



用于润滑环境（流体动力系统中）的 新型低摩擦可加工金属复合轴承

摘要

金属复合轴承在许多润滑应用环境中已相对成功地取代了传统含铅青铜或双金属轴承。但直到最近，聚四氟乙烯基金属-聚合物滑动轴承仍无法匹配金属合金轴承的组装尺寸精度，从而限制了其在特定领域的应用，在这些领域中，轴间隙控制对于运行效率的提高或噪声、振动和不平顺性的抑制发挥着极其重要的作用。

为填补这一空白，GGB 发起了一个开发项目，目的是开发一种金属复合轴承解决方案，通过安装时进行加工以改善内径控制，同时还不影响自润滑聚四氟乙烯顶层相关摩擦学特性。

本文分享了 GGB 的开发经验，并着重介绍了所面临的挑战以及经验教训。除 GGB 内部验证测试之外，本文还将通过成功取代金属合金滑动轴承的两个案例研究着重描述这一新产品概念的独特特征和性能优势。上述案例研究将分享客户反馈以及两家主要开发合作伙伴现场性能评价相关信息；这两家合作伙伴代表着两种不同的润滑应用领域和市场，即齿轮泵和压缩机。

背景介绍

自全球第一套自润滑金属 - 聚合物滑动轴承发明五十年以来，其应用仍在持续增长，并且已扩展到润滑应用和流体动力系统领域。此类自润滑轴承在很多情况下已取代传统滚动元件或金属合金轴承。

此类轴承在该领域的成功应用很大程度上得益于图 1 所示多层复合结构提供的摩擦学特性独特组合，其中包含：

1. 一块金属背板，主要由钢材质制成
2. 一个烧结多孔青铜层，孔隙率约为 30%，内有专门配制的聚四氟乙烯混合料
3. 由相同聚四氟乙烯混合料制成的一个薄顶层（通常称为“盖层”）。

摩擦、磨损、疲劳和耐腐蚀性等轴承关键特性很大程度上取决于填料选择与比例。

GGB 中国

上海市长宁区延安西路 2633 号

美丽华商务中心 D307 室

T: 86 21 6219 9885

F: 86 21 6219 9805

China@ggbearings.com

www.ggbearings.cn

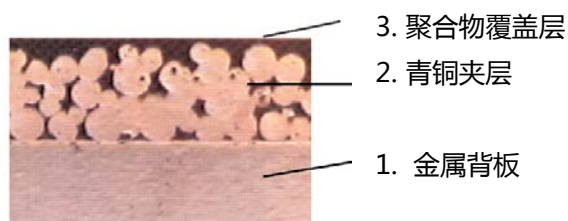


图 1：聚四氟乙烯基金属复合轴承典型截面

此种材料配置通常是设计工程师的首选材料，因为同金属合金轴承相比，聚四氟乙烯层摩擦相对较低，而且在边界润滑或润滑不足时可进行自润滑。此外，此种自润滑聚合物顶层较低的刚度在弹性流体动力（EHD）效应的作用下促进流体膜形成，使此类轴承对轴配合不当和边缘荷载的耐受能力远远高于金属轴承。

尽管存在上述性能优势，金属合金滑动轴承仍广泛应用于公差要求较高的领域。金属合金轴承同质构成使其在装配过程中可加工至较大深度，同时还不影响滑动面的性能。相形之下，人们不建议对传统聚四氟乙烯基金属复合轴承进行加工，因为聚四氟乙烯层厚度通常仅为 5-25 μm ，而且底部青铜层过多外露会对性能造成不利影响。表 1 汇总了上述类型产品在公差和摩擦方面的一般权衡要素。

表 1：各类轴承的摩擦与尺寸特征。

	金属合金	传统金属复合物	理想解决方案
摩擦	一般	良好	良好
尺寸精度	良好	一般	良好

金属复合轴承减少内径变化通常依赖于二次定型技术，需要将专门设计的超大销插入组装孔，以塑性形式减小轴承壁厚并改变直径。然而，此项技术会产生较大的销干涉，在腐蚀性条件运行时存在轴承性能受损风险。若要采用此项技术，始终建议进行周密的验证测试。

例如，对于压缩机而言，先前进行的研究证明可在不严重缩短磨损寿命的情况下实现较高水平的抛光作业⁽¹⁾。尽管如此，该方法产生的尺寸公差从未能匹配机械加工金属合金衬套的精度。

某些应用环境中可通过间隙控制实现性能优化。事实证明，相对于相同间隙水平的金属轴承，配备金属-聚合物衬套的压缩机效率提升量高达 3%⁽²⁾。齿轮泵制造商同样希望通过改善尺寸公差提高机械效率并减少噪声和振动。

GGB 中国

上海市长宁区延安西路 2633 号
 美丽华商务中心 D307 室
 T: 86 21 6219 9885
 F: 86 21 6219 9805

China@ggbearings.com
www.ggbearings.cn

项目详细信息

基于上述市场要求，GGB 发起了一个开拓性开发项目，旨在开发一种油润滑领域专用低摩擦金属复合轴承，通过组装后加工改善尺寸精度。开发策略的关键要素在于，加工完成后要在表面上保留足够厚的填充聚四氟乙烯层，以确保传统金属-聚合物的前述性能优势得以保留。

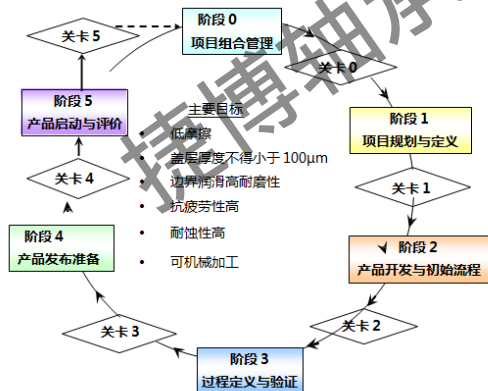
该项目目标提出两项关键技术挑战，需要在材料与工艺开发之间实现微妙平衡：

首先必须找到一种在多孔青铜结构上制作足够厚聚四氟乙烯层的方式。GGB 标准加工技术主要依赖聚四氟乙烯水分散和填料凝聚产生湿聚合物共混物，从而有效渗入青铜孔；然而，此项技术的最大盖层厚度仅为 $30\mu\text{m}$ 。此项限制的原因是：浆料内必须去除水分和溶剂，以免因起泡而超出该厚度。

基于齿轮泵应用工程经验的初步计算表明，若要实现足够的加工余量和功能操作层，盖层厚度绝对不得小于 $100\mu\text{m}$ 。机械加工完成后的功能操作层目标设计厚度为 $5\text{-}60\mu\text{m}$ 。

第二项挑战是开发并优化适当的聚四氟乙烯和填料配方，不仅与所用工艺方法兼容，而且还可在加工过程中尽可能减少毛刺，同时在磨损、疲劳和耐蚀性方面提供出色的轴承油内运行性能。

整个项目从概念到解决方案完全遵循一系列标准程序以及分专业阶段关卡过程相关重要节点要求。GGB 标准开发方案由 6 个不同的阶段组成（见图 2）。



GGB 中国

上海市长宁区延安西路 2633 号
美丽华商务中心 D307 室
T: 86 21 6219 9885
F: 86 21 6219 9805

China@ggbearings.com
www.ggbearings.cn



图 2：GGB 产品开发周期和总体目标

阶段 0 和 1 基本上主要涉及项目初始评价与规划。此阶段项目总体目标是达成一致意见并转化为可衡量的具体开发目标。此种情况下，最小可接受性能极限根据摩擦、磨损、疲劳和耐蚀性能进行设置，每种情况相对于得到验证的标杆性金属-聚合物材料（已根据 GGB 标准条件完成试验）的已知性能进行量化和定义。该标杆性产品的“同等”性能视为每种情况下符合预期的目标。

其他需要考虑的次要产品特征包括化学和温度耐受性、聚四氟乙烯层附着力和材料最终形状进入常见轴承形式和几何形状（例如：垫圈、圆柱形或法兰衬套）的能力。

产品“可加工性”方面存在诸多挑战。需要考虑如何限制青铜外露量，因为青铜外露会增加咬合或轴承寿命缩短的风险。此外还需证明整个加工内径范围内可对聚合物厚度进行充分控制，或者厚度变化不会对性能造成不良影响。典型机械加工考虑要素（例如：擦伤或撕裂可能性及其对表面光洁度或质量的影响）必须予以考虑。

第 2、3 阶段将开展主要开发活动并集中精力识别、验证和确认出一种适当的材料和工艺方案。

可行性研究阶段对所有已知聚四氟乙烯加工方法进行探索研究，看其是否允许形成厚层。结果证明，聚四氟乙烯刮削是当时最具可行性的途径，可形成填料聚合物胶带的持续固化长度。然而，在耗费大量时间和精力后，该工艺经证明强度不足，主要原因在于胶带韧性和难以渗入青铜孔。未能实现足够的渗透深度，或者材料应力过大导致青铜层顶部表面起泡或裂纹。这些不良效应在两种情况下均可能致使材料在机械加工或轴承运行中出现分层或拉毛。由于未能消除上述风险，项目几乎陷于停滞，需要进行全面可行性评审。

经过深思熟虑之后，公司决定与一家聚四氟乙烯胶带专业制造商展开合作开发并优化非固化高填充聚四氟乙烯胶带。非固化聚四氟乙烯胶带的可塑性和柔韧性明显高于其他材料，可在确保材料所受应力最小的情况下增强渗透能力。显然，此种方法在渗透后还需要一个填充聚四氟乙烯层固化过程，该过程中同时还需优化滑动面分子结构和摩擦学性能。

初步试验表明，带体渗透难易程度对聚合物共混物的成分十分敏感。多种实验混合物进行了尝试和测试，所选

GGB 中国

上海市长宁区延安西路 2633 号

美丽华商务中心 D307 室

T: 86 21 6219 9885

F: 86 21 6219 9805

China@ggbearings.com

www.ggbearings.cn



配方主要是基于 GGB 先前在油润滑环境有效填料组合方面的经验。成功渗透的各种材料首先在车床上进行实验室加工试验，而后接受摩擦学筛选。最终有一种材料从其他材料中脱颖而出，超出了所有摩擦学性能预期。该成分组合主要由聚四氟乙烯构成，同时还包括两种其他关键填料成分；一种是氟化钙，它是能够在油环境中有效发挥作用的一种增强填料，许多 GGB 润滑产品都包含此种成分。

经过全面测试并证明能够制成带材并制造具有足够盖层厚度和质量的轴承之后，材料设计最终完成。而后，项目进入第 3 阶段，工作重点是建立并验证一种能力极强的高容量材料和轴承制造工艺。此阶段工作需要对现有加工线进行大量投资和改造。

加工线改造完成后，通过一系列研究优化了复合带材连续成卷生产能力，同时深入了解加工线速度、温度、所施加压力、带材厚度和张力等关键参数在尺寸和摩擦学特性方面的复杂相互作用。这是一个极其耗时的过程，因为每次更改都需要采用各类试验装置和条件制造和测试大量不同材料。

确定最优制程窗口后反复进行大量材料和轴承制造试验验证并确认工艺稳健性，然后通过全面测试确认产品稳定性。

整个项目进行过程中会经常出现各种意想不到的问题和挑战，但每次都能通过制定计划全面解决相应的问题，唯一的后果便是不断延后的时间表。

客户意见

尽管实验室测试很早便表明此种原型解决方案可能会在轴承性能及其可加工性方面实现项目目标，但大家普遍认为，潜在最终用户独立评价能够提供宝贵的意见，并确认 GGB 的研究方向是否正确。

为此，GGB 邀请一家大型齿轮泵制造商和一家大型涡旋压缩机制造商作为合作伙伴加入该项目，以便对产品进行评估和优化。碰巧的是，由于铅金属方面的环保压力，两家客户正在为其现有金属合金轴承积极寻求替代轴承解决方案。

这些应用情形提供了两种极具挑战但却截然不同的运行环境（见表 2）。另外，两家客户采用两种完全不同的轴

GGB 中国

上海市长宁区延安西路 2633 号
美丽华商务中心 D307 室
T: 86 21 6219 9885
F: 86 21 6219 9805

China@ggbearings.com
www.ggbearings.cn

承形状，分别代表小直径和大直径零件。

表 2：运行条件和轴承要求对比

	涡旋式压缩机	齿轮泵
轴承直径 (mm)	40-60	8-42
负载 (Mpa)	3-6	25-50
速度 (m/s)	8-11	2-5
润滑剂	油 (2%) + 制冷剂	油
间隙 (μm)	70-100	25-50
温度 (°C)	65-107	80-120

案例研究 1：齿轮泵轴承

齿轮泵（或电机）提供一种紧凑型高效高压装置，特别适合多种流体动力应用情形。齿轮泵概念非常简单：两个相互啮合的齿轮转子在一侧引入流体，然后将其从另一侧排出。因此，此类泵机应用数量极大，特别是建筑、农业、汽车、航空和采矿行业。例如，齿轮泵在汽车工业中主要用于动力转向系统，而在建筑和非公路用设备行业则用于牵引动力输出系统。

齿轮泵性能很大程度上取决于齿轮转子、转子转动腔室和转子支撑轴承的设计和尺寸精度。金属复合轴承通常用于由泵送流体润滑并在流体动力学条件下（润滑膜厚度极小）运行的高能泵。

此类轴承必须具备较低的磨损率，因为磨损会影响齿轮转子的相对位置，进而影响泵效率。除由泵输送压力造成的高轴承比负载之外，轴承表面还受到齿轮相互作用所致动态负载，要求轴承材料具有足够的疲劳强度。此外，轴承表面还会发生某种形式的气蚀。理想情况下，轴承必须适当融合所述特性，同时保持极低的摩擦特性。

所选泵设计是新一代“静音”齿轮泵的组成部分，需对特定衬套尺寸进行严格控制，以降低噪声、振动和不平顺性。图 3 展示了传统薄层聚四氟乙烯金属复合轴承无法满足的装配公差。客户主要依赖四种含铅青铜轴承的机械加工，它们组装在两个铝制双筒轴承座内，提供必要的齿轮转子支撑精度。

GGB 中国

上海市长宁区延安西路 2633 号
 美丽华商务中心 D307 室
 T: 86 21 6219 9885
 F: 86 21 6219 9805

China@ggbearings.com
www.ggbearings.cn

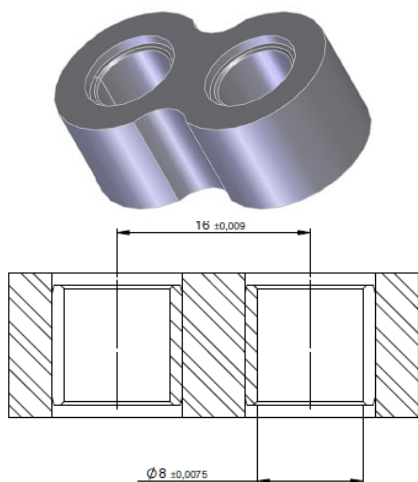


图 3: 衬套组件临界尺寸和目标公差

此种特定情形下，GGB 全面负责制造和供应整个衬套子组件，因此可以在全自动生产条件下积累所有衬套的一手组装和制造经验。

铝座半成品件首先进行机械加工并组装轴承。所装轴承内径同时扩至规定尺寸，然后切割两个平行槽。最后，轴承壳外部相对于轴承内径加工至最终尺寸和形状。

在含铅青铜轴承标准加工设置和条件下，GGB 可加工金属-聚合物原型初始试验未能满足成品尺寸和质量要求。具体问题包括：圆柱度不佳；聚合物加工切屑仍附着于孔内；孔周围聚四氟乙烯滑动层不均匀，偶见局部露出青铜。

鉴于此，某大学机械加工系发起一项研究，以期积累更多经验并建立此类产品的机械加工推荐指导准则和工装设计。与此同时，GGB 工艺工程师进行了一次自动加工组装线衬套座演练，旨在优化加工设置与条件。上述活动使得每种已确定的问题全面解决，但事实证明，该金属-聚合物方案并不是简单地“偶然”替代任何金属合金轴承。该金属-聚合物方案需要最终用户进行一定的过程优化和验证试验。由于盖层厚度仅为 100μm，必须特别注意工装设置和调准。

迄今为止，此特定应用的加工经验总共已涵盖四百多万个组装完成的衬套（两百万个衬套座）。产品概念和过程经证明满足客户所有尺寸规范。对于 0.015mm 的内径公差，所得离差为 0.08mm，对应的 Cpk 为 1.67。

GGB 中国

上海市长宁区延安西路 2633 号
美丽华商务中心 D307 室
T: 86 21 6219 9885
F: 86 21 6219 9805

China@ggbearings.com
www.ggbearings.cn



机械加工完成后，孔表面粗糙度通常为 $1.2\mu\text{m}$ 左右。尽管该数值略高于金属合金轴承，但由于材料的柔软、整合与润滑特性，这不会构成任何问题。

泵中进行的第一次原型实验室测试足以吸引客户对开发项目产生兴趣和关注。客户之后进行的大规模现场试验在摩擦改善和抗咬合性方面证实了材料相对于加铅青铜的预期性能优势（特别是在启动/停止过程中）。人们认为，较低模量聚合物层提供的阻尼效应具有降噪效果。

案例研究 2：涡旋式压缩机轴承

涡旋式压缩机用于压缩空气或制冷剂，因此广泛应用于商用空调系统、中央热泵和汽车空调。该压缩机工作原理是依靠两螺旋涡管之间的相对运动，从而封闭和抽吸涡管之间的流体腔。为实现高效运行，某些类型的涡管设计在孔位和轴承间隙方面需满足极其严格的公差要求。

所选开发合作伙伴使用加工后的含铅铝合金轴承，并积极寻求无铅替代方案。制冷剂法规变更要求通过提升轴承性能应对压力的升高。由于金属合金轴承在处理这些负载时存在一定困难，设计工程师考虑使用金属复合轴承。但他们发现，较低公差要求所致低效率仍然是为满足政府季节能效比额定值要求时必须克服的主要障碍。

另外，根据规定，轴承方案必须：

- 适用于油品和制冷剂
- 能够支承三种较严苛的试验方案：
 1. 无润滑反复干启动测试（短时高负荷接触）
 2. 边界/混合膜润滑（长时间低负荷接触）
 3. 液力试验（理想条件）
- 耐疲劳
- 耐侵蚀
- 抗咬合
- 可耐受碎屑和边缘负载

首先选择支承 15 吨压缩机主外壳和绕动涡管的两个上部轴承进行原型试验。总体设计和轴承位置如图 4 所示。

GGB 中国

上海市长宁区延安西路 2633 号

美丽华商务中心 D307 室

T: 86 21 6219 9885

F: 86 21 6219 9805

China@ggbearings.com

www.ggbearings.cn

早期试验得到的成功结果促使我们的合作伙伴将试验扩展至更高负载的 30 吨压缩机。

同案例研究 1 相反，该案例所述机械加工并非采用自动化，而是利用客户执行的车床手动加工。

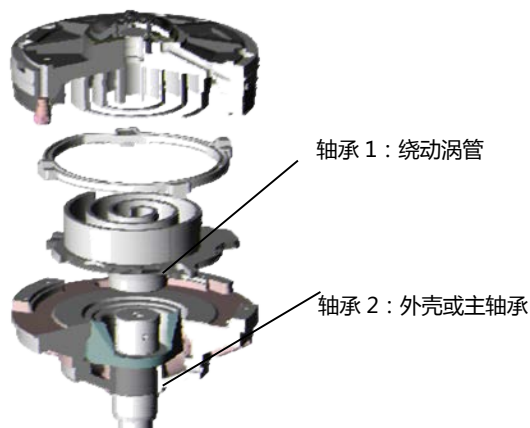


图 4：涡旋式压缩机概念与试验轴承位置

在两年时间内，该客户进行了一系列严格的压缩机实验室试验，将原型置于极限条件，以便研究最常见潜在失效模式。虽然专用高应力加速试验显示，该环境条件下可能产生疲劳损伤和腐蚀，但事实证明，此种情况在启动后并非渐进过程。

标准条件下，此种材料在所有方面都较为出色。

产品属性

项目八年期间，随着开发合作伙伴提供有价值的反馈和建议后实现的全面逐步优化，产品原始概念不断演化。

最终得到的产品 DTS10™ 显著扩展了传统金属聚合物轴承技术的性能能力；考虑到该产品的尺寸公差，其为金属合金轴承主导的应用领域提供了一种可行替代方案。

DTS10™ 轴承结构（见图 5）标称盖层厚度为 0.12mm（至少 0.1mm），可在严格受控条件下满足较高公差要

GGB 中国

上海市长宁区延安西路 2633 号

美丽华商务中心 D307 室

T: 86 21 6219 9885

F: 86 21 6219 9805

China@ggbearings.com

www.ggbearings.cn

求，同时还不会影响金属复合轴承的基本优点。



图 5：DTS10™截面结构

轴承性能属性

标准 GGB 试验装置和试验条件用于评价 DTS10™性能。所有关键轴承特性均进行测量，并与原设计目标中规定的金属-聚合物参照产品对比。在可行情况下，加工对材料特性的影响也进行了验证。采用推荐加工条件和做法时，每种情况下均未观察到显著或不良性能影响。

摩擦

摩擦计试验在各种干燥和油润滑条件下证实，主要成分采用聚四氟乙烯天然润滑剂的滑动面摩擦水平较低。

图 6 和图 7 比较了负载不断增大时 DTS10™的摩擦性与干燥和润滑条件下标准双金属轴承材料的摩擦性。

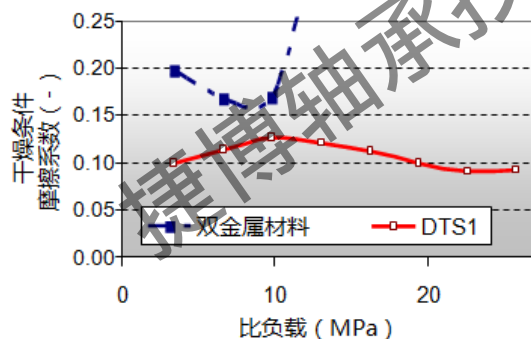


图 6：DTS10™与标准双金属轴承材料在干燥条件下的摩擦-负载关系。

GGB 中国

上海市长宁区延安西路 2633 号

美丽华商务中心 D307 室

T: 86 21 6219 9885

F: 86 21 6219 9805

China@ggbearings.com

www.ggbearings.cn

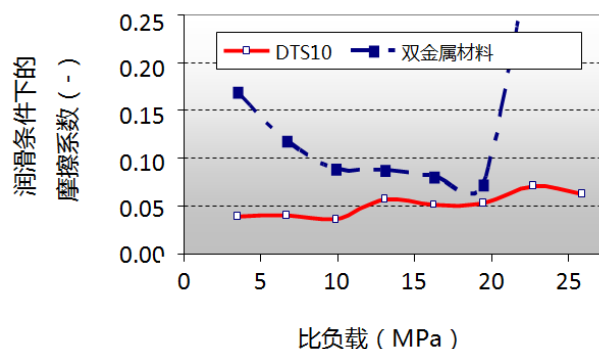


图 7：DTS10™与标准双金属轴承材料在油润滑条件下的摩擦-负载关系

每种情况下，自润滑金属复合轴承摩擦性明显降低，负载能力显著提高，抗咬合性明显改善。

与设计目标中规定的目标基准金属-聚合物的摩擦性对比如图 8 所示

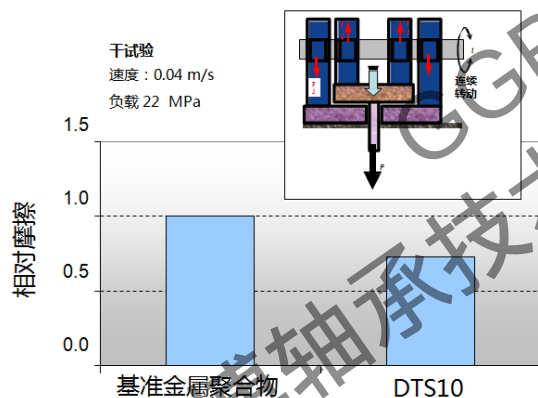


图 8：DTS10™和金属-聚合物基准材料之间的相对摩擦（干）。

边界润滑耐磨性

事实证明，DTS10™的耐磨性远高于加工和未加工状态的行业现有金属-聚合物基准材料。DTS10™边界润滑耐磨性同金属-聚合物基准材料性能对比参见图 9。

GGB 中国

上海市长宁区延安西路 2633 号
 美丽华商务中心 D307 室
 T: 86 21 6219 9885
 F: 86 21 6219 9805

China@ggbearings.com
www.ggbearings.cn

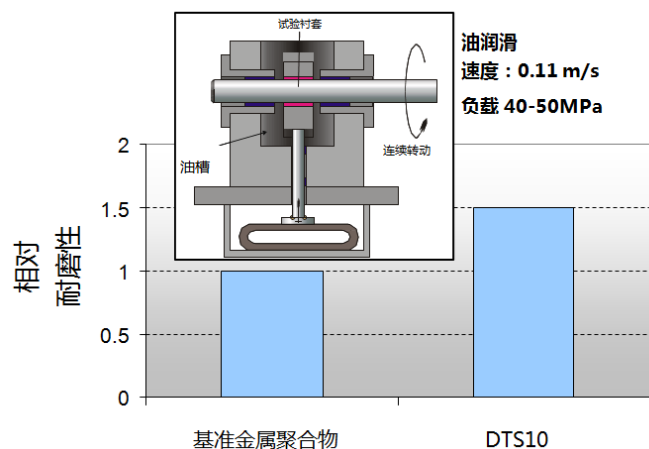
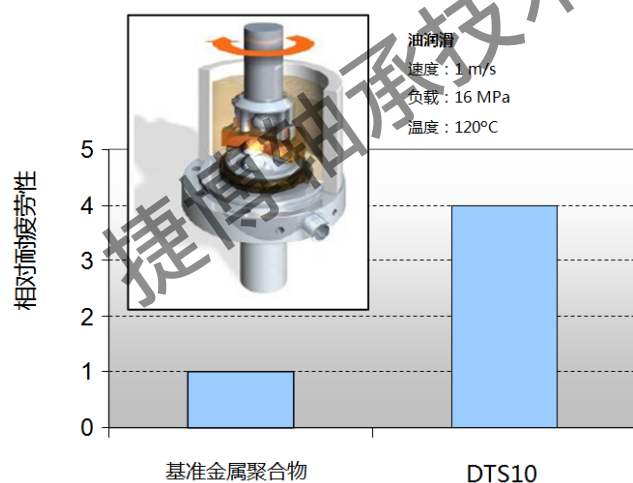


图 9：稳定负载和边界润滑条件下的相对耐磨性。

耐疲劳性

齿轮泵和涡旋式压缩机对耐疲劳性要求特别高，因为轴承要在油中承受高频动态负载。该机制条件下，DTS10™的疲劳损伤耐受性特别高，在出现任何损坏迹象之前可承受逾 1600 万次运行，比现行金属-聚合物标准高出 4 倍左右。

DTS10™相对于基准金属-聚合物的疲劳损伤如图 10 所示。



GGB 中国

上海市长宁区延安西路 2633 号
美丽华商务中心 D307 室
T: 86 21 6219 9885
F: 86 21 6219 9805

China@ggbearings.com
www.ggbearings.cn

图 10：DTS10™和金属-聚合物基准材料之间的相对耐疲劳性。

气蚀耐受性

轴承耐气蚀能力经测量后与项目基准金属-聚合物产品对比。相对耐气蚀性参见图 11。

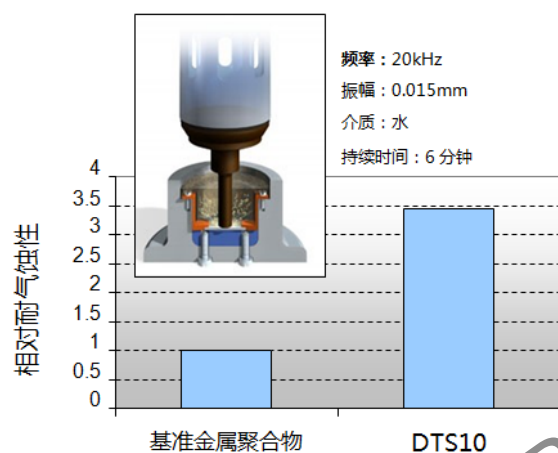


图 11：DTS10™和金属-聚合物基准材料之间的相对耐气蚀性。

耐腐蚀性

腐蚀性油品（特别是硫含量较高的油品）对轴承中的青铜具有化学腐蚀性。将腐蚀性特别高的标准试验油加热至 140°C 进行的 DTS10™ 实验室腐蚀试验表明，本产品耐化学性明显高于其他大多数金属-聚合物产品。此种方法还适用于加工后的 DTS10™。

图 12a-12c 展示了 DTS10™ 和其他基准轴承材料经 100 小时曝置热油后的腐蚀程度对比图。

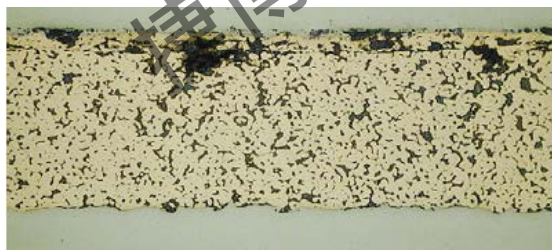


图 12a：腐蚀试验后的行业标准双金属轴承

GGB 中国

上海市长宁区延安西路 2633 号
美丽华商务中心 D307 室
T: 86 21 6219 9885
F: 86 21 6219 9805

China@ggbearings.com
www.ggbearings.cn



图 12b：腐蚀试验后的金属-聚合物基准轴承



图 12c：腐蚀试验完成后的 DTS10™

GGB 试验表明，DTS10™ 优于所有项目原始性能指标，性能完全高于现有最佳聚四氟乙烯行业基准产品。齿轮泵和压缩机客户测试与反馈结果也证实了这一结论。轴承性能强化主要得益于周密设计的配方和混合物料制备过程中所用专用专属加工技术。

加工特征

GGB 和客户加工试验证实，此种材料适合大多数标准加工工艺，包括车削、拉削、铰孔和铣削。每种情况下通过研究试验为每种工艺建立推荐规程。

研究表明，表面粗糙度对加工条件极为敏感。例如，图 13 明确描述了各种刀具进给速度的影响。随后证明，较高的表面粗糙度会导致启动摩擦稍稍升高。尽管如此，表面在磨合过程中会快速改变，相应地返回最优摩擦水平。未发现表面粗糙度还有其他影响。

GGB 中国

上海市长宁区延安西路 2633 号
美丽华商务中心 D307 室
T: 86 21 6219 9885
F: 86 21 6219 9805

China@ggbearings.com
www.ggbearings.cn

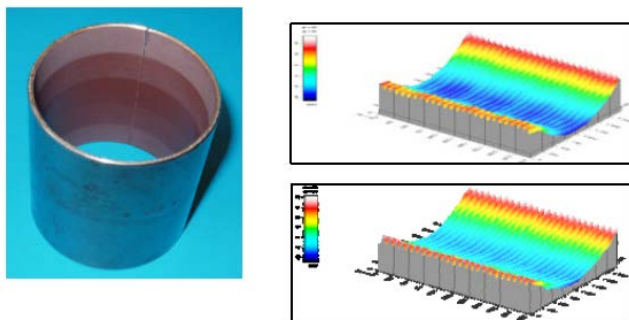


图 13：刀具进给速度对表面粗糙度的影响

聚四氟乙烯等含氟聚合物较低的导热性会导致聚合物材料和刀具在高速切削运行过程中发热升温，进而造成聚四氟乙烯变形和刀具过度磨损。因此，加工过程中必须使用润滑剂避免此种过热效应。另外，为尽可能减少刀具磨损，推荐使用 PCD（多晶金刚石）或涂层硬质合金（K10）刀具。

DTS10™轴承孔加工经证明可显著改善轴承同心度。试验证明，已装配轴承的圆度可达 16μm，但加工后可降至 2μm。

经验教训

GGB 认为该项目取得了成功，因为所得产品经证明符合或高于所有原定项目目标。然而，此类项目总是能够在总体管理吸取经验教训。为此，GGB 开发方案第 5 阶段包括一项常规评审。

该项目证明，同第三方合作伙伴（无论是最终用户还是某一领域的专家）合作能够产生巨大效益。如果 GGB 未选择与其他聚四氟乙烯加工专家合作，某些技术壁垒便永远无法突破，项目很早便会以失败而告终。

同样，如果客户未及时提供产品缺点的早期反馈信息，产品可能会在预定应用领域过早发布，从而导致发布后需要大量调试或在市场上遭遇极大挫折。但事实上，产品优点和局限性在发布之前已为大家所熟知，而且可与客户开放沟通。

GGB 中国

上海市长宁区延安西路 2633 号
美丽华商务中心 D307 室
T: 86 21 6219 9885
F: 86 21 6219 9805

China@ggbearings.com
www.ggbearings.cn



120 μ m 的标称盖层厚度经证明适合进行机械加工，但必须足够仔细且采取适当控制措施。尽管如此，该技术不一定适合所有客户的加工能力，因此需要与客户工程师合作优化设计和加工设置。对于此种潜在局限性，还可继续寻求更大的盖层厚度。

本项目最初预计需要四年时间便可实现解决方案的确定与优化，但由于种种原因（包括过分乐观的规划和技术问题估计不足），实际耗费八年才完成此项目标。因此，项目有好几次都处于岌岌可危的状态，但市场需求和整个团队寻求解决方案的信心与决心最终令管理层继续支持该项目。基于该目的，GGB 的阶段关卡流程及其定期评审对于确保活动和时间安排变更的适当沟通与定期讨论效果特别明显。

大家一致认为，针对 DTS10™ 开发的专有加工技术和所获经验将为用于其他运行环境（包括无润滑环境）的下一代高性能轴承提供一个平台。

结论

本项目旨在开发一种聚合物解决方案，将金属复合轴承的性能优势与传统双金属轴颈轴承的尺寸精度相结合。

随着 DTS10™ 的开发和推出，这一目标得以实现；作为一种融合传统金属-聚合物复合结构所有优势的轴承，DTS10™ 包含一个专门设计的厚聚四氟乙烯盖层，可在安装时进行加工，以改善对装配公差的控制。衬套用于组装成刚性外壳，内径加工时在青铜上方形成 5-60 μ m 的润滑聚合物层。

聚合物覆盖层配方专门适用于润滑应用环境。GGB 测试和齿轮泵及涡旋式压缩机现场试验证实，所有性能指标都能实现。摩擦系数极低，同聚四氟乙烯润滑剂保持一致。这意味着，所述材料在任何流体动力系统中都具有极高的抗咬合性和较高的运行效率。此外，此种材料具有出色的耐化学侵蚀性、耐疲劳性和气蚀损坏耐受性，涵盖了腐蚀性油润滑环境中运行的轴承所需全部重要特性。鉴于上述特性和材料可加工性，金属复合轴承的应用极有可能会扩展至流体动力行业其他领域。

值得注意的是，参与本项目的两家最终用户已在其齿轮泵和涡旋式压缩机上批准应用该解决方案，并希望在将来的新项目中深入挖掘各种优势。

GGB 中国

上海市长宁区延安西路 2633 号
美丽华商务中心 D307 室
T: 86 21 6219 9885
F: 86 21 6219 9805

China@ggbearings.com
www.ggbearings.cn



参考文献

1. Michael R. Kim , Yuan H. Peng , Christopher D. Small ; 二次成型后自润滑轴承的摩擦学性能 ; 2008 年 7 月。
2. Christopher D. Small ; 压缩机应用中金属-聚合物衬套的设计内容 ; 2006 年 12 月。

定义、首字母缩略词和缩写词

EHD : 弹性流体动力

ID : 内径

PTFE: 聚四氟乙烯

SEER : 季节性能效比

DTS10 : DTS10 是 GGB 的一个商标

GGB China
捷博轴承技术（苏州）有限公司

GGB 中国

上海市长宁区延安西路 2633 号

美丽华商务中心 D307 室

T: 86 21 6219 9885

F: 86 21 6219 9805

China@ggbearings.com

www.ggbearings.cn