

# Pentacam 三维眼前节分析仪在眼科临床中的应用

焦一典<sup>1</sup> 闫志<sup>2</sup> 牛雨<sup>1</sup> 综述 赵海霞<sup>1</sup> 审校

**摘要** 三维眼前节分析仪(Pentacam)是一种基于 Scheimpflug 的旋转角膜和眼前节断层扫描仪,可对角膜 3D 几何形状进行综合分析和三维断层重建,是分析角膜表面的常用方法。Pentacam 应用于角膜屈光手术术前筛查亚临床圆锥角膜(KC)及评估术后视觉质量、角膜塑形镜(OK)验配及监测配镜后角膜形态、白内障高级计算人工晶状体度数和引导角膜移植等领域。近年来,Pentacam 在临床实践中的广泛应用提高了眼科医师发现、评估早期疾病并有效采取治疗方案的能力。现就 Pentacam 的技术原理和其目前在眼科中的应用展开综述。

**关键词** 三维眼前节分析仪; 屈光手术; 角膜塑形镜; 白内障; 角膜移植

中图分类号 R 77

文献标志码 A 文章编号 1000-1492(2023)02-0342-04  
doi: 10.19405/j.cnki.issn1000-1492.2023.02.030

三维眼前节分析仪(Pentacam)是具有旋转式 Scheimpflug 摄像系统的眼前节分析仪,通过旋转式测量程序生成三维 Scheimpflug 图像,描绘并计算角膜缘之间整个眼前节和后房表面的角膜地形图和角膜厚度,评估角膜前表面到晶状体后表面的眼前段。目前,Pentacam 在诊断眼前节疾病方面有着重要地位。临床上 Pentacam 可广泛应用于屈光手术术前圆锥角膜(keratoconus, KC)的筛查,并精确监测术后角膜形态的变化,依照眼前节参数进行角膜塑形镜(orthokeratology, OK)的验配、白内障植入人工晶状体(intraocular lens, IOL)的优选以及角膜移植等手术方案的制定。随着 Pentacam 设备的更新,Pentacam HR 和 Pentacam AXL 等新型设备在眼科临床中应用的越来越广泛,然而,对其了解尚不全面。因此,该文详细总结了 Pentacam 的发展及其在眼科的

临床应用。

## 1 Pentacam 的发展和原理

角膜地形图起源于 17 世纪,葡萄牙眼科学家 António 发明了一种评估角膜形状手持设备,该装置的中心开口处绘制了同心黑白圆圈,患者被置于光线充足的环境,然后在距离角膜 15 cm 处进行检查<sup>[1]</sup>。如今,大多数角膜地形图设备配备了 Placido 环和图像配准系统(视频角膜镜)。随着光学设备不断更新,计算机断层扫描系统应运而生,此技术具有扫描快速、图像清晰等优势。目前,应用断层扫描技术的眼前节设备包括 OrbScan IIz(Bausch & Lomb, 美国)、Scheimpflug 相机和基于眼前节光学相关断层扫描技术(optical coherence tomography, OCT)的设备。Scheimpflug 相机成像是目前最常用的眼前段断层扫描方法之一,能够测量光轴上的色散,进而检测透镜透明度随时间的变化。Scheimpflug 相机设备包括 Pentacam(Pentacam HR 和 Pentacam AXL, Oculus, Wetzlar, 德国)、Galilei(Zieler Ophthalmic Systems AG, 瑞士)和 Sirius(CSO, Firenze, 意大利)。Pentacam 基于 Scheimpflug 摄像原理,以二极管发出的蓝光为光源,通过摄像头在光轴方向对眼睛进行全面捕捉,可在 2 s 内拍摄 50 张图像,并获取 25 000 个测量点,以提供从角膜前表面到晶状体的图像信息,这些图像数据经内部软件处理后实现眼前段的三维重建。Pentacam HR 的精确度较 Pentacam 更高,在原有的基础上对视轴设计进行了改良,装备了 1.45 MB 高分辨率的 Scheimpflug 相机,能够在 2 s 内精准拍摄 50 张图像,并将最大测量点提升至 13.8 万个<sup>[2]</sup>。Pentacam AXL 是一种具有 Pentacam HR 功能和部分相干干涉(partial coherency interferometry, PCI)的新颖生物测量设备,可基于 PCI 原理对眼轴长度进行测量<sup>[3]</sup>。另外, Pentacam 能够对眼前节任何点进行手动测量,重建角膜厚度图,并提高角膜扩张检测的敏感性和特异性<sup>[4]</sup>。

## 2 Pentacam 在眼科临床中的应用

### 2.1 Pentacam 在屈光手术中的应用 屈光手术包

2022-11-28 接收

基金项目: 国家自然科学基金(编号: 81460090); 内蒙古自治区卫生健康委 2022 年度医疗卫生科技计划项目(编号: 202201332)

作者单位: 内蒙古医科大学附属医院<sup>1</sup> 近视眼治疗中心、<sup>2</sup> 检验科, 呼和浩特 010050

作者简介: 焦一典,女,硕士研究生;

赵海霞,女,教授,主任医师,博士生导师,责任作者, E-mail: nmghzhx@163.com

括角膜屈光手术和人工晶状体(implantable collamer lens, ICL)植入术。角膜屈光手术是通过准分子激光或飞秒激光切削中央角膜厚度,改变角膜前表面曲率,从而达到矫正近视的效果。ICL植入术与角膜屈光手术原理不同,它是一种将ICL植入眼内的微创手术,可达到与角膜屈光手术同样的效果,但对角膜无实质性损伤。角膜屈光手术分为表层角膜屈光手术、板层角膜屈光手术以及飞秒激光角膜基质透镜切除术(small incision lenticule extraction, SMILE)。随着屈光手术的发展,其良好的安全性、有效性和准确性得到业界的广泛认可,越来越多的患者选择通过手术的方式来改善视力。因此,屈光手术患者术前的检查和术后治疗效果的评估至关重要。Pentacam引导的屈光手术主要基于角膜前表面的形态和角膜地形图的切削曲线等信息,其结果不受环境、瞳孔直径等因素的影响<sup>[5]</sup>。随着光学技术的发展,Pentacam提高了屈光手术术前筛选KC和持续监控角膜细微变化的能力,并能对术后治疗效果做出系统的评价。

### 2.1.1 屈光手术术前检查与角膜中央厚度测量

医源性角膜扩张和KC是屈光手术后最严重的并发症,术前筛查是有效预防的关键。尽管当前角膜成像技术取得了长足的进步,但术后KC的发生率仍居高不下。因此,需要更为明确的筛查指标,以便诊断早期KC和其他角膜疾病。Pentacam生成的Belin/Ambrosio增强型扩张图(BAD)整合了包括角膜前后高度、厚度及最佳拟合球体的参考表面等视图,并将数据与标准数据库进行比较,提供预测角膜扩张性疾病所需的总体“D”值,有助于KC的诊断。研究<sup>[6]</sup>显示,角膜扩张综合偏差分析指数(BAD-D)是检测亚临床和临床圆锥角膜最有效的指标,可通过识别早期亚临床圆锥角膜,快速、准确地筛查潜在的屈光手术患者。Zaabaab et al<sup>[7]</sup>使用Pentacam断层扫描评估并比较了与KC相关的18个眼前节参数曲线下面积(AUROC),结果显示Pentacam在鉴别KC方面表现优异(检出率=0.9~1.0)。

临床上,眼科医师依据Pentacam测量角膜水平直径(white-to-white distance, WTW)、中央角膜曲率、中央角膜厚度(central corneal thickness, CCT)、水平前房角距离(angle-to-angle, ATA)、前房内角(internal anterior chamber, ACQ)和晶状体矢高(crystalline lens rise, CLR)等生物力学参数,以此来选择最佳的屈光手术方式和相匹配的ICL<sup>[8]</sup>。ICL术后最具威胁的并发症是内皮细胞的快速丢失,这

一风险与前房深度呈负相关,因此术前前房形态的评估对ICL植入的位置至关重要。拱顶是晶状体前表面与ICL之间的距离,不适宜的ICL将导致次优的拱顶,其与许多术后视觉上的并发症有关,因此提高ICL植入后拱顶的可预测性可改善术后视觉质量。拱顶对ICL植入术后并发症的发生息息相关,一方面,拱顶值过小可增加前囊下白内障的风险<sup>[9]</sup>;另一方面,拱顶过大会导致瞳孔阻塞或前房角关闭,从而增加继发性青光眼的风险<sup>[10]</sup>。有研究<sup>[11]</sup>报道,超声生物显微镜(ultrasound biomicroscopy, UBM)能够直接测量睫状沟水平间距(sulcus-to-sulcus, STS),但对于水平WTW和STS的测量一致性较差( $P < 0.05$ )。然而,Scheimpflug成像设备与UBM相比,在测量水平WTW和STS方面的精度相对较高。

CCT不仅是评价角膜新陈代谢和水合状态的指标,而且是辅助诊断KC和Fuchs营养不良的重要参数。屈光手术术后角膜剩余基底床厚度的减少是导致医源性角膜扩张的重要因素。因此,精准测量手术前后的CCT至关重要。临床上广泛应用Pentacam测量角膜厚度,Biswas et al<sup>[12]</sup>对比了Pentacam HR、扫描源光学相干断层扫描(Casia SS-1000)、超声和Placido-Scheimpflug断层扫描(Topographic Modeling System, version 5)测量CCT的一致性和可重复性,结果显示Pentacam和超声的平均CCT测量值差异无统计学意义( $P = 0.13$ )。

2.1.2 屈光手术术后效果及二次手术评估 屈光手术术后常见的并发症包括KC、屈光回退等,而通过Pentacam进行术前精准检查可减少术后KC和屈光回退的发生。屈光手术作为可预测性的治疗方式,可以提高视力,亦可影响视觉质量,其中主要与术后高阶像差(higher order aberrations, HOA)的升高有关。目前,大量研究利用Pentacam对不同术式的屈光手术术后视觉质量进行了评估,并探讨了影响术后远期屈光效果的因素。Ye et al<sup>[13]</sup>通过Pentacam测量并比较了准分子激光原位角膜磨削术(laser in situ keratomileusis, LASIK)、波前引导的虹膜配准LASIK(WF-LASIK)、飞秒激光原位角膜磨镶术(femtosecond assisted laser in situ keratomileusis, FS-LASIK)和SMILE术前及术后6个月HOA的变化,结果显示,与LASIK和FS-LASIK相比,SMILE和WF-LASIK能诱导更少的总HOA。屈光手术术后角膜表面形态的改变、伤口的过度修复以及术中操作和设备带来的问题,可导致诸如上皮内生、不规

则散光和角膜扩张等并发症,这些并发症可造成术后视觉质量下降等更为严重的问题,因此部分患者需要接受二次手术。Pentacam 可测量二次手术术前患者角膜屈光力、角膜厚度,同时还能预估切削厚度和程度,为制定手术方案做出比较全面准确的判断。另外,Pentacam 还可以评估 LASIK 扩张术后角膜内植入 KeraRing 片段后的角膜前后地形图和生物力学结果,显著改善眼球表面屈光度,并实现可预测的散光矫正<sup>[14]</sup>。

**2.2 Pentacam 在角膜塑形镜验配中的应用** 截止目前,全球近视患病人数接近 20 亿人(占全球人口的 28.3%) ,其中高度近视人群接近 14%<sup>[15]</sup>。控制与延缓近视发展的措施主要包括:光学干预、药物干预与手术治疗。而光学干预中 OK 镜的效果似乎更佳,研究显示,OK 镜对于近视进展程度的控制达到了 25% ~ 79% ,显著高于框架眼镜(3% ~ 34%)<sup>[16]</sup>。角膜地形图是 OK 镜验配过程中至关重要的一项检测,可以指导镜片的选择,评估镜片的塑形效果,同时推测镜片夜间佩戴的位置。目前,临床上最常应用 Pentacam 测量角膜生物学参数,包括角膜中央 K 值及 e 值,并采用经验法进行镜片验配。Queirós et al<sup>[17]</sup> 利用 Pentacam 评估了 62 例来自新加坡的近视儿童佩戴 OK 镜 12 个月后屈光度和角膜生物学参数的变化,结果发现,在 12 个月的角膜塑形镜治疗期间,儿童眼轴长度显著增加 $[(0.11 \pm 0.18) \text{ mm } P < 0.001]$ ,而屈光度保持稳定。另外,Pentacam 还可以探讨 OK 镜治疗后角膜透明度的变化以及视觉质量。丁雯芝等<sup>[18]</sup> 通过对比患者佩戴 OK 镜后第 1 天、第 1 周和第 1、3、6、12 个月 Pentacam 测量的角膜光密度值发现,角膜前、中、后层光密度值前期呈下降趋势,6 个月和 12 个月均显著增加(前层:7.143 和 6.177;中层:7.508 和 6.563;后层:6.722 和 8.533;  $P < 0.01$ )。任美侠等<sup>[19]</sup> 利用 Pentacam 三维眼前节分析系统测量了角膜最薄点中心 3 mm 区域前后表面曲率半径(ARC 和 PRC)、角膜最薄点厚度(THP) 和 BAD-D,以分析长期配戴 OK 镜对角膜形态、角膜生物力学以及客观视觉质量的影响。结果显示,与配戴前相比,配戴 OK 镜后 ARC 增高、THP 降低、BAD-D 增高( $P < 0.05$ )。表明长期配戴 OK 镜可改变角膜前表面形态,而对角膜生物力学无明显影响。

**2.3 Pentacam 在白内障中的应用** 白内障是最常见的致盲性眼病,是世界各个地区视力障碍的主要原因。晶状体混浊分类系统 III(LOCSIII) 是一种评

估白内障患者晶状体形态和混浊程度的主观方法。客观精确地测量晶状体密度对于评估可能出现的术中风险以及优化治疗方案具有重要意义。术中超声乳化的能量可以通过术前晶状体密度的测量来估计,进而推断出术后的角膜状况。白内障术后视觉质量受到多种因素的影响,如眼部参数[角膜曲率(K)、AL、WTW 和晶状体厚度]、IOL 计算公式的选择以及 IOL 植入的位置等<sup>[20]</sup>。Pentacam 可准确计算白内障患者 IOL 度数,评估白内障进展程度和术后视觉质量,同时还可检测 IOL 植入的位置。晶状体核密度的测量在白内障手术前尤为重要,Gupta et al<sup>[21]</sup> 研究发现,Pentacam 评估的晶状体核密度与 LOCSIII 分级之间存在很强的关联性,并且在测量晶状体皮质和核密度上具有更好的重复性。判断白内障手术成功的依据主要取决于术后屈光状态,因此术前精确计算 IOL 屈光度对白内障手术至关重要。研究<sup>[22]</sup> 显示,Pentacam AXL 测量的角膜曲率相比 IOL Master 500 更为平坦,并且能够提供更精确的 AL、K 和 WTW 测量值。IOL 位置的稳定是评估白内障术后视觉功能的关键,而前房深度(anterior chamber depth, ACD) 是反映 IOL 有效轴向位置的关键指标,Pentacam 同样可实现 ACD 的精准测量,从而有效避免白内障术后出现的近视或远视移位误差。

**2.4 Pentacam 在角膜移植中的应用** 角膜性失明是可逆性失明的主要原因之一,可以通过移植健康供体的角膜来控制。随着术前检查设备,如 OCT、UBM 和 Pentacam 的发展,角膜移植手术的成功率逐渐提高。角膜厚度(corneal thickness, CT) 的变化可以作为预测术后移植角膜存活率的指标,反映角膜移植术后内皮功能障碍的早期变化。Verdier et al<sup>[23]</sup> 纳入了 81 例 Fuchs 内皮性角膜营养不良患者,并利用 Pentacam 测量其行角膜内皮细胞移植术前后的角膜厚度,结果显示,在距角膜中心 6 mm 处,95% 的观察对象前后测量的 CT 值差异低于 17  $\mu\text{m}$ ,证实了 Pentacam 测量 CT 的高度重复性。然而,有研究认为 Pentacam 在角膜移植术后中央角膜厚度的测量上重复性较低。Szalai et al<sup>[24]</sup> 对移植患者进行了眼前节的评估,发现与 Pentacam 相比,SS-OCT 提供了更好的可靠性和可重复性。角膜移植术的成功不仅与移植角膜的透明度有关,术后还需要评估患者的视觉质量。Heinzelmann et al<sup>[25]</sup> 使用 Pentacam 测量了患者术后移植角膜和宿主角膜之间界面区域的反射率和最佳矫正视力,结果显示使用 Pen-

tacam 可获得更高的视觉质量。

### 3 展望

Pentacam 在眼科临床中可应用于屈光手术、OK 镜、白内障、角膜移植等领域,尤其在屈光手术中发挥至关重要的作用。其可依据测量的角膜形态筛选适合行屈光手术的患者、评估术后效果及视觉质量。随着 Pentacam 设备衍生新技术,Pentacam HR 和 Pentacam AXL 等新型设备与其他测量设备相比存在很多优势。如与 UBM 相比,Pentacam 在测量水平 WTW 和 STS 方面的精度相对较高。另外,PentacamHR 与扫描源光学相干断层扫描和 Placido-Scheimpflug 断层扫描相比,在测量 CCT 水平上同样表现出更稳定的结果输出。虽然 Pentacam 在眼前节测量上优势明显,但是仍存在许多不足之处,如 Pentacam 在测量角膜移植厚度上表现出较低的重复性。因此,Pentacam 要真正实现对眼前节参数的精准测量依旧任重道远。

### 参考文献

- [1] Grzybowski A, Kanclerz P. Beginnings of astigmatism understanding and management in the 19th century [J]. *Eye Contact Lens*, 2018, 44 Suppl 1: S22–9.
- [2] Domínguez-Vicent A, Pérez-Vives C, Ferrer-Blasco T, et al. Device interchangeability on anterior chamber depth and white-to-white measurements: a thorough literature review [J]. *Int J Ophthalmol*, 2016, 9(7): 1057–65.
- [3] Ruiz-Mesa R, Abengózar-Vela A, Ruiz-Santos M. Comparison of a new Scheimpflug imaging combined with partial coherence interferometry biometer and a low-coherence reflectometry biometer [J]. *J Cataract Refract Surg*, 2017, 43(11): 1406–12.
- [4] Winkler von Mohrenfels C, Salgado J, Khoramnia R. Keratectasia after refractive surgery [J]. *Klin Monbl Augenheilkd*, 2011, 228(8): 704–11.
- [5] 潘善刚, 廖荣丰, 高健, 等. 四种角膜屈光手术后角膜后表面高阶像差的变化 [J]. *安徽医科大学学报*, 2021, 56(3): 486–9.
- [6] Hashemi H, Beiranvand A, Yekta A, et al. Pentacam top indices for diagnosing subclinical and definite keratoconus [J]. *J Curr Ophthalmol*, 2016, 28(1): 21–6.
- [7] Zaabaar E, Kyei S, Parkson Brew M A A, et al. The utility of measures of anterior segment parameters of a Pentacam Scheimpflug tomographer in discriminating high myopic astigmatism from keratoconus [J]. *PLoS One*, 2021, 16(12): e0260648.
- [8] Trancón A, Manito S, Sierra O, et al. Determining vault size in implantable collamer lenses: preoperative anatomy and lens parameters [J]. *J Cataract Refract Surg*, 2020, 46(5): 728–36.
- [9] Chen L J, Chang Y J, Kuo J C, et al. Metaanalysis of cataract development after phakic intraocular lens surgery [J]. *J Cataract Refract Surg*, 2008, 34(7): 1181–200.
- [10] McCaughey M V, Mifflin T, Fenzl C R, et al. Pseudophacomorphic glaucoma along with pupillary block after Visian implantable collamer lens implantation for high myopia [J]. *Open J Ophthalmol*, 2014, 4(4): 107–11.
- [11] Biermann J, Bredow L, Boehringer D, et al. Evaluation of ciliary sulcus diameter using ultrasound biomicroscopy in emmetropic eyes and myopic eyes [J]. *J Cataract Refract Surg*, 2011, 37(9): 1686–93.
- [12] Biswas S, Biswas P. Agreement and repeatability of corneal thickness and radius among three different corneal measurement devices [J]. *Optom Vis Sci*, 2021, 98(10): 1196–202.
- [13] Ye M, Liu C, Liao R, et al. SMILE and wavefront-guided LASIK out-compete other refractive surgeries in ameliorating the induction of high-order aberrations in anterior corneal surface [J]. *J Ophthalmol*, 2016, 2016: 8702162.
- [14] Peris-Martínez C, Bueno-Gimeno I, Alvarez-Arana I, et al. Characterization of the effect of intracorneal ring segment in corneal ectasia after laser refractive surgery [J]. *Eur J Ophthalmol*, 2020, 30(1): 125–31.
- [15] Holden B A, Fricke T R, Wilson D A, et al. Global prevalence of myopia and high myopia and temporal trends from 2000 through 2050 [J]. *Ophthalmology*, 2016, 123(5): 1036–42.
- [16] Kanda H, Oshika T, Hiraoka T, et al. Effect of spectacle lenses designed to reduce relative peripheral hyperopia on myopia progression in Japanese children: a 2-year multicenter randomized controlled trial [J]. *Jpn J Ophthalmol*, 2018, 62(5): 537–43.
- [17] Queirós A, Lopes-Ferreira D, Yeoh B, et al. Refractive, biometric and corneal topographic parameter changes during 12 months of orthokeratology [J]. *Clin Exp Optom*, 2020, 103(4): 454–62.
- [18] 丁雯芝, 荆丽丽, 杜显丽. 青少年近视眼患者配戴角膜塑形镜后角膜透明度的变化分析 [J]. *中华眼科杂志*, 2019, 55(6): 435–41.
- [19] 任美侠, 张国云, 叶璐. 长期配戴角膜塑形镜对患者角膜和视觉质量的影响 [J]. *国际眼科杂志*, 2022, 22(2): 304–8.
- [20] Karabela Y, Eliacik M, Kocabora M S, et al. Predicting the refractive outcome and accuracy of IOL power calculation after phacoemulsification using the SRK/T formula with ultrasound biometry in medium axial lengths [J]. *Clin Ophthalmol*, 2017, 11: 1143–9.
- [21] Gupta M, Ram J, Jain A, et al. Correlation of nuclear density using the Lens Opacity Classification System III versus Scheimpflug imaging with phacoemulsification parameters [J]. *J Cataract Refract Surg*, 2013, 39(12): 1818–23.
- [22] Arruda H A, Pereira J M, Neves A, et al. Lenstar LS 900 versus Pentacam-AXL: analysis of refractive outcomes and predicted refraction [J]. *Sci Rep*, 2021, 11(1): 1449.
- [23] Verdier D D, Sugar A, Baratz K, et al. Corneal thickness as a predictor of corneal transplant outcome [J]. *Cornea*, 2013, 32(6): 729–36.
- [24] Szalai E, Németh G, Hassan Z, et al. Noncontact evaluation of corneal grafts: Swept-source fourier domain OCT versus high-resolution scheimpflug imaging [J]. *Cornea*, 2017, 36(4): 434–9.
- [25] Heinzlmann S, Böhringer D, Maier P C, et al. Correlation between visual acuity and interface reflectivity measured by pentacam following DSAEK [J]. *Acta Ophthalmol*, 2014, 92(1): e1–4.