

飞秒激光辅助白内障手术矫正角膜散光的研究进展

郭勇*, 张宏#

新疆医科大学第一附属医院眼科, 新疆 乌鲁木齐

收稿日期: 2023年12月8日; 录用日期: 2024年1月2日; 发布日期: 2024年1月9日

摘要

白内障手术中矫正散光的方法目前主要包括角膜松解术和散光矫正型人工晶状体植入术。随着飞秒激光辅助白内障手术(femtosecond laser-assisted cataract surgery, FLACS)在临床中应用越来越广泛, 飞秒激光辅助白内障手术的可预测性和准确性使白内障手术中矫正散光的疗效得到了进一步的提升。本文就飞秒激光辅助白内障手术在角膜散光矫正中的应用进行综述, 以期为眼科医师在白内障手术中角膜散光矫正术式的选择提供帮助。

关键词

飞秒激光, 白内障手术, 散光矫正, 角膜松解术, 散光矫正型人工晶体植入术

Research Progress of Femtosecond Laser-Assisted Cataract Surgery for Correction of Corneal Astigmatism

Yong Guo*, Hong Zhang#

Department of Ophthalmology, The First Affiliated Hospital of Xinjiang Medical University, Urumqi Xinjiang

Received: Dec. 8th, 2023; accepted: Jan. 2nd, 2024; published: Jan. 9th, 2024

Abstract

Methods of astigmatism correction in cataract surgery currently include corneal relaxation and

*第一作者。

#通讯作者。

astigmatism-correcting IOL implantation. As femtosecond laser-assisted cataract surgery (FLACS) has become more and more widely used in clinical applications, the predictability and accuracy of femtosecond laser-assisted cataract surgery have led to a further improvement in the efficacy of astigmatism correction in cataract surgery. This article reviews the application of femtosecond laser-assisted cataract surgery in corneal astigmatism correction, with a view to help ophthalmologists in the selection of corneal astigmatism correction in cataract surgery.

Keywords

Femtosecond Laser, Cataract Surgery, Astigmatism Correction, Corneal Relaxation, Astigmatism-Correcting IOL Implantation

Copyright © 2024 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. 介绍

由于眼球在不同子午线上屈光力不同, 平行光线经过该眼球屈光系统后不能形成一个焦点, 这种屈光状态称为散光。人的视觉质量受散光的影响, 散光会扭曲投射到视网膜上的图像, 导致未矫正的眼睛出现视觉障碍和视物模糊。

迄今为止, 白内障仍然是导致人类失明的主要原因, 超声乳化白内障手术(phacoemulsification cataract surgery, PCS)是目前最主要的手术方式。随着科技的发展, 白内障手术从复明手术正在进入屈光手术时代, 人们对术后视觉质量的要求越来越高。根据我国的流行病学调查数据显示, 白内障摘除术前术眼角膜散光在 1.00~1.50 D 者占 21.3%~22.4%, 1.50~2.00 D 者占 10.6%~12.4%, 超过 2.00 D 者占 8.2%~13.0%。其中, 规则性角膜散光 ≥ 0.75 D, 并有远视力脱镜意愿的白内障患者可以考虑进行散光矫正。角膜散光严重影响着白内障患者术后的视觉质量, 并且角膜散光限制了双焦点及多焦点人工晶体的使用, 柱镜度数每增加 1.0 D, 未矫正远视力就会减少 0.16 logMAR, 视觉敏锐度降低更大(每 1.0 D 柱镜度数降低 0.2311 至 0.3712 logMAR) [1], 因此角膜散光的矫正引起了人们越来越多的关注。在过去的几十年内, 多种术式被用于白内障术中矫正散光, 主要包括角膜松解术和散光矫正型人工晶体植入术。

2. 飞秒激光在白内障术中的应用

飞秒激光辅助的白内障手术又称为“无刀手术”, 飞秒激光平台提供的精确和可重复的切割可以提高手术标准化, 减少手术中与人为因素相关的风险, 并向机器人辅助手术迈进一步。在制定好手术方案后, 飞秒激光被用以制作角膜切口、撕囊、预劈核和制作弧形角膜切口。

2.1. 角膜切口的制作

良好的角膜切口有利于进行白内障手术, 它可以在手术结束后进行良好的切口封闭。尽管以往飞秒激光主要用于板层角膜手术, 但随着时间的推移, 它开始被应用于白内障手术中进行透明角膜切口的制作。使用飞秒激光制作的切口具有可重复性, 并且随着时间的推移可以保持稳定。通常主切口采用三平面结构, 而侧切口形成单平面切口。与手动切口相比, FLACS 制作的切口的伤口裂开更少, 水肿减少, 并且切口结构的可再现性更一致。另一方面, 激光切口标本的形态学分析显示, 与切口更平滑的手动 PCS

相比, 其凋亡细胞计数显著更高, 且飞秒激光角膜切口的切割边缘呈锯齿状[2]。

2.2. 囊膜处理

飞秒激光囊膜切开术(FLC)的一个显著优势是可以制作位置、大小和形状完美的撕囊口。这一优势在接受多焦点人工晶状体(IOL)和散光矫正型人工晶体(TIOL)植入术的患者中很重要, 因为人工晶体的居中性会影响视觉表现。在 1 年的观察期内, FLC 囊口的变化幅度小于手动连续环形撕囊技术(continuous curvilinear capsulorhexis, CCC)制作的撕囊口。但是 FLC 制作的囊口同样存在问题, 包括囊口边缘的强度显示出随着激光能量水平的增加而降低和囊膜切开不完整可能。即使在优化的能量设置下, FLC 与手动 CCC 相比, 表现出更低的抗应力和更高的前径向撕裂倾向; 囊膜切开不完整的原因主要为眼球倾斜瞳孔偏中心、负压吸引不充分导致界面之间存在气泡或分泌物及晶状体浑浊程度较大[3]。此外, 建议从囊膜切开边缘到瞳孔边缘的安全距离为 1.0 mm, 以便充分观察前囊并制作完整的囊膜切口, 该方案可防止对虹膜造成意外损伤, 并减少由于能量冲击波分布到瞳孔边缘而导致的瞳孔缩小。

2.3. 晶状体核预处理

劈核时大部分能量被输送到眼睛中, 其能量会造成内皮细胞损伤和眼部其它结构的潜在损伤。研究表明, 与传统 PCS 相比, 飞秒激光辅助晶状体预处理可将有效超声乳化时间(EPT)缩短 83.6% [4], EPT 的减少可能转化为更低的内皮细胞损失[5], 在一项研究报告, 术后 180 天, FLACS 的内皮细胞损失略低于 PCS (FLACS 为 21.0%, PCS 为 30%) [6]。在基于白内障分级分析病例的研究中, 与传统 PCS 相比, FLACS 中的内皮细胞密度在轻度和成熟期白内障中都有所降低[7]。在过熟期白内障中, 传统白内障超声乳化手术 EPT 较长, 且内皮细胞损伤大于早期白内障[8]。因此, 特别是在过熟期白内障病例中, FLACS 可能显著减少内皮细胞损伤, 并提供比传统 PCS 更快的视力恢复。同时, 内皮细胞损失的减少可能转化为角膜失代偿的较低风险, 并且这种益处在于患有 Fuchs 内皮营养不良的患者中至关重要。由此可以得出结论, 由于 EPT 较短, FLACS 对基线内皮细胞计数较低的患者更有益。

3. 角膜松解术

近年来多项研究证实, 可以通过改变角膜切口的位置、形态、大小、深度、数量等来改变角膜散光情况。根据切口位置不同, 角膜切口矫正散光术式主要包括角膜缘松解切开术(LRIs)或称为周边角膜松解切口(PCRI)、对侧透明角膜切口(OCCI)及散光性角膜切开术(AK)。切口的制作主要通过手工或飞秒激光辅助进行。一项 5 年的连续性研究结果显示[9], 飞秒辅助角膜弧形切开术的稳定性在 5 年内保持良好。但随着时间的推移, 术前顺规散光过矫和逆规散光欠矫的趋势有增加, 其可能的原因主要为顺规散光术源性散光较逆规散光术源性散光大, 其次角膜后表面散光可能是其重要原因。

3.1. 切口计算

目前对于切口的位置、大小及深度的计算方法暂无统一标准。常见的计算方法有使用 Verion 数字导航系统(Alcon, 美国)的散光计算系统; 使用手工制作角膜缘松解切口的参考表计算; 使用在线计算器(<https://www.lricalculator.com/>)进行角膜缘松解切口的计算等。Verion 数字导航系统可用于飞秒激光辅助白内障的生物学测算及手术导航, 但其成本较高; Lricalculator.com 在线计算器为美国强生公司用于计算角膜缘松解切口的产品, 可根据患者年龄, 手术切口位置, 手术源性散光的因素计算松解切口, 并且可以重复免费使用且不会给白内障患者带来额外的经济负担, 其计算方式采用 Donnenfeld Nomogram 原理, 是以角膜光学区直径为 11 mm 来计算的, 然而飞秒激光角膜弧形切口位置设计是按照 9 mm 光学区直径

为准, 因此其计算结果需要矫正。

3.2. 切口制作

LRI 是在角膜周边制作的用于治疗角膜散光的非穿透性切口, 大多数放置在角巩膜缘内 1 mm 处, 是一种安全有效的方法, 可在角膜散光高达 3.0 D 的白内障手术中减少角膜散光。OCCI 是标准同轴小切口白内障手术的改良, 在对侧的陡峭角膜轴上做额外的侧切口。与单切口相比, 成对 OCCI 造成的角膜散光矫正量更大。与 LRI 相比, OCCI 具有优势, 包括更容易操作, 并且不需要测量外周角膜厚度。然而, 因为它们是穿透性切口, 它们造成眼内炎的风险更高。在松弛角膜切口类别内, 也可以做弧形角膜切开术(AK)。由于 AK 更靠近角膜中心(角膜中央 7.0~9.0 mm 内), 因此它对陡峭轴角膜曲率具有更大的影响, 并引起角膜散光的更多变化。

手动制作角膜松解切口的一个问题是可预测性相对较低, 因为切口长度、位置和深度的准确性有限。理论上, 飞秒辅助制作角膜松解切口的优势在于操作方便、安全性和更高的可重复性。因为它可以在不考虑外科医生经验的情况下进行更精确的切口。多项研究均表明, 与手动 AK 相比飞秒激光辅助散光性角膜切开术(FSAK)术后具有更好的最佳矫正视力、裸眼视力、角膜散光及更高的矫正指数[10]。使用飞秒激光可以辅助制作角膜松解切口, 包括穿透性切口或非穿透性基质内切口。一项随机对照实验通过矢量分析比较手工角膜缘松弛切口(LRIs)和角膜内飞秒激光辅助散光角膜切开术(iFAKs)得出结论, iFAKs 的矫正指数更高($P = 0.02$; 95%), 差异向量更小($P = 0.046$; 95%) [11]。另一项研究表明对于 ≥ 0.75 D 的 TIA 患者, 飞秒组 SIA 和校正指数均更高(分别为 0.310 和 0.250, $P < 0.001$)。而对于 TIA 为 0.75 D 及以下的患者, 常规组和飞秒组的过校正率分别为 48.8%和 58.9% ($P < 0.001$) [12]。非穿透性基质内切口可以降低不良反应的风险, 但是由于基质内切口不切开前弹力层, 因此与穿透性切口相比, 其散光矫正效果会降低[13], 穿透性切口与基质内切口矫正指数分别为 0.78 ± 0.32 和 0.38 ± 0.25 ($t = 5.386$, $P < 0.001$) [14]。使用 FLAK 矫正散光的主要难点是使用合适的切口计算公式, 以实现令人满意的结果。此外, 尽管飞秒激光辅助白内障手术(FLACS)的安全性和有效性已得到证实, 但其成本效益分析仍存在争议[15]。

3.3. 优缺点

FLACS 手术的优点: 角膜切口的大小、深度和位置可以控制, 使散光矫正更准确可靠; 可以制作非穿透性基质内切口, 以降低眼内炎等不良反应的风险。缺点: 角膜松解切口计算方式尚无统一标准, FLACS 手术增加了患者经济负担; 患者眼球移动可能影响角膜切口的精确放置, 这可能会造成不规则散光、散光矫正过度或矫正不足。

4. 散光矫正型人工晶体植入术

散光矫正型人工晶状体(Toric IOL)在临床得到了越来越广泛的应用。多项临床研究结果表明, Toric IOL 的散光矫正范围广, 手术预测性强, 术后效果良好、稳定, 可以显著降低白内障患者术后的残留散光度数, 提高患者的裸眼远视力和脱镜率。

4.1. 人工晶体的居中性

研究发现, 人工撕囊患者发生人工晶体偏中心的可能性是 FLACS 晶状体囊切开术患者的 6 倍。在为接受多焦点和散光矫正型 IOL 的患者进行撕囊时, 居中是关键, 因为人工晶体的居中性会影响患者术后的视觉质量[16]; 研究表明, FLC 中囊膜切开术的大小、形状比手动连续环形撕囊(CCC)更精确, 人工晶体植入术后居中性更好。

4.2. 散光矫正型人工晶体的对准

术中散光矫正型 IOL 的准确对准是实现预测屈光结果的基本步骤。手术时, 患者从直立位移动到卧位时, 眼球会转动, 因此必须在坐位时标记适当的角膜轴位。术中标记技术的进步有助于散光矫正型 IOL 的对准, 自动图像引导系统, 如 Verion (Alcon) 和 Callisto (Carl Zeiss, 德国)。Verion 是一种图像引导系统, 该系统拍摄眼睛的高分辨率参考图像, 进而用于术中跟踪并自动校正运动和旋转。数据与 LenSx 激光系统 (Alcon) 和大多数手术显微镜兼容。Callisto 是另一种可用于术中精确对准散光矫正型 IOL 的技术。与 Verion 系统不同, 它不需要额外的图像或显微镜中的图像分割器。但是, 需要配备生物测量仪 (IOLMaster500/700), 以便获得识别轴和 Zeiss Lumera 显微镜所需的图像。

行散光矫正型人工晶体植入术的患者大多视力恢复良好, 满意度高; 然而, 这些晶状体在术后可能发生旋转, 特别是在术后早期, 大多数人工晶体旋转发生在术后 10 天内。由于任何植入的 IOL 都可能错位, 如果发现预期和测量的术后屈光度之间存在显著差异, 则应在术后确认适当的 IOL 位置。如前所述, 人工晶体轴位离轴每一度导致散光矫正损失约 3.5%。旋转被认为是由以下几个原因造成, 包括术后眼压下降(这可能会使前房不稳定), 撕囊口的大小和居中性, 植入的散光矫正型 IOL 的设计特点, 以及大囊袋和残留粘弹剂等。FLACS 手术在撕囊时的优点可以减少人工晶体旋转的可能性, 改善患者术后视觉质量。

4.3. 术源性散光(Surgically Induced Astigmatism, SIA)

良好的手术切口对白内障手术十分重要, 这是白内障手术顺利进行的关键, 不理想的透明角膜切口可能会造成更大的术源性散光、角膜内皮错位、角膜后弹力层脱离、切口愈合不良及眼内炎的风险等。手术切口的位置、大小和形态均会对 SIA 的大小产生影响。与手动切口相比, FLACS 手术制作的角膜切口具有更小的伤口裂开率、减少的伤口水肿和更一致的切口结构, 这些优势对准确控制 SIA 十分重要。

4.4. 优缺点

飞秒激光辅助白内障联合散光矫正型人工晶状体植入术的可预测性和稳定性相对较高, 相比传统超声乳化联合 Toric IOL 植入术而言降低了人工晶状体偏心、倾斜及旋转的可能性, 术源性散光控制更佳, 在术前的手术设计中可以更准确的预测术后散光, 增强了散光矫正的有效性, 但散光矫正型人工晶状体的屈光度数比较有限, 联合飞秒激光辅助白内障手术的价格更高, 造成了更大的经济负担。

5. 讨论

上海和平医院最近一项研究通过比较双眼均有 0.75 D 至 2.25 D 角膜散光的患者给予一眼散光矫正型双焦点人工晶体(TIOL), 一眼给予三焦点人工晶体植入联合飞秒激光辅助角膜松解术(FSAK)治疗散光的术后视力和视觉质量得出结论[17], 在长期随访中, 双焦点 TIOL 的稳定性和有效性高于三焦点 IOL 和 FSAK; 然而, 对于轻度或中度 CA 患者, 混合匹配手术包括在一只眼睛中植入三焦点 IOL 和 FSAK, 在另一只眼睛中植入双焦点 TIOL, 可以提供比在两只眼睛中的任一手术更大的总体 VA 和视觉质量。这项研究给出了白内障术中散光矫正的新思路, 对要求更高视觉质量的患者可以提供一种新的解决方案。

6. 总结

散光矫正型人工晶体植入术具有较好的可预测性及远期稳定性, 但存在旋转、偏心、倾斜等引起矫正疗效降低的缺点; 角膜松解术在低度数散光矫正方面同样得到了良好的矫正效果, 且不需要考虑散光矫正型人工晶体的适应症, 但是可预测性和远期稳定性欠佳。因此, 两种术式均可以较好地矫正散光,

且具有各自的特点。

在屈光性白内障手术时代, FLACS 为可重复高精度的白内障手术开辟了一条新途径, 尽管在常规白内障手术中 FLACS 与 PCS 的术后最佳矫正视力和裸眼视力并没有表现出十分显著的差异且 FLACS 比 PCS 造成了更大的经济负担[11], 但是在优化散光矫正疗效、实现优质人工晶状体性能和满足患者的高期望方面 FLACS 表现出了明显的优势。在潜在的复杂的高风险病例中, 它也是一种有效工具, 可以降低术中和术后并发症的风险。FLACS 同样也存在禁忌症, 严格掌控 FLACS 的适应症与禁忌症十分重要。同时, FLACS 与 PCS 各有自己独特的优缺点且不同术式之间也各有差异, 外科医生在选择手术方式时应根据患者自身的特点, 选择符合患者病情需求的术式。

参考文献

- [1] Berdahl, J.P., Hardten, D.R., Kramer, B.A., *et al.* (2018) Effect of Astigmatism on Visual Acuity after Multifocal versus Monofocal Intraocular Lens Implantation. *Journal of Cataract and Refractive Surgery*, **44**, 1192-1197. <https://doi.org/10.1016/j.jcrs.2018.06.048>
- [2] das Neves, N.T., Boianovsky, C. and Lake, J.C. (2023) Functional Profile of a Customized Wound Parameter in Femtosecond Laser-Assisted Corneal Incision for Cataract Surgery. *Clinical Ophthalmology*, **17**, 175-181. <https://doi.org/10.2147/OPHTH.S384660>
- [3] Wang, W., Chen, X., Liu, X., *et al.* (2022) Lens Capsule-Related Complications in Femtosecond Laser-Assisted Cataract Surgery: A Study Based on Video Analysis. *British Journal of Ophthalmology*, **107**, 906-911. <https://doi.org/10.1136/bjophthalmol-2021-320842>
- [4] Wang, H., Chen, X., Xu, J., *et al.* (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>
- [5] Chen, L., Lin, X., Li, H.-Y., *et al.* (2021) Clinical Outcomes and Complications between FLACS and Conventional Phacoemulsification Cataract Surgery: A PRISMA-Compliant Meta-Analysis of 25 Randomized Controlled Trials. *International Journal of Ophthalmology*, **14**, 1081-1091. <https://doi.org/10.18240/ijo.2021.07.18>
- [6] Krarup, T., Ejstrup, R., Mortensen, A., *et al.* (2019) Comparison of Refractive Predictability and Endothelial Cell Loss in Femtosecond Laser-Assisted Cataract Surgery and Conventional Phaco Surgery: Prospective Randomised Trial with 6 Months of Follow-Up. *BMJ Open Ophthalmology*, **4**, e000233. <https://doi.org/10.1136/bmjophth-2018-000233>
- [7] Chee, S.-P., Yang, Y. and Wong, M.H.Y. (2021) Randomized Controlled Trial Comparing Femtosecond Laser-Assisted with Conventional Phacoemulsification on Dense Cataracts. *American Journal of Ophthalmology*, **229**, 1-7. <https://doi.org/10.1016/j.ajo.2020.12.024>
- [8] Yong, W.W.D., Chai, H.-C.C., Shen, L., *et al.* (2018) Comparing Outcomes of Phacoemulsification with Femtosecond Laser-Assisted Cataract Surgery in Patients with Fuchs Endothelial Dystrophy. *American Journal of Ophthalmology*, **196**, 173-180. <https://doi.org/10.1016/j.ajo.2018.08.006>
- [9] Chan, T.C.Y., Ng, A.L.K., Wang, Z., *et al.* (2020) Five-Year Changes in Corneal Astigmatism after Combined Femtosecond-Assisted Phacoemulsification and Arcuate Keratotomy. *American Journal of Ophthalmology*, **217**, 232-239. <https://doi.org/10.1016/j.ajo.2020.05.004>
- [10] Sorkin, N., Mimouni, M., Santaella, G., *et al.* (2020) Comparison of Manual and Femtosecond Astigmatic Keratotomy in the Treatment of Postkeratoplasty Astigmatism. *Acta Ophthalmologica*, **99**, e747-e752. <https://doi.org/10.1111/aos.14653>
- [11] Stanojeic, N., Roberts, H.W., Wagh, V.K., *et al.* (2020) A Randomised Controlled Trial Comparing Femtosecond Laser-Assisted Cataract Surgery versus Conventional Phacoemulsification Surgery: 12-Month Results. *British Journal of Ophthalmology*, **105**, 631-638. <https://doi.org/10.1136/bjophthalmol-2020-316311>
- [12] Ahn, H., Jun, I., Seo, K.Y., *et al.* (2022) Femtosecond Laser-Assisted Arcuate Keratotomy for the Management of Corneal Astigmatism in Patients Undergoing Cataract Surgery: Comparison with Conventional Cataract Surgery. *Frontiers in Medicine*, **9**. <https://doi.org/10.3389/fmed.2022.914504>
- [13] Wang, L., Scott, W., Montes de Oca, I., *et al.* (2022) Outcome of Astigmatism Correction Using Femtosecond Laser Combined with Cataract Surgery: Penetrating vs Intrastromal Incisions. *Journal of Cataract and Refractive Surgery*, **48**, 1063-1072. <https://doi.org/10.1097/j.jcrs.0000000000000911>
- [14] 张帆, 李绍伟, 霍冬梅, 等. 白内障术中飞秒激光弧形角膜切开术矫正角膜散光的疗效[J]. 中华眼视光学与视觉科学杂志, 2023, 25(1): 24-32.

-
- [15] Kolb, C.M., Shajari, M., Mathys, L., *et al.* (2020) Comparison of Femtosecond Laser-Assisted Cataract Surgery and Conventional Cataract Surgery: A Meta-Analysis and Systematic Review. *Journal of Cataract and Refractive Surgery*, **46**, 1075-1085. <https://doi.org/10.1097/j.jcrs.0000000000000228>
- [16] Lee, J.A., Song, W.K., Kim, J.Y., *et al.* (2019) Femtosecond Laser-Assisted Cataract Surgery versus Conventional Phacoemulsification: Refractive and Aberrometric Outcomes with a Diffractive Multifocal Intraocular Lens. *Journal of Cataract and Refractive Surgery*, **45**, 21-27. <https://doi.org/10.1016/j.jcrs.2018.08.032>
- [17] Shen, J., Hua, Z., Zhang, L., *et al.* (2023) Comparison of Astigmatism Correction and Visual Outcomes in Mix-and-Match Implantations of Trifocal Intraocular Lenses with Femtosecond Laser-Assisted Arcuate Keratotomy and Contralateral Bifocal Toric Intraocular Lenses. *Frontiers in Medicine*, **10**, Article ID: 1237319. <https://doi.org/10.3389/fmed.2023.1237319>