

基于正交切削的铝合金切削力理论计算方法

张顺琦¹, 林绿高², 应申舜³, 林斌², 蒋小乐², 孙建男¹

¹上海大学机电工程与自动化学院; ²浙江畅尔智能装备股份有限公司;

³浙江工业大学特种装备制造与先进加工技术教育部重点实验室

摘要: 基于传统正交切削力学模型, 采用 Johnson-Cook 材料本构和失效模型, 建立同时考虑前刀面和后刀面双摩擦因素的切削力理论计算模型。采用双摩擦切削力模型模拟 7050 航空铝合金切削力的计算, 获得了与试验结果非常吻合的切削力理论计算值。用本文模型计算了不同 Johnson-Cook 材料本构参数下的切削力, 获得了与文献仿真值非常一致的结果。双摩擦切削力模型引入的后刀面摩擦分量, 在航空铝合金切削仿真中, 占主切削力的比重较少(约占 12.5%), 但不可忽略。

关键词: 正交切削; 铝合金切削; 切削力模型; 拉削

中图分类号: TG57; TH164

文献标志码: A

DOI: 10.3969/j.issn.1000-7008.2020.03.014

Force Computation Model for Aluminum Alloy Cutting Based on Orthogonal Metal Cutting Mechanics

Zhang Shunqi, Lin Lvga, Ying Shenshun, Lin Bin, Jiang Xiaole, Sun Jiannan

Abstract: Based on the mechanics of orthogonal metal cutting, a force computation model is constructed with consideration of the friction on both rake face and clearance face by using Johnson-Cook material constitutive and failure model. The bifrictional model is validated by the experimental data of aluminum alloy 7050 from the literature, which shows good agreement. And the present force model is applied to compute the cutting force with various Johnson-Cook parameters, with the obtained results being closed to the numerical results in the literature. The simulation results show that the cutting force due to the friction on the clearance face has a relative low but nonnegligible proportion of approximate 12.5%.

Keywords: orthogonal cutting; aluminum alloy cutting; force computation model; broaching

1 引言

铝合金 7050 是可热处理强化的超硬铝合金材料, 其成形性好, 具有良好的综合性能, 多应用于航空航天等领域。7050 铝合金塑性相对较低, 多采用高速切削加工。切削力主要受材料性能、刀具参数和加工参数等影响, 切削力的大小对工件的加工质量和效率至关重要, 准确计算切削力是机加工工艺设计的重要依据。

切削力计算模型主要分为理论计算模型和有限元计算模型。W. Sutherland 等^[1]通过定义刀具与工件的接触模型以及切削力与接触模型的关系, 建立了环状内螺旋齿轮拉削力的理论计算模型。N. Tounsi 等^[2]揭示了正交切削的基本力学问题, 并建立了主要考虑前刀面摩擦因素的基于 Johnson-Cook 材料本构模型(J-C 材料模型)的切削力计算模型。基于 Tounsi 的正交切削力学模型, Z. Meng 等^[3]在切削过程中引入刮削假设, 建立了圆弧工件多齿切

削模型, 但是该材料 J-C 本构模型中忽略了温度对切削力的影响。以上理论计算模型根据切削过程的几何关系得出, 具有明确的物理意义, 但是直接用理论公式很难计算获得准确的切削力。相比来说, Kienzle 切削力经验公式简单, 参数少, 计算方便, 但模型参数的确定需要以试验数据作参考, 因此成本较高。R. B. Schroeter 等^[4]采用 Kienzle 切削力模型计算了曲轴的车拉过程主切削力, 并用试验进行验证。

切削力的理论计算模型只能处理稳定切削时的切削力, 对于切削的详细过程无法进行仿真。想要获得切削全过程, 有限元方法是目前最好的选择, 如采用有限元软件 ABAQUS、ANSYS、DEFORM 等进行切削仿真。V. Schulze 等^[5,6]基于 ABAQUS 平台采用二维有限元仿真研究了机床振动和切削厚度对切削力的影响。P. Vogtel 等^[7]结合有限元仿真提出一种多变量回归的切削力计算模型, 并应用于镍基粉末合金在不同切削厚度、切削速率下的切削力计算。秦宇等^[8]研究了不同前角下 7050 航空铝合金切削力的 ABAQUS 有限元仿真。Z. Sun 等^[9]采用欧

拉—拉格朗日网格相结合的方法,在 ABAQUS 平台对振动切削过程中切削力进行了仿真。彭臣西等^[10]采用 ABAQUS 平台研究了材料 J-C 本构模型在不同参数下对切削力大小的影响。

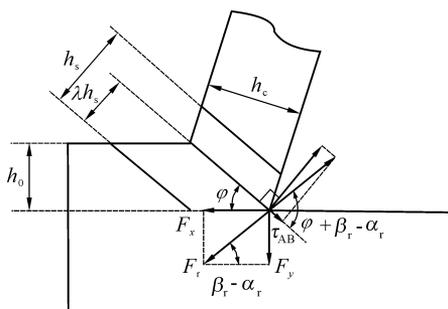
有限元仿真可以获得较为准确和完整的切削过程,但其计算仿真设置繁琐,很多参数的设定需要依靠丰富的有限元切削仿真经验。根据切削几何关系的理论计算模型,难以全面定义获得准确的切削力。基于 Kienzle 经验公式的切削力模型参数需要通过试验获得,成本很高。鉴于此,本文基于 Tounsi 的正交切削基本模型,引入后刀面的摩擦因素,建立正交切削的理论计算模型,尽可能获得相对准确的切削力仿真值。利用该模型计算 7050 航空铝合金切削力,并用文献中的试验进行验证。计算不同 J-C 材料参数下的切削力,并与文献中的有限元仿真结果进行对比。

2 正交切削理论模型

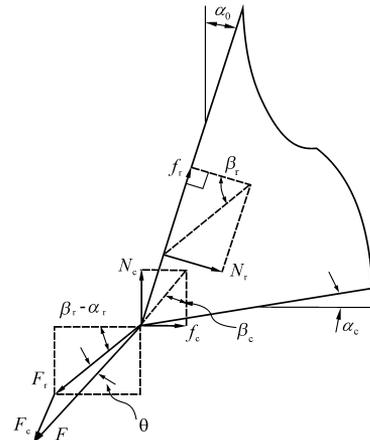
2.1 宏观切削力计算模型

金属切削是一个热—力动态耦合的复杂过程,涉及高温、高应变率、材料弹塑性变形等。为简化切削过程,在金属材料切削过程中假设^[2]如下:①金属材料发生准静态变形,塑性变形导致的惯性力忽略不计;②切削宽度远大于切削深度,符合平面应变条件;③切削过程中,切屑连续形成;④假设材料均匀,具有各向同性硬化和热粘塑性控制本构方程;⑤主切削区域厚度恒定,且剪切应力、应变、应变率和热力场与坐标有关;⑥刀具不变形,看作刚体。

基于上述基本假设,三维金属切削可以简化为如图 1 所示的二维切削模型。根据文献[2]正交切削理论,在切削过程中,刀具与工件主要在前刀面发生摩擦,通过力的平衡关系获得切削力。本文在此基础上考虑到工件在切削过程中产生热量,使工件温度升高,导致工件膨胀与后刀面发生摩擦。



(a) 工件受力模型



(b) 刀具受力模型

图 1 正交切削模型

因此,切削力主要由材料变形剪切力和后刀面摩擦力构成,其对应的合力分别为 F_r 和 F_c (见图 1),切削合力用向量方法表示为

$$\mathbf{F} = \mathbf{F}_r + \mathbf{F}_c \quad (1)$$

式中, \mathbf{F} 为切削合力; \mathbf{F}_r 为材料切断所需剪切力; \mathbf{F}_c 为由于热膨胀变形导致后刀面与工件的摩擦力。

切削合力沿 X 轴和 Y 轴的分量分别为主切削力和切深抗力,有

$$F_x = F_r \cos(\beta_r - \alpha_r) + f_c \quad (2)$$

$$F_y = F_r \sin(\beta_r - \alpha_r) + N_c \quad (3)$$

式中, F_r 主要用来克服材料剪切变形。

F_r 的公式可以表示为

$$F_r = \frac{\tau_s W \delta}{\sin \varphi \cos(\varphi + \beta_r - \alpha_r)} \quad (4)$$

式中, β_r 为前刀面摩擦角; α_r 为刀具前角; f_c 为后刀面摩擦力; N_c 为后刀面支反力; τ_s 为剪切应力; W 为切削宽度; δ 为切削深度; φ 为剪切角。

一般需要通过试验测量获得剪切角,也可根据材料切削后切屑的膨胀系数 Λ 近似求解,公式为

$$\Lambda = \frac{h_c}{\delta} = \frac{\cos(\varphi - \alpha_r)}{\sin \varphi} \quad (5)$$

式中, h_c 为切屑厚度,可根据实际切屑测量或根据材料属性测算。

由 Merchant 公式计算获得前刀面摩擦角为

$$\beta_r = \frac{\pi}{2} + \alpha_r - 2\varphi \quad (6)$$

后刀面的摩擦力计算公式可表示为

$$f_c = \mu N_c \quad (7)$$

式中, N_c 为后刀面支反力; μ 为摩擦系数。

假设支反力是由于切削产生热量导致材料变形与后刀面接触而产生,其近似公式为

$$N_c = YK_E \Delta T W \times \frac{1}{2} L_c \quad (8)$$

式中, Y 为工件的杨氏模量; ΔT 为工件切削与初始状态间的温度差; K_E 为工件材料热膨胀系数; L_c 为工件膨胀后与后刀面接触长度。

接触长度 L_c 的估算公式为

$$L_c = \Delta T K_E \times \frac{1}{2} h_T / \sin \alpha_c \quad (9)$$

式中, α_c 为刀具后角; h_T 为温度传递深度。

2.2 Johnson-Cook 材料模型

材料切削过程涉及弹塑性变形, 需要建立材料在发生大变形时应力和应变的关系曲线探寻其规律。材料切削中的失效过程属于大应变、高应变率、高温环境下金属材料的强度极限, 本文拟用 Johnson-Cook 材料模型及失效模型, 剪切面上的剪切力为

$$\tau_s = \frac{1}{\sqrt{3}} (A + B \gamma^{n_s}) \left(1 + C \ln \frac{\dot{\gamma}}{\dot{\gamma}_0} \right) \left[1 - \left(\frac{T - T_0}{T_m - T_0} \right)^{m_s} \right] \quad (10)$$

式中, A 为屈服强度; B 为硬化模量; C 为应变率; n_s 为应变硬化指数; m_s 为材料热敏感参数; γ 为剪切应变; $\dot{\gamma}$ 为应变率; $\dot{\gamma}_0$ 为初始应变率; T, T_0, T_m 分别为工件切削温度、初始温度和材料融化温度。

剪切应变的计算公式为

$$\gamma = \frac{\lambda \cos \alpha_r}{\sqrt{3} \cos(\varphi - \alpha_r) \sin \varphi} \quad (11)$$

式中, λ 为主剪切区域系数。

$$\lambda = \frac{1}{2} + \frac{\cos(2\varphi - \alpha_r)}{2 \cos \alpha_r} \quad (12)$$

剪切应变率跟切削速度、前角、主剪切区域宽度和剪切角有关, 公式可表示为

$$\dot{\gamma} = \frac{2V \cos \alpha_r}{\sqrt{3} h_s \cos(\varphi - \alpha_r)} \quad (13)$$

式中, 主剪切区域宽度假设为 $h_s = 0.5\delta^{[2]}$ 。

主剪切面上的温度表达式为

$$T_{AB} = T_0 + \left[\frac{\lambda \cos \alpha_r}{\rho C_p \sin \varphi \cos(\varphi - \alpha_r)} \right] \left(\frac{2\tau_s + \tau_0}{3} \right) \quad (14)$$

式中, ρ 为质量密度; C_p 为比热。

采用牛顿非线性求解方法, 联立求解式(10)和式(14)即可获得实时应力。

3 铝合金切削力模拟

3.1 几何模型及计算验证

航空铝合金 7050 工件的尺寸为 10mm × 3mm, 切削深度为 0.1mm, 切削宽度为 2mm。切削宽度与切削深度的比值为 20, 故符合本文平面应变假设, 切削过程可处理为二维切削。工件材料为 7050-T7451 铝合金, 其 J-C 本构参数为 $A = 435.7 \text{ MPa}$, $B = 534.624 \text{ MPa}$, $n_s = 0.504$, $m_s = 0.97$, $C = 0.019$, 密

度 $\rho = 2830 \text{ kg/m}^3$, 弹性模量 $Y = 70.3 \text{ GPa}$, 线性膨胀系数 $K_E = 23.5 \times 10^{-6} / \text{K}$, 比热 $C_p = 860 \text{ J/(kg} \cdot \text{K)}$, 初始应变率 $\dot{\gamma}_0 = 10^{-3} / \text{s}$, 铝金融化温度 $T_m = 833 \text{ K}$, 初始温度 $T_0 = 298 \text{ K}$ 。切削参数主要有: 刀具前角 $\alpha_r = 0$, 后角 $\alpha_c = 7^\circ$, 切削速度 $V = 500 \text{ m/min}$, 后刀面与工件的摩擦系数取 $\mu = 0.3$, 切屑厚度膨胀系数为 2.2。

在上述切削条件下, 采用本文所提出的切削力模型计算得主切削力为 227.37N, 与周军^[11]的试验值 243.25N 非常吻合, 偏差仅为 6.53%。文献[11]采用 DAEWOO ACE - V500 加工中心进行了试验, 试验过程为直角切削, 工件材料选择 7050 - T7451, 刀具材料设定为硬质合金, 利用 Kistler 9257B 型测力仪进行切削力测量获得主切削力。

3.2 切削力计算

工件材料 J-C 本构模型主要涉及 A, B, n_s, m_s, C 五个参数。采用变量控制法改变某个参数大小, 代入本文切削力模型, 获得各种参数组合下的切削力大小见表 1, 切削力与文献仿真值对比见图 2。

从表 1 和图 2 可见, 本文模型与文献有限元仿真值非常吻合。若不考虑后刀面的摩擦分量, 按照文献[2]的模型计算, 主切削力(即 F_x 前刀面摩擦分量)与文献仿真结果有较大差距。图 3 为主切削力前刀面与后刀面摩擦分量, 由图可见, 后刀面摩擦力在 7050 铝合金主切削力中比重为 12.49%。

表 1 不同 J-C 模型参数下的切削力仿真

序号	A (MPa)	B (MPa)	n_s	m_s	C	主切削力(N)		
						文献 [10]	本文	偏差 (%)
1	348.56	427.6992	0.4032	0.776	0.0152	191.01	203.41	6.49
2	348.56	534.624	0.504	0.97	0.019	228.61	229.38	0.34
3	348.56	641.5488	0.6048	1.164	0.0228	265.74	238.74	10.16
4	435.7	427.6992	0.4032	0.97	0.019	223.68	229.55	2.62
5	435.7	534.624	0.504	1.164	0.0228	255.09	242.33	5.00
6	435.7	641.5488	0.6048	0.776	0.0152	232.74	203.16	12.71
7	522.84	427.6992	0.504	0.776	0.0228	218.06	205.20	5.90
8	522.84	534.624	0.6048	0.97	0.0152	246.91	225.71	8.59
9	522.84	641.5488	0.4032	1.164	0.019	269.58	231.95	13.96
10	348.56	427.6992	0.6048	1.164	0.019	231.40	247.66	7.03
11	348.56	534.624	0.4032	0.776	0.0228	210.83	206.79	1.92
12	348.56	641.5488	0.504	0.97	0.0152	239.39	228.13	4.70
13	435.7	427.6992	0.504	1.164	0.0152	235.35	248.11	5.42
14	435.7	534.624	0.6048	0.776	0.019	224.40	205.37	8.48
15	435.7	641.5488	0.4032	0.97	0.0228	252.47	218.20	13.57
16	522.84	427.6992	0.6048	0.97	0.0228	236.53	226.08	4.42
17	522.84	534.624	0.4032	1.164	0.0152	259.17	244.60	5.62
18	522.84	641.5488	0.504	0.776	0.019	239.02	195.65	18.15

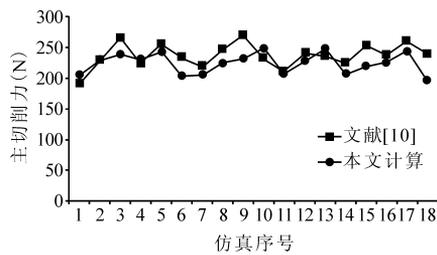


图2 主切削力与文献[10]对比

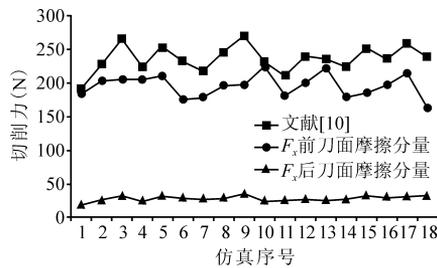


图3 主切削力前刀面与后刀面摩擦分量

4 结语

切削力是零件切削工艺设计的重要参考数据,不合理的切削力极易导致工件表面损伤并降低加工质量。基于文献[2]的传统正交切削力学模型,采用 Johnson-Cook 材料本构和失效模型,建立了同时考虑前刀面和后刀面摩擦因素的切削力理论计算模型。该模型首先计算了文献[11]中铝合金的切削力,获得了与试验非常吻合的理论计算值,偏差仅为 6.53%。

借助本文模型计算了不同 Johnson-Cook 材料本构参数下的切削力,与文献[10]的仿真数据比较,获得了一致结果,最大偏差为 18.15%。最后探讨了后刀面摩擦力对主切削力的影响,由试验结果可知,后刀面摩擦分量占主切削力的比重约为 12.5%。

参考文献

- [1] J W Sutherland, E J Salisbury, F W Hoge. A model for the cutting force system in the gear broaching process[J]. Journal of Machine Tools and Manufacture, 1997, 37(10): 1409 - 1421.
- [2] N Tounsi, J Vincenti, A Otho, et al. From the basic mechanics of orthogonal metal cutting toward the identification of the constitutive equation [J]. International Journal of Machine Tools & Manufacture, 2002, 42: 1373 - 1383.
- [3] Z Meng, C Wu, J Ni, et al. Modeling and analysis of cutting force in vibration-assisted broaching (VAB) [J]. International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2017, 91(5-8): 2151 - 2159.
- [4] R B Schroeter, C M Bastos, J M Crichigno Filho. Simulation

of the main cutting force in crankshaft turn broaching [J]. Journal of Machine Tools and Manufacture, 2007, 47(12-13): 1884 - 1892.

- [5] V Schulze, N Boev, F Zanger. Numerical Investigation of the changing cutting force caused by the effects of process machine interaction while broaching [C]. Procedia CIRP, 2012, 4: 140 - 145.
- [6] V Schulze, H Meier. Tobias strauss jens gibmeier, high speed broaching of case hardening steel SAE 5120 [C]. Procedia CIRP, 2012, 1(1): 431 - 436.
- [7] P Vogtel, F Klocke, H Puls, et al. Modelling of process forces in broaching inconel 718 [C]. Procedia CIRP, 2013, 8: 409 - 414.
- [8] 秦宇, 沙智华, 刘宇. 基于不同前角的航空铝合金切削过程分析[J]. 航空制造技术, 2016, 14: 97 - 101.
- [9] Z Sun, F Shuang, W Ma. Investigations of vibration cutting mechanisms of Ti6Al4V alloy [J]. International Journal of Mechanical Sciences, 2018, 148: 510 - 530.
- [10] 彭臣西, 吴运新, 易守华, 等. JC 本构模型对 7050 铝合金二维切削仿真影响的研究 [J]. 工具技术, 2018, 52(11): 59 - 62.
- [11] 周军. 铝合金 7050 - T7451 微切削加工机理及表面完整性研究 [D]. 济南: 山东大学, 2010.
第一作者: 张顺琦, 博士, 副教授, 上海大学机电工程与自动化学院, 200444 上海市
First Author: Zhang Shunqi, Ph.D., Associate Professor, School of Mechanic Engineering and Automation, Shanghai University, Shanghai 200444, China
通信作者: 应申舜, 博士, 副教授, 浙江工业大学特种装备制造与先进加工技术教育部重点实验室, 310032 杭州市
Corresponding Author: Ying Shenshun, Ph.D., Associate Professor, Ministry of Education Key Laboratory of Special Purpose Equipment and Advanced Processing Technology, Zhejiang University of Technology, Hangzhou 310014, China