DOI:10.3969/j.issn.1001-4551.2019.05.007

角度铣刀切削力学性能研究*

张德义[1],沈 宇[1],陶丽佳[1],钱洪良[2],王 琪[1]
(1.江苏科技大学 机电与动力工程学院,江苏 张家港 215600;
2.张家港市锐正精密工具有限公司,江苏 张家港 215600)

摘要:针对角度铣刀结构设计及切削寿命等问题,对角度铣刀切削过程的力学性能进行了研究。依据刀具设计原则对角度铣刀进行了结构设计,以斜角切削理论为基础,基于 LS-DYNA 建立了角度铣刀三维切削模型,研究了不同切削要素以及刀具几何角度对切削力的影响规律,通过与理论结果对比验证了计算模型的正确性,进而研究了不同角度铣刀的结构的切削力学性能,为角度铣刀的结构设计提供了理论基础。研究结果表明:双角角度铣刀比单角度铣刀表现出更好的切削力学性能,但其刀齿强度较弱,高速铣削时容易引起崩刃;R 型刀齿的角度铣刀比尖型刀齿的角度铣刀表现出更好的切削力学性能,可将刀齿形状加工为 R 型。

关键词:角度铣刀;切削模型;刀具结构;力学性能
中图分类号:TH122;TG741 **文献标志码:**A **文章编号:**1001-4551(2019)05-0485-05

Cutting mechanical properties of angle milling cutter

ZHANG De-yi[1], SHEN Yu[1], TAO Li-jia[1], QIAN Hong-liang[2], WANG Qi[1]
(1. School of Mechatronic and Power Engineering, Jiangsu University of Science and Technology, Zhang jiagang 215600, China; 2. Zhangjiagang Raise Cutters, Raise Performance Co., Ltd., Zhang jiagang 215600, China)

Abstract: Aiming at the structural design and cutting life of angle milling cutter, the mechanical properties of angle milling cutter in cutting process were studied. The angle milling cutter was designed according to the design principle and the cutting model of angle milling cutter was established in LS-DYNA based on the theory of obliqueangle cutting. The influence of different cutting factors and cutter geometric angles on cutting force was studied and the correctness of the cutting model was verified by comparing with the theoretical results. On this basis, the cutting mechanical properties of milling cutter with different structural angles was studied, which provided a theoretical basis for the structural design of angle milling cutter. The results indicate that the double angle milling cutter has better cutting mechanical properties than the single angle milling cutter, but its teeth are weak, and it is easy to cause cutting edge collapse when milling at high speed, and the angle milling cutter with R-type cutter has better cutting mechanical performance than that with sharp type. The shape of its cutter teeth can be processed into R-type.

Key words: angle milling cutter; cutting model; cutter structure; mechanical properties

0 引 言

角度铣刀可以用来铣出一定成型角度的平面或加工相应的角度槽。角度铣刀几何参数作为影响刀具寿命的因素之一,其设计过程是设计角度铣刀结构的必要过程,直接影响刀具所受切削力大小[1]。因此研究角度铣刀几何参数及切削过程力学性能具有十分重要的意义。

角度铣刀的设计与研究通常以切削理论为基础,进而研究铣削过程的受力情况。切削理论主要是以斜

收稿日期:2018-11-19
基金项目:江苏省高校自然科学研究面上项目(16KJD130001)
作者简介:张德义(1989-),男,江苏徐州人,博士研究生,讲师,主要从事机械切削动力学及切削自动化方面的研究工作。E-mail:deyi1108@126.com

角切削理论为基础进行研究,文献[2-3]参照直角切削模型,建立了单一剪切面的斜角切削模型,得出了剪切流角和切屑流角的关系;文献[4-5]基于斜角切削理论建立了切削热以及切削力预测模型,建立了剪切区剪切速度、剪应变、剪应力和温度分布的控制方程,并利用数值模拟和实验的方法验证了所提出模型的有效性。在铣刀设计与应用方面:文献[6]展开了对不同螺旋角刀具的切削性能的研究,发现随着螺旋角从30°~45°增大,铣刀所受到切削力减小,且被切削工件的表面质量也相对地变好;文献[7]设计了用于加工运输管道的角度铣刀,通过改变角度铣刀的齿数和几何参数,基于斜角切削理论,对铣刀进行了受力分析与计算,并采用有限元分析验证了铣刀设计的合理性和适用性。

以上研究多集中于切削力学模型以及角度铣刀几何静力学分析,对其结构对切削力的影响以及切削过程的力学分布特性的研究相对较少。

本研究将从角度铣刀的几何角度入手,设计几种用于加工小型且表面质量要求较高的零件的角度铣刀;基于有限单元法,建立角度铣刀三维切削模型,分析不同切削要素以及刀具几何角度对切削力的影响规律,通过与理论结果对比验证计算模型的正确性;在此基础上,研究不同角度铣刀结构切削力学性能,从而为角度铣刀的结构设计提供理论基础。

1 几何角度及结构设计

几何角度是设计角度铣刀的重要参数,直接关系到切削效率、切削质量和刀具寿命[8]。角度铣刀的几何角度主要有前角 γ_0、后角 α_0 和螺旋角 β[9]。

前角 γ_0 影响角度铣刀的锋利程度以及刀具强度,通常角度铣刀的前角范围为 5° ~ 25°,本研究设计的刀具每个刀齿相对较小,可以选择较小的前角来增加刀齿强度,取 $\gamma_0 = 5°$;后角 α_0 影响刀具磨损、加工质量以及散热能力,通常后角范围为 12° ~ 16°,本研究中加工的零件对表面质量及精度要求较高,且前角在选择时优先考虑了刀齿的强度,所以后刀面在选择时考虑加工质量和刀齿的锋利程度,取 $\alpha_0 = 13°$;螺旋角 β 影响切削过程的平稳性以及切削屑的流向,考虑切削屑的流动以及刀具强度,取 $\beta = 5°$;角度铣刀在高速铣削时会有大量的切屑沿着前刀面流出,因而刀齿间设有容屑槽,取容屑槽半径 $r = 0.2$ mm。本研究中所给出角度铣刀是遵循上述原则设计得到的。

45 单角 R 型铣刀结构如图 1 所示。

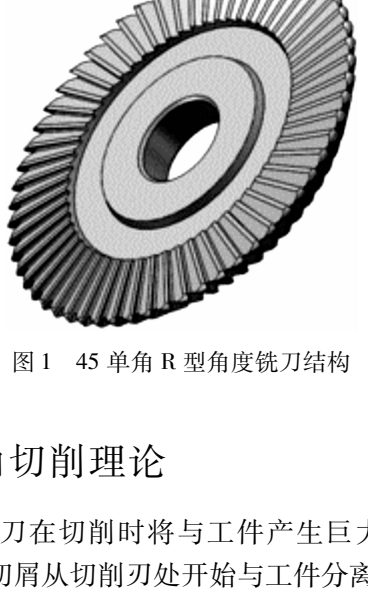


图 1 45 单角 R 型角度铣刀结构

2 斜角切削理论

角度铣刀在切削时将与工件产生巨大的相对移动,从而使切屑从切削刃处开始与工件分离。

角度铣刀切削模型如图 2 所示。

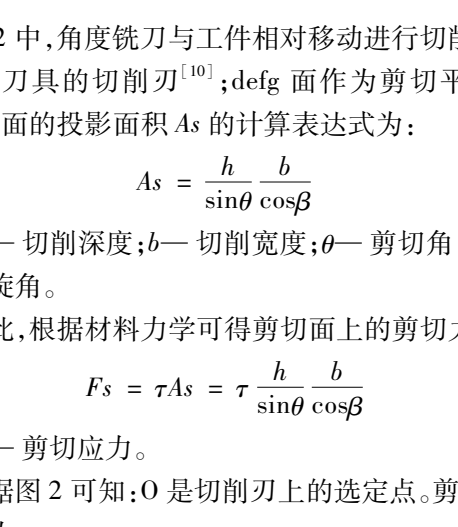


图 2 角度铣刀切削模型

图 2 中,角度铣刀与工件相对移动进行切削。其中 AB 段为刀具的切削刃[10];defg 面作为剪切平面。因此,剪切面的投影面积 As 的计算表达式为:

$$As = \frac{h}{\sin\theta}\frac{b}{\cos\beta} \tag{1}$$

式中:h— 切削深度;b— 切削宽度;θ— 剪切角;β— 刀具的螺旋角。

因此,根据材料力学可得剪切面上的剪切力为:

$$Fs = \tau As = \tau\frac{h}{\sin\theta}\frac{b}{\cos\beta} \tag{2}$$

式中:τ— 剪切应力。

根据图 2 可知:O 是切削刃上的选定点。剪切力则可表示为:

$$Fs = F\frac{\cos\varphi_i\cos(\alpha_0 + \theta)}{\cos\Phi_i} \tag{3}$$

式中:F— 切削合力;θ— 剪切角;φ_i—F 与其在法平面 Pn 上的投影之间的夹角;α_0— 切削平面 Ps 与 xoy 平面之间的夹角即后角;Φ_i— 剪切速度方向与切削平面 Ps

和法平面 Pn 的交线之间的夹角。

结合式(2,3)可以推出切削合力的表达式为:

$$F = \frac{\tau hb\cos\Phi_i}{\cos\varphi_i\sin\theta\cos\beta\cos(\alpha_0 + \theta)} \tag{4}$$

由切削力之间的关系可知 $\Phi_i = \varphi_i = 0$。应用最大剪切应力准则剪切发生在剪应力最大的方向,此时主应力方向与最大剪应力方向呈 45°,根据 Merchant 剪切角公式:

$$\theta = \frac{\pi}{4} - \frac{\beta_\alpha - \gamma_0}{2} \tag{5}$$

式中:β_α— 前刀面与切屑之间的摩擦角;γ_0— 前角。

此时,前刀面与切屑之间的摩擦角 $\beta_\alpha = 45°$,因此 $\theta = 25°$。

3　计算模型与结果分析

3.1　计算模型

本研究选择的角度铣刀刀具直径为 57.15 mm,厚度为 2.5 mm,齿数为 90;工件为薄钢板,其尺寸为 16 mm×8.5 mm×2 mm。为了减小计算量,将角度铣刀模型中间切去导入到 LS-DYNA 软件中。刀具材料选用 * MAT_RIGID,工件材料选用的 * MAT_JOHNSON_COOK,刀具材料为高速钢,工件材料为 45 钢[11]。

材料具体参数如表 1 所示。

表 1　材料具体参数

类型	密度/(kg · m^3)	弹性模量/GPa	泊松比
刀具	7 800	210	0.26
工件	7 830	206	0.3

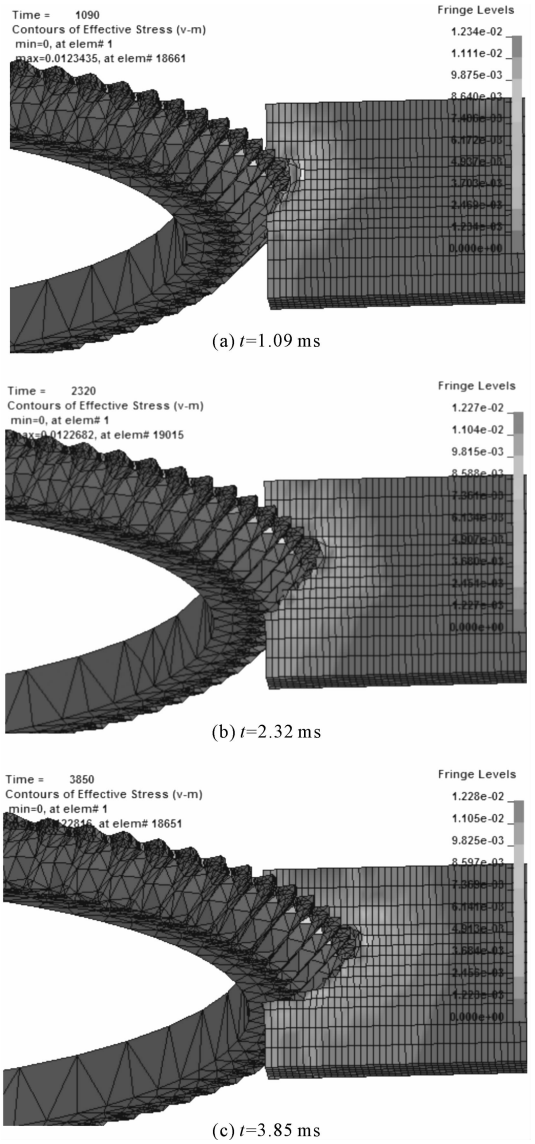
工件的形状是规则的长方体,采用映射网格划分法将工件划分为六面体网格,角度铣刀采用自适应网格方法划分四面体网格。

角度铣刀与工件采用 ESTS 侵蚀算法,工件的上下表面采用 * BOUNDARY_SPC_SET 进行全约束,角度铣刀沿 x 轴旋转进给,采用 * BOUNDARY_PRESCRIBE_MOTION_RIGID 施加,采用 * DATABASE_ACSII_OPTION 输出切削力[12-13],计算时间设置为 4 ms。

3.2　角度铣刀切削过程

为了研究角度铣刀切削过程的力学特性,本研究提取由仿真确定的角度铣刀所受到的载荷等数据,角度铣刀所受载荷是刀齿受力的合力。

以转速为 1 500 r/min,进给速度为 1 m/s 计算工况为例,45°单角尖型角度铣刀铣削等效应力分布如图 3 所示。



(a) t=1.09 ms

(b) t=2.32 ms

(c) t=3.85 ms

图 3　45°单角尖型角度铣刀铣削等效应力分布($\times 10^{11}$ Pa)

从图 3 中可以看出:角度铣刀在铣削的过程中,离切削刃越远应力越小,应力主要集中在切削刃处,此处工件材料在挤压下达到强度极限从而形成切削屑;随着铣刀的不断进给切削宽度也不断增大,应力变化范围也将扩大,直到刀齿全部进入参与铣削,铣削过程趋于平稳。

取该工况下切削力进行定性分析,45°单角尖型角度铣刀切削力历程曲线如图 4 所示。

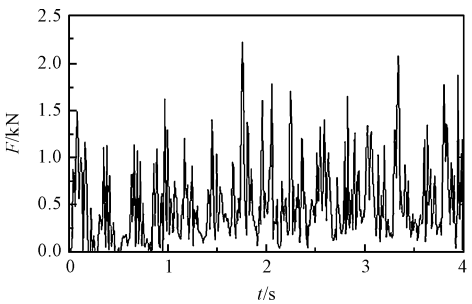


图 4　45°单角尖型角度铣刀切削力历程曲线

从图 4 中可以看出:切削力随时间呈周期性变化,结合其切削过程可以发现角度铣刀每个刀齿完整的切削过程切削力包含 5 个峰值,这是由于工件在厚度上网格被划分为 5 个单元,每个刀齿都会切削 5 个网格。每个周期内切削力都存在峰值,在 $t=1.77$ ms 时刻,切削力峰值达到最大值为 2.22 kN,此时刀齿全部进入工件,切削宽度不再变化。为了评价角度铣刀切削过程的力学性能,本研究中取各周期内切削力的峰值计算平均值。

3.3　切削要素对切削力的影响

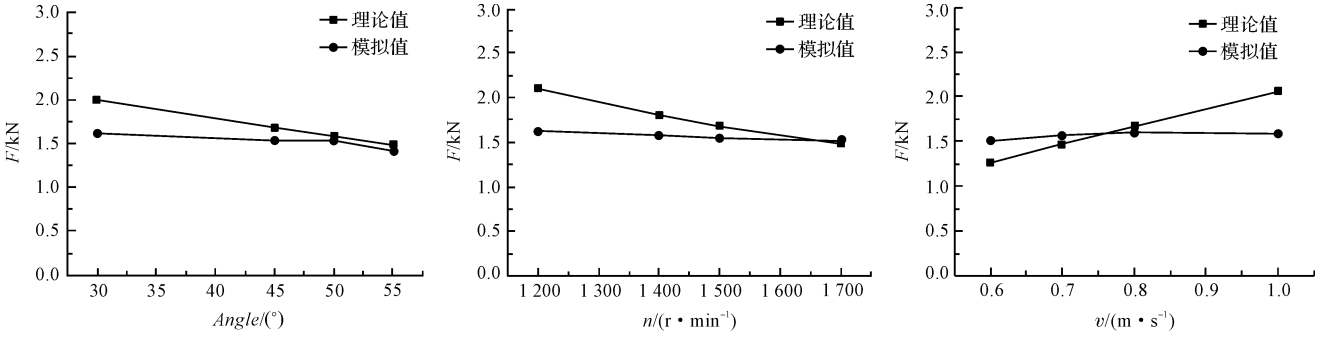
针对不同角度大小的单角角度铣刀以及不同切削要素工况下的单角角度铣刀切削过程进行力学特性研究,不同切削要素工况如表 2 所示。

表 2　不同切削要素工况

刀具角度/(°)	进给速度/(m·s^{-1})	切削速度/(r·min^{-1})
45	0.6/0.7/0.8/1	(1.2/1.4/1.5/1.7)×10^3
30		
50	1	1.5×10^3
55		

为了验证计算模型的正确性,本研究将数值计算结果与理论计算结果进行对比。

切削力理论值与模拟值的对比如图 5 所示。



(a) 不同角度大小的角度铣刀切削力　(b) 不同切削速度的角度铣刀切削力　(c) 不同进给速度的角度铣刀切削力

图 5　切削力理论值与模拟值的对比

其中,理论值由公式(4)计算得到,模拟值按照上述方式取平均力得到。

从图 5 可以看出:不同切削要素工况下角度铣刀切削力的理论值与模拟值大小与趋势基本一致。其中不同进给速度相差最大,这是由于在模拟的过程中有限单元法处理大变形时出现的网格畸变所引起的。从以上结果可以看出,采用上述方法模拟角度铣刀切削过程并研究其切削力变化规律存在一定的合理性和正确性。

3.4　铣刀结构对切削力的影响

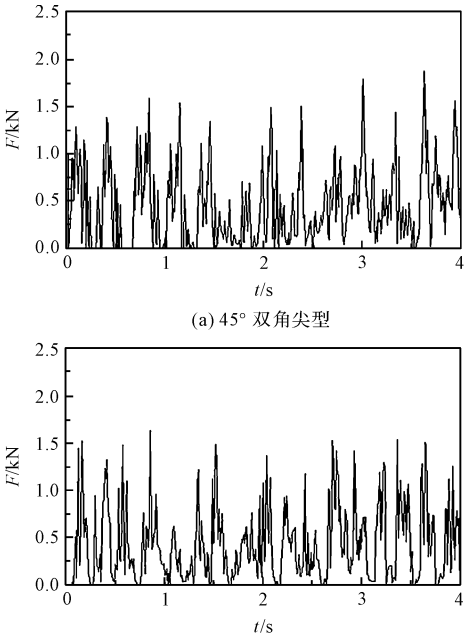
角度铣刀切削力学特性除了和切削要素有关,与刀具本身结构形式也有一定的关系[14],为了进一步研究角度铣刀结构对切削力的影响,在厚度为 2.5 mm、转速为 1 500 r/min、进给速度为 1 m/s 的切削要素工况下,文中进行了不同刀尖类型以及角度类型的角度铣刀切削过程力学性能研究。

不同角度铣刀结构工况如表 3 所示。

表 3　不同角度铣刀结构工况

角度大小/(°)	刀尖类型	角度类型
	尖型	单角
45	尖型	双角
	R 型	单角

角度大小为 45°工况下,不同类型结构的角度铣刀的切削力历程曲线如图 6 所示。



(a) 45° 双角尖型

(b) 45° 单角R型

图 6　切削力历程曲线

对比图 4 与图 6 的切削力的历程曲线可以看出:相同工况下双角角度铣刀要比单角角度铣刀平均切削力小,R 型角度铣刀切削力比尖型角度铣刀平均切削力小。这是由于在切削过程中,当切削角度相同时,双角比单角角度铣刀单位时间内切削宽度的变化量要

小,而且双角度铣刀在切削时两边切削刃呈不同角度切削工件;同时可以发现双角角度铣刀要比单角角度铣刀切削力平稳,R 型角度铣刀切削力比尖型角度铣刀切削力平稳。

综上所述,不同结构的角度铣刀受到的切削力大小变化很大,在实际应用中可以通过在满足加工要求的前提下适当改变角度铣刀的刀齿形状,从而减小切削力大小增加刀具寿命;尽管双角角度铣刀表现出较好的切削力学性能,但其刀齿齿根强度较弱,当刀具进行高速铣削时容易引起崩刃,所以使用时需要降低转速和进给速度。

4　结束语

本研究中针对角度铣刀切削过程的力学性能进行了研究,得到结论如下:

(1)采用有限单元法模拟角度铣刀切削过程,将模拟结果与理论结果对比,表明数值模拟的可行性与正确性;

(2)双角角度铣刀比单角角度铣刀表现出较好的切削力学性能,但其刀齿强度较弱,当刀具进行高速铣削时容易引起崩刃,所以使用时需要降低转速和进给速度;

(3)R 型刀齿比尖型刀齿角度铣刀表现出较好的切削力学性能,并且其刀齿强度相对较强,在满足加工要求的前提下,尽量将刀齿加工为 R 型,以增加刀具寿命。

参考文献(References):

[1] FENG P F, XU D C, WU Z J, et al. Comprehensive evaluation analysis and optimization methodology of tool geometric parameters for high speed cutting[J]. **Key Engineering Materials**, 2010,431-432(3):474-478.

[2] 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.

[3] BECZE C E, ELBESTAWI M A. A chip formation based analytic force model for oblique cutting[J]. **International Journal of Machine Tools and Manufacture**, 2002, 42(4):529-538.

[4] 李炳林,王学林,胡于进,等. 斜角切削的热力建模与仿真分析[J]. 中国机械工程,2010,21(20):2042-2048.

[5] 李炳林,胡于进,王学林,等. 基于斜角切削理论的立铣切削力预测研究[J]. 中国机械工程,2011,22(19):2283-2288.

[6] 涂志标,任巨涛,郑宝增,等. 不同螺旋角度立铣刀切削性能研究[J]. 机床与液压,2015(16):39-43.

[7] 弓海霞,赵选斌,唐海兵. 管道角度铣刀的设计[J]. 工具技术,2007,41(12):49-54.

[8] 刘晓晨,汪永超,李　磊,等. 面向绿色制造的刀具几何角度的优化选择[J]. 组合机床与自动化加工技术,2016(1):1-3.

[9] WANG Xue-hui, ZHOU Ping, LIU Ya-wen, et al. Physical simulation of the cutting process induced by tool geometric angle and cutting parameters[J]. **Advanced Materials Research**, 2012,31(4):715-718.

[10] WANG L, LIN B, GUO Y, et al. Optimization of end mill geometry parameters based on oblique cutting theory[J]. **Key Engineering Materials**, 2016,693(5):850-855.

[11] SHROT A, BAEKER M. Determination of Johnson-Cook parameters from machining simulations[J]. **Computational Materials Science**, 2012,52(1):298-304.

[12] HALLQUIST J O. LS-DYNA keyword user's manual[M]. California: Livermore Software Technology Corporalion, 2007.

[13] RODRIGUEZ J M, JONSEN P, SVOBODA A. Simulation of metal cutting using the particle finite-element method and a physically based plasticity model[J]. **Computational Particle Mechanics**, 2017,4(1):35-51.

[14] 王　雷. 铣削过程力学建模与刀具结构优化技术方法研究[D]. 天津:天津大学机械工程学院,2016.

[**编辑:**李　辉]

本文引用格式:

张德义,沈　宇,陶丽佳,等. 角度铣刀切削力学性能研究[J]. 机电工程,2019,36(5):485 - 489.

ZHANG De-yi, SHEN Yu, TAO Li-jia, et al. Cutting mechanical properties of angle milling cutter[J]. Journal of Mechanical & Electrical Engineering, 2019, 36(5):485 - 489.