微细切削加工技术(下)

中国航空精密机械研究所 (北京 100076) 荣烈润

3. 微细切削加工的主要方法及应用

(1) 微细车削 在微细车削加工时，由于卧式车床无法达到高精度要求，所以常针对微细车削研制微细车削机床。常采用金刚石车刀，它既能保证得到极小的表面粗糙度值和极高的加工精度，又有很高的寿命（可达数十万米）。微细切削时，切削速度不受刀具寿命的制约，常根据所用机床的动态特性及切削系统的动态特性选取，即选择振动最小的转速（切削速度）。在加工时都采用很小的进给量，并且刀具带修光刃。对有修光刃金刚石车刀，加工时要用显微镜精确对刀，使修光刃与进给方向一致。

1996年，日本通产省工业技术院开发了世界上第一台微型化机床——微型车床：长32mm、宽25mm、高30.5mm，重量约100g，主轴电动机额定功率1.5W，转速10 000r/min。切削试验中的功率消耗仅为卧式车床的1/500，该机床用于切削黄铜。

1999年，日本金泽大学研制了一套长约200mm的微细切削系统。它由微细车床、控制单元、光学显微装置及监视器组成，如图1所示。机床的主要性能参数如下：主轴功率0.5W；转速3 000～15 000r/min，连续变速；径向圆跳动1μm以内；装夹工件直径0.3mm；X、Y、Z轴的进给分辨率为4nm。

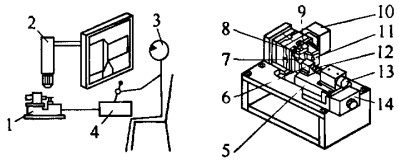

图1 长约200mm的微细车削系统

1. 微细车床 2. 光学显微系统 3. 操作者 4. 控制单元 5. 进给工作台 6. 主轴承 7. 微型夹头 8. 金刚石车刀 9. 刀架 10. $X-Y$轴步进电动机 11. 刀具测力器 12. 联轴器 13. 直流电动机 14. Z轴步进电动机

借用STM（扫描隧道显微镜）的金刚石探针头作为微细车削的刀具头，三角棱锥形金刚石颗粒的刀头装在直径为0.25mm的刀杆上。该机床可加工不同形状的回转体零件（0.3mm直径的黄铜丝毛坯，用单晶金刚石刀具加工），可加工微细轴、微细丝杠、阶梯轮廓面，还可车削端面、切槽、镗孔等。

微细切削加工机床并非因机床的尺寸越小，可加工的工件尺寸就越小，精度就越高。微细车床的发展趋势一方面是微型化及智能化，另一方面是提高系统的刚度

加工后关键尺寸滑轨内圆弧轮廓度0.12mm及滑动槽宽20H8的测量情况：经过测量机取点测量后，滑轨内圆弧面实际尺寸与理论尺寸偏差跳动量±0.06mm以内，基本符合要求。滑动槽宽实际尺寸20～20.10mm，收口量0.10mm，符合零件公差。加工完之后再到后续的喷丸和火焰喷涂碳化物处理，完成产品生产。

5. 结语

截至2009年5月底，ARJ21钛滑轨已完成了13架份的加工。在研制批加工过程中出现了一些问题，例如圆弧槽腔端头槽口收口问题，尺寸$70^{0}_{-0.15}$mm加工难控制问题等，从第一架份到第六架份，产品的超差数量逐渐递减，目前达到10%，同时我们正在实施进一步的过程中的细节研究，并寻求钛合金的高效加工方法，相信经过我们钛合金滑轨团队的共同努力，钛合金滑轨的制造技术会更加成熟、可靠、高效。也希望通过ARJ21钛滑轨的研制为今后飞机钛合金滑轨的应用奠定坚实的基础。**MW**

(收稿日期：20101024)

和强度，以便于加工硬度较大、强度较高的材料，如超高强度镍钢、工具钢和陶瓷等。超高强度镍钢可用金刚石车刀车削出最佳的形状精度和表面质量。

（2）微细铣削 铣削在传统的机械加工中是最常用的加工方法之一。据国外资料报道，微细铣削加工技术在微机械的微结构制作及材料去除加工中，已经表现出极强的发展潜力，尤其是在复杂微型三维结构的加工中，可以获得较高的加工效率及表面质量，微细铣削加工方法更具有独特的优势。它是对光刻、半导体平面硅工艺及 LIGA（电镀和铸塑工艺）技术等微细三维加工工艺的一种补充，特别是当加工比较大的复杂结构（>10μm）时，微细铣削加工更为有效。

在微细铣削中，微细铣刀的制作技术是微细铣削的难点之一。采用聚焦离子束加工技术制作微细铣刀被认为是一种可行的方法。美国 Sandia 国家实验室已用此方法加工出 2 刃、4 刃和 6 刃的微细铣刀。但用聚焦离子束制作端铣头，所用设备及工艺都比较复杂。用 WEDG（线电极电火花磨削）技术结合主轴旋转及轴向进给的计算机数字控制，可以加工出螺旋齿微细铣刀，铣头直径 300μm。

除了微细铣刀之外，高精度（优于 1μm 以上）的微细铣床技术也是很关键的技术。日本 FANUC 公司和电气通信大学合作研制出了世界首例用切削方法实现自由曲面微细加工的超精密铣床。该机床不仅可对包括金属在内的各种可切削材料进行微细加工，而且可利用 CAD/CAM 技术实现三维加工，具有生产率高、相对精度高的优点，为光刻技术领域中的微细加工技术（如半导体平面硅工艺、LIGA 技术）所不及。这种微细铣削技术对微机械的实用化开发研究很有价值。

在此机床研究的基础上，日本 FANUC 公司又研制出一种加工微型零件的五轴联动加工中心，如图 2 所示。它可加工极小的精密微细三维曲面，进行车、铣、磨及电火花加工。

该机床既有编码器半闭环控制，又有激光全息式直线移动的全闭环控制。反馈指令的大小直接影响到伺服跟踪误差，编码器反馈单位为 1/3nm，故跟踪误差在 ±1/3nm以内。直线尺的分辨率为 1nm，跟踪误差在 ±3nm以内。还开发了有 50 万点的高密度误差自动设置的高精度螺距误差补偿技术，来消除电动机编码器和直线检测元件本身的误差对反馈的影响。螺距误差补偿值用 0.3nm 分辨率的激光干涉仪测出。

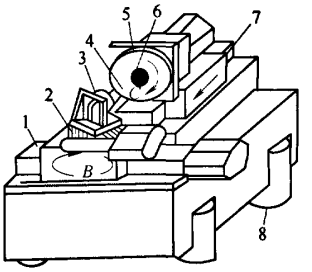

图 2 微型超精度加工中心

1. *X* 导轨 2. *B* 轴回转工作台 3. 空气涡轮主轴 4. 刀具 5. *C* 轴回转工作台 6. 工件 7. *Z* 导轨 8. 空气油减振器

为了降低伺服系统的摩擦，对导轨、丝杠螺母副以及丝杠和伺服电动机转子的推力轴承、径向轴承均采用空气静压支承结构。用空气冷却伺服电动机的转子和定子，使运行时由热引起的温升控制在 0.1℃以下。

瑞士制造的 Willemin W—130 型三坐标数控铣钻中心，装有德国 Heidenhain 高分辨直读光学玻璃刻度尺传感器和通用电气公司的 Century 2000 型高精度控制装置，能严格控制轴向力，并能保持精度无误的主轴速度、恒定的进给速度以及高的主轴定位精度。

（3）微细钻削 微细钻削是微孔加工的重要工艺，它一般可用于加工直径小于 0.5mm 的孔。微细钻削以加工形状和加工余量微小化为特征，精度一般为 10 ~ 20μm，可实现的表面粗糙度值大约为 $R_a = 0.2\mu m$，具有生产率高、不受材料导电性能的限制、能获得大的深径比、表面质量较好等特点，可加工低碳钢、铜、铝及一些非金属材料，可用于电子、精密机械、仪器仪表及钟表等行业。日本已在单晶硅上稳定地钻削出了直径 10μm 的微细孔，最小直径为 6.7μm，其钻削局限性在于不能加工比钻头硬的材料。

微细钻削工艺中微细钻头的制作是一个关键问题。钻头材料一般选用特殊合金钢、高速钢、微粒高韧性硬质合金以及涂层材料。微孔钻头的结构一般为麻花钻、扁锥形钻及半圆梯形钻等。扁钻通常用于加工浅孔，麻花钻多用于钻削微小深孔。市场上可供应的微细钻头最小直径为 50μm，如要得到更细的钻头，可用聚焦离子束溅射技术制成直径 12μm 以上的钻头。但是，聚

焦离子束溅射装置复杂，加工效率低。现用 WEDG 技术已可以稳定地制作出直径小于 20μm 的钻头。与离子束加工比较，该法具有设备简单、可操作性强等特点。

日本住友电气工业公司开发了一种晶粒尺寸为 0.5μm 以下的结晶组织均匀的超硬合金，成为“井衍碳化钨硬质合金 AFI”，洛氏硬度达 93HRA，弯曲强度达 500MPa。已用该材料制成了直径为 0.4mm 以下的微型钻头，其目标是开发直径为 0.05～0.08mm 的微型钻头。用该钻头加工印刷电路板孔，比其他材料钻头的耐磨性高 2 倍、耐折断性高 4 倍以上。

对微型钻床来说，其系统刚度要好，加工时不能有松动，应有消振措施；机床主轴的径向圆跳动一般应小于 2μm，有大于 10 000r/min 的转速，应采用精密对中夹头。目前，国外已成功地推出了一批微孔钻床，例如日本某公司制造的 Machida 微孔钻床是一台全自动微深孔钻床，它可在铜、不锈钢、工具钢、钛合金和陶瓷上钻削直径为 0.1～4.0mm、深径比为 10～150 的微深孔。如装上专用附件，可钻削直径小至 35μm 的孔。该机床可自动控制钻削速度、进给量和钻削深度。另外，该机床还配备一个钻尖传感器（扭矩探测器）；可以反映出钻削路径的微小偏差，从而调整主轴反复进退，直到重新建立所要求的钻削路径为止。由意大利 Pluritce 工厂和美国 Dynamotion 工厂合作生产的 CNC 微型钻床，可加工直径为 0.1mm 的微孔。该钻床的主轴转速为 120 000r/min，精度为 ±0.025mm，重复定位精度为 ±2.5μm，生产率为 235 孔/min。

（4）微细冲压　微细冲压是在微型冲床上利用冲模制作微细零件的工艺，其优点为：无切削成形、生产率高、节约成本、加工精度及质量同于或优于其他机加工。微细冲压的加工精度优于 5μm。

在冲微细孔时，必须解决两个主要问题：一是必须有微细尺寸的冲头和凹模，可通过应用适当的微细加工方法解决，例如用线电极电火花磨削来制作微细冲头，用微细电火花加工技术来制作微凹模；二是微冲头与微凹模间缝隙在微细尺度上的均匀一致性，可以用微冲头和微凹模在微细冲床上依次在线制作的办法来解决。国外，某些机械公司为了制作出高精度微细零件，专门成立了用于加工微型模具的工具车间。该车间的工厂具有高洁净度和高光照强度，采用隔振和防振措施，并采用各种先进机床制造高精度的微型模具。微细小孔冲压技术的研究方向为减小冲床的尺寸，增大微小凸模的刚强度，保证微小凸模的导向和保护等。

日本东京大学生产技术研究所已在厚为 25μm 的不锈钢板上冲出了直径为 25μm 的微孔；在厚为 50μm 的聚酰亚胺塑料上冲出了宽度为 40μm 的非圆截面微孔。

4. 便携式工厂

日本通产省工业技术院机械工程实验室进行了多种加工设备的小型化试验后得出结论：机床尺寸缩小到 1/10时，动力消耗可减少到 1/100。该实验室于 1990 年提出了由微型化机床和操作器组成微型制造系统，即微型工厂的概念，于 1996 年开发了世界上第一台微型化的机床样机——重量为 100g 的微型车床，以后又不断开发了其他微型组件如微型铣床、微型冲床等，并于 1999 年设计创制了世界上第一台桌面型微型工厂样机。该样机占地面积为 700mm×500mm，能进行加工和装配，并试运转成功。试运转生产出的产品是外径为 900μm、长度为 3mm 的枢轴球轴承。为了演示和证明微型工厂的可携带性，该实验室又于 2000 年设计制造了第二台微型工厂样机——便携式微型工厂。它由微型车床、微型铣床、微型冲床、微型搬运机械手、双指机械手及电路、控制装置等组成，重量为 23kg，被放在长 625mm、宽 490mm、高 380mm 的箱子里，箱子可以像旅行箱一样推着走。这座已达到实用化水平的“便携式工厂”适用于加工和组装微型机械的零部件。由于它占的空间小，不仅从动力上，而且还从物料运输上以及车间照明上都节约了能源，符合当今节能减排要求。

5. 结语

微细切削加工技术可以满足三维形状和材料多样性的要求，尤其对于加工中间尺度（其特征尺寸为 0.01μm～1mm），精密微小零件的制造更具优势，现已发展成为微型机械（MEMS）的重要加工手段之一。另外，由于微型机床具有节省空间、节省能源、易于重组以及成本低等方面的优点，因而基于微型机床的微细切削加工技术已逐渐应用到微小零件的制造中，并成为国内外微细制造研究领域的一项新兴技术，具有广阔的发展和应用前景。**MW**　（全文完）（收稿日期：20101102）