

超声波辅助加工

利用 HSK-40 锥柄的超声波辅助加工研究

柏林工业大学 IWF 研究所的科学家开发了一种旨在优化陶瓷切削加工的超声波辅助铣削的 HSK-40 空心锥柄。这一研发项目开发也是大有原因的：这种材料的切削加工越来越成为制造业关注的焦点。

文 | Julius Tschöpel、Mitschel Polte、Bernfried Fleiner、Clemens Dicke、Eckart Uhlman

由于陶瓷材料有着很好的耐磨性、电气绝缘性和耐高温性，越来越多地出现在消费品、医疗器械和航空航天领域的零部件生产制造中。然而，由于又硬又脆的特性使陶瓷材料零件的切削加工遇到了众多挑战，大幅缩短了切削刀具的使用寿命 T_{St} ，也减小了单位时间里的切削量 QW 。超声波辅助铣削技术是一种具有良好应用前景的陶瓷材料切削加工工艺技术，因为它能够加工出几何结构形状非常复杂的陶瓷零件。超声波辅助铣削加工时的切削运动是铣刀的旋转运动与其轴向方向的高频上下运动相互叠加在一起的复合运动。这样的复合运动使铣刀的耐用度 T_{St} 提高了 300%，也减少了毛刺的形成且提高了单位时间内的切削量 QW 。

超声波辅助铣削的工作原理

在超声波的干预下铣刀的切削运动呈周期性的间断性切削，这就减小了铣刀切削时的切削力 F_c 、降低了铣刀切削时的温度。在使用超声波辅助铣削技术时，通常都要在夹持铣刀的空心锥柄里安装一个提供电力能源 EV 的超声波震动器。因此，通常还要用一个集成在机床主轴中的旋转变压器在主轴旋转的同时为超声波震动器提供电力能源 EV 。为了使超声波辅助震动系统能够利用这



图 1 旨在优化陶瓷切削加工的超声波辅助控制铣刀切削的 HSK-40 空心锥柄

种电力能源，主轴内锥孔处就必须有与刀具锥柄相互输送电力能源的触点。铣刀锥柄电气连接触点当前的研发情况

是：在 HSK 系列的空心锥柄与主轴连接的端面 AP 区设有弹簧式触针，在主轴的连接端面处设有相应的触点。

这一方案已经在研究项目的框架内得到了实现和测试，但使用的铣刀空心锥柄仅仅只有 HSK 63 和 HSK 100 两种规格型号。由于在微加工技术领域使用的铣刀直径通常都是 $\phi < 1\text{mm}$ 的微型铣刀，因此这些铣刀无法使用上述锥柄进行装夹、这也就需要将超声波辅助铣削工艺技术“移植”到小型 HSK 系列锥柄之中。但由于 HSK 40 或者 HSK 32 型空心锥柄的法兰连接端面面积 AP_a 较小、宽度不够，因此很难将弹簧式触针集成到这些铣刀锥柄中。

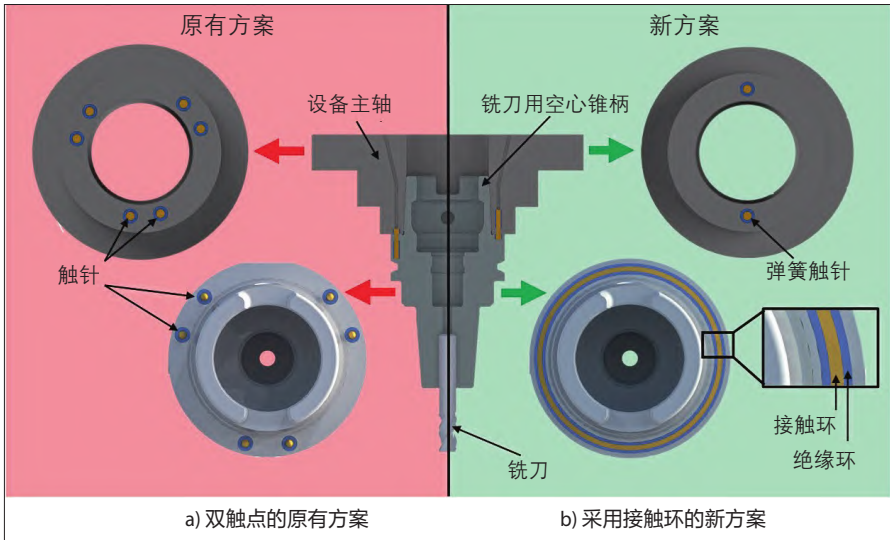


图 2 不同电气接口方案的示意图

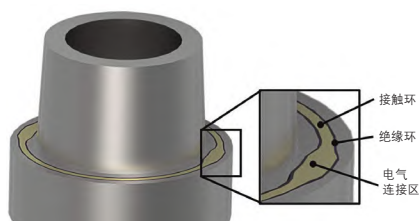


图3 HSK-E 40型的电气接口示意图

新型供电接触点

为了应对最新自动化技术面临的挑战，科研人员选择了一种创新性的解决方案：将供电触点做成一个环形的供电接触环并将其集成到精密的HSK 40型铣刀空心锥柄之中。

主轴端相应的触点是弹簧触点。弹簧式触点及其紧凑的结构设计使其集成在现有主轴系统中有着相当大的优势：因为主轴端面的接触区ASp的安装面积有限。新方案可以用于所有类型的HSK空心锥柄，也可以用于特殊的HSK-E型锥柄：由于新方案采用的是完全旋转对称的结构设计、有着很好的动平衡性能，因此使HSK-E型锥柄可以用于最高转速 $n \geq 25 \text{ r/min}$ 的高速主轴。因此它是一种适合微加工的超声波辅助铣削系统。

由于HSK-E型空心刀柄没有定位槽，因此无法按照固定角度安装到主轴上。这也使其无法研发项目中所述的利用弹簧触针与接触点为超声波系统供电的技术方案。因为在更换铣刀刀具时HSK-E型锥柄没有定位槽，因此无法保证弹簧触针与供电触点准确对位。

相应锥柄的设计

接触环使用的材料是CuNi7Zn39Mn5Pb3镍银合金。这种材料

触针的头部形状：

球头直径 $\phi = 0.8 \text{ mm}$ 球头直径 $\phi = 2.3 \text{ mm}$

三棱锥 30°

尖头 30°

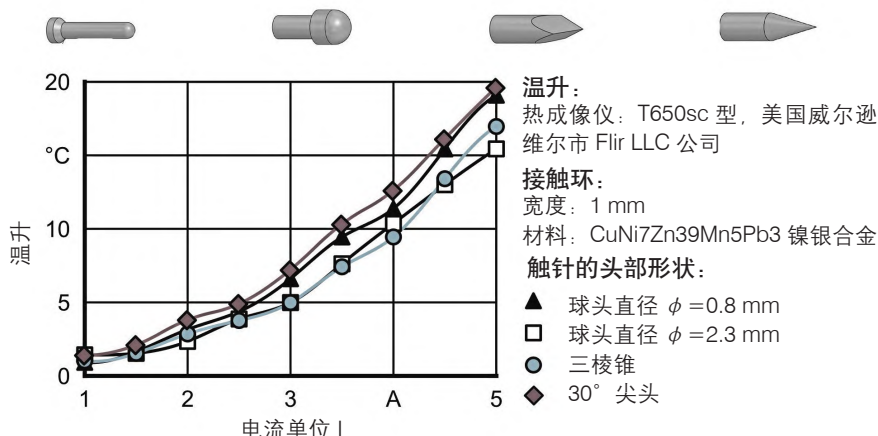


图5 触针和接触环在接触区域中的温升取决于流经它们的电流强度

有着与铜材相当的电阻比 ρ （铜材的电阻比 $\rho = 0.018 \Omega \text{ mm}^2/\text{m}$ ，镍银合金的电阻比为 $\rho = 0.33 \Omega \text{ mm}^2/\text{m}$ ）。但镍银合金在腐蚀性环境中的耐腐蚀能力明显更强。接触环与机床主轴之间的电气绝缘环是Formlabs 有限公司的 Tough 1500 型环氧树脂在立体光固化成型技术的帮助下制成的。直径 $\phi = 37 \text{ mm}$ 的绝缘环和接触环都是用粘合剂粘接到主轴和空心锥柄上的。在自动换刀时，即便是铣刀锥柄残存着KSS冷却润滑液时，触点组件也不会脱落。为了将接触环与空心锥柄中的传感器相互连接起来，新方案提供了两个对称的钎焊区用来焊接连接导线。由于HSK系列空心锥柄连接端面AP有着很高的硬度值H、不容易触摸到铣削刀具，因此空心锥柄上的所有凹槽都需要采用电火花腐蚀加工来制作。

电气连接的现场测试

为了排除弹簧触点和接触环因传输电功率P而产生不可接受的发热就需要

对各个触点的工况进行热成像检查。为此，专门制造了一个热成像显示器。这个显示器可以清楚的显示触点组件在不易检测的工作状态下的受热特性。利用这一测试设备还可以测量不同触头形式受热时的情况。超声波辅助系统的电气负载则是用Conrad Electronics公司生产的PSP 12010实验室电源检测仪进行检测的。测量接触电阻R所产生接触热 θ_K 的仪器是Flir LLC公司研发生产的T650sc型热成像摄像机。

经弹簧触针和接触环流过的电流在1~5A之间变化。图4所示是经红外成像设备拍摄到的、不同加热状态后达到热平衡时的图像。从图中可以看出：当电压从U=5V开始下降、电流增加到I=5A时的温度升高数值只有 $\Delta\theta = 19^\circ\text{C}$ 。而这种温升并不超过生产厂家规定的环氧树脂长期使用温度 $\theta_D = 63^\circ\text{C}$ 。

检测到的接触温度 θ_K 只受弹簧触针不同形式触头的影响（参见图5）。因此触针体的选择十分灵活，也就避免了在接口设计时受到限制。

小结和未来展望

上述研究证明：尽管HSK-40型空心锥柄可用的安装空间有限，但它仍然可以配备超声波辅助切削系统的电气接口。MM

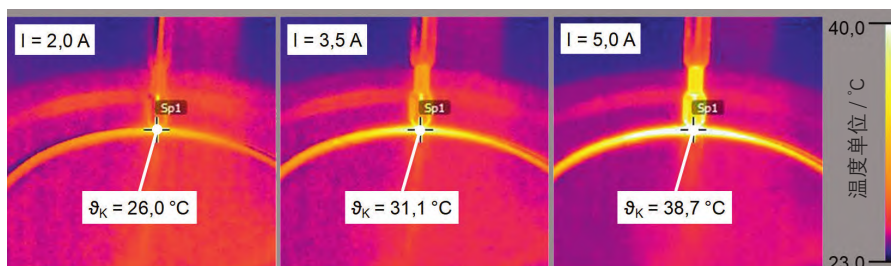


图4 直径2.3 mm球形触针的红外图像