

·综述 General review·

颈内动脉球囊闭塞试验临床应用及研究进展

刘 强, 赵卫东, 沙 炎, 戴春富, 余洪猛, 王德辉

【摘要】 球囊闭塞试验(BOT)主要用于评估牺牲一侧颈内动脉的可行性。临床常用于侵犯颈内动脉的颅底、鼻咽、咽旁间隙、颈部原发或继发性肿瘤及颈内动脉复杂动脉瘤等治疗。目前不同术者在 BOT 麻醉方式选择、球囊类别选用、球囊闭塞位置、血流阻断时间及结果评判方法等方面存在差异。为了提高试验的准确性,又有静脉相延迟时间计算、残端压测定、低血压考验、脑灌注评估、局部脑氧饱和度监测、脑电图检查、经颅多普勒流速测定等多种 BOT 结果评判技术应用于临床。本文主要就这些方面的临床应用及研究进展进行综述。

【关键词】 球囊闭塞试验; 颈内动脉; 颅底肿瘤; 鼻咽肿瘤

中图分类号:R743 文献标志码:A 文章编号:1008-794X(2022)-12-1228-06

Clinical application and research progress of balloon occlusion test of internal carotid artery LIU

Qiang, ZHAO Weidong, SHA Yan, DAI Chunfu, YU Hongmeng, WANG Dehui. Department of Radiology, Affiliated Eye & ENT Hospital of Fudan University, Shanghai 200031, China

Corresponding author: SHA Yan, E-mail: cjr.shayan.vip@163.com

【Abstract】 The balloon occlusion test(BOT) is mainly used in evaluating the feasibility of sacrificing one-side internal carotid artery. It is commonly used in the treatment of primary or secondary tumors of nasopharynx, skull base, parapharyngeal space and neck, as well as complex aneurysms of internal carotid artery. At present, the selections of anesthesia method and balloon type, the site to be occluded, the duration of blood flow occlusion, and the method of evaluating the efficacy in performing BOT are different from surgeon to surgeon. In order to improve the accuracy of BOT, a variety of techniques, including calculation of venous phase delay time, stump pressure measurement, hypotensive challenge, cerebral perfusion assessment, brain oxygen saturation monitoring, electroencephalogram examination, Doppler flow measurement and so on, have been applied in clinical practice. This paper mainly reviews the clinical application and research progress of BOT in these aspects. (J Intervent Radiol, 2022, 31: 1228-1233)

【Key words】 balloon occlusion test; internal carotid artery; skull base tumor; nasopharyngeal tumor

球囊闭塞试验(balloon occlusion test, BOT)旨在拟牺牲一侧颈内动脉前或拟切除邻近颈内动脉病变前评估脑组织缺血性损伤风险,临床常用于侵犯颈内动脉的颅底、鼻咽、咽旁间隙、颈部原发性或继发性肿瘤及颈内动脉复杂动脉瘤、颈内动脉海绵窦瘘等疾病治疗。BOT 临床应用 30 余年来,另有多种名称,如临时性球囊闭塞(temporary balloon occlusion, TBO)、球囊试验性闭塞(balloon test occlusion, BTO)、试验性球囊闭塞(test balloon occlusion, TBO)^[1-3]。该

技术本质上是一项试验,考虑到中文语言习惯及规范,国内学者及期刊多称其为球囊闭塞试验有其合理性^[4-8]。BOT 基本原理是用球囊暂时性阻断一侧颈内动脉血流后,判断患者能否耐受该侧颈内动脉的缺失或失用。20 世纪 80 年代至今,随着医疗技术进步,在单纯依靠患者症状和体征基础上,逐步出现了一些新的技术手段被用于帮助术者对 BOT 结果进行判定。为进一步加深对 BOT 的认识,现将该技术临床应用及研究进展综述如下。

DOI:10.3969/j.issn.1008-794X.2022.12.021

作者单位: 200031 上海 复旦大学附属眼耳鼻喉科医院放射科(刘 强、沙 炎), 神经外科(赵卫东), 耳鼻喉科(戴春富、余洪猛、王德辉)

通信作者: 沙 炎 E-mail: cjr.shayan.vip@163.com

1 麻醉方式选择

在 BOT 术中,患者症状和体征始终是评判的核心,因此 BOT 应尽量在局部麻醉下进行,并避免应用可能会对中枢神经系统评估造成干扰的药物,如苯二氮草类镇静催眠药。必要时,对局部麻醉下无法配合患者才考虑在全身麻醉下进行。有研究者尝试在全身麻醉下行 BOT,通过血管造影相关参数判定试验结果,亦取得较好效果^[9]。

2 球囊类别选用

不同类型的球囊如高顺应性封堵球囊、半顺应性经皮腔内血管成形术(PTA)球囊、可解脱球囊及球囊导引导管等均被用于 BOT^[10-13]。对于较迂曲血管,应选择通过性好且更柔软的高顺应性球囊。若血管拟闭塞处的管腔规则且走行平直,则可使用半顺应性 PTA 球囊。球囊直径需与拟闭塞处的血管直径匹配,一般选择稍大于血管直径。

3 球囊闭塞位置

理论上,越接近病变处行 BOT,结果越真实。不过,拟闭塞动脉越迂曲,操作复杂性和风险就越高。因此,BOT 术中球囊闭塞位置存在较大差别,如在颈内动脉 C6 段^[2,14]、颈内动脉 C4/5 段^[12]、颈内动脉 C2 段^[10,15]、颈内动脉 C1 段^[11]、颈总动脉+颈内动脉 C1 段^[13]、颈总动脉+颈外动脉^[16](Bouthillier 分段法)等。然而研究表明,在不同位置行 BOT 的结果可能不同。Lesley 等^[17]报道对颈内动脉 C1 段 BOT 阴性患者再次行 BOT,即将球囊置于 C6 段眼动脉开口处以远,结果有 14%阳性率。即便如此,受限于球囊获得的便利性等原因,目前临床应用最多的还是在 C1 段行 BOT^[3,11,18-19]。

4 血流阻断时间

若颈内动脉血流阻断后患者无新发不适症状和神经系统阳性体征,一般于 20~30 min 后结束 BOT^[1,2,10,17-18];若 BOT 术中拟对患者进行脑灌注评估且需要转移到其他地点实施,则在首次血流阻断无异常后先恢复血流通畅,待转移完成后再行二次阻断,直至完成脑灌注检查。

5 结果评判方法

患者有无新发的不适症状和神经系统阳性体征是评判 BOT 结果的基石。若颈内动脉血流阻断后患者出现不适症状和/或阳性体征,即 BOT 阳性;若

无新发的不适症状和神经系统阳性体征,则通常可认为 BOT 阴性。值得注意的是,患者处于缺血耐受的临界状态也可能暂时无不适症状和阳性体征,但却意味着颈内动脉牺牲后存在较高的脑梗死风险。这是临床上发生 BOT 假阴性的主要原因之一。除了对患者症状和体征进行观察,血流阻断后通过造影行侧支循环评估(对侧颈内动脉及优势侧椎动脉造影)也是目前常用方法。此外,为了提高 BOT 准确率,临床上还有多种方法被用于协助判断 BOT 结果,这些方法主要有静脉相延迟(venous phase delay,VPD)时间计算、残端压(stump pressure,SP)测定、低血压考验(hypotensive challenge,HC)、脑灌注评估、局部脑氧饱和度(rScO₂)检测、脑电图(EEG)检查、经颅多普勒超声(TCD)和多普勒导丝检测等。

5.1 VPD 时间计算

正常情况下,脑部回流静脉显影的早晚直接反映了脑组织对碘对比剂廓清的快慢,间接反映了脑血流量(cerebral blood flow,CBF)大小。BOT 时,闭塞侧大脑半球依靠侧支循环供血,CBF 通常会减少,血管造影静脉期上常可观察到该侧大脑半球回流静脉较术前或对侧延迟显影,此即 VPD。最常用的 VPD 评估方法是在球囊闭塞一侧颈内动脉后行对侧颈内动脉造影,此时记录双侧大脑半球皮层静脉的初始显影时间并计算其时间差,此即 VPD 时间^[9]。在 BOT 术中,观察 VPD 是一种简单实用的办法,VPD 时间可作为患者能否耐受颈内动脉牺牲的预测指标^[9-10,14,20-21]。有研究发现 BOT 术中患者的 VPD 时间与 CBF 有良好相关性^[22]。甚至有术者在患者全身麻醉状态下完全依赖 VPD 时间判定 BOT 结果,亦获得不错效果^[9]。

目前用于判定 BOT 结果的 VPD 时间没有统一标准,常用的有 0.5 s^[14,20]、1 s^[6,21]、2 s^[2,9-10]等。理论上,以越短的 VPD 时间为标准,BOT 假阴性率越低。Van Rooij 等^[14]在 BOT 时采用“0.5 s”作为“症状+体征”外的唯一评判标准,假阴性率为零。但过于严格的标准可能会导致假阳性率增高。

观察 VPD 的最佳区域为双侧大脑半球,故 VPD 时间最适用于前循环代偿为主患者。后循环代偿为主患者对比同侧大脑半球闭塞前后的 VPD 时间或许更为合适。此外,还需注意部分患者基础状态下双侧大脑半球静脉回流本身就不对称。

5.2 SP 测定

BOT 术中于闭塞处远端的颈内动脉管腔内测得的动脉血压称为 SP,常用指标有 SP 平均值或最

小值^[23]、SP/桡动脉动脉压^[24]、SP/闭塞前颈内动脉动脉压^[25]。因为无法直接反映颅内侧支循环情况,SP 有效性尚有争议。Barker 等^[26]研究显示,颈内动脉血流阻断后其远端压力在早期快速下降,随后部分患者会逐步上升。Kato 等^[24]认为 SP 维持在平均动脉压的 50%或以上,意味着 BOT 期间有足够的脑血流代偿。Kaminogo 等^[23]研究表明 SP 与 CBF 无良好相关性。目前 SP 较少单独用于评估 BOT 结果。

5.3 HC

为降低 BOT 假阴性率,在颈内动脉血流阻断后通过降低血压方法观察患者是否出现新的脑供血不足表现,即 HC。理论上,降低血压意味着降低脑灌注压,脑灌注压下降意味着 CBF 减少^[27]。但研究表明,CBF 和血压并非同步下降,原因有:①人体具有脑血流调节机制,能在一定血压范围内维持 CBF 相对稳定^[28];②部分降压药物在降压的同时有扩张脑血管作用,使用此类药物降压后 CBF 不会明显下降^[27]。Tanaka 等^[29]研究显示,BOT 术中行 HC 时非闭塞侧 CBF 无明显下降,甚至有所上升。

以硝普钠为代表的硝酸盐类降压药物已被证实对脑血管有直接的扩张作用,即使是大幅降压后 CBF 仍维持稳定或轻度升高^[30]。Dare 等^[31]在 BOT 术中采用硝普钠行 HC,平均降压幅度达 42%,仍有 15%假阴性率。因此,使用此类降压药物行 HC 可能是无效的。 α 受体阻滞剂如乌拉地尔等扩血管作用较弱,或许是更合适的选择。

5.4 脑灌注评估

脑灌注评估可直接了解患者脑组织灌注、脑代谢水平等信息。目前用于 BOT 脑灌注评估手段有:氙气 CT(Xenon CT),放射性同位素显像如单光子发射计算机断层成像(SPECT)、正电子发射断层成像(PET),磁共振灌注加权成像(MR-PWI),CT 灌注成像(CTP)及平板探测器 CT 灌注成像(FD-CTP)等。

氙气是一种可吸收 X 线的惰性气体,被人体吸入后能很快通过血脑屏障弥散入脑,此时行头颅 CT 扫描并对图像进行后处理,可得到 CBF 等信息。此即 Xenon CT 脑血流灌注成像原理。Xenon CT 早期在 BOT 术中应用较多。研究显示,BOT 术中以局部 $CBF < 30 \text{ mL} \cdot 100 \text{ g}^{-1} \cdot \text{min}^{-1}$ 作为判断颈内动脉牺牲后该区域是否会发生脑梗死的阈值,假阴性率为 3%~10%^[32]。由于氙气的麻醉不良反应等原因,目前 Xenon CT 已较少应用于临床。

CT 采集碘对比剂通过脑组织产生 X 线衰减信号,并经后处理软件生成 CBF、脑血容量(cerebral

blood volume,CBV)、达峰时间(time to peak,TTP)和平均通过时间(mean transit time,MTT)等参数,此即脑 CTP。另可结合乙酰唑胺负荷试验进一步评估脑血流储备情况。Jain 等^[33]研究认为,虽然用于判定 BOT 结果的 CTP 参数阈值尚未取得一致,但双侧大脑半球血流对称、乙酰唑胺负荷试验阴性患者永久闭塞颈内动脉后会更安全。Kuribara 等^[13]在 BOT 时采用 CTP,提示侧支代偿良好组与侧支代偿不良组患者 CBF 和 MTT 不对称率差异有统计学意义;认为 MTT 是量化评估 BOT 患者缺血耐受性的有效参数,其中闭塞侧 MTT 较对侧延长 $< 16.4\%$ 可作为颈内动脉牺牲的阈值。由于行 CTP 需要将患者转移至 CT 检查室,或具备 DSA/CT 的复合手术室^[34],目前在 BOT 术中应用较少。

MR-PWI 是一种能反映组织微血管分布和血流灌注情况的 MR 功能成像技术。用于评价脑灌注的 MR-PWI 参数有 CBV、CBF、MTT、TTP 等。Michel 等^[35]在 BOT 术中应用 MR-PWI 进行评估,结果显示 BOT 阴性者闭塞侧 TTP 延长(0.7~3.23 s),CBV 无明显变化,而阳性者 TTP 明显延长(6.1~6.7 s),CBV 明显下降。值得注意的是,BOT 阳性者双侧大脑半球均可有 TTP、CBV 异常。由于行 MR-PWI 同样需要搬动患者,且需符合特殊条件,以及检查时间较长,目前在 BOT 中的应用也较少。

SPECT 脑灌注成像的主要原理是利用注入体内后能被脑组织摄取的放射性同位素显像剂(如 $^{99m}\text{Tc-HMPAO}$)发生衰变而产生 γ 光子,这些光子再被体外设备所采集并经后处理成像。放射性同位素进入脑组织的量与 CBF 呈正比,故其分布反映了 CBF 大小。BOT 术中行 SPECT 检查,可直接通过灌注图观察 CBV 对称性,亦可借助计算机软件对双侧大脑半球进行 CBF 半定量分析。SPECT 在 BOT 术中的应用较多,最具特异性的表现是双侧大脑半球灌注显像不对称^[24]。研究表明,双侧大脑半球 CBF 相差 10%以下被认为是安全的^[3]。因此,通常认为 BOT 术中双侧 CBF 相差 10%以上才具有特异性。不过,Lorberboym 等^[36]研究显示 SPECT 判定 BOT 结果仍有较高的假阴性率。此外 SPECT 仅能对 CBF 进行半定量分析,因此用其判定 BOT 结果容易产生偏差。

PET 是目前最好的脑血流与脑代谢研究方法^[37]。通过静脉注射或吸入能在脑组织中再分配的放射性同位素显像剂(如 $^{15}\text{O}_2$ 、 C^{15}O 、 C^{15}O_2 、 H_2^{15}O 、 ^{18}F -FDG),并经体外设备采集其在体内衰变释放的正电子,再用后处理软件进行成像和定量分析,可获得 CBF、

脑氧代谢率(CMRO₂)、脑葡萄糖代谢率(CMRglu)及氧摄取分数(OEF)等参数。Kawai 等^[38]研究显示,BOT 术中行 PET 检查,所有阴性患者 CBF 均较术前有轻至中度下降(9%~34%)。Brunberg 等^[39]研究显示,BOT 阴性患者中,若闭塞侧 CBF 降至 25~35 mL·100 g⁻¹·min⁻¹,该侧颈内动脉牺牲后仍有较高的脑梗死风险。PET 设备昂贵,检查流程复杂,目前在 BOT 中应用不多。

平板探测器(FD)-CTP 最常用于脑灌注检查,检查过程中注射碘对比剂的同时 FD 旋转采集数据,经工作站软件处理后获得彩色编码 CBV 图,可直观地反映两侧大脑半球的灌注对称性,又被称为 FD-CBV。此外,该检查可对 CBV 进行量化分析,还可获得时间-密度曲线(time-density curves,TDC)、TTP、静脉显影延迟时间(venous delay time,VDT)等参数。研究显示,FD-CTP 评价 CBV 效果可与 CTP 相媲美^[40]。BOT 术中 FD-CTP 测得的 VDT 与肉眼观察的 VPD 时间具有高度相关性^[41],采用 VDT 和症状体征作为评判标准的结果具有良好一致性^[4]。FD-CTP 具有无需搬动患者、成像时间短的优点。不过 FD 每旋转 1 周通常需要数秒时间,因此 FD-CTP 时间分辨率较低^[18]。此外,FD-CTP 无法进行 CBF 定量分析。这些均对 BOT 术中应用 FD-CTP 造成了一定限制。

5.5 rScO₂ 检测

rScO₂ 是通过分析脑组织对红外光的吸收连续测定其氧合情况,可反映脑氧供需平衡及血流变化。BOT 术中主要采用闭塞侧大脑半球 rScO₂ 下降幅度或双侧大脑半球 rScO₂ 比值进行评估。研究显示 rScO₂ 在 BOT 术中的特异性较差。Kuribara 等^[13]在 BOT 术中比较球囊闭塞前和闭塞 10 min 后双侧 rScO₂,提示脑侧支循环丰富组患者与侧支循环不良组患者差异无统计学意义。Yang 等^[11]研究显示,BOT 阴性组患者与假阴性组患者间闭塞侧 rScO₂ 下降幅度差异无统计学意义。此外,出现脑缺血症状的 rScO₂ 临界值尚不明确。Yang 等^[11]研究认为判定 BOT 阳性的最佳 rScO₂ 下降幅度为 5%。Kaminogo 等^[23]研究显示,BOT 术中闭塞侧 rScO₂ 降低与双侧大脑半球灌注不对称(SPECT 显像)一致,阳性组 rScO₂ 平均下降 9%,阴性组 rScO₂ 下降 4%~7%。Dujovny 等^[42]报道显示 BOT 阳性患者 rScO₂ 下降超过 10%。这些研究提示,rScO₂ 值可能不适合作为 BOT 结果的主要评估指标,作为术中辅助监测手段更为合适。此外,rScO₂ 值在常规脑血管造影时也会出现明显变化,需加以鉴别。

5.6 EEG 检查

EEG 反映大脑皮层神经元细胞群的自发性、节律性电活动。研究表明,神经元活动与 CBF 之间存在耦合,CBF 减少数秒内 EEG 就会发生改变^[43]。目前引起 EEG 异常的 CBF 阈值尚不明确。Jordan 等^[44]研究表明,CBF 低至 25~30 mL·100 g⁻¹·min⁻¹ 时 EEG 中快频率电波逐渐消失,EEG 背景活动明显减慢。Murphy 等^[45]在 BOT 术中同时行 PET 和 EEG 检查,发现 EEG 对 CBF 的减少不灵敏,直至 CBF 低于 24 mL·100 g⁻¹·min⁻¹ 才出现明显异常。这些研究提示 EEG 在 BOT 术中的特异性较低。

5.7 TCD 和多普勒导丝检测

TCD 在 BOT 术中应用已有近 30 年历史。BOT 术中血流阻断后第一秒的大脑中动脉收缩期峰值流速(PSVMCA)是常用 TCD 指标。PSVMCA 下降<30%可作为血流阻断后耐受性良好的预测值^[46]。Sorteberg 等^[15]研究显示 PSVMCA 下降≤35%患者对颈内动脉牺牲的耐受良好,而下降≥46%患者可能发生脑梗死。

TCD 具有无创、简便、安全等优点。但 TCD 可靠性很大程度上取决于操作者技术水平,且易受患者颞窗的影响^[47]。而对于 TCD 检查困难患者,多普勒导丝可作为一种补充检查。多普勒导丝由一根特制的导丝和连接在其头端的多普勒探头组成,将其置于血管腔内可直接测量血流速度。BOT 术中使用多普勒导丝时,一般将其置于大脑中动脉。研究表明,BOT 术中多普勒导丝的测量结果与 TCD 测量结果相似^[48]。

6 结语

尽管现阶段有多种方法可用于协助术者对 BOT 结果进行评判,但仍无法做到其结果绝对准确和持续有效,因为人体脑血流状态是一动态变化过程,脑血管本身也会因各种因素发生变化。因此,一侧颈内动脉牺牲应始终作为治疗的最后选择。BOT 结果阴性者是否牺牲颈内动脉,需综合多种因素确定,不能仅凭 BOT 结果而定。对于原发疾病治疗过程中低血容量风险较高患者,需提高评估标准,慎重选择牺牲颈内动脉。对于伴有基础脑血管疾病或罹患该类疾病风险较高患者,需仔细评估疾病当前状态和预期进展,尽量避免单纯牺牲颈内动脉。

[参考文献]

- [1] De Vries EJ, Sekhar LN, Horton JA, et al. A new method to predict

- safe resection of the internal carotid artery[J]. *Laryngoscope*, 1990, 100: 85-88.
- [2] Narayanan S, Singer R, Bruzzo TA, et al. Reporting standards for balloon test occlusion[J]. *J Neurointerv Surg*, 2013, 5: 503-505.
 - [3] Sivakumaran R, Mohamed AZ, Akhunbay - Fudge CY, et al. Internal carotid artery test balloon occlusion using single photon emission computed tomography scan in the management of complex cerebral aneurysms and skull base tumors: a 20-year review[J]. *World Neurosurg*, 2020, 139: e32-e37.
 - [4] Yang M, Wu J, Ma L, et al. The value of syngo DynaPBV neuro during neuro - interventional hypotensive balloon occlusion test [J]. *Clin Neuroradiol*, 2015, 25: 387-395.
 - [5] 郝伟远, 邵国良, 虞希祥, 等. 球囊闭塞试验在累及颈动脉头颈肿瘤术前评估中的应用[J]. *介入放射学杂志*, 2015, 24: 38-40.
 - [6] 黎劭学, 陈锦华, 黄胜平. 球囊闭塞试验的适应证以及相关并发症的预防[J]. *中华耳鼻咽喉头颈外科杂志*, 2011, 46: 350-352.
 - [7] 张超, 毛颖. 球囊闭塞试验的研究进展[J]. *国外医学(脑血管疾病分册)*, 2004, 12: 833-836.
 - [8] 马永迁, 王伟, 于金录. 球囊闭塞试验在颅内颈内动脉巨大动脉瘤治疗中的应用[J]. *中国微侵袭神经外科杂志*, 2012, 17: 188-189.
 - [9] Abud DG, Spelle L, Pötin M, et al. Venous phase timing during balloon test occlusion as a criterion for permanent internal carotid artery sacrifice[J]. *AJNR Am J Neuroradiol*, 2005, 26: 2602-2609.
 - [10] Fukuhara N, Tsuruta W, Hosoo H, et al. Magnetic resonance angiography - based prediction of the results of balloon test occlusion[J]. *Neurol Med Chir (Tokyo)*, 2019, 59: 384-391.
 - [11] Yang R, Wu H, Chen B, et al. Balloon test occlusion of internal carotid artery in recurrent nasopharyngeal carcinoma before endoscopic nasopharyngectomy: a single center experience [J]. *Front Oncol*, 2021, 11: 674889.
 - [12] Gonzalez CF, Moret J. Balloon occlusion of the carotid artery prior to surgery for neck tumors[J]. *AJNR Am J Neuroradiol*, 1990, 11: 649-652.
 - [13] Kuribara T, Mikami T, Iihoshi S, et al. Ischemic tolerance evaluated by computed tomography perfusion during balloon test occlusion[J]. *J Stroke Cerebrovasc Dis*, 2020, 29: 104807.
 - [14] Van Rooij WJ, Sluzewski M, Metz NH, et al. Carotid balloon occlusion for large and giant aneurysms: evaluation of a new test occlusion protocol[J]. *Neurosurgery*, 2000, 47: 116-121.
 - [15] Sorteberg A, Bakke SJ, Boysen M, et al. Angiographic balloon test occlusion and therapeutic sacrifice of major arteries to the brain[J]. *Neurosurgery*, 2008, 63: 651-660.
 - [16] Takamura Y, Motoyama Y, Takatani T, et al. Motor evoked potential monitoring can evaluate ischemic tolerance to carotid artery occlusion during surgery[J]. *J Clin Monit Comput*, 2021, 35: 1055-1062.
 - [17] Lesley WS, Bieneman BK, Dalsania HJ. Selective use of the paraophthalmic balloon test occlusion (BTO) to identify a false-negative subset of the cervical carotid BTO[J]. *Minim Invasive Neurosurg*, 2006, 49: 34-36.
 - [18] Ciceri EF, Caldiera V, Talenti G, et al. Neurovascular perfusion study with DynaPBV during preoperative balloon test occlusion: a feasibility study on aneurysm and tumor lesions[J]. *J Comput Assist Tomogr*, 2020, 44: 399-404.
 - [19] Ikemura A, Yuki I, Otani K, et al. Evaluation of balloon test occlusion before therapeutic carotid artery occlusion: flat detector computed tomography cerebral blood volume imaging versus single-photon emission computed tomography[J]. *World Neurosurg*, 2020, 133: e522-e528.
 - [20] Van Rooij WJ, Sluzewski M, Slob MJ, et al. Predictive value of angiographic testing for tolerance to therapeutic occlusion of the carotid artery[J]. *AJNR Am J Neuroradiol*, 2005, 26: 175-178.
 - [21] Sanna M, Piazza P, Ditrupani G, et al. Management of the internal carotid artery in tumors of the lateral skull base: preoperative permanent balloon occlusion without reconstruction [J]. *Otol Neurotol*, 2004, 25: 998-1005.
 - [22] Tani S, Imamura H, Asai K, et al. Comparison of practical methods in clinical sites for estimating cerebral blood flow during balloon test occlusion[J]. *J Neurosurg*, 2018: 1-7.
 - [23] Kaminogo M, Ochi M, Onizuka M, et al. An additional monitoring of regional cerebral Oxygen saturation to HMPAO SPECT study during balloon test occlusion[J]. *Stroke*, 1999, 30: 407-413.
 - [24] Kato K, Tomura N, Takahashi S, et al. Balloon occlusion test of the internal carotid artery: correlation with stump pressure and ^{99m}Tc-HMPAO SPECT[J]. *Acta Radiol*, 2006, 47: 1073-1078.
 - [25] Morishima H, Kurata A, Miyasaka Y, et al. Efficacy of the stump pressure ratio as a guide to the safety of permanent occlusion of the internal carotid artery[J]. *Neurol Res*, 1998, 20: 732-736.
 - [26] Barker DW, Jungreis CA, Horton JA, et al. Balloon test occlusion of the internal carotid artery: change in stump pressure over 15 minutes and its correlation with Xenon CT cerebral blood flow [J]. *AJNR Am J Neuroradiol*, 1993, 14: 587-590.
 - [27] Hoiland RL, Fisher JA, Ainslie PN. Regulation of the cerebral circulation by arterial carbon dioxide[J]. *Compr Physiol*, 2019, 9: 1101-1154.
 - [28] Tan CO. Defining the characteristic relationship between arterial pressure and cerebral flow[J]. *J Appl Physiol* (1985), 2012, 113: 1194-1200.
 - [29] Tanaka F, Nishizawa S, Yonekura Y, et al. Changes in cerebral blood flow induced by balloon test occlusion of the internal carotid artery under hypotension[J]. *Eur J Nucl Med*, 1995, 22: 1268-1273.
 - [30] Olesen ND, Fischer M, Secher NH. Sodium nitroprusside dilates cerebral vessels and enhances internal carotid artery flow in young men[J]. *J Physiol*, 2018, 596: 3967-3976.
 - [31] Dare AO, Chaloupka JC, Putman CM, et al. Failure of the hypotensive provocative test during temporary balloon test occlusion of the internal carotid artery to predict delayed hemodynamic ischemia after therapeutic carotid occlusion[J]. *Surg Neurol*, 1998, 50: 147-155.
 - [32] Linskey ME, Jungreis CA, Yonas H, et al. Stroke risk after abrupt internal carotid artery sacrifice: accuracy of preoperative

- assessment with balloon test occlusion and stable xenon-enhanced CT[J]. AJNR Am J Neuroradiol, 1994, 15: 829-843.
- [33] Jain R, Hoeffner EG, Deveikis JP, et al. Carotid perfusion CT with balloon occlusion and acetazolamide challenge test: feasibility[J]. Radiology, 2004, 231: 906-913.
- [34] Ebara M, Murayama Y, Saguchi T, et al. Balloon test occlusion with perfusion CT imaging utilizing intraarterial contrast injection[J]. Interv Neuroradiol, 2006, 12: 241-245.
- [35] Michel E, Liu H, Remley KB, et al. Perfusion Mr neuroimaging in patients undergoing balloon test occlusion of the internal carotid artery[J]. AJNR Am J Neuroradiol, 2001, 22: 1590-1596.
- [36] Lorberboym M, Pandit N, Machac J, et al. Brain perfusion imaging during preoperative temporary balloon occlusion of the internal carotid artery[J]. J Nucl Med, 1996, 37: 415-419.
- [37] 何 洁. SPECT 和 PET 显像对缺血性脑血管病生理病理状态的评估[J]. 中国脑血管病杂志, 2004, 1: 573-576.
- [38] Kawai N, Kawanishi M, Shindou A, et al. Cerebral blood flow and metabolism measurement using positron emission tomography before and during internal carotid artery test occlusions: feasibility of rapid quantitative measurement of CBF and OEF/CMRO(2)[J]. Interv Neuroradiol, 2012, 18: 264-274.
- [39] Brunberg JA, Frey KA, Horton JA, et al. [^{15}O]H $_2\text{O}$ positron emission tomography determination of cerebral blood flow during balloon test occlusion of the internal carotid artery[J]. AJNR Am J Neuroradiol, 1994, 15: 725-732.
- [40] Struffert T, Deuerling-Zheng Y, Kloska S, et al. Cerebral blood volume imaging by flat detector computed tomography in comparison to conventional multislice perfusion CT[J]. Eur Radiol, 2011, 21: 882-889.
- [41] Struffert T, Deuerling-Zheng Y, Engelhorn T, et al. Monitoring of balloon test occlusion of the internal carotid artery by parametric color coding and perfusion imaging within the angio suite: first results[J]. Clin Neuroradiol, 2013, 23: 285-292.
- [42] Dujovny M, Slavin KV, Hernandez G, et al. Use of cerebral oximetry to monitor brain oxygenation reserves for skull base surgery[J]. Skull Base Surg, 1994, 4: 117-121.
- [43] Sundt TM Jr, Sharbrough FW, Anderson RE, et al. Cerebral blood flow measurements and electroencephalograms during carotid endarterectomy[J]. J Neurosurg, 1974, 41: 310-320.
- [44] Jordan KG. Emergency EEG and continuous EEG monitoring in acute ischemic stroke[J]. J Clin Neurophysiol, 2004, 21: 341-352.
- [45] Murphy KJ, Payne T, Jamadar DA, et al. Correlation of continuous EEG monitoring with [^{15}O]H $_2\text{O}$ positron emission tomography determination of cerebral blood flow during balloon test occlusion of the internal carotid artery. Experience in 34 cases[J]. Interv Neuroradiol, 1998, 4: 51-55.
- [46] Eckert B, Thie A, Carvajal M, et al. Predicting hemodynamic ischemia by transcranial Doppler monitoring during therapeutic balloon occlusion of the internal carotid artery[J]. AJNR Am J Neuroradiol, 1998, 19: 577-582.
- [47] Krejza J, Swiat M, Pawlak MA, et al. Suitability of temporal bone acoustic window; conventional TCD versus transcranial color-coded duplex sonography[J]. J Neuroimaging, 2007, 17: 311-314.
- [48] Levitt MR, Vaidya SS, Mai JC, et al. Balloon test occlusion with the Doppler velocity guidewire[J]. J Stroke Cerebrovasc Dis, 2012, 21: 909.e1-e4.

(收稿日期:2021-10-26)

(本文编辑:边 皓)