

文章编号: 0258-7025(2008)07-1101-04

# 激光斜入射和反射对角膜屈光手术后 人眼成像质量的影响

刘永基 王肇圻 吕 尤 母国光

(南开大学现代光学研究所光电信息技术科学教育部重点实验室, 天津 300071)

**摘要** 以 Kooijman 眼模型为基础, 根据 Jimenez 的理论及临床上应用的 Munnerlyn 理论, 分析了激光在角膜前表面的斜入射和反射对角膜屈光手术后人眼成像质量的影响。研究表明, 激光的斜入射和反射会引起一定的术后欠矫, 但是影响不大, 对于  $-9D$  的术前屈光不正, 由激光能量损失引起的欠矫也只有  $-0.6D$ ; 激光角膜手术本身会使术后角膜前表面的非球面系数变大。随着术前屈光不正的增大, 非球面系数由术前的负值变为正值, 使得术后的人眼球差增大。考虑了激光斜入射和反射后的术后非球面系数与 Munnerlyn 公式的预期值差别不大, 术后非球面系数的大小与光区的关系不大。

**关键词** 医用光学与生物技术; 斜入射和反射; 屈光不正; 欠矫; 非球面系数; 球差

**中图分类号** R 778 **文献标识码** A **doi:** 10.3788/CJL20083507.1101

## Effects of the Reflection Losses and Nonnormal Incidence of Laser on the Eye's Visual Quality after Refractive Procedure on a Cornea

Liu Yongji Wang Zhaoqi Lü You Mu Guoguang

(Key Laboratory of Opto-Electronic Information Science and Technology of Ministry of Education, Institute of Modern Optics, Nankai University, Tianjin 300071, China)

**Abstract** Based on the eye model of Kooijman, the effects of the reflection losses and nonnormal incidence of laser on the human eye's visual quality after refractive procedure on a cornea were analyzed by comparing the J. R. Jimenez's theory and Munnerlyn's. The reflection losses and nonnormal incidence on the anterior cornea lead to the under-correction of the post-surgery eye. With the 6 mm diameter of the optical zone, when the refractive error of the eye before surgery is  $-9D$ , the under-correction is only  $-0.6D$ . The corneal asphericity after refractive surgery increases for myopia. With the increase of the refractive error before refractive surgery, the asphericity of the anterior cornea changes from negative to positive, which leads to the increase of the spherical aberration. There is no large difference between the asphericities obtained by Munnerlyn's theory and Jimenez's. The diameter of the optical zone has little effect on the post-surgery  $p$ -value.

**Key words** medical optics and biotechnology; reflection losses and nonnormal incidence; refractive error; under-correction; asphericity; spherical aberration

## 1 引 言

激光角膜手术常见问题之一就是术后球差增大以及欠矫。目前都认为角膜非球面系数的变化引起人眼球差增大<sup>[1,2]</sup>, 但是非球面系数增大的原因尚有争议。Roberts 等<sup>[3]</sup>认为术后角膜的生理变化会引起非球面的变化。Jimenez 等<sup>[4]</sup>从理论上得出考

虑激光斜入射和反射后确定手术后角膜面型参数的公式。Mrochen 等<sup>[5]</sup>提出, 激光的斜入射会引起非球面系数的增大。眼睛接受激光手术后, 屈光度的欠矫也经常出现<sup>[6]</sup>, 但产生原因尚不十分清楚。在临床上, 一般默认激光垂直入射于角膜前表面并且入射的激光能量全部用于与角膜组织作用, 即采用

收稿日期: 2007-08-16; 收到修改稿日期: 2007-11-26

基金项目: 国家自然科学基金重点项目(60438030)和国家自然科学基金(60777011)资助课题。

作者简介: 刘永基(1977—), 女, 河北人, 讲师, 主要从事光学信息处理及视觉光学方面的研究工作。

E-mail: lyj@mail.nankai.edu.cn

Munnerlyn<sup>[7]</sup>公式预期术后角膜曲率半径。而实际上角膜前表面是一个曲面,并且入射激光存在反射,故与角膜作用的激光能量存在损失,实际切削的角膜面型会与理论预期存在差别。本文在眼模型的基础上,分析了激光斜入射和反射引起的能量损失对术后非球面系数及球差和矫正效果的影响。

## 2 基本原理

采用临床上广泛使用的  $\lambda = 193 \text{ nm}$  的 ArF 激光,角膜对此波长的折射率是  $n = 1.52$ 。设术前眼的屈光不正为  $D$ ,切削前角膜前表面的曲率半径为  $R$ ,切削前角膜前表面的非球面系数为  $Q$ ,它与视光学中常用的  $p$  值的关系为  $p = Q + 1$ 。设在手术中采用的光区直径为  $d$ ,临床手术一般取为  $5 \sim 6 \text{ mm}$ 。

临床手术的理论计算,默认激光垂直入射于角膜前表面,且无能量损失。这种情况下,由 Munnerlyn 公式给出了手术后角膜面型参数为

$$z_{\text{Mun}} = -d^2 D / 3, \quad (1a)$$

$$\frac{1}{R'_{\text{Mun}}} = \frac{1}{R} + \frac{8D}{3}, \quad (1b)$$

$$p'_{\text{Mun}} = \frac{R_{\text{Mun}}^3}{R^3} p, \quad (1c)$$

式中  $z_{\text{Mun}}$ ,  $R'_{\text{Mun}}$  和  $p'_{\text{Mun}}$  表示不考虑激光在角膜前表面的反射和斜入射时,切削后角膜顶点处的切削深

度、角膜前表面的曲率半径和角膜前表面的  $p$  值。

而实际上,除角膜顶点处是正入射外,激光在角膜前表面其他各处均为斜入射;同时,激光在角膜表面存在反射,即并非全部的入射能量都与角膜作用。这就导致激光实际切削出的面型与 Munnerlyn 公式给出的术后面型的预期值之间存在差别。Jimenez 等<sup>[4]</sup>从理论上计算了考虑了激光斜入射和反射时,术后角膜面型的参数

$$z_{\text{min}} = \frac{-d^2 D}{3} + 0.0145ad^2 D, \quad (2a)$$

$$\frac{1}{R'_{\text{min}}} = \frac{1}{R} + \frac{8D}{3} - 0.0116D + \frac{ad^2 D}{3R^2}, \quad (2b)$$

$$p'_{\text{min}} = \frac{R_{\text{min}}^3}{R^3} \times \left\{ p + \frac{aD}{R} [d^2 (-0.62 + 1.333p) - 1.333R^2] \right\}, \quad (2c)$$

式中  $z_{\text{min}}$ ,  $R'_{\text{min}}$  和  $p'_{\text{min}}$  分别表示角膜顶点处实际的切削深度、实际切削后角膜前表面的曲率半径和角膜前表面的  $p$  值; $a$  表示激光的特性参数,范围一般在  $0.62 \sim 1.142$  之间,在本文中取其中间值  $0.88$ 。

考虑到要分析术后非球面系数的变化,选择考虑了眼睛各折射面非球面系数的 Kooijman<sup>[8]</sup>眼模型,以其为基础模拟了激光在角膜处的切削。Kooijman 眼模型的结构参数如表 1 所示。

表 1 Kooijman 眼睛模型的结构参数

Table 1 Parameters of the eye model of Kooijman

Refractive surface	Radius of the curvature /mm	Asphericity (Q)	Thickness /mm	Refractive index (543 nm)
Anterior surface of the cornea	7.8	-0.25	0.55	1.3771
Posterior surface of the cornea	6.5	-0.25	3.05	1.3374
Pupil	infinite	0	0	
Anterior surface of the lens	10.2	-3.06	4.0	1.42
Posterior surface of the lens	-6	-1	16.33	1.336
Retina	-12.5	0		

## 3 计算结果和分析

眼睛屈光不正的矫正是通过对角膜前表面的修正来实现的,术后角膜前表面的曲率半径对矫正效果的影响非常关键。首先计算了激光斜入射和反射产生的实际角膜曲率半径与 Munnerlyn 公式的预期值之间的差别。光区分别为  $5 \text{ mm}$  和  $6 \text{ mm}$ ,角膜前表面曲率半径为  $7.0 \text{ mm}$ ,眼睛的屈光不正由  $-1D \sim -9D$  变化时,切削后角膜前表面实际的曲率半径和角膜中央切削深度与 Munnerlyn 公式预

期值之间的差别分别如图 1(a), (b) 所示。

由图 1(a) 可以看出,手术的光区越大,实际切削值与预期值差别越大。 $6 \text{ mm}$  的切削光区中,当术前屈光不正为  $-9D$  时,两种方式切削后角膜曲率半径的差别只有  $0.14 \text{ mm}$ ;角膜中央区厚度的差别只有  $-0.00413 \text{ mm}$ 。同时考虑到多数近视的产生是由于轴长偏长引起的,我们认为模型眼中的近视均是由轴长变化引起的。选择了光区为  $6 \text{ mm}$ ,将实际切削后的角膜数据和理论预期数据分别代入眼模型

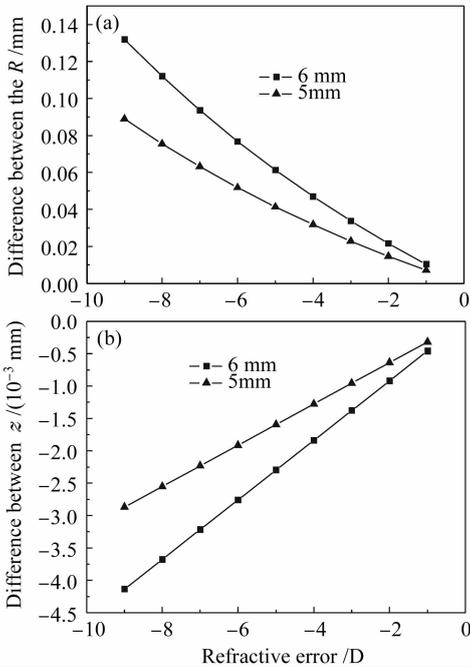


图1 实际切削的角膜半径(a)和角膜顶点处实际切削厚度(b)与 Munnerlyn 公式预期的半径之差随术前屈光不正的变化

Fig. 1 Changes of the difference between real anterior surface radius (a) and real ablation depth (b) and that obtained from Munnerlyn as a function of refractive error

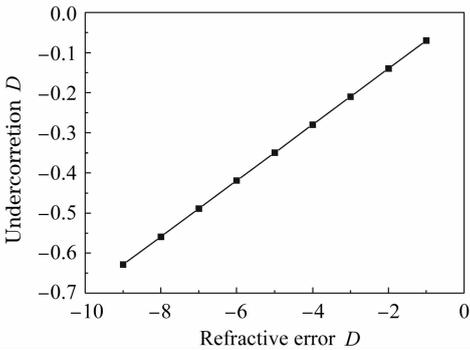


图2 术后人眼实际屈光度与理论屈光度之差随术前人眼屈光不正的变化

Fig. 2 With optical zone of 6 mm, the under-correction of the eye as a function of refractive error

中,计算出两种情况下眼睛的屈光度,这两个屈光度之差如图2所示。

按照 Munnerlyn 公式,本来预期术后将眼睛的屈光不正矫正为  $0D$ , 即术后人眼的屈光度正好能将平行光成像于视网膜上。但是由于激光能量的损失,激光实际切削掉的角膜厚度没有预期值大,造成切削后的角膜前表面的曲率半径没有预期值大,进而导致屈光不正不能完全被矫正,存在一定的剩余

屈光度,即术后人眼屈光度产生欠矫。由图2可以看出,随着屈光度数的增大,欠矫增大。但是由于激光斜入射和反射损失引起的欠矫并不大,当术前屈光不正为  $-9D$  时,欠矫为约  $-0.6D$ ,也就是手术后剩余  $-0.6D$  的屈光不正。而在临床上,小于  $-0.5D$  的屈光不正一般不需要矫正。因此,这个剩余屈光不正是可以接受的。计算中选取的角膜前表面的曲率半径为  $7\text{ mm}$ ,手术光区为  $6\text{ mm}$ ,当角膜前表面曲率半径增大、手术光区减小时,激光斜入射和反射的影响会进一步减小,因此,可以预计术后欠矫会进一步减小。由结果可知,激光在角膜前表面的斜入射和反射引起的能量损失,对术后欠矫的影响不大。那么,术后欠矫的出现应该是有其他原因造成的。

图3(a)给出了光区直径分别为  $5\text{ mm}$  和  $6\text{ mm}$ ,角膜前表面曲率半径取为  $7.8\text{ mm}$ ,术前屈光不正由  $-1D \sim -8D$  变化时,切削后角膜前表面实际的  $p$  值与 Munnerlyn 公式预期值之间的差别。由图中可以看出,不论是 Munnerlyn 公式的预期值还是实际值,手术后角膜前表面的  $p$  值都增大了,而且  $p$  值随着屈光不正的增加而增加。激光的斜入射和反射导致切削后的实际  $p$  值高于 Munnerlyn 公式的预期值。光区的大小对术后角膜前表面的  $p$  值影

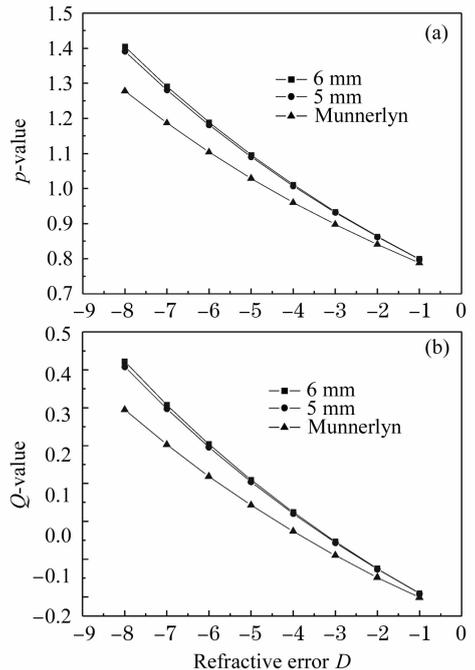


图3 切削后角膜前表面的  $p$  值(a)和  $Q$  值(b)同 Munnerlyn 预期的比较

Fig. 3 Comparing between  $p$ -value (a),  $Q$ -value (b) with that obtained from Munnerlyn

响不大。Dorrnsoro 等<sup>[9]</sup>通过用激光在平面和圆面聚甲基丙烯酸甲酯(PMMA)切削,验证了激光的斜入射和反射会引起术后  $p$  值的增大。为了便于分析,图 3(b)给出了非球面系数  $Q$  的变化情况。由图可以看出,随着屈光不正的增加,术后非球面系数由负值变为正值。根据非球面的定义<sup>[10]</sup>可知,当  $Q$  值由负值变为正值时,角膜前表面的面型由扁长椭球变为扁圆椭球。也就是说,对于屈光度数较大的人眼,手术后角膜前表面的面型发生了变化,这与临床结果符合<sup>[11]</sup>。

在 ZEMAX 软件中,以眼模型为基础,分析了非球面系数的增大对术后人眼成像质量的影响。计算了术前屈光不正为  $-8D$ ,光区直径为 6 mm 时,切削前后眼睛的球差。切削前,眼睛像差的查涅克(Zernike)展开式中的球差项的系数为  $0.863728\lambda$ ,切削后,Munnerlyn 公式预期的球差项的系数为  $1.102307\lambda$ ,实际的值应为  $1.169053\lambda$ 。由此可知,术后人眼的球差增大,这与临床结果一致<sup>[1,2]</sup>。模拟计算表明,激光角膜手术后,球差的增大是由于切削引起的非球面系数的变化导致的。计算同时表明,人眼切削后实际的球差值与 Munnerlyn 公式预期值相差不大。

## 4 结 论

由于激光在角膜前表面的斜入射和反射,使术后人眼的实际屈光度与 Munnerlyn 公式的预期值存在差别,即存在欠矫。但是计算激光斜入射和反射本身引起的术后欠矫并不大,临床上欠矫的发生可能是由于其他因素导致的。激光切削后角膜前表面的非球面系数随着术前屈光不正的增大而增大,由术前的负值变为正值。非球面系数的增大,使术后人眼的球差变大。考虑激光斜入射和反射后的术后非球面系数与 Munnerlyn 公式预期值差别不大,

术后非球面系数的大小与光区的关系不大。

## 参 考 文 献

- 1 Jack T. Holladay, Deep R. Dudgeja, Joanne Chang. Functional vision and corneal changes after laser in situ keratomileusis determined by contrast sensitivity, glare testing, and corneal topography [J]. *J. Cataract Refract. Surg.*, 1999, **25**(5): 663~669
- 2 Estber Moreno-Barriso, Jesús Merayo-Llves, Susana Marcos *et al.*. Ocular aberrations before and after myopic corneal refractive surgery: LASIK induced changes measured with laser ray tracing [J]. *Invest. Ophthalmol. Visual Sci.*, 2001, **42**(6):1396~1403
- 3 C. Roberts, W. Dupps. "Corneal biomechanics and their role in corneal ablative procedures," in Customized corneal ablation: The quest for super vision, S. McRae, R. Krueger, and R. Applegate, eds [M]. First Edition. New York: Stack Publishing, 2001
- 4 J. R. Jimenez, R. G. Anera, L. Jimenez del Barco *et al.*. Effect on laser-ablation algorithms of reflection losses and nonnormal incidence on the anterior cornea [J]. *Appl. Phys. Lett.*, 2002, **81**(8):1521~1523
- 5 M. Mrochen, T. Seiler. Influence of corneal curvature on calculation of ablation patterns used in photorefractive laser surgery [J]. *J. Refract. Surg.*, 2001, **17**(5):584~587
- 6 Lian Jingcai, Ye Wen, Zhou Deyou *et al.*. The complication of laser in situ keratomileusis and its management [J]. *Ophthalmol Chin.*, 1999, **1**(8):3~7  
廉井财,叶 纹,周得佑等. LASIK 手术并发症及其处理[J]. 眼科, 1999, **1**(8):3~7
- 7 C. R. Munnerlyn, S. J. Koons, J. Marshall. Photorefractive keratotomy: a technique for laser refractive surgery [J]. *J. Cataract Refract. Surg.*, 1988, **14**:46~52
- 8 Aart C. Kooijman. Light distribution on the retina of a wide-angle theoretical eye [J]. *J. Opt. Soc. Am.*, 1983, **73**(11): 1544~1550
- 9 Carlos Dorrnsoro, Daniel Cano. Experiments on PMMA models to predict the impact of corneal refractive surgery on corneal shape [J]. *Opt. Express*, 2006, **14**(13):6142~6156
- 10 W. T. Welford. Chen Huangming, Liang Lixuan Trans.. Aberrations of the Symmetrical Optical System Welford [M]. First edition. Beijing: Science Press, 1982. 13~15, 55~71  
W. T. 威尔福特. 陈昆明,梁丽轩译. 对称光学系统的像差 [M]. 第一版. 北京:科学出版社,1982. 13~15, 55~71
- 11 K. M. Tuan, D. Chernyak. Corneal asphericity and visual function after wavefront-guided LASIK [J]. *Optom Vis Sci.*, 2006, **83**(8):605~610