

激光在泌尿系结石微创手术中的应用进展

王大伟¹ 吴忠^{2*}

(1 上海交通大学医学院附属瑞金医院泌尿外科,上海市 201801;2 复旦大学附属华山医院,上海市 200040)



吴忠,教授、主任医师、医学博士、博士生导师,复旦大学泌尿系结石诊疗研究中心主任、复旦大学附属华山医院泌尿外科行政副主任。长期致力于泌尿生殖系统肿瘤、泌尿系结石和前列腺增生症等疾病的微创手术治疗和新技术研究与应用,率先在国内开展以泌尿系腔内镜和激光为代表的微创技术治疗泌尿系结石、泌尿系统肿瘤和前列腺增生症等,尤其擅长应用机器人辅助腹腔镜(达芬奇机器人手术)、普通腹腔镜、输尿管软镜/硬镜、经皮肾镜以及激光等先进技术开展泌尿外科微创手术,积累了丰富的临床经验。先后主持国家自然科学基金、科技部“十三五”重大专项子课题、国家卫生健康委员会重点临床项目、上海市科学技术委员会重点基金等研究项目。主编、参编十余部泌尿外科学专著、教材及指南,发表SCI及国内权威核心期刊论著80余篇。获全球泌尿系结石领域最高奖之一——国际尿石症联盟(IAU)突出贡献奖,以及教育部科技进步二等奖、国家级发明专利、上海市医学会泌尿外科与男科“风云人物”奖等。主要社会任职:中华医学会泌尿外科学分会国际交流委员会副主任委员、中华医学会激光医学分会常委兼外科与妇产科学组组长、中国光学会激光医学分会常委、中国人体健康科技促进会泌尿系结石防治专委会常委、中华医学会泌尿外科学分会结石学组全国委员、中国医师协会泌尿外科医师分会结石学组全国委员、上海市医学会激光医学分会主任委员、上海市医学会泌尿外科学分会副主任委员兼结石学组组长、国际尿石症联盟委员、美国泌尿外科学协会会员、欧洲泌尿外科学协会会员、国际泌尿外科学协会会员、《中华泌尿外科杂志》常务编委,以及《中国微创外科杂志》《国际泌尿系统杂志》《上海医学》等杂志编委。

【提要】 泌尿系结石是我国最常见的泌尿外科疾病之一,发病率和复发率均较高。目前泌尿系结石微创手术常用的激光包括传统的钬激光、钬激光摩西技术和铥光纤激光等。该文就激光特别是钬激光和铥光纤激光在泌尿系结石微创手术治疗中的应用进展进行综述。

【关键词】 钬激光;铥光纤激光;泌尿系结石;应用进展

【文章编号】 1673-6575(2024)03-0228-04

DOI:10.11864/j.issn.1673.2024.03.02

泌尿系结石是我国最常见的泌尿外科疾病之一,近年来发病率逐年上升,且复发率高,占泌尿外科住院患者病因首位。近30年来,随着泌尿外科内窥镜和激光等微创技术的发展,以激光为代表的微创手术如输尿管硬镜/软镜碎石术、经皮肾镜碎石术等,不仅基本取代了以往传统的开放性手术,成为目前泌尿系结石微创手术治疗的主要方法和发展方向,而且具有创伤小、安全性好、疗效佳和恢复快等独特优势,在泌尿系结石微创手术治疗中占据不可替代的地位。由于激光技术发展迅速,目前泌尿系结石微创手术常用的激光包括传统的钬激光(又被称为“碎石之王”“碎石金标准”)、钬激光摩西技术和

铥光纤激光(thulium fiber laser, TFL)等。本文就激光特别是钬激光和TFL在泌尿系结石微创手术治疗中的进展简要综述如下。

1 钬激光

1.1 钬激光性能及参数 传统的钬激光是一种固态脉冲激光,波长2 100 nm,其能量能被水高效吸收,通过光声效应(微爆炸)和光热作用实现对泌尿系结石的高效碎石^[1]。钬激光是泌尿外科应用最早、最常用的碎石激光。钬激光于1992年在全球被首次报告应用于泌尿外科临床,目前已被广泛应用于泌尿系结石的微创手术治疗,并被认为是泌尿系结石激光碎石的“金标准”,有“碎石之王”的称号。钬激光能够

*通信作者

粉碎所有成分的泌尿系结石,包括最坚硬的一水草酸钙结石和胱氨酸结石等,其使用的光纤直径细且柔软,便于与内窥镜配合使用,且能够随软镜弯曲,特别适合用于肾脏结石甚至是肾下盏结石的碎石治疗^[2]。钬激光的功率(单位为瓦特,W)是脉冲能量(单位为焦耳,J)与脉冲频率(单位为赫兹,Hz)的乘积。脉冲能量指的是在一个激光脉冲中,钬激光光纤末端产生的光能,脉冲频率是指每秒在钬激光光纤末端产生的脉冲数量。最初,唯一可以调整的激光设置是脉冲能量和脉冲频率,随后,新的技术进步允许改变每个脉冲能量的传递方式,提出了脉冲调制概念。脉冲调制可以设置为短脉冲或长脉冲(快速或缓慢能量传递)。目前钬激光的脉冲能量范围为0.2~6.0 J,脉冲能量的高低直接影响碎石效果,脉冲能量越高,产生的结石碎块越大,因此高脉冲能量(1.5 J)多用于碎块化碎石。而低脉冲能量(0.2 J)通常用于粉末化碎石。然而,临床发现高脉冲能量可能导致激光光纤末端的快速消融、损耗和结石移位明显,从而影响碎石效率和手术时间^[3]。最新的钬激光设备能提供高达80 Hz的脉冲频率。若脉冲能量保持不变,提高脉冲频率可显著提高对结石的粉碎效率^[4]。此外,新一代的钬激光设备整合了脉冲宽度和脉冲调节这两项关键参数,这包括长脉冲或短脉冲选项以及常规脉冲模式或摩西模式的选择^[5]。脉冲宽度是指激光光纤末端产生的一个光脉冲的持续时间,用微秒(μs)表示,500~1 300 μs 的持续时间被定义为长脉冲;150~350 μs 的持续时间则被视为短脉冲^[6]。理论上,长脉冲能减少结石的移位并最小化激光光纤的耗损,碎石的颗粒细小,适合粉末化碎石。而短脉冲虽然可以提高结石的消融率和碎石效率,但碎石颗粒较大,且增加了结石的移位,适合于碎块化碎石^[3,7]。

1.2 钬激光碎石模式 经过多年的临床实践总结,目前钬激光碎石主要有3种模式,即碎块化碎石、粉末化碎石和“爆米花”样碎石。(1)碎块化碎石:将钬激光的能量参数设置为高能量(0.6~2.0 J)、低频率(4.0~6.0 Hz)、短脉宽参数,将尿路结石粉碎成4 mm以下的碎块,随后用取石网篮将这些较大的结石碎块从患者体内取出。碎石过程通常以0.6~1.0 J的能量开始,并根据结石的硬度调节,以确定最佳碎石能量参数^[8]。(2)粉末化碎石:将钬激光的能量参数设置为低能量(0.2~0.5 J)、高频率(15~60 Hz)、长脉宽^[9]。将尿路结石粉碎成2 mm以下的微小碎屑,术中无须使用取石网篮,而是让患者术后将结石碎末自行排出体外。复旦大学附属华山医院吴忠教授团队对1 157例行输尿管软镜钬激光碎石术的肾结石患者进行回顾性研究,结果表明,对于CT值<1 100 HU的

较软结石,推荐使用低能量、高频率参数(0.3~0.8 J, 20~40 Hz)或EMS激光长脉宽模式进行粉末化碎石,以确保碎石颗粒 ≤ 2 mm自行排出体外^[10]。此外,该团队还发现,对于CT值 ≥ 1 200 HU的肾结石,输尿管软镜钬激光技术采用联合碎石模式(粉末化+碎块化)的碎石效率更高^[11]。(3)“爆米花”样碎石:在治疗肾结石时,还可以使用一种被称为“爆米花”技术的方法^[12]。当较大的结石碎块被取出后,设置适中的能量(例如1 J)和频率(如10~15 Hz),可使剩余的结石碎块碎成更小的颗粒和粉末,提高碎石效率^[13]。此外,“爆米花”样碎石还可以检查碎石过程中隐藏在细小颗粒深面、可能未被发现的较大结石碎块^[14-15]。

1.3 钬激光摩西技术 钬激光摩西技术是一种改进的脉冲调制方式,其通过利用蒸汽通道更高效地传递激光能量至目标结石,从而提升碎石效率。此技术的关键创新包括摩西效应和爆破效应。摩西技术是一种“脉冲调节”技术,其通过双相脉冲而非传统的单相脉冲传递激光能量,显著提高了激光能量到达结石的传递效率及其粉碎效率^[2,7]。摩西技术应用于钬激光系统后,该系统在两个连续阶段产生脉冲能量:初期阶段产生蒸汽泡沫并在水中形成通道(即摩西效应),晚期阶段则通过这些蒸汽泡沫通道将剩余的脉冲能量直接传递至结石。这种受控的脉冲能量释放和传递方式将能量损失最小化。当启用摩西技术模式时,碎石过程中结石的位移显著减少,结石消融速度加快,碎石时间缩短。反之,若关闭摩西技术模式,则激光光纤的抖动幅度增大,结石位移增加,碎石效率降低。麦吉尔大学Elhilali团队的研究表明,摩西钬激光技术在加速结石消融和降低结石位移方面具有明显优势,碎石效率总体上超过传统的钬激光技术^[16]。

2 TFL

2.1 TFL性能及参数 TFL由半导体激光作为泵浦源,以掺铥离子光纤作为工作介质,发射波长为1 940 nm^[17]。与使用掺钕钇铝石榴石晶体作为工作介质的钪固体激光(Tm:YAG)不同,TFL主要用于泌尿系结石的碎石手术,还可用于软组织手术^[18]。TFL可以分为连续激光和脉冲激光两种模式。连续激光由于其产热特性,适用于软组织手术,但其碎石效率较低且存在热损伤的风险^[19]。相比之下,脉冲激光由于具有较高的峰值功率,能够显著提高碎石效率,同时减少热损伤^[4]。TFL和钬激光同属近红外光,但TFL的波长(1 940 nm)更接近水的吸收峰值,其吸收系数是钬激光(2 100 nm)的4~5倍^[1],使其在较低能量下即可实现与钬激光相同的结石消融效率,或在

相同能量下实现更高效的消融^[5]。TFL可以使用直径小至 50 μm 的光纤,而钬激光的最小光纤直径为 200 μm ,且 TFL 的脉冲频率可达 2 000 Hz,脉冲能量可低至 0.025 J^[5]。这种高频率、低能量设置使 TFL 能够适应更小的光纤直径,增加了激光能量密度,从而大大提高了碎石效率。此外,TFL 的穿透深度较浅(0.077 mm),对结石周围软组织的损伤更小,安全性更高^[20]。这些物理特性使 TFL 在碎石术中具有显著优势。

2.2 TFL 碎石机制 TFL 碎石的主要机制包括光热消融和微爆破^[21]。光热消融是指在碎石过程中,结石对红外辐射的直接吸收导致局部温度升高,热能积聚从而导致结石消融,这种特性对各种成分的结石均有效。微爆破则指激光辐射产生等离子体或圆形气泡,通过机械能或机械应力波的积聚导致结石脱落或直接破碎、裂解结石^[22]。脉冲 TFL(脉宽=20 μs)在水和空气中作用于湿性结石时均能高效碎石,而作用于干性结石时碎石效率降低。在空气中,脉冲 TFL 仅导致结石热消融,而在水中,除热消融外,还会产生机械裂纹^[4]。TFL 碎石过程中,光热消融和微爆破同时发生。在高功率 TFL(500 W)条件下,微爆破占主导地位,而在低功率 TFL(120 W)条件下,光热消融起主要作用^[4]。此外,TFL 碎石过程中还存在摩西效应,即脉冲 TFL 被水吸收产生蒸汽气泡,激光能量沿着气泡通道向前传递,激光束通过蒸汽气泡时衰减极少,从而极大地提升碎石效率^[23-24]。

2.3 TFL 用于碎石的优势 已有研究表明,TFL 碎石技术具有显著优势^[25]。首先,TFL 的波长位于水的吸收峰值附近,其水吸收系数是钬激光的 4 倍,提高了结石碎石速率并降低能量需求^[1]。铥光纤激光器采用的大模场增益光纤,可产生接近衍射极限的光束,通过 150 μm 、100 μm 甚至 50 μm 的超细光纤耦合传导^[23,26]。细光纤输出的激光能量产生的气泡和碎石颗粒更小,微蒸汽泡直径约为钬激光的 1/4,脉冲瞬时压力较小,对碎石的反推力较小,因此结石移动距离更短^[27]。其次,细光纤占用碎石通道体积小,可实现高流量灌注率,清除碎石粉末并带走热量,避免粉尘风暴,提高碎石能见度并防止热量积累损伤组织。TFL 可运行超过 2 000 Hz 的脉冲频率,是钬激光的 20 倍以上^[28]。铥光纤激光器采用直接风冷散热,而钬激光需要水冷系统。铥光纤激光器可产生近 1 000 W 的激光输出,远高于钬激光。此外,铥光纤激光器可设置更宽的脉冲,实现均匀脉冲能量,降低尖峰功率。与钬激光器不同,铥光纤激光器仅需单相供电,最大电流不超过 10 A,电气安全性更高^[20]。铥光纤激光器峰值功率低,光纤尖端退化少,设备连续使用寿命长,平均故障率低,零部件更新周期长,

后期维护成本低。这些优势使 TFL 在泌尿外科碎石术中展现出巨大潜力。

Traxer 等^[5]比较了钬激光和 TFL 在碎石中的应用情况,指出两者在激光束的基本设计上存在根本性差异:TFL 在水中的吸收系数是钬激光的 4 倍,相较于钬激光,TFL 操作激光的光纤更小(芯径 50~150 μm)、单脉冲能量更低(低至 0.025 J)、最大脉冲重复率更高(高达 2 000 Hz)。该研究还表明,TFL 的结石消融速度是钬激光的 1.5~4.0 倍^[5]。Chua 等^[29]对钬激光和 TFL 在内镜碎石术治疗泌尿系结石的临床效果进行了系统评价,结果显示,两者在总体结石清除率、并发症发生率、消融效率、激光总能量使用和住院时间方面差异无统计学意义,但 TFL 在手术时间、激光使用时间、结石消融速度和结石迁移方面均优于钬激光;同时作者也指出,目前关于钬激光和 TFL 应用效果比较的临床证据等级较低,需进一步研究以获取更高等级的证据。Tang 等^[30]通过 Meta 分析比较了 TFL 和钬激光在输尿管镜碎石术治疗泌尿系结石中的疗效和安全性,纳入了 13 项研究,共计 1 394 名患者。分析结果显示,两者对激光使用时间、住院时间、血红蛋白水平、总能量使用情况、术后输尿管支架留置率、术中并发症发生率及术后并发症发生率方面的影响差异无统计学意义,但 TFL 组的结石清除率更高、手术时间更短、结石迁移更少。

3 小 结

泌尿结石的高发病率、高复发率以及泌尿系内窥镜和激光设备的迅猛发展,大大促进了激光技术在泌尿系结石微创手术中的应用。钬激光和 TFL 是目前临床中最常用的泌尿系结石碎石激光。虽然钬激光仍然是泌尿系结石微创手术的“金标准”,尤其是钬激光摩西技术,其通过脉冲模式优化能量传递,实现了更精确的能量控制和更深的穿透力,有助于快速粉碎负荷大或质地坚硬的尿路结石,同时减少结石位移,提高碎石效率。但越来越多的研究表明,TFL 由于其独特的结构和物理性能使其能够实现更高的碎石效率和粉末化碎石效果,获得更小的结石移位以及更高的液体灌溉速率。同时,TFL 设备支持免水冷工作、高电光效率运转、全光纤高效耦合以及超细光纤传导等,这些特性均优于钬激光。未来,TFL 有取代钬激光之势,在泌尿系结石微创手术中发挥越来越重要的作用。

参 考 文 献

- [1] Terry RS, Ho DS, Scialabba DM, et al. Comparison of different pulse modulation modes for holmium: yttrium-aluminum-garnet laser lithotripsy ablation in a benchtop

- model[J]. *J Endourol*, 2022, 36(1): 29–37.
- [2] Pietropaolo A, Hughes T, Mani M, et al. Outcomes of ureteroscopy and laser stone fragmentation (URSL) for kidney stone disease (KSD): comparative cohort study using MOSES technology 60 W laser system versus regular holmium 20 W laser[J]. *J Clin Med*, 2021, 10(13): 2742.
- [3] Hardy LA, Vinnichenko V, Fried NM. High power holmium: YAG versus thulium fiber laser treatment of kidney stones in dusting mode: ablation rate and fragment size studies[J]. *Lasers Surg Med*, 2019, 51(6): 522–530.
- [4] Taratkin M, Laukhtina E, Singla N, et al. How lasers ablate stones: in vitro study of laser lithotripsy (Ho: YAG and Tm-fiber lasers) in different environments[J]. *J Endourol*, 2021, 35(6): 931–936.
- [5] Traxer O, Keller EX. Thulium fiber laser: the new player for kidney stone treatment? A comparison with Holmium: YAG laser[J]. *World J Urol*, 2020, 38(8): 1883–1894.
- [6] Noureldin YA, Kallidonis P, Liatsikos EN. Lasers for stone treatment: how safe are they? [J]. *Curr Opin Urol*, 2020, 30(2): 130–134.
- [7] Ballesta Martinez B, Peteinaris A, Tsaturyan A, et al. Stone ablation rates using innovative pulse modulation technology: Vapor tunnel, virtual basket, and bubble blast. An in vitro experimental study[J]. *Lasers Surg Med*, 2022, 54(4): 580–587.
- [8] Matlaga BR, Chew B, Eisner B, et al. Ureteroscopic laser lithotripsy: a review of dusting vs fragmentation with extraction[J]. *J Endourol*, 2018, 32(1): 1–6.
- [9] Weiss B, Shah O. Evaluation of dusting versus basketing—can new technologies improve stone-free rates? [J]. *Nat Rev Urol*, 2016, 13: 726–733.
- [10] 吴忠,高鹏,王路加,等. 输尿管软镜钬激光碎石术治疗肾脏结石的策略选择[J]. *中国激光医学杂志*, 2018, 27(2):108.
- [11] 吴忠,高鹏,王路加,等. 输尿管软镜钬激光碎石术治疗 CT 值 \geq 1200 HU 肾结石的碎石方式选择[J]. *中国激光医学杂志*, 2021, 30(1):26.
- [12] Aldoukhi AH, Roberts WW, Hall TL, et al. Holmium laser lithotripsy in the new stone age: dust or bust? [J]. *Front Surg*, 2017, 4: 57.
- [13] Aldoukhi AH, Roberts WW, Hall TL, et al. Understanding the popcorn effect during holmium laser lithotripsy for dusting[J]. *Urology*, 2018, 122: 52–57.
- [14] Klaver P, de Boorder T, Rem AI, et al. In vitro comparison of renal stone laser treatment using fragmentation and popcorn technique[J]. *Lasers Surg Med*, 2017, 49(7): 698–704.
- [15] Emiliani E, Talso M, Cho SY, et al. Optimal settings for the noncontact holmium: YAG stone fragmentation popcorn technique[J]. *J Urol*, 2017, 198(3): 702–706.
- [16] Martov AG, Ergakov DV, Guseynov M, et al. Clinical comparison of super pulse thulium fiber laser and high-power holmium laser for ureteral stone management [J]. *J Endourol*, 2021, 35(6): 795–800.
- [17] Fried NM, Irby PB. Advances in laser technology and fibre-optic delivery systems in lithotripsy[J]. *Nat Rev Urol*, 2018, 15(9): 563–573.
- [18] Aldoukhi AH, Roberts WW, Hall TL, et al. Watch your distance: the role of laser fiber working distance on fragmentation when altering pulse width or modulation [J]. *J Endourol*, 2019, 33(2): 120–126.
- [19] Pal D, Ghosh A, Sen R, et al. Continuous-wave and quasi-continuous wave thulium-doped all-fiber laser: implementation on kidney stone fragmentations[J]. *Appl Opt*, 2016, 55(23): 6151–6155.
- [20] Kronenberg P, Traxer O. The laser of the future: reality and expectations about the new thulium fiber laser—a systematic review[J]. *Transl Androl Urol*, 2019, 8(Suppl 4): S398–S417.
- [21] Fried NM. Recent advances in infrared laser lithotripsy [J]. *Biomed Opt Express*, 2018, 9(9): 4552–4568.
- [22] Keller EX, De Coninck V, Doizi S, et al. Thulium fiber laser: ready to dust all urinary stone composition types? [J]. *World J Urol*, 2021, 39(6): 1693–1698.
- [23] Hardy LA, Kennedy JD, Wilson CR, et al. Analysis of thulium fiber laser induced bubble dynamics for ablation of kidney stones[J]. *J Biophotonics*, 2017, 10(10): 1240–1249.
- [24] Ventimiglia E, Traxer O. What is Moses effect: a historical perspective[J]. *J Endourol*, 2019, 33(5): 353–357.
- [25] 阳优司,李丹,吉恩才,等. 掺铥光纤激光器及其碎石应用:进展与展望[J]. *激光与光电子学进展*, 2023, 60(15): 96–113.
- [26] 刘敏,高小峰. 铥光纤激光碎石基础研究和临床应用进展[J]. *中华泌尿外科杂志*, 2021, 42(1):75–78.
- [27] 胡卫国,李建兴. 泌尿系结石的激光治疗现状[J]. *临床外科杂志*, 2020, 28(2):183–185.
- [28] Schembri M, Sahu J, Aboumarzouk O, et al. Thulium fiber laser: The new kid on the block[J]. *Turk J Urol*, 2020, 46(Suppl. 1): S1–S10.
- [29] Chua ME, Bobrowski A, Ahmad I, et al. Thulium fibre laser vs holmium: yttrium-aluminium-garnet laser lithotripsy for urolithiasis: meta-analysis of clinical studies[J]. *BJU Int*, 2023, 131(4): 383–394.
- [30] Tang XY, Wu SJ, Li ZL, et al. Comparison of Thulium Fiber Laser versus Holmium laser in ureteroscopic lithotripsy: a Meta-analysis and systematic review[J]. *BMC Urol*, 2024, 24(1): 44.

(收稿日期:2024-03-01 修回日期:2024-05-20)