

天然气总硫含量在线检测标准方法及其相关技术

李晓红¹ 沈琳¹ 罗勤¹ 周理¹ 杨芳¹ 何占兴² 杨薇钊³

1. 中国石油西南油气田公司天然气研究院 2. 中国石化中原油田普光分公司 3. 中国石油西南油气田公司输气处

摘 要 尽管目前国内检测总硫含量的诸多方法都准确可靠,但仍存在检测频率低、周期长、不能及时给出检测结果等不足。为此,在总结天然气总硫含量检测相关标准的基础上,探讨了天然气总硫含量在线检测标准方法及其相关技术,确定了上述标准方法和相关技术的原理,进而提出了制订我国天然气硫化物和总硫含量在线检测标准方法的建议。结论认为:①实现天然气总硫含量在线检测是未来发展的必然趋势;②鉴于国内尚无天然气总硫含量在线测定方法标准,建议借鉴和参考 ASTM D7165-10 (2015)《气相色谱法在线测定气态燃料中的硫含量》、ASTM D7166-10 (2015)《用总硫分析仪在线测定气态燃料中的硫含量》和 ASTM D7493-2014《气相色谱和电化学检测法在线测定天然气和气体燃料中硫化物》等国外标准,适时制订我国的相应标准。

关键词 天然气 总硫含量 在线 检测 国家标准 国际标准

DOI: 10.3787/j.issn.1000-0976.2017.09.013

Standard methods and related techniques for on-line detection of the total sulfur contents in natural gas

Li Xiaohong¹, Shen Lin¹, Luo Qin¹, Zhou Li¹, Yang Fang¹, He Zhanxing² & Yang Weizhao³

(1. Natural Gas Research Institute, PetroChina Southwest Oil & Gas Field Company, Chengdu, Sichuan 601213, China; 2. Puguang Branch of Sinopec Zhongyuan Oilfield Company, Dazhou, Sichuan 635002, China; 3. Gas Transmission Division, PetroChina Southwest Oil & Gas Field Company, Chengdu, Sichuan 601213, China)

NATUR. GAS IND. VOLUME 37, ISSUE 9, pp.97-102, 9/25/2017. (ISSN 1000-0976; In Chinese)

Abstract: At present, many domestic total sulfur detection methods are accurate and reliable, but they are disadvantageous with a low detection frequency, a long detection period and delayed work. In this paper, the standards of the total sulfur content detection of natural gas were reviewed. Then, the standard methods and related techniques for on-line detection of the total sulfur contents in natural gas were discussed, and their principles were figured out. And finally, it was recommended to develop a domestic on-line detection standard method for sulfur compounds and the total sulfur contents in natural gas. It is concluded that on-line total sulfur content detection is the inevitable development trend in the future; and that there is neither methods nor standards at home available for on-line detection of the total sulfur contents in natural gas, so it is recommended to timely formulate a national standard correspondingly by referring to foreign standards, e.g. *Standard Practice for Gas Chromatograph based On-line/At-line Analysis for Sulfur Content of Gaseous Fuels* (ASTM D7165-10 (2015)), *Standard Practice for Total Sulfur Analyzer based On-line/At-line Analysis for Sulfur Content of Gaseous Fuels* (ASTM D7166-10 (2015)), and *Standard Test Method for Online Measurement of Sulfur Compounds in Natural Gas Gaseous Fuels by Gas Chromatograph and Electrochemical Detection* (ASTM D7493-2014).

Keywords: Natural gas; Total sulfur content; On-line; Detection; National standard; International standard

基金项目: 全国天然气标准化技术委员会科研项目“天然气总硫含量在线测定方法标准前期研究”(编号:2016030077)。

作者简介: 李晓红,女,1975年生,高级工程师,硕士;主要从事天然气分析测试及其标准化和实验室认证认可等工作。地址:(601213)四川省成都市天府新区华阳镇天研路218号。电话:13708028330。ORCID:0000-0002-6435-1665。E-mail:hxiaohong_li@petrochina.com.cn

总硫含量是表征天然气气质的重要指标,与安全、环保工作及管道、设备的腐蚀与防护息息相关,是天然气检测不可或缺的项目。我国现行强制性国家标准 GB 17820—2012《天然气》和 GB 18047—2000《车用压缩天然气》均对产品天然气中的总硫含量做了限量规定。因此,准确可靠、及时有效地检测天然气中的总硫含量具有重要意义。

目前,国内天然气总硫含量基本采用人工现场取样、实验室离线检测的方式获取数据。常用的检测标准方法有氧化微库仑法 GB/T 11060.4—2010^[1]、氢解比色法 GB/T 11060.5—2010^[2]和紫外荧光法 GB/T 11060.8—2012^[3],上述方法准确可靠,但检测频率低、周期长、不能及时给出检测结果,而且硫化物存在容易被取样容器吸附可能影响检测结果的真实性。而在线检测方法具有直接、实时、快速检测的优点,且可以避免取样带来硫的吸附和样品污染问题。因此,天然气总硫含量在线检测技术及其标准方法引

起了业内人士的广泛关注。

为此,笔者在总结天然气总硫含量检测相关标准的基础上,探讨了天然气总硫在线检测标准方法及其相关技术,确定了这些标准方法和相关技术的原理,进而对我国制订天然气总硫含量在线检测标准方法提出了建议。

1 天然气总硫含量检测相关标准

目前,国内外天然气总硫含量测定相关标准方法较多(表1)。主要分为两大类:第一类是将各种硫化物氧化成 SO₂ 后进行检测,如氧化微库仑法 ISO 16960^[4]和 GB/T 11060.4,紫外荧光法 ISO 20729/DIS(尚未正式发布)^[5]、GB/T 11060.8、ASTM D6667-14^[6]和 ASTM D7551-10^[7],氯化钡滴定法 ASTM D1072-06^[8]。林格奈燃烧法 ISO 6326-5^[9]和 GB/T 11060.7^[10]虽然未明确燃烧产物是 SO₂,但

表1 国内外天然气总硫含量检测标准统计表

序号	标准编号	标准名称	说明	使用方法
1	ISO 16960:2014	天然气 硫化物测定 用氧化微库仑法测定总硫	—	氧化—微库仑法
2	GB/T 11060.4—2010	天然气 含硫化物的测定 第4部分:用氧化微库仑法测定总硫含量	与 ISO 16960 技术内容一致	
3	ASTM D6667-14	紫外荧光法测定气态烃和液化石油气中挥发性总硫含量	—	氧化—紫外荧光法
4	ASTM D7551-10	紫外荧光法测定气态烃、液化石油气和天然气中挥发性总硫含量	—	
5	ISO 20729/DIS	天然气 硫化物测定 用紫外荧光法测定总硫含量	注册国际标准草案,未正式发布。	氧化—紫外荧光法
6	GB/T 11060.8—2012	天然气 含硫化物的测定 第8部分:用紫外荧光光度法测定总硫含量	参考 ASTM D6667-14	
7	ASTM D1072-06(2012)	用燃烧和氯化钡滴定法测定气体燃料中总硫含量	—	
8	ISO 6326-5:1989	天然气 含硫化物的测定 第5部分:林格奈燃烧法	—	氧化—滴定法
9	GB/T 11060.7—2011	天然气 含硫化物的测定 第7部分:用林格奈燃烧法测定总硫含量	修改采用 ISO 6326-5:1989 ^[9]	
10	ASTM D4468-85(2011)	氢解速率计比色法测定气态燃料中总硫含量	—	氢解—乙酸铅比色法
11	GB/T 11060.5—2010	天然气 含硫化物的测定 第5部分:用氢解速率计比色法测定总硫含量	修改采用 ASTM D4468-85(2011)	
12	ISO 19739:2004	天然气 用气相色谱法测定硫化物	—	气相色谱法
13	GB/T 11060.10—2014	天然气 含硫化物的测定 第10部分:用气相色谱法测定硫化物	修改采用 ISO 19739	

原理上都是将各种硫化物转化成硫的氧化物后检测。其中,库仑法和紫外荧光法是国内常用方法,氯化钡滴定法和林格奈燃烧法由于步骤繁琐,很少有人使用。第二类是将各种硫化物还原成 H_2S 后进行检测,如氢解比色法 ASTM D4468-85^[11] 和 GB/T 11060.5,这类方法在硫化物还原为 H_2S 后与乙酸铅反应,结果由比色反应速率计检测读出,也是常用的总硫含量检测方法之一。

此外,气相色谱法 ISO 19739:2004^[12] 和 GB/T 11060.10^[13] 用于检测天然气中硫化物含量,标准中虽未说明可以将各个硫化物含量的结果进行加和作为总硫含量,但从原理上讲,只要天然气中的所有硫化物都能被检测出峰,加和的方式是可行的。

而且,目前国际天然气贸易中总硫含量检测基本采用的就是气相色谱法,然后加和后得到总硫含量。通过全国天然气标准化技术委员会(国际标准化组织 ISO/TC193 国内对口单位)也了解到,ISO 相关硫化物分析专家已经提出,下一步拟在国际标准 ISO 19739 中明确提出可以采用气相色谱法检测得到单个硫化物分析结果,加和后作为总硫含量。

2 天然气总硫含量在线检测标准

目前,国内外与天然气总硫含量在线检测相关的标准有 3 项(表 2),都是美国材料与试验协会 (ASTM) 发布的标准。

表 2 国内外天然气总硫含量在线检测相关标准统计表

序号	标准编号	标准名称	可检测物质	检测范围(以硫计) /($mg \cdot m^{-3}$)
1	ASTM D7165-10(2015)	气相色谱法在线测定气态燃料中的硫含量	总挥发性硫化物	0.1 ~ 1 000
2	ASTM D7166-10(2015)	用总硫分析仪在线测定气态燃料中的硫含量	总挥发性硫化物	未规定
3	ASTM D7493-14	气相色谱和电化学检测法在线测定天然气和气体燃料中硫化物	硫化氢, C_1 到 C_4 硫醇, 硫化物, 四氢噻吩。	0.1 ~ 100

2.1 ASTM D7165-10(2015)^[14]

ASTM D7165《气相色谱法在线测定气态燃料中的硫含量》标准方法测定硫含量的原理为:采用填充柱或毛细管柱物理分离天然气中的硫化物,随后采用硫化学发光检测器(SCD)、火焰光度检测器(FPD)、电化学检测器(EC)等检测器中的一种在线检测挥发性硫化物的含量。该方法检测范围为(0.1 ~ 1 000) mg/m^3 ,适用于天然气中所有挥发性硫化物含量的检测。标准中未说明各种硫化物含量加和结果可以作为总硫含量的检测结果,但从原理上讲是可行的。

另外,ASTM D7165 除了对标准的使用范围、参考文件、术语、操作概要、仪器、试剂和材料做了说明以外,还对在线色谱仪的选址、安装和性能试验进行了规定。

2.1.1 在线色谱仪的安装及安装地址的选择

ASTM D7165 规定在线色谱仪在选择安装地址时需考虑的因素包括校准、维修或维护的便利性、取样点样品的均匀性、从取样位置获取样品的适宜性以及安全问题。规定取样系统应能在 5 min 内将样品送入检测系统,取样系统应具备必要的过滤、减压

和调温功能,以便为色谱仪提供 1 个有代表性的样品,须仔细选择采样点,确保采集到的样品具有代表性。

2.1.2 在线色谱仪的性能试验

ASTM D7165 规定应根据需要,至少每年或间隔更短的时间对在线色谱仪执行全套性能试验,包括系统空白试验、日常校准检查、连续 7 天校准误差试验、线性检查、漂移测试载体流量检查、审查测试、验证试验以及在线色谱仪与实验室分析仪的对比试验。标准对仪器性能试验的规定比较完善和全面,为确保在线色谱仪的性能可以满足在线检测要求提供了必要的操作方法和程序。

2.2 ASTM D7166-10(2015)^[15]

ASTM D7166《用总硫分析仪在线测定气态燃料中的硫含量》标准方法类似于总则指导性的标准,不是针对气相色谱法制订,比 ASTM D7165 在线气相色谱法的内容更为宽泛,检测方法包括化学发光法、微库仑分析法、电化学法、乙酸铅法、滴定法、紫外荧光法以及其他方法。但对在线总硫分析仪器的要求是必须能检测出所有挥发性的硫化物。

ASTM D7166 与 ASTM D7165 标准结构和内容

相似,除了对标准的使用范围、参考文件、术语、操作概要、仪器、试剂和材料做了说明以外,还对在线色谱仪的选址、安装、性能试验和计算机软件进行了规定。

2.3 ASTM D7493-14^[6]

ASTM D7493《气相色谱和电化学检测法在线测定天然气和气体燃料中硫化物》标准方法测定硫含量的原理为:采用气相色谱法物理分离天然气中的硫化物,随后进入电化学检测器(EC)在线检测挥发性硫化物含量。检测范围为(0.1~100) mg/m³,根据进样体积、色谱峰分离度和特定EC检测器灵敏度的不同,检测范围可能会发生变化,适用于H₂S、C₁~C₄硫醇、其他硫化物和四氢噻吩(THT)的检测。标准中特别指出不能检测羰基硫(COS),但原因未做说明。COS也是挥发性硫化物,这与2.1中提到的ASTM D7165中同样采用气相色谱分离后也可以选择EC检测器(不仅限于此检测器)检测所有挥发性硫化物含量似乎存在矛盾,分析原因如下:

1)从逻辑层面考虑:ASTM D7493的1.6明确说明该检测方法是用作ASTM D7165的“同伴(Companion)”而进行编写的,也就是说两个标准方法共同使用,相辅相成。ASTM D7493仅规定了一种EC检测器,标准中对EC检测器原理也进行了阐述。而ASTM D7165规定可以采用EC、SCD和FPD等多种检测器,未对EC和其他检测器原理进行阐述,标准内容相对笼统。ASTM D7493可以视为ASTM D7165中多种检测器之EC检测器的具体化和细化的标准,更具有可操作性,具体技术内容应以ASTM D7493为准。那么ASTM D7165所说的可以检测所有挥发性硫化物,可能指的是整个标准使用多种检测器的情况,而EC检测器不适用于COS检测的细节在ASTM D7165中未被提出。

2)从技术层面考虑:ASTM D7493中的EC检测器是基于还原态硫化物和铬酸溶液之间的氧化还原反应的原理,其中铬酸溶液(电解液)是指三氧化铬(CrO₃)水溶液(100 g/L),电解液装在一个耐酸容器中。

式(1)解释了可能的反应机理:电极表面上发生氧化还原反应,在两个电极之间产生电位差,从而产生了可以测量的电流(使用低电阻测量电路)。例如,叔丁硫醇氧化为叔丁亚砷和氧化铬(Cr₂O₃),见式(2)。从式(1)、(2)可以看出,与铬酸发生氧化还原反应的硫化物中的硫以单键形式与其他有

机部分相连,而有机物气态的COS分子为直线型,1个碳原子以2个双键分别与氧原子和硫原子相连,性质相对稳定,可能无法与铬酸发生氧化还原反应或反应效率较低,而不能通过EC检测器检测。这一推断是否正确还有待进一步试验验证。



式中R表示有机部分,例如C_xH_y。

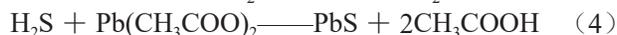


3 天然气总硫含量在线检测方法

前面“天然气总硫检测相关标准”和“天然气总硫在线检测相关标准”中涉及的部分总硫在线检测相关技术,已在国内外诸多商品化的天然气总硫在线分析上得到应用,但目前我国在天然气管输和生产过程中应用天然气总硫在线分析仪的实例很少。下面重点介绍3种常见方法的在线总硫分析仪,即氢解比色法、紫外荧光法和气相色谱法。

3.1 氢解比色法

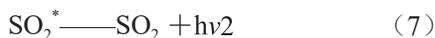
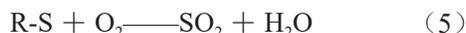
氢解比色法类型的在线总硫分析仪采用了标准ASTM D4468和GB/T 11060.5检测总硫含量的原理:天然气样品和氢气在高温炉中进行加氢反应,使长链硫化物变成短链硫化物,反应生成H₂S气体,见式(3)。H₂S样本气体与湿润的乙酸铅纸带接触,形成一层变暗的褐色硫化铅,见式(4),经过光电、光学检测器和反应速率电路测量后,显示总硫浓度。该方法利用H₂S和乙酸铅反应变色的机理,是一种经典准确的检测方法。



3.2 紫外荧光法

紫外荧光法类型的在线总硫分析仪采用了标准ASTM D6667、ASTM D7551和GB/T 11060.8检测总硫含量的原理:天然气样品和氧气在高温炉中进行氧化反应,样品中的硫化物被氧化为SO₂,见式(5),生成的气体经过干燥器脱水后进入反应室,用特定波长的紫外光(hv₁)照射基态SO₂,使其被激活成为激发态的SO₂^{*},见式(6),激发态的SO₂^{*}不稳定,将很快返回基态并释放能量,产生另一波长的辐射荧光(hv₂),见式(7),用光电光学系统进行检测。依据被测样品气中总硫含量与辐射荧光量成正比的关系,采用硫化物标准气体进行校正,获得样品气的总硫含量检测数据。近年,紫外荧光法

检测天然气总硫含量在国内实验室的应用越来越多,方法准确可靠,操作方便。



3.3 气相色谱法

3.3.1 分离检测加和法

气相色谱分离检测加和法类型的在线总硫分析仪采用了标准 ISO 19739、GB/T 11060.10、ASTM D7165 和 ASTM D7493 的检测原理:天然气样品和已知组成的硫化物混合标准气体,在相同的操作条件下,用气相色谱法进行物理分离,进入火焰光度检测器(FPD)进行检测,获得各个硫化物组成色谱峰。由标准气体的硫化物含量值,通过比较峰高或者峰面积,计算获得样品气中相应的硫化物含量。最后,将获得的各个硫化物的硫含量数值进行加和,得到总硫含量。使用该方法测定总硫的前提条件是配备的色谱仪可以检测出天然气样品中所有的硫化物。

3.3.2 氧化后合并检测法

气相色谱氧化后合并检测法的在线总硫分析仪采用了标准 ASTM D7041-16《采用气相色谱火焰光度检测法测定液烃和氧化烃混合物中总硫含量》^[17]检测总硫含量的原理:空气或氧气将天然气样品载入到氧化炉中,样品气在富氧和高温条件下被氧化生成 CO₂、H₂O 和 SO₂, 见式(8)。生成的混合气体通过色谱柱分离后,进入 FPD 检测器,获得 SO₂ 的色谱峰。由标准气体的硫化物含量值,通过比较峰高或者峰面积,间接获得天然气中总硫的含量。虽然 ASTM D7041 是针对液烃和氧化烃的液体混合物制订,但商品化的在线总硫分析仪已实际应用于天然气中总硫含量的检测。



总体来说,氢解比色法、紫外荧光法和气相色谱法原理上用于天然气总硫检测都是可行的,目前也都有商品化仪器在售。建议用户在选择在线分析仪时,对仪器技术指标比如检测范围和检测限等方面做详细了解,并对仪器的重复性、再现性和稳定性进行验证,以确保在线仪器的正常和准确使用。

4 结束语

天然气产品质量国家强制性标准 GB 17820—2012 对发热量、总硫、硫化氢、二氧化碳和水露点

5 项指标做了限量规定,其中发热量、硫化氢、二氧化碳和水露点 4 项指标目前在国内均已实现在线检测。国内外商品化天然气总硫在线分析仪的生产厂家和型号虽然很多,但目前国内有效和正确应用的例子却很少见,实现天然气总硫在线检测是未来发展的必然趋势。

国内暂无天然气总硫在线测定方法标准,国外 ASTM 有 3 项相关标准,分别是 ASTM D7165-10 (2015)《气相色谱法在线测定气态燃料中的硫含量》、ASTM D7166-10 (2015)《用总硫分析仪在线测定气态燃料中的硫含量》和 ASTM D7493—2014《气相色谱和电化学检测法在线测定天然气和气体燃料中硫化物》。建议借鉴和参考 3 项 ASTM 标准,适时制订我国相应标准。此外,ASTM D7041—2016《采用气相色谱火焰光度检测法测定液烃和氧化烃混合物中总硫含量》不是天然气总硫含量测定标准,也不是在线测定方法标准,但其检测总硫含量的原理已在商品化在线天然气总硫分析仪中得到应用,而国内没有相应的测定标准。

适时制订我国天然气硫化物和总硫含量在线检测方法标准,将为天然气硫化物和总硫含量的在线检测提供准确、及时、可靠的标准依据,减少工人劳动强度,提高检测工作效率,还可以为准确调节天然气脱硫装置的工艺参数起到及时的保障作用。

参 考 文 献

- [1] 中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局,中国国家标准化管理委员会.天然气含硫化合物的测定 第 4 部分:用氧化微库仑法测定总硫含量:GB/T 11060.4—2010[S].北京:中国标准出版社,2010.
General Administration of Quality Supervision, Inspection and Quarantine of the People's Republic of China & Standardization Administration of the People's Republic of China. Natural gas—Determination of sulfur compound—Part 4: Determination of total sulfur content by oxidative microcoulometry method: GB/T 11060.4-2010[S]. Beijing: Standards Press of China, 2010.
- [2] 中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局,中国国家标准化管理委员会.天然气含硫化合物的测定 第 5 部分:用氢解—速率比色法测定总硫含量:GB/T 11060.5—2010[S].北京:中国标准出版社,2010.
General Administration of Quality Supervision, Inspection and Quarantine of the People's Republic of China & Standardization Administration of the People's Republic of China. Natural gas—Determination of sulfur compound—Part 5: Determination of total sulfur content by hydrogenolysis and rateometric colorimetry method: GB/T 11060.5-2010[S]. Beijing: Standards Press of China, 2010.

- [3] 中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局, 中国国家标准化管理委员会. 天然气含硫化化合物的测定 第8部分: 用紫外荧光光度法测定总硫含量: GB/T 11060.8—2012[S]. 北京: 中国标准出版社, 2012.
- General Administration of Quality Supervision, Inspection and Quarantine of the People's Republic of China & Standardization Administration of the People's Republic of China. Natural gas—Determination of sulfur compound—Part 8: Determination of total sulfur content by ultraviolet fluorescence method: GB/T 11060.8-2012[S]. Beijing: Standards Press of China, 2012.
- [4] ISO. Natural gas—Determination of sulfur compounds—Determination of total sulfur by oxidative microcoulometry method: ISO 16960: 2014[S]. Geneva: International Organization for Standardization, 2014.
- [5] ISO. Natural gas—Determination of sulfur compounds—Determination of total sulfur content by ultraviolet fluorescence method: ISO/DIS 20729: 2017[S]. Geneva: International Organization for Standardization, 2017.
- [6] ASTM. Standard test method for determination of total volatile sulfur in gaseous hydrocarbons and liquefied petroleum gases by ultraviolet fluorescence: ASTM D6667-14[S]. West Conshohocken: American Society of Testing Materials, 2014.
- [7] ASTM. Standard test method for determination of total volatile sulfur in gaseous hydrocarbons and liquefied petroleum gases and natural gas by ultraviolet fluorescence: ASTM D7551-10[S]. West Conshohocken: American Society of Testing Materials, 2010.
- [8] ASTM. Standard test method for total sulfur in fuel gases by combustion and barium chloride titration: ASTM D1072-06[S]. West Conshohocken: American Society of Testing Materials, 2006.
- [9] ISO. Natural gas—Determination of sulfur compounds—Part 5: Lingener combustion method: ISO 6326-5: 1989[S]. Geneva: International Organization for Standardization, 1989.
- [10] 中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局, 中国国家标准化管理委员会. 天然气含硫化化合物的测定 第7部分: 用林格奈燃烧法测定总硫含量: GB/T 11060.7—2011[S]. 北京: 中国标准出版社, 2011.
- General Administration of Quality Supervision, Inspection and Quarantine of the People's Republic of China & Standardization Administration of the People's Republic of China. Natural gas—Determination of sulfur compound—Part 7: Determination of total sulfur content by Lingener combustion method: GB/T 11060.7-2011[S]. Beijing: Standards Press of China, 2011.
- [11] ASTM. Standard test method for total sulfur in gaseous fuels by hydrogenolysis and rateometric colorimetry: D4468-85(2011) [S]. West Conshohocken: American Society of Testing Materials, 2011.
- [12] ISO. Natural gas—Determination of sulfur compounds using gas chromatography method: ISO 19739: 2004[S]. Geneva: International Organization for Standardization, 2004.
- [13] 中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局, 中国国家标准化管理委员会. 天然气含硫化化合物的测定 第10部分: 用气相色谱法测定硫化物: GB/T 11060.10—2014[S]. 北京: 中国标准出版社, 2014.
- General Administration of Quality Supervision, Inspection and Quarantine of the People's Republic of China & Standardization Administration of the People's Republic of China. Natural gas—Determination of sulfur compound—Part 10: Determination of sulfur compounds using gas chromatography method: GB/T 11060.10-2014[S]. Beijing: Standards Press of China, 2014.
- [14] ASTM. Standard practice for gas chromatograph based on-line/at-line analysis for sulfur content of gaseous fuels: ASTM D7165-10(2015)[S]. West Conshohocken: American Society of Testing Materials, 2015.
- [15] ASTM. Standard practice for total sulfur analyzer based on-line/at-line for sulfur content of gaseous fuels: ASTM D7166-10(2015)[S]. West Conshohocken: American Society of Testing Materials, 2015.
- [16] ASTM. Standard test method for online measurement of sulfur compounds in natural gas and gaseous fuels by gas chromatograph and electrochemical detection: ASTM D7493-14[S]. West Conshohocken: American Society of Testing Materials, 2014.
- [17] ASTM. Standard test method for determination of total sulfur in liquid hydrocarbons and hydrocarbon-oxygenate blends by gas chromatography with flame photometric detection: ASTM D7041-16[S]. West Conshohocken: American Society of Testing Materials, 2016.

(修改回稿日期 2017-07-11 编辑 何明)