图 1　仅在德国就有大约 1 000 万个压缩气瓶在流通

连续顺磁氧气测量解决方案

文 /Michael Kamphus 博士

在氧气生产及其后续使用期间，必须监控流路状况，才能确保气体最佳质量。本文讨论了使用连续顺磁氧气测量赋予流程工业的优势。

在许多行业中，氧气都是重要的过程气体。在食品工业中，二氧化碳或氮气最常用作食品包装中的保护气体。但是，在肉类和香肠包装中，氧气含量却高达 80%，以确保肉类保持代表新鲜的粉红色。在金属工业中，氧气与乙炔等燃气结合，用于焊接、切割或熔化金属。在钢铁厂中，氧气被用于提高燃烧温度；在医疗领域，氧气被用于辅助呼吸等其他用途。

由于氧气有如此广泛的用途，对氧气的需求也相应较高——2021 年，德国有 57 台工业空气分离器生产了约 60 亿 m^3 的氧气。如图 1 所示，空气分离器利用膜分离法或低温林德－汉普逊循环从周围空气中提取氧气。林德－汉普逊循环首先将空气液化，然后将其分离成氧气、氮气和其他惰性气体。为了保证生产的气体的质量，至关重要的是需要对液体精馏分离过程进行计量控制和监测。如果精馏分离过程用时过短，氧气中的杂质（例如氮气或二氧化碳）含量可能会增大。水分、碳氢化合物、臭氧和硫或氯等腐蚀性成分也可能进入氧气中。

1　过程控制，确保优质

为了获得优质气体，必须连续在线监控生产过程。例如，甚至在开始精馏之前就可以测量纯度，并采用初步清洗优化将气体污染降至最低。纯度为 99.95%（3.5 级）意味着气体中含有 500 ppm 的杂质。对于 6.0 级高纯度氧气（>99.9999% 纯度，例如用作化学过程中的氧化剂或仪器分析中的工作气体），杂质含量要求不高于 10 ppm，因此其纯度难以分析。为此，通常使用高度灵敏的非分散红外吸收法，来检测一氧化碳和二氧化碳等污染物。

数十年来，在固定污染源和无组织排放的应用中，国际社会广泛认可 HORIBA 对空气质量和废气排放的测量方法。HORIBA 提供紧凑型测量设

本文作者系 HORIBA 集团过程与环境部产品经理。

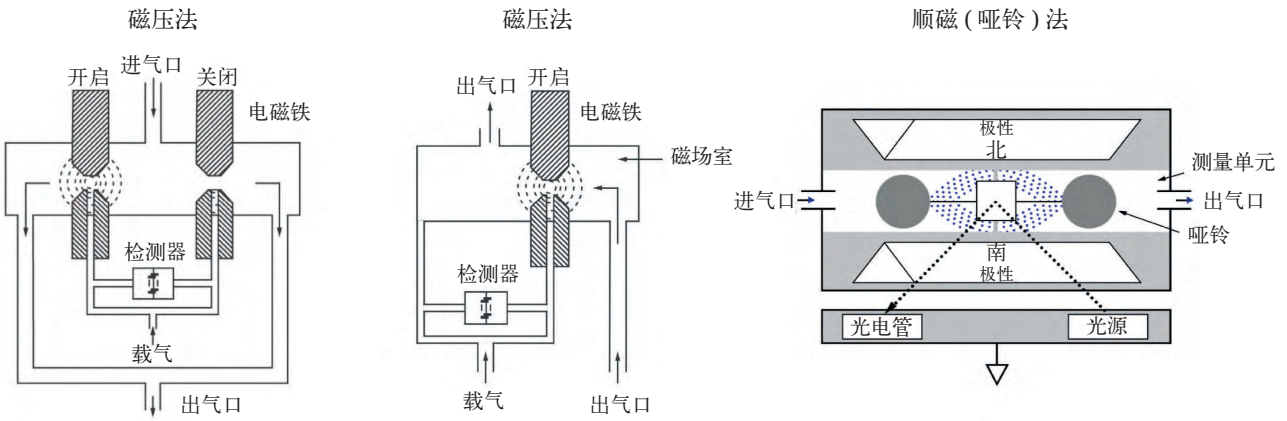

图 2　顺磁测量法与磁压法的比较

备产品，使用两种不同的顺磁测量方法（使用或不使用参比气体）进行标准和高精度测量，用于氧气的生产过程管理和品质监控。由于 HORIBA 设备能快速响应，因此过程稍有异常，就会立即反映。终端用户例如食品生产商、工业公司和医用气体供应商，可以测试其购入的气体纯度。

2　顺磁测量的工作原理

氧气分析设备使用的测量原理基于氧气的特殊性质：氧气具有顺磁性，即它会受到磁体的磁极吸引或排斥。利用这种效应，可以定量测量氧气，并且可以轻易区分氧气与其他气体。

在使用“哑铃”法的顺磁测量中，将两个充氮玻璃球放置在磁场中并相互连接，类似于哑铃，如图 2 所示。当氧气流过周围的测量单元时，它会受到磁场吸引，玻璃球会从磁场中偏转。哑铃旋转轴上的反射镜将光束反射到光电管上，光电管激活反馈电流，使哑铃返回到其起始位置。所需的电流与氧气浓度成正比：氧气浓度越高，使哑铃返回起始位置所需的力和电流越大。HORIBA VA-5006R 中使用的顺磁哑铃法不需要参比气体，适合标准测量，足以满足氧气生产或技术应用的需求。

3　医用氧气的高精度测量

HORIBA 中使用的磁压法适用于高精度纯度测量。在测量中，氧气流入 VA-5003R 上的测量单元，可在测量单元中激活磁场。磁场激活时会将氧气流推向充满参比气体的检测器。氧气含量越高，检测器内膜的偏转越大。VA-5003RH 不是产生一个磁场，而是产生两个交替激活的磁场，从而获得更高的精度。借助双磁场，测量设备的重复性达到 0.005%。这使得测量设备能够监测 99.995% 的氧气纯度；相当于 4.5 级，甚至超过了《欧洲药典》的规格（规格要求医疗应用的氧气纯度至少为 99.5%）。

《欧洲药典》收集了关于药品及其生产中使用的物质的质量、测试、储存、分配和标签的公认药品法规，由德国联邦药品与医疗器械管理局、德国保罗 · 埃尔利希研究所以及德国联邦消费者保护和食品安全办公室共同出版。《欧洲药典》还规定了测量方法：用于测试氧气纯度的设备必须基于顺磁测量原理，正是 HORIBA 设备采用的方法。

4　哑铃法还是磁压法?

磁压法可用来测量氧气浓度的细微变化，即使在绝对浓度非常高的情况下也可以实现。磁压法采用高纯氧气作为参比气体；流量为 12 mL/min，消耗量非常低。磁压法除了测量精度更高之外，比顺磁“哑铃”法更大的优势在于被测气体不会与检测器接触。而在哑铃法中，被测气体直接流过反射镜和玻璃球。随着时间的推移，残留物可能会轻微影响测量的准确性。

氧气杂质的测量意味着必须在高浓度水平上测量非常小的浓度变化。因此，温度和压力的变化对测量精度的影响起着非常重要的作用。只有对这些影响进行精确的补偿，才能实现高精度测量。

最终，氧气测量方法的选择取决于多种因素。然而，无论您选择哑铃法还是磁压法，HORIBA 的 VA-5000 模块化设计的产品组合均可以满足您的分析测试需求。

为了快速反映过程变化，HORIBA 测量设备提供连续分析，可以每天 24 h 监控生产过程，并在 30 s 内检测测量值的变化。借助以太网 /Modbus，48.26 cm（19 英寸）机架中的紧凑型设备可以集成到现有的分析系统中。此外，设备还提供八通道模拟输出。软件确保定期自动校准。

第一款顺磁氧传感器于 20 世纪 30 年代在德国上市。尽管技术不断优化，但测量原理不变。除了细微的技术优化之外，数字维护概念中的设备功能和集成会在不久的将来发挥更重要的作用。