢也多。有条紋的光整表面，如果同时具有良好的几何形状、清除了毛刺、污染和其它有害的因素，那将可以获得很长的寿命。图 11 就是一例。

另一种常用的光整方法用一块往复运动的、成形的磨石搪磨座圈槽。如果正确控制加工规范，这种搪磨能产生极好的几何形状。光洁度取决于循环周期、磨料的选择、和搪磨液。这种加工方法也可能产生凸起的毛刺，表面光洁度的范围在有条紋到接近光亮之間。图 12 表示，随着改进了的搪磨技术的发展，表面光洁度也不断获得改进。这种加工也能产生极好的軸承。

滾珠研磨是一种較新的加工方法，用研磨膏和与座圈槽一致的滾珠进行研磨，滾珠由旋轉的錐体驱动。这种加工法不能改进初始的座圈槽的圓度，但可产生极好的横向曲率，在有些情况下，它有形成W型的特点，可以控制中央部位的凸起，保持它在压力区之外。滾珠研磨产生均匀而无光澤的光洁表面，如图 13 所見，并不会产生凸起的毛刺，这种自然地消除某些毛刺的作用，大大簡化了檢驗

問題。用这种技术光洁的軸承，已証明具有高的生产率和长的寿命。

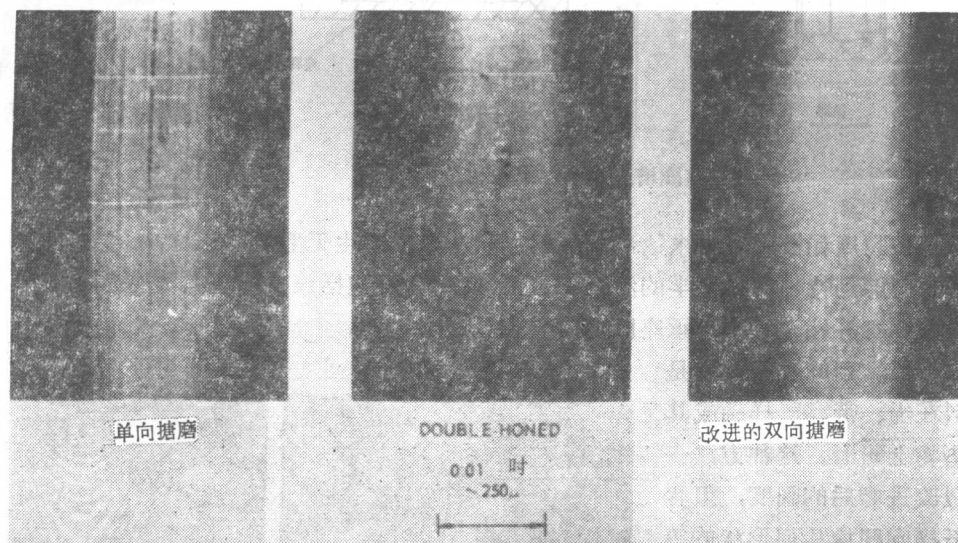


图 12 搪磨的 440C 外座圈槽光洁度的改进

使用其它一些精加工和跑和技术，获得了不同程度的成功。值得注意的是一种新的实验性的方法，用特殊的流体預轉，証明可获得座圈槽表面象鏡面一样的軸承，運轉十分成功。重载的軸承浸在循环过滤的乙稀乙二醇中，以較低的速度旋轉，可产生光洁度很高的座圈槽表面。之后，在陀螺仪工作的条件下，試驗了这种軸承，証明有很长的有效寿命。

另一种有趣的預轉技术是在热的磷酸三个甲笨酯溶液中进行的。結果，表面外貌仅有輕

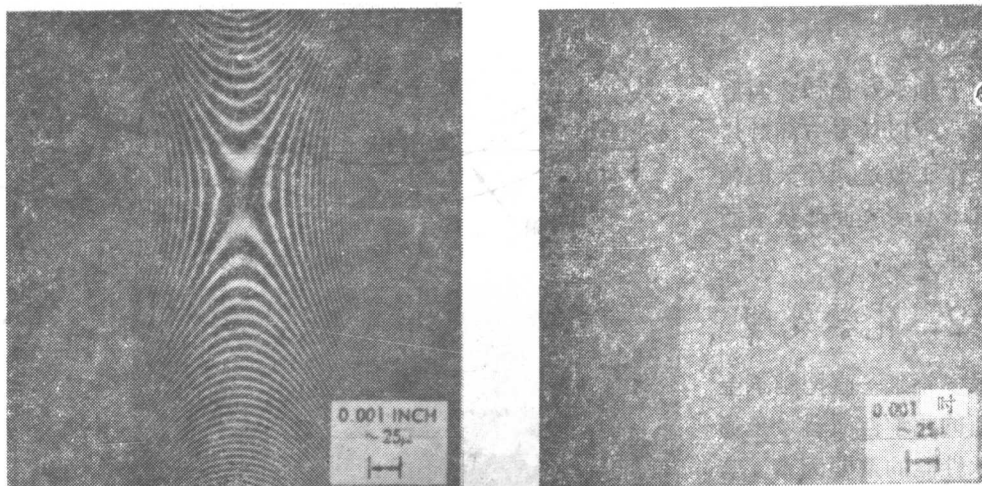


图 13 典型的滚珠研磨的光洁度，R_{440C}内座圈槽

微的变化，但轴承证明了磷酸三个甲苯酯复层的有益作用。另外，用这种方法在一定条件下可以大大提高轴承产量和寿命。一组含夹杂高的金属制造，并用普通方法研磨的轴承呈现出大量慧星状图形。同时，这组轴承也表明产量低、寿命短。这些轴承的几对曾用磷酸三个甲苯酯进行运转，则它们的产量和寿命都显著地提高。隆起的凸凹不平的频繁性和严重性的减少，被认为是这个重大的改进的重要项目。

表面图形的重要性，推动了改进光整方法的研究，也导致表面光洁度鉴定方面的重要发展。因为有了应用光学和电子显微镜的技术，机电式表面光洁度测量装置已有改进。简单的干涉显微镜是特别有用的，如图 10、13、25 和 26 所见。

关于表面图形鉴定的一种有趣的技术是润滑薄膜电阻测量计(图14)。这种装置具有一个润滑的滚珠，压着旋转座圈槽，旋转座圈槽驱动滚珠。滚珠——座圈槽电路是预备测量凹凸接触或者连结情况的，当电阻低于预先给定的值时，通过计算油滴每转出现的个数而测得。

特殊的表面特征也可以在一阳极射线管上鉴定，载荷、转速、润滑是变化的。这个装置受表面电导率、毛刺以及表面化学复层的限制。利用这种设备可以更进一步洞察座圈槽表面的情况。

另一种对表面和最贴近表面的次表层鉴定的有效方法是座圈槽斜切法，表示在图15。为了保护，边缘座圈槽电镀，然后倒角。对由此获得的断面进行抛光并腐蚀，以便提供机械放大的了(由于斜切放大)座圈槽的表面轮廓。接近表面的金属微观结构可用这种方法鉴定，并可获得微观硬度读数。这些读数明显地表明，接近于表面的金属比座圈的本体

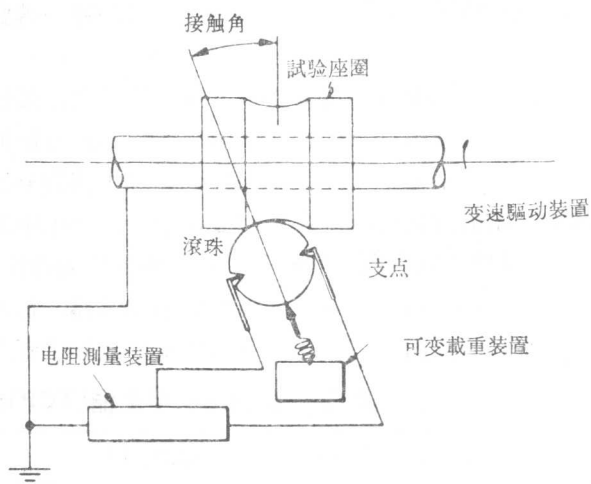


图 14 润滑薄膜的电阻测量装置

部分稍硬些。

由于轴承寿命和表面形状有关，所以从多方面对这个因素作了改进。今天的轴承技术不必受表面形状不适当的限制了。

2. 化学处理

很多年来一直把轴承金属表面的化学性质看做是影响轴承性能的重要因素。若干年来，为提高轴承边界层润滑的可靠性，很注意改进表面化学处理。然而，最近才确定不恰当地施加化学处理，对轴承的寿命有不利影响，不管是边界层润滑还是流体动力薄膜润滑。

已经表明，润滑过的但未处理的 52100 或 440 C 轴承，在正常载荷的条件下，以 1 转/分的速度运转 1 至数小时，就将招致润滑剂降解，表面损害。在很低速时，遇

到的与边界层润滑有关的另一个有趣的现象是，在不同的时间里所接受的外观相同的一批轴承里，轴承的旋转力矩相差很大。在以每分钟一轉旋轉时，不同批的轴承，其轉矩变化达三倍之大。

这两种情况均可用很简单的办法修正之：延长轴承金属零件在磷酸三个甲苯酯中的热浸时间，其作用可见表 1。这样做后，以 1 转/分旋轉的轴承寿命可从一个或几个小时增加到几百个或者几千个小时。各批轴承每分钟 1 轉的摩擦力矩都接近在同一个低的水平上。这种有益的作用估计是由于作为杂质存在于磷酸三个甲苯酯中的酸性磷化物与钢表面的化学反应产生的。440 C 钢表面的硝酸钝化也能使低速寿命比未处理的表面所达到的寿命长些。如第 1 节所叙述的，轴承在磷酸三个甲苯酯中预运转，也能产生上述有益的作用。

有害的表面化学变化，或称污染，或称“毒化”，是最近查明的，有很大的潜在意义。

表 1 磷酸三个甲苯酯(TCP)对低速寿命和力矩的影响

R ₄ 轴承，每分钟一轉，軸向載重4.5公斤	精加 2 斤	涂复TCP 后
力矩(克，厘米)	2~6	2~3
损坏时间(小时)	1~5	200~1000

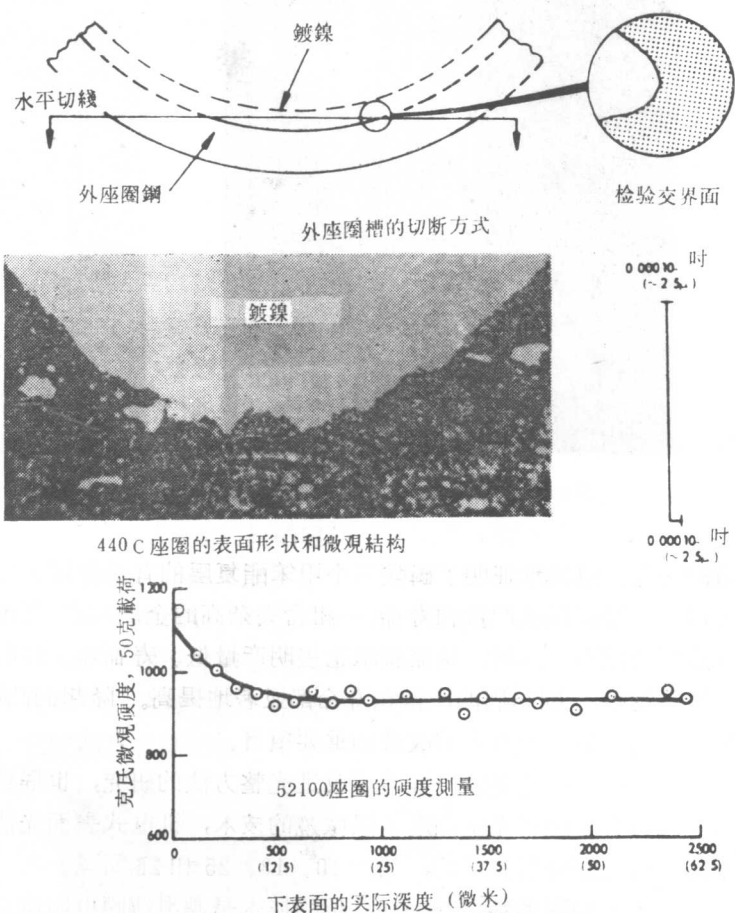


图 15 外座圈槽的斜切断面

在經過通常的鑑定技術鑑定后，認為是優良的兩組軸承，在界層和彈性流体動力運轉條件下，都呈現早期非典型損壞時，才首次發現這個問題。如第 1 節所述，當浸在磷酸三個甲苯酯中預運轉時，這些軸承的表面也顯示某種不尋常的變異。圖 16、17、18、19 表示這些現象。

現識別污染的最有效的方法，是測定油滴在座圈槽表面的散布速度，污染了的軸承顯示不良的油潤性，散布試驗及其典型結果表示在圖 20。這個研究發現中毒的可能原因，克服這些原因，導致未經污染的兩組之一中剩余的軸承交貨。在陀螺儀制造計劃中，這種“清潔”的軸承已成功地使用，因此更進一步證明了這個論點。

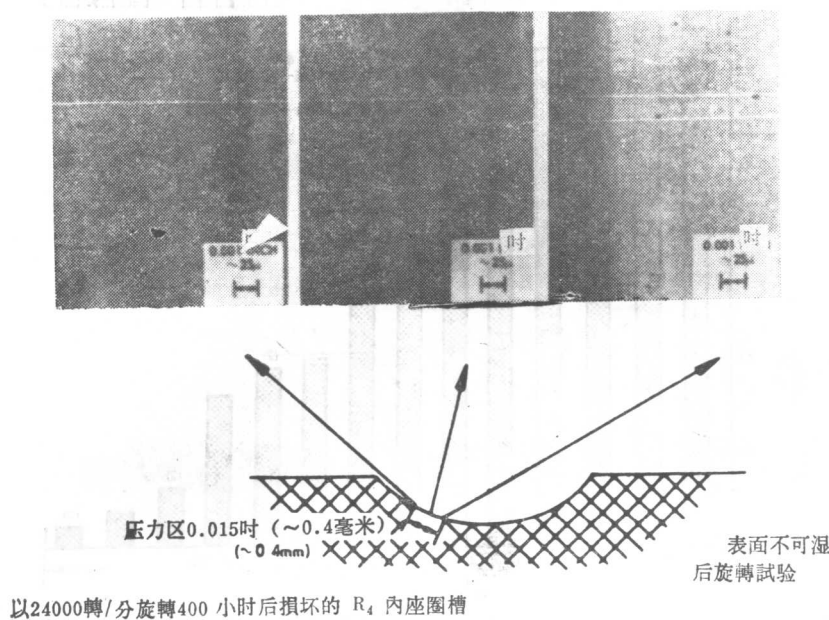


圖 16 化學污染的軸承表面的早期損壞情況

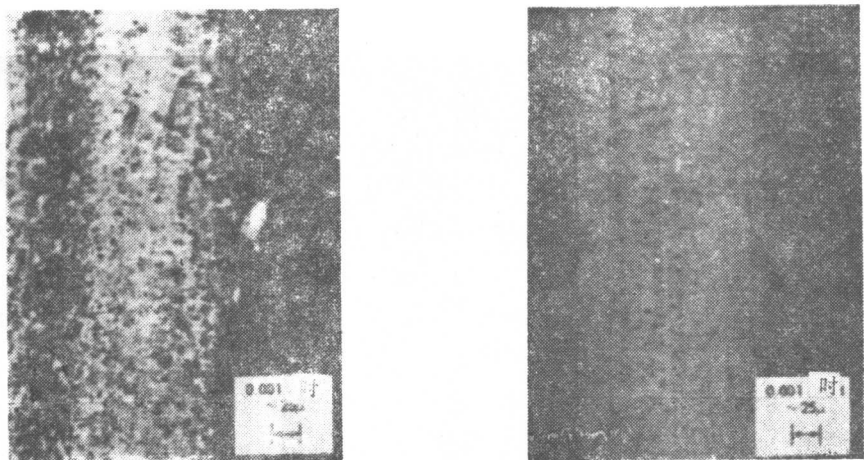


圖 17 表面變化，早期的軸承損壞

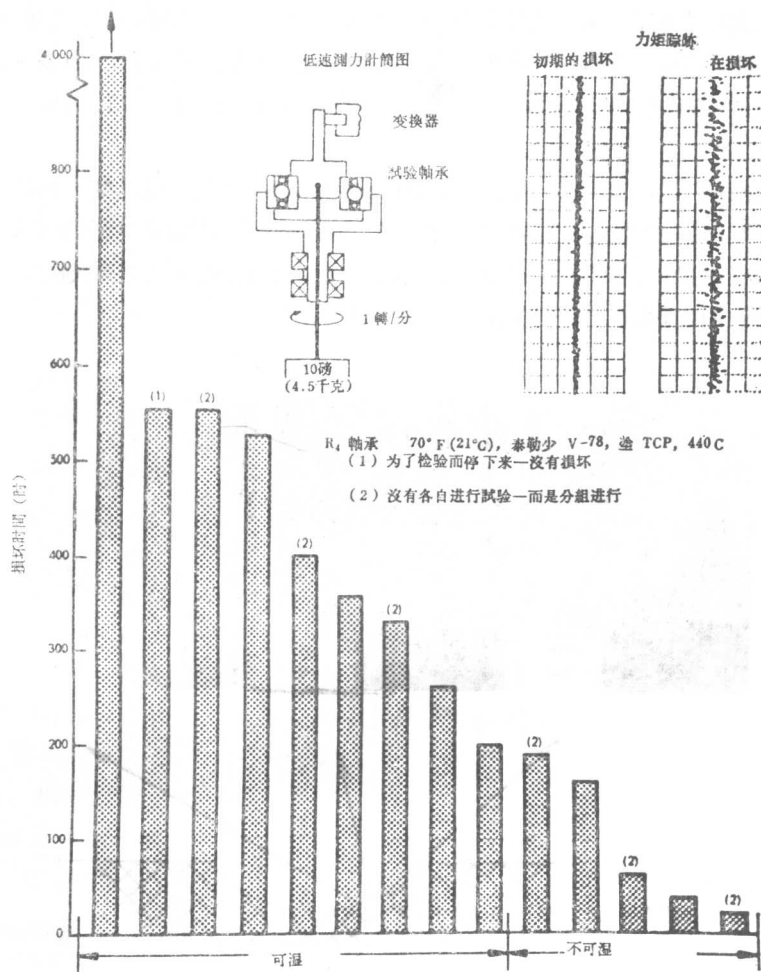


图 18 表面化学效应对低速寿命的影响(在 1 轉/分条件下)

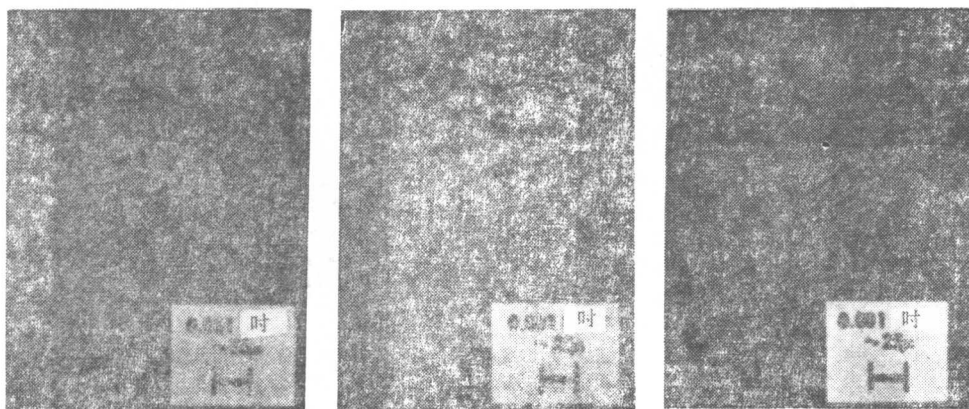


图 19 磷酸三个甲苯酯(TCP)中預运转, 內座圈槽表面的变化

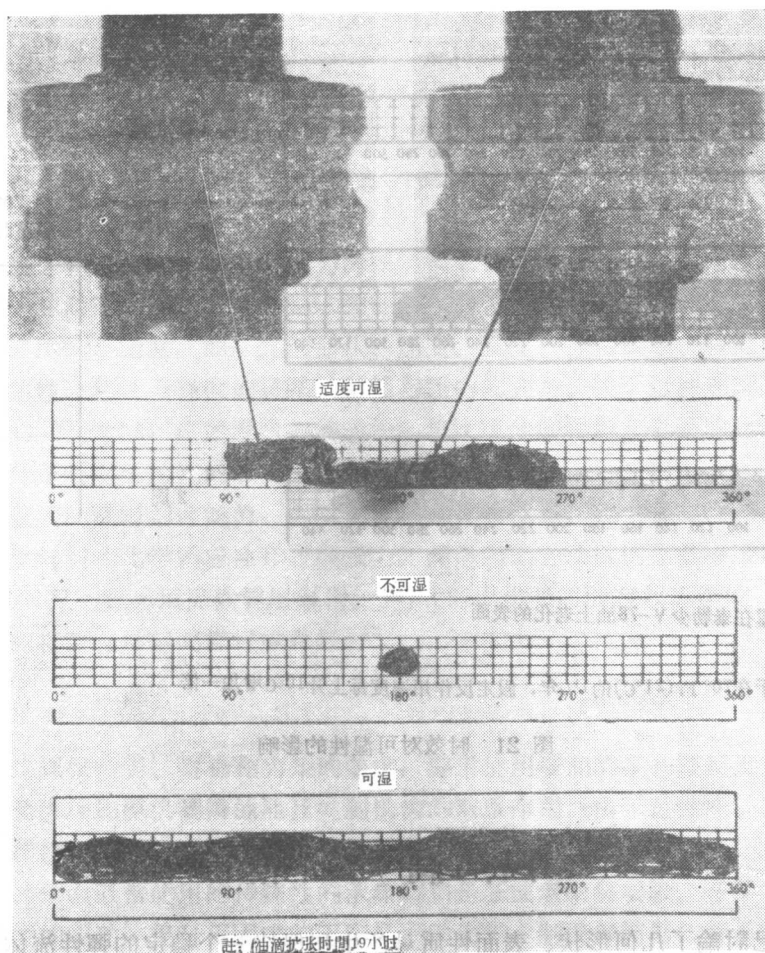


图 20 座圈槽油散布记录

发现这一点是很重要的，即表面润湿的不好是污染的一种症状，但不能用以解释为什么会早期损坏。例如，轴承表面可以用油润湿，其办法诸如在油中浸渍或沉积溶剂溶液。一经润湿，油不能自行从表面除去。那么，加到润湿表面的油滴将十分快地散布。绝大部分轴承是在这种预润条件下使用的。关于损坏的解释，可能在于高压区域内润滑剂性能差异，尤其是表面附近的分子状态的不同。

用特殊的溶剂清洗技术，可使许多中毒的轴承变成“可湿”。这些轴承的寿命大大地延长了，无论是在界层还是在流体动力运转条件下。这项研究，明白地确认了由贮存在油中的轴承的时效中偶然发现的有益作用，以及这个作用与表面化学性质关系。简言之，在油中进行人工时效（高温浸渍），使得一些中毒的轴承变得可湿（见图 21）。

每批轴承的状况的不可预测是一个老问题，探讨表面化学性质对这个问题的可能有的影响，是十分有必要的：这一批和那一批轴承，尽管轴承本身及其用途无明显的差异，但是有些很快损坏，成品率低，而有的寿命长。这个研究的当前努力目标是：建立有关上述效应的基础，改进识别方法，预防，修复，以及确定所有要求化学处理方法等。目前已有基本的识别技术，而纠正或预防的方法尚在寻找中。