

# 面向流屑角突变建模的切削状态参数经验公式的获得及应用

张义凯,熊良山,杨鹤青

华中科技大学机械科学与工程学院

**摘要:** 从提高流屑角突变模型的预测精度出发,建立了切削状态参数与3个切削控制参数之间关系的新经验公式。提出了一种通过迭代法准确设定有限元仿真软件刀-屑摩擦因数的方法,并通过直角切削 Al6061-T6 工件的有限元仿真试验,获得了一组不同切削控制参数组合条件下的切削状态参数数据。根据该数据拟合出剪切角  $\varphi$ 、刀-屑摩擦角  $\beta$ 、剪切应力  $\tau_s$  关于刀具前角  $\gamma_0$ 、进给量  $f$  和切削速度  $v$  的经验公式,并通过一组直角切削试验,验证了所得经验公式的有效性。将新建经验公式应用于流屑角突变建模过程后,所得模型关于突变临界切削宽度的平均预测误差减小了 27.2%。

**关键词:** 流屑角突变;建模;切削状态参数;经验公式;有限元仿真

**中图分类号:** TG501.1;TH164

**文献标志码:** A

**DOI:**10.3969/j.issn.1000-7008.2020.04.017

## Obtaining and Applying of Empirical Formulas of Cutting State Parameters for Modeling of Chip Flow Angle Catastrophe

Zhang Yikai, Xiong Liangshan, Yang Heqing

**Abstract:** To improve the prediction accuracy of the model of CFA catastrophe, the empirical formulas between CSP and three cutting control parameters are established. A method of accurately setting the friction coefficient in the finite element simulation software by iteration is proposed, and a set of CSP changing with the cutting conditions are obtained through the finite element simulation of the orthogonal-cutting of Al6061-T6 workpiece. The empirical formulas for calculating the CSP (the shear angle  $\varphi$ , the tool-chip friction angle  $\beta$  and the shear stress  $\tau_s$ ) are fitted accordingly, in which the tool rake angle  $\gamma_0$ , the feed rate  $f$  and the cutting speed  $v$  are considered. A series of orthogonal-cutting experiments of Al6061-T6 workpiece are completed to validate the accuracy of these empirical formulas. After applying the new empirical formulas to the modeling of CFA catastrophe, the average of prediction error of the critical width of cut of the new model is reduced by 27.2% compared with the empirical formulas established by previous researchers.

**Keywords:** chip flow angle catastrophe; modeling; cutting state parameters; empirical formula; finite element simulation

### 1 引言

试验发现,双刃切削时流屑角突变会导致各向切削力降低最高达 75%<sup>[1]</sup>,其对工艺效果和节能降耗的影响不容小觑。建立流屑角突变现象的数学模型,是对流屑角进行控制和利用的基础,对机械制造领域的节能增效具有重要意义。

工件材料在切削过程中的剪切角  $\varphi$ 、刀-屑摩擦角  $\beta$ 、第一变形区的剪切应力  $\tau_s$  等切削变形与切屑受力状态参数(以下简称切削状态参数)随着切削控制参数的非线性变化特性,是产生流屑角突变现象的根本原因,也是建立流屑角突变现象数学模型的重要因素。Shi H.<sup>[1]</sup>应用突变理论的概念和方

法,对流屑角突变现象的“突跳性”与“滞后性”进行了解释,但在研究过程中将工件材料的剪切应力  $\tau_s$  和刀-屑摩擦角  $\beta$  均设为常数,所得流屑角突变临界切削条件的预测结果与实际情况存在较大差距。Usui E.等<sup>[2]</sup>关于预测三维切削力及切屑流动方向的研究表明,切削状态参数对流屑角的计算结果有较大影响。因此,文献[3,4]在建立流屑角突变模型过程中,均引入了根据前角计算切削状态参数的经验公式,所建模型关于突变临界切削宽度的预测精度获得较大提升,但所建立的经验公式未考虑进给量  $f$  和切削速度  $v$  对切削状态参数的影响,与实际切削过程仍然存在一定差距。

随着高性能计算机和软件技术的发展,有限元仿真技术日趋成熟,在金属切削领域的应用越来越广泛<sup>[5]</sup>,并为获取切削状态参数提供了有效途径。

本文通过切削过程的有限元仿真试验获取切削状态参数数据,建立剪切角 $\varphi$ 、刀-屑摩擦角 $\beta$ 、剪切应力 $\tau_s$ 与切削控制参数刀具前角 $\gamma_0$ 、进给量 $f$ 、切削速度 $v$ 之间的经验公式,并将其引入流屑角突变建模过程。试验结果表明,新模型关于突变临界切削宽度的平均预测误差相对旧模型减小了27.2%。

## 2 基于有限元仿真的切削状态参数获取

采用 AdvantEdge FEM 软件对 Al6061-T6 工件的直角切削过程进行有限元仿真,以获得切削状态参数值。

### 2.1 有限元模型

AdvantEdge FEM 切削仿真软件无需预先假定切屑形状、定义分离线以及切屑和工件分离准则等,避免了网格再划分和网格畸变等问题,计算收敛速度快,运算精度与效率高。材料本构模型选择 AdvantEdge FEM 中的 Power Law<sup>[6]</sup>,基本参数设置见表1。

表1 仿真参数

工件	材料	Al6061-T6
	尺寸(mm)	5×3
	网格划分(mm)	0.02~0.1
刀具	材料	PCD
	后角(°)	10
	刀尖圆弧半径(mm)	0.025
	网格划分(mm)	0.02~0.1
加工	切削长度(mm)	1.5
	切削宽度(mm)	0.5

#### (1) 切削控制参数

要保证流屑角突变数学模型的预测精度,需将切削控制参数的变化范围覆盖可能触发流屑角突变的切削控制参数变化范围。触发流屑角突变的刀具前角 $\gamma_0$ 、进给量 $f$ 和切削速度 $v$ 等切削控制参数的变化范围较大<sup>[4]</sup>,在同时考虑生产中切削控制参数实际取值范围的条件下,按照表2所示的9个水平来设定仿真时的切削控制参数,采用正交法设计仿真试验。

表2 控制参数

$\gamma_0$ (°)	-15	-10	-5	0	5	10	15	20	25
$f$ (mm/r)	0.05	0.1	0.15	0.2	0.25	0.3	0.4	0.5	0.7
$v$ (m/min)	2	4	6	8	10	12	15	18	21

#### (2) 刀-屑摩擦因数

为得到精确的仿真结果,需要由用户设定 AdvantEdge FEM 软件中的刀-屑摩擦因数 $\mu$ 。刀-屑摩擦因数 $\mu$ 设定为不同的值,仿真得到的切削力 $F_c$ 和切削推力 $F_p$ 也不同。

根据仿真结果,按照公式得到的 $\mu$ 值为

$$\mu = \frac{F_p + F_c \tan \gamma_0}{F_c - F_p \tan \gamma_0} \quad (1)$$

试验发现,根据公式计算出的值(简称计算值)与设置值一般都不相等。分析原因是:当 $\mu$ 的设置值为0~1时,该设置值与计算值之差的绝对值 $\Delta$ 只存在一个极小值(见图1)。采用迭代法解决上述问题,获取相对合理的 $\mu$ 设置值。具体思路和步骤是:根据经验将刀-屑摩擦因数设置为 $\mu_1$ ,进行第一次仿真,由式(1)计算得到刀-屑摩擦因数的第一次迭代结果 $\mu_2$ ,计算迭代结果与设置值之间的差 $\Delta_1 = |\mu_2 - \mu_1|$ ;再将刀-屑摩擦因数设置为 $\mu_2$ ,进行第二次仿真,用同样方法得到第二次迭代结果 $\mu_3$ ,以及迭代结果与设置值之间的差 $\Delta_2 = |\mu_3 - \mu_2|$ 。重复上述步骤,直至完成第 $i$ 次仿真,且 $\Delta_i > \Delta_{i-1}$ 为止。将第 $i-1$ 次仿真结果作为后面获取切削状态参数的仿真试验结果, $\mu_i$ 即为合理的 $\mu$ 设置值。第 $i-1$ 次仿真时的设置值 $\mu_{i-1}$ 与计算值 $\mu_i$ 见表3。

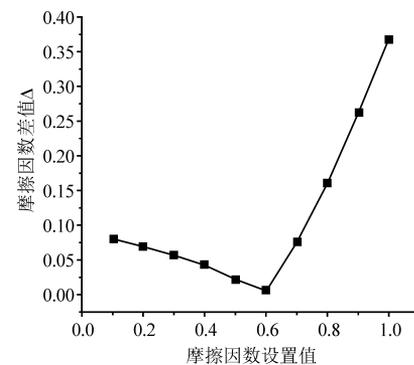


图1 摩擦因数设置值与计算值的差值 $\Delta$

### 2.2 切削状态参数仿真值的获取

完成81组仿真后,获得了切削过程达到稳定状态后的应变率云图、平均切削力 $F_c$ 和切削推力 $F_p$ ,再利用仿真结果获取切削状态参数。

可以应用 AutoCAD 软件在仿真得出的应变率云图中测量剪切角 $\varphi$ 的仿真值,方法是:由后处理软件 Tecplot 生成整个切削过程的全部剪切滑移带塑性应变率云图;将切削过程达到稳定状态后的任意一张应变率云图(见图2)导入 AutoCAD 软件中;在第一变形区中剪切应变率最大的部位画一条直线表示剪切平面的位置,测量出该直线与切削速度方向之间的夹角,即为剪切角 $\varphi$ 的仿真值。

根据仿真获得的平均切削力 $F_c$ 和切削推力 $F_p$ 计算得到刀-屑摩擦角 $\beta$ 的仿真值,其表达式为

$$\beta = a \tan \frac{F_p + F_c \tan \gamma_0}{F_c - F_p \tan \gamma_0} \quad (2)$$

利用已获得的 $\varphi$ 、 $F_c$ 及 $F_p$ 可求得剪切应力 $\tau_s$

的仿真值,其表达式为

$$\tau_s = \frac{\sin\varphi}{bh_D} (F_c \cos\varphi - F_p \sin\varphi) \quad (3)$$

式中,  $\tau_s$  为剪切应力 (MPa);  $\varphi$  为剪切角 ( $^\circ$ );  $b$  为切削宽度 (mm);  $h_D$  为切削厚度 (mm), 其数值与进给量相同, 即  $h_D = f$ 。

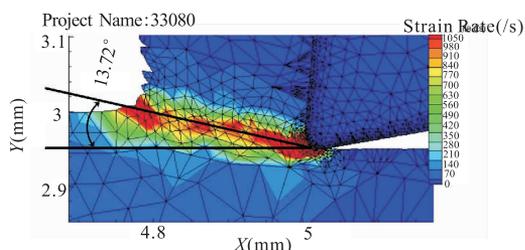


图2 剪切带塑性应变率云图

按照上述方法, 获得用 PCD 刀具直角切削 Al6061-T6 时  $\varphi$ 、 $\beta$  和  $\tau_s$  的仿真值见表 3。

表3 Al6061-T6 直角切削仿真结果

No.	$\gamma_0$ ( $^\circ$ )	$f$ (mm/r)	$v$ (m/min)	$\mu_{i-1}$	$\mu_i$	$\varphi$ ( $^\circ$ )	$\beta$ ( $^\circ$ )	$\tau_s$ (MPa)
1	-10	0.30	2	0.29	0.290	14.37	16.15	233.7
2	20	0.15	2	0.76	0.766	20.68	37.46	276.4
3	-5	0.25	2	0.35	0.360	15.68	19.79	255.3
4	5	0.50	2	0.36	0.366	20.39	20.09	244.7
5	0	0.40	2	0.36	0.358	17.66	19.70	242.2
6	10	0.10	2	0.71	0.649	16.54	32.99	297.0
7	15	0.70	2	0.46	0.459	23.29	24.68	229.0
8	25	0.20	2	0.89	0.887	23.65	41.57	280.8
9	-15	0.05	2	0.45	0.425	7.99	23.03	256.7
10	-5	0.40	4	0.31	0.315	16.99	17.47	248.7
11	5	0.20	4	0.50	0.531	15.71	27.95	260.1
12	0	0.15	4	0.50	0.502	20.06	26.64	254.5
13	10	0.70	4	0.45	0.443	23.02	23.91	247.7
14	-10	0.10	4	0.41	0.407	10.52	22.16	272.1
15	-15	0.50	4	0.16	0.175	16.77	9.90	238.2
16	15	0.30	4	0.66	0.664	18.49	33.57	251.1
17	25	0.05	4	0.99	1.200	23.25	50.20	301.1
18	20	0.25	4	0.79	0.786	18.92	38.18	255.4
19	-10	0.70	6	0.21	0.215	19.36	12.15	243.0
20	0	0.25	6	0.47	0.474	15.22	25.38	262.8
21	5	0.05	6	0.80	0.773	13.72	37.71	329.7
22	15	0.10	6	0.81	0.808	15.95	38.93	291.2
23	25	0.50	6	0.63	0.662	23.19	33.52	240.6
24	-15	0.20	6	0.25	0.253	12.31	14.21	257.9
25	20	0.40	6	0.66	0.666	23.45	33.67	271.4
26	10	0.30	6	0.56	0.578	18.56	30.01	266.6
27	-5	0.15	6	0.43	0.447	12.45	24.06	272.2
28	-5	0.50	8	0.33	0.331	17.43	18.29	249.2
29	-10	0.40	8	0.28	0.289	16.54	16.14	259.1
30	5	0.70	8	0.37	0.383	21.3	20.95	251.4
31	10	0.15	8	0.69	0.705	13.56	35.17	259.3
32	25	0.30	8	0.81	0.817	22.58	39.26	271.4
33	15	0.25	8	0.67	0.683	19.02	34.33	273.8
34	-15	0.10	8	0.33	0.340	9.61	18.75	280.3

续表 3

No.	$\gamma_0$ ( $^\circ$ )	$f$ (mm/r)	$v$ (m/min)	$\mu_{i-1}$	$\mu_i$	$\varphi$ ( $^\circ$ )	$\beta$ ( $^\circ$ )	$\tau_s$ (MPa)
35	0	0.20	8	0.51	0.519	13.23	27.42	255.7
36	20	0.05	8	1.00	1.043	20.53	46.20	320.6
37	-10	0.15	10	0.42	0.411	11.59	22.36	280.2
38	15	0.40	10	0.63	0.635	21.52	32.43	276.3
39	0	0.05	10	0.67	0.675	12.08	34.00	341.7
40	-15	0.70	10	0.19	0.187	18.81	10.60	247.3
41	25	0.10	10	1.00	1.009	17.71	45.26	277.6
42	-5	0.20	10	0.41	0.427	15.44	23.10	302.3
43	10	0.25	10	0.60	0.615	18.88	31.59	291.4
44	20	0.50	10	0.60	0.615	22.62	31.61	255.2
45	5	0.30	10	0.52	0.529	18.01	27.90	282.3
46	-10	0.25	12	0.37	0.373	14.53	20.45	283.1
47	0	0.50	12	0.39	0.398	18.08	21.72	259.1
48	5	0.10	12	0.66	0.668	12.44	33.76	298.3
49	-15	0.30	12	0.25	0.260	14.24	14.57	269.8
50	25	0.70	12	0.70	0.708	25.75	35.28	257.5
51	20	0.20	12	0.81	0.805	21.92	38.85	308.3
52	15	0.15	12	0.75	0.785	17.14	38.12	295.5
53	10	0.40	12	0.54	0.558	19.21	29.15	267.1
54	-5	0.05	12	0.59	0.599	11.77	30.94	363.5
55	-10	0.20	15	0.33	0.348	14.28	19.21	295.7
56	20	0.10	15	0.91	0.914	16.57	42.44	293.0
57	0	0.30	15	0.41	0.429	15.8	23.23	269.6
58	15	0.50	15	0.59	0.601	21.21	31.02	265.5
59	-15	0.15	15	0.30	0.316	12.09	17.52	304.4
60	25	0.40	15	0.69	0.688	24.01	34.51	252.1
61	5	0.25	15	0.53	0.556	16.34	29.05	282.9
62	10	0.05	15	0.91	0.852	12.81	40.44	298.1
63	-5	0.70	15	0.30	0.302	19.6	16.79	257.8
64	5	0.40	18	0.50	0.509	18.11	26.96	260.3
65	20	0.70	18	0.63	0.632	23.26	32.28	247.6
66	25	0.15	18	0.97	0.988	20.95	44.66	293.4
67	0	0.10	18	0.57	0.566	12.24	29.50	304.3
68	10	0.50	18	0.55	0.556	20.02	29.09	256.5
69	-10	0.05	18	0.51	0.511	7.96	27.04	286.6
70	-5	0.30	18	0.43	0.428	15.95	23.19	273.0
71	-15	0.25	18	0.29	0.295	14.23	16.45	278.8
72	15	0.20	18	0.70	0.706	18.66	35.21	281.0
73	-5	0.10	21	0.50	0.506	10.18	26.82	278.8
74	20	0.30	21	0.70	0.712	22.15	35.47	272.8
75	0	0.70	21	0.37	0.372	20.13	20.40	253.2
76	15	0.05	21	0.89	0.894	18.57	41.80	340.2
77	-15	0.40	21	0.26	0.261	15.2	14.65	254.5
78	-10	0.50	21	0.28	0.287	17.49	16.00	258.9
79	10	0.20	21	0.66	0.672	16.48	33.89	277.6
80	5	0.15	21	0.66	0.668	14.27	33.73	290.7
81	25	0.25	21	0.87	0.873	23.46	41.12	281.3

### 3 经验公式的拟合及试验验证

#### 3.1 经验公式的拟合

采用 1stOpt 软件拟合与仿真数据匹配最好的切削状态参数与控制参数之间关系的经验公式。方法是: 导入仿真数据; 利用 1stOpt 软件的公式自动

搜索功能找到与仿真数据匹配最好的经验公式的函数形式;拟合出函数的系数。最终得到的剪切角  $\varphi$ 、刀-屑摩擦角  $\beta$ 、剪切应力  $\tau_s$  的经验公式分别为

$$\varphi = e^{0.034\gamma_0 + 1.516} + e^{0.972f + 2.088} + e^{-0.260v + 0.358} \quad (4)$$

$$\beta = 157.175 - 138.450 e^{-0.005\gamma_0} + 18.413 e^{-3.319f} - 0.040 e^{-0.245v + 4.756} \quad (5)$$

$$\tau_s = 22.115(0.007\gamma_0 + 9.835)f^{-0.089}v^{0.042} \quad (6)$$

式中,  $\varphi, \beta, \tau_s$  的拟合相关度系数分别为 0.926, 0.992, 0.842, 拟合结果较为理想。

### 3.2 经验公式的试验验证

#### (1) 验证试验

在配备变频调速系统的 CM6163E 精密卧式车床上进行试验,采用 Kistler 三向车削测力系统测量切削力,采用数显游标卡尺测量切屑厚度。试验条件与所测得的切削力  $F_c'$ 、切削推力  $F_p'$  及切屑厚度  $h_{ch}$  见表 4。

表 4 试验条件及测量结果

No.	$\gamma_0(^{\circ})$	$f(\text{mm/r})$	$v(\text{m/min})$	$F_c'(\text{N})$	$F_p'(\text{N})$	$h_{ch}(\text{mm})$
1	-5	0.26	2	884.4	506.7	0.89
2	-5	0.40	4	1134.0	573.0	1.17
3	-5	0.15	6	596.9	362.3	0.68
4	-5	0.20	10	736.0	437.1	0.65
5	-5	0.30	18	916.7	562.0	0.86
6	-5	0.10	21	376.9	233.9	0.49
7	5	0.20	4	552.5	277.8	0.68
8	5	0.30	10	608.3	292.5	0.74
9	5	0.10	12	350.3	207.7	0.42
10	5	0.26	15	576.8	283.7	0.69
11	5	0.40	18	690.7	313.8	1.03
12	5	0.15	21	433.3	238.7	0.51
13	15	0.30	4	750.2	346.4	0.94
14	15	0.10	6	364.2	199.1	0.36
15	15	0.26	8	663.7	322.6	0.76
16	15	0.40	10	871.7	403.5	0.86
17	15	0.15	12	502.2	251.8	0.48
18	15	0.20	18	551.5	289.5	0.58

#### (2) 切削状态参数试验值的获取

通过测得的切屑厚度  $h_{ch}$  以及试验条件中的切削厚度  $h_D$  和刀具前角  $\gamma_0$  可以计算得到试验剪切角  $\varphi$ , 其表达式为

$$\varphi = \arctan \frac{\cos\gamma_0}{\frac{h_{ch}}{h_D} - \sin\gamma_0} \quad (7)$$

通过试验测得的切削力  $F_c'$  和切削推力  $F_p'$  计算得到刀-屑摩擦角  $\beta$ , 其表达式为

$$\beta = \arctan \left( \frac{F_p'}{F_c'} \right) + \gamma_0 \quad (8)$$

通过试验测得的切削力  $F_c'$ 、切削推力  $F_p'$  以及剪切角  $\varphi$  等可以计算得到剪切应力  $\tau_s$ , 其表达式为

$$\tau_s = \frac{\sin\varphi}{bh_D} (F_c' \cos\varphi - F_p' \sin\varphi) \quad (9)$$

按照上述方法计算出的各切削状态参数的试验值见表 5。

#### (3) 经验公式预测结果与试验值的比较

将表 4 的切削条件参数代入所拟合的经验公式(4)~式(6),得到切削状态参数剪切角  $\varphi$ 、刀-屑摩擦角  $\beta$ 、剪切应力  $\tau_s$  的预测值。由表 5 可知,  $\varphi, \beta, \tau_s$  的预测值与试验值的相对误差绝对值的平均值分别为 13.24%, 8.95%, 19.66%, 表明所建经验公式有效。

表 5 经验公式预测值与试验结果对比

No.	剪切角 $\varphi(^{\circ})$			刀-屑摩擦角 $\beta(^{\circ})$			剪切应力 $\tau_s(\text{MPa})$		
	预测值	试验值	误差 (%)	预测值	试验值	误差 (%)	预测值	试验值	误差 (%)
1	15.08	15.84	-4.80	20.14	24.81	-18.82	206.47	249.39	-17.21
2	16.25	18.30	-11.20	18.36	21.81	-15.82	191.31	234.64	-18.47
3	13.48	12.17	10.76	25.34	26.26	-3.50	186.44	237.51	-21.50
4	13.75	16.62	-17.27	24.30	25.70	-5.45	182.90	276.63	-33.88
5	14.66	18.64	-21.35	21.97	26.51	-17.13	177.68	244.66	-27.38
6	12.74	11.30	12.74	28.41	26.82	5.93	175.26	211.41	-17.10
7	15.70	16.74	-6.21	29.88	31.70	-5.74	191.31	215.53	-11.24
8	16.30	22.72	-28.26	28.54	30.68	-6.98	182.90	192.30	-4.89
9	14.35	13.62	5.36	35.11	35.66	-1.54	179.96	228.78	-21.34
10	15.82	21.21	-25.41	29.79	31.19	-4.49	178.38	201.83	-11.62
11	17.31	21.82	-20.67	26.97	29.43	-8.36	177.68	162.50	9.34
12	14.74	16.74	-11.95	33.31	33.86	-1.62	175.26	221.52	-20.88
13	18.89	18.57	1.72	33.79	39.78	-15.06	191.31	212.65	-10.03
14	16.78	16.12	4.09	40.87	43.66	-6.39	186.44	272.74	-31.64
15	18.15	19.93	-8.93	35.84	40.93	-12.44	184.02	224.59	-18.06
16	19.59	27.06	-27.61	33.21	39.84	-16.64	182.90	224.68	-18.60
17	16.98	18.18	-6.60	39.68	41.63	-4.68	179.96	276.34	-34.88
18	17.40	20.09	-13.39	38.15	42.70	-10.66	177.68	239.57	-25.84

## 4 经验公式在流屑角突变模型中的应用

### 4.1 基于所建经验公式的流屑角突变数学模型

将拟合的切削状态参数经验公式(4)~式(6),代替以往建立流屑角  $\eta$  突变数学模型过程中使用的根据刀具前角  $\gamma_0$  求解切削状态参数剪切角  $\varphi$ 、刀-屑摩擦角  $\beta$ 、剪切应力  $\tau_s$  时使用的经验公式<sup>[4]</sup>,有

$$\begin{cases} \varphi = e^{1.727\gamma_0 - 1.7838} \\ \beta = 0.6237\gamma_0 + 0.4230 \\ \tau_s = 301.136 \end{cases} \quad (10)$$

试验得到与原数学模型形式相同、但系数不同的新的流屑角突变数学模型(属于 7 种标准初等突变模型中的尖点模型)为

$$\begin{cases} \text{势函数 } V: V(\eta) = f(\eta; b, h_D) \\ \text{流形 } M: \frac{\partial V}{\partial \eta} = g(\eta; b, h_D) = 0 \\ \text{分叉集 } B: h(b, h_D) = 0 \end{cases} \quad (11)$$

式中,  $\eta$  为流屑角, 属于突变状态参数;  $b$  为切削宽度,  $h_D$  为切削厚度, 二者属于切削控制参数; 势函数  $V$  为由  $\eta$ 、 $b$  和  $h_D$  计算出的切削功率函数; 流形  $M$  是令势函数  $V(\eta)$  对  $\eta$  的一阶导函数  $g(\eta; b, h_D)$  为 0 得到的方程; 分叉集  $B$  是令势函数  $V(\eta)$  对  $\eta$  的二阶导函数为 0 得到的方程与  $M$  联立所求的方程。

#### 4.2 新、旧流屑角突变模型预测精度的比较

以新数学模型为基础, 在 Maple 软件平台上绘制流屑角突变的流形曲面的截曲线(切削厚度  $h_D$  为 0.3mm), 如图 3 所示。

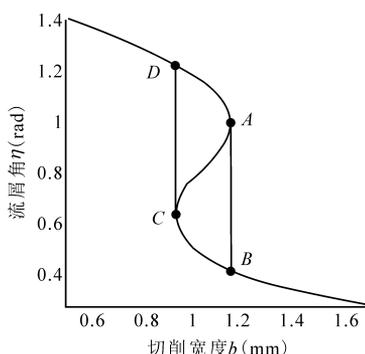


图3 流形曲面的截曲线

测得与图中的起始点 A 和终止点 B 对应的流屑角发生下跳式突变的临界切削宽度, 以及与起始点 C 和终止点 D 对应的发生上跳式突变的临界切削宽度, 即为新数学模型预测的临界切削宽度值。将其与旧数学模型按照同样方法预测的临界切削宽度值, 以及试验值一起, 绘制对比新、旧数学模型预测误差大小的点图(见图 4)。

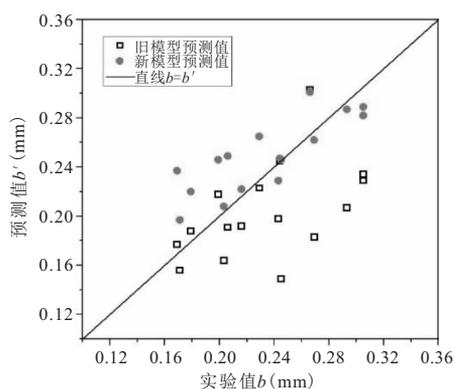


图4 新、旧模型临界切削宽度预测值与试验值的比较

由图 4 可知, 新模型的临界切削宽度预测值与试验值的一致性远优于旧模型。新模型预测的临界切削宽度与试验值之间相对误差绝对值的平均值为

11.4%, 旧模型预测的临界切削宽度与试验值之间相对误差绝对值的平均值为 15.6%, 前者相对于后者减小了 27.2%。

## 5 结语

本文提出了通过仿真迭代来确定刀-屑摩擦因数设置值的方法, 完成了 81 组直角切削 Al6061-T6 的有限元仿真试验, 根据仿真结果建立剪切角  $\varphi$ 、刀-屑摩擦角  $\beta$ 、剪切应力  $\tau_s$  关于刀具前角  $\gamma_0$ 、进给量  $f$  和切削速度  $v$  的经验公式, 并通过直角切削试验验证了经验公式的有效性。将所建立的经验公式应用于 Al6061-T6 工件双刃车削时流屑角突变现象的建模过程, 获得了与原形式相同但系数不同的流屑角突变数学模型(尖点模型)。相比原数学模型, 新模型可以大幅降低流屑角突变临界切削宽度的预测误差。

## 参考文献

- [1] Shi H. Metal cutting theory: new perspectives and new approaches [M]. Cham: Springer International Publishing, 2018:117-192.
- [2] Usui E, Hirota A, Masuko M. Analytical prediction of three dimensional cutting process [J]. Journal of Engineering for Industry, 1978, 100:222-228.
- [3] 万秀娟. 直线双刃车刀斜角切削时的流屑角突变建模 [D]. 武汉: 华中科技大学, 2018.
- [4] 杨鹤青. 引入二维切削变形参数的外圆车削流屑角突变建模及试验研究 [D]. 武汉: 华中科技大学, 2019.
- [5] 张松, 李斌训, 李取浩, 等. 切削过程有限元仿真研究进展 [J]. 航空制造技术, 2019, 62(13):14-28.
- [6] 曾林林, 周利平, 张敬志. 基于 AdvantEdge FEM 的车刀参数优化试验研究 [J]. 工具技术, 2015, 49(12):91-94.

第一作者: 张义凯, 硕士研究生, 华中科技大学机械科学与工程学院, 430074 武汉市

First Author: Zhang Yikai, Postgraduate, School of Mechanical Science & Engineering, Huazhong University of Science and Technology, Wuhan 430074, China

通信作者: 熊良山, 教授, 华中科技大学机械科学与工程学院, 430074 武汉市

Corresponding Author: Xiong Liangshan, Professor, School of Mechanical Science & Engineering, Huazhong University of Science and Technology, Wuhan 430074, China