



磁性氧量表

(修订版)

许冀森

水利电力出版社

前 言

磁性氧量表是一种测量氧含量的气体分析仪表。它不仅应用于能源、化工、冶金等工业生产过程，也常用于医疗、环境监测、燃气灶具检测及相应的科学研究部门。

近几年来，随着新技术的采用，气体分析仪表的发展十分迅速。自从出现了氧化锆氧量计，磁性氧量表在某些地区和领域的应用似乎日益减少，但由于磁性氧量表具有独特的优点，它非但在许多地区和部门继续应用，并且还得到新的发展。例如，磁性氧量表的另一主要类型——磁力式氧量表已形成系列产品，并获得愈来愈多的应用。因此编者决定对1974年版《磁性氧量表》进行修订，并在修订本中加进了介绍磁力式氧量表工作原理、系统组成和使用等内容。

本书对于气体分析仪表的组成、技术参数以及有关辅助装置、校验方法的叙述，均具有一定的通用性和普遍意义。

随着能源工业的高速发展，一次能源短缺的矛盾日益严重，节能措施愈来愈被人们重视；此外，关系人们生存的环境科学亦迅速发展，这些均促进了气体分析仪表的发展。希望本书能在这方面起一些有益的作用。

由于水平限制及可能的疏忽，书中定有不足和错误之处，恳请读者指正。

编 者

一九八六年十月

目 录

前 言

第一章 概论	1
第一节 常用气体分析仪表的发展和比较.....	2
第二节 气体分析仪表的组成及技术性能.....	5
一、气体分析仪表的组成部分(5) 二、气体分析仪表的主要技术性能(7)	
第三节 气体分析仪表在生产过程中的应用.....	8
一、在燃烧监控中的应用(8) 二、在化工生产及其它方面的应用(13)	
第二章 磁性氧量表的理论基础	14
第一节 气体的磁化特性.....	14
一、气体的磁化率(14) 二、顺磁性气体磁化率与温度的关系(16)	
第二节 磁性氧量表的分类原理.....	17
第三章 热磁式氧量表	19
第一节 热磁对流效应及传感器原理.....	19
第二节 热磁式氧量表的组成.....	22
第三节 热磁式传感器.....	23
一、内对流式传感器——CD系列(24) 二、外对流式传感器——QZS5101系列(27)	
第四节 测量电路及二次仪表.....	30
一、测量电路中的桥路分析(30) 二、CD系列磁氧表的电路系统及二次仪表(32) 三、QZS系列磁氧表的测量系统及二次仪表(35) 四、Yb-01型比值变送器(39)	

第五节 取样系统及安装运行	50
一、取样点、旁路管道及取样装置 (50)	
二、气样的抽取及预处理 (52)	
三、安装要点 (55)	
四、磁氧表的运行 (57)	
第六节 热磁式氧量表的误差分析	59
一、静态误差及其减小途径 (59)	
二、动态特性和动态误差 (61)	
第七节 故障处理及维修	62
一、故障处理的一般原则 (62)	
二、常见故障分析及处理 (63)	
三、桥臂元件的更换 (63)	
第八节 国外热磁式氧量表	68
第四章 磁力式氧量表	74
第一节 磁力式氧量表的工作原理	74
第二节 磁力式氧量表的系统组成	76
一、磁力式氧量传感器 (76)	
二、磁力式氧量表的电路系统 (79)	
第三节 磁力式氧量表的安装、运行及故障处理	83
一、气样的抽取及预处理 (83)	
二、仪表的安装、运行 (86)	
三、磁力式氧量表的故障处理 (87)	
第四节 磁力式氧量表的误差分析	89
一、大气压变化造成的误差 (89)	
二、湿度对仪表指示值的影响 (90)	
三、背景气体磁化率变化造成的误差 (90)	
第五章 磁性氧量表的校验	92
第一节 校验的意义	92
一、投运前的调校 (92)	
二、检修后的校验 (92)	
第二节 常用校验方法	93
一、试验室校验方法 (93)	
二、现场校验方法 (97)	

第一章 概 论

磁性氧量表是利用气体的磁化特性不同, 实现对混合气体中氧的百分含量进行检测的一种气体分析仪表。

表 1-1 气体分析仪表的分类

分类	仪表型式	工 作 原 理	被分析气体
化学类	化学自动式	利用化学吸收剂对被分析气体的吸收作用	O_2 、 CO_2 、 $CO + H_2$ 、 CH_4
物理类	重力式	利用混合气体中各组分的比重不同	CO_2
	热导式	利用气体的相对导热系数不同	CO_2 、 H_2 、 SO_2
	热磁式	利用不均匀磁场中, 顺磁性气体受热后形成的热磁对流效应	O_2
	磁力式	利用不均匀磁场中, 物体所受的 压力随周围气体磁化率的变化而改变	O_2
	红外线式	利用各种气体对红外线辐射能具有不同吸收光谱	CO_2 、 CO 、 CH_4 ...
	半导体气敏式	利用气敏元件表面电导率对不同气体的敏感性	CO 、 NO_x 、 SO_2 ...
电化学类	氧化锆式	利用氧化锆固体电解质的氧浓差电势与含氧量之间的关系	O_2
	极谱式	利用特殊电解液中, 专用电极间的 电解电流正比于渗入的气体浓度	O_2 、 CO
其他	气相色谱式	利用某种物质对于不同气体的吸附能力或溶解度的不同而将被分析混合气体在色谱柱中分离	CO_2 、 O_2 、 CO 、 N_2 、 C_2H_6

气体分析仪表在过程检测仪表领域中是发展较晚的一种仪表，这是由于气体分析仪表比较复杂，它的发展有赖于掌握新的科技成就。近年来，气体分析仪表发展十分迅速，无论是能源、电力、化工、冶金等工业生产过程中参数的检测，还是科研部门和实验室中的测量，都越来越多使用气体分析仪表，近来还逐渐应用于环境监测和废气排放管理部门。

人们总是采用各种可行的原理和方法设计、制造气体分析仪表，因此可按传感器的工作原理不同来对常用气体分析仪表作如表1-1分类。

由表1-1不难看出，分析仪表所采用原理的物理、化学规律，具有一定的复杂性，这就决定了分析仪表应用的适应性及其所能达到的精度。此外，还关系到投资的大小。

由于篇幅有限，本书不能对表1-1所列的各种型式仪表一一讨论，只介绍磁性氧量表（以下简称磁氧表）。

第一节 常用气体分析仪表的发展和比较

在自动气体分析仪表出现之前，气体的分析靠化学吸收式分析器——奥氏分析器来进行。这种分析器由吸收瓶、量筒、梳形管及吸气装置等组成，这些部件装在一个便于携带的木箱内。一般吸收瓶有三种：用来吸收 CO_2 的吸收瓶，内充氢氧化钾溶液；吸收 O_2 的吸收瓶，内充氢氧化钾和焦性没食子酸的混合溶液；吸收 CO 的吸收瓶，内充氯化亚铜溶液。充液量均为吸收瓶容积的60%。在分析时先吸入一定量的气体到量筒中，然后依次送入吸收瓶与吸收溶液充分接触，其中一种气体即被全部吸收，测量吸收前后气体的容

积，即可算得该气体的含量。这种仪器只能由人工操作，但由于它具有较高的精度，所以至今仍用于试验室等场合，并可作为自动气体分析仪表的校验器。随着工业生产的发展，在40年代后期，出现了由电动机驱动、机械切换操作、并能自动指示记录的化学自动式气体分析仪表。在这种仪表中，被分析气体每小时15~30次充满测量容器并进行分析，各次时间间隔为2~4 min，加上被分析气体经过取样管路的时间，总的测量迟延时间可达3~5 min，因此仪表的指示值不能作为对工艺流程进行操作和调整的依据。此外，这种仪表使用汞作为气路的切换密封物质及气泵的工质，存在汞污染危险，所以没多久即被淘汰。与此同时，人们应用物理原理来制造气体分析仪表，最初曾出现过重力机械式分析仪表，它是根据 CO_2 较其它组分具有密度特别大这一原理而制成的，重力机械式分析仪表虽然测量连续性好，迟延时间短，但受环境震动影响较大，加上指示值无法远方传送，限制了在工业生产过程中的应用。

自50年代起，热导式 CO_2 分析仪表得到较广泛的应用。它是根据 CO_2 的导热率比其它气体特别低这一特点制成的（另外， H_2 表则是利用其导热率特别高的特点制成），其工作原理如图1-1所示。传感器由两个工作室（内通被分析气体）和两个参比室（内通空气）组成。各室内均装有铂丝桥臂元件——敏感元件，它们用电流加热至100℃左右。四个桥臂元件接成电桥电路，当工作桥臂周围被分析气体中的 CO_2 含量发生变化时，桥臂对外传导散热条件随之变化，使得铂丝的温度发生相应的变化并表现出电阻值变化，从而导致电桥的输出随 CO_2 的含量变化而变化，因此，二次仪表可按 $\text{CO}_2\%$ 刻度。这种分析仪表最先采用桥式电路把被测参数

转换成电量输出，便于远方指示和记录，比前几种分析仪表有明显的进步。但根据热导式气体分析仪表的工作原理，传感器中的铂丝应工作在传导散热状态，而实际上还有对流和辐射散热，为了减少对流散热的影响，气体主要以扩散方式进入桥臂室，速度较慢，传感器反应时间可达 $1 \sim 2 \text{ min}$ 。同时为了减少辐射散热的影响，铂丝桥臂的工作温度不宜过高，仪表的灵敏度较低。此外，这种仪表的示值受背景组分的干扰较大，需要一套辅助预处理装置使气样达到所要求的状态，因而使仪表总的测量迟延达到 $2 \sim 3 \text{ min}$ ，所以仪表的指示值也不能作为快变化工业流程进行操作、控制的依据，促使人们研制更新的气体分析仪表。

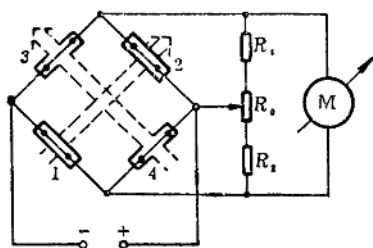


图 1-1 热导式 CO_2 分析仪表原理

1、2—电桥参比臂；3、4—电桥工作臂； R_1 —“零位”调节； M —二次仪表

自60年代起磁氧表获得了广泛的应用，首先它的测量迟延时间减少到 1 min 以内，比前几种气体分析仪表的迟延时间大为缩短，仪表的指示值可作为运行操作和调节的依据。

氧化锆氧量表以其反应迅速、传感器简单而得到广泛应用，但它的传感器需工作在 800°C 左右的高温，温度变化对

输出值的影响很大，需要采取恒温或温度补偿措施，以消除温度的影响，此外，氧化锆管探头的使用寿命不长。经过十余年的对比应用，氧化锆氧量表也未能大范围取代磁氧表。近几年来，在线的CO₂分析仪表有新的发展，尤其在燃烧过程中的应用受到重视。

为了便于比较，把常用气体分析仪表的主要性能列于表1-2；由表中可以看出磁氧表具有量程宽、反应快、刻度线性好、工作稳定、干扰组分影响不大和适用范围广等优点，至今仍不失为一种有用的气体分析仪表。

表 1-2 磁氧表与其他气体分析仪表的技术性能

仪 表 型 式	适用量程	反应 时间 (s)	刻度 特性	基 本 误 差 (%)	背景气体 干 扰	结构特点
热 磁 式	%限度	较快， ＜10	尚线性	±(2~3)	影响较大，但 便于消除	较复杂，有安装水 平度要求
磁 力 式	ppm至% 限度	较快， ＜10	良好的 线性	± 2	无影响	较复杂，水平安装
热 导 式	%限度	慢， 30~60	非线性	±(2~3)	影响大，需除 去干扰组分	简 单
氧化锆式	ppm至% 限度	快， 1~3	对数特 性	±(2~3)	影响不大	可做成直插式，但 传感器工作在高温
红外线式	ppm至% 限度	较慢， 10~30	近似线 性	±(1~2)	影响小	复 杂
极 谱 式	ppm限度	较慢， 20~40	低含量 时线性	±(3~4)	影响较小	简单，寿命较短

第二节 气体分析仪表的组成及技术性能

一、气体分析仪表的组成部分

气体分析仪表种类很多，尽管它们的工作原理各不相同

同，结构和组成繁简差异甚大，但象其它检测仪表一样，可按各部分所起的功能不同，分为以下部分。

1. 传感器

传感器是指感受被测组分含量变化，并将它变换成相应的电信号输出的装置。传感器相当于分析仪表的“耳目”，是决定仪表性能的关键一环。传感器由敏感元件和一定的测量电路组成，对传感器的要求是：输出信号与被测组分含量成单值函数关系，最好是线性关系，同时要求灵敏度高、稳定性好，并且有足够的使用寿命。

2. 信号放大及变送部分

传感器输出的信号是低电平弱信号，需经过放大才可供显示部分指示、记录。用于生产过程的分析仪表均把信号转换成统一的标准化电流或电压信号，以便与显示部分配套或与调节系统联接，此时的放大部分叫变送器。

3. 显示部分

显示部分用来显示放大的信号，获取读数值，与分析仪表配套的显示仪表有毫安电流表、电子电位差计、数字式仪表，也有用小型数据处理装置。

4. 取样系统

取样系统由机械过滤器、取样管路、抽气装置、气样预处理装置等组成，用来使被测气样减压、冷却、净化、干燥、稳流，并消除某些有影响的干扰组分，使气样在进入传感器前达到规定的状态（如温度、压力、湿度、清净度等）。取样系统应根据工艺流程及气体分析仪表的类型配套选用。

5. 辅助装置

一些对环境温度敏感的分析仪表（如热导式、红外线

式、色谱仪等)，其传感器部分需用恒温控制器保持温度在规定值。另外，多数分析仪表的稳定性和精度受电源电压波动影响，除了仪表内部电子电路采取稳压之外，需采用交流稳压电源对仪表供电。有时为了消除电源引入的干扰，还需加隔离变压器。这些统称为辅助装置或辅助电源。

从仪表总体来看，各组成部分间的联接有两种方式：早期的分析仪表大多用直接联接方式，即开环联接方式；新型的分析仪表通过光、电等途径对系统加反馈，使仪表以平衡方式工作，即闭环方式工作，使仪表的精度大为提高。

二、气体分析仪器的主要技术性能

1. 误差和精度等级

误差是指仪表示值与被测参数真实值之间的差值。分析仪器的误差有基本误差和附加误差两部分，基本误差是指分析仪表在规定的工作条件下使用时产生的误差；附加误差是指由于使用条件不符合规定的工作条件而产生的额外误差。分析仪表产生附加误差的可能性比一般检测仪表要大得多，应充分重视。

精度与误差是同一性能指标的两种表示方法，把基本误差去掉“±”号和“%”号，其数值就是精度等级，通常把分析仪器的精度由高到低分为：1.0，1.5，2.0，2.5，3.0，4.0，5.0，6.0等级，精度高于1.0级的分析仪表几乎没有；低于6.0级的分析仪表尽管有，但用于检测的价值不高，一般不采用。

2. 灵敏度和灵敏度限

灵敏度是指仪表的输出信号变化量与相应的组分含量变化量之比，对分析仪表来说传感器部分的灵敏度是起决定性作用的。灵敏度限亦叫不灵敏区，是指引起仪表指示器开始

动作的含量最小变化量，用来衡量分析仪表的分辨能力。灵敏度限应小于基本误差的一半。

3. 稳定性

稳定性用来表征分析仪表各组成部分以及整机的稳定程度，可采用一定时间内（如 8h、24h）指示值的漂移值来表示。影响稳定性的因素有敏感元件的质量，电路元件的老化程度，以及取样系统及电源的稳定性等。

4. 滞后性

滞后性表示被测气体含量变化后仪表指示值反应的快慢。滞后性可用测量迟延时间这一概念来表征，它包括反应时间和滞后时间两部分。反应时间是指从仪表指示动作开始直到指示值为含量变化量的90%时的时间。滞后时间则是从含量变化开始至仪表指示开始反映的一段时间，它很大程度上取决于取样系统的容积，有可能用改进取样系统来加以减少。对在线的分析仪表来说，测量迟延时间愈短，指示值对生产过程监控愈有价值。

第三节 气体分析仪表在生产过程中的应用

气体分析仪表在生产过程中的应用主要有以下几方面：

一、在燃烧监控中的应用

凡使用燃料燃烧获得热能的生产过程都存在燃烧产物——烟道气的成分分析问题，如火力发电厂及化工厂的锅炉，冶金厂的高炉、平炉，硅酸盐工业中的窑炉等。这些生产装置每时每刻都在大量地消耗着各种燃料，因此燃烧的经济性具有重要意义。要使燃烧完全并做到对环境最少污染，就需要供给的空气量多于理论空气量，实际空气量超过理论

空气量的程度可用过剩空气系数 α 表示:

$$\alpha = \frac{\text{实际空气量}}{\text{理论空气量}} \quad (1-1)$$

α 是反映燃烧经济性和运行水平的一项基本指标。 α 的最佳值与燃料的品质, 燃烧方式及燃烧设备的运行工况等密切相关。当燃烧的条件一定时, 保持最佳 α 值就等于保持最佳燃烧状态, 现在的问题是用什么方法来反映 α 的大小。研究表明, 烟道气中的 CO_2 、 O_2 及 CO 的含量均可反映 α 的大小。

1. 测量 CO_2 含量来判断 α 大小

烟气中的 CO_2 含量 $\text{CO}_2\%$ 是指其中 CO_2 的体积与总干烟气体积的比值:

$$\text{CO}_2\% = \frac{\text{CO}_2 \text{ 的体积}}{\text{总干烟气体积}} \times 100\% \quad (1-2)$$

在稳定的燃烧情况下, 如果燃料品质不变, 则 $\text{CO}_2\%$ 也应不变。当 α 增大时, 因总干烟气体积的增加较 CO_2 体积增加得多, 所以 $\text{CO}_2\%$ 减少; 反之, 当 α 减少时 (但 $\alpha > 1$), 则 $\text{CO}_2\%$ 增大。总的说 $\text{CO}_2\%$ 可以反映燃烧状态是否最佳。例如烟煤在煤粉锅炉中燃烧后, 烟气中 CO_2 含量的大小与排烟热损失的关系如表1-3所示。

表 1-3 $\text{CO}_2\%$ 与排烟热损失的关系
(排烟温度为 170°C)

$\text{CO}_2\%$	16	14	12	10	8	6
排烟热损失(%)	9	9.3	10	12	16	22

表中的数据可以说明: $\text{CO}_2\%$ 大些对减少排烟热损失有利, 但可能出现燃烧不完全, 反而使总的热效率降低, 所以 $\text{CO}_2\%$ 应控制在适当范围之内。对燃煤的室燃式锅炉来说,

$\text{CO}_2\%$ 应控制在 $14\% \sim 15\%$ ，相当于 $\alpha = 1.30 \sim 1.20$ 。

从自动气体分析仪表的发展来看，热导式 CO_2 表最先研制出来并得到应用，因此，根据 $\text{CO}_2\%$ 来判断 α 大小的方案也最先得到实现，但从图 1-2 不难发现： $\text{CO}_2\%$ 与 α 之间并非单值函数关系，同一 $\text{CO}_2\%$ 下可能有两个 α 值，各代表空气量过剩和不足，因此往往发生错误的判断。此外，还有一个重要的问题：就是热导式 CO_2 表的测量迟延可达 $2 \sim 3\text{min}$ （早期产品还要大），用它的指示值作为控制操作的依据效果不好，因此，没有多久就提出把烟道气中 O_2 的含量作为调整燃烧的依据。

2. 测量 O_2 的含量来判断 α 大小

烟道气中 O_2 的含量 $\text{O}_2\%$ 是指其中 O_2 的体积与总干烟气体积的比值：

$$\text{O}_2\% = \frac{\text{O}_2 \text{ 的体积}}{\text{总干烟气体积}} \times 100\% \quad (1-3)$$

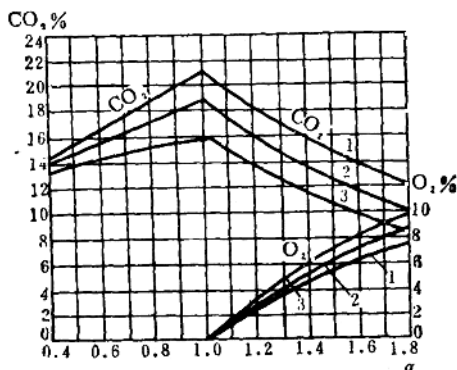


图 1-2 燃料燃烧后烟道气中 $\text{CO}_2\%$ 、 $\text{O}_2\%$ 与 α 的关系曲线

1—发生炉煤气；2—烟煤；3—油

图1-2下部曲线表示 $O_2\%$ 与 α 之间的单值函数关系。表1-4列出了烟煤燃烧后排出的烟道气中 $O_2\%$ 与 α 及排烟热损失之间的关系：

表 1-4 烟气中 $O_2\%$ 与 α 、排烟热损失的关系

$O_2\%$	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
α	1.05	1.10	1.16	1.23	1.31	1.40	1.50	1.61	1.75	1.91
排烟热损失(%)	6.3	6.5	6.8	7.2	7.6	8.0	8.5	9.1	9.8	10.6

对燃煤锅炉来说，烟道气中的 $O_2\%$ 应保持在3%~5%，相当于 $\alpha = 1.20 \sim 1.30$ ，对燃油锅炉来说 $O_2\%$ 可保持在2%~3%，相当于 $\alpha = 1.10 \sim 1.20$ 。

近20年来，锅炉操作者一直努力用测量烟道气中 O_2 的含量来控制 α ，已经取得明显的节能效果，取得这一成功的

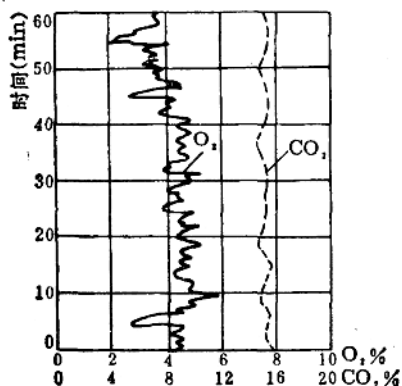


图 1-3 同时用 O_2 及 CO_2 表分析烟道气的记录曲线

一个重要条件是氧分析仪表的发展和完善。图 1-3 所示为某热发电厂锅炉同时用热磁式 O_2 分析仪表和热导式 CO_2 分析仪表对烟道气进行检测的记录曲线（为对比方便画在一起），显然，测量 O_2 % 的仪表反应灵敏、准确，能及时反映燃烧工况。目前，有许多成功的 O_2 监测系统 和燃烧控制系统可使锅炉的燃烧效率达到相当高的水平。这些系统有取样的和非取样的（直插式），有常规的，也有带智能装置的。但是，多年的实践经验提出这样一个事实：完善的燃烧过程所产生的烟道气中的 O_2 含量并非一定值，而是随燃料的品质、空气的湿度及燃烧工况变化而变化的，这使得单凭 O_2 含量调整燃烧来进一步提高效率的努力得不到理想的效果。

3. 测量 CO 含量对燃烧作细调

实测表明：当 α 小于容许最小值时，燃烧不完全的最明显现象是烟道气中 CO 含量急剧增加，如图 1-4 所示。当 α 足够大时， CO % 小于 100ppm，曲线在 100ppm 附近出现拐弯，

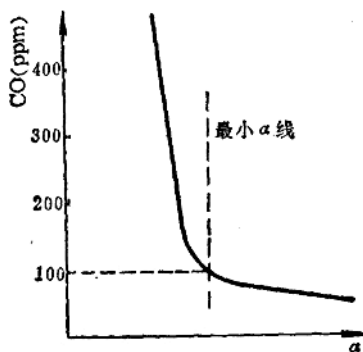


图 1-4 烟道气中 CO 含量与 α 的关系曲线

然后急剧上升，因此，由 $\text{CO}\%$ 来控制 α 有明显的优点。但现场在线测量 CO 存在一些复杂的具体问题，所以以前人们企图通过测量烟道气中的 CO 含量来控制燃烧没有获得成功。随着科学技术的进步，近年来在发展 CO 含量分析仪表方面已取得初步成果，例如一种穿过烟囱的红外线检测装置和微处理机系统可连续监控 CO 含量，从而实现对燃烧工况的细调，使锅炉热效率提高 $1\% \sim 3\%$ 。这也说明气体分析仪表对提高能源利用率的重要作用。

二、在化工生产及其它方面的应用

氧分析仪表在化工生产过程中的应用十分广泛，如用于原料、中间产物及成品的物理化学性质的监控，用于燃烧监控；氧分析仪表还用于测定易燃易爆气氛中的含氧量，如监视合成氨生产过程中纯净的原料气被氧污染的程度，以便预防爆炸，确保安全；氧分析仪表还用于感光胶片生产中分析保护气氛的含氧量，防止爆炸。

氧分析仪表在其它方面的应用，如热处理炉中的保护气氛含氧量的监控，可以防止表面氧化，提高产品质量；又如在各种制氧、制氮设备上，氧分析仪表用于对氧纯度的监视；此外还用于密闭环境中的含氧量分析，象用于隧道、高压氧舱、水下沉箱、潜艇及高空飞行器等特殊场合的氧量分析。