

二维光子晶体水凝胶传感器检测邻苯二甲醛

辛建伟^{1,2} 王一飞³ 孟子晖^{*1} 张玉琦^{*4} 刘鹏飞⁵

¹(北京理工大学化学与化工学院, 北京 102488) ²(延安大学医学院, 延安 716000)

³(北京理工大学明德书院, 北京 102488) ⁴(延安大学化学与化工学院, 延安 716000)

⁵(延安大学附属医院消化内科, 延安 716000)

摘 要 邻苯二甲醛(OPA)是一种新型化学消毒剂,在医疗机构中广泛使用,为保证使用效果和安全性,在临床使用中必须对其浓度进行检测和验证。本研究在二维光子晶体(2DPC)水凝胶中修饰乙二胺(EDA)并嵌入氨基,使水凝胶氨基功能化,制备了一种响应性 2DPC 水凝胶。2DPC 水凝胶聚合物链上嵌入的氨基可与 OPA 反应,随着 OPA 浓度增加,水凝胶的交联密度增大,从而导致水凝胶体积发生相变,即发生收缩现象,2DPC 的微球间距逐渐减小,而德拜衍射环直径逐渐增大。通过测量德拜衍射环直径的变化,并根据公式计算得到 2DPC 的微球间距的变化。结果表明,在 $10^1\sim 10^6$ nmol/L 范围内,OPA 浓度的对数值与微球间距呈良好的线性关系。因此,基于氨基功能化的 2DPC 水凝胶传感器可实现对 OPA 的定量检测。本方法检测线性范围宽,检出限为 0.21 nmol/L ($3\sigma/k$)。采用此水凝胶传感器检测了稀释的临床消毒剂中的 OPA,回收率为 100%~103%,相对标准偏差为 1.8%~5.5%。本研究构建的 2DPC 水凝胶传感器可用于临床内窥镜等器械消毒剂中 OPA 的检测。

关键词 二维光子晶体; 水凝胶; 传感器; 邻苯二甲醛; 消毒剂

邻苯二甲醛(OPA)是一种重要的医药化工中间体,现作为一种新型化学消毒剂在医疗机构中广泛使用^[1-2]。OPA 消毒液具有杀菌能力强、杀菌范围广、使用浓度低、灭菌时间短、毒性低、挥发性小、腐蚀性弱以及性质稳定等优点^[3-5],可用于不耐热内窥镜等器械的高水平消毒,杀灭肠道性致病菌和化脓性球菌和枯草杆菌黑色变种芽胞等^[6-8]。为保证 OPA 消毒剂的有效性和安全性,采用的消毒浓度应在合理范围内。因此,对其浓度的检测至关重要。在临床环境中,OPA 的最低有效浓度为 0.3%^[9],通常采用商用指示条进行验证^[10-11]。然而,指示条只可进行半定量分析,其准确性受有时间限制的测试步骤、温度及湿度等存储条件的影响。高效液相色谱法^[12]、荧光分析法^[13]、气相色谱-质谱(GC-MS)法^[14]和电化学法^[15]均可精确测定 OPA 浓度,但需要昂贵的仪器,并且检测成本高、实验复杂和缺乏便携性等限制了其临床适用性。因此,需要开发一种更精确且便携的 OPA 定量检测传感器,用于临床消毒过程中 OPA 浓度的检测和有效性的判断。

近年来,刺激响应型光子晶体水凝胶已广泛应用于生物医学诊断^[16-18]、环境监测^[19-21]和食品安全分析^[22-24]等领域。与三维光子晶体水凝胶^[25]相比,使用二维光子晶体(2DPC)的水凝胶传感器方便且易制备^[26-27]。通过修饰以及不同的识别剂功能化的光子晶体水凝胶,可与目标分析物相互作用,水凝胶的体积发生相变,即收缩或膨胀,从而改变每个水凝胶中嵌入的光子晶体的粒子间距^[18,28-29]。Cai 等^[28]制备了 2DPC 水凝胶传感器,水凝胶化学功能化后,可与特定化学物质选择性响应,发生体积相变,使其膨胀或收缩,从而改变其 2DPC 阵列间距并改变其衍射波长。Holtz 等^[29]报道了一种智能水凝胶传感器,可与特定分析物响应而溶胀,水凝胶的溶胀改变了 2DPC 的周期性,从而导致衍射波长偏移。因此,目标粒子间距的变化改变了光衍射,据此可对其进行监测以确定分析物的浓度。目前,尚未见 2DPC 用于 OPA 检测的研究报道。

本研究制备了一种乙二胺(EDA)功能化的 2DPC 水凝胶传感器,用于临床消毒剂中 OPA 的检测。

2023-09-29 收稿; 2024-03-06 接受

国家自然科学基金项目(No. 21804009)资助。

* E-mail: m_zihui@yahoo.com; yqzhang@yau.edu.cn

EDA 功能化的水凝胶网络中的氨基可与 OPA 中的醛基发生反应^[30-33],随着 OPA 浓度增加,水凝胶的交联密度增大,导致其体积发生相变,即收缩。水凝胶收缩减小了 2DPC 的微球间距,德拜衍射环直径增大。实验机理如图 1 所示。本研究开发的 2DPC 水凝胶传感器为 OPA 的检测提供了一种简便的新方法,对临床检测和应用具有重要的意义。

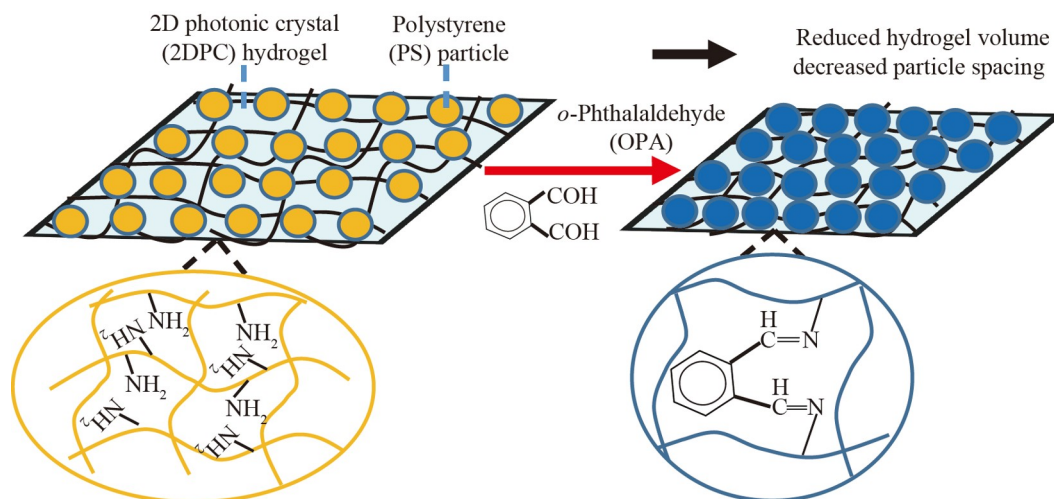


图1 二维光子晶体(2DPC)水凝胶传感器检测邻苯二甲醛(OPA)的机理示意图

Fig.1 Mechanism diagram of two-dimensional photonic crystal (2DPC) hydrogel sensor for detection of *o*-phthalaldehyde (OPA)

1 实验部分

1.1 仪器与试剂

Supra55 场发射扫描电子显微镜(SEM,德国 Zeiss 公司); BSA224S-CW 电子天平(赛多利斯科学仪器(北京)有限公司); DF-101S 集热式恒温加热磁力搅拌器(上海力晨邦西仪器科技有限公司); KQ5200B 型超声波清洗器(昆山市超声仪器有限公司); THZ-82A 水浴恒温振荡器(江苏盛蓝仪器制造有限公司)。

苯乙烯(St,分析纯,天津市大茂化学试剂厂); 丙烯酰胺(AM)和 *N,N*-亚甲基双丙烯酰胺(BIS)(分析纯,天津市科密欧化学试剂有限公司); 2-羟基-2-甲基-1-[4-(2-羟基乙氧基)苯基]-1-丙酮(I₂₉₅₉,分析纯)、1-乙基-(3-二甲基氨基丙基)碳二亚胺盐酸盐(EDC, 98%)、偶氮二异丁腈(AIBN, 98%)、苯乙烯磺酸钠(NaSS,分析纯)、EDA(分析纯)和丙烯酸(AAc, GC)(上海阿拉丁生化科技股份有限公司); *N*-羟基磺酰基琥珀酰亚胺钠盐(NHS, 98%)和 OPA(99%)(北京百灵威科技有限公司); OPA 消毒液(山东利尔康医疗科技股份有限公司); 甲醇和二甲基亚砜(DMSO,分析纯,天津市致远化学试剂有限公司)。实验用水为超纯水(18.2 MΩ·cm)。

1.2 实验方法

1.2.1 聚苯乙烯微球和二维光子晶体阵列的制备

采用分散聚合法^[34]合成直径为 1000 nm 的单分散聚苯乙烯(PS)颗粒。按照文献^[35]中的“针尖端流法”制备 2DPC 阵列。用 1 mL 注射器吸取适量 PS-正丙醇(3:1, V/V)的混合乳液,然后用注射器缓慢注射到空气-水界面,由于正丙醇和 PS 乳液之间存在表面张力差,微球能够在水面快速向外扩散,并自组装成紧密排列的六边形 2DPC 阵列。最后,用玻璃片缓慢提拉,将水面上的 2DPC 阵列转移到玻璃表面,置于空气中晾干,即得到 2DPC 阵列。

1.2.2 二维光子晶体水凝胶膜的制备

分别称取 0.35 g AAc、0.03 g BIS 和 0.8 g AM,加入 8.82 g 超纯水溶解,得到溶液 A。称取 0.165 g 光引发剂 I₂₉₅₉溶于 0.5 mL DMSO(33%, m/V),得到溶液 B。取 1 mL 溶液 A 与 20 μL 溶液 B 混合均匀,得到

溶液 C, 作为制备 2DPC 水凝胶的前驱液。

采用“三明治”法^[36]制备 2DPC 水凝胶。用移液枪吸取 110 μL 前驱液, 缓慢连续滴加在 2DPC 阵列表面, 并采用干净的盖玻片轻轻覆盖, 静置; 待前驱液充分渗透到光子晶体的缝隙中, 将其平稳放置于 365 nm 的紫外灯下光聚合 0.5 h, 再置入纯水中浸泡过夜。将制得的 2DPC 水凝胶薄膜从玻璃基底上剥离下来, 并用超纯水浸洗 3 次, 每次 30 min, 除去未反应的单体分子, 得到 2DPC 水凝胶薄膜。将薄膜裁切成约 1.0 cm $\times$ 1.0 cm 大小, 于超纯水中保存, 备用。

1.2.3 氨基功能化二维光子晶体水凝胶的制备

称取 0.15 g EDC 和 0.03 g NHS 溶于 10 mL 水中, 取切割成块的水凝胶薄膜浸入其中 1 h, 活化水凝胶链上的羧基^[37]。再将薄膜浸入 10 mL 一定浓度的 EDA 溶液中过夜, 取出后置于超纯水中浸洗 3 次, 每次 30 min, 除去未反应的 EDA、EDC 和 NHS 等, 制得 EDA 修饰的 2DPC 水凝胶薄膜。

1.2.4 二维光子晶体水凝胶德拜衍射环直径的测量

当激光垂直照射 2DPC 阵列时, 在阵列下方会产生德拜衍射环, 如图 3 所示, 满足布拉格衍射公式:

$$\sin\theta = \frac{2\lambda}{\sqrt{3}d} \quad (1)$$

式中, d 为周期间距, 对于六边紧密排列的 2DPC 阵列而言, d 等于微球粒径; θ 为德拜衍射角。设阵列与德拜环平面距离为 h , 德拜环直径为 D , 则 $\sin\theta = D/2h$, 代入式(1)即可得间距与德拜环大小的关系^[38]:

$$d = \frac{4\lambda\sqrt{(D/2)^2 + h^2}}{\sqrt{3}D} \quad (2)$$

图 2 为 2DPC 阵列的德拜环示意图和实物图。本实验中, 波长 $\lambda = 532 \text{ nm}$, h 固定在 60 mm。对于微球间距的测定, 每个浓度的样品使用 3 个 2DPC 水凝胶薄膜, 每个水凝胶薄膜测量 3 个不同的 D 值, 取其平均值, 并计算出 d 的平均值和标准差。

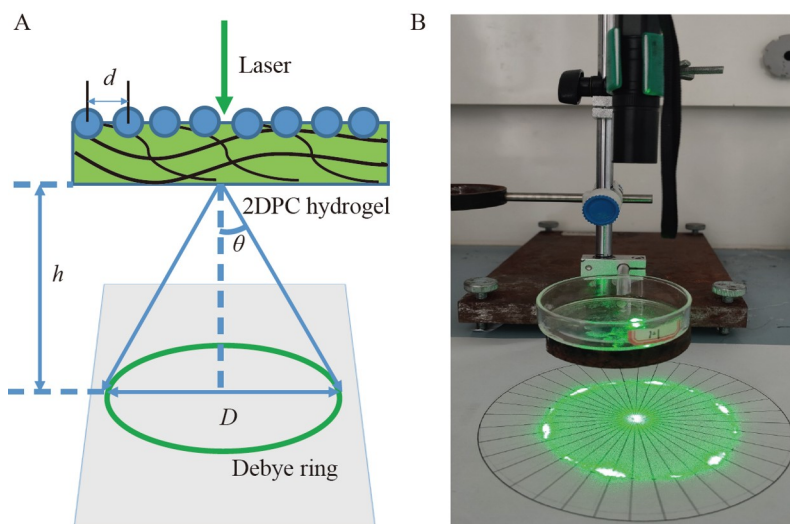


图2 (A) 2DPC 阵列的德拜环示意图和(B)实物图

Fig.2 (A) Schematic diagram and (B) actual diagram of Debye ring of 2DPC array

2 结果与讨论

2.1 二维光子晶体水凝胶薄膜的表征结果与分析

采用扫描电子显微镜(SEM)表征了制备的 2DPC 和 2DPC 水凝胶的表面形貌(图 3)。如图 3A 所示, 2DPC 阵列的微球规则且紧密地排列在一起; 如图 3B 所示, 2DPC 水凝胶也同样规则地排列在一起, 但微球间距明显增大。当被白光照射时, 2DPC 阵列和 2DPC 水凝胶根据波长对光线进行不同角度的衍射, 产生鲜艳的彩虹色(图 3 插图)。

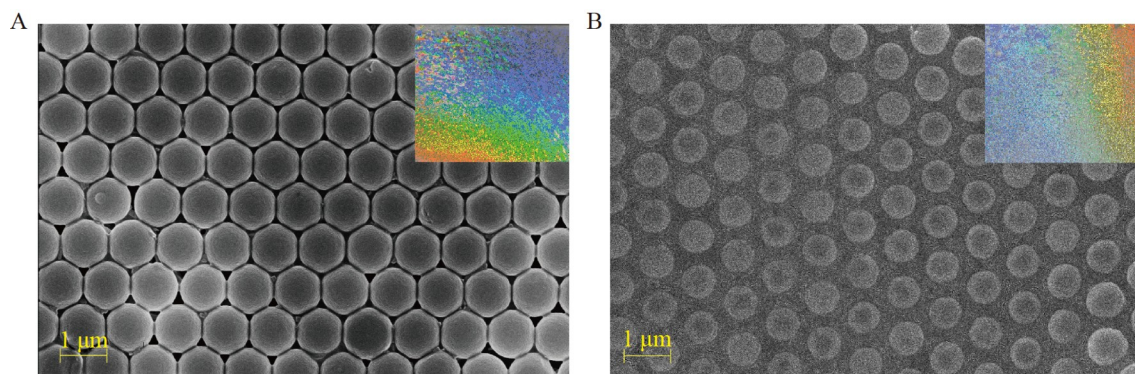


图3 2DPC阵列(A)和2DPC水凝胶(B)的扫描电镜(SEM)图,插图为相应样品被白色灯照亮时显示出彩虹色的照片

Fig.3 Scanning electron microscopy (SEM) images of 2DPC array (A) and 2DPC hydrogel (B). Insets are photographs of the corresponding samples showing iridescent colors when they are illuminated by a white light

2.2 二维光子晶体水凝胶的优化及邻苯二甲醛的检测

2.2.1 二维光子晶体水凝胶制备条件的优化

为了制备对 OPA 响应最灵敏的 2DPC 水凝胶,通过调节交联剂、AAc 以及 EDA 的浓度,制备了不同的水凝胶薄膜,在室温下与 10 mmol/L OPA 溶液反应 1.0 h,检测响应前后的德拜衍射环直径,考察其响应性能。由图 4 可知,在交联剂含量为 0.3%、AAc 含量为 1%和 EDA 浓度为 20 mmol/L 条件下,制备的 2DPC 水凝胶与 OPA 反应 40 min 时微球间距变化最大。因此,后续实验在此最优条件下制备 2DPC 水凝胶。

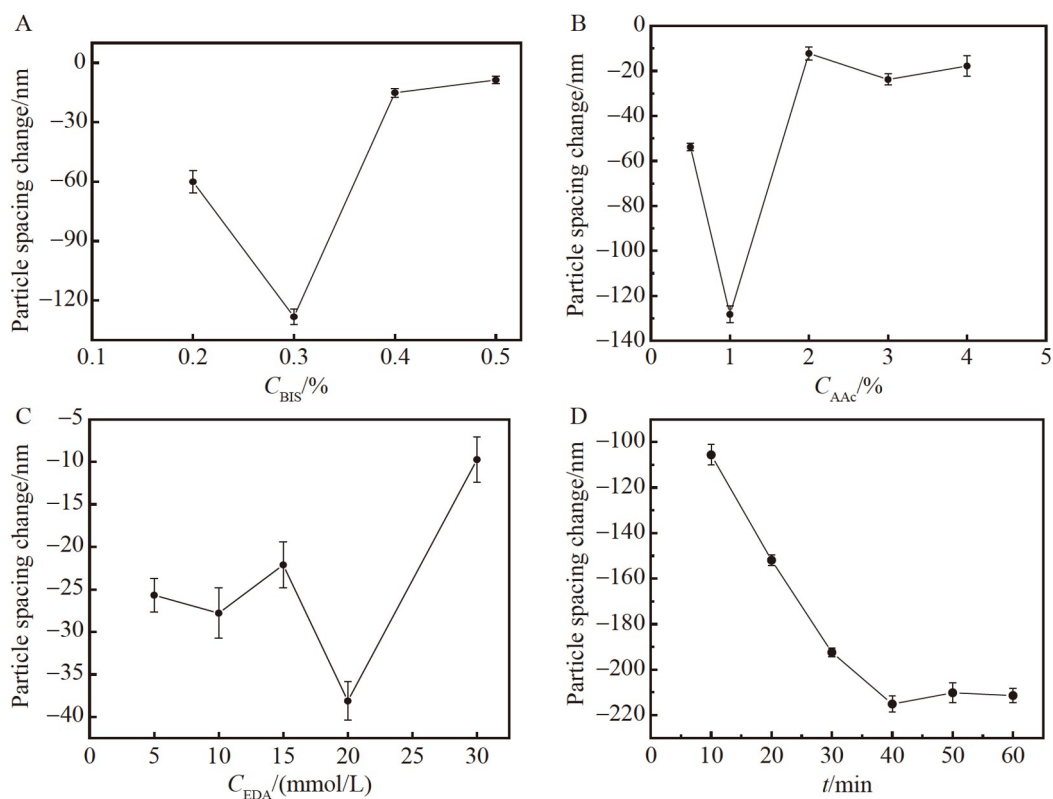


图4 2DPC水凝胶制备条件的优化: (A) N,N -亚甲基双丙烯酰胺(BIS)浓度; (B) 丙烯酸(AAc)浓度; (C) 乙二胺(EDA)浓度; (D) 反应时间

Fig.4 Optimization of conditions for preparation of 2DPC hydrogels: (A) Concentration of N,N -methylene bisacrylamide (BIS); (B) Concentration of acrylic acid (AAc); (C) Concentration of ethanediamine (EDA); (D) Reaction time

2.2.2 灵敏度和检出限

在相同的实验条件下制备多个 EDA (20 mmol/L) 修饰的 2DPC 水凝胶薄膜, 分别与 2 mL 浓度为 0、 10^1 、 10^2 、 10^3 、 10^4 、 10^5 和 10^6 nmol/L 的 OPA 溶液作用 40 min 后, 测试德拜环的大小, 再由公式(2)计算出 2DPC 的微球间距。由图 5 可知, 在 $10^1 \sim 10^6$ nmol/L 范围内, 2DPC 水凝胶微球间距与 OPA 浓度的对数值呈良好的线性关系, 线性方程为 $y=37.75-40.82\lg x(R^2=0.9925)$ 。检测后的 2DPC 水凝胶薄膜不可重复使用, 对 OPA 的检出限($LOD=3\sigma/k$)为 0.21 nmol/L。将本方法与其它 OPA 测定方法的性能进行比较(表 1), 其它方法都需要精密的设备, 而本方法只需要激光指针和标尺, 大大简化了分析过程。

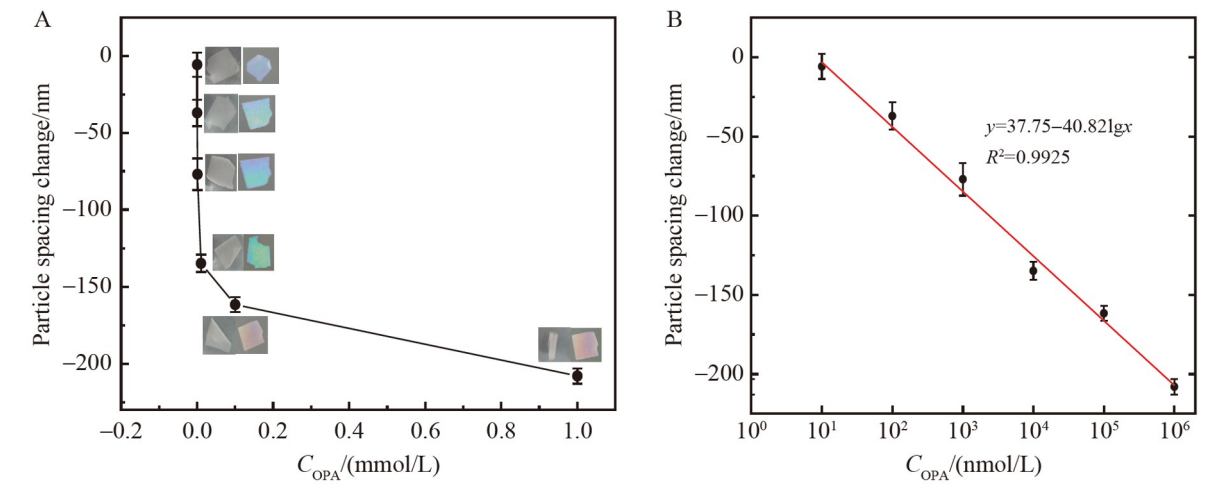


图5 (A) 2DPC 水凝胶薄膜在浓度为 10 nmol/L~1.0 mmol/L 的 OPA 水溶液中微球间距变化, 插图是水凝胶在相应浓度下的相变和固定角度下的结构色; (B) 微球间距变化与 $\lg C_{OPA}$ 的线性关系

Fig.5 (A) Changes of microsphere spacing of 2DPC hydrogel films in different concentrations of OPA aqueous solutions ranging from 10 nmol/L~1.0 mmol/L, the illustrations show the phase transition of the hydrogel at the corresponding concentration and the structural color at a fixed angle; (B) Linear relationship between microsphere spacing and logarithm of concentration of OPA

表1 本方法与其它检测OPA方法的性能比较

检测方法 Methods	检测范围 Detection range	检出限 Detection limit	参考文献 Ref.
高效液相色谱法 High performance liquid chromatography	0.0005%~0.05%	0.0001%	[12]
荧光光谱法 Fluorescence	5~100 $\mu\text{g/mL}$	1.7 $\mu\text{g/mL}$	[13]
气相色谱-质谱法 Gas chromatography-mass spectrometry	—	0.3 $\mu\text{g/L}$	[14]
电化学法 Electrochemistry	0.2%~0.6%	—	[15]
2DPC 水凝胶 2DPC hydrogel	$10^1 \sim 10^6$ nmol/L	0.21 nmol/L	本工作 This work

2.2.3 选择性

在常温下, 将 2DPC 水凝胶储存于水溶液中 1~2 个月, 测试传感器的稳定性。陈化水凝胶和新制备水凝胶与 OPA 反应后颗粒间距的变化结果基本一致, 表明 2DPC 水凝胶传感器的稳定性较好。考察了 10 mmol/L 的甲醛、乙醛、乙二醛、戊醛、苯甲醛、戊二醛、对苯二甲醛和间苯二甲醛对氨基功能化 2DPC 水凝胶薄膜微球间距的影响。由图 6 可知, 醛类物质虽都有一定的响应变化, 但在临床实际应用中, OPA 消毒液成分简单, 杂质较少, 干扰也较少, 因此, 本传感器可用于临床消毒剂中 OPA 的检测。

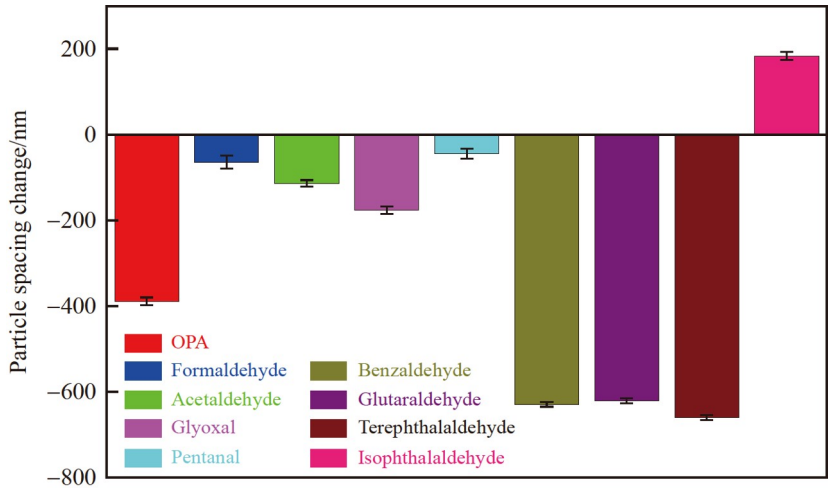


图6 2DPC 水凝胶薄膜与不同醛类物质作用后的微球间距变化
Fig.6 Changes of microsphere spacing between 2DPC hydrogel films and different aldehydes

2.3 实际样品分析

采用此 2DPC 传感薄膜测定了临床消毒液中 OPA 的含量。分别收集使用 2 d 后的 OPA 消毒液和 OPA 消毒液原液(浓度为 5.0~6.0 g/L,即 37.2~44.7 mmol/L)(由延安大学附属医院消化内科提供)。临床消毒所采用的 OPA 消毒液为复方消毒液,含有少量添加剂(季铵盐和螯合剂等)。采用标准加入法向 2 mL 稀释 10000 倍后的实际样品中加入等体积已知浓度的 OPA 标准溶液,并测定加标后样品中 OPA 的浓度,结果见表 2,回收率为 100%~103%,相对标准偏差(RSD)为 1.82%~5.48%,表明此传感薄膜检测 OPA 具有良好的准确性和可靠性。在临床实践中每天使用 OPA 消毒液约 10 次,一般 10 d 后就会用 OPA 消毒液浓度测试卡(利尔康)粗略地测试 OPA 有效成分占比是否低于 0.3%。此方法虽然简便,但属于半定量分析,检测灵敏度低。本方法灵敏度高、检出限低、线性范围宽,可实时准确地监测消毒液中的 OPA 浓度,提高临床使用效率以及安全性。

表2 临床用消毒液中OPA的检测结果
Table 2 Detection results of OPA in clinically used disinfectant

样品(稀释 10 ⁴ 倍) Sample (Diluted 10 ⁴ times)	测得值 Found/ (μmol/L)	相对标准偏差 RSD/ (%, n=3)	加入值 Added/ (μmol/L)	总测得值 Total found/ (μmol/L)	回收率 Recovery/ %	相对标准偏差 RSD/ (%, n=3)
使用 2 d 后的 OPA Used OPA after 2 d	4.02	6.9	0.100	4.12	100	2.5
			1.00	5.05	103	2.7
OPA 原液 OPA stock solution	4.25	8.3	0.100	4.35	100	1.8
			1.00	5.25	100	5.5

3 结论

基于 2DPC 水凝胶传感器构建了一种用于临床消毒剂中 OPA 的快速、灵敏和准确的定量检测方法。此水凝胶传感器利用氨基和醛基的亲核加成反应,使水凝胶发生收缩,引起微球间距变化,通过简单的 2DPC 德拜衍射测量进行监测。结果表明,在 10¹~10⁶ nmol/L 范围内,OPA 浓度的对数与微球间距大小呈良好的线性关系,可用于临床消毒剂中 OPA 的检测,检出限为 0.21 nmol/L,灵敏度高,样品用量少。本方法优于临床上采用的 OPA 消毒液浓度测试卡,灵敏度更高且更准确,可以检测低浓度的 OPA。本研究开发的检测 OPA 的新型 2DPC 水凝胶传感器制备成本低,读取结果简单,只需一个激光笔和直尺即可完成检测。在资源有限的环境中,此 2DPC 水凝胶具有重要的临床应用价值。

References

- [1] GREGORY A W, SCHAALJE G B, SMART J D, ROBISON R A. *Infect. Control Hosp. Epidemiol.*, 1999, 20(5): 324-330.
- [2] ALFA M J, SITTER D L. *J. Hosp. Infect.*, 1994, 26(1): 15-26.
- [3] RUTALA W A, WEBER D J. *Emerging Infect. Dis.*, 2001, 7(2): 348-353.
- [4] CABRERA-MARTINEZ R M, SETLOW B, SETLOW P. *J. Appl. Microbiol.*, 2002, 92(4): 675-680.
- [5] WALSH S E, MAILLARD J Y, RUSSELL A D, HANN A C. *J. Appl. Microbiol.*, 2001, 91(1): 80-92.
- [6] WALSH S E, MAILLARD J Y, RUSSELL A D. *J. Appl. Microbiol.*, 1999, 86(6): 1039-1046.
- [7] GUAN A, WANG Y, PHILLIPS K S. *Biofouling*, 2018, 34(8): 925-934.
- [8] HESSION S M. *Gastroenterol. Nurs.*, 2003, 26(3): 110-114.
- [9] COOKE R P D, GODDARD S V, WHYMANT-MORRIS A, SHERWOOD J, CHATTERLY R. *J. Hosp. Infect.*, 2003, 54(3): 226-231.
- [10] DAI Yan-Zhen, SHI Rui-Xue, MA Bo-Feng, WANG Shu-Meng, WANG Yu-Lu, WANG Cong-Min. China Patent, CN107024473-A, CN107024473-B, 2019.
戴彦榛, 史瑞雪, 马柏凤, 王舒萌, 王玉路, 王聪敏. 中国专利, CN107024473-A, CN107024473-B, 2019.
- [11] XIONG Zhong-Liang, XIONG Qing-Jue, YU Qing-Guo. China Patent, CN106872459-A, 2017.
熊忠良, 熊清爵, 郁庆国. 中国专利, CN106872459-A, 2017.
- [12] ZHANG Dan, SUI Chao-Xia. *Jiangsu J. Prev. Med.*, 2020, 31(3): 245-247.
张丹, 睢超霞. 江苏预防医学, 2020, 31(3): 245-247.
- [13] REN Ning-Na, JIA Min, WU Ji-Kui. *J. Shanghai Ocean Univ.*, 2019, 28(6): 994-1001.
任宁娜, 贾敏, 吴继魁. 上海海洋大学学报, 2019, 28(6): 994-1001.
- [14] OH J A, SHIN H S. *J. Chromatogr. A*, 2012, 1247: 99-103.
- [15] CHEN R L C, HSIEH B C, LIN J S, CHENG T J. *Biosensors*, 2023, 13(4): 485.
- [16] SHEN P, JANG K, CAI Z, ZHANG Y, ASHER S A. *Microchim. Acta*, 2022, 189(11): 418.
- [17] CHI J, WU Y, QIN F, SU M, CHENG N, ZHANG J, LI C, LIAN Z, YANG X, CHENG L, XIE H, WANG H, ZHANG Z, CARMELIET J, SONG Y. *Lab Chip*, 2022, 22(16): 3008-3014.
- [18] DAHER M G, TAYA S A, COLAK I, VIGNESWARAN D, OLAIMAT M M, PATEL S K, RAMAHI O M, ALMAWGANI A H M. *Chin. J. Phys. (Amsterdam, Neth.)*, 2022, 77: 1168-1181.
- [19] DU X, ZHAI J, LI X, ZHANG Y, LI N, XIE X. *ACS Sens.*, 2021, 6(6): 1990-2001.
- [20] XU B, MA X, DAI A, PAN X, PAN X, LI N, ZHU J. *Polym. Chem.*, 2022, 13(29): 4290-4297.
- [21] LI L, DONG X, LIU Z, WEI J, LI J, ZHOU H, ZHU J, SHI X. *Dyes Pigm.*, 2021, 195: 109676.
- [22] WANG S, SHAO R, LI W, LI X, SUN J, JIAO S, DAI S, DOU M, XU R, LI Q, LI J. *ACS Appl. Mater. Interfaces*, 2022, 14(16): 18845-18853.
- [23] DAI S, LI Q, LI W, ZHANG Y, DOU M, XU R, WANG T, LU X, WANG F, LI J. *Compr. Rev. Food Sci. Food Saf.*, 2022, 21(6): 4900-4920.
- [24] JIA M, YU L, LI X, LI Y, HE X, CHEN L, ZHANG Y. *Talanta*, 2023, 260: 124638.
- [25] SOBHANIMATIN M B, POURMAHDIAN S, TEHRANCHI M M. *Polym. Test.*, 2021, 98: 106999.
- [26] SHEN P, ZHANG Y, CAI Z, LIU R, XU X, LI R, WANG J J, YANG D A. *J. Mater. Chem. C*, 2021, 9(21): 6944.
- [27] GAO Min-Jun, LIU Gen-Qi, XUE Ya-Feng, CHEN Xiao-Juan, SHI Wei-Jiang, FAN Xiao-Dong. *Chin. J. Anal. Chem.*, 2017, 45(5): 727-733.
高敏君, 刘根起, 薛亚峰, 陈小娟, 师维江, 范晓东. 分析化学, 2017, 45(5): 727-733.
- [28] CAI Z, SMITH N L, ZHANG J T, ASHER S A. *Anal. Chem.*, 2015, 87(10): 5013-5025.
- [29] HOLTZ J H, HOLTZ J S W, MUNRO C H, ASHER S A. *Anal. Chem.*, 1998, 70(4): 780-791.
- [30] LI B, WANG L, CHEN X, CHU X, TANG H, ZHANG J, HE G, LI L, CHEN G. *Nat. Commun.*, 2022, 13(1): 311.
- [31] JIE Z, LIU J, YING Y, YANG H. *Spectrochim. Acta, Part A*, 2023, 287(Pt 2): 122048.
- [32] LU X, SHEN P, BAI Q, LIU Y, HAN B, MA H, LI R, HOU X, ZHANG Y, WANG J J. *Spectrochim. Acta, Part A*, 2023, 300: 122920.
- [33] ZHANG Z, HE C, RONG Y, REN H, WANG T, ZOU Z, CHEN X. *Natl. Sci. Rev.*, 2021, 8(4): nwaal28.
- [34] ZHANG F, CAO L, YANG W. *Macromol. Chem. Phys.*, 2010, 211(7): 744-751.
- [35] ZHANG J T, WANG L, LAMONT D N, VELANKAR S S, ASHER S A. *Angew. Chem. Int. Ed.*, 2012, 51(25): 6117-6120.
- [36] CAI Z, SASMAL A, LIU X, ASHER S A. *ACS Sens.*, 2017, 2(10): 1474-1481.
- [37] LI G, XIAO F, LIAO S, CHEN Q, ZHOU J, WU Z, YU R. *Sens. Actuators, B*, 2018, 277: 591-597.
- [38] CAI Z, ZHANG J T, XUE F, HONG Z, PUNIHAOLE D, ASHER S A. *Anal. Chem.*, 2014, 86(10): 4840-4847.

Detection of *o*-Phthalaldehyde by Two-dimensional Photonic Crystal Hydrogel Sensor

XIN Jian-Wei^{1,2}, WANG Yi-Fei³, MENG Zi-Hui^{*1}, ZHANG Yu-Qi^{*4}, LIU Peng-Fei⁵

¹(School of Chemistry and Chemical Engineering, Beijing Institute of Technology, Beijing 102488, China)

²(School of Medicine, Yan'an University, Yan'an 716000, China)

³(Mingde College, Beijing Institute of Technology, Beijing 102488, China)

⁴(School of Chemistry and Chemical Engineering, Yan'an University, Yan'an 716000, China)

⁵(Department of Gastroenterology, Affiliated Hospital of Yan'an University, Yan'an 716000, China)

Abstract *o*-Phthalaldehyde (OPA) is a new type of chemical disinfectant widely used in medical institutions. The development of new efficient and convenient detection platforms or methods for OPA is of great significance. In this work, in two-dimensional photonic crystal (2DPC) hydrogel, a responsive 2DPC hydrogel was prepared by functionalizing the hydrogel with ethylenediamine (EDA) and embedding amino groups. The amino group on the polymer chain of 2DPC hydrogel reacted with OPA, and with the increase of OPA concentration, the crosslinking density of the hydrogel also increased, resulting in the volume phase transition of the hydrogel, e.g., shrinkage phenomenon. In the meantime, the spacing of 2DPC microspheres gradually decreased, while the diameter of Debye diffraction ring gradually increased. The results showed that the change of particle size spacing had a good linear relationship with logarithm of concentration of OPA in the range of 10^1 – 10^6 nmol/L, with the detection limit of 0.21 nmol/L ($3\sigma/k$). Therefore, the amino functionalized photonic crystal hydrogel sensor could realize the quantitative detection of OPA. The method was simple with low cost, ease to operate and use. Then the practicability of this hydrogel sensor for real sample was verified in the diluted clinical disinfectant. The recoveries of OPA in the diluted disinfectant were 100%–103%, with a relative standard deviations of 1.8%–5.5%. The results proved that 2DPC hydrogel sensor could be used for detection of OPA in disinfectant used for clinical endoscopes and other instruments.

Keywords Two-dimensional photonic crystals; Hydrogel; Sensors; *o*-Phthalaldehyde; Disinfectant

(Received 2023-09-29; accepted 2024-03-06)

Supported by the National Natural Science Foundation of China (No. 21804009).