

光学相干断层扫描在冠状动脉疾病中的应用现状及进展

常成, 范建华

昆山市中医医院心血管内科, 江苏 苏州, 215300

通信作者: 范建华, E-mail: fjhheart@126.com

【摘要】 光学相干断层扫描(OCT)作为一种高分辨率成像技术,在冠状动脉疾病(CAD)的评估中逐渐发挥重要作用。本文综述了OCT在冠状动脉疾病中的应用现状,包括冠状动脉斑块的识别与分类、冠状动脉狭窄程度的评估、急性冠脉综合征中的应用,以及与其他成像技术的比较。OCT因其高分辨率成像能力,在指导冠状动脉介入治疗方面具有重要价值,包括支架植入前后的成像评估、指导及评估生物可降解支架,以及指导复杂病变的治疗策略。此外,本文还介绍了OCT技术的新进展,如智能化分析与多模态成像。OCT在冠状动脉疾病的诊断和治疗中具有重要的临床价值,随着技术的不断发展和应用的深入,OCT有望为心血管疾病的管理提供更为精准的诊断工具和治疗策略,从而改善患者的治疗效果和预后。

【关键词】 光学相干断层扫描, 冠状动脉疾病, 临床应用, 研究进展, 成像技术

【文章编号】 2095-834X(2024)10-67-08

DOI: 10.26939/j.cnki.CN11-9353/R.2024.10.008

本文著录格式: 常成, 范建华. 光学相干断层扫描在冠状动脉疾病中的应用现状及进展[J]. 当代介入医学电子杂志, 2024, 1(10): 67-74.

Application status and progress of optical coherence tomography in coronary artery disease

Chang Cheng, Fan Jianhua

Department of Cardiology, Kunshan Hospital of Traditional Chinese Medicine, Suzhou 215300, Jiangsu, China

Corresponding author: Fan Jianhua, E-mail: fjhheart@126.com

【Abstract】 Optical coherence tomography (OCT) has become an important imaging technology for the assessment of Coronary artery disease (CAD). This article reviews the current status of OCT in the diagnosis and treatment of CAD, including the identification and classification of coronary plaques, the assessment of coronary stenosis, the application in acute coronary syndrome, and comparisons with other imaging techniques. OCT has great value in guiding coronary interventional therapy, including imaging assessment before and after stent implantation, guiding and evaluating biodegradable stents, and guiding the treatment strategy of complex lesions. In addition, this article also introduces the new progress of OCT technology, such as intelligent analysis and multimodal imaging. OCT has important clinical value in the diagnosis and treatment of CAD. With the continuous development and application of technology, OCT is expected to provide more accurate diagnostic tools and treatment strategies for the management of cardiovascular diseases, thus improving the treatment effect and prognosis of patients.

【Keywords】 Optical coherence tomography, Coronary artery disease, Clinical applications, Research progress, Imaging technology

冠状动脉疾病(coronary artery disease, CAD) 是全球心血管疾病相关死亡的主要原因之一,随着

收稿日期: 2024-09-20

基金项目: 2023 年昆山市重点研发计划(社会发展)项目(KS2323)

中国经济的发展和生活方式的变化,CAD的发病率及死亡率逐年递增,尤其是在急性心肌梗死(acute myocardial infarction, AMI)方面,且越来越年轻化。《中国心血管健康与疾病报告 2023 概要》显示中国现患心血管病人数 3.3 亿,其中 CAD 患者达 1 139 万^[1]。由于生活习惯改变、人口老龄化等原因,我国正面临前所未有的心血管疾病防控压力。城市化进程加快带来的饮食结构变化、工作生活节奏紧张、运动量减少、环境污染等都是促成这一现象的关键因素。最新研究表明,CAD 不仅严重影响患者的生活质量,并显著增加患者不良心脏事件的风险,如 AMI 和心力衰竭^[2],这迫切需要有效的早期诊断和治疗手段来改善患者的预后。

传统影像学技术,如冠状动脉计算机断层扫描血管造影(coronary computed tomography angiography, CCTA)、冠状动脉造影(coronary angiography, CAG)和血管内超声(intravenous ultrasound, IVUS)在 CAD 的诊断中虽然广泛应用,但存在一定的局限性。因此,随着对 CAD 病理机制理解的深入,新的影像技术应运而生,以期克服传统方法的不足。

随着医学影像技术的进步,光学相干断层扫描(optical coherence tomography, OCT)作为一种高分辨率成像技术,在 CAD 的评估中逐渐发挥重要作用。OCT 利用光的干涉原理,提供冠状动脉内壁的微观结构信息,研究显示其在识别和评估冠状动脉病变方面具有显著优势,有助于制定个体化的治疗方案,从而改善患者的临床预后^[3]。因此,本文综述了 OCT 在 CAD 中的应用现状及进展,旨在为临床医生和研究人员提供有价值的参考,促进 OCT 在 CAD 管理中的进一步应用。

1 OCT 基本原理

OCT 自 1990 年代初由 David Huang 等^[4]首次报道以来,已经经历了显著的技术演进。其作为一种非侵入性的光学成像技术,它利用近红外光波段的低相干光源进行成像,其核心在于光的干涉原理。当光源发出的光束分成两路,一路作为参考光束,另一路则照射到目标样本上,从样本返回的光与参考光束相遇发生干涉,通过干涉效应生成图像。这种干涉信号包含了样本的结构信息,通过快速扫描,可以构建出样本的二维甚至三维图像,空间分辨率通常可达几微米至几十微米之间,能够清晰地显示组织的微细结构,这使其在眼科、心血管病学等领域得到了广泛应用。近年来,随着技术的进步,OCT 的成像速度和深度分辨率不断提高,使得其在临床诊断中的应用愈加广泛和重要^[5-6]。

2 OCT 在 CAD 诊断中的应用

2.1 冠状动脉斑块的识别与分类 OCT 的分辨率可达到 10~20 μm , 远高于传统 CAG 及 IVUS, 使其能够识别不同种类的斑块。(1)纤维性斑块:由大量胶原纤维、平滑肌细胞及细胞外基质形成;(2)钙化斑块:钙盐沉积于细胞外脂质和细胞碎片、纤维帽甚至中膜内,钙化点逐渐扩大,融合成较大的团块状和片状的钙质沉积;(3)软斑块:巨噬细胞和平滑肌细胞大量吞噬氧化的低密度脂蛋白颗粒,成为泡沫细胞,大量泡沫细胞及细胞外脂质和坏死碎片组成脂质斑块;(4)易损斑块:尤指厚度<65 μm 的薄纤维帽,脂质核心(核心超过斑块 40%)伴有大量巨噬细胞在内的炎症细胞浸润,纤维破裂等;(5)红血栓:呈暗红色,在纤维素网眼内充满红细胞,常突入管腔;(6)白血栓:呈灰白色,由血小板及少量的纤维蛋白构成^[7-9]。在急性冠脉综合征(acute coronary syndrome, ACS)患者中,OCT 能够帮助医生识别斑块破裂、斑块侵蚀及钙化结节等病理变化,从而为后续的治疗提供依据。薄纤维帽粥样硬化斑块是易损斑块的一种典型斑块表型,其特征是被薄纤维帽(定义为纤维帽厚度<65 μm)包裹的大坏死核心被巨噬细胞严重浸润。研究表明,OCT 在识别薄纤维帽(<65 μm)和大脂质核心方面具有重要价值,这些特征往往与斑块不稳定性和 ACS 相关^[10]。此外,OCT 还能够通过检测内膜增厚、炎症细胞浸润等特征,进一步评估斑块的稳定性和破裂风险,这对临床决策具有重要意义,同时还能够评估自发的冠脉内夹层,冠脉痉挛及各种原因所致的冠脉栓塞等,进一步的指导临床诊断及治疗^[11-13]。

OCT 在冠状动脉斑块的识别与分类中,提供了极为精确的解剖学信息,对于临床决策具有重要的指导意义。通过对斑块特征的详细评估,临床医生能够更好地判断患者的 CAD 风险,制定更加个体化的治疗方案。

2.2 冠状动脉狭窄程度的评估 OCT 在冠状动脉狭窄程度的评估中发挥着越来越重要的作用。与传统的 CAG 相比,OCT 提供了更为精确的血管内成像,其不仅仅能够区分不同类型的斑块(如纤维斑块、脂质斑块、钙化斑块,图 1),帮助确定狭窄的原因,而且能够提供冠状动脉病变的详细横截面图像,从而允许对最小管腔面积(minimum lumen area, MLA)及面积狭窄率(area stenosis, AS)进行精确测量,对于 CAG 提示临界狭窄(50~70%)病变判断尤为关键,从而更准确地评估狭窄的严重程度^[14]。MLA 是指在冠状动脉横截面图像中最小管腔的面积,AS 则是病变处管腔面积与参考血管面积之差与参考血管面积的比值。近年来随着数据计算及新型技术的发展,基于 OCT 扫描

冠状动脉的解剖信息计算生成的虚拟血流储备分数 (virtual blood flow reserve score, VFR) 逐渐应用于临床,一次 OCT 检查既分析了冠脉病变的斑块性质、又确定了管腔狭窄程度及血管功能,为临床医生决定是否进行血运重建提供可靠的诊断信息,合理的冠脉介入治疗使患者更多的获益^[15-16]。

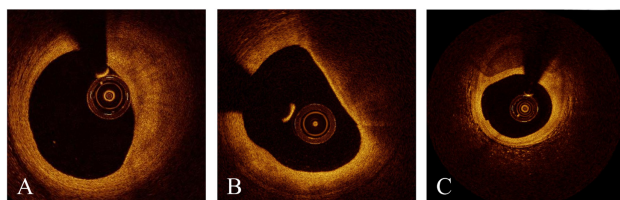


图 1 OCT 识别不同类型的斑块

注:A 为纤维斑块;B 为脂质斑块;C 为钙化斑块。

2.3 OCT 在 ACS 中的作用 在 ACS 的管理中,OCT 的应用显著提高了医生对斑块病理变化的识别能力。OCT 的分辨率允许识别斑块成分的薄帽、纤维粥样瘤和脂质核心,能够清晰地显示斑块破裂(图 2A)、斑块侵蚀(图 2B)及钙化结节(图 2C)等病理特征,且能够识别冠脉自发夹层(图 2D)及冠脉痉挛(图 2E),这些特征与急性冠脉事件的发生密切相关,同时 OCT 还能够协助临床医生对冠脉夹层、冠脉痉挛等情况的鉴别。OCT 定义的斑块破裂是存在富含红细胞的血栓(“红色血栓”)与破裂的纤维帽相关联,斑块侵蚀则在多个帧上显示为不规则的管腔表面,没有帽破裂的证据^[17],钙化结节是冠状动脉内火山口样隆起、突出的致密钙化结节,可伴有纤维帽破裂和血栓形成^[18]。OCT 研究显示,ACS 中的罪犯病变中斑块破裂占 56.9%,斑块侵蚀占 33.3%,钙化结节占 4.5%^[19]。斑块破裂是急性 ST 段抬高型心肌梗死(ST segment elevation myocardial infarction, STEMI)和非 ST 段抬高型心肌梗死(non ST segment elevation myocardial infarction, NSTEMI)组的主要病变形态,但 STEMI 患者中比例较高^[20]。

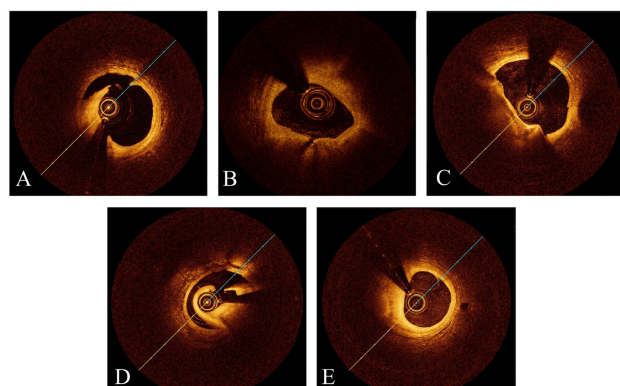


图 2 OCT 在 ACS 中的作用

注:A 为 OCT 显示斑块破裂;B 为 OCT 显示斑块侵蚀;C 为 OCT 显示钙化结节;D 为 OCT 显示冠脉内自发夹层;E 为结合 CAG, OCT 显示冠脉痉挛。

OCT 的高分辨率成像能力使其成为评估斑块稳

定性和预测急性事件的重要工具,尤其在处理不明原因的 AMI 时,OCT 能够提供关键的信息来指导治疗决策。因此,OCT 在 ACS 的早期诊断和治疗决策中具有重要的临床价值。

3 OCT 与其他成像技术的比较

3.1 OCT 与 CAG 的对比 CAG 作为传统的金标准,主要提供血管的二维影像,能够有效显示血管的狭窄程度,但对于血管内的具体病变特征,如斑块的性质和组成,提供的信息有限。相反,OCT 能够生成高分辨率的横截面图像,提供对血管壁及其内部结构的详细视图,能够清晰识别斑块的类型、厚度和其他微观特征。研究表明,OCT 在指导经皮冠状动脉介入治疗(percutaneous coronary intervention, PCI)方面表现出更好的临床结果。在一项 2:1 倾向匹配的前瞻性队列研究中,214 例 STEMI 患者支架置入前后的 OCT 指导比 428 例患者的 CAG 指导的最终最小管腔直径更大 $[(2.99 \pm 0.48) \text{ mm}$ 和 $(2.79 \pm 0.47) \text{ mm}, P < 0.001]$,可能是由于在 OCT 组中进一步扩张了贴壁不良的支架^[21]。He L 等^[22]对比 OCT 指导或 CAG 指导 STEMI 患者接受 PCI 治疗的不同预后,2017 年 1 月至 2020 年 12 月期间共研究 3897 名患者,且完成 5 年随访:2696 名(69.2%)接受 OCT 引导,1201 名(30.8%)接受 CAG 指导。OCT 指导组中的患者在 PCI 期间接受支架治疗率较低(62.6% 和 80.2%, $P < 0.001$)。OCT 指导组的 5 年累积全因死亡率和心血管死亡率分别为 10.4% 和 8.0%,显著低于 CAG 指导组(19.0% 和 14.1%, $P < 0.001$)。

OCT 在分辨率、病变特征识别以及 PCI 指导方面具有明显优势,而 CAG 则在提供血管轮廓和动态观察方面发挥作用。两者在临床实践中往往是互补的,选择合适的检查方法对于患者的诊断和治疗至关重要。

3.2 OCT 与血流储备分数的对比 血流储备分数(fractional flow reserve, FFR)通过测量血流动力学来判断病变是否导致缺血,而 OCT 则提供结构性信息,能够详细显示斑块的形态和成分。这两种技术的结合可以为临床医生提供更全面的信息,帮助优化治疗决策。FORZA (NCT01824030) 试验是一项开放标签、单中心、前瞻性、随机试验^[23],伴有中度冠状动脉狭窄的患者以 1:1 的比例随机分配到 OCT 或 FFR 指导下以评估 PCI 的表现,并在血运重建的情况下优化 PCI 结果,350 例患者 429 根含有中度狭窄的冠状动脉被随机分配至 OCT 组($n=174$)和 FFR 组($n=176$)。与 FFR 组患者相比,OCT 组患者行 PCI 的比例较高(52.7% 和 32.4%, $P < 0.001$),植入支架较多(0.64 ± 0.70 和 $0.33 \pm 0.57, P < 0.0001$),支架直径

较大(3.2 ± 0.5 和 2.9 ± 0.3 , $P=0.009$), 造影剂较多 (280 ± 129 和 245 ± 137 , $P=0.004$), 急性肾损伤发生率较高(8.6% 和 1.7% , $P=0.034$)。在中位随访 1 825 天时, OCT 组有 30 例患者发生主要心脏不良事件(major adverse cardiac events, MACE), FFR 组有 33 例患者发生 MACE (17.2% 和 18.8% , $P=0.704$)。与 FFR 组相比, OCT 组的全因死亡率较低(8.6% 和 10.8% , $P=0.525$), AMI (1.1% 和 2.8% , $P=0.275$), 靶血管重建比例(8.0% 和 8.5% , $P=0.854$), 各亚组的主要结局结果基本一致。Vergallo R 等^[24]对 489 例患者 502 处冠状动脉病变, OCT-MLA 和 FFR 值之间存在显著相关性($R=0.525$, $P<0.001$), OCT-AS 和 FFR 值之间也存在显著相关性。在受试者操作特征分析中, $MLA<2.0\text{ mm}^2$ 显示出良好的判别能力, 可以预测 $FFR \leq 0.80$ [曲线下面积(area under curve, AUC)=0.80], 而 $AS>73\%$ 显示出中等判别能力(AUC=0.73)。在考虑近端冠状动脉段时, 预测 $FFR \leq 0.80$ 的最佳 OCT 截止值为 $MLA<3.1\text{ mm}^2$ (AUC=0.82) 和 $AS>61\%$ (AUC=0.84)。OCT 管腔测量(MLA, AS)可以预测 FFR, 近端血管需要不同的截断值^[24]。其它研究表明, OCT 可以通过精确扫描冠脉解剖计算的 VFR 值, 从而在某些情况下替代 FFR 的应用。Olsen NT 等^[25]对 41 例患者 48 条冠状动脉研究发现, 基于 OCT 计算的 VFR 与观察到的 FFR 有较高的相关性($R=0.83$, $P<0.001$), 提示基于 OCT 的 VFR 在预测冠状动脉狭窄的血流动力学意义方面有较好的诊断准确性。

FFR 和 OCT 在评估冠状动脉病变方面各有优势, 它们的结合可以为临床医生提供更全面的病变信息, 优化治疗决策。此外, OCT 的形态学测量与 FFR 的功能学评估之间存在相关性, OCT 计算的 VFR 可能成为预测冠状动脉狭窄血流动力学意义的有用工具。

3.3 OCT 与 IVUS 的对比 OCT 和 IVUS 是两种常用的血管成像技术, 各有其独特的优势和局限性。OCT 以其高分辨率($10\sim 20\text{ }\mu\text{m}$)能够提供更为细致的血管内结构图像, 而 IVUS 的分辨率较低(约 $100\text{ }\mu\text{m}$), 但其穿透力更强, 能够评估更深层次的血管结构。

OCTIVUS 是一项前瞻性、多中心、开放标签、实用性的研究^[26], 以 1:1 的比例随机分配了 2 008 例患者接受 OCT 引导或 IVUS 引导的 PCI 治疗。主要终点是 1 年内因心脏原因死亡、靶血管相关 AMI 或缺血导致的靶血管血运重建的复合终点。经过一年的随访, OCT 组 1 005 例患者中有 25 名发生了 MACE (Kaplan-Meier 估计为 2.5%), IVUS 组 1 003 名患者中也有 31 名发生了首要终点事件 (Kaplan-Meier 估计为 3.1%) (绝对差异为 -0.6 个百分点, 单侧 $97.5\%CI$ 的上限为 0.97 个百分点, 非劣效性 $P=0.001$)。造影剂诱导

肾病的发生率相似 [OCT 组 14 例患者 (1.4%), IVUS 组 15 例患者 (1.5%), $P=0.85$]。OCT 组的主要手术并发症发生率低于 IVUS 组 [22 例 (2.2%) 和 37 例 (3.7%), $P=0.047$]。在冠状动脉介入治疗中, OCT 引导的 PCI 在 1 年内因心脏原因、靶血管相关 AMI 或缺血导致的靶血管血运重建导致的复合死亡发生率方面不劣于 IVUS 引导的 PCI。OPINION 试验^[27]包括来自日本 42 个医疗中心的 829 例患者, 随机分配到 OCT 指导 ($n=414$) 或 IVUS 指导 ($n=415$) 药物洗脱支架植入。主要终点, 1 年 OCT 指导与 IVUS 指导关于靶病变导致的心源性死亡、靶血管 AMI 和缺血导致的靶血管重建的非劣效性, 分别达到 5.2% 和 4.9% (非劣效性 $P=0.042$)。此外, 在近 90% 的晚期血管造影随访中, 两组支架内再狭窄率 (1.6% 和 1.6%) 也相似。OCT 指导和 IVUS 指导产生了相似的良好长期临床和血管造影结果。

在临床应用中, OCT 通常用于评估斑块的微观结构, 特别是在支架植入后, OCT 能够有效识别支架的适配性。在对标准支架长度为 (28 ± 4.5) mm 的研究表明, OCT 能够准确评估支架的长度 (28.12 ± 6.8) mm, 而 IVUS 由于不连续的回撤和血管运动而容易出现随机误差 (24.21 ± 7.90) mm, 且 OCT 与 IVUS 在评价支架的 MLA [$(3.30 \pm 1.49)\text{ mm}^2$ 和 $(2.19 \pm 1.30)\text{ mm}^2$, $P=0.0046$] 和最小管腔直径 (minimum lumen diameter, MLD) [$(2.42 \pm 0.51)\text{ mm}^2$ 和 $(1.58 \pm 0.56)\text{ mm}^2$, $P=0.0023$] 方面存在显著差异。与 OCT 相比, IVUS 对管腔体积有轻微高估 [$(130.18 \pm 70.61)\text{ mm}^3$ 和 $(117.82 \pm 67.02)\text{ mm}^3$, $P=0.7256$], 对支架体积有明显高估 [$(179.29 \pm 97.58)\text{ mm}^3$ 和 $(226.46 \pm 108.76)\text{ mm}^3$, $P=0.0544$]。IVUS 的平均新生内膜负荷远小于 OCT [$(20.79 \pm 14.27)\%$ 和 $(58.16 \pm 18.25)\%$, $P=0.0033$]。OCT 凭借高分辨率可以精确量化支架覆盖率, 在评估支架植入后患者的血管愈合方面比 IVUS 更准确^[28]。

在临床实践中, OCT 因其高分辨率优势, 尤其在评估斑块微观结构和支架植入后的适配性方面更为精确, 能够有效识别支架覆盖率, 为评估支架植入后患者的血管愈合提供更准确的信息。这些研究结果强调了 OCT 和 IVUS 在冠状动脉介入治疗中的互补作用, 以及 OCT 在特定应用场景中的潜在优势。

4 OCT 在冠状动脉介入治疗中的指导作用

4.1 支架植入前后的成像评估 OCT 在血管内治疗中发挥着重要的指导作用, 尤其是在支架植入前后的成像评估中。OCT 能够提供高分辨率的冠状动脉成像, 帮助医生准确评估病变的性质和程度, 从而为支架

的选择和植入策略提供依据。在支架植入前,OCT可以清晰显示血管腔内的斑块特征、钙化情况及血管壁的结构,为医生提供全面的病变信息。植入后,OCT不仅可以评估支架的定位和扩张情况,还能有效识别支架的未膨胀区域、贴壁不良、夹层及组织脱垂等情况(图3),这些因素可能导致再狭窄或血栓形成的风险增加^[29]。

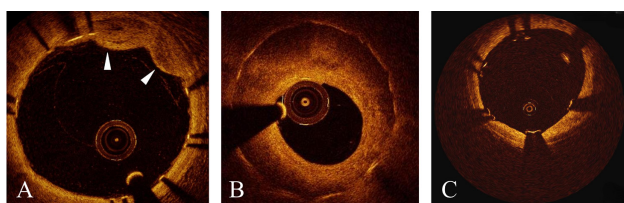


图3 OCT识别支架情况

注:A为OCT显示支架内组织脱垂;B为OCT显示支架内内膜增生伴再狭窄;C为OCT显示支架贴壁不良。

ILUMIEN I是一项OCT检查对医生决策影响的前瞻性、非随机、观察性研究^[30]。418例稳定型或不稳定型心绞痛或NSTEMI患者(467处狭窄)在PCI前后进行了OCT检查。基于PCI前OCT,55%的患者(占所有狭窄的57%)通过选择不同的支架长度(25%的患者更短,43%的患者更长)改变了手术方式。PCI术后再次进行OCT检查,14.5%的贴壁不良、7.6%的扩张不足、2.7%的边缘夹层,并促使25%的患者(占所有狭窄的27%)使用额外的支架内后扩张或放置20个新支架(12%)进行基于OCT的进一步支架优化。最后发现:支架放置对OCT结果没有反应($n=137$),PCI前OCT改变PCI计划($n=165$),PCI后OCT检查促使PCI后优化($n=41$),OCT检查改变PCI计划及PCI后优化($n=65$)。在所有病例中,57%的病例在PCI前和27%的病例在PCI后受到OCT成像的影响。据ILUMIEN I研究显示,OCT显著影响了超过半数患者的PCI策略调整,促使近三分之一的案例实施了基于OCT反馈的进一步优化措施,充分证实了OCT在PCI全过程中的不可或缺作用。

在OCT指导下,支架置入优化的标准可以总结为以下几点^[31]:(1)支架膨胀率应大于80%;在非左主干病变中,最小支架面积应大于 4.5 mm^2 ;(2)无重度边缘夹层,夹层局限于内膜且无明显水肿发生风险;(3)无严重贴壁不良(轴向距离 $<400\text{ }\mu\text{m}$,长度 $<1\text{ mm}$);(4)无重度组织脱垂,且组织脱垂不影响血流;(5)支架边缘不存在富含脂质区域。这些标准有助于确保支架置入的安全性和有效性,减少术后并发症的风险。

4.2 指导及评估生物可降解支架 生物可降解支架(biodegradable stent, BRS)的发展,OCT在指导BRS植入方面的作用日益凸显。OCT能够精确识别冠状动脉病变的特征,包括粥样斑块的性质、病变长度、钙化程度等,为能否选择BRS提供依据。通过OCT成像,

可以评估血管的直径和参考血管段,确保选择的BRS与血管匹配,减少术后并发症。支架植入后,OCT可以即刻评估BRS展开情况、支架与血管壁的贴合度以及是否存在并发症,如支架贴壁不良、边缘夹层等。

OCT可用于BRS植入后的长期随访,监测支架的降解过程、血管重塑情况以及是否有新生内膜增生的发生。Silva G等^[32]用OCT评估新型西罗莫司BRS在植入后第1个月,第2个月及第3个月时支架内皮覆盖情况。共68例患者参与此项研究,所有患者被连续分为3组,第一组在3个月时进行OCT成像随访,第二组在2个月时,第三组在1个月时。共治疗72处病变,1、2和3个月时支架的OCT评估显示支柱覆盖率分别为90.41%、93.96%和97.21%($P=0.04$)。Konishi A等^[33]通过OCT对22个Nobori BRS进行术后6、12和24月连续评估,新生内膜厚度逐渐增加(分别为 $(73 \pm 24)\text{ }\mu\text{m}$ 、 $(81 \pm 26)\text{ }\mu\text{m}$ 和 $(108 \pm 35)\text{ }\mu\text{m}$, $P=0.001$),管腔面积无显著减少 $[(6.36 \pm 1.98)\text{ mm}^2$ 、 $(6.18 \pm 2.04)\text{ mm}^2$ 和 $(5.87 \pm 2.06)\text{ mm}^2$, $P=0.72$]。未覆盖支柱的频率 $[(3.89 \pm 3.91)\%$ 、 $(1.55 \pm 1.63)\%$ 和 $(0.23 \pm 0.67)\%$, $P=0.001$]、新生内膜不均匀评分 $[(1.95 \pm 0.18)\%$ 、 $(1.86 \pm 0.19)\%$ 和 $(1.78 \pm 0.17)\%$, $P=0.012$]、血栓百分比(5%、0%和0%, $P=0.37$)和支柱周围低强度区域(6.8%、5.1%和1.6%, $P=0.017$)从6个月减少到12个月和24个月。Nobori支架实现了可接受的长期血管愈合。

OCT在BRS的植入中提供了精确的术前评估、术中指导和术后随访,是优化BRS植入和评估的重要工具。

4.3 指导复杂病变的治疗策略 冠状动脉钙化病变是介入手术中的复杂病变之一。钙化病变的存在会影响支架的膨胀和贴合,OCT穿透性更高能够详细评估钙化的程度和分布,从而指导医生选择合适的预处理技术,以优化支架植入的效果。钙化病变术前应进行OCT检查,并使用OCT钙化积分系统对冠状动脉钙化病变进行评估,该系统根据钙化角度、厚度和长度来评分^[34]。钙化积分高(4分)的病变有较大风险发生支架膨胀不良,需要进行充分的预处理,包括切割球囊扩张术、棘突球囊扩张术、震波球囊扩张术(intravascular lithotripsy, IVL)、旋磨术(rotational atherectomy, RA)和准分子激光冠状动脉斑块消蚀术(excimer laser coronary atherectomy, ELCA)。对于钙化积分在1到3分之间的病变,医生应根据OCT评估的钙化特征决定是否进行预处理,并选择适当的技术。深部钙化推荐使用IVL或ELCA预处理,而钙化结节和偏心钙化则推荐使用IVL或RA预处理。预处理后,应再次进行OCT检查,确保钙化断裂或修饰充分后再置入支架,以保证支架顺利通过并获得最佳膨胀和贴壁效果。PCI后,

建议进行 OCT 检查以评估支架置入的即刻效果^[31]。

Ziedses des Plantes AC 等^[35]回顾性 2008 年 5 月至 2022 年 4 月在 PCI 前后进行 OCT 评估的患者。PCI 前 OCT 用于评估钙负荷, PCI 后 OCT 用于评估支架的绝对和相对膨胀。共分析 336 例患者 361 个病灶, 242 处(67.0%)病变存在靶病变钙化。病变预处理和扩张在钙化病变中更频繁, 扩张后的最大膨胀压力在钙化病变中更高。PCI 后 OCT 结果显示, 钙化病变组中位最小支架面积小于非钙化病变组(5.37 mm^2 和 6.24 mm^2 , $P<0.001$), 而组间中位相对支架扩张相似(78% 和 83%, $P=0.325$)。钙角度、厚度或钙化结节的存在对最小支架面积没有影响, 尽管最大钙角度越大, 支架的相对扩张就越差。另一方面, 总钙化病变长度似乎是绝对和相对支架扩张的唯一独立预测因子。在一项单中心、回顾性、观察性研究中, 经过血管内成像(OCT 与 IVUS)评估钙化病变指导 PCI 支架扩张的影响^[36]: 145 例中度至重度钙化病变被分为四组: 40 例 IVUS 引导的 RA、38 例 IVUS 指导的非 RA、35 例 OCT 引导的 RA 和 32 例 OCT 引导非 RA。与 IVUS 引导的 RA 相比, OCT 引导的 RA 与靶钙处更大的支架扩张率有关[中位数(88.0%), 四分位数间距(78.0~96.0)和中位数(76.5%), 四分位数间距(71.0~84.3), $P=0.008$]。此外, OCT 引导的非 RA 支架扩张与 OCT 引导的 RA 相似。与 IVUS 引导的 RA 相比, OCT 引导的 RA 使用了更大的旋磨头[1.75 mm ($1.50\sim2.00$) 和 1.50 mm ($1.50\sim1.75$), $P=0.004$]。在 OCT 引导的 RA 中, 钙化病变的中位最小厚度从 $800(640\sim980)\text{ }\mu\text{m}$ 显著降低到 $550(350\sim680)\text{ }\mu\text{m}$, ($P<0.001$)。四组间缺血导致的靶病变血运重建的发生率没有显著差异($P=0.37$)。通过根据钙化病变的厚度确定 RA 改变病变的适应症和终点, OCT 引导的 PCI 与 IVUS 引导的 PCI 相比, 支架扩张的直径明显更大。

在分叉病变中, OCT 能够帮助医生精确评估分叉病变的主支和分支, 采取恰当的介入治疗策略, 确保主支和侧支的通畅, 降低再狭窄的风险。一项在欧洲 38 个医学中心进行的随机、开发标签的临床研究^[37]: 1 201 例临床有 PCI 指征且经 CAG 发现有复杂分叉病变的患者按 1:1 的比例随机分配到 OCT 引导下的 PCI (600 例)或血管造影引导下的 PCI (601 例)。OCT 引导下 PCI 组 111 例(18.5%)和血管造影引导下 PCI 组 116 例(19.3%)有左主干冠状动脉分叉病变。2 年时, OCT 引导的 PCI 组中有 59 例(10.1%)患者发生了 MACE (心脏原因死亡、靶病变 AMI 或缺血导致靶病变血运重建术), 血管造影引导的 PCI 组中有 83 例(14.1%)患者发生了 MACE (风险比 0.70, 95% 置信区间为 0.50~0.98, $P=0.035$)。OCT 引导下 PCI 组有 41 例(6.8%)患者发生手术相关并发症, 血管造影引导

下 PCI 组有 34 例(5.7%)患者发生手术相关并发症。在复杂冠状动脉分叉病变的患者中, OCT 引导下的 PCI 在 2 年的 MACE 发生率低于血管造影引导下的 PCI。

OCT 在处理钙化病变和分叉病变中发挥着关键作用, 通过精确评估病变特征, 指导预处理和支架植入, 优化治疗结果, 并降低手术并发症及 MACE 发生率。

5 OCT 技术的新进展

OCT 技术在心血管领域的最新进展, 主要体现在智能化分析与多模态成像的深入应用。通过集成机器学习和深度学习算法等先进算法, OCT 能够自动识别和分类冠状动脉内的病变, 如粥样硬化斑块、钙化等, 并精确评估病变风险, 为临床医生提供个性化的治疗建议^[38]。此外, OCT 的多模态成像能力也得到了显著提升, 通过与 IVUS 及 FFR 等技术的结合, 不仅能够提供血管结构的详细信息, 还能综合评估血流动力学, 从而为 CAD 的诊断和治疗提供了更为全面和深入的影像学支持^[39]。这些进展不仅优化了 PCI 的策略, 还显著提高了手术的精确性和安全性, 为患者带来了更好的治疗效果和预后。随着技术的不断发展, OCT 在心血管领域的应用前景将更加广阔。

6 总结

OCT 作为一种重要的影像学技术, 其高分辨率的成像能力使得医生能够更清晰地观察到动脉内部结构, 进而更准确地评估病变程度。这一优势不仅提高了 CAD 的早期诊断率, 还有助于优化介入治疗方案, 降低手术并发症的风险。通过对 OCT 影像的深入分析, 临床医生可以获得更全面的信息, 从而在制定个性化治疗方案时, 做出更为明智的决策。然而, 尽管 OCT 在冠状动脉疾病的诊断和治疗中具有重要的临床价值, 它也存在一些局限性。首先, OCT 的穿透力相对较弱, 对于较深的血管壁或钙化病变的评估能力有限。其次, OCT 的使用需要血管内注射造影剂, 这可能增加患者发生过敏反应或肾功能损害的风险, 尤其是对于那些有肾功能不全的患者。此外, OCT 的成像范围相对有限, 可能无法全面评估长段病变或弥漫性病变。还有, OCT 设备的高昂成本和操作的复杂性限制了其在一些医疗设施中的广泛应用。最后, OCT 图像的解读需要专业的培训和经验, 这对于医生来说是一个额外的要求。

综上所述, OCT 在 CAD 的诊断和治疗中具有重要的临床价值。随着技术的不断发展和应用的深入, OCT 有望为心血管疾病的管理提供更为精准的诊断工

具和治疗策略,从而改善患者的治疗效果和预后。未来的研究将进一步探索 OCT 在心血管疾病中的潜力,特别是在智能化和多模态成像方面的应用,以期为患者带来更多的临床获益。同时,针对 OCT 的局限性,未来的技术改进和临床应用指南的制定也将是研究的重要方向。

利益冲突 所有作者均声明不存在利益冲突

参考文献

- [1] 国家心血管病中心, 中国心血管健康与疾病报告编写组, 胡盛寿. 中国心血管健康与疾病报告 2023 概要[J]. 中国循环杂志, 2024, 39(7): 625–660.
- [2] Jensen RV, Hjortbak MV, Bøtker HE. Ischemic heart disease: an update[J]. Semin Nucl Med, 2020, 50(3): 195–207.
- [3] Fernández-Ruiz I. New insights into OCT-guided PCI [J]. Nat Rev Cardiol, 2023, 20(11): 720.
- [4] Huang D, Swanson EA, Lin CP, et al. Optical coherence tomography[J]. Science, 1991, 254(5035): 1178–81.
- [5] Zeppieri M, Marsili S, Enaholo ES, et al. Optical coherence tomography (OCT): a brief look at the uses and technological evolution of ophthalmology[J]. Medicina (Kaunas), 2023, 59(12): 2114.
- [6] Araki M, Park SJ, Dauerman HL, et al. Optical coherence tomography in coronary atherosclerosis assessment and intervention[J]. Nat Rev Cardiol, 2022, 19(10): 684–703.
- [7] Gerbaud E, Weisz G, Tanaka A, et al. Plaque burden can be assessed using intravascular optical coherence tomography and a dedicated automated processing algorithm: a comparison study with intravascular ultrasound[J]. Eur Heart J Cardiovasc Imaging, 2020, 21(6): 640–652.
- [8] Ybarra LF, Szarf G, Ishikawa W, et al. Diagnostic accuracy of 320-row computed tomography for characterizing coronary atherosclerotic plaques: comparison with intravascular optical coherence tomography[J]. Cardiovasc Revasc Med, 2020, 21(5): 640–646.
- [9] 原野, 王智慧, 王丽珊, 等. OCT 在冠状动脉粥样斑块评估及介入治疗中作用的研究进展[J]. 中国老年学杂志, 2013, 33(4): 987–988.
- [10] Tian J, Ren X, Vergallo R, et al. Distinct morphological features of ruptured culprit plaque for acute coronary events compared to those with silent rupture and thin-cap fibroatheroma: a combined optical coherence tomography and intravascular ultrasound study[J]. J Am Coll Cardiol, 2014, 63(21): 2209–16.
- [11] Maqableh G, Khan KA, Shahid F, et al. Role of optical coherence tomography in chronic spontaneous coronary artery dissection—diagnosis and management[J]. Heart Views, 2023, 24(2): 119–121.
- [12] Okabe H, Sonoda S, Naka Y, et al. Healed erosion: the role of pre-interventional optical coherence tomography in a patient clinically suspected of having unstable angina with coronary spasm[J]. Intern Med, 2021, 60(14): 2241–2244.
- [13] Kavaliauskaite R, Otsuka T, Ueki Y, et al. Coronary embolism due to possible thrombosis of prosthetic aortic valve – the role of optical coherence tomography: case report[J]. Eur Heart J Case Rep, 2021, 5(7): ytab115.
- [14] Jiang S, Fang C, Xu X, et al. Identification of high-risk coronary lesions by 3-vessel optical coherence tomography[J]. J Am Coll Cardiol, 2023, 81(13): 1217–1230.
- [15] Paraggio L, Burzotta F, Aurigemma C, et al. Trends and outcomes of optical coherence tomography use: 877 patients single-center experience[J]. Cardiovasc Revasc Med, 2019, 20(4): 303–310.
- [16] Pan W, Wei W, Hu Y, et al. Diagnostic accuracy of a novel optical coherence tomography-based fractional flow reserve algorithm for assessment of coronary stenosis significance[J]. Cardiol J, 2024, 31(3): 381–389.
- [17] Ozaki Y, Tanaka A, Tanimoto T, et al. Thin-cap fibroatheroma as high-risk plaque for microvascular obstruction in patients with acute coronary syndrome[J]. Circ Cardiovasc Imaging, 2011, 4(6): 620–7.
- [18] Sugiyama T, Yamamoto E, Fracassi F, et al. Calcified plaques in patients with acute coronary syndromes[J]. JACC Cardiovasc Interv, 2019, 12(6): 531–540.
- [19] Karimi Galougahi K, Dakroub A, Chau K, et al. Utility of optical coherence tomography in acute coronary syndromes[J]. Catheter Cardiovasc Interv, 2023, 102(1): 46–55.
- [20] Mani A, Ojha V, Sivadasanpillai H, et al. Culprit lesion morphology on optical coherence tomography in ST-elevation myocardial infarction vs non ST-elevation myocardial infarction—a systematic review of 7526 patients[J]. J Saudi Heart Assoc, 2023, 35(1): 40–49.
- [21] Sheth TN, Kajander OA, Lavi S, et al. Optical coherence tomography-guided percutaneous coronary intervention in ST-segment-elevation myocardial infarction: a prospective propensity-matched cohort of the thrombectomy versus percutaneous coronary intervention alone trial[J]. Circ Cardiovasc Interv, 2016, 9(4): e003414.
- [22] He L, Hu S, Zhao C, et al. Five-year follow-up of OCT-

- guided percutaneous coronary intervention in patients with ST-segment elevation myocardial infarction[J]. *EuroIntervention*, 2024, 20(15): e937–e947.
- [23] Burzotta F, Zito A, Aurigemma C, et al. Fractional flow reserve or optical coherence tomography for angiographically intermediate coronary stenoses: 5-year outcomes in the FORZA trial[J]. *Eur Heart J*, 2024, 45(30): 2785–2788.
- [24] Vergallo R, Lombardi M, Kakuta T, et al. Optical coherence tomography measures predicting fractional flow reserve: the OMEF study[J]. *J Soc Cardiovasc Angiogr Interv*, 2024, 3(4): 101288.
- [25] Olsen NT, Sheng K. Simulation of coronary fractional flow reserve and whole-cycle flow based on optical coherence tomography in individual patients with coronary artery disease[J]. *Int J Cardiovasc Imaging*, 2024, 40(8): 1661–1670.
- [26] Kang DY, Ahn JM, Yun SC, et al. Optical coherence tomography-guided or intravascular ultrasound-guided percutaneous coronary intervention: the OCTIVUS randomized clinical trial[J]. *Circulation*, 2023, 148(16): 1195–1206.
- [27] Kubo T, Shinke T, Okamura T, et al. Optical frequency domain imaging vs. intravascular ultrasound in percutaneous coronary intervention (OPINION trial): one-year angiographic and clinical results[J]. *Eur Heart J*, 2017, 38(42): 3139–3147.
- [28] Kochman J, Pietrasik A, Rdzanak A, et al. Comparison between optical coherence tomography and intravascular ultrasound in detecting neointimal healing patterns after stent implantation[J]. *Kardiolog Pol*, 2014, 72(6): 534–40.
- [29] Volleberg R, Mol JQ, van der Heijden D, et al. Optical coherence tomography and coronary revascularization: from indication to procedural optimization[J]. *Trends Cardiovasc Med*, 2023, 33(2): 92–106.
- [30] Wijns W, Shite J, Jones MR, et al. Optical coherence tomography imaging during percutaneous coronary intervention impacts physician decision-making: ILUMIEN I study[J]. *Eur Heart J*, 2015, 36(47): 3346–55.
- [31] 贾海波, 何路平, 徐艺硕, 等.《光学相干断层成像技术在冠心病介入诊疗中应用的中国专家共识》解读[J]. *临床心血管病杂志*, 2023, 39(3): 167–171.
- [32] Silva G, Meneguz-Moreno RA, Costa R, et al. Serial assessment of coronary artery healing of a biodegradable polymer drug-eluting stent at 1, 2, and 3 months by optical coherence tomography (OCT)–the REPAIR trial [J]. *J Invasive Cardiol*, 2023, 35(5): E225–E233.
- [33] Konishi A, Shinke T, Otake H, et al. Serial optical coherence tomography evaluation at 6, 12, and 24 months after biolimus A9-eluting biodegradable polymer-coated stent implantation[J]. *Can J Cardiol*, 2015, 31(8): 980–8.
- [34] Fujino A, Mintz GS, Matsumura M, et al. A new optical coherence tomography-based calcium scoring system to predict stent underexpansion[J]. *EuroIntervention*, 2018, 13(18): e2182–e2189.
- [35] Ziedses des Plantes AC, Scoccia A, Neleman T, et al. Optical coherence tomography-derived predictors of stent expansion in calcified lesions[J]. *Catheter Cardiovasc Interv*, 2023, 102(1): 25–35.
- [36] Kurogi K, Ishii M, Ikebe S, et al. Optical coherence tomography-versus intravascular ultrasound-guided stent expansion in calcified lesions[J]. *Cardiovasc Interv Ther*, 2022, 37(2): 312–323.
- [37] Holm NR, Andreasen LN, Neghabat O, et al. OCT or angiography guidance for PCI in complex bifurcation lesions[J]. *N Engl J Med*, 2023, 389(16): 1477–1487.
- [38] Kumar S, Chu M, Tu S, et al. Physiologic and compositional coronary artery disease extension in patients with takotsubo syndrome assessed using artificial intelligence: an optical coherence tomography study[J]. *Coron Artery Dis*, 2022, 33(5): 349–353.
- [39] Chu M, Jia H, Gutiérrez-Chico JL, et al. Artificial intelligence and optical coherence tomography for the automatic characterisation of human atherosclerotic plaques[J]. *EuroIntervention*, 2021, 17(1): 41–50.

(本文编辑: 马萌萌, 许守超)