

激光在泌尿外科中的应用进展

王宇宁^{1,2} 周娟¹ 董志慧² 刘一洋² 张鹤^{1,2} 王忠^{1,2} (通讯作者)

1. 上海健康医学院附属浦东公利医院, 上海 200135

2. 上海理工大学, 上海理工大学公利医院医疗技术学院, 上海 200093

摘要: 上尿路结石与前列腺增生是泌尿外科的常见疾病, 上尿路结石常伴有肾盂积水、腰腹部胀痛等不适, 积水严重时诱发感染, 严重损伤肾功能; 前列腺增生常有尿频、尿急、尿痛伴排尿不畅。近年来, 泌尿系结石与前列腺增生的发病率逐年增高, 因激光具有良好的切割与爆破能力, 激光碎石与激光剜除是临床上常见的治疗手段, 选择合适的激光可以有效提高手术效率并降低术后并发症的发生率。本文通过检索归纳目前泌尿外科常见的医用激光在泌尿系结石与前列腺增生的应用进展进行系统的总结综述。

关键词: 泌尿系结石; 前列腺增生; 钬激光; 铥激光; 绿激光

The Development of Laser Applications in Urology

Wang Yuning^{1,2} Zhou Juan¹ Dong Zhihui² Liu Yiyang² Zhang He^{1,2} Wang Zhong^{1,2} (Corresponding author)

1. Pudong Gongli Hospital affiliated with Shanghai Health Medical College, Shanghai 200135

2. Shanghai University of Technology, School of Medical Technology, Shanghai University of Technology Gongli Hospital, Shanghai 200093

Abstract: Upper urinary tract calculi and benign prostatic hyperplasia are common diseases in urology. Upper urinary tract calculi often cause hydronephrosis, lumbar and abdominal distension pain, etc., and severe hydronephrosis can lead to infection and severely damage renal function. Benign prostatic hyperplasia usually presents with frequent urination, urgent urination, painful urination, and poor urination. In recent years, the incidence of urinary tract calculi and benign prostatic hyperplasia has been increasing year by year. Due to the excellent cutting and blasting capabilities of lasers, laser lithotripsy and laser enucleation are common treatment methods in clinical practice. Choosing the appropriate laser can effectively improve surgical efficiency and reduce the incidence of postoperative complications. This article summarizes and reviews the application progress of common medical lasers in urological calculi and benign prostatic hyperplasia through literature search.

Key words: Urinary calculi, Prostatic hyperplasia, Holmium laser, Thulium laser, Green laser

0 引言

上尿路结石与前列腺增生是泌尿外科的常见疾病, 上尿路结石临床表现为腰腹部酸胀, 常伴有恶心、呕吐以及无痛肉眼血尿, 若未能及时进行治疗, 可能会引起尿路梗阻, 感染诱发高热, 肾功能受损, 进而造成肾功能的永久性损伤, 最终导致无肾功能, 需要进行单纯性肾脏切除^[1], 据 Global Burden of Disease (GBD) 研究数据显示, 肾结石的发病率在全球范围内呈现逐年增长的趋势, 近十年全球泌尿系结石新发病例从 7.78 亿增至 11.56 亿, 增幅达 48.57%^[2]。前列腺增生好发于年长男

性, 常伴有尿频、尿急、尿痛以及排尿困难, 排尿受阻严重时会导致尿潴留。

自上世纪激光发明以来, 其在基础学科领域占据着核心地位。单色性、相干性以及方向性是激光的三种特性^[3], 单色性是指激光所发射的光波频率单一, 波长精准、稳定, 几乎不随环境的变化而波动; 相干性是指激光光波在时间、空间上的相位高度统一; 方向性是指激光在发射过程高度集中, 所有的射线近乎平行, 即使在很远的距离上也不会有明显的发散, 这一特性使其在远距离传输和精准定位方面具有显著优势^[4]。激光

最早应用于材料加工^[5]，随后逐渐拓展至信号通信^[6]、军事^[7]等多个领域，研究表明，激光具有显著的生物学效应，在激光照射下，特定生物组织结构会升温，从而达到去除和消融有害物质等目的。根据激光使用前的参数选择，其产生的组织学效应也不同^[8]。本文通过检索归纳目前泌尿外科常见的医用激光在泌尿系结石与前列腺增生的应用进展进行系统的总结综述。

1 激光原理

激光本质上是通过外界能量对增益介质进行激励，促使高能级的粒子增多，数量超过低能级粒子，形成粒子数反转状态。当外部光源射入增益介质后，受激辐射与受激吸收同步出现，若受激吸收强于受激辐射，光在增益介质中的传播逐渐减弱；反之，在增益介质中的传播逐渐增强^[9]。激光器^[10]是产生激光的核心装置，主要由增益介质、泵浦源以及光学谐振腔三部分构成。增益介质是产生激光的核心载体，其内部能级结构直接决定激光的输出波长；泵浦源是激光器能量供应的源头，实现粒子数反转；光学谐振腔由一对放射镜组成，使光子在腔内反复振荡，持续实现光放大，最终输出相干性良好的激光束。激光器根据增益介质的不同，可分为气体、固体、液体、半导体以及光纤激光器等类^[11]。目前，泌尿外科常见的激光器有固体激光器：钕激光、钪激光等；半导体激光器：绿激光等。

2 钕激光

钕激光(Holmium laser, Ho YAG)，即钕钇铝石榴石激光，将钕离子(Ho^{3+})置于光学谐振腔内部，通过泵浦源激发使钕离子实现低能级至高能级的跃迁的过程^[12]。钕激光是一种采用固态介质的脉冲式激光，其发射波长为2100纳米(nm)，由于该波长非常接近水分子对激光能量的最高吸收峰值，使得激光能量能够被生物组织中的水分高效吸收，组织渗透深度为0.40mm，因此具有良好的组织切割及汽化能力^[13]；同时，钕激光具备良好的爆破能力，其可通过光声效应和光热作用，形成对目标局部的破坏作用，在泌尿外科领域常用于泌尿系结石的治疗^[14]。钕激光在进行碎石时，根据不同的治疗方法，钕激光在碎石时一般设置为高能、低频、短脉宽。Abedi AR等^[15]回顾性比较气压弹道与钕激光治疗输尿管结石的临床疗效，结果显示，钕激光组结石清除率、手术时间以及术后并发症发生率显著优于气压弹道组，差异有统计学意义；Mi Y等^[16]回顾性比较钕激光碎石术与体外冲击波碎石术治疗泌尿系结石的临床疗效，结果显示钕激光在治疗泌尿系结石方面优于冲击波体外碎石术。目前输尿管钕激光碎石术因其碎石效率高，术后并发症发生率低，已成为术者首选的微创碎石方法。

摩西技术是一种改良的双相脉冲技术，通过将单个激光脉冲分割成两个连续脉冲阶段，初级阶段前导脉冲使水介质汽化形成空泡通道（即摩西效应），末期阶段剩余的脉冲能量沿该通道无能量损耗地抵达结石表面。在使用摩西技术时，结石产生的位移显著减小，结石粉末化的速度明显增快，Large T等通过进行钕激光与摩西技术碎石临床疗效对比，结果显示，摩西技术可以显著降低结石的位移，结石清除率较标准钕激光碎石显著提升，尤其在处理肾下盏结石时两者差异更为明显^[17]；Letsakos I等^[18]探讨将120W高功率钕激光联合摩西技术应用于超微通道经皮肾镜取石术的临床效果。该研究共纳入12例肾结石患者，采用摩西模式120W钕激光进行碎石，结果显示患者一期清石率可达91.6%，手术时间与激光碎石效率均较为理想，且未出现严重并发症，住院时间短、安全性良好。

在前列腺增生治疗领域，钕激光主要应用于经尿道前列腺剜除。孙凤亮等^[19]通过系统比较经尿道钕激光剜除术(Transurethral Holmium Laser Enucleation of the Prostate HoLEP)与经尿道前列腺电切术大的临床疗效，经尿道钕激光剜除术通过脉冲能量实现前列腺腺体与包膜之间的精准分离，同时能有效止血，术中出血量显著低于经尿道前列腺电切术，差异具有统计学意义。Kim DH等^[20]通过系统性评估了经尿道钕激光剜除术治疗良性前列腺增生的临床疗效，HoLEP适用于治疗任何前列腺体积，术后复发率低，长期随访其尿流动力学改善效果稳定。然而，HoLEP学习曲线较陡峭，对术者要求较高，限制了其对于基层医院的推广。

3 钪激光

钪激光(Thulium laser, Tm YAG)，即钪钇铝石榴石激光，其原理与钕激光相似，将钪离子(Tm^{3+})置于光学谐振腔中，通过泵浦源的激发使得钪离子由低能级跃迁至高能级的过程。作为一种连续激光，波长约为2013nm，与水分子吸收峰相似，具有良好的组织汽化切割能力；同时其组织穿透深度约为0.25mm，在切割组织时热损伤范围更小，具备良好的止血效果，目前临床中常用于良性前列腺增生汽化或剜除^[21]。颜汝平等^[22]系统比较钪激光与钕激光进行前列腺增生剜除的临床疗效，结果表面，钪激光具有良好的止血效果，且术后并发症发生率低于钕激光组。陈斌等^[23]研究证明钪激光在剜除不同体积的前列腺均有效，在处理较大体积前列腺时会延长手术时间，术中出血量会相对增高，但术后并发症发生率并未明显提升。

近年来，钪激光是泌尿系结石治疗研究备受瞩目。Ulvik O等^[24]首次将钪激光应用于上尿路结石碎石，结果表明钕激光与钪激光在进行输尿管结石的治疗中，差异无明显统计学意义；

而在肾结石治疗方面, 钬激光无论是结石清除率还是术后并发症发生率均优于钬激光组。钬激光是连续脉冲激光, 会导致结石融合而非粉末化, Johnson 等^[25]一项体外实验证明, 当钬激光以连续波模式持续作用于结石表面时, 主要以光热效应为主, 导致结石表面迅速升温熔化、最后炭化, 同时结石表层会形成致密的熔融保护壳, 阻碍碎石, 导致随时效率降低。因此, 目前常规功率的钬激光仅适用于良性前列腺剜除等软组织切除手术, 在泌尿系结石治疗中相对较为局限。

4 超脉冲光纤钬激光

超脉冲光纤钬激光 (Super-pulsed fiber thulium laser SP TEL), 与钬激光的产生原理略有不同, 其主要在钬激光连续波模式运行时采用脉冲调制技术, 将能量压缩成极窄的高峰值功率脉冲输出, 其瞬间爆发的冲击力可产生类似于“微爆炸”的光机械效应。超脉冲光纤钬激光的波长约为 1940 纳米, 与水的吸收峰相似, 能量利用效率是钬激光的 4 倍。在参数调节范围上, 超脉冲光纤钬激光峰值功率可达数百瓦, 单脉冲能量可在极宽范围内调节, 频率最高可达 2000 Hz 以上, 因此超脉冲光纤钬激光具备良好的爆破性能。Chandra M V 等^[26]对 60W 超脉冲光纤钬激光在逆行肾内术进行临床疗效评估, 超脉冲光纤钬激光高效、安全, 结石体积越大, 其工作效率越高。

超脉冲光纤钬激光具有独特的低能高频模式, 即能量可以设置至 0.01J, 频率可以设定至 1000Hz。研究表明, 该模式下, 超脉冲光纤钬激光可以有效将结石粉末化至毫米级, 术后无需取石网篮, 患者自行排除即可^[27]。Basulto M M 等^[28]体外实验进一步验证了超脉冲光纤钬激光碎石的有效性与安全性, 在设置相同功率的前提下, 超脉冲光纤钬激光对结石消融速度显著高于钬激光, 其碎石效率约为钬激光的 2 倍, 在低能高频模式下其碎石速率最高。国内学者^[29]通过前瞻性分析超脉冲光纤钬激光与钬激光在泌尿系结石的临床疗效, 结果表明, 超脉冲光纤钬激光碎石疗效优于钬激光, 且其对结石位移的影响小于钬激光。

此外, 超脉冲光纤钬激光在组织切割等方面同样表现亮眼, 其高峰值功率脉冲模式可实现精准组织汽化切割, 连续波模式则可用于有效止血, 在前列腺剜除手术中, 超脉冲光纤钬激光可将腺体与包膜精准分离, 控制术中出血。王劲夫等^[30]首次将超脉冲光纤钬激光应用于前列腺增生剜除, 术中其切割能力与止血效果均表现良好。Kosiba M 等^[31]前瞻性地对比超脉冲光纤钬激光与钬激光前列腺剜除术的临床效果, 超脉冲光纤钬激光

对患者术后尿路刺激症状的发生率显著低于钬激光组, 进一步验证了超脉冲光纤钬激光应用于前列腺剜除的安全性与有效性。

5 绿激光

绿激光 (Green laser GL) 又称双频钬激光, 即倍频掺钕铝石榴石激光。绿激光的波长约为 532nm, 与氧合血红蛋白的吸收峰相近, 因此其可被血红蛋白吸收而不能被水吸收, 使绿激光在富含血管的软组织手术中具有独特优势, 能够实现精准汽化切割的同时保持术野清晰。绿激光的组织穿透深度极浅, 仅约 0.8mm, 热损伤范围约 1mm^[32]。绿激光的发射原理与钬激光和钬激光略有不同, 其主要是在传统钬激光的基础上, 通过使用非线性光学晶体, 可以将发射波长从原始的 1024nm 减少到约 532nm, 这个过程被称为频率加倍, 将激光的颜色由红光转变为绿光^[33]。纪阿林等^[34]证明了绿激光前列腺剜除术在良性前列腺增生治疗方面的安全性和有效性。EAU 于 2016 年提出了“五步法”前列腺汽化术, 使用 180 W XPS 绿激光治疗大体积 BPH 患者, 可以明显提高其疗效^[35]。Zhao L 等^[36]通过 meta 分析评估绿激光与钬激光治疗前列腺增生的临床疗效, 结果显示绿激光与钬激光均安全有效, 术后并发症及排尿状况等方面的改善均无明显差异, 因此在激光选择时需根据患者的具体情况而定。

由于绿激光的波长远低于水的吸收峰, 导致其几乎无法被水吸收, 在进行泌尿系结石碎石时, 绿激光所释放的能量无法经过水传递至结石, 因此其碎石效率显著低于钬激光。Gorbatova N 等^[37]最新研究证明了绿激光在特殊成分结石的治疗中存在有效性, 尤其是富含血红蛋白基质的感染性结石或混合型结石, 绿激光可通过光热效应破坏结石内部的有机基质, 进而辅助碎石。

6 结论与讨论

综上所述, 四种泌尿外科常见的医用激光在治疗结石与前列腺增生领域有着不同的临床疗效, 术中需根据患者情况具体考量选择合适的手术方法。由于激光器高昂的成本, 使得很多医院不能同时具备这几种激光器, 因而使得部分地区的临床手术没办法开展。近年来, 多模态融合激光是研究的热门, 通过将钬激光与钬激光汇合于一根光纤中形成一种新型的钬-钬二合一双波长多功能泌尿外科激光治疗机^[38], 此复合激光器实现钬激光与钬激光的自由转化, 可以有效提高手术效率, 降低手术成本, 未来复合激光在泌尿外科可能更有前景。

参考文献:

- [1] Papatsoris A, Alba AB, Galan Llopis JA, et al. Management of urinary stones: state of the art and future perspectives

- by experts in stone disease. *Arch Ital Urol Androl*. 2024 Jun 27;96(2):12703.
- [2] Hua L, Cao J, Zhao X, et al. Correlation between lifestyle choices, dietary factors, and the risk of adult urolithiasis: insights from a systematic review and meta-analysis. *Transl Androl Urol*. 2025 May 30;14(5):1283-1294.
- [3] Tan S, Yuan D, Su H, et al. Prevalence of urolithiasis in China: a systematic review and meta-analysis[J]. *BJU Int*, 2025, 133(1): 34-43.
- [4] Ventimiglia E, Villa L, Doizi S, et al. Laser Lithotripsy: The Importance of Peak Power and Pulse Modulation. *Eur Urol Focus*. 2021 Jan;7(1):22-25.
- [5] Ramirez I, Bertolini GR, Candemil AP, et al. Chemical and morphological analysis of dentin irradiated by different high-power lasers: a systematic review. *Lasers Med Sci*. 2023 Nov 6;38(1):255.
- [6] Hou Y, Wang Z, Li Z, et al. Laser-Based Mobile Visible Light Communication System. *Sensors (Basel)*. 2024 May 13;24(10):3086.
- [7] Sliney DH. Evaluating health hazards from military lasers. *JAMA*. 1970 Nov 9;214(6):1047-54.
- [8] Jia X, Feng Y. Energy-Based Skin Rejuvenation: A Review of Mechanisms and Thermal Effects. *J Cosmet Dermatol*. 2025 Feb;24(2):e16657.
- [9] 蒙庆华, 林辉, 王革, 等. 激光雷达工作原理及发展现状[J]. 现代制造技术与装备, 2019, (10):155-157.
- [10] 张建心, 杜飞, 孙海竹, 等. 波导激光器的研究进展与展望[J]. 光电技术应用, 2022, 37(06):28-32.
- [11] 张珊, 单雯雯, 张玉芹, 等. 激光器技术发展 with 标准现状分析[J]. 标准科学, 2025, (S1):67-71.
- [12] Corsini C, de Angelis M, Villa L, et al. Holmium: yttrium-aluminum-garnet laser with Moses: does it make a difference? *Curr Opin Urol*. 2022 May 1;32(3):324-329.
- [13] Chen SX, Cheng J, Watchmaker J, et al. Review of Lasers and Energy-Based Devices for Skin Rejuvenation and Scar Treatment With Histologic Correlations. *Dermatol Surg*. 2022 Apr 1;48(4):441-448.
- [14] 王大伟, 吴忠. 激光在泌尿系结石微创手术中的应用进展[J]. 微创医学, 2024, 19(03):228-231.
- [15] Abedi AR, Razzaghi MR, Allameh F, et al. Pneumatic Lithotripsy Versus Laser Lithotripsy for Ureteral Stones. *J Lasers Med Sci*. 2018 Fall;9(4):233-236.
- [16] Mi Y, Ren K, Pan H, et al. Flexible ureterorenoscopy (F-URS) with holmium laser versus extracorporeal shock wave lithotripsy (ESWL) for treatment of renal stone <2 cm: a meta-analysis. *Urolithiasis*. 2016 Aug;44(4):353-65.
- [17] Large T, Nottingham C, Stoughton C, et al. Comparative Study of Holmium Laser Enucleation of the Prostate With MOSES Enabled Pulsed Laser Modulation. *Urology*. 2020 Feb;136:196-201.
- [18] Leotsakos I, Katafigiotis I, Lorber A, et al. Initial experience in combined ultra-mini percutaneous nephrolithotomy with the use of 120W laser and the anti-retropulsion "Moses effect": the future of percutaneous nephrolithotomy?[J]. *Lasers in medical science*, 2020, 35(9):1961-1966.
- [19] 孙凤亮, 张建伟, 郭宝印. 经尿道钬激光前列腺剜除术在良性前列腺增生外科治疗中的应用进展[J]. 医疗装备, 2022, 35(05):190-192+196.
- [20] Kim DH, Kang CS, Choi JW, et al. The Efficacy and Safety of 'Inverted Omega En-bloc' Holmium Laser Enucleation of the Prostate (HoLEP) for Benign Prostatic Hyperplasia: A Size-Independent Technique for the Surgical Treatment of LUTS. *World J Mens Health*. 2023 Oct;41(4):951-959.
- [21] 徐峻豪, 荆翌峰. 钬激光在泌尿外科中的应用与进展 [J]. 临床泌尿外科杂志, 2023, 38 (05): 350-354.
- [22] 颜汝平, 王剑松. 钬激光在良性前列腺增生治疗中的应用及进展[J]. 微创泌尿外科杂志, 2024, 13(06):420-423.
- [23] 陈斌, 陈志强, 李代畅, 等. 光纤钬激光前列腺剜除术在不同体积良性前列腺增生的应用效果研究[J]. 浙江创伤外科, 2026, 31(01):45-49.
- [24] Ulvik O, Esøy MS, Juliebo-Jones P, et al. Thulium Fibre Laser versus Holmium:YAG for Ureteroscopic Lithotripsy:

Outcomes from a Prospective Randomised Clinical Trial. *Eur Urol.* 2022 Jul;82(1):73-79.

[25] Johnson J, Lee J, Movassaghi M, et al. Comparative Analyses and Ablation Efficiency of Thulium Fiber Laser by Stone Composition. *J Urol.* 2024 Mar;211(3):445-454.

[26] Vaddi CM, Ramakrishna P, Ganeshan S, et al. The clinical efficiency and safety of 60W superpulse thulium fiber laser in retrograde intrarenal surgery. *Indian J Urol.* 2022 Jul-Sep;38(3):191-196.

[27] Doizi S, Keller EX, De Coninck V, et al. Dusting technique for lithotripsy: what does it mean? *Nat Rev Urol.* 2018 Nov;15(11):653-654.

[28] Basulto-Martínez M, Proietti S, Pavia MP, et al. Understanding the ablation rate of Holmium:YAG and thulium fiber lasers. Perspectives from an in vitro study. *Urolithiasis.* 2023 Jan 17;51(1):32.

[29] 刘一洋, 梁雯雯, 王宇宁, 等. 超脉冲光纤钬激光与钬激光治疗输尿管结石的临床疗效比较 [J]. *应用激光*, 2025, 45(04):180-186.

[30] 王劲夫, 逢城, 袁园, 等. 超脉冲光纤钬激光在前列腺剜除术中的应用及初步经验 [J]. *临床泌尿外科杂志*, 2023, 38(05):338-341+346.

[31] Kosiba M, Filzmayer M, Welte MN, et al. Thulium fiber laser vs. holmium laser enucleation of the prostate: results of a prospective randomized non-inferiority trial. *World J Urol.* 2024 Jan 20;42(1):49.

[32] 张川, 贾卓敏, 王希友. 绿激光在泌尿外科的临床应用 [J]. *中国临床医生杂志*, 2023, 51(09):1012-1015.

[33] 夏术阶, 钱雨鑫, 杨博宇. 良性前列腺增生症激光治疗的昨天、今天、明天 [J]. *现代泌尿外科杂志*, 2019, 24(04):252-255.

[34] 纪阿林, 全晶, 黄新冕, 等. 选择性绿激光前列腺汽化术与绿激光前列腺剜除术治疗良性前列腺增生的疗效对比 [J]. *微创泌尿外科杂志*, 2022, 11(01):32-37.

[35] Turk C, Petrik A, Sarica K, et al. EAU guidelines on interventional treatment for urolithiasis. *Eur Urol.* 2016;69(3):475-482.

[36] Zhao L, Yu X, Zhu Z, et al. Comparative efficacy and safety of greenlight and thulium laser vaporization techniques for benign prostatic hyperplasia: a systematic review and meta-analysis. *Lasers Med Sci.* 2024 Jul 23;39(1):190.

[37] Gorbatova N, Gasanova E, Zolotov S, et al. Experimental confirmation of the promising selective use of "green" laser radiation for photothermolysis of hemoglobin-containing tissues. *Lasers Med Sci.* 2022 Feb;37(1):225-231.

[38] 夏术阶, 王援柱, 尹良怡, 等. 钬-钬二合一双波长多功能泌尿外科激光治疗机 [P]. 上海: CN203263532U, 2013-11-06.

作者简介: 王宇宁 (1993—), 男, 汉族, 四川省资阳市, 博士研究生, 上海健康医学院附属浦东公利医院, 医师, 泌尿外科。

通讯作者: 王忠, 博士后, 主任医师, 泌尿外科。

基金项目: 国家临床重点专科建设项目 (10000015Z155080000004);

上海市卫生健康系统重点学科 (2024ZDXK0043)。