

微V型槽椭圆振动辅助切削加工 轨迹规划研究*

侯 磊, 张 臣

(南京航空航天大学机电学院, 南京 210016)

[摘要] 仿生研究表明,凹坑、沟槽等微织构具有减阻、降噪、自清洁等许多优秀的性能,实现微织构的精密加工对于提高产品性能具有重要意义。然而,目前的微织构加工方法存在着基准面适应性差,加工成本高以及加工周期长等问题。以V型槽减阻织构为目标织构,提出了一种分层椭圆振动辅助切削加工微织构的方法,实现了工件表面上V型槽的加工。首先,根据椭圆振动的轨迹特点,建立了V型槽的形貌参数模型,据此推导出最大残留高度与切削速度之间的关系;其次,根据V型槽的加工深度,设计了分层椭圆振动辅助切削的走刀轨迹;最后进行了V型槽加工试验,对不同的加工方式所获得的V型槽进行对比,验证了关于形貌模型的理论分析的正确性,表明分层椭圆振动辅助切削加工V型槽时具有降低切削力和抑制槽沿毛刺产生的作用。

关键词: 微V型槽; 椭圆振动辅助切削; 形貌模型; 分层切削; 表面粗糙度

DOI:10.16080/j.issn1671-833x.2018.21.070



侯 磊

硕士研究生,研究方向为微纳织构超声振动加工。

仿生研究表明,自然界中存在着很多的微米级或纳米级的特殊结构,这些微纳织构具有优异的性能,如分布在荷叶表面的微型乳突结构,使得荷叶具有很强的疏水性而能够“出淤泥而不染”;鲨鱼皮表面沟槽状的盾鳞,有效减小了鲨鱼在水中游动时的阻力和抑制了皮肤表面处涡流的产生,使得鲨鱼成为游泳速度最快的海洋生物之一^[1];壁虎足部由刚毛和刚毛分支等组成的复杂结构使得其足部具有了强黏附力而能与接触物体表面充分接触,使得壁虎能够“飞檐走壁”;这些微织构所具有的减阻、降噪、自洁、高黏附力等许多优异的性能,在机械制造、光学仪器、生物医学、航空航天等领域具有广阔的应用前景。研究表明,凹坑、矩形槽、金字塔状、V型槽等织构都具有减阻效果^[2];Walsh等^[3]进一步研究

表明,对称状的V型截面的沟槽具有最佳的减阻效果,减阻效果能达到8%左右。而若将V型沟槽织构用于机翼表面和发动机叶片表面,将具有减少表面摩擦力的作用,其节约燃油最大能达到50%左右^[4];韩国学者Lee等^[5]通过对贴覆有沟槽蒙皮的NACA0012机翼进行风动试验,得到了在不同雷诺数下的减阻性能;北京航空航天大学的杨宏伟等^[6]基于中华鲟表皮结构设计出了一种呈菱形排列的凹坑点阵表面,并将其铺设到NACA16012翼型表面上,通过水洞试验,得到了22%的减阻效果。

如何高质量,高效率的加工出这些V型槽等微织构,提高产品的功能和性能,一直是近些年来的研究热点;德国的Klink^[7]和Ludolf^[8]等利用激光表面造型技术在F582型发动机的气缸内孔表面加工出了

* 基金项目: 国家自然科学基金(51675277)。

微凹坑阵列,使得气缸和活塞环之间的磨损降低了50%,柴油消耗量减少了40%,颗粒物排放量减少了10%~30%;Brinksmeier等^[9]利用研磨技术在光学元件上加工出了V型槽,使得该表面的粗糙度达到了5nm;英国的Chang等^[10]采用聚焦离子束技术在端铣刀前刀面上加工出与刀刃成0°、45°、90°,深度为7.5 μm,间距为4.5 μm的V型沟槽阵列,试验研究表明,当V型槽阵列与刀刃的角度为90°时,刀具所受到的平均切削力最小,减少了20%左右;Wu等^[11]在WC/Co硬质合金上采用激光表面织构造型技术加工出了微沟槽阵列织构,试验研究表明,填充有MnS₂固体润滑剂的微沟槽相比于无沟槽的具有更好的润滑减摩效果。上述技术加工V型槽等织构时方便灵活,但是存在着材料适应性差、成本高、效率低等问题,比如激光表面织构技术,由于能量密度极高,在加工微织构的同时,不可避免地会对织构周围材料造成连带烧蚀,改变材料的性质,需要后期的打磨或其他处理,这不仅造成了整个加工成本的上升和加工周期的延长,还会影响V型槽的加工精度;另外,由于激光的可穿透性强,使得该技术不可用于加工透明或者具有特殊光学性能的材料等,因此,如何低成本,高效率地实现微V型槽的加工应用,成为了关键问题之一。椭圆振动辅助切削(Elliptical Vibration Assisted Cutting)技术是在椭圆振动切削技术的基础上发展而来的,作为一种新兴的加工方式,具有减小切削力、抑制加工过程中毛刺的产生和提高工件表面加工质量等优势^[12]。由于椭圆振动加工技术的显著优势,从日本学者Moriwaki^[13]提出这一加工方式后,就引起了研究人员极大研究热情,且很快应用于微织构的加工中。韩国的Kim^[14]在黄铜表面利用椭圆振动技术加工出了深度为20 μm的

V型槽,相比普通切削,平均切削力减少了80%,且V型槽边沿处和出口处毛刺较少;同时,还利用椭圆振动装置和SCD刀具,在镍合金上加工出了深度为10 μm的V型槽和高度为20 μm的金字塔状织构。

综上所述,虽然目前加工V型沟槽织构的方法很多,但是在加工应用中依然存在着材料适应性差、刀具磨损严重、大规模加工成本高等问题。针对上述加工V型槽织构研究中存在的问题,本文以椭圆振动辅助加工技术为基础,提出一种类似于刨削的分层加工微V型槽的加工方法,对于分层加工V型槽的轨迹规划和分层加工工艺进行说明,建立了基于分层椭圆振动辅助加工的V型槽形貌模型,对于V型槽的关键参数及其影响的因素进行理论分析;最后在45#钢工件表面上进行了V型槽加工试验,通过对试验中切屑的形态、切削速度和V型槽表面粗糙度的关系等进行对比分析,验证了本文提出的V型槽加工方式的有效性和建立的V型槽形貌模型的正确性。

椭圆振动辅助切削微V型槽加工轨迹规划

1 微V型槽几何建模

对鲨鱼皮表面盾鳞结构中的沟槽结构进行简化处理,建立等截面的V型沟槽模型,其截面如图1(a)所示,简化后的V型槽的宽度为 l ,深

度为 h ,顶角为 θ ;但是在实际加工中,由于刀具刀尖半径 r 的存在,实际加工的V型槽槽底为圆弧状,且圆弧状所对应的高度为 h' ,如图1(b)所示;根据V型沟槽形状的对称性,其尺寸参数之间的关系为:

$$h' = r \left(1 - \sin\left(\frac{\theta}{2}\right) \right) \quad (1)$$

若V型槽的深度 $h > h'$,则对应的V型槽宽度 l 为:

$$l = 2(h - h') \tan\left(\frac{\theta}{2}\right) + 2r \cos\left(\frac{\theta}{2}\right) \quad (2)$$

若V型槽的深度 $h < h'$,则对应的V型槽宽度 l' 为:

$$l' = 2\sqrt{r^2 - h^2} \quad (3)$$

2 分层切削路径的规划方法

为了减少加工V型槽织构过程中的切削力和提高V型槽表面质量,本文设计了一种均匀分层切削的方法,即多刀递进的方式加工微V型槽,以达到减少刀具磨损和表面粗糙度的目的。图2(a)所示为分层切削V型槽截面模型,将椭圆振动辅助切削技术应用到分层切削中时,得到一种新的切削方式:分层椭圆振动辅助切削(Layered Elliptical

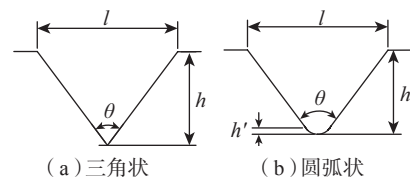
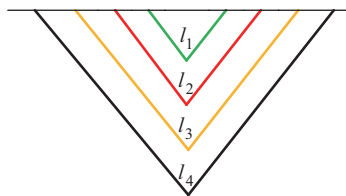
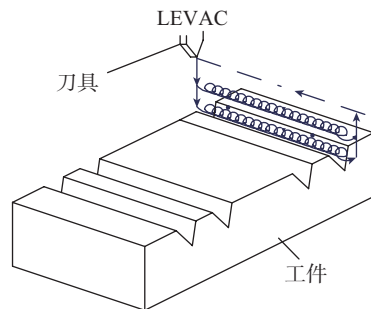


图1 微V型槽截面

Fig.1 Micro V-grooving section



(a) 分层切削截面模型



(b) LEVAC 切削方式

图2 分层切削示意图

Fig.2 Layered cutting schematic

Vibration Assisted Cutting, LEVAC), 其走刀轨迹如图 2 (b) 所示。

在图 2 所示的 V 型槽加工方式中, 由于均匀分层的层数和 V 型槽的表面加工质量, 刀具磨损情况以及加工效率有关, 因此十分重要。为了确定合理的分层层数, 首先根据加工材料所允许的切削速度 v_T , 确定其相对加工性等级 K_v , 其计算公式为:

$$K_v = \frac{v_T}{v_{60}} \quad (4)$$

式中, v_T 为加工材料的允许切削速度; v_{60} 为钢材料的允许切削速度。

其次, 根据相对加工性等级和表面粗糙度要求, 查阅《加工技术手册》, 可以确定其合适的加工厚度, 再根据 V 型沟槽的总深度 h 便可确定具体的均匀分层加工层数 n , 为:

$$n = \frac{h}{d'} \quad (5)$$

另外, 为了提高 V 型槽的精度, 在分层切削加工中, 其单层加工厚度 d' 应满足:

$$d' < h' \quad (6)$$

式中, h' 为刀具圆弧刃所对应的高度。

加工微织构属于精密加工范畴, 本研究中加工的材料为 45# 钢, 但是切削速度较小时, 查阅手册可知, 切削厚度选取 10~25 μm 较好^[15], 考虑到刀具的磨损、切削温度等影响因素, 在本文中 d' 取为 20 μm , 这一结果同时也满足式 (6) 的约束。

在本文的研究过程中采用一种二维共振式的椭圆振动辅助切削装置^[16], 装置的共振频率为 18.1kHz, 相位差为 55°, 切削方向和切深方向的位移振幅分别为 $A=1.26 \mu\text{m}$, $B=3.88 \mu\text{m}$ 。由于金刚石刀具和铁材料具有很强的亲和性, 在加工时产生的高温会使得金刚石中的碳原子与铁原子相互作用而转化为石墨结构, 而使得刀具极易损坏。本次试验刀具选为硬质合金刀具, 刀尖半径为 0.4mm, 前角为 0°, 后角为 7°。

3 基于椭圆振动加工技术的 V 型槽表面形貌模型

由于椭圆振动切削时特有的波浪状的运动轨迹, 在切削 V 型槽过程中, 其运动轨迹便会在切削方向上留下波浪状的纹路, 如图 3 所示, 其中 Δh 为最大的残留高度, s 为切削方向两波峰之间的间距。

从几何方面考虑, 如图 4 所示, 其中实线为采用椭圆振动辅助切削所形成的 V 型槽形貌, 虚线为采用普通加工方式下的 V 型槽形貌, 其中 l 为 V 槽宽度, h 为 V 槽深度, 从微观形貌便可以知道, V 型槽槽壁表面的表面粗糙度主要与间距 s 和残留高度 Δh 两个参数有关, V 型槽的特征参数计算公式为:

$$h = D + B \quad (7)$$

式中, D 为初始切削深度。

$$\Delta h = B \left(1 - \sqrt{1 - \left(\frac{v}{2fA} \right)^2} \right) \quad (8)$$

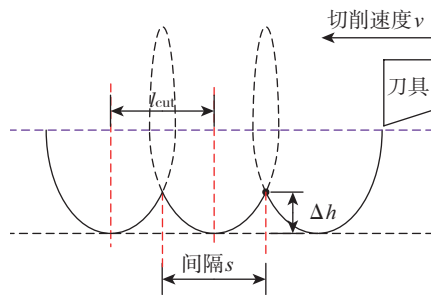


图3 椭圆振动切削过程的走刀轨迹

Fig.3 Elliptical vibration cutting process path

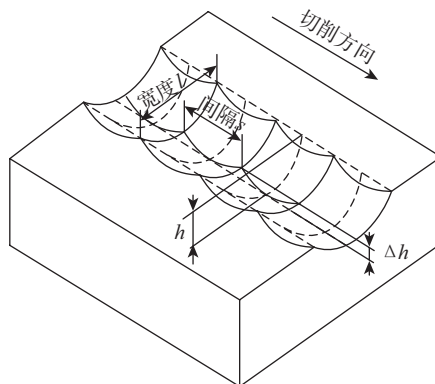


图4 椭圆振动切削 V 型槽表面形貌

Fig.4 Elliptical vibration cutting V-groove surface morphology

$$s = \frac{v}{f} \quad (9)$$

从公式 (8) 可以看出, 切削方向的残留高度 Δh 和切削速度 v , 椭圆振动频率 f , 以及椭圆振动装置的切削方向振幅 A 和切深方向振幅 B 有关, 且残留高度 Δh 随着切深方向的振幅 B 增大而增大, 随着切削方向的振幅 A 增大而减小; 另外, 当取 $f=18.1\text{kHz}$, $A=1.26 \mu\text{m}$, $B=3.88 \mu\text{m}$ 时, 椭圆振动辅助切削的残留高度和切削速度之间的变化关系为随着切削速度的增大, 残留高度也随之增大, 且增大的速度越来越快; 但在实际切削过程中, 由于刀具刀尖半径 r 的存在, 对加工表面上的残余纹路有一定的“挤压”作用, 因此, 在相同的加工条件下, 实际加工所得到的纹路最大残留高度 Δh 要比理论残留高度低; 而公式 (9) 表明, 当装置的共振频率保持不变时, 波纹面上波峰之间的间距与切削速度成正比。

4 V 型槽表面粗糙度计算

分别测量所加工 V 型槽的 3 处表面粗糙度, 求取平均值, 作为整个 V 型槽槽壁表面的粗糙度, 如图 5 所示。

V 型槽槽壁内表面表面粗糙度用 R_a 表示, 其计算公式为:

$$R_a = \frac{1}{l} \int_0^l |y(x)| dx \quad (10)$$

式中, l 为测量长度; $|y(x)|$ 为轮廓

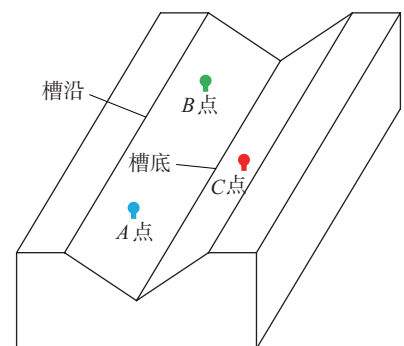


图5 V 型槽表面粗糙度采样点示意图

Fig.5 V-groove surface roughness sampling point schematic

上各点至中线上距离的绝对值。测量结果的不确定性通过标准差 ss 来表示,为:

$$ss = \sqrt{\frac{((x_1 - \bar{x})^2 + (x_2 - \bar{x})^2 + \dots + (x_n - \bar{x})^2)}{n}} \quad (11)$$

式中, n 为采样数目, \bar{x} 为采样数据的平均值, x_1, x_2, \dots, x_n 为采样数据。

V 型槽加工试验

本次试验在美国 FADAL VMC-8030HT 立式铣床上进行,分别采用分层普通加工(LCC)、分层椭圆振动辅助切削加工(LEVAC)两种加工方式,试验中由基于 Labview 编写的控制程序产生的激励信号,通过数据采集卡和电压放大器传递到 EVAC 装置上,如图 6 所示,加工参数及目标微结构的尺寸如表 1 所示,图 7 为 V 型槽的切削结果。最后在 Rtec 公司的非接触式 3D 形貌仪上观察测量切削的 V 型槽表面形貌及槽壁面粗糙度,切屑形态则在显微镜下观察和测量。

1 微V型槽加工误差分析

将加工的微 V 型槽放在 3D 形貌仪上观察,如图 8 所示,其可以明显观察到,在 3 种不同的切削速度下,相比于普通切削,采用 LEVAC 方式加工,其获得的 V 型槽的槽沿处缺陷、毛刺较少,比较光滑,表明 LEVAC 方式可以很好地提高 V 型槽加工质量。

取 V 型槽的中间截面作为整个 V 型槽的截面曲线,并与仿真截面曲线对比,误差计算为:

$$\delta = \frac{|l_{\text{实际}} - l_{\text{仿真}}|}{l_{\text{仿真}}} \times 100\% \quad (12)$$

表 2 为不同加工方式下获得的 V 型槽的截面曲线即参数对比,从中可以发现,采用 LCC 加工方式,其 V 型槽的深度误差为 8.48%,宽度误差为 17.7%,当采用 LEVAC 加工的 V

型槽深度误差为 5.84%,宽度误差为 8.64%,误差均有所降低,但是 V 型槽深度和宽度都超过了仿真的理论 V 型槽深度和宽度,这是由于椭圆振动装置产生的椭圆轨迹在切深方向的轴向长度,以及刀尖的圆弧特性,使得采用 LEVAC 加工方式所获得 V 型槽切削深度超过 $100 \mu\text{m}$,达到

最大值,深度越大时,宽度也随之变大。

2 加工方式对表面粗糙度的影响

加工深度为 0.1mm 的 V 槽,采用分层普通切削(LCC),分层椭圆振动辅助切削(LEVAC)两种切削方式,V 槽槽壁表面粗糙度的测量结果如图 9 所示。

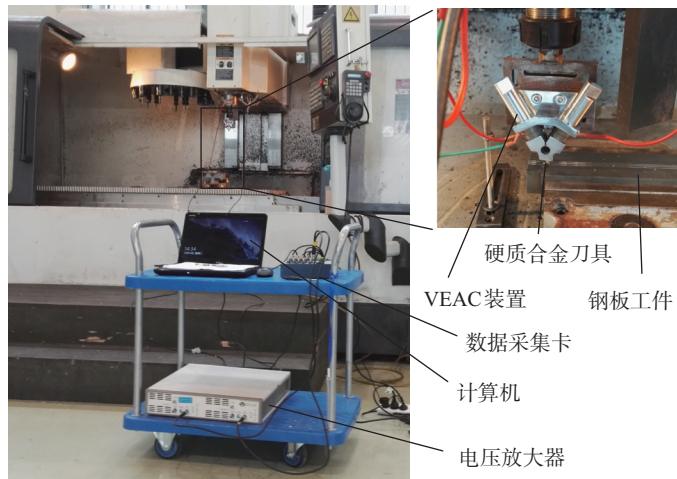
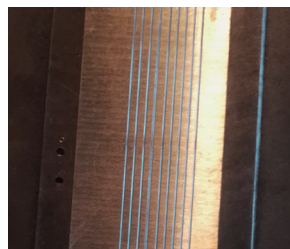


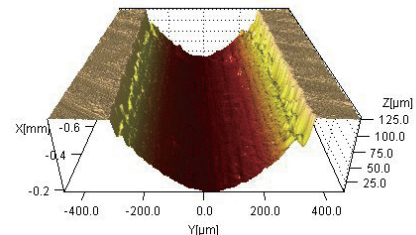
图6 微V型槽切削试验现场
Fig.6 Micro V-groove cutting experiment site

表1 V型槽试验加工参数
Table 1 V-groove test processing parameters

参数	LCC 方式	LEVAC 方式
进给速度 /($\text{mm} \cdot \text{min}^{-1}$)	300	300
	600	600
	1000	1000
V 槽深度 /mm	0.1	0.1
分层层数	5	5
每层切深 /mm	0.02	0.02
V 槽长度 /mm	100	100
振动频率 /kHz	0	18.1



(a) 工件上表面的 V 型槽



(b) 形貌仪下的 V 型槽三维形貌

图7 V型槽加工试验结果

Fig.7 V-groove machining experimental results

从图9中可知,采用分层传统切削方式加工深度为0.1mm的V槽时,相比于分层椭圆振动辅助切削方式,获得的V槽表面的粗糙度要低很多,3种不同切削速度下,其表面粗糙度的平均误差降低了31%左右,证明了LEVAC加工方式在降低表面粗糙度方面的有效性,另外,从图9中可以看出,LEVAC方式所获得V型槽的表面粗糙度的标准差要比LCC方式的小一些,这是由于采用LEVAC方式加工V型槽时,尽管其表面有波浪状的加工痕迹,但是由于加工过程中切削抗力比较小,槽壁表面并没有其他大的缺陷或毛刺,表面粗糙度分布比较均匀,因此其标准差要小一些。

3 切削速度对表面粗糙度的影响

如图9所示,分别采用LCC和LEVAC方式加工V型槽,每种加工方式分别采用 $v_1=300\text{mm/min}$ 、 $v_2=600\text{mm/min}$ 、 $v_3=1000\text{mm/min}$ 3种不同的切削速度加工V槽。

从所得到的V槽表面粗糙度测量结果可以看出,在分层加工微V型槽方式下,采用椭圆振动辅助切削所获得的V型槽表面粗糙度要比采用普通切削加工所获得的更小,表面质量更好。另外,随着切削速度的增加,两种加工方式所获得的V型槽表面粗糙度都呈增大趋势,这与之前对V型槽形貌模型的理论分析一致,即由于切削速度增加时,椭圆振动辅助切削加工方式所特有的波浪状的切削轨迹,留下的残余高度会随之增大,因而使得V型槽的表面粗糙度增大。

4 加工方式对切屑形态的影响

加工深度为0.1mm的V型槽,切削速度均为 $v=600\text{mm/min}$,观察LCC和LEVAC两种加工方式下所获得的切屑形态,并放在显微镜下进行对比,如图10(a)和(b)所示。

如图10所示,通过观察测量发现,LCC方式下的切屑呈现卷曲状、

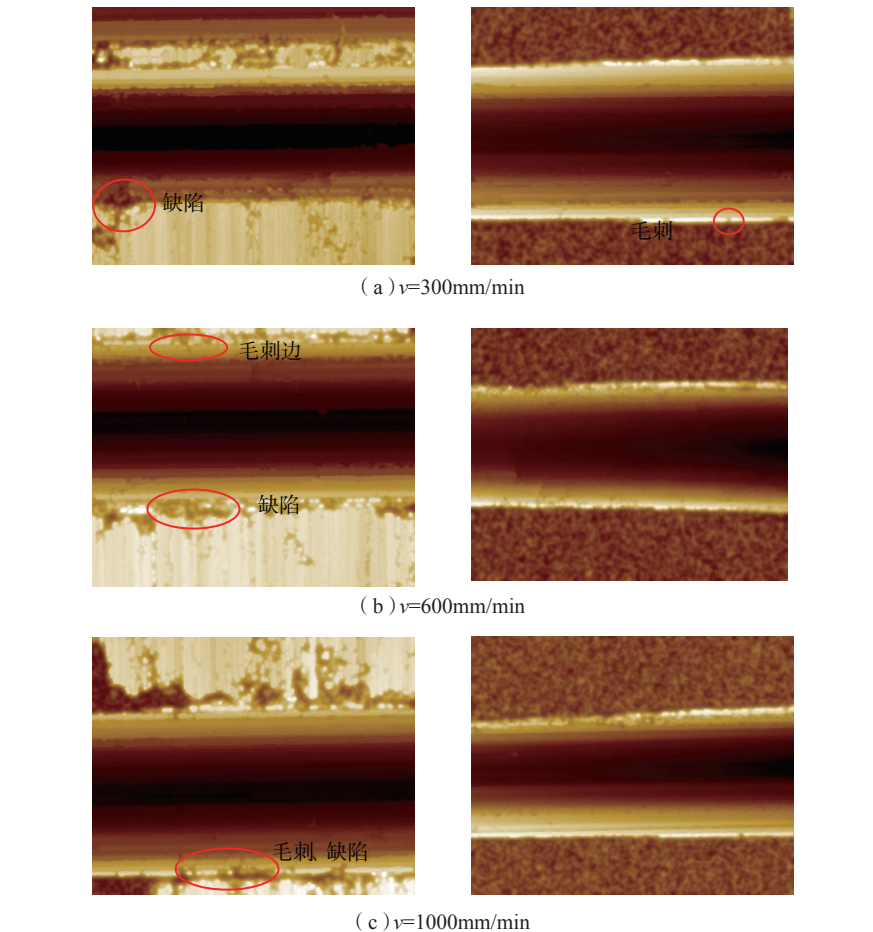


图8 不同加工方式下V型槽切削形貌图(左图为LCC方式,右图为LEVAC方式)
Fig.8 V-groove cutting topography under different machining methods (the LCC method for the left and the LEVAC method for the right)

表2 V型槽参数误差
Table 2 V-groove parameter error

加工方式	深度 $h/\mu\text{m}$	误差 $\delta/\%$	宽度 $s/\mu\text{m}$	误差 $\delta/\%$
仿真	100	—	529.4	—
LCC方式	91.52	8.48	622.69	17.7
LEVAC方式	105.84	5.84	580.77	9.70

连续状,而LEVAC方式下的切屑呈现短碎状、非连续状,排屑较为容易,出现这种现象的原因是由于在LCC方式下,切屑在剪切平面上受到比较大且稳定的剪切应力,而在LEVAC方式下,切屑在剪切平面上受到的剪切应力较小,且为间歇式的,因此呈现出两种不同的切屑形态;另外,LCC方式下获得的切屑曲率半径为 $R=44.84\mu\text{m}$,而LEVAC方式下获得的切屑曲率半径更大一些,

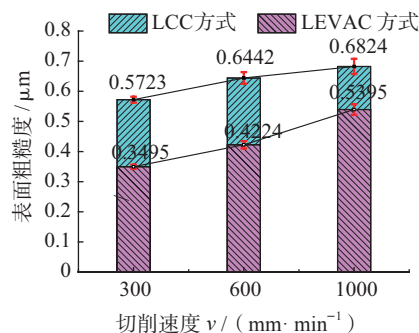


图9 不同加工方式的V槽壁表面粗糙度
Fig.9 V-groove wall surface roughness of different processing methods

为 $R=61.04\ \mu\text{m}$ 。这与实际观察到的 LCC 方式下获得的切屑更为弯曲相一致,造成这种现象的原因是由于在两种加工方式下的切削过程中,切屑的受力不同,如图 11 所示。

在 LCC 方式下,刀具相对于工件作直线运动,切屑受到刀具的水平挤压力 F_t ,另外,切屑在向上排出时受到刀具的竖直向下的阻力 F_c ,在加工的不同阶段,受力情况不变,其合力 R_F 方向始终斜向下,如图 11 (a) 所示,刀具对切屑始终保持斜向下

的“压迫”作用;而在 LEVAC 方式下,由于刀具相对于工件即有直线运动,还有周期性的椭圆运动,因此切屑的受力情况也呈周期性变化,如图 11 (b) 所示,在刀具的一个运动周期 $ABCDE$ 中,当刀具运动到 AB 段的 P_1 点时,由于刀具相对于切屑向下运动,刀具对切屑的摩擦阻力 F_c 方向竖直向下,切屑所受合力的方向 R_F 斜向下,而当刀具运动到 BC 段的 P_2 点时,刀具相对于切屑向上运动,刀具对切屑的摩擦阻力 F_c 方向改为

竖直向上,这一改变,不仅有利于切屑的排出,还有此时其合力 R_F 方向变为斜向上,如图 11 (b) 右图所示,对切屑具有向上的“拉伸”作用;在 CDE 段刀具与切屑发生分离;正是由于在 LEVAC 过程中刀具对切屑周期性的斜向上“拉伸”作用,使得切屑的曲率半径要比在 LCC 方式下较大一些。

结论

(1) 为了解决微 V 型槽加工时的毛刺、缺陷等问题,实现 V 型槽高质量的加工,提出了一种分层椭圆振动辅助切削的加工方式。

(2) 根据 V 型槽的几何特征,对分层椭圆振动辅助切削 V 型槽的轨迹进行规划;另外,根据椭圆振动辅助切削的特点,建立了 V 型槽槽壁表面粗糙度参数模型,对影响 V 型槽槽壁表面粗糙度的因素进行分析。

(3) 采用不同的加工方式进行试验加工,对所得 V 型槽槽壁表面粗糙度和切屑形态进行对比分析,分层椭圆振动辅助加工在降低 V 槽表面粗糙度和排屑方面具有很大优势,采用分层椭圆振动辅助加工其表面粗糙度最大可降低 38.9%。

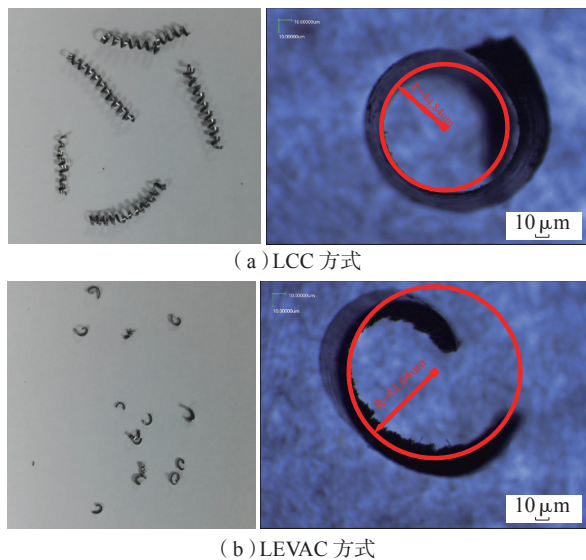


图10 切屑形态及放大图
Fig.10 Chip shape and enlargement

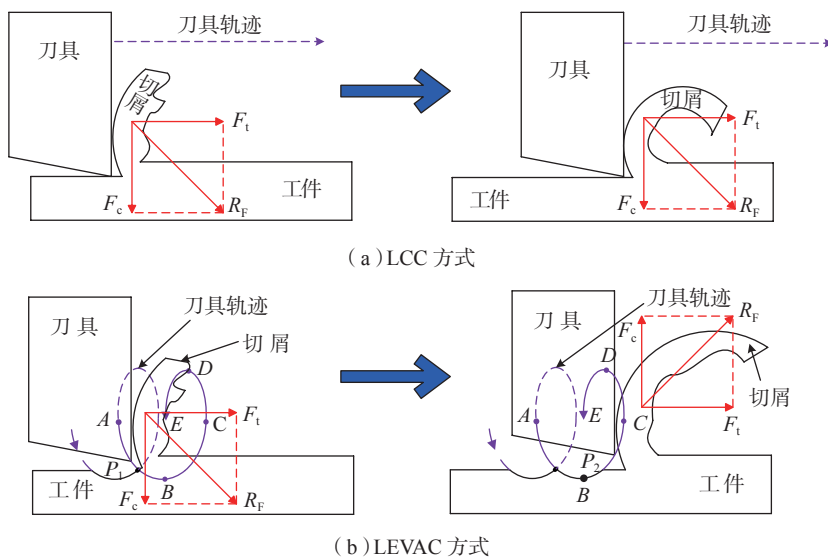


图11 不同切削方式下的切屑受力图
Fig.11 Chip cutting force under different cutting methods

参考文献

[1] 赵丹阳,孙鹏翔,王敏杰,等. 鲨鱼皮微沟槽结构复制技术研究[J]. 大连理工大学学报, 2012, 52(3): 362-366.
ZHAO Danyang, SUN Pengxiang, WANG Minjie, et al. Study on structure replication of shark skin micro grooves [J]. Journal of Dalian University of Technology, 2012, 52(3): 362-366.

[2] WEN L, WEAVER J C, LAUDER G V. Biomimetic shark skin: design, fabrication and hydrodynamic function[J]. The Journal of Experimental Biology, 2014, 217(10): 1656-1666.

[3] WALSH M, LINDEMANN A. Optimization and application of riblets for turbulent drag reduction[J/OL]. AIAA, 1984:

<http://arc.aiaa.org/doi/abs/102514/61984-347>.

[4] KIM G D, LOH B G. Direct machining of micro patterns on nickel alloy and mold steel by vibration assisted cutting[J]. International Journal of Precision Engineering and Manufacturing, 2011, 12(4): 583-588.

[5] LEE S J, JANG Y G. Control of flow around a NACA0012 airfoil with a micro-riblet film[J]. Journal of Fluids and Structures, 2005, 20: 659-672.

[6] 杨弘伟, 高歌. 一种新型边界层控制技术应用于湍流减阻的实验研究[J]. 航空学报, 1997, 18(4): 455-457.

YANG Hongwei, GAO Ge. Experimental study for turbulent drag reduction using a novel boundary control technique[J]. Acta Aeronautica et Astronautica Sinica, 1997, 18(4): 455-457.

[7] KLINK U, FLORE G. New technologies of honing[J]. Society of Manufacturing Engineer, 1998, 21: 98-210.

[8] LUDOLF H, HORST L, MIKE H, et al. Targeting diesel engine efficiency[J]. Industrial Laser Solutions, 2004, 10(19): 32-

35.

[9] BRINKSMEIER E, RIEMER O, GESSENHARTER A. Finishing of structured surfaces by abrasive polishing[J]. Precision Engineering, 2006, 30: 325-336.

[10] CHANG W L, SUN J, LUO X H, et al. Investigation of microstructured milling tool for deferring tool wear[J]. Wear, 2011, 271: 2433-2437.

[11] WU Z, DENG J X, XING Y Q, et al. Effect of surface texturing on friction properties of WC/Co cemented carbide[J]. Materials and Design, 2012, 41: 142-149.

[12] SU Y S, LI Z, LI L, et al. Cutting performance of micro-textured polycrystalline diamond tool in dry cutting[J]. Journal of Manufacturing Processes, 2017, 27: 1-7.

[13] KAWASEGI N, SUGIMORI H, MORIMOTO H, et al. Developing cutting tools with microscale and nanoscale textures to improve frictional behavior[J]. Precision Engineering, 2009, 209: 1612-1620.

[14] KIM G D, LOH B G. Cutting

force variation with respect to tilt angle of trajectory in elliptical vibration V-grooving[J]. International Journal of Precision Engineering and Manufacturing, 2013, 14(10): 1861-1864.

[15] 崔伯第, 郭建亮. 车削加工物理仿真技术及试验研究[M]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学出版社, 2014.

CUI Baidi, GUO Jianliang. Turning simulation technology and experimental research[M]. Harbin: Harbin Institute of Technology Press, 2014.

[16] 史桂林. 基于超声椭圆振动辅助的表面微结构切削加工技术研究[D]. 南京: 南京航空航天大学, 2016.

SHI Guilin. Study of ultrasonic elliptical vibration assisted-cutting micro-texturing[D]. Nanjing: Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 2016.

通讯作者: 张臣, 博士、教授, 主要从事超声振动辅助加工技术与装备、微纳结构设计及制造技术、数控加工状态监测与控制研究, E-mail: meeczhang@nuaa.edu.cn.

Research on Path Planning of Elliptical Vibration Assisted Machining for Micro V-Grooving

HOU Lei, ZHANG Chen

(College of Mechanical and Electrical Engineering, Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing 210016, China)

[ABSTRACT] Biomimetic studies have shown that the micro-textures of pits and grooves have much excellent properties such as drag reduction, noise reduction and self-cleaning. It is of great significance to realize micro-texture precision machining to improve the product performance. However, the current micro-texture machining methods have the problems of poor adaptability of the reference surface, high machining cost and long processing cycle. Therefore, taking the V-grooving as the target micro-texture, this paper presents a layered elliptical vibration assisted cutting micro-texture method, and realizes the machining of the V-grooving on the surface of the workpiece. Firstly, according to the trajectory characteristics of elliptical vibration, the morphological parameter model of V-grooving was established, and the relationship between the maximum scallop height and the cutting speed was derived. Secondly, according to the machining depth of V-grooving, designed layered elliptical vibration assisted cutting path; Finally, the V-grooving machining experiment was carried out, and the obtained V-grooving is compared, which verified the theoretical analysis of the topography model. It shows that the layered elliptical vibration assisted cutting of the V-grooving can reduce the cutting force and inhibit the generation of burrs.

Keywords: Micro V-grooving; Elliptical vibration assisted cutting; Topography model; Layered cutting; Surface roughness

(责编 大漠)