

# 极谱法透氧测试仪电流参数校准方法

曹远航<sup>1</sup> 张吉焱<sup>1</sup>

(1.中国计量科学研究院 医学计量中心, 北京 100029)

**摘要:** 随着青少年近视率的不断攀升, 近视防控备受关注。接触镜作为屈光矫治和近视防控的重要技术手段, 近些年在眼科临床上的应用日益广泛。接触镜的透氧性能密切关系到佩戴者的眼部健康。极谱法透氧测试仪是测量接触镜材料透氧系数的重要仪器, 测量准确与否直接影响到接触镜的产品质量评价。由于其测量原理和接口的特殊性, 现有技术下难以进行校准。该文章分析了极谱法透氧测试仪的工作原理, 设计了极谱法透氧测试仪电流参数校准模块, 并通过引入设备自带电压源实现电流校准, 方便可行。校准实验和稳定性实验验证了电流参数校准模块的性能可靠, 实验结果表明: 设计的校准模块电流电阻引入的误差小于 0.1%, 温度电阻引入的误差小于 0.5%, 完全满足预期设计要求, 并能为极谱法透氧测试仪的计量校准提供解决方案和技术手段。

**关键词** 极谱法透氧测试仪; 接触镜; 透氧量; 透氧系数; 校准模块

**中图分类号:** TB97 **文献标识码:** A

## Calibration Method for Current Parameters of Polarographic Oxygen Transmissibility Tester

CAO Yuanhang<sup>1</sup>, Zhang Jiyang<sup>1</sup>

(1.Center for Medical Metrology, Beijing, 100029, China)

**Abstract:** With the increasing prevalence of myopia among adolescents, the usage of contact lenses has seen a gradual rise. The oxygen permeability of contact lens materials plays a pivotal role in maintaining the ocular health of wearers. The polarographic method, commonly referred to as the polarographic approach, is a crucial instrument for assessing the oxygen permeability coefficient of contact lens materials. However, due to its specialized principles and interface, calibrating this instrument can be a challenging endeavor. This paper delves into the operational principles of the polarographic oxygen permeability testing instrument and introduces a calibration module for the current parameters in the polarographic oxygen permeability testing apparatus. This module incorporates the use of an internally integrated voltage source for current calibration. The performance of the standard module is validated through calibration experiments and stability tests. The experimental results reveal that the designed standard module introduces an error of less than 0.1% in current resistance and less than 0.5% in temperature resistance. It successfully meets the anticipated design requirements, offering a viable solution to the calibration challenges associated with polarographic oxygen permeability testing instruments.

### 1、前言

近视已逐渐演变为我国青少年普遍存在的健康问题<sup>[1]</sup>, 面对我国儿童和青少年的高近视率, 以及近视呈现年轻化和重度化的严峻形势, 2018年习近平总书记做出重要指示, 强调“全社会都要行动起来, 共同呵护好孩子的眼睛, 让他们拥有一个光明的未来”。一旦发现近视趋势, 即需进行相应的矫治措施。在眼科临床中, 近视矫治通常采取三种主要方法: 框架眼镜<sup>[2]</sup>、接触镜<sup>[3,4]</sup>以及屈光手术<sup>[5]</sup>。这些方法各具特色, 适用人群各异。随着人们对视觉品质

和外观舒适性要求的不断提升,以及对青少年近视防控的重视,接触镜尤其是角膜塑形镜(俗称 OK 镜)的配戴率在眼科领域正呈现出持续增长的发展趋势。

接触镜相比框架眼镜具有配戴美观、视野宽阔、物像接近真实等特点,不仅广泛应用于近视、远视、散光等屈光不正的矫正与改善,而且在控制青少年近视、散光发展、治疗特殊眼科疾病等方面也发挥着特殊的功效与作用。然而,隐形眼镜的佩戴安全一直是一个备受关注的问题。其中,接触镜的透氧性能是保障佩戴者眼部健康和舒适的重要指标之一。由于接触镜是通过泪液层与人眼角膜前表面贴附使用的,而角膜上皮细胞是一类代谢极其活跃的细胞<sup>[6]</sup>,氧供要求很高<sup>[7]</sup>,只有在充分氧供的状态下,角膜才能保持稳定的水合状态,保证角膜透明性<sup>[8]</sup>,因此接触镜应具有一定的透氧性,以维持正常的眼生理循环。

极谱法测试仪是目前用于测量接触镜氧气透过量的重要仪器,其适用范围广,不仅可以测量软性亲水性接触镜,还可以测量硬性透气性接触镜<sup>[9]</sup>,应用领域也十分广泛,如:接触镜生产研发公司、制造企业、计量质检、注册检验等行业与部门。

由于极谱法测试仪的计量校准目前行业内没有统一标准,质量监管没有统一方法,导致仪器性能无法准确评价,仪器质量良莠不齐。随着接触镜的使用越来越多,无论是从规范接触镜的产品质量和计量监管,还是从有效验配、控制近视、保护消费者视力健康的角度,都急需解决接触镜极谱法测试仪的计量校准和量值溯源,以解决接触镜透氧性能准确测量的实际问题。

目前,极谱法透氧测试仪的校准存在一定的技术难题,这主要源于测试仪器本身的复杂性以及接触镜材料的特殊性。有效的校准模块对于确保测试仪器的准确性和可靠性至关重要,但在实际应用中却面临一系列挑战。因此,本文旨在探讨极谱法透氧测试仪的校准问题,分析其中的难点和挑战,提出可能的解决方案,为推动该领域的研究和发展提供有价值的参考。

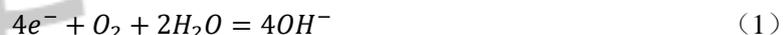
## 2、极谱法透氧测试仪工作原理

### 2.1 透氧量和透氧系数

透氧系数是指在规定条件下受到单位压力差时透过接触镜材料单位厚度的氧气流量,是表征接触镜材料透氧性能的关键参数,其单位为 $10^{-11}(\text{cm}^3\text{O}_2 \cdot \text{cm})/(\text{cm}^2 \cdot \text{s} \cdot \text{hPa})$ ,常用 $Dk$ 表示。透氧量是被测样品的氧气透过量,为其在规定条件下的透氧系数除以厚度,其单位为 $10^{-9}(\text{cm}^3\text{O}_2)/(\text{cm}^2 \cdot \text{s} \cdot \text{hPa})$ ,极谱法测试仪所测得的电流在一定条件下与镜片单位时间的透氧量成正比<sup>[10]</sup>。

### 2.2 极谱法测试仪工作原理

极谱法透氧测试仪通过极谱探头,利用阴阳两个电极与通过接触镜的氧气分子反应,其中氧气分子与中心电极(阴极)接触,瞬间转化成4个氢离子形成电流<sup>[11]</sup>,如公式(1)所示。



由于电流的大小与透过的氧气分子的个数成正比,因此,通过测量产生的电流即可得到被测接触镜的透氧量,从而得到接触镜材料的透氧系数,极谱法透氧测试仪的极谱探头如图1所示,其中金色的圆形区域即为中心电极(阴极),为纯金材质,其面积即为有效的测试面积。



图 1 极谱探头

材料的透气系数与温度呈正相关，人眼的温度约为 35 摄氏度，因此极谱法测试仪探头内部会有温度传感器来监测探头部位即接触镜的温度，以保证其实验结果是在适当的条件下测得的。

当使用极谱法透氧测试仪测量时，应先测量暗电流，暗电流是指在没有氧气透过的条件下流过极谱探头的电流值，构成了对零透氧材料的参考值。测量时，应设置温度为 35 摄氏度，相对湿度不低于 98%，并在此环境下至少保持 4 小时。将两片与极谱探头曲率半径一致的镜片中紧密夹装一片铝箔，并将其覆盖在放有浸湿薄滤纸的极谱探头上，然后将极谱探头放置在恒温恒湿箱中，并按照极谱法透氧测试仪的说明进行操作，待示值稳定后，极谱法测试仪显示的电流值即为暗电流。

暗电流测量结束后，即可开始平衡电流的测量，取出一片与极谱探头曲率半径一致的镜待测片，并将其覆盖在放有浸湿薄滤纸的极谱探头上，然后同样将极谱探头放置在恒温恒湿箱中，待示值稳定后，极谱法测试仪显示的电流值减去上述的暗电流值即为平衡电流。

待测镜片的  $Dk$  值计算如公式 (2) 所示：

$$Dk/t_{\text{初级}} = \frac{I - I_a}{pA \times A} \times 5.804 \times 10^{-2} \quad (2)$$

其中： $Dk/t_{\text{初级}}$  为初级氧气透过量，单位为  $\text{cm}^3/(\text{cm}^2 \cdot \text{s} \cdot \text{hPa})$ ； $pA$  为(大气压-水汽压) $\times 0.209$ (大气中氧气含量百分比值)单位为  $\text{hPa}$ ； $A$  为中心电极(阴极)的面积单位为  $\text{cm}^2$ ； $I$  为测得的电流单位为  $A$ ； $I_a$  为暗电流单位为  $A$ 。

电流和温度是评价接触镜极谱法测试仪的关键参数，因此，研制一种电流校准模块并具备温度验证功能，是解决接触镜极谱法测试仪校准与检测的重要手段。

### 3、电流校准模块的设计

#### 3.1 结构设计

为保证上述电路的可靠性，需要设计外壳和固定结构。在所设计的电流校准模块中，该模块由基板和外壳两部分构成。基板内部设计与机身完全对应的 9 针插口，焊接的铜质镀金插针可插入机身的极谱探头插口处，提供可靠的连接。

由于基板与焊接其上的探针需要在极谱法测试仪上插拔,故为实现基板在垂直方向的可靠固定,基板设计了一 45°的凸缘,并在下外壳底部设计了一 1.65mm 厚度的开槽,使基板在放入下外壳底部后可旋转 60°固定,保证了基板在垂直方向上受力均匀,固定可靠。外壳由上外壳和下外壳组成,上、下外壳通过旋紧的方式固定,使得上下外壳安装牢靠。所采用的外壳材料为黑色光敏树脂,基板安装完成后,外壳内部被灌注绝缘胶,使模块防水防尘,以确保整个模块的稳定性。

### 3.2 电路设计

极谱法测试仪机身与探头间通过 9 针插口连接,其功能为:插口 1 为高精度+0.75V 供电,插口 2 为+15V 供电,插口 3 为-15V 供电,插口 4 为电流输入引脚,仪器显示的电流值即为此引脚的输入电流示值,插口 5 为温度输入引脚,插口 6、7、8 为公共接地引脚,插口 9 无电学作用,仅作固定使用。

所设计的校准模块应与其功能对应,并可以利用插口提供的电压为校准模块供电,因此我们可以用经校准后的电阻接入+0.75V 供电,使其提供高精度的电流输入插口 4,作为校准电流,并使用经校准后的电阻按需接入三个不同电压供电中的一个,分压后接入插口 5,作为温度验证量。

不同的接触镜需要不同的电流校准值,极谱法透氧测试仪主机如图 2 所示,其量程分别为 2 $\mu$ A、20 $\mu$ A 和 200 $\mu$ A,故设计 5 个拥有不同电流值和温度值的校准模块,其电流标称值分别为: +150 $\mu$ A、+75.0 $\mu$ A、+15.0 $\mu$ A、+7.50 $\mu$ A、+1.50 $\mu$ A,其中+150 $\mu$ A、+15.0 $\mu$ A 和+1.50 $\mu$ A 为三个量程的 3/4 处, +75.0 $\mu$ A 和+7.50 $\mu$ A 为两个常用电流量程的约 1/3 处,温度电压标称值分别为+1.50V、+0.35V、-1.50V、-0.75V、+0.75V。上述 5 个校准模块根据标称电流的不同分别对应不同阻值的电流电阻,温度电阻根据不同的标称值选择分压电阻,如+150 $^{\circ}$ C 的分压电阻为 300 $\Omega$  和 2.7k $\Omega$ , +0.35V 和+0.75V 的电压标称值精度为 $\pm$ 1%, 其余精度为 $\pm$ 10%。



图 2 极谱法透氧测试仪主机

## 4、实验研究和分析

### 4.1 稳定性实验

校准模块的稳定性关系到能否准确校准极谱法测试仪,因此我们多次测量校准模块的稳定性。

使用仪器：201T Permeometer 测试仪、自制校准模块、自制转换接口、标准万用表；

实验条件：温度：(26±1) °C。

实验步骤：按照校准实验的方法测得示值，每个校准模块测试完成后立即插入自制转换接口测试其各电阻阻值，示值连续测量 7 天，其中模块 5 不涉及温度电阻测试。

电流电阻引入的误差如公式 (3) 所示：

$$\Delta I_{Ri} = -\frac{U}{R_i^2} \Delta R_i \Delta I_{Ri} = -\frac{U}{R_i^2} \Delta R_i \quad (3)$$

其中： $\Delta I_{Ri}$ 为电流误差， $U$ 为主机电压， $R_i$ 为电流电阻。

温度电阻引入的误差如公式 (4) 所示：

$$\Delta V_{RT} = \sqrt{\left(\frac{\partial}{\partial R_{Th}} \left(\frac{U \times R_{Tl}}{R_{Th} + R_{Tl}}\right) \Delta R_{Th}\right)^2 + \left(\frac{\partial}{\partial R_{Tl}} \left(\frac{U \times R_{Tl}}{R_{Th} + R_{Tl}}\right) \Delta R_{Tl}\right)^2} \quad (4)$$

其中： $\Delta I_{RT}$ 为温度误差， $U$ 为主机的 0.75V 供电电压， $R_{Th}$ 为高位温度电阻， $R_{Tl}$ 为低位温度电阻。

则电流电阻引入的误差和温度电阻引入的误差如表 1 所示：

**表 1 电流电阻引入的相对误差和温度电阻引入的相对误差**

模块名称	电流电阻引入的相对误差	温度电阻引入的相对误差
150uA, +150°C	-0.016%	0.033%
75uA, +35°C	0.074%	0.445%
15.0uA, -150°C	0.028%	-0.033%
7.50uA, -75°C	0.026%	-0.007%
1.50uA, +75°C	0.021%	-

从上表中可以看出，电流电阻引入的相对误差均小于 0.1%，温度电阻引入的相对误差均小于 0.5%，均远小于模块标称的误差和实验要求的误差。

## 4.2 校准实验

为测试所设计校准模块的功能是否符合预期，我们将所涉及的校准模块插入极谱法测试仪进行了校准实验。

使用仪器：201T Permeometer 测试仪、自制校准模块；

实验条件：温度：(26±1) °C。

实验步骤：将校准模块 1 插入极谱法测试仪，开机至少 20 分钟待示值稳定后记录示值数据，如电流示值不符合模块标识则旋转偏置旋钮调整至符合要求，关机并更换下一个模块，开机待示值稳定后记录数据，直至将全部校准模块测量完成。

实验结果如表 2 所示：

**表 2 校准实验结果**

模块名称	电流示值/uA	温度示值/°C	电流示值误差	温度示值误差
150uA, +150°C	150.0	146.7	0.00%	-2.2%
75uA, +35°C	75.0	32.4	0.00%	-7.4%
15.0uA, -150°C	15.0	-148.9	0.00%	-0.7%
7.50uA, -75°C	7.50	-72.4	0.00%	-3.4%
1.50uA, +75°C	1.502	74.9	0.13%	0%

当测量至 1.50uA+75°C 模块时，测试结果为 1.502uA，调整偏置旋钮后，极谱法测试仪的示值为 1.500uA，电流示值误差重新为 0%。被测仪器的温度示值误差均在 10% 内，符合要求。

## 5、结论

综上所述,通过本研究我们成功设计并实现了一种电流校准模块,经过测试和实验证明,本设计的电流校准模块能够符合预期设计要求,其电流电阻引入的相对误差均小于0.1%,温度电阻引入的相对误差均小于0.5%。使用该模块对极谱法透氧测试仪开展校准实验,被测设备的电流误差小于0.1%,温度误差小于10%。该校准模块不仅提供了1.5uA至150uA在内的标准电流值和-1.5V至+1.5V在内的电压值,还在结构上经过优化确保了稳定的性能。通过本研究的成果,提供了一种极谱法测试仪的校准方法与校准模块,为极谱法测量接触镜透氧系数的提供了有效校准手段。未来,我们将进一步优化和改进该模块,以实现更精准、方便的校准工作。

### 参考文献

- [1] Wang Y M, Lu S Y, Zhang X J, et al. Myopia Genetics and Heredity [J]. Children-Basel, 2022, 9(3):382.
- [2] Du K, Wang H, Ma Y, et al. Effect of Eyeglasses on Student Academic Performance: What Matters? Evidence from a Randomized Controlled Trial in China [J]. International Journal of Environmental Research and Public Health, 2022, 19(17).
- [3] Fu Y, Luo Y, Chen X, et al. Atropine-eluting silicone contact lenses for myopia control [J]. Journal of Biomaterials Applications, 2023, 37(10): 1724-1735.
- [4] Y. J. Lee, S. Y. Park, Y. Eom. Characteristics of Silicone Hydrogel Contact Lenses Commercially Available in Korea [J]. Annals of Optometry and Contact Lens, 2022, 21(2): 47-52.
- [5] E. D. Stahl. Pediatric Refractive Surgery [J]. Pediatric Clinics of North America, 2014, 61(3): 519.
- [6] C. J. Radke, M. Chhabra. Minimum contact lens oxygen transmissibility (Dk/L) with monod kinetics for the corneal oxygen consumption rate [J]. Investigative Ophthalmology & Visual Science, 2005, 46.
- [7] D. M. Harvitt, J. A. Bonanno. Re-evaluation of the oxygen diffusion model for predicting minimum contact lens Dk/t values needed to avoid corneal anoxia [J]. Optometry and Vision Science, 1999, 76(10): 712-719.
- [8] K. P. Pang, A. Lennikov, M. L. Yang. Hypoxia adaptation in the cornea: Current animal models and underlying mechanisms [J]. Animal Models and Experimental Medicine, 2021, 4(4): 300-310.
- [9] M. Chhabra, J. M. Prausnitz, C. J. Radke,. A single-lens polarographic measurement of oxygen permeability (Dk) for hypertransmissible soft contact lenses [J]. Biomaterials, 2007, 28(30): 4331-4342.
- [10] S. K. Dhallu, S. T. Huarte, P. S. Bilkhu, et al. Effect of Scleral Lens Oxygen Permeability on Corneal Physiology [J]. Optometry and Vision Science, 2020, 97(9): 669-675.
- [11] V. Compan, J. Garrido, J. A. Manzanares, et al. TRUE AND APPARENT OXYGEN PERMEABILITIES OF CONTACT-LENSES [J]. Optometry and Vision Science, 1992, 69(9): 685-690.