

# 飞秒激光辅助白内障超声乳化术最新研究进展

高鹏飞<sup>1</sup>, 何建中<sup>2\*</sup>

<sup>1</sup>赣南医科大学第一临床医学院, 江西 赣州

<sup>2</sup>萍乡市人民医院眼科, 江西 萍乡

收稿日期: 2026年3月21日; 录用日期: 2026年4月16日; 发布日期: 2026年4月22日

## 摘要

白内障是全球首位致盲性眼病, 超声乳化白内障吸除联合人工晶状体植入术是目前临床治疗白内障的主流术式。飞秒激光辅助白内障超声乳化术(FLACS)凭借其精准化、数字化的操作优势, 成为近年来白内障手术领域的研究热点。本文围绕FLACS的技术原理、手术流程、临床疗效与安全性、技术优势与局限性等方面, 结合最新临床研究证据进行综述, 旨在为该技术的临床合理应用与后续研究提供参考。

## 关键词

飞秒激光辅助白内障超声乳化术, 白内障, 超声乳化白内障吸除术, 临床疗效

# Latest Research Progress in Femtosecond Laser-Assisted Cataract Phacoemulsification

Pengfei Gao<sup>1</sup>, Jianzhong He<sup>2\*</sup>

<sup>1</sup>The First Clinical Medical College of Gannan Medical University, Ganzhou Jiangxi

<sup>2</sup>Ophthalmology Department, Pingxiang People's Hospital, Pingxiang Jiangxi

Received: March 21, 2026; accepted: April 16, 2026; published: April 22, 2026

## Abstract

Cataract is the leading cause of blindness worldwide. Phacoemulsification combined with intraocular lens implantation is the mainstream surgical method for clinical treatment of cataract at present. Femtosecond laser-assisted cataract surgery (FLACS) has become a research hotspot in the field of cataract surgery in recent years due to its advantages of precise and digital operation. This paper reviews the technical principle, surgical procedure, clinical efficacy and safety, technical advantages and limitations of FLACS combined with the latest clinical research evidence, aiming to provide a

\*通讯作者。

reference for the rational clinical application and subsequent research of this technology.

## Keywords

Femtosecond Laser-Assisted Cataract Surgery, Cataract, Phacoemulsification, Clinical Efficacy

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

白内障是因晶状体混浊导致的视觉障碍性疾病,也是全球范围内导致视力损害和失明的首要病因[1]。随着人口老龄化进程的加快,白内障的患病人数持续增长,对白内障手术的需求也逐年攀升。近年来,围绕 FLACS 的临床疗效、安全性、适用人群与成本效益等方面开展了大量研究,其临床应用价值也得到了进一步的明确。本文结合最新研究成果,对 FLACS 的研究进展进行综述。

## 2. 飞秒激光辅助白内障手术的技术原理与手术流程

### 2.1. 技术原理

FLACS 的核心技术原理主要包括三个核心维度,且全程无过度物理化的机械损伤。一是光致爆破原理,飞秒激光通过发射持续时间极短的脉冲激光,聚焦于眼内靶组织的特定层面,通过光裂解效应产生等离子体,等离子体膨胀形成微小气泡,通过气泡的联合作用实现组织的精准切割,全程无机械性接触,避免了手动操作带来的组织牵拉损伤[2]。二是低热损伤效应,飞秒激光的脉冲持续时间仅为数百飞秒,能量沉积严格局限于聚焦靶点,向周围组织的热传导范围极小,最大程度减少了激光操作对角膜、虹膜、晶状体囊膜等周围组织的热损伤[3]。三是计算机精确控制,手术全程通过眼前节光学相干断层扫描(OCT)实时成像引导,术者可术前数字化规划切割的位置、深度、尺寸等参数,激光操作可实现微米级的精度控制,保证了手术步骤的可重复性与稳定性。

### 2.2. 手术关键步骤

FLACS 的手术核心步骤均由飞秒激光完成,主要包括四个关键环节。第一是角膜切口制作,根据术前规划完成主切口与辅助切口的制作,可精准控制切口的几何形态,实现自闭式切口,减少术源性散光的发生[4]。第二是前囊膜环形撕囊,激光可完成连续、居中、圆形的前囊膜切开,囊口尺寸可精准预设,边缘光滑完整,为人工晶状体(IOL)的稳定植入提供了理想的囊袋条件。第三是晶状体核预劈裂,根据晶状体核的硬度分级,预设切割模式,对晶状体核进行立体式分割与预劈裂,大幅降低后续超声乳化操作的难度[5]。目前临床主流的预劈裂切割模式主要包括“米”字形与“网格”形两类:“米”字形切割以晶状体核中心为原点,制作 4~8 条放射状切割沟,形成类似“米”字的分割结构,该模式的优势在于激光脉冲数量少、曝光时间短,可减少激光对周围囊膜、虹膜组织的潜在损伤,操作流程更简洁,适用于 II~III 级中等硬度的白内障核;其局限性在于对硬核的分割深度与范围有限,无法实现核的完全碎片化,后续仍需术者补充机械劈核操作。“网格”形切割则是在水平与垂直方向制作多组平行切割线,将晶状体核分割为多个均匀的微小立方体,该模式可实现晶状体核的充分碎片化,最大程度降低后续超声乳化的能量需求与操作难度,尤其适用于 III~V 级硬核白内障;其不足在于所需激光脉冲更多,操作耗时相对更长,对于 II 级及

以下的软核存在过度切割的风险, 可能增加后囊膜损伤的概率。第四是散光矫正切口, 可同步制作弧形角膜切开, 对术前存在的低至中度角膜散光进行精准矫正, 实现白内障手术与散光矫正的一体化完成。

### 2.3. 与传统超声乳化术的核心差异

传统超声乳化白内障手术中, 角膜切口制作、前囊膜撕囊、晶状体核劈裂等核心步骤均由术者手动完成, 手术效果高度依赖术者的操作经验与技术水平, 操作精度与重复性存在较大的个体差异, 且手动操作易出现囊膜撕裂、切口不规整等并发症[6]。而 FLACS 将上述手术核心步骤实现了自动化、数字化控制, 突破了人眼与手操作的生理极限, 显著提升了操作的精准度与可重复性。同时, 通过激光预劈裂技术, FLACS 可有效降低术中超声乳化的能量需求与操作时间, 减少超声能量对眼内组织的损伤, 这也是其与传统术式最核心的差异。

## 3. 临床疗效与安全性研究进展

### 3.1. 术中参数比较

术中参数是评估手术效率与操作难度的核心指标, 现有研究主要围绕有效超声时间(EPT)、累积消融能量(CDE)、手术时间与囊膜完整性展开对比。在 CDE 与 EPT 方面, 多项前瞻性研究证实, FLACS 可显著降低术中超声乳化的能量需求。Baldascino 等的研究显示, 在无并发症的白内障病例中, FLACS 组平均 CDE 为 8.3, 显著低于传统超声乳化组的 11.35 ( $P=0.01$ ); Oka 等的随机对照研究也得出一致结论, FLACS 组平均 CDE 仅为  $0.213\% \pm 0.334\%$ -seconds, 远低于传统组的  $1.718\% \pm 0.898\%$ -seconds ( $P<0.0001$ )。同时, FLACS 组的 EPT 也显著短于传统组, 尤其在 III 级及以上硬核白内障中, 这种差异更为显著[7]。手术时间方面, FLACS 的整体手术时长较传统术式有所延长, Baldascino 等的研究数据显示, 传统术式总手术时间为  $742.3 \pm 185.8$  s, 而 FLACS 组达到  $985.1 \pm 118.6$  s, 差异有统计学意义, 额外耗时主要来源于激光对位、扫描与切割步骤。囊膜完整性方面, FLACS 制作的前囊膜切开具有更高的居中性与边缘完整性, 囊口尺寸与术前预设值的偏差显著小于手动撕囊, 为 IOL 的长期稳定植入提供了可靠的囊袋支撑。

### 3.2. 术后视觉质量

术后视觉质量是评估手术疗效的核心终点, 主要包括术后裸眼视力、屈光预测误差、IOL 居中性与散光矫正效果四个维度。在术后视力方面, 多项研究显示 FLACS 可带来更优的早期视力恢复。孔令普的临床研究显示, 术后 1 周、3 个月时, FLACS 组患者的裸眼远视力改善程度显著优于传统术式组; 郑艳瑾等针对浅前房白内障患者的研究也发现, FLACS 组术后 1 d 的裸眼视力显著优于传统组。但多项大样本随机对照试验(RCT)的长期随访结果显示, 术后 1 年时, 两组患者的最佳矫正视力无显著的临床差异。屈光预测误差方面, FLACS 凭借精准的前囊膜切开与 IOL 稳定植入, 术后屈光结果更接近术前预设目标, 屈光预测误差显著小于传统术式, 更能满足屈光性白内障手术的精准需求。IOL 居中性方面, FLACS 制作的居中、圆形前囊口可保证囊袋的对称性收缩, 显著减少术后 IOL 的倾斜与偏心, 降低了术后高阶像差的增加幅度, 提升了患者的术后视觉质量[8]。散光矫正效果方面, Truong 等采用新型飞秒激光角膜切开术列线图矫正白内障合并角膜散光, 结果显示术后 92% 的患眼残余散光低于 1.0D, 散光矫正效果显著; 孔令普的研究也证实, FLACS 组术后角膜散光度的改善程度显著优于传统术式组, 但现有证据显示, 对于 1.5D 以上的高度散光, toricIOL 的矫正效果仍优于飞秒激光辅助角膜切开术。

### 3.3. 角膜内皮与角膜安全性

角膜内皮细胞损伤是白内障手术最主要的术中并发症之一, 也是影响手术长期安全性的关键因素。

Wang 等的 meta 分析纳入了 42 项临床研究、共 7652 只患眼, 结果显示, FLACS 组术后 1~3 天、1 周、1 个月、3 个月、6 个月的角膜内皮细胞丢失率均显著低于传统超声乳化术组[9]。Liu 等的配对眼 RCT 研究 1 年随访结果显示, FLACS 组术后 1 年内皮细胞丢失率为  $8.2\% \pm 2.8\%$ , 显著低于传统组的  $11.2\% \pm 3.6\%$  ( $P=0.03$ ) [10]。中央角膜厚度是反映术后角膜水肿程度的核心指标, 该 meta 分析同时显示, FLACS 组术后 1 周、1 个月的中央角膜厚度显著低于传统组, 提示其术后早期角膜水肿程度更轻, 恢复速度更快; 而 Oka 等的研究显示, 术后 3 个月时, 两组的中央角膜厚度无显著统计学差异[11]。对于硬核白内障患者, FLACS 的预劈裂技术可大幅降低超声乳化的操作难度与能量需求, 显著减少超声能量对角膜内皮的损伤, 相比传统术式具有更突出的角膜保护优势。

### 3.4. 特殊人群应用

对于特殊类型白内障患者, FLACS 的临床应用价值也得到了相关研究的验证。部分研究提示, 对于硬核白内障患者, FLACS 可通过激光预劈裂降低手术操作难度, 减少术中内皮细胞丢失与并发症发生风险。部分研究提示, 糖尿病合并白内障患者接受 FLACS 联合 ToricIOL 植入治疗, 术后 6 个月的裸眼视力、散光矫正效果均显著优于传统术式, 且术后角膜高阶像差更低[12]。部分研究提示, 浅前房合并白内障患者采用 FLACS 治疗, 术中 CDE、EPT 均显著低于传统术式, 术后内皮细胞丢失率、角膜水肿发生率也显著更低, 且手术操作对黄斑无明显不良影响, 安全性更优[13] [14]。

## 4. 优势、局限性与争议

### 4.1. 技术优势

FLACS 的技术优势主要体现在三个方面。第一是精准的囊膜操作, FLACS 可实现连续、居中、尺寸精准的前囊膜切开, 其操作精度与重复性远高于手动撕囊, 可保证 IOL 的长期居中稳定, 是实现屈光性白内障手术精准屈光目标的核心基础。第二是显著降低超声能量损伤, 通过激光预劈裂技术对晶状体核进行预先分割, 大幅降低了超声乳化的操作难度, 显著减少了术中 CDE 与 EPT, 减少了超声能量对角膜内皮、虹膜等眼内组织的损伤, 提升了手术的整体安全性。第三是适配屈光性白内障手术的发展趋势, 随着患者对术后全程视觉质量的要求不断提高, 白内障手术已进入屈光性手术时代, FLACS 可同步完成精准角膜切口、散光矫正、囊膜切开、晶状体预劈裂等多个与屈光效果相关的手术步骤, 为个性化屈光性白内障手术提供了更完善的技术平台。

### 4.2. 技术局限性

FLACS 也存在较为明确的局限性。首先是治疗成本较高, FLACS 需要配套的飞秒激光设备, 设备的购置、维护与耗材成本均较高, 导致手术费用远高于传统超声乳化术, 限制了其在基层医疗机构与公共卫生体系中的广泛应用[15]。其次是整体手术时间延长, 相比传统术式, FLACS 增加了激光对位、眼前节扫描、激光切割等步骤, 整体手术时长有所增加, 对手术室的流转效率存在一定影响。第三是存在一定的学习曲线, 术者不仅需要掌握传统白内障手术的操作技能, 还需熟练掌握激光设备的参数设置、操作流程、术中应急处理等相关技能, 对于手术经验不足的医师, 存在一定的学习门槛[16]。第四是常规病例的长期临床获益有限, 多项大样本 RCT 研究显示, 在常规白内障病例中, FLACS 与传统术式的长期视觉预后、并发症发生率无显著临床差异, 额外的医疗成本并未带来与之匹配的长期临床获益。

## 5. 总结与未来展望

FLACS 作为白内障手术领域的重要技术革新, 通过数字化、自动化的操作模式, 实现了手术核心步

骤的微米级精准控制, 在提升囊膜操作精度、降低术中超声能量、保护角膜内皮细胞等方面具有明确的技术优势, 尤其在硬核白内障、浅前房白内障、糖尿病合并白内障等复杂病例, 以及个性化屈光性白内障手术中, 展现出了重要的临床应用价值。但现有循证医学证据显示, 在常规白内障病例中, FLACS 的长期视觉预后与并发症发生率与传统超声乳化术无显著临床差异, 同时其还存在治疗成本高、手术时间延长、成本效益不明确等局限性, 目前尚无法完全替代传统超声乳化术。

未来, FLACS 的研究与临床应用应聚焦于解决现有技术的核心痛点, 突破循证证据与应用场景的局限, 具体可围绕以下方向开展深入探索: 第一, 优化临床研究设计, 完善高质量循证证据体系。针对现有研究中常规病例长期获益不明确、亚组分析不足的问题, 未来的随机对照试验(RCT)应采用分层随机设计, 以晶状体核硬度分级、是否合并糖尿病/青光眼浅前房、术前散光度数、人工晶状体类型等作为分层因素, 针对性评估 FLACS 在不同亚组人群的短期视觉恢复获益与长期预后安全性; 同时应统一有效超声时间、角膜内皮细胞丢失率、屈光预测误差、术后高阶像差等核心终点指标的评价标准与随访时点, 减少研究间的异质性, 为明确 FLACS 的最佳适用人群提供高质量循证依据。第二, 推动人工智能与 FLACS 的深度融合, 解决临床实际痛点。针对复杂病例个性化手术规划不足、操作依赖术者经验的问题, 可基于术前眼前节 OCT 影像、晶状体核硬度、眼部合并症等多模态临床数据, 构建深度学习模型, 实现预劈裂切割模式的自动匹配与参数个性化优化——如为硬核病例自动适配网格形切割方案、为中等硬度核匹配米字形切割方案, 同时精准调整切割深度与范围, 平衡手术效率与安全性; 此外, 可开发术中实时 AI 导航与预警系统, 基于术中 OCT 实时影像识别激光聚焦偏差、囊膜损伤风险等问题, 实现术中动态调整, 降低复杂病例的并发症发生率。第三, 推进设备技术优化与卫生经济学研究, 拓展技术应用范围。针对现有设备成本高、手术耗时长的问题, 未来应聚焦小型化、低成本飞秒激光设备的研发, 简化激光对位、扫描与切割流程, 压缩非必要手术耗时, 提升手术室流转效率; 同时应开展基于不同医疗场景的长期成本效益研究, 明确 FLACS 在复杂病例、屈光性白内障手术中的卫生经济学价值, 探索适配基层医疗机构的应用模式, 推动该技术的规范化普及。

## 参考文献

- [1] Narayan, A., Evans, J.R., O'Brart, D., Bunce, C., Gore, D.M. and Day, A.C. (2023) Laser-Assisted Cataract Surgery versus Standard Ultrasound Phacoemulsification Cataract Surgery. *Cochrane Database of Systematic Reviews*, **2023**, CD010735. <https://doi.org/10.1002/14651858.cd010735.pub3>
- [2] Chen, X., Zhong, Y., Wang, K., Xu, J., Grzybowski, A. and Yao, K. (2026) Femtosecond Laser-Assisted Cataract Surgery: Precision, Practice, and the Path to Personalization. *American Journal of Ophthalmology*, **285**, 213-217. <https://doi.org/10.1016/j.ajo.2026.01.031>
- [3] Salgado, R., Torres, P.F. and Marinho, A. (2023) Pupil Status with Low-Energy Femtosecond Laser-Assisted Cataract Surgery versus Conventional Phacoemulsification: An Intra-individual Comparative Study. *Clinical Ophthalmology (Auckland, N.Z.)*, **17**, 331-339.
- [4] Truong, N., Ernst, B., Mishra, G., Seeger, C., Sun, A., Longenecker, A., et al. (2025) Short-Term Outcomes Using a Novel Femtosecond Laser-Assisted Keratotomy Nomogram to Manage Corneal Astigmatism during Phacoemulsification. *Clinical Ophthalmology*, **19**, 721-731. <https://doi.org/10.2147/ophth.s500884>
- [5] Baldascino, A., Carlà, M.M., Giannuzzi, F., Boselli, F., Caporossi, T., Gambini, G., et al. (2022) Femtosecond Laser-Assisted Cataract Surgery: Analysis of Surgical Phases and Comparison with Standard Phacoemulsification in Uncomplicated Cataracts. *Vision*, **6**, Article No. 72. <https://doi.org/10.3390/vision6040072>
- [6] 丁锐, 吴保华, 袁晓彤, 等. 飞秒激光辅助白内障超声乳化术治疗白内障临床观察[J]. 甘肃科技纵横, 2022, 51(7): 78-81.
- [7] 郑艳瑾, 赵春梅, 刘湘云, 等. 飞秒激光辅助白内障超声乳化术治疗浅前房白内障的临床观察[J]. 国际眼科杂志, 2022, 22(1): 87-90.
- [8] Pohlmann, D., Pilger, D., Bertelmann, E. and von Sonnleithner, C. (2021) Corneal Higher-Order Aberrations after Cataract Surgery: Manual Phacoemulsification versus Femtosecond-Laser Assisted Technique. *European Journal of Ophthalmology*, **31**, 2955-2961. <https://doi.org/10.1177/1120672121990611>

- 
- [9] Wang, H., Chen, X., Xu, J. and Yao, K. (2023) Comparison of Femtosecond Laser-Assisted Cataract Surgery and Conventional Phacoemulsification on Corneal Impact: A Meta-Analysis and Systematic Review. *PLOS ONE*, **18**, e0284181. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0284181>
- [10] Liu, Y., Setiawan, M., Chin, J.Y., Wu, B., Ong, H.S., Lamoureux, E., *et al.* (2021) Randomized Controlled Trial Comparing 1-Year Outcomes of Low-Energy Femtosecond Laser-Assisted Cataract Surgery versus Conventional Phacoemulsification. *Frontiers in Medicine*, **8**, Article ID: 811093. <https://doi.org/10.3389/fmed.2021.811093>
- [11] Oka, Y., Sasaki, N. and Injev, V.P. (2021) Comparison of Femtosecond Laser-Assisted Cataract Surgery and Conventional Phacoemulsification on Endothelial Cell Density When Using Torsional Modality. *Clinical Ophthalmology*, **15**, 4227-4237. <https://doi.org/10.2147/oph.s329935>
- [12] Tang, Y. and Duan, Z. (2024) Clinical Efficacy of Femtosecond Laser-Assisted Phacoemulsification in Diabetic Cataract Patients. *World Journal of Clinical Cases*, **12**, 1733-1741. <https://doi.org/10.12998/wjcc.v12.i10.1733>
- [13] Zhou, Z., Li, L., Zeng, S., He, W. and Li, M. (2020) Comparison of Femtosecond Laser-Assisted Cataract Surgery and Conventional Phacoemulsification in Shallow Anterior Chambers and Glaucoma. *Journal of Ophthalmology*, **2020**, Article ID: 3690528. <https://doi.org/10.1155/2020/3690528>
- [14] Mencucci, R., De Vitto, C., Cennamo, M., Vignapiano, R., Buzzi, M. and Favuzza, E. (2020) Femtosecond Laser-Assisted Cataract Surgery in Eyes with Shallow Anterior Chamber Depth: Comparison with Conventional Phacoemulsification. *Journal of Cataract and Refractive Surgery*, **46**, 1604-1610. <https://doi.org/10.1097/j.jcrs.0000000000000341>
- [15] Day, A.C., Burr, J.M., Bennett, K., Hunter, R., Bunce, C., Doré, C.J., *et al.* (2021) Femtosecond Laser-Assisted Cataract Surgery Compared with Phacoemulsification: The FACT Non-Inferiority RCT. *Health Technology Assessment*, **25**, 1-68. <https://doi.org/10.3310/hta25060>
- [16] Hansen, B., Blomquist, P.H., Ririe, P., Pouly, S., Nguyen, C., Petroll, W.M., *et al.* (2020) Outcomes of Resident-Performed Laser-Assisted vs Traditional Phacoemulsification. *Journal of Cataract and Refractive Surgery*, **46**, 1273-1277. <https://doi.org/10.1097/j.jcrs.0000000000000253>