

国家重点研发计划项目（2018YFC0807900）资助

国家自然科学基金面上项目（51574009、51774014、51874007）资助

安徽省经济与信息化委员会企业发展专项资金资助

煤矿安全高效开采省部共建教育部重点实验室资助

煤矿示踪检测技术

秦汝祥 戴广龙 著

Meikuang Shizong Jiance Jishu

China University of Mining and Technology Press

中国矿业大学出版社

国家重点研发计划项目(2018YFC0807900)资助

国家自然科学基金面上项目(51574009、51774014、51874007)资助

安徽省经济与信息化委员会企业发展专项资金资助

煤矿安全高效开采省部共建教育部重点实验室资助

煤矿示踪检测技术

秦汝祥 戴广龙 著



中国矿业大学出版社

内 容 提 要

本书针对煤矿生产中气体渗流问题,采用示踪气体检测技术,分析了示踪剂的特点及检测方法、装备,研究了煤矿生产中诱发煤自燃的漏风规律和复杂采场内瓦斯运移特征。从煤柱漏风、工作面架后漏风、多源多汇复杂采空区漏风、分层开采顶板层状漏风、煤层群开采大面积漏风、浅埋深煤层地表漏风以及钻孔抽采瓦斯影响范围分析等方面提出了相应的气体运移路径及运移特征的检测方法,并结合工程实例展开了分析,为煤矿自然防治和瓦斯治理措施的制定提供了依据。

本书可供矿业工程、安全工程等相关专业的高等院校、科研院所的师生、研究人员及企业的技术管理干部参考使用。

图书在版编目(CIP)数据

煤矿示踪检测技术 / 秦汝祥,戴广龙著. —徐州:中国矿业大学出版社, 2018.12

ISBN 978 - 7 - 5646 - 4150 - 4

I. ①煤… II. ①秦…②戴… III. ①示踪法—检测—应用—煤矿开采—研究 IV. ①TD82

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2018)第 224008 号

书 名 煤矿示踪检测技术

著 者 秦汝祥 戴广龙

责任编辑 李 敬

出版发行 中国矿业大学出版社有限责任公司

(江苏省徐州市解放南路 邮编 221008)

营销热线 (0516)83884103 83885105

出版服务 (0516)83995789 83884920

网 址 <http://www.cumtp.com> E-mail: cumtpvip@cumtp.com

印 刷 江苏淮阴新华印务有限公司

开 本 787×1092 1/16 印张 13.75 字数 352 千字

版次印次 2018 年 12 月第 1 版 2018 年 12 月第 1 次印刷

定 价 36.00 元

(图书出现印装质量问题,本社负责调换)

前 言

示踪检测技术在我国地质工程、石油工程、海洋工程和医学、气象学等领域有着广泛的应用。实际上,示踪技术在我国煤矿领域也有着一定的历史。自原淮南矿业学院(安徽理工大学前身)首次脉冲释放 SF₆ 示踪气体成功实现了采区漏风通道测试以来,煤矿示踪检测已经扩展至矿井内的煤柱漏风、裂隙导通性判定、瓦斯抽采钻孔影响范围的测试和井巷微风量的检测等方面。本书在总结前人关于煤矿示踪检测分析的基础上,结合课题组近二十年来的科研成果,旨在将煤矿示踪检测技术进行归纳、系统化,便于研究人员查阅与借鉴。

煤矿示踪气体检测技术,是选择具有一定特性的气体做标志气体,利用风流或漏风做载气,在风流能位较高的漏风源释放,在其可能出现的漏风汇采集气样、分析气体,确定标志气体的流动路径,判断漏风通道,根据标志气体浓度变化计算风量或漏风量。煤矿示踪气体测试主要以 SF₆ 气体为主,根据需求不同辅以二氟一氯一溴甲烷(CF₂ClBr)、二氟二氯甲烷(CF₂Cl₂)、二氟二溴甲烷(CF₂Br₂),判定井下裂隙导通时也用氦气,在进行煤自燃火区探测时常用氦气。示踪气体的释放方法包括瞬时释放和定量连续释放两种,漏风量计算可分别采用示踪气体浓度分布曲线积分法和浓度稀释定律进行。采用色谱分析方法检测示踪气体,分析精度高,可达 10⁻¹²,主要用于定量分析,但气样采集量大,采集操作要求高,气样采集的可靠性难以得到保证。近几年,出现了几种便携式 SF₆ 气体检测仪,可方便快捷地实现漏风通道的判断,但便携仪主要用于定性检测,由于检测精度低,尚不能进行定量检测。

1981年,淮南矿业学院通风教研室首次成功应用 SF₆ 示踪气体脉冲释放法测试了采空区漏风,1989年又提出了示踪气体连续稳定定量释放方法,实现了更为准确的矿井微量漏风量的定量测试。至此,示踪检测技术成为我国煤矿检测漏风通道、判断漏风方向、确定漏风风速的主要方法。随着该项技术的广泛应用而渐趋成熟,又成功应用于我国各煤矿生产集团公司。例如,淮北矿务局芦岭煤矿、平顶山矿务局高庄煤矿、淮南新集煤矿等分别采用 SF₆ 示踪气体的脉冲释放测试了采空区的漏风规律;南屯煤矿应用 SF₆ 单元示踪气体,采用连续定量稳定释放方法,研究了“孤岛”采煤工作面的漏风规律;平顶山煤业集团八矿、十矿和首山一矿采用连续定量稳定释放示踪气体方法,测试了工作面架后漏风规律;淮南矿业集团顾桥矿、潘一矿和平顶山煤业集团十矿分别采用连续定量稳定释放方法测试了采空区三维空间裂隙分布状况;淮南矿业集团谢桥矿、山西恒煤焦有限公司采用连续定量稳定释放方法测试了区段煤柱漏风特性;等等。这些测试的应用,为矿井的瓦斯治理和煤自燃防治提供了基础资料,保障了矿井的安全生产。

本书共分8章。第1章介绍示踪气体的性质、检测技术与检测方法、煤矿示踪气体的优选;第2章介绍示踪气体在煤矿井下煤层和采空区内的运移理论及其规律;第3章介绍示踪气体测风原理、示踪气体在下分层井巷漏风量测试以及采空区沿空巷充填墙漏风测试中的

应用;第4章介绍示踪气体在工作面采空区漏风中的应用,主要介绍复杂多源多汇以及不同通风方式下的采空区漏风特征;第5章讨论示踪气体在三维采空区漏风中的应用,包括Y型通风形成的复杂三维采空区漏风、近距离煤层群间以及近地表采空区的漏风;第6章介绍示踪气体在煤柱漏风中的应用,包括煤柱的整体漏风特性和煤柱宽度对漏风的影响;第7章介绍采动裂隙导通性测试以及卸压煤层内的裂隙发育分布对瓦斯抽采区域的影响;第8章介绍地面钻井抽采采空区瓦斯的有效区域分析以及瓦斯抽采对煤自燃的影响等。

本书不仅仅是研究团队共同努力的结果,同时也参考了大量相关文献,对于部分文献中较好的实例甚至进行了直接引用,值此向参与示踪检测的研究人员以及文献的作者表示衷心的感谢!

本书得到了国家重点研发计划项目(2018YFC0807900)、国家自然科学基金面上项目(51574009、51774014、51874007)、安徽省经济与信息化委员会企业发展专项资金和煤矿安全高效开采省部共建教育部重点实验室的资助,在此表示感谢!本书在出版过程中,中国矿业大学出版社给予了大力支持,在此一并表示感谢!

著者

2018年6月4日

目 录

第 1 章 示踪气体优选与检测	1
1.1 示踪剂的性质	1
1.2 示踪气体检测方法及其装备	6
1.3 气相色谱检测技术	23
1.4 煤矿卤元素化合物示踪气体优选	37
第 2 章 示踪剂运移理论	45
2.1 分子扩散	45
2.2 随流输送	48
2.3 多孔介质中示踪剂运移与扩散	53
第 3 章 井巷风量示踪检测技术	60
3.1 示踪气体测量原理	60
3.2 井巷漏风量测试	62
3.3 矿井外部漏风测试	69
第 4 章 采空区二维空间漏风检测	72
4.1 能位测定与示踪技术联合检测复杂采空区漏风	72
4.2 双示踪技术检测采空区漏风	78
4.3 Y 型通风工作面采空区漏风测试	81
4.4 U 型通风采空区漏风测试	87
4.5 U 型+中间进风巷的采空区漏风测试	96
第 5 章 采空区三维空间漏风检测	105
5.1 潘一矿保护层开采工作面采空区三维漏风测试	105
5.2 薄煤层 Y 型通风工作面采空区三维漏风特征	115
5.3 顾桥矿 Y 型通风工作面大范围三维漏风测试	121
5.4 极近距离煤层采空区漏风	138
5.5 近地表采空区漏风检测技术	144
第 6 章 煤柱漏风示踪检测技术	147
6.1 区段小煤柱整体漏风	147

6.2	小煤柱及采空区漏风规律研究	150
6.3	小煤柱宽度的漏风特性	158
第 7 章	采动裂隙贯通性示踪检测	161
7.1	谢桥矿 1252(3)底抽巷顶板裂隙贯通性试验	161
7.2	地面钻井预抽采动区卸压煤层瓦斯半径测试	167
7.3	双示踪测试采动卸压区煤层瓦斯抽采范围	190
第 8 章	地面钻井与采空区连通性测试	205
8.1	试验地点工程概况	205
8.2	测试方案	206
8.3	测试过程	207
8.4	测试结果及分析	207
	主要参考文献	210

第1章 示踪气体优选与检测

示踪检测是以矿井通风或者瓦斯抽采负压形成的压差作为示踪剂运移的动力,因此,实际运用时示踪剂均为气体。本章主要探讨煤矿通风安全应用的示踪气体的性质及其检测技术。

1.1 示踪剂的性质

国内外使用的示踪剂很多,如六氟化硫(SF_6)、二氟二溴甲烷(CF_2Br_2)、二氟一氯一溴甲烷(CF_2ClBr)、二氟二氯甲烷(CF_2Cl_2)等。其中, SF_6 是应用最为广泛的示踪剂,除此之外,氦气和氩气也常被应用于煤矿作为示踪剂。

1.1.1 六氟化硫

六氟化硫英文名为 Sulfur hexafluoride、Sulfur fluoride,由卤族元素中最活泼的氟原子与硫原子结合而成,分子结构是6个氟原子处于顶点位置而硫原子处于中心位置的正八面体,如图1-1-1所示,硫原子与氟原子以共价键连接,键距是 1.58×10^{-10} m。其分子等值直径是 4.58×10^{-10} m。六氟化硫在常温常压下具有高稳定性,在通常状态下是一种无色、无味、无毒、无腐蚀性、不燃、不爆炸的气体。六氟化硫气体的相对分子质量是146.07,空气相对分子质量是28.8,密度约为空气的5倍,标准状态下密度为 6.0886 kg/m^3 ,在低温和加压情况下呈液态,冷冻后变成白色固体。升华温度为 -63.9°C ,熔点为 -50.8°C ,临界温度为 45.6°C ,临界压力为3.759 MPa。六氟化硫的物理化学性质对其作为示踪剂的应用有很大影响。

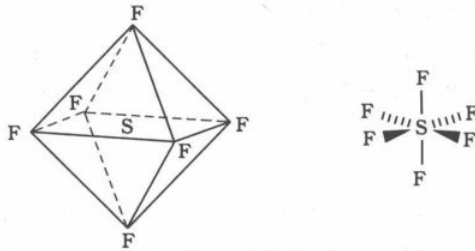


图 1-1-1 六氟化硫分子结构示意图

1.1.1.1 溶解度

六氟化硫在极性和非极性溶剂中的溶解度如表1-1-1所列。最早测得六氟化硫在水中的溶解度比氦(He)、氖(Ne)、氙(Xe)、氩(Ar)等惰性气体在水中的溶解度低得多,如表1-1-2所列。

表 1-1-1 六氟化硫在极性和非极性溶剂中的溶解度(摩尔分数)

溶剂	溶解度/($\times 10^{-4}$)	溶剂	溶解度/($\times 10^{-4}$)	溶剂	溶解度/($\times 10^{-4}$)
H ₂ O	0.05	C ₆ H ₅ CH ₃	33.95	C ₂ Cl ₃ F ₃	278.6
HF	1.3	C ₆ H ₁₁ CH ₃	70.15	CS ₂	9.245
C ₆ H ₆	26.4	C ₇ H ₁₆	224.4	N ₂ O ₄	93.48
C ₆ H ₁₂	53.91	CCl ₄	65.54	CH ₃ NO ₂	10.0

表 1-1-2 六氟化硫与氦、氖、氩、氙在水中的溶解度(体积分数)

物质	溶剂	溶解度/($\times 10^{-3}$)
SF ₆	H ₂ O	5.5
He	H ₂ O	9
Ne	H ₂ O	16
Xe	H ₂ O	118
Ar	H ₂ O	34

1.1.1.2 热稳定性

六氟化硫气体的化学性质极为稳定,在常温和较高的温度下一般不会发生分解反应,其热分解温度为 500 ℃。六氟化硫在室温条件下与大多数化学物质不发生作用。在温度低于 800 ℃时,六氟化硫为惰性气体,不燃烧。在赤热的温度下,它与氧气、氢气、铝以及其他许多物质不发生作用。但在高温下则与许多金属发生反应,而且与碱金属在 200 ℃左右即可反应。使用条件在 150~200 ℃时,要慎重选用与六氟化硫接触的材料。

1.1.1.3 热传导性

由于物质的传热过程包括热传导、热对流、热辐射,所以评价传热性能的优劣应综合分析。对于气体介质而言,它的传热效应往往不是单纯的传导作用,还要考虑自然的对流传热、分子扩散运动携带的能量以及气体与热固体表面接触膨胀扩散传热等。因此,综合考虑六氟化硫气体的导热系数、摩尔定压热容和表面传热系数,可以看到六氟化硫气体的热传导性能虽较差,导热系数比空气低 1/3,但它的摩尔质量定压热容是空气的 3.4 倍。其对流传热能力比空气大。此外,六氟化硫气体的表面传热系数比空气和氢气大。表面传热系数大,表示热物体在单位表面积、单位温差下的散热效果好,因此六氟化硫气体的实际散热能力比空气好。

1.1.1.4 临界常数

在一定温度下,实际气体压力与体积的关系曲线称为实际气体的等温线。实际气体的等温线平直部分正好缩成一点时的温度称为临界温度。临界温度表示气体可以被液化的最高温度。在临界温度时使气体液化所需的最小压力称为临界压力。六氟化硫的临界压力和临界温度都很高(临界压力为 3.759 MPa,临界温度为 45.6 ℃)。在临界压力和临界温度下六氟化硫气体的密度是 7.3 g/L。

一般的气体其临界温度越低越好,如氮气,临界温度为 -146.8 ℃,表明氮气只有在低于 -146.8 ℃时才可以液化。六氟化硫则不然,只有在温度高于 45.6 ℃才能恒定地保持气态,通常条件下很容易液化,所以六氟化硫气体不适于在低温、高压下使用。

六氟化硫气体的升华温度为 $-63.9\text{ }^{\circ}\text{C}$,在此温度下,0.1 MPa 的压力可使六氟化硫气体直接转变为固体。六氟化硫气体的熔点为 $-50.8\text{ }^{\circ}\text{C}$,在此温度下,六氟化硫液态转变为固态,在 0.23 MPa 压力下,六氟化硫气体也可以直接转变成固体。

1.1.1.5 电负性

六氟化硫是电负性气体。电负性是指分子(原子)吸收自由电子形成负离子的特性。六氟化硫气体的这一性质主要是由氟元素确定的。氟元素在元素周期表上是第七族卤族元素,它的最外层有七个电子,很容易吸收一个电子形成稳定的电子层(八个电子)。元素的电负性可由电子亲和能来评价。当分子或原子与电子结合时会释放出能量,该能量称为电子亲和能。卤族元素均具有电负性,氟居首位。

若干元素的电子亲和能值见表 1-1-3。当氟与硫结合后,仍将保留此特性。六氟化硫的电子亲和能是 3.4 eV。

表 1-1-3 若干元素的电子亲和能值

元素	F	Cl	Br	I	O	S	N	SF ₆
电子亲和能/eV	4.10	3.78	3.43	3.20	3.80	2.06	0.04	3.4
周期族	Ⅶ	Ⅶ	Ⅶ	Ⅶ	Ⅵ	Ⅵ	V	

1.1.1.6 红外吸收特性

不同气体分子由于具有不同的分子结构,其反映的分子内部运动和分子之间相互作用也各有不同。分子的内部运动包括振动和转动,且分子的振动能量大于分子的转动能量,分子发生振动能级跃迁时,伴随有分子的转动能级跃迁,所以分子的光谱是振动-转动光谱。

根据能级跃迁理论,气体分子对入射光具有很强的选择性吸收。当分子受到含有丰富频率的红外光照射时,分子会吸收某些频率的光,并转换成分子的振动能量和转动能量。多原子分子由于更多的机械自由度,将比简单的分子更有效地吸收和发射能量,使分子的能级从基态跃迁到激发态,并使对应于吸收区域的红外照射光的光强减弱。

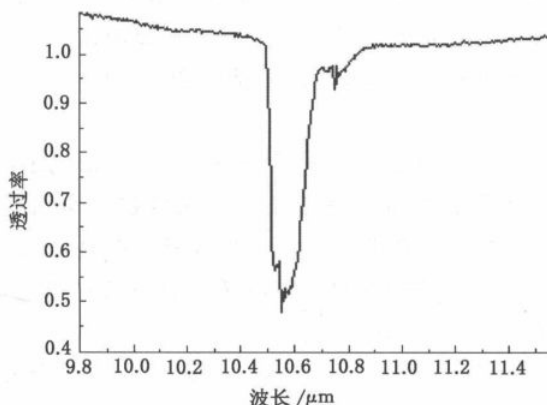
每一种物质都有自己的特征吸收谱,在气体吸收谱与光源发射谱重叠的部分会产生吸收,吸收后光强将会减弱,在一定条件下,其特征吸收峰值的强度与样品物质的浓度成正比关系,因此可以把红外辐射通过气体的分子吸收光谱作为一种工具,达到测定样品浓度的目的。SF₆ 气体在 10.6 μm 的红外辐射具有很强的吸收作用,如图 1-1-2 所示。

1.1.2 卤素示踪剂

1.1.2.1 二氟一氯一溴甲烷

二氟一氯一溴甲烷的化学式是 CF₂ClBr(又称 1211),分子量为 165.4,为无色、略带芳香气味的、低毒不导电不燃烧气体,不具腐蚀性,微溶于水。液体密度($-4\text{ }^{\circ}\text{C}$, 101.325 kPa)为 1.889 kg/m³,沸点(101.325 kPa)为 $-4\text{ }^{\circ}\text{C}$,熔点(101.325 kPa)为 $-159.5\text{ }^{\circ}\text{C}$,临界温度为 153.75 $^{\circ}\text{C}$,临界压力为 4 254 kPa,化学性质稳定。

二氟一氯一溴甲烷在常温常压下为略带芳香味的低毒无色气体,在空气中不燃烧。在水中很轻微地水解,溶解量很微小。可溶于丁烷、苯、甲苯等碳氢化合物,四氯化碳等氯化物溶剂,己醇、丙酮、酯和一些有机酸。不溶于甘醇、甘油、酚和蓖麻油。

图 1-1-2 SF₆ 光谱透过率曲线图

二氟一氯一溴甲烷对金属的腐蚀性极小,在干燥的状态下,可以储存在钢、铝、铜等制成的容器里,而且长期储存也不会变质。它的绝缘性能良好,其绝缘电阻率为 $90.0 \times 10^{12} \Omega \cdot \text{m}$,气态击穿电压为 36.6 kV/cm,液态击穿电压为 22.9 kV/cm。

二氟一氯一溴甲烷曾作为我国主要灭火剂之一,用于扑灭油类、有机溶剂、精密仪器、文件档案等的火灾,其灭火效率比二氧化碳灭火剂高 4 倍多,而且灭火后不留痕迹。二氟一氯一溴甲烷还有较强的抑爆能力,在有爆炸性气体存在的库房或容器中,充灌 1211 灭火剂,使其浓度达到 6.76% 以上,就能抑制其燃烧或爆炸。因此,在船舶、油罐、油田、矿井等的灭火中曾经广泛应用 1211 灭火剂。

二氟一氯一溴甲烷是毒性较低的物质,但是,当其与可燃性气体的混合物燃烧时,能分解出毒性高的气体。当温度超过 800 °C 时,它将全部分解,分解产物有 HF、HCl、HBr、Cl₂、Br₂ 及少量的 COF₂、COCl₂ 和 COBr₂。试验证明,人在 1211 灭火剂浓度为 4%~5% 的场所中,其最大安全时间可达 1 min;在浓度低于 4% 时,停留数分钟不致产生严重影响;当浓度达到 5%~10% 或更高时,人有中毒的危险。

二氟一氯一溴甲烷虽然对金属的腐蚀性极小,但如果含有水分,其腐蚀性增强。在常温下,用碳钢容器储存三个月,其腐蚀深度仅 0.003 mm。干燥的二氟一氯一溴甲烷用不锈钢、碳钢、黄铜、紫铜容器储存,长时间不变质。但是,含镁 2% 以上的合金应避免使用。二氟一氯一溴甲烷对橡胶有膨胀作用,对塑料、尼龙不腐蚀,可用聚四氟乙烯做封闭材料。

1.1.2.2 二氟二溴甲烷

二氟二溴甲烷的化学式为 CF₂Br₂,分子量为 209.82,在常温常压下为无色微毒的液体,熔点为 -140.1 °C,沸点(101.325 kPa)为 23.9 °C,液体密度(23.9 °C, 101.325 kPa)为 2 215.6 kg/m³,气体密度(40 °C, 101.325 kPa)为 8.171 kg/m³。二氟二溴甲烷本身不可燃,但若与可燃气体混合点燃时即能分解,放出有毒产物。二氟二溴甲烷可用作灭火剂(1202 灭火剂),其灭火能力为 1301 灭火剂的 67%。

二氟二溴甲烷在常温常压下为无色微毒的液体,最高允许体积比浓度为 1×10^{-4} (对应质量比浓度 860 mg/m³)。体积比浓度为 5.4×10^{-2} 时,老鼠在 15 min 内致命,人在浓度 2%~2.5% 时吸入 2 h 可重伤或致命。二氟二溴甲烷可通过吸入、食入或皮肤被人体吸收,

吸入后可引起肺刺激、胸痛,可使人因肺水肿而死亡,对人体的慢性影响是肝损害。人体吸入二氟二溴甲烷后应脱离现场至空气新鲜处,保持呼吸道通畅,必要时进行人工呼吸、就医。

二氟二溴甲烷与碱金属能发生剧烈反应,与活性金属粉末(如镁、铝)能发生反应,引起分解,燃烧或分解的产物为溴化氢和氟化氢。

在室温,对干燥或潮湿的二氟二溴甲烷可以用铜、不锈钢容器储存,干燥时也可以用铝。

1.1.2.3 二氟二氯甲烷

二氟二氯甲烷是无色、几乎无臭、无腐蚀性、无刺激性的不燃气体。二氟二氯甲烷的化学式是 CF_2Cl_2 ,分子量为120.92,熔点为 $-158\text{ }^\circ\text{C}$,沸点为 $-29.79\text{ }^\circ\text{C}$,液态密度($-29.8\text{ }^\circ\text{C}$)为 1.486 kg/m^3 ,气态密度($0\text{ }^\circ\text{C}$)为 5.5389 kg/m^3 ,闪点为 $11\text{ }^\circ\text{C}$ 。高浓度二氟二氯甲烷微有类似醚的气味,不溶于水,溶于乙醇、乙醚等有机溶剂,水溶解度为 0.028 g/100 mL 。

二氟二氯甲烷是氟利昂的代表物,在紫外线作用下光解为 Cl ,它能促进 O_3 转化为 O_2 。常温下不燃,燃烧产生有毒氟化物和氯化物烟雾。

二氟二氯甲烷属于低毒类物质,一般对人体的危害是经呼吸道吸入。

1.1.3 氦气

氦元素符号为 He ,原子序数为86。氦气是无色、无味、无臭的放射性惰性气体,是自然界唯一的天然放射性气体。氦在周期表中是第0族第6周期,属稀有气体,在标准压力和 $0\text{ }^\circ\text{C}$ 下,氦气的密度为 9.73 kg/m^3 。氦在室温中是最重的气体(大气层密度为 1.217 kg/m^3),熔点为 $-71.0\text{ }^\circ\text{C}$,熔化热为 2.89 kJ/mol ,沸点为 $-61.8\text{ }^\circ\text{C}$,汽化焓为 16.4 kJ/mol 。氦在水里溶解度为 4.933 g/kg ,摩尔体积为 $50.5\times 10^{-6}\text{ m}^3/\text{mol}$,比热容为 $94\text{ J}/(\text{kg}\cdot\text{K})$,热导率为 $0.00364\text{ W}/(\text{m}\cdot\text{K})$,第一电离能为 1037 kJ/mol ,原子半径为 $134\times 10^{-12}\text{ m}$ 。氦在空气、水及岩石中的扩散速度分别为 $0.105\text{ cm}^2/\text{s}$ 、 $8.2\times 10^{-3}\text{ cm}^2/\text{s}$ 、 $7.0\times 10^{-2}\sim 5.0\times 10^{-4}\text{ cm}^2/\text{s}$ 。氦气能溶于煤油、甲苯、血、水、二硫化碳,易被脂肪、橡胶、硅胶、活性炭吸附,因此可从气体杂质中分离出来,若被活性炭吸附后,加热到约 $350\text{ }^\circ\text{C}$,又可从活性炭上脱附得到纯的氦气。

氦作为惰性气体,化学性质不是很活泼。氦的外围电子数目有8个,表示已达到八隅体稳定的状态。由于氦有放射性,很少出现在化学实验研究中,氦亦难以与其他元素发生反应生成化合物。不过,氦可以与强氧化剂如氟发生反应,生成氦氟。

氦是自然界唯一的天然放射性气体,已知氦的同位素有34种,从氦-195到氦-228,其中最稳定的同位素氦-222是镭-226的衰变物,会放出 α 粒子,半衰期是 3.823 d ,衰变常数为 $2.097\times 10^{-6}\text{ s}^{-1}$, α 粒子的能量为 5.481 MeV ,在空气中的射程为 4.04 cm 。氦-220是钍的衰变物,又称“钍射气”,会放出 α 粒子来衰变,半衰期是 55.6 s ;氦-219是镭的衰变物,又称“镭射气”,会放出 α 粒子来衰变,半衰期是 3.96 s ;氦-218的半衰期是 0.03 s 。氦进一步衰变产生钋-218、铅-214、铋-214和钋-214等短寿命子体,是室内氦致癌的氦子体。

氦对人类的健康危害表现为确定性效应和随机效应。确定性效应表现为人在高浓度氦的暴露下,机体出现血细胞的变化。氦直接照射人体后产生一种生物效果,会对人体内的造血器官、神经系统、生殖系统和消化系统造成损伤。随机效应主要表现为肿瘤的发生,当人体吸入氦气后,氦衰变产生的 α 粒子可对人的呼吸系统造成辐射损伤,诱发肺癌。

1.1.4 氦气

氦气分子式为 He ,在室温和大气压力下,氦是无色、无味的不可燃气体,在干空气中的

体积含量为 5.24×10^{-6} 。氦气是人类发现临界温度最低的物质,氦不能仅靠将饱和液体冷却到绝对零度而固化,要使氦固化,必须施以相应压力。在 2.173 K,氦将从正常液体变成一种具有独特性质的流体;温度高于 2.173 K 的液体称为氦 I,低于 2.173 K 的液体称为氦 II,氦 II 为超流体,它的熵为零,热导率极高,黏度几乎为零。由于液氦温度低,用液氦冷却某些金属或金属化合物,金属或金属化合物的电阻会完全消失,这种现象称为超导电性,此温度称为临界温度。因为氦气传播声音的速度差不多为空气的 3 倍,所以吸入氦气的人说话的声音会变高频率。

氦是单原子气体,化学性质不活泼,极难形成化合物。氦气既不能燃烧,也不能助燃。

氦气对人体的不良反应表现为,当身体内的氦气含量增加导致氧气含量低于 19.5% 时,患者先出现呼吸加快、注意力不集中、共济失调;继之出现疲倦无力、烦躁不安、恶心、呕吐、昏迷、抽搐,以致死亡。如果是由高压气瓶中直接吸入氦气,其高流速会严重地破坏人体肺部组织。大量及长时间吸入氦气可导致脑损伤,甚至死亡。

1.2 示踪气体检测方法及装备

示踪气体的检测方法很多,一般是依据示踪剂的物理化学性质而提出相应的检测方法。因检测设备的工作原理不同,各检测设备都有自身的优势和不足。因此,必须了解其优缺点和适用性,才能采用示踪测试技术结合工程实际条件准确进行工程需求检测。

1.2.1 SF₆ 检测

1.2.1.1 SF₆ 检测技术与原理

SF₆ 作为示踪剂在电力行业的应用最为广泛,其相应的检测有成熟的技术与装备。人们对 SF₆ 气体的特性,尤其是化学、声学、光学性质已经形成了系统的认识。SF₆ 气体的泄漏检测机理都是基于气体存在的这些性质,其中,负电晕检测技术、电子捕获检测技术、负离子捕获检测技术、紫外电离检测技术利用的是 SF₆ 气体的负电性,而红外吸收技术、光声光谱技术、成像检测技术是采用了 SF₆ 气体红外光谱的特征吸收的性质。

1.2.1.1.1 负电晕检测技术

负电晕检测技术是利用电晕放电原理实现的气体检测。电晕放电是指带电体表面在气体或液体介质中出现的局部的自持放电现象,常发生在不均匀电场中电场强度很高的区域内,如高压导线的周围、带电体的尖端附近等。因为在尖端电极附近,电荷密度很大,局部电场强度很强,超过了气体的电离场强,使气体发生电离和激励,出现电晕放电,发生电晕放电时在电极周围可以看到发光的电晕层,并伴有滋滋声。电晕放电的极性由曲率半径小的电极的极性决定。如果曲率半径小的电极带正电,发生的电晕为正电晕,反之则为负电晕。负电晕放电检测技术中,采用了具有高频脉冲负电晕连续放电效应的检测器,当检测器中存在 SF₆ 气体时,SF₆ 气体的负电性对负电晕放电有一定的抑制作用,致使电晕电流减小。这些随负电性气体浓度而变化的电晕电流通过信号放大电路转换成 SF₆ 气体浓度指示值。

负电晕放电检测仪组成及基本原理如图 1-2-1 所示。仪器由检测器 3、高频脉冲发生器 10、信号放大器 5、自动跟踪电路 9、报警电路 7 以及采样系统(包括采样探头 1、净化层 2 和抽气泵 4)组成。

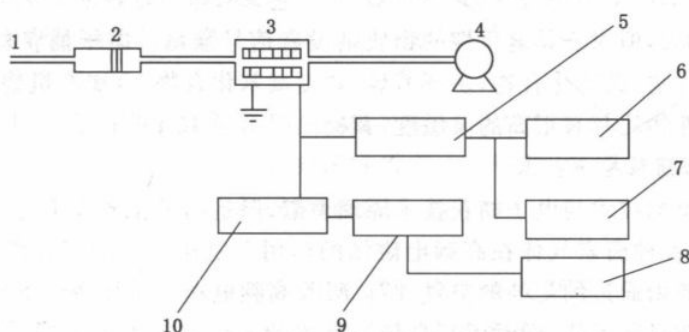


图 1-2-1 负电晕放电检测器组成及基本原理图

1—探头;2—净化层;3—检测器;4—抽气泵;5—信号放大器;6—指示仪表;
7—报警电路;8—电源;9—自动跟踪电路;10—高频脉冲发生器

抽气泵 4 使气体经过净化层 2,清除待测气体中的水分及灰尘后,进入检测器 3 中,检测器在脉冲高压作用下产生电晕连续放电效应。当气体中带有负电性气体(如 SF_6 、卤素、氟卤烃等)时,这些负电性气体对检测器中的电晕电场起到抑制作用。气体中的负电性越强,物质浓度越高,则电晕效应越受到抑制,电晕放电电流则会越少,这些随负电性气体浓度而变化的电晕电流通过信号放大电路转换成浓度指示值。同时,由已设定的报警电路 7 根据信号大小而发出浓度超限警告信号。

负电晕检测技术的设备结构简单、成本低,但是具有测试干扰因素较多、抗干扰能力差、电极易老化、传感器寿命短、单电极结构灵敏度不高、精度低等缺点。目前,该技术由于精度低的缺点不适用于定量检测,多用于定性检测仪,也有应用于室内 SF_6 监测报警装置。该技术原理的仪器在使用过程中需对检测器定期清洗。

1.2.1.1.2 电子捕获检测技术

电子捕获检测技术常采用放射性同位素 Ni-63 作为检测器的离子发射体,且配有载气。当载气通过放射源时,放射源产生 β 射线的高能电子使载气电离形成正离子与慢速电子,向极性相反的电极定向迁移形成基流。 SF_6 气体的负电性决定了它能捕获载气电离形成的慢速电子,从而形成负离子。待检 SF_6 气体负离子与载气正离子复合成为中性化合物,而使原有的基流减少,基流的减少量与被测气体的浓度成一定数量的比例关系,将变化了的基流转换为浓度指示信号输出,从而达到检测气体浓度的目的。该类检测器对载气(通常为氩气、氮气)的纯度有特殊要求。

采用该技术的仪器由探头和控制器组成。探头包括电子捕获检测器、检测管、信号放大器和指示器、浓度报警器。控制器包括载气钢瓶、气体控制部件、信号控制系统及电源。

电子捕获检测技术性能非常稳定,测量分辨率高,精度高,响应和恢复速度都很快。但是,这种技术使用放射源和高压载气瓶,测试安全与快捷的要求均无法满足,且操作复杂。这种类型的技术仪器多用于电力设备出厂试验,但是安全和便携因素制约着测试仪器的运输、存储和使用。

电子捕获检测器(ECD)是一种对痕量电负性(亲电子)有机化合物的分析很有效的检测

器,典型的产品是美国 USON 公司生产的 Q200。它只对电负性物质有信号,样品电负性越强,给出的信号越大,但对不具电负性的物质则没有信号输出。电子捕获检测器对卤化物,含磷、硫、氧的化合物,硝基化合物,多环芳烃,共轭羰基化合物,金属有机物,金属化合物,甾族化合物等电负性物质都有很高的灵敏度,其检出限可达 $10 \mu\text{g}/\text{mL}$ 。

1.2.1.1.3 负离子捕获检测技术

负离子捕获检测技术与电子捕获技术原理类似,但是离子化方式不同,该方法利用的是空气、 SF_6 气体或各种卤素气体在高频电磁场的作用下电离程度的差异而形成的一种检测技术。假设电离腔内通过的是纯的空气,腔体吸收高频电场和磁场所给予的能量,致使谐振回路内的功率因数显著下降,同时引起高频振荡器的振荡幅值大大下降。然而当空气中含有 SF_6 或卤素等负电性气体时,负电性气体具有很强的俘获电子的能力,致使电离腔中的电离度减弱,振荡器的振荡幅值上升,上升的幅值与被测气体的负电性气体浓度成比例变化,从而通过信号放大器将信号转换为浓度输出值。

负离子捕获检测法原理如图 1-2-2 所示。仪器由探头和泵体两部分组成。探头部分包括针阀 2、气体电离腔 3、信号放大器 5、振荡电路 13、指示仪表 6、报警信号器 7。泵体部分包括抽气泵 4、控制电源 10、直流电源 8 和交流电源 9。

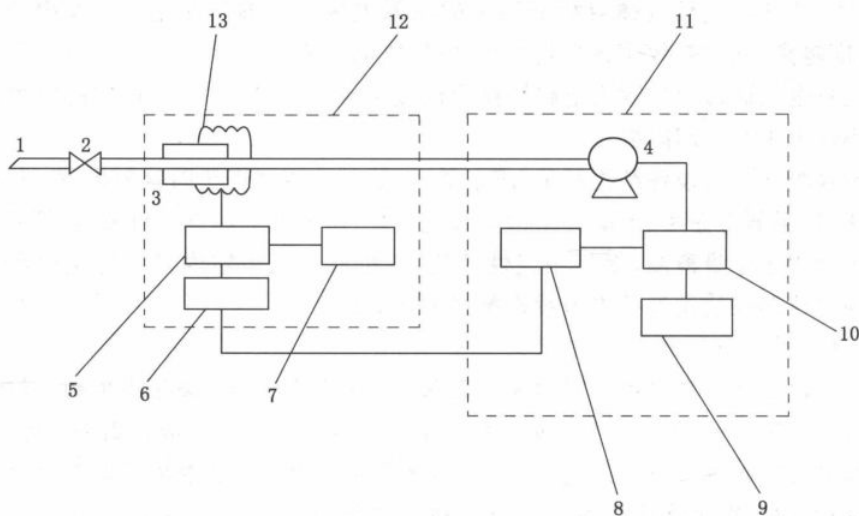


图 1-2-2 负离子捕获检测法原理图

- 1——探嘴;2——针阀;3——电离腔;4——抽气泵;5——信号放大器;6——指示仪表;7——报警信号器;
8——直流电源;9——交流电源;10——控制电源;11——泵体;12——探头;13——振荡电路

仪器气体电离腔 3 两侧的高频电场电极与高频振荡线圈组成高频振荡器的谐振回路和能量输出回路。探头的针阀 2 可以调节进气量,使其与抽气泵 4 的抽气速率相配合,以便在气体电离腔 3 内保持一定的真空度,使被测气体在较低能量的高频电磁场作用下具有足够的电离度。由高频线圈产生的高频电场和磁场共同作用于电离腔内的稀薄气体,使之产生高频无极电离现象。当电离腔内通过的空气不含 SF_6 或卤素气体时,腔体吸收高频电场和磁场所给予的能量,致使谐振回路内的功率因数显著下降,同时引起高频振荡器的振荡幅值大大下降。然而当空气中含有 SF_6 或卤素等负电性气体时,因为 SF_6 及卤素气体是俘获

电子的气体,可大量地俘获在电离腔内的自由电子,这样电离腔中的电离度减弱,振荡器的振荡幅值上升,上升的幅值与被测气体的负电性气体浓度成比例变化,从而通过信号放大器5将信号转换为浓度指示。

负离子捕获检测法摒弃了放射源和高压载气瓶,由此原理制作的仪器操作非常简单,是目前电力设备现场检漏工作中最常用的测试仪器之一。同时,电极贵、成本高、反应慢也是高压真空负离子捕获检测技术不容忽视的缺点。

1.2.1.1.4 红外吸收技术

红外吸收技术是基于 SF_6 气体对红外光谱的特征吸收原理,当红外光通过待测气体时, SF_6 气体分子对特定波长 (975 cm^{-1}) 的红外光有吸收,其吸收关系服从朗伯-比尔(Lambert-Beer)吸收定律。由朗伯-比尔定律可知,光的吸收系数与物质的浓度有关,通过吸收介质的长度与透射光强满足以下关系:

$$I(\lambda, l) = I_0 e^{-\alpha c l} \quad (1-2-1)$$

式中: I 和 I_0 分别是透射光强和入射光强; α 是一定波长下的单位浓度、单位长度介质的吸收系数; l 是待测气体与光相互作用的长度; c 是待测气体的浓度。

式(1-2-1)可变为式(1-2-2):

$$c = -\frac{1}{l\alpha} \ln \frac{I(\lambda, l)}{I_0} \quad (1-2-2)$$

由此可知,在波长 λ 下,若气体的吸收系数 α 可以测量,则 SF_6 气体浓度 c 可以从 λ 光的输入光强 I_0 和输出光强 I 的变化量求出。

红外吸收检测仪的主要组成部分包括光源系统、气体采样泵、测试气室、反射镜、滤光片、探测器、放大器以及数据处理系统,如图 1-2-3 所示。

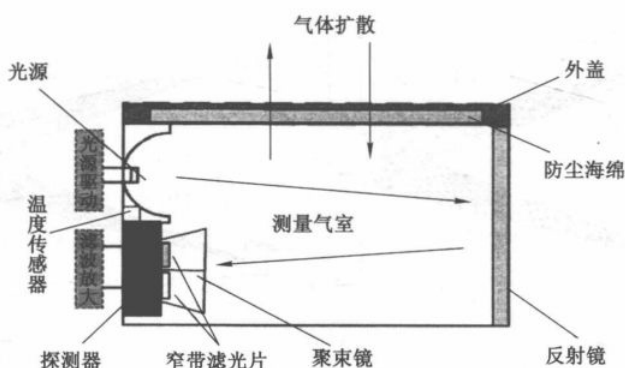


图 1-2-3 红外光谱吸收检测仪的结构组成

仪器的工作原理为通过气体采集泵将采集到的气体引入双反射镜气室内,经过红外光源所放射出的红外线透过气体,针对 SF_6 气体的特定红外波段经过 SF_6 气体时会被吸收一部分,通过红外探测器探测出红外波段的变化,并将该变化值通过放大器后,输入数据处理系统,进而显示出 SF_6 气体的含量。

红外吸收技术的检测仪器体积小、质量轻、无放射源危险、无须耗材、性能稳定。电力系统室内 SF_6 监测报警装置普遍采用该技术,但是它的检测灵敏度不高,最小检出限高达

10 $\mu\text{L/L}$, 响应速度慢, 制约了它在定量检漏中的应用。

1.2.1.1.5 成像检测技术

成像检测技术通过成像方式方便地观测气体状况, 在显示屏上以可见的动态烟云形式显现出来, 从而可以直观、准确、快速地发现并定位泄漏点。与常用方法相比较, 成像检测技术可以安全地在远距离对检测点进行检测。在电力行业中采用成像检测 SF_6 技术可保障运行、检修人员不受触电和气体中毒危险, 减少停电时间, 提高设备的供电可靠性。

根据不同的成像原理, SF_6 成像检测可分为激光成像和红外成像。

(1) SF_6 气体激光成像

SF_6 气体具有极强的红外吸收特性, 当激光遇到 SF_6 气体时, 会被 SF_6 气体吸收, 激光强度将明显减弱, SF_6 激光成像检测仪主要就是利用 SF_6 气体该特性以及反向散射/吸收理论。其工作原理为: 由激光发射器瞄准被测区域发出入射激光, 经过背景反射会形成反向散射激光进入激光摄影机成像系统。在没有 SF_6 气体的情况下, 所产生的反向散射激光与反向散射阳光产生的图像相同; 在有 SF_6 气体的情况下, 发出的入射激光遇到 SF_6 气体, 则其能量会被吸收一部分, 返回到激光摄影机成像系统的激光强度由于经过气体烟雾的吸收将会减弱, 从而导致无气体与有气体两种情况下的反向散射激光产生差异, 最终造成各自的激光成像不同。 SF_6 气体浓度越高, 其对激光的吸收就越大, 激光成像对比度也越大。在这种方式下, 一般的非可视气体将在视频中可见, 利用激光成像仪可观测到气体运移方向。

激光成像仪检测待测气体烟雾的后面必须要有固定的背景, 以便将激光反射到取景器进行成像。也就是说气体必须在激光检测仪和一个背景平面之间通过, 该平面将激光反射回检测仪以便显示图像。图 1-2-4 是 SF_6 气体成像检测原理图。

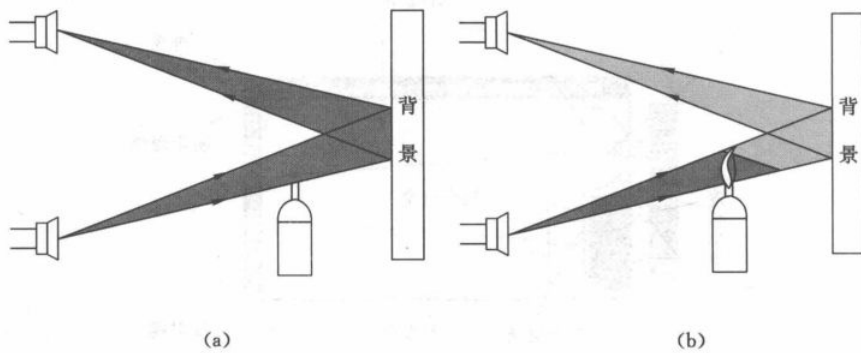


图 1-2-4 成像检测原理图

(a) 无 SF_6 气体; (b) 有 SF_6 气体

该技术使正常不可见的 SF_6 气体泄漏在标准视频显示中可视化, 检测人员在监视器上就可实时检测 SF_6 气体, 由此可以发现有无 SF_6 气体泄漏。

激光检测仪的主要部件包括激光发射系统、激光接收系统、放大成像及数据处理系统、视频显示记录系统、蓄电池、三脚架等, 具体如图 1-2-5 所示。其中激光器是由 IV 级连续波 CO_2 激光器组成, 其输出光是不可见的红外激光线。光束通过一对高频运转的镜片扫描,