

·综述 General review·

旋磨术辅助冠状动脉介入治疗的研究进展

朱晨迎, 叶 萍, 岳 斌, 季晓飞, 常兆华

【摘要】 使用常规介入治疗严重的钙化病变血管不仅增加经皮冠状动脉介入治疗(PCI)的难度,也使手术并发症的发生率明显升高。旋磨系统可通过修饰斑块从而为球囊扩张和支架植入创造良好的条件。目前旋磨术系统包括冠状动脉内旋磨术(rotational atherectomy, RA)、轨道旋磨术(orbital atherectomy, OA)和准分子激光冠状动脉粥样硬化切除术(excimer laser coronary atherectomy, ELCA)。本文对旋磨术的机制、设备的基本结构原理、临床应用和并发症进行了总结,最后对旋磨术治疗中的一些应用和对旋磨装置的未来发展进行了展望。

【关键词】 冠状动脉钙化;旋磨术;设备;临床应用

中图分类号:R541.4 文献标志码:A 文章编号:1008-794X(2021)-01-0097-06

Research progress in atherectomy-assisted percutaneous coronary intervention ZHU Chenying, YE Ping, YUE Bin, JI Xiaofei, CHANG Zhaohua. School of Medical Instrument and Food Engineering, University of Shanghai for Science and Technology, Shanghai 200093, China

Corresponding author: CHANG Zhaohua, E-mail: m8090313@126.com

【Abstract】 For the treatment of heavily calcified coronary arteries, conventional interventional treatment method not only increases the difficulty of percutaneous coronary intervention (PCI) manipulation, but also significantly increases the incidence of surgical complications. Through modifying the sclerotic plaques, the atherectomy system can create ideal conditions favorable for the performance of balloon expansion and stent implantation. At present, atherectomy systems include rotational atherectomy (RA), orbital atherectomy (OA), and excimer laser coronary atherectomy (ELCA). This article aims to make a detailed summary concerning the mechanism, basic structural principles of equipment, clinical applications, and complications of atherectomy devices. In addition, some therapeutic applications of atherectomy and the prospect of future development of atherectomy devices are discussed. (J Intervent Radiol, 2021, 30: 97-102)

【Key words】 coronary artery calcification; atherectomy; equipment; clinical application

冠状动脉钙化(coronary artery calcification, CAC)是冠状动脉粥样硬化斑块发展而来,内膜钙化是冠状动脉钙化的主要类型^[1],严重的内膜钙化可能会增加术后支架内血栓和穿孔的风险而增加 PCI 的难度。血管内超声(intravascular ultrasound, IVUS)和光学相干断层显像(optical coherence tomography, OCT)是两种辅助诊断冠状动脉钙化病变的血管内成像方法,OCT 的分辨率优于 IVUS,但是其组织穿透力较差,目前诊断 CAC 的主要方法为 IVUS,对于 IVUS 检查结果 > 270° 范围的内膜钙化,可直接选择

旋磨术。旋磨术利用机械或激光消融作用,打磨修饰钙化病变产生一个相对光滑的管腔^[2],有效改善血管的顺应性,从而使球囊容易通过及扩张,支架植入时有助于支架膨胀与贴壁,降低支架再狭窄(ISR)的发生率,极大提高了冠状动脉内钙化病变 PCI 的手术成功率,降低支架内血栓的风险^[3]。轨道旋磨术(OA)系统和冠状动脉内旋磨术(RA)系统在严重钙化的冠状动脉病变中有相似的近期效果(死亡率、心肌梗死、急性肾损伤和/或脑卒中等住院结果方面没有差异)和手术成功率^[4]。此外,美国 Shockwave

DOI:10.3969/j.issn.1008-794X.2021.01.023

作者单位: 200093 上海理工大学医疗器械与食品学院(朱晨迎、叶 萍、常兆华);上海微创医疗器械(集团)有限公司(岳 斌、季晓飞)

通信作者: 常兆华 E-mail: m8090313@126.com

Medical 公司结合超声碎石与球囊血管成形技术,开发了血管碎石(lithoplasty)系统,通过利用声波治疗钙化动脉疾病。该系统的临床研究 DISRUPT CAD 已经进入第 3 阶段,已发布的结果表明该系统可减小对血管的损伤,治疗冠状动脉钙化和外周动脉钙化有较好的效果和安全性^[5]。本文主要从机制、并发症、适应证、设备及临床研究进展等方面简介不同的旋磨术系统。

1 旋磨设备及其临床应用

1.1 RA 系统

RA 系统在 20 世纪 80 年代初由波士顿科学公司的 David C Auth 等进行研制及开发,并在 1988 年 Fourier 等完成了首例 RA 实验。第一代 RA 系统(Rotablator™)主要由控制台、脚踏板、气源、推进器、椭圆形旋磨头(图 1①)、导引导丝 RotaWire(RW 0.009 英寸/0.014 英寸)和 Rotaglide™ 润滑剂等组成(图 1②)。利用差异切割和垂直移动摩擦两个原理,选择性地切割较坚硬的钙化病变而不损伤正常血

管组织,磨头在高速旋转期间始终保持纵向移动^[2],RA 系统的旋磨头尺寸为 1.25~2.5 mm 范围内多种规格,治疗不同直径的血管堵塞时需要根据不同情况更换旋磨头尺寸。操作过程中旋磨头的旋转速度可达到 140 000~190 000 r/min,椭圆形的镀镍黄铜旋磨头前端有 2 000 到 3 000 个金刚石颗粒,金刚石颗粒直径尺寸为 20~30 μm ^[6]。

新一代 RA 系统(ROTAPRO™)在原有系统上进行改进,主要优点是简化操作程序,一方面取消脚踏板,且用于切换到 Dynaglide 模式的脚踏板的小旋扭被推进器上端的按钮取代,另一方面控制台小型化,设置时间更简便(图 1③)^[7-8];Oscar 等^[7]在波兰首次使用 ROTAPRO™ 治疗重度钙化病变。相比于上一代 RA 系统,ROTAPRO™ 系统操作友好,同时使学习曲线变平,可能会鼓励更多介入心脏病学家愿意进行旋磨术治疗。但是新一代系统的改进主要在脚踏板方面,虽然简化了一部分操作,但是在使用过程中旋磨头的更换问题和导丝操作方面仍值得关注。



①Rotablator™ 旋磨头;② Rotablator™ 脚踏板、控制台、推进器(从左到右);③ROTAPRO™ 系统

图 1 波士顿科学两代旋磨系统设备图

使用 RA 系统的适应证、禁忌证和并发症在表 1 中列出^[3,9],其中并发症会导致 ISR、支架内血栓形成、心肌梗死和死亡等不良事件发生率的增加^[10]。Azzalini 等^[11]探讨 RA 系统治疗慢性完全闭塞病变(chronic total occlusion,CTO)的远期疗效,RA 系统与常规 PCI 相比手术成功率(77% 比 89%)虽然较低,但长期随访结果显示 RA 系统和常规 PCI 组之间的主要心血管不良事件(major adverse cardiovascular events,MACE)发生率没有较大差异(15% 比 13%)。Zhang 等^[12]报道 587 例 CTO 患者中 26 例采用 RA 系统的治疗结果,手术成功率为 97.2%且围手术期未观察到 MACE 发生。应用小直径(<1.5 mm)旋磨

头冠脉旋磨术联合药物洗脱支架(drug-eluting stent, DES)治疗冠脉重度钙化病变血管造影成功率(100%)及手术成功率(91.7%)高,并发症发生率低,近期疗效满意^[13]。随着 DES 的发展,RA 系统作为斑块修饰的辅助疗法可以改善斑块的顺应性,方便支架的递送和扩张从而改善预后。

虽然 RA 系统较普通 PCI 在治疗严重的钙化病变有很好的即时效果,但也存在一些不容忽视的问题,有研究表明降低动脉粥样硬化斑块清除率的主要原因在于使用时间较长后旋磨头上有较为严重的粘结^[14]。若手术过程中需要更换旋磨头,操作者需要根据经验在合适的时机更换旋磨头避免并发

表 1 RA 的适应证、禁忌证以及并发症

适应证	禁忌证	并发症
血管内膜严重钙化 的病变、球囊无法通 过或无法充分扩张 的病变、冠状动脉开 口病变、选择性的弥 漫性支架内再狭窄 的病变、慢性完全闭 塞、无保护左主干狭 窄病变等	血栓、或溃疡性冠状动 脉病变、隐静脉桥病变、 严重的成角病变($>60^\circ$)、 有明显内膜撕裂的病 变、导丝不能通过的慢 性完全闭塞病变、严重 螺旋性夹层、弥漫性病 变,长度 >25 mm、严重 左心功能降低者等	冠状动脉痉挛、血 液慢血流/无复 流、心动过缓、血 管夹层、动脉穿孔 或破裂或旋磨设 备的损坏(旋磨头 嵌顿、导丝断裂、 磨头脱载)等

症的发生。由于 RA 系统操作时旋磨头与斑块持续接触,摩擦产生的热量会导致热损伤和血小板活化。热损伤可增加围手术期心肌梗死的风险,血液温度升高会引起血细胞团聚形成血栓。旋磨过程中磨削力过大是导致血管夹层、痉挛和动脉穿孔等并发症的直接原因^[15]。操作过程中建议速度为 135 000~180 000 r/min^[16],速度超过 180 000 r/min 可能会引发血栓和激活血小板等并发症,Kenichi 等^[17]观察导丝在最大速度下会发生旋转,旋转可能会引起导丝螺旋段解旋引发血管穿孔,速度过低虽然会降低温度,但会使碎片的粒径增大导致远处栓塞^[18]。严重减速会增加右冠状动脉开口病变损伤率,还存在发生旋磨头嵌顿和血管穿孔等并发症的可能性。操作过程中 RA 速度减少应该小于 5 000 r/min^[19]。旋磨

头嵌顿与病变类型和操作有较大关系,穿过长段、成角病变或严重钙化病变时容易发生磨头嵌顿,采取分段推进的方法可有效减小该并发症的发生。导丝断裂(穿孔)较为少见,但导丝打结、解旋伸长^[20]和导丝在最大速度下旋转都曾有报道^[17]。Warisawa 等^[20]报道 1 例使用 RA 系统治疗严重钙化病变,RW 导丝在 220 000 r/min 下多次运行时出现远端打结,当撤出时 RW 导丝时导丝明显伸长,通过对微导管的逐步推进和轻柔旋转 RW 导丝等操作使 RW 成功撤回。

1.2 轨道旋磨术 OA 系统

OA 系统最初用于外周血管钙化疾病取得良好效果,2013 年开始用于冠状动脉钙化治疗。OA 系统代表装置为 DIAMONDBACK 360[®]冠状动脉粥样硬化切除系统,该装置采用电机驱动,不需要脚踏板和气源来启动设备且操作手柄可以控制旋磨头在血管内的位置(图 2①),采用直径为 1.25 mm 标准旋磨头,导丝(ViperWire[®])直径为 0.012/0.014 英寸,金刚石涂层磨头偏心安装在导引导丝上高速旋转(图 2②),速度在 80 000~120 000 r/min,结合离心力和差异切割来消除钙化病变,可以通过控制台的按钮控制低高速的转换从而实现对不同直径血管病变的旋磨,在不更换磨头的情况下仅使用 6 F 的导管也可以实现对不同直径血管的病变消除,相比 RA 系统速度设置更快也更容易操作^[6, 21]。

图 2 DIAMONDBACK 360[®]系统

ORBIT I^[21]和 ORBIT II^[22]两次关键性试验评估 OA 系统用于治疗再狭窄严重钙化病变后再植入支架后的安全性和有效性。ORBIT I 试验治疗重新严重钙化病变,在入选的 50 例患者中,使用 OA 系统治疗后植入 DES,手术成功率为 94%,住院期间、30 d 和 6 个月的累积 MACE 率分别为 4%、6%和 8%,但是该实验样本数较少,存在一定局限。ORBIT II 是一项更大的试验,手术成功率和支架植入成功率分别为 88.9%和 97.7%,住院期间和 30 d

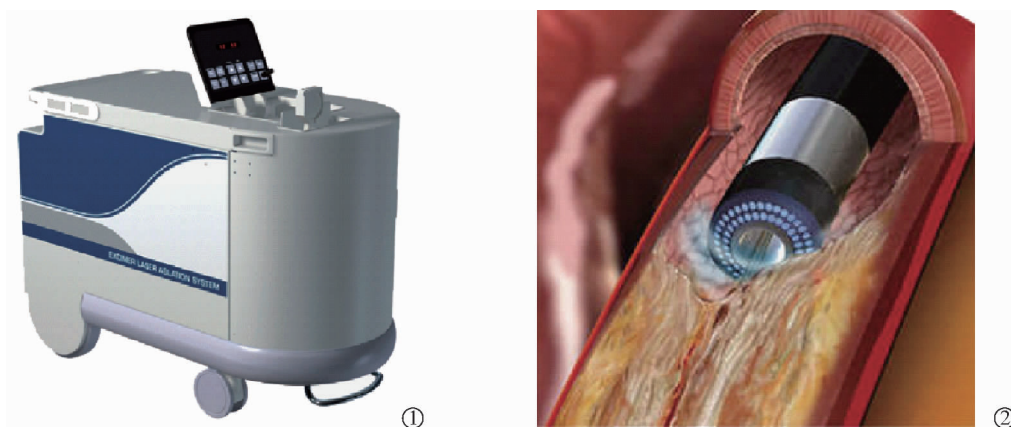
的累积 MACE 率分别为 9.8%和 10.4%^[22]。ORBIT II 的 1 年随访结果显示 MACE 率为 16.4%,靶血管血运重建(target vessel revascularization, TVR)率为 4.7%^[23]。经济学分析显示使用 OA 系统治疗 1 年后具有较好的成本效益。住院期间使用 OA 系统比球囊血管成形术的标准治疗费用平均少 1702 美元,且死亡率降低^[24]。Lee 等^[25]评估了 OA 系统在真实世界中治疗严重 CAC 患者的安全性和有效性,30 d MACE 率为 1.7%。血管造影和手术成功率高,支架

植入成功率为 99.1%。ORBIT II 试验的欠缺之处在于缺少对照组,与历史对照组比较可能会使研究结果缺乏说服力。ECLIPSE 是目前正在进行的一项随机试验,该试验将登记约 2 000 例严重 CAC 患者,对照 OA 系统和传统血管成形术治疗严重 CAC 的疗效,主要终点为比较即刻最小支架面积和术后 1 年 TVF 率^[26]。

1.3 准分子激光冠状动脉粥样硬化切除术

20 世纪 80 年代激光被用于冠状动脉血管成形术的辅助治疗纳入介入心脏病学的治疗,CVX-300 准分子激光系统是唯—被 PMA 批准用于治疗外周

及冠状动脉血管疾病的冠状动脉应用激光系统(图 3①),导管(图 3②)可兼容 0.014 英寸导丝,尖端可采用同心或偏心设计^[27]。采用氙气(XeCl)气体作为介质,通过光纤传输波长为 308 nm 的紫外光能量。作用机制是光化学,光机械或光热相互作用。由于准分子激光穿透深度较低,在较短的相互作用时间(脉冲)内可以获得较高的能量,这使化学键只在激光接触的组织中断裂,而不会破坏周围的组织或增加热量^[28]。ELCA 除了无保护主干病变及缺少知情同意等相对禁忌证外没有绝对的禁忌证^[29]。



①CVX-300 准分子激光系统;②ELCA 导管

图 3 准分子激光旋磨术设备

Goldman 在 1962 年报道了激光的首个医学应用,并于 1963 年用于动脉粥样硬化斑块的实验性消融,且第一次临床应用是在 1983 年由 Choy 和 Ginsburg 完成的。Nakabayashi 等^[27]报道可使用 ELCA 系统简化治疗复杂钙化病变的 PCI 程序,包括侧支病变、急性冠脉综合征(acute coronary syndrome,ACS)、支架扩张不足、ISR、血栓等。Mohandes 等^[30]报道 6 例使用 ELCA 系统辅助治疗 CTO 和功能性闭塞患者,手术成功率为 83.3%。Nishino 等^[31]使用多中心注册表(ULTRAMAN)来分析 DES 时代在日本使用 ELCA 系统治疗各种冠状动脉疾病后的临床经验和结果,328 例患者中主要病变类型为 ACS(53.4%)和 ISR(32.3%),使用 ELCA 系统治疗 ACS 和 ISR 的成功率分别为 92.5%和 91.5%。使用 ELCA 系统和药物洗脱球囊(DEB)成形术治疗 80 例 ISR,结果显示 91%的患者在临床和血管造影方面取得了长期的成功。心肌梗死和死亡的发生率低于支架内普通球囊血管成形术后的发生率^[32]。Ichimoto 等^[33]研究表明使用 ELCA 系统治疗 DES 后 ISR 与常规 PCI 相比,

前者管腔增大程度明显大于后者 $[(1.64 \pm 0.48) \text{ mm}$ 比 $(1.26 \pm 0.42) \text{ mm}$, $P < 0.001$)。

1.4 不同旋磨术的比较与展望

关于 OA 系统与 RA 系统的治疗结果对比研究,Xenogiannis 等^[34]和 Aggarwal 等^[35]均报道了使用 OA 系统和 RA 系统分别治疗 CTO 等钙化病变,结果显示 OA 系统和 RA 系统的手术成功率以及总体 MACE 率相似,在促进冠状动脉钙化 PCI 方面两者有相似的安全性和有效性。在并发症方面,OA 系统与 RA 系统相比有以下优势:钙化组织旋磨产生的磨屑堵塞毛细血管是引发血液慢血流/无复流和痉挛等并发症的主要原因。RA 系统的磨屑平均颗粒大小为 $5 \mu\text{m}$,颗粒以团状方式释放,OA 磨头处于间断接触状态,连续释放 $2 \mu\text{m}$ 颗粒,使用 OA 系统的远端栓塞与慢/无血流量较少^[36-37]。与 RA 系统相比,OA 系统运转轨道为椭圆形则允许血液和微小碎屑流经旋磨头,从而不断地分散颗粒,冷却旋磨头,理论上降低目标血管热损伤和缓慢回流的风险^[21, 38]。OA 系统是双向运转的,降低了血管夹层的风险^[6]。OCT 扫

描结果显示,相比于 RA 系统,OA 系统治疗明显具有更长的切口和更深的解剖,同时 OA 系统治疗后支架支撑贴壁不良的百分比比较低以及支架扩张较好^[39]。

ELCA 系统相比 OA 和 RA 系统的关键优势在于,RA 系统和 OA 系统需要专用的旋磨导丝,ELCA 系统可以在标准 0.014 英寸导丝上递送。ELCA 系统与前两者的作用机制不同,若在严重钙化病变出现旋磨导丝无法通过病变时可先行 ELCA,为后续旋磨术创造条件。另外,准分子激光具有独特的抑制血小板聚集的作用^[40]。

综上,对于血液慢血流和局部温度过高等并发症,旋磨设备的旋磨头采用偏心设计理论上可以有效降低该并发症的发生,但技术问题值得考虑,且旋磨头的成本问题较为突出,价格较低的旋磨头有更大的需求。更为理想的旋磨操作系统,其导管应能与目前临床常用的标准导引导丝(直径为 0.014 英寸)兼容,导管在旋磨过程中高速旋转,保持导管与导丝的完整性成为考虑的重点问题,包括操作过程中保持导丝不断裂和两者的表面涂层完整性等,针对此问题,在结构设计方面,导管的扭矩需要使其达到必要的使用速度且柔性必须满足通过不同形态的血管的需求。另一方面,选择在血液环境中摩擦力较小、耐高温和生物相容性较好的材料作为涂层,例如聚四氟乙烯和聚酰亚胺等,提高涂层的牢固性与基体的粘合性也可以减小操作过程中两者产生的摩擦。

2 结语

冠状动脉斑块旋磨术是治疗严重钙化病变的主要术式,虽然目前的临床研究说明旋磨术对严重钙化病变或是复杂病变的治疗具有较好的安全性和有效性,但是减少并发症的发生还需设备开发人员和操作者的共同努力,成本低、操作简便、适用性广的旋磨术设备可以实现对更多患者的治疗。

【参考文献】

- [1] Hiroyoshi M, Sho T, Matthew K, et al. Coronary artery calcification and its progression; what does it really mean? [J]. JACC Cardiovasc Imaging, 2018, 11: 127-142.
- [2] Tomey MI, Kini AS, Sharma SK. Current status of rotational atherectomy [J]. JACC Cardiovasc Imaging, 2014, 7: 345-353.
- [3] 葛均波,王伟民,霍勇. 冠状动脉内旋磨术中国专家共识 [J]. 中国介入性心脏病学杂志, 2017, 25: 61-66.
- [4] Koifman E, Garcia-Garcia HM, Kuku KO, et al. Comparison of the efficacy and safety of orbital and rotational atherectomy in calcified narrowings in patients who underwent percutaneous coronary intervention [J]. Am J Cardiol, 2018, 121: 934-939.
- [5] Brodmann M, Werner M, Brinton TJ, et al. Safety and performance of lithoplasty for treatment of calcified peripheral artery lesions [J]. J Am Coll Cardiol, 2017, 70: 908-910.
- [6] Lee MS, Park KW, Shlofmitz E, et al. Comparison of rotational atherectomy versus orbital atherectomy for the treatment of heavily calcified coronary plaques [J]. Am J Cardiol, 2017, 119: 1320-1323.
- [7] Oscar R, Wojciech Z, Piotr K, et al. Complex case of rotational atherectomy with the new RotaPro system in a heavily calcified coronary artery [J]. Kardiol Pol, 2019, 77: 980-981.
- [8] Barbato E, Shlofmitz E, Milas A, et al. State of the art: evolving concepts in the treatment of heavily calcified and undilatable coronary stenoses - from debulking to plaque modification, a 40-year-long journey [J]. EuroIntervention, 2017, 13: 696-705.
- [9] Fourrier JL, Bertrand ME, Auth DC, et al. Percutaneous coronary rotational angioplasty in humans: preliminary report [J]. J Am Coll Cardiol, 1989, 14: 1278-1282.
- [10] Genereux P, Redfors B, Witzensbichler B, et al. Two-year outcomes after percutaneous coronary intervention of calcified lesions with drug-eluting stents [J]. Int J Cardiol, 2017, 231: 61-67.
- [11] Azzalini L, Dautov R, Ojeda S, et al. Long-term outcomes of rotational atherectomy for the percutaneous treatment of chronic total occlusions [J]. Catheter Cardiovasc Interv, 2017, 89: 820-828.
- [12] Zhang B, Wang F, Tan JWC, et al. The application of rotational atherectomy in PCI of coronary chronic total occlusions [J]. ASEAN Heart J, 2016, 24: 1-4.
- [13] 吴志勇,关瑞锦,陈诗泉,等. 应用小直径旋磨头联合药物洗脱支架治疗冠状动脉重度钙化病变的疗效 [J]. 介入放射学杂志, 2014, 23: 198-202.
- [14] Gronostajski Z, Kaszuba M, Zimoch W, et al. Degradation mechanisms of the burrs in rotablation [J]. Arch Civ Mech Eng, 2019, 19: 1381-1389.
- [15] Zheng YH, Liu Y, Liu Y, et al. Experimental investigation of the grinding force in rotational atherectomy [J]. Procedia Manuf, 2016, 5: 838-848.
- [16] Emanuele B, Didier C, Petros D, et al. European expert consensus on rotational atherectomy [J]. EuroIntervention, 2015, 11: 30-36.
- [17] Kenichi S, Shin - Ichi M, Hideo F. The RotaWire may be spinning in rotational atherectomy under the maximum rotational speed [J]. Cardiovasc Interv Ther, 2019, 34: 182-183.
- [18] Liu Y, Liu Y, Zheng Y, et al. Catheter thermal energy generation and temperature in rotational atherectomy [J]. Med Eng Phys, 2019, 70: 29-38.
- [19] Sakakura K, Taniguchi Y, Yamamoto K, et al. Association of excessive speed reduction with clinical factors during rotational atherectomy [J]. Cardiovasc Revasc Med, 2020, 21: 314-319.
- [20] Warisawa T, Cook CM, Doi S, et al. RotaWire fracturing due to

- spinning under the maximum rotational speed[J]. *Cardiovasc Interv Ther*, 2019, 34: 373-374.
- [21] Parikh K, Chandra P, Choksi N, et al. Safety and feasibility of orbital atherectomy for the treatment of calcified coronary lesions: the ORBIT I trial[J]. *Catheter Cardiovasc Interv*, 2013, 81: 1134-1139.
- [22] Chambers JW, Feldman RL, Himmelstein SI, et al. Pivotal trial to evaluate the safety and efficacy of the orbital atherectomy system in treating de novo, severely calcified coronary lesions (ORBIT II)[J]. *JACC Cardiovasc Interv*, 2014, 7: 510-518.
- [23] Genereux P, Lee AC, Kim CY, et al. Orbital atherectomy for treating de novo severely calcified coronary narrowing(1-year results from the pivotal ORBIT II trial)[J]. *Am J Cardiol*, 2015, 115: 1685-1690.
- [24] Garrison LP, Zimmermann MR, Young CH, et al. Cost-effectiveness analysis of the orbital atherectomy system: two-year follow-up[J]. *Cardiovasc Revasc Med*, 2017, 18: 86-90.
- [25] Lee MS, Shlofmitz E, Kaplan B, et al. Real-world multicenter registry of patients with severe coronary artery calcification undergoing orbital atherectomy[J]. *J Interv Cardiol*, 2016, 29: 357-362.
- [26] Shlofmitz E, Martinsen BJ, Lee M, et al. Orbital atherectomy for the treatment of severely calcified coronary lesions: evidence, technique, and best practices[J]. *Expert Rev Med Devices*, 2017, 14: 867-879.
- [27] Nakabayashi K, Sunaga D, Kaneko N, et al. Simple percutaneous coronary interventions using the modification of complex coronary lesion with excimer laser[J]. *Cardiovasc Revasc Med*, 2019, 20: 293-302.
- [28] Akkus NI, Abdulkaki A, Jimenez E, et al. Atherectomy devices: technology update[J]. *Med Devices (Auckl)*, 2015, 8: 1-10.
- [29] Rawlins J, Din JN, Talwar S, et al. Coronary intervention with the excimer laser: review of the technology and outcome data[J]. *Interv Cardiol*, 2016, 11: 27-32.
- [30] Mohandes M, Rojas S, Moreno C, et al. Excimer laser in percutaneous coronary intervention of device uncrossable chronic total and functional occlusions[J]. *Cardiovasc Revasc Med*, 2020, 21: 657-660.
- [31] Nishino M, Mori N, Takiuchi S, et al. Indications and outcomes of excimer laser coronary atherectomy: efficacy and safety for thrombotic lesions-the ULTRAMAN registry[J]. *J Cardiol*, 2017, 69: 314-319.
- [32] Ambrosini V, Golino L, Niccoli G, et al. The combined use of drug-eluting balloon and excimer laser for coronary artery restenosis in-stent treatment: the DERIST study[J]. *Cardiovasc Revasc Med*, 2017, 18: 165-168.
- [33] Ichimoto E, Kadohira T, Nakayama T, et al. Long-term clinical outcomes after treatment with excimer laser coronary atherectomy for in-stent restenosis of drug-eluting stent[J]. *Int Heart J*, 2018, 59: 14-20.
- [34] Xenogiannis I, Karpaliotis D, Alaswad K, et al. Usefulness of atherectomy in chronic total occlusion interventions (from the PROGRESS-CTO registry)[J]. *Am J Cardiol*, 2019, 123: 1422-1428.
- [35] Aggarwal D, Seth M, Perdoncin E, et al. TCT-25 comparative safety and effectiveness of orbital and rotational atherectomy in patients undergoing percutaneous coronary intervention: insights from the Blue Cross Blue Shield of Michigan Cardiovascular Consortium(BMC2)[J]. *J Am Coll Cardiol*, 2019, 74(13 Suppl): B25.
- [36] Sakakura K, Funayama H, Taniguchi Y, et al. The incidence of slow flow after rotational atherectomy of calcified coronary arteries: a randomized study of low speed versus high speed[J]. *Catheter Cardiovasc Interv*, 2017, 89: 832-840.
- [37] Zheng Y, Belmont B, Shih AJ. Experimental investigation of the abrasive crown dynamics in orbital atherectomy[J]. *Med Eng Phys*, 2016, 38: 639-647.
- [38] Chambers JW, Diage T. Evaluation of the diamondback 360 coronary orbital atherectomy system for treating de novo, severely calcified lesions[J]. *Expert Rev Med Devices*, 2014, 11: 1-10.
- [39] Kini AS, Vengrenyuk Y, Pena J, et al. Optical coherence tomography assessment of the mechanistic effects of rotational and orbital atherectomy in severely calcified coronary lesions[J]. *Catheter Cardiovasc Interv*, 2015, 86: 1024-1032.
- [40] 徐英恺, 李拥军. 准分子激光在冠状动脉介入治疗中的应用进展[J]. *国际心血管病杂志*, 2018, 45: 196-199.

(收稿日期:2019-12-30)

(本文编辑:俞瑞纲)