

圆锥球头立铣刀的 CNC 磨削模型及工艺

来传远, 金建新

(华中理工大学机械学院, 湖北武汉 430074)

摘要: 复杂形状刀具结构上的复杂性导致了磨削加工的复杂性。利用圆锥球头立铣刀这一典型复杂形状刀具, 对其圆锥部分和球头部分的刀刃曲线的连续性进行了分析, 然后对刀刃结构和加工特性进行研究, 再利用 Frenet 标架来确定砂轮的摆放姿态, 实现利用活动坐标系控制机床坐标的插补进给, 并通过磨削实例验证。

关键词: 圆锥球头立铣刀; 等螺旋角; Frenet 标架; 加工工艺

中图分类号: TG714 **文献标识码:** A

1 引言

圆锥球头立铣刀(以下称刀具)是一种复杂形状刀具, 它是铣削自由曲面的重要刀具。其切削刃为空间复杂曲线。这无论对于刀具的刃形设计还是刃磨加工来说, 都是一项相当复杂的工作。以下参考国内某工具厂设计的圆锥球头立铣刀图纸(如图 1 所示), 探讨它的刀具结构和工艺原理, 在六轴五联动 CNC 工具磨床上利用磨削实验来验证。

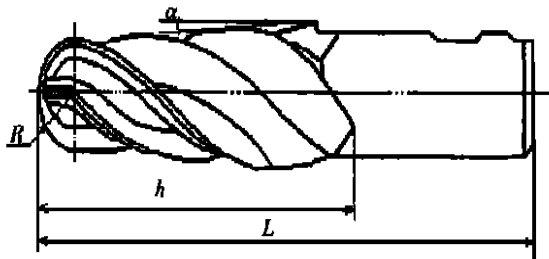


Fig. 1 Cone ball-end mill

刀具的基本几何参数有: L —刀具总长度 h —刀刃长度 α —锥顶半角 γ —前角(见图 3 截形图) β —螺旋角(螺旋切线与中心线交角) R —球头半径 K —槽深系数。

该刀具的加工难度在于在导程不相等的条件下, 加工出等前角、等后角刀刃。为保证加工过程中的安全性和包络面的光滑, 锥面和球面上的刀刃曲线必须是一阶连续的。刀具在开沟槽后采用 CBN(立方氮化硼)砂轮磨削, 在复杂的刀刃曲线

条件下, 如何获得合理的砂轮摆放姿态是加工过程中的难点。

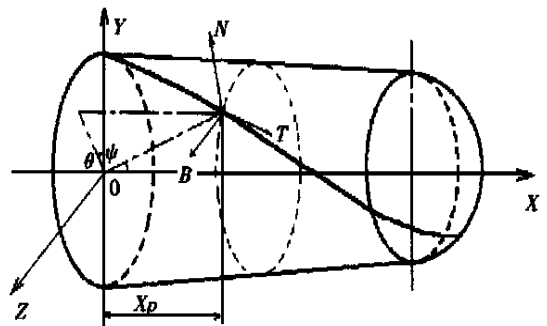


Fig. 2 Equal spiral angle curve of the mill

2 刀具刀刃曲线的数学模型

为方便描述, 将铣刀简化如图 2, 铣刀外形曲面是由圆锥(锥半角为 α)的一部分和圆球(球半径为 R)的一部分拼接起来, 显然这个曲面只有一阶连续, 下面以 θ 为参数, 给出连续刀刃曲线 C 的参数方程。在等螺旋角(即为常数)的情况下有: 当 C 位于锥面上时,

$$\begin{cases} x = x_0(1 - e^{-(\sin\alpha\cot\beta)\theta}) \\ y = x_0 \tan\alpha e^{-(\sin\alpha\cot\beta)\theta} \cos\theta \\ z = x_0 \tan\alpha e^{-(\sin\alpha\cot\beta)\theta} \sin\theta \end{cases} \quad (1)$$

其中 $x_0 = l + R(\csc\alpha - 1)$

当 C 位于球面上时,

$$\begin{cases} x = R \sin \Psi + (L - R) \\ y = R \cos \Psi \cdot \cos \theta \\ z = R \cos \Psi \cdot \sin \theta \end{cases} \quad (2)$$

其中 $\Psi = 2 \arctan(e^{(\omega/\beta) \cdot \theta}) - \pi/2$

为方便计算, 引入微分几何中的 Frenet 标架^[1] $\{r; T, N, B\}$, 其中 T, N, B 分别是切矢量、主法矢量和副法矢量的单位矢量。

则 C 曲线在锥面上时,

$$T = \cos \alpha \cos \beta i - (\sin \alpha \cdot \cos \beta \cos \theta + \sin \beta \sin \theta) j - (\sin \alpha \cdot \cos \beta \sin \theta - \sin \beta \cos \theta) k \quad (3)$$

当曲线在球面上时,

$$T = \cos \Psi \cos \beta i - (\sin \Psi \cos \beta \cos \theta + \sin \beta \sin \theta) j - (\sin \Psi \cos \beta \sin \theta - \sin \beta \cos \theta) k \quad (4)$$

观察式(3)和式(4), 不难发现, 如果将 Ψ 换成 θ , T 矢量是一样的, 即整个圆锥球头立铣刀上的刀刃曲线是一阶连续的。这样在用砂轮磨削包围刀刃曲线的前刀面、第一后刀面、第二后刀面时, 可以保持曲线和包络面平滑。否则, 刀具在加工过程中, 由于产生不连续的突变, 会产生不可预料甚至严重的后果。同理, 利用微分几何知识, 可以得到主法矢量 N 和副法矢量 B 。有了曲线的 T, N 和 B , 就可以在加工过程中确定合适的砂轮加工角度及合理位置, 从而在刀具的 CNC 磨削加工中, 利用计算机的强大运算能力, 精确控制加工运动过程, 加工出合适的前、后角并避免加工过程中的干涉现象。

3 刀具刀刃结构及工艺分析

3.1 刀具刀刃结构

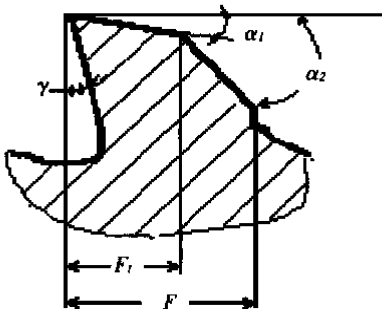


Fig. 3 Structure of the mill edge

待磨削加工的刀刃结构端截面如图 3, 待加

工表面包括前刀面、第一后刀面和第二后刀面, 前刀面要求保证前角相等, 而刀具后刀面主要要在保证刀刃的刀刃曲线和第一后刀面刃带宽的前提下磨削出满足后角要求的后刀面。 F_1 为第一后刀面刃带宽, F 是第一、第二后刀面刃带总宽度。 α_1 和 α_2 分别是第一后角、第二后角。

刀具的设计就是对刀具前角、第一后角、第二后角以及刃带宽度等参数的规定。由金属切削刀具的基本知识可知, 刀具的前角、后角等只与刀刃及其邻域有关, 它是由刀刃上任一点的邻域微分几何特性来定义的。为此, 可以根据刀具的刀刃曲线的数学模型, 利用微分几何的有关知识, 解出刀刃点的位置矢量, 然后根据磨削加工的工艺要求的几何约束条件, 求得砂轮的位置矢量。供试验六轴五联动 CNC 工具磨床有 X, Y, Z, A, C, X 等六根可控轴, 其中 X 不参加联动。加工时, 前刀面采用碟形砂轮加工, 第一后刀面和第二后刀面的磨削加工均采用柱形砂轮加工。

3.2 磨削工艺分析

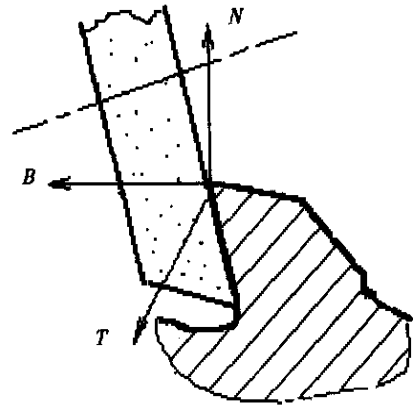


Fig. 4 Process of the front surface

前刀面的的刀刃磨削状态如图 4。实际加工过程中, 刀具是固定不动的(仅附加一个旋转运动), 而砂轮轴线矢量是变化的。首先, 规定砂轮的初始位置为砂轮的大端圆法矢量等于 x_p 点的副法矢量 B , 为加工出相应的前角, 使砂轮的法矢量绕 T 旋转一个角度为 γ 。同时保证只有砂轮的大端面前端和前刀面接触, 形成包络加工状态, 避免砂轮其它部分参与前刀面的磨削而造成干涉。式(1)、(2)表达的圆锥球头立铣刀的等螺旋角螺旋线方程中, 任一 x_p 点所表示的刀刃上的点同时又对应砂轮侧平面上的一点。除 x_p 点外, 砂轮侧平面圆周与刀槽槽底所在圆锥面相切于另一点 x_2 , x_2 的刀刃中的坐标由槽深系数 K 确定, 显然, x_2 同时可以用砂轮侧平面方程确定。同时, 无论曲线

是在锥面还是在球面上, 曲线有统一的曲面——曲线标架, 可以得到砂轮在刀刃曲线上的姿态及刀刃径向截面具体的参数。

在插补运算过程中, 对于砂轮和刀具的接触点的运动轨迹上任意一点 $P_i(x_i, y_i, z_i)$, 利用插补的原理有: $\Delta p_i = (\Delta x_i, \Delta y_i, \Delta z_i)$ 。对于 p_i 点对应砂轮的轴线矢量旋转角度坐标 $n_i(\alpha, \beta)$, 有 $\Delta n_i = (\Delta \alpha, \Delta \beta)$ 。其中 $i = 0, 1, 2, \dots, n_0$ 。由 Δp_i 和 Δn_i , 可以得到各轴的插补进给 $\Delta X, \Delta Y, \Delta Z, \Delta A, \Delta C$, 使用可控步长插补原理^[2]的方法, 可以加工出满足精度的前刀面刀槽。

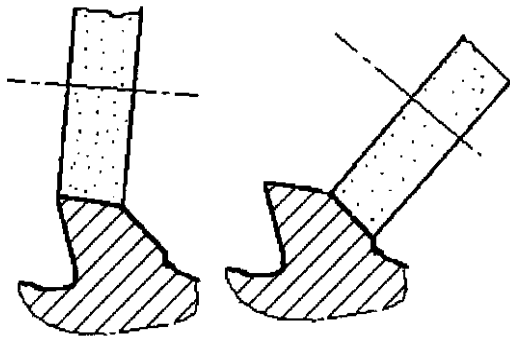


Fig. 5 Process of the back surface

后刀面的磨削加工原理基本上同前刀面的磨削, 以下作简单的论述: 刀具的后刀面的加工是在保证刀具的刀刃曲线和第一后刀面刃带宽前提下

磨削出满足后角要求的后刀面。后刀面的磨削分第一后刀面磨削和第二后刀面的磨削。如图 5。

第一后刀面的磨削加工根据刀具的刀刃曲线求得砂轮与刀具刀刃相交点的坐标, 然后由砂轮轴线与 B 的交角确定第一后角的大小, 进而砂轮的圆心位置, 由活动坐标系与固定坐标系的变换控制机床各轴的插补进给量, 来加工出合理的第一后刀面。

第二后刀面的磨削加工原理与第一后刀面的加工原理基本上是一致的, 只是对于砂轮与刀具的切削刃而言, 刀具要附加一个旋转角。保证第一后刀面宽的条件下, 加工出合理的第二后刀面。

4 结 论

利用微分几何可以求出圆锥球头立铣刀刀刃曲线由切矢量、主法矢量和副法矢量描述的 Frenet 标架, 并确定刀刃曲线是否满足一阶连续的条件。将刀刃曲线离散成一系列化的离散点, 通过将砂轮运动坐标系下的离散点坐标值转化成机床坐标系下的坐标值, 可以实现对数控机床的坐标轴控制, 进而得到刀具前刀面、第一后刀面、第二后刀面的加工工艺方法。由实验工具磨床上作的磨削胶木棒实验效果来看, 锥头、球头部分的前刀面、后刀面基本保持光滑, 槽形控制较好, 基本已达到设计的要求。

参考文献:

- [1] 苏步青, 等. 实用微分几何引论[M]. 北京: 科学出版社, 1998.
- [2] 金建新. 机床 CNC 系统中任意空间曲线的可控步长插补方法[J]. 机械工程学报, 2000(4): 95- 97.

CNC grinding model and technology of an equal spiral angle cone ball-end miller

LAI Chuan-yuan, JIN Jian-xin

(School of Mechanical Science and Engineering,
Huazhong University of Science and Technology, Wuhan 430074, China)

Abstract: The complexity of complex-shaped tools structure makes the tool grinding process difficult. Taking the "equal spiral angle cone ball-end miller" as an example, the continuity of space-curves in the cone and the ball, and the tools structure and machining characteristics are analysed and studied in detail. Using Frenet-frame to locate the grindstone, the interpolation was implemented by using real-coordinate to control machine tool. The result was tested in the grinding experiment.

Key words: cone ball-end mills; equal spiral angle; Frenet-frame; processing technology

作者简介: 来传远(1975-), 男, 湖北石首人, 硕士, 硕士期间从事 CAD/CAM 方向课题研究。

金建新(1957-), 男, 湖北武汉人, 副教授, 主要从事 CAD/CAM/CNC 方面的教学和研究工作。