

新型人工晶状体在治疗后发性白内障中的研究进展

翟欣然^{1,2},陈志敏²,许衍辉²,张 越²

引用:翟欣然,陈志敏,许衍辉,等. 新型人工晶状体在治疗后发性白内障中的研究进展. 国际眼科杂志, 2025, 25(10): 1611-1616.

基金项目:河北省医学科学研究课题计划(No.20250250)

作者单位:¹(050017)中国河北省石家庄市,河北医科大学眼科学教研室;²(054001)中国河北省邢台市,河北省眼科医院河北省眼科学重点实验室 河北省眼部疾病临床医学研究中心

作者简介:翟欣然,在读硕士研究生,研究方向:白内障、晶状体疾病及屈光。

通讯作者:张越,博士,副主任医师,硕士研究生导师,研究方向:白内障、晶状体疾病及屈光。zhangyueyk@163.com

收稿日期:2025-02-05 修回日期:2025-08-21

摘要

后发性白内障(PCO)是白内障术后常见并发症,由残余晶状体上皮细胞(LECs)增殖迁移引发。虽然掺钕钇铝石榴石(Nd:YAG)激光后囊切开术可治疗PCO,但可能引起黄斑囊样水肿等并发症,因此从源头预防PCO的形成更具临床意义。尽管人工晶状体(IOL)的材料与设计不断改进,但难以彻底消除PCO。文章综述了新型表面改性IOL的研究进展,包括抗生物污染IOL(减少LECs黏附)、增强黏连IOL(促进囊袋贴合)、微图案IOL(物理抑制迁移)、光热/光动力IOL(光诱导LECs凋亡)及载药IOL(缓释药物)。这些改性技术通过物理、化学或生物活性机制协同抑制LECs增殖,显著降低PCO发生率,同时规避了激光治疗的潜在风险。文章旨在为IOL优化设计提供参考,推动白内障手术从被动治疗转向主动预防,对改善患者长期预后具有重要价值。

关键词:后发性白内障;人工晶状体;生物材料;表面改性

DOI:10.3980/j.issn.1672-5123.2025.10.11

Research progress of novel intraocular lens in the treatment of posterior cataract

Zhai Xinran^{1,2}, Chen Zhimin², Xu Yanhui²,
Zhang Yue²

Foundation item: Hebei Provincial Medical Science Research Project (No.20250250)

¹Department of Ophthalmology Teaching and Research, Hebei Medical University, Shijiazhuang 050017, Hebei Province, China;

²Hebei Eye Hospital; Hebei Provincial Key Laboratory of Ophthalmology; Hebei Provincial Clinical Research Center for Eye Diseases, Xingtai 054001, Hebei Province, China

Correspondence to: Zhang Yue. Hebei Eye Hospital; Hebei Provincial Key Laboratory of Ophthalmology; Hebei Provincial

Clinical Research Center for Eye Diseases, Xingtai 054001, Hebei Province, China. zhangyueyk@163.com

Received:2025-02-05 Accepted:2025-08-21

Abstract

Posterior capsule opacification (PCO) is a common postoperative complication of cataract surgery, primarily caused by the proliferation and migration of residual lens epithelial cells (LECs). Although neodymium-doped yttrium aluminum garnet (Nd:YAG) laser posterior capsulotomy effectively treats PCO, it carries risks of complications such as cystoid macular edema (CME). Thus, preventing PCO formation is of critical clinical importance. Despite advancements in intraocular lens (IOL) materials and designs, achieving complete PCO eradication remains challenging. This review systematically examines recent advancements in surface-modified IOLs, including anti-biofouling IOL (reducing LECs adhesion), capsular adhesion-enhanced IOL (promoting capsular bag integration), micro-patterned IOL (physically inhibiting migration), photothermal/photodynamic IOL (inducing light-activated LECs apoptosis), and drug-eluting IOL (sustained drug release). These surface modification strategies demonstrate synergistic effects through complementary mechanisms (including physical barrier formation, chemical intervention, and bioactive regulation), effectively suppressing LECs proliferation while significantly reducing PCO incidence. Importantly, these approaches eliminate the risks associated with conventional Nd:YAG laser treatment, offering substantial advantages. By providing a comprehensive evaluation of these cutting-edge technologies, this review serves as a valuable reference for IOL design optimization. It represents a paradigm shift in cataract management strategies, transitioning from reactive therapeutic interventions to proactive preventive measures, and ultimately leads to improving long-term visual outcomes for patients.

KEYWORDS: posterior capsule opacification; intraocular lens; biomaterials; surface modification

Citation: Zhai XR, Chen ZM, Xu YH, et al. Research progress of novel intraocular lens in the treatment of posterior cataract. Guoji Yanke Zazhi (Int Eye Sci), 2025, 25(10): 1611-1616.

0 引言

白内障是全球范围内最主要的致盲性眼病。目前唯一有效的治疗方法是超声乳化联合人工晶状体

(intraocular lens, IOL) 植入术。尽管手术技术已相当成熟, 但术后后发性白内障 (posterior capsule opacification, PCO) 仍严重影响患者视力。据统计, 成人白内障术后 5 a 内 PCO 发生率约 20% - 40%, 婴幼儿可高达 100%^[1]。PCO 是残余晶状体上皮细胞 (lens epithelial cells, LECs) 在后囊增殖迁移和上皮-间质转化 (epithelial to mesenchymal transition, EMT) 的结果^[2]。目前, 钕:YAG (Nd:YAG) 激光后囊切开术是治疗 PCO 的有效方法, 但可能引发黄斑囊样水肿、视网膜脱离等并发症。因此, 主动预防 PCO 具有重要的临床价值。IOL 自应用以来, 其材料和设计不断革新, 表面改性 IOL 为预防白内障术后并发症提供新思路。本文基于多项 PCO 相关临床研究, 系统阐述表面改性 IOL 的研究进展, 以期为临床实践提供一定的理论指导。

1 PCO 的发生机制

白内障术中植入 IOL 后, 残留的 LECs 会因手术创伤激活, 进而发生增殖与迁移, 这是 PCO 形成的关键机制。PCO 主要分为两型: (1) 纤维型 PCO 是 LECs 经历 EMT 分化为肌成纤维细胞, 导致后囊膜纤维化; (2) 珍珠型 PCO 由赤道部 LECs 在后囊膜形成纤维样细胞团块或 Elschnig 珠样小体^[3]。目前, LECs 行为调控的分子机制尚未完全阐明, 但已知手术会改变房水中生长因子和炎症因子水平, 这些细胞因子通过激活相关信号通路调控 LECs 的生物学行为。

2 IOL 预防 PCO

根据 PCO 的发病机制, 其预防措施主要包括两方面: 减少 LECs 残留和调节 LECs 行为。术中后囊膜抛光和术后抗炎药物应用可减少 LECs 残留。而调控 LECs 行为则需关注 IOL 的生物相容性。Amon^[4] 将 IOL 生物相容性分为葡萄膜相容性 (反映 IOL 引发的炎症反应程度) 和囊膜相容性 (体现抑制后囊混浊的能力)。IOL 的生物相容性与其材料、设计和表面特性密切相关。目前临床常用的丙烯酸 IOL 中, 亲水性材质虽能减轻炎症反应但易黏附 LECs, 而疏水性材质虽具有良好透光性却存在较高感染

风险。最新研发的亲水共聚物乙二醇苯醚甲基丙烯酸酯展现出良好的抗黏附性^[5]。在 IOL 设计方面, 直角边缘可通过形成机械屏障产生“囊袋弯曲效应”, 从而有效阻止 LECs 向光学区迁移。Maedel 等^[6] 研究证实, 直角边缘 IOL 的 PCO 发生率显著低于圆形边缘, 且囊袋弯曲越尖锐, 抑制效果越显著。IOL 作为一种永久性眼内植入物, 可用作药物递送系统, 通过浸泡、超临界浸渍等技术负载药物, 在眼内持续释放, 有效提高局部药物浓度并减少全身副作用。除载药 IOL 外, 抗生物污染 IOL、增强黏连 IOL 及光热/光动力 IOL 等新型表面改性 IOL 不断涌现, 为预防 PCO 等术后并发症提供了新思路。本文将对上述创新 IOL 的作用机制与研究进展进行系统综述。

3 表面改性 IOL

3.1 抗生物污染 IOL 抗生物污染 IOL 通过表面修饰防污聚合物减少生物黏附。2-甲基丙烯酰氧基乙基磷酸胆碱 (2-methacryloyloxyethyl phosphorylcholine, MPC) 具有良好的亲水性和生物相容性, 能在 IOL 表面形成水合层, 有效抑制蛋白质、细胞和细菌的黏附。MPC 修饰的生物材料广泛应用于医疗领域, 通过等离子体技术将 MPC 修饰于疏水性硅胶 IOL 表面, 其亲水性显著提高。体外实验证实, MPC-IOL 能抑制血小板、细胞和细菌的黏附; 动物实验进一步表明, 该 IOL 可使术后 3 mo 的 PCO 发生率降低 ($P < 0.05$)。此外, MPC-IOL 具有优异的抗硅油黏附特性, 尤其适用于需硅油填充的复杂病例。甲基丙烯酸 (methyl acrylic acid, MAA) 与 MPC 共聚形成的 P(MPC-MAA) 经氨等离子体接枝后, 其表面负电荷显著增强, 可更有效抑制蛋白质吸附和细胞黏附。该共聚物还能促进 MPC 在房水中的扩散, 降低炎症风险, 但仅能预防前囊膜混浊, 对 PCO 抑制效果有限^[7]。磺基甜菜碱甲基丙烯酸酯 (sulfobetaine methacrylate, SBMA) 通过可逆加成-断裂链转移聚合在 IOL 表面构建梳状聚合物刷, 同样赋予 IOL 良好的亲水性^[8]。实验证实, 这些改性 IOL 能有效减少生物黏附, 抑制 LECs 增殖, 具有良好的 PCO 预防效果。

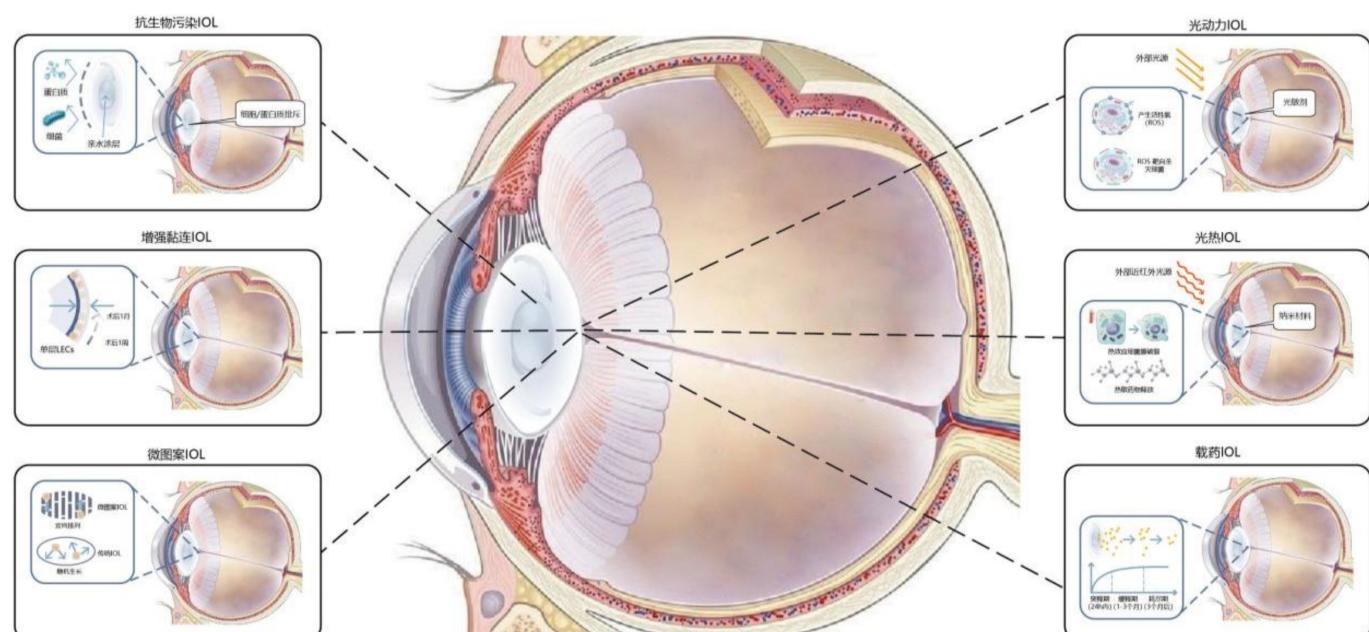


图 1 PCO 预防的主要 IOL 类型示意图。

虽然上述改性 IOL 能有效减少细胞黏附,但难以同时维持 IOL 与后囊膜的紧密贴合。为此, Yang 等^[9]开发的新型水凝胶 IOL 采用差异化表面修饰:前表面通过 SBMA/MPC 两性离子涂层抑制 LECs 黏附,晶状体襻和后表面通过多巴胺修饰增强囊膜黏附力。该材料经冻融(freeze-thaw, FT)循环处理,兼具力学稳定性和高透光性,但研究仍存在以下局限:(1)尽管冻融循环处理使水凝胶机械强度接近天然晶状体,但长期植入稳定性仍需验证;(2)若晶状体襻力学性能不足,可能因囊膜不对称纤维化而导致 IOL 偏位;(3)当前设计缺乏针对转化生长因子-β(transforming growth factor-beta, TGF-β)介导的肌成纤维细胞分化的抑制能力^[10]。最新研究采用两性离子聚合物羧基甜菜碱[poly(carboxybetaine), PCB]-共-多巴胺甲基丙烯酰胺与阿米卡星(Amikacin, AMK)结合,在 IOL 上制备出具有防污和抗菌双重功能的 PCB/AMK 涂层。动物实验显示,对照组术后 14 d 出现 PCO 并逐渐加重,而实验组后囊膜始终维持透明。该涂层在保持 IOL 透光率的同时,可实现 AMK 的持续释放,为术后并发症的防控提供了新方案^[11]。

3.2 增强黏连 IOL 亲水性 IOL 的 PCO 发生率远高于疏水性 IOL。Linnola 等^[12]提出“三明治”理论指出,疏水性 IOL 能够诱导单层 LECs 与后囊膜形成密闭夹层结构,从而有效抑制细胞迁移。Jaitli 等^[13]的后续研究进一步揭示,纤维连接蛋白可增强丙烯酸 IOL 的囊膜黏附,但对聚甲基丙烯酸甲酯 IOL 和有机硅 IOL 无显著影响。此外,亲水性丙烯酸 IOL 吸附的纤维连接蛋白少于疏水性 IOL,导致 IOL 与后囊膜间的细胞浸润增加,更易引发 PCO。为改善亲水性材料的生物黏附性,研究者采用精氨酸-甘氨酸-天冬氨酸(arginine-glycine-aspartic acid, RGD)肽修饰 IOL 表面。RGD 肽作为细胞黏附分子,特异性识别多种整合素。实验显示,RGD 肽修饰 IOL 在 LECs 黏附、EMT 等指标上与疏水性 IOL 相当^[14]。Xiang 等^[15]在疏水性丙烯酸 IOL 前表面构建聚多巴胺(polydopamine, PDA)/硫酸庆大霉素亲水涂层,后表面维持疏水性。结果显示,前表面抑制 74% 的细菌黏附,后表面吸附大量 IV 型胶原和纤维连接蛋白,形成稳定的“三明治”密封结构。该 IOL 在预防 PCO 和眼内炎方面具有良好潜力,但其复杂的制备工艺仍需优化。未来增强黏连 IOL 将聚焦于优化表面改性工艺以提高稳定性,并开发多功能复合涂层,从而为白内障患者提供更优的长期视觉预后。

3.3 微图案 IOL Sharklet 技术通过仿生微图案调控 LECs 的迁移行为。该技术通过微图案调控细胞生物学行为,特别是整联蛋白介导的 LECs 迁移。Magin 等^[16]的研究表明,采用 Sharklet 微图案保护膜的 IOL 在体外 PCO 模型中可使 LECs 表面覆盖率降低达 80%,且凸起型微结构的抑制效果显著优于凹陷型结构。这一发现通过 Ellis 等^[17]的兔眼植入实验得到进一步验证:微图案的非连续性几何特征能够精确调控黏着斑的形成,从而定向引导细胞迁移。技术优化方面,最新研究利用飞秒激光制备的 5-40 μm 微图案化聚甲基丙烯酸羟乙脂 IOL 显示,当微结构尺寸与 LECs 直径相匹配时,迁移抑制效果达到峰值($P < 0.05$),且无炎症反应^[18]。值得注意的是,组织工程领域的聚乙二醇二丙烯酸酯(polyethylene glycol diacrylate, PEGDA)

水凝胶微图案化技术为 IOL 表面工程提供了新思路。通过设计仿生拓扑结构(如波浪形、蜂巢状),可物理阻隔 LECs 迁移,这与当前抗 PCO 的微图案 IOL 研发方向高度契合^[19]。尽管微图案化 IOL 在防治后 PCO 方面已取得重要进展,特定尺寸和结构的微图案可显著抑制 LECs 迁移,且飞秒激光制造的微图案化 IOL 展现出良好的生物相容性。然而,其长期安全性、最佳参数标准化、动态环境下的稳定性及与其他抗 PCO 策略的协同作用仍需进一步研究。

3.4 光热 IOL 光热疗法(photothermal therapy, PTT)是指一种通过近红外光激发光热转换纳米材料,将光能转化为局部热能以实现精准治疗的技术。该技术在抗菌和抗肿瘤领域已取得重要突破,其作用机制与 PCO 防治高度相关:适度的热效应可破坏细胞骨架结构,抑制异常细胞迁移,这与 PCO 中 LECs 的病理行为高度相似。Lin 等^[20]的研究表明,经二氧化硅包被的金纳米棒修饰 IOL 可使兔眼 PCO 发生率从 100% 显著降低至 33.3%,且未引起角膜内皮损伤。但金纳米材料存在成本高昂和长期滞留毒性等局限。为此,Liu 等^[21]使用纳米多孔金(nanoporous gold, NPG)修饰 IOL(R-IOL),NPG 具有较高的比表面积,在近红外光照射下能产生高效光热转换,通过精确温控选择性地诱导 IOL 边缘 LECs 凋亡,同时保持光学中心区的透明度。相比传统金纳米棒,该技术具有更高的光热效率和更好的靶向性。此外,聚多巴胺/聚乙烯亚胺^[22]和聚乙烯亚胺/还原氧化石墨烯^[23]等聚合物涂层同样具备优异的光热性能,其制备工艺更简单、稳定性更好。体内实验证实,这类光热 IOL 不仅能有效抑制 LECs 迁移,还表现出显著的抗菌活性。

最新突破集中在光热-药物协同系统,研究者开发了一种基于 Ti3C2 MXene 纳米片负载雷帕霉素的智能 IOL。实验结果表明,该 IOL 在 808 nm 近红外光照射(1 W/cm²)下表现出优异的光热性能(1 min 升温至 50 °C)和可控药物释放特性(48 h 释放率达 74.1%)。在兔眼模型中,每周 1 次光热治疗可显著抑制后发性白内障形成(PCO 评分 0.25 vs 对照组 3.50)^[24]。负载阿霉素(doxorubicin, DOX)的黑磷纳米片也具有相似的功能^[25]。目前大量研究已证实光热 IOL 的临床应用潜力,光热 IOL 在预防白内障术后炎症及 PCO 方面展现了良好的前景。不过,其临床转化仍面临挑战,尤其是不同物种(如人类与兔模型)对光热敏感性的差异需进一步研究验证。

3.5 光动力 IOL 在 PCO 的光学防治策略中,光动力疗法(photodynamic therapy, PDT)因其非药物干预特性展现出独特优势。其核心机制在于光敏剂被特定波长激活后产生细胞毒性活性氧,通过引发蛋白质变性、脂质过氧化等反应,最终导致靶细胞凋亡。载有光敏剂二氢卟酚-e6(chlorin e6, Ce6)的 IOL 在兔眼实验中表现出 100% 的 PCO 预防率,且未诱发急性炎症^[26]。但技术面临制备工艺复杂和成本高昂等瓶颈。为提升可行性,研究者开发了两种改良方案,即 Ce6 修饰的 PDA 涂层^[27]以及采用旋转涂层技术制备的同心环状光动力涂层^[28],在体内实验中植入两种光动力 IOL 组后囊膜混浊程度明显下降。

为了提升光动力 IOL 的效率,多功能集成成为最新研究方向。Fang 等^[29]结合光动力与光热疗法,开发了 PDA/

吲哚菁绿复合 IOL。吲哚菁绿使 PDA 光热效应提升 6 倍,近红外照射 24 h 内完全清除 LECs(存活率<5%)。另一项研究结合光动力、光热与药物疗法,改良后的 IOL 能够利用低功率近红外光触发光热和光动力效应,同时升温触发药物释放,借助级联效应显著抑制 PCO^[30]。不同于上述化学方法,Karim 等^[31]开发了一种基于偶氮苯-β 环糊精的光响应型 IOL 涂层系统。该系统通过 365 nm 紫外光调控,能选择性抑制 α-平滑肌肌动蛋白和炎性白介素 6 表达,并降低细胞黏附力,与传统 PDT 的化学杀伤机制不同,该技术通过物理性调控细胞行为预防 PCO。目前,PDT 在 PCO 防治领域呈现出从单一疗法向多功能协同系统发展的趋势,未来研究应重点关注可临床化光敏材料开发和个性化治疗方案优化,以推动眼科治疗向精准化、个性化方向发展。

3.6 载药 IOL 传统眼部给药方式(如滴眼液、注射等)因血-眼屏障等因素导致药物生物利用度低。载药 IOL 作为一种新型药物递送系统,通过药物浸泡或超临界浸渍等技术实现药物负载,可实现药物在前房的持续释放,显著提高局部药物浓度,有效预防 PCO 的发生。

3.6.1 抗炎药物 白内障术后炎症反应可诱导 LECs 增殖、迁移及 EMT,从而加速 PCO 的进程。载有抗炎药物的 IOL 可通过局部抗炎作用调控 LECs 行为。Brookshire 等^[32]研究发现,塞来昔布浸泡的 IOL 在 4 wk 时 PCO 抑制效果优于溴芬酸钠滴眼液组($P<0.05$),但 56 wk 后效果逆转,这可能与药物快速释放有关导致的浓度不足有关。Zhang 等^[33]利用超声喷涂技术,以聚乳酸-羟基乙酸共聚物[poly(lactic-co-glycolic) acid, PLGA]为载体,构建了溴芬酸钠缓释 IOL,该 IOL 可持续释放溴芬酸钠达 14 d,但仍存在明显的突释现象(前 2 d 释放量达 80%)。为解决药物突释问题,开发能够维持长期有效药物浓度的眼内缓释系统至关重要。近期,研究者制备了一种新型吲哚美辛 IOL,在兔眼 PCO 模型中,该药物可持续释放 28 d,展现出良好的抗炎及抗 PCO 效果^[34]。

3.6.2 抗生素类药物 IOL 可用于负载抗生素药物,以预防或治疗术后并发症。莫西沙星(moxifloxacin, MXF)是一种常用于预防眼内炎的抗生素,其抗菌谱广泛,涵盖革兰氏阳性菌、阴性杆菌、非典型病原体及厌氧菌。通过浸泡法制备的 MXF-IOL 在保持优异光学性能(可见光区透光率 $\geq 90\%$)的同时,可实现持续药物释放(释放周期达 2 wk)^[35]。类似地,Tan 等^[36]采用超声喷涂技术制备左氧氟沙星载药 IOL(载药量 3%~5%),可实现 14 d 持续药物释放,显著抑制术后炎症。这些研究为抗生素载药 IOL 在预防术后眼内炎等并发症方面的应用提供了重要依据。

3.6.3 抗肿瘤药物 抗肿瘤药物通常分为细胞毒性药物(如 5-氟尿嘧啶等)和非细胞毒性药物(如吉非替尼等)两类,这些药物能抑制 LECs 增殖、纤维化及细胞胶原蛋白的产生,但其眼内应用的安全性仍需系统评估。基于逐层静电自组装技术构建的多层膜结构可显著降低药物毒性并实现可控释放。Huang 等^[37]利用此技术构建的透明质酸/壳聚糖/紫杉醇多层膜结构 IOL 实现了 28 d 以上的可控药物释放,呈现出初期(前 7 d)快速释放和后期稳定缓释的特征。近期研究通过结合 DOX 纳米颗粒进一步优化了该技术的缓释性能^[38]。然而,该技术在应用过程中

存在制备工艺复杂、生产成本较高等局限性,这在一定程度上限制了其临床应用。Wang 等^[39]开发的金属-多酚网络涂层技术(负载 AZD0364 和紫檀芪)不仅制备工艺简便,而且展现出显著的 PCO 抑制效果,为 IOL 载药系统提供了新的研究方向。这些技术的突破为平衡药物疗效与安全性提供了重要解决方案。

3.6.4 免疫抑制剂 免疫抑制剂能够诱导 LECs 调亡。利用 PLGA 制备的药物缓释装置在眼内通过水解酯键实现降解,其降解周期可通过调节单体比例精确控制。甲氨蝶呤-PLGA 涂层 IOL 可实现 14 d 持续释放,且对角膜内皮无显著毒性^[40]。Lu 等^[41]采用旋转涂层技术设计了一种同心环状载药 PLGA 涂层。该涂层中央薄,周围厚,这种结构确保了 IOL 的高透光率。进一步优化涂层参数,将免疫抑制剂环孢素 A 负载至 PLGA 涂层,制备改性 IOL,这种 IOL 能够在术后 4~6 wk 内将环孢素 A 维持在稳定治疗浓度,体内外实验均证明其具有良好的抑制细胞增殖效果,实现了治疗和视觉质量的双重保障。

当前载药 IOL 研究取得重要突破,通过创新载药技术(如 PLGA 缓释系统等)显著提升了药物递送效率,将药物持续释放时间不断延长。未来需重点发展智能载药系统,优化协同治疗策略,并简化制备工艺,以推动 IOL 向“治疗-预防”一体化平台转型。

4 新型 IOL 的不足与展望

IOL 表面功能涂层可调控细胞行为,抑制 PCO。目前临床广泛应用的肝素化 IOL 虽能减少细胞黏附,但其长期疗效仍存在局限。新型功能涂层研究面临以下关键问题:载药 IOL 目前主要处于动物实验阶段,其眼内毒性评估和药物控释技术优化仍是待解决的关键问题,特别是需要克服药物初期突释和后期释放不足等技术瓶颈^[42]。光热与光动力 IOL 需通过动物模型系统评估其毒理学特性、药代动力学及生物相容性。材料的形态、结构、浓度及表面化学性质等因素显著影响其安全性,尽管金纳米颗粒因其化学惰性被广泛应用,但其难降解性和潜在长期毒性仍需优化^[43];相比之下,有机光热纳米材料具有良好的可降解性和可修饰性,更具临床潜力。光响应材料具有较低的细胞毒性和 PCO 发生率。然而,该材料存在两个主要问题:(1)光热转化过程可能导致视网膜损伤;(2)其细菌黏附特性可能增加眼内炎风险,需要在临床应用中进行严格评估和控制^[44]。最新一项研究基于介孔二氧化硅纳米颗粒构建了酶催化级联系统,通过层层自组装技术修饰于 IOL 表面。该体系可利用眼内葡萄糖原位产生 ROS,无需外源刺激,显著降低了组织毒性。实验证实,该改性 IOL 在保持光学性能的同时能有效抑制 PCO^[45]。

新型 IOL 的研发为临床白内障治疗带来了革命性突破。特别是载药缓释 IOL 和抗生物污染 IOL 已展现出显著的临床优势。当前,改性 IOL 面临的主要制约因素包括:(1)大多数相关研究仍停留在动物实验阶段,其临床应用的安全性和有效性尚待进一步验证;(2)复杂的生产工艺导致成本居高不下,限制了推广发展;(3)个体化治疗方案的缺乏,特别是针对特殊人群(如儿童患者、糖尿病患者等)的差异化 IOL 设计尚不完善。未来研究应重点关注以下几个发展方向:(1)开发智能化响应型 IOL,实现精准按需治疗;(2)构建多机制协同的一体化防治体

系,整合药物缓释、光热疗法和物理屏障等多种干预策略;(3)推进基于患者个体特征的定制化IOL设计;(4)优化标准化生产工艺,并通过大规模多中心临床试验加速临床转化进程。后续研究应着力于材料优化和设计改进,以全面提升IOL的安全性、有效性及临床适用性。

5 结语

随着人口老龄化加剧及白内障手术患者年轻化趋势,PCO的防治已成为眼科领域亟待解决的关键问题。近年来,得益于IOL材料学和设计工艺的突破,新型IOL的临床应用为眩光、PCO等术后并发症的防治提供了新思路^[46]。值得注意的是,当前研究重点已从基础材料改良转向更为精准的表面功能化改性。本文系统综述了抗生素污染型、增强黏连型、微图案型、光热/光动力型以及载药型等新型IOL的研究进展,这些创新设计不仅有望显著降低PCO发生率,更能全面提升患者的术后视觉质量。然而,目前大部分研究仍处于实验阶段,缺乏足够的临床验证。因此,未来的研究应侧重于开展更多的临床试验,以评估改性IOL的长期效果和安全性。通过进一步优化设计与性能,改性IOL有望为白内障患者提供更加安全有效的治疗方案,改善他们的生活质量。具有良好生物相容性和PCO抑制作用的新型IOL在白内障术后并发症防治方面具有巨大的临床应用潜力。

利益冲突声明:本文不存在利益冲突。

作者贡献声明:翟欣然论文选题与修改,初稿撰写;陈志敏文献检索;许衍辉图片处理;张越选题指导,论文修改及审阅。所有作者阅读并同意最终的文本。

参考文献

- [1] Sen P, Kshetrapal M, Shah C, et al. Posterior capsule opacification rate after phacoemulsification in pediatric cataract: Hydrophilic versus hydrophobic intraocular lenses. *J Cataract Refract Surg*, 2019, 45 (10) : 1380–1385.
- [2] Taiyab A, Holms J, West-Mays JA. β -catenin/Smad3 interaction regulates transforming growth factor - β - induced epithelial to mesenchymal transition in the lens. *Int J Mol Sci*, 2019, 20(9) : 2078.
- [3] Das V, Bhattacharya S, Chikkaputtaiah C, et al. The basics of epithelial–mesenchymal transition (EMT): a study from a structure, dynamics, and functional perspective. *J Cell Physiol*, 2019, 234 (9) : 14535–14555.
- [4] Amon M. Biocompatibility of intraocular lenses. *J Cataract Refract Surg*, 2001, 27 (2) : 178–179.
- [5] Liu D, Tang JM, Shen LL, et al. Foldable bulk anti–adhesive polyacrylic intraocular lens material design and fabrication for posterior capsule opacification prevention. *Biomacromolecules*, 2022, 23(4) : 1581–1591.
- [6] Maedel S, Evans JR, Harrer-Seely A, et al. Intraocular lens optic edge design for the prevention of posterior capsule opacification after cataract surgery. *Cochrane Database Syst Rev*, 2021, 8(8) : CD012516.
- [7] Tan XH, Zhan JZ, Zhu Y, et al. Improvement of uveal and capsular biocompatibility of hydrophobic acrylic intraocular lens by surface grafting with 2 - methacryloyloxyethyl phosphorylcholine - methacrylic acid copolymer. *Sci Rep*, 2017, 7:40462.
- [8] Wang R, Xia JY, Tang JM, et al. Surface modification of intraocular lens with hydrophilic poly (sulfobetaine methacrylate) brush for posterior capsular opacification prevention. *J Ocul Pharmacol Ther*, 2021, 37(3) : 172–180.
- [9] Yang CJ, Huang WL, Yang Y, et al. Zwitterionic modified and freeze–thaw reinforced foldable hydrogel as intraocular lens for posterior capsule opacification prevention. *Biomaterials*, 2024, 309:122593.
- [10] Ray I, Michael A, Meira LB, et al. The role of cytokines in epithelial–mesenchymal transition in gynaecological cancers: a systematic review. *Cells*, 2023, 12(3) : 416.
- [11] Li KJ, Yu L, Ma L, et al. Surface modification of commercial intraocular lens by zwitterionic and antibiotic – loaded coating for preventing postoperative endophthalmitis. *Colloids Surf B Biointerfaces*, 2023, 222:113093.
- [12] Linnola RJ, Werner L, Pandey SK, et al. Adhesion of fibronectin, vitronectin, laminin, and collagen type IV to intraocular lens materials in pseudophakic human autopsy eyes. Part 2: explanted intraocular lenses. *J Cataract Refract Surg*, 2000, 26 (12) : 1807–1818.
- [13] Jaitli A, Roy J, Chatila A, et al. Role of fibronectin and IOL surface modification in IOL: lens capsule interactions. *Exp Eye Res*, 2022, 221:109135.
- [14] Huang YS, Bertrand V, Bozukova D, et al. RGD surface functionalization of the hydrophilic acrylic intraocular lens material to control posterior capsular opacification. *PLoS One*, 2014, 9 (12) : e114973.
- [15] Xiang Y, Jin RR, Zhang Y, et al. Foldable glistening–free acrylic intraocular lens biomaterials with dual – side heterogeneous surface modification for postoperative endophthalmitis and posterior capsule opacification prophylaxis. *Biomacromolecules*, 2021, 22(8) : 3510–3521.
- [16] Magin CM, May RM, Drinker MC, et al. Micropatterned protective membranes inhibit lens epithelial cell migration in posterior capsule opacification model. *Transl Vis Sci Technol*, 2015, 4 (2) : 9.
- [17] Ellis N, Werner L, Balendiran V, et al. Posterior capsule opacification prevention by an intraocular lens incorporating a micropatterned membrane on the posterior surface. *J Cataract Refract Surg*, 2020, 46 (1) : 102–107.
- [18] Seo Y, Kim S, Lee HS, et al. Femtosecond laser induced nano–textured micropatterning to regulate cell functions on implanted biomaterials. *Acta Biomater*, 2020, 116:138–148.
- [19] Darwis MKA, Levario–Diaz V, Pashapour S, et al. Development of polyethylene glycol diacrylate – based micropattern substrate to study the interplay between surface topography and cellular response for tissue engineering applications. *Bio Protoc*, 2025, 15 (10) : e5323.
- [20] Lin YX, Hu XF, Zhao Y, et al. Photothermal ring integrated intraocular lens for high – efficient eye disease treatment. *Adv Mater*, 2017, 29 (34) : 1701617.
- [21] Liu D, Wu QN, Chen W, et al. Nanoporous gold ring–integrated photothermal intraocular lens for active prevention of posterior capsular opacification. *Small*, 2022, 18(34) : e2201098.
- [22] Xu JW, Li HN, Hu DF, et al. Intraocular lens with mussel – inspired coating for preventing posterior capsule opacification via photothermal effect. *ACS Appl Bio Mater*, 2021, 4 (4) : 3579–3586.
- [23] Zhang CS, Guo QS, Tong ZR, et al. Thin film nanoarchitectonics of layer–by–layer assembly with reduced graphene oxide on intraocular lens for photothermal therapy of posterior capsular opacification. *J Colloid Interface Sci*, 2022, 619:348–358.
- [24] Ye Z, Huang Y, Li JL, et al. Two–dimensional ultrathin Ti3C2 MXene nanosheets coated intraocular lens for synergistic photothermal and NIR – controllable rapamycin releasing therapy against posterior capsule opacification. *Front Bioeng Biotechnol*, 2022, 10:989099.
- [25] Mao YY, Li M, Wang JD, et al. NIR – triggered drug delivery system for chemo–photothermal therapy of posterior capsule opacification. *J Control Release*, 2021, 339:391–402.
- [26] Tang JM, Liu SH, Han YM, et al. Surface modification of

- intraocular lenses via photodynamic coating for safe and effective PCO prevention. *J Mater Chem B*, 2021, 9(6): 1546–1556.
- [27] Qie JQ, Wen SM, Han YM, et al. A polydopamine – based photodynamic coating on the intraocular lens surface for safer posterior capsule opacification conquering. *Biomater Sci*, 2022, 10 (9): 2188 – 2197.
- [28] Lu DD, Wang H, Feng CL, et al. Spin – coating – based facile annular photodynamic intraocular lens fabrication for efficient and safer posterior capsular opacification prevention. *ACS Appl Mater Interfaces*, 2022, 14(43): 48341–48355.
- [29] Fang QN, Qin C, Duo L, et al. Polydopamine based photothermal/photodynamic synchronous coating modified intraocular lens for efficient and safer posterior capsule opacification prevention. *Biomater Adv*, 2024, 158: 213792.
- [30] Qin C, Wen S, Fei F, et al. NIR – triggered thermosensitive polymer brush coating modified intraocular lens for smart prevention of posterior capsular opacification. *J Nanobiotechnology*, 2023, 21(1): 323.
- [31] Karim S, Wells LA. Azobenzene – grafted acrylate coatings to modulate lens epithelial cells. *ACS Biomater Sci Eng*, 2025, 11(4): 2127–2145.
- [32] Brookshire HL, English RV, Nadelstein B, et al. Efficacy of COX-2 inhibitors in controlling inflammation and capsular opacification after phacoemulsification cataract removal. *Vet Ophthalmol*, 2015, 18(3): 175–185.
- [33] Zhang XB, Lai KR, Li S, et al. Drug – eluting intraocular lens with sustained bromfenac release for conquering posterior capsular opacification. *Bioact Mater*, 2021, 9: 343–357.
- [34] Zhang XB, Wang J, Xu JW, et al. Prophylaxis of posterior capsule opacification through autophagy activation with indomethacin – eluting intraocular lens. *Bioact Mater*, 2023, 23: 539–550.
- [35] Filipe HP, Bozukova D, Pimenta A, et al. Moxifloxacin – loaded acrylic intraocular lenses: in vitro and in vivo performance. *J Cataract Refract Surg*, 2019, 45 (12): 1808–1817.
- [36] Tan DW, Lim SG, Wong TT, et al. Sustained antibiotic – eluting intra – ocular lenses: a new approach. *PLoS One*, 2016, 11 (10): e0163857.
- [37] Huang HY, Zhu SQ, Liu D, et al. Antiproliferative drug – loaded multi – functionalized intraocular lens for reducing posterior capsular opacification. *J Biomater Sci Polym Ed*, 2021, 32(6): 735–748.
- [38] Qin C, Liu SH, Wen SM, et al. Enhanced PCO prevention of drug eluting IOLs via endocytosis and autophagy effects of a PAMAM dendrimer. *J Mater Chem B*, 2021, 9(3): 793–800.
- [39] Wang YQ, Wen C, Jing RH, et al. Self – assembled coating with a metal – polyphenolic network for intraocular lens modification to prevent posterior capsule opacification. *Biomed Mater*, 2024, 19(2).
- [40] Kassumeh SA, Wertheimer CM, von Studnitz A, et al. Poly (lactic – co – glycolic) acid as a slow – release drug – carrying matrix for methotrexate coated onto intraocular lenses to conquer posterior capsule opacification. *Curr Eye Res*, 2018, 43(6): 702–708.
- [41] Lu DD, Han YM, Liu D, et al. Centrifugally concentric ring – patterned drug – loaded polymeric coating as an intraocular lens surface modification for efficient prevention of posterior capsular opacification. *Acta Biomater*, 2022, 138: 327–341.
- [42] Li XY, Liang C, Guo YX, et al. Clinical translation of long – acting drug delivery systems for posterior capsule opacification prophylaxis. *Pharmaceutics*, 2023, 15(4): 1235.
- [43] Park S, Nguyen VP, Wang XD, et al. Gold nanoparticles for retinal molecular optical imaging. *Int J Mol Sci*, 2024, 25(17): 9315.
- [44] Liu CZ, Sun MH, Dai W, et al. Biocompatibility of light responsive materials prepared for accommodative intraocular lenses manufacturing. *Int J Ophthalmol*, 2024, 17(12): 2167–2176.
- [45] Jia QQ, Wei YF, Hu YL, et al. Cascade catalytic multilayer modified intraocular lens for enhanced and safer posterior capsule opacification prevention. *Acta Biomater*, 2025, 192: 248–259.
- [46] 黄文龙, 雷蔚, 刘锦魁, 等. 人工晶状体混浊的研究进展. *国际眼科杂志*, 2024, 24(10): 1600–1604.