

## Teflon AF 液芯波导的应用研究进展

孙兆华<sup>1,2</sup>, 周 雯<sup>1</sup>, 许占堂<sup>1,2</sup>, 叶海彬<sup>1,2</sup>, 杨超宇<sup>1,2</sup>,  
林俊芳<sup>1,2</sup>, 胡水波<sup>1,2</sup>, 杨跃忠<sup>1</sup>, 李 彩<sup>1</sup>, 曹文熙<sup>1</sup>

1. 中国科学院南海海洋研究所 LTO 国家重点实验室, 广东 广州 510301
2. 中国科学院研究生院, 北京 100039

**摘 要** 由于 Teflon AF 具有气体渗透性结构、疏水性、化学惰性、比水低的折射率等特点, 因此 Teflon AF 液芯波导在吸收、荧光、拉曼光谱分析、气体传感器等诸多领域得到了广泛的应用。本文将剖析 Teflon AF 液芯波导的特性, 分析 Teflon AF 液芯波导的应用研究进展, 展望 Teflon AF 液芯波导的应用研究前景。

**关键词** 仪器分析; 光谱分析; Teflon AF 液芯波导

**中图分类号:** O657, P714 **文献标识码:** A **DOI:** 10.3964/j.issn.1000-0593(2011)11-2881-05

### 引 言

在 20 世纪 70 年代就已经提出了液芯波导的概念, 由折射率为 1.51 的硼硅酸盐玻璃或是折射率 1.45 的石英玻璃毛细管, 内部充满折射率大于 1.51 或 1.45 的高折射率的液体构成, 入射光可以在波导内部传播, 由于波导纤芯是液体, 所以称为液芯波导, 多用于拉曼光谱分析中<sup>[1]</sup>。由于当时无法找到折射率小于水( $n \sim 1.33$ )的材料, 因此液芯波导无法用于水溶液的化学分析中。1989 年, DuPont 公司发明了折射率低于水的材料——Teflon AF<sup>[2]</sup>, 彻底改变了这一情况, 推动了仪器分析和光谱分析等技术领域的发展。Teflon AF 是一种四氟乙烯的无定形聚合物, 目前有 Teflon AF-1600 和 Teflon AF-2400 两种类型, 折射率分别是 1.31 和 1.29。由 Teflon AF 制造的液芯波导, 充满水溶液后, 由于 Teflon AF 的折射率小于水的折射率, 入射光可在 Teflon AF 与水的界面发生全反射, 从而将光束束缚在波导内传播。用于仪器分析和光谱分析中, 既可以作为光程池, 又可以作为流路样品池, 低成本、便捷地实现了低损耗、小容积、小尺寸的长光程样品池, 再加上 Teflon AF 制造的液芯波导可盘曲、具有气体渗透性等突出的特性, 使 Teflon AF 制作的液芯波导迅速在长光程吸收分析、荧光分析、拉曼光谱分析、气体传感器等诸多领域得到了广泛的应用。

目前, 不同学者对 Teflon AF 制作的液芯波导的称呼不同, 长光程液芯波导毛细管 (long path-length liquid

waveguide capillary cell, LWCC)、液芯波导 (liquid core waveguides, LCW) 都能够见到报道, 本工作为了将 LCW/LWCC 与非 Teflon AF 制造的液芯波导加以区分, 便于识别, 将其称为 Teflon AF 液芯波导 (LWCC/LCW), 并剖析 Teflon AF 液芯波导的特性, 分析 Teflon AF 液芯波导的应用研究进展, 展望 Teflon AF 液芯波导的应用研究前景。

### 1 Teflon AF 液芯波导的特性

在 Teflon AF 液芯波导二十多年的发展过程中, 出现过多种类型<sup>[3]</sup>: 如内表面镀 Teflon AF 玻璃毛细管、由 Teflon AF 制造的毛细管、外表面镀 Teflon AF 包层的石英毛细管、商业化的 Teflon AF 液芯波导样品池等。目前, 得到学术界广泛认可的、光学性能优良的 Teflon AF 液芯波导有两种型号, 一种是由 Teflon AF2400 制造的毛细管, 称为一型液芯波导, 另一种是外表面镀 Teflon AF2400 包层的石英毛细管, 称为二型液芯波导。一、二型液芯波导都是基于全反射原理传播光, 只是发生全反射的界面不同而已。

图 1 所示是一、二型 Teflon AF 液芯波导光束在其内部传输的剖面示意图。对于一型 Teflon AF 液芯波导, 由于 Teflon AF 的折射率小于水, 当入射角超过全反射角时, 在 Teflon AF 管的内表面发生全反射, 从而将光束束缚在波导内传播; 对于二型液芯波导, 在水与石英的界面, 由于石英的折射率大于水, 并不会发生全反射, 但是在石英与 Teflon AF 的界面, 石英的折射率大于 Teflon AF, 当入射角

收稿日期: 2011-02-22, 修订日期: 2011-06-28

基金项目: 国家自然科学基金项目 (40906022), 中国科学院科研装备项目 (2010042) 和国家 (863 计划) 项目 (2006AA09A310, 2006AA09Z182) 资助

作者简介: 孙兆华, 1979 年生, 中国科学院南海海洋研究所助理研究员 e-mail: JoeySun@scsio.ac.cn

超过全反射角时,入射光可在 Teflon AF 与石英的交界面发生全反射,从而将光束束缚在波导内传播。

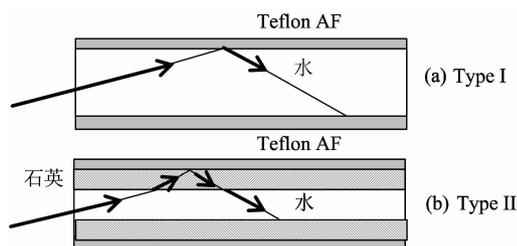


Fig. 1 Cross-sectional view of light transmission in LCW/LWCC

- (a): Type I LCW/LWCC constructed with Teflon AF tubing;  
 (b): Type II LCW/LWCC constructed with fused silica tubing with an outer coating of Teflon AF

一、二型 Teflon AF 液芯波导构成方式的不同,必然导致其特性和应用方式的不同,体现在以下几个方面。

(1)在一、二型 Teflon AF 液芯波导中发生全反射的光疏介质都是 Teflon AF2400,但是光密介质却不同,一型 Teflon AF 液芯波导的光密介质为水、二型 Teflon AF 液芯波导的光密介质为石英,因此一、二型 Teflon AF 液芯波导的全反射角不同。假设波导充满纯水( $RI \sim 1.33$ ),可计算得一型 Teflon AF2400 液芯波导的全反射角为  $14.1^\circ$ ,对于二型 Teflon AF 液芯波导计算相对复杂,详细过程可参见 Byrne 等<sup>[4]</sup>和 D'Sa 等<sup>[5]</sup>发表的关于一、二型 Teflon AF 液芯波导的光传输理论分析。在利用 Teflon AF 液芯波导制作样品池,光耦合设计的实际应用中,一定要注意由于全反射角和数值孔径的差异而导致的一、二型 Teflon AF 液芯波导样品池的光损耗和耦合方式的不同。

(2)由于 Teflon AF 液芯波导是基于全反射原理传输光,因此 Teflon AF 液芯波导的有效光程和实际物理长度是不相符的。二型 Teflon AF 液芯波导的全反射角大于一型液芯波导,而且光在二型液芯波导中传输时,需要多次穿过石英层,因此有效光程和实际物理长度不相符的问题,在二型 Teflon AF 液芯波导中体现的比一型明显。Belz 等<sup>[3]</sup>针对一、二型 Teflon AF 液芯波导的线性和有效光程的问题进行过详细的分析,他指出,一型 Teflon AF 液芯波导的有效光程和物理长度基本一致,二型 Teflon AF 液芯波导的有效光程稍短于物理长度,依赖于二型 Teflon AF 液芯波导的内径和壁厚。利用 Teflon AF 液芯波导作为样品池,利用标准溶液标定工作曲线测量分析物的浓度时,如测量海水中的亚硝酸盐、磷酸盐等,可不用考虑有效光程和物理长度不一致的问题;但是测量绝对吸收系数,如测量海水中 CDOM 的吸收系数时(尤其测量大洋水体中的 CDOM 吸收系数时),有效光程和物理长度不一致的问题需要慎重考虑,在这种情况下,选用一型 Teflon AF 液芯波导为宜,如果要选用二型 Teflon AF 液芯波导,需要利用标准物质针对使用的二型 Teflon AF 液芯波导标定有效光程。

(3)Teflon AF 具有气体渗透性结构、疏水性的特性,因此对于直接利用 Teflon AF 制造的一型液芯波导,可以作为

气体渗透膜使用,目前已有众多学者利用这种特性,设计了新型的光纤化学传感器用于测量水溶液和大气中的气体<sup>[6-12]</sup>。但是也正是因为 Teflon AF 的这种特性,导致一型 Teflon AF 液芯波导比二型 Teflon AF 液芯波导更容易在内壁上附着微小气泡,更容易被玷污,进而测量时更容易造成光信号的扰动。

一、二型 Teflon AF 液芯波导的光谱范围都能够达到  $200 \sim 2\,000\text{ nm}$ ,但是光谱范围随着 Teflon AF 液芯波导物理长度的增加而变窄,据我们的实验显示,在物理长度增加到  $5\text{ m}$  时, Teflon AF 液芯波导的光谱范围约为  $400 \sim 700\text{ nm}$ ,仍能够覆盖可见光波段。

相对于传统的仪器分析中的样品池,利用 Teflon AF 液芯波导作为样品池,在没有增加(甚至有些情况下是减少)样品体积、没有增加光能量损耗的情况下,有效地增加了有效光程,进而可以数量级的提高检测灵敏度,这是 Teflon AF 液芯波导目前倍受关注、应用最广泛的突出优点,而且无论一、二型液芯波导都具有盘曲性,即便是  $5\text{ m}$  长的波导,也可盘曲在直径  $150\text{ mm}$ ,高  $10\text{ mm}$  的体积内,这一优势非常有利于仪器的小型化设计。但也正是由于 Teflon AF 液芯波导样品池的这种高灵敏性, Teflon AF 液芯波导样品池非常“敏感”,轻微的污染、或是使用中的稍有不慎,将严重影响测量结果。LWCC 的生产厂家 WPI(World Precision Instruments; Sarasota, FL, USA),建议在 Teflon AF 液芯波导样品池的使用前后必须进行彻底的清洁,使用后需要妥善的保存。清洗时,使用乙腈(或甲醇)、 $1\text{ mol} \cdot \text{L}^{-1}\text{ NaOH}$  溶液、 $1\text{ mol} \cdot \text{L}^{-1}\text{ HCl}$  溶液和去离子水依次冲洗;保存时,在波导清洗干净后,充满超纯水,并用塞子塞住两端,避免内部干掉,阻止微生物生长<sup>[12]</sup>。但是依据我们近 6 年的使用经验,最好慎重使用有机溶剂清洗 Teflon AF 液芯波导,使用不当会造成对波导的二次污染,在对波导精心维护的情况下,仅仅使用  $1\text{ mol} \cdot \text{L}^{-1}\text{ NaOH}$  溶液、 $1\text{ mol} \cdot \text{L}^{-1}\text{ HCl}$  溶液和去离子水依次冲洗,就能够达到很好的使用效果;保存时,对于一型 Teflon AF 液芯波导,清洗干净后,充入超纯水,并用塞子塞住两端,是不错的方法,但是对于二型 Teflon AF 液芯波导,清洗干净后,充满空气,并用塞子塞住两端保存,比充满纯水的效果更好。

## 2 Teflon AF 液芯波导的应用

### 2.1 长光程吸收测量

目前 Teflon AF 液芯波导已经被广泛应用到水溶液痕量元素的分析中,尤其在海水中的应用的更为广泛,如 CDOM<sup>[13-15]</sup>、硝酸盐、亚硝酸盐<sup>[16-24]</sup>、磷酸盐<sup>[23-29]</sup>、铁离子<sup>[30-33]</sup>、铜离子<sup>[34, 35]</sup>等<sup>[36-42]</sup>。这些应用基本上都是利用了 Teflon AF 液芯波导可以设计长光程样品池,可以成数量级的提高检测灵敏度这一优点,样品池的构建方式也比较简单。图 2(c)所示为长光程样品池的结构示意图,左右两端的光纤,一端连接光源,一端连接探测器,依据测量的灵敏度、仪器功耗和测量光谱范围的需求,光源可选择发光二极管、高亮 LED 光源、溴钨灯等,探测器可以选择光敏二极管、

CCD、微型光纤光谱仪等。样品池的进出水的端口是可以互换的,进样方式可以选择用注射器或是蠕动泵等。“T”型的光液耦合器,可以自己设计加工,也可以购买商业化的适合管径的“T”型接头安装,一般来讲,有两种耦合方式最为常用,一种是直接将裸光纤插入液芯波导,利用液芯波导内径和裸光纤外径之间的空隙进样和排废,如图 2(a)所示;另一种是将光纤插针和液芯波导同轴放置,中间留有适当间隙,用于进出水,如图 2(b)所示。两种耦合方式都非常简单,耦合效率都能够满足一般的应用需求,裸光纤直接插入液芯波导的方式,相对于另一种方式耦合效率会稍高,但是由于芯液波导内径和裸光纤外径之间的空隙一般较小,所以使用这种耦合方式的样品池,进样前溶液需要通过合适孔径的滤膜过滤,不然很容易堵塞波导。

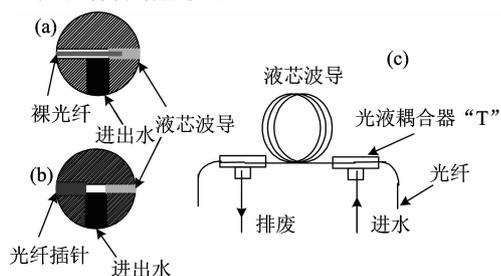


Fig. 2 Manifold configuration for LCW/LWCC-based long-path absorption spectroscopy

(a): Detailed picture of “T”: Inserting the fiber core into LCW/LWCC; (b): Detailed picture of “T”: Not inserting the fiber core into LCW/LWCC; (c): Schematic diagram of manifold configuration

## 2.2 荧光光谱测量

如何探测微弱的荧光信号是构建荧光光谱分析系统需要面对的关键问题。概略来说,可以通过降低噪声、增强激发光强、增加探测器灵敏度等思路上去提高测量的灵敏度,当今技术的飞速发展已经使以上三个方面的提高趋于完善,很难有突破性的进展,而且昂贵的成本也是需要考虑的问题,Teflon AF 液芯波导的出现,正好可以低成本地大幅提高探测的灵敏度,因此近期已经被广泛的应用到荧光分析系统中<sup>[42-50]</sup>。基于 Teflon AF 液芯波导的荧光光谱分析系统的构建方式并不复杂,光源一般采取垂直于波导轴向照射,其他配置和用作长光程吸收测量时的配置相同,因此有一些应用中可以不改变系统结构,而简单将两种光谱分析方法集成在一起,构建长光程吸收、荧光分析系统。

## 2.3 拉曼光谱测量

激光拉曼光谱技术具有快速、非破坏性、可对物质进行“指纹性认证”等许多突出的优点,遗憾的是拉曼散射是一个弱过程,散射截面小,其量子效率只有  $10^{-10} \sim 10^{-4}$ ,因此拉曼光谱信号弱,如果想要得到足够强的探测信号,必须使用高功率的激发光源去激发,使用高灵敏度的探测器去探测,因此拉曼光谱分析仪器往往体积庞大、结构复杂、价格昂贵。传统的拉曼光谱测量系统测量液态样品一般采用  $90^\circ$  几何散射结构,有效激发光程小。而将 Teflon AF 液芯波导用于拉曼光谱测量系统,同传统的  $90^\circ$  几何散射结构相比,能

提供高达  $10^3$  量级的拉曼光谱信号放大,相应的检测灵敏度和 S/N 也成比例提高。如 Altkorn 等<sup>[51]</sup> 研究表明,以 Teflon AF 液芯波导作为样品池获得的乙腈激光拉曼信号强度是传统检测池的 300 倍;Dijkstra<sup>[52]</sup>,关于拉曼光谱测量技术的综述中指出,利用 Teflon AF 液芯波导构建的拉曼光谱定量分析系统的检出线一般都能达到约  $100 \mu\text{g} \cdot \text{mL}^{-1}$  的级别。Teflon AF 液芯波导用于拉曼光谱测量系统中的机理和应用研究已有报道<sup>[51-55]</sup>,依据探测器对拉曼散射信号的收集方式,其激励/散射结构可简单归结为三种,即:收集前向散射、收集后向散射和收集前向+后向散射,如图 3 激励/散射结构分类图所示。

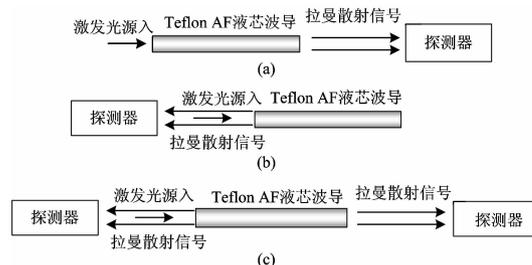


Fig. 3 Manifold configuration for LCW/LWCC-based Raman spectroscopy

(a): Raman scattering is collected in the “forward mode”; (b): Raman scattering is collected in the “backward mode”; (c): Raman scattering is collected in the “forward plus backward mode”

收集前向散射这种激励/散射结构最简单,也最常用,如图 3(a)所示,为了避免激发光源的影响,在前向拉曼散射出射端往往需要加装滤镜,而且收集的拉曼散射信号的强度与 Teflon AF 液芯波导的物理长度并排是一直呈正比关系,Altkorn 等<sup>[51]</sup>,提出过估算和优化收集前向散射的激励/散射结构下拉曼信号强度的方法;Dijkstra 等<sup>[53]</sup>,也曾结合 Teflon AF 液芯波导和拉曼光谱应用于溶液中溶存组分测量中,计算过不同的激发光源下,最优化的 Teflon AF 液芯波导的长度,及其对于拉曼光谱测量的增强因子。同时,将 Teflon AF 液芯波导用于拉曼光谱测量系统中时,Teflon AF 液芯波导内的光漂白效应、荧光背景的消除问题也需要关注。

## 2.4 气体传感器

Teflon AF 具有气体渗透性结构、疏水性的特点,可以利用一型 Teflon AF 液芯波导设计气体传感器,用于测量气相或者液相样品中的气体。图 4 所示是这类传感器的样品池结构图,基本原理是利用一型 Teflon AF 液芯波导作为气体渗透膜,指示剂被注入波导内部,将气相或者液相样品从波导外的套管内流过,样品中的气体渗透通过波导壁,进入波导内部,与波导内的指示剂达到新的平衡,测定指示剂的吸光度,进而计算待测样品中的待测气体的浓度。基于 Teflon AF 液芯波导设计气体传感器,应用于海洋碳循环的关键参数的现场监测中,取得了突出的成绩,如 Byrne 等<sup>[56]</sup>用于测量总体无机碳,Wang 等<sup>[6,7]</sup>、Lu 等<sup>[9]</sup>构建了  $\text{pCO}_2$  光纤化学传感器,测量精度和仪器应用于长时间序列监测的前景都

得到了广泛的肯定。除此之外,也有报道显示, Teflon AF 液芯波导被用于测量大气中的过氧化氢<sup>[11]</sup>、二氧化氮<sup>[10]</sup>、呼吸中的丙酮<sup>[12]</sup>等。

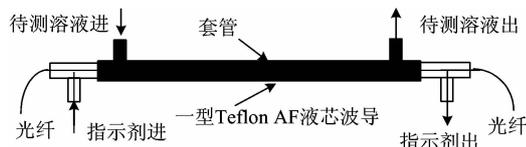


Fig. 4 Schematic diagram for LCW/LWCC-based gas sensor

## 2.5 现场与其他应用

目前,采样、保存、运输、实验室检测,仍然是众多学科分析化学参量采用的基本方法,但是,无论采样程序多么严谨,总存在着所采样品代表性差、样品在采集和预处理过程中难免玷污、在保存和运输样品过程中损失和变异等诸多问题,在痕量元素的环境监测中,这些问题更为突出,因此实时、连续、高精度的现场测定分析技术将是技术发展的主流。Teflon AF 液芯波导的优秀特性正是迎合了这种趋势,非常适用于设计小型化、高精度的现场分析仪器,如南佛罗里达大学基于 Teflon AF 液芯波导设计的 SEAS(spectrophotometric elemental analysis systems)<sup>[20, 22, 34, 35]</sup>,应用于现场测量水环境中的亚硝酸盐、铜离子等痕量元素;基于一型 Teflon AF 液芯波导构建了 pCO<sub>2</sub> 光纤化学传感器也有应用于锚系浮标体长时间序列现场原位监测的报道<sup>[9]</sup>。除了以上

涉及的吸收、荧光、拉曼、气体传感器、现场应用以外, Teflon AF 液芯波导与已经成熟的进样、分离方法联用,或是其他光谱分析应用也有很多报道,如结合流动注射分析<sup>[19, 27, 33, 42]</sup>、结合毛细管电泳<sup>[48, 49]</sup>、化学发光测量<sup>[42, 57]</sup>、微流控芯片<sup>[60]</sup>等,在这些方面, Teflon AF 液芯波导的应用相对于传统的方式都体现出了极佳的性能优势。

## 3 结论与展望

由于 Teflon AF 具有气体渗透性结构、疏水性、化学惰性、比水低的折射率等特点,因此 Teflon AF 液芯波导可以用于设计吸收、荧光、拉曼光谱分析中长光程样品池,大幅提高检测的灵敏度;可以用于设计气体渗透膜样品池,测量气相或液相样品中的痕量气体;而且由于 Teflon AF 液芯波导具有可盘曲性,因此可实现仪器设计的小型化,这些突出优势,使 Teflon AF 液芯波导在吸收、荧光、拉曼光谱分析、气体传感器、现场原位分析仪器、流动注射分析、化学发光测量等诸多领域得到了广泛的应用。

虽然目前 Teflon AF 液芯波导的应用已经非常广泛,但是它的应用潜力却远不止如此,在许多研究领域、研究方向、交叉学科上仍有广泛的应用前景。而且,利用 Teflon AF 液芯波导构建分析系统,成本较低,技术简单,不但适用于工程师,而且也适于理论研究学者借此构建分析系统,拓展研究思路。

## References

- [1] Walrafen G E, Stone J. *Applied Spectroscopy*, 1972, 26(6): 585.
- [2] Resnick P R. U. S. Patent; 5276121. 1994.
- [3] Belz M, Dress P, Sukhitskiy A, Lu Suyi. *Proceedings of SPIE*, DOI: 10.1117/12.371300, 1999, 271.
- [4] Byrne R H, Kaltenbacher E. *Limnology and Oceanography*, 2001, 46(3): 740.
- [5] D'Sa E J, Steward R G. *Limnology and Oceanography*, 2001, 46(3): 742.
- [6] Wang Zhaohui, Wang Yongchen, Cai Weijun, et al. *Talanta*, 2002, 57(1): 69.
- [7] Wang Zhaohui, Cai Weijun, Wang Yongchen, Upchurch B L. *Marine Chemistry*, 2003, 84(1-2): 73.
- [8] Wang Zhaohui, Liu Xuewu, Byrne R H, et al. *Analytica Chimica Acta*, 2007, 596(1): 23.
- [9] Lu Zhongming, Dai Minghan, Xu Kunming, et al. *Talanta*, 2008, 76(2): 353.
- [10] Milani M, Dasgupta P. *Analytica Chimica Acta*, 2001, 431(2): 169.
- [11] Li Jianzhong, Dasgupta P. *Analytical Sciences*, 2003, 19(4): 517.
- [12] Teshima N, Li Jianzhong, Toda K, et al. *Analytica Chimica Acta*, 2005, 535(1-2): 189.
- [13] Miller R L, Belz M, Castillo C D, et al. *Continental Shelf Research*, 2002, 22(9): 1301.
- [14] Kirkpatrick G, Orrico C, Moline M, et al. *Applied Optics*, 2003, 42(33): 6564.
- [15] D'Sa E, Steward R, Vodacek A, et al. *Limnology and Oceanography*, 1999, 44(4): 1142.
- [16] Yao Wensheng, Byrne R H, Waterbury R. *Environmental Science & Technology*, 1998, 32(17): 2646.
- [17] Zhang Jiazhong. *Deep-Sea Research Part I-Oceanographic Research Papers*, 2000, 47(6): 1157.
- [18] Zhang Jiazhong, Wanninkhof R, Lee K. *Geophysical Research Letters*, 2001, 28(8): 1579.
- [19] Zhang Jiazhong. *Analytical Sciences*, 2006, 22(1): 57.
- [20] Steimle E, Kaltenbacher E, Byrne R. *Marine Chemistry*, 2002, 77(4): 255.
- [21] Belz M, Dress P, Klein K F, et al. *Water Science and Technology*, 1998, 37(12): 279.
- [22] Adornato L, Kaltenbacher E, Villareal T, et al. *Deep-Sea Research Part I-Oceanographic Research Papers*, 2005, 52(3): 543.
- [23] Li Qian, Hansell D, Zhang Jiazhong. *Limnology and Oceanography-Methods*, 2008, 6(3787): 319.
- [24] Patey M, Achterberg E, Rijkenberg M, et al. *Analytica Chimica Acta*, 2010, 673(2): 109.
- [25] Zhang Jiazhong, Chi Jie. *Environmental Science & Technology*, 2002, 36(5): 1048.

- [26] Gimbert L J, Haygarth P M, Worsfold P J. *Talanta*, 2007, 71(4): 1624.
- [27] Hanrahan G, Gledhill M, Fletcher P J, et al. *Analytica Chimica Acta*, 2001, 440(1): 55.
- [28] Li Qian, Hansell D. *Analytica Chimica Acta*, 2008, 611(1): 68.
- [29] Guo Laodong, Zhang Jiazhong, Gueguen C. *Global Biogeochemical Cycles*, 2004, 18, GB1038, DOI: 10.1029/2003GB002152.
- [30] Santana-Casiano J M, Gonzalez-Davila M, et al. *Environmental Science & Technology*, 2005, 39(7): 2073.
- [31] Waterbury R, Yao Wensheng, Byrne R. *Analytica Chimica Acta*, 1997, 357(1-2): 99.
- [32] Rastogi N, Oakes M, Schauer J, et al. *Environmental Science & Technology*, 2009, 43(7): 2425.
- [33] Zhang Jiazhong, Kelbe C, Millero F. *Analytica Chimica Acta*, 2001, 438(1-2): 49.
- [34] Callahan M, Rose J, Byrne R. *Talanta*, 2002, 58(5): 891.
- [35] Callahan M, Kaltenbacher E, Byrne R. *Environmental Science & Technology*, 2004, 38(2): 587.
- [36] Byrne R, Yao Wensheng, Kaltenbacher E, et al. *Talanta*, 2000, 50(6): 1307.
- [37] Cheng Xiaohong, Zhang Zhujun, Tian Suikang. *Spectrochimica Acta Part a-Molecular and Biomolecular Spectroscopy*, 2007, 67(5): 1270.
- [38] Li Qian, Zhang Jia-zhong, Millero F J, et al. *Marine Chemistry*, 2005, 96(1-2): 73.
- [39] Pressman M, Aldstadt J. *Journal of Environmental Monitoring*, 2005, 7(8): 809.
- [40] Yao Wensheng, Byrne R. *Talanta*, 1999, 48(2): 277.
- [41] Kirkpatrick G J, Millie D F, Moline M A, et al. *Limnology and Oceanography*, 2000, 45(2): 467.
- [42] Li Qingyang, Morris K, Dasgupta P, et al. *Analytica Chimica Acta*, 2003, 479(2): 151.
- [43] Afseth N, Segtnan V, Wold J, et al. *Applied Spectroscopy*, 2007, 61(12): 1283.
- [44] Curcio M, Stalhandske P, Lindberg P, et al. *Electrophoresis*, 2002, 23(10): 1467.
- [45] Hanning A, Lindberg P, Westberg J, et al. *Analytical Chemistry*, 2000, 72(15): 3423.
- [46] Hanning A, Westberg J, Roeraade J. *Electrophoresis*, 2000, 21(15): 3290.
- [47] Kostal V, Zeisbergerova M, Slais K, et al. *Journal of Chromatography A*, 2005, 1081(1): 36.
- [48] Liu Zhen, Pawliszyn J. *Analytical Chemistry*, 2003, 75(18): 4887.
- [49] Liu Zhen, Pawliszyn J. *Analytical Biochemistry*, 2005, 336(1): 94.
- [50] Song Guanqun, Villanueva-Fierro I, Ohira S, et al. *Talanta*, 2008, 77(2): 901.
- [51] Altkorn R, Koev I, Gottlieb A. *Applied Spectroscopy*, 1997, 51(10): 1554.
- [52] Dijkstra R, Ariese F, Gooijer C, et al. *Trac-Trends in Analytical Chemistry*, 2005, 24(4): 304.
- [53] Dijkstra R, Slooten G, Stortelder A, et al. *Journal of Chromatography A*, 2001, 918(1): 25.
- [54] Marquardt B, Vahey P, Synovec R, et al. *Analytical Chemistry*, 1999, 71(21): 4808.
- [55] Pelletier M, Altkorn R. *Applied Spectroscopy*, 2000, 54(12): 1837.
- [56] Byrne R, Liu Xuewu, Kaltenbacher E, Sell K. *Analytica Chimica Acta*, 2002, 451(2): 221.
- [57] Li Jianzhong, Dasgupta P. *Analytica Chimica Acta*, 1999, 398(1): 33.
- [58] Bliss C, McMullin J, Backhouse C. *Lab on a Chip*, 2008, 8(1): 143.

## Progress in Teflon AF LWCC/LCW Applications

SUN Zhao-hua<sup>1,2</sup>, ZHOU Wen<sup>1</sup>, XU Zhan-tang<sup>1,2</sup>, YE Hai-bin<sup>1,2</sup>, YANG Chao-yu<sup>1,2</sup>, LIN Jun-fang<sup>1,2</sup>, HU Shui-bo<sup>1,2</sup>, YANG Yue-zhong<sup>1</sup>, LI Cai<sup>1</sup>, CAO Wen-xi<sup>1</sup>

1. LTO Key Lab, South China Sea Institute of Oceanology, Chinese Academy of Sciences, Guangzhou 510301, China

2. Graduate University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100039, China

**Abstract** Teflon AF is chemically very inert, quite physically and optically stable, a highly vapor-permeable polymer with optical transparency through much of the UV-Vis region and with an RI lower than that of water, so Teflon AF LWCC/LCW (Long path-length liquid waveguide capillary cell/liquid core waveguides) has been used with a range of different detection techniques, including absorbance spectroscopy, fluorescence spectroscopy, Raman spectroscopy, and gas sensor. The present article describes the properties and the aspects of Teflon AF LWCC/LCW instrumentation and applications. And finally, the future prospect and outlook of Teflon AF LWCC/LCW is also discussed.

**Keywords** Instrument analysis; Spectral analysis; Teflon AF LWCC/LCW

(Received Feb. 22, 2011; accepted Jun. 28, 2011)