

培养箱内的二氧化碳测量 - 常见问题解答



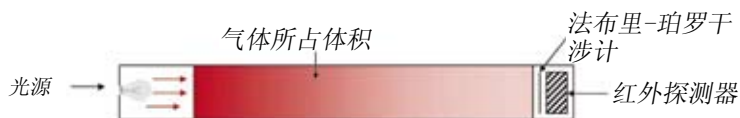
常见问题

1. CARBOCAP®, NDIR (非分散红外线) 单光束、双波长传感器的工作原理?
2. 温度和压力对二氧化碳测量有何影响?
3. 使用维萨拉的二氧化碳测量仪时, 如何修正因温度和压力产生的误差?
4. 从培养箱采样时, 如何避免冷凝?
5. 在使用干燥管进行泵吸式采样时, 为什么二氧化碳浓度读数会比预期值高?

本文旨在回答关于二氧化碳测量及相关产品的最常见问题。

1. CARBOCAP®, NDIR (非分散红外线) 单光束、双波长传感器的工作原理?

维萨拉CARBOCAP® 传感器由三大部件构成: 光源、干涉计和红外探测器。光源用于向红外探测器照射, 使光到探测器的传输距离保持固定, 从而对光强度进行测量。



在可被二氧化碳吸收的波长, 光线被气体中的二氧化碳吸收。法布里-珀罗干涉计排除掉所有其它波长, 从而使到达红外探测器的光强度只随传感器内二氧化碳的量而变化。

红外探测器正前方装有一个法布里-珀罗干涉计 (FPI)。此干涉计为一个可调谐滤光器, 只允许特定波长的光透过其照射到探测器上。二氧化碳只吸收特定波长的光线, 而不吸收其他波长的光线, 因而此干涉计设计用于允许二氧化碳吸收的波长 (4.26 μm) 及邻近非吸收波长的光线通过。详见左图。

传感器工作期间，法布里-珀罗干涉计有规律地在两个波长之间往复调谐。在可被二氧化碳吸收的波长，探测到的光强度随光通道中二氧化碳的浓度按比例减少。非可吸收波长上测得到光强度则作为对比的基线。



法布里-珀罗干涉计调谐至邻近的非可吸收参考波长，此时红外探测器测量整体光强度，获得对比基准值。光源、法布里-珀罗干涉计或红外探测器的性能如发生任何改变，均会对两种测量值产生同等影响，保持两种测量值的差值，从而校准传感器。这对于传感器的长期稳定性至关重要。

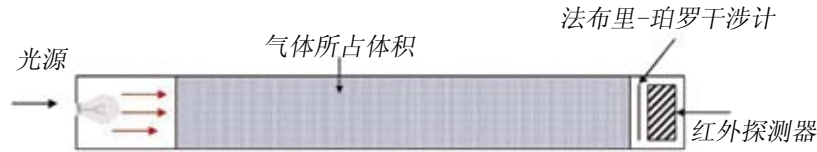
光强度会随二氧化碳浓度变化而变化。使用纯氮（0ppm二氧化碳）对仪表进行校准并参照已知二氧化碳浓度值，即可判定红外线强度与二氧化碳浓度之间的确切关系。

CARBOCAP® 传感器设计简易耐用，只使用1个光源和1个红外探测器。此设计避免了双光束型传感器多部件构造导致的细微误差。CARBOCAP® 传感器采用的法布里-珀罗干涉计由硅材料通过微加工工艺制成，不存在移动部件，因而比机械式“调制盘”设计可靠性更高。

2. 温度和压力对二氧化碳测量有何影响？

所有的非分散红外线仪器基本上是测量摩尔浓度（光束通路上的分子数）。多数使用者倾向于体积百分比输出，因此这种二氧化碳测量仪器通过使分子数与特定的已知二氧化碳体积浓度相关联，调整为显示体积百分比。

因为气体是可压缩的，气体的摩尔浓度会随周围环境的气压和温度而变化，这意味着输出值会受温度和压力影响。详见下图。



蓝色点代表海平面空气中的二氧化碳分子。



随着海拔的上升，气压会下降，相同空间的二氧化碳分子数会减少，尽管二氧化碳相对于其它气体的百分比保持不变。由于NDIR传感器在光程中“计算分子数”，如要准确显示二氧化碳百分比，则必须根据压差对测量值进行调整，否则仪器会显示错误的偏低读数。

如测量条件与校准条件（1013hPa；25 °C）存在明显出入，则需对二氧化碳测量值进行补偿。表1和表2所示为根据理想气体定律得出的，未补偿的压力和温度对测量的影响程度。

要详细了解补偿的必要性，有必要首先了解气体活动的规律。任何混合气体，其总压力为各组成气体的压力之和。此即为道尔顿定律，其公式如下：

$$P_{\text{total}} = P_1 + P_2 + P_3 \dots$$

混合气体中任何气体的量均可用压力来表示。例如空气，其主要成分是氮气、氧气、二氧化碳和水蒸气，因此其总气压为这些气体的分压力之和。各气体的分压力则是由其体积浓度和系统的总压力所致。

我们所呼吸的空气是由78%的氮气、21%的氧气、0.9%的氩气和约0.04%的二氧化碳组成。在各个海拔高度的大气中，此百分比大致保持恒定。

海平面的平均大气压约为1013hPa，因此，二氧化碳的压力即为1013hPa的0.04% (0.0004*1013)，即为0.405hPa。例如，美国科罗拉多州丹佛市的海拔约为5280英尺，大气压约为834.3hPa，鉴于其二氧化碳百分比同样为0.04%，我们可以计算出其空气中二氧化碳的压力为0.334hPa，而非0.405hPa。

尽管在比较高海拔二氧化碳在大气中所占比例依然为0.04%，但随海拔上升气压有所下降，而气压下降时摩尔浓度也会降低。由于非分散红外线传感器主要测量摩尔浓度，故需要体积百分比或ppmv读数时，需要进行补偿。温度补偿也很重要，因为随着气温下降摩尔浓度会增加。

表1: 未补偿的压力变化对NDIR传感器二氧化碳百分比读数的影响 (根据理想气体定律)

仪器校准条件为 25 °C 和1013 hPa					
海拔高度		压力 (hPa)	测得二氧化碳浓度 (%CO ₂)	修正的二氧化碳浓度 (%CO ₂)	偏差 (%CO ₂)
英尺	米				
0	0	1013	5.00	5.00	0.00
500	153	992.8	4.90	5.00	0.10
1000	305	979.1	4.83	5.00	0.17
1500	458	958.4	4.73	5.00	0.27
2000	610	937.7	4.63	5.00	0.37
2500	763	923.9	4.56	5.00	0.44
3000	915	903.2	4.46	5.00	0.54
3500	1068	889.4	4.39	5.00	0.61
4000	1220	868.7	4.29	5.00	0.71
4500	1373	854.9	4.22	5.00	0.78
5000	1526	834.3	4.12	5.00	0.88
5500	1679	820.5	4.05	5.00	0.95
6000	1831	806.7	3.98	5.00	1.02

表2: 未补偿的温度变化对NDIR传感器二氧化碳百分比读数的影响 (根据理想气体定律)

仪器校准条件为 25 °C 和1013 hPa			
温度 (°C)	测得二氧化碳浓度 (%CO ₂)	修正的二氧化碳浓度 (%CO ₂)	偏差 (%CO ₂)
25	5.00	5.00	0.00
26	4.98	5.00	0.02
27	4.97	5.00	0.03
28	4.95	5.00	0.05
29	4.93	5.00	0.07
30	4.92	5.00	0.08
31	4.90	5.00	0.10
32	4.89	5.00	0.11
33	4.87	5.00	0.13
34	4.85	5.00	0.15
35	4.84	5.00	0.16
36	4.82	5.00	0.18
37	4.81	5.00	0.19

3. 使用维萨拉二氧化碳测量仪器时，如何修正因温度和压力产生的误差？

在与校准条件有出入的温度和压力条件下的二氧化碳测量值需要经过修正方可达到要求的精度。这种简单的体积百分比读数修正可依照理想气体定律采用如下公式完成：

$$c_{\text{corrected}}(\%/ppm) = \frac{c_{\text{measured}}(\%/ppm) * (1013 * (t(^{\circ}\text{C}) + 273))}{(298\text{K} * p(\text{hPa}))}$$

使用维萨拉CARBOCAP® GM70型手持式二氧化碳测量仪时，可根据GM70的用户菜单轻松设定测量点的环境温度和压力。补偿过程内部完成，仪表显示经过修正的测量值。此内部修正过程还考虑了由实际气体规律，以及仪器的电子和光学部件造成的影响。GM70的内部修正精度比按理想气体定律修正的精度更高。

进行温度补偿的另一种方法是在进行二氧化碳测量的同时，在MI70上再接一个维萨拉HUMICAP® 温湿度探头。此探头测得的温度可设定为自动补偿二氧化碳读数。

维萨拉CARBOCAP® 二氧化碳变送器GMT220系列和维萨拉CARBOCAP® 二氧化碳模块GMM220系列也可实现内部补偿功能。可通过连接电脑修改设置。GMT220系列和GMM220系列可通过配备COM适配器（部件号19040GM）的串口电缆与电脑相连。

维萨拉CARBOCAP® 二氧化碳模块GMM111系列最多可测量20%的二氧化碳。但其不具备内部补偿功能。



同时连接二氧化碳探头和温湿度探头的维萨拉GM70手持表。

4. 从培养箱采样时，如何避免冷凝？

GM70具备两种采样方式：扩散式和泵吸式。泵吸式用于对无法进行扩散式直接测量的空间进行采样。

从潮湿环境中进行气体采样时必须注意，因为探头内的NDIR传感器表面和泵的腔室内必须防止冷凝产生。

培养箱和环境试验箱的测量是具有挑战性的，因为所采样的气体通常从高温高湿的环境转入室温环境时，易发生冷凝。



维萨拉GM70用于验证培养箱内的二氧化碳水平。

通过采用由一种叫作Nafion®（高氟化离子交换树脂）的材料制成的采样管（作为附件提供，维萨拉部件号：212807GM），可避免管道和采样系统内发生冷凝。



Nafion® 管，维萨拉部件号：212807GM。

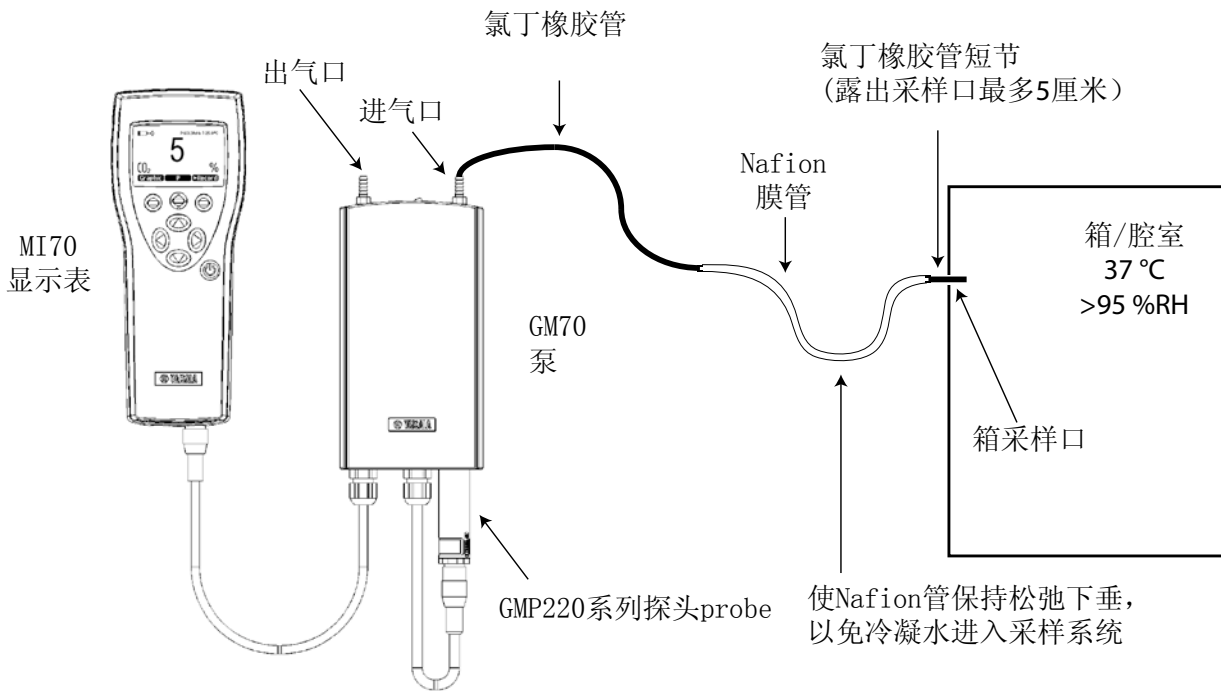
此管的核心技术是采用了去水作用极佳的Nafion®。水分通过一种称作“全蒸发”的过程沿膜壁蒸发到周围空气中。Nafion®材料通过“一级动力反应”吸收水分起到去水作用。在进行干燥时，湿交换器将水蒸气从湿气流中排入周边空气中。当样本的湿度水平与周围环境湿度相当时，干燥过程宣告完成。由于干燥过程是以“一级动力反应”的方式进行的，因而与周围环境湿度达到一致的速度会非常快，通常在100至200毫秒内。此功能使该采样管成为湿气样本进入室温环境时的理想选择。只需很短一段管即可有效降低样气的湿度。有关该管的更多详情请参见 www.permapure.com

Nafion®是杜邦公司研制的一种四氯乙烯（特氟纶）和全氟-3,6-二氧杂-4-甲基-7-烯磺酸的聚合物。

使用Nafion®膜管的采样系统

使用GM70泵从培养箱采样时，使用Nafion®管道可消除采样系统中可能出现的湿气冷凝。建议遵循如下指南：

- 应在培养箱与外界环境的临界位置安装Nafion®采样管。Nafion®采样管探入外界环境20厘米即足以将水蒸气从提取的样气中排入外界环境。采样管的其它部分可以是氯丁橡胶或某些其它材料。用软管卡具或其它方式将管连上，避免外界空气进入样气。样气管的总长应尽可能短。
- 如通过培养箱门进行采样，则将Nafion®管插入培养箱，并轻轻关上培养箱门，检查箱门密闭时是否损坏采样管，管周边密闭是否充分。
- 从箱/腔室内采样气时，可将采样管插入该箱内数厘米。如采样的箱内可能发生冷凝，则应特别小心，以免冷凝水进入采样管内。
- 可将二氧化碳探头从GM70泵中拔出，检查探头是否有冷凝。重新插入探头时，勿将探头全部插入，而应将两个O型圈与探头的平滑面契合，以实现紧密连接。



- 如通过孔洞或培养箱的其它端口进行采样, 则将 Nafion® 插入, 并周边密封。
- 如通过软管扣件/采样口进行采样, 则应采用极短的氯丁橡胶管将 Nafion® 管的扣件与培养箱的扣件相连。用氯丁橡胶作为“连接器”将 Nafion® 管尽可能紧密地与软管扣件连接。无需让样气通过氯丁橡胶管, 因为氯丁橡胶管内可能会导致冷凝。
- 作为预防措施, 应使 GM70 泵始终高于箱采样口。如采样管路中发生冷凝, 此措施将能防止液态水损坏二氧化碳传感器。

5、在使用干燥管进行泵吸式采样时, 为何二氧化碳浓度读数比预期值高?

使用 Nafion® 管进行样气干燥时, 干样气的二氧化碳浓度会略高于湿样气。这是因为稀释现象所致。培养箱中二氧化碳的浓度被水蒸气占据并“稀释”。如将这些水蒸气从样气中去除, 则其它气体, 包括二氧化碳, 所占据的空间将会相应增加。

表3所示为进行样气干燥时的气体浓度稀释系数。横轴为培养箱内样气的露点(气压为1013hPa时), 纵轴为测量点上样气的露点。测量点上样气的露点可用湿度探头(HMP75B, HMP76B 或 HMP77B)来测量。

表3: 稀释系数

Td (°C)	-40	-30	-20	-10	0	10	20	30	40	50	60
-60	0.9999	0.9996	0.999	0.997	0.994	0.988	0.977	0.958	0.927	0.878	0.803
-50	0.9999	0.9997	0.999	0.997	0.994	0.988	0.977	0.958	0.927	0.878	0.803
-40	1.0000	0.9998	0.999	0.998	0.994	0.988	0.977	0.958	0.927	0.878	0.803
-30		1.0000	0.999	0.998	0.994	0.988	0.977	0.958	0.928	0.879	0.804
-20			1.000	0.998	0.995	0.989	0.978	0.959	0.928	0.879	0.804
-10				1.000	0.997	0.990	0.979	0.961	0.930	0.881	0.806
0					1.000	0.994	0.983	0.964	0.933	0.884	0.809
10						1.000	0.989	0.970	0.939	0.890	0.815
20							1.000	0.981	0.950	0.901	0.826
30								1.000	0.969	0.920	0.845
40									1.000	0.951	0.876
50										1.000	0.925
60											1.000

举例说明: 某样气从露点温度为40 °C的环境被采样到露点温度为10 °C的环境中, 测得的气体浓度为5.32%。在露点温度为40 °C的环境中, 此样气对应的二氧化碳浓度为5% CO₂ (5.32% X 0.939= 5.00%), 原因是水分增加致使样气被稀释。