

文章编号:1004-7220(2012)01-0077-07

## 基于单元刀具切削的活检针切削力模型

高立营<sup>a,b</sup>, 张勤河<sup>a,b</sup>, 刘明<sup>a,b</sup>, 秦雪梅<sup>c</sup>

(山东大学 a. 机械工程学院, 济南 250061; b. 高效洁净机械制造教育部重点实验室, 济南 250061; c. 齐鲁医院, 肿瘤防治中心, 济南 250012)

**摘要:** **目的** 从切削力学角度构建活检针切削力模型, 揭示针尖几何形状与活检针切削力之间的内在联系。 **方法** 借鉴传统金属切削理论建立针尖几何结构的数学模型, 在此基础上将针尖切削刃离散成一系列单元刀具, 在软组织切削试验平台上进行斜角切削试验, 获得单位刃长切削力参数模型, 最后采用单元刀具综合法构建活检针切削力泛函模型。 **结果** 该模型能够较好地预测活检针切削力, 针尖顶角  $\xi$  为  $30^\circ$ 、 $45^\circ$ 、 $60^\circ$  的 18 G 活检针切削力试验值为 1.33、1.38、1.56 N, 预测值为 1.29、1.43、1.52 N, 相对误差小于 5%。 **结论** 活检针切削力泛函模型定量描述了切削力与针尖几何结构之间的关系, 可以用于新型针尖设计、评价及术前穿刺路径规划。

**关键词:** 切削力; 活检针; 软组织; 力学

**中图分类号:** R 318.01 **文献标志码:** A

## Cutting force model of biopsy needle based on cutting of elementary cutting tools

GAO Li-ying<sup>a,b</sup>, ZHANG Qin-he<sup>a,b</sup>, LIU Ming<sup>a,b</sup>, QIN Xue-mei<sup>c</sup> (a. School of Mechanical Engineering, b. Key Lab of High Efficiency and Clean Mechanical Manufacture of Ministry of Education, Shandong University, Jinan 250061, China; c. Cancer Prevention Center, Qilu Hospital, Shandong University, Jinan 250012, China)

**Abstract: Objective** To establish the cutting force model of biopsy needle from the aspect of cutting mechanics and to reveal the relationship between cutting force of the needle and geometry of the needle tip. **Methods** Based on the traditional theory of metal cutting, a mathematical model of biopsy needle geometry was established. The needle cutting edge was divided into a series of elementary cutting tools (ECTs) with varying inclination and normal rake angles. The oblique cutting experiment was performed on the soft tissue cutting setup and a functional cutting force model was developed based on these ECTs. **Results** The force model could predict the cutting force of biopsy needle well. When the bevel angle  $\xi$  was  $30^\circ$ ,  $45^\circ$  and  $60^\circ$ , the experimental forces of 18 G biopsy needle were 1.33, 1.38, and 1.56 N, respectively, while the predicted values were 1.29, 1.43, and 1.52 N, respectively. The relative error was less than 5%. **Conclusions** This cutting force model of biopsy needle quantitatively describes the relationship between the cutting force and geometry of the needle tip. The results can be used for the design and evaluation of new needle, and preoperative planning of needle insertion trajectory. **Key words:** Cutting force; Biopsy needle; Soft tissue; Mechanics

活检是一种利用锋利的针头从病人身体上提取组织(皮肤、器官或肿块等)作为样本来诊断疾病的

方法。但是该方法效率和准确度不高,过程既长又痛苦。初次活检结果阴性的病例中,至少有 10% 再

收稿日期:2011-10-23; 修回日期:2011-12-16

基金项目:教育部新世纪优秀人才支持计划(2007), 山东大学自主创新基金(2011JC023), 山东省自然科学基金(ZR2010EM002), 山东大学研究生自主创新基金(yzc09062)。

通讯作者:张勤河, 教授, 博士研究生导师, Tel: (0531)88392850; E-mail: zhangqh@sdu.edu.cn。

次活检时呈阳性<sup>[1]</sup>。造成这一结果的原因主要有两种<sup>[2-3]</sup>：一是穿刺时靶器官受力使病变组织偏离穿刺线，二是组织的阻力过大或者阻力不均衡致使针头弯曲。

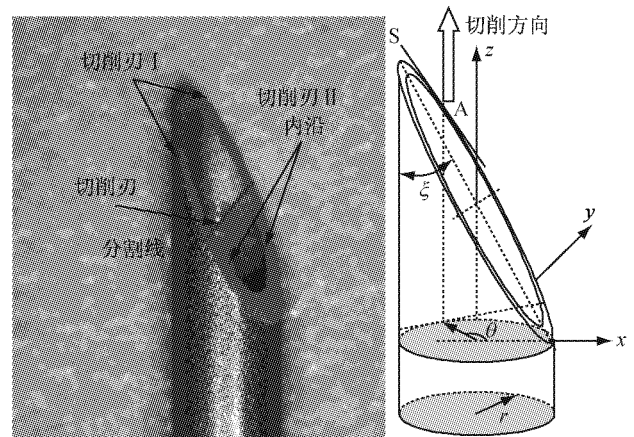
许多学者在该领域进行了研究。Okamura 等<sup>[4]</sup>建立了针尖穿透组织的模型，并将此模型用于牛肝脏穿刺试验。Chanthasoopcephan 等<sup>[5-6]</sup>和 Mahvash 等<sup>[7-8]</sup>研究了软组织破裂，表明提高穿刺速度能够减小组织变形量。Podder 等<sup>[9]</sup>研究了穿刺过程中针刺速度对组织变形和针头弯曲的影响，测量了前列腺短程治疗中针头穿刺力及针尖运动轨迹，表明旋转针头能够减小穿刺力和针头弯曲。以上研究主要从穿刺运动角度出发，采取高速进针策略提高穿刺准确性。但是临床上出于安全考虑，扎针速度不能太快，显然这种解决方案无法从根本上解决减小针头刺入误差的难题。从机械学角度看，活检实质就是用锋利的针头切削软组织的过程，故采用类比法可以将其看作是刀具（针头）切削工件（软组织）的过程<sup>[10]</sup>。金属切削理论表明，刀具几何结构对切削力具有至关重要的影响<sup>[11]</sup>。因此，掌握针头几何结构对软组织切削力的影响规律，有助于开发出高效而锋利的新型穿刺针，提高活检穿刺效率和准确性。

本文在前期研究<sup>[12]</sup>基础上开展软组织（猪肝脏）斜角切削试验，构造了单元刀具单位刃长切削力参数模型，并使用单元刀具综合法建立了活检针切削力数学模型，揭示了针尖几何结构与切削力之间的内在联系，为针头设计、评价及术前穿刺路径规划提供理论依据。

## 1 针尖几何结构及其切削角度分析

### 1.1 针尖几何结构的数学模型

如图1(a)所示，临床上应用最广泛的单面倾斜针头是由空心圆柱和一个平面相交得到的，所得交线为两个空间椭圆，针尖切削刃以图示分割线为界可分为：切削刃I（外椭圆的上半部分）和切削刃II（内椭圆的下半部分）。参考坐标系定义如图1(b)所示：以针头中轴线为 $z$ 轴，正方向与切削方向相同；过针尖倾斜面最低点且与 $z$ 轴垂直相交的直线为 $x$ 轴，同时与 $x, z$ 轴垂直相交的直线为 $y$ 轴。



(a) 实物图

(b) 几何模型

图1 活检针

Fig.1 Biopsy needle (a) Photo, (b) Geometric model

切削刃 I 的参数方程为：

$$\left. \begin{aligned} x(\theta) &= r \cdot \cos \theta \\ y(\theta) &= r \cdot \sin \theta \\ z(\theta) &= r(1 - \cos \theta) \cdot \cot \xi \\ (\pi/2 \leq \theta \leq 3\pi/2) \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

切削刃 II 的参数方程为：

$$\left. \begin{aligned} x(\theta) &= (r - t) \cdot \cos \theta \\ y(\theta) &= (r - t) \cdot \sin \theta \\ z(\theta) &= (r - t)(1 - \cos \theta) \cdot \cot \xi \\ (-\pi/2 < \theta < \pi/2) \end{aligned} \right\} \quad (2)$$

式中： $\theta$ 为切削刃上一点 $A(x, y, z)$ 在 $XOY$ 平面上投影点的方位角。 $\xi$ 为针尖倾斜面顶角， $r$ 为针头外径， $t$ 为针管壁厚。

针头壁厚很小，经分析针尖壁厚对切削角度沿切削刃的分布无影响<sup>[12]</sup>，故将两条椭圆切削刃合并为一条椭圆曲线。A处的切线方向即为该点处切削刃方向，其切向量：

$$s = \{-\sin \theta, \cos \theta, \cot \xi \sin \theta\} \quad (3)$$

### 1.2 针尖参考坐标平面

切削角度是指切削刃、刀面与各参考平面间的夹角，用于确定切削刃、刀面的空间位置。如图2所示为切削角度的参考坐标平面：(1)前面 $A_y$ ：针尖倾斜面，其法向量 $n_y = \{\cos \xi, 0, \sin \xi\}$ 。(2)基面 $P_z$ ：过切削刃上选定点且与主运动方向垂直的平面，其法向向量 $v = \{0, 0, 1\}$ 。(3)切削平面 $P_s$ ：过切削刃选定点与切削刃相切并垂直于基面 $P_z$ 的平面，该面

与后面  $A_\alpha$  重合,其法向量

$$\mathbf{n}_s = \mathbf{s} \times \mathbf{v} = \{\cos \theta, \sin \theta, 0\}$$

(4)法平面  $P_n$ :过切削刃选定点并垂直于切削刃的平面,其法向量为  $\mathbf{s}$ 。(5)正交平面  $P_o$ :过切削刃选定点并垂直于切削刃切线在基面  $P_r$  上的投影的平面。 $P_o$  的法向量

$$\mathbf{t} = \mathbf{n}_s \times \mathbf{tv} = \{\sin \theta, -\cos \theta, 0\}$$

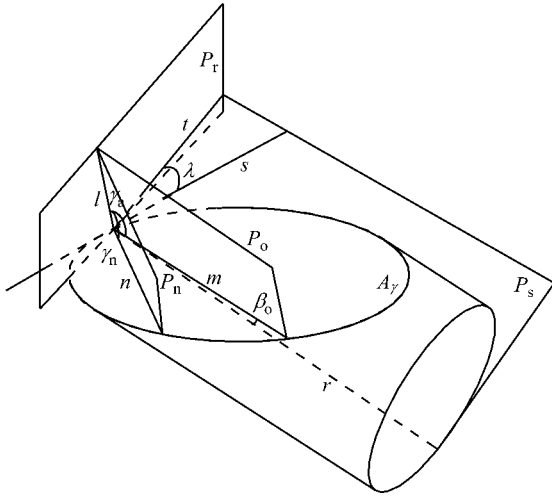


图2 参考坐标平面及切削角度的定义

Fig.2 Reference planes and cutting angles

### 1.3 针尖切削角度

刃倾角  $\lambda$  为切削刃与基面  $P_r$  间的夹角,在切削平面  $P_s$  中度量标注。向量  $\mathbf{s}$  与向量  $\mathbf{t}$  的夹角即为刃倾角  $\lambda$ 。

前角  $\gamma_o$  为前面  $A_y$  与基面  $P_r$  的夹角,在正交平面  $P_o$  中度量标注。向量  $\mathbf{l}$  与向量  $\mathbf{m}$  间的夹角即为前角  $\gamma_o$ ,其中:

$$\mathbf{l} = \mathbf{r} \times \mathbf{v} = \{\cos \theta, \sin \theta, 0\}$$

$$\mathbf{m} = \mathbf{r} \times \mathbf{n}_y = \{-\cos \theta \sin \xi, -\sin \theta \sin \xi, \cos \theta \cos \xi\}$$

法向角  $\gamma_n$  为前面  $A_y$  与基面  $P_r$  的夹角,在法平面  $P_n$  中度量标注。向量  $\mathbf{l}$  与向量  $\mathbf{m}$  间的夹角即为法前角  $\gamma_n$ ,其中:

$$\mathbf{n} = \mathbf{s} \times \mathbf{n}_y = \{\cos \theta \sin \xi, \sin \theta \sin \xi + \sin \theta \cot \xi \cos \xi, -\cos \theta \cos \xi\}$$

楔角  $\beta_o$  是前后面的夹角,在正交平面  $P_o$  中度量标注。向量  $\mathbf{m}$  和向量  $\mathbf{l}$  间的夹角即为楔角  $\beta_o$ 。

基于以上分析,使用两向量夹角余弦定理分别得到了刃倾角  $\lambda$ 、前角  $\gamma_o$ 、法向角  $\gamma_n$  以及楔角  $\beta_o$  的

表达式:

$$\lambda(\xi, \theta) = \arccos \frac{|\mathbf{s} \cdot \mathbf{t}|}{\|\mathbf{s}\| \|\mathbf{t}\|} = \arccos \frac{1}{\sqrt{1 + \cot^2 \xi \sin^2 \theta}} \quad (4)$$

$$\gamma_o(\xi, \theta) = \arccos \frac{|\mathbf{l} \cdot \mathbf{m}|}{\|\mathbf{l}\| \|\mathbf{m}\|} = \arccos \frac{|\sin \xi|}{\sqrt{\sin^2 \xi + \cos^2 \theta \cos^2 \xi}} \quad (5)$$

$$\gamma_n(\xi, \theta) = \arccos \frac{|\mathbf{l} \cdot \mathbf{n}|}{\|\mathbf{l}\| \|\mathbf{n}\|} = \arccos \sqrt{\cos^2 \theta \sin^2 \xi + \sin^2 \theta} \quad (6)$$

$$\beta_o(\xi, \theta) = \arccos \frac{|\mathbf{m} \cdot \mathbf{r}|}{\|\mathbf{m}\| \|\mathbf{r}\|} = \arccos \frac{|\cos \theta \cos \xi|}{\sqrt{\sin^2 \xi + \cos^2 \theta \cos^2 \xi}} \quad (7)$$

式(4)~(7)给出了针尖切削刃上的切削角度分布规律,易知刃倾角  $\lambda$ 、前角  $\gamma_o$ 、法向角  $\gamma_n$  以及楔角  $\beta_o$  的大小仅与针尖顶角  $\xi$  及方位角  $\theta$  有关,与针头半径  $r$  及针头壁厚  $t$  无关。

## 2 活检针切削力建模

### 2.1 单元刀具的几何参数

单元刀具是由前、后面及其交线(切削刃)组成的,是构成复杂刀具的基本元素和基础。几何形状复杂的针尖可以看作是一系列单元刀具的组合,在切削过程中,各单元刀具并行地进行切削<sup>[11]</sup>。根据这一观点,将针尖切削刃离散成多个单元刀具,通过试验可以测量每一把单元刀具的切削力,进而通过“累加”可以获得整个切削刃的切削力。

设针尖切削刃分割为  $n$  段单元刀具,其分割点坐标为  $x_i, y_i, z_i, i = 1, 2, \dots, n$ 。每一段单元刀具由两分割点连成线段代替,则单元刀具的刃长:

$$b_i = \sqrt{(x_{i+1} - x_i)^2 + (y_{i+1} - y_i)^2 + (z_{i+1} - z_i)^2} \quad (8)$$

将式(1)代入式(8)可求得单面倾角针尖单元刀具的刃长,即

$$b_i = r \cdot [(1 + \cos^2 \xi)(\cos \theta_{i+1} - \cos \theta)^2 + (\sin \theta_{i+1} - \sin \theta)^2]^{1/2} \quad (9)$$

由式(4)和式(6)求得每一分割点处的刃倾角和法前角,故单面针尖切削刃分割为单元刀具可表

示为 $\{\lambda_i, \gamma_n, b_i\}$ 。

## 2.2 针尖切削力的泛函模型

**2.2.1 单位刃长切削力参数模型** 设计切削角度为 $(\lambda_i, \gamma_n)$ , 刃长为单位长度的一系列单元刀具, 通过切削试验获得每一把单元刀具的切削力, 使用二元非线性回归法构建单位长度单元刀具的切削力参数模型<sup>[14]</sup>:

$$f(\lambda, \gamma_n) = a + \sum_{i=1}^m b_i \lambda^i + \sum_{i+j=2}^m c_{i+j} \lambda^i \gamma_n + \sum_{j=1}^m d_j \gamma_n \quad (10)$$

**2.2.2 针尖切削力泛函模型** 对于切削刃曲线为 $\Gamma$ 的针尖, 其切削力为各单元刀具并行切削时切削力之和, 在数值上等于单位刃长切削力函数沿切削刃曲线的积分, 即

$$F_\Gamma = \int_\Gamma f(\lambda, \gamma_n) d\Gamma \quad (11)$$

活检针相比单元刀具很小, 切削软组织造成的应力集中比单元刀具强烈的多, 这种强烈的应力集中有利于针尖刺破软组织, 从而减小切削力。考虑到针尖切削与单元刀具切削两者之间的差别, 式(11)乘以比例因子 $S$ , 将其改写为

$$F_\Gamma = S \int_\Gamma f(\lambda, \gamma_n) d\Gamma \quad (12)$$

将式(4)和式(6)代入式(12)得针尖切削刃切削力的数学模型:

$$F_{\text{needle}} = S \int_\Gamma f(\lambda(\xi, \theta), \gamma_n(\xi, \theta)) d\Gamma \quad (13)$$

当分割点足够多时, 使用 $b_i$ 取代式(13)中的 $d\Gamma$ , 即:

$$F_{\text{needle}} = S \sum_{i=1}^n b_i \cdot f(\lambda_i, \gamma_{ni}) \quad (14)$$

式中 $f(\lambda_i, \gamma_{ni})$ 由式(10)求得。

## 3 生物软组织切削试验

### 3.1 生物软组织切削试验装置

生物软组织, 如肌肉、皮肤以及角膜等是典型的两向异性、非均匀非线性黏弹性物体<sup>[14-15]</sup>。进行软组织切削试验, 首先需要开发组织试验装置。针对生物软组织切削的实际需求, 搭建了由驱动机构、固定装置、切削刀片以及测量装置组成的试验平台, 如图3所示。驱动机构选用 P01-23S  $\times$  80/210  $\times$  270 型号直线电机驱动。固定装置采用 60 mm  $\times$  60 mm

$\times$  100 mm 的载物盒, 载物盒内的隔板可将其分成 3 部分, 根据试样大小选择不同隔板。切削过程中载物盒内壁和隔板对组织有支撑作用, 它模拟了体内其他脏器对组织试样的支撑作用, 使试样在切削过程中保持与活体组织近似的固定状态。切削刀具材料采用 60 钢。数据采集采用高精度 ATI 六自由度力/力矩测量系统(型号 SI-25-0.25),  $x, y$  轴量程为 25 N,  $z$  轴量程为 35 N, 分辨率为 6.25 mN。

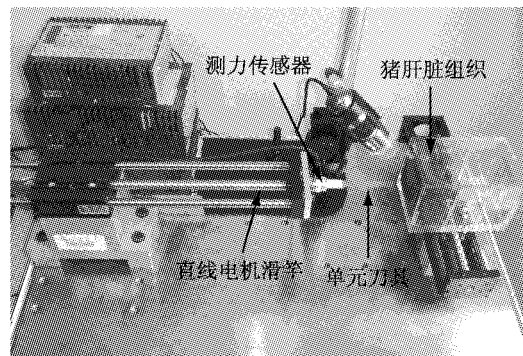


图3 软组织切削试验装置图

Fig.3 Photo of soft tissue cutting setup

### 3.2 试验材料

本试验选用的带有包膜的猪肝组织为切削对象。为减小外部环境对试验结果的影响, 所有试验均在屠宰后 3 h 内完成。试验前首先使用手术刀将猪肝组织切割成 60 mm  $\times$  60 mm  $\times$  40 mm 的试样备用。

### 3.3 试验方案

分别使用单元刀具和活检针进行试验, 数据采集频率均设置为 100 Hz。

**3.3.1 单元刀具切削试验** 使用单元刀具对肝脏组织进行切削并测量切削力。每种刀片进行 10 次切削。

**3.3.2 活检针穿刺试验** 分别使用针尖顶角 $\xi$ 为 30°、40°、45°、50°以及 60°的 18 G 活检针进行穿刺试验, 使用 ATI 测力传感器测量穿刺力, 每种活检针进行 10 次穿刺。

## 4 结果

### 4.1 切削角度在针尖切削刃的分布

图4所示为针尖顶角 $\xi = 30^\circ$ 的单面活检针切削刃上刃倾角、前角、法前角和楔角沿切削刃的分布曲

线。刃倾角和法前角是设计、制造单元刀具的重要参数,图 5、6 分别为刃倾角和法前角沿切削刃的分布曲线,易知针尖顶角  $\xi$  影响了刃倾角和法前角的分布,当方位角  $\theta$  相同时,较大的针尖顶角  $\xi$  对应着较小的刃倾角和法前角。

#### 4.2 单元刀具的刃倾角和法前角

由图 4~6 可知,针尖切削角度分布曲线具有周期性(周期为  $\pi$ )和对称性(对称轴为  $\theta = k \cdot \pi/2$ ),故考察针尖切削性能时只需分析  $0^\circ \sim 90^\circ$  方位角上对应的切削刃。分别将  $30^\circ$ 、 $45^\circ$  和  $60^\circ$  针尖切削刃分割成 6 等分,根据式(4)和式(6)计算每一分割点的刃倾角和法前角。由于磨床上难于加工法前角小于  $15^\circ$  的刀片,故舍弃法前角小于  $15^\circ$  的单元刀具,于是共得到 16 把单元刀具,其切削角度如表 1 所示。

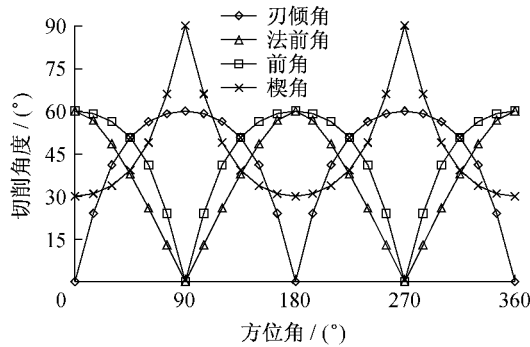


图 4 切削角度沿针尖切削刃的分布曲线(针尖顶角  $\xi = 30^\circ$ )  
Fig. 4 Distribution curve of cutting angles along the needle cutting edge (needle bevel angle  $\xi = 30^\circ$ )

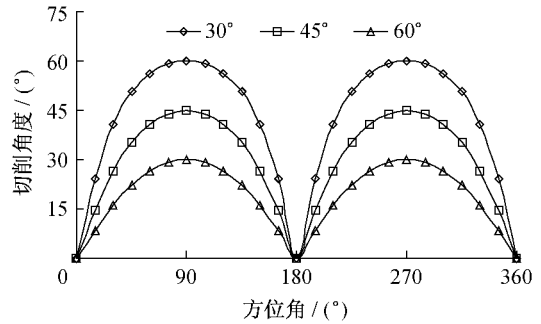


图 5 刃倾角在针尖切削刃上的分布曲线(针尖顶角  $\xi$  分别为  $30^\circ$ 、 $45^\circ$  和  $60^\circ$ )  
Fig. 5 Distribution curve of inclination angles along the needle cutting edges (needle bevel angles  $\xi$  are  $30^\circ$ ,  $45^\circ$  and  $60^\circ$ )

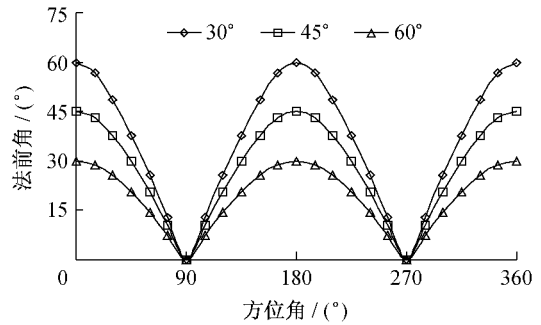


图 6 法前角在针尖切削刃上的分布曲线(针尖顶角  $\xi$  分别为  $30^\circ$ 、 $45^\circ$  和  $60^\circ$ )  
Fig. 6 Distribution curve of normal rake angles along the needle cutting edges (Needle bevel angles  $\xi$  are  $30^\circ$ ,  $45^\circ$  and  $60^\circ$ )

表 1 单元刀具的切削角度

Tab. 1 Cutting angle of the elementary cutting tools

60°针尖			45°针尖			30°针尖		
刃倾角/(°)	法前角/(°)	编号*	刃倾角/(°)	法前角/(°)	编号*	刃倾角/(°)	法前角/(°)	编号
0	30	1	0	45	2	0	60	3
8	29	4	15	43	5	24	57	8
16	26	6	27	38	10	41	49	13
22	21	7	35	30	11	51	38	14
27	14	9	41	21	12	56	26	15
—	—	—	—	—	—	59	15	16

\* 为便于安排试验,单元刀具按照刃倾角和法前角由小到大的顺序编号

#### 4.3 单元刀具单位刃长切削力参数模型

图 7 为单元刀具(刃倾角和法前角分别为  $0^\circ$  和  $60^\circ$ )切削肝脏组织时的切削力曲线,切削速度为

5 mm/s。坐标原点表示刀片与肝脏组织接触,随着刀片继续进给,刀片与组织之间的作用力逐渐增大,直到点 A 结束,此阶段组织仅发生弹性变形。当刀

片继续进给,组织突然破裂,此时刀片切入软组织,切削力突然下降,此阶段为组织切削阶段;刀片进给到顶点 B 时停止进给,刀具与软组织间的作用力迅速减小。

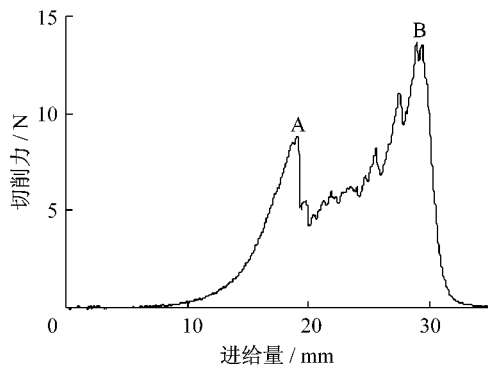


图7 软组织切削试验结果  
Fig.7 Experimental results of soft tissue cutting

定义 AB 段测量结果的平均值为单元刀具的切削力,作为衡量刀具的切削性能的指标。对于刃倾角不等于零的单元刀具,在 A 点附近整个刀刃并未全部刺入软组织,仅有部分刀刃参与切削,因此取 AB 阶段后半部分测量值的平均值作为该单元刀具的切削力。使用表 1 中所列单元刀具进行切削试验,使用非线性回归方法构建单位刃长切削力的三次多项式参数模型:

$$f(\lambda, \gamma_n) = 0.1025 + 2.738\lambda + 3.396\gamma_n - 4.875\lambda\gamma_n - 6.981\lambda^2 - 4.299\gamma_n + 2.291\lambda^2\gamma_n + 2.694\lambda\gamma_n + 4.083\lambda^3 + 1.651\gamma_n \quad (15)$$

式(15)为单位刃长切削力模型,  $R^2 = 0.99$ , 图 8 给出了参数模型拟合值与试验值。

#### 4.4 活检针切削力的试验值和预测值

活检针穿刺试验结果如表 2 所示。顶角  $\xi$  为  $30^\circ$  和  $60^\circ$  单面针尖的穿刺力分别为 1.33 N 和 1.56 N,这是因为  $30^\circ$  针尖切削刃分布着更大的刃倾角和切削前角,大的刃倾角和法前角有利于针尖以更小的力刺入软组织。但针尖切削力等于各个单元刀具并行切削时的切削力之和,它不仅与单元刀具的切削角度有关,还与单元刀具的刃长有关,这在切削试验表现为切削力与针尖顶角之间的非线性关系。

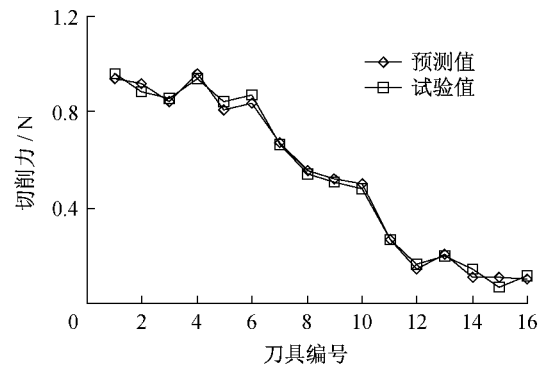


图8 单位刃长切削力预测值与试验值  
Fig.8 Experiment and prediction results for the specific cutting force

使用二次多项式拟合式中的比例因子  $S$ ,  $S = -1.47\xi^2 + 2\xi$ ,  $R^2 = 0.99$ 。于是活检针切削力泛函模型为:

$$F_{\text{needle}} = (-1.47\xi^2 + 2\xi) \times \int_{\Gamma} f(\lambda(\xi, \theta), \gamma_n(\xi, \theta)) d\Gamma \quad (16)$$

表2 针尖切削力的试验值与预测值  
Tab.2 Experiment and prediction results for the cutting forces of biopsy needle tip

针尖顶角/ $^\circ$	试验值/N	预测值/N	相对误差/%
30	1.33 $\pm$ 0.13	1.29	3.01
40	1.32 $\pm$ 0.34	1.28	3.03
45	1.38 $\pm$ 0.38	1.43	-3.62
50	1.59 $\pm$ 0.30	1.57	1.26
60	1.56 $\pm$ 0.19	1.52	2.56

由表 2 可知,泛函模型预测值与试验值具有较好的一致性,在该模型中刃倾角  $\lambda$  和法前角  $\gamma_n$  是针尖切削力模型的自变量,同时又是针尖几何结构(针尖顶角  $\xi$  和方位角  $\theta$ )的函数。

## 5 结论

(1) 借鉴传统切削理论建立了活检针针尖几何结构的数学模型,构建了针尖切削角度的表达方法,并得出了刃倾角  $\lambda$ 、前角  $\gamma_o$ 、法前角  $\gamma_n$  以及楔角  $\beta$ 。沿针尖切削刃的分布规律,它们仅与针尖顶角  $\xi$  及方位角  $\theta$  有关,与针头半径及针头壁厚无关。

(2) 根据切削角度在针尖切削刃上的分布规律设计制造了软组织切削试验用的单元刀具,搭建了

一套软组织切削试验平台进行软组织切削试验,使用非线性回归法建立了刀具单位刃长切削力参数模型。

(3) 采用单元刀具综合法建立了针尖切削软组织的切削力泛函模型,该模型反映了针尖切削刃几何形状对针尖切削力的影响,为针尖建模、评价及术前穿刺路径规划提供了理论依据。

#### 参考文献:

- [1] 乔勇, 胡晓勇, 徐月敏, 等. 经直肠超声引导下重复穿刺活检在前列腺癌高危人群中的诊断价值(附45例分析) [J]. 中国男科学杂志, 2008, 22(3): 29-31.
- [2] Deurloo EE, Gilhuijs KG, Schultze Kool LJ, *et al.* Displacement of breast tissue and needle deviations during stereotactic procedures [J]. *Invest Radiol*, 2001, 36(6): 347-353.
- [3] Roberson PL, Narayana V, McShan DL, *et al.* Source placement error for permanent implant of the prostate [J]. *Med Phys*, 1997, 24(2): 251-257.
- [4] Okamura AM, Simone C, O'Leary MD. Force modeling for needle insertion into soft tissue [J]. *IEEE Trans Biomed Eng*, 2004, 51(10): 1707-1716.
- [5] Chanthasopeephan T, Desai JP, Lau ACW. Study of soft tissue cutting forces and cutting speeds [J]. *Medical Meets Virtual Reality*, 2004, 98: 56-62.
- [6] Chanthasopeephan T, Desai JP, Lau ACW. Modeling soft-tissue deformation prior to cutting for surgical simulation: Finite element analysis and study of cutting parameters [J]. *IEEE Trans Biomed Eng*, 2007, 54(3): 349-359.
- [7] Mahvash M and Dupont PE. Mechanics of dynamic needle insertion into a biological material [J]. *IEEE Trans Biomed Eng*, 2010, 57(Compendex): 934-943.
- [8] Mahvash M and Okamura AM. A fracture mechanics approach to haptic synthesis of tissue cutting with scissors [C]//World Haptics Conference: First Joint Eurohaptics Conference and Symposium on Haptic Interfaces for Virtual Environment and Teleoperator Systems. Pisa, Italy: [s. n.], 2005: 356-362, 669.
- [9] Podder TK, Clark DP, Fuller D, *et al.* Effects of velocity modulation during surgical needle insertion [J]. *Conf Proc IEEE Eng Med Biol Soc*, 2005, 6: 5766-5770.
- [10] Shih AJ. Biomedical manufacturing: A new frontier of manufacturing research [J]. *J Manuf Sci Eng*, 2008, 130(2): 021009-021008.
- [11] 师汉民. 金属切削理论及其应用新探[M]. 武汉: 华中科技大学出版社, 2003.
- [12] Moore JZ, Zhang Q, McGill CS, *et al.* Modeling of the plane needle cutting edge rake and inclination angles for biopsy [J]. *J Manuf Sci Eng*, 2010, 132(5): 051005-051008.
- [13] Moore JZ, Malukhin K, Shih AJ, *et al.* Hollow needle tissue insertion force model [J]. *CIRP Annals - Manufacturing Technology*, 2011, 60(Compendex): 157-160.
- [14] 吴新丰, 康国政, 钱林茂. 猪背部皮肤生物力学特性的实验研究 [J]. *医用生物力学*, 2009, 24(6): 452-457.  
Wu XF, Kang GZ, Qian LM. Experimental study on biomechanical property of the skin in pigs back [J]. *J Med Biomech*, 2009, 24(6): 452-457.
- [15] 姜黎, 包芳军, 张东升, 等. 膨胀试验测定猪眼角膜生物力学参数的研究 [J]. *医用生物力学*, 2009, 24(2): 123-126.  
Jiang L, Bao FJ, Zhang DS, *et al.* Determining the ex vivo biomechanical properties of porcine cornea with inflation test [J]. *J Med Biomech*, 2009, 24(2): 123-126.