

# 正交车铣瞬时切削面积的建模与分析

金成哲, 郭畅

沈阳理工大学

**摘要:** 通过对正交车铣运动学的分析建立了偏心正交车铣过程中的圆周刃切削深度、圆周刃切削厚度、端面刃切削深度和端面刃切削厚度的最大值表达式。运用所建立的数学模型,通过对切屑形成模型的研究建立了正交车铣瞬时切削面积的数学模型。应用正交试验法研究了正交车铣切削参数(切削深度、铣刀齿数、铣刀转速、偏心量和轴向进给量)对瞬时切削面积的影响规律:铣刀齿数影响最大,依次为切削深度、轴向进给量、铣刀转速和偏心量和运用极差分析探讨了以上五个切削参数对最大瞬时切削面积的影响趋势,最大瞬时切削面积随铣刀转速、偏心量和刀具齿数的增加而减小,随切削深度、轴向进给量的增大而增大。

**关键词:** 正交车铣;切屑;切削面积;切削参数

**中图分类号:** TG506; TH161

**文献标志码:** A

## Modeling and Analysis of Instantaneous Cutting Area on Orthogonal Turn-milling

Jin Chengzhe, Guo Chang

**Abstract:** Based on the analysis of the kinematics of the orthogonal turn-milling, the expression of the side cutting edge cutting depth, the side cutting edge cutting thickness, the cutting depth of the end cutting edge and the maximum thickness of the end cutting edge are established. Based on the mathematical model, the research of orthogonal turn-milling of cutting thickness and depth with the milling cutter rotation and the influence of eccentricity on the chip shape in a cutting cycle are studied. Through the research of chip form establishes, a mathematical model of the orthogonal turn-milling instantaneous cutting area is set up. Study on the five main orthogonal turn-milling cutting parameters by orthogonal experimental method (cutting depth, cutter tooth number, rotational speed, eccentricity and axial feed) effect of instantaneous cutting area; the number of milling cutter teeth has the greatest influence on the cutting area, in order to cutting depth, axial feed, milling cutter speed and eccentricity. The trend of the above five effects of cutting parameters on the maximum instantaneous cutting area is analyzed, by increasing the maximum instantaneous cutting area with the cutter rotational speed, eccentricity, tooth number decreases, and decreases with the increase of cutting depth, the axial feed rate increases.

**Keywords:** orthogonal turn-milling; chip; cutting area; cutting regimes

## 1 引言

车铣作为一种先进的金属切削加工技术,其独特的切削运动可以明显提高加工表面质量和加工效率,国内外学者对车铣切削力进行了一系列的研究。贾春德等<sup>[1]</sup>在国内率先开展了车铣切削力的研究; Lida Zhu 等<sup>[2]</sup>针对正交车铣的切屑以及切削力进行了研究;邱文旺等<sup>[3]</sup>建立了圆形刀片和方形刀片正交车铣切削力的计算模型;Joel Martins 等<sup>[4]</sup>通过分析刀具前一齿与现一齿的位置确定切屑,在切屑的截面上分析切削厚度,进而计算出切削力;Umut Karaguzel 等<sup>[5]</sup>对切屑截面进行分析,研究了正交车铣、切向车铣的切削力,并对车铣的切削速度、表面残留高度进行了研究;Emre Uysal<sup>[6]</sup>和 Umut

Karaguzel 等<sup>[7,8]</sup>随后也对轴向车铣的切削力,车铣的表面质量、偏心量对表面质量、切削力的研究;金成哲等<sup>[9]</sup>通过正交车铣湿式切削试验研究发现,正交车铣高强度钢的切屑属于锯齿状切屑,在切屑内部有绝热剪切的发生。

切削力的大小与切削面积成正比关系,瞬时切削面积越大,切削力越大,因此对瞬时切削面积变化规律的研究能够反映出切削力的变化规律。本文将通过正交车铣运动学分析,研究正交车铣瞬时切削面积的数学模型及切削参数对其影响的规律。

## 2 瞬时切削面积的建模

正交车铣切削加工是通过铣刀的旋转主运动和工件的旋转进给运动形成的复合运动,进而去除材料,达到理想的加工表面质量和加工精度的切削加工方法。正交车铣切削加工运动主要有铣刀旋转转速  $n_1$  (rpm)、工件旋转转速  $n_w$  (rpm)、铣刀的轴向进

给量  $f_a$  (mm/r)。假设工件不旋转, 刀具既绕自身轴线旋转也绕工件轴线旋转, 刀具绕工件旋转的方向为工件旋转的反方向, 速度与工件旋转速度相同, 则刀具在工件表面的轨迹为螺旋线, 正交车铣切削运动在刀具轴向方向投影如图 1 所示。

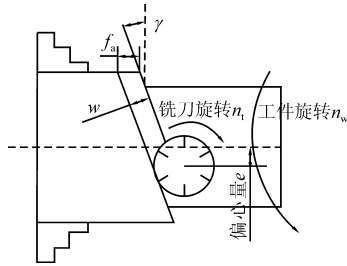


图 1 正交车铣运动参数

图 1 中, 铣刀加工轨迹的螺旋升角  $\gamma$  计算式可表示为

$$\gamma = \arcsin\left(\frac{n_w f_a}{\sqrt{(n_w f_a)^2 + [2\pi(R - a_p)]^2}}\right) \quad (1)$$

式中,  $R$  为工件加工前的半径;  $a_p$  为切削深度;  $n_w$  为工件旋转转速。

正交车铣切削宽度  $w$  的计算式可表示为

$$w = f_a \cos \gamma \quad (2)$$

式中,  $f_a$  为铣刀的轴向进给量;  $\gamma$  为铣刀加工轨迹的螺旋升角。

每齿进给量  $f_z$  的计算式可表示为

$$f_z = \frac{n_w \sqrt{f_a^2 + [2\pi(R - a_p)]^2}}{Z \times n_t} \quad (3)$$

式中,  $Z$  为铣刀齿数。

图 2 为正交车铣切屑形成模型, 由铣刀的圆周刃切削和端面刃切削两部分共同完成。圆周刃切屑由圆周刃切削深度  $a_{pr}$  和圆周刃切削厚度  $h_r$  描述, 端面刃切屑由端面刃切削深度  $a_{pe}$  和端面刃切削厚度  $h_e$  描述, 4 个参数都是关于铣刀转角  $\varphi$  的函数。

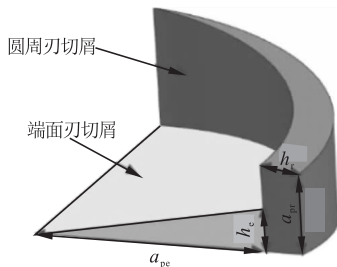


图 2 正交车铣切屑形成模型

由图 2 可知, 可以将圆周刃瞬时切削面积简化为矩形两条边, 分别为圆周刃切削深度及厚度。将端面刃瞬时切削面积简化为直角三角形两条直角边, 分别为端面刃切削厚度和深度, 得到正交车铣瞬

时切削面积的数学模型, 可表示为

$$S = a_{pr} h_r + \frac{1}{2} a_{pe} h_e \quad (4)$$

式中,  $h_e$  为端面刃切削厚度;  $a_{pr}$  为圆周刃切削深度。

图 3 为采用多刃铣刀的正交车铣切削示意图。即铣刀刀齿刚切出上一个刀齿留下的切削表面,  $\theta_2$  为一个完整的切削周期内铣刀绕工件转过的角度。图 4 为正交车铣切削  $ABCE$  段局部放大图。

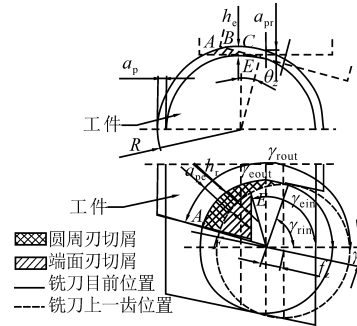


图 3 正交车铣切削示意图

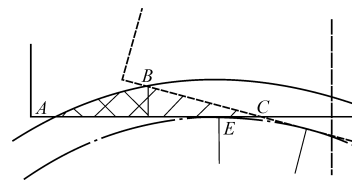


图 4 正交车铣切削 ABCE 段局部放大

在图 3 中, 圆周刃切入角  $\varphi_{rin}$ 、圆周刃切出角  $\varphi_{rout}$  的计算式可表示为

$$\bar{\varphi}_{rin} = \arccos\left(\frac{f_z}{2r}\right) - \gamma \quad (5)$$

$$\varphi_{rout} = \pi - \arcsin\left(\frac{r-w}{r}\right) - \gamma \quad (6)$$

式中,  $r$  为铣刀半径 (mm)。

由于在正交车铣加工过程中, 切削刃运动轨迹为三维螺旋线, 其切削刃在两个相邻时刻并不处在同一平面上, 故根据图 3 计算的圆周刃切入角并不能准确反映圆周刃的切入。

式(5)计算的圆周刃切入角并不是精确值, 具体的切入情况还需考虑圆周刃切削深度。为计算圆周刃切削深度, 建立如图 5 和图 6 所示的刀具坐标系  $Z_T X_T Y_T$  以及工件坐标系  $Z_W X_W Y_W$ 。

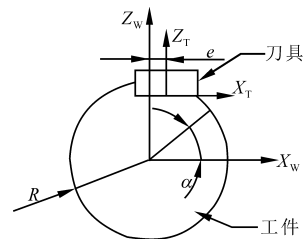


图 5 圆周刃切削深度坐标系 (工件轴向)

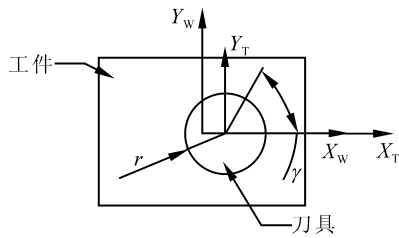


图 6 圆周刃切削深度坐标系(刀具轴向)

由图 5 和图 6 可得,刀具坐标系与工件坐标系的换算关系为

工件坐标系	刀具坐标系	转换关系
$X_w = R \cos \alpha$	$X_t = r \cos \varphi$	$X_w = X_t + e$
$Y_w = Y_t$	$Y_t = r \sin \varphi$	$Y_w = Y_t$
$Z_w = R \sin \alpha$	$Z_t = Z_w - (R - a_p)$	$Z_w = R - a_p + Z_t$

(7)

由此可得圆周刃切削深度的计算式为

$$a_{p1} = a_p - R + \sqrt{R^2 - [r \times \cos(\varphi) + e]^2} \quad (8)$$

由式(8)可知,圆周刃切入角还要满足圆周刃切削深度大于 0 才能判断圆周刃已切入工件,即圆周刃切入角要同时满足式(5)和式(9)。

$$a_p - R + \sqrt{R^2 - [r \times \cos(\varphi_{in}) + e]^2} > 0 \quad (9)$$

最终的圆周刃切削厚度和圆周刃切削深度的表达式分别为式(10)和式(11)。圆周刃的切削厚度由两部分组成, $h_{r1}$ 表示第一段切屑(DA段); $h_{r2}$ 表示圆周刃切削厚度的第二段(AF段)。其计算式可表示为

$$h_r = \begin{cases} h_{r1} = -f_z \cos(\gamma + \varphi) + r - \sqrt{r^2 - [f_z \sin(\gamma + \varphi)]^2} \\ h_{r2} = h_{r2} = r - \frac{r-w}{\sin(\pi - \varphi - \gamma)} (\varphi_{in} < \varphi < \varphi_{out}) \end{cases} \quad (10)$$

$$a_{pr} = a_{p1} (\varphi_{in} < \varphi < \varphi_{out}) \quad (11)$$

$$\theta_z = \frac{2\pi n_w}{n_t Z} \quad (12)$$

由图 3 可得到端面刃切入角及切出角的计算式分别为

$$\varphi_{in} = \pi - \arccos\left(\frac{e}{r}\right) \quad (13)$$

$$\varphi_{out} = \pi - \arcsin\left(\frac{r-w}{r-h_{max}}\right) - \gamma \quad (14)$$

端面刃切削深度  $a_{pe}$  由两段构成,即 EF 段与 FG 段,其中  $a_{pe1}$  描述的是 EF 段, $a_{pe2}$  描述的是 FG 段。最终的端面刃切削深度可表示为

$$a_{pe} = \begin{cases} a_{pe1} = r - \frac{e - (R - a_p) \times \tan\left(\frac{\theta_z}{2}\right)}{\cos(\pi - \varphi)} - h_{r1} (\varphi_{in} < \varphi < \varphi_{out}) \\ a_{pe2} = r - \frac{r-w}{\sin(\pi - \varphi - \gamma)} - h_{r1} \end{cases} \quad (15)$$

由图 3 可知,端面刃的切削厚度的最大值  $h_{emax}$  是端面刃切削深度函数式(16),即

$$h_{emax} = a_{pe} \tan \theta_z \quad (16)$$

### 3 瞬时切削面积的分析

为研究正交车铣加工 5 个主要切削参数  $a_p$  (mm)、 $Z$ (齿数)、 $n_t$ (r/min)、 $e$ (mm)和  $f_a$ (mm/r)对瞬时切削面积的影响,本文设计了 5 因素 5 水平正交试验法,应用 MATLAB 软件来研究切削参数对偏心正交车铣瞬时切削面积的影响,以最大瞬时切削面积为评定标准。正交试验切削参数及结果如表 1、表 2 和表 3 所示。

表 1 L25(5<sup>5</sup>)正交表

	$n_t$ (r/min)	$a_p$ (mm)	$Z$	$e$ (mm)	$f_a$ (mm/r)
1	3000	9	3	10	15
2	3500	4	4	15	20
3	4000	5	5	20	25
4	4500	6	6	25	30
5	5000	7	7	30	35

表 2 正交试验方案及结果

序号	$n_t$	$a_p$	$z$	$e$	$f_a$	$S(\text{mm}^2)$
1	1	1	1	1	1	1.92
2	1	2	2	2	2	2.18
3	1	3	3	3	3	2.15
4	1	4	4	4	4	2.08
5	1	5	5	5	5	2.03
6	2	1	2	3	4	1.97
7	2	2	3	4	5	1.54
8	2	3	4	5	1	1.17
9	2	4	5	1	2	1.42
10	2	5	1	2	3	4.26
11	3	1	3	5	2	0.84
12	3	2	4	1	3	1.62
13	3	3	5	2	4	1.45
14	3	4	1	3	5	3.38
15	3	5	2	4	1	1.99
16	4	1	4	2	5	1.11
17	4	2	5	3	1	0.61
18	4	3	1	4	2	1.95
19	4	4	2	5	3	1.89
20	4	5	3	1	4	2.61
21	5	1	5	4	3	0.56
22	5	2	1	5	4	1.68
23	5	3	2	1	5	2.56
24	5	4	3	2	1	1.03
25	5	5	4	3	2	1.19

表3 极差分析表

	$n_1$	$a_p$	$Z$	$e$	$f_a$
ki1	2.07	1.27	2.63	2.02	1.34
ki2	2.06	1.52	2.11	2.00	1.51
ki3	1.85	1.85	1.63	1.86	1.82
ki4	1.63	1.95	1.43	1.62	2.09
ki5	1.40	2.42	1.21	1.52	1.95
极差	0.66	1.14	1.42	0.50	0.78
因素主→次	$Z > a_p > f_a > n_1 > e$				

运用极差分析理论,从表3分析结果可得到切削参数对最大瞬时切削面积的影响趋势,最大瞬时切削面积随铣刀转速、偏心量、刀具齿数的增加而减小,随切削深度和轴向进给量的增大而增大。

如图7所示,瞬时切削面积随铣刀转速的增加而减小。由式(12)和式(16)可知,增加铣刀转速可以减小铣刀每转过一齿绕工件轴线转过的角度 $\theta_2$ ,从而使端面刃的切削厚度最大值减小;由式(3)和式(10)可知,增加铣刀转速同时,可以降低铣刀的每齿进给量,从而减小圆周刃的切削厚度,两者共同作用于瞬时切削面积使其降低。

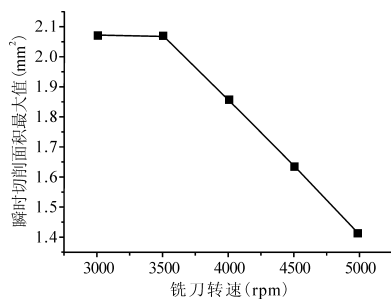


图7 铣刀转速对切削面积的影响

如图8所示,瞬时切削面积随切削深度的增加而增加。由式(8)可知,增加切削深度可以增加圆周刃的切削面积。偏心正交车铣过程中切削面积由圆周刃主导,增加切削深度导致切削面积增大。

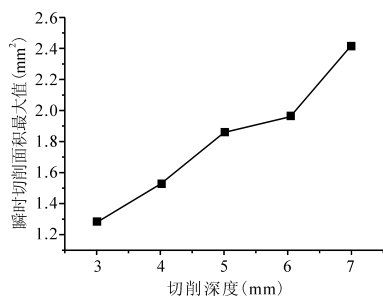


图8 切削深度对切削面积的影响

如图9所示,瞬时切削面积随铣刀齿数的增加而减小。由式(12)可知,增加铣刀齿数可以减小铣刀每转过一齿绕工件轴线转过的角度 $\theta_2$ ,从而减小端面刃切削厚度。由式(3)可知,增加铣刀齿数可

以减小合成每齿进给量,减小圆周刃切削厚度,二者共同作用减小切削面积,影响方式与增加铣刀转速类似。

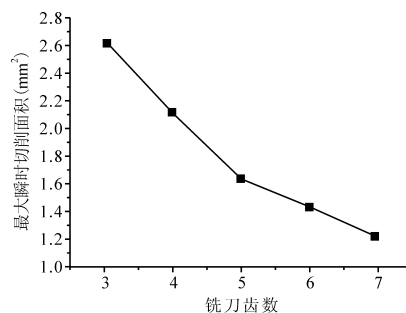


图9 铣刀齿数对切削面积的影响

如图10所示,瞬时切削面积随偏心量的增加而减小。由式(15)可知,增加偏心量主要使端面刃切削深度减小,并使端面刃切入角减小,端面刃作用于切削面积的范围减小,最终导致切削面积减小。正交车铣过程由圆周刃主导,故偏心量对切削面积的影响最小。

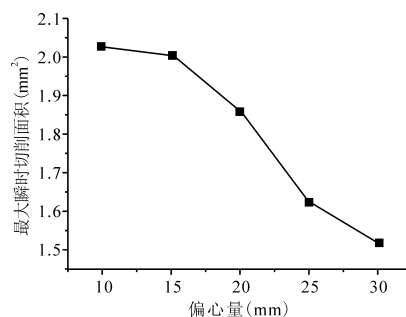


图10 偏心量对切削面积的影响

如图11所示,瞬时切削面积基本随轴向进给量的增大而增大。由式(3)可知,增加轴向进给量,会使每齿进给量增加,从而增加圆周刃切削厚度使切削面积增加。

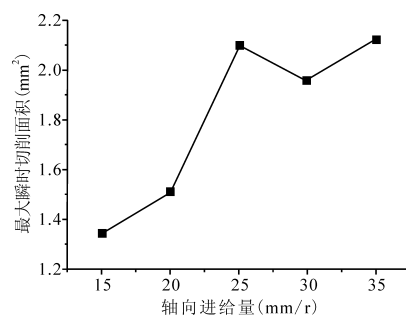


图11 轴向进给量对切削面积的影响

## 4 结语

(1)从正交车铣切削运动学分析出发,建立了工件和刀具坐标系,分别得到圆周刃和端面刃的切

削深度及切削厚度最大值表达式。通过对切屑形成模型的研究,运用所建立的数学模型,建立了正交车铣瞬时切削面积的数学模型。

(2)应用正交试验法和极差分析理论,得到了切削参数对最大瞬时切削面积的影响趋势:铣刀齿数对瞬时切削面积影响最大,其余依次为切削深度、轴向进给量、铣刀转速和偏心量。最大瞬时切削面积随铣刀转速、偏心量、刀具齿数的增加而减小,随切削深度和轴向进给量的增大而增大。

### 参考文献

- [1] 贾春德,姜增辉. 车铣原理[M]. 北京:国防工业出版社, 2003.
- [2] Lida Zhu, Haonan Li, Changfu Liu. Analytical modeling on 3D chip formation of rotary surface in orthogonal turn-milling [J]. Archives of Civil and Mechanical Engineering, 2016, 16(4): 590-604.
- [3] 邱文旺,刘强,袁松梅. 面铣刀正交车铣加工切屑厚度的计算方法[J]. 北京航空航天大学学报, 2015, 41(9): 1638-1644.
- [4] Joel Martins, Crichigno Filho. Prediction of cutting forces in mill turning through process simulation using a five-axis machining center[J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2012, 58(1): 71-80.
- [5] Umut Karaguzel, Mustafa Bakkal, Erhan Budak. Process modeling of turn-milling using analytical approach[C]//3rd CIRP Conference on Process Machine Interactions, 2012(4): 131-139.
- [6] Emre Uysal, Umut Karaguzel, Erhan Budak, et al. Investigating eccentricity effects in turn-milling operations[J]. Procedia Cirp, 2014, 14(14): 176-181.
- [7] Umut Karaguzel, Emre Uysal, Erhan Budak, et al. Analytical modeling of turn-milling process geometry, kinematics and mechanics [J]. International Journal of Machine Tools and Manufacture, 2015, 91: 24-33.
- [8] Umut Karaguzel, Emre Uysal, Erhan Budak, et al. Effects of tool axis offset in turn-milling process [J]. Journal of Materials Processing Technology, 2016, 231: 239-247.
- [9] 金成哲,贾春德. 正交车铣高强度钢切屑形成机理的研究[J]. 哈尔滨工业大学学报, 2006, 38(9): 1610-1612.  
第一作者:金成哲,博士,教授,沈阳理工大学机械工程学院,110159 沈阳市  
First Author: Jin Chengzhe, Doctor, Professor, School of Mechanical Engineering, Shenyang Ligong University, Shenyang 110159, China

## 《现代刀具设计与应用》征订



《现代刀具设计与应用》由成都工具研究所、行业协会和专业学会及标委会组织高等院校、科研院所、刀具企业和用户企业的10余名刀具专家编写,国防工业出版社出版。本书介绍了近20多年来在先进制造技术快速发展过程中切削加工工艺的发展趋势,全面反映了切削技术和刀具专业所取得的新进展。

全书600余页,大16开,130余万字,共15章,分成两篇。第一篇为刀具设计基础,共7章,介绍金属切削基本原理、刀具材料、刀具几何参数及结构设计、刀具涂层、工具系统及刀具装夹技术和刀具标准等现代刀具设计应用的基础知识;第二篇为刀具应用技术,共8章,内容涵盖了为获得最佳加工效果和正确应用刀具的系统专业知识,包括工件材料可加工性、切削数据库、切削冷却润滑等基础知识以及高速、高效、硬切削、干式切削等切削新工艺,刀具动平衡和

安全技术、加工表面完整性、铣削走刀路线及编程方法和刀具管理等切削刀具专业的新技术。内容翔实新颖,充分显示了刀具应用技术在现代切削技术中的重要性。

本书可供从事金属切削专业技术工作的工程技术人员、科研人员在开发刀具新产品、应用切削新工艺、提高加工效率、降低加工成本等实际工作实践中使用,也可作为高等或中等专业学校机制专业师生的参考书及各类切削技术和刀具培训班的教材。本书对刀具制造企业开展技术创新和提高为用户服务的能力起到积极作用,为提升我国装备制造业切削加工技术水平具有重要的现实意义。

本书定价128元,欢迎专业工作者及专业图书资料部门订阅,联系方式:

四川省成都市府青路二段24号 工具技术杂志社发行部

电话:028-83245073

邮箱:toolmagazine@163.com