[31] QIU H L, HUANG S H, LIU Y T, et al. Idebenone alleviates doxorubicin-induced cardiotoxicity by stabilizing FSP1 to inhibit ferroptosis[J]. Acta Pharm Sin B, 2024, 14(6): 2581-2597.
[32] LIU C T, WANG Y C, ZENG Y X, et al. Use of deep-learning assisted assessment of cardiac parameters in zebrafish to discover cyanidin chloride as a novel Keap1 inhibitor against doxorubicin-induced cardiotoxicity[J]. Adv Sci, 2023, 10(30): 2301136.
[33] CUI J X, CHEN Y J, YANG Q N, et al. Protosappanin a protects DOX-induced myocardial injury and cardiac dysfunction by targeting ACSL4/FTH1 axis-dependent ferroptosis[J]. Adv Sci, 2024, 11(34): 2310227.

收稿日期：2025-04-07
（本文编辑：方能）

激光在泌尿系结石中的应用进展

张磊，程跃，李周鑫，薛阳，谢国海

doi:10.3969/j.issn.1671-0800.2025.11.029
【中图分类号】 R691.4　【文献标志码】 C　【文章编号】 1671-0800(2025)11-1207-04

泌尿系结石是泌尿外科常见疾病，复发率高达 50%～ 60%。目前，体外冲击波碎石的的单次成功率不足 40%，常需联合腔内治疗。钬激光（holmium: yttrium-aluminum-garnet，Ho:YAG）作为当前治疗的“金标准”[1]，虽具有良好碎石能力，但仍存在能量效率低、热损伤和特殊部位结石处理能力有限等局限性。近年来，铥光纤激光器（thulium fiber laser，TFL）以其卓越的碎石效率、能显著缩短手术时间以及结石位移控制等优势受到关注[2]。然而，TFL 仍面临设备成本高、长期疗效数据不足等挑战。本文比较了两种激光的作用机制与临床效能，为优化结石治疗策略、指导临床实践提供参考。

1　Ho:YAG 技术

1.1　技术原理与物理特性　Ho:YAG 产生 2 100 nm 中红外激光波长接近水的吸收峰，能使能量被结石中的水高效吸收，通过独特的光热-光机械协同效应实现碎石[3]。光热效应导致结石局部温度在微秒时间内升至 300 ～ 500 ℃，形成热膨胀应力；光机械效应则通过蒸汽泡的膨胀-塌陷循环产生超过 100 MPa 的冲击波，使结石发生结构性崩解[4]。然而，Ho:YAG 能量在水中具有显著的距离依赖性衰减，传输数毫米后即被大量吸收。因此，操作中需将光纤与结石的间距精确控制在 1 ～ 2 mm，以确保碎石效果并避免周围组织热损伤。

1.2　参数设置及碎石模式

1.2.1　参数设置　Ho:YAG 功率是脉冲能量与脉冲频率的乘积，其有效工作范围脉冲能量为 0.2 ～ 2.0 J，频率为 5 ～ 50 Hz[5]。随着激光技术的发展，目前 Ho:YAG 最大功率可达到 120 W，最大脉冲能量可达到 6.0 J，最大频率可达到 80 Hz，这可以充分实现粉末化、碎块化和“爆米花”碎石。多项研究显示[6-7]，与低功率 Ho:YAG 相比，高功率 Ho:YAG 能明显缩短手术时间，但会增加软组织热损伤风险。2022 年欧洲泌尿外科协会指南明确指出，Ho: YAG 参数设置需遵循结石成分-硬度匹配原则：对于 Mohs 硬度≤3 的尿酸结石，推荐采用 0.3 J/30 Hz 高频低能模式；而硬度≥4 的草酸钙结石则需 0.8 ～ 1.2 J/10 Hz 的中能设置[8]。

1.2.2　碎石模式的选择策略　碎块化碎石是采用“低频高能”的激光设置（0.6 ～ 2.0 J、5 ～ 15 Hz），将结石击碎至可通过输尿管鞘（ureteral access sheath，UAS）的较大碎块。该模式结石清除率（stone free-rate，SFR）较高（89.3%），并能有效降低术后输尿管梗阻风险，尤其适用于肾盂结石。使用 UAS 可避免软镜反复进出，有助于维持低压视野，提升手术整体安全性与效率[9]。粉末化碎石则采用“高频低能”设置，将结石粉碎至＜ 2 mm 的颗粒使其随尿液自然排出。其 SFR 相对较低（76.5%），但手术时间平均可缩短 18 min，更适用于输尿管中下段结石[10]。“爆米花”碎石是一种非接触式 Ho:YAG 碎石技术，是在

作者单位：315010 宁波，宁波大学附属第一医院
通信作者：谢国海：fyyxieguohai@nbu.edu.cn

较大结石取出后，设置适中的能量和频率（0.8 ～ 1.2 J、10 ～ 20 Hz）局限在肾盏内激发，利用碎块旋涡运动实现残留结石的粉末化，作为补充碎石手段[11]。而“爆裂除尘”技术是通过先碎块化后粉末化的组合策略，将＞ 1.5 cm 肾结石的 SFR 提升至 93%，且未增加并发症[12]。近年来，Ho:YAG 增加了脉宽模式，即调整单个激光脉冲持续时间。长脉宽激光使结石表面形成的坑洞更深更窄，可以减少结石逃逸，更适合于粉末化碎石。而短脉宽激光结石消融速度更快，在高能低频设置下更适合于碎块化碎石[13]。

1.3　脉冲调制技术　为克服高脉冲能量导致的结石位移与光纤损耗，摩西技术（MOSES）应运而生。其采用独特的双脉冲模式：首脉冲先产生一个蒸汽通道，使后续脉冲能量能绕过水体阻隔，直接作用于结石。这种机制不仅显著减少了结石回退，还将碎石效率提升了约 40%，平均缩短手术时间 15 ～ 20 min，尤其擅长处理软性结石[14]。2022 年发布的 MOSES 2.0 系统能根据结石 CT 值自适应调整脉冲，对高密度结石（＞ 1 000 HU）缩短脉冲间隔以增强穿透力，对低密度结石（＜ 500 HU）则延长间隔以实现宽域消融。该技术将输尿管结石的首次碎石成功率从 84%提升至 91%[15]。尽管能显著缩短手术时间，但研究显示其术后 3 个月的 SFR 与传统模式并无显著差异[16]。

随着脉冲调制技术的发展，蒸汽隧道（vapor tunnel，VT）、虚拟篮（virtual basket，VB）及 Bubble Blast 新型脉冲模式相继出现。这些技术核的心思路相近，旨在通过调控脉冲形态，先在光纤前端产生蒸汽通道或气泡，以提升后续能量的传输效率，从而在增强结石消融、减少位移与控制热损伤之间取得更优平衡[17]。体外研究显示，VT 能提高消融率并缩短手术时间[18]，VT 在低功率模式下则更适合粉末化碎石；VB 则在各种功率设置下对硬石和软石均表现出更高的消融效率[19]。尽管这些脉冲调制技术在体外研究中展现出巨大潜力，但其确切的临床有效性与优势，仍需通过更严谨、更全面的临床试验来最终证实。

尽管 Ho:YAG 不断革新，但其高功率运行时导致灌注液升温（＞ 42 ℃）及组织热损伤风险仍是固有局限。采用负压吸引鞘，通过高速灌流将术区温度维持在 32 ～ 35 ℃的安全范围，是当前有效的解决方案[20]。为改善肾下盏结石的镜体到位率，新型纳米银涂层光纤将弯曲半径从 15 mm 缩减至 8 mm，使定位成功率从 76%提升至 93%[21]。此外，人工智能辅助系统引入改变了传统的操作模式，人工智能系统（如 Litho Guide）能实时计算最佳激光参数，将术者操作失误率降低 42%[22]。

2　TFL

2.1　技术原理与物理特性　TFL 是泌尿系结石治疗领域的新兴技术，以其卓越的物理特性和高效的碎石能力，对 Ho:YAGd 的主导地位形成挑战[2]。TFL 采用半导体泵浦和光纤增益介质，能量转换效率比 Ho:YAG 提升约 35%，热损耗显著降低[23]。可提供从极低到高（0.025 ～ 6 J）的宽泛脉冲能量、高达 2 400 Hz 的频率以及可变的脉冲持续时间，实现了激光参数的灵活调节。得益于优异的光束质量（M2 ＜ 1.3），TFL 可耦合至 50 μm 超细光纤，为输尿管软镜提供了更大的器械通道和更佳的弯曲性能[24]。其 1 940 nm 的波长与水吸收峰完美匹配，使光热效应成为其碎石的主要机制，能更高效地消融结石[3]。这些特性使 TFL 在单位时间内能产生更高的有效碎石能量密度，为处理困难结石和改善手术效果带来了新的可能。

2.2　研究进展与临床应用评估　研究表明[25]，与 Ho:YAG 相比，TFL 能显著缩短手术时间并降低激光总能量。体外模型进一步证实，当 TFL 脉冲频率提升至 800 Hz 以上时，可借由持续空化效应将结石粉末化率推升至 98%[26]。

在肾结石治疗中，TFL 肾下盏结石的 SFR 达 90%[27]，这得益于其超细光纤带来的综合优势。更细的光纤释放了器械通道空间，允许更大的灌注流量以维持清晰视野；同时，它改善了软镜的弯曲能力，使其能更轻松抵达肾下盏，并有效减少结石后移，从而显著提高结石消融率和最终清除率。多项研究证实，铥光纤激光在结石治疗的多个维度优于 Ho:YAG：（1）在疗效上，TFL 的 SFR 显著更高（93.7% *vs* 76.4%），其超细光纤可实现 270°镜体偏转，将肾下盏结石的可视率提升至 98%[28]。（2）在效率上，TFL 凭借更优的视野清晰度与几乎无结石后移的特性，显著缩短了手术时间[29]。（3）在安全性方面，TFL 术中和术后并发症（如出血）发生率更低[27]。当灌流速度

＞ 24 ml/s 时，两者所致水温升高无显著差异，均可维持在安全范围[30-31]。

在输尿管结石中，TFL 的热效应受功率与冲洗流量共同影响。研究表明[32]，将参数设置为：功率＜15 W、冲洗流量 20 ml/min 及脉冲能量 0.3 J，可在保证安全的前提下实现最佳碎石效果。一项前瞻性研究[33]进一步证实了 TFL 在手术时间和结石消融速度上明显优于 Ho:YAG，且两者的 SFR 与并发症发生率无显著差异，凸显了 TFL 在输尿管结石治疗中优势。

在经皮肾镜取石术（percutaneous nephrolithotomy，PCNL）领域中，TFL 展现出卓越的碎石效率，在处理大结石时较 Ho: YAG 提升 2.8 倍，并能显著缩短手术时间、减少出血[34]。但 TFL 在 PCNL 应用中存在特异性风险，Somani 等[35]研究发现，使用＞1.5 J 脉冲能量时，集合系统内瞬态温度峰值可达 42.3 ℃，这要求术者必须结合实时灌注监测系统进行精准能量管理。

尽管优势显著，但 TFL 的推广仍面临缺乏长期疗效数据、激光参数尚未标准化、以及高昂的设备购置成本限制了其在基层医院的应用等挑战。

3 脉冲固态铥激光器（thulium-doped yttrium aluminum garnet laser，Tm:YAG）

Tm: YAG 是一种固态二极管泵浦激光器，发射波长为 2 010 nm。Tm:YAG 因其能连续波输出，平滑切割和汽化软组织，且止血效果良好，适用于治疗良性前列腺增生[36]。近年来，通过 Q 开关对 Tm:YAG 进行脉冲调制，使产生的脉冲铥激光（p-Tm:YAG）在碎石领域展现出独特优势，它兼具 TFL 与 Ho:YAG 的特性，拥有适中的水吸收系数、较高的可调节峰值功率及均匀脉冲轮廓[37]。体外研究显示，p-Tm:YAG 具有较低的反冲力、激光碎石期间的温度水平与 Ho:YAG 相似且烧蚀速率高于 Ho:YAG，并且对所有结石类型均显示出有效的碎石能力。Panthier 等[38]的研究发现，p-Tm: YAG 与 TFL 有相同的 SFR，但 p-Tm:YAG 的烧蚀速度更高。尽管一些临床前研究展示了其潜在临床价值。然而，该技术目前仍处于临床前研究阶段，其具体的设备性能与临床转化价值有待深入评估。

4 结论

综上所述，Ho:YAG 是临床治疗的“金标准”，其安全性毋庸置疑，但物理特性限制了其性能的进一步提升。TFL 虽在研究中展现出显著优势，其临床应用仍需更多数据支持。而新型 p-Tm: YAG，目前尚缺乏与前两者的关键临床数据对比。随着研究的深入和技术的不断进步，我们期待未来能够开发出更加高效、安全、经济的激光碎石技术，为泌尿系结石患者提供更好的治疗选择，进一步改善他们的生活质量。

利益冲突 所有作者声明无利益冲突

参 考 文 献

[1] KACHKOUL R, TOUIMI G B, EL MOUHRI G, et al. Urolithiasis: History, epidemiology, aetiologic factors and management[J]. Malays J Pathol, 2023, 45(3): 333-352.

[2] 丁天福,黄忠月,徐铮,等.超脉冲光纤铥激光碎石的研究进展[J].现代泌尿外科杂志,2025,30(1):82-85.

[3] 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.

[4] XIANG G M, LI D W, CHEN J Q, et al. Dissimilar cavitation dynamics and damage patterns produced by parallel fiber alignment to the stone surface in holmium: Yttrium aluminum garnet laser lithotripsy[J]. Phys Fluids, 2023, 35(3): 033303.

[5] IBRAHIM A, ELHILALI M M, FAHMY N, et al. Double-blinded prospective randomized clinical trial comparing regular and Moses modes of holmium laser lithotripsy[J]. J Endourol, 2020, 34(5): 624-628.

[6] EROL E, ECER G, KIREMIT M C, et al. Multicentric evaluation of high and low power lasers on RIRS success using propensity score analysis[J]. Urolithiasis, 2024, 52(1): 32.

[7] TSATURYAN A, BALLESTA MARTINEZ B, LATTARULO M, et al. Could the high-power laser increase the efficacy of stone lithotripsy during retrograde intrarenal surgery?[J]. J Endourol, 2022, 36(7): 877-884.

[8] GERAGHTY R M, DAVIS N F, TZELVES L, et al. Best practice in interventional management of urolithiasis: An update from the European association of urology guidelines panel for urolithiasis 2022[J]. Eur Urol Focus, 2023, 9(1): 199-208.

[9] 钟恩鹏,陈新铭,江沛源.可弯曲负压吸引鞘在输尿管软镜钬激光碎石术治疗肾结石中的应用研究[J].中国医学创新,2024,21(31):62-66.

[10] LIAO N K, TAN S T, YANG S B, et al. A study comparing dusting to basketing for renal stones≤2 cm during flexible ureteroscopy[J]. Int Braz J Urol, 2023, 49(2): 194-201.

[11] 韩刚,计宁,张艳,等.肾结石输尿管软镜碎石模式的临床疗效比较[J].新疆医学,2024,54(11):1350-1354.
[12] PIETROPAOLO A, JONES P, WHITEHURST L, et al. Role of 'dusting and pop-dusting' using a high-powered (100 W) laser machine in the treatment of large stones (≥15 mm): Prospective outcomes over 16 months[J]. Urolithiasis, 2019, 47(4): 391-394.
[13] NOURELDIN Y A, KALLIDONIS P, LIATSIKOS E N. Lasers for stone treatment: How safe are they?[J]. Curr Opin Urol, 2020, 30 (2): 130-134.
[14] LI P H, MA Y C, YUAN C, et al. Comparison of the efficacy and safety of holmium laser with the Moses technology and regular mode for stone treatment: A systematic review and meta-analysis[J]. BMC Urol, 2023, 23(1): 99.
[15] CORRALES M, SIERRA A, TRAXER O. Moses and Moses 2.0 f or laser lithotripsy: Expectations vs. reality[J]. J Clin Med, 2022, 11 (16): 4828.
[16] CASTELLANI D, FONG K Y, LIM E J, et al. Comparison between holmium: YAG laser with MOSES technology vs thulium fiber laser lithotripsy in retrograde intrarenal surgery for kidney stones in adults: A propensity score-matched analysis from the FLEXible ureteroscopy outcomes registry[J]. J Urol, 2023, 210(2): 323-330.
[17] CORSINI C, ROBESTI D, VILLA L, et al. Is pulse modulation the future of laser technology in endourology: Evidence from a literature review-section of EAU endourology[J]. Eur Urol Focus, 2025, 11 (2): 347-355.
[18] RICO L, CONTRERAS P, BLAS L, et al. Dusting efficacy between the regular setting of holmium laser (Ho: YAG) versus Vapor Tunnel pulse modality for non-complex kidney stones[J]. Lasers Med Sci, 2023, 38(1): 168.
[19] 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.
[20] 向俊,刘湘鄂,林晨,等.灌注液温度对输尿管镜手术效果的影响[J].中国现代医生,2021,59(22):4-7.
[21] VILLA L, FALLARA G, MENEAN M, et al. SC248 Immediate and early postoperative complications after ureteroscopy and Ho: Yag laser lithotripsy for urinary stones: Real-life findings from a single centre series[J]. Eur Urol Suppl, 2019, 18(9): e3305.
[22] LI D W, WANG N C, LI M C, et al. Three-dimensional super-resolution passive cavitation mapping in laser lithotripsy[J]. IEEE Trans Ultrason Ferroelectr Freq Control, 2024, 71(12: Breaking the Resolution Barrier in Ultrasound): 1690-1700.
[23] PANTHIER F, DOIZI S, LAPOUGE P, et al. Comparison of the ablation rates, fissures and fragments produced with 150 μm and 272 μm laser fibers with superpulsed thulium fiber laser: An *in vitro* study[J]. World J Urol, 2021, 39(6): 1683-1691.
[24] KHUSID J A, KHARGI R, SEIDEN B, et al. Thulium fiber laser utilization in urological surgery: A narrative review[J]. Investig Clin Urol, 2021, 62(2): 136-147.
[25] 刘一洋,梁雯雯,王宇宁,等.超脉冲光纤铥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(4):180-186.
[26] JOHNSON J, LEE J, MOVASSAGHI M, et al. Comparative analyses and ablation efficiency of thulium fiber laser by stone composition[J]. J Urol, 2024, 211(3): 445-454.
[27] CORRALES M, TRAXER O. Re: Thulium fibre laser versus holmium: YAG for ureteroscopic lithotripsy: Outcomes from a prospective randomised clinical trial[J]. Eur Urol, 2023, 83(2): 184-185.
[28] TARATKIN M, AZILGAREEVA C, CHINENOV D, et al. Retrograde intrarenal surgery versus percutaneous nephrolithotomy in larger kidney stones. Could SuperPulsed Thulium-fiber laser change the game?[J]. Cent European J Urol, 2021, 74(2): 229-234.
[29] MARTOV A G, ERGAKOV D V, GUSEYNOV M, et al. Clinical comparison of super pulse thulium fiber laser and high-power hol mium laser for ureteral stone management[J]. J Endourol, 2021, 35 (6): 795-800.
[30] SHEN Z H, LIANG J J, XIE L G, et al. Ablation efficiency and laser safety of a novel superpulsed thulium fiber laser: A *in vitro* study[J]. World J Urol, 2024, 42(1): 561.
[31] TARATKIN M, LAUKHTINA E, SINGLA N, et al. Temperature changes during laser lithotripsy with Ho: YAG laser and novel Tm-fiber laser: A comparative *in-vitro* study[J]. World J Urol, 2020, 38 (12): 3261-3266.
[32] MOLINA W R, CARRERA R V, CHEW B H, et al. Temperature rise during ureteral laser lithotripsy: Comparison of super pulse thulium fiber laser (SPTF) *vs* high power 120 W holmium-YAG laser (Ho: YAG)[J]. World J Urol, 2021, 39(10): 3951-3956.
[33] TG S K, SEKAR H, CHANDRU T, et al. Outcomes of holmium: YAG laser vs. Thulium fiber laser for ureteric stones during ureterorenoscopic lithotripsy - A prospective, randomized single-centre study[J]. World J Urol, 2025, 43(1): 167.
[34] PATIL A, SHARMA R, SHAH D, et al. A prospective comparative study of mini-PCNL using Trilogy™ or thulium fibre laser with suction[J]. World J Urol, 2022, 40(2): 539-543.
[35] SOMANI B. Minimally invasive urological procedures and related technological developments—Series 2[J]. J Clin Med, 2023, 12(8): 2879.
[36] HEIN S, PETZOLD R, SUAREZ-IBARROLA R, et al. Thermal effects of thulium: YAG laser treatment of the prostate-an *in vitro* study[J]. World J Urol, 2022, 40(1): 161-167.
[37] CHICAUD M, CORRALES M, KUTCHUKIAN S, et al. Thulium: YAG laser: A good compromise between holmium: YAG and thulium fiber laser for endoscopic lithotripsy? A narrative review[J]. World J Urol, 2023, 41(12): 3437-3447.
[38] PANTHIER F, SOLANO C, CHICAUD M, et al. Thulium fiber laser versus pulsed Thulium: YAG for laser lithotripsy during flexible ureteroscopy[J]. Lasers Med Sci, 2024, 39(1): 294.

收稿日期:2025-04-21
(本文编辑:方能)