

二氧化硫监测方法进展

胡利芬, 郭燕芬, 冯皓

(中国电器科学研究院有限公司 工业产品环境适应性国家重点实验室, 广州 510300)

摘要: 介绍了环境中SO₂监测的主要方法, 比较了常用的溶液吸收法和被动采样法等。溶液吸收法用来测量1 h或者更短时间内环境中SO₂的浓度水平, 被动采样法更多地用来监测1周到1个月内环境中SO₂的沉积率, 在线监测技术的发展为烟气的测量和烟道的防腐蚀提供了更多的技术支撑。最后提出了今后SO₂监测方法的发展趋势。

关键词: 大气腐蚀; SO₂; 采样分析; 溶液吸收法; 被动采样法; 在线监测

DOI: 10.7643/issn.1672-9242.2015.02.014

中图分类号: TJ04; TG172.3 **文献标识码:** A

文章编号: 1672-9242(2015)02-0064-06

Progress in Monitoring Methods of Sulfur Dioxide

HU Li-fen, GUO Yan-fen, FENG Hao

(State Key Laboratory of Environmental Adaptability for Industrial Products,
China National Electric Apparatus Research Institute Co., Ltd, Guangzhou 510300, China)

ABSTRACT: The main methods for monitoring of environmental SO₂ were introduced, and the commonly used solution absorption method and passive sampling method were compared. The solution absorption method is used to analyze the SO₂ concentrations in the environment within an hour or even shorter time, while the passive sampling method is more frequently used to monitor the rate of deposition within one week or one month. The development of on-line monitor technology provides more technical support for the measurement of exhaust gas and anti-corrosion of flue. In the end, this article put forward the development trend of SO₂ monitoring methods.

KEY WORDS: atmospheric corrosion; sulfur dioxide; sampling analysis; solution absorption method; passive sampling method; on-line monitoring

金属材料在自然大气中的腐蚀是普遍存在的现象, 约占总腐蚀损失的一半以上^[1-2]。据资料报道, 世界上因腐蚀造成的金属浪费, 其年经济损失占当年国民经济总产值为: 美国 1%~2.5%, 英国 3.5%, 日本 1.25%, 加拿大 3%^[3]。我国虽没有精确统计, 但估计年经济损失约占当年国民经济总产值的 4%。SO₂被公

认为是大气中最重要的腐蚀性气体^[4-5], 能加速多数金属的腐蚀过程。我国是世界上最大的煤炭生产国和消费国, SO₂污染十分严重, 部分地区大气中的SO₂含量超过了环境容量的 60%^[6-7]。污染的大气环境不仅危害人类身体健康, 影响人们的正常生活与工作, 而且对建筑、设备、工程结构等也带来危害, 加速其腐

收稿日期: 2014-12-05; 修订日期: 2015-01-07

Received: 2014-12-05; Revised: 2015-01-07

作者简介: 胡利芬(1979—), 女, 高级工程师, 主要研究方向为材料检测评价。

Biography: HU Li-fen(1979—), female, Senior engineer, Research focus: test and evaluation of materials.

蚀,缩短其使用寿命。

大部分金属材料和制品都是在大气中存放和使用的,为了解金属材料在大气中的腐蚀现象和规律,必须对SO₂进行监测,并建立准确灵敏的测量方法。研究者们对SO₂的监测进行了广泛研究,如今已发展许多监测手段^[8-10]。文中结合文献综述了国内外近些年来SO₂的主要监测方法,对它们的优点,使用范围以及存在的问题进行了介绍。

1 气体采集方法

气体污染物的采集方法可以分为直接采样法、有动力采样法和被动式采样法。

1) 直接采样法是将气体样品直接采集在合适的气体收集器内,再带回实验室分析,所得结果代表污染物的瞬间或短时间内的平均浓度。直接采样法不需要使用专用吸收剂,采集完后直接进入气相色谱即可进行分析,方法简便,适用于大多数气体污染物的分析。该法主要用于气体污染物浓度较高的场所,且存在气体样品与收集容器的器壁易发生化学反应、吸附、解析和渗漏等问题^[11]。

2) 有动力采样法是用一个抽气泵将气体样品通过吸收介质,使气体样品中的待测物质浓缩在吸收介质中,而达到浓缩采样的目的。吸收介质通常是液体和多孔状的固体颗粒物,其不仅浓缩了待测污染物,提高了分析灵敏度,并有利于去除干扰物和选择不同原理的分析方法。

3) 被动式采样是基于气体分子扩散或渗透原理采集气态物质的方法。这种采样器小巧轻便,可制成一支钢笔或一枚徽章大小,用作个体接触剂量评价的监测,也可放在欲测场所连续采样,间接用作环境空气质量评价的监测。

在上述各种采集方法中,SO₂的采集主要采用动力采样法和被动式采样法。

2 SO₂采样监测方法

2.1 溶液吸收法

传统的SO₂采集方法是有动力的溶液吸收法,根据选用吸收液的不同,后续采用的分析方法有分光光度法、电化学法、色谱法、化学发光法以及毛细管电泳等,各种分析方法各有所长^[12-15]。金属的大气腐蚀是一个长期累积的过程,了解环境中SO₂在一定时间内

的累积和变化情况对分析金属的大气腐蚀行为是非常必要的。溶液吸收法因为吸收液的稳定性和体积的限制,采样时间不能过长,一般在1 h左右,采样分析结果体现的是短期内大气中SO₂的瞬时浓度。由于溶液吸收法吸收液稳定性的限制,采样结束后要尽早对采样结果进行分析,因此,目前国内主要暴晒场不仅配有溶液吸收采样装置,而且配备有化学分析设备和专业技术人员,以便定期对暴晒场大气环境中的SO₂进行采集分析。随着工业的发展,材料应用领域不断变化,越来越多的应用环境并不适于配备专业的采样分析设备和专业技术人员。这些都显现出溶液吸收法的局限性。

2.2 被动采样法

被动采样器不用任何电源或抽气动力,所以又称为无泵采样器。将采样器放置于试验环境中对SO₂进行被动吸附,一般采样时间为1个月。采样结束后对采样器上吸附的SO₂进行分析,分析结果反映了采样时间内试验环境中SO₂的沉积率。GB/T 19292.3—2003《金属和合金的腐蚀 大气腐蚀性 污染物的测量》^[16]规定了在碱性表面上确定二氧化硫沉积率和用二氧化铅确定二氧化硫在硫酸盐收集盘上沉积率的方法。

文献[17]和[18]报道的是在碱性表面上确定SO₂沉积率的采样装置,该装置由3部分构成,如图1a所示。底座内径为25 mm,可选用低密度聚乙烯或聚酯、聚四氟乙烯等惰性材料制成。在底座内表面附着一直径为25 mm,用 1.0×10^{-2} mol/L Na₂CO₃浸渍过的纤维素滤膜,该滤膜可吸收SO₂。中间部分为一长10 mm、外径25 mm的圆环,此部分用作SO₂的扩散通道。带孔的前盖,用与底座相同的材料制成,中间开一个20 mm直径的孔。在前盖的内表面依次放入直径均为25 mm的不锈钢筛和聚四氟乙烯微孔膜,不锈钢筛主要用于保护聚四氟乙烯膜免受大气中的沙尘等颗粒破坏,聚四氟乙烯膜具有疏水性,可阻止滤膜中的水汽快速蒸发。

文献[19]报道的也是基于碱性表面采集SO₂的装置。该装置结构简单,只需将吸附吸收剂的滤纸片置于培养皿,将培养皿倒装在支架的钢短管内,用3个螺栓固定即可,如图1b所示。

文献[20]以及正在审定中的ASTM标准G91—97^[21]提出的则是用二氧化铅确定二氧化硫在硫酸盐收集盘上沉积率的方法。将二氧化铅吸收剂分散于黄菁胶制成的糊状物中,将糊状物粘附于培养皿内制成硫

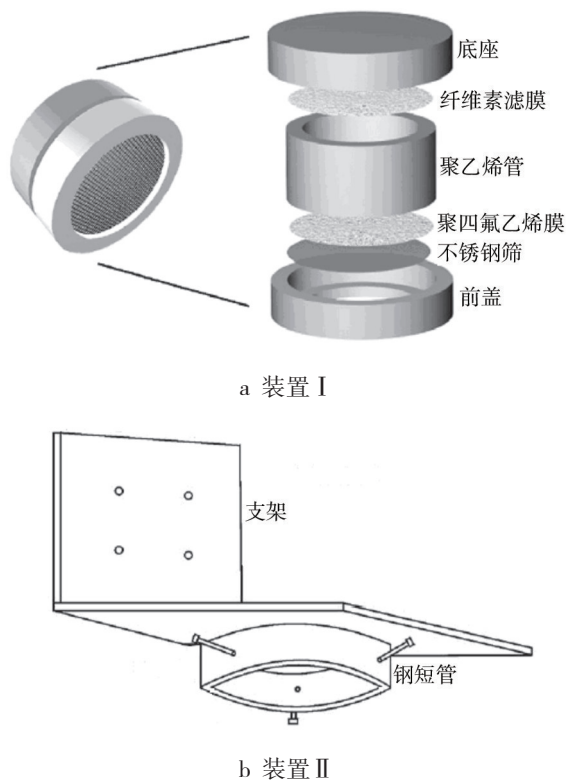


图1 采样装置

Fig.1 Schematic representation of the economical sampler

酸盐收集盘。采样结束后,将收集盘在 20 mL, 50 g/L 的热 Na_2CO_3 溶液中悬浮 3 h, 生成物用钡盐沉淀后, 采用重量法或浊度法进行测定。

针对低温地区和高温高湿的气候条件, 石美等^[22]提出了以无纺布为吸收载体, 三乙醇胺为吸收主体的被动采样装置。通过在采样器中加入乙二醇和丙三醇作为添加剂, 可以满足于哈尔滨等低温地区和武汉等高温高湿地区的 SO_2 采样。

被动采样法操作简便, 采样过程中不需要人员值守, 不需要特殊的仪器设备, 不必在采样现场配备专业分析仪器和分析人员, 并且采样装置可长期放置于试验环境中, 能够更好地反映一段时间内 SO_2 的累积情况和平均水平。因此, 该方法也作为国际标准方法在众多大气暴露试验场推广使用。此外, 通过对采样器的挂膜进行化学处理, 被动采样法也可完成环境中 SO_2 气体的定量监测。W.B.A Sharp 等^[23]采用含有一系列涂布特殊化学物质的膜片进行测试, 膜片可以有效与环境中 Cl_2 , H_2S 和 SO_2 进行化学键合。气体以 1 L/min 的速率通过膜片, 目标气体被富集, 采集时间为 7 天。采用 X 射线荧光技术对键合物质进行定性分析, 通过与实验室制备的标准品对比, 计算出环境中 Cl_2 , H_2S 和 SO_2 气体的体积分数。文献^[24]研究表明, 采用

被动采样法得到的结果与溶液吸收法结果之间的偏差在 15% 以内, 准确率和稳定性均较好。

2.3 SO_2 在线监测技术

在电厂、石化等重污染行业, 设备在运行过程中需要了解其所处环境的腐蚀性和变化情况, 以便及时发现并采用必要的防腐措施。为此, 建立了一套 SO_2 在线监测系统, 实时监测设备所处环境 SO_2 的变化情况, 以便于在正常运行状态下有效监测设备的腐蚀速率。烟气连续监测系统(简称 CEMS) 是广泛应用的一种污染物在线监测系统, 它通过抽取方式或直接测量方式实时、连续地测定固定污染源排放的烟气中各种污染物浓度, 其中气体污染物主要包括 SO_2 和氮氧化物。该系统现已广泛应用于火电厂、钢铁厂、水泥厂、石油化工厂等燃煤量较大的企业^[25-28]。

按照取样方法不同, CEMS 有代表性的 3 种系统为:

1) 稀释采样法。应用该原理的产品主要来自欧美大型企业, 如: 美国 KVB-Enertec, TE, EPM; 法国 Chromato, EA 公司; 日本 HORIBA; 德国 MRU 公司; 中兴环境等。

2) 直接抽取法。这类产品以欧洲西门子为代表, 在韩国、日本此方法也占主导地位。

3) 原位直接测量法。以德国 SICK MAIHAK 公司为代表, 该系统将仪器直接插入烟道, 实时连续监测烟气排放^[29-31]。

近年 CEMS 系统在国内也得到长足的发展, 开始有仪器厂家自主研发 CEMS 产品。王世龙等^[32]采用中科院应用化学研究所研制的电化学气体传感器监测烟气 SO_2 浓度, 研制出一套烟气 SO_2 在线监测系统, 并将其应用于中国一汽集团热电厂锅炉烟道中。该系统可以在锅炉正常工作状况下给出其烟道中 SO_2 的排放量, 为一汽集团制定相应的防腐措施提供了技术支持。

目前, 依据不同的分析技术也已经研制出各类传感器, 以实现气体的在线监测, 如: 利用物质的电化学性质, 研制出各种电化学传感器, 这类传感器在便携式检测仪中应用较多。它具有较高的测量精度, 小型轻便, 非常适用于工业生产现场气体的监测^[33-38]。但这类传感器采用的探头寿命有限, 需要经常更换, 而且响应时间较长, 对于在线监测需要的快速响应方面还有待改进。

相比而言, 光学与光谱学技术以其大范围、多组分检测、连续实时监测方式而成为污染气体监测的理

想工具^[39-43]。采用这些技术的主要优点有:可以实现非接触在线自动监测,并且响应时间短、稳定性高、具有很高的测量精度。从这个角度上看,光学和光谱学技术是当前气体在线监测技术的发展方向和技术主流^[44-45]。目前在气体监测中最常用的光学与光谱学技术主要有非分散红外光谱法、紫外荧光法、可调谐激光法、差分紫外光谱法等^[46-50]。

3 发展趋势

SO₂气体监测方法多种多样,每种方法都有自己的优缺点。随着社会对环境污染的重视,近年来这些方法在各自适用的行业得到了快速的发展。

在自然环境低浓度SO₂监测中,还是依旧沿袭着溶液吸收法和被动采样法两种方法。研究人员一方面改进采样膜片或吸收液,以期提高对SO₂的吸收效率;另一方面更多地引入光谱分析技术,提高采样后结果分析的准确性、降低操作人员的工作强度。

在烟气在线监测领域,更多地向着多参数、智能化、高精度、便携式及高稳定性方向发展。目前世界各国都在研制开发各种智能传感器和多功能传感器以及连续监测系统,SO₂测试技术也应朝着这一方向发展。如:进一步改进气体探测系统,使其朝着小型化的方向发展,取代如电化学传感器等成为新的便携式测量仪器,实现对污染源更加方便的监测;通过选择新的高分辨率探测器,提高系统的灵敏度和精度,实现对痕量SO₂的检测。

参考文献:

- [1] 王振尧. 金属材料大气腐蚀研究动态[J]. 全面腐蚀控制, 1995, (4): 1—3.
WANG Zhen-yao. The Review of Atmospheric Corrosion Research on Metal Materials[J]. General Control, 1995, (4): 1—3.
- [2] 王光雍,王海江,李兴濂,等. 自然环境的腐蚀与防护[M]. 北京:化学工业出版社,199:20.
WANG Guang-yong, WANG Hai-jiang, LI Xing-lian, et al. Corrosion and Protection of the Natural Environment[M]. Beijing:Chemical Industry Press, 1997:20.
- [3] 叶康民. 金属腐蚀与防护概论[M]. 北京:人民教育出版社, 1986.
YE Kang-min. Introduction of Corrosion and Protection of Metals[M]. Beijing:Peoples Education Press, 1986.
- [4] OH S J, COOK D C, TOWNSEND H E. Atmospheric Corrosion of Different Steels in Marine, Rural and Industrial Environments[J]. Corrosion Science, 1999, 41(9): 1687—1702.
- [5] YAMASHITA M, NAGANO H, MISA W A T, et al. Structure of Protective Rust Layers Formed on Weathering Steels by Long-term Exposure in the Industrial Atmospheres of Japan and North America[J]. ISIJ Intern, 1998, 38(3): 285—290.
- [6] 刘秀晨,安成强. 金属腐蚀学[M]. 北京:国防工业出版社, 2002.
LIU Xiu-chen, AN Cheng-qiang. Metal Corrosion Science[M]. Beijing:National Defence Industry Press, 2002.
- [7] 李援. 中国石化控制SO₂的污染对策初探[J]. 当代石油化工, 2004, 12(4): 41—44.
LI Yuan. Preliminary Discussion on Sinopec's Countermeasures to Control SO₂ Pollution[J]. Petrochemical Industry Trends, 2004, 12(4): 41—44.
- [8] 刘建国,刘文清,魏庆农. 环境监测技术及其发展方向[J]. 光电子技术与信息, 2001, 14(2): 7—12.
LIU Jian-guo, LIU Wen-qing, WEI Qing-nong. The Survey and Future Development of Environmental Monitoring Techniques[J]. Optoelectronic Technology & Information, 2001, 14(2): 7—12.
- [9] 郭永彩,张天华,高潮,等. 差分吸收光谱技术及在大气监测领域中的应用[J]. 重庆大学学报, 2003, 26(8): 27—31.
GUO Yong-cai, ZHANG Tian-hua, GAO Chao, et al. Differential Optical Absorption Spectroscopy and Applications in Atmospheric Monitoring Studies[J]. Journal of Chongqing University, 2003, 26(8): 27—31.
- [10] 郑龙江,李鹏,秦瑞峰,等. 气体浓度检测光学技术的研究现状和发展趋势[J]. 激光与光电子学进展, 2008, 45(8): 24—31.
ZHENG Long-jiang, LI Peng, QING Rui-feng, et al. Research Situation and Developing Tendency for Optical Measurement Technology of Gas Density[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2008, 45(8): 24—31.
- [11] 吴匿名,胡敏. 挥发性有机物气体污染源监测中直接采样法的评价[J]. 中国环境监测, 2001, 17(3): 28—30.
WU Ya-ming, HU Min. Evaluation on Direct Sampling Methods in Monitoring VOCs Emission Sources[J]. Environmental Monitoring in China, 2001, 17(3): 28—30.
- [12] 饶明辉,何振江,杨冠玲,等. 大气二氧化硫浓度的光学测定方法[J]. 环境污染治理技术与设备, 2004, 5(2): 86—89.
RAO Ming-hui, HE Zhen-jiang, YANG Guan-ling, et al. Optical Determination Methods of SO₂ Concentration in air[J].

- Techniques and Equipment for Environmental Pollution Control, 2004, 5(2): 86—89.
- [13] 张新祥, 张胜利, 陈荣, 等. 荧光光度法测定二氧化硫的基础研究[J]. 光谱学与光谱分析, 1999, 19(6): 878—879.
ZHANG Xin-xiang, ZHANG Sheng-li, CHEN Rong, et al. Determination of Sulfur Dioxide by Fluorometric Analysis[J]. Spectroscopy and Spectral Analysis, 1999, 19(6): 878—879.
- [14] 吴凤武, 何治柯, 孟辉, 等. 三邻菲咯啉合亚钒-亚硫酸根-过二硫酸钾化学发光法测定空气中的二氧化硫[J]. 分析化学研究简报, 2000, 28(6): 709—711.
WU Feng-wu, HE Zhi-ke, MENG Hui, et al. Chemiluminescence Determination of Sulfur Dioxide in Air Using Tris(1, 10-Phenanthroline) Ruthenium(II)-Sulfite-Potassium Persulfate System[J]. Chinese Journal of Analytical Chemistry, 2000, 28(6): 709—711.
- [15] 朱国辉, 朱庆枝, 许金钧. 荧光光度法测定大气中痕量二氧化硫[J]. 分析化学研究简报, 1999, 27(11): 1303—1305.
ZHU Guo-hui, ZHU Qing-zhi, XU Jin-gou. A Fluorimetric Method for the Determination of Atmospheric Sulphur Dioxide [J]. Chinese Journal of Analytical Chemistry, 1999, 27(11): 1303—1305.
- [16] GB/T 19292.3—2003, 金属和合金的腐蚀 大气腐蚀性 污染物的测量[S].
GB/T 19292.3—2003, Corrosion of Metals and Alloys—Corrosivity of Atmospheres—Measurement of Pollution[S].
- [17] LICIA P S Cruz, V NIA P Campos, JUSSIVAL A P, et al. Laboratory Validation of a Passive Sampler for SO₂ Atmospheric Monitoring[J]. J Braz Chem Soc, 2005, 16: 50—57.
- [18] VANIA P Campos, L CIA P S Cruz, RICARDO H M Godoi, et al. Development and Validation of Passive Samplers for Atmospheric Monitoring of SO₂, NO₂, O₃ and H₂S in Tropical Areas [J]. Microchemical Journal, 2010, 96: 132—138.
- [19] TA Wan-quan, WEI Chun, CHEN Fa-hu. Long-term Measurements of SO₂ Dry Deposition over Gansu Province[J]. Atmospheric Environment, 2005, 39: 7095—7105.
- [20] PIERRE Delmelle, JOHN Stix, CHARLES P, et al. Dry Deposition and Heavy Acid Loading in the Vicinity of Masaya Volcano, a Major Sulfur and Chlorine Source in Nicaragua[J]. Environmental Science & Technology, 2001, 35: 1289—1293.
- [21] ASTM G91—97(2010), Standard Practice for Monitoring Atmospheric SO₂ Using the Sulfation Plate Technique[S].
- [22] 石美, 杨屹, 张新祥. 新型二氧化硫被动采样器的研制[J]. 分析实验室, 2002, 21(6): 93—96.
SHI Mei, YANG Yi, ZHANG Xin-xiang. Study on a New Type of Passive Sampler for Sulfur Dioxide[J]. Chinese Journal of Analysis Laboratory, 2002, 21(6): 93—96.
- [23] ASHARP W B, FALAT L, KRASOWSKI J A. Corrosion Prevention in Electrical Control Rooms[J]. World Pulp and Paper, 2009, 28(3): 64—68.
- [24] TANG Hong-mao, BERNIE Brassard, et al. A New Passive Sampling System for Monitoring SO₂ in the Atmosphere[J]. Field Analytical Chemistry and Technology, 1997, 1(5): 307—314.
- [25] 董艳平, 张子凡, 李京. 烟气排放连续监测系统比对监测中存在问题探讨研究[J]. 环境科学与管理, 2014, 39(2): 129—131.
DONG Yan-ping, ZHANG Zi-fan, LI Jing. Investigation on Comparison Monitoring of Continuous Emission Monitoring System[J]. Environmental Science and Management, 2014, 39(2): 129—131.
- [26] 郑海明, 蔡小舒. 烟气连续监测系统稀释采样比例技术研究[J]. 工程热物理学报, 2006, 27(1): 163—166.
ZHENG Hai-ming, CAI Xiao-shu. Study on Dilution Extractive Sampling Ratio of Continuous Emission Monitoring System [J]. Journal of Engineering Thermophysics, 2006, 27(1): 163—166.
- [27] 李叔珉, 刘斌, 孙长库, 等. 烟气排放连续监测系统研究进展[J]. 激光与光电子学进展, 2009(6): 45—48.
LI Shun-min, LIU Bin, SUN Chang-ku, et al. Research Progress of Flue Gas Continuous Monitoring System[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2009(6): 45—48.
- [28] 陶申鑫. 我国火电厂烟气连续监测系统应用现状[J]. 电力环境保护, 1998, 14(2): 58—62.
TAO Shen-xin. Flue Gas Continuous Emission Monitoring System in Thermal Power Plant[J]. Electric Power Environmental Protection, 1998, 14(2): 58—62.
- [29] 郜武. 烟气连续监测系统(CEMS)技术及应用[J]. 中国仪器仪表, 2009(1): 43—47.
GAO Wu. Continuous Emission Monitoring System (CEMS) Technologies and Application[J]. China Instrumentation, 2009(1): 43—47.
- [30] 王飞, 徐志清. 介绍几种烟气连续监测系统[J]. 电力环境保护, 2002, 18(1): 50—51.
WANG Fei, XU Zhi-qing. Introduction on Several Kinds of Continuous Emission Monitoring Systems[J]. Electric Power Environmental Protection, 2002, 18(1): 50—51.
- [31] 施捷, 李鸣. 基于稀释法的烟气排放连续检测技术[J]. 仪表技术, 2008(9): 5—7
SHI Jie, LI Ming. The Technique of the Continuous Emission Monitoring Based on the Dilution Method[J]. Instrumentation Technology, 2008(9): 5—7
- [32] 王世龙, 王丽娜, 王宏博, 等. 烟气二氧化硫在线监测系统[J]. 仪表技术与传感器, 2011(4): 38—41.
WANG Shi-long, WANG Li-na, WANG Hong-bo, et al. On-line Monitoring System for Monitoring SO₂ Fume[J]. Instrument Technique and Sensor, 2011(4): 38—41.

- [33] 蔡琪, 鲜跃仲, 李辉, 等. 采用离子液体的二氧化硫电化学传感器的研究[J]. 华东师范大学学报(自然科学版), 2001, 3(9): 57—60.
CAI Qi, XIAN Yue-zhong, LI Hui, et al. Studies on a Sulfur Dioxide Electrochemical Sensor with Ionic Liquid as Electrolyte[J]. Journal of East China Normal University (Natural Science), 2001, 3(9): 57—60.
- [34] 于玉忠, 严河清, 陆君涛, 等. 二氧化碳电化学传感器的研究现状和发展前景[J]. 武汉大学学报(自然科学版), 1998, 44(2): 179—182.
YU Yu-Zong, YAN He-qing, LU Jun-tao, et al. The Current Status of Research And Development of Carbon Dioxide Electrochemical Sensoes[J]. J.Wuhan Univ. (Natural Science Edition), 1998, 44(2): 179—182.
- [35] 黄啸, 沈杭军, 杨岳平. 定电位电解二氧化硫传感器特性研究[J]. 环境污染与防治, 2005, 27(1): 18—20.
HUANG Xiao, SHEN Hang-jun, YANG Yue-ping. Characteristic Investigation of the Fixed Electric Potential Electroanalysis Sulfur Dioxide Sensor[J]. Environmental Pollution & Control, 2005, 27(1): 18—20.
- [36] 鲜跃仲, 薛建, 张文, 等. 新型二氧化硫气体电化学传感器的研究[J]. 高等学校化学学报, 2000, 21(9): 1375—1376.
XIAN Yue-zhong, XUE Jian, ZHANG Wen, et al. Studies on a Novel Sulfur Dioxide Gas Electrochemical Sensor[J]. Chemical Journal of Chinese Universities, 2000, 21(9): 1375—1376.
- [37] RIOS A, LUQUE de CASTRO M D, VALCARCEL M, et al. Electrochemical Determination of Sulfur Dioxide in Air Samples in Closed-loop Flow Injection System[J]. Anal Chem, 1987, 59: 666—670.
- [38] CHACHULSKI B. Amperometric Sulfur Dioxide Gas Sensor with Dimethyl Sulfoxide as Solvent for Internal Electrolyte Solution[J]. Analyst, 1998, 123: 1141—1144.
- [39] ALIWELL S R, JONES R L. Measurement of Atmospheric NO_3^- , Improved Removal of Water Vapour Absorption Features in the Analysis for NO_3^- [J]. Geophys Res Lett, 1996, 23: 2585—2588.
- [40] RAZEK T M A, MILLER M J, HASSAN S S M, et al. Optical Sensor for Sulfur Dioxide Based on Fluorescence Quenching[J]. Talanta, 1999, 50(3): 491—498.
- [41] ALIWELL S R, JONES R L. Measurement of Tropospheric NO_3^- at Midlatitude[J]. J Geophys Res, 1998, 103: 5719—5727.
- [42] ALLAN B J, CARSLAW N, COE H, et al. Observations of the Nitrate Radical in the Marine Boundary Layer[J]. J Atmos Chem, 1999, 33: 129—154.
- [43] 周斌, 刘文清, 齐峰, 等. 差分吸收光谱法测量大气污染物的浓度反演方法研究[J]. 物理学报, 2001, 50(9): 1818—1823.
ZHOU Bin, LIU Wen-qing, QI Feng, et al. Study of Concentration Retrieving Method in Differential Optical Absorption Spectroscopy for Measuring Air Pollutions[J]. Acta Physica Sinica, 2001, 50(9): 1818—1823.
- [44] 刘文清, 崔志成, 刘建国, 等. 大气痕量气体测量的光谱学和化学技术[J]. 量子电子学报, 2004, 21(2): 202—210.
LIU Wen-qing, CUI Zhi-cheng, LIU Jian-guo, et al. Measurement of Atmospheric Trace Gases by Spectroscopic and Chemical Techniques[J]. Chinese Journal of Quantum Electronics, 2004, 21(2): 202—210.
- [45] 刘文清, 崔志成, 董凤忠. 环境污染监测的光学和光谱学技术[J]. 光电子技术与信息, 2002, 15(5): 1—12.
LIU Wen-qing, CUI Zhi-cheng, DONG Feng-zhong. Optical and Spectroscopic Techniques for Environmental Pollution Monitoring[J]. Optoelectronic Technology & Information, 2002, 15(5): 1—12.
- [46] 黄书华, 孙友文, 刘文清, 等. 基于非分散红外光谱吸收法的二氧化硫检测系统研究[J]. 红外, 2011, 32(12): 10—13.
HUANG Shu-hua, SUN You-wen, LIU Wen-qing, et al. Sulfur Dioxide Measurement System Based on Non-dispersive Infrared Gas Analysis Technique[J]. Infrared, 2011, 32(12): 10—13.
- [47] 高光珍, 陈抱雪, 胡波, 等. 基于可调谐多模二极管激光吸收光谱的二氧化碳浓度测量[J]. 光谱学与光谱分析, 2013, 33(12): 3269—3272.
GAO Guang-zhen, CHEN Bao-xue, HU Bo, et al. Study on CO_2 Measurement Using Tunable Multi-Mode Diode Laser Absorption Spectroscopy[J]. Spectroscopy and Spectral Analysis, 2013, 33(12): 3269—3272.
- [48] 尚丽平. 紫外荧光法测定烟气中二氧化硫浓度的研究[J]. 传感技术学报, 2001(6): 162—165.
SHANG Li-ping. Study on Ultraviolet Fluorescent Measurement for the Concentration of Sulphur Dioxide in Flue Gas[J]. Chinese Journal of Sensors and Actuators, 2001(6): 162—165.
- [49] 邱健, 杨冠玲, 何振江, 等. 基于紫外荧光法的大气二氧化硫气体浓度分析仪[J]. 仪器仪表学报, 2008, 29(1): 174—178.
QIU Jian, YANG Guan-ling, HE Zhen-jiang, et al. Atmospheric SO_2 Concentration Analyzer Based on Ultra-violet Fluorescence[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2008, 29(1): 174—178.
- [50] 徐家清, 解光武. 便携式红外烟气分析仪在污染源二氧化硫监测的探讨[J]. 广东化工, 2014(8): 145—146.
XU Jia-qing, XIE Guang-wu. Portable Infrared Gas Analyzer in the Pollution Sources Discussion on Sulfur Dioxide Monitoring[J]. Guangdong Chemical Industry, 2014(8): 145—146.