

doi:10.11835/j.issn.1000-582X.2021.01

# 基于磨损区重构的圆柱立铣刀周刃磨损评价方法

盛 精<sup>a,b</sup>, 王志敏<sup>a</sup>, 易 了<sup>a</sup>, 许建民<sup>b</sup>, 龙海飞<sup>b</sup>

( 厦门理工学院 a.福建省客车先进设计与制造重点实验室;  
b.福建省客车及特种车辆研发协同创新中心,福建 厦门 361024)

**摘要:**针对周刃磨损值测量误差大的问题,提出了基于磨损区重构的铣刀周刃磨损的评价方法。从视频显微镜获取的磨损区图像出发,建立三维重构与曲面展开映射模型,实现周刃后刀面磨损区的三维重构以及螺旋面的近似平面展开;应用几何变换,实现第 1、第 2 后刀面磨损区的平面表示及其共面表示,从而得到等效平面磨损区。通过对等效平面磨损区的分析,得到后刀面磨损宽度和磨损面积,进而对铣刀周刃磨损进行评价。在对四刃铣刀的磨损(切削时间为 57 min)进行实证研究后发现用重构法得到的磨损宽度、面积相比于用直接法平均增加了 0.16 mm 和 0.067 mm<sup>2</sup>,增率为 17.0% 和 14.9%。研究结果表明了重构法的可行性和准确性。

**关键词:**圆柱立铣刀;周刃磨损;螺旋面展开;映射模型;等效平面磨损区

**中图分类号:**TH161

**文献标志码:**A

**文章编号:**1000-582X(2022)06-141-12

## Evaluation method of the circumferential edge wear of the cylindrical vertical milling cutter based on wear zone reconstruction

SHENG Jing<sup>a,b</sup>, WANG Zhimin<sup>a</sup>, YI Liao<sup>a</sup>, XU Jianmin<sup>b</sup>, LONG Haifei<sup>b</sup>

(a. Fujian Key Laboratory of Advanced Design and Manufacture for Bus & Coach; b. Fujian Collaborative Innovation Center for R&D of Coach and Special Vehicle, Xiamen University of Technology, Xiamen 361024, Fujian, P. R. China)

**Abstract:** In order to solve the problem of large error in the measurement value of circumferential edge wear, an evaluation method of the circumferential edge wear of milling cutter based on the reconstruction of wear zone was proposed. Based on the image of the wear zone obtained by video microscope, a 3D reconstruction and surface expansion mapping model were established. Then the 3D reconstruction of the wear zone of the flank wear zone of circumferential edge was completed, and the approximate plane expansion of the spiral surface of the perimeter edge was completed. The geometric transformation was used to complete the representation of the first and second flank wear zones in their respective planes and their coplanar representation so as to obtain the equivalent plane wear zone. Through the analysis of

**收稿日期:**2020-06-18 **网络出版日期:**2021-03-10

**基金项目:**福建省自然科学基金资助项目(2018J01532,2020J01269);厦门理工学院科研基金(XPDKT 18021);福建省中青年教育科研基金(JT180449,JT180448)资助项目。

Supported by Fujian Natural Science Foundation (2018J01532,2020J01269), Technology Scientific Research Climbing Project of Xiamen University (XPDKT18021), and the Educational Research Project for Young Teachers in Fujian Province (JT180449,JT180448).

**作者简介:**盛精(1965—),男,厦门理工学院教授,博士,主要从事精密制造技术、CAD/CAE 集成技术研究,(E-mail) shengqqqjing@163.com。

equivalent plane wear zone, the wear width and wear area of the flank were obtained, and the accurate evaluation of the circumferential edge wear was further finished. The empirical study on the wear of the four-edge milling cutter (the cutting time is 57 min) found that the average wear width and area obtained by the reconstruction method were 0.16 mm and  $0.067 \text{ mm}^2$  higher than those obtained by the direct method on average, and the increase rates were 17% and 14.9%. The results show the feasibility and accuracy of the reconstruction method.

**Keywords:** cylindrical vertical milling cutter; wear of circumferential edge; surface expansion; mapping model; equivalent plane wear zone

精密、超精密加工技术一直是先进制造技术的基础与核心,而刀具的磨损预测与控制技术则是制约其发展的瓶颈<sup>[1-2]</sup>。随着“以铣代磨”新工艺的发展,铣削加工应用愈加广泛<sup>[3-4]</sup>,铣刀磨损的评估成为关注的焦点<sup>[5-7]</sup>。众多学者对周刃磨损的测量与评价开展了研究,其中一些研究者采用视频显微镜、扫描电镜等仪器测量了铣刀周刃后刀面的磨损宽度  $V_B$ <sup>[8-9]</sup>(磨损区一维度量值);也有学者应用数字显微镜测量了周刃后刀面的磨损面积<sup>[10-11]</sup>(磨损区二维度量值)。上述铣刀的磨损都是借助于仪器或设备直接测量的,可以称之为直接测量方法(后简称直接法)。相比直接法,间接测量法(后简称间接法)则是依据刀具磨损模型得到其磨损量。Singh 等<sup>[12]</sup>建立切削 Inconel 718 合金时铣刀磨损与切削参数之间的关系模型;Li 等<sup>[13]</sup>构建的自适应隐马尔可夫模型,可以在微铣 T4 钢过程中实时识别铣刀的磨损状态;Yang 等<sup>[14]</sup>研究了铣削 TC4 材料时信号特征量与刀具磨损的关系;Shankar<sup>[15]</sup>和 Wu 等<sup>[16]</sup>通过建立神经网络模型以预测磨损;Zhu<sup>[17]</sup>和 Xiao 等<sup>[18]</sup>通过对磨损区的三维重构来评估磨损。

不难发现,直接法是获取刀具磨损的基础或主要方法<sup>[8-16]</sup>。面向立铣刀磨损区图像,通过测取其中的主刀刃线至后刀面磨损区边界点的最大距离,得到后刀面最大磨损量(记为  $V_{Bmax}$ ),或通过对磨损区域的面积计算,得到后刀面磨损区面积(记为  $S_{fl}$ )。由于  $V_{Bmax}$  相对  $S_{fl}$  容易获取且误差小,通常采用  $V_{Bmax}$  评价刀具的磨损。上述对刀具磨损的评价都是在一个平面上(后刀面)进行的。周刃磨损区是一个围绕铣刀轴线的空间曲面,从其图像中获取的  $V_{Bmax}$  或  $S_{fl}$ ,实质是将磨损区通过投影平面化后进行评价的结果。无疑,采用直接法得到的磨损值会有较大的误差。

综上所述,直接法不可能精确测量立铣刀周刃的磨损量。关于准确评价铣刀周刃磨损的方法,至今还未见诸报道。笔者针对立铣刀周刃磨损难以准确测量的问题,提出了基于等效平面磨损区的铣刀后刀面磨损的评价方法(重构法),然后开展重构法与直接法的对比分析,以期找到一种能够准确评估立铣刀周刃磨损的有效方法。

## 1 铣刀周刃后刀面磨损区的重构及周刃螺旋面展开方法

### 1.1 周刃磨损区边界点平面坐标(XOZ)的测取

依据视频显微镜接收的图像,构造以垂直于铣刀轴线为边且覆盖磨损区的矩形视窗区域 1(见图 1)。首先,以刀具轴线为 Z 轴,矩形边(靠近底刃)为 X 轴建立直角坐标系, X 轴与周刃尖顶螺旋线  $S_1S_1'$ (主切削刃)、周刃底部螺旋线  $S_2S_2'$  分别交于  $P_{e0}$  和  $P_0$  点,借助图形数据处理系统,测取  $P_{e0}$  坐标值( $x_{e0}, z_{e0}$ );然后,在周刃后刀面(第 1、第 2 后刀面)磨损区上选择若干个边界点,分别过所选边界点作垂直于 Z 轴的直线  $I_1-I_1', I_2-I_2', \dots, I_n-I_n'$ (后称截线),分别测取  $n$  个周刃后刀面磨损区边界点的坐标  $P_i(x_i, z_i)$  ( $i=1, 2, \dots, n$ )。

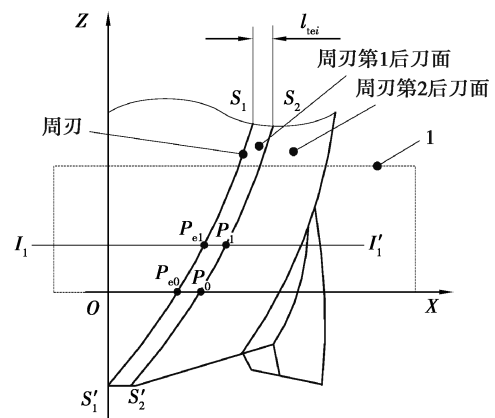


图 1 立铣刀坐标系的构建

Fig. 1 Establishment of coordinate system of vertical milling cutter

1.2 截线与周刃尖部螺旋线交点坐标(XOZ)的确立

应用增量理论和圆柱螺旋线的极坐标方程(1),得到增量式(2)。由式(2)可推出式(3)。以点  $P_{e0}(x_{e0}, z_{e0})$  为基准点(见图 2 和图 3),分别解得过  $P_i$  点对应的周刃尖顶线上点  $P_{ei}(x_{ei}, z_{ei})$  的坐标,见式(3)。

$$\begin{cases} x = r \cos \theta, \\ y = r \sin \theta, \\ z = r\theta \operatorname{ctg} \beta. \end{cases} \quad (1)$$

$$\begin{cases} \Delta x = -r \sin \theta \cdot \Delta \theta, \\ \Delta y = r \cos \theta \cdot \Delta \theta, \\ \Delta z = r \operatorname{ctg} \beta \cdot \Delta \theta. \end{cases} \quad (2)$$

$$\begin{cases} \Delta \theta = \Delta z \cdot \operatorname{tg} \beta / r = z_i \cdot \operatorname{tg} \beta / r, \\ \Delta x = -z_i \cdot \operatorname{tg} \beta \cdot \sin \theta = -z_i \cdot \operatorname{tg} \beta \cdot \sin(\theta_0 + \Delta \theta) = -z_i \cdot \operatorname{tg} \beta \cdot \sin(\theta_0 + z_i \operatorname{tg} \beta / r). \end{cases} \quad (3)$$

$$\begin{cases} x_{ei} = x_{e0} + \Delta x = x_{e0} - z_i \operatorname{tg} \beta \cdot \sin(\theta_0 + z_i \operatorname{tg} \beta / r), \\ z_{ei} = z_i. \end{cases} \quad (4)$$

式中: $r$  是铣刀半径; $\theta$  是极角; $\beta$  是铣刀刃螺旋角; $\theta_0$  是刀尖点  $P_{e0}$  对应的极角。

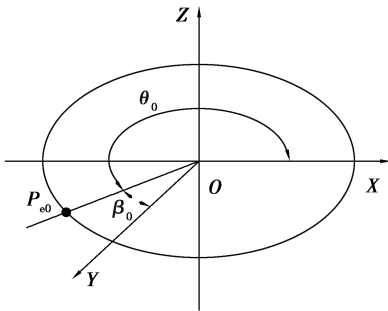


图 2 周刃尖点在空间的几何角度

Fig. 2 Geometric angle of the tip of circumferential edge in space

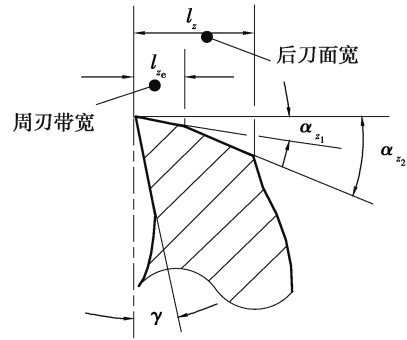


图 3 周刃的几何参数示意图

Fig. 3 Diagram of geometric parameters

1.3 周刃磨损区边界点的三维重构

坐标  $P_{ei}$  是磨损区边界点坐标计算的基准点,三维坐标由式(5)确定。根据周刃的几何参数示意图(图 3)、周刃在不同位置时的几何角度(图 4),推导出铣刀第 1、第 2 后刀面磨损区从二维到三维的映射函数。 $D$  为刀尖点,其坐标为  $(x_i, y_{ei}, z_i)$ 。当  $|x_i - x_{ei}| \leq l_{tei}$  时,第 1 后刀面磨损区边界点(线段  $DE$  之间,见图 4)的重构模型见式(6)。当  $|x_i - x_{ei}| > l_{tei}$  时, $E$  为第 1 后刀面与第 2 后刀面的交界点,其坐标为  $[x_i, y_{ei} + l_{tei} \operatorname{tg}(\beta_1 - \alpha_{z_1}), z_i]$ ,第 2 后刀面磨损区边界点(线段  $DE$  之间,见图 4)的重构模型如式(7)。

$$\begin{cases} x_{ei} = x_{e0} - z_i \operatorname{tg} \beta \sin(\theta_0 + z_i \operatorname{tg} \beta / r), \\ y_{ei} = \sqrt{r^2 - x_{ei}^2}, \\ z_{ei} = z_i. \end{cases} \quad (5)$$

$$\begin{cases} x_j = x_i, \\ y_j = y_{ei} + (x_i - x_{ei}) \operatorname{tg}(\beta_1 - \alpha_{z_1}), \\ z_j = z_i. \end{cases} \quad (6)$$

$$\begin{cases} x_j = x_i, \\ y_j = y_{ei} + l_{tei} \operatorname{tg}(\beta_1 - \alpha_{z_1}) + (x_i - x_{ei} - l_{tei}) \operatorname{tg}(\beta_1 - \alpha_{z_2}), \\ z_j = z_i. \end{cases} \quad (7)$$

式中:  $\beta_1$  是周刃尖点与  $Y$  轴正向所夹的圆心角,  $\beta_1 = \arcsin(x_i/r)$ ;  $\alpha_{z_1}$  是周刃第 1 后角;  $\alpha_{z_2}$  是周刃第 2 后角;  $l_{tej}$  是周刃刃带在  $XOZ$  面的投影长度, 其值为  $l_{temax} \cos(\beta_1 - \alpha_{z_1})$  (见图 4);  $l_{temax}$  为周刃刃带的最大长度,  $l_{temax} = l_{te} \cos \alpha_{z_1}$ ;  $j = 1, 2, \dots, n$ 。

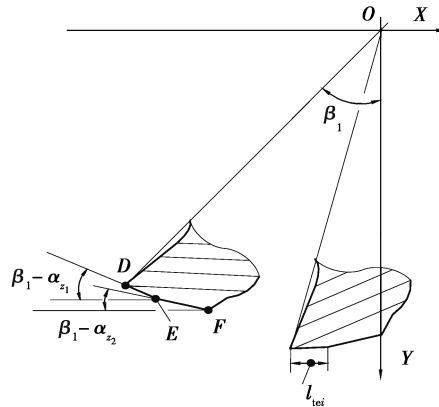


图 4 周刃在不同位置时的几何角度

Fig. 4 Geometric angle of the edge at different positions of circumferential edge

#### 1.4 铣刀周刃的展开

由于铣刀周刃为螺旋曲面, 需要将其展开成近似平面, 以便度量。以铣刀轴线为中心, 沿着平行于  $XOZ$  平面将铣刀 (含磨损区边界) 在半径处展开, 一个周刃近似展开情况见图 5。磨损区边界重构点映射到展开平面的规律见式(8)。

$$\begin{cases} \tilde{x}_j = \sqrt{x_j^2 + y_j^2} \theta_{kj}, \\ \tilde{y}_j = \sqrt{x_j^2 + y_j^2}, \\ \tilde{z}_j = z_j. \end{cases} \quad (8)$$

式中展开角  $\theta_{kj} = \arcsin(x_j / \sqrt{x_j^2 + y_j^2})$ ,  $(-\pi/2 \leq \theta_{kj} \leq \pi/2)$ 。

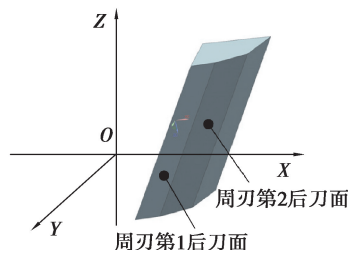


图 5 周刃展开后的简图

Fig. 5 Diagram of circumferential edge deployment

## 2 后刀面磨损区重构点的获取与磨损评价方法

在螺旋面展开后, 周刃的第 1、第 2 后刀面分别转化成两个近似的平面, 见图 5。因此, 先将第 1、第 2 后刀面磨损区重构点分别在各自的平面上表示, 然后把它们拼接在同一平面上进行磨损评价。

### 2.1 周刃第 1 后刀面磨损区重构点的平面表示

将铣刀的坐标系  $O-XYZ$  原点平移至刀尖点  $P_{e0}$ , 磨损区边界点再经过式(9)所示 2 次旋转变换, 可实现磨损区边界点在第 1 后刀面上的表示, 即在  $X'O'Z'$  平面上的表示。

$$\begin{bmatrix} x' \\ y' \\ z' \end{bmatrix} = \mathbf{T}_1^{-1} \mathbf{R}_y^{-1}(\theta_1) \mathbf{R}_z^{-1}(\theta_2) \begin{bmatrix} \tilde{x} \\ \tilde{y} \\ \tilde{z} \end{bmatrix}, \quad (9)$$

式中: $\theta_1$ 为原坐标系绕Y轴旋转的角度(等于铣刀螺旋角 $\beta$ ); $\theta_2$ 为坐标系绕Z轴旋转的角度。

$\theta_2$ 的值可以通过几何计算得到,笔者提出通过无约束优化模型获取方式,见式(9)。在优化模型中以边界点坐标Y值最小为目标。

$$\min f(X) = \sum_{i=1}^n (-u_i \sin x + v_i \cos x)^2, x \in [-1, 1], \quad (10)$$

式中: $X=[x]=[x_2]$ ;  $n$ 为边界点的个数; $u_i, v_i$ 为边界点坐标值。

## 2.2 铣刀周刃第 2 后刀面磨损区重构点的平面表示

将铣刀的三维直角坐标系  $O$ - $XYZ$  原点平移至  $P_0$  点,并经过式(10)所示 2 次旋转变换,可实现磨损区边界点在第 2 后刀面上的表示,即在  $X''O''Z''$  平面上的表示。式(11)中  $\theta_3$  的值同样也要通过优化模型(10)求解得到。

$$\begin{bmatrix} x'' \\ y'' \\ z'' \end{bmatrix} = \mathbf{T}_2^{-1} \mathbf{R}_y^{-1}(\theta_1) \mathbf{R}_z^{-1}(\theta_3) \begin{bmatrix} \tilde{x} \\ \tilde{y} \\ \tilde{z} \end{bmatrix}. \quad (11)$$

## 2.3 铣刀第 1、第 2 后刀面磨损区重构点的共面表示

$$\begin{bmatrix} x' \\ y' \\ z' \end{bmatrix} = \mathbf{T}_3 \begin{bmatrix} x'' \\ y'' \\ z'' \end{bmatrix}, \quad (12)$$

式中  $\mathbf{T}_3$  为平移矩阵。

重构点通过式(12)的平移变换,将  $O''$ - $X''Y''Z''$  坐标系原点平移至  $P'_0$  ( $P_0$  点在  $O'$ - $X'Y'Z'$  中的坐标),使  $X'O'Z'$  与  $X''O''Z''$  共面。这样,就实现了周刃第 1、第 2 后刀面磨损区在同一平面的表示,即完成了铣刀后刀面等效平面磨损区的构建。

## 2.4 铣刀周刃后刀面磨损评价

笔者采用周刃后刀面磨损宽度与磨损面积作为其磨损的评价指标。不难看出,通过上述的几何变换,在  $X'O'Z'$  平面上  $Z'$  轴与周刃一致(旋转重合)。因此,将离坐标轴  $Z'$  最远距离点的横坐标绝对值作为磨损区宽度,依次用折线将  $X'O'Z'$  平面上多点(重构点)相连形成封闭图形,然后通过图形处理系统解得的面积即为磨损区面积,这样就实现了单个周刃磨损指标评价。对于多刃刀具,可以采用均值法评定。

# 3 实验验证

## 3.1 实验条件

加工机床:数控铣床 TJ700(见图 6)。工件材料:20CrMnTi,经热处理(在  $930^\circ\text{C}$ ,渗碳 14 h;在  $70^\circ\text{C}$  的 HQS-2000 油中淬火 7 min),其组织为马氏体 2 级,淬硬层深 CHD 为 1.6 mm(按照 GB/T 9450—2005 规定),硬度为 58-62HRC,基体材料硬度 32HRC,试件尺寸为  $250\text{ mm} \times 70\text{ mm} \times 70\text{ mm}$ 。刀具: $\phi 6$  直柄立铣刀(牌号 GU25UF),螺旋角为  $30^\circ$ ,刃齿数  $z=4$ ,周刃结构的参数见表 1。加工方法:干式切削、顺铣(在淬硬层中切削)。切削实验参数:切削速度 28.26 m/min、铣削深度 1 mm、铣削宽度 2.5 mm、进给量 0.14 mm/r。为了说明重构方法,取在切削时间为 57 min 时铣刀周刃磨损区为研究对象。

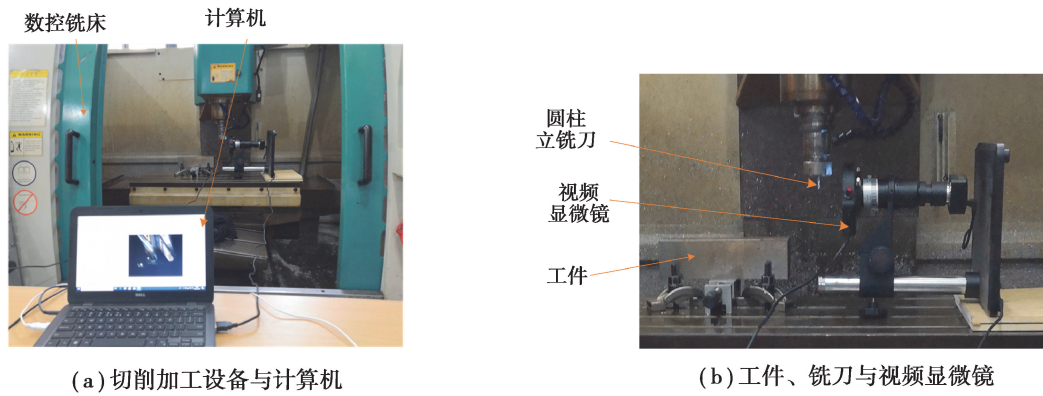


图 6 切削加工与铣刀磨损测试系统

Fig. 6 Cutting and tool wear testing system

表 1 铣刀周刃结构参数

Table 1 Structure parameters of the circumferential edge of the cutter

后刀面宽 $l_z$	周刃带宽 $l_{ze}$	第 1 后角 $\alpha_{z_1}$	第 2 后角 $\alpha_{z_2}$	铣刀直径 $d/\text{mm}$
1.2 mm	0.54 mm	$6^\circ$	$24^\circ$	6

### 3.2 磨损区边界点的测量

测量仪器与软件:由计算机、视频显微镜(型号 SGO1600BDX)等硬件和图像处理系统等软件组成,用于拍摄铣刀周刃后刀面磨损区的图像并从中获取磨损区边界点位置等信息,见图 6。在切削过程中,通过程控,让铣刀每隔 2~4 min 自动停留在视频摄像头的左侧位置进行采样。转动铣刀,依次拍摄 4 个周刃牙齿的磨损区。选择能体现磨损区形状特征的点作为边界点,通过图像处理系统,得到各刃齿磨损区的磨损值(直接法),见表 2。为了说明重构法,择取 No.1 刃齿磨损区图像(见图 7),15 个边界点坐标见表 3。

表 2 直接法获取的后刀面磨损值

Table 2 The wear value of the flank obtained by the direct method

刃齿号	磨损区图像	磨损区宽度 /mm	磨损区面积 /mm <sup>2</sup>
1		0.820	0.426
2		0.824	0.436
3		0.810	0.456
4		0.836	0.481

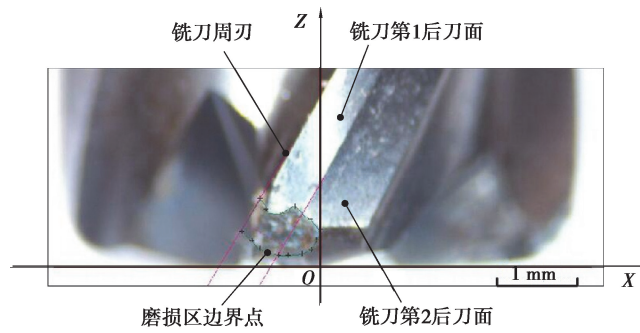


图 7 铣刀周刃磨损区

Fig. 7 Circumferential edge wear zone of milling cutter

表 3 磨损区边界点原始坐标及其重构后的坐标

Table 3 Original coordinates of boundary points in wear area and their reconstructed coordinates

序号	测量点原始的坐标		三维重构后坐标			后刀面 序号
	$x/\text{mm}$	$z/\text{mm}$	$x/\text{mm}$	$y/\text{mm}$	$z/\text{mm}$	
1	-0.988 0	0.317 0	-0.988 0	2.832 6	0.317 0	1
2	-0.914 0	0.241 0	-0.914 0	2.841 7	0.241 0	1
3	-0.805 0	0.143 0	-0.805 0	2.844 3	0.143 0	1
4	-0.703 0	0.128 0	-0.703 0	2.845 7	0.128 0	1
5	-0.544 0	0.109 0	-0.544 0	2.831 3	0.109 0	2
6	-0.377 0	0.089 0	-0.377 0	2.742 3	0.089 0	2
7	-0.217 0	0.127 0	-0.217 0	2.659 4	0.127 0	2
8	-0.111 0	0.181 0	-0.111 0	2.606 9	0.181 0	2
9	-0.024 0	0.304 0	-0.024 0	2.593 1	0.304 0	2
10	0.000 0	0.446 0	0.000 0	2.636 1	0.446 0	2
11	-0.112 0	0.539 0	-0.112 0	2.756 0	0.539 0	2
12	-0.274 0	0.684 0	-0.274 0	2.890 1	0.684 0	1
13	-0.471 0	0.611 0	-0.471 0	2.903 8	0.611 0	1
14	-0.623 0	0.671 0	-0.623 0	2.912 0	0.671 0	1
15	-0.749 0	0.738 0	-0.749 0	2.905 1	0.738 0	1

## 4 结果与讨论

### 4.1 磨损区边界点的重构与周刃螺旋面的展开

依据式(6)(7)映射模型,将磨损区边界点从平面点映射成三维点,见表 3 中重构后的坐标。依据式(8)映射规律,将周刃螺旋曲面展开。展开后的重构点见表 4,其分布图见图 8。

表 4 第 1、第 2 后刀面重构点及其平面表示的坐标

Table 4 The coordinates of the reconstruction point and the plane representation of the first and second flank mm

序号	展开后重构点的坐标			重构点平面表示的坐标			后刀面序号
	$x/\text{mm}$	$y/\text{mm}$	$z/\text{mm}$	$x'(x'')$	$y'(y'')$	$z'(z'')$	
1	-1.007 0	3.000 0	0.317 0	0.001 8	0.000 3	0.367 1	1
2	-0.929 0	2.985 1	0.241 0	0.108 3	0.005 7	0.340 3	1
3	-0.815 0	2.956 0	0.143 0	0.258 5	0.005 1	0.312 2	1
4	-0.710 0	2.931 2	0.128 0	0.360 2	0.000 5	0.351 9	1
5	-0.547 0	2.883 1	0.109 0	0.097 8	-0.055 0	0.138 9	2
6	-0.378 0	2.768 1	0.089 0	0.287 3	-0.013 0	0.206 1	2
7	-0.217 0	2.668 2	0.127 0	0.441 8	0.012 0	0.319 5	2
8	-0.111 0	2.609 3	0.181 0	0.528 8	0.022 1	0.419 4	2
9	-0.024 0	2.593 2	0.304 0	0.550 1	0.022 0	0.569 4	2
10	0.000 0	2.636 1	0.446 0	0.484 8	0.012 4	0.704 4	2
11	-0.112 0	2.758 3	0.539 0	0.298 4	-0.015 0	0.728 9	2
12	-0.274 0	2.903 1	0.684 0	0.463 0	-0.009 0	1.051 2	1
13	-0.473 0	2.941 8	0.611 0	0.322 6	0.003 0	0.888 7	1
14	-0.628 0	2.977 9	0.671 0	0.154 8	0.007 4	0.863 4	1
15	-0.757 0	3.000 0	0.738 0	0.008 0	0.001 5	0.856 8	1

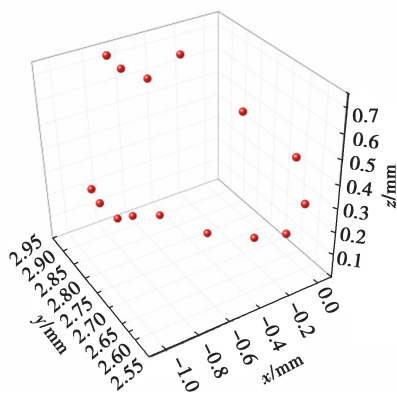


图 8 铣刀沿半径处展开后磨损区边界点分布

Fig. 8 Distribution of boundary points in wear zone of milling cutters after expansion along radius

## 4.2 周刃后刀面重构点的平面表示

周刃磨损区二维边界点经过了先重构再展开(螺旋面)的变化。为便于表达,后面叙述中将展开后的重构点依然称为重构点。

### 4.2.1 第 1 后刀面重构点的平面表示

通过式(13)的几何变换后,实现了周刃第 1 后刀面重构点在同一平面的表示,见表 4(后刀面序号为“1”的点)。



$$M_1 = T(1.192\ 1, -3.000\ 0, 0.000\ 0) \cdot R_y(-30.000^\circ) \cdot R_z(-2.389^\circ)。 \tag{13}$$

4.2.2 周刃第 2 后刀面重构点的平面表示

通过式(14)的几何变换后,实现了周刃第 2 后刀面重构点在同一平面的表示,见表 4(后刀面序号为“2”的点)。

$$M_2 = T(0.636\ 3, -2.993\ 2, 0.000\ 0) \cdot R_y(-30.000^\circ) \cdot R_z(-47.880^\circ)。 \tag{14}$$

4.2.3 周刃第 1 后刀面与第 2 后刀面重构点的共面表示

在周刃第 1、第 2 后刀面重构点完成平面表示后,再通过式(15)的几何变换,将第 2 后刀面重构点平移至第 1 后刀面所在坐标平面上,实现第 1、第 2 后刀面重构点的共面表示,即完成了等效平面磨损区的构建。共面表示后第 2 后刀面重构点的坐标见表 5,重构点分布情况见图 9。

$$M_3 = T(0.481\ 2, 0.013\ 3)。 \tag{15}$$

表 5 共面表示后第 2 后刀面重构点的坐标  
Table 5 The coordinates of the second flank reconstruction point after the co-plane represents

序号	共面表示后第 2 后刀面 重构点的坐标		后刀面 序号
	$x''$ /mm	$z''$ /mm	
5	0.517 0	0.416 8	2
6	0.706 5	0.484 0	2
7	0.861 0	0.597 4	2
8	0.948 0	0.697 3	2
9	0.969 3	0.847 3	2
10	0.904 0	0.982 3	2
11	0.717 6	1.006 8	2

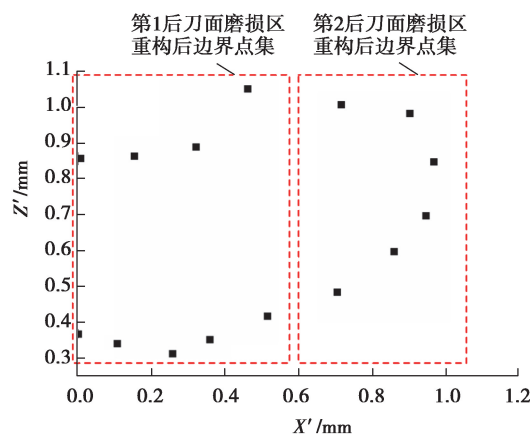


图 9 后刀面重构点的分布

Fig. 9 Distribution of reconstruction points on the flank

为了将磨损区重构过程便捷化,开发了评价过程的运行程序,操作界面见图 10。通过对后刀面重构点的数据处理,可以得到 No.1 刃齿后刀面磨损区的宽度为 0.969 mm、面积为 0.498 mm<sup>2</sup>。

基于磨损区重构的圆柱立铣刀周刃磨损指标评价系统			
I.铣刀几何参数与磨损区边界点的输入	R.后刀面磨损区边界点三维坐标的重构	T.后刀面磨损区边界点的几何转换	C.后刀面磨损区边界点的组合
后刀面磨损区边界点的录入	计算周刃尖点平面坐标	第1后刀面边界点的几何转换	第1与第2后刀面磨损区边界点的组合
圆柱立铣刀结构几何参数的录入	计算周刃尖点三维坐标	第2后刀面边界点的几何转换	
	计算磨损区边界点的三维坐标		

图 10 周刃磨损重构评价的操作界面

Fig.10 Operating interface for evaluation of the reconstruction method of circumferential edge wear

### 4.3 讨论

#### 4.3.1 重构点的平面表示

从表 4 可以看出,磨损区边界重构点的坐标  $y'$  ( $y''$ ) 近似等于 0。结果表明:通过几何变换后,先实现第 1 后刀面与第 2 后刀面上的重构点在各自平面( $X'O'Z'$  坐标平面与  $X''O''Z''$  坐标平面)的表示(见表 4),然后完成两后刀面重构后的共面表示( $X'O'Z'$  坐标平面)(见表 4 和表 5)。从图 9 可以看出,在第 1、第 2 后刀面的共面表示后,重构点组成的磨损区与拍摄的磨损区相似度高。

#### 4.3.2 直接法与重构法的结果比较

按照 No.1 刃齿后刀面磨损值获取的方法,可以得到 No.2、No.3 和 No.4 刃齿的磨损宽度和磨损面积。重构法、直接法获取的刃齿后刀面磨损宽度见图 11,磨损面积见图 12。

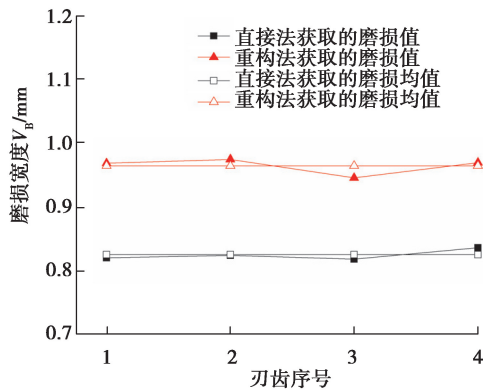


图 11 刃齿的后刀面磨损宽度

Fig. 11 Width of flank wear of cutting edge teeth

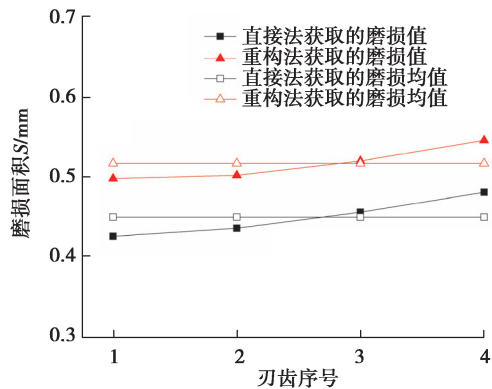


图 12 刃齿的后刀面磨损面积

Fig. 12 Area of flank wear of cutting teeth

对比直接法与重构法得到的结果可知,直接法获取的磨损宽度在 0.820~0.836 mm 范围内,均值为 0.825 mm;重构法获取的磨损宽度在 0.946~0.975 mm 范围内,均值为 0.965 mm。直接法获取的磨损面积在 0.426~0.481 mm<sup>2</sup> 范围内,均值为 0.450 mm<sup>2</sup>;重构法获取的磨损面积在 0.498~0.546 mm<sup>2</sup> 范围内,均值为 0.517 mm<sup>2</sup>。总之,重构法相比直接法,磨损宽度平均增加了 0.160 mm,面积平均增加了 0.067 mm<sup>2</sup>。

为分析重构法与直接法获取的磨损值的差异,将其数据进行比较。从图 13 可见,重构法获取的后刀面磨损宽度、面积比直接测量法分别增加了 16.0%~18.2%(均值 17.0%)、13.5%~16.9%(均值 14.9%)。造成两种方法评价结果差异大的主要原因是评价的磨损区不同。采用直接法评价的磨损区是投影磨损区(磨损区在垂直于拍摄方向上平面的投影),而采用重构法评价的磨损区是等效平面磨损区。

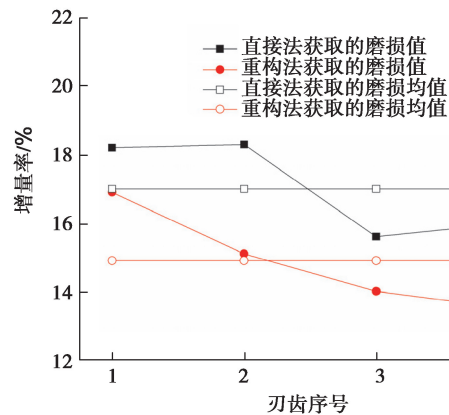


图 13 重构法相比直接法获取的后刀面  
磨损宽度、面积增量率

Fig. 13 The wear increase rate of the reconstruction  
method compared with the direct method

## 5 结 语

针对在切削加工过程中圆柱立铣刀周刃后刀面磨损难以准确测量的问题,开展了磨损区重构方法的研究,得到的结论如下:

1)提出了一种基于磨损区重构的铣刀周刃磨损评价方法。以前,铣刀的磨损量是将周刃螺旋面的磨损区投影平面化后直接测量的,该方法会产生原理误差。而重构法是将上述磨损区转化成一个平面磨损区并对其测量。

2)重构法评价铣刀磨损的准确性好。重构法是对铣刀周刃磨损区的等效平面磨损区进行评估,所以该方法评价周刃磨损精准确度高,且评价结果不受在观测磨损区时视角变化的影响。

3)重构法与直接法的对比分析。选了一个铣刀磨损的样本(切削时间为 57 min),开展了重构法与直接法的对比研究,结果发现重构法获取的磨损区宽度、面积比直接测量法获取的值高 13.5%~16.9%和 16.0%~18.2%,表明了磨损重构法的可行性与合理性。

### 参考文献:

- [1] Li S S, Zou B, Xu K T, et al. Machined channel quality and tool life using cermet micro-mill in micro-milling aluminum alloy[J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2019, 101(9/10/11/12): 2205-2216.
- [2] 李鑫,史振宇,蒋森河,等. 神经网络预测刀具磨损和切削力[J]. 控制理论与应用, 2018, 35(12): 1731-1737.  
Li X, Shi Z Y, Jiang S H, et al. Artificial neural network predicts tool wear and cutting force[J]. Control Theory & Applications, 2018, 35(12): 1731-1737. (in Chinese)
- [3] 张金峰,封超,马芸慧,等. 微铣金属表面微沟槽结构的粗糙度及形貌分析[J]. 光学精密工程, 2018, 26(12): 2998-3011.  
Zhang J F, Feng C, Ma Y H, et al. Analysis of roughness and morphology of metal surface grooves by micro milling[J]. Optics and Precision Engineering, 2018, 26(12): 2998-3011. (in Chinese)
- [4] 张楠,史耀耀,杨臣,等. 基于 GRA-RBF-FA 的整体叶盘通道盘铣加工多目标参数优化[J]. 西北工业大学学报, 2019, 37(1): 160-166.  
Zhang N, Shi Y Y, Yang C, et al. Multi-objective optimization of processing parameters for disc-mill cutter machining blisk-tunnel based on GRA-RBF-FA method[J]. Journal of Northwestern Polytechnical University, 2019, 37(1): 160-166. (in Chinese)
- [5] Yıldırım Ç V, Kıvak T, Erzincanlı F. Tool wear and surface roughness analysis in milling with ceramic tools of Waspaloy: a comparison of machining performance with different cooling methods[J]. Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering, 2019, 41(2): 1-15.
- [6] 丁宝洋,白倩,刘具龙,等. 基于 Simulink 反馈方法的钛合金铣削刀具磨损预测[J]. 机械工程学报, 2019, 55(11):

224-232.

Ding B Y, Bai Q, Liu J L, et al. A novel method for tool wear prediction in titanium milling by simulink feedback method[J]. *Journal of Mechanical Engineering*, 2019, 55(11): 224-232. (in Chinese)

- [7] Elhami S, Razfar M R, Farahnakian M. Experimental study of surface roughness and tool flank wear during hybrid milling[J]. *Materials and Manufacturing Processes*, 2016, 31(7): 933-940.
- [8] K V, Mathew J. Wear behavior of TiAlN coated WC tool during micro end milling of Ti-6Al-4V and analysis of surface roughness[J]. *Wear*, 2019, 424/425: 165-182.
- [9] Alhadeff L L, Marshall M B, Curtis D T, et al. Protocol for tool wear measurement in micro-milling[J]. *Wear*, 2019, 420/421: 54-67.
- [10] 李锡文, 杨明金, 谢守勇, 等. 基于时域特性的铣刀磨损状态信息提取[J]. *中国机械工程*, 2007, 18(13): 1513-1517.  
Li X W, Yang M J, Xie S Y, et al. Information extraction of milling cutter wear condition through timedomain method[J]. *China Mechanical Engineering*, 2007, 18(13): 1513-1517. (in Chinese)
- [11] Yang Y S, Liu Y, Liu K. Experimental investigation on tool wear and measurement method in micro milling with carbide tools[J]. *International Journal of Mechatronics and Manufacturing Systems*, 2018, 11(1): 2.
- [12] Singh G, Gupta M K, Mia M, et al. Modeling and optimization of tool wear in MQL-assisted milling of Inconel 718 superalloy using evolutionary techniques[J]. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2018, 97(1/2/3/4): 481-494.
- [13] Li W J, Liu T S. Time varying and condition adaptive hidden Markov model for tool wear state estimation and remaining useful life prediction in micro-milling[J]. *Mechanical Systems and Signal Processing*, 2019, 131: 689-702.
- [14] Yang Y F, Guo Y L, Huang Z P, et al. Research on the milling tool wear and life prediction by establishing an integrated predictive model[J]. *Measurement*, 2019, 145: 178-189.
- [15] Shankar S, Mohanraj T, Rajasekar R. Prediction of cutting tool wear during milling process using artificial intelligence techniques[J]. *International Journal of Computer Integrated Manufacturing*, 2019, 32(2): 174-182.
- [16] Wu X F, Liu Y H, Zhou X L, et al. Automatic identification of tool wear based on convolutional neural network in face milling process[J]. *Sensors (Basel, Switzerland)*, 2019, 19(18): 3817.
- [17] Zhu A B, He D Y, Zhao J W, et al. 3D wear area reconstruction of grinding wheel by frequency-domain fusion[J]. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2017, 88(1/2/3/4): 1111-1117.
- [18] Xiao M H, Sun Z M, Shen X J, et al. Research on 3D reconstruction technology of tool wear area[J]. *Manufacturing Technology*, 2019, 19(2): 345-349.

(编辑 张 苹)