

老年患者全髋关节置换股骨假体置入期微气栓与循环波动相关性

苗园园 王 淳 杨海涛^(通讯作者) 梁秀清

大连医科大学附属第二医院麻醉科, 辽宁 大连 116000

摘要: [目的]利用经颅多普勒超声(TCD)技术来观察老年患者全髋关节置换术(THA)中股骨假体植入期微气栓出现的特殊规律,探究它同循环系统动态改变的可能联系。[方法]选取90名接受腰硬联合麻醉的高龄THA手术患者作为研究对象,在股骨假体置入前1分钟(T0)、置入瞬间(T1)、置入后3分钟(T2)、5分钟(T3)及10分钟(T4)五个时间节点,同步采集有创动脉平均压(Invasive Mean Arterial Pressure, IAMAP)、心率(Heart Rate, HR)、肺动脉氧分压(Pulmonary Artery Oxygen Tension, PaO₂)等相关生理参数。用TCD设备对微气栓事件的频次以及影像学特征评分进行监测,并且详细记录术后出现的各种不良反应情况,从而为改良该类手术操作给予科学依据^[1]。[结果]在纳入标准的90例THA中,微气栓发生率为41.1%。出现2、3级气栓的患者在T1时刻IAMAP较术前明显降低($P<0.05$),但出血量相比统计学无显著差异($P>0.05$);在不同的栓子面积下麻黄碱的临床应用频率有明显的统计学意义($P<0.05$),而去甲肾上腺素的临床应用频率没有统计学意义($P>0.05$)。实验结果表明微气栓形成发生率是41.1%,有血流动力学改变的病例占32.43%^[1];微气栓是否引起血流动力学改变以及严重程度,并不是由它是否存在来决定的,而是和栓子面积大小有关。术中发生循环波动后,及时给予血管活性药物可维持血流动力学平稳。

关键词: 老年患者;微气栓;人工全髋关节置换术

Correlation between microembolism and circulatory fluctuation during femoral prosthesis implantation in total hip arthroplasty for elderly patients

Miao Yuanyuan Wang Chun Yang Haitao^(Corresponding author) Liang Xiuqing

Department of Anesthesiology, the Second Affiliated Hospital of Dalian Medical University, Liaoning Dalian

116000

Abstract: [Objective]To observe the special regularity of micro-air embolism during femoral prosthesis implantation in elderly patients undergoing total hip arthroplasty(THA)by transcranial Doppler(TCD),and to explore its possible relationship with the dynamic changes of circulatory system.[METHODS]A total of 90 elderly patients undergoing THA surgery under combined spinal-epidural anesthesia were selected as the study subjects.Five time nodes were selected:1 minute before femoral prosthesis implantation(T0),the moment of implantation(T1),3 minutes after implantation(T2),5 minutes(T3)and 10 minutes(T4).The related physiological parameters such as Invasive Mean Arterial Pressure(IAMAP),Heart Rate(HR)and Pulmonary Artery Oxygen Tension(PaO₂)were collected simultaneously.TCD equipment was used to monitor the frequency of microembolic events and imaging feature scores,and various adverse reactions after operation were recorded in detail,so as to provide scientific basis for improving the operation of this kind of operation[1].[Results]:The overall incidence of microemboli was 41.1% among the 90 enrolled THA patients. Patients with grade 2 and grade 3 microemboli exhibited a significant decrease in

IAMAP at T1 compared with baseline ($P < 0.05$), while no significant difference was found in blood loss volume among groups ($P > 0.05$). The requirement for ephedrine differed significantly among patients with different microemboli sizes ($P < 0.05$), whereas the usage rate of norepinephrine showed no statistical difference ($P > 0.05$). [Conclusion] The incidence of microemboli in this study was 41.1%, and hemodynamic fluctuations occurred in 32.43% of microemboli events. Not all microemboli can induce hemodynamic instability, which is directly related to the size of microemboli. Timely administration of vasoactive drugs can stabilize hemodynamics after intraoperative circulatory fluctuations.

Keywords: elderly patients; micro-air embolism; total hip arthroplasty

全髋关节置换术 (Total Hip Arthroplasty, THA) 属于成熟的临床技术, 已经被广泛地应用到终末期髋关节疾病的治疗当中, 它的疗效和安全性已经得到了充分的证实。虽然该手术对患者髋关节的关节功能有明显的好处, 但是也要注意有关的术中并发症^[2]。早期的研究表明, 骨水泥中挥发的单体是引起术后低血压、低氧血症、心血管反应等的可能的原因^[3]。近几年的研究表明, 非骨水泥型全髋关节置换术 (THA) 患者的血流动力学会发生很大的改变。根据已有的文献可以知道, 这类手术中空气栓塞的发生率可达 60%–90%, 大概有四分之一到五分之一的病例会出现循环系统功能障碍的情况^{[4][5]}。目前学术界认为, 这些术中并发症不是由于骨水泥毒性引起的, 是多因素综合作用的结果。以超声监测技术发展为依托, 对于空气栓塞危险程度的评判愈加精确, 促使出现更有效率的防范以及处置办法^[6]。本研究采用经胸多普勒超声心动图 (TTE) 对 THA 中心腔内微气栓动态观察并分级, 同时监测患者生命体征变化情况, 分析不同程度的微气栓对患者血流动力学波动的影响, 探究如何更好的预防临床并发症的发生。

1 资料与方法

1.1 一般资料

本研究在大连医科大学附属第二医院伦理委员会的正式批准下进行, 也得到患者的同意和家属的认可。研究选取该医院于 2022 年 1 月至 2024 年 1 月期间完成的 90 例全髋关节置换术 (Total Hip Arthroplasty, THA) 病例作为样本对象。纳入标准包括: 目标群体年龄范围为 60–80 岁, 美国麻醉医师协会 (ASA) 健康状况分值在 I 级到 III 级之间, 体质指数 (BMI) 在 18.5 到 23.9 kg/m² 之间。排除的情形有, 明确表示不愿意参与本次研究者、严重心血管或者神经系统疾病史者、有血栓史者、呼吸系统、消化系统或者泌尿系统功能异常者、因凝血功能障碍长期应用抗凝药者、存在脊柱畸形等影响局部麻醉施行的解剖学异常、存在其他造成重度休克风险因素的患者都不在本研究范围内^[1]。

1.2 研究方法

1.2.1 麻醉前准备

患者监测心电图 (ECG), 心率 (HR), 脉氧饱和度 (SpO₂), 监测有创动脉平均压 (IAMAP)^[7]。

1.2.2 麻醉

采用腰硬联合麻醉技术, 用 0.5% 布比卡因做局部麻醉, 每次给药量控制在 10mg 以内。术前已事先置入并固定硬膜外导管, 在保证麻醉效果达到手术要求之后, 病人取平卧位。考虑术前禁食禁饮和麻醉操作会引起机体参数的变化, 所以实验利用超声影像学技术实时观察下腔静脉塌陷指数 (SCI) 来评价受试者容量状况, 根据该情况制订个性化的输液方案, 从而减小非特异性因素对于实验结果的影响^[7]。具体的实施方法如下: 在剑突下做下腔静脉纵切面, 在下腔静脉与右心房汇合处距下腔静脉 2cm 处为观察点, 每次测量 SCI 值 (公式见原文献)。如果测得的 SCI 小于等于 43%^[8], 那么根据术前估计的出血量、基础代谢率和术中失血量来综合确定总的补液量, 按 4ml/(h · kg) 的速度给晶体液和胶体液混合扩容治疗, 晶体液和胶体液的比例为 2: 1; 当 SCI 大于 43% 时, 先给予羟乙基淀粉 130/0.4 氯化钠注射液 200ml 作为负荷液, 然后每 10 分钟复查一次 SCI, 直到 SCI 下降到目标阈值以下, 再转入常规液体管理流程^[1]。

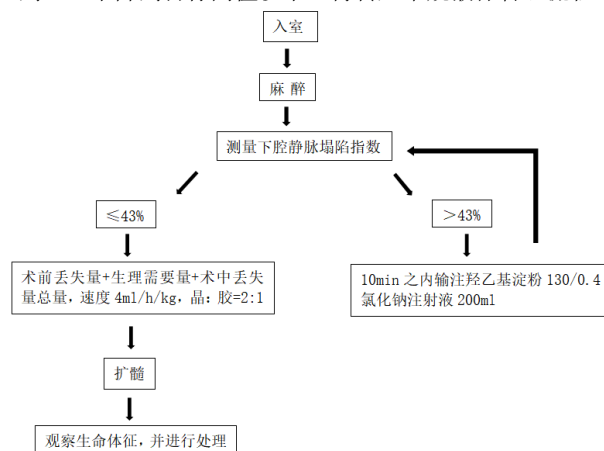


图 1 实验基本流程图

1.2.3 手术过程记录

在进行股骨假体植入手术的时候,使用经胸壁超声心动图(TTE),在心尖四腔切面上实时检测可能形成的血栓,记录重要的时间点^[1]。具体操作时,用假体置入前的T0作为基准点,然后在置入后即刻、3分钟、5分钟和10分钟四个时间点同时采集平均动脉压(MAP)、心率(HR)和血氧饱和度(SpO₂)等主要的生理指标。如果任一指标与基线相比有超过±20%的变化,那么就判定为血流动力学不稳定事件;如果SpO₂的下降幅度大于5%,那么就认为是低灌注型脉搏血氧变化。还需要注意有无心律失常或者其他的并发症^[9],根据不同的病情给予相应的血管活性药物或者支持性治疗。

1.2.4 相关处理

在术中,医疗团队要时刻注意观察患者的循环系统的变化情况,并且根据实际情况来改变血管活性药物使用的量。当常规氧疗不能改善呼吸衰竭、低氧血症或者心律失常等问题的时候,如果存在心搏骤停的危险,那么医护人员就要立刻告知外科医师停止手术,立即开展急救工作来保持患者生理指标的稳定^[9]。

1.2.5 手术结束

观察患者生命体征平稳,将患者转入病房。

1.3 观察指标

在手术过程中要时刻观察并记下诸多重要生理指标,即基线血压(T₀)、心率(HR)、脉搏血氧饱和度(SpO₂)和与胸腔积气有关的经皮指数平均动脉压(IAMAP)。为了达到动态观察和分析的目的,应该采用高分辨率超声设备对股骨假体植入过程中产生的影像数据进行持续的采集,以便之后形态学以及功能学的评价工作顺利开展。根据血栓占据右心房区域面积占整个右心房比例来分级,按照预先设定的标准分为0级(没有明显的血栓)1级(占区<5%)2级(5%–10%)3级(10%–15%)4级(15%–30%)S4(大于30%但是小于等于50%)5级(大于50%)。使用ImageJ软件将原始影像文件进行标准化处理之后,用定量分析法统计各个阶段血栓的分布频率,根据该数据建立亚组样本库。

1.4 统计学方法

本文主要采用SPSS25.0软件平台来进行数据统计学方面的分析。在完成Shapiro-Wilk检验评估各个变量是否符合或接近正态分布特征之后,对符合正态分布特征或者接近正态分布特征的计量资料,用均值($\bar{X}$)和标准差(S)来表示其集中趋势和变异程度,根据方差齐性情况选择单因素方差分析或者Welch修正检验来研究组间差异,使用LSD法进行多组之间的两两比较;方差不齐时直接用Welch检验进行后续分析。对正态分布、方差不齐的计数资料用配对样本t检验来考察组内效应的变化,

当数据不符合正态分布或者方差不齐的时候,则用非参数检验方法,中位数及其四分位间距建立统计模型得到推断结果。所有的研究结果都用 $\alpha=0.05$ 这个显著性水平的判定标准来判断^[10]

1.5 结果

1.5.1 一般情况的比较(表1)

统计学检验结果发现各个研究对象在年龄、体质指数BMI、美国麻醉医师协会分级ASA这三个方面没有显著性差异($P>0.05$)。

1.5.2 发生空气栓塞的情况(表2)

选择90例老年全髋关节置换术患者做微气栓事件的发生检测,用多普勒超声检测。结果显示,53例(占比58.89%)未观察到明显微气栓影像学特征;其余37例(占41.1%)中,一级、二级及三级微气栓分别出现16例(17.78%)、19例(21.11%)和2例(2.22%)。从统计结果可知各类别的微气栓检出率没有统计学差异。对血流动力学波动与微气栓等级的相关性进行深入研究之后得知,不同分级之间的数据分布有明显统计学上的差别($P<0.001$)。

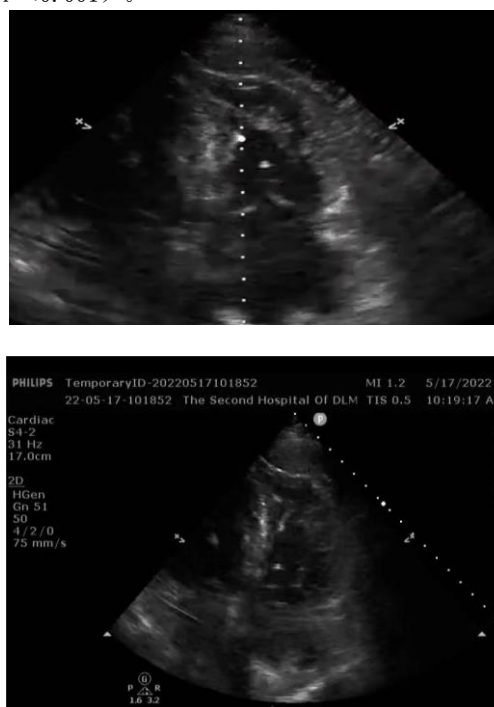


图2 术中微气栓超声图像

1.5.3 各项生命体征指数的比较

(1) 患者在T0时刻的MAP、HR(表3)

所有患者在T0时刻的MAP、HR比较,统计学差异无显著性。

(2) 所有患者在不同时刻的MAP(表4)

(3) 所有患者在不同时刻的HR(表5)

表1 一般情况的比较

面积	S0	S1	S2	S3	P 值
年龄 (岁)	69.49±5.34451	71.5±3.120	70.42±3.977	71.00±5.657	0.495
BMI (kg/m ²)	21.215±1.13	21.413±0.8253	21.205±0.8243	21.200±1.55	0.919
ASA (I/II/III)	(10/42/1)	(2/13/1)	(2/15/2)	(0/2/0)	0.599

表2 患者发生空气栓塞的情况

面积	0 级	1 级	2 级	3 级	合计
血流动力学波动例数	2	1	9	2	14
未发生血流动力学波动例数	51	15	10	0	76
合计	53	16	19	2	90
循环波动发生率	3.77%	6.25%	47.37%	100%	15.56%

表3 患者在 T0 时刻的 MAP、HR

栓子面积	S0	S1	S2	S3	P
MAP0 (mmHg)	95.09±6.532	94.25±4.155	100.11±10.132	100.00±2.828	0.134
HR0 (次/分)	63.32±9.930	64.81±10.913	67.58±12.993	65.00±4.243	0.534

表4 所有患者在不同时刻的 IAMAP

栓子面积	T0	T1	T2	T3	T4
0 级	95.0±6.532	94.11±7.658	93.15±9.176	93.23±9.653	93.49±7.242
1 级	94.25±4.155	92.00±7.127	91.63±7.719	90.50±8.824	91.19±8.440
2 级	100.11±10.132	82.37±8.584a	80.21±11.938a	96.53±9.407	96.32±9.724
3 级	100.00±2.828	79.5±2.121	86.00±8.485	104.00±8.485	103.00±4.243
P 值	0.134	0.000	0.000	0.118	0.107

a 表示同级别面积栓子在不同时刻 IAMAP 较 T0 时刻比较, P 值<0.05

表5 所有患者在不同时刻的 HR

级别	HR0 (次/分)	HR1 (次/分)	HR2 (次/分)	HR3 (次/分)	HR4 (次/分)
S0	63.32±9.930	63.49±8.004	64.28±9.506	62.42±8.619	63.42±6.392
S1	64.81±10.913	63.38±8.469	64.19±8.134	65.44±3.741	62.50±6.772
S2	67.58±12.993	65.63±7.661	66.26±11.180	65.89±11.115	66.05±12.933
S3	65.00±4.243	65.00±4.243	59.50±0.707	61.50±0.707	63.5±2.121
P 值	0.534	0.769	0.749	0.186	0.823

表6 所有患者在不同时刻的 PaO2

栓子面积	锤击前	锤击时	锤击后 30min
0 级	216.3704±17.270	214.672±17.788	214.319±15.795
1 级	219.463±17.723	217.800±18.981	221.544±21.168
2 级	213.189±25.048	177.184±18.592c	214.468±16.952
3 级	208.750±4.879	151.200±1.414c	212.300±5.515
P 值	0.336	0.000	0.495

c 为同一个等级面积栓塞在不同时间点相比锤击前 PaO2 的变化值, 当 P<0.05 时有统计学意义。

表7 不同级别栓子之间的出血量

面积	0 级	1 级	2 级	P 值
出血量 (ml)	184.53±64.497	199.06±70.904	156.05±53.296	0.141

表8 血管活性药物应用情况

使用的药物	S0 (人数)	S1 (人数)	S2 (人数)	S3 (人数)	P 值
麻黄碱	4 (7.5%)	2 (12.5%)	4 (21.1%)	1 (50%)	0.008
去甲肾上腺素	2 (3.7%)	1 (6.25%)	3 (15.8%)	1 (50%)	1.000

就同级别的栓塞负荷的受试者而言, 在各个时间点上主动脉瓣口面积 (IAMAP)、心率 (HR) 的变化特性做分析之后得知, 0 级以及 1 级组的各个评价时间节点下的 IAMAP 值存在显著差异, 并且基本维持在基线位置附近, 2 级组在首次以及第二次随访时的 IAMAP 均小于基线, 而 3 级组只在第一次随访时发现 IAMAP 低于基线。由数据可知, 在各个测量时间点上所有组别的心率没有明显的统计学显著性差异, 即 HR 的变化不大, 没有达到设定的阈值。

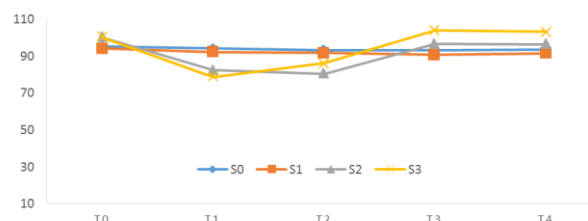


图3 不同面积下不同时刻 MAP 均值变化

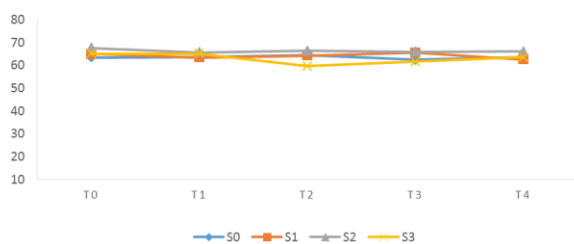


图4 不同面积下不同时刻 HR 均值变化

(4) 所有患者在不同时刻的 PaO₂

对不同栓塞体积下的0级、1级、2级、3级病人血气分析数据做统计学检验后可知,对0级、1级病人来说,在各个观察时点动脉血氧分压(PaO₂)值与干预前没有显著性差异;但2级和3级病人在受到外力作用的时候,其动脉血氧分压(PaO₂)值有显著性的下降。

S3时期有一个患者的脉氧饱和度从原来的基线水平上超过5%,但是在S2时期就出现了两位患者先后出现咳嗽、胸闷和胸痛的症状,并且伴有两次短时间的心律失常(室性期前收缩)。经过吸氧和体位调节之后,上述症状明显好转,两位病人就转入普通病房进行后续的治疗。

1.5.4 不同级别栓子之间的出血量比较(表7)

不同级别栓子之间的出血量之间无显著性差异。

1.5.5 血管活性药物应用情况(表8)

使用麻黄碱的人数在不同级别栓子之间有显著性差异(P=0.008),使用去甲肾上腺素的人数在不同级别栓子之间无显著差异。

2 讨论

有关研究显示,在髋关节置换手术(THA)时,微气栓发生率大约为60%~90%,其中大概有40%~50%的病人会出现明显的心血管功能紊乱状况^[6]。微气栓进入人体循环系统以后,大多数生理状态正常的个体因为栓子体积小,一般会滞留在肺泡壁或者毛细血管内,依靠肺部自主调节机制避免出现临床症状,但是部分患者会出现短暂的低氧血症、血压波动等症状^[11],在机械通气支持下,患者的呼吸末二氧化碳分压会出现一过性的下降。有些患者也会有胸闷、胸痛等相关的不适感觉。微气栓引起的凝血级联反应会引发血栓产生并且造成血管堵塞,进而影响到肺血管床。该一系列的病理生理变化会引发右心室流出道梗阻和急性右心衰竭,还会加重左心前负荷过重和心输出量减少的情况,而且还有心律失常以及急性心脏骤停的危险^{[11][12][13]}。在这个过程之中,气体分子促使炎症因子(血栓素、白三烯等)被释放出来,明显加大了呼吸系统的阻力,提高了肺毛细血管

的通透性,最后导致肺水肿和肺泡塌陷出现^[14]。微气栓事件引起了机体各种液体调节系统的活跃,组胺、前列腺素等许多生物活性物质就会被释放到循环中来,进而造成一系列复杂的生理反应,比如血管扩张、外周血管扩张、血压下降等^[11]。

本研究用多普勒超声观察微气栓事件的发生情况,得到结果是微气栓事件发生率为41.1%。血流动力学显著波动的患者比例为32.43%^[1]。根据数据分析可知,当栓子占据血管横截面积的比例大于等于5%的时候,一般会伴随一定程度的循环功能障碍,而且随着栓子体积变大,相关的生理指标波动幅度也变大,有较高的临床关注价值。在某个时刻(T2),重症病人接受干预之后,平均动脉压(MAP)明显上升,中度病人虽然有所恢复到基线±20%左右,但依然属于正常区间,按照目前的风险控制手段,并没有对它们进行更加积极的治疗干预。直到后来的时间点T3、T4为止,各个组别均呈MAP逐渐上升的趋势。合并低氧血症或者心律失常等并发症的患者,根据具体的病情来实施个体化的对症支持治疗。

本研究具有一定的局限性。就目前的实验设计而言,大多研究集中在股骨假体植入时微气栓的产生机理上,在手术的实际操作过程中,气栓事件发生的时候涉及到髌臼假体的固定、髓腔的清理和骨水泥的注入等诸多环节。尽管使用了经胸超声心动图(TTE)来监测栓子动态变化,但是由于经食道超声心动图(TEE)因为比经胸超声心动图更敏感而被广泛应用到空气栓塞的诊断和评估中^[16]。因此没有使用TEE作为主要观察仪器。目前超声技术还不能准确地分辨气体与其它物质(脂质、血栓、骨髓碎片)的区别,并且没有对某一段时间内的右心房血液成分进行系统的分析,因此不能对图像中的潜在栓子类型做出全面的解析^[17]。随着虚拟仿真技术的不断发展,可以期望各种类型的栓子分辨能力会得到提高。复旦大学研究团队从气栓多普勒信号特点入手,利用彩色血流成像和功率成像技术,成功地将气栓可视化,并且改进了检测方式^[18];他们还建立了以气栓超声多普勒效应为基础的模拟模型,给临床决策赋予了理论支撑和操作参照^[19]。评估栓子的大小时,本研究采用视觉判断确定测量范围,用Image J软件计算占位百分比来分等级,此法存在人为因素干扰,导致数据不可靠。建议以后继续研发更为精确的空间定位算法或者智能化的处理程序,从而提高数据分析的总体准确性以及稳定性。

综上所述,全髋关节置换术(Total Hip Arthroplasty, THA)中微气栓的高发生率揭示了其潜在危害不容小觑。虽然大多数微气栓体积小,而且健康人的心肺系统一般可以很好地处理这些颗粒物,但是许多无基础疾病的患者没有明显的临床症状^[20]。在某些情况下,比如微气栓体积过大、患者有心脑血管疾

病、低氧血症、肺功能不好、肺动脉高压、卵圆孔未闭等危险因素时，可能会引起急性呼吸衰竭、循环系统崩溃，严重者可致心脏骤停或死亡。这就表明麻醉科和骨科医生对于围手术期的各种风险因素作出精确的判定，并且要采取综合性的方式来进行管理具有十分重大的价值。对于高危患者来说，应采取多

种监测措施，并依照病情改变随时对治疗方案进行调整，比如利用血管活性药物^[21]来提升血压水平，给予吸氧支持，并改善体位管理等方法，从而尽可能减小并发症的发生几率，并且保证病人的生命安全。

参考文献:

- [1] 苗园园. 老年患者人工全髋关节置换术中股骨假体置入期微气栓与循环波动的相关性[D]. 大连医科大学, 2023.
- [2] Fitzgerald R, Mason L, Kanumilli V, Kleinhomer K, Sakamoto A, Johnson C. Transient cardiac standstill associated with embolic phenomena diagnosed by intraoperative transesophageal echocardiography during cemented total hip arthroplasty. *Anesth Analg*. 1994 Aug;79(2):382-5.
- [3] Spiess BD, Sloan MS, McCarthy RJ, Lubenow TR, Tuman KJ, Matz SD, Ivankovich AD. The incidence of venous air embolism during total hip arthroplasty. *J Clin Anesth*. 1988;1(1):25-30.
- [4] 王晓慧, 陈虹. 空气栓塞的诊治[J]. 临床荟萃, 2016, 31(04):355-358.
- [5] Shanks J, Pachen M, Lever NA, Paton JFR, Ramchandra R. Reinstating respiratory heart rate variability improves hemodynamic responses during exercise in heart failure with reduced ejection fraction. *Basic Res Cardiol*. 2025 Aug;120(4):745-759.
- [6] 洪飏, 古妙宁, 段律芳, 郑利民. 经食管超声心动图在宫腔镜术中患者心腔内气体栓塞状况的监测[J]. 实用医学杂志, 2014, 30(12):1946-1949.
- [7] 尹小清, 邹军, 叶西就. 保留自主呼吸条件下七氟烷吸入联合 UE 可视喉镜在可预料困难气道诱导插管中的应用体会[J]. 岭南现代临床外科, 2020, 20(5):628-630.
- [8] 姜玉凤. 下腔静脉塌陷指数导向补液对全麻诱导后血流动力学的影响[D]. 福建医科大学, 2018.
- [9] Haroon MM. ECMO circuit-induced microembolism and subclinical cognitive decline: a hidden determinant of delayed neurological recovery after eCPR. *Resuscitation*. 2025 Dec;217:110889.
- [10] 田雪, 黄柳, 姚菁菁, 等. 血清脂蛋白相关磷脂酶 A2 水平与颈动脉粥样硬化斑块的相关性分析[J]. 中华全科医学, 2022, 20(11):1848-1851.
- [11] 陈雯婷, 陈仲清, 陈晔明, 等. 经食道超声心动图观测非骨水泥型全髋关节置换术中心腔内栓子[J]. 中华关节外科杂志(电子版), 2011, 5(2):149-154.
- [12] Cruz AS, Khattar NK, Weiner GM, Aljuboory ZS, Schirmer CM. Preventing air microembolism in cerebral angiography: a JNIS fellow's perspective. *J Neurointerv Surg*. 2024 Mar 14;16(4):331-332.
- [13] 唐建国, 朋立超, 黄鲁铨, 朱彪, 缪长虹. 全髋置换术扩髓及骨水泥灌注对血液动力学的影响及其机制[J]. 临床麻醉学杂志, 2002(10):520-522.
- [14] Bisignani G, Bisignani M, Pasquale GS, Greco F. Intraoperative embolism and hip arthroplasty: intraoperative transesophageal echocardiographic study. *J Cardiovasc Med (Hagerstown)*. 2008 Mar;9(3):277-81.
- [15] Shiomi S, Tokuda M, Takato U, Sakurai R, Yamazaki Y, Matsumoto T, Sato H, Oseto H, Yokoyama M, Tokutake K, Yamashita S, Yoshimura M, Yamane T. Real-time detection of microembolic signals using carotid echocardiography: A comparative study of 3 pulsed-field systems. *Heart Rhythm*. 2026 Jan;23(1):25-31.
- [16] 李涛, 代钊, 张静, 等. TEE 监测下控制性低中心静脉压技术在腹腔镜肝切除的临床安全性观察[J]. 麻醉安全与质控, 2021, 5(6):363-367.
- [17] Koessler MJ, Fabiani R, Hamer H, Pitto RP. The clinical relevance of embolic events detected by transesophageal

echocardiography during cemented total hip arthroplasty: a randomized clinical trial. *Anesth Analg.* 2001 Jan;92(1):49-55.

[18]王腾. 超声栓子信号的检测与分类研究[D]. 复旦大学, 2012.

[19]戴鹤锋, 李晓高, 沈国浪, 等. 基于超声多普勒技术的气栓检测研究[J]. *现代信息科技*, 2023, 7(13):131-135.

[20]Chahal D, Ruzhynsky V, McAuley I, Sweeney D, Sobkin P, Kinahan M, Gardiner R, Kinahan J. Paradoxical air embolism during percutaneous nephrolithotomy due to patent foramen ovale: Case report. *Can Urol Assoc J.* 2015 Sep-Oct;9(9-10):E658-60.

[21]Malik N, Claus PL, Illman JE, Kligerman SJ, Moynagh MR, Levin DL, Woodrum DA, Arani A, Arunachalam SP, Araoz PA. Air embolism: diagnosis and management. *Future Cardiol.* 2017 Jul;13(4):365-378.

作者简介:

第一作者: 苗园园, 1997年5月10日出生, 女, 汉族, 籍贯天津市, 住院医师, 最高学历硕士研究生, 研究方向老年患者围术期麻醉管理。

通讯作者: 杨海涛, 1978年12月5日出生, 男, 汉族, 籍贯辽宁省大连市, 主任医师, 最高学历博士研究生, 老年危重症患者围术期快速康复, 糖尿病患者麻醉管理, 肺移植患者麻醉管理。

第二作者: 梁秀清, 1976年10月5日出生, 女, 满族, 籍贯辽宁省葫芦岛市, 主治医师, 最高学历本科, 研究方向糖尿病患者麻醉管理。