

文章编号:1004-7220(2020)05-0414-07

# 砍击案件中刀器锋利程度对前臂损伤的影响

郝卫亚<sup>1</sup>, 山松俊杰<sup>1,2</sup>, 石屹<sup>3</sup>, 杨超鹏<sup>3</sup>, 吴成亮<sup>1</sup>, 何卫<sup>1</sup>, 辛振芳<sup>4</sup>, 王坚<sup>3</sup>, 王明直<sup>3</sup>

(1. 国家体育总局 体育科学研究所, 北京 100061; 2. 中国农业大学 理学院, 北京 100083;

3. 公安部物证鉴定中心, 北京 100038; 4. 北京机械设备研究所, 北京 100854)

**摘要:**目的 定量探究刀器砍击案件中刀器锋利程度对前臂损伤的影响。方法 以人体 CT 图像和砍刀原型为基础, 建立锐利、钝口和宽口 3 种锋利程度的刀器和上肢有限元模型, 对刀器以 4 m/s 速度、10 ms 持续时间砍击前臂的过程进行仿真, 分析接触力、砍创尺寸和能量变化。结果 锐利、钝口和宽口刀器在砍击过程中分别于 65、85、95 ms 接触尺骨, 砍击力峰值分别为 846、1 064、1 865 N, 砍创长度分别为 135.64、105.47、99.23 mm, 深度分别为 38.77、27.81、18.74 mm。随着刀器锋利程度降低, 创口形成速度减慢、长度和深度减小, 砍击力增加。与钝口和宽口刀器相比, 锐利刀器砍击时模型系统总能量明显较大, 内能也较高, 但所产生的系统动能却较小。结论 建立定量评估刀器砍击上肢创口形成过程的方法。研究结果深化了对刀器砍创形成生物力学机制的理解, 为砍杀案件的法医鉴定和法庭审判提供参考依据。

**关键词:** 锐器损伤; 上肢; 法医生物力学; 有限元方法

中图分类号: R318.01 文献标志码: A

DOI: 10.16156/j.1004-7220.2020.05.005

## The Influence of Knife Sharpness on Forearm Wounds in Knife Slash Cases

HAO Weiya<sup>1</sup>, SHAN Songjunjie<sup>1,2</sup>, SHI Yi<sup>3</sup>, YANG Chaopeng<sup>3</sup>, WU Chengliang<sup>1</sup>, HE Wei<sup>1</sup>, XIN Zhenfang<sup>4</sup>, WANG Jian<sup>3</sup>, WANG Mingzhi<sup>3</sup>

(1. China Institute of Sport Science, General Administration of Sport of China, Beijing 100061, China; 2. College of Science, China Agricultural University, Beijing 100083, China; 3. Institute of Forensic Science, Ministry of Public Security, Beijing 100038, China; 4. Beijing Institute of Machinery and Equipment, Beijing 100854, China)

**Abstract: Objective** To quantitatively explore the influence of knife sharpness on forearm wounds in knife slash cases. **Methods** The finite element models of the upper limb and knives with 3 degrees of sharpness (with sharp blade, blunt blade, wide blade) were developed based on human CT images and prototype of slash knife. The slash by 3 kinds of knives on the forearm at velocity of 4 m/s and duration of 10 ms was simulated, so as to analyze changes in contact forces, wound dimensions and energy. **Results** During the slash by knives with sharp, blunt, wide blade, the blades reached the ulna at about 65, 85, 95 ms, respectively. The corresponding slash forces were 846, 1 064 and 1 865 N; the wound lengths were 135.64, 105.47 and 99.23 mm; the wound depths were 38.77, 27.81 and 18.74 mm. With the sharpness of blade decreasing, the wound formation was slowed, the length and depth decreased and the slash force increased. The model system for slash knife with sharp blade had obviously greater total energy and inner energy, but smaller kinetic energy, compared with slash

收稿日期:2020-02-11; 修回日期:2020-03-28

基金项目:国家重点研发计划项目(2017YFC0803802)

通信作者:郝卫亚, 研究员, 博士生导师, E-mail: haoweiya@ciss.cn

knife with blunt blade and wide blade. **Conclusions** The method for quantitatively assessing wound formation in knife slash upon the forearm was developed. The research findings deepen the understanding of biomechanical mechanism of wound formation by knife slash, and provide new scientific means for forensic investigation and court trial of knife slash cases.

**Key words:** sharp injury; upper limb; forensic biomechanics; finite element method

砍击伤害是锐器伤害的主要类型之一<sup>[1]</sup>。砍击案件刑事调查和法庭审判关键要素包括4个方面<sup>[2]</sup>:①损伤(砍创)的形态学特征,即伤口部位、几何尺度、形态等;②砍击刀器的判别,包括刀器数量、类型、材料、质量、刃数、刃长和锋利程度等;③砍击行为动作特征,包括伤害人和被害人之间空间体位关系、砍击动作空间范围、砍击角度、速度和砍击力等;④伤害人个体特征,包括伤害人数量、性别、年龄、身高、体质量、健康状况、职业等信息。这4种要素相互关联,构成砍击案件研判和庭审的要素体系<sup>[2]</sup>。

砍击案件发生后,法医等刑事侦查人员通常实施砍创检验和现场勘测,根据受害人砍创的数量、部位、形态、严重程度,并结合现场物证进行综合判断,推测砍击行为发生过程;同时,也对案件的未知要素进行推测,包括刀器特征、伤害人特征等。现实刑事调查中,砍击案件复杂多变,受到多种因素的影响,包括伤害人个性特征、刀器特点、现场环境以及受害人的反抗或者躲避等<sup>[1]</sup>。虽然上述诸多因素之间存在着紧密关联,但目前尚未能完全定量阐明各因素间的逻辑关系。当前砍击案件研判依靠经验进行人工推断,导致要素之间关联性差,影响着案件侦破和庭审准确判定。

生物力学在砍击成伤机制中具有重要的作用<sup>[1]</sup>。根据案例初步研究表明,骨质、刀痕角度与刀器之间的关系可以通过生物力学研究确立;产生创口的工具痕迹判别技术,有助于厘清刀器类型、形状尺寸等因素,这些因素能够作为犯罪案件的侦查证据甚至判别死亡原因<sup>[3]</sup>。在现实砍击案件中,所使用的刀器会呈现出不同锋利程度。从定性角度来说,愈锐利的刀锋砍伤效果愈明显。本文以传统的损伤力学理论为基础,通过生物力学建模与仿真方法,定量探讨砍刀锋利程度对砍创形成的影响,为深化砍创成伤机制提供科学依据。

## 1 损伤模式与理论

损伤力学理论中韧性破坏存在两种形式,一种是拉伸破坏,一种是剪切破坏。研究表明,材料的塑性变形能增加到一定值时,材料因产生宏观裂纹而丧失承载能力<sup>[4]</sup>;材料在一定应变率和温度条件下,导致材料破坏的主要原因是塑性变形时的最大拉应力<sup>[5]</sup>;应力、应变随时间变化历史对材料的破坏(韧性断裂)具有一定影响,而且静水应力分量会改变材料韧性断裂过程<sup>[6]</sup>。拉伸破坏大多发生在脆性材料,而剪切破坏大多发生在塑性材料。骨组织在韧性断裂时,对应的微观形貌表现为微观孔洞体积增加,断裂后断口会被孔洞覆盖,故骨组织的失效模式可以采用拉伸型韧性断裂模型模拟。相对应的,软组织的微观形貌表现为很少量的孔洞形成,孔洞形貌变化不大,但是孔洞沿着剪切带的方向将会被显著地拉长,故而软组织的失效模式可采用剪切型韧性断裂模型模拟。

应用拉伸损伤模型作为骨组织的损伤模型。等效塑性应变是关于应力三轴比和等效塑性应变率的函数:

$$\bar{\varepsilon}_D^{pl} = f(\eta, \dot{\varepsilon}^{pl})$$

式中:  $\dot{\varepsilon}^{pl}$  为等效塑性应变率,  $\bar{\varepsilon}_D^{pl} = \left( \frac{2}{3} \varepsilon_{ij}^{pl} \varepsilon_{ij}^{pl} \right)^{\frac{1}{2}}$ <sup>[7]</sup>。

当塑性应变达到阈值  $\varepsilon_0^{pl}$  时,材料内部开始有损伤产生。拉伸类型损伤状态变量定义为:  $\omega_D = \int \frac{1}{\bar{\varepsilon}_D^{pl}(\eta, \dot{\varepsilon}^{pl})} d\bar{\varepsilon}^{pl}$  当满足  $\omega_D = 1$  时,即认为塑性应变达到阈值,损伤萌生。在分析计算时,对每个增量步设置以观察损伤状态变化:

$$\Delta\omega_D = \frac{\Delta\bar{\varepsilon}^{pl}}{\bar{\varepsilon}_D^{pl}(\eta, \dot{\varepsilon}^{pl})} \geq 0$$

产生损伤后,随着材料继续承受载荷,损伤将按照线性方式逐步演化:

$$d = \frac{\bar{u}^{pl}}{\bar{u}_f^{pl}} = \frac{L\bar{\epsilon}^{pl}}{\bar{u}_f^{pl}}$$

式中:  $L$  为单元特征长度;  $\bar{u}^{pl}$  为等效塑性位移;  $\bar{u}_f^{pl}$  为材料失效时的等效塑性位移。当等效塑性应变增加时,材料损伤也逐渐增加,直至损伤  $d = 1$ ,材料达到完全失效。随着材料损伤的发生,性能随之退化,其弹性模量改变为:  $\tilde{E} = E(1 - d)^{[7]}$ 。

软组织按照剪切损伤模型失效。等效塑性应变是关于剪切应力比及等效塑性应变率的函数:

$$\bar{\epsilon}_s^{pl} = f(\theta_s, \dot{\bar{\epsilon}}^{pl})$$

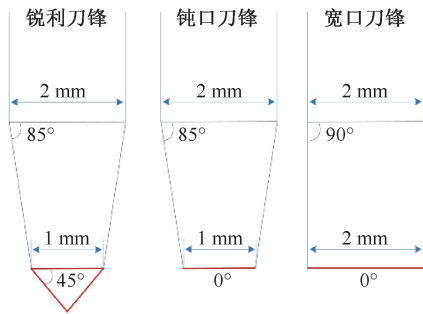
式中:  $\theta_s$  为剪切应力比,  $\theta_s = (\sigma_m + k_s \bar{\sigma}) / \tau_{max}$ ;  $k_s$  为材料常数;  $\tau_{max}$  为最大剪切应力。定义拉伸类型损伤状态变量为:

$$\omega_s = \int \frac{1}{\bar{\epsilon}_s^{pl}(\theta_s, \dot{\bar{\epsilon}}^{pl})} d\bar{\epsilon}^{pl}$$

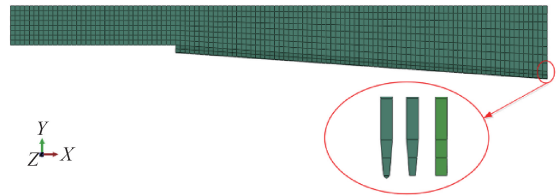
当  $\omega_s = 1$  满足时,即认为塑性应变达到阈值,损伤会萌生。并计算每个增量步中  $\omega_s$  增量为:

$$\Delta\omega_s = \frac{\Delta\bar{\epsilon}^{pl}}{\bar{\epsilon}_s^{pl}(\theta_s, \dot{\bar{\epsilon}}^{pl})} \geq 0$$

当损伤产生后,若结构继续承载,损伤将以与拉伸类型损伤模型相同的方式逐渐演化,并且随着损伤的增大,材料性能也将以相同方式退化,直至  $d = 1$ ,材料刚度降为 0,完全失去承载能力<sup>[7]</sup>。



(a) 3种刀口形貌参数



(b) 刀具网格划分

图 1 3 种不同锋利程度刀具的外形及其有限元模型

Fig.1 Shapes of 3 different sharpness knives and their finite element models (a) Geometric parameters of 3 knives with different blades, (b) Element meshing of the knife

采用 HyperMesh 2017 软件对上肢和刀器的实体三维模型进行单元网格划分,均采用四面体网格,网格尺度为 3 mm。单独对上肢砍伤区域进行网格细化处理,网格尺度为 1 mm。表 1 为上肢和刀器有限元模型包含的节点和单元数目以及各自的

## 2 有限元建模与数值分析

### 2.1 数据收集与模型建立

选取 1 名健康男性志愿者(52 岁,身高 171 cm,体质量 72 kg)的左上肢 CT 图像 1 225 张,图像层间距为 1 mm,存储为 DICOM 格式。

将原始 CT 图像导入 Mimics 19.0 软件后,计算生成冠状面图和矢状面图,通过调节阈值范围分别提取骨组织和软组织。使用区域增长依次对骨组织及软组织蒙罩(mask)进行编辑,随后对软组织蒙罩进行重建,初步建立各组织结构的三维几何模型。将分割组织模型以 STL 格式输出,存储为不同的几何模型文件。将所有的骨骼模型及软组织模型文件导入 Geomagic Studio 2015 软件中,进行平滑、减少噪声、优化边缘等处理。最后,运用软件精确曲面功能自动合并曲面片,并应用自动曲面化,形成包括骨组织和软组织模型的人体上肢几何模型。

选取公安机关收缴的 1 把砍刀(50 cm×5 cm, 0.31 kg)为原型,采用游标卡尺测量几何参数后,应用 SolidWorks 2016 软件建立刀器几何模型。调整刀器模型的刀锋几何形状,分别形成三角、梯形和矩形刀锋,代表锐利、钝口和宽口 3 种锋利状态的刀器(见图 1)。

质量。

### 2.2 模型装配及材料参数

对划分后的网格模型在 ABAQUS 2019 有限元软件系统中组合装配,上肢骨组织包裹于软组织内部,刀器置于前臂上方(见图 2)。

表1 上肢和刀具三维有限元模型参数

Tab.1 Parameters for finite element models of the upper limb and knives

模型	节点	单元	质量/kg
上肢	30 138	154 022	3. 210
锐利刀具	2 390	1 070	0. 311
钝口刀具	2 470	1 149	0. 310
宽口刀具	2 470	1 149	0. 314

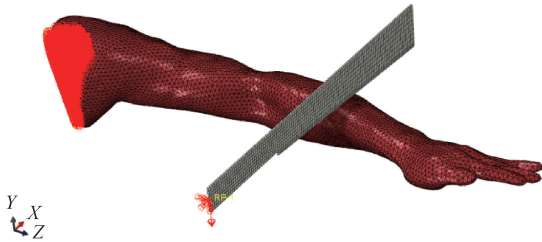


图2 刀具砍击前臂有限元模型

Fig.2 Finite element model of knife slash upon the forearm

刀具为钢质各向同性材料,密度 $\rho = 7.8 \text{ g/mm}^3$ ,泊松比 $\nu = 0.3$ ,弹性模量 $E = 194 \text{ GPa}$ 。不考虑上肢中骨和软组织各向异性的性质,其材料属性设置为:软组织 $\rho = 0.938 \text{ mg/mm}^3$ , $\nu = 0.48$ , $E = 2.53 \text{ MPa}$ ;骨组织 $\rho = 1.7 \text{ g/mm}^3$ , $\nu = 0.35$ , $E = 13.8 \text{ GPa}$ <sup>[8-9]</sup>。软组织的失效模式设置为剪切失效,骨组织的失效模式设置为韧性断裂失效。

### 2.3 位移边界及加载条件

将刀具定义为刚体,将其属性耦合至刀柄处的参考点 $RP_1$ ,其质量特性为等效体积与密度的乘积;约束刀具 $X$ 、 $Z$ 方向自由度,在 $Y$ 方向施加位移,模拟刀具按 $4 \text{ m/s}$ 速度砍向前臂。接触采用显式动力学分析(ABAQUS/Explicit)的通用接触,接触属性定义为切向摩擦系数为 $0.3$ ,法向为硬接触<sup>[10]</sup>。

采用显式动力学(ABAQUS/Explicit)算法进行分析,分别仿真锐利、钝口和宽口3种刀锋的刀具,以切入角度为 $90^\circ$ ,速度为 $4 \text{ m/s}$ 砍击前臂(见图2)。仿真分析的总时间为 $10 \text{ ms}$ ,时间步长为 $2 \text{ ms}$ ,输出接触力、砍创尺寸和能量变化数据。

## 3 结果

### 3.1 砍创形成过程和砍击力变化

图3所示为锐利、钝口和宽口3种刀锋刀具在 $0$ 、 $20$ 、 $40$ 、 $60$ 、 $80$ 、 $100 \text{ ms}$ 瞬时的砍创形成状况。刀口越锋利,砍创深度越大。锐利、钝口和宽口刀锋

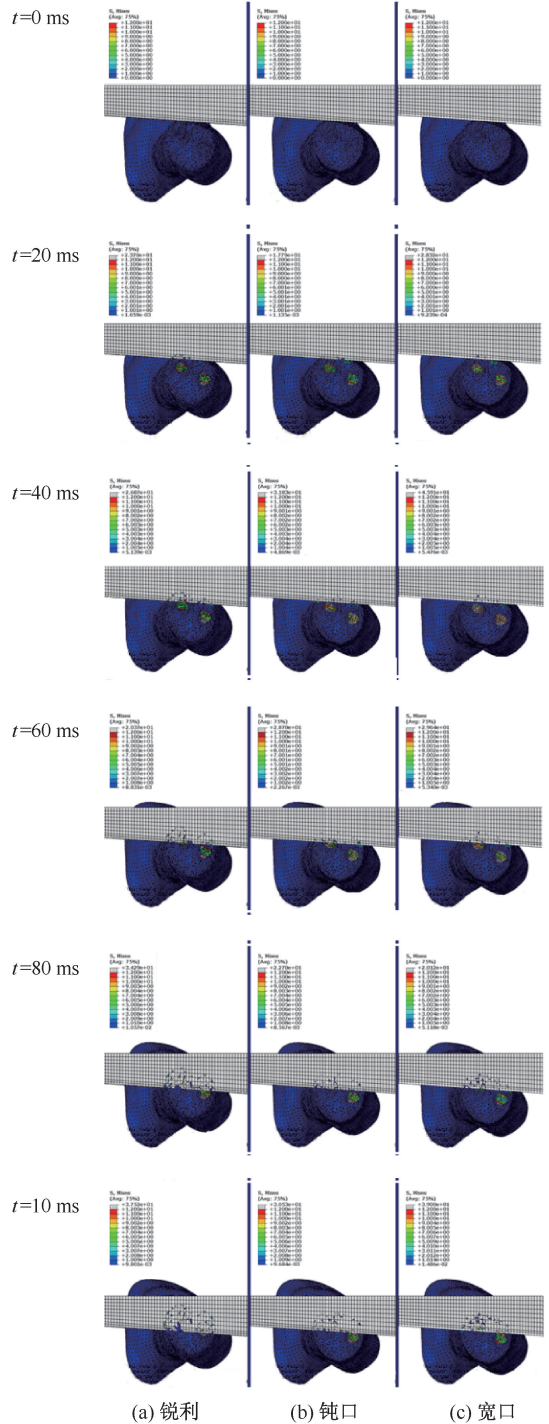


图3 不同锋利程度刀具的砍创形成过程

Fig.3 Formations of slash wounds by knives with different sharpness (a) Sharp blade, (b) Blunt blade, (c) Wide blade

的刀具在接触桡骨的时刻分别为 $35$ 、 $40$ 、 $45 \text{ ms}$ ;接触尺骨的时刻分别为 $65$ 、 $85$ 、 $95 \text{ ms}$ 。这种砍切时空



差异表征了不同锋利程度的刀器渗入人体组织的速度快慢,其原因是刀器受到的阻力不同(见图4)。锐利、钝口和宽口刀器的刀器所受反力的峰值依次增加,分别为846、1 064、1 865 N。

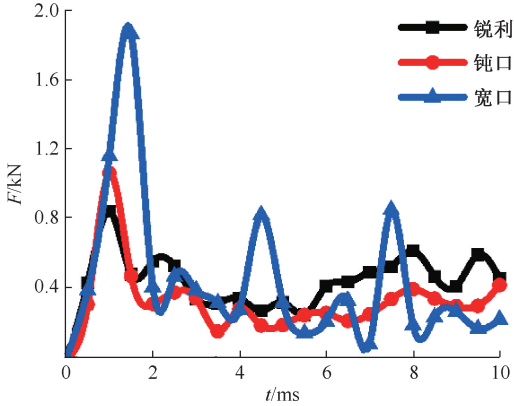


图4 不同锋利程度刀器砍击力对比

Fig.4 Comparison of slash forces by the knives with different sharpness

### 3.2 砍伤形态学

为便于对砍伤形态进行评价,定义创口的深度、长度和宽度3个指标。以刀刃在组织内的渗入方向位移作为砍伤深度,以刀器行进至最深位置时

所形成的包络圆弧长度为创口长度,以刀器的宽度作为创口的宽度。

砍创形成后,由创口的形态学指标可见,锋利、钝口和宽口刀器的砍创深度依次减少,长度差异不大,而宽度与刀器的背部厚度相同(见表2)。

表2 不同锋利程度刀器砍创形态学指标

Tab.2 Morphological parameters of wounds by knives with different sharpness

指标	锐利	钝口	宽口
深度/mm	38.77	27.81	18.74
长度/mm	135.64	105.47	99.23
宽度/mm	2.00	2.00	2.00

### 3.3 砍击过程中能量变化

在刀器砍击引起的软组织和骨组织破坏过程中,会发生一系列的能量变化<sup>[10]</sup>。锋利刀器的总能量明显比另外两种的总能量要大;钝口和宽口刀器的总能量差异并不明显[见图5(a)]。在开始阶段,3种刀器的内能差异很小。但是随着时间的推移,锐利刀器的内能比其他两种刀器的内能差异逐渐增加[见图5(b)]。在砍击初始阶段,3种刀器砍击时系统的动能基本相同,而随着时间增加,锐利、钝口和宽口刀器砍击的动能依次明显增加[见图5(c)]。

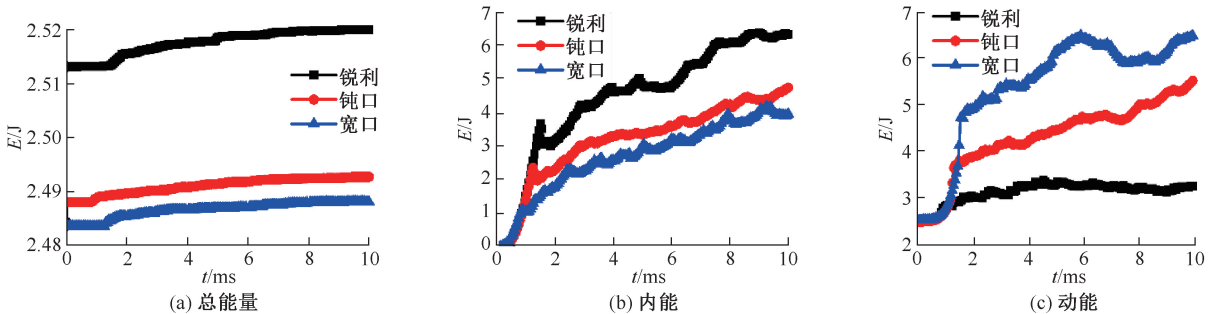


图5 不同锋利程度刀器砍击过程中能量变化

Fig.5 Changes of energies during the slash by knives with different sharpness (a) Total energy, (b) Inner energy, (c) Kinetic energy

## 4 讨论

本文通过应用有限元模型仿真不同锋利程度的刀器砍击前臂时砍创形成过程、砍击力和能量变化特征。结果显示,锐利、钝口和宽口刀器的砍创形成依次减慢,砍创长度和深度依次减小;最大砍击力依次增加;锐利刀器砍击时模型系统总能量明显较大,内能也较高,但所产生的系统动能却较小。

本文的定量仿真结果与人们日常生活中形成的定性经验相符,即刀具愈锋利,砍切速度愈快,砍切力愈小。国外文献也报道了类似的实验结果。Claudon等<sup>[11]</sup>通过实验发现,肉类加工时使用非常钝的刀具剔骨的切割力大约是锋利刀具的2.8倍,同时作业人员上肢大多数肌肉的表面肌电也更高,说明操作更加困难。本文仿真结果显示,宽口刀器砍击最大力约为锐利刀器的2.2倍。该结果还可从

另外角度理解:形成同样深度的砍创,使用锐利刀器所需要的力要比钝圆刀器的力小很多。

本文仿真结果显示,宽口刀器形成砍创的深度最浅。这是由于宽口刀锋面积较大,在与组织接触区域难以快速形成应力集中区域,需要耗散更多的能量去克服摩擦阻力以及对组织形成创口。砍创深度也影响着其长度,随着深度的增加,创口包络弧长也相应增加。

在刀器砍击作用下,砍创形成过程十分复杂,涉及几种能量的变化。本文仿真结果显示,总能量曲线呈现出较好的稳定性,小范围的波动幅度均小于1%,说明动力学计算结果精度较好<sup>[10]</sup>。锋利刀器的总能量和内能明显比钝口或宽口刀器的总能量和内能更大,原因是刀口的形貌差异导致渗入组织过程时的速度更大,以及渗入时遭遇生物组织的物质总量更多。锐利刀器能在较小砍击冲击载荷作用下对上肢形成伤害,故而对上肢的运动扰动较小,使上肢产生较小的动能。

锐器(特别是刀器)伤害是法医生物力学关注的研究内容之一<sup>[3]</sup>。近20多年来,国内外学者开展了一系列有关生物组织在锐器砍刺时生物力学性质和创口形态特征的研究。Love等<sup>[12]</sup>综述分析锐器伤害案件中骨和软骨的砍击损伤形态特征,认为锐器外形、砍击力和方向都是骨和软骨损伤形态的影响因素<sup>[12]</sup>。Siqueira等<sup>[13]</sup>则对锐器和钝器伤害动物所形成的创口形状特征、继发后果以及潜在的犯罪进行分析对比。Ní Annaidh等<sup>[14]</sup>对人体皮肤、家猪皮肤和衣物进行试验,发现3种材料穿透的刺击力呈现相似的变化特征,刀器锋利程度和刺击速度都对刺击力的影响非常显著。Nolan等<sup>[15]</sup>实验中要求受试者手持刀器或者螺丝刀,采用轻度、中度和重度3种用力方式对模拟皮肤、猪腿和猪胸样本分别进行刺击,对比分析产生的刺击力大小,认为主观量化刺击力并不可靠。

为锐器防护服设计,人们利用装有传感器的测试刀器进行了一些砍刺生物力学研究。例如,Chadwick等<sup>[16]</sup>采用测试匕首对模拟防护服的目标进行捅刺,同时采用6镜头Vicon运动捕捉系统对捅刺动作进行拍摄。结果显示,轴向最大刺杀力可以达到2261 N,横向砍切力869 N,能量也可达到103 J。Ambade等<sup>[17]</sup>通过分析241起凶杀案件发现,锐器伤

害案件中,手和前臂是最常用的防御部位。

由于伦理学的限制,无法对活性组织进行砍击痕迹学实验,而新鲜人体尸体样本也难以获得,实验结果和可靠性也常常受到怀疑。因此,通过建立刀器和人体器官生物力学模型,进行计算机仿真方法研究就显得十分重要,使用该方法能够灵活地调整刀器和加载条件后进行仿真实验<sup>[18-19]</sup>。虽然如此,国内外有关应用有限元法分析进行刀器伤害的研究鲜有报道。Ní Annaidh等<sup>[14]</sup>应用有限元软件ABAQUS进行一系列仿真实验,认为刀尖几何形状和刺击方向都显著影响穿透皮肤的刺击力的大小。Leonov等<sup>[20]</sup>使用编写的有限元分析程序,模拟带有折断刀尖的刀器刺入皮肤时的破坏过程,评估刀刃的轨迹形成特征。本文基于人体影像学数据建立较为逼真的器官层次(上肢)的有限元模型,进行有关刀器砍击的法医生物力学研究。

本文研究还存在着一定的局限性:①对人体组织的本构方程进行简化,假设所有组织都是各向同性。②未考虑在体软组织的预应力和朗格线(Langer's line)的存在<sup>[1]</sup>,导致仿真获得的砍创宽度与刀器厚度相同,这不符合现实情况。③模型未经严格的实验验证,需要开展相应的尸体或动物实验。尽管如此,本文无论在研究方法上还是在研究内容上都具有一定的创新性,所建有限元模型可以应用于实际案件的刑事研判中,研究方法还可以推广到人体其他部位(例如头、胸腹部)受到砍杀条件下的生物力学理论和应用研究<sup>[21]</sup>。

## 5 结论

(1)通过建立不同锋利程度刀器及上肢有限元模型及计算机仿真的研究表明,随着刀器锋利程度降低,创口形成速度减慢,长度和深度减小,砍击力增加。

(2)通过分析仿真模型系统中的总能量、内能以及动能的变化表明,随着刀器锋利程度降低,总能量降低,内能降低,动能增加。锐利刀器渗入组织速度较快,导致模型总能量和内能较多,但上肢运动有关的动能较小。

(3)建立刀器砍击前臂的有限元模型,探究刀器锋利程度对砍创影响的生物力学机制,为砍杀案件的刑事侦查和法庭审判提供参考依据,对提高公

共安全和司法实践的科学化水平具有一定促进作用。

### 参考文献:

- [ 1 ] KIESER J, TAYLOR M, CARR D. Forensic biomechanics [M]. Oxford: Wiley-Blackwell, 2013.
- [ 2 ] 肖晓飞, 吕途, 郝卫亚, 等. 生物力学在砍击成伤机制及行为分析中的应用探讨[J]. 刑事技术, 2019, 44(5): 395-398.
- [ 3 ] SCHMIDT U. Sharp trauma [M]// SIEGEL JA, HOUCK MM, eds. Encyclopedia of forensic sciences [M]. Salt Lake City: Academic Press, 2013: 39-46.
- [ 4 ] FREUDENTHAL AM. The inelastic behavior of engineering materials and structures [M]. New York: Wiley Press, 1950.
- [ 5 ] COCKROFT MG, LATHAM DJ. Ductility and workability of metals [J]. J Inst Met, 1968, 96(1): 33-39.
- [ 6 ] BROZZO P, DELUCA B. A new method for the prediction of formability limits in metal sheets [C]// Proceeding of the 7<sup>th</sup> Biennial Conference of the International Deep Drawing Research. Amsterdam: [s.n.], 1972.
- [ 7 ] 苏维国, 穆志韬, 刘涛, 等. 基于损伤力学的金属材料韧性断裂失效分析[J]. 宇航材料工艺, 2014, 2(1): 24-28.
- [ 8 ] 孙培栋, 陈春, 吴长福, 等. 有限元分析中软组织力学参数的设定及验证[J]. 医用生物力学, 2012, 27(1): 27-31.
- [ 9 ] FRANK H, FRANK D. Forensic biomechanics and human injury criminal and civil applications: An engineering approach [M]. New York: CRC Press, 2016.
- [ 10 ] 张文元. ABAQUS 动力学有限元分析指南[M]. 北京: 中国图书出版社, 2005.
- [ 11 ] CLAUDON L, MARSOT J. Effect of knife sharpness on upper limb biomechanical stresses; A laboratory study [J]. Int J Ind Ergonom, 2006, 36(3): 239-246.
- [ 12 ] LOVE JC. Sharp force trauma analysis in bone and cartilage: A literature review [J]. Forensic Sci Int, 2019, 299(1-2): 119-127.
- [ 13 ] DE SIQUEIRA A, CUEVAS SEC, SALVAGNI FA, et al. Forensic veterinary pathology: Sharp injuries in animals [J]. Vet Pathol, 2016, 53(5): 979-987.
- [ 14 ] Ní ANNAIDH A, CASSIDY M, CURTIS M, et al. Toward a predictive assessment of stab-penetration forces [J]. Am J Foren Med Path, 2015, 13(3): 461-465.
- [ 15 ] NOLAN G, HAINSWORTH SV, RUTTY GN. Forces generated in stabbing attacks: An evaluation of the utility of the mild, moderate and severe scale [J]. Int J Legal Med, 2018, 132(1): 229-236.
- [ 16 ] CHADWICK EK, NICOL AC, LANE JV, et al. Biomechanics of knife stab attacks [J]. Forensic Sci Int, 1999, 105(1): 35-44.
- [ 17 ] AMBADE VN, GODBOLE HV. Comparison of wound patterns in homicide by sharp and blunt force [J]. Forensic Sci Int, 2006, 156(2-3): 166-170.
- [ 18 ] 张明, 张德文, 余嘉, 等. 足部三维有限元建模方法及其生物力学应用[J]. 医用生物力学, 2007, 22(4): 339-344.
- [ 19 ] ZHANG M, ZHANG DW, YU J, et al. Human foot three-dimensional finite element of modeling and its biomechanical applications [J]. J Med Biomech, 2007, 22(4): 339-344.
- [ 19 ] 郝卫亚. 人体运动的生物力学建模与计算机仿真进展[J]. 医用生物力学, 2011, 26(2): 97-104.
- [ 20 ] HAO WY. Advances in biomechanical modeling and computer simulation of human movement [J]. J Med Biomech, 2011, 26(2): 97-104.
- [ 20 ] LEONOV SV, VLASYUK IV, KRUPIN KN. Simulation of the mechanisms of formation of stab and slash wounds by finite element method [J]. Sud Med Ekspert, 2013, 56(6): 14-16.
- [ 21 ] SCHMIDT U. Sharp force injuries in “clinical” forensic medicine [J]. Forensic Sci Int, 2010, 195(1-3): 1-5.