

可转位成型铣刀微元化几何模型的仿真研究^①刘志峰^② 卓 旭 蔡力钢 赵永胜

(北京工业大学机械工程与应用电子技术学院 北京 100124)

摘 要 针对可转位立铣刀切削刃的非连续性,提出了对每齿每层刀片的切削刃进行微元化的方法,建立了可转位立铣刀的广义几何模型。基于可转位立铣刀的刀体特征,将刀体的三维模型展开成二维结构形式,采用平面坐标描述刀体各部分的几何参数,进而确定每齿每刃的二维微元表达。针对高铁道岔尖轨三个典型型面加工的成型铣刀,分别建立了圆柱以及非圆柱刀体的几何模型,给出了几何参数的计算公式,采用 Matlab 工具得到了切削刃微元的几何参数,并仿真出了道岔尖轨各部位铣刀切削刃角位置等微元相关几何参数。该方法及几何模型的建立为多层可转位成型铣刀切削力预报、仿真以及动态稳定性分析提供了新的手段和理论依据,对于提升高铁道岔尖轨加工质量和加工稳定性具有一定的理论意义。

关键词 可转位刀片,几何模型,成型铣刀,道岔尖轨

0 引言

高铁道岔多采用可转位铣刀进行加工,主要由于可转位立铣刀的刀片采用立装结构、切向安装方式,不需要焊接,结构简单可靠,这样的刀体结构承受切向力的截面大,从而可采用大进给量、大切削深度和较高的机床功率^[1,2]。对铣刀已有大量研究。Tlustý^[3]研究了稳态铣削力和铣刀切入切出过渡过程铣削力的变化;Konig^[4]研究了铣削力系数的计算机识别方法和铣削力仿真;Shin^[5]研究了螺旋立铣刀,建立了基于前刀面摩擦力及法向力的铣削力模型;Devor^[6]研究了铣削力的识别与预测,并将研究结果用于仿形加工和计算机辅助加工领域;Altintas^[7]将螺旋立铣刀的切向、径向和轴向切削力分别表示为变化的切削层面积及刀刃接触长度的函数^[3-7]。从上述这些研究中看出,建立切削力模型,基本上就是建立铣削力与主要切削参数的关系,特别是切削建模与切削厚度之间的关系,在铣削加工过程中,主要表现在切削厚度随刀齿瞬时位置角的变化而变化^[8-11]。铣刀切削刃瞬时角位置和加工位置是铣削加工建模研究的重要参数之一,所以对切削刃瞬时角位置的求解对切削力建模起着至关重要

的作用。目前国内的研究大都针对切削刃连续的螺旋立铣刀或者端铣刀进行几何建模,对于可转位立铣刀的几何建模的研究较少,因此对于不同刀具的几何模型的建立是有重要意义的。Kline 建立了螺旋立铣刀的几何模型,并计算了与刀具旋转角对应的瞬时切削力,准确而动态地描述了切削过程^[12]。Kima 对于可转位立铣刀进行了几何建模^[13],由于可转位立铣刀的切削刃是非连续的,且在轴向投影有重叠,所以不能简单地微元划分求解。

综上所述,针对可转位立铣刀切削刃进行微元几何建模具有重要的研究意义和实用价值,因此,本文针对可转位立铣刀的几何外形,对非连续切削刃进行每齿每层微元化,将三维刀体展开在二维坐标系中,计算出了切削刃微元的几何参数,给出了可转位立铣刀切削刃几何参数的广义计算公式,并应用到加工高铁道岔尖轨的成型铣刀中,对于提升高铁道岔尖轨加工质量和加工稳定性具有一定的理论意义。

1 可转位刀片的几何描述

可转位刀片的形状和安装位置根据实际加工需求而不同。其刀片固定在刀体上,每个刀片由刀片

① 国家科技重大专项(2010ZX04012-011)和北京市科技计划(D101104048710002)资助项目。

② 男,1973年生,博士,副教授;研究方向:数字化制造,CIMS等;联系人,E-mail: lzf@bjut.edu.cn

(收稿日期:2011-10-25)

长度 l 、刀体半径 R 、切削刃轴向上部投影位置 Y_T 、切削刃轴向底部投影位置 Y_B 、角位置 ϕ 、螺旋角 β 来描述。因此,刀具上第 m 个刀齿上第 n 个刀片就可以被表述为

$$U(m, n) = \{l(m, n), R(m, n), Y_T(m, n), Y_B(m, n), \phi(m, n), \beta\} \quad (1)$$

将刀体置入三维坐标系中,可转位立铣刀嵌入刀片的几何参数可显示于图1中。该刀片几何信息根据轴向位置的不同而发生变化,但是每个切削刃的切削现象与斜角切削原理是基本一致的。可将刀体上每个切削刃看成一条直线,由于切削刃的间断性,而且各层可转位刀片的切削刃在轴向的投影是

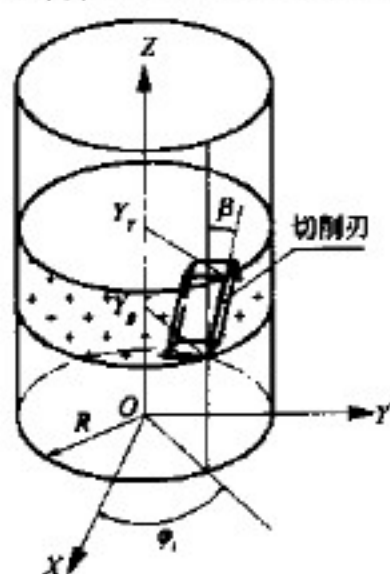


图1 可转位刀片几何描述

有重叠的,所有切削刃的几何模型不能简单地按照螺旋刃立铣刀一样划分微元,但是切削刃微元的几何信息是沿轴向位置的变化而变化的,因此,可转位立铣刀的切削刃的几何模型可以根据轴向坐标的变化进行建模分析。

2 基于微元化的广义几何模型

针对可转位立铣刀切削刃的非连续性,以及各个刀片的几何形态,可转位立铣刀的几何模型可以由各个切削刃微元计算而得。将可转位立铣刀每个刀片进行微元划分,将每个切削刃划分成有限个微元,为了方便计算,一般取相等的微元长度。为计算可转位立铣刀刀体上第 m 个刀齿上第 n 层中第 k 个微元上的切削力,就需要建立刀体轴向各个微元的几何模型,得到各个微元的几何参数。根据可转位立铣刀嵌入刀片的形状、位置、齿数、切削刃角位置以及刀齿的排布来建立几何模型。将柱形刀体侧面展开,将展开的刀体置入平面坐标系中,其中纵坐标是刀体的轴向位置,横坐标是刀体展开的圆周方向,即角位置。纵坐标为长度,横坐标为角度。纵坐标表示切削刃长度,分布刀片的层数,横坐标表示各个切削刃的角位置,以及刀片的齿数。可转位立铣刀展开图如图2所示:

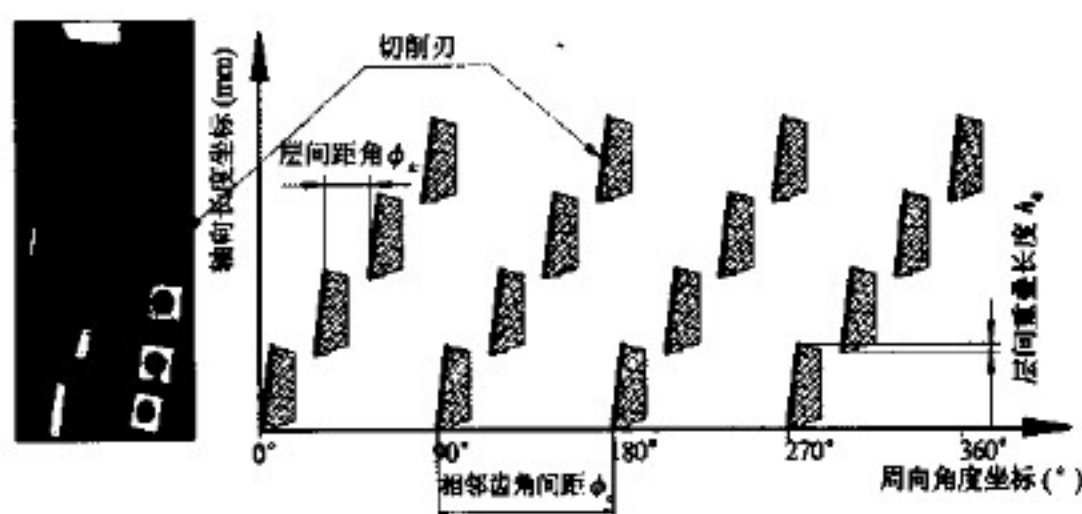


图2 可转位立铣刀刀体展开图

每个刀齿上的微元数是由嵌入刀片的切削刃的轴向位置——切削刃轴向上部投影位置 Y_T 和切削刃轴向底部投影位置 Y_B 所决定的。可转位平底立铣刀嵌入刀片的轴向位置表达如式^[11]

$$Y_B(m, n) = \sum_{i=1}^n l(m, i) \times \cos \beta - \sum_{i=0}^n h_0(m, i) \quad (2)$$

$$Y_T(m, n) = Y_B(m, n) + l(m, n) \times \cos \beta$$

$$(m, n = 0, 1, 2, 3, \dots) \quad (3)$$

所示,其中 $h_0(m, n)$ 表示第 m 个刀齿上第 n 层刀片重叠长度。

将可转位立铣刀的每个切削刃进行微元划分,刀体上第 m 齿第 n 层第 k 个微元在周向展开的坐标系中的角位置由式

$$\phi(m, n, k) = m \times \phi_c + n \times \phi_k + (k \times \Delta\alpha + \Delta\alpha/2) \times (\tan \beta)/R \quad (4)$$

计算可得,其中 $\Delta\alpha$ 表示切削刃微元的大小, ϕ_k 为

相邻切削层间距角, ϕ_c 为相邻齿角间距。

3 尖轨典型加工面成型铣刀几何模型

成型铣刀多采用可转位刀片, 由于高速铁路道岔外形轮廓很复杂, 采用成型刀具加工, 可以简便加工路径, 简化装夹步骤, 提高加工效率和加工质量。根据上述理论方法, 针对道岔尖轨三个典型型面加工的成型铣刀, 分别建立三把成型铣刀的简化几何模型, 提出计算三种成型铣刀几何参数的有效计算公式。计算加工道岔尖轨导向面的成型铣刀刀片切削刃微元几何参数的计算流程图如图 3 所示, 其中 N_i 表示刀片层数, N_f 表示刀片齿数, $K(n)$ 表示相应切削刃划分的微元个数, $a(n)$ 表示第 n 层刀片切削刃长度。

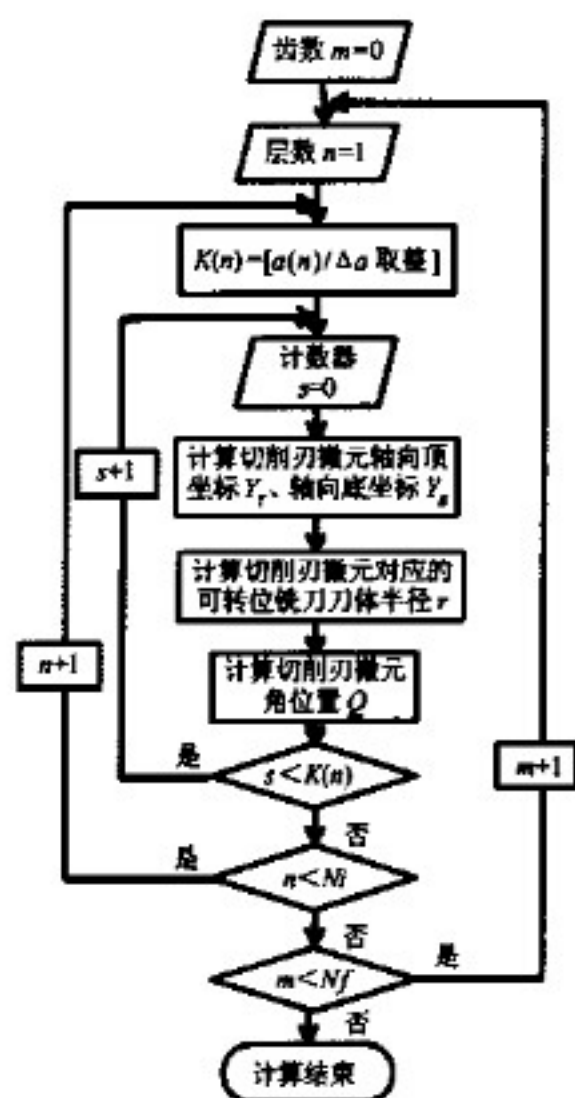


图 3 切削刃微元几何参数计算流程图

3.1 尖轨轨底加工成型铣刀几何模型

铣削加工尖轨轨底的成型铣刀刀体简化成常用的柱体可转位立铣刀, 简化后的成型铣刀加工尖轨轨底的示意图如图 4(a) 所示, 其刀体半径计算简图如图 4(b) 所示。成型铣刀简化成了可转位平底立铣刀。

可转位平底立铣刀的嵌入刀片的排布是规则

的, 轴向相邻每层刀片之间具有相同的轴向重叠长度, 每齿之间具有相同的刀齿间隔角, 每层刀片之间具有相同的刀片间距角, 可转位平底刀片规则排布的轴向位置几何模型可以简化如下:

$$Y_B(m, n, k) = n \times l \times \cos\beta - n \times h_0 + k \times l \times (\cos\beta) / K \quad (5)$$

$$Y_T(m, n, k) = Y_B(m, n, k) + l \times (\cos\beta) / K \quad (6)$$

可转位立铣刀第 m 齿上第 n 层中第 k 个微元的角位置可以通过下式计算得到:

$$\phi(m, n, k) = m \times \phi_c + n \times \phi_{nc} + (k \times \Delta\alpha + \Delta\alpha/2) \times (\tan\beta) / R \quad (k = 0, 1, 2, 3, \dots, K) \quad (7)$$

其中 $\Delta\alpha$ 表示微元轴向长度, K 表示每个嵌入刀片切削刃划分的微元个数。

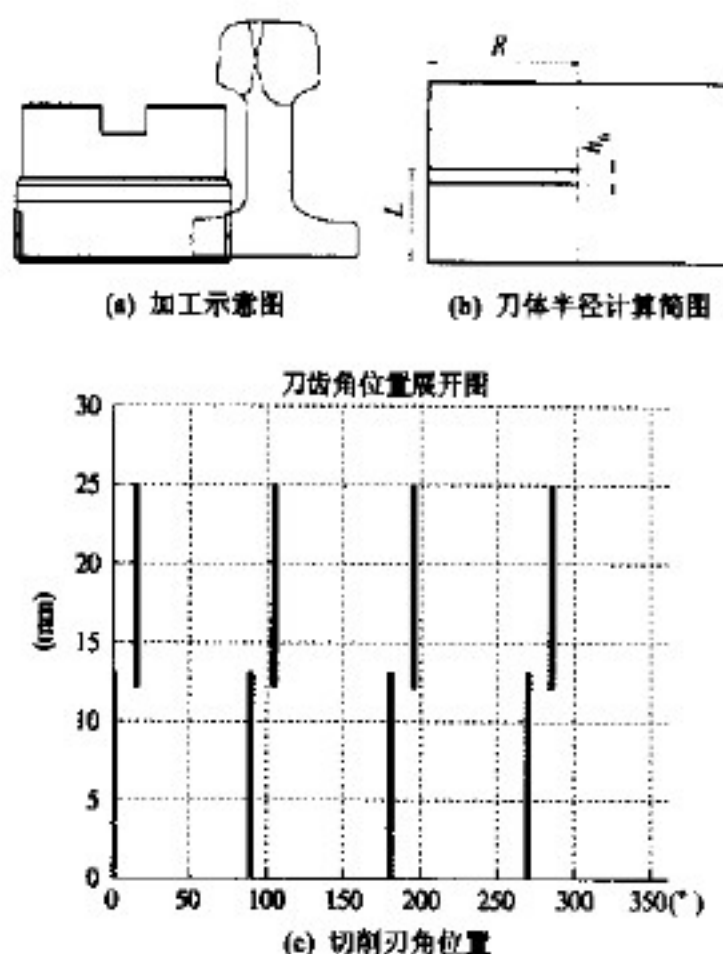


图 4 加工尖轨轨底成型铣刀示意图

根据铣刀刀体结构和刀片几何信息, 将刀体每个切削刃进行微元划分, 对刀具几何体上的切削刃微元进行计算, 采用 Matlab 计算得到相应刀具刀片切削刃的几何参数。通过刀具几何模型, 计算得到刀齿微元的几何参数, 如在 Matlab 窗口中输入 $q(2, 2, 1)$ 可以得到 $q(2, 2, 1) = 15.0335^\circ$, 其表示为第 1 个齿上第 2 层切削刃第 2 个微元的角位置为 15.0335° 。同样可以得到刀体上各个微元在轴向的

坐标位置 Y_r 与 Y_g 。采用 Matlab 仿真得到加工道岔尖轨底边的成型铣刀切削刃微元的几何参数,如图 4(c)所示。图 4(c)展示了切削刃的排列规则、刀齿轴向重叠长度以及切削刃的分布疏密度。

3.2 道岔尖轨非工作面加工成型铣刀几何模型

加工道岔尖轨非工作面的成型铣刀轮廓与加工

尖轨底部的成型铣刀轮廓类似,刀片的排布是规则的,轴向相邻每层刀片之间具有相同的轴向重叠长度,每齿之间具有相同的刀齿间隔角,每层刀片之间具有相同的刀片间距角,成型铣刀加工道岔尖轨非工作边的加工示意图如图 5(a)所示。

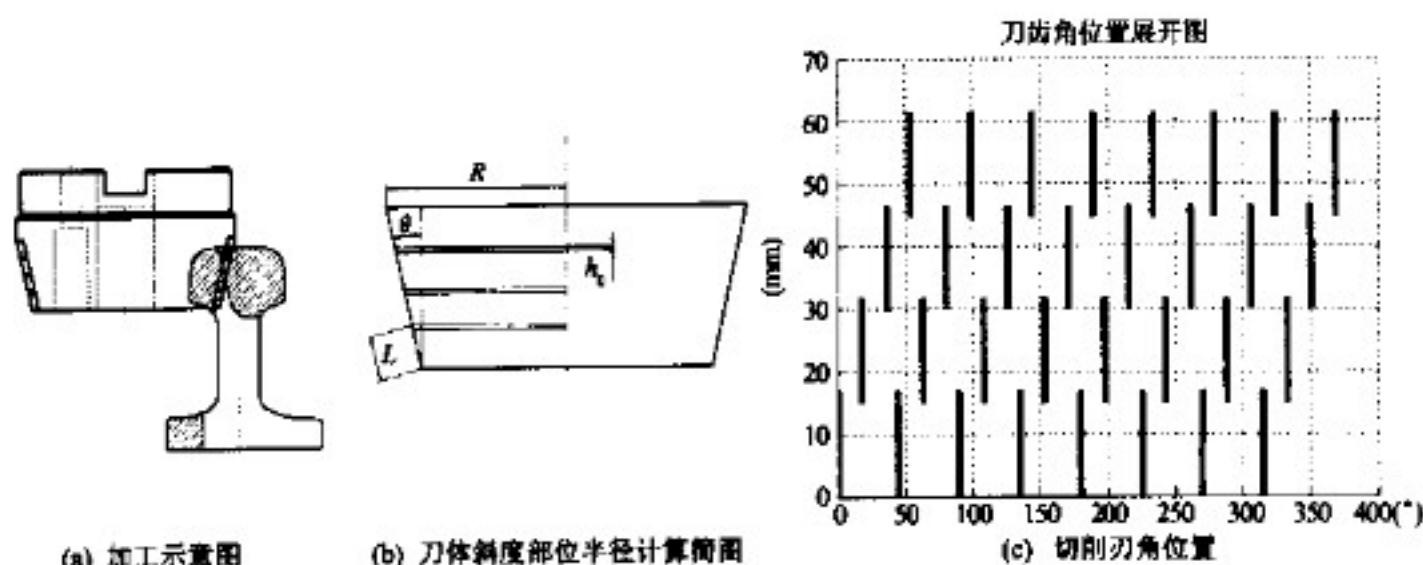


图 5 加工道岔尖轨非工作面成型铣刀示意图

随着轴向位置的不同,刀片规则排布的成型铣刀几何体可以建模。其中刀片切削刃在二维坐标系中的坐标位置表达式如下:

$$Y_g(m, n) = n \times l \times \cos\beta \times \cos\theta - n \times h_0 + k \times l \times \cos\beta \times (\cos\theta)/K \quad (8)$$

$$Y_r(m, n) = Y_g + (k+1) \times l \times \cos\beta \times (\cos\theta)/K \quad (9)$$

由于道岔尖轨的非工作面成 1:4 的斜角,成型铣刀刀体的外圆轮廓成 1:4 的锥度,基于轴向切削刃所对应的刀体半径随着轴向坐标的变化而变化,可以计算得到任意层切削刃上任意微元所对应的刀体半径。计算简图如图 5(b)所示。通过计算得到任意刀齿上任意层任意切削微元所对应的刀体半径和角位置,计算公式如下式所示:

$$R_i = R - (l \times N_i - (N_i - 1) \times h_0) \times \sin\theta + (k \times l/K + l/(2 \times K)) \times \sin\theta \quad (10)$$

$$\phi(m, n, k) = m \times \phi_c + n \times \phi_w + (k \times l/K + l/(2 \times K)) \times (\tan\beta)/R_i \quad (11)$$

采用 Matlab 得到加工道岔尖轨成型铣刀非工作面切削刃微元的几何参数,如图 5(c)所示。图中将可转位铣刀切削刃展开放置在二维坐标系中,复原了刀具每齿每层的刀具切削刃,确定了切削刃分布规则,得到了可转位立铣刀切削刃的位置坐标和

角位置坐标,并在 Matlab 窗口中的 workspace 里可以读出各个微元的几何参数。从仿真结果可以看出,加工高铁道岔尖轨非工作边的切削刃排布紧凑,周向间隔小,从而可采用大进给量、大切削深度的切削参数进行加工,采用仿真计算得到的数据可作为切削力的预报、动态稳定性理论分析的依据。

3.3 道岔尖轨工作面成型铣刀几何模型

道岔尖轨的工作面也叫做导向面,是高铁道岔中至关重要的部位之一。加工道岔尖轨的导向面的成型铣刀加工示意图如图 6(a)所示。加工尖轨工作边的成型铣刀轮廓与加工尖轨非工作边的成型铣刀轮廓类似,不同之处在于尖轨导向面是 1:4 的斜度和带半径的圆弧构成,因此加工道岔尖轨导向面的成型铣刀刀体上部是一个成 1:4 的椎体,下部则是一个带弧度的旋转体。

关于柱体和椎体刀具几何模型的建立,计算方法如本文前面内容所述。针对加工道岔尖轨工作边的成型铣刀,主要给出如何建立刀体弧度部位的几何模型的方法。在成弧度的刀体部位上刀片的排布是规则的,每齿之间具有相同的间隔角,每层刀片之间具有相同的刀片间距角,轴向相邻的每层刀片之间具有相同的轴向重叠长度。刀体弧度部位切削刃对应的刀具直径是根据轴向位置的变化而变化的,每层切削刃微元对应的刀具的直径计算简图如图 6(b)所示。

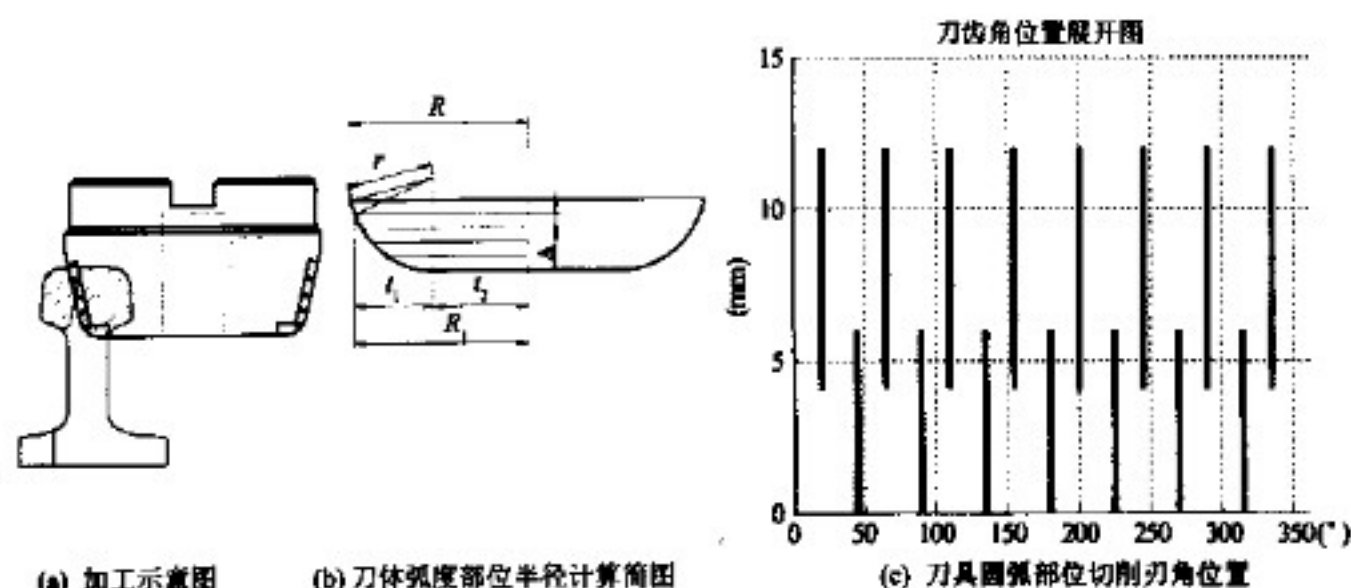


图6 加工道岔尖轨工作边成型铣刀图组

根据刀体弧度部位计算简图所示,得到计算切削微元对应刀体半径和相应微元的角位置的计算公式如下所示:

$$t_1 = \sqrt{r^2 - (r - L + \Delta)^2} \quad (12)$$

$$t_2 = R - \sqrt{r^2 - (r - L)^2} \quad (13)$$

$$R_1 = t_1 + t_2 = \sqrt{r^2 - (r - L + \Delta)^2} + R - \sqrt{r^2 - (r - L)^2} \quad (14)$$

$$\begin{aligned} \phi(m, n, k) = & m \times \phi_c + (n - 1) \times \phi_w \\ & + (s \times a(n) / (k(n) \times 2) \\ & + l / (2 \times K)) \times (\tan \beta) / R_1 \end{aligned} \quad (15)$$

采用 Matlab 工具仿真得到了加工道岔尖轨导向面成型铣刀切削刃微元的几何参数,如图 6(c)所示。图中确定了可转位立铣刀切削刃的轴向位置坐标和周向角位置坐标,在 Matlab 窗口中的 workspace 里可以读出各个微元的相关几何参数。仿真结果展示了切削刃的排列规则,刀齿轴向重叠部分以及切削刃的分布疏密度,通过切削刃的排列规则可以确定刀具的加工型面,加工道岔尖轨工作面的成型铣刀主要特点即刀体底部切削刃带有弧度,通过仿真计算,得到切削刃有弧度部分的相关参数,以便简化几何模型,得到精确的几何参数。

4 结论

本文对可转位立铣刀刀片进行了几何描述,定义了可转位立铣刀的广义几何模型;针对可转位立铣刀,提出了将三维刀体展开在二维坐标系中,对切削刃进行每齿每层微元化的方法,得到了任意齿任意层任意微元的几何参数。该方法可用于建立圆柱和非圆柱几何模型,现已运用这一方法建立了高铁

尖轨三个典型加工型面的可转位成型铣刀几何模型,采用 Matlab 工具得到了相应几何参数。该几何模型的建立为切削力预报、仿真以及动态稳定性分析提供了理论依据,对于提升高铁道岔尖轨加工质量和加工稳定性具有理论研究及实用价值。

参考文献

- [1] 李晓双, 郑险峰, 李华. 加工铁道锰叉、道岔专用可转位铣刀的 CAD/CAM. 工具技术, 1999, 33(3): 16-18
- [2] 吴能章, 邓远超, 尹洋等. 可转位成型铣刀的几何造形. 四川工业学院学报, 2001, 20(1): 16-19
- [3] Tlustý J, Mee Neil P. Dynamics of cutting forces in end milling. *CIRP Annals*, 1975, 24(1): 21-25
- [4] König W, Bouzakis K D. Determination of the values of the technological parameters which are used to describe the time course of cutting force components in milling. *CIRP Annals*, 1985, 34(1): 141-144
- [5] Li H Q, Shin Y C. A comprehensive dynamic end milling simulation model. *Journal of Manufacturing Science and Engineering*, 2006, (128): 86-95
- [6] Sutherland J W, Devor R E. Improved method for cutting force and surface error prediction in flexible end milling systems. *Journal of Engineering for Industry*, 1986, 108(4): 269-279
- [7] Engin S, Altintas Y. Mechanics and dynamics of general milling cutters (Part I: helical end mills). *International Journal of Machine Tools & Manufacture*, 2001, (41): 2195-2212
- [8] 陶海虹, 李振加, 李彬芳等. 单齿铣削铣削力的数学模型. 哈尔滨理工大学学报, 1999, 4(5): 56-60
- [9] 辛志杰. 螺旋立铣刀的动态切削力模型. 工具技术, 2009, 43(5): 58-60
- [10] 周汝忠, 王国金. 端面铣削动态切削力模型. 西南交通大学学报, 1984, (3): 23-34

- [11] 张廷贤, 刘胜利, 屈文然. 铣削力建模与仿真. 天津大学学报, 1991, (3): 73-80
- [12] Kline W, DeVor R, Lindberg J. The prediction of cutting forces in end milling with application to cornering cuts. *International Journal of Machine Tool and Manufacture*, 1982, 22(1): 7-22
- [13] Sung-Joon Kima. Feedrate scheduling for indexable end milling process based on an improved cutting force model. *International Journal of Machine Tools & Manufacture*, 2006, 46(1): 1589 - 1597

Simulation research on micro-element geometry model of an indexable forming milling cutter

Liu Zhifeng, Zhuo Xu, Cai Ligang, Zhao Yongsheng
(College of Mechanical Engineering and Applied Electronics Technology
Beijing University of Technology, Beijing 100124)

Abstract

Based on the discontinuous cutting edges, a generalized geometric model for indexable milling cutters was established and a micro-element method for the indexable inserts of each layer each tooth was proposed. According to the shape features of an indexable end mill cutter, the three-dimensional model of the cutter body was expanded to the two-dimensional structure. The plane coordinates were used to describe the geometric parameters of the various parts of the cutter body, and then the two-dimensional micro-expression for each edge of each tooth was determined. The forming milling cutter for processing the three typical processing surface of turnout and tip-rail was taken as the research object, a cylindrical cutter body geometry model and a non-cylindrical cutter body geometry model were built respectively, the mathematical geometric models were derived, and the formulas for calculating geometrical parameters were given. And then, the geometric parameters of the cutting edge micro-element were obtained and the simulation on micro-element parameters was conducted with Matlab system. This method provided a new means and theoretical basis for multi-layer indexable milling cutters' cutting force prediction, simulation and dynamic stability analysis.

Key words: indexable insert, geometric model, molding cutter, tip-rail turnout