

具有适用于积极应用场合的改进型润滑性和 机械加工性的复合轴承设计

Michael R. Kim

GGB Bearing Technology

公司地址：

700 Mid Atlantic Pkwy

Thorofare, NJ, USA

Elena Wapner

GGB Bearing Technology

公司地址：

700 Mid Atlantic Pkwy

Thorofare, NJ, USA

简介

复合材料轴承因其具有较高的强度、卓越的耐磨性能和摩擦特性，以及无需外部润滑的操作能力，而被广泛应用于各行各业。具有最有效摩擦性能的纤维缠绕复合轴承，其尺寸公差历来都会受到缠绕工艺固有加工能力的限制。因为复合轴承通常包含加工过程中容易出现断裂和磨损的连续聚四氟乙烯（PTFE）纤维，所以将复合轴承加工成具有严格尺寸公差的能力受到了一定限制。自润滑纤维/树脂复合轴承技术的最新发展涉及用于克服加工限制，并提供优异的摩擦性能的纤维结构。我们可通过此项工作，深入了解加工限制的本质，以及旨在克服这些限制的材料设计方面的具体进展。

1. 背景

复合轴承已应用于水利工程20余年。在此期间，它始终作为一种用非润滑操作替代润滑脂的机制，并且与已被它替代的青铜轴承相比，经常会起到提高磨损性能和延长使用寿命的作用（1）。边门的位置对轴承的状况（包括复合材料）具有相当大的挑战。含PTFE的复合轴承已被证明可在水电工程（2）以及其他更加广泛的腐蚀性工业应用中提供卓越的摩擦性能。

良好的尺寸公差和稳定性被认为对于复合轴承在水电工程（例如，边门位置）中的成功应用具有非常重要的作用。通常会在缠绕和固化工艺之后，采取某些措施对轴承孔进行二次尺寸测量，以获得目标尺寸公差。这一操作通常作为制造工艺的一部分在轴承上进行。

1.1 东方水泵水轮机

2016年，东方电气公司与GGB公司就其在安徽省绩溪县新设计的抽水蓄能设施的轴承技术解决方案进行了接洽。由于可再生能源可用性与峰值需求量之间的不匹配，并网蓄能被认为是可再生能源发展的关键，但也是可再生能源持续增长的主要障碍。抽水蓄能是迄今为止容量最大的储能方法，也是满足中国不断增长的电力需求的一种重要工具。

该设施对轴承需求在其整体要求中是独一无二的。虽然整个行业对严格公差的需求正变得越来越普遍，但该设施对安装后轴承孔的偏心加工提出了特别的允差要求。对于该设施的设计而言，轴承必须能够适应顶盖偏移的可能性。直到施工后期轴承安装完毕后，才能了解最终的偏移情况，而且这还需要设计和制造方面具有最高的灵活性。

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

此处讨论的可加工轴承产品特别适合满足上述需求。耐磨衬里专为客户轴承安装后的可加工性而设计。热塑性纤维材质内采用的非连续聚四氟乙烯（PTFE）纤维设计使这一有利方面更加突出。可加工轴承在制造中采用了稳定的超大摩擦层，允许客户进行相应的加工，以适应其较高的尺寸精度需要。为了适应此类偏移需要，GGB的跨职能工程师团队计算并设计出了具有适合的尺寸摩擦层，并且可以适应各种偏移尺寸的轴承产品。这种较厚的摩擦层被专门设计成可在轴承安装到相应的外壳内后再由客户进行加工。其衬里的可加工性将在下文着重阐述。

1.2 适用于最佳摩擦性能的复合材料设计：它是一种常见的复合轴承构建方法，利用PTFE和另一种热塑性塑料（如聚酯）的连续捻合纤维，对PTFE纤维进行部分包围或包封，而此类纤维通常粘合性不佳，因此需要在树脂基质（如环氧树脂）内对其进行支撑。也可以将微粒状填料加入到聚合物复合树脂基质中，此类填料包括石墨（1）、聚四氟乙烯（PTFE）（3）或各种其他类型的微粒材料（4）。之前的调查显示，轴承材料设计带来的益处与轴承和配合轴材料的磨损性能有关（5）。

典型的边门条件已在美国陆军工程公司测试规范CERL TR 99/104（2）中进行了定义。该测试需要中等到高等水平的可变负载（23-30MPa）组合，以及抖动（低角度高速振荡）与速度较慢的大角度振荡条件的组合。通过美国陆军工程公司（COE）规范CERL TR 99/104（2），对自润滑轴承在边门应用中的潜在摩擦性能进行了测定。该测试在同一连续测试中使用两个独立的条件来评估轴承性能，如表1所示。

表1：测试条件：美国陆军工程公司COE规范CERL TR 99/104

载荷：	23-30 MPa	抖动条件：每15分钟一次：	
轴承尺寸：	127mmID	+/-1°	+/-15°
轴：	17-4	2Hz	0.1 Hz（10秒全扫描）
硬度：	HRC40		
粗糙度：	R _c ：最大0.4um		

在之前关于当前加工研究中所用轴承类型的研究中，已经对指定的抖动条件下的性能（5）进行了讨论。在使用多种轴对应型的情况下，对该模式下的摩擦性能进行评估，并将评估结果与基线复合材料自润滑轴承（1）进行对比。所研究的轴类型采用薄致密铬镀层、硬化不锈钢（420级）和低碳钢（1040级）。研究结果表明，基线复合轴承会在两个等级的钢材中引起摩擦氧化磨损，导致轴变得非常粗糙。然后，这种轴粗糙度的增加会导致具有聚合物基自润滑磨损表面的轴承出现加速磨损的情况。图1a和图b显示了这两种相伴而生的现象——轴变得粗糙以及伴随而来的轴承磨损。

相比之下，在这项研究工作中，PTFE纤维轴承并没有表现出此类有害反应（5）。图1a和图b显示了这种有利的性能（图表中表示为EDC，即：增强型抖动复合材料）。对于这三种对应型中的任何一种，轴的粗糙度都没有发生显著变化，并且轴承磨损也相应地较低。通过EDC轴承形成的有利的均匀自润滑转移膜，被认为是形成有利摩擦性能的原因。研究结果表明，光滑的转移膜的形成可防止摩擦氧化现象，并消除轴损伤的情况，从而导致较低的轴承磨损和比较稳定的摩擦系统性能。

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

增强型光纤技术还允许使用标准的加工程序。连续的聚四氟乙烯（PTFE）纤维在加工过程中已显示出破裂的趋势，部分原因是与其嵌入的树脂基质之间的粘合性较差。热塑性纤维中含有的非连续PTFE纤维已用于实现摩擦性和机械加工性的有利方面。以上被描述为采用增强型抖动复合材料的轴承，本文中即为采用非连续PTFE纤维复合材料的轴承。

1.3 适用于可加工性的复合材料设计：专门设计用于优异摩擦性能的纤维/树脂复合轴承，通常采用自润滑机制的组合构造。其中一种方法使用的是包括石墨（1）和聚四氟乙烯（PTFE）（3）的润滑微粒状填料的一种组合，或者在相同构造（4）中使用包括多种润滑填料在内的其他填料类型。自润滑材料设计通常包括PTFE纤维，以帮助减少摩擦和降低磨损，其中可能包含额外的热塑性纤维，以提供轴承（1、3、4）耐磨层的结构完整性。这些纤维的结构还可能影响耐磨表面的加工响应性。

本文阐述的实验工作已完成，并借此比较了采用两种不同纤维生产出的复合轴承之间的加工响应变化情况，且这两种纤维均采用的是纤维缠绕制造工艺。其中一种轴承使用了热塑性塑料和PTFE合成物的单独且连续的纤维材质，这些纤维材质被混合并捻合在一起，以形成均匀的纤维束。第二种类型使用的是含在热塑性纤维基质中的非连续PTFE纤维的复合纤维结构。图2和图3显示了突出纤维结构差异的横截面图像。图2b显示了一种突出的长而连续的PTFE纤维。图3b显示了较大的热塑性纤维中包含的多条短且非连续的纤维。

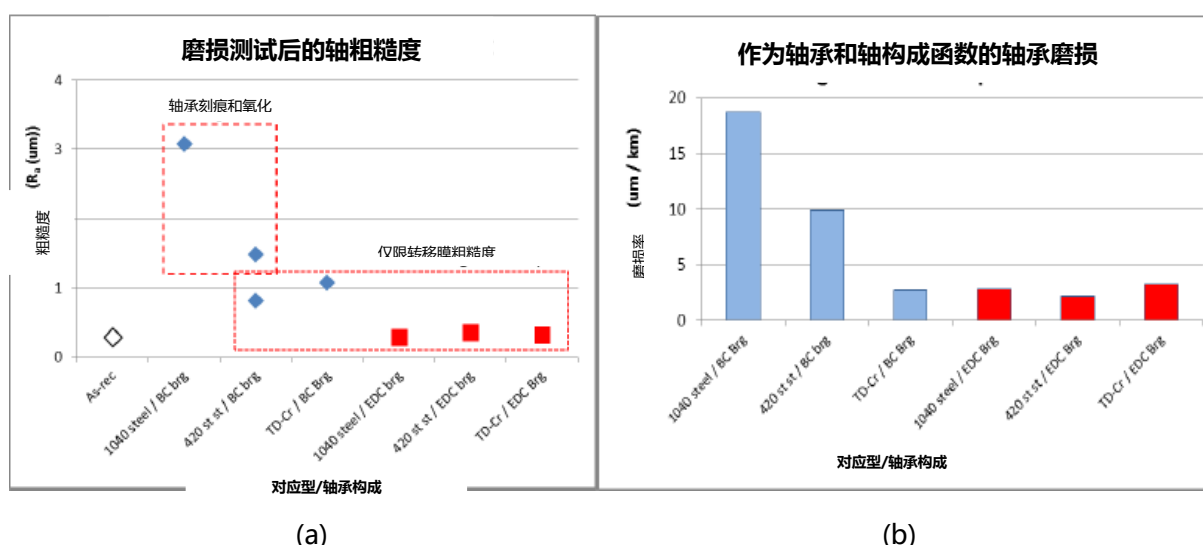


图1：摩擦学数据显示：

（a）磨损测试后基线复合轴承与设计用于增强型抖动性能的高级轴承之间存在轴粗糙度的差异。该轴承与用于研究加工响应的工作中使用的轴承相同；同时也显示了与之相伴的轴承磨损情况（b）。

不管是连续的还是非连续的PTFE纤维类型，都能够提供有利的自润滑特性（1、4）。这两种类型之间的加工响应的显著差异提供了不同的应用条件。通过“标准”加工技术进行的加工被认为是实现最佳尺寸特性的理想方式，同时这种方式还可以在最终制造过程中保持最大的灵活性，并且此类“标准”技术还被认为是通过传统车床和单点加工方式实现的。连续的PTFE纤维在通过上述标准方法进行加工时表

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

现出破裂和磨损的趋势。该结构已被证明可通过原始轴承制造商采用的ID磨削工艺进行加工，以实现严格的尺寸公差。已确认该工艺不得转让给最终用户，因此需要创新替代材料结构，以提供能够被最终用户在最终装配地点通过标准加工技术使用的有利加工响应。

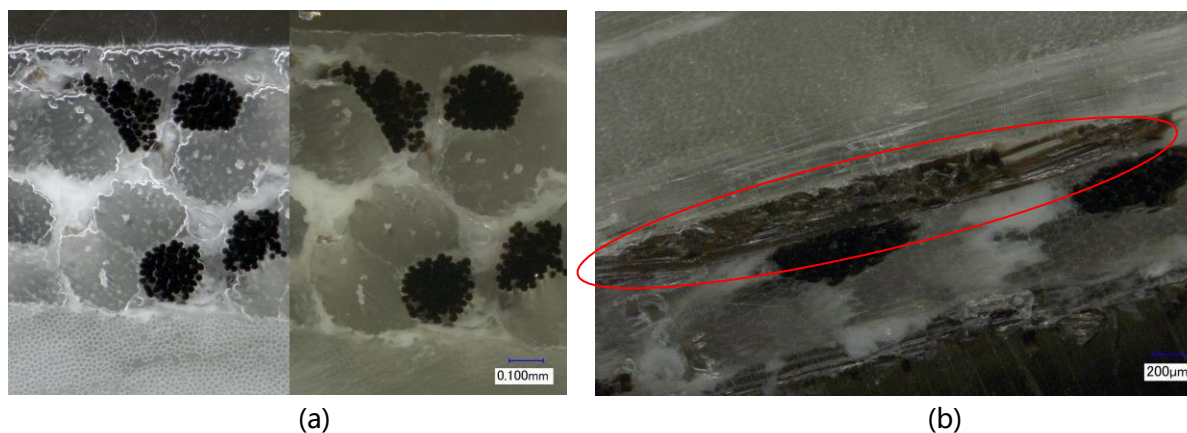


图2：横截面图像显示了连续的PTFE纤维结构。图（a）展示了横向视图中的纤维结构；图（b）展示了纵向纤维，用红色椭圆形突出显示。

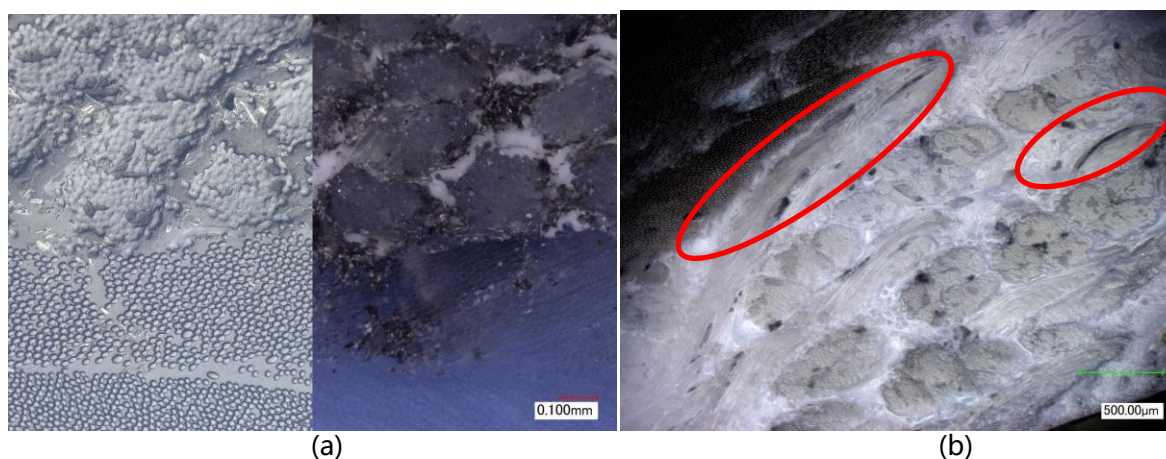


图3：横截面图像显示非连续的PTFE纤维结构。图（a）显示了横向视图中的纤维结构；图（b）显示了纵向纤维，用红色椭圆突出显示。

2. 实验步骤

加工研究：进行了一项旨在研究作为纤维基质结构函数的复合轴承加工响应的加工研究。研究中，将连续PTFE纤维与二次热塑性纤维捻合而成的轴承衬里与用包含在纺成的热塑性塑料中的非连续PTFE纤维并具有复合材料性质的纤维制造而成的轴承进行比较。此外，还设计了一个测试矩阵来对一系列条件进行测试，其中包括：

- 刀具类型（根据不同的刀片半径）
- 表面速度
- 切削深度

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

本研究中使用的轴承内径为127 mm (ID)。刀具类型均采用硬质合金结构，刀尖半径分别为0.4 mm、1.6 mm、3.1 mm和9.5 mm。零件的表面切削速度在1.2至3.3m/s (内径为127mm时为180至500rpm) 之间变化。切削深度从0.635毫米 (直径) 到1.27毫米不等。行进速度恒定为0.127毫米/转。本研究中使用的切削刀具如图4 a至d所示，图中显示了研究中所用的不同刀具之间切削半径的变化。该图显示了从0.4 mm半径的尖锐刀具点到9.5 mm半径的全圆刀具点的整个范围。

加工配置如图5a所示。图中显示了置于车床上的加工测试件，该测试件使用通过镗杆保持的刀具进行单点加工。旋转测试件，同时让镗杆和切削刀具沿着零件表面纵向平移。

使用了两种可加工性度量方式。通过测量表面粗糙度的方式，对一般性加工响应进行评价。使用Zeiss Surfcorm 130A表面光度仪，对表面粗糙度进行了定量测量。此外，还使用Keyence VHX-1000显微镜 (该显微镜具有能够显示弯曲和粗糙表面状况的高景深分辨率) 通过成像的方式，对表面状况进行了目测评价。对某些轴承上加工过程的尺寸响应进行分别的评价。将用于尺寸研究的零件插入到固定的钢母模中 (如图5b所示)，以确保零件具有完整的圆度和一致的外径。然后，将主模和封闭零件保持在车床上，同时使用类似于图5a中所示的方法对测试件进行加工。

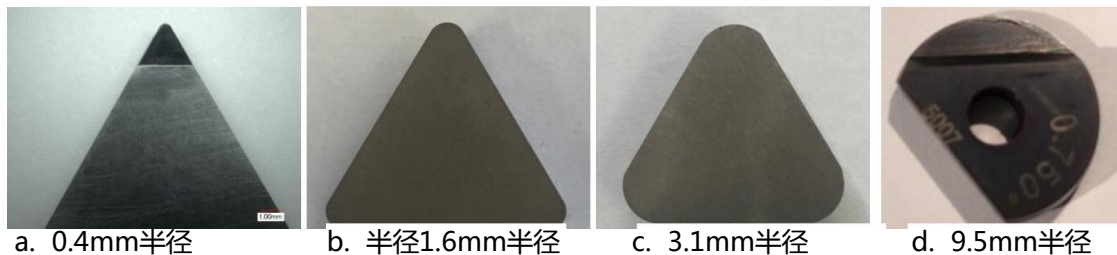


图4：加工研究中使用的刀具类型。刀具采用烧结硬质合金材质，切削半径为0.4至9.5

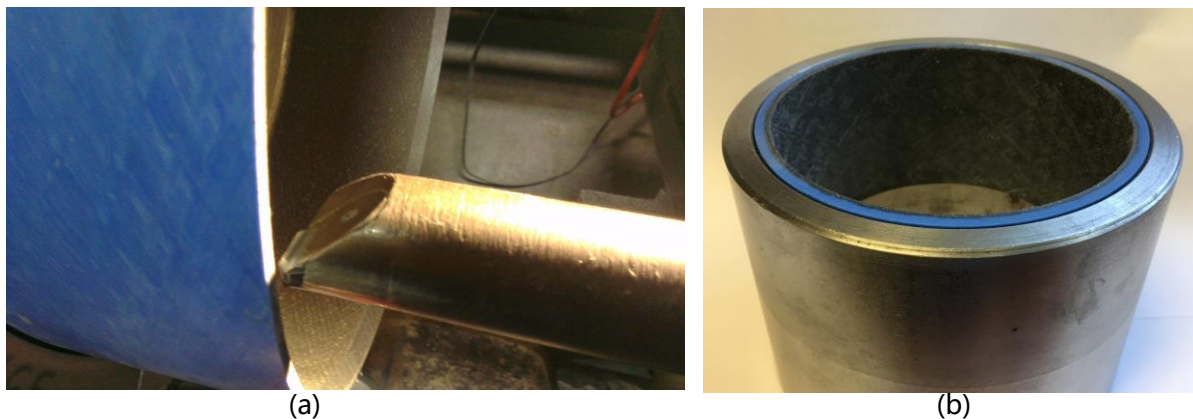


图5：用于显示加工研究中所用方法的图像。图 (a) 显示了自由状态下用于分析加工后表面粗糙度的正在进行加工的零件。图 (b) 显示了主模中用于评价尺寸响应的经过加工的零件。

3. 结果

研究中使用两种测量方法对加工响应进行量化处理。其中一种方法即表面粗糙度，报告中显示为平均粗糙度 R_a ；另一种方法即通过坐标测量机 (CMM) 对内径进行测量。

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

3.1:粗糙度测定：图6和图7显示了作为加工参数和纤维类型的函数的粗糙度数据。图6a和图b将非连续纤维与作为刀具半径和切削速度函数的连续纤维进行比较。刀具半径从0.4 mm到9.5mm不等。粗糙度数据表明，在整个刀具半径范围内，与连续型相比，非连续型结构显著降低了粗糙度。

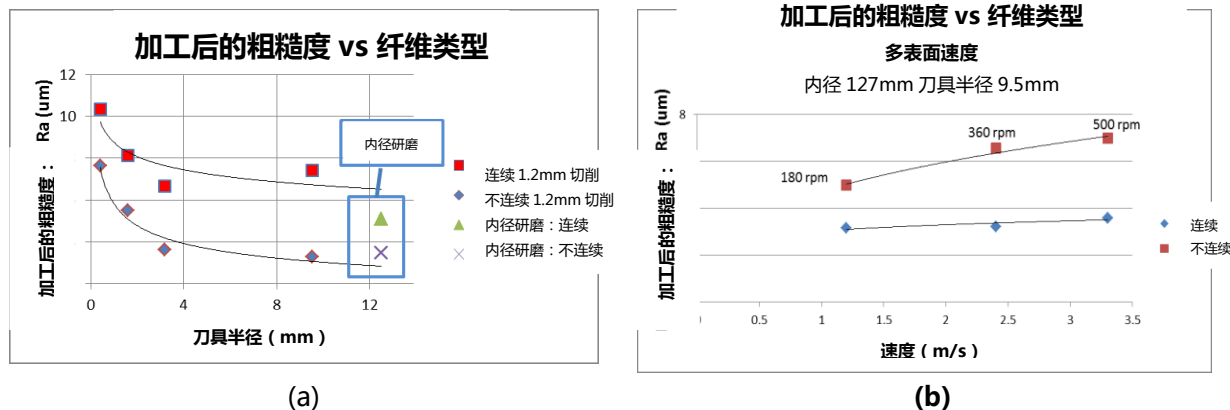


图6：粗糙度数据比较连续和非连续PTFE纤维结构的加工响应。数据显示为刀具半径和切削速度的函数。

还在开发单点刀具加工方法之前，测量了内径（ID）研磨样品的加工粗糙度，此即现有方法。上述粗糙度数据显示了连续纤维复合材料的粗糙度改善情况，但其粗糙度仍大于非连续纤维加工表面。与3mm或9.5mm半径刀具相比，研磨方法没有显示出非连续纤维结构的粗糙度改善情况。显示切削速度会对测试范围内的非连续纤维复合材料的粗糙度产生很小的影响，甚至不会产生任何影响。连续纤维结构会受切削速度的显著影响，且速度增加会导致粗糙度增加。

此外，还测量了作为切削深度函数的粗糙度。图7显示了切削深度对切削后的复合材料的粗糙度的影响。两种复合材料均没有在较大的刀具半径下表现出切削深度的影响，但这两种复合材料都能形成更加精细的表面效果。对于这两种纤维类型，刀具半径的影响在采用较浅的切削深度和最小的刀具半径时将更加显著。

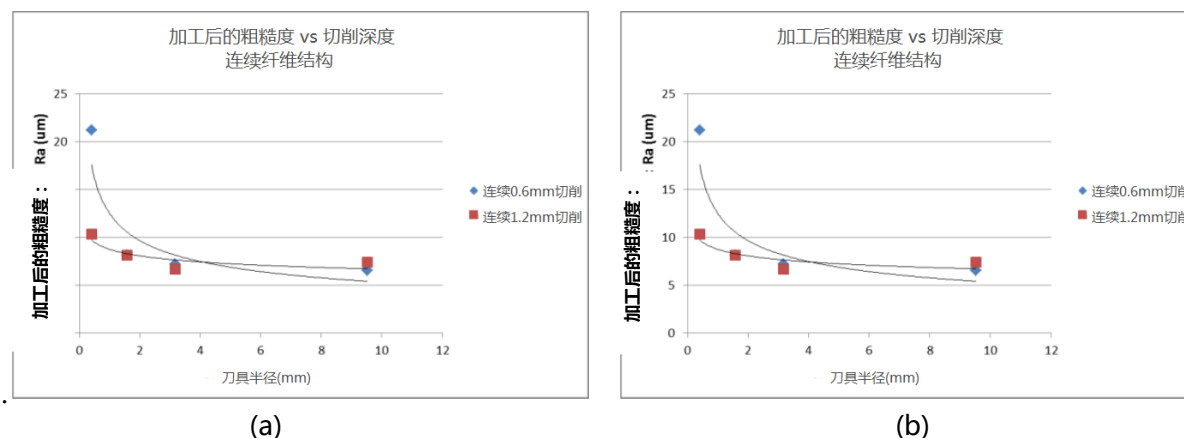


图7：加工后的粗糙度数据显示了切削深度的影响。图（a）显示了连续PTFE纤维结构的数据；图（b）显示了非连续的PTFE纤维的数据。

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

3.2:加工后表面的成像：对加工后的表面进行视觉评估，以支持加工响应的数值分析。图8显示了内径研磨后的两种复合材料的表面状况，它是一种为加工连续纤维产品而开发的工艺。连续纤维表面显示出较小程度的纤维磨损，这被认为属于正常情况，并且对于成品是可以接受的。图8b中所示的非连续纤维表面显示有光滑的表面，且不存在松散或磨损的纤维。应当注意的是，非连续纤维复合材料表面的粗糙度测定值小于连续纤维复合材料的粗糙度测定值，即：3.5vs 5.1 μmRa 。

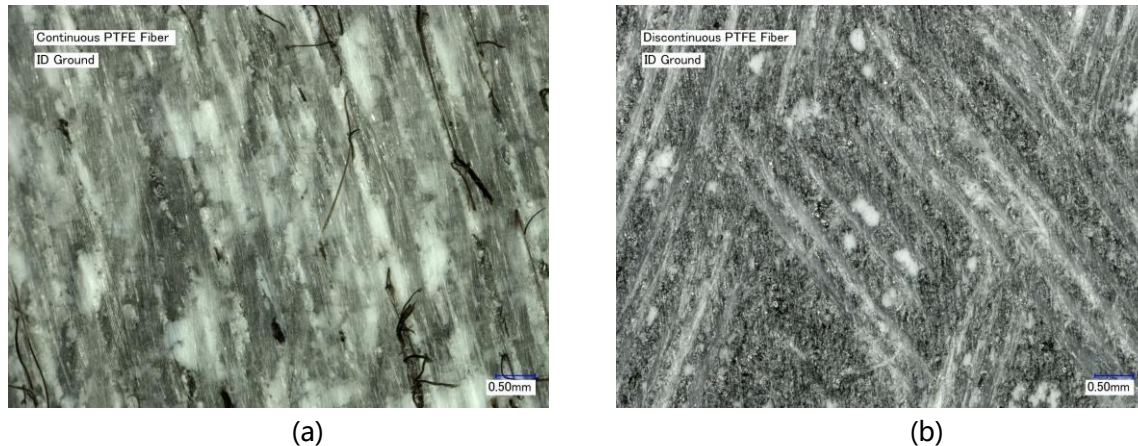


图8：采用基线（内径研磨）工艺方法进行二次加工的连续PTFE纤维轴承的表面图像（左图（a））。右图（b）显示了通过相同的内径研磨工艺加工得到的非连续PTFE纤维轴承表面。

最小半径为0.4 mm的加工后表面如图9所示。相应数据集中任何刀具半径的被测表面的最大粗糙度为7.6 μmRa （非连续）和10.3 μm （连续）。连续PTFE纤维显示出显著的断裂和磨损外观。此外，还观察到周围的纤维/树脂基质以不利的方式发生改变，并且最终加工后的表面上显现出明显的基质材料的加工碎片。与连续纤维形式相比，非连续纤维表面状况表现出明显的改善，但使用较大半径的刀具时，某一程度的纤维磨损仍无法观察到。

使用最大半径为9.5 mm的刀具加工的表面如图10所示。图10a中的连续PTFE纤维表现出一定程度的断裂，但小于使用0.4 mm刀具的程度。周围的矩阵没有表现出由于使用较大半径刀具而造成的损伤，如0.4mm半径刀具的情况所示。以9.5mm半径加工而成的非连续纤维复合材料的表面，没有表现出纤维磨损或其他表面损伤，如0.4mm半径的情况所示。非连续的PTFE纤维零件的表面也在图11中用宏观图像的形式显示。根据图中显示，其表面光滑，且没有损伤或其他可见粗糙的视觉证据。

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

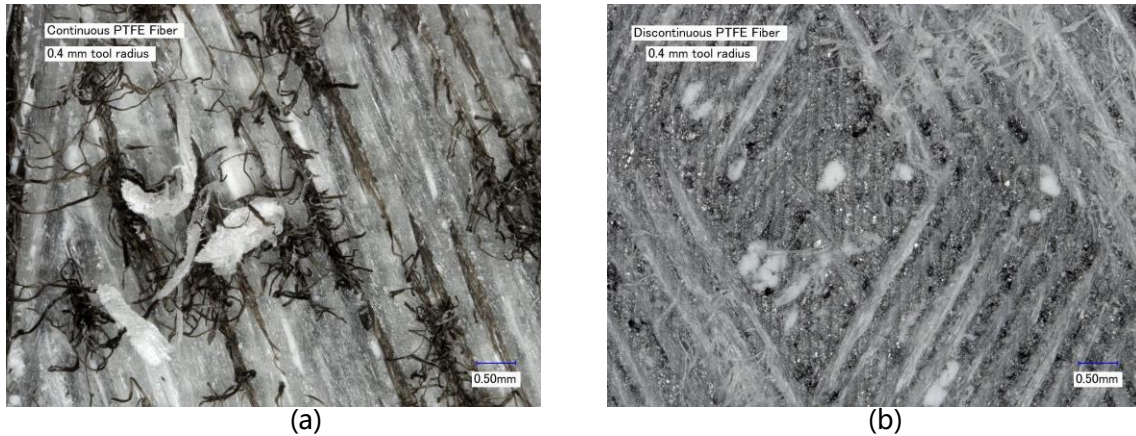


图9：使用0.4 mm半径刀具进行单点加工后两种材料的表面状况。图（a）显示了连续PTFE纤维轴承；图（b）显示了精细PTFE纤维轴承材料。

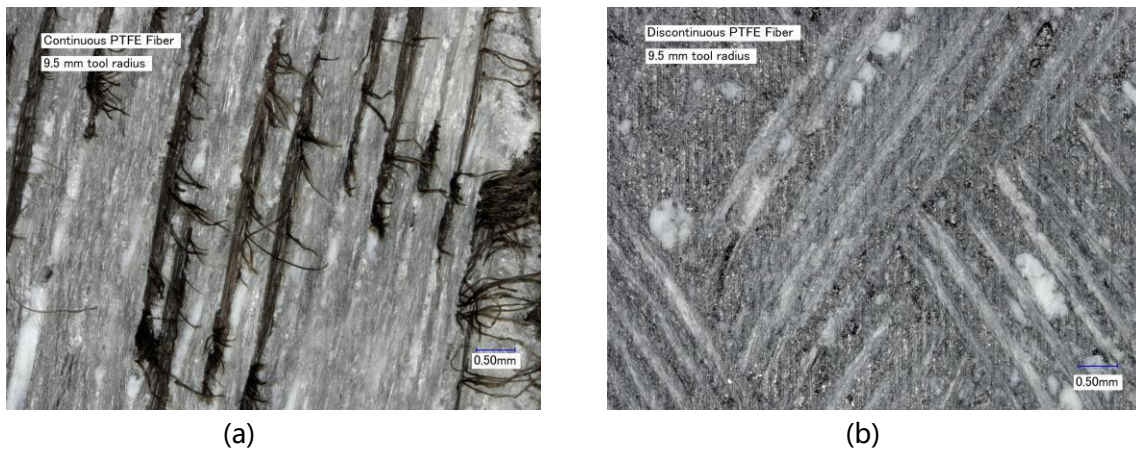


图10：使用9.5 mm半径刀具进行单点加工后两种材料的表面状况。图（a）显示了连续PTFE纤维轴承；图（b）显示了精细PTFE纤维轴承材料。

3.3尺寸分析：在主模中完成非连续纤维复合材料（图5b）的加工，以评估尺寸响应。从模具中取出零件，并在自由状态下通过CMM对其进行测量，以确定最终直径。沿75mm轴承长度方向，在3个点位置对直径进行测量，并将所得直径与ISO公差范围（H4至H7）进行比较，如图12所示。直径数据显示，非连续纤维结构表现出能够满足H4公差范围的能力。应该注意的是，正在进行的生产中的公差性能将高度依赖于用于执行加工工艺的设备能力。

4. 结论：

使用单点加工工艺的切削刀具半径，对最终复合材料的表面粗糙度具有显著的影响。与连续PTFE纤维复合材料相比，粘合在热塑性纤维基质中的非连续PTFE纤维表现出对单点加工的良好响应性。

根据图中显示，切削速度不会在1.2至3.3 m/s的范围内影响非连续PTFE纤维复合材料的加工响应，但确实会影响速度更快的连续PTFE复合材料的响应，进而导致更大的粗糙度。在本研究中测量了非连续纤维轴承结构的尺寸能力，其公差为H4，但同时也注意到其高度依赖于加工所用的设备。

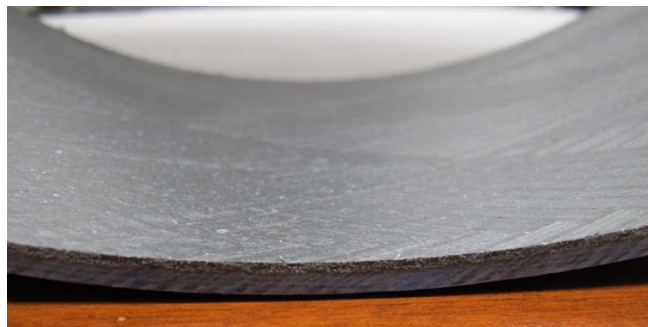
GGB 中国

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



(a)



(b)

图11：使用3 mm半径刀具生产出的非连续PTFE纤维轴承衬里的加工后表面的宏观图像。采用类似的方式对图像（a）和（b）进行处理，拍照时采用不同的角度。

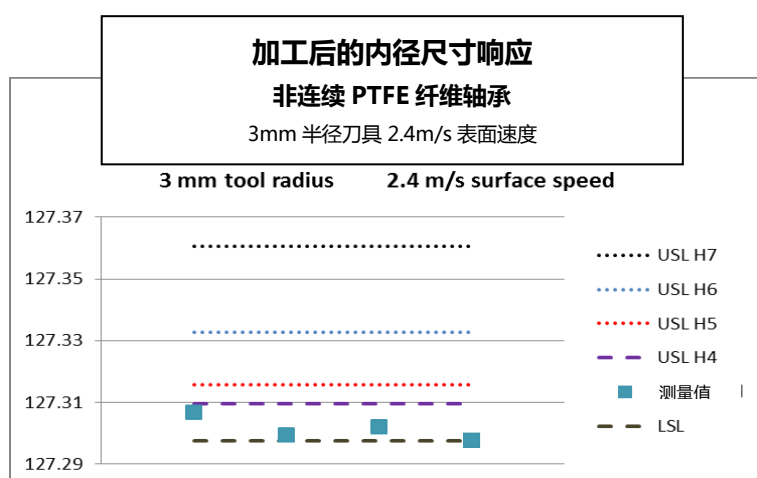


图12：使用3 mm半径刀具加工出的非连续光纤轴承的尺寸结果。图中显示有尺寸范围，作为一系列公差极限的参考。

参考文献

1. Jacobsen, C., "Composite bearings having improved wear life," US Patent 4867889, (1987)
2. Jones, J., Palylyk, R., Willis, P., Weber, R., "Greaseless Bushings for Hydropower Applications: Program, Testing and Results," CERL Technical Report 99/104, 1999
3. Peng, Y., Kim, M., Horchuck, M., "Composite Bearings" EP1616107B1 (2007)
4. Kim, M., Laicovsky, J., Rennie, K., Sarro, H., Trenkler, A. "Composite Bearing with Enhanced Wear and Machinability," EP3189124(A1) (2017)
5. Kim, M., Wapner, E., Sarro, H., Ruscitto, L., "The reduction of tribo-oxidative wear in high frequency, low amplitude oscillation for wicket gate bearing applications," Hydro2015 (2015)
6. Kim, M., "Effect of Shaft Corrosion Resistance on Fretting Wear with Composite Bearings," World Tribology Conf., 2013
7. Kim, M., "Tribo-oxidative Wear with Self-lubricating Bearings in High Frequency, Low Amplitude Oscillation," STLE Conf., 2014

作者：

Michael Kim 是 GGB Bearing Technologies 首席摩擦材料工程师，拥有德雷塞尔大学材料科学博士学位，在

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

摩擦材料的开发、测试和应用方面拥有20余年专业经验，包括许多专门用于侵蚀性轴承应用场合的多层功能梯度自润滑复合材料的开发。

Elena Wapner是GGB Bearing Technology航空航天与可再生能源部门的应用工程负责人，拥有西北大学的机械工程学位，且在多元化工程方面拥有10余年专业经验。其中包括石油和天然气、电力输送、核能和制造业的项目管理及分析工作。

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