

微细铣削和微细车铣 切削技术*

Micro-Milling and Micro-Turning-Milling Technology

沈阳理工大学机械工程学院 朱茂霞
沈阳理工大学辽宁省高速切削工程技术中心 金成哲



朱茂霞

沈阳理工大学机械制造及其自动化专业硕士研究生,从事先进切削加工技术研究。

航空航天、国防工业、现代医学以及生物工程技术的发展对微小装置的功能、结构复杂程度、可靠性的要求越来越高,从而使得对特征尺寸在微米级到毫米级、采用多种材料、

微细铣削和微细车铣切削技术与 LIGA 和光刻等其他微细加工技术相比,具有体积小、能耗低、生产灵活、效率高等优点。而无论从理论分析还是实际加工,微细车铣切削技术更适合于微细长轴类零件的加工,它在改善微小型零件的切削状态、实现高速切削、降低切削力、延长刀具寿命、保证零件加工质量、提高加工效率等方面都具有明显的优势,是一种非常适合微小型零件加工的方法。

且具有一定形状精度和表面质量要求的精密三维微小零件的需求日益迫切^[1]。微小型制造技术作为先进制造技术的重要发展方向和多学科交叉的科技研究前沿,因此备受有关研究机构的关注。围绕着微细切削技术,国外展开了深入的研究。国内部分大学和研究所也进行了初步的研究。

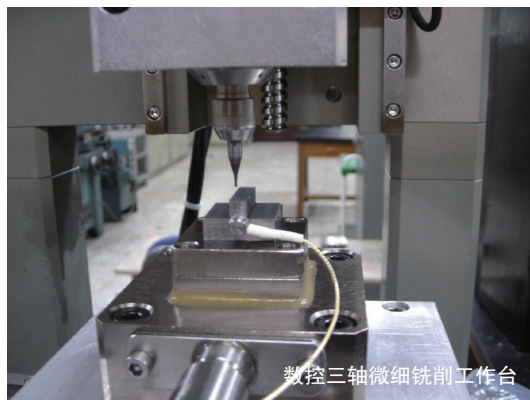
微细切削加工

采用微细切削技术可以实现多种材料任意形状微型三维零件的加工,弥补了 MEMS 技术的不足,所制

作出的各种微型机械有着日益广阔的应用前景,因此,国内外的一些高等院校和研究机构对此进行了不断的探索。从 FANUC 公司^[2]采用微铣削技术加工的零件微观形貌上看,该零件是一个高深宽比的梯形沟槽,开度角为 3° ,沟槽跨度为 $35\mu\text{m}$,工件材料是铜,采用微铣削加工 5min 就可以完成,且侧壁加工精度很高。采用 FANUC 公司制造的车床型微型铣床可以实现三维自由曲面的微细切削加工。从加工的微透镜体图中可看出,零件表面高低差为 $16\mu\text{m}$,直径为 $236\mu\text{m}$,加工后的表面粗糙

* 辽宁省教育厅科学技术研究重点实验室项目(LS2010138)资助。

度 R_z 为 $0.1 \mu m$, 这些均是 MEMS 技术以及同步辐射 X 射线深度光刻、LIGA 工艺等技术所不及的。目前, 微细切削加工技术可使用切削刀具, 对包括金属在内的各种可切削材料



数控三轴微细铣削工作台

进行微细加工, 而且还可利用 CAD/CAM 技术实现三维数控编程, 几乎可以满足任意复杂曲面和超硬材料的加工要求。与某些特种加工方法(如电火花、超声加工)相比, 微细切削加工具有更快的加工速度、更低的加工成本、更好的加工柔性和更高的加工精度。

微细铣削力模型

W.Y. Bao 和 I.N. Tansel^[3] 提出了考虑刀具跳动情况下的微细铣削切削力解析模型。由于每齿进给量与切削刃半径比率很大时, 对切屑厚度所作的假设与传统切削力模型^[4] 的相比变化很大, 因此他们在这个模型的基础上, 改变切屑厚度的计算方法, 即根据刀尖轨迹来估计切削厚度值, 从而使得切削力模型更加精确。其提出的切削力表达式用到了 8 个参量(如主轴转速、进给量、切入切出角等) 和一个与刀具和工件有关的材料系数, 该系数需要进行试验才能确定。

由于切屑厚度在微细车铣中对切削力的影响很大, G. Newby 等^[5] 也考虑到切削刃轨迹对切屑厚度的影响, 他们在 W. Y. Bao 和 I. N. Tansel 的基础上建立切削力经验模

型。M. T. Zaman 等^[6] 根据理论切屑面积来估计切削力的大小。

与传统铣削相比, 在微细车铣中切削刃参与切削加工的长度相对要长, 因此刀具螺旋角在微细车铣加工的切削力形状中起到至关重要的作用, 在轴向上就会产生可观的切削力。

I. S. Kang 等^[7] 在基于 Tlustý 和 MacNeil 传统切削力模型^[5] 的基础上, 研究了刀刃半径对切削力的影响, 并将其纳入切削力模型中。

Bong-Cheol Shin 等^[8] 提出了用加速度传感器和最新的霍尔传感器来间接

测量切削力的方法。在带有高速主轴的精密机械工作台上进行了一系列试验, 并取得了显著成果。

微细铣刀及其涂层

在微细铣削中, 刀具是影响加工精度的重要参数, 早在 1997 年 I. Tansel 等人^[9] 就已经提出了采用智能工件夹持器来延长刀具寿命的观点。A. Aramcharoen 等人^[10-11] 对刀具涂层进行了深入研究, 对宏观尺寸铣削和微细铣削进行对比分析。E. Uhlmann 等^[12] 采用有限元仿真, 设计了新的微立铣刀, 分析铣刀的动载荷和应变, 并对其进行优化, 最终开发的工具钢微铣削刀具硬度达到 62HRC。Jan Gabler 和 Sven Pleger^[13] 采用了微精密 CVD 金刚石涂层刀具, 发现金刚石涂层能极大地增强在微米级尺寸下切削刀具的性能。

考虑微铣刀具的尺寸效应, 佛罗里达国际大学的 I.N. Tansel 等^[14] 对微铣削中的刀具磨损作了新的定义: 刀具材料的损失, 刀具表面小颗粒工件材料的沉积或是刀具挠度形状的变化等。结合美国的空气力

学研究实验室的专家, 佛罗里达国际大学的专家在原先研究发现的基础上又开发了遗传刀具监控系统^[15]。此外, 2008 年, 新加坡的学者开发了采用隐形马尔可夫模型监控微铣削刀具状态的系统^[16]。正是由于马尔可夫模型的快速识别性特点, 使得其模型对噪声的鲁棒性较好, 通过试验发现, 该系统对刀具状态的识别达到了较高的水平。

针对微铣削与传统铣削的区别, 学者们在微铣削中的尺寸效应、微刀刃半径、最小切削厚度、摩擦效应以及表面粗糙度等方面内容做了深入研究^[16], 分析其行为与机理, 建立数学模型, 并通过广泛的试验进行了验证。

微细车铣切削

微细车铣切削是基于车铣原理的一种先进制造技术。车铣加工不是普通意义上的车削与铣削功能的简单组合。它是利用铣刀旋转和工件旋转的合成运动来实现回转体工件的切削加工任务, 达到常规的“车削”目的, 使工件在形状精度、位置精度、已加工表面完整性等多方面达到使用要求^[17]。车铣加工包括铣刀旋转、工件旋转、铣刀轴向进给和径向进给 4 个基本运动。铣刀的旋转运动是主切削运动, 切削速度与工件直径没有关系, 只与铣刀直径和铣刀转速密切相关。工件旋转是为了配合回转体表面加工而做的范成运动, 对切削速度的影响一般不予考虑, 它主要对加工过程中的进给速度产生



微细铣削高速气动主轴

影响。因此,从切削原理上可以发现,车铣加工过程中,无论被加工件直径多小,只要铣削头的转速有足够宽的变化范围,就可以实现微小零件的正常切削加工。

无论在生产率还是在加工工件表面质量上,微细车铣切削技术较其他技术而言具有很大的优势。其中一个非常重要的优势在于它能够在一次装夹中完成对形状复杂工件的加工,并且能在较短时间内完成并提供一个较高的加工精度。这尤其适用于铣刀的高速切削,不但可以提高生产率,而且也提高了加工精度。

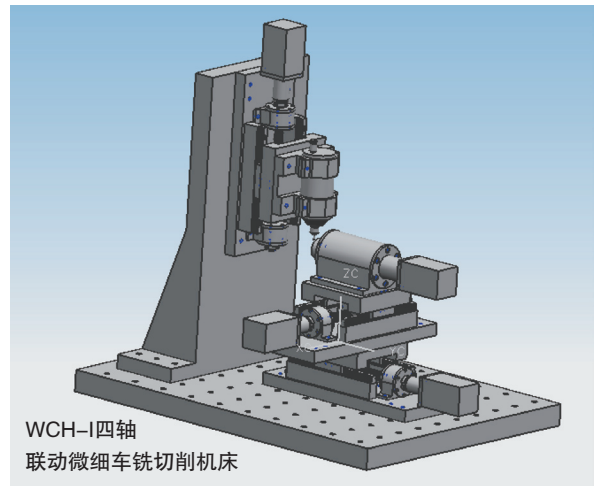
德国阿亨工业大学和卡尔斯鲁厄大学近年来开展了淬火钢和硬铝材料的微细车铣切削研究,卡尔斯鲁厄大学与奔驰汽车厂合作研制了世界上首台转速为 16000r/min 的精密微型铣床,用以加工微型模具,实现了用微小设备高速加工微小零件。弗朗恩霍夫研究院针对大机械加工零件所暴露的问题,近年来开展了微型加工系统相关技术的研究,已成功研制出微型加工系统原理样机^[18]。

近些年来,沈阳理工大学在微细铣削加工和微细车铣切削技术方面开展了一些研究。在微小铣削机床上完成了微细铣削 AISI D2 模具

钢的切削试验,研究了各切削参数对已加工表面形貌和切削力的影响程度及变化趋势。结果表明,每齿进给量对表面形貌和切削力影响较大,而轴向切削深度和切削速度影响次之。在微细铣削工件表面上由于塑性变形所产生的微小突出物是微细毛刺^[19-20]。

沈阳理工大学在车铣加工技术的基础上完成了 WCH-I 数控四轴联动微细车铣切削机床设计和开发的研究。其气动铣削主轴转速为 150000r/min,旨在实现高速微细车铣切削微型细长轴和具有复杂型面的微型零件。与大中型超精密机床相比,该机床具有体积小、易控制加工环境、成本低等特点。

北京理工大学采用传统的车削方法和先进的车铣方法进行了微细轴的切削加工试验,试验研究在自主设计的具有结构优势和加工特色的“微型车铣复合加工中心”上进行。首先将这一技术应用于微型零件的加工^[21]。该中心能独立完成车、铣、镗、磨、钻削的任务,同时还能



实现独具特色的车铣加工功能,从根本上解决了车削时线速度太低的问题,能实现微细轴类零件正常的切削加工甚至高速切削加工^[22]。

另外,哈尔滨工业大学^[23-24]、南京航空航天大学^[25-26]、北京航空精密机械研究所^[27]、清华大学^[28]也针对微型切削机床开展了积极研究。

结束语

微型零件的加工技术已引起各国的重视,发达国家已开展相关技术研究,并有不少成果问世。微细铣削和微细车铣切削技术与 LIGA 和光刻等其他微细加工技术相比,具有体积小、能耗低、生产灵活、效率高等优点。而无论从理论分析还是实际加工,微细车铣切削技术更适合于微细长轴类零件的加工,它在改善微型零件的切削状态、实现高速切削、降低切削力、延长刀具寿命、保证零件加工质量、提高加工效率等方面都具有明显的优势,是一种非常适合微型零件加工的方法。只要合理匹配车削主轴与铣削主轴的转速比,合理辅以其他切削用量,就可以加工出理想的微型零件。

本文有参考文献 28 篇,因篇幅所限,未能一一列出,读者如有需要,请向本刊编辑部索取。

(责编 岩石)

