



玻璃、石英玻璃、陶瓷……

脆性硬质材料的超精密加工

用于实验室诊断和真空技术应用的演示器。精确的微通道几乎没有破损地进行磨削（照片：ShapeFab）

在实验室、医疗技术、测量设备和激光技术等领域，加工玻璃或陶瓷制成的透镜和其他结构通常遵循“经典”的三步技术链：磨削、研磨和抛光，每个步骤通常在不同的系统上完成。



这块玻璃砖上经过抛光的自由曲面是在罗德斯的一台 5 轴 RXP501DS 铣床上使用磨点加工而成的（图片：ShapeFab）

然而，耶拿的一家初创公司ShapeFab GmbH & Co. KG正在改变这一现状，他们在一台高精度数控机床上整合了所有这些加工步骤。

对于某些复杂的几何形状，比如底切或自由曲面，这种方法展现出显著的优势。该公司能够处理从单件到中等批量的订单。ShapeFab的总经理、机械工程师奥利弗·塞德尔（Oliver Seidel）表示：“雅恩女士和我在光学行业的玻璃加工领域拥有超过26年的经验。”塞德尔和他的团队凭借对玻璃和陶瓷材料特性的深刻理解，以及对传统加工技术的熟悉，一直在探索如何利用现代机床更高效地加工这些脆性材料。

传统的工艺链不仅耗时，还因为多次夹紧可能导致精度损失。塞德尔和雅恩女士长期以来一直在思考如何通过一次装夹在同一台机床上完成所有三个加工步骤，以提高效率并保持精度。他们的创新方法为光学行业提供了一种新的加工解决方案。



创始团队：机械工程师奥利弗·塞德尔（总经理）、机械工程师安妮特·雅恩（总经理）和授权签字人商业工程师阿德里安·赫尔明（从左至右）（图片：ShapeFab）

“与通常的玻璃加工方法不同，我们在所有三个工艺阶段都使用具有确定几何形状的工具，”安妮特·雅恩

重要的差异关于工具

“相较于传统的玻璃加工方法，我们在整个加工过程中，包括磨削、研磨和抛光，都使用具有精确几何形状的工具，” ShapeFab GmbH & Co. KG的总经理安妮特·雅恩（Dipl. Ing. Anett Jahn）解释道。在常规的玻璃加工中，通常只有磨削阶段使用具有确定几何形状的金刚石磨削工具，而后续的研磨和抛光则依赖于松散的磨料颗粒，这增加了许多变量。

由ShapeFab公司展示的光学传感器采用整体磨削工艺制造，并集成安装几何结构。该技术可实现无框架组装，即使不使用夹具或调节元件，也能达到微米级装配精度。（图片来源：ShapeFab）

磨削过程涉及在工件与对应工具之间使用尺寸一致的未粘结磨料颗粒悬浮液，通过两者的持续相对滑动来去除材料，实现哑光表面，尺寸精度可达0.5微米，表面粗糙度Rz小于0.05微米。抛光阶段则采用含有极细抛光剂颗粒的悬浮液，在轻微压力下，使用柔性材料如纺织品或毛毡沿表面移动，以最少的材料去除量平滑表面，使表面达到极致光滑、透明和光泽。

然而，对于复杂几何形状或自由曲面，这些传统方法如果不增加过程的复杂性，往往难以应用。

相比之下，ShapeFab采用的工具涂有牢固粘结的磨料颗粒，并具有确定的几何形状，确保最终几何形状与CAD设计完全一致，类似于数控金属加工的精度。通过精心选择的磨削工具，ShapeFab能够实现8纳米Ra的表面质量，为玻璃加工提供了一种全新的高效、精确的解决方案。

ShapeFab工艺的优势

“我们工艺的独特之处在于能够制造出比传统方法更为复杂精细的结构，” ShapeFab的授权签字人阿德里安·赫尔明（Adrian Helming）解释。现在，玻璃材料能够实现以往只能通过金属加工达到的设计，如3D自由曲面、透镜阵列、集成紧固点或孔的无框架组件、微流体组件、传感器光学器件，以及在难以到达的位置进行选择性抛光的部件。

得益于高度自动化的生产流程和数控机床的使用，即使是特殊设计的单件产品也能经济地生产。ShapeFab采用罗德斯的高精度五轴铣床和磨削设备，为客户提供了设计复杂三维几何形状的灵活性，使得以往认为不经济制造的组件变得可行。公司能够实现高纵横比、精确的螺距偏差、严格的尺寸公差、极小的结构尺寸和卓越的表面粗糙度，以及在深孔加工中保持极高的圆度精度。

与客户的开发合作

“我们所掌握的制造技术对许多设计师而言仍是一个新兴领域，因此我们利用我们的专业技能为客户提供支持，”

从一开始的驱动力：安妮特·雅恩（Anett Jahn）在罗德斯（Röders）加工中心的编程和操作方面拥有多年经验（图片：克劳斯·沃尔拉特）

O. Seidel 表示。尽管团队规模不大，但由于整个生产流程高度自动化，他们能够实现这一目标。从 CAD 设计到 CAM 编程，再到加工和质量控制，所有环节均实现了数字化。工件通过 Erowa 零点夹紧系统的托盘固定，确保了高精度的重复性，使得工件能够在加工中心和坐标测量系统之间无损精度地转移。Werth 测量系统配备了传统的探头、白光传感器和光纤探头，后者特别适用于不损伤抛光表面的测量。得益于创始人在公司成立前就对使用五轴加工中心加工玻璃和脆性材料进行了多年的深入研究，他们在系统、软件和潜在应用方面积累了丰富的专业知识。例如，他们能够将坚固几何形状直接集成到光学部件或自由曲面中，展示了他们工艺的先进性和灵活性。

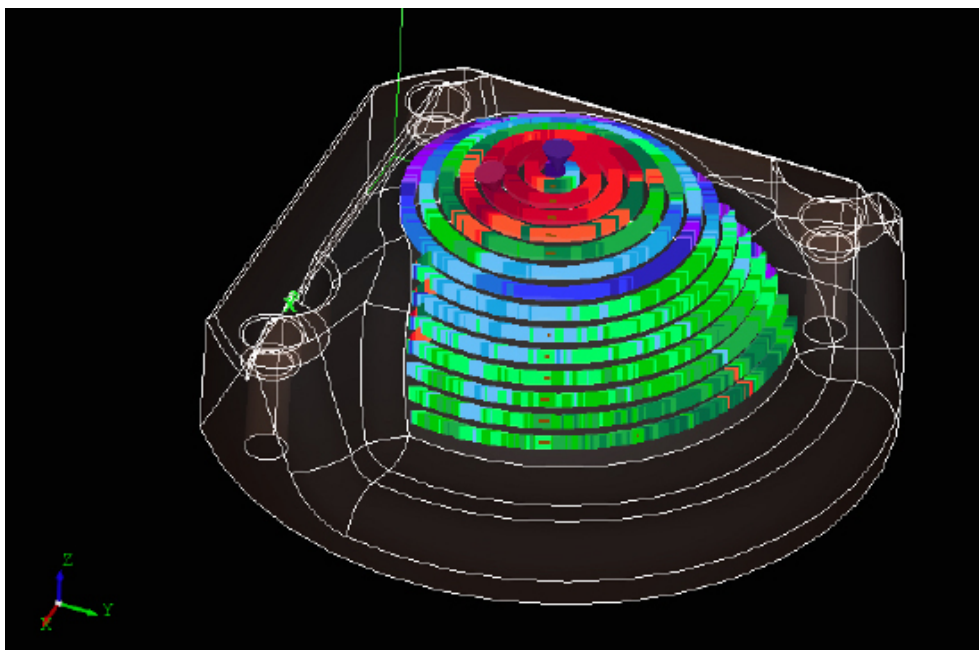
这使得组件能够以微米级的精度连接到最终应用，甚至无需调整元件。此外，使用五轴磨削，

“我们正在处理的制造技术对大多数设计师来说仍然是一个新领域。”
Oliver Seidel

这使得组件能够以微米级的精度直接与最终应用对接，无需额外调整。利用五轴磨削技术，不仅能够在玻璃中钻孔，还能加工螺纹。对于客户而言，另一个显著优势是能够根据设计定制磨削工具，无论是底切还是具有复杂几何形状的孔，都能轻松实现。此外，即便是通常难以处理的锐边过渡，也能在不破裂的情况下精确加工。

与罗德斯的良好合作经验

A. Jahn 强调：‘多年来，我们作为机器方面的合作伙伴与制造商罗德斯建立了良好的合作关系。’



生产以及质量控制的持续数字化和自动化，使得偏差显示方面能够实现有用的变体，并能快速对流程进行修正（图表：ShapeFab）



由于加工步骤可以自由组合，光学观察窗或用于光纤的耦合点（例如用于（拉曼）光谱学）可以有选择地实现（图片：ShapeFab）

这种合作始于她的实习期，当时她在罗德斯完成了与公司成立相关的系统准备工作。在这期间，她接受了关于罗德斯系统及其控制的潜在用途和操作的广泛额外培训，并在实施她加工脆性硬材料的想法时得到了支持。

罗德斯开发的基于 Windows 的 RMS6 控制系统编程直观且易于学习。由于该系统为海德汉（Heidenhain®）循环不足的情况提供了强大的编程例程和广泛的功能，因此也便于实现自定义的加工循环。这使得她能够迅速创建出第一个加工程序。

未来增长的坚实基础

A. Helming 指出：‘在我们成立公司时，我们非常注重充分的准备和坚实的资金支持。’

罗德斯技术报告 03/2023

脆性硬质材料的超精密加工

多年来，团队为创业阶段做了系统的准备。联邦政府的 EXIST 创业补助金、耶拿的恩斯特·阿贝应用科学大学以及罗德斯的积极支持提供了关键的帮助。在实习期间，罗德斯的**管理层**认识到这个想法的潜力，并决定为创始人提供物质支持。在创业的艰难初始阶段，罗德斯愿意以租赁的方式提供一台机器，这使得公司能够在还未购买加工系统时就为第一批客户提供服务，产生收入并建立客户群，同时进一步开发加工技术。从那时起，公司已经能够购买第二台机器，吸引了广泛且迅速增长的客户群，并实现了良好的产能利用率。

A. Helming 微笑着说：‘我们对工业客户向我们提出的众多开发项目特别有信心，因为我们看到了它们背后巨大的系列应用潜力。’ 克劳斯·沃尔拉特，b2dcomm.ch

“我们对工业客户向我们提出的众多开发项目特别有信心。”
Adrian Helming

Adresses

ShapeFab GmbH & Co. KG,
Hans-Knöll-Str. 6, 07745 Jena, Germany
Tel. +49-3641-5549330
info@shapefab.de, www.shapefab.de

Röders GmbH,
Gottlieb-Daimler-Str. 6, 29614 Soltau, Germany Tel.
+49-5191-603-43, Fax +49-5191-603-38,
hsc@roeders.de, www.roeders.de

罗德斯RXP501DS

罗德斯HSC 5轴铣床RXP 501 DS专为满足高精度需求而设计，同时在加工硬质材料时展现出卓越的性能。它配备了无摩擦的线性直接驱动系统，并与所有轴上32 kHz的高速控制器相结合，确保了加工过程既动态又精确。这种高校正频率不仅显著减少了加工时间，还保证了出色的表面质量。

所有轴均配备了高精度光学尺，罗德斯在精度上绝不妥协。得益于其精确度和动态性能，该机器也适用于夹具磨削。Z轴还配备了专利的无摩擦真空重量平衡器，进一步提高了加工的稳定性和精度。

为了确保最大的热稳定性，该设备配备了先进的温度管理系统，所有关键系统组件的介质温度控制精度达到±0.1 K。此外，基于PC技术的专用控制系统为HSC高精度铣削或坐标磨削等特定任务量身定制。罗德斯自主开发的控制系统基于工业PC和Windows操作系统，能够根据需要随时进行硬件和软件的更新，确保机器在控制系统方面始终保持最新，避免了过时的风险。

<<