

DOI:10.3969/j.issn.1001-4551.2019.03.011

# 菌形叶根型线铣刀的三维建模及有限元分析研究\*

曾祥录<sup>1</sup>, 韩俊峰<sup>2</sup>, 朱留宪<sup>2</sup>, 周乐安<sup>3</sup>

(1. 四川工程职业技术学院 机电工程系, 四川 德阳 618000; 2. 四川省高温合金切削工艺技术  
工程实验室, 四川 德阳 618000; 3. 德阳杰创科技有限公司, 四川 德阳 618000)

**摘要:**针对菌形叶根型线铣刀设计过程中不能参数化、数字化的问题,利用UG三维建模软件,对某型号菌形叶根型线铣刀进行了数字化三维实体建模,并运用ANSYS软件对设计进行了受力情况的有限元分析。通过建模实现了刀具设计的参数化、数字化;通过有限元刀具受力分析,验证了刀具设计的合理性、可用性。研究表明:利用UG三维建模和ANSYS有限元分析,对菌形叶根型线铣刀进行设计及优化是可行的。

**关键词:**菌形叶根型线铣刀;三维建模;有限元分析

中图分类号:TH122;TG714

文献标志码:A

文章编号:1001-4551(2019)03-0284-05

## Three dimensional modeling and finite element analysis on mushroom-shaped blade root milling cutter

ZENG Xiang-lu<sup>1</sup>, HAN Jun-feng<sup>2</sup>, ZHU Liu-xian<sup>2</sup>, ZHOU Le-an<sup>3</sup>

(1. Department of Mechanical and Electrical Engineering, Sichuan Engineering Technical College, Deyang 618000, China; 2. Sichuan Provincial Engineering Laboratory of Super Alloy Cutting Technology, Deyang 618000, China; 3. Deyang JieChuang Technology Co., Ltd., Deyang 618000, China)

**Abstract:** Aiming that the de-parameterization and de-digitalization in the design process of mushroom-shaped blade root milling cutter, the UG three-dimensional modeling software was used to develop a digital mushroom-shaped blade root profile, and finite element analysis was run on the force by using ANSYS consequently, the parameterization and digitization were achieved. Furthermore, the rationality and usability of tool design were verified by the force analysis of finite element. The results show that applying UG three-dimensional to modeling and conducting finite element analysis through ANSYS help to design and optimize the mushroom-shaped blade root milling cutter.

**Key words:** mushroom-shaped blade root profile milling cutter; 3D modeling; finite element analysis

## 0 引 言

菌形叶根又称为外包式叶根,这种叶根改善了轮缘的受力情况,接触强度较高,被广泛应用于汽轮机叶片的叶根连接结构<sup>[1]</sup>。菌形叶根型线铣刀作为菌形叶根型线槽的最终刀具,其精度直接决定着叶片叶根的加工质量。菌形叶根铣刀型线结构复杂,并且对精

度、可靠性和寿命等方面都有很高的要求。因此,菌形叶根型线铣刀的高效、准确的优化设计,及其有效的验证方法是急需解决的难题。

受专业性及应用场合的限制,目前,对于菌形叶根型线铣刀(专用的成型铣刀)的研究较少,国外仅有几家知名刀具厂家应用专业软件对其进行了一定的研究。国内叶根型线刀具制造商在刀具的设计、仿真及

收稿日期:2018-09-17

基金项目:德阳市重点科技计划资助项目(2017ZZ032)

作者简介:曾祥录(1963-),男,四川德阳人,硕士研究生,高级工程师,主要从事机械加工工艺、机械CAD/CAM技术方面的研究。E-mail: 695999704@qq.com

加工方面都依赖于国外加工设备的自带软件,例如:WALTER公司的Toolstudio刀具磨削软件,ANC公司的ToolRoom刀具磨削软件等。由于国外软件技术保护的原因,导致国内设计完全受限于国外磨削设备的软件,不能提取刀具的模型,更无法进行仿真分析,以及后续的优化改进<sup>[2]</sup>。

本研究针对菌形叶根型线铣刀的参数进行分析,并采用UG三维建模软件建立其三维数字模型,然后导入ANSYS软件进行有限元分析及优化,为后续型线刀具的设计、仿真提供借鉴。

## 1 菌形叶根型线铣刀的三维建模

### 1.1 刀具参数的确定

建立刀具三维模型首先应确定刀具的参数,菌形叶根型线铣刀的参数包括结构参数和几何参数<sup>[3]</sup>。

#### (1) 结构参数。

菌形叶根型线铣刀采用整体机构:刀杆直径根据装夹及与刀头的比例确定,因属于成型铣刀则切削刃部分(长度、刃形、各截面的直径)是由叶根的型线确定;刀齿的数目根据型线的大小一般取3~4齿;容屑槽的形状根据排屑及制造等因素来确定。

某菌形叶根型线筒图如图1所示。

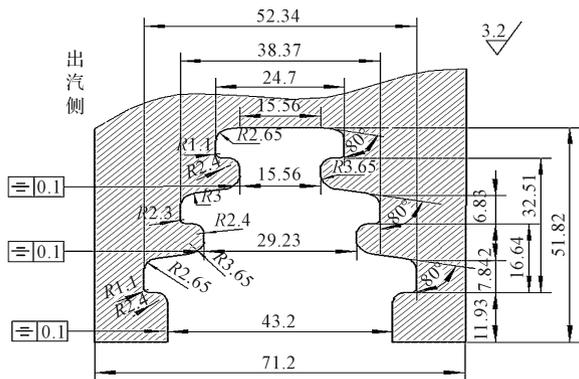


图1 某菌形叶根叶片的型线筒图

#### (2) 几何参数。

菌形叶根的粗加工常用线切割放量切割成形,精加工由菌形叶根成型铣刀铣削完成<sup>[4]</sup>,即菌形叶根成型铣刀的精度决定叶根的精度。菌形叶根成型铣刀的几何参数主要包括前刀面的形状、前角、后刀面的形状、后角和螺旋角。

为了制造、测量以及重磨方便,菌形叶根成型铣刀设计成铲齿铣刀。因其应用于叶根槽的精加工,切削余量及切削振动相对较小、且为成形加工,为保证型线的准确性和完整性,菌形叶根成型铣刀的前刀面做成平面,前角和螺旋角均取 $0^{\circ}$ <sup>[5]</sup>。

铲齿成型铣刀后刀面的设计要满足以下两个要求:

(1) 切削刃上的每个点都具有合适的后角;

(2) 重磨后的铣刀与未重磨前的铣刀两者加工的工件其形状和尺寸是相同。

理论上满足此要求的曲面只有对数螺面,但由于对数螺面制造困难,生产上常采用阿基米德螺面代替<sup>[6]</sup>。菌形叶根成型铣刀后刀面形状设计成阿基米德螺面,并且根据切削实际其后角一般取 $8^{\circ}$ 左右。

### 1.2 刀具的三维建模

在UG软件建模模块的主要操作过程为:

(1) 在软件中选择【文件】|【导入】文件类型选2D类型,导入已知的叶根型线及刀杆尺寸的2D文件(注只需轮廓的一半尺寸即可)。再利用软件的【旋转】命令:选择型线及刀杆的外形线为旋转目标,选择中心线为旋转中心,得到刀具模型的基本体轮廓,如图2所示。

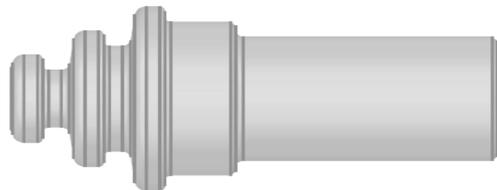


图2 刀具模型基本体的轮廓

(2) 在刀具顶端面建立草图,并在草图中画出容屑槽的径向截面图形(注:容屑槽的槽形主要考虑排屑及磨制加工难易程度),菌形叶根成型铣刀容屑槽设计成三角形,并在底部进行倒圆<sup>[7]</sup>;在刀具轴向剖面建立草图,并在草图中画出容屑槽的轴向的引导线(需保证引导完成后铣刀各处都有合适的前角);再利用软件【扫描】命令:使用径向截面图形为截面线,轴向引导线为引导线,扫描得到容屑槽及前刀面的实体,然后利用【阵列】功能阵列出其余3个(本例刀齿的数目取4)容屑槽实体,然后【布尔-减】命令,从基本体上减去容屑槽实体,得到基本成型的刀具模型,如图3所示。

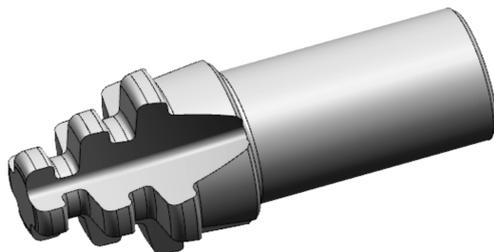


图3 基本成型的刀具模型

(3)后刀面建模。轮槽精铣刀的后刀面是由刃型线沿齿背曲线绕刀具轴线旋转而形成的<sup>[7]</sup>。

阿基米德线如图 4 所示。

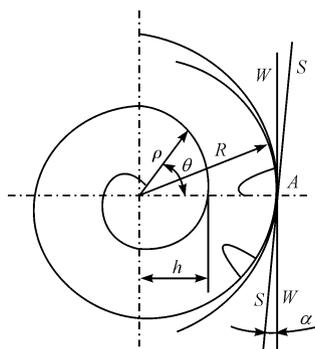


图 4 阿基米德线

根据极坐标方程,有用于轮槽精铣刀刀齿齿顶的阿基米德螺旋线方程<sup>[8]</sup>为:

$$\rho = R - \frac{h}{2\pi}\theta \quad (1)$$

式中: $\rho$ —螺旋线上各点相应的向量半径; $\theta$ —螺旋线上各点相应的极角(弧度); $R$ —铣刀的外径; $h$ —螺距。

螺旋线上 A 点的后角  $\alpha$ ,是由该点做出的切于螺旋线的切线  $s-s$  和切于圆周的切线  $w-w$  之间的夹角。

利用微分几何学的公式如下:

$$\tan\alpha = \frac{h}{2\pi\rho} \quad (2)$$

由式(2)可看出:后角  $\alpha$  与螺旋线上各点向量半径  $\rho$ 、极角  $\theta$  以及螺距  $h$  有密切关系。

联立式(1,2),可推导出齿背曲线的数学公式:

$$\rho = R - \tan\alpha * \rho\theta \quad (3)$$

当后角  $\alpha$  ( $\alpha = 8^\circ$ ) 已知,刀具刃型线已知(即等效半径  $\rho$  可得到),根据公式(3),在 UG 软件中应用【规律曲线】命令,建立满足要求的阿基米德齿背曲线,再应用【扫掠】命令建立曲面切除已建的基本成型刀具体,得到最终的刀具模型,如图 5 所示。

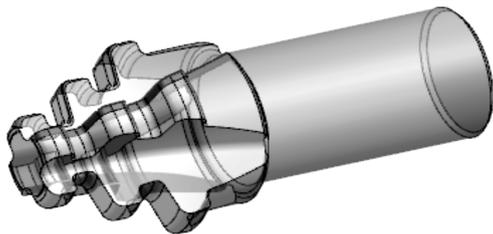


图 5 最终的刀具模型

## 2 菌形叶根型线铣刀的有限元分析

本研究将上述建立的刀具模型导入到 ANSYS 软

件中,进行有限元静态受力分析。

### 2.1 前处理分析

(1)单元类型的确定。

ANSYS 拥有丰富的单元类型,分析时根据单元的自由度、数学描述和积分方法来选择。依据菌形叶根型线铣刀实际选择四面体单元类型,可减少单元数量,保证计算精度。

(2)材料属性的确定。

菌形叶根型线铣刀的材料选用钨钢钼系高碳含钴超硬型高速钢 M42 (W42Mo9Cr4VCo8)<sup>[9]</sup>,材料的性能指标如表 1 所示。

表 1 菌形叶根型线铣刀的材料属性

性能指标	参数
密度/( $\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$ )	$8.67 * 10^3$
硬度/HRA	60
抗弯硬度/MPa	2.65 - 3.72
弹性模量/GPa	2.02e11
泊松比( $\mu$ )	0.29

(3)网格的划分。

ANSYS 软件提供了多种单元划分和各种网格划分的方法。结合实际,采用自由网格划分方式,对菌形叶根型线铣刀进行网格划分。

### 2.2 静态分析

(1)边界条件。

本研究根据菌形叶根成型铣刀装夹的实际情况来约束它的自由度:工作时刀具固定装夹在机床主轴的刀柄上,不能出现 3 个方向的移动,即轴向自由度为零;旋转自由度: $M_x$ 、 $M_r$  均为零, $M_z$  是刀具的旋转方向,由于转速一定,故也可以认为  $M_z$  是受约束的,可认为菌形叶根成型铣刀工作时的自由度为零<sup>[10]</sup>。

(2)加载形式。

菌形叶根成型铣刀是用来精铣叶片叶根的菌形槽的,工作时任意时刻有一对对称的两个切削刃在进行切削。于是切削力被平均分配在两对称刀刃上,精加工余量均匀,故以均布载荷的形式将平均铣削力  $F_x$ 、 $F_y$ 、 $F_z$  加在菌形叶根成型铣刀的切削刃上。

(3)结果分析。

按照前面的条件,在菌形叶根成型铣刀的有限元模型上,施加载荷和约束条件进行求解,得到静态分析的结果。

其应力图如图 6 所示。

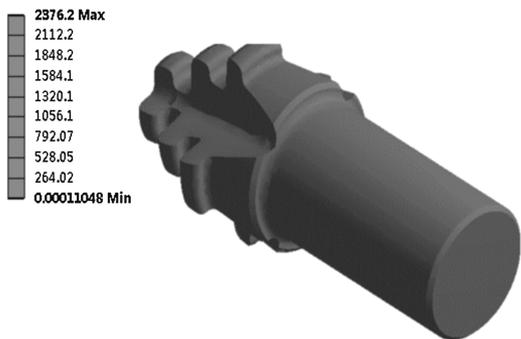


图6 菌形叶根型线铣刀静态分析应力图

静态分析应力对比图如图8所示。



图8 静态分析应力对比图

其变形图如图7所示。

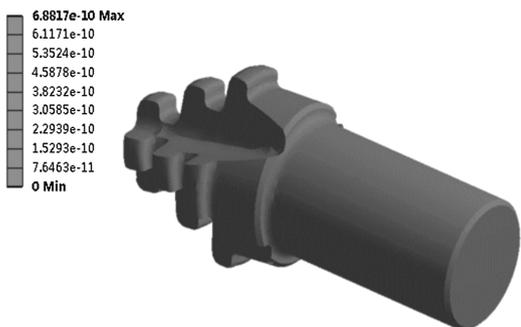


图7 菌形叶根型线铣刀静态分析变形图

静态分析变形对比图如图9所示。

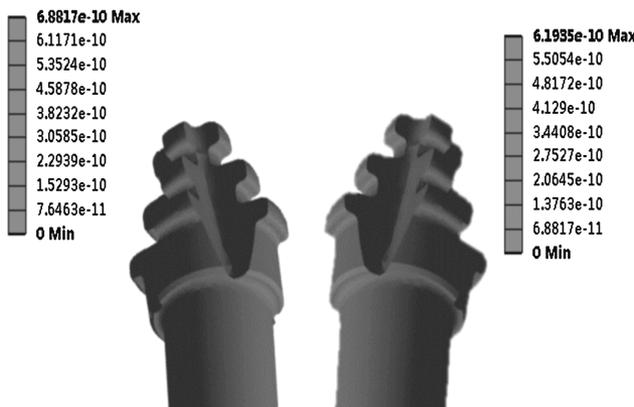


图9 静态分析变形对比图

## 2.3 结果分析及优化设计

### 2.3.1 结果分析

(1) 菌形叶根型线铣刀切削时,最大应力值2 376.2 MPa发生在刀刃的突起部位附近,而且在刀具最小直径处应力集中。当然,由于菌形叶根型线铣刀用于精加工,加工余量小,切削力小,最大应力值远小于M42 刀具材料的强度极限。但因铣削加工属于断续加工,随着刀具的切入切出,周而复始,刀具应力集中点易过早发生疲劳破坏。

(2) 在切削力的作用下,刀具的变形量从刀头向刀柄逐渐减小,变形量从刀刃向刀心处也呈现逐渐减小趋势。刀具最大变形量 $6.8817 \times 10^{-10}$  发生在刀头部位的刀刃上。显然这是由于刀头和刀刃处的刚性相对较差造成的,要提高刀具的刚性,重点在于提高刀头部位的刚性。

### 2.3.2 优化设计

根据以上分析,可在应力集中点处适当减小菌形叶根型线铣刀后角的角度值( $8^\circ$ ),以提高刀具结构强度和刚性(考虑到后角减小,后刀面与加工表面摩擦会加剧,刀具耐用度会降低,一般M42 材料的菌形叶根型线铣刀后角不小于 $6^\circ$ )。

调整后,二次建立刀具模型,导入ANSYS 软件后,进行对比分析。

根据对比分析图可以看出,调整后的刀具的受力和变形有了明显改善。

## 3 结束语

针对菌形叶根型线铣刀设计时数字化建模,以及优化时设计分析存在的问题,本文分析了菌形叶根成型铣刀的相关设计参数,根据分析参数利用UG 软件,建立了菌形叶根成型铣刀的三维模型,并将模型导入ANSYS 有限元分析软件,对菌形叶根成型铣刀进行受力模拟分析,然后依据分析结果对刀具进行了优化设计。

经模拟分析验证,此种刀具数字化建模思路、刀具优化分析方法是可行的。本文提出的这种菌形叶根成型铣刀计算机CAD\CAE 技术简便、快捷,可以缩短菌形叶根型线铣刀设计开发时间,减少试验次数,降低设计开发成本,可对后续菌形叶根成型铣刀的设计优化提供借鉴。

参考文献 (References) :

[1] 李伍亮. 汽轮机动叶片叶根强度计算原理及程序编制 [J]. 机械工程师, 2011(06) :80-81.

[2] 蓝 华, 蒋道顺. 基于 SolidWorks 球头立铣刀的三维建模技术 [J]. 机械工程师, 2016(11) :210-211.

[3] 李国超, 孙 杰, 剑 峰, 等. 整体式立铣刀三维精确建模与软件实现 [J]. 计算机辅助设计与图形学学报, 2014(3) :411-417.

[4] 曾祥录, 周 奎, 李登万. 汽轮机叶片菌型叶根数控加工关键技术研究 [J]. 制造技术与机床, 2010(5) :87-89.

[5] 李 芸. 高效铣削刀具的研究与生产 [J]. 航空制造技术,

2006(7) :51-53.

[6] 李儒苟. 刀具设计原理与计算 [M]. 南京:江苏科学技术出版社, 1985.

[7] 陈 泳. PRO/E 在非标螺旋槽刀具设计中的应用 [J]. 工具技术, 2007(3) :53-54.

[8] 陈惠贤, 楚 功, 陈 明, 等. 枞树型轮槽精铣刀后刀面几何造型的研究 [J]. 工具技术, 2013(6) :3-6.

[9] 杨辉军, 陈惠贤. 基于 Deform 的枞树型轮槽铣刀加工仿真研究 [J]. 工具技术, 2014(1) :28-31.

[10] 王 薇. 基于 ANSYS 球头铣刀建模与静力、模态分析 [J]. 装备制造技术, 2014(1) :8-9.

[编辑:李 辉]

本文引用格式:

曾祥录, 韩俊峰, 朱留宪, 等. 菌形叶根型线铣刀的三维建模及有限元分析研究 [J]. 机电工程, 2019, 36(3) :284 - 288.

ZENG Xiang-lu, HAN Jun-feng, ZHU Liu-xian, et al. Three dimensional modeling and finite element analysis on mushroom-shaped blade root milling cutter [J]. Journal of Mechanical & Electrical Engineering, 2019, 36(3) :284 - 288.

《机电工程》杂志: <http://www.meem.com.cn>

(上接第 270 页)

5 结束语

本研究对输送升降机的滚珠丝杠进行了受力分析, 得出了滚珠丝杠在输送升降机不同工作状态时的受力情况, 以及滚珠丝杠产生径向载荷的原因, 升降输送机质点系合外力恒不等于零, 因此在升降输送机工作过程中作用在滚珠丝杠径向方向的动载荷不为零; 在升降输送机输送机构启动和制动过程中产生加速度突变, 滚珠丝杠受径向载荷大小与输送过程的加速度大小有很大的线性关系, 但滚珠丝杠受冲击力最大发生在输送机启动瞬间; 提出了减小滚珠丝杠受到径向载荷的两种方法, 在改进方案中增加导向杆和液压缸, 减少了滚珠丝杠受到的径向冲击, 对滚珠丝杠起到了保护作用。

在下一阶段, 本研究将考虑大节距输送链在输送过程中沿输送方向上的速度波动较大, 需要研究输送链多边形效应对输送升降机工作的影响, 以便更精确地分析滚珠丝杠的受力规律。

参考文献 (References) :

[1] 张 钺. 国内外带式输送机的应用概况 [J]. 矿山机械, 2001(5) :55-60.

[2] 徐 进. 丝杆升降机构传动的可靠性设计研究 [J]. 煤矿

机械, 2003(10) :15-18.

[3] 陈钦鸿, 孙东明, 谢兴平. 升降式输送机启动及制动阶段动态特性分析 [J]. 起重运输机械, 2014(8) :82-85.

[4] 陈钦鸿, 孙东明, 宿 展, 等. 基于有限元法的横向载荷条件下丝杠升降机静强度分析 [J]. 新技术新工艺, 2014(8) :94-97.

[5] HARRISON A. Simulation of conveyor dynamics [J]. **Bulk Solids Handling**, 1996, 16(1) :33-36.

[6] SCHULZ G. Analysis of belt dynamics in horizontal curves of long belt conveyors [J]. **Bulk Solids Handling**, 1995, 15(1) :25-30.

[7] LODEWIJKS G. Non-linear dynamics of belt conveyor systems [J]. **Bulk Solids Handling**, 1997, 17(1) :57-67.

[8] 焦宏章, 杨兆建, 王淑平. 刮板输送机链轮传动系统接触动力学仿真分析 [J]. 煤炭学报, 2012, 37(a2) :494-498.

[9] 何柏岩, 孙阳辉, 聂 锐, 等. 矿用刮板输送机圆环链传动系统动力学行为研究 [J]. 机械工程学报, 2012, 48(17) :50-56.

[10] 陈钦鸿. 升降式输送机的研制与应用研究 [D]. 昆明:昆明理工大学机电工程学院, 2015.

[11] 哈尔滨工业大学理论力学研究室. 理论力学 [M]. 7 版. 北京:高等教育出版社, 2009.

[12] 郭卫东. 虚拟样机技术 ADAMS 应用实例教程 [M]. 北京:北京航空航天大学出版社, 2005.

[编辑:李 辉]