

硬脆材料的加工

超声辅助磨削
采用 PRIMINER C500ultrasonic

内容提要

石英玻璃和氧化铝的超声辅助磨削

石英玻璃以及氧化铝等工程陶瓷，是众多高科技行业不可或缺的材料。例如，石英玻璃兼具热稳定性和化学稳定性，因此在半导体行业被用于制造晶圆载具和刻蚀掩模。在光学领域，精密透镜、棱镜和光导均由石英玻璃制成。此外，石英玻璃在现代医疗技术中也起着关键作用，例如用于诊断设备和激光系统。

氧化铝同样在工业中应用广泛。在医疗技术领域，它被用于制造人工髋关节球头等生物相容性植入物，其高耐磨性和耐腐蚀性在此大有裨益。在航空航天领域，它还被用作关键部件的隔热防护，或用作必须承受极端机械负荷和热负荷的轴承与密封件的材料。

使石英玻璃和氧化铝如此宝贵的材料特性，同时也增加了其加工难度。两种材料都具有高硬度和高脆性，可能导致微裂纹、工具磨损率高以及表面质量不足。因此，磨削是适宜的加工方法。磨削过程要求很高的精度，复杂几何形状尤其如此，以满足上述应用的要求。

在磨削过程中采用超声辅助，显示出应对这些挑战的巨大潜力。通过引入高频振动，可降低加工力、改善表面质量，并将工具磨损降至最低。本白皮书介绍超声辅助磨削技术用于石英玻璃和氧化铝时的效果与优势。试验采用超声系统 VibroCut *ultrasonic*，对磨削工具施加高频振动。这一创新系统的突出特点，是可实现大振幅的强劲性能以及精确的工艺特性。

内容提要 02

硬脆材料的超声辅助磨削 03

技术效果与作用机理 04

结果 05

客户收益 06

VibroCut 详细信息 07

机床：PRIMINER C500-5X ultrasonic 08

实施合作伙伴 UNITECH-Maschinen GmbH 09

超声辅助
应用研究
采用 VibroCut *ultrasonic*

以石英玻璃和氧化铝零件作为硬脆材料的代表，对超声辅助磨削进行了研究。

为实现超声辅助，UNITECH-Maschinen GmbH 为加工中心 PRIMINER C500 配备了 VibroCut *ultrasonic* 系统。该系统在旋转的刀柄中产生超声振动，并将其有针对性地叠加到切削过程的运动上。振幅通过 NC 程序中的 M 指令设定，可在很宽的范围内调节。振动频率由系统自动搜寻并跟踪调节。该系统的独到之处在于强劲的性能和高精度，这得益于用于超声高动态闭环控制的内置传感器。
试验参数随被加工材料而变化，汇总于表 1。

为评估超声辅助的效果，借助测力平台（Kistler 公司）采集了磨削过程中的背向力，并对常规磨削与超声辅助磨削进行了比较。

为保护高精度的机床部件，UNITECH 对驱动部件进行了改造，使其得到严密封装，能够抵御侵蚀性的磨削粉尘。

	石英玻璃	**氧化铝**
工具	磨头 – 金刚石磨粒 电镀结合剂	磨头 – 金刚石磨粒 电镀结合剂
工具直径	Ø10 mm	Ø10 mm
切削速度 v_c	2,5 m/s	2,5 m/s
切削深度 a_p	0.2 mm	0.06 mm
切削宽度 a_e	1 mm	2 mm
进给速度 v_f	120…200 mm/min	300…500 mm/min
冷却液压力	乳化液 30 bar	乳化液 30 bar
振动频率	≈ 18.5 kHz	≈ 18.5 kHz
振幅	4 µm / 8 µm / 12 µm	4 µm / 8 µm / 12 µm

表 1： 磨削试验参数

技术效果与作用机理

为研究**石英玻璃**的超声辅助磨削，对零件端面进行了平面磨削。图 2 显示了磨削石英玻璃时不同进给速度下进给力的变化，以及常规加工过程与振幅由 4 µm 递增至 12 µm 的超声辅助加工过程的对比。可以看出，进给力随进给速度的提高而增大，常规磨削的力最大为 4.5 N。由于材料敏感，切削力是硬脆材料磨削过程的重要评价指标，因为它决定了材料去除过程的效率。过大的力会限制生产率和表面质量，并可能导致微裂纹或崩边等质量问题。由图 2 可见，在两种进给速度下，超声辅助都使背向力显著降低，且力随振幅的增大而减小。在进给速度 0.2 m/min、振幅 12 µm 时，超声辅助使背向力由 4.5 N 降至 2 N，相当于力大幅降低 56%。这一效果源于超声的“微锤击”作用： 它在微观尺度上使脆性材料破碎，从而实现 可控的材料去除。此外，工具的快速运动还 改变了运动学关系，并使磨粒承受多轴载荷。

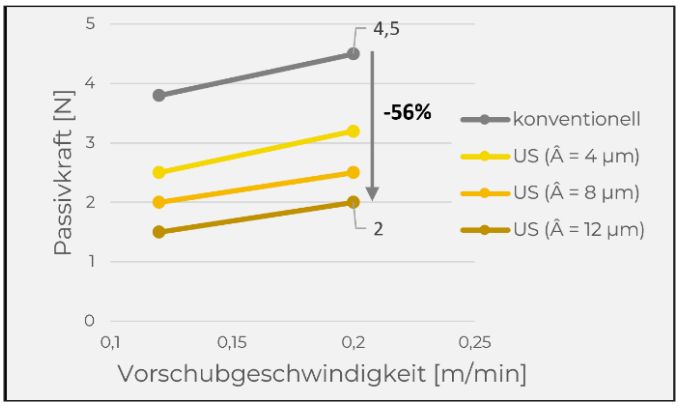


图 2： 石英玻璃背向力曲线图

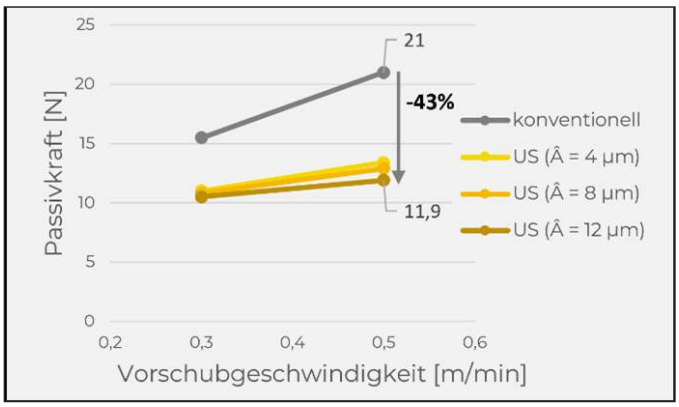


图 3： 氧化铝背向力曲线图

对第二种材料**氧化铝**，以类似的方法测量了力。图 3 显示了该陶瓷磨削加工时的背向力数值。这里的力同样随进给值的增大而升高。在常规磨削、进给速度 0.5 m/min 时，氧 化铝的背向力为 21 N。对这种材料而言， 切削力同样对磨削过程的效率起决定作用。 对磨削过程施加超声辅助，在这里同样使加 工力大幅降低。在进给速度 0.5 m/min、振 幅 12 µm 时，背向力降低 43%，降至 11.9 N。与石英玻璃不同，振幅在这里的影 响较小：4 µm 至 12 µm 之间各振幅的效果 几乎相同。由于材料呈脆性，超声在这里同 样使材料去除更高效、更可控，对磨削过程的性能产生积极影响。

结果

结果表明，超声辅助对磨削过程的特性和性能具有积极影响。超声刀柄使磨削工具产生高频振动，从而既改变了过程运动学，也改变了磨屑形成的作用机理。其效果与作用可归纳如下：

1. 磨粒的超高速运动

超声使磨具产生极快的运动，每一颗磨粒在旋转运动之外还沿轴向往复振动，磨粒的切入条件因此受到显著影响。

2. 高效的材料去除

超声使磨粒产生“微锤击”作用，硬脆材料的表层因此以可控的方式破碎，材料去除更高效、更可控。

3. 自清洁

超声可减少磨削工具上的附着物，防止工具堵塞，使工具更长久地保持锋利和良好的切削性能。

4. 磨粒自锐

多轴的冲击性载荷使磨粒发生破碎，从而形成新的锋利切削刃。



客户收益

大幅降低的加工力，在生产率、过程可靠性和零件质量方面突破了磨削过程的现有极限。图 4 汇总了超声辅助在磨削石英玻璃等硬脆材料或氧化铝等陶瓷时的优势。



图 4：超声辅助磨削的优势

高效且可控的材料去除改善了零件的表面粗糙度，并避免了微裂纹和崩边。除延长工具寿命外，提高切削参数、进而提升磨削过程生产率的潜力，是通过使用 VibroCut ultrasonic 实现成本节约的关键因素。

使用 VibroCut *ultrasonic* 磨削硬脆材料可节约成本

计算示例：提高切削参数

- 机床小时费率：75,- € / h
- 计划占用时间：4000 h/年 （每年 500 个班次）
- 磨削占节拍时间比例：80%

切削参数提升	生产率提升	每台机床每年节省
20%	13,3%	39,900 €
50%	26,7%	80,100 €
100%	40%	120,000 €

图 5：提高切削参数的经济效益计算示例

图 5 给出了一个经济性计算示例。在许多应用场合，投资回收期不到一年。

超声辅助的另一重要优势在于提高过程可靠性。借助超声实现的高效而柔和的加工，对复杂且昂贵的零件尤其有益：它降低了过程故障和影响质量的偏差的风险，从而避免耗资费时的废品。这对跨多个班次的无人值守加工尤为重要。

详细信息

VibroCut *ultrasonic* 是 VibroCut GmbH 的专利系统。我们作为产品和技术供应商，助您在生产中应用超声辅助切削。我们销售用于新机床和现有机床加装的超声系统，并为您提供相关服务。

超声系统 VibroCut ultrasonic 代表着市场上最强劲、最精确的超声技术。凭借强大的性能，它可实现大振幅，也能使较大的磨削工具产生振动。内置传感器直接测量超声振动，通过高动态闭环控制确保振动特性可重复，将超声的精度提升到全新高度。

该系统提供多种功率等级、尺寸和接口，可与您的机床相匹配。用户可根据加工过程的要求在四个功率等级中选择——从适用于精细刀具、转速最高 30,000 rpm 的 Precision-Line，到适用于大型、大质量刀具应用的 Performance-Line。其中 Precision-Line（100 W）、Standard-Line（250 W）和 Performance-Line（500 W）适用于带自动换刀的加工中心。



VibroCut *ultrasonic* 性能参数			
振动频率	f_{Vib}	=	16 ... 50 kHz
振幅	Â	=	0,1 ... 80 µm
功率	P_{Wmax}	=	100 ... 1,000 W

图 6：VibroCut ultrasonic 超声刀柄

欢迎直接与我们联系，或访问我们的网站了解详情：

VIBROCUT

VibroCut GmbH
Annaberger Str. 240
09125 Chemnitz
info@vibrocut.de
www.vibrocut.de

PRIMINER CNC 铣床搭配 VibroCut *ultrasonic* 的应用

PRIMINER 的 C500-5X 是一款五轴加工中心，以出色的精度和灵活性著称。机床重 9.5 吨，专为工件的五轴复杂加工而设计，可用钢、铝和塑料等多种材料制造高精度零件。凭借其多功能性，它适用于从样件到批量生产的众多应用。

C500-5X 的技术参数为 VibroCut *ultrasonic* 配置提供了理想支持。采用超声辅助工艺对硬脆材料进行磨削和钻削时对机床提出的要求，它都能很好地满足。



技术参数		C500-5X
工作台		
最大工件直径	mm	700
工作台尺寸	mm	Ø 500 x 400
T 型槽（宽度 x 数量 x 间距）	mm	14 ×80 ×5
最大承重	kg	300
行程		
X/Y/Z 行程	mm	700 / 550 / 500
A/C 行程	度	+30° ~ -120° / 360°
主轴端面至工作台	mm	120 - 620
主轴		
主轴锥孔	-	SK40/BBT40/CAT40
主轴电机功率	kW	9 / 22
主轴电机扭矩	Nm	63 / 135
主轴转速	rpm	12000
进给速度		
X/Y/Z 快移速度	m/min	48
A/C 转速	rpm	50/60
切削进给速度	mm/min	1-12000

技术参数		C500-5X
刀库		
刀具数量	把	40
最大刀具长度	mm	300
最大刀具直径	mm	Ø 80 / Ø 125
最大刀具重量	kg	8
精度（VDI 3441 全行程） 定位精度		
（无光栅尺）	mm	0,008 (X/Y/Z)
重复定位精度（无光栅尺）	mm	0,006 (X/Y/Z)
定位精度（带光栅尺）	mm	0,006 (X/Y/Z)
重复定位精度（带光栅尺）	mm	0,004 (X/Y/Z)
尺寸与重量		
尺寸	mm	3976×4965×3050
重量	kg	7000

欢迎直接与我们联系，或访问我们的网站了解详情：

PRIMINER

PRIMINER
Werkzeugmaschinen GmbH
Tungendorfer Str. 10
24536 Neumünster
info@priminer.de
www.priminer.de

UNITECH-Maschinen GmbH — 机械制造行业的知名合作伙伴

UNITECH-Maschinen GmbH 是 Chemnitz 地区机械制造行业的知名企业之一。其业务范围涵盖多种类型机床的设计、制造、销售以及全面服务。制定整体解决方案、提供工艺咨询和用户培训同样属于其服务内容。

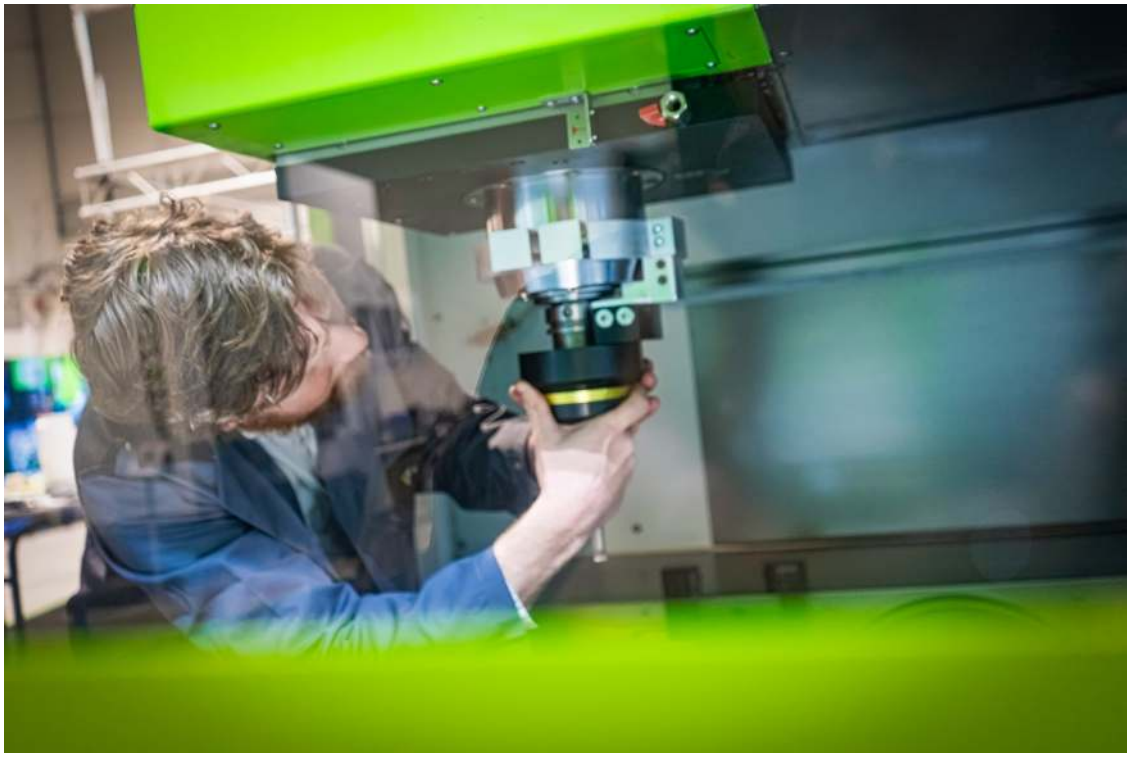
由于毗邻 VibroCut GmbH，并且销售 Priminer 的机床，双方形成了出色的合作。

在硬脆材料加工领域，VibroCut GmbH 的集成合作伙伴是 UNITECH-Maschinen GmbH。 作为 机床的 技术 导向型改造 专家， 同时也是 经验丰富的服务伙伴，UNITECH 将高精度五轴加工中心 PRIMINER C500 改造成了同级别中最强的超声磨削机床。

在此过程中，VibroCut 超声磨削工具连同操作引导和过程监控被完整集成到机床中。机床本身还通过精心设计的封装等措施加以防护，使其免受侵蚀性加工粉尘的影响，以保证持久的品质。

加工介质与粉尘分离后，被有针对性地输送到加工过程中。在使用有爆炸倾向的介质时，可根据需要为机床加装防火措施。

为保障跨多个班次的无人值守加工，机床集成了过程监控和质量监控。



技术集成：UNITECH-Maschinen GmbH 与 VibroCut GmbH 的 Dr. Oliver Georgi

欢迎直接与我们联系，或访问我们的网站了解详情：

UNITECH-Maschinen GmbH
Clemens-Winkler-Straße 6
09116 Chemnitz
www.unitech-maschinen.de