

# 硬质合金刮削滚刀刀刃强度的有限元计算

马建旭 祝佩兴\* 吴清文 王贺\* 刘晓春\*\*

(中国科学院长春光学精密机械研究所, 长春130022)

(\* 吉林工业大学机械工程系, 长春130025)

(\*\* 大连旅顺汽车配件厂, 大连116041)

**摘要** 借助有限元方法对硬质合金刮削滚刀刀刃的应力、应变分布值进行了计算, 并以此为依据来判别其抗崩刃的原因。定量地分析出硬质合金凸曲面刮削滚刀在刮削硬齿面齿轮时, 造成的机械应力小于平前刀面滚刀切削时侧刃的机械应力, 表明该种新型滚刀的设计具有优越性, 为其应用和推广提供了理论依据。

**关键词:** 滚刀刀刃强度; 有限元; 硬质合金刮削滚刀

## 1 引言

近年来, 随着科技的发展, 硬齿面齿轮获得越来越广泛的应用。但由于齿轮经过淬硬等热处理工艺后, 其精度将普遍降低, 因而也就产生了硬齿面齿轮精加工方法研究的问题。以大负前角为主要结构特色的硬质合金刮削滚刀作为高效加工硬齿面齿轮的刀具, 在一定程度上替代了传统磨齿并已得到应用和推广, 并从工艺上保证了淬硬齿轮广泛应用的可能性, 尤其适用于中小批量生产规模的机械制造厂。

在刮削齿轮的过程中, 刮削滚刀刀齿的崩刃, 主要是由于切屑形成过程中的过大机械应力引起的。而凸曲面硬质合金刮削滚刀作为一种新构型的硬质合金刮削滚刀, 以其特有的凸曲前刀面替代传统的平前刀面, 提高了硬质合金刮削滚刀的重磨次数和抗崩刃性能。本文以该复杂工序的运动学和刮削滚刀几何形状为基础采用有限元方法分析比较两种滚刀在加工状况下的应力和应变分布状况, 试图定量得出凸曲面硬质合金刮削滚刀比平前刀面硬质合金刮削滚刀在抗崩刃、提高寿命方面优越的结论。

## 2 刮削滚刀刀体刀齿的有限元模型建立

建立有限元模型, 就是把工程实际的力学问题简化成一种能够用有限元求解的数学模型。模型化的基本原则是, 必须确保这一数学模型能够模拟工程实际的力学状态, 并尽可能减小模拟误差。实现结构相似、载荷相似, 边界条件相似、材料属性相似。对于我们研究的刮削滚刀, 主

要从以下四个方面考虑:

(1)本文需要计算的是齿轮滚刀侧刃的应力及应变情况,因而采用三维实体单元模拟。

(2)在计算中,每个刀齿在不同的瞬时时刻受到冲击力的作用,由于作用时间短,集中应力大,因此侧刃上受到冲击载荷的部分应当在划分单元节点时加密。

因每个刀齿刮削工件时刮下切屑宽度范围在1mm左右,说明相应该刀齿侧刃刮削区长度也应在1mm左右,因而在计算中取侧刃刮削长度为1mm,侧刃上划分节点间距为0.1mm。

(3)支承在力学计算中反映为边界条件,是求解的重要基础。

(4)计算的主要目的是对比凸、平前刀面滚刀的应力和应变的情况,因此计算的前提应当是两种滚刀的限元模型是一致的。

综合以上情况,将两种构形不同的滚刀建模如下:

#### ①单元划分

采用六面体单元,从齿顶到齿根方向沿侧刃划分间距0.1mm的节点,由于加载力的作用部位主要是集中在刀齿的上部,因此齿根附近节点间距加长。两种滚刀侧刃上的节点间隔是一致的。

除前刀面上节点划分所带来的实体单元有所不同外,刀齿上其余节点划分均相同。如图1所示是 $z-y$ 平面投影出整个滚刀的十四分之一的有限元网格节点的划分情况。图中刀齿的上部进行了细分,下部网格划分较稀疏,硬质合金刀片部分细分了前后相同的两部分。并沿对称两侧刃的中心面划分左、右对称部分。

根据滚刀刮削齿轮实验可知一排刀齿上多数情况下有并联两个刀齿同时受冲击载荷,因此选择两个刀齿作为计算分析用刀齿(如图2)。

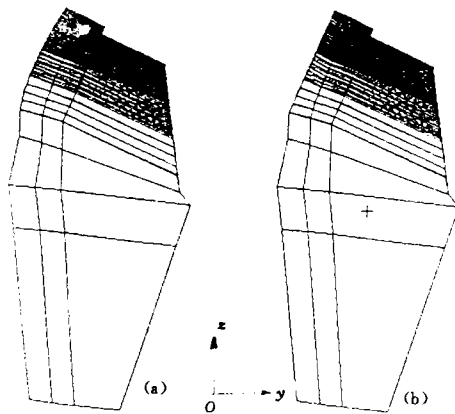


图1 刮削滚刀 $Z-Y$ 平面有限元网格节点划分  
(a)平刮削滚刀; (b)凸刮削滚刀

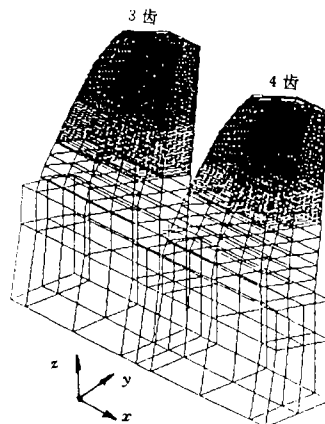


图2 刀齿有限元网格划分侧视图

#### ②约束处理

该计算的主要目的是定量计算凸、平前刀面两种滚刀应力和应变和比较刀刃的强度,因而约束应当是一样的。取滚刀 $1/14$ 部分作为有限元计算的模型,一共划分1054个单元,2126个节点。

考虑到硬质合金刀片是焊接到42CrMo合金钢刀体上的,二者是相对静止的,在受到冲击载荷的情况下,可以认为刀齿上的各个单元都产生微弹性变形,因此刀齿上不加约束。只将刀

齿以下部位加以约束,除允许绕 x 轴(刀具回转轴)转动外,其余方向自由度都约束住。

### 3 刮削滚刀刀齿的加载

刀齿的加载就是确定侧刃上加载力的大小和位置,这也是前处理的一个重要环节。刀齿侧刃上受到的力是冲击力,作用时间短,瞬间完成。因此载荷的分布应按冲击力分布,如图3a示。由于冲击力作用时间短,为便于计算将载荷近似看成等腰三角形分布(如图3b)。

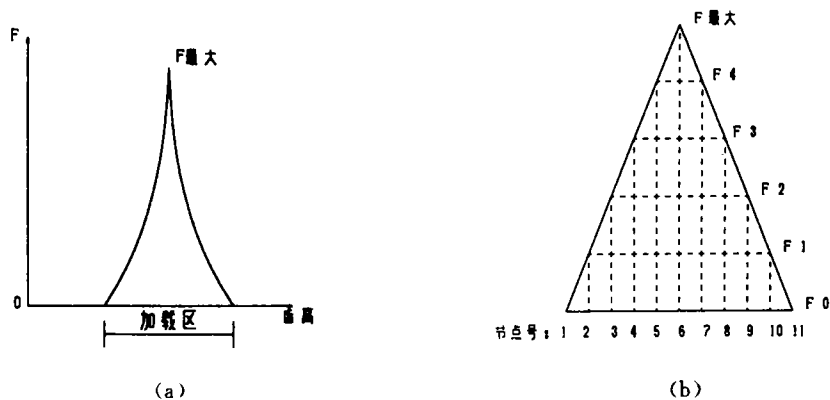


图3 刀齿加载区划分

因刮削下的金属切屑宽度在1mm左右,所以将加载区的长度定在1mm,每个节点的间距是0.1mm,正好将侧刃加载区的长度10等分(如图3b)。图中正中节点6上加载为最大值,与侧刃上该部位受到的冲击载荷值相等。其余点受力如下:

$$F_4 = 4/5 F_{max}; \quad F_3 = 3/5 F_{max} \quad F_2 = 3/5 F_{max};$$

$$F_2 = 2/5 F_{max} \quad F_1 = 2/5 F_{max}; \quad F_0 = 0$$

本次计算共进行了 Load=100,200,300,400四种工况的计算(表1),加载区分别是图2中3

表1 刮削滚刀刀齿加载表

工况	坐标及力值 (N)	加 载 区			
		1	2	3	4
工 况 一	$p(x,y,z)$	44.59, -2.72, 65.63	50.84, -2.72, 65.63		
	$F_{max}$ $(x,y,z)$	-331.1, 615.8, -618.2	331.1, 615.8, -618.2		
工 况 二	$p(x,y,z)$	39.12, -0.96, 68.60	44.86, -3.27, 64.52	50.37, -3.67, 63.66	55.85, -0.36, 69.48
	$F_{max}$ $(x,y,z)$	-69.25, 270.0, -263.17	-69.25, 270.0, -263.17	69.25, 270.0, -263.17	-69.25, 270.0, -263.175
工 况 三	$p(x,y,z)$	39.70, -0.24, 69.65	45.22, -3.96, 62.97	50.54, -3.35, 64.35	56.26, -0.08, 68.72
	$F_{max}$ $(x,y,z)$	231.0, 337.8 -438.62	-231.0, 337.8, -438.62	231.0, 337.8, -438.62	-231.0, 337.8, -438.625

工	$\rho(x, y, z)$		37.68, -3.89, 63.14	56.78, -1.74, 67.37	57.22, -1.74, 67.36
况	$F_{\max}$		173.12, 641.84,	-173.12, 641.84,	173.12, 641.84,
四	$(x, y, z)$		-592.14	-592.14	-592.14

齿的左、右侧和4齿的左、右侧。载荷的值是根据资料<sup>[3]</sup>中测得刮削力值乘以动载荷系数  $K=1.5$  得到  $F_{\max}$ 。载荷  $x, y, z$  三个方向与有限元模型的整体坐标系方向相同。载荷的分布是依照实验观测结果确定的,选取的部位是侧刃磨损较严重的位置。

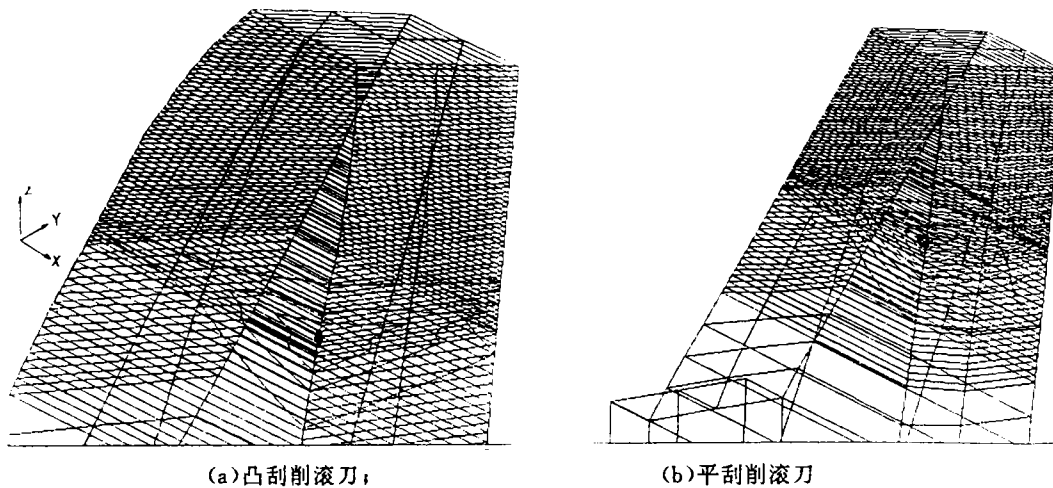


图4 b,等效力等值线图

## 4 计算结果与讨论

通过有限元计算,分析四种工况的数据表明,数据结果基本一致,这里仅就第一种工况的数据进行分析。

### 4.1 应力分析

根据材料力学的有关理论,微单元体的应力状态可以用三向主应力来描述。本文计算得出了各单元体的三向主应力。下面给出了两种滚刀刀齿右侧刃加载区应力最大值和相差百分率,负号表示为压应力。

应力最大值:

$$\sigma_1 = -1130(\text{N/mm}^2) (\text{凸刮削滚刀})$$

$$\sigma'_1 = -1380(\text{N/mm}^2) (\text{平刮削滚刀})$$

$$\sigma_2 = -3310(\text{N/mm}^2)$$

$$\sigma'_2 = -4620(\text{N/mm}^2)$$

$$\sigma_3 = -1560(\text{N/mm}^2)$$

$$\sigma'_3 = -2370(\text{N/mm}^2)$$

比率:

$$\gamma_1 = (\sigma'_1 - \sigma_1) / \sigma'_1 = 18.1\%$$

$$\gamma_2 = (\sigma'_2 - \sigma_2) / \sigma'_2 = 28.4\%$$

$$\gamma_3 = (\sigma'_3 - \sigma_3) / \sigma'_3 = 34.2\%$$

根据第四强度理论给出的综合应力指标等效应力  $\sigma_4$ ,得到:

$$\sigma_4 = -22110(\text{N/mm}^2) (\text{凸刮削滚刀})$$

$$\sigma'_4 = -2880(\text{N/mm}^2) (\text{平刮削滚刀})$$

比率:

$$\gamma_4 = (\sigma'_4 - \sigma_4) / \sigma'_4 = 26.8\%$$

图4a, b 分别是凸刮削滚刀和平刮削滚刀等效应力  $\sigma_4$  等值线侧视图, 图中右侧刃。标记的节点表明在该处  $\sigma_4$  最大。

由上可知两种滚刀在相同条件下, 相对应节点所在的单元微体上都存在压应力, 并且平刮削滚刀侧刃上因载荷而引起的压应力大于凸刮削滚刀相应位置的压应力。

#### 4.2 应变分析

单元体的应变可以用单元节点的位移量描述, 在整体坐标系中, 节点的位移方向与  $x, y, z$  三个坐标系方向相同, 因此存在  $x, y, z$  三个方向的应变。

图5是第三齿位移等值线侧后视图。在图上用0标记打出的部位是压应力带来的向单元体内部沿  $x$  方向的最大节点位移量  $DX$ 。

$$DX = 0.00438(\text{mm}) \quad (\text{凸刮削滚刀})$$

$$DX' = 0.00503(\text{mm}) \quad (\text{平刮削滚刀})$$

$$DX' > DX,$$

比率:

$$\beta_x = (DX' - DX) / DX' = 12.9\%$$

差值:

$$Tx = DX' - DX = 0.00065(\text{mm})$$

说明平刮削滚刀节点沿  $x$  方向位移大于凸刮削滚刀相应节点位移, 但二者相差不多。

同理可得到两种刮削滚刀在  $y, z$  向节点位移等值线图 and 给出结果。

节点位移最大值:

$$DY = 0.0171(\text{mm}), DY' = 0.0158(\text{mm}); \quad DY > DY'$$

$$DZ = 0.00720(\text{mm}), DZ' = 0.00763(\text{mm}) \quad DZ' > DZ$$

比率

$$\beta_y = (DY - DY') / DY = 7.5\%; \quad \beta_z = (DZ' - DZ) / DZ' = 5.7\%$$

表明在  $y$  向平前刀面刮削滚刀最大位移小于凸前刀面刮削滚刀最大位移量, 但二者比较接近。在  $z$  向平刮削滚刀刀齿上的节点位移稍微大于凸刮削滚刀。

综上所述两种刮削滚刀在相同部位, 相同载荷及相同约束条件下, 在  $x, y, z$  三个方向相应刀齿节点位移差异很不明显, 但都表现为  $y$  向上的位移量要比  $x, z$  向增大的多。

## 5 结 论

通过对刮削滚刀刀刃强度有限元计算结果进行的应力和位移分析, 可得出以下结论:

(1) 应力分析结果:

在刮削滚刀加载区各个节点所在单元体上, 都存在主压应力, 即在侧刃磨损区的刀齿表面

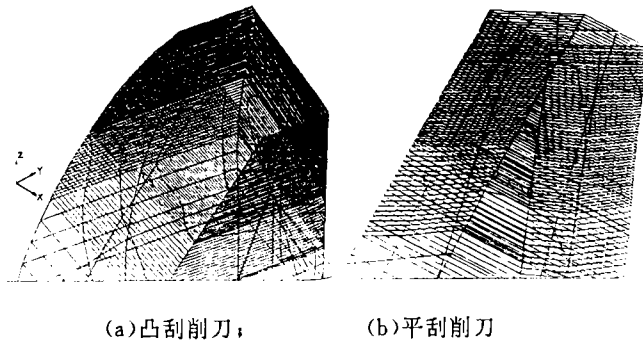


图5  $x$  向位移等值线

附近确实存在由于受到冲击载荷而产生的内应力。定量结果表明平前刀面滚刀在磨损区刀齿表面的内应力大于凸曲前刀面刮削滚刀。这表明凸曲前刀面提高了刮削滚刀的抗崩刃性,体现了设计的优越性。

(2)位移分析结果:

定量分析结果表明这两种滚刀上的磨损区里,各节点沿  $x, y, z$  三个方向位移变化趋势基本一致。但平刮削滚刀刀齿侧刃在磨损区内的各节点沿  $x, z$  向产生的弯曲变形比凸刮削滚刀刀刃上相应点大,在  $y$  方向上情况正好相反。因  $y$  向位移比  $x, z$  向位移大得多,刀具侧刃上各点产生的微变形的趋势主要取决于  $y$  向。因而凸刮削滚刀侧刃上的抗弯强度及韧性较平刮削滚刀的相应有所降低。

在精加工过程中,虽然滚刀刀片材料的抗弯强度有所下降,但由于抗崩刃强度有很大提高,因而整体刀具的耐用性增强。综合应力和位移分析,可以得出凸刮削滚刀的刀具寿命比平刮削滚刀要高。

### 参 考 文 献

- [1] 金玉璋等,凸曲前刀面硬质合金刮削滚刀构形方法与滚切机理的研究. 机械工程学报,1993,29(2):1-6
- [2] 许焕然等,工程中有限元方法. 长春:吉林工业大学编印,1985
- [3] 祝佩兴,新构型法硬质合金刮削滚刀刀具CAD和切削力的研究. 吉林工大硕士论文,1991. 3

## Finite-Element Analysis of the Mechanical Stress of Skiving Carbide Hob

Ma Jianxu, Zhu Peixing\*, Wu Qingwen, Wang He\* and Liu Xiaochun\*\*

(Changchun Institute of Optics and Fine Mechanics,

Chinese Academy of Sciences, Changchun 130022)

(\* Department of Mechanical Engineering, Jilin University of  
Technology, Changchun 130025)

(\*\* Lushun Automobile Components Factory in Dalian, Dalian 116041)

### Abstract

A new way to understand the mechanical characteristics of skiving carbide hob by using a finite-element analysis is presented. First the distribution of the stress and the stain is calculated by a finite-element method (FEM) code, and the reasons against the hob broken depending on this way are told. The conclusion is obtained by quantitative analysis that the mechanical stress of the latest skiving carbide hob is less than the one of the common skiving carbide hob when skiving the gears at last. It expresses the design of the latest skiving carbide hob is superior. The way provides scientific basis for using and popularizing the latest skiving carbide hob.

**Key words:** Mechanical stress, Finite-element, Skiving carbide hob