带圆角圆弧头铣刀设计的关键技术

陈 涛， 李显创， 王广越， 刘献礼
(哈尔滨理工大学 机械动力工程学院，黑龙江 哈尔滨 150080)

摘 要：淬硬钢为典型难加工模具材料，其加工过程中受强热力耦合载荷作用，易导致刀具磨破损，进而降低模具加工表面质量。为了提高工件加工表面质量和刀具寿命，对带圆角圆弧头铣刀的设计进行了研究。首先，结合球头立铣刀和平底圆角立铣刀切削特性，提出了一种适用于大型淬硬钢模具加工的带圆角圆弧头铣刀。其次，对带圆角圆弧头铣刀几何特征进行定义，建立了铣刀轮廓面数学模型，推导了螺旋切削刃参数方程。最后，通过仿真、刀具磨削试验和检测中心对所设计的带圆角圆弧头铣刀进行了检验。检验结果表明：带圆角圆弧头铣刀的刀具直径、圆角半径、圆弧头半径、刃形的磨削精度误差范围在 ±0.001 mm 以内，螺旋角、前角和后角的磨削精度误差范围在 ±0.05°以内，为刀具的推广应用提供了技术保障。

关键词：切削特性；带圆角圆弧头铣刀；螺旋切削刃；刀具磨削；精度检测
DOI：10.15938/j.jhust.2017.01.013
中图分类号：TG501 **文献标志码**：A **文章编号**：1007-2683(2017)01-0075-05

The Key Technology of Torus End Milling Cutter with Circular Corner Design

CHEN Tao， *LI Xian-chuang*， *WANG Guang-yue*， *LIU Xian-li*
(School of Mechanical and Power Engineering, Harbin University of Science and Technology, Harbin 150080, China)

Abstract: Hardened steel is typically low-machinability mold material, strong thermal and mechanical loading in the processing process, lead to cutter wear and breakage, and reduce the mold machining surface quality. In order to improve the machining surface quality and cutter life, studied the design of torus end milling cutter with circular corner. Firstly, combined with the ball end milling cutter and annular cutter cutting property , proposing a kind of applicable to large hardened steel mold machining with torus end milling cutter with circular corner. Secondly, torus end milling cutter with circular corner geometrical features are defined, establish mathematical model of milling cutter contour surface, which is derived from the helix edge parameter equation. Finally, torus end milling cutter with circular corner is tested by simulation, cutter grinding experiment and test center, the result show that cutter diameter, fillet radius, radius of cutter with circular corner design, cutting edge grinding accuracy error range of the cutter in the range of ±0.001 mm, and the error range of the grinding error is within ±0.05, provide technical support for the popularization and application of cutter.

Keywords: cutter property; torus end milling cutter with circular corner; helix edge; cutter grinding; precision test

收稿日期：2015-09-11
基金项目：国家重大科技专项(2012ZX04012021).
作者简介：陈 涛(1979—)，男，教授，硕士研究生导师，E-mail: chentao@hrhust.edu.cn;
李显创(1988—)，男，硕士研究生;
王广越(1979—)，男，博士研究生。

0 引 言

淬硬钢材料具有硬度高、延伸率小、塑性低和易形成高光洁加工表面等优点，在轿车覆盖件模具行业中得到广泛应用[1]。然而，由于大型淬硬钢模具高硬度、型面特征复杂的特点[2]，加工过程中切削载荷较大且多变，易导致刀具磨、破损，进而降低模具加工表面质量，对切削刀具提出了新的挑战。

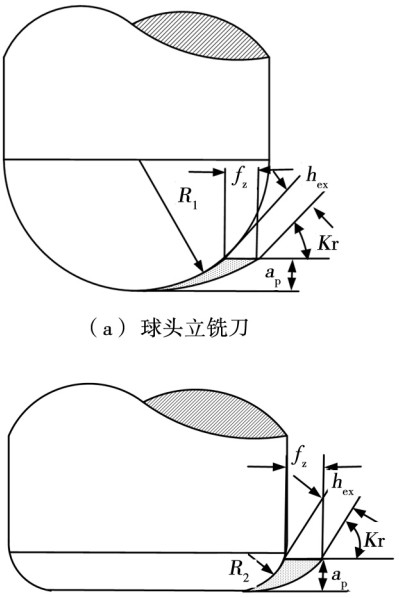
为了提高工件加工表面质量和刀具寿命，相关人员对整体硬质合金立铣刀结构设计开展了研究。Shirase 等[3]对变齿距螺旋立铣刀进行了切削力和加工表面误差分析，提出了变齿距立铣刀不仅能够抑制颤振，且可以有效减小加工表面误差，提供加工表面质量。Yusoff 等[4]分析变螺旋角铣刀抑制颤振的机理，结果表明采用变螺旋角结构有助于降低铣削系统的颤振，增加其稳定性。Song 等[5]对立铣刀高速铣削的颤振稳定域进行研究，提出不等齿距、不等螺旋角立铣刀的系统稳定性更好。张辉等[6]建立等螺旋角球头铣刀螺旋刃线，解决了刀具在切削过程中受力不均匀的问题，减少了刀具的磨、破损。Domrovari 等[7]提出变导程的立铣刀的刃线设计，提高了刀具在铣削过程中的稳定性。Engin[8]设计‘S’形切削刃，解决了球头铣刀在铣削过程中出现的振动问题。董敏[9]提出了等螺距连续刃口曲线，为刀具的设计和制造提供了参考。何耀雄[10]提出了广义螺旋运动概念，并建立了球头刀典型刀刃曲线的通用数学模型及其设计方法。

可见，针对整体硬质合金立铣刀结构研究，目前主要集中在球头立铣刀和平底圆角立铣刀的不等距、变螺旋角和刀具刃型等特征方面，而对成型立铣刀设计方面的研究还很少。本文根据切削刀具在加工大型淬硬钢模具型面的特点，同时结合球头和平底圆角等立铣刀的切削特性，提出了带圆角圆弧头铣刀这类成型铣刀，并进行刀具的设计、磨制和检测。

1 带圆角圆弧头铣刀

1.1 不同类型铣刀切削特性对比分析

在图1球头铣刀和环形铣刀切削特性对比分析中，使刀具的切削深度、每齿进给量和刀具直径都保持一致。



（a）球头立铣刀

（b）平底圆角立铣刀

图1 不同类型铣刀的铣削对比

$$K_r = \frac{1}{2}\cos^{-1}\left(\frac{R-a_p}{R}\right) \tag{1}$$

$$h_{ex} = \sin K_r \times f_Z \tag{2}$$

$$L_e = \frac{\pi R}{180}\cos^{-1}\left(\frac{R-a_p}{R}\right) \tag{3}$$

$$F_C = K_C \cdot A_D = K_C h_{ex} \cdot b_D \tag{4}$$

其中：R 为切削底刃曲率半径，a_p 为切削深度，K_r 为主偏角，h_{ex} 为切削厚度，f_Z 为每齿进给量，L_e 为接触长度。F_C 为主切削力，A_D 为单位切削面积，b_D 为切削宽度，Kc 为切削力系数。

由公式(1)可知，在相同的切削深度下，球头立铣刀的主偏角小于平底圆角立铣刀。由式(2)～(4)可知，相同的进给量，小的主偏角会产生相对小的厚度的切屑，进而减小切削轴向力，提高刀具抗磨、破损的能力，但球头立铣刀的切削刚度小于平底圆角立铣刀，在加工高硬度淬硬钢容易引起刀具变形，造成加工表面质量下降。

1.2 带圆角圆弧头铣刀的提出

结合球头和平底圆角等立铣刀的切削特性和面向大型淬硬钢模具加工中表面质量和刀具寿命问题，本文提出了一种带圆角圆弧头铣刀，如图2所示。

带圆角圆弧头铣刀结构主要包括圆弧头结构、刀柄结构和圆弧头结构与刀柄结构有圆弧过渡的圆角结构。其中圆角结构不但能使圆弧头和刀柄两段

结构光滑过渡而且增加了参与切削的切削刃长度，使刀具磨、破损减小，提高了刀具寿命，降低了加工成本。同时圆角结构使刀具的轴向截面为椭圆形，在保证了刀具刚度的同时，最大限度的提高了刀具的刀尖锥度，从而提高了刀具的锋利性。

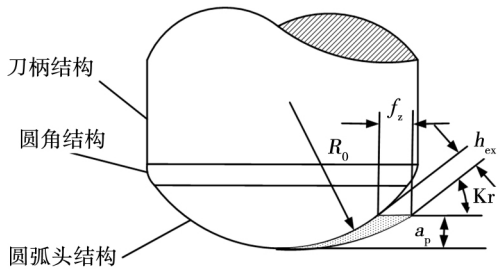


图 2　带圆角圆弧头铣刀

根据图 1、图 2 和式(1) ~(4)，带圆角圆弧头铣刀的切削主偏角明显小于球头铣刀和平底圆角立铣刀，小的主偏角不但能够使切削刃更为平缓地切入，而且有助于减少轴向力和保护切削刃，提高工件加工表面质量和刀具寿命。

2　带圆角圆弧头铣刀结构数学模型的建立

2.1　轮廓面数学模型的建立

对带圆角圆弧头铣刀几何特征进行定义，如图 3 所示，其几何特征是由 AB 段圆弧与 BC 段圆弧相连，然后 BC 段圆弧再与 CD 段直线相连组成。其中，圆弧顶点 O' 与 A 点重合，O 点为 AB 段圆弧头结构的圆心，AB 段圆弧半径为 R_0，O_1 点为 BC 段圆角结构圆心，BC 段圆角结构的圆弧半径为 R_1，CD 段刀柄结构的圆弧半径为 R_2。

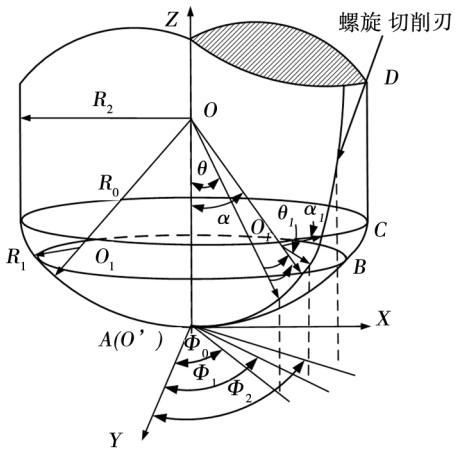


图 3　带圆角圆弧头铣刀结构

根据带圆角圆弧头铣刀几何特征的定义建立轮廓面数学模型，AB 段圆弧头结构轮廓面数学模型如下式:

$$r_0=\begin{Bmatrix}R_0\sin\theta\cos\varphi_0\\R_0\sin\theta\sin\varphi_0\\R_0-R_0\cos\theta\end{Bmatrix},\theta\in[0,\alpha],\varphi_0\in[0,2\pi]\quad(5)$$

式中: r_0 为 AB 段刃口曲线任意点的空间矢量，R_0 为带圆角圆弧头铣刀 AB 段圆弧的半径，φ_0 为 AB 段圆弧面螺旋刃线的回转角，θ 为点沿着 AB 段螺旋刃线移动与 O 点的连线与 OA 夹角，α 为 OA 与 OB 之间的夹角。

BC 段圆角结构轮廓面数学模型:

$$r_1=\begin{Bmatrix}((R_0-R_1)\sin\alpha+R_1\sin(\alpha+\theta_1))\cos\varphi_1\\((R_0-R_1)\sin\alpha+R_1\sin(\alpha+\theta_1))\sin\varphi_1\\(R_0-(R_0-R_1)\cos\alpha)-R_1\cos(\alpha+\theta_1)\end{Bmatrix}\quad(6)$$

式中: $\theta_1\in[0,\alpha_1]$，$\varphi_1\in[0,2\pi]$，r_1 为 BC 段螺段圆角螺旋刃线的回转角，θ_1 为点沿着 BC 段螺旋刃线方向运动与线 $O'B$ 的夹角，α_1 为线段 O_1B 与线段 O_1C 之间的夹角旋刃线任意点的空间矢量，R_1 为带圆角圆弧头铣刀 BC 段圆角的半径，φ_1 为 BC。

CD 段刀体结构轮廓面数学模型可以如下表示:

$$r_2=\begin{Bmatrix}((R_0-R_1)\sin\alpha+R_1)\cos\varphi_2\\((R_0-R_1)\sin\alpha+R_1)\sin\varphi_2\\(R_0-(R_0-R_1)\cos\alpha)+h\end{Bmatrix}\quad(7)$$

式中: $h\in[0,3]$，$\varphi_2\in[0,2\pi]$，r_1 为 BC 段刃口曲线任意点的空间矢量，φ_2 为 CD 段圆弧面螺旋刃线的回转角，h 为 CD 段刃口曲线的长度。

2.2　带圆角圆弧头铣刀螺旋切削刃数学模型的建立

结合大型淬硬钢模具加工中型面起伏多变的特征，对带圆角圆弧头铣刀的螺旋刃线采用等螺旋角方法进行设计。根据微分几何原理，将轮廓面数学模型求解运算得到 AB 段圆弧头结构的螺旋切削刃的参数方程:

$$r_0=\begin{Bmatrix}R_0\sin\theta\cos(\tan\beta\cdot\ln|\csc\theta-\cot\theta|)\\R_0\sin\theta\sin(\tan\beta\cdot\ln|\csc\theta-\cot\theta|)\\R_0-R_0\cos\theta\end{Bmatrix}\quad(8)$$

式中: $\theta\in[0,\alpha]$，同时为实现切削刃各部分光滑过渡，需对圆弧头、圆角和刀柄结构光滑过渡连接部分进行设计计算。首先，圆弧头部分和圆角部分两段连接部分的螺旋刃线连接条件为: $\theta=\alpha$，$\varphi_1=\varphi_0$。则 BC 段圆角结构螺旋刃线的回转角:

$$\varphi_1 = \frac{2\tan\beta b}{\sqrt{a^2-b^2}}\tan^{-1}\frac{a\tan\frac{u}{2}+b}{\sqrt{a^2-b^2}} + \tan\beta \cdot \ln|\csc\alpha - \cot\alpha| - \frac{2\tan\beta \cdot b}{\sqrt{a^2-b^2}}\tan^{-1}\frac{a \cdot \tan\frac{\alpha}{2}+b}{\sqrt{a^2-b^2}} \tag{9}$$

式中: $a = (R_0 - R_1)\sin\alpha$, $b = R_1$, $u = \alpha + \theta_1$。

将式(9)带入式(6)中得到 BC 段圆角结构的螺旋切削刃的参数方程。

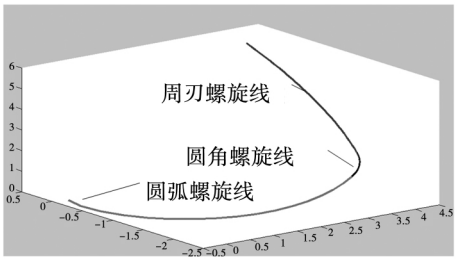
其次,由圆角部分和刀柄部分两段的螺旋刃线连接条件为: $\theta_1 = \alpha_1$, $h = 0$,偏转角 $\varphi_2 = \varphi_1$,则 CD 段刀柄结构螺旋刃线的回转角:

$$\varphi_2 = \frac{\tan\beta \cdot h}{(R_0 - R_1)\sin\alpha + R_1} + \frac{2\tan\beta \cdot b}{\sqrt{a^2-b^2}}\tan^{-1}\frac{a\tan\frac{\pi}{4}+b}{\sqrt{a^2-b^2}} + \tan\beta \cdot \ln|\csc\alpha - \cot\alpha| - \frac{2\tan\beta \cdot b}{\sqrt{a^2-b^2}}\tan^{-1}\frac{a \cdot \tan\frac{\alpha}{2}+b}{\sqrt{a^2-b^2}} \tag{10}$$

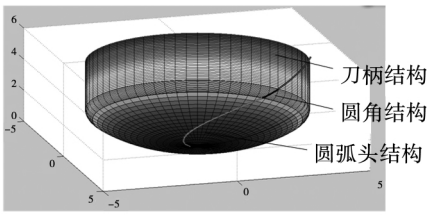
式中: $a = (R_0 - R_1)\sin\alpha$, $b = R_1$。

将式(10)带入式(7)中,可得到 CD 段刀柄结构的螺旋切削刃的参数方程。

针对建立的螺旋切削刃参数方程和轮廓面数学模型进行 matlab 仿真,如图 4 所示。



(a) 刃线仿真



(b) 模型仿真

图 4 带圆角圆弧头铣刀螺旋刃线仿真

结合仿真的数据,可检验刀具廓形和刃型建模的正确性,同时仿真数据可为后续铣刀的磨制提供依据。

3 带圆角圆弧头铣刀的磨制与检测

利用 SACCK 五轴工具磨床对所建立的带圆角圆弧头铣刀刀具进行磨制试验,刀具材料为硬质合金,其磨削流程,如图 5 所示。

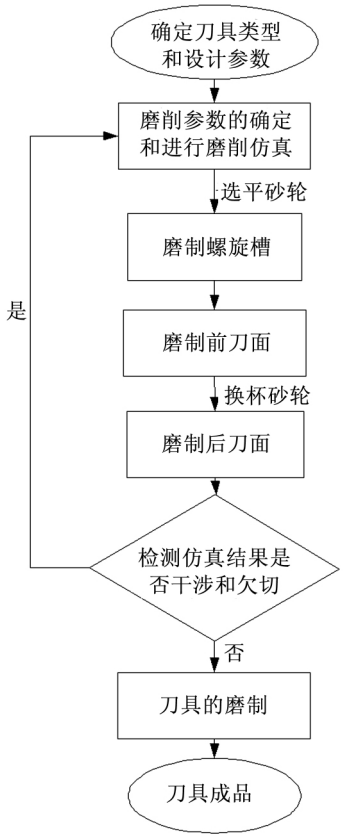
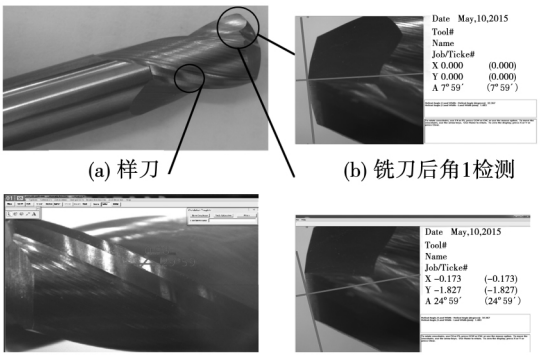


图 5 带圆角圆弧头铣刀的磨削流程

在整个螺旋槽磨削过程中,为了保证磨削精度砂轮的轴线矢量需平行于螺旋切削刃上的磨削点所在前刀面的法矢量,磨削方向为螺旋切削刃上的磨削点的切线方向。磨制的样刀如图 6(a)所示。

为了对刀具的磨削精度进行分析,通过刀具检测中心对刀具不同部位的参数进行检测取平均值见表 1,其中采用 PG-1000 检测仪对刀具的螺旋角、前角、后角及后刀面宽度的测量。其螺旋角、后角及法向第一后刀面宽度的检测结果,如图 6(b)、(c)、(d)所示。



(a) 样刀　(b) 铣刀后角1检测

(c) 螺旋角及第一后刀面宽度的检测　(d) 铣刀后角2检测

图 6　带圆角圆弧头铣刀样刀检测

表 1　带圆角圆弧头铣刀设计值和检测值对比

参数	刀具直径 /mm	圆角半径 /mm	圆弧头半径 /mm	第一后角 /(°)	第二后角 /(°)	螺旋角 /(°)	前角 /(°)	第一后刀面宽度 /mm
设计值	12	1	10	8	25	30	1	1
检测值	11.995	0.996	9.995	7.996	24.996	29.98	0.995	0.96

从表 1 可以看出带圆角圆弧头铣刀的刀具直径、圆角半径、圆弧头半径、刃形的磨削精度误差范围在 ±0.001 mm 以内，螺旋角、前角和后角的磨削精度误差范围在 ±0.05°以内。

3　结　论

1) 通过对比分析球头立铣刀和平底圆角立铣刀的切削特性，提出了一种适用于大型淬硬钢模具加工的带圆角圆弧头铣刀。

2) 建立了带圆角圆弧头铣刀设计模型，推导出了刀具轮廓面方程和螺旋刃线参数方程。

3) 运用 MATLAB 对所建立的螺旋刃线参数方程和刀具轮廓面方程进行仿真，其结果验证了螺旋刃线参数方程和刀具轮廓面方程的正确性。

4) 完成了带圆角圆弧头铣刀样刀磨制和磨削精度检测，为刀具的推广应用提供了技术保障。

参 考 文 献:

[1] 姜彦翠，刘献礼，丁云鹏，等. 汽车大型覆盖件淬硬钢模具切削加工技术[J]. 哈尔滨理工大报，2013，18(1)：7－13.

[2] ALTAN T，LILLY B，YEN Y C. Manufacturing of Dies and Molds [J]. CIRP Annals Manufacturing Technology，2001，50(2)：405－423.

[3] SHIRASE S K. Cutting force and dimensional surface error generation in peripheral milling with variable pitch helical end mills [J]. International Journal of Machine Tools and Manufacture，1996，36(5)：567－584.

[4] YUSOFF A R，SIMS N D. Optimization of variable helix tool geometry for regenerative chatter mitigation [J]. International Journal of Machine Tools and Manufacture，2011，51：133－14.

[5] SONG Q，AI X，ZHAO J. Design for variable pitch end mills with milling stability [J]. International Journal of Advanced Manufacturing Technology，2011，55：891－903.

[6] 张辉，姚南珣，王殿龙，等. 等螺旋角回转刀具刀刃曲线的通用算法[J]. 大连理工大学学报，1997，37(1)：63－67.

[7] DOMBOVARI Z，STEPAN G. The effect of helix angle variation on milling stability [J]. Journal of Man-ufacturing Science and Engineering，2012，134(10)：1－9.

[8] ENGIN S and ALTINTAS Y. Mechanics and dynamics ofgeneral milling cutters，part I：helical end mills [J]. International Journal of Machine Tools and Manufacture，2001，41(15)：2195－2212.

[9] 董敏，唐余勇，董增福. 关于球头铣刀的等螺距连续刃口曲线[J]. 哈尔滨工业大学，2003，35(2)：301－302.

[10] 何耀雄. 球头刀具刃形建模与过渡刃设计[J]. 机械工程学报，2001，37(9)：101－104.

(编辑: 关　毅)