

SF₆定量检漏仪测量局限的突破

★ 引言

SF₆ 常态下是一种无色、无味、无臭、无毒的非可燃性气体，是已知化学稳定性最好的物质之一，具有很强的耐电强度，在较均匀的电场中约为空气耐电强度的2.5倍，同时具有良好的理化特性，是理想的绝缘和灭弧介质。SF₆ 因此广泛运用于变电站等电力系统中。然而SF₆ 气体作为诸多电气设备中一极其重要的绝缘气体和保护气，其发生的泄漏却是这些设备不得不面对的致命弱点。泄漏将导致灭弧和绝缘性能下降，甚至严重危险系统的安全运行；同时SF₆ 所具有的温室气体的属性也制约了它在多个领域的使用（一个标准的52kg 瓶装的SF₆ 气体排放出，相当于1243吨CO₂ 对大气的影 响，更准确的说24000倍于CO₂ 的温室效应，所以国内外相关法规均对SF₆ 的排放制定了严格的要求）。因此对于提高 SF₆ 电气设备运行可靠性的要求越来越高，同时也对SF₆ 检漏的辅助设备及检漏仪器提出了更高的要求。针对某地区SF₆ 设备运行情况的调查和分析，2003年10月——2004年10月间，绝缘故障占总故障率的79.64%，其中因SF₆ 泄漏造成的绝缘故障就达到了65.91%，因此在SF₆ 设备运行中加强和提高检漏精度是预防事故的重要措施之一。

按照GB50150-2006电气设备交接试验标准规定，密封性SF₆ 检漏试验应采用的灵敏度体积分数不低于1×10⁻⁶。目前市场上SF₆ 检漏仪器品种繁多，但真正符合GB50150-2006标准的SF₆ 检漏仪相对比较少。出于对电气产品及设备运行安全，以及环境的要求，选择一款高精度、高质量及高性能的SF₆ 检漏仪极其重要，在符合标准的情况下，不仅能及时地发现隐患，更多的避免了财产，生命及对环境的影响和破坏。

★ 影响检漏仪灵敏度的因素

通常SF₆ 检漏设备在泄漏测试时分定性与定量两种，定性法仅寻找泄漏点，无法确认SF₆ 泄漏的排放量，定量法则可以测定泄漏的程度，以及在不同单位情况下的SF₆ 泄漏量，相关的单位有：ppm (μL/L)、ml/s、g/y。其中ppm是目前大部分仪器惯为使用的单位。虽然国家标准GB50150-2006规定对SF₆ 检漏试验应采用的灵敏度体积分数 (L/L) 不低于1×10⁻⁶，即1ppm。但对标准片面理解，令用户在市场上选购SF₆ 检漏仪时造成了一些误区，认为选购仅提供浓度ppm测量单位的SF₆ 检漏仪就已经满足SF₆ 检漏试验的测量要求。而忽视了其它参数，即检漏仪流量率，对选型的重要性。也就是说除了已知因素，电路噪声、温度和湿度对检测结果的影响外，检漏仪的进气流量同样影响着检测结果的准确性。

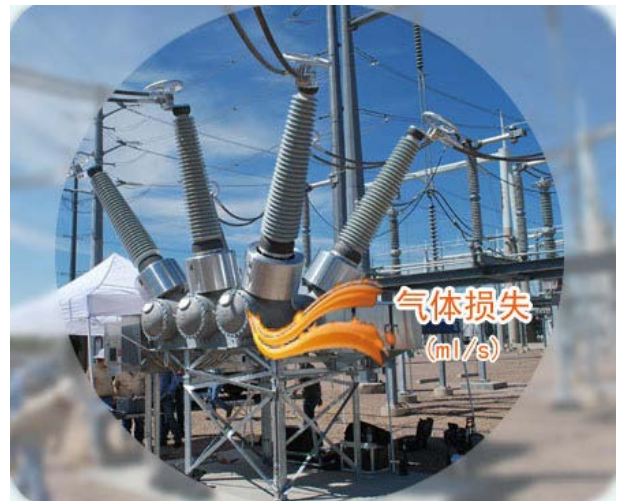


图2 气体实际泄漏率 ml/s

★ 不同进气流量率对ppm值的影响

这里所述的ppm指一定量的SF₆ 与空气的混合比。不同于在相对密闭环境中，泄漏气体与一定量空气混合后，空气的量始终是恒定的。如果仅显示浓度ppm读数的SF₆ 检漏仪在非包扎应用中，即在开阔环境中检漏时，由于仪器的流量率极大，SF₆ 相对占比极小，因此很难查找到泄漏点且显示泄漏量。只有当泄漏气体相对占比很大时被吸入检漏仪中，才能确定有泄漏点存在。

图3显示开阔环境下测量同一泄漏点，用两种不同流量2 ml/s和11 ml/s，并以相同1ppm灵敏度做比较。

SF6定量检漏仪测量局限的突破

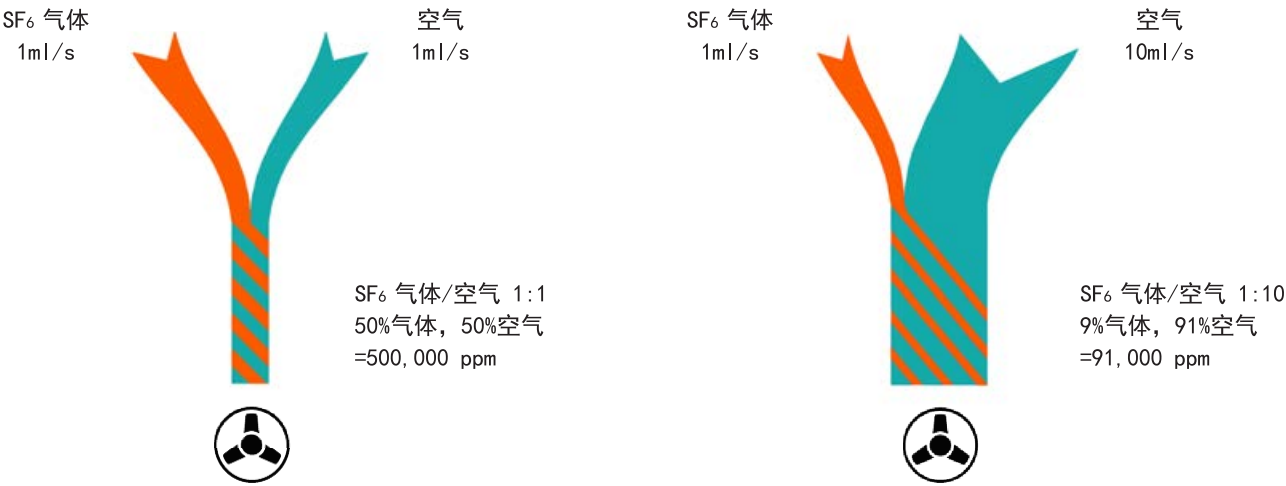


图3 相同SF6泄漏率不同进气流量率下的ppm浓度值

图3反映了以相同ppm灵敏度的SF6 检漏仪测量不同进气流量率，单位时间内同等量泄漏气体所得出的结果，以及所比较出的极大差异。其结果也就是说，同一泄漏情况下，小口径进气流量率的仪器所得ppm值将远远大于大口径的仪器，这和实际存在的泄漏情况相矛盾的。说明单纯的使用ppm来表达实际泄漏率是不合理的。

我们所用的ppm单位，其结果值只是表示了损失在空气中的SF6 与外部空气的混合体积浓度比。任何体积的SF6 只要与相应体积的空气混合，都能达到1ppm。标准所规定的1ppm虽说是仪器测量时的灵敏度要求，却非真正显示给用户的直观泄漏情况。我们把一个单位时间内的气体泄漏或损失称之为“泄漏率”，对应单位可表述为: g/y、ml/s、mbar/L/s。这才是真正表达了SF6 实际的泄漏损失量。如果一台SF6 定量检漏仪无法显示上述单位，那么通常因为它的泄漏检测精度十分不理想，因为ppm只是一个无量纲量，无法说明泄漏率实际情况。只要已知仪器的样气流量率和ppm 体积比，就可以按下列公式得出泄漏率：

$$\text{泄漏率 [ml/s]} = \text{体积比 [ppm]} \times \text{样气流量 [ml/s]} / 10^6$$

试验中使用两台不同型号SF6 定量检漏仪，A型为GasChek P1 (LDD2000) -SF6 定量检漏仪，样气流量率为2ml/min，另一台B型为普通的SF6 定量检漏仪，样气流量率为1000ml/min，这两种检漏仪的灵敏度相同体积比，且假设所得最小体积比都为1ppm，即标准所定的仪器有反应的最低标准，由实验及计算可得以下实际泄漏率：

A型检漏仪样气流量率 = 2 ml/min = 0.033 ml/s

$$\text{泄漏率} = (1 \text{ [ppm]} \times 0.033 \text{ [ml/s]}) / 10^6 = 3.33 \times 10^{-8} \text{ [ml/s]}$$

B型检漏仪样气流量率 = 1000 ml/min = 16.66 ml/s

$$\text{泄漏率} = (1 \text{ [ppm]} \times 16.66 \text{ [ml/s]}) / 10^6 = 1.8 \times 10^{-5} \text{ [ml/s]}$$

同样是1ppm体积比浓度，使用仪器进气流量低至2ml/min的，实际测得气体损失率仅为3.33x10⁻⁸ ml/s；使用当进气流量为1000ml/min的B型检漏仪，气体损失率为1.8 x 10⁻⁵ ml/s是前者的540倍，说明B型只有单位时间内泄漏量很大时才能检测到气体泄漏。因此以气体泄漏速率为标准显示的话，选用A型GasChek P1 (LDD2000) 低流量的定量检漏仪，其检测结果准确度远远大于高流量的普通SF6 定量检漏仪，单位时间内的灵敏度为3.33x10⁻⁸ ml/s和1.8 x 10⁻⁵ ml/s。

SF₆定量检漏仪测量局限的突破

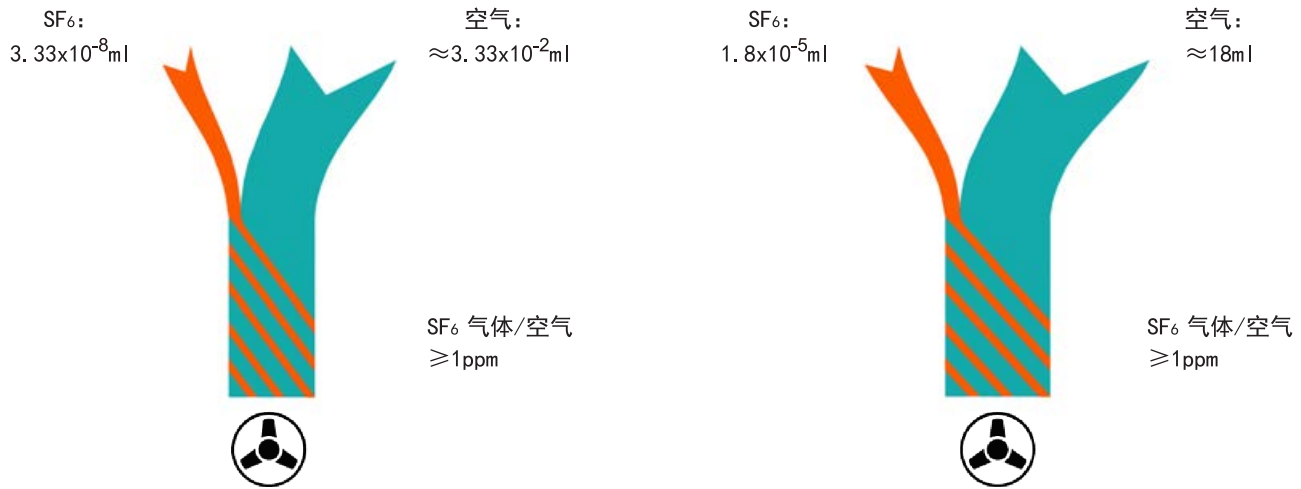


图4 1s内测得1ppm情况下实际泄漏率比较

通过图4比较可知，B型检漏仪对1s内泄漏量为 $1.8 \times 10^{-5} \text{ ml}$ 以下的SF₆不会有反应。而A型可测得1s内低至 $3.33 \times 10^{-8} \text{ ml}$ 泄漏量的SF₆。

★ 包扎法情况下流量率的影响

在包扎法检漏情况下，往往认为只需要ppm读数就足够了，因为没有空气为背景，所以流量率无关紧要，即使存在细小的泄漏也可以忽略。其实不然，SF₆气体昂贵，何况出于环境等因素的考虑，京都协议和欧盟EC842/2006标准也都严格限制SF₆气体随意排放，因此极小的泄漏不管出于何种考虑也应该排查出来。为了要提高灵敏度或减少检测时间，在个别案例中采用对GIS局部包扎检漏十分有效，但如果要捕捉小的泄漏就必须保证包扎袋中的气量较少，否则泄漏气体被稀释体现不出包扎法的优势。

实验中当 $4 \times 10^{-6} \text{ ml/s}$ 纯SF₆气体泄漏至一足够检测1ppm的包扎区域，当我们使用进气流量大的SF₆定量检漏仪测量时，测量的问题在于一旦把探头伸入袋内，里面的气体浓度即开始减少，因为仪器的流量率越大，袋口的气体浓度随即降低使得读数也降低（进气量小于出气量产生的流量差所致）。“大流量，低浓度”，实验说明1ppm灵敏度的大流量仪器在检测相对较低泄漏时，可能只短暂显示1ppm随后降至零甚至毫无反应。

★ 结束语

在不同测试方式下，ppm测量方式并不能提供直观的泄漏情况，在受限于检测方式与测量技术情况下，体积浓度比ppm值提供了间接的泄漏参考，其准确性取决于检漏仪流量率。因此具有泄漏率ml/s显示的检漏仪更能体现检测的准确性和可靠性，对于检漏仪选型也具有价值的。

如果出于安全、环保、节约等目的，自然需要更真实，更准确的检测结果，所以在测定各种SF₆电气设备可能存在的泄漏时，一款高精度，高灵敏，高质量真实显值的检漏仪是必不可少的。面对市场上诸多同类不同情况的产品，拥有泄漏率ml/s等表达的检漏仪将更有可靠性。譬如，采用“负离子捕捉”技术的SF₆定量检漏仪，GasChek P1 (LDD2000)/ LeakCheck (LDD2008)，它更是国际上第一款无需纯氩气、无辐射、绿色环保、超低样气流量率的高灵敏度定量检漏仪。该产品曾荣获ABB公司和Phoenix公司参与评定的英国工业大奖即环境保护和技术创新两项冠军。其优势在于它不仅能提供用户三项单位灵活选择，即ppm、ml/s、g/y，很重要的一点是其流量率仅为2ml/min，且实际气体损失测量精度更降至 $3.33 \times 10^{-8} \text{ ml/s}$ ，体积比灵敏度达到0.1ppm。是一款真正符合GB50150-2006电气设备交接试验标准中所规定的密封性SF₆检漏试验首选产品，使得SF₆泄漏检测不再被ppm所误导。