

doi: 10.3969/j.issn.1674-1242.2026.04.023

胸腔镜肺癌淋巴结清扫中超声刀与电凝钩对肺门血管热损伤的差异比较及档位参数优选

刘天振¹, 王富强¹, 赵冠英¹, 胡宝利^{2*}

(1. 河南宏力医院 胸外科, 河南新乡 453400; 2. 河南大学淮河医院 胸外科, 河南开封 475001)

【摘要】目的 比较超声刀与电凝钩在胸腔镜肺癌淋巴结清扫中对肺门血管热损伤的差异, 筛选安全操作档位参数。**方法** 回顾性收集河南宏力医院胸外科 2024 年 1 月至 2026 年 6 月行胸腔镜肺癌手术的患者 100 例, 按术中能量器械及档位分为超声刀 5 档组 (60 W, $n=50$)、超声刀 3 档组 (40 W, $n=30$) 和电凝钩组 (30 W, $n=20$)。术中采用红外热成像测温, 引入 Arrhenius 模型换算累积等效 43 °C 分钟数 (cumulative equivalent minutes at 43 °C, CEM43)。比较三组肺门血管热损伤发生率、术中指标 [肺门血管表面峰值温度、术中出血量]、术后并发症及档位参数综合性能。**结果** 超声刀 5 档组肺门血管热损伤发生率显著低于电凝钩组 ($P=0.011$)。术中出血量超声刀 5 档组最少, 电凝钩组最高 ($P<0.001$)。电凝钩组肺门血管表面峰值温度显著高于超声刀 3 档组 ($P<0.001$), 但略高于超声刀 5 档组。电凝钩组术后第 1 天胸腔引流量显著高于超声刀 5 档组 ($P<0.001$)。电凝钩组术后发生乳糜胸 5 例 (25.00%), 再次手术 3 例 (15.00%), 均高于超声刀各组 (均 $P<0.05$)。综合性能评估显示, 超声刀 4~5 档 (50~60 W) 为优选操作参数。**结论** 胸腔镜肺癌淋巴结清扫中超声刀所致肺门血管热损伤的风险显著低于电凝钩, 4~5 档是兼顾安全性与操作效率的推荐参数。

【关键词】 胸腔镜; 肺癌; 淋巴结清扫; 超声刀; 电凝钩; 肺门血管热损伤**【中图分类号】** R655.3**【文献标志码】** A

文章编号: 1674-1242 (2026) 04-0112-04

Comparison the difference of thermal damage to pulmonary hilar vessels between ultrasonic scalpel and electrocoagulation hook in thoracoscopic lymph node dissection for lung cancer and optimization of gear parameters

LIU Tianzhen¹, WANG FUqiang¹, ZHAO Guanying¹, HU Baoli^{2*}

(1. Thoracic Surgery Department, Henan Hongli Hospital, Xinxiang 453400, Henan, China;

2. Thoracic Surgery Department, Huaihe Hospital of Henan University, Kaifeng 475001, Henan, China)

【Abstract】Objective To compare the difference of thermal damage to pulmonary hilar vessels between ultrasonic scalpel and electrocoagulation hook in thoracoscopic lymph node dissection for lung cancer, and optimize the safety gear parameters. **Methods** A retrospective study was conducted on 100 patients who underwent thoracoscopic lung cancer surgery in the thoracic surgery department of Henan Hongli Hospital from January 2024 to June 2026. These patients were divided into three groups based on the energy devices and settings used during the operation: the 5-gear ultrasonic scalpel group (60 W, $n=50$), the 3-gear ultrasonic scalpel group (40 W, $n=30$), and the electrocoagulation hook group (30 W, $n=20$). During the operation, infrared thermal imaging was used for temperature measurement. The Arrhenius model was introduced to convert the cumulative equivalent minutes at 43 °C (CEM43). The incidence of thermal damage to pulmonary hilar vessels, intraoperative indicators (peak temperature of the pulmonary hilar vessels surface, intraoperative blood loss), postoperative complications and comprehensive performance of the gear parameters among the three groups were compared. **Results** The incidence of thermal damage to pulmonary hilar vessels in the 5-gear ultrasonic scalpel group was significantly lower than that in the electrocoagulation hook group ($P=0.011$). The intraoperative blood loss was the least in the 5-gear ultrasonic scalpel group and the highest in the electrocoagulation hook group ($P<0.001$). The peak temperature on the surface of the pulmonary hilar vessels in the electrocoagulation hook group was significantly higher than that in the 3-gear ultrasonic scalpel group ($P<$

收稿日期: 2026-07-21。

作者简介: 刘天振, 本科, 主治医师, 研究方向: 胸腔镜肺癌手术。E-mail: ltz20210714@163.com。

通信作者: 胡宝利, 硕士, 副主任医师, 研究方向: 胸部疾病微创治疗。E-mail: 15837807285@163.com。

0.001), but slightly higher than that in the 5-gear ultrasonic scalpel group. The thoracic drainage volume on the first day after the electrocoagulation hook group surgery was significantly higher than that of the 5-gear ultrasonic scalpel group ($P < 0.001$). There were 5 cases (25.00%) of chylothorax and 3 cases (15.00%) of reoperation in the electrocoagulation hook group, which were all higher than those in the other ultrasonic scalpel groups (all $P < 0.05$). The comprehensive performance evaluation showed that 4-5 gear (50-60 W) of ultrasonic scalpel was the optimal parameter. **Conclusion** The risk of thermal damage to pulmonary hilar vessels caused by the ultrasonic scalpel during thoracoscopic lymph node dissection for lung cancer is significantly lower than that caused by the electrocoagulation hook. Parameters of 4-5 gear are recommended as a balance between safety and operational efficiency.

【Key words】 Thoracoscopy; Lung cancer; Lymph node dissection; Ultrasonic scalpel; Electrocoagulation hooks; Thermal damage to pulmonary hilar vessels

肺癌以非小细胞肺癌(non-small cell lung cancer, NSCLC)为主要类型,手术切除为其首选治疗方式,系统性淋巴结清扫会直接影响其分期判定与远期生存^[1-2]。电视辅助胸腔镜手术(video-assisted thoracoscopic surgery, VATS)肺门区淋巴结清扫及组织离断多依赖能量器械,而肺门血管密集,热传导易致血管损伤,减少能量器械损伤是手术安全管控的关键^[3-5]。目前临床常用能量器械为超声刀与电凝钩^[6]。本研究回顾性分析 VATS 病例,结合红外测温与病理评估,引入 Arrhenius 模型量化温度-时间累积效应并进行血流修正,以筛选安全的超声刀档位参数。

1 资料与方法

1.1 一般资料

回顾性收集河南宏力医院胸外科 2024 年 1 月至 2026 年 6 月行胸腔镜肺癌手术的患者,初步符合条件者 186 例。纳入标准:① 18~80 岁,病理确诊为 NSCLC;② 接受单孔或单操作孔 VATS 肺叶/肺段切除+系统性淋巴结清扫;③ 术中主要使用超声刀或电凝钩进行淋巴结清扫;④ 临床资料完整。排除标准:① 肿瘤侵犯肺门大血管需血管重建;② 既往同侧胸部手术史;③ 术中转开胸;④ 严重凝血功能障碍;⑤ 临床资料不完整。按排除标准剔除 86 例(肿瘤侵犯肺门大血管需血管重建 22 例、既往同侧胸部手术史 15 例、术中转开胸 12 例、严重凝血功能障碍 10 例、临床资料不完整 27 例),最终纳入 100 例。按术中能量器械及档位分为三组:超声刀 5 档组(60 W, $n=50$)、超声刀 3 档组(40 W, $n=30$)和电凝钩组(单极 30 W, $n=20$)。本研究经河南宏力医院伦理委员会审批(批件号:HLYY-2026-018)。

1.2 方法

1.2.1 手术操作

超声刀组使用 Harmonic ACE+(Ethicon),设定 3 档(40 W)或 5 档(60 W);电凝钩组使用 Valleylab

Force FX 单极电外科发生器(Medtronic)配单极电钩,功率 30 W(切割/凝血混合模式)。设备输出特性为:超声刀工作频率 55.5 kHz,振幅 50~100 μm ,输出随负载自适应;电凝钩具阻抗动态补偿。电凝钩 30 W 为临床常用功率(低于 20 W 切割效率差,高于 40 W 碳化严重)^[7]。淋巴结清扫范围遵循美国国家综合癌症网络(National Comprehensive Cancer Network, NCCN)指南(N1+N2)。

1.2.2 术中温度测量

使用经黑体辐射源校准的 FLIR A655sc 红外热成像仪(分辨率 640×480,帧频 50 Hz,精度 $\pm 2^\circ\text{C}$ 或读数的 $\pm 2\%$,取较大值),发射率设为 0.95。镜头经观察孔对准术野,采集器械作用点为中心 5 mm 半径内肺门血管壁表面温度,记录每次激活峰值温度及持续时间。采集前清除遮挡并待烟雾消散、组织表面液体清除后采集,剔除图像模糊、血管表面覆血等无效数据。每例至少 10 个有效测温点,取各有效测温点峰值温度的均值作为该例的统计指标,并据完整温度-时间曲线基于 Arrhenius 损伤模型换算累积等效 43 $^\circ\text{C}$ 分钟数(cumulative equivalent minutes at 43 $^\circ\text{C}$, CEM43)。

1.2.3 热损伤判定标准

术后在淋巴结清扫边缘及血管离断处系统取材(每例 ≥ 3 个血管断面),行苏木精-伊红染色(hematoxylin-eosin, HE)和 Masson 三色染色,光镜下见血管内膜蛋白变性、空泡变性或弹力层断裂任一项即为热损伤阳性。

1.3 观察指标

① 肺门血管热损伤发生率(病理确认);② 肺门血管表面峰值温度(红外热成像)。次要指标:① 迷走神经分支热损伤发生率;② 术中出血量;③ 术后第 1 天胸腔引流量;④ 术后并发症(乳糜胸、再次手术等);⑤ 术后住院时间。

1.4 统计学方法

采用 SPSS 26.0 软件进行数据分析。计量资料以均数 $\pm$ 标准差($\bar{x}\pm s$)表示,多组比较用单因素方差分析,两两比较用 LSD-*t* 检验;计数资料以例(%)表示,组间比较用 χ^2 检验或 Fisher 确切概率法。相关性分析采用 Pearson 法。 $P<0.05$ 为差异有统计学意义。

2 结果

2.1 三组基线资料比较

三组年龄、性别、吸烟史、肿瘤 TNM 分期、手术方式等基线资料比较,差异均无统计学意义(均 $P>0.05$)(表 1)。

2.2 三组肺门血管热损伤及术中指标比较

超声刀 5 档组肺门血管热损伤发生率显著低于

表 1 三组基本资料比较($\bar{x}\pm s$,例(%))

项目	超声刀 5 档组 (<i>n</i> =50)	超声刀 3 档组 (<i>n</i> =30)	电凝钩组 (<i>n</i> =20)	<i>F</i> / χ^2	<i>P</i>
年龄(岁)	62.4 $\pm$ 8.6	63.1 $\pm$ 7.9	61.8 $\pm$ 9.2	0.183	0.832
男性	32 (64.00)	19 (63.33)	13 (65.00)	0.026	0.987
吸烟史	28 (56.00)	16 (53.33)	12 (60.00)	0.161	0.856
TNM 分期 I 期	35 (70.00)	21 (70.00)	14 (70.00)	—	1.000
TNM 分期 II 期	15 (30.00)	9 (30.00)	6 (30.00)	—	1.000
肺叶切除	38 (76.00)	23 (76.67)	15 (75.00)	0.025	0.975
肺段切除	12 (24.00)	7 (23.33)	5 (25.00)	0.025	0.975
左侧手术	22 (44.00)	13 (43.33)	9 (45.00)	0.026	0.987

电凝钩组($P=0.011$)。术中出血量超声刀 5 档组最少,电凝钩组最高($P<0.001$)。电凝钩组肺门血管表面峰值温度显著高于超声刀 3 档组($P<0.001$),但略高于超声刀 5 档组(表 2)。

表 2 三组肺门血管热损伤及术中指标比较($\bar{x}\pm s$,例(%))

指标	超声刀 5 档组 (<i>n</i> =50)	超声刀 3 档组 (<i>n</i> =30)	电凝钩组 (<i>n</i> =20)	χ^2 / <i>F</i>	<i>P</i>
肺门血管热损伤	2 (4.00)	3 (10.00)	5 (25.00)	8.927	0.011
迷走神经分支热损伤	1 (2.00)	2 (6.66)	4 (20.00)	7.653	0.022
术中出血量 (ml)	85.1 $\pm$ 32.3	110.2 $\pm$ 38.3	165.3 $\pm$ 58.1	28.431	<0.001
肺门血管表面峰值温度 (°C)	63.8 $\pm$ 3.6	56.2 $\pm$ 3.0	68.3 $\pm$ 3.8	18.726	<0.001
淋巴结清扫总数 (枚)	18.6 $\pm$ 4.2	17.2 $\pm$ 3.8	16.5 $\pm$ 4.0	2.184	0.118
手术时间 (min)	145.1 $\pm$ 28.2	158.3 $\pm$ 32.1	172.2 $\pm$ 35.1	6.523	0.002

超声刀 1~5 档静态峰值温度由 42.3 °C 线性升至 71.5 °C($r=0.982$, $P<0.001$),活体实测中超声刀 5 档均值为 63.8 °C。电凝钩 20 W 时已达 55.6 °C,40 W 时升至 79.8 °C,超过 60 °C 安全阈值。引入 Arrhenius 模型计算 CEM43,电凝钩 30 W 为(12.5 $\pm$ 3.2)s,显著高于超声刀 5 档的(4.8 $\pm$ 1.5)s($P<0.001$)。血流修正分析显示,血管直径与温度衰减率呈负相

关($r=-0.45$, $P=0.008$),血流速度与之呈正相关($r=0.52$, $P=0.002$)。

2.4 三组术后并发症比较

电凝钩组术后第 1 天胸腔引流量显著高于超声刀 5 档组($P<0.001$)。电凝钩组术后发生乳糜胸 5 例(25.00%),再次手术 3 例(15.00%),均高于超声刀各组(均 $P<0.05$)(表 3)。

表 3 三组术后并发症比较($\bar{x}\pm s$,例(%))

指标	超声刀 5 档组 (<i>n</i> =50)	超声刀 3 档组 (<i>n</i> =30)	电凝钩组 (<i>n</i> =20)	<i>F</i> / χ^2	<i>P</i>
术后第 1 天胸腔引流量 (ml)	215.2 $\pm$ 68.0	268.1 $\pm$ 75.3	385.4 $\pm$ 101.8	32.817	<0.001
术后第 3 天胸腔引流量 (ml)	98.2 $\pm$ 35.3	125.3 $\pm$ 42.4	177.2 $\pm$ 54.9	18.543	<0.001
总引流量 (ml)	580.1 $\pm$ 151.6	695.2 $\pm$ 180.3	980.1 $\pm$ 234.7	24.671	<0.001
拔管时间 (d)	4.2 $\pm$ 1.3	5.0 $\pm$ 1.5	6.8 $\pm$ 2.1	15.328	<0.001
乳糜胸	1 (2.00)	2 (6.67)	5 (25.00)	10.285	0.006*
再次手术	0 (0)	1 (3.33)	3 (15.00)	—	0.013*
术后住院时间 (d)	6.5 $\pm$ 1.8	7.8 $\pm$ 2.0	10.2 $\pm$ 3.5	12.846	<0.001

注: *采用 Fisher 确切概率法; “—” 表示未提供数值。

2.5 档位参数综合性能评估

将血管热损伤风险、切割效率、止血效果、周围组织安全性、淋巴结清扫完整性、操作便捷性 6 项指标按 1~4 分(差 $\rightarrow$ 优)评分,绘制综合性能热图(图 1)。结果显示:超声刀 5 档在切割效率(4 分)、止

血效果(4 分)、淋巴结清扫完整性(4 分)三项得分最高,血管热损伤风险(2 分)与周围组织安全性(2 分)略低于低档位,但综合得分最优;电凝钩在 40 W 及以上功率时,血管热损伤风险与周围组织安全性均降至 1 分(最差)。

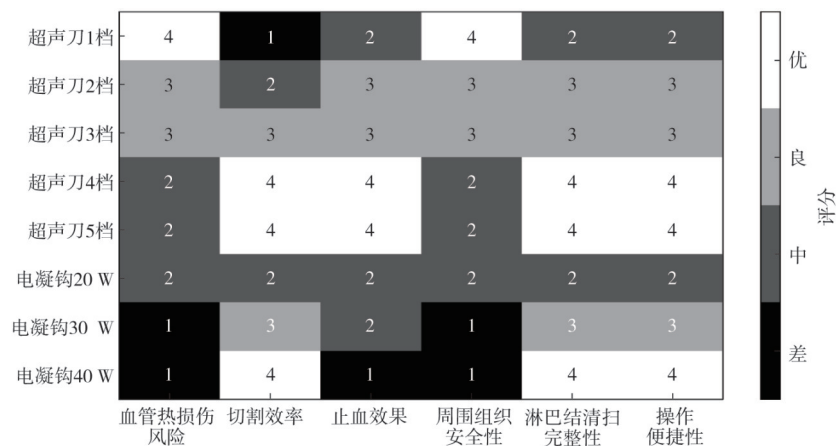


图1 超声刀与电凝钩各档位参数综合性能热图

注：评分1~4分别对应差、中、良、优。

3 讨论

本研究发现,超声刀所致肺门血管热损伤风险显著低于电凝钩,差异不仅体现在病理层面,也得到术中红外测温数据支持,与已有研究报道相一致^[7-8]。本研究的创新点包括:针对肺门血管开展专项温度学与病理学对照,引入 Arrhenius 模型量化温度-时间累积效应;对超声刀档位进行系统分层,明确档位与功率的对应关系。既往文献多将超声刀作为整体对比^[4,6],本研究显示 1~5 档峰值温度跨度 42.3~71.5℃,4~5 档(50~60 W)在保证切割效率的同时热损伤率控制在 4%~8%,为档位优选提供了量化依据。

60℃是血管热损伤的关键阈值。电凝钩 30 W 的 CEM43 值显著高于超声刀 5 档,证实其温度-时间累积效应更强,与其电流密度分布及阻抗动态变化有关。超声刀 5 档峰值(63.8℃)虽略超阈值,但热扩散半径小、作用时间短,损伤有限;电凝钩 30 W 峰值 68.3℃且扩散半径大,是高损伤率的主因。Okada 等^[9]研究支持超声刀可安全闭合 7 mm 以下血管,本研究为该结论补充了温度学层面的直接证据。活体与静态环境下的温度差异受血流对流影响,较粗血管和较快血流能有效降温,为热损伤风险评估提供了动态修正依据。

本研究发现,能量器械组清扫淋巴结总数显著多于电凝组,但差异未达统计学意义,考虑可能与样本量较小、纳入部分肺段切除病例有关。王安生等^[6]强调手术质量控制,本研究的测温数据量化了“精细”的温度学内涵。

综上,超声刀对肺门血管的热损伤风险显著低

于电凝钩;4~5 档(50~60 W)是兼顾安全性、切割效率与清扫完整性的优选参数区间,建议临床优先选用,操作中可配合间歇性激活与局部生理盐水冲洗进一步降低热损伤风险。但本研究存在以下局限:为单中心回顾性设计,各组样本量分布不均衡,可能存在一定选择偏倚;未来仍需多中心研究验证结论可靠性。

参考文献

[1] 赵臣亮,汪杨,吴晗,等. 单孔胸腔镜下纵隔淋巴结清扫策略[J]. 中华胸部外科电子杂志, 2024, 11 (2): 109-114.

[2] 顾秀发,张含露,陈龙奇,等. 单孔胸腔镜后入路右肺中叶切除术 52 例前瞻性队列研究[J]. 中国胸心血管外科临床杂志, 2024, 31 (9): 1281-1287.

[3] 陈昊,黄麟,郑斌,等. 单孔胸腔镜下肺段切除术中超声刀分离段间平面的应用研究[J]. 中华胸部外科电子杂志, 2019, 6 (2): 131-135.

[4] 王长兴,成刚,余晓伟,等. 胸腔镜肺癌精准切除策略的肿瘤学疗效、肺功能、复发率及安全性研究[J]. 疑难病杂志, 2022, 21 (12): 1259-1263, 1270.

[5] 王安生,王祖义,陈力维,等. 早期肺癌胸腔镜解剖性肺段切除临床疗效及手术质量控制[J]. 蚌埠医学院学报, 2023, 48 (6): 735-740.

[6] CATTONI M, ROTOLO N, NARDECCHIA E, et al. Energy devices safety and impact on video-assisted thoracoscopic lung lobectomy postoperative course: monopolar electrocautery versus ultrasonic dissector[J]. J Cardiothorac Surg, 2021, 16(1):40.

[7] CATELLI C, D'ALESSANDRO M, MATHIEU F, et al. Clinical and biological effects of different energetic surgical devices currently used for mini-invasive anatomical lung resections for the treatment of NSCLC: a prospective interventional study[J]. Surg Endosc, 2024, 38(8):4753-4761.

[8] OKADA M, MIYATA Y, TAKAMUCHI K, et al. Prospective feasibility study of sealing pulmonary vessels with energy in lung surgery[J]. J Thorac Cardiovasc Surg, 2019, 157(1):388-395.