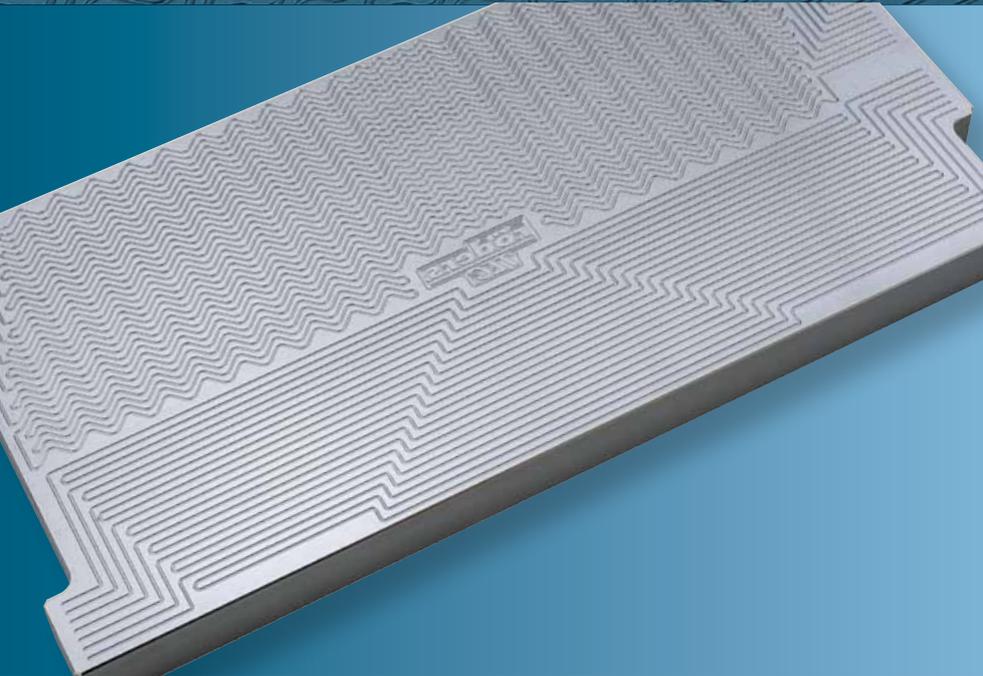


涵盖特殊钢材、CAD/CAM、铣削中心、工具、润滑和测量技术的工具链

# 高性能微铣削高硬度钢材：例如用于双极板



用于汽车燃料电池双极板压花模具的样品（300×150毫米）上的精细流道结构。材料为百禄W360，硬度58HRC，总加工时间65小时3分钟。

冲压、压花和成形板材的工具要求极高，尤其是在生产过程中，精度有时需达到1至2微米。这一挑战随着工具体积的增大和板材厚度的减小而变得更加严峻。在制造氢燃料电池的双极板时，这种困难尤为明显。这些双极板由薄壁的中空结构组成，它们是通过焊接的钣金半壳形成，内部包裹着精细的流道。与夹在其中的膜电极单元一起，众多层按规律排列形成所谓的“堆栈”。

全球各国正致力于推广和支持可再生电能，以逐步替代化石燃料。然而，鉴于某些应用场景无法仅依赖电力，氢能源经济的发展也受到了重视。在这一背景下，燃料电池被看作是一种有前景的电池替代技术。

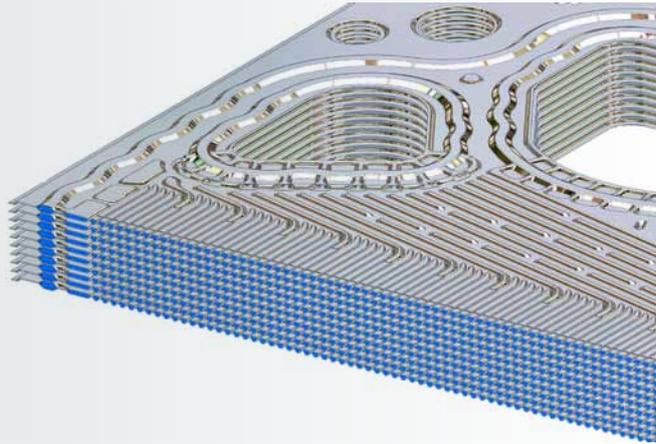
特别是在汽车行业，燃料电池的构造包括所谓的双极板，这些双极板由金属板经过冲压、压花和焊接形成，构建出空心结构。

目前，制造所需的成形和冲压工具是技术上的一个瓶颈。使用更薄的金属板有助于减轻燃料电池的整体质量，提高其性能。但是，随着材料厚度的减少，冲压过程中的容差也随之缩小，这就要求工具的几何设计必须达到更高的精度。这种对冲压和成形工具以及压力机精度的极端要求，无疑带来了巨大的技术挑战。为了生产适当的金属板部件，必须发展一套特别适应的制造流程链，包括压花和冲压工具。这一流程链的关键要素包括工具钢材的选择、CAD/CAM软件的应用、微铣刀具的精确性、加工中心的性能、铣刀的润滑与冷却技术，以及严格的计量控制和质量控制记录。

Hufschmied、MHT、Röders、Open Mind、Voestalpine和Zeiss等公司在这一项目上展开了合作。目前取得的成果已在Hufschmied举办的研讨会上向50多名与会者展示。这些成果不仅针对“双极板”这一核心议题，而且为微生产、精密机械、医疗技术和航空航天等其他领域提供了富有前景的洞见。



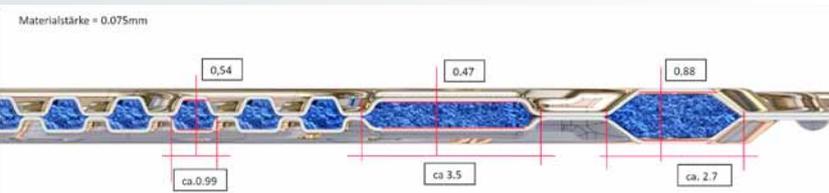
演讲者：Marc Maier（Open Mind公司），Oliver Gossel博士（Röders公司），Matthis Toppmöller（Hufschmied公司），Marc Geile（Voestalpine/Böhler公司），Matthias Schneider（Zeiss公司），Herbert Merz（MHT公司）和Marco Giarrusso（Open Mind公司）（从左到右）（照片：Klaus Vollrath）



双极板均由两个冲压而成的金属薄板半壳组成，这两个半壳焊接在一起，从而在它们之间以及沿外轮廓形成诸如冷却水（蓝色）等介质的流动通道(图片: Fa. Klaus Baier)



样品工件（50毫米 x 40毫米），具有双极板典型的各种表面结构，由Böhler K888 Matrix材料制成，硬度为63+1 HRC（照片：Klaus Vollrath）。



双极板流道的详细视图。在焊接半壳时，即使位置或角度出现微小偏差，也可能会显著降低效率。  
(图片 Fa. Klaus Baier)

### 超硬钢：Böhler K888 Matrix

为了经济高效地制造具有极精细结构的双极板，所需的压花工具必须具备极高的尺寸精度、出色的耐磨性以及低粘附性。此外，工具的加工性也是一个关键因素。这要求在硬质微观结构的基体钢中，初生碳化物的比例要低。碳化物颗粒应细小且在材料体积中均匀分布，以避免在加工过程中因断裂而产生表面缺陷。

粉末冶金工艺生产的钢材因其均匀的微观结构而成为首选。Böhler K888 Matrix材料因其最大碳化物含量低于2%，软退火状态下的布氏硬度小于280 HB，以及在1070-1120°C硬化处理后达到63+1 HRC的HRC而脱颖而出。这种材料即使与碳化物含量更高的材料相比，也展现出了卓越的耐磨性。Hufschmied的加工测试结果表明，K888 Matrix材料不仅易于加工，还能获得极佳表面质量。此外，该材料的涂层性能良好，有助于进一步延长刀具的使用寿命。

### CAD-CAM软件

实现最佳工件质量的关键在于编写完美的NC程序。OPEN MIND公司通过其先进的hyperMILL CAD/CAM system，为创建这些程序提供了完备的条件。该系统以极高的精度计算刀具路径，确保生成精确的NC数据。

在这一过程中，有几个关键点需要特别关注。首先，为了在计算刀具路径时充分考虑组件的拓扑结构，必须对几何特征进行深入分析和识别，包括锋利的边缘、间隙以及表面过渡的性质。这些关键输入在计算过程中得到考虑，从而控制刀具路径中的关键点分布。

此外，还可以进行进一步的优化，例如调整进给速率，确保铣削工具能够以恒定的进给速率加工组件。“平滑重叠”功能通过消除不同铣削工具或策略导致的可见过渡，显著减少了手动返工的需求，几乎将相关支出降至最低。

另一个至关重要的功能是自动识别或定义组件内几何上相同的结构，并将其相互关联。这些结构的刀具路径首次在单个区域创建后，可以通过转换并完全自动地链接到之前识别或手动定义的位置。这一过程消除了多余的动作，显著减少了CAM系统中的计算时间，提高了整体的加工效率。

### 铣削机器的要求

双极板冲压模具的加工过程具有一系列特点：材料硬度极高，使用的是直径远低于一毫米的小型铣刀，对表面质量有着极高的要求，以及精度需达到1微米级别。这些小轮廓细节的加工也意味着加工时间较长，这就要求机床具备出色的长期热稳定性。

Röders机床在此类精密加工任务中表现出色。它们配备了无摩擦的直接驱动系统、高刚性的滚柱导轨、Z轴的无摩擦重量补偿机制、精密的HSC（高速切削）主轴，以及高精度的工具测量系统。特别值得一提的是，所有控制回路中实现了32 kHz的极高控制周期率，这确保了即使是最微小的偏差也能迅速得到纠正。

另一个关键因素是机床通过温度控制介质进行的复杂温度管理。这种介质能够在±0.1 K的范围内保持稳定，并循环通过机器的所有关键部件，从而确保在较低微米范围内的公差得到可靠维持。

### ufschmied的Bumble-Bi微型工具

加工双极板的压花工具对铣削工具提出了特别的挑战，主要由于加工材料的高硬度和长时间的加工程序，这些程序有时甚至超过100小时。

# 罗德斯技术报告01/2025

高硬度钢的高性能微铣削：例如用于双极板

此外，为了满足所需的精度，工具的磨损必须保持在极低水平。

为了应对这些挑战，Hufschmied开发了专为此类应用设计的“Bumble-Bi”系列微型工具。该系列包括专为粗加工设计的高进给铣刀，以及环形铣刀、球头铣刀和平面球头铣刀。平面球头铣刀结合了环形和球头铣刀的特点，提供了独特的加工优势。

所有这些工具都采用了特别开发的物理气相沉积（PVD）涂层，这种涂层具有极光滑的表面，有助于实现有效的温度管理。此外，用于制造样品的工具及其应用参数已经在表格中进行了详细的总结。

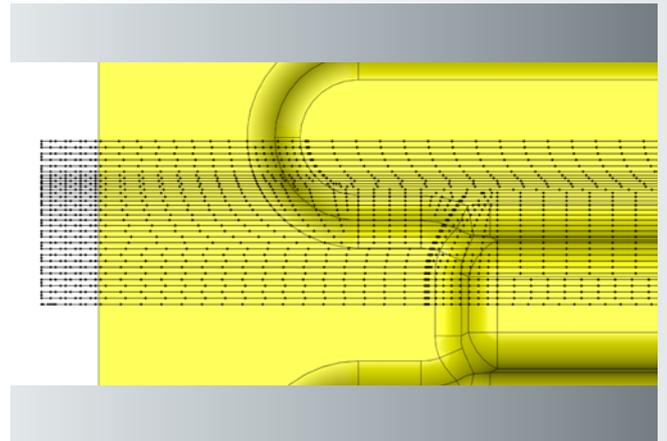
## MHT介质分配器的最佳润滑

冷却在加工过程中，冷却、润滑以及从工作区域有效移除切屑的正确组合发挥着至关重要的作用。MHT介质分配器提供了一种既高效又经济节能的解决方案。该系统的核心是一个锥形套筒，它与工具夹头永久连接，并在更换工具时一同更换，但不会随铣刀旋转。这个套筒位于主轴下方，负责接收压缩空气和润滑剂。

冷却和清洁工作主要由从套筒下边缘的环形喷嘴中喷出的压缩空气完成。这种强劲的气流能够迅速清除铣刀和工件上的切屑及其携带的热量。同时，由精选烃类组成的润滑介质以极小的量（2-10毫升/小时）被精确供应，足以切屑刃提供最佳润滑。在硬质材料加工中，这种润滑方式可以减少约50%的切削刃产生的热量。主要优势包括显著延长工具的使用寿命，提高机器的切削效率，以及改善工件的表面质量。



该样品是在Hufschmied技术中心使用五轴Röders RXP 501 DS铣削的。该系统配备了MHT介质分配器（照片：Klaus Vollrath）。



HyperMill CAM 软件可实现自动点分布（图片来源：Open Mind）

## 测量技术和质量控制

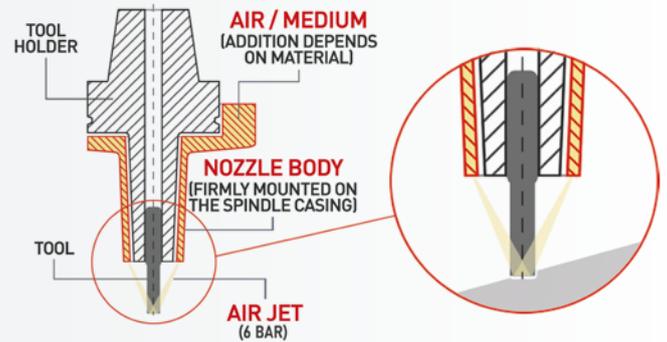
在本项目中，使用的铣刀直径甚至低至0.2毫米。质量控制环节必须对极小且狭窄的轮廓区域进行严密监控，例如流道的侧面以及成形/冲压工具的切削刃。鉴于需要识别微米级别的细节，所使用的测量系统必须具备极高的精度，其测量不确定度通常是生产公差要求的十分之一。然而，能够满足这样严格标准的坐标测量机并不多见。为了能够高效地记录这些关键的测量点，项目中采用了Zeiss DotScan光学传感器。该传感器的测量速度极快，高达每秒1000个测量点。通过使用旋转摆动单元，样品能够在三个不同的角度位置上被精确引导，确保了测量的全面性和准确性。

Milling times sample	
Steel:	Böhler K888 Matrix; HRC 63+1
●	HHF746BP010, HC743BP0100-20
●	6:55 min.
●	HHF746BP006, HC743BP005-010
●	19:39 min.
●	HHF746BP008, HC743BP005-010, HC743BPFB003-010
●	49:32 min.
●	HC643030-06002, HC743BP005-010, HC743BPFB003-010, HC732BP002
●	76:27 min.

由Hufschmied制造的Bumble-Bi系列工具用于在Röders系统上加工样品（50毫米 x 40毫米）的不同部分，以及相应的铣削时间（图表：Röders/Hufschmied）。

Milling Parameters														
High feed roughing milling cutter tools														
SR	HMF746BP 1 x D										63 - 66 HRC			
	Artikel	D1	D2	L2	L1	L3	ER	Z	VC	N	fz	Vf	ap	ae
	HMF746BP06	0,6	6	0,6	50	0,6	0,075	4	54,5	30.000	0,038	1.560	0,024	0,430
	HMF746BP08	0,8	6	0,8	50	0,8	0,09	4	65,2	26.000	0,037	1.880	0,032	0,560
HMF746BP10	1	6	1	50	1	0,11	4	70,5	22.500	0,047	4.200	0,040	0,700	
Torus and flatball milling cutter tools														
SR	HC743BP 1 x D										63 - 66 HRC			
	Artikel	D1	D2	L2	L1	L3	ER	Z	VC	N	fz	Vf	ap	ae
	HC743BP005-010	0,5	6	0,5	50	0,5	0,1	3	35,8	38.000	0,021	2.390	0,009	0,075
HC743BP005-010	0,5	6	0,5	50	0,5	0,1	3	50,3	33.000	0,028	2.660	0,015	0,200	
SL	HC743BP 1 x D										63 - 66 HRC			
	Artikel	D1	D2	L2	L1	L3	ER	Z	VC	N	fz	Vf	ap	ae
	HC743BP005-010	0,5	6	0,5	50	0,5	0,1	3	45,2	42.000	0,016	1.990	0,020	0,050
HC743BP005-010	0,5	6	0,5	50	0,5	0,1	3	61,8	40.000	0,021	2.550	0,020	0,100	
HC743BP010-020	1	6	1	50	1	0,2	3	54,2	30.000	0,032	2.850	0,028	0,200	
Ball head milling cutter														
SL	HC733+732 1 x D										63 - 66 HRC			
	Artikel	D1	D2	L2	L1	L3	ER	Z	VC	N	fz	Vf	ap	ae
HC732BP002	0,2	6	0,2	50	0,2	0,1	2	31,4	42.000	0,013	1.060	0,050	0,014	

用于加工样品的Hufschmied工具的应用数据（图表：Hufschmied）。



包括对接站的刀柄和刀套横截面（图片来源：MHT）

### 结果

这展示的成果（精度范围±3μm）充分证明了所描述的流程链的高效性。通过精心挑选合适的组件和制定恰当的程序，即便在加工高强度材料或硬质工具钢时，也能确保高水准的过程可靠性。此外，该流程链同样能够满足对高质量标准的要求。

然而，需要强调的是，实现这样的成果并非易事，它要求我们对流程链中的每一个环节进行细致的考量和优化。

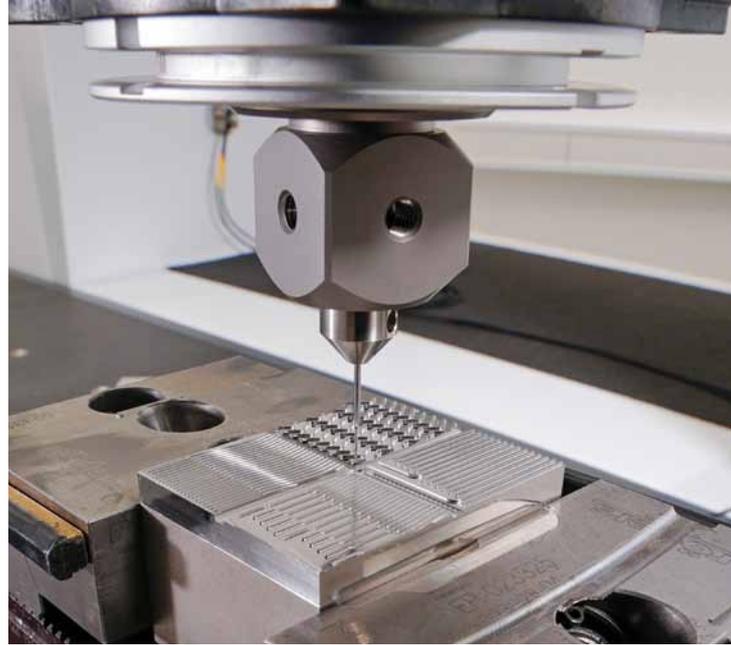
Klaus Vollrath b2dcomm.ch



MHT介质分配器的空心套筒在不接触或不随工具夹头旋转的情况下包围了工具夹头。空气和润滑剂通过位于主轴下方的对接接口供应（Photo: Klaus Vollrath）

## 罗德斯技术报告 01/2025

高硬度钢的高性能微铣削：例如用于双极板



在罗德斯（Röders）的蔡司Xenos坐标测量机上对演示样机进行触觉测量（图片来源：罗德斯）

### Adresses

Hufschmied Zerspanungssysteme GmbH,  
Edisonstr. 11 d, D-86399 Bobingen, Germany  
Tel. +49-8234-9664-0, Fax +49-8234-9664-99,  
info@hufschmied.net, www.hufschmied.net

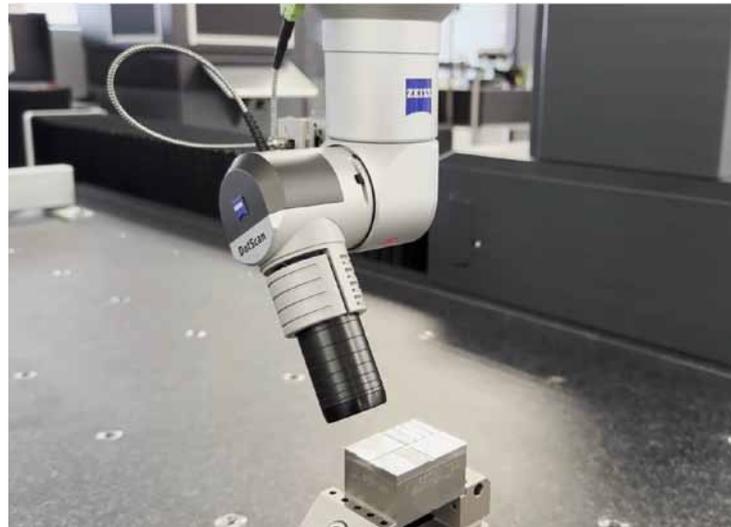
Open Mind Technologies AG,  
Argelsrieder Feld 5, D-82234 Wessling, Germany,  
Tel. +49-8153 933-500, Info.Deutschland@openmind-tech.com,  
www.openmind-tech.com

MHT GmbH Merz & Haag,  
Waldmössinger Str. 56, D-78713 Schramberg, Germany,  
Tel. +49-7422-520-697,  
info@mht-gmbh.de, https://mht-gmbh.de

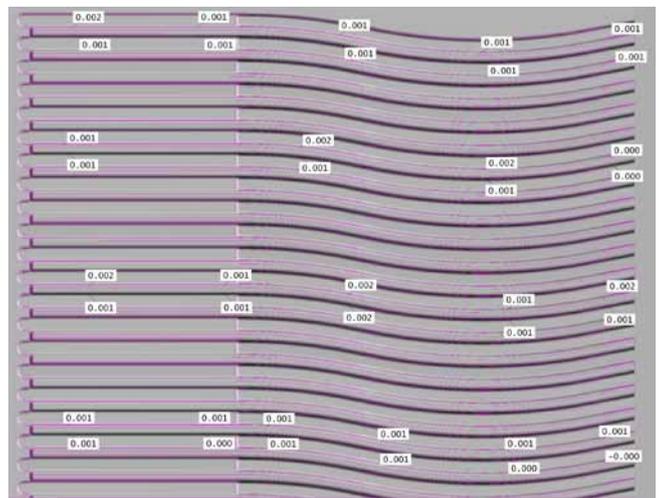
Voestalpine High Performance Metals Deutschland GmbH,  
Hansaallee 321, D-40549 Düsseldorf, Germany,  
Tel. +49-211-522-0, Fax +49-211-522-2983,  
info@bohler.de, www.bohler.de

Carl Zeiss IQS Deutschland GmbH,  
Carl-Zeiss-Str. 22, D-73447 Oberkochen, Germany,  
Tel. +49-7364-20-6337, Fax +49-7364-20-1929,  
info.metrology.de@zeiss.com, www.zeiss.de/  
emobilitysolutions

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



使用Zeiss DotScan光学传感器监测样品，其测量不确定度为 $1.8 \mu\text{m} + L/350$ 。为了更好地测量侧面，样品通过Zeiss "Contura"坐标测量机配合RDS旋转摆动单元进行了移动（照片：Zeiss）。



达到的样品质量（图表：Röders）。