

微槽结构单点金刚石飞切加工的切削力建模*

刘勇,尹自强,李圣怡,关朝亮

(国防科技大学机电工程与自动化学院,湖南长沙 410073)

摘要:超精密单点金刚石飞刀切削技术是一种比较新颖的微槽类结构加工方式。在飞切过程中,切削力是切削过程中重要的物理量,对加工后的表面质量、刀具磨损等有着直接影响。提出了一种基于直角微切削理论的动态微槽类结构飞切的力学模型,基于微切削理论,得到了前、后刀面切削力的理论模型。根据飞切的几何运动特征,建立了飞切过程中剪切角的计算模型,并根据单圈飞切实验得到了飞切过程中剪切面的变化规律。为了验证模型的正确性,采用不同切削参数进行了多圈重叠飞切实验,对切削力进行了测量和分析。实验得到的切削力大小和变化规律与理论模型计算得到的基本一致,证明了该切削力模型的有效性。

关键词:微槽结构;单点金刚石飞切;微切削;切削力建模

中图分类号: TH161 **文献标志码:** A **文章编号:** 1001-2486(2014)02-0175-06

Cutting force model for fabrication of micro-grooves by single point diamond flycutting

LIU Yong, YIN Ziqiang, LI Shengyi, GUAN Chaoliang

(College of Mechatronic Engineering and Automation, National University of Defense Technology, Changsha 410073, China)

Abstract: Ultra-precision single point diamond flycutting is a novel method to manufacture the microstructures with grooves. In the flycutting process, the cutting force is an important physical quantity. It is closely associated with cutting quality and tool wearing. To develop the cutting regularity, a flycutting force model based on the theory of orthogonal microcutting was presented. The cutting force model on rake and flank face is achieved. The shear angle in flycutting process was analyzed based on the kinematical regularity. The value of the shear angle in specific processing parameters technological conditions was achieved by single-turn flycutting experiments. To verify the flycutting force model, overlapping flycutting experiments with variant parameters feed rates were carried out. The validity of the force model is demonstrated with the accordance of experiments and theoretical analysis.

Key words: micro-grooves; single point diamond flycutting; microcutting; cutting force model

超精密飞刀切削是各种复杂微结构表面加工制造的重要方法之一^[1-3],尤其适用于微V型槽阵列、光波导模具、手机导光板模芯等微槽类光学结构阵列的加工,图1所示即为飞切加工微V型槽结构的示意图。飞切过程中切削力是非常重要的物理量,它对加工过程中刀具磨损和工件表面质量等都有着直接的影响^[4-5],因此必须对飞切加工过程中的切削力进行分析与建模。传统切削过程的力学建模以Ernst和Merchant^[6-7]与Lee和Shaffer^[8]等建立的剪切面模型最有代表性。

由于飞切过程中刀具与工件之间的相对运动与传统切削不同,因此需要在传统切削力模型的基础上结合飞刀切削的运动学特点作进一步的分析。目前国内外对超精密单点金刚石飞刀切削过

程中的切削力研究报道非常少,哈尔滨工业大学的赵清亮、郭兵等对V型刀具加工微槽进行了切削力建模分析^[9-10],但是他们都没有对飞切加工过程中剪切面与剪切角的变化规律进行深入研究,因而无法对飞切过程中的切削力变化进行更深入的阐释。为了对超精密飞切的物理过程进行分析,提出了一种基于直角微切削理论^[11]的飞刀切削力模型。首先得到单晶金刚石刀具前、后刀面的切削力理论模型,并根据飞切的几何运动特征,建立飞切过程中剪切角模型,再根据单圈飞切实验得到飞切过程中剪切面的变化规律。为了验证模型的正确性,采用不同切削参数进行多圈重叠飞切实验,对切削力进行测量和分析。

* 收稿日期:2013-06-21

基金项目:国家自然科学基金(51075393);“高档数控机床与基础制造装备”国家科技重大专项(2010ZX04001-151)

作者简介:刘勇(1983—),男,安徽贵池人,博士研究生,E-mail:gfkdy@aliyun.com;

李圣怡(通信作者),男,教授,硕士,博士生导师,E-mail:sylinudt@sina.com

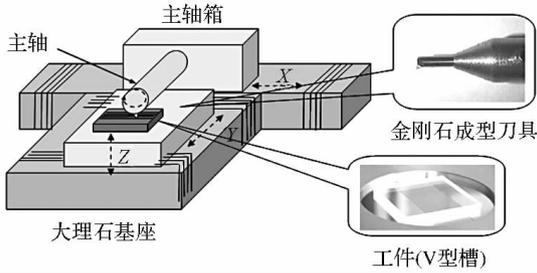


图 1 飞刀加工示意图

Fig.1 Schematic of fly-cutting

1 飞刀切削力建模

1.1 微切削力模型

根据直角微切削模型理论^[11],切削力一般来源于 4 个方面,一是由加工工件材料在切削过程中的弹性变形产生的抗力;二是工件材料在切削过程中由材料塑性变形而产生的抗力;三是加工产生的切屑与刀具前刀面相对运动而产生的摩擦力;四是由于已加工表面材料由于弹性恢复而与刀具后刀面产生的动摩擦力。

图 2 所示为基于直角切削理论的微切削力模型示意图。图中 γ 是刀具的前角, α 是刀具的后角, r 是刀具的切削刃半径, ϕ 是切削过程的剪切角。 F_s 和 F_n 分别为剪切面上的剪切力和法向力, F_t 为垂直于切削方向的吃刀抗力, F_c 为主切削方向的力, $F_{elastic}$ 为由工件弹性变形(材料的回弹)引起的切削方向的合力, $F_{telastic}$ 为由工件弹性变形引起的垂直于切削方向的合力。

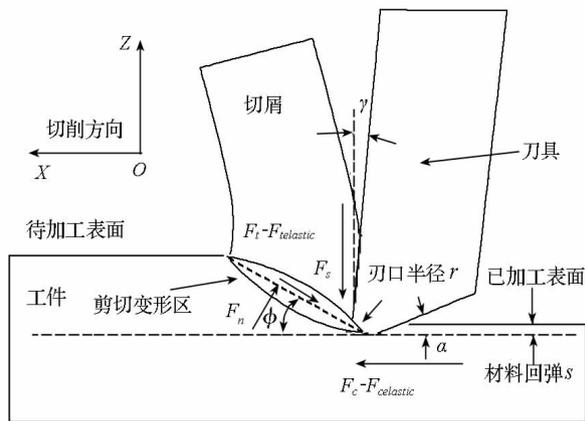


图 2 微切削力模型

Fig.2 Force model of Micro cutting

根据刀具切屑受力平衡原理,有:

$$\begin{cases} F_c = F_s \cos\phi + F_n \sin\phi + F_{elastic} \\ F_t = F_n \cos\phi - F_s \sin\phi + F_{telastic} \end{cases} \quad (1)$$

其中,剪切面切削力为:

$$\begin{cases} F_s = \tau_s S \\ F_n = \delta_s S \end{cases} \quad (2)$$

式中, S 为飞切剪切面的面积; τ_s 为工件材料的剪切屈服强度; δ_s 为工件材料的 0.2% 屈服强度。

由 Von-Mises 屈服准则与 Arcona 与 Dow^[11] 的分析可知:

$$\tau_s = \sigma_s / \sqrt{3} \quad (3)$$

后刀面受的弹力和摩擦力为:

$$\begin{cases} F_{elastic} = \mu \sigma_f S_f \\ F_{telastic} = \sigma_f S_f \end{cases} \quad (4)$$

式中, S_f 为刀具后刀面与已加工表面的接触面积在切削方向的投影; σ_f 为刀具后刀面与已加工表面的平均接触应力; μ 为刀具后刀面与已加工表面的摩擦系数。

通常情况下,相对于前刀面和剪切面,后刀面受力较小,可以忽略,本文主要讨论前刀面和剪切面上切削力的变化。

1.2 飞刀切削剪切角计算模型

飞切剪切面上的力与切削过程中剪切面的面积大小成正比,因此须先建立飞切过程中剪切面的计算模型。为了简化分析,考虑最简单的切削情况,即飞切时工件不进给,使刀具在平面工件表面切削一次,切削过程如图 3 所示。

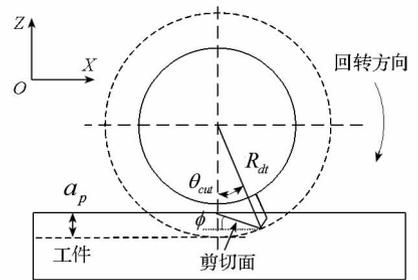


图 3 超精密金刚石飞刀加工示意图

Fig.3 Principle of ultra-precision fly-cutting process

由于飞切过程不同于传统车削,切削的有效深度和刀具切削角度 θ_{cut} 是变化的,因此需要在 Von-Mises 屈服准则基础上结合飞切的运动特点进行分析,建立飞切的理论模型。

当有效切削深度较大时,前刀面上的力是主要部分,可以忽略刀具后刀面的弹力和摩擦力,此时可以近似认为刀具所受到的合力与工件剪切面上的力相等。以 V 型刀具为代表,进行剪切面建模分析。刀具前角取为 0° ,后角为 10° ,刀具的切削角度也为 0° ,即刀具前刀面与工件表面垂直。

如图 4 所示,V 型刀具有两条切削刃参与切削,因此相对应有两个剪切面。它们左右对称,和

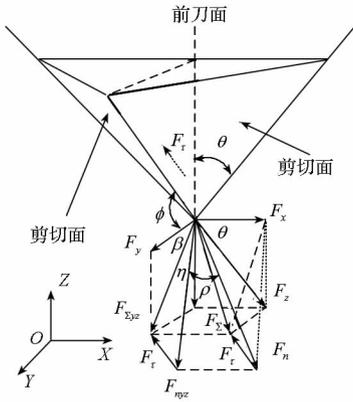


图 4 V型金刚石飞切剪切面示意图

Fig. 4 Schematic of shear plane in flycutting process

前刀面组成锥形。为方便起见,取一个剪切面进行分析。图中取 θ 为两刃夹角的一半, F_y 为 Y 方向切削力, F_z 为 Z 方向切削力。 F_n 为剪切面弹力, F_τ 为剪切面剪切力, F_Σ 为剪切面受力的合力。 $F_{\Sigma yz}$ 、 F_{nyz} 分别为 F_Σ 、 F_n 在 YOZ 平面的投影, ρ 为 F_n 与 YOZ 平面的夹角。 η 为 $F_{\Sigma yz}$ 与 F_{nyz} 的夹角。

图 4 中切削力之间的关系为:

$$F_n^2 = F_{nyz}^2 + F_x^2 \quad (5)$$

$$F_x = c \tan \theta \cdot F_z \quad (6)$$

$$\begin{aligned} F_\Sigma^2 &= F_n^2 + F_\tau^2 = F_{\Sigma yz}^2 + F_x^2 \\ &= F_{nyz}^2 + F_\tau^2 + F_x^2 = F_y^2 + F_z^2 + F_x^2 \end{aligned} \quad (7)$$

由几何关系可知:

$$\phi + \beta + \eta = 90^\circ \quad (8)$$

其中:

$$\tan \beta = \frac{F_z}{F_y} \quad (9)$$

$$\tan \eta = \frac{F_\tau}{F_{nyz}} \quad (10)$$

为建立剪切角 ϕ 与飞切过程中切削力 F_y 、 F_z 之间的函数关系,需要推导 F_n 与 YOZ 平面的夹角 ρ 的计算公式,它们的关系如图 5 所示:

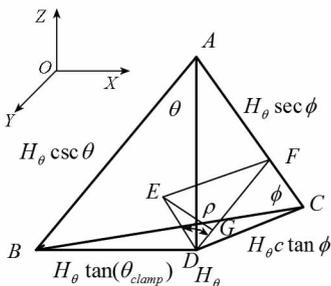


图 5 剪切面三角形的立体结构图

Fig. 5 Schematic drawing of shear plane

图 5 中,剪切面 $\triangle ABC$ 的面积记为 S_c 。根据棱锥的体积可得棱锥的高 EG 的长为:

$$H_{cut} = 0.5 H_\theta c \tan \phi \tan \theta / S_c \quad (11)$$

则有:

$$\cos \rho = \frac{\tan \theta}{2 \sin \phi S_c} \quad (12)$$

得剪切面弹力在 YOZ 面上投影与剪切面合力的夹角 η :

$$\tan \eta = \frac{F_\tau}{F_{nyz}} = \frac{1}{\sqrt{3} \cos \rho} = \frac{2 \sin \phi S_c}{\sqrt{3} \tan \theta} \quad (13)$$

将式(9)和(13)代入式(8)即可通过切削力 F_y 与 F_z 计算得到剪切角 ϕ 。再根据剪切角即可求得剪切面的面积,实现飞切剪切面切削力的计算。

2 切削实验

2.1 实验说明

飞切测力实验所用材料以硬铝 7075 材料为代表,材料的基本属性见表 1。

表 1 硬铝 7075 的材料参数

Tab. 1 Material parameters of alloy 7075

材料属性	数值	材料属性	数值
弹性模量	70GPa	0.2% 屈服强度	525MPa
硬度	160MPa	抗拉强度	575MPa

飞切测力实验设备如图 6 所示。测力仪为 Kistler 公司的 9256C 型三维测力仪。切削刀具为 V 型金刚石成型刀,刀尖夹角为 100° ,如图 7 所示。

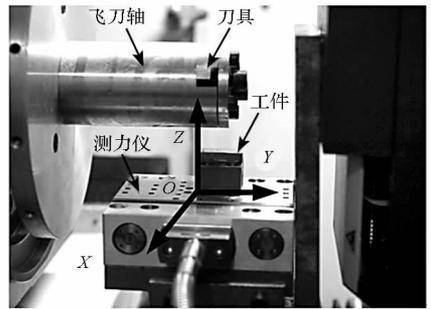


图 6 飞切测力实验设备

Fig. 6 Experimental setup of flycutting

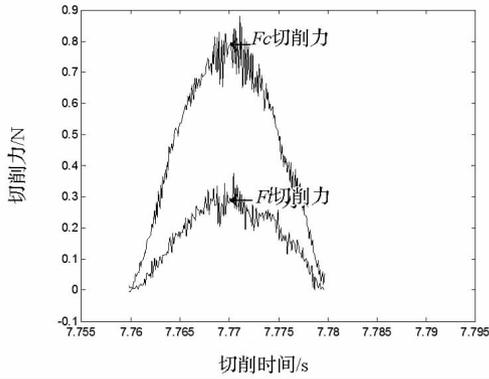


图 7 金刚石刀具

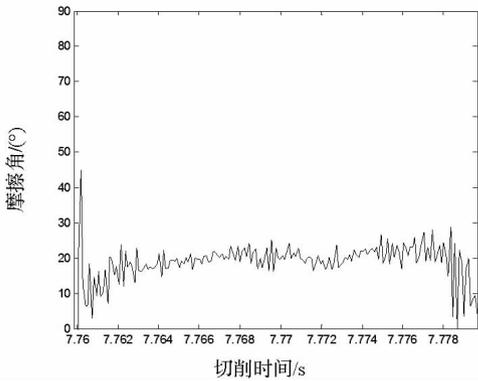
Fig. 7 Single diamond cutting tool

2.2 飞切剪切角实验分析

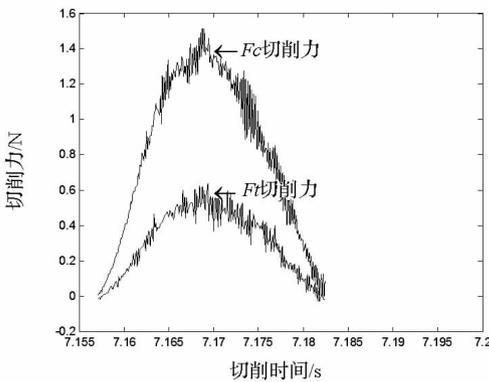
为了深入分析飞切加工过程中剪切角的变化规律,进行了不同背吃刀量下的单圈飞切平面工件的测力实验。切削过程如图 8 所示。



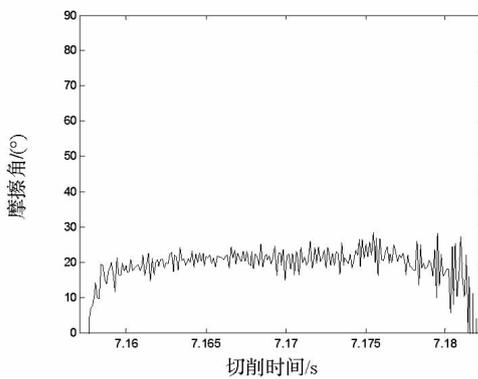
(a) 20µm 背吃刀量下的切削力



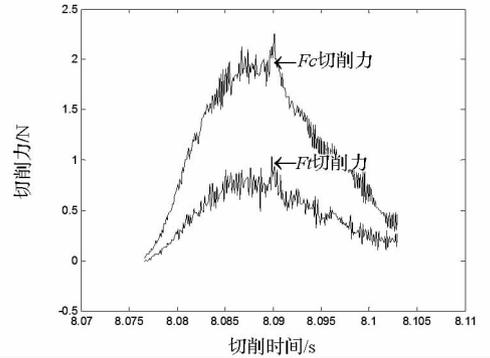
(b) 20µm 背吃刀量下的摩擦角



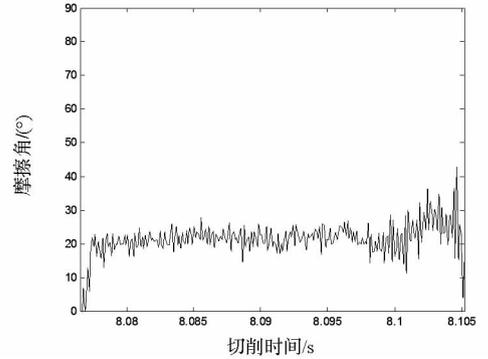
(c) 30µm 背吃刀量下的切削力



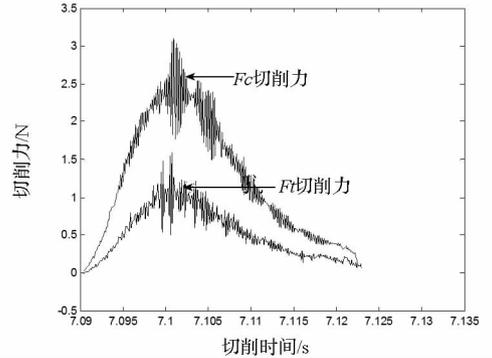
(d) 30µm 背吃刀量下的摩擦角



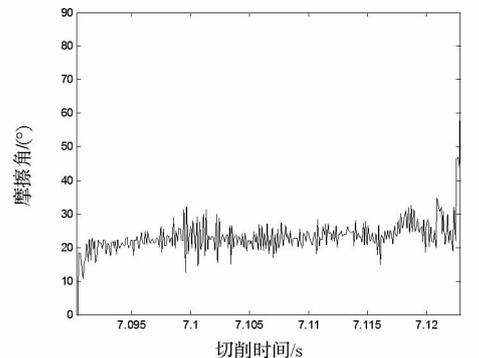
(e) 40µm 背吃刀量下的切削力



(f) 40µm 背吃刀量下的摩擦角



(g) 50µm 背吃刀量下的切削力



(h) 50µm 背吃刀量下的摩擦角

图 8 不同背吃刀量下的切削力和摩擦角

Fig. 8 Cutting force and friction angle

由于切削速度对剪切角一般无影响^[11],为了便于切削力测量与分析,取飞切的主轴转速为 90rpm。工件不进给,每个切深切削进行两次切削以验证数据的重复性,保证实验结果的可靠性。

由图 8 所示的实验结果可知,不同背吃刀量下飞切加工的摩擦角不随飞切深度变化,均为 20° ,代入 1.2 节的公式可解得剪切角为 35° 。

3 多圈重叠切削测力验证实验

为了验证剪切力模型的正确性,在工件表面进行了如图 9 所示的进给条件下多刀重叠切削加工实验,这也是加工微结构时通常采用的飞切方式。

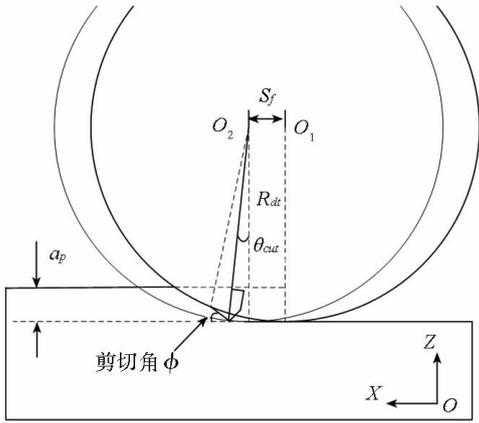


图 9 多刀重叠飞切示意图

Fig. 9 Schematic drawing of overlapping flycutting

采用 2.1 节相同的切削条件,以保证剪切角为 35° 不变。保持主轴转速 500rpm、背吃刀量 $50\mu\text{m}$ 不变,采用不同的进给速度进行切削实验,通过与建模所得到的切削力进行对比,实验及结果如图 10 和图 11 所示。

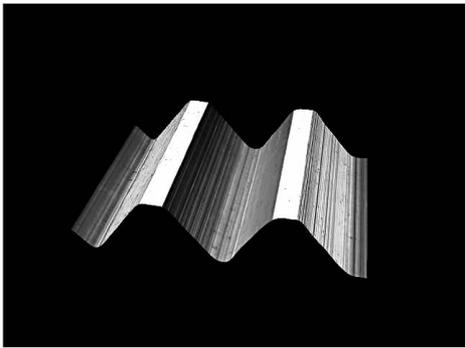
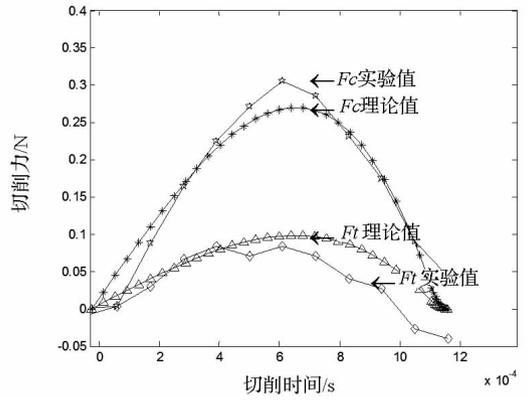


图 10 V 型槽三维照片

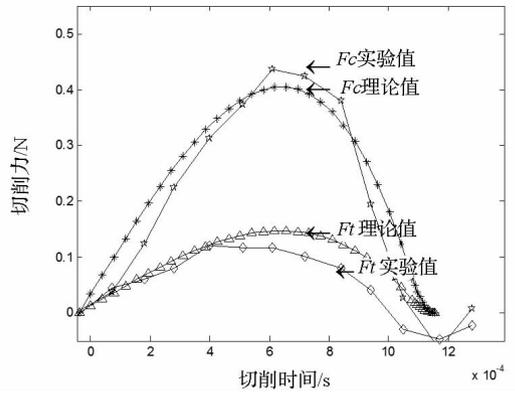
Fig. 10 Picture of micro V-grooves

图 10 所示为在硬铝 7075 材料上飞切加工得到的微 V 槽结构。

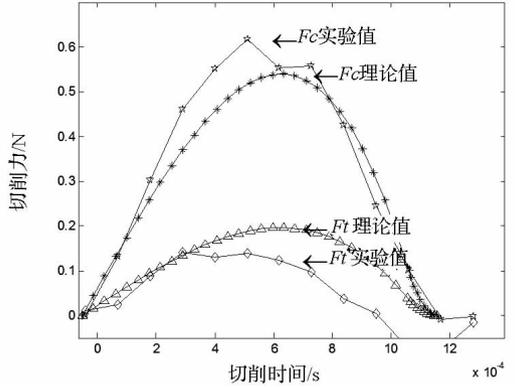
通过图 11 中数据分析可知,基于单圈切削所得剪切角的基础上,得到的切削力理论值与实验值基本吻合,误差在 10% 以内。



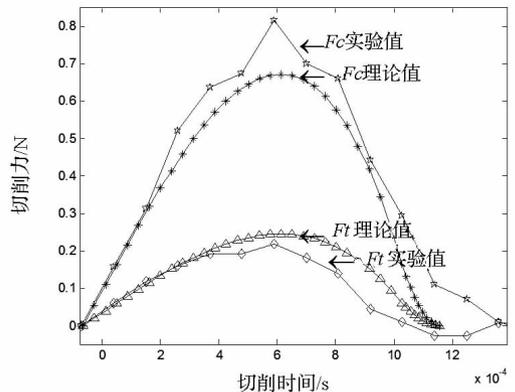
(a) 40mm/min 进给速度下的仿真图



(b) 60mm/min 进给速度下的仿真图



(c) 80mm/min 进给速度下的切削力



(d) 100mm/min 进给速度下的切削力

图 11 重叠切削状态下切削力理论与实验值
Fig. 11 Theoretical force and experimental force

4 结论

基于直角微切削力模型,以 V 型刀具为代表,建立了微结构飞切加工过程中的剪切角模型,得到了剪切角与刀尖角度、摩擦角的几何关系。通过单圈飞切实验可知,飞切过程中剪切角基本保持不变。并通过不同进给速度下多刀重叠切削实验对切削力模型进行了验证,实验结果表明所建立的飞切加工切削力模型和实验结果基本一致,能对超精密飞切加工过程中的切削状态与刀具磨损等提供有效的预测与监控,对超精密微槽类光学微结构的飞切加工有重要的指导意义。

参考文献 (References)

- [1] Weck M, Fischer S. Manufacturing of microstructures using ultra-precision machine tools [C]//Proceedings of SPIE, Part of the Symposium on Design, Test, and Microfabrication of MEMS and MOEMS, 1999, 3680: 450 - 455.
- [2] Sotgiu G, Schirone L. Microstructured silicon surfaces for field emission devices [J]. Applied Surface Science, 2005, 240(1 - 4): 424 - 431.
- [3] Jiang W. Diamond turning microstructure optical components [C]//Proceeding of SPIE 4th International Symposium on Advanced Optical Manufacturing and Testing Technologies, 2009, 7284: 1 - 6.
- [4] Arcona C. Tool force, chip formation and surface finish in diamond turning [D]. North Carolina: North Carolina State University, 1996.
- [5] Yin Z Q, To S, Lee W B. Wear characteristics of diamond tool in ultraprecision raster milling [J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2009, 44(7 - 8): 638 - 647.
- [6] Ernst H, Merchant M E. Chip formation, friction and high quality machined surfaces [J]. Transactions of American Society for Metals, 1941: 299 - 335.
- [7] Merchant M E. Mechanics of the metal cutting process II plasticity conditions in orthogonal cutting [J]. Journal of Applied Physics, 1945, 16(6): 318 - 324.
- [8] Lee E H, Shaffer B W. The theory of plasticity applied to a problem of machining [J]. Journal of Applied Mechanics, 1951, 18: 405 - 413.
- [9] Zhao Q L, Guo B, Yang H, et al. Mechanistic cutting force model for diamond fly-cutting of microstructured surface [C]//Proceeding of SPIE 4th International Symposium on Advanced Optical Manufacturing and Testing Technologies, 2009, 7282: 1 - 6.
- [10] 郭兵. 微结构表面的金刚石飞切加工研究 [D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2008.
GUO Bing. Diamond fly-cutting of microstructured surface [D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2008 (in Chinese).
- [11] Arcona C, Dow T A. An empirical tool force model for precision machining [J]. Journal of Manufacturing Science and Engineering, 1998, 120(4): 700 - 707.