

微结构表面超精密加工中切削条件的影响分析

Analysis on Impact of Cutting Conditions in Microstructure Surface Ultra-Machining Process

中国空空导弹研究院 卢 猛
哈尔滨工业大学精密工程研究所 赵清亮

[摘要] 介绍了微结构功能表面加工中的问题,以同轴调制锯齿波微结构的金刚石超精密加工为例阐述了其加工原理,结合试验对刀具刀尖圆弧半径、被加工材料和切削液等切削条件与金刚石超精密切削加工后的微结构功能表面之间的关系进行了分析与讨论,并对主轴转速和刀具进给速度等切削用量与金刚石超精密切削出的微结构功能表面之间的关系进行了分析与讨论。

关键词: 锯齿波微结构 同轴调制微结构 超精密加工 金刚石尖刀

[ABSTRACT] The problems in microstructure function surface machining are introduced, and the ultra-precision machining of coaxial modulating saw-tooth wave microstructure with diamond tool is taken as the example to explain the machining principle. The relationship between cutting conditions including rounded cutting edge radius, workpiece materials, cutting fluid and microstructure function surface after ultra-precision cutting with diamond tool is analyzed and discussed according to the experiment. The relationships between cutting parameters like spindle rotational speed, feed speed and microstructure function surface after ultra-precision cutting with diamond tool are also analyzed and discussed.

Keywords: Saw-tooth wave microstructure Coaxial modulating microstructure Ultra-precision machining Pointed diamond tool

1998年美国国家研究委员会发表了一篇题为“驾驭光——21世纪的光科学与工程”的报告^[1],报告中指出了具有高精度复杂微结构功能表面的光学元件低成本加工有着极为重要的实际应用意义。2000年德国的一篇题为“面向21世纪的光科学技术”的报告^[2]也指出了确定性的加工过程对于复杂表面光学元件的制造来说是占主导地位的优先发展技术之一。这

些都充分显示了微结构功能表面的高效率、低成本加工在21世纪的制造科学技术发展领域中占有非常重要的地位,也有着非常重要的科研价值。

现代众多军品和民品设备装置大量使用了带有微结构功能表面的零件用以简化光路和电路系统,为保证整个系统的高可靠性及高稳定性,对其中此类关键零件提出了很高的精度要求,而微结构功能表面类零件的加工精度也从一个侧面反映了一个国家整体的超精密技术水平^[3]。在微结构的众多加工方法中,金刚石超精密切削显示出了特有的优势。在微结构功能表面的金刚石超精密切削中,除了要求加工机床等设备各项指标高精度外,车削工艺中所选用的切削刀具、切削参数、加工路径、以及切削状态、工作环境等因素对微结构的加工精度也存在着一定程度的影响^[4]。

1 锯齿波微结构的加工原理

1.1 加工方法分析

从原理上讲,微结构功能表面加工技术有:MEMS技术,包括光刻技术、刻蚀技术、沉积和影像可视技术、LIGA技术等;能量辅助加工技术,主要包括激光束加工、离子束加工、电子束加工、电火花加工以及微超声加工等工艺;复制技术,主要包括热压成型、模压成型、注射成型等技术;超精密加工技术,包括超精密金刚石车削、铣削、飞刀切削、金刚石砂轮成型磨削等。

从目前国内外微结构加工技术研究的发展情况来看,传统的MEMS技术、能量辅助加工技术和激光直接写入技术已经不能满足越来越多的复杂光学元件的加工制作要求。而单晶金刚石超精密加工技术以其确定性的加工特点具有很大优势,比如能供加工真正的三维结构,加工零件的成型精度达亚微米级,表面粗糙度 S_a (表示取样轮廓为一表面,利用传统粗糙度值理论计算求得的该取样表面轮廓的算术平均值)达到纳米量级,有些材料甚至可以达到1nm;能够加工大深宽比的结构以及适合于多种材料的加工等。这

种技术不但加工精度高,而且也可以大大降低加工成本,缩短生产周期。

1.2 加工过程原理

同轴调制锯齿波微结构的金刚石超精密加工原理如图1所示^[9]。同轴调制锯齿波随着金刚石尖刀的运动轨迹一次成形,如图1(a)所示,也就是在工件自转的同时,金刚石尖刀沿着 X 向匀速移动,并沿着 Z 向做往复移动。由图1(a)可知金刚石尖刀的移动过程分为两步:第一步是刀具沿 Z 轴、垂直于 X 移动距离 A ,第二步是刀具随着 $Z-X$ 轴同时移动。金刚石尖刀在 X 向的位移 x 和 Z 向的位移 z 的关系为:

$$Z(x) = \begin{cases} A & x = k\lambda \\ \frac{A \cdot x}{\lambda} - A & x \in (k\lambda, (k+1)\lambda) \end{cases} \quad k=0, 1, 2, \dots, (1)$$

式中, x 为金刚石尖刀在 X 向的位移(μm); λ 为微结构表面上锯齿波的波长(μm); A 为微结构表面上锯齿波的幅值(μm); Z 为金刚石尖刀在 Z 向的位移(μm); k 为刀具从当前位置到初始位置锯齿波的个数。

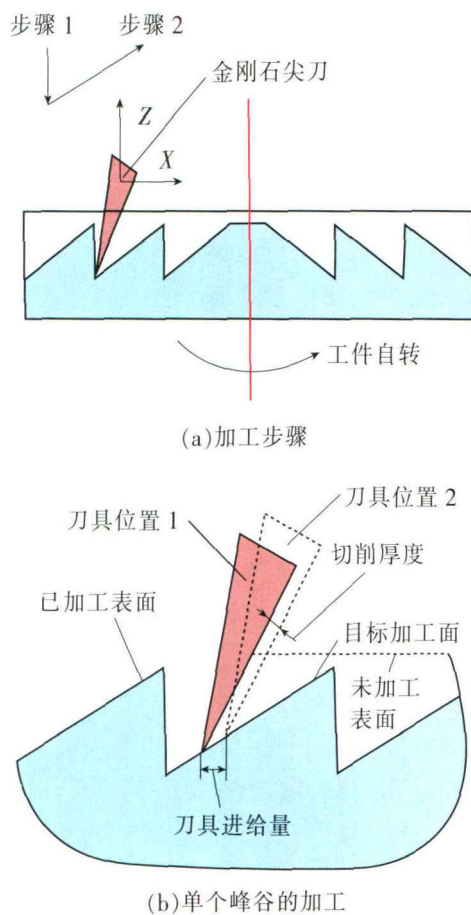


图1 同轴调制锯齿波加工原理

Fig.1 Principle of coaxial modulating saw-tooth wave machining

同轴调制锯齿波的加工过程:当工件自转时,金刚石尖刀由位置1沿直线走到位置2,从而实现了去除材料的车削过程,单个峰谷的加工过程参见图1(b)。图中刀尖在两个位置时的间距为刀具进给量,尖刀切削刃在两个位置时之间的距离即为切屑的厚度。为了加工锯齿波的尖角,要求刀具前端角小于实物如图2所示,图2(a)是峰谷距为 $15\mu\text{m}$,波长为 $500\mu\text{m}$ 的锯齿波微结构的SEM图像,图2(b)是峰谷距为 $25\mu\text{m}$,波长为 $500\mu\text{m}$ 的锯齿波微结构的光学显微镜53倍图像。

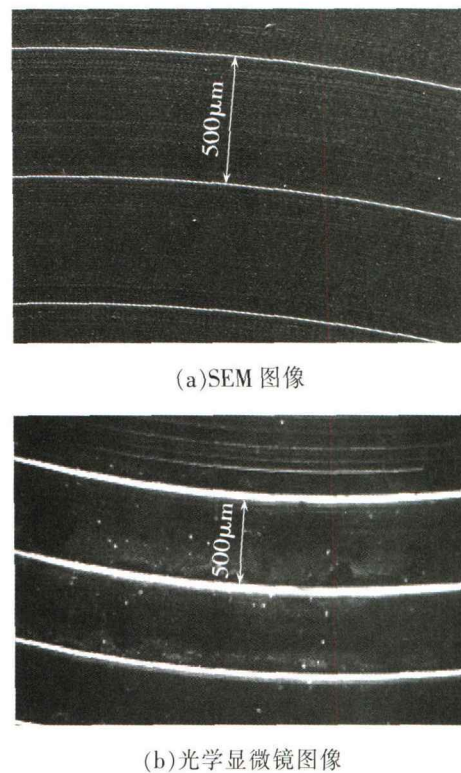


图2 锯齿波微结构的SEM图像和光学显微镜图像

Fig.2 Images of saw-tooth wave structure in SEM and Optical microscope

2 切削条件对加工表面质量的影响

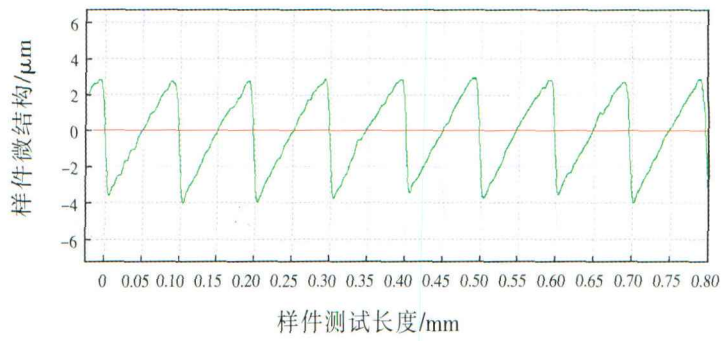
2.1 刀尖圆弧半径的影响

圆弧刃金刚石刀具以其加工残留面积小、对刀容易和使用方便等优点在超精密加工领域得到了广泛应用。而金刚石尖刀刀具作为微结构表面超精密加工专用刀具也逐渐成为各国相关领域科研工作人员关注和研究的重点。圆弧刃金刚石刀具因为其刀尖圆弧半径较大,在加工锯齿波时,在波谷处会产生干涉现象,实际加工出的锯齿波微结构表面相对于理论的锯齿波结构产生很大偏差。圆弧刃金刚石刀具和金刚石

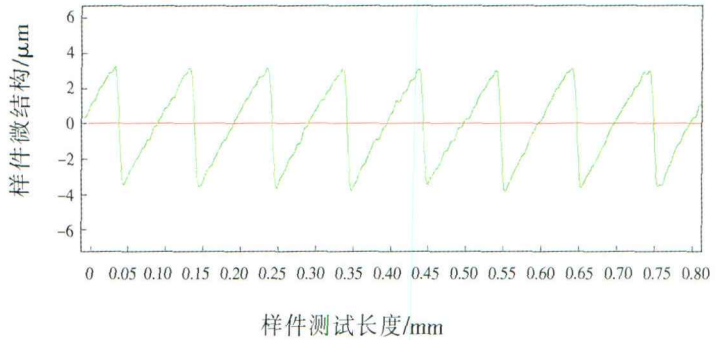
尖刀刀具在相同条件下加工出的锯齿波利用 Form Talysurf 进行检测, 结果如图 3 所示。图 3(a)为 No.5mlGCi 型圆弧刃金刚石刀具(刀尖圆弧半径为0.538mm)加工出的锯齿波, 从图中可以看出在波谷处有明显的干涉现象, 其几何误差为 $4.12\mu\text{m}$ (均方根偏差值);图 3(b)是金刚石尖刀刀具(刀具圆弧半径为 $0.3\mu\text{m}$)加工出的锯齿波, 其几何误差为 $2.35\mu\text{m}$ (均方根偏差值)。

2.2 加工材料的影响

由于工件材料的物理、力学性能对切削加工性有不同程度的影响, 所以在微结构功能表面的金刚石超精密加工中, 被加工的工件必须采用超精密加工材料才能保证加工质量。试验中对 PC 和 LY12 材料在相同条件下进行同轴调制锯齿波加工, 并利用 Form Talysurf 对加工后的工件进行检测和表面形貌数据提取, 检测结果如图 4 所示。通过 Matlab 编程对提取的数据计算得出了它们的粗糙度和形状误差。图 4(a)为在 LY12 工件上加工出的锯齿波, 其表面粗糙度 S_a 为 31nm , 几何误差 $2.59\mu\text{m}$ (均



(a)LY12 材料



(b)PC 材料

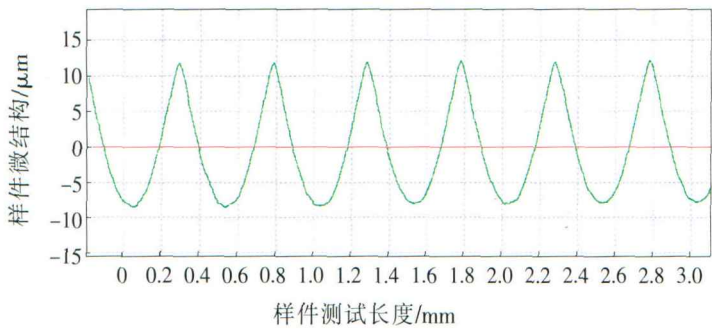
图 4 不同材料上加工出的锯齿波的形貌

Fig.4 Appearance of saw-tooth wave machined on different materials

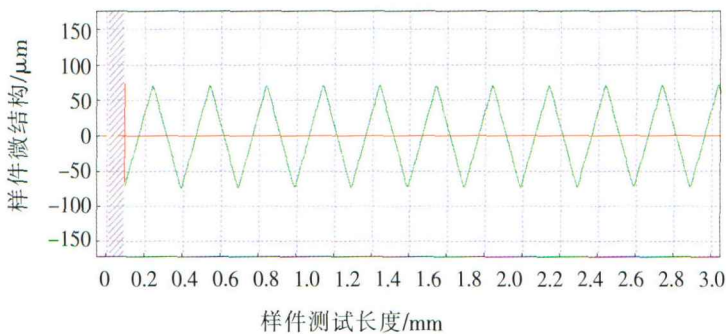
方根偏差值);图 4(b)为在 PC 工件上加工出的锯齿波, 其表面粗糙度 S_a 为 33nm , 几何误差 $2.57\mu\text{m}$ (均方根偏差值)。

2.3 切削液的影响

在微结构功能表面的金刚石超精密加工中, 切削液起着冷却、润滑、清洗以及防腐防锈重要作用, 所以合理选择切削液可以改善切屑、刀具与工件之间的摩擦状况, 减少刀具磨损, 降低切削力和切削温度, 提高加工表面的质量。根据现有试验条件, 选用酒精作为切削液, 因为酒精具有很好的冷却、清洗、防锈性能, 兼有一定的润滑作用, 且透明性较好。图 5 是在试验加工中用切削液和不用切削液所加工出来的锯齿波表面利用 Talysurf CCI 2000 白光干涉表面轮廓仪对加工完的工件在 $360\mu\text{m}\times 360\mu\text{m}$ 面积上检测结果的三维图形。图 5(a)和(b)都是锯齿波, 前者在加工中未使用切削液, 其局部表面粗糙度 S_a 为 70.8nm , 后者则是用了酒精作为切削液, 其局部表面粗糙度 S_a 为 32.1nm 。



(a)圆弧刀具加工



(b)尖刀加工

图 3 不同刀具加工的锯齿波的形貌

Fig.3 Appearance of saw-tooth wave machined by different cutting tools

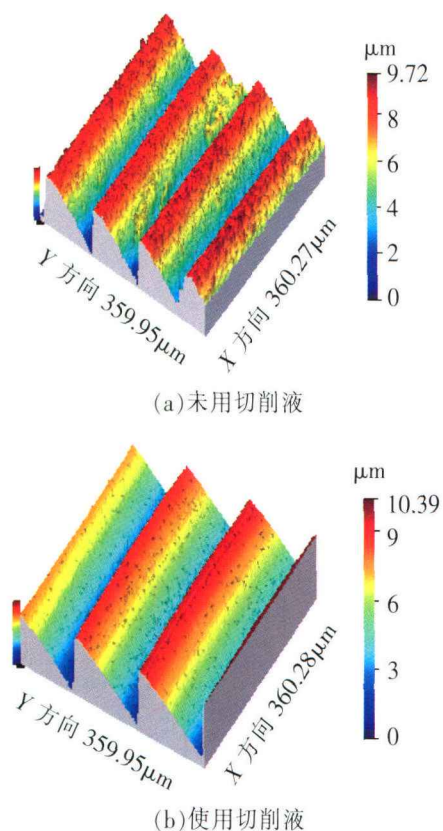


图5 用切削液与不用切削液加工出的锯齿波形貌

Fig.5 Appearance of saw-tooth wave machined with and without cutting fluid

3 切削用量对加工精度的影响

3.1 主轴转速的影响

在微结构功能表面的金刚石超精密加工中,不同材料必然要求选用不同的切削参数。对于同一材料来说,不同的主轴转速加工出来的表面粗糙度也不尽相同,以硬铝合金 LY12 工件上加工同轴调制微结构为例,在不同转速下加工出的锯齿波表面的表面粗糙度也

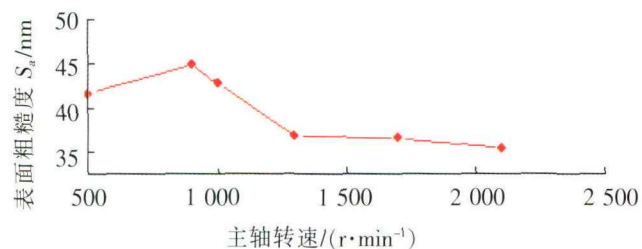


图6 锯齿波微结构表面粗糙度与主轴转速的关系曲线

Fig.6 Curve of relation between roughness of saw-tooth wave microstructure surface and spindle rotational speed

各不相同。图6为金刚石尖刀加工出的锯齿波微结构功能表面的表面粗糙度和主轴转速的关系曲线。

从图6可以看出,在LY12工件上加工锯齿波微结构时,主轴转速在一定范围内对表面粗糙度有一定影响,但影响不是很大,1 000~2 100r/min的范围可以取得较好的加工效果。当主轴转速较低时,切削速度小,此时材料的去除过程以工件的塑性变形为主,工件表面粗糙度值较大;当主轴转速较高时,切削速度变大,切削热随之升高,切削力也随之变大,从而使表面粗糙度值变小。由于试验条件所限,具体影响结果有待进一步研究。

3.2 进给速度的影响

当主轴转速选取在1 000~2 100r/min的范围内进给速度会在很大程度上影响加工效果,仍以硬铝合金 LY12 工件上加工同轴调制微结构为例,在不同进给速度下加工出的同轴调制锯齿波表面的质量各不相同,图7为加工出的锯齿波微结构表面粗糙度与刀具进给速度之间的关系曲线。

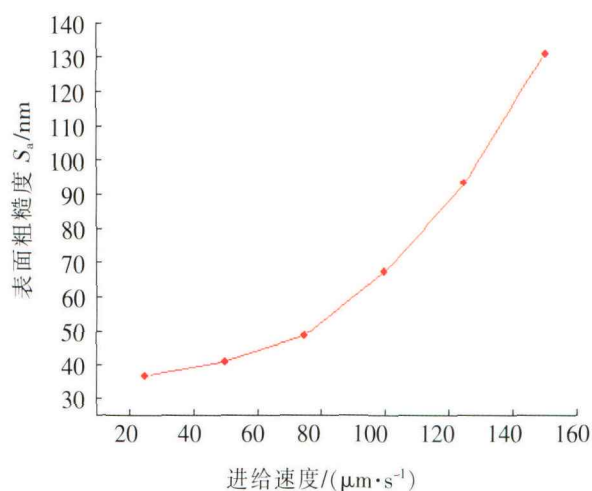


图7 锯齿波微结构表面粗糙度与进给速度的关系曲线

Fig.7 Curve of relation between roughness of saw-tooth wave microstructure surface and feed speed

从图7可以看出,在同轴调制锯齿波微结构的金刚石超精密加工中,刀具的进给速度对微结构的表面粗糙度影响很大,随着进给速度的提高,表面粗糙度值大幅度增加,这是因为金刚石尖刀的刀尖圆弧半径极小,当进给速度过大时,刀尖轨迹会在工件表面形成明显的刀尖切削痕迹,从而使表面粗糙度值增大。

4 试验结果分析

微结构功能表面在武器装备和航空航天等领域的特殊用途决定了其加工质量的标准,即要有较小的形状误差和较好的表面粗糙度,因为形状决定加工表面能否实现其设计功能,表面粗糙程度则决定能否更好地实现预期功能。对于锯齿波微结构表面而言,表面粗糙度 S_a 是指加工面上波长小于锯齿波波长的结构的表面粗糙度,通过测试仪器和编制的 Matlab 计算程序得到;形状误差是指加工表面的形状与理想表面的形状之间的差异程度,本文采用相对应点之间的距离的平均值来表示形状误差。本课题中利用 Form Talysurf 轮廓仪对加工出的同轴调制锯齿波微结构表面的相关数据进行了采集,然后基于 Matlab 编制了计算加工表面的粗糙度值和形状误差的计算程序,运用完全设计法设计出的滤波器进行滤波。

从本课题不同条件下加工出锯齿波微结构的形状误差的计算结果可以看出,形状误差主要受刀具圆弧半径的影响,刀尖圆弧半径越大形状误差越大,其他加工参数所产生的影响不大,这主要是因为锯齿波微结构的表面形状是依赖刀尖的运动轨迹形成的,刀尖圆弧半径过大使其在切削锯齿波波谷时产生干涉现象,影响表面的形状误差。

从本课题中不同加工条件下加工出的同轴调制锯齿波微结构表面的表面粗糙度值的计算结果可以看出,粗糙度受到很多因素的影响,其中试验用的两种材料对表面粗糙度的影响相对较小。刀尖圆弧半径大,表面粗糙度值小;使用切削液也能有效减小表面粗糙度值。这是因为在相同切削速度下,刀具圆弧半径大,表面的未切削区域就会减小,使得切削一致而减小表面粗糙度值,因此,合理选择选择刀具圆弧半径和切削速度是减小加工面粗糙度值的关键。另外,合理选用主轴转速和适当使用切削液也能有效控制切削区域的温度和切削力,从而实现高质量切削,减小表面粗糙度。

5 结论

通过加工试验及检测分析,详细说明了同轴调制锯齿波微结构功能表面的加工原理,并分析了切削刀具、具、切削材料和切削环境等切削条件对微结构功能表面金刚石超精密加工质量的影响,还分析了主轴转速和刀具进给速度等切削参数对加工表面质量的影响,通过分析可知,在现有试验条件下,主轴转速为

1 000~2 100r/min, 刀具进给速度 25~50 μ m/s 左右并使用酒精或者航空煤油作为切削液,采用专用的金刚石尖刀可以加工出较好质量的微结构功能表面。

参 考 文 献

- [1] Washington D C. Harnessing Light. Optical science and engineering for the 21st century. National Research Council. National Academy Press, 1998.
- [2] Siegel A, Litfin G. Deutsche agenda optische technologien fuer das 21. Lenkungskreis Optische Technologien fuer das 21. Jarhundert, 2000.
- [3] 袁哲君,王先逵. 精密和超精密加工技术. 北京:机械工业出版社,1997:1-8.
- [4] 卢猛. 微结构功能表面的金刚石超精密加工工艺的研究[D]. 哈尔滨:哈尔滨工业大学,2007.
- [5] Yan Jiwang, Kouki Maekawa, Jun'ichi Tamaki, et al. Micro grooving on single-crystal germanium for infrared Fresnel lenses. Journal of Micromechanics and Microengineering, 2005 (15): 1 925-1 931. (责编 未艾)

齐二机床首月签订产品合同超亿元

2009 年对于机床行业乃至整个装备制造业来说,形势十分严峻,由于消费需求下降,用户固定资产投资减少,很多机床厂商的订单锐减,产品出现积压,资金链日益紧张,整体形势向不利的方向转变,面临着诸多方面的经营风险。

面对金融危机给制造业带来的巨大冲击,作为中国重型机床的龙头企业,在 2008 年完成工业总产值 37.1 亿元、商品产值 28.5 亿元、实现利润 1.46 亿元、实现税金 1.5 亿元,各项经济指标同比大幅度增长的基础上,2009 年齐二机床发挥国有经济的顶梁柱作用,担当实现小康的重要力量,依托国家产业导向优势、依托自身产品配套优势、依托通用技术集团资源网络优势,围绕国家拉动内需的政策机遇,面向风电、核电、环保、新能源、大飞机、航空航天、高速铁路等国家重点行业,把重型数控落地铣镗床、重型数控龙门铣床、重型数控立、卧式车床、重型机械压力机以及各类大型数控专机等主导产品做精、做大,全面推向市场。

基于这种指导思想,齐二机床集团把市场营销作为企业的龙头,积极推进营销管理创新,抢抓市场先机,赢得了新的市场空间,签定了各式机床产品 11 台,总合同金额达 1 亿多元。(本刊记者 晓霏)