

IVUS在冠脉钙化病变PCI治疗中的临床应用与价值

徐康宁¹, 卜韦丹¹, 黄 达^{2*}

¹右江民族医学院研究生学院, 广西 百色

²右江民族医学院附属医院心血管内科, 广西 百色

收稿日期: 2025年12月29日; 录用日期: 2026年1月23日; 发布日期: 2026年2月2日

摘 要

冠状动脉钙化病变显著增加经皮冠状动脉介入治疗(Percutaneous Coronary Intervention, PCI)的难度与风险。血管内超声(Intravascular Ultrasound, IVUS)作为评估钙化的“金标准”, 在病变精准识别、分型与量化(如钙化弧度、长度及综合评分)中发挥核心作用。本文系统综述了IVUS如何基于上述评估, 引导个体化PCI决策: 对轻中度钙化采用阶梯式球囊扩张策略; 对具有高危特征(如钙化弧度 $\geq 270^\circ$ 、评分 ≥ 2 分)的重度钙化, 则指导选择冠状动脉斑块旋磨术(Rotational Atherectomy, RA)、轨道旋磨术(Orbital Atherectomy, OA)或血管内碎石术(Intravascular Lithotripsy, IVL)等积极预处理。此外, IVUS通过提供客观标准优化支架植入, 并被证实能显著改善患者临床预后。展望未来, IVUS成像技术的进步、评估标准的完善, 以及与人工智能等新技术的结合, 将进一步增强其在钙化病变介入治疗的临床应用价值与预后改善作用。

关键词

冠脉钙化, 血管内超声, 经皮冠状动脉介入治疗

Clinical Application and Value of IVUS in PCI Treatment of Coronary Artery Calcification Lesions

Kangning Xu¹, Weidan Bu¹, Da Huang^{2*}

¹Graduate School of Youjiang Medical University for Nationalities, Baise Guangxi

²Department of Cardiovascular Medicine, Affiliated Hospital of Youjiang Medical University for Nationalities, Baise Guangxi

Received: December 29, 2025; accepted: January 23, 2026; published: February 2, 2026

*通讯作者。

文章引用: 徐康宁, 卜韦丹, 黄达. IVUS 在冠脉钙化病变 PCI 治疗中的临床应用与价值[J]. 临床医学进展, 2026, 16(2): 548-555. DOI: 10.12677/acm.2026.162424

Abstract

Coronary artery calcification lesions significantly increase the difficulty and risk of Percutaneous Coronary Intervention (PCI). Intravascular Ultrasound (IVUS), as the “gold standard” for evaluating calcification, plays a central role in the precise identification, classification, and quantification of lesions (e.g., calcification arc, length, and comprehensive scoring). This article systematically reviews how IVUS, based on the aforementioned assessments, guides individualized PCI decision-making: employing a stepwise balloon expansion strategy for mild to moderate calcification, while directing the selection of active pretreatment strategies such as Rotational Atherectomy (RA), Orbital Atherectomy (OA), or Intravascular Lithotripsy (IVL) for severe calcification with high-risk features (e.g., maximum calcification arc $\geq 270^\circ$, score ≥ 2). Furthermore, IVUS optimizes stent implantation by providing objective criteria and has been proven to significantly improve clinical outcomes. Looking ahead, advancements in IVUS imaging technology, refinement of evaluation standards, and integration with emerging technologies such as artificial intelligence are expected to further enhance the clinical utility and prognostic value of IVUS in treating calcified lesions.

Keywords

Coronary Artery Calcification, Intravascular Ultrasound, Percutaneous Coronary Intervention Therapy

Copyright © 2026 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

冠状动脉钙化是经皮冠状动脉介入治疗(Percutaneous Coronary Intervention, PCI)中的常见挑战, 其存在显著增加手术难度, 并与更高的支架扩张不良及术后不良事件风险相关[1]。血管内超声(Intravascular Ultrasound, IVUS)作为目前评估冠状动脉钙化的“金标准”, 在指导钙化病变的 PCI 决策中发挥着核心作用[2]。随着技术的进步和发展, IVUS 在钙化冠脉病变 PCI 中的应用日益成熟, 本文旨在系统阐述其在冠脉钙化病变 PCI 治疗中的临床应用与价值。

2. IVUS 在冠状动脉钙化病变评估与决策中的引导作用

钙化病变显著增加 PCI 的器械通过失败、球囊扩张不全及支架贴壁不良的风险[3], 并与更高的长期不良事件发生率相关[4] [5]。因此, 在 PCI 术前对钙化病变进行精准评估至关重要。IVUS 通过其高分辨率的腔内成像能力, 已成为实现这一精准评估并引导后续治疗决策的核心工具。

2.1. 钙化冠脉的血管内超声成像特点

冠脉钙化病变在 IVUS 图像上表现为明亮的白色影像, 钙化区域的边缘通常比较锐利、清晰, 与周围组织分界明确。因超声波无法穿透钙化组织, 在钙化区域后方形成一个无回声(黑色)的锥形声影, 这是钙化最特异的特征[6]。尽管致密的纤维斑块或血管内支架也可呈现强回声, 但后方均无此典型声影。因此, 术者依据“高回声伴声影”这一特征, 既可迅速识别钙化病变, 又能实现与其他高回声结构的准确鉴别。

2.2. 钙化病变的 IVUS 分型

IVUS 影像基于钙化斑块与冠状动脉内膜的关系、钙化在血管壁的空间位置和分布特征,可将冠脉钙化病变分为以下四型:即浅表钙化、深层钙化、环形钙化、钙化结节。浅表钙化定义为钙化声影前缘出现在斑块厚度的内侧 50%以内;该类型是导致球囊扩张不全和支架膨胀不良的重要因素,通常需切割球囊(Cutting Balloon, CB)或冠状动脉斑块旋磨术(Rotational Atherectomy, RA)、轨道旋磨术(Orbital Atherectomy, OA)治疗[2]。深层钙化定义为钙化声影前缘出现在斑块厚度的外侧 50%以内;该类钙化虽不直接阻碍扩张,但可能影响血管的整体弹性回缩,与支架膨胀不良的风险相关性大,故术后常需高压后扩张以确保贴壁[7]。环形钙化定义为 IVUS 横截面形成环形高回声伴声影且钙化范围 $\geq 270^\circ$;因其形成坚硬的钙化环,严重限制血管扩张,是导致支架膨胀不全的主要因素,故常需在植入支架前采用 RA、OA 或 IVL 进行充分的管腔准备[2]。钙化结节指钙化灶突破内膜向管腔内突出,表面不规则,高回声钙化后方伴显著声影;它显著增加 PCI 的难度,是支架膨胀不全的独立危险因子,在基于 IVUS 的钙化评分系统中,有钙化结节则赋 1 分,2 分及以上就要考虑进行斑块修饰[8]。可见,冠脉钙化病变的 IVUS 分型对 PCI 治疗策略的选择具有决定性影响。

2.3. 钙化病变负荷量化指标

IVUS 是实现冠脉钙化负荷精准量化的重要工具,其评估结果与 PCI 预后密切相关。钙化弧度与钙化长度是评估钙化负荷的基础指标。钙化弧度指 IVUS 横断面上钙化斑块所占据的角度范围,通常据此进行分级:I 级(轻度, $<90^\circ$)、II 级(中度, $90^\circ\sim 180^\circ$)、III 级(重度, $180^\circ\sim 270^\circ$)与 IV 级(极重度, $>270^\circ$) [9]。IVUS 通过自动回撤系统来精确测量钙化病变的纵向长度。目前,IVUS 的量化评估已从基础指标参数发展至综合评分系统。在 Zhang 等人的回顾性观察性研究中,浅表性钙化弧度 $>270^\circ$ 且长度 $>5\text{ mm}$ 被证实是支架扩张不足的独立预测因子;他们提出了一种基于 IVUS 的评分系统,并明确,当评分 ≥ 2 分时,预示着支架扩张不足的风险显著增加[8]。于手术者而言,该评分提供了明确的决策工具:即当评分 ≥ 2 分时,应积极启动 RA、OA 或血管内碎石术(Intravascular Lithotripsy, IVL)等预处理策略,以规避支架扩张不足的风险。

上述精准的量化评估,其核心临床价值在于,为钙化病变的预处理提供了客观决策依据。正如 Petousis 等人在其系统综述中指出,IVUS 对钙化的评估是指导钙化修饰策略的基础,当 IVUS 识别出高危特征(如浅表钙化弧度 $>270^\circ$ 、钙化长度 $>5\text{ mm}$ 或钙化评分 ≥ 2 分)时,直接提示需进行预处理[10]。这一 IVUS 引导的决策流程能带来明确的临床获益:最新的 Meta 分析证实,与单纯造影引导相比,IVUS 引导的 PCI 能显著降低主要不良心脏事件(Major Adverse Cardiac Events, MACE)、心源性死亡(Cardiac Death, CD)及支架内血栓(Stent Thrombosis, ST)风险[11]。这表明,基于 IVUS 评估指导预处理,已不仅是技术优化,更是改善患者长期预后的关键策略。

3. 基于 IVUS 的个体化预处理策略选择

在完成对钙化病变的精准评估后,如何将量化结果(如弧度、深度、分布)转化为最优的预处理策略,成为决定手术成败的关键。

3.1. IVUS 引导下的轻中度钙化病变处理策略

在 IVUS 引导的个体化预处理策略中,对于轻中度钙化病变,权威专家共识已为其确立了清晰的阶梯化方案。根据《冠状动脉钙化病变诊治中国专家共识(2021 版)》的推荐,常规 PCI 是该类病变的主要治疗方式:轻度表浅钙化可直接采用常规半顺应性球囊(Semi-Compliant Balloon, SCB)处理;而轻、中度

钙化则更适合选用非顺应性球囊(Non-Compliant Balloon, NCB)、CB 或棘突球囊(Scoring Balloon, SB)进行预扩张[2]。大量的临床研究与实践已证实,遵循此 IVUS 引导的阶梯化策略,能为轻中度钙化病变提供兼具安全性与有效性的管腔准备[12] [13]。

3.2. IVUS 引导下的重度钙化病变处理策略

当 IVUS 提示最大钙化弧度 $\geq 270^\circ$ 、连续钙化长度 $> 5 \text{ mm}$ 或存在浅表性钙化等高危特征时,则标志着病变已进入重度范畴,常规球囊扩张策略面临高失败风险。对此,须积极采用更高效的斑块修饰技术,其主要手段包括 RA、OA、IVL 等。

3.2.1. 斑块磨削技术: RA 与 OA

RA 与 OA 作为基于“差异切割”原理的主动斑块修饰技术,是处理重度钙化病变的核心手段,其临床应用高度依赖 IVUS 的精准评估[14]。若经 NCB 高压扩张后,IVUS 影像确认钙化环未被有效撕裂,即提示需转向更积极的斑块修饰策略。一项针对球囊扩张失败患者的回顾性研究证实,在此情况下启动旋磨术,手术成功率可达 87.5%,并显著改善患者远期预后[15],体现出 IVUS 在引导策略转换、避免无效操作中的关键价值。为实现更前瞻的精准决策,Zhang 等人提出了 IVUS 钙化评分系统,对以下特征各赋 1 分: 360° 浅表性钙化、浅表性钙化弧度 $> 270^\circ$ 且长度 $> 5 \text{ mm}$ 、存在钙化结节、血管直径 $< 3.5 \text{ mm}$ 。该研究指出,当评分 ≥ 2 分时,支架扩张不足风险显著上升,应积极采用 RA 或 OA 进行预处理[8]。该评分系统为术者提供了可靠的量化决策工具。在此基础上,IVUS 所揭示的病变特征可进一步细化技术选择。Okamoto 等人开展的 DIRO 试验证实,RA 在重度钙化病变中可实现更优的组织修饰效果,为支架植入创造更佳的膨胀条件;同一研究也提示,对于 IVUS 显示的弥漫长病变,OA 在操作灵活性与安全性方面更具优势[16],为基于 IVUS 表型的技术优选提供了直接依据。

近年来,RA 的应用场景进一步拓展至更具挑战的临床情境。一项纳入 104 例需行急诊介入的 ST 段抬高型心肌梗死(ST-segment Elevation Myocardial Infarction, STEMI)患者的多中心研究显示,当常规器械因钙化无法通过或扩张时,采取补救性旋磨策略(占 76.9%)的总体成功率达 86.5%,且未增加严重并发症风险[17],证实了 RA 在此类复杂情况下的可行性,为术者在处理“STEMI 合并钙化”这一极高风险病变时,提供了关键的治疗选项。

3.2.2. 血管内碎石术

IVL 是一种通过球囊导管递送声波能量以安全碎裂钙化斑块的创新技术[2]。其用于重度冠状动脉钙化病变的安全性与长期有效性,已获多项高质量临床研究的证实[18] [19]。IVL 对深层钙化具有显著作用,且相关血管并发症风险较低。Kereiakes 等学者的基础研究为此提供了关键证据。该研究通过新鲜冷冻人体股动脉实验证实,IVL 对深层钙化作用显著,其声波能以最小的影响穿过柔软的血管组织而不造成损伤,因此发生血管穿孔、远端微循环闭塞等并发症的风险较低[20]。这提示,当 IVUS 明确显示病变以深层钙化为主要特征时,IVL 可作为一种兼具高效与安全的优选策略。在明确其显著优势的基础上,IVL 的适用标准得以不断精确。最新的 COCALP 前瞻性多中心研究进一步明确了其适应症:即适用于经 IVUS 评估为重度钙化(动脉壁两侧不透射线密度影),且病变长度 $\leq 60 \text{ mm}$ 、参考血管直径 2.5~4.0 mm 的患者;该研究同时证实,IVL 治疗可实现极高的手术成功率,且并发症与 MACE 发生率低,能有效优化后续支架植入[21]。

此外,IVL 的应用已成功拓展至更为复杂的病变场景。对于 IVUS 提示同时存在严重钙化与慢性完全闭塞(Chronic Total Occlusion, CTO)的病变,临床研究证实 IVL 同样可行。一项纳入 404 名患者的研究显示,在 CTO 亚组中,IVL 的器械成功率(100%)与技术成功率与非 CTO 组无差异,且长期主要 MACE

发生率亦无显著增高[22]。这表明, 当 IVUS 确认 CTO 病变伴有重度钙化时, IVL 可作为一种高效且安全的预处理选择。

总结而言, IVUS 通过精准评估, 为预处理策略提供了分层决策的核心依据。其决策路径可概括为: 对于轻中度钙化, 遵循 IVUS 引导的球囊阶梯化扩张策略; 当 IVUS 提示进入重度范畴(如最大钙化弧度 $\geq 270^\circ$ 、钙化评分 ≥ 2 分), 则必须启动斑块修饰。在选择具体修饰技术时, IVUS 揭示的钙化位置与类型成为关键: 基于 IVUS 的钙化评分系统提示, 当存在严重的浅表钙化(如弧度 $> 270^\circ$)时, 支架扩张不足风险显著增加, 应积极采用 RA/OA 进行预处理; 而当 IVUS 明确病变以深层钙化为主要特征时, 研究证实 IVL 则成为更具针对性的选择。这一从“负荷分层”到“靶点匹配”的 IVUS 引导流程, 是确保后续支架理想植入的基石。

4. IVUS 在识别与处理 PCI 并发症中的作用

钙化病变预处理过程中, 尤其是在使用旋磨、碎石等积极技术时, 并发症如夹层、壁内血肿、穿孔等的风险相应增加。IVUS 凭借其高分辨率的管腔与管壁成像能力, 在早期识别、风险评估与处理指导中具有不可替代的作用。

4.1. 冠状动脉夹层与壁内血肿

冠状动脉夹层(Coronary Artery Dissection CAD)是术中常见的并发症, IVUS 能够提供特征性的高分辨率影像: 表现为血管内膜层的线性高回声分离, 可清晰显示撕裂片的形态、夹层的纵向与周向范围, 以及是否形成真腔与假腔结构; 当夹层进展导致血液进入血管壁时, IVUS 可进一步敏感地识别继发的壁内血肿(Intramural Hematoma CIH), 其特征为紧邻管腔的、新月形或环形的均质无回声区[23]。在处理 CAD 的介入治疗中, IVUS 通过提供关键信息, 直接提升了操作的安全性与有效性。David 等人指出, IVUS 不仅能精确判断夹层的纵向延伸范围、周向累及程度及解剖深度(如是否累及中膜), 还能在复杂病例中确认介入导丝位于真腔, 避免操作误入假腔加重损伤; 此外, IVUS 可精准测量夹层近远端参考血管的直径与病变长度, 为选择尺寸与覆盖范围合适的支架提供客观、个体化的数据支持, 确保对夹层入口及病变段的完全覆盖与有效贴壁[24]。Hussain 等人指出, IVUS 在 CIH 中具有不可替代的诊断价值: 一方面, 其可通过特异性月牙形高回声伴无回声区的成像特征, 明确 CIH 的形态学诊断, 弥补冠状动脉造影的漏诊风险; 另一方面, IVUS 对血肿范围与管腔压迫程度的精准评估, 能为 PCI 术后 CIH 的个体化治疗提供关键参考, 有效降低心肌梗死等严重不良结局的发生风险[25]。

4.2. 冠状动脉穿孔

冠状动脉穿孔(Coronary Perforation CAP)是 PCI 中罕见但危急的并发症, 尤其是在旋磨或高压扩张后。IVUS 可直接显示血管壁的完整性, 穿孔处表现为管壁连续性中断, 伴造影剂外渗或心包积液的间接征象[26]。CAP 是经皮冠状动脉介入治疗(PCI)中罕见但致命的并发症, 聚四氟乙烯覆膜支架是常用封堵手段, 但该类支架缺乏弹性, 易出现扩张不足, 而冠状动脉造影对支架部署效果的评估存在局限性。Jurado-Román 等人在临床病例中发现, 69 岁 CAP 患者植入覆膜支架后, 冠脉造影仅提示“可能扩张不足”, 而 IVUS 清晰验证了后续球囊后扩张后的支架达到“正确扩张”标准, 且明确显示支架与血管壁的贴合状态及管腔外血肿范围, 避免了造影误判导致的治疗不足[27]。该研究证实, IVUS 可精准评估覆膜支架的扩张效果, 弥补 CA 在血管结构可视化上的缺陷, 为 CAP 后续治疗决策提供可靠依据; Velarde-Acosta 等人在病例报告指出, IVUS 是 CAP 风险预判的关键影像学工具, 其可通过识别特异性 C-CAT 体征(C 型偏心病变、约 270 度钙化斑块及对侧薄斑块), 提前警示冠脉介入过程中的穿孔高危风险, 为临床提供重

要预警信号[28]。

5. IVUS 指导支架植入与预后

支架植入术是 PCI 的最后一步，其结果直接影响患者预后。IVUS 的核心价值体现在优化植入效果与改善患者预后两个层面。

在预测支架扩张不足风险方面，IVUS 提供了从传统评分到智能模型的多层面参考。Zhang 等人构建了 IVUS 钙化评分以预测扩张不足，当钙评分 ≥ 2 ，支架植入后扩张不足风险增加，可在置入支架前进行钙化预处理以预防支架扩张不足[8]；Min 等人的开创性研究，首次将深度学习算法应用于术前 IVUS 图像分析，他们构建的模型能够直接、自动地预测术后支架面积，其预测的最小支架面积(Minimum Stent Area, MSA)与术后实际测量值高度相关，总体预测准确率高达 94% [29]，这项研究表明，基于 IVUS 的人工智能模型能够辅助临床医生预先识别高风险病变，从而作出治疗决策。基于风险预测，IVUS 进一步为优化植入提供了客观标准。ULTIMATE 试验证实[30]，在 IVUS 指导下的 PCI 术后表现出更好的长期疗效，其中满足支架置入后最佳 IVUS 图像标准的患者长期疗效显著，该标准为：最小管腔面积(Minimum Lumen Area, MLA) $> 5.0 \text{ mm}$ 或远端参考血管腔面积的 90%，支架近端和远端斑块负荷 $< 50\%$ ，支架边缘夹层长度不超过 3 mm，包括介质层。该标准为术者实现更佳的治疗效果提供了重要依据。

在预后评估方面，IVUS 的作用主要体现在两个层面：一是其引导的整体治疗能改善临床结局；二是其提供的特定影像指标可直接用于风险分层。一项随机对照试验的 Meta 分析证实，对于复杂冠脉疾病患者，IVUS 引导能显著降低术后 CD、靶血管血运重建(Target Vessel Revascularization, TVR)及 ST 的发生风险[31]。更重要的是，IVUS 所评估的钙化负荷信息本身已成为一个强大的独立预后指标。例如，Tara 等人提出的 IVUS 钙化积分(ICS)研究发现，ICS 高于中位数(85 分)的患者，其发生心血管复合终点(包括 CD、靶血管心肌梗死等)的风险增加 51% [32]，这提示我们，IVUS 评估的钙化负荷不仅是手术策略的指导工具，更是一个强大的风险分层和预后预测指标。此外，IVUS 在特殊人群中的精准应用，进一步巩固了其临床价值。在高龄、弥漫钙化等高危人群中，刘等人的回顾性研究指出，IVUS 能有效识别传统造影易遗漏的微小或深层钙化，从而指导更个体化的预处理与支架选择，显著降低此类患者的 PCI 相关风险 [33]。

6. 人工智能在 IVUS 钙化识别中的应用

人工智能为 IVUS 影像的自动化、精准化分析提供了新的工具。Shinohara 等人的研究证实，基于 U-Net 架构的深度学习模型能够有效识别冠状动脉 IVUS 图像中的钙化区域。该模型直接学习钙化的超声物理特性，即强回声(高灰度值)区域及其后方伴随的声影(低灰度值)，通过卷积神经网络自动提取图像中的灰度差异与空间纹理特征，无需依赖人工设计规则，即可实现对钙化区域的精准分割，对严重钙化病变的分类准确率达 98% [34]。这为 IVUS 图像的自动化钙化识别与量化提供了可靠的技术路径，有助于提升评估的客观性与效率。尽管如此，当前 AI 驱动 IVUS 分析工具在真实临床环境中的集成度与可及性仍面临显著挑战。尽管研究层面已证明 AI 在识别与量化钙化方面具备高精度，但其向常规临床工作流的转化尚处于初步阶段。即使是已商业化的 AI 模块，其部署也往往局限于具备相应设备更新能力与专业技术支持的大型医疗中心。未来，AI 工具若想实现从“展示潜力”到“常规使用”的跨越，不仅需要更严谨的多中心临床验证，还需在系统集成、用户界面友好性及符合临床实际需求的自动化报告生成等方面取得实质性进展。

7. 总结与展望

冠状动脉钙化病变显著增加 PCI 的难度与风险。IVUS 作为钙化评估的“金标准”，在病变识别、分

型与量化(如钙化弧度、长度及综合评分)中发挥关键作用,指导预处理策略(如 RA、OA、IVL)的选择和支架植入的优化,有效改善手术成功率并降低术后不良事件风险。展望未来,随着 IVUS 成像技术的不断进步,其在钙化病变评估中的分辨率和准确性将进一步提高,为临床提供更详细和可靠的影像学信息;基于 IVUS 的钙化评分系统和评估标准也将随着更多临床研究的开展而不断完善,为个体化治疗提供更强有力的支持。同时,IVUS 技术与人工智能的结合、精准预处理标准的建立以及多模态影像融合应用,有望实现钙化病变的自动识别与量化,进一步提升钙化病变 PCI 治疗的效果与预后,凸显其持续发展的临床价值。

参考文献

- [1] 杨敏,林章宇,丰雷,等. 冠状动脉造影评估的靶病变钙化程度对接受经皮冠状动脉介入治疗患者手术即刻成功率和长期预后的影响[J]. 中国循环杂志, 2023, 38(12): 1239-1245.
- [2] 王伟民,霍勇,葛均波. 冠状动脉钙化病变诊治中国专家共识(2021 版) [J]. 中国介入心脏病学杂志, 2021, 29(5): 251-259.
- [3] Lis, P., Rajzer, M. and Klima, L. (2024) The Significance of Coronary Artery Calcification for Percutaneous Coronary Interventions. *Healthcare*, **12**, Article No. 520. <https://doi.org/10.3390/healthcare12050520>
- [4] Shiode, N., Kozuma, K., Aoki, J., Awata, M., Nanasato, M., Tanabe, K., *et al.* (2017) The Impact of Coronary Calcification on Angiographic and 3-Year Clinical Outcomes of Everolimus-Eluting Stents: Results of a XIENCE V/PROMUS Post-Marketing Surveillance Study. *Cardiovascular Intervention and Therapeutics*, **33**, 313-320. <https://doi.org/10.1007/s12928-017-0484-7>
- [5] Budoff, M.J., Kinninger, A., Gransar, H., Achenbach, S., Al-Mallah, M., Bax, J.J., *et al.* (2023) When Does a Calcium Score Equate to Secondary Prevention? Insights from the Multinational CONFIRM Registry. *JACC: Cardiovascular Imaging*, **16**, 1181-1189. <https://doi.org/10.1016/j.jcmg.2023.03.008>
- [6] Mintz, G.S., Nissen, S.E., Anderson, W.D., *et al.* (2001) American College of Cardiology Clinical Expert Consensus Document on Standards for Acquisition, Measurement and Reporting of Intravascular Ultrasound Studies (IVUS). A Report of the American College of Cardiology Task Force on Clinical Expert Consensus Documents. *Journal of the American College of Cardiology*, **37**, 1478-1492.
- [7] 李晓冉,赵笑男,陈晖. 冠状动脉钙化病变干预策略及治疗进展[J]. 中国循证心血管医学杂志, 2020, 12(4): 509-512.
- [8] Zhang, M., Matsumura, M., Usui, E., Noguchi, M., Fujimura, T., Fall, K.N., *et al.* (2021) Intravascular Ultrasound-Derived Calcium Score to Predict Stent Expansion in Severely Calcified Lesions. *Circulation: Cardiovascular Interventions*, **14**, e10296. <https://doi.org/10.1161/circinterventions.120.010296>
- [9] 张茵,宋雷. 腔内影像学评价冠状动脉钙化病变操作规范[J]. 中华心血管病杂志(网络版), 2023, 6(1): 1-10.
- [10] Petousis, S., Skolidis, E., Zacharis, E., Kochiadakis, G. and Hamilos, M. (2023) The Role of Intracoronary Imaging for the Management of Calcified Lesions. *Journal of Clinical Medicine*, **12**, Article No. 4622. <https://doi.org/10.3390/jcm12144622>
- [11] Sreenivasan, J., Reddy, R.K., Jamil, Y., Malik, A., Chamie, D., Howard, J.P., *et al.* (2024) Intravascular Imaging-Guided versus Angiography-Guided Percutaneous Coronary Intervention: A Systematic Review and Meta-Analysis of Randomized Trials. *Journal of the American Heart Association*, **13**, e31111. <https://doi.org/10.1161/jaha.123.031111>
- [12] Mangieri, A., Nerla, R., Castriota, F., Reimers, B., Regazzoli, D., Leone, P.P., *et al.* (2023) Cutting Balloon to Optimize Predilation for Stent Implantation: The COPS Randomized Trial. *Catheterization and Cardiovascular Interventions*, **101**, 798-805. <https://doi.org/10.1002/ccd.30603>
- [13] 申巧丽,赵殿儒,戈美琴,等. 非顺应性球囊、棘突球囊和切割球囊在冠状动脉药物球囊治疗中的疗效及安全性评价[J]. 中西医结合心脑血管病杂志, 2023, 21(12): 2286-2290.
- [14] Florek, K., Bartoszewski, E., Biegała, S., Klimek, O., Malcharczyk, B. and Kübler, P. (2023) Rotational Atherectomy, Orbital Atherectomy, and Intravascular Lithotripsy Comparison for Calcified Coronary Lesions. *Journal of Clinical Medicine*, **12**, Article No. 7246. <https://doi.org/10.3390/jcm12237246>
- [15] Ferri, L.A., Jabbour, R.J., Giannini, F., Benincasa, S., Ancona, M., Regazzoli, D., *et al.* (2016) Safety and Efficacy of Rotational Atherectomy for the Treatment of Undilatable Underexpanded Stents Implanted in Calcific Lesions. *Catheterization and Cardiovascular Interventions*, **90**, E19-E24. <https://doi.org/10.1002/ccd.26836>
- [16] Okamoto, N., Egami, Y., Nohara, H., Kawanami, S., Sugae, H., Kawamura, A., *et al.* (2023) Direct Comparison of Rotational

- vs Orbital Atherectomy for Calcified Lesions Guided by Optical Coherence Tomography. *JACC: Cardiovascular Interventions*, **16**, 2125-2136. <https://doi.org/10.1016/j.jcin.2023.06.016>
- [17] Hemetsberger, R., Mankerious, N., Muntané-Carol, G., Temporal, J., Sulimov, D., Gaede, L., *et al.* (2024) In-Hospital Outcomes of Rotational Atherectomy in ST-Elevation Myocardial Infarction: Results from the Multicentre ROTA-STEMI Network. *Canadian Journal of Cardiology*, **40**, 1226-1233. <https://doi.org/10.1016/j.cjca.2023.12.018>
- [18] Brinton, T.J., Ali, Z.A., Hill, J.M., Meredith, I.T., Machara, A., Illindala, U., *et al.* (2019) Feasibility of Shockwave Coronary Intravascular Lithotripsy for the Treatment of Calcified Coronary Stenoses. *Circulation*, **139**, 834-836. <https://doi.org/10.1161/circulationaha.118.036531>
- [19] Ali, Z.A., Nef, H., Escaned, J., Werner, N., Banning, A.P., Hill, J.M., *et al.* (2019) Safety and Effectiveness of Coronary Intravascular Lithotripsy for Treatment of Severely Calcified Coronary Stenoses: The Disrupt CAD II Study. *Circulation: Cardiovascular Interventions*, **12**, e8434. <https://doi.org/10.1161/circinterventions.119.008434>
- [20] Kereiakes, D.J., Virmani, R., Hokama, J.Y., Illindala, U., Mena-Hurtado, C., Holden, A., *et al.* (2021) Principles of Intravascular Lithotripsy for Calcific Plaque Modification. *JACC: Cardiovascular Interventions*, **14**, 1275-1292. <https://doi.org/10.1016/j.jcin.2021.03.036>
- [21] Deng, X., Hu, Y., Fu, G., Ma, G., Liu, X., Shi, B., *et al.* (2025) A Novel Intravascular Lithotripsy System in Severely Calcified Coronary Lesions: The Prospective Coronary Calcified Lesion Lithotripsy Procedure (COCALP) Study. *Med-Comm*, **6**, e70208. <https://doi.org/10.1002/mco2.70208>
- [22] Oliveri, F., van Oort, M.J.H., Al Amri, I., Bingen, B.O., Claessen, B.E., Dimitriu-Leen, A.C., *et al.* (2024) Intravascular Lithotripsy in Heavily Calcified Chronic Total Occlusion: Procedural and One-Year Clinical Outcomes. *Catheterization and Cardiovascular Interventions*, **104**, 655-663. <https://doi.org/10.1002/ccd.31207>
- [23] 血管内超声在冠状动脉疾病中应用的中国专家共识专家组. 血管内超声在冠状动脉疾病中应用的中国专家共识(2018)[J]. 中华心血管病杂志, 2018, 46(5): 344-351.
- [24] Fischman, D.L. and Vishnevsky, A. (2021) Management of Iatrogenic Coronary Artery Dissections: Failing to Prepare Is Preparing to Fail. *JACC: Case Reports*, **3**, 385-387. <https://doi.org/10.1016/j.jaccas.2021.01.023>
- [25] Hussain, B., Bhavsar, D. and Dhulipala, V. (2022) Coronary Artery Intramural Hematoma, a Rare Complication of Percutaneous Coronary Intervention. *Radiology Case Reports*, **17**, 3770-3773. <https://doi.org/10.1016/j.radcr.2022.07.001>
- [26] Saito, Y., Kobayashi, Y., Fujii, K., Sonoda, S., Tsujita, K., Hibi, K., *et al.* (2025) CVIT 2025 Clinical Expert Consensus Document on Intravascular Ultrasound. *Cardiovascular Intervention and Therapeutics*, **40**, 211-225. <https://doi.org/10.1007/s12928-025-01090-0>
- [27] Jurado-Román, A., García-Tejada, J., Hernández-Hernández, F., Granda-Nistal, C., Velázquez-Martín, M.T., González-Trevilla, A.A., *et al.* (2015) Coronary Artery Perforation: Don't Rush, IVUS May Be Useful. *Revista Portuguesa de Cardiologia*, **34**, 623.e1-623.e3. <https://doi.org/10.1016/j.repc.2015.03.018>
- [28] Velarde-Acosta, K., Moscoso Ramirez, J.Y., Rojas, P. and Baltodano-Arellano, R. (2024) Acute Left Anterior Descending Artery Occlusion after IVUS Leading to Urgent Percutaneous Coronary Intervention Complicated with Coronary Perforation: Case Report. *JRSM Cardiovascular Disease*, **13**, Article ID: 208618852. <https://doi.org/10.1177/20480040241248924>
- [29] Min, H.S., Ryu, D., Kang, S., Lee, J., Yoo, J.H., Cho, H., *et al.* (2021) Prediction of Coronary Stent Underexpansion by Pre-Procedural Intravascular Ultrasound-Based Deep Learning. *JACC: Cardiovascular Interventions*, **14**, 1021-1029. <https://doi.org/10.1016/j.jcin.2021.01.033>
- [30] Gao, X., Ge, Z., Kong, X., Kan, J., Han, L., Lu, S., *et al.* (2021) 3-Year Outcomes of the ULTIMATE Trial Comparing Intravascular Ultrasound versus Angiography-Guided Drug-Eluting Stent Implantation. *JACC: Cardiovascular Interventions*, **14**, 247-257. <https://doi.org/10.1016/j.jcin.2020.10.001>
- [31] Xu, A., Wang, D., Chen, B., Song, S., Zhang, Q., Zhu, Z., *et al.* (2024) Efficacy of IVUS-Guided Stent Implantation in Patients with Complex CAD: A Meta-Analysis Based on RCTs. *Frontiers in Cardiovascular Medicine*, **11**, Article 1446014. <https://doi.org/10.3389/fcvm.2024.1446014>
- [32] Neleman, T., Liu, S., Tovar Forero, M.N., Hartman, E.M.J., Ligthart, J.M.R., Witberg, K.T., *et al.* (2021) The Prognostic Value of a Validated and Automated Intravascular Ultrasound-Derived Calcium Score. *Journal of Cardiovascular Translational Research*, **14**, 992-1000. <https://doi.org/10.1007/s12265-021-10103-1>
- [33] 刘豪, 刘新锋, 关玲霞. 血管内超声指导下介入治疗老年冠脉重度钙化病变的价值[J]. 中国医学工程, 2022, 30(12): 114-117.
- [34] Shinohara, H., Kodera, S., Ninomiya, K., Nakamoto, M., Katsushika, S., Saito, A., *et al.* (2021) Automatic Detection of Vessel Structure by Deep Learning Using Intravascular Ultrasound Images of the Coronary Arteries. *PLOS ONE*, **16**, e0255577. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0255577>