

文章编号:1004-7220(2012)04-0427-05

# 仿生减阻针头穿刺过程中力学行为分析

齐迎春<sup>1</sup>, 丛茜<sup>1</sup>, 齐欣<sup>1,2</sup>

(1. 吉林大学 工程仿生教育部重点实验室, 长春 130022; 2. 长春工程学院, 长春 130012)

**摘要:** **目的** 利用非光滑表面减阻技术设计仿生无痛针头并探讨其无痛机理。**方法** 从减阻角度出发,根据蚊子吸血不痛的特点,在分析蚊子口器结构基础上,设计两种仿生减阻无痛针头(锯齿形和条纹形),并运用显示动力学分析软件 LS-DYNA,对常规光滑表面针头和仿生针头的软组织注射过程进行数值模拟,分析仿生针头的减痛机理。**结果** 通过对比分析光滑针头和仿生针头软组织穿刺过程的应力云图、内能曲线和阻力曲线可知,仿生针头具有明显减阻效果,锯齿形针头和条纹形针头减阻率分别为 23.84% 和 31.57%。**结论** 仿生针头可以通过减阻来达到减痛或无痛注射效果,且仿生针头结构形态决定其减阻效果。

**关键词:** 仿生; 减阻; 无痛注射; 力学行为; 数值模拟

**中图分类号:** R 318.01 **文献标志码:** A

## Mechanical behavior of bionic drag reduction needle during puncturing process

QI Ying-chun<sup>1</sup>, CONG Qian<sup>1</sup>, QI Xin<sup>1,2</sup> (1. Key Laboratory of Engineering Bionics Ministry of Education, Jilin University, Changchun 130022, China; 2. Changchun Institute of Technology, Changchun 130012, China)

**Abstract:** **Objective** To design a kind of bionic drag reduction needle and investigate its mechanism of painless injection. **Methods** Based on the analysis of mosquito's mouthpart structure, two types of bionic drag reduction injector needles, sawtooth needle and stripe needle, were designed with the painless feature as mosquito's blood-sucking action. The injection processes of normal smooth needle and two bionic drag reduction injector needles were simulated by using explicit kinetic software LS-DYNA, and analyzed the pain-relief mechanism of bionic drag reduction needles. **Results** Through contrast and analysis on the stress contour, internal energy curves and resistance curves of both the smooth needle and bionic needles during the puncturing process in soft tissue, the bionic needle was found to have obvious drag reduction effects. The drag reduction rate of the saw-tooth needle and stripe needle was 23.48% and 31.57%, respectively. **Conclusions** The bionic needles can minimize the friction resistance to achieve the painless injection by drag reduction, and its effect is determined by the structure and shape of the bionic needle.

**Key words:** Bionics; Drag reduction; Painless injection; Mechanical behavior; Numerical simulation

在皮下注射过程中,引起疼痛的原因包括生理、心理等多方面因素,其中生理因素是指注射过程中针头刺激引起被注射部位软组织的创伤性疼痛,是软组织注射疼痛的主要原因<sup>[1]</sup>。皮肤中含有丰富

的感觉神经末梢以感受外界刺激,注射时由于针头触及神经末梢产生痛感。另外,皮肤中交感神经支配的分支大量存在于真皮网状层和结缔组织层,注射时针头对皮肤的刺激会引起软组织收缩;随着刺

收稿日期:2011-10-10; 修回日期:2011-12-20

基金项目:国家自然科学基金资助项目(50875108),中国博士后科学基金资助项目(801114202418)。

通讯作者:丛茜,教授,博士研究生导师,E-mail:congqian@jlu.edu.cn。

激强度增大,收缩也逐渐增加,作用在针头的正压力增大,摩擦阻力也相应增加,痛感增强。而且随着皮肤与针头间摩擦力的增加,与针尖接触的皮肤附近细胞会受到很大的拉力,导致细胞严重变形甚至破损,释放出如钾离子、氢离子、血浆激肽等致痛物质,使病人产生疼痛<sup>[2]</sup>。相比之下,无痛注射可以通过减小或消除对痛感神经的刺激和减小皮肤与注射器间的摩擦阻力等两种方法来实现,如通过减小注射针头尺寸以减小注射时对皮肤内痛感神经的刺激来达到无痛效果的微针,利用机械装置、超声波或电离等方法使药物直接进入人体皮肤的无针注射<sup>[3]</sup>等。皮下注射过程与蚊子吸血过程对生物软组织产生的效果相似,本文根据蚊子吸血不痛的特点,结合蚊子口器结构特征,将常规注射器针头进行形态改进,设计了两种仿生减阻无痛针头,以期达到注射减痛或无痛的效果;并运用显示动力分析方法,对常规光滑表面针头和仿生针头的软组织注射过程进行数值模拟,研究仿生针头的减痛机理。

## 1 蚊子口器结构

蚊子口器为刺吸式,由6根口针组成,取食时先以唇瓣在皮肤表面探索,借助下唇支撑,靠软组织的作用使两上颚交替刺入组织内;当两上颚口针刺入相等时,下颚口针跟进,这样重复多次,口针深入到适宜取食部位,开始取食<sup>[4]</sup>。图1为蚊子口器扫描电子显微镜照片,此时唇瓣打开,针束向外伸出,针束末端部表面带有三角形锯齿<sup>[5]</sup>。图2为蚊子上颚的扫描电子显微镜照片<sup>[5]</sup>。

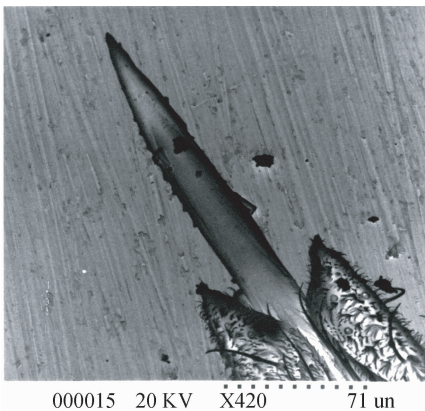


图1 蚊子口器扫描电子显微镜照片<sup>[5]</sup>

Fig. 1 Scanning electron micrograph of the mouthpart in mosquito

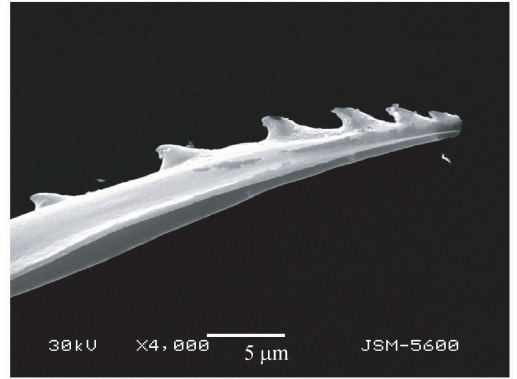


图2 蚊子上颚扫描电子显微镜照片<sup>[5]</sup>

Fig. 2 Scanning electron micrograph of the maxillary in mosquito

由图1、2可以清楚地看到,蚊子上颚一侧长有非均匀分布、向根部倾斜的斜齿形,另一侧面具有沟壑结构。蚊子吸血时,因其上颚表面具有锯齿状非光滑形态,刺入时尖锐的锯齿像精巧的手术刀一样切入皮肤,只造成一个很小的伤口;和光滑表面相比,存在锯齿和沟壑的口器与皮肤组织接触面积更小,口器与皮肤组织间阻力小,减少了对神经的刺激,使疼痛降低到人体感觉不到的程度。关于蚊子口器刺入皮肤过程问题,孔祥清等<sup>[6-7]</sup>曾进行过详细研究。

## 2 仿生无痛注射针头

皮下注射过程与蚊子吸血过程对生物软组织产生的效果相似,借鉴蚊子刺吸式口器无痛原理,拟将常规注射器针头进行形态改进,以达到注射减痛或无痛效果:即通过改变注射器针头表面形态,减小注射时针头与软组织间摩擦阻力,从而减小对痛感神经的刺激。

模仿蚊子口器外表面形态,结合注射器针头加工工艺,本文设计了两种表面分别带有锯齿和条纹形沟槽的仿生针头,其几何模型如图3所示。

为了研究仿生针头的减痛机理,验证仿生针头的减阻效果,为后续仿生针头形态改进做准备,采用显示动力学分析方法,应用 Ansys 有限元分析软件提供的 LS-DYNA 模块对常规光滑表面针头、条纹形针头和锯齿形针头的软组织注射过程进行模拟计算。光滑针头模型依据6号无菌注射针头尺寸建

立,仿生针头是在6号光滑针头表面上设计非光滑结构。锯齿结构宽0.1 mm,齿间距0.5 mm,深0.05 mm;条纹结构宽0.06 mm,均布10等分,深0.05 mm。

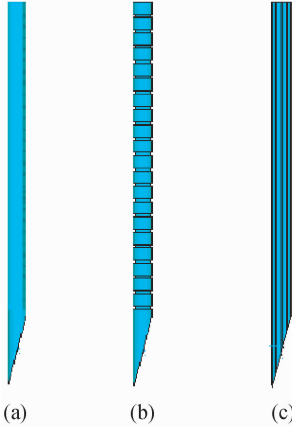


图3 注射器针头几何模型 (a)普通形,(b)锯齿形,(c)条纹形  
Fig.3 Geometry of the injector pinhead (a) Normal needle, (b) Sawtooth needle, (c) Stripe needle

### 3 注射过程显示动力学分析

#### 3.1 有限元模型

生物软组织是注射器针头的主要刺入对象,包括皮肤、血管、脂肪、肌肉等,皮肤由表皮、真皮及皮下组织3部分组成,其中真皮厚度约有0.3~5 mm,内含特殊的感受神经纤维末梢,是感受皮下注射疼痛的主要部位。针头刺入软组织时,穿过表皮、真皮、皮下组织,最后到达肌肉,药液只有注射到软组织内,才能被很好吸收<sup>[8]</sup>。在刺入过程中,针头的硬度比软组织的硬度高出许多,为简化计算,将针头设定为刚体,密度为 $8.93 \text{ g/cm}^3$ ,泊松比为0.35,弹性模量为206 GPa;鉴于穿刺过程中伴随着软组织的破坏,软组织模型选用双线性弹塑性带应变失效的材料本构模型<sup>[9-10]</sup>。考虑到软组织注射过程涉及接触非线性问题,且接触面积较大,注射部位的软组织材料在注射过程中发生材料失效等因素,接触类形选用面面侵入<sup>[11-13]</sup>。鉴于注射器针头为对称结构,为了缩减计算时间,取针头和软组织材料模型的一半进行计算。软组织结构简化为单一介质,模型(1/2)长20 mm、宽10 mm、高20 mm。软组织和普通注射器针头几何模型如图4所示。

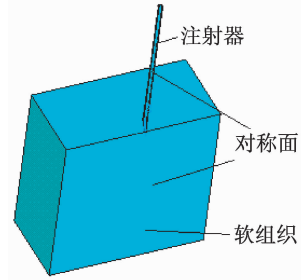


图4 软组织和普通注射器针头几何模型  
Fig.4 Geometry of the parenchyma and normal injector pinhead

注射器针头和软组织的对称面施加对称约束;软组织两侧面和背面模拟生物软组织无限大,施加无反射边界;软组织底面施加固定约束;注射器初始速度为2 m/s。针头和软组织采用LS-DYNA 三维实体单元solide 164。在显示动力学分析过程中,网格类型在很大程度上决定了计算时间和计算精度,本文应用Ansys 前处理功能建立针头和软组织模型,针头选用4面体单元,软组织选用6面体单元;为模拟针头外壁与软组织的相互作用,将软组织与针头接触部位单元细化,使单元尺寸小于针头非光滑结构尺寸。

#### 3.2 结果分析

针尖部分刺入皮肤时,会在刺入部分产生一个小孔,此时针头受到的阻力仅为皮肤对针尖的阻力。针头部分完全刺入皮肤后,由于皮肤的弹性模量较大,皮肤会受到针头挤压产生形变;同时这部分形变对针头侧壁产生压力,压力越大,针头刺入摩擦阻力越大,对痛感神经刺激越大。

内能是物体内部一切能量的总和。物体内能增加的途径有两种,吸收热量和外力对物体做功,针头穿刺过程中内能的增加源于针壁与软组织的相互作用。注射时针头与软组织相互摩擦产生阻力,动能的一部分转化为内能,使针头和软组织内能变化;内能变化量与摩擦力大小有关,内能变化越大,针头与软组织间摩擦力越大,对神经系统刺激越大,痛感越强烈。3种针头刺入软组织过程中软组织内能变化曲线如图5所示,由图可知,光滑针头内能变化最大,锯齿形针头次之,条纹形针头最小,两种仿生针头的内能变化量相差不多,故仿生针头对减小针头与软组织间摩擦阻力效果较好。

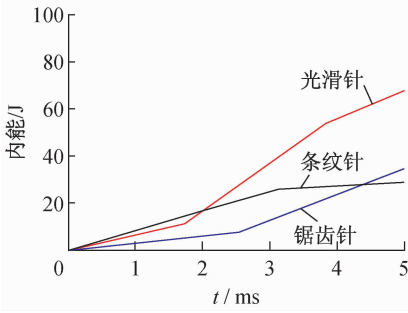


图5 各种针头刺入软组织过程中软组织内能变化曲线  
Fig.5 Internal energy curves when three needles were penetrated into skin parenchyma for 5 ms, respectively

通过对常规光滑针头和两种仿生针头注射过程的数值模拟计算,可以看出:仿生针头可以通过减阻来达到减痛或无痛注射效果;不同表面形状的仿生针头,减阻效果不同。

图6为各种类型针头刺入5 ms后对称面上软组织应力云图。图7为软组织表面受到的随时间变化的穿刺阻力曲线。可以看出:

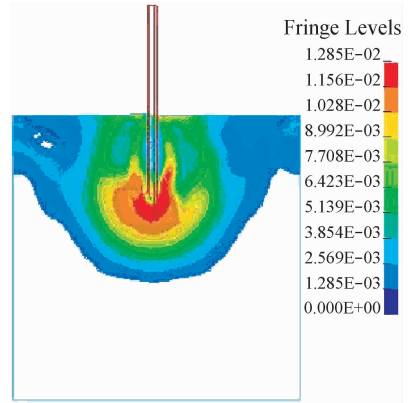
(1) 针头刺入皮肤后,由于针尖部分对软组织产生破坏,使此处软组织的应力最大,针尖后面部分对软组织不产生破坏作用,只发生侧壁与软组织的摩擦,故这部分的应力相对于针尖较小。

(2) 同一型号的针头穿刺过程中,仿生针头针管外壁对软组织整体结构的应力作用范围小于光滑针头,即仿生针头对软组织刺激面积小于常规针头。

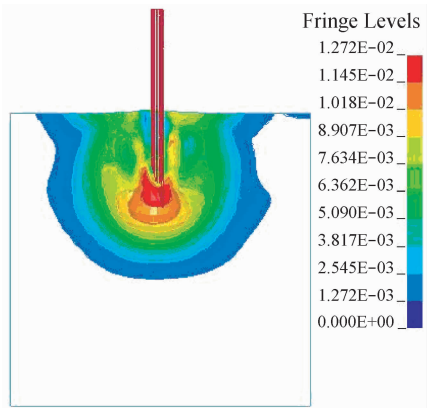
(3) 条纹形针头针尖对软组织的刺激作用小于锯齿形针头,这主要源于两种针头针尖部分几何结构的差异。条纹针头的条纹凹槽一直通到针尖,使起到切入软组织作用的针尖结构形态发生了改变;而锯齿针头的凸起仅限于针尖斜面上部,在刺入软组织时,两种针头的针尖与软组织作用面积不同,且当锯齿的第一个凸起与软组织接触时会产生应力突变。

(4) 注射器针头与软组织的摩擦阻力主要来自于针头侧壁与软组织的相互作用。从图6可以看出,光滑表面侧壁附近条纹较混乱,而锯齿形针头侧壁附近的应力条纹最规整且均匀,条纹表面居中,说明锯齿表面的针头侧壁与软组织相互作用较平缓,对软组织细胞破坏较小;当针头刺入后,微小的锯齿

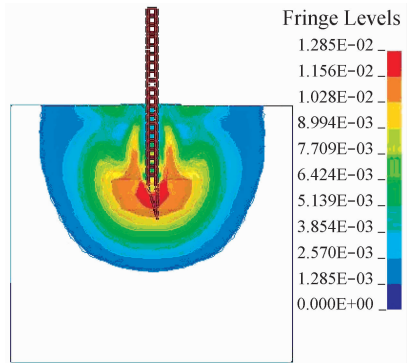
形可以继续划破皮肤组织,使皮肤上面的孔不断扩大,减小了侧壁受到的阻力,使侧壁与皮肤之间的摩擦力减小,达到减阻效果。



(a) 光滑针头



(b) 条纹针头



(c) 锯齿针头

图6 各种针头刺入5 ms时的对称面软组织应力云图  
Fig.6 Contours of effective stress when three needles were penetrated into skin parenchyma for 5 ms, respectively (a) Normal needle, (b) Stripe needle, (c) Sawtooth needle

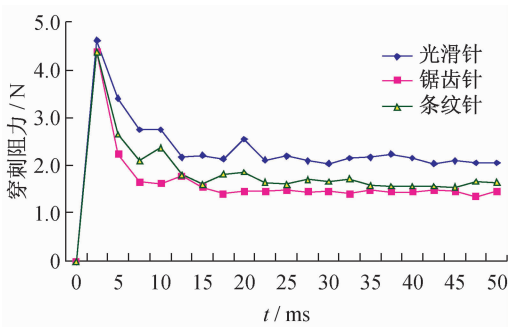


图7 软组织表面随时间变化的穿刺阻力曲线

Fig.7 Time-puncture resistance curve on the soft tissue surface

(5)如图7所示,取25~50 ms之间的各条曲线穿刺阻力均值,作为各针头针管外壁软组织穿刺过程中的摩擦阻力,可得到光滑针穿刺阻力为2.114 39 N,锯齿针穿刺阻力为1.617 953 N,条纹针穿刺阻力为1.446 87 N。计算可得,锯齿针减阻率为23.48%,条纹针减阻率为31.57%。仅对于这两种仿生针头而言,锯齿与条纹相结合且延伸到针尖附近的非光滑表面减阻效果可能更好,这也是本研究接下来的工作方向。

## 4 结语

无痛注射器研究涉及医疗、机械、材料、金属加工、仿生等很多领域,对促进医疗工程领域自主创新、技术进步和行业发展具有重大意义。目前国内外对无痛注射的研究主要针对微针、无针等方面,而仿生减阻针头是通过在常规针头表面上设计非光滑结构来达到减痛甚至无痛的效果<sup>[14]</sup>。本文根据蚊子吸血不痛的特点,在分析蚊子口器结构基础上,依据非光滑表面减阻现象,运用仿真数值模拟方法,对仿生减阻注射器的减痛机理进行了研究。结果发现,仿生针头可以通过减阻来达到减痛或无痛注射效果,且仿生针头表面决定减阻效果,锯齿与条纹相结合且延伸到针尖附近的非光滑表面减阻效果可能更好,这为今后进一步的理论研究和试验研究奠定了基础。

## 参考文献:

- [1] 傅志俭. 临床疼痛学[M]. 济南: 山东科学技术出版社, 2004.
- [2] 王京春. 基于昆虫刺吸式口器的仿生耦合无痛注射针头的研究[D]. 长春: 吉林大学博士学位论文, 2008.
- [3] 齐迎春, 李岩, 金敬福, 等. 无痛注射技术研究现状[J]. 医疗卫生装备, 2009, 30(9): 34-36.
- [4] 戈峰. 昆虫生态学原理与方法[M]. 北京: 高等教育出版社, 2008.
- [5] 谷松涛. 基于昆虫刺吸式口器的仿生注射器研究[D]. 长春: 吉林大学硕士学位论文, 2008.
- [6] Kong XQ, Wu CW. Measurement and prediction of insertion force for the mosquito fascicle penetrating into human skin[J]. J Bionic Eng, 2009, 6(2): 143-152.
- [7] 孔祥清, 吴承伟. 蚊子口针刺破人体皮肤过程的数值模拟[J]. 力学与实践, 2010, 32(2): 90-94.
- [8] 王滨. 正常人体结构[M]. 北京: 高等教育出版社, 2005.
- [9] 苏晋, 赵文志, 陈秉智, 等. 建立全腰椎有限元接触模型[J]. 医用生物力学, 2010, 25(3): 200-205.  
Su J, Zhao WZ, Chen BZ, *et al.* Establishing finite element contact model of human L1 ~ L5 lumbar segments[J]. J Med Biomech, 2010, 25(3): 200-205.
- [10] 徐伟, 伍维根, 缪志农, 等. 以 ANSYS/LS-DYNA 为平台的高速弹头侵入防弹衣的仿真研究[J]. 科技传播, 2010, 21: 217-218.
- [11] 李云婷, 陶凯, 王冬梅, 等. 足底软组织硬化对足部生物力学性能影响的三维有限元分析[J]. 医用生物力学, 2009, 24(3): 169-173.  
Li YT, Tao K, Wang DM, *et al.* Effects of stiffness of plantar soft tissue on foot biomechanical behavior: A 3D finite element analysis[J]. J Med Biomech, 2009, 24(3): 169-173.
- [12] 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.  
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.
- [13] 王宝珍. 肌肉类软组织动态力学性能研究[D]. 合肥: 中国科技大学博士学位论文, 2009.
- [14] 马国军, 吴承伟. 人造微针与生物微针研究进展[J]. 医用生物力学, 2011, 26(6): 487-493.  
Ma GJ, Wu CW. Advances in artificial microneedles and biomimetic microneedles[J]. J Med Biomech, 2011, 26(6): 487-493.