

复杂槽型铣刀片三维温度场分析 及其模糊综合评价*

谭光宇 刘广军 李振加 刘美娟 李广慧
(哈尔滨理工大学机械动力学院 哈尔滨 150080)

融亦鸣

(美国伍士德理工学院)

摘要: 建立了三维复杂槽型铣刀片的参数化模型, 提出并建立了刀具表面受热密度函数, 根据受热密度函数确定了边界条件, 对铣刀片的温度场进行了有限元分析; 运用模糊数学理论对铣刀片温度场进行了模糊综合评判, 以确定其优劣, 为铣刀片三维复杂槽型重构提供依据。

关键词: 三维复杂槽型铣刀片 受热密度函数 三维温度场 模糊综合评判

中图分类号: TG714

0 前言

冲击破损和粘接破损是铣刀片失效的主要形式, 研究表明, 切削力和切削热是产生这两种破损的根本原因, 切削过程中由切削力和切削热产生的恶劣的应力场和温度场直接导致刀具失效^[1,2]。而三维复杂槽型可转位铣刀片具有优于平前刀面铣刀片的切削性能, 具有逐渐代替平前刀面铣刀片的趋势。但目前三维复杂槽型铣刀片的种类较少, 并且其槽型也多由经验定型, 缺乏理论依据。为了得到切削性能更优良的槽型, 从而获得较好的应力场和温度场, 进行了三维复杂槽型铣刀片的温度场有限元分析和模糊综合评判, 以确定其优劣, 为基于温度场优劣判据驱动的铣刀片三维复杂槽型重构提供理论依据。

1 基于 ANSYS 的铣刀片参数化建模

基于三维复杂槽型铣刀片和 ANSYS 软件的特点, 采用语言描述法建立铣刀片的参数化模型, 即使用造型语言来定义带有参数的体素, 再用这些体素来描述几何图形, 或者先绘制体素, 系统自动生成几何体的描述语言, 再修改描述语言中的某些参数, 以生成新的体素。这里使用 ANSYS 的内部开发语言 APDL(ANSYS parametric design language)。APDL 是 ANSYS 提供的一种参数化设计语言, 以方便用户进行程序编辑。

1.1 铣刀片几何参数的确定

波形刃铣刀片的前刀面是波形曲面, 波形刃曲面的形状可以看作是以一条余弦曲线母线沿着与水平面成一定角度的直线扫掠形成的, 并且和一倾斜面相交成相贯面, 其波形刃曲线满足余弦函数方程, 其方程式为

$$y = 0.20\alpha - 3 \cos \frac{2}{3}\pi x \quad (1)$$

式中 α ——扫掠面与水平面夹角

1.2 建模程序的编制

由于刀片模型比较复杂, 有不规则的曲面, 有曲面和平面相贯, 所以在建模时, 应用一些建模技巧, 尽量减少工作量, 充分利用 APDL 语言的循环函数、条件函数、重复功能; 选择多种坐标系和工作平面; 灵活运用自底向上和自顶向下两种建模方式相结合和强大的布尔运算来完成。完成后的实体模型如图 1 所示。



图 1 铣刀片实体模型

2 铣刀片温度场分析

2.1 建立铣刀片有限元分析模型

实体建模完成后, 必须将实体模型划分为合适的单元, 并生成相应的节点, 以进行有限元分析与计算。单元划分的质量直接决定了有限元分析的精度, 因此这一步是非常关键的。由于波形刃铣刀片的形状复杂,

* 国家自然科学基金资助项目(50075021, 50275042)。20030411 收到初稿, 20040111 收到修改稿

采用自由网格划分实体模型,选择 SOLID87 的热单元。波形刃铣刀片的有限元模型如图 2 所示。

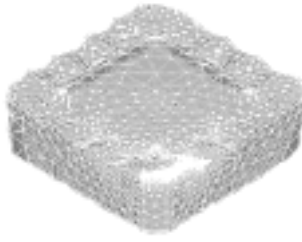


图 2 有限元网格的划分

2.2 边界条件和受热密度函数的确定

为了建立受热密度函数,以及确定有限元分析边界条件,进行了铣削测温试验。

2.2.1 测温试验

试验采用人工热电偶测温^[4]。为了得到高质量的电压信号,将放大电路加到了集流环的前端,与主轴同步旋转,测量信号先放大再经过集流环;热电偶的热端焊接在刀具预定要测量的点上,热电偶安装方法及测量点的分布如图 3 所示,其中 1~6 点各点的坐标分别是(2.0,2.0)、(2.0,3.5)、(2.0,5.0)、(3.5,2.0)、(3.5, 3.5)、(3.5, 5.0)。通过信号传输系统和动态数据采集系统以及热电偶标定曲线,就可以测得焊接点上的温度变化。

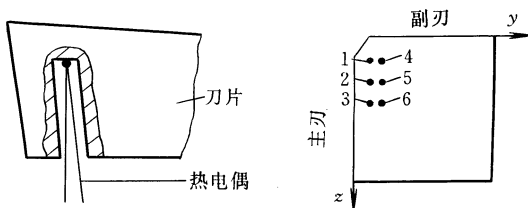


图 3 热电偶的安装方法及刀片上测量点的分布

铣削温度试验在 X5030A 立式升降台铣床上进行,根据试验要求选择测量点的坐标,用电火花机从刀片底部打出小孔,孔的直径为 1.5 mm,孔深为 3.2 mm。热电偶的材料为镍钼合金,在做试验之前,要事先标定,得出热电偶的温度和输出电压之间的关系曲线,根据输出的电压,可求出刀具上测量点的切削温度。

铣削温度试验采用新型的三维复杂槽型铣刀片(波形刃铣刀片),牌号为 YG532,刀盘直径 160 mm,工件材料为 45 钢,工件尺寸:宽 83 mm,长 200 mm。

试验使用北京惯性技术研究所的 FAS-4DEE-2 动态数据采集处理系统,对刀片上 6 个点的温度进行了采集。

$$\theta = \frac{\theta_1 \exp\left[-\frac{x^2 + 0.0064}{A^2}\right] \left[\operatorname{erf}\left(\frac{z}{A}\right) - \operatorname{erf}\left(\frac{z - 0.305}{A}\right) \right] \left[\operatorname{erf}\left(\frac{y}{A}\right) - \operatorname{erf}\left(\frac{y - 0.137}{A}\right) \right]}{\left[\operatorname{erf}\left(\frac{0.2}{A}\right) - \operatorname{erf}\left(\frac{-0.105}{A}\right) \right] \left[\operatorname{erf}\left(\frac{0.2}{A}\right) - \operatorname{erf}\left(\frac{0.063}{A}\right) \right]} \quad (3)$$

2.2.2 受热密度函数

以切削参数为 $n=385 \text{ r/min}$, $f=36 \text{ mm/min}$, $a_p=2 \text{ mm}$ 为例,进行推导,其余的情况与此类似。

首先根据传热学理论得到有限大面热源的温度场

$$\theta = \frac{Q_m \exp\left(-\frac{x^2}{4\lambda t}\right) \left[\operatorname{erf}\left(\frac{z}{\sqrt{4\lambda t}}\right) - \operatorname{erf}\left(\frac{z-L}{\sqrt{4\lambda t}}\right) \right]}{\sqrt{4c\rho(4\pi at)}} \times \left[\operatorname{erf}\left(\frac{y}{\sqrt{4\lambda t}}\right) - \operatorname{erf}\left(\frac{y-b}{\sqrt{4\lambda t}}\right) \right] \quad (2)$$

式中 $\operatorname{erf}(x)$ ——误差函数,可以通过查表或计算得到

b ——刀片磨损区宽度

L ——刀片磨损区长度

λ ——热导率

通过试验测得了铣刀片内部点的温度,但是热源的发热量 Q_m 还未得到,可以通过上式和温度值反推出 Q_m 。

根据试验采集到的温度值,在切削达到稳态后,得到一个周期内刀片上第 1 点的温升为

$$\theta_1 = t_1 - t_0 = t_1 - 25 = 2\ 013\ 495\ 862t^4 - 51\ 843\ 592t^3 - 259\ 355t^2 + 21\ 604t + 118$$

式中 t_1 ——第 1 点的温度

t_0 ——初始温度

各个采集点的温度—时间曲线如图 4 所示,整个曲线是在切削达到稳态后一个切削周期内切削时的温度—时间变化曲线。

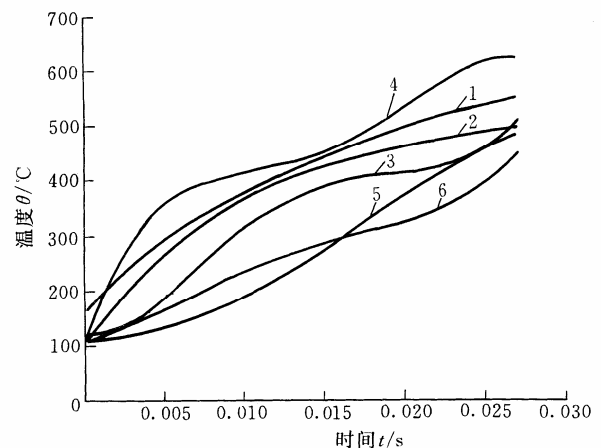


图 4 6 个测试点的温度—时间曲线

最终得到刀具在整个铣削过程中刀体的温度随时间而变化的函数,即受热密度函数如下

式中 $A = \sqrt{4\lambda(t+1)}$

x, y, z ——导热体内各点的坐标(mm)

根据受热密度函数可以得到前刀面任意时刻的温度分布图,如图 5 表示在切入后 0.01 s 时的温度分布曲面。

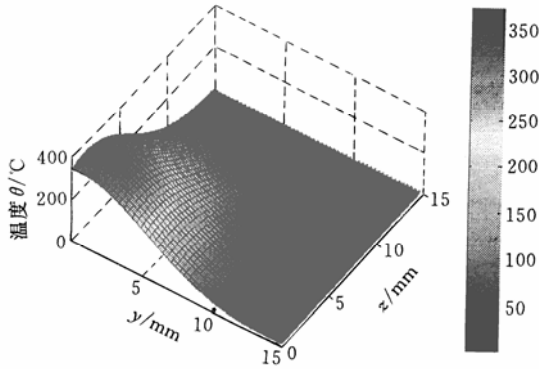


图 5 前刀面上温度分布曲面

2.3 温度场有限元分析

采用基于 APDL 语言编制网格划分、加载和求解的命令流程,然后存成一个批处理文件,直接从 Read from 读入这个批处理文件,就可以自动完成整个分析过程。温度场分析的结果如图 6 所示,图中各个 t_{\max} 表示相应温度场中的最高温度值。

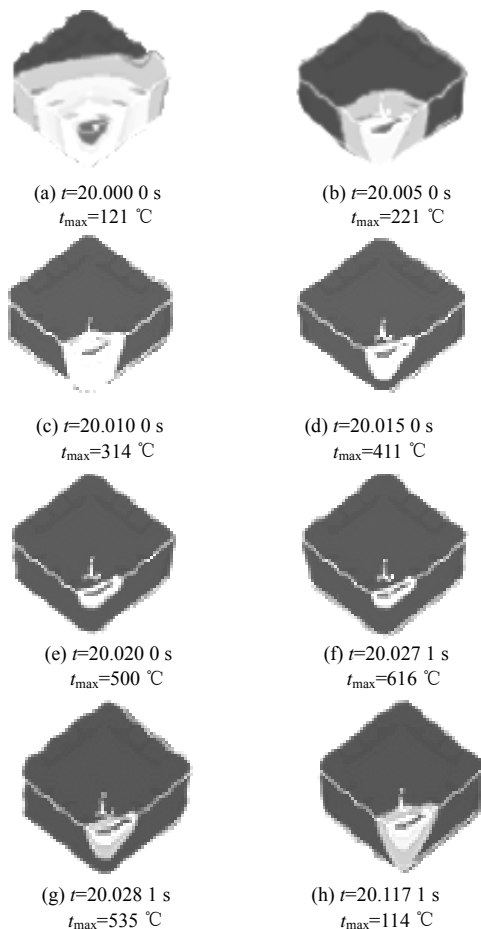


图 6 铣刀片瞬态温度场分析云图

从铣刀片非稳态温度场的有限元分析结果可以看出:在一个铣削周期内,刀具切入时,切削温度逐渐升高。在刚切入时,切削温度上升的速度比较慢,随着刀具逐渐切入工件,温度迅速上升。前刀面切削区最高温度集中在刀尖及主切削刃处,刀一屑接触区附近温度也很高,而且存在较大的温度梯度。刀具切出时,整个刀片在空气中冷却,温度逐渐降低,最高温度在 200 °C 左右。最高温度还是集中在刀刃附近和刀屑接触区内,前刀面上的温度梯度减小了。

刀具切入时,最高温度可以超过 600 °C,而且温度上升很快。铣削过程中,刀具在切入和切出时,温度梯度较大,刀片的主要失效形式为粘结破损。因此,采用有限元方法对铣削刀片的非稳态温度场分析,以寻求减少刀具破损的刀具几何参数及槽型参数。它的应用大大减少了由于试验所消耗的费用,对铣刀片槽型的开发具有很大的指导意义。

3 铣刀片温度场模糊综合评判

前面已经根据受热密度函数的计算和有限元分析得到了温度场的各项指标,但是尚不能据此评判温度场的优劣,因此引入模糊数学的方法来进行温度场的综合评判。模糊综合评判就是应用模糊数学方法,对受多种因素影响的对象和事物做出总的评价^[3]。因此,模糊综合评价方法可对影响铣削温度场的各因素进行评判,从而判断温度场的优劣。

3.1 模糊综合评判的基本模型

首先确定温度场模糊综合评判的三个基本因素,即因素集、评价集和备选集。

3.1.1 因素集

分析影响温度场的所有因素,这里考虑 4 个指标: u_1 =前刀面最高温度; u_2 =刀体内的最大温度梯度; u_3 =前刀面平均温度; u_4 =刀体内的平均温度。

3.1.2 评价集

对因素集每个因素根据其属性类别,建立评价集 $u_i=(I, II, III, IV)$, I, II, III, IV 分别表示第 i 个因素的不同评价等级。

评价等级若按其影响温度场由大到小的趋势来排序,则有 $u_1=\{\text{低, 较低, 较高, 高}\}$; $u_2=\{\text{小, 较小, 较大, 大}\}$; $u_3=\{\text{低, 较低, 较高, 高}\}$; $u_4=\{\text{低, 较低, 较高, 高}\}$ 。

3.1.3 备选集

把刀具温度场的优劣分为 5 个等级: v_1 =很好, v_2 =较好, v_3 =一般, v_4 =较差, v_5 =很差。构成备选集:

$V=\{v_1, v_2, v_3, v_4, v_5\}$ 。

3.2 模糊综合评价

3.2.1 等级权重集

建立评价模糊集如下

$$u_1=\{u_{11}(\text{低}), u_{12}(\text{较低}), u_{13}(\text{较高}), u_{14}(\text{高})\}$$

$$u_2=\{u_{21}(\text{小}), u_{22}(\text{较小}), u_{23}(\text{较大}), u_{24}(\text{大})\}$$

$$u_3=\{u_{31}(\text{低}), u_{32}(\text{较低}), u_{33}(\text{较高}), u_{34}(\text{高})\}$$

$$u_4=\{u_{41}(\text{低}), u_{42}(\text{较低}), u_{43}(\text{较高}), u_{44}(\text{高})\}$$

其中, u_{ij} 为第 i 个因素的第 j 个评价等级对该因素的隶属度, $0 \leq u_{ij} \leq 1 (i=1,2,\dots,6; j=1,2,\dots,4)$ 。各因素的隶属度的具体确定, 是根据实际调查、检索资料, 评估各个等级所占的相对比重及其等第倾向, 在 $0 \leq u_{ij} \leq 1$ 范围内取值。

对 u_{ij} 进行归一化处理, 建立第 i 个因素的评价等级双重集

$$X_i = \{x_{i1}, x_{i2}, x_{i3}, x_{i4}\} \quad (4)$$

式中
$$x_{ij} = \frac{u_{ij}}{\sum_{j=1}^4 u_{ij}} \quad j=1,2,\dots,4$$

3.2.2 因素等级评价矩阵

根据备选集和因素集, 建立因素等级评价矩阵 R_i : $R_i = (r_{ijk})_{j \times n}$, 其中 r_{ijk} 为第 i 个因素的第 j 个等级对备选集中第 k 个因素的隶属度, $i=1,2,\dots,6; j=1,2,\dots,4; k=1,2,\dots,n$, 即

$$R_i = \begin{bmatrix} r_{i11} & r_{i12} & \dots & r_{i1n} \\ r_{i21} & r_{i22} & \dots & r_{i2n} \\ \vdots & \vdots & & \vdots \\ r_{i41} & r_{i42} & \dots & r_{i4n} \end{bmatrix} \quad (5)$$

3.2.3 模糊综合评价矩阵

由上式可以得出一级模糊综合评价集:

$$Y_i = X_i \cdot R_i = (y_{i1}, y_{i2}, y_{i3}, y_{i4})$$

采用 $M(\cdot, +)$ 算子运算, 建立一级模糊评价矩阵

$$\tilde{R} = \begin{bmatrix} y_{11} & y_{12} & \dots & y_{1n} \\ y_{21} & y_{22} & \dots & y_{2n} \\ \vdots & \vdots & & \vdots \\ y_{41} & y_{42} & \dots & y_{4n} \end{bmatrix} \quad (6)$$

式中
$$y_{ik} = \sum_{j=1}^4 x_{ij} r_{ijk} \quad i=1,2,\dots,4 \quad k=1,2,\dots,n$$

分析因素集各因素对温度场的影响, 确定因素权重集 $\tilde{X} = (x_1, x_2, \dots, x_6)$

采用 $M(\cdot, +)$ 算子运算, 建立二级模糊评价集 $\tilde{Y} = \tilde{X} \cdot \tilde{R} = (y_1, y_2, \dots, y_k, \dots, y_n)$, 其中

$$y_k = \frac{\sum_{i=1}^6 x_i}{y_{ik}} \quad k=1,2,\dots,n$$

3.3 评价温度场

根据最大隶属度法进行评价: 以综合评价集中选择最大的 y_k 对应于备选集中的 V 作为评价结果, 则

$$V = \left\{ v \mid v \rightarrow \max_{1 \leq k \leq n} y_k \right\}$$

3.4 评价实例

根据上面的试验和分析结果, 经采集和计算得到一组数据如下: 前刀面最高温度 $616\text{ }^\circ\text{C}$; 温度梯度最大值为 0.140×10^9 ; 前刀面平均温度 $342\text{ }^\circ\text{C}$; 刀体内平均温度 $217\text{ }^\circ\text{C}$ 。

(1) 建立备选集为 $V = \{\text{很好, 较好, 一般, 较差, 极差}\}$ 。

(2) 确定 μ_{ij} , 建立评价域上的模糊子集。 μ_{ij} 是根据铣削试验结合专家调查法并参阅有关铣刀片设计和温度场的文献, 用隶属度确定, 铣削试验过程如前文所述。

$$u_1 = \{0.5, 1.0, 0.0, 0.0\}$$

$$u_2 = \{0.4, 1.0, 0.2, 0.0\}$$

$$u_3 = \{0.6, 1.0, 0.2, 0.0\}$$

$$u_4 = \{1.0, 0.4, 0.0, 0.0\}$$

(3) 由此可建立因素等级权重集

$$x_1 = \{0.33, 0.67, 0.0, 0.0\}$$

$$x_2 = \{0.25, 0.625, 0.125, 0.0\}$$

$$x_3 = \{0.33, 0.56, 0.11, 0.0\}$$

$$x_4 = \{0.71, 0.29, 0.0, 0.0\}$$

(4) 同样依据确定 u_{ij} 的方法确定 r_{ijk} , 建立评价集评判矩阵

$$R_i = \begin{bmatrix} 0.5 & 1.0 & 0.4 & 0 & 0 \\ 0.4 & 1.0 & 0.6 & 0 & 0 \\ 0 & 0.6 & 1.0 & 0.8 & 0.4 \\ 0 & 0 & 0.2 & 0.7 & 1.0 \end{bmatrix}$$

得到一级综合评价矩阵

$$\tilde{R} = \begin{bmatrix} 0.433 & 1.000 & 0.534 & 0 & 0 \\ 0.375 & 0.938 & 0.600 & 0.100 & 0.050 \\ 0.389 & 0.945 & 0.578 & 0.088 & 0.044 \\ 0.471 & 1.000 & 0.458 & 0 & 0 \end{bmatrix}$$

(5) 确定权重集为

$$\tilde{X} = \{0.4, 0.3, 0.2, 0.1\}$$

价集

$$\tilde{Y} = \tilde{X} \cdot \tilde{R} = \{0.4106, 0.9703, 0.5550, 0.0476, 0.0238\}$$

(6) 归一化处理后得到

$$Y = \{0.205\ 3, 0.485\ 2, 0.277\ 5, 0.023\ 8, 0.011\ 9\}$$

按最大隶属度原则, 该温度场“较好”。

4 结 论

利用 AYSYS 开发工具 APDL 和 UIDL 建立了三维复杂槽型铣刀片参数化实体模型, 提出并建立了刀具表面受热密度函数, 以此确定边界条件, 对复杂槽型铣刀片的三维温度场进行了有限元分析, 对刀具切入切出一个周期温度场进行了动态仿真; 运用模糊数学理论对有限元分析所得的温度场进行了模糊综合评判, 确定铣刀片三维槽型的优劣, 由此可作为铣刀片槽型重构的依据。

参 考 文 献

- 1 Tan G Y, Yuan J L, Wang X L, et al. Cause of brittle tool exit failure in intermittent cutting. *Journal of Harbin Institute of Technology*, 1997, 4(2): 107~111
- 2 Sun F L, Li Z J. Adhering wear mechanism of cemented carbide cutter in the intervallic cutting of stainless steel. *Wear*, 1998, 214(1): 79~82
- 3 肖盛燮. 模糊数学与工程应用. 成都: 成都科技大学出版社, 1993
- 4 刘战强, 黄传真, 万熠, 等. 切削温度测量方法综述. *工具技术*, 2000, 36(3): 3~6

3D TEMPERATURE FIELD ANALYSIS AND FUZZY COMPREHENSIVE EVALUATION FOR MILLING INSERT WITH COMPLEX GROOVE

Tan Guangyu Liu Guangjun Li Zhenjia

Liu Meijuan Li Guanghui

(Harbin University of Science and Technology)

Rong Yiming

(Worcester Polytechnic Institute, USA)

Abstract: The parametric model of milling insert with 3D complex groove is established. The heating density function of the tool surface is presented and established, and the boundary condition is developed according to the heating density function. The finite element analysis of the temperature field of milling insert is processed. The fuzzy comprehensive evaluation of temperature field is processed to evaluate the temperature field by the application of fuzzy mathematics theory, which provides basis for the groove reconstruction of milling insert with 3D complex groove.

Key words: Milling insert with 3D complex groove

Heating density function

3D temperature field

Fuzzy comprehensive evaluation

作者简介: 谭光宇, 男, 1957 年出生, 教授, 博士生导师。从事金属切削理论及 CAD/CAM 等方面的教学和研究工作。发表论文 40 余篇。