

# 超声引导下同轴活检针与半自动活检针联合应用的物理机制及组织获取原理分析

迟悦 孙成哲

(吉林市化工医院 电诊科 132021)

**【摘要】**超声引导下同轴活检针与半自动活检针联合应用,在物理架构上实现了引导与取样功能的分离与协同。本文从介入超声物理学视角,系统分析该联合体系的声学、力学及材料学耦合机制。首先阐明超声引导的物理基础,包括声波衰减、声束角度依存性及针具声学增强设计原理。继而分别论述同轴活检针的轨道建立机制(同轴嵌套的几何力学、多轨道损伤调控及穿刺偏斜抑制)与半自动活检针的切割物理(弹簧储能动力学、套叠切割管摩擦锁合效应及高速应变率行为)。重点探讨联合应用产生的双重物理耦合效应:双针间隙匹配对动能传递的约束、空心隧道声学重建、组织应力场从点应力向面应力的重分布,以及空化与声影遮挡等潜在不利效应。本文为理解该穿刺技术的物理本质提供理论框架。

**【关键词】**超声引导;同轴活检针;半自动活检针;穿刺动力学

Physical Mechanism and Tissue Acquisition Principle Analysis of Combined Application of Ultrasonic-Guided Coaxial Biopsy Needles and Semi-Automated Biopsy Needles

Chi Yue Sun Chengzhe

(Department of Electrical Diagnosis, Jilin Chemical Hospital 132021)

**[Abstract]** The combined application of ultrasonic-guided coaxial biopsy needles and semi-automatic biopsy needles achieves separation and synergy between guidance and sampling functions at the physical level. From the perspective of interventional ultrasound physics, this study systematically analyzes the acoustic, mechanical, and materials coupling mechanisms of this integrated system. First, the physical foundations of ultrasound guidance are elucidated, including sound wave attenuation, beam angle dependence, and acoustic enhancement design principles for needles. Subsequently, the trajectory establishment mechanism of coaxial biopsy needles (geometric mechanics of coaxial nesting, multi-track damage control, and puncture deviation suppression) and the cutting physics of semi-automatic biopsy needles (spring energy storage dynamics, friction locking effect of nested cutting tubes, and high-speed strain rate behavior) are discussed separately. Special emphasis is placed on the dual physical coupling effects generated by the combination: constraint on kinetic energy transfer through needle gap matching, acoustic reconstruction in hollow tunnels, redistribution of tissue stress fields from point stress to surface stress, as well as potential adverse effects such as cavitation and acoustic shadow masking. This study provides a theoretical framework for understanding the physical essence of this puncture technique.

**[Key words]** ultrasound guidance; coaxial biopsy needle; semi-automatic biopsy needle; puncture dynamics

## 引言

介入超声技术的发展推动了微创诊疗的进步。超声引导下的经皮穿刺活检技术如今已成为获取组织病理学标本的核心手段之一<sup>[1-2]</sup>。然而,传统单针穿刺在多次取样中面临针道偏移、组织撕裂和出血风险增加等物理层面的挑战。同轴活检针与半自动活检针联合应用技术的出现,在物理架构上实现了突破:同轴针首先建立一条从体表到病灶边缘的稳定轨道,随后半自动活检针沿此轨道反复进出完成多次切割取样。这一“轨道先行、切割随后”的物理策略,在理论上将引导功能与取样功能分离。前者的核心任务是为后序器械提供可重复的、低阻力的物理通道;后者的核心任务是在毫秒级时间内完成精确的组织分离与获取。理解这一体系中涉及

的声学、力学和材料学原理的意义在于:它为优化穿刺参数、改进针具设计和提升标本质量提供了物理层面的理论依据。本文将从超声引导的物理基础入手,依次分析同轴活检针、半自动活检针各自的物理机制,并重点阐述两者联合应用所产生的物理耦合效应。

## 1. 超声引导的物理基础与对针具的要求

### 1.1 超声波的传播与组织交互

超声波是频率高于 20 kHz 的机械波,在生物组织中通过介质粒子的交替压缩和稀疏进行传播。传播速度取决于组织的密度和弹性模量。超声在组织中传播面临衰减,包括吸收、散射和反射三个物理过程。不同组织成分的声阻抗差异

决定了反射波的能量大小,反射波经探头接收和信号处理后形成超声图像。针具作为声阻抗极高的金属物体,在组织中形成显著反射界面。当超声波束以一定角度入射到针体表面时,部分声能反射回探头形成高亮度针体图像,另一部分声能因针体遮挡在其后方形成声影。因此,针体识别本质上是对金属反射信号的解读,要求针体表面具备良好的声学反射特性。超声频率的选择直接影响横向分辨率和穿透深度:高频(如 10 MHz 以上)分辨率高但穿透深度小,低频(如 5 MHz 以下)则相反。深层病灶穿刺时需根据目标深度合理设置频率参数。

### 1.2 声束与针体的角度依存关系

针体在超声图像中的可视性取决于入射声束相对于针体纵轴的方向角。当针体纵轴与声束方向夹角接近  $90^\circ$  时,声波垂直于针体表面入射,反射能量最大,针体呈明亮高回声线性结构。当夹角接近  $0^\circ$  时,声波沿针体表面切向传播,反射能量极小,针体模糊甚至不可见。平面内穿刺技术中,进针路径与超声探头长轴平行,针体全程保持在声束平面内,有利于实时监控针尖位置。定量研究显示,穿刺角度在  $15^\circ$  至  $45^\circ$  之间时,反射能量最为理想,可视化效果最佳。小于  $15^\circ$  的进针路径受操作空间和解剖位置限制难以实现。操作者须在有限空间角度范围内找到最优针体朝向,以提高对针尖和切割槽位置的辨识精度。

### 1.3 穿刺引导对针具设计的声学约束

超声引导对活检针提出了特定声学要求<sup>[3-4]</sup>。普通金属针的圆柱面在声束斜入射时易产生镜面反射,仅在特定角度范围内形成明显回波。临床使用的超声引导活检针常在针尖或针体远端增设声学增强设计,如针尖表面滚花、螺旋沟槽加工或附着微气泡涂层。这些结构的物理本质是制造“非光滑界面”,使反射模式从镜面反射向漫反射转变,增加返回探头的声能分散范围,提高偏离最优角度时的可见性。针体直径直接影响声影严重程度:较粗针体(如 14G 至 16G)形成的声影范围更大,可能完全遮盖针尖后方的重要解剖结构,增加损伤风险。针具规格选择是穿刺定位清晰度与轨道稳定性之间的物理权衡。将超声焦点调节至病灶深度可改善空间分辨率,提供更精准的引导信息。

## 2. 同轴活检针的物理基础与轨道建立机制

### 2.1 同轴结构的几何学与力学原理

同轴活检针由外鞘管与内针芯组成,两者形成同轴嵌套关系。同轴结构确保外鞘管与内针芯的纵轴严格重合,保证穿刺作用力沿轴向传递。外鞘管内径决定后继器械的可通过尺寸。内针芯在初步穿刺时填充于外鞘管内部,使整个结构成为连续金属实体,最大程度降低摩擦力。外鞘管与内针芯同步进入组织后,内针芯被抽离,外鞘管成为空心隧道,其内壁经电化学抛光后光滑,减少后继活检针穿越的推动力。

从力学观点看,外鞘管穿刺相当于在生物组织中植入高强度空心管。外鞘管壁承受来自周围组织的径向压缩应力,在组织弹性收缩作用下被包裹固定,为后续器械提供稳定轨道。这一状态可近似为厚壁圆筒在弹性无限大介质中的应力问题:径向压力随深度增加而积累,与组织弹性模量呈正相关。

### 2.2 多轨道获取与组织损伤的物理调控

外鞘管预留组织后,半自动活检针可沿此轨道多次进出,从不同角度和深度进行多次切割。缺乏外鞘管保护时,每一次切割都在组织中开拓新路径,增加出血、撕裂和周围组织损伤风险。同轴结构提供的外鞘管轨道使活检针每一次往返运动都在固定通道中进行,剪切力方向被严格约束在纵轴上,横向分力几乎被外鞘管刚性内壁抵消,极大减少了对周边组织的意外撕裂。同时,外鞘管作为植入的硬质屏障,反复进出造成的组织碎屑和微血栓被限制在鞘管内,不易扩散,出血范围可控。这一机制的实质是用“单次破皮、多次取样”替代“多次穿刺、各立针道”,将组织损伤的物理积累降低一个数量级。

### 2.3 穿刺偏斜的力学抑制效应

经皮穿刺时针体在软组织中发生偏斜是普遍力学现象。偏斜的根源包括:针尖的不对称几何形状(斜面针尖受非对称侧向反作用力)以及组织非均质与各向异性(不同组织层次间弹性模量突变改变受力平衡)。同轴活检针在外鞘管和内针芯同步推进模式下,内针芯的高刚性提高了整个系统的抗弯刚度。简单受力模型显示,偏斜角度与针体长度的平方呈线性关系,与截面惯性矩成反比。同轴结构的截面惯性矩较同等外径单针大幅提升,因此在受侧向分力时,同轴针的针尖偏移距离远小于单针。这一机制保证了外鞘管在初步穿刺阶段以更高精度抵达指定位置,为后续切割创造有利起始条件。

## 3. 半自动活检针的切割物理与组织获取原理

### 3.1 弹簧储能释放的动力学过程

半自动活检针的核心工作机制依赖弹簧的弹性势能存储与瞬时释放。操作者压缩击发弹簧时,外力对弹簧做功,能量以弹性势能形式储存。根据胡克定律,弹性势能  $E = k \cdot x^2/2$ ,其中  $k$  为劲度系数, $x$  为压缩形变量。击发瞬间弹簧解锁,势能转化为活检针组合体的动能,驱动针体在毫秒级时间内以极高速度刺入靶组织。这一能量转换遵循牛顿第二定律。高速切割时,针体周围液体介质因局部压力骤降可能诱发空化现象。研究显示,弹簧驱动的核心针活检装置在操作过程中确实可产生空化气泡,气泡破裂形成微射流和冲击波。该效应对组织分离可能有辅助意义,但对标本细胞层面的影响仍需澄清。半自动针的切割长度通过行程限位机构调节,常见为 10 mm 或 20 mm,其物理本质是改变弹簧释行程,控制针尖与切割槽的相对位移量。

### 3.2 套叠切割管的设计物理与组织分离

半自动活检针采用内针芯与外切割套管相嵌套的构型,两管之间预留精确设计的工作间隙。操作时首先手动推出内针芯,使其远端的组织接纳槽暴露于靶组织区域。外切割套管在弹簧驱动下高速前冲,其锐利前沿以极高的剪切速率横切固定在接纳槽中的组织带,完成组织切割。该过程涉及两个主要物理机制:第一,内针芯接纳槽与组织之间的摩擦锁合效应。接纳槽内表面规则分布微型倒刺或沟纹,组织挤入后倒刺与组织间的静摩擦系数足够大,可抵抗切割时的拉伸力,使组织条保留在槽内。第二,外切割套管切割边缘的锋利度决定所需最小剪切力。高度锋利的刃口可在极小力作用下实现组织的脆性断裂,钝化刃口则需要更大切割力,增加标本挤压变形风险。

### 3.3 高速切割的应变率效应

高速切割过程的力学加载速率与传统剪刀剪切完全不同。组织的力学响应应具有应变率依赖性:低应变率条件下(如缓慢剪切),组织主要表现为粘弹性变形,纤维结构在剪断前经历大幅拉伸和蠕变,断面不整齐且纤维丝拖出较长。高应变率条件下(活检针弹射切割),加载速率远超软组织纤维的粘弹性响应时间,材料来不及发生明显塑性变形即发生脆性断裂,使组织断面整齐锐利,细胞层次结构保存完好。但过高速度可能伴随剪切波前和应力波传播,细胞层面结构完整性是否受冲击波影响取决于切割速度与组织强度。半自动针的弹射速度由弹簧劲度系数和击发行程决定,出厂时已固定,操作者无法在临床调节,理解该机制有助于针具选型。两步操作模式“手动推出内针芯、按压击发外套管”为取样位置微调预留了操作空间。

## 4. 联合应用的物理耦合效应与分析

同轴活检针与半自动活检针的联合应用在物理层面产生了一系列相互作用,这些耦合效应直接决定了穿刺的精度、安全性与标本质量。

### 4.1 双针间隙匹配的动力学约束

外鞘管内径与活检针外径之间的配合间隙是实现能量高效传递的关键物理参数。间隙过小时,滑动阻力增大,弹

簧释放的部分弹性势能转化为摩擦热,作用于切割点的净动能下降,影响组织切割的完整性。间隙过大时,活检针在鞘管内产生径向松动,轴向推进出现微小角度偏差,切割槽与病灶的相对定位精度降低。理想的间隙设计应在保证顺畅滑动的前提下最小化动能损耗。操作层面的安全冗余表现为:击发前须使半自动针针管座与同轴针座保持适当距离,并确保针芯取样槽充分露出鞘管末端。

### 4.2 空心隧道的声学重建机制

内针芯抽离后,外鞘管形成的空心隧道内容纳的空气或组织液泡构成极端声阻抗界面。空气声阻抗约为400瑞利,而生物组织声阻抗约为150万至170万瑞利,两者相差三个数量级。这种巨大差异导致超声波在空气界面发生强反射,形成声影和多次反射伪影,使针尖后方结构完全不可见。用生理盐水充分冲洗隧道后,液性填充介质替代了空气,声波得以恢复传播,实现对深方组织的连续成像。这一“声学重建”是联合应用中确保引导精度的技术前提。

### 4.3 组织应力场的重分布

传统单针穿刺时,作用力集中于针尖的极小面积,形成高应力集中区。同轴技术引入外鞘管后,组织对管壁施加的径向压应力均匀分布于管壁整圈表面。半自动针进行切割时,剪切力优先通过外鞘管壁传递至周边组织,形成“应力分摊”效应。切割区域的剪切应力场从集中于针尖的点应力演变为均布于管壁的面应力,从而有效保护靶病灶外正常组织免受牵拉损伤。

### 4.4 潜在的不利物理效应

弹簧驱动的活检针在击发过程中可能诱发周围液体的空化现象。研究显示,侧切式半自动针在速度超过7 m/s时(雷诺数14,000至20,000),针尖下游可出现最大0.65 mm的空化云,并在155 dB强度下产生宽带噪声脉冲。同轴外鞘管限制了液体流动空间,空化气泡在鞘管末端的破裂可能产生更强的冲击波。此外,外鞘管作为金属体对超声波存在固有遮挡效应,对较小病灶而言,声影可能覆盖整个病变区域,导致切割槽位置确认困难。上述不利效应提示,在充分评估物理约束的基础上,联合策略方可实现精准定位与多次取材的临床优势。

## 参考文献:

- [1]周旺,陈永超,李岩,等.超声引导下经皮粗针穿刺活检在诊断胰腺占位性病变中的价值[J].肝胆外科杂志,2026,34(1):19-23.
  - [2]翟赛男,孙改艳,董立萍.超声引导经皮肝脏穿刺活检对肝脏占位性病变良恶性的鉴别诊断价值[J].实用癌症杂志,2026,41(3):459-462.
  - [3]康毅敏.超声引导下细针穿刺活检诊断甲状腺结节的研究进展[J].中外医学研究,2025,23(10):171-173.
  - [4]尹淑丹,张晖,连鹏,等.CT、MRI与超声引导下细针穿刺活检诊断甲状腺结节良恶性的研究[J].中国医学装备,2023,20(5):64-68.
- 吉林市科技创新发展计划项目【超声引导下同轴活检针穿刺联合半自动活检针在周围型肺癌病理活检的研究】编号:20230406110。