

ICS

附件 2



中华人民共和国国家标准

GB/T 17230—××××

代替GB/T 17230-1998

放射性物品安全运输 货包的泄漏检验

Safe transport of radioactive materials

Leakage testing on packages

(征求意见稿)

××××-××-××发布

××××-××-××实施

生态环境部
国家市场监督管理总局

发布

前 言

为贯彻《中华人民共和国环境保护法》《中华人民共和国放射性污染防治法》《中华人民共和国核安全法》和《放射性物品运输安全管理条例》，防治放射性污染，改善环境质量，规范放射性物品运输货包的泄漏检验工作，证明所使用的放射性物品运输货包满足《放射性物品安全运输规程》（GB 11806）所规定的货包容容要求，制定本标准。

本标准在GB/T 17230-1998版的基础上，等同采用ISO 12807: 2018《放射性物质安全运输—货包的泄漏检验》，在技术内容上与ISO 12807: 2018等同。本标准发布后将作为《放射性物品安全运输规程》（GB 11806）的配套标准使用。

本标准规定了进行放射性物品运输货包泄漏检验的常用方法-等效气体泄漏检验法的检验准则和检验方法，可应用于货包的设计验证、制造验证、装运前验证、定期验证和维修验证等。

本标准是对《放射性物质安全运输 货包的泄漏检验》（GB/T 17230-1998）标准的修订。

本标准由生态环境部辐射源安全监管司和法规与标准司组织制订。

本标准起草单位：中国辐射防护研究院。

本标准由生态环境部20XX年XX月XX日批准。

本标准自20XX年XX月XX日起实施，自实施之日起，GB/T 17230-1998废止。

本标准由生态环境部解释。

目录

前 言	1
1 适用范围.....	1
2 规范性引用文件	1
3 术语和定义.....	1
4 规定的包容要求	2
5 检验程序.....	2
6 容许活度释放率的确定	5
7 标准化泄漏率的确定	7
8 包容系统验证要求	9
9 泄漏检验程序要求	12
附录 A.....	14
附录 B.....	30
附录 C.....	35
附录 D.....	36
附录 E.....	69
附录 F.....	83

放射性物品安全运输

货包的泄漏检验

1 适用范围

本标准规定了一种用于放射性物品运输货包泄漏检验的气体泄漏检验法。

采用该方法可在设计、制造、装运前、定期检验和维修等阶段对运输货包进行验证，以证明货包符合规定的包容要求。

本标准并未规定具体的气体泄漏检验程序，仅给出了进行各种气体泄漏检验方法的最低要求。

本标准适用于有规定包容要求的B(U)型货包、B(M)型货包或C型货包，其他类型的货包或放射性物品贮存容器也可参照使用。

2 规范性引用文件

本标准内容引用了下列文件中的条款。凡是不注明日期的引用文件，其有效版本适用于本标准。

GB 11806-2019 放射性物品安全运输规程

GB/T 12604.7-2014 无损检测 术语 泄漏检测

3 术语和定义

本标准除采用GB 11806-2019和GB/T 12604.7-2014中的定义外，还使用如下定义。

3.1 活度释放率 **activity release rate**

单位时间内，通过包容系统的漏孔或渗透性壁面所漏出的放射性内容物的活度。

3.2 阻塞机制 **blockage mechanism**

由于可能存在的泄漏通道被液体或固体物质阻塞而使放射性物质保留在包容系统内的一种机制。

3.3 气体泄漏检验法 **gas leakage test methodology**

该方法建立了运输包容系统内放射性内容物的容许活度释放率与给定检验条件下气体泄漏率的等效关系，是验证货包符合规定的包容要求最常用的方法。

3.4 介质 medium

能携带放射性物质通过漏孔的任何流体，这种流体本身可以是放射性的，也可以是非放射性的。

3.5 渗透 permeation

气体依靠“吸附-扩散-解吸”机制穿过渗透性固体壁（即使没有漏孔）的过程。除非气体本身具有放射性，否则不应将渗透认为是放射性的释放。

3.6 渗透率 permeation rate

单位时间内，通过渗透壁的气体量，渗透率取决于分压梯度。

3.7 标准化泄漏率 standardized leakage rate(SLR)

在已知条件下，相对于温度为298K（25 °C、入口压力为 1.013×10^5 Pa、出口压力为0 Pa的参考条件，对干燥空气流进行归一，计算得到的泄漏率。其单位表示为 $\text{Pa} \cdot \text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1} \text{SLR}$ 。

3.8 标准化氦泄漏率 standardized helium leakage rate (SHeLR)

在已知条件下，相对于温度为298K（25 °C、入口压力为 1.013×10^5 Pa、出口压力为0 Pa的参考条件，对干燥氦气流进行归一，计算得到的氦泄漏率。其单位表示为 $\text{Pa} \cdot \text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1} \text{SHeLR}$ 。

4 规定的包容要求

根据GB 11806-2019的规定，对于运输放射性物品的B(U)型货包、B(M)型货包或C型货包，在经过了规定的试验后，包容系统应满足表2的要求：

表 1 货包的包容要求

运输条件	包容要求
正常运输条件	不大于 $A_2 \times 10^{-6} / \text{h}$
运输事故条件	对 ^{85}Kr 在一周内不大于 $10A_2$ ，对其他放射性核素一周内不大于 A_2

放射性内容物的 A_2 值必须根据GB 11806-2019的有关规定予以确定。

5 检验程序

5.1概述

可以通过测量放射性内容物释放率或其他方法来证明货包符合包容要求。本标

准规定了如何通过等效气体泄漏检验来证明包装满足包容要求，该方法是通过进行原型或模型检验，并参考原有的演示、计算或合理推论，将所有测得的检验泄漏率与内容物潜在的释放相联系。

本标准以下列各点为前提：

a) 可从货包中释放的放射性物质可以是下列形式物质中的一种或任意组合：

——液体

——气体

——固体

——固体悬浮液

——气体中的悬浮固体颗粒（气溶胶）

当考虑到放射性内容物的物理形态和特性时，可用最大容许漏孔直径来表示最大容许活度释放率。

b) 稳态假设条件应适当近似。

c) 气体泄漏检验程序可用于测量气体流量，可用数学关系使流量与单个笔直毛细管（可认为该毛细管在绝大多数情况下至少可以代表一个漏孔或多个漏孔）的直径相联系。

d) 当从第5.1 b) 条气体泄漏检验中得到的单个笔直毛细管直径等于或小于第5.1 a) 条中的最大容许漏孔直径时，符合包容要求可用气体泄漏检验程序来证明。

本标准认为活度释放或不释放（密封），可以以下列一种或几种方式发生：

——粘滞流

——分子流

——渗透

——阻塞

5.2程序

应以图1流程图为指导，使用下述程序。流程图中每一方框内的内容表示该步骤的结果。

图1第1步至第8步与放射性内容物的包容有关，而第10步至第12步与检验气体的泄漏有关。第9步是连接放射性内容物包容和检验气体泄漏的参考步骤。

因为可释放的放射性物质可能是气体、液体或固体形态，也可能是各种形态的组合。因此对于具体的放射性物质形态，有必要根据下列程序中相应步骤来确定容许标准化泄漏率。

图1是一个通用的流程图，在某些情况下并不一定要完成所有步骤（例如，以液相存在的一种放射性核素）。在另外一些情况下（诸如不同形态的放射性物质混合物），可能需要反复地重复某些步骤。但是，对于上述任何一种情况都必须对正常运输条件和运输事故条件完成图1相应的步骤。

5.2.1容许活度释放率的确定

应确定各种可释放的放射性内容物的量，同时将可释放的内容物与规定的包容要求相比较。参见图1第1步到第3步和第6章。

5.2.2标准化泄漏率（SLR）的确定

将容许活度释放率换算成等效的标准化泄漏率。参见图1第4步至第9步和第7章。

5.2.3确定每个验证阶段的容许检验泄漏率

确定设计、制造、装运前、定期和维护验证阶段相应的气体泄漏率。参见图1第10步和8.2。

5.2.4选择合适的检验方法

为进行设计、制造、装运前、定期和维护验证选择合适的气体泄漏检验法。参见图1第11步和8.2。

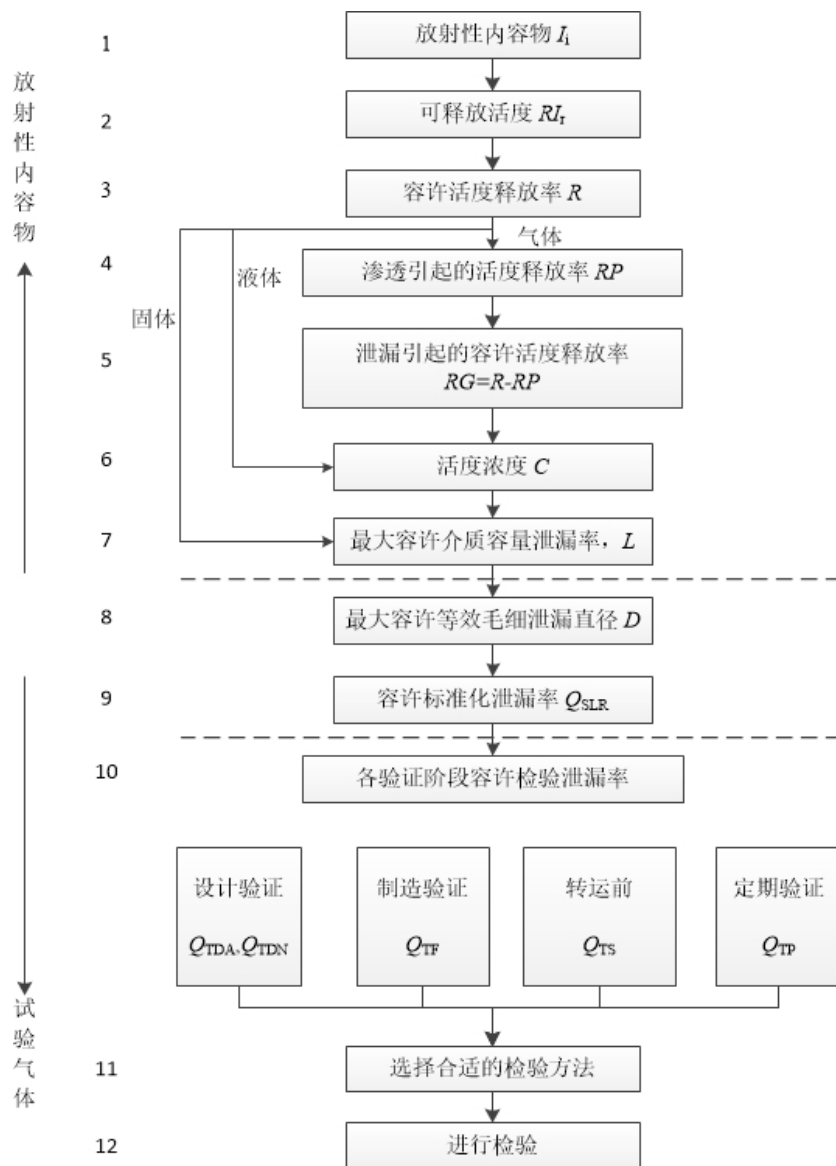


图1 气体泄漏检验法流程

5.2.5 检验与记录

必须完成所要求的检验，同时记录检验结果。参见图1第12步和第9章。

6 容许活度释放率的确定

应按照第6.1条至第6.3条来确定正常运输条件和运输事故条件这两种条件下的容许活度释放率。

6.1 第 1 步 列出放射性内容物 I_i

列出各种放射性内容物的量，并给出其中每个放射性核素的活度和物理特性。

将内容物按不同的物相（即液相、气相和固相）分别考虑。气溶胶可看作气相，溶液中的悬浮细颗粒可当作液体处理。

当放射性内容物不能实际确定时，使用者应估计所含的放射性内容物组份，并征得审管部门的同意。

6.2第2步 确定总的可释放活度 RI_T

在某些情况下，放射性内容物可能被包容系统中多个容器所包容（例如，运输包装内的已辐照燃料组件）。那么，不论是运输事故条件还是正常运输条件，只有一部分放射性内容物可从最内层容器向包容系统释放（ FC_{iN} , FC_{iA} ）；而且这一部分从最内层释放的放射性物质中也只有极小部分可能从包容系统释放到环境中去（ FE_{iN} , FE_{iA} ）。如果放射性内容物是放射性核素的混合物，其释放份额的数值将取决于具体的放射性核素，因而可得出多个释放份额数值。另外，即使是同一种放射性核素，正常运输条件下与运输事故条件下的释放份额也是不同的。

可释放份额取决于下列因素：

- 1) 在运输事故条件和正常运输条件下，包容系统内容物的物理和化学形态。
- 2) 可能的释放方式。如气体渗透、气溶胶的迁移，或颗粒与存在于系统中的水或其他物质反应以及固体颗粒的可溶性等。
- 3) 在正常运输条件和运输事故条件下，内容物能经受的最大温度、压力、振动、机械拉伸或挠曲等等。这些因素可通过进行原型或模型试验，并参考以前的实验、计算或合理推论来确定。当释放份额不能定值时，可假设其值为1.0。释放份额一般要求征得审管部门的同意。

正常运输条件下，放射性核素*i*的可释放活度是：

$$RI_{iN} = FC_{iN} \times FE_{iN} \times I_i \quad (1)$$

其可释放总活度为：

$$RI_{TN} = \sum_i RI_{iN} \quad (2)$$

同样地，在运输事故条件下放射性核素*i*的可释放活度是：

$$RI_{iA} = FC_{iA} \times FE_{iA} \times I_i \quad (3)$$

其可释放总活度为：

$$RI_{TA} = \sum_i RI_{iA} \quad (4)$$

6.3第3步 确定最大容许活度释放率 R

由第1步和第2步的数据确定可从货包中释放的放射性核素。而各种放射性核素的 A_2 值应根据 GB 11806 予以确定，对于混合物必须使用等效 A_2 值。然后根据本标准第4章表2计算出包容要求。此时包容要求的单位是每小时活度或每周活度。由于气体检验泄漏率通常以每秒流量为单位，因此为了具有可比性，必须将规定的包容要求的时间单位换算为秒。本标准假定在规定的期限（正常运输条件下为1小时；运输事故条件下为一周）内以均匀的速率发生泄漏。若主管部门同意也可采用其他时间平均法。

根据上述步骤即可确定容许活度释放率。

7 标准化泄漏率的确定

7.1概述

按图1第4步至第9步确定正常运输条件和运输事故条件这两种条件下的标准化泄漏率。

本章详细描述了所有泄漏机制的标准化泄漏率（由此可确定检验泄漏率）的确定方法。根据7.2至7.7来确定最大容许标准化泄漏率，最大容许标准化泄漏率在数值上与规定的包容要求是等效的。

为了满足第4步至第9步的要求，必须了解包装内放射性内容物的性质和包容系统的情况。当放射性内容物不能实际确定时，用户应估计所含的放射性内容物组份，并征得审管部门的同意。

7.2第4步 确定由渗透引起的活度释放率 RP

对于放射性气体，确定由渗透引起的活度释放率，参见附录B中的B13。

7.3第5步 确定由泄漏引起的最大容许活度释放率 RG

当内容物含有放射性气体时，从第3步确定的规定的包容要求中减去第4步得到的由渗透引起的释放率，即是由泄漏引起的最大容许活度释放率。

7.4第6步 确定包容系统介质的活度浓度 C

分别指定 C_N 和 C_A 为正常运输条件和运输事故条件下可从包容系统释放到环境

中去的介质中的活度浓度。 C_N 和 C_A 的值取决于每个放射性核素的活度浓度，以及可释放至容器的空腔中然后又可释放至环境中去的介质份额。

介质体积为 V_N 时， C_N 由下式计算：

$$C_N = \frac{RI_{TN}}{V_N} \quad (5)$$

介质体积为 V_A 时， C_A 由下式计算：

$$C_A = \frac{RI_{TA}}{V_A} \quad (6)$$

7.5第7步 确定介质的最大容许体积泄漏率 L

用第3步的数据（如果必须考虑渗透则用第5步的数据）除以第6步的数据，就得到第7步的结果。该值表示由于泄漏可从货包释放的介质的最大容许体积流量。此时介质处于工作压力和温度条件下。

在正常运输条件下，介质的最大容许体积泄漏率 L_N 由下式计算：

$$L_N = \frac{R_N}{C_N} \quad (7)$$

在运输事故条件下，介质的最大容许体积泄漏率 L_A 由下式计算：

$$L_A = \frac{R_A}{C_A} \quad (8)$$

7.6第8步 确定最大容许等效毛细管漏孔直径 D

对于液体，通过附录B中的公式（B7）可将第7步的体积泄漏率换算成单个漏孔的直径。

对于气体和气溶胶，可通过下列公式将第7步的体积泄漏率（ L_N 和 L_A ）换算成容许泄漏率（ Q_A 和 Q_N ）：

$$Q_N = L_N \times P_N \quad (9)$$

$$Q_A = L_A \times P_A \quad (10)$$

并用附录B中的公式（B1）计算单个漏孔的直径。

对于固体（包括颗粒）和某些液体，通过对放射性物质性质（如颗粒直径或流体粘度）的分析来确定一个放射性内容物不能漏出的极限直径是可能的。由于这种

阻塞机制，就不会有放射性活度释放。但使用阻塞机制必须是审管部门可接受的。

7.7第9步 确定容许标准化泄漏率 Q_{SLR}

当确定了最大容许等效毛细漏孔直径后，该值可用于附录 B 中的公式 (B1) 来确定容许标准化泄漏率。(详见附录 D 中 D3、D10、D11 和 D13 的实例)。

如果包容系统中的总压力低于外部系统（如包容系统中的初始压力低于外部压力），并且整个运输过程中的内部压力保持低于外部压力而产生的 Q_{SLR} （见 D 15 实例），假定分子流是主要模式，则只需要考虑由放射性物质的分压驱动的分流。为此，公式 (B1) 的第一个加数应设置为零。在第二个要求中，应使用放射性物质的特性（分子质量，分压）。对每种相关放射性物质进行评估，并将结果合并。

应该确定在运输中正常和事故两种条件下的标准化泄漏率；应用 D_A 来确定 $Q_{A(SLR)}$ ，应用 D_N 来确定 $Q_{N(SLR)}$ 。如果放射性物品以多种形态存在，应针对每一种形态分别确定 D_A 、 $Q_{A(SLR)}$ 、 D_N 和 $Q_{N(SLR)}$ 的值。

如果为了计算其他形态的活度释放需要对 $Q_{A(SLR)}$ 值作更严格限制的话，那么应通过评估来确定 $Q_{A(SLR)}$ 的极限值。

同样，如果为了计算其它形态的活度释放需对 $Q_{N(SLR)}$ 值作更严格限制的话，那么也应通过评估来确定 $Q_{N(SLR)}$ 的极限值。

上述确定和评估出的 $Q_{N(SLR)}$ 和 $Q_{A(SLR)}$ 值将用于第 10 步中。

8 包容系统验证要求

8.1 包容系统的验证阶段

8.1.1 概述

应通过在设计、制造、装运前、定期和维修阶段进行的验证程序来证明包装符合包容要求，必须对每个验证阶段建立一套检验要求。

验证程序应证明包装在正常运输条件和运输事故条件两种条件下都符合所有规定的包容要求。因此，泄漏检验仅仅是验证程序的一部分。必须在不同的验证阶段，建立一套审管部门可接受的程序。

包容系统的组装应按照书面的质量保证程序执行，这个书面程序包括包容系统所有部件都符合有关要求且安装适位、同时有确实可靠的核对清单。

8.1.2 设计验证

设计验证程序应证明货包的设计满足正常运输条件和运输事故条件下所有规定的包容要求。

应对包装进行检验以证明它的泄漏率低于或等于最大容许检验泄漏率 Q_{TDA} 和 Q_{TDN} 。

应分别检验正常运输条件和运输事故条件下的最大容许检验泄漏率 Q_{TDA} 和 Q_{TDN} 。如果检验是在不同于运输中正常运输条件和运输事故条件的条件（如温度和压力）下进行的，则必须证明测得的泄漏率是适当的和有代表性的。

8.1.3 制造验证

制造验证程序应证明每个按指定设计而制造的包装在正常运输条件和运输事故条件下都能满足规定的包容要求（假定货包在装运前正确组装，且包装受到合理维护）。

应对包装进行检验以证明其泄漏率低于或等于最大容许检验泄漏率 Q_{TF} 。整个包容边界，包括基础材料，焊接，密封，封闭，阀门，爆破片或其他边界元素应进行检验，但那些泄漏率忽略不计的元素除外。

最大容许检验泄漏率 Q_{TF} 应比 Q_{TDN} 和 Q_{TDA} 更严格。如果检验条件不同于与正常运输条件和运输事故条件相对应的最坏条件，应选择适当的检验泄漏率，以使检验能证明货包泄漏不会超过正常运输条件和运输事故条件的最大容许泄漏率。

有关规定参考的更多信息，请参见附录 E 中的 8.1.3。

8.1.4 装运前验证

装运前验证程序应证明在每次装运前货包已组装好，且包装受到维护，以使在运输过程中（正常运输条件和运输事故条件下）完全满足规定的包容要求。为此，程序应验证包装是否已正确组装并且包装是否正确维护，以及是否已建立包容功能。

必须对包装进行检验以证明它的泄漏率低于或等于最大容许检验泄漏率 Q_{TS} 。

最大容许检验泄漏率 Q_{TF} 应比 Q_{TDN} 和 Q_{TDA} 更严格。如果检验条件不同于与正常运输条件和运输事故条件相对应的最坏条件，应选择适当的检验泄漏率，以使检验能证明货包泄漏不会超过正常运输条件和运输事故条件的最大容许泄漏率。

有关规定参考的更多信息，请参见附录 E 中的 8.1.4。

8.1.5 定期验证

定期验证程序应证明所有依照批准的设计制造的包装，在重复使用之后，仍满足规定的包容要求。

应对包装进行检验以证明它的泄漏率低于或等于最大容许检验泄漏率 Q_{TF} 。由于拆开组件可能有困难，待检验的包容范围和密封件数目以及 Q_{TF} 的数值必须是审管部门认可的。

定期验证的周期应是审管部门认可的。

有关规定参考的更多信息，请参见附录 E 中的 8.1.5。

8.1.6 维护验证

维护验证程序应证明对货包的任何维护，修理或更换都未使包容性能降低。

在将货包返运前应进行维护验证，以表明其泄漏率小于或等于最大容许检验泄漏率 Q_{TM} 。

只需要对受影响的区域或点进行维护验证检验，并且可以与装运前验证相结合。

有关规定参考的更多信息，请参见附录 E 中的 8.1.6。

8.2 验证要求

8.2.1 概述

必须确定第 8.1 条中每个验证阶段相应的容许检验泄漏率，以证明包容系统满足规定的包容要求，同时必须选择合适的检验方法。

8.2.2 第 10 步 确定每个验证阶段的容许检验泄漏率 Q_{TDA} 、 Q_{TDN} 、 Q_{TF} 、 Q_{TS} 、 Q_{TP} 和 Q_{TM}

在确定容许检验泄漏率时应使用第 9 步得到的相应结果。

应用 $Q_{A(SLR)}$ 来确定 Q_{TDA} ，应用 $Q_{N(SLR)}$ 来确定 Q_{TDN} 。对于 Q_{TF} 、 Q_{TS} 和 Q_{TP} 的确定，应使用 $Q_{A(SLR)}$ 和 $Q_{N(SLR)}$ 的较严格值。

同样，应该规定正常运输条件和运输事故条件下计算容许标准化泄漏率的较严格值，以便于第 10 步确定相应的容许检验泄漏率。

有关标准化泄漏率的确定和各种测试条件（不同示踪气体，工作温度和测量期间压力）的考虑，更多信息见附录 E 中的 B2 和第 8 章。

8.2.3第 11 步选择合适的检验方法

对应第 10 步（设计、制造、装运前、定期或维护验证）各阶段所确定的每个容许检验泄漏率，选择一种合适的检验方法，并确定适当的检验程序。

本标准附录 A 的表 A1 列出了一些适用的检验方法。

9 泄漏检验程序要求

9.1概述

所有的泄漏检验都应按照书面的质量保证大纲进行。检验应能满足泄漏检验的要求。在制造、装运前、定期或维护验证检验中，如果发现实际泄漏率大于最大容许泄漏率，必须采取措施将泄漏率减少到可接受的水平。

9.2第 12 步进行检验并记录结果

通过检验将证明包装符合规定的包容要求。对所用气体泄漏检验法的最低要求列于 9.3 和 9.4。

9.3检验灵敏度

通过参考有关文献或试验而确定某种泄漏检验方法的灵敏度。当其灵敏度小于或等于 8.2.2 所确定的示踪气体容许检验泄漏率的一半时，该检验方法的灵敏度被认为是足够的。

要根据检验物项来选择泄漏检验法。例如，气压降低检验（附录 A 表 A2 中 A3.1）和气压升高检验（附录 A 表 A2 中 A3.2）取决于被检气体体积，因此应对这些检验方法的灵敏度进行调整（时间和体积等因素）。在许多情况下，由于体积、压力、温度、混合物组分或时间的变化，而使泄漏检验方法的灵敏度发生较大变化。通常在能良好控制条件的实验室中进行的泄漏检验法比在现场条件下进行的同一方法更灵敏。

9.4检验方法的要求

9.4.1概述

泄漏检验方法应与检验物项相对应，并且当应用于包容系统时，还应有足够的灵敏度能证明其符合包容系统验证的检验要求。

应根据满足包容系统验证要求的活度释放率来确定容许的检验泄漏率和检验灵

敏度。

检验应设计成防止错误接受。这可能包括确保示踪气体和驱动力（压力差）的存在。

进行泄漏检验时必须有必要的安全防护措施。

泄漏试验方法应由符合 ISO 9712 或同等标准要求的人员建立和审查。所有泄漏检验应由合格的操作人员来完成，操作人员应符合 ISO 9712 或同等标准的要求。

9.4.2 检验

使用者应负责验证所选择的检验方法与实际情况相适应，并正确使用该方法。

必须按照 9.4.1 进行检验，并形成文件。

附录 A

(资料性附录)

推荐的泄漏检验方法

A1 概述

本附录目的是为使用者选择合适的检验方法提供帮助。本附录仅简要叙述了相应的泄漏检验方法及其灵敏度范围、优缺点和应考虑的有关安全问题。如欲了解详细情况请参考有关文献。

检验方法由使用者负责选择与实际情况相适应的方法，并保证其正确使用。本目录提供的细节并非足够充分，使用者仍可从其他渠道获取额外细节。

如使用本标准中没有列出的泄漏检验方法，应证明其满足本标准的最低要求，并且是审管部门可接受的。

本附录修订了用于测量货包泄漏量的实用泄漏检验技术，并明确推荐使用适用于确定放射性物质货包泄漏率的检验方法。

本附录在重点考虑容器具体类型的相关因素后，推荐并制定了详细方法。

表 A1 列出了推荐的泄漏检验方法及其标称灵敏度，由于灵敏度是压力、时间、体积、温度和气体特征的函数，通常将不得不为每一种应用而计算其实际灵敏度。在表 A1 中对这些方法进行了分类，本文中分为定性法和定量法两类，定量法能测量总泄漏量；定性法便于发现分散的漏孔。如果可能的话，可用标准漏孔对定性法进行核查。

表 A2 列出了推荐的泄漏检验方法及示意图，表中概括了检验方法，标称灵敏度以及每个方法的适用范围，可以用作选择具体容器检验方法的指南。

A2 说明和注意事项

A2.1 爆炸的风险

对于具有较高设计压力或较大的气体体积或二者兼有的检验物项，应注意防止爆炸事故。气体体积较大时，即使是适度的气压，也是有危险的。不论是将压力减少至已知的安全值，还是用液体或固体填充检验物项，以便剩下较小的检验气体体

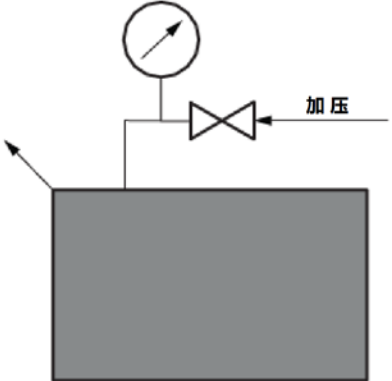
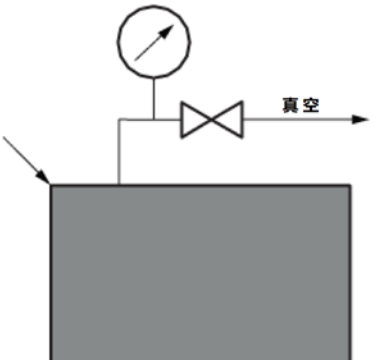
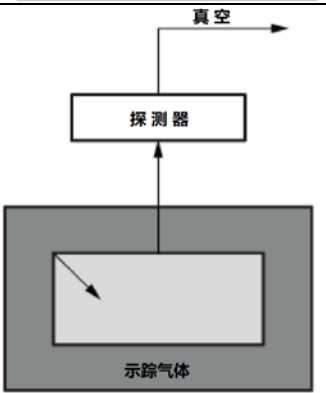
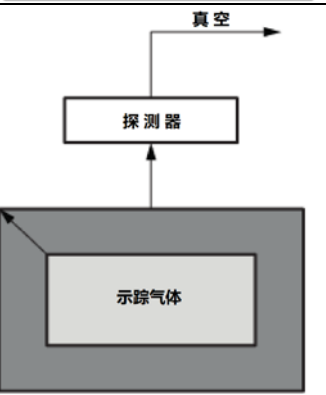
积。最好都做物项液压验证检验，以确保安全。当使用某种液体时，必须保证对泄漏检验没有影响。

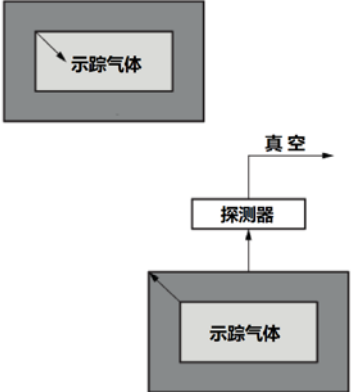
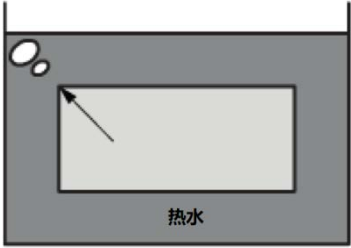
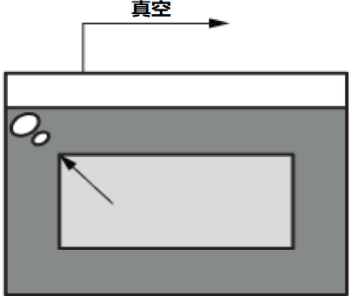
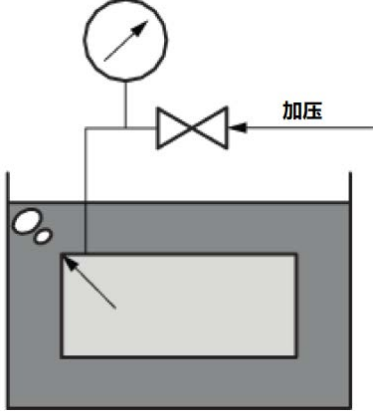
如果包容系统几何形状和性能差异的影响可忽略不计，或操作条件没有足够的压力差以获得有意义的结果，那么检验可在与操作不同的温度和压力下进行。在检验过程中，泄漏流方向应与操作过程中相同，流向与此相反时，应证明其合理性。

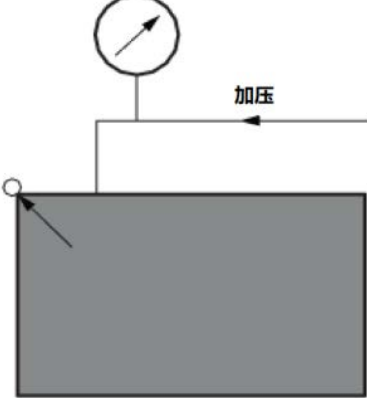
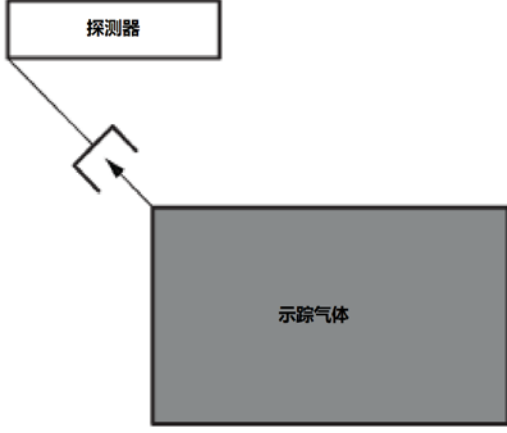
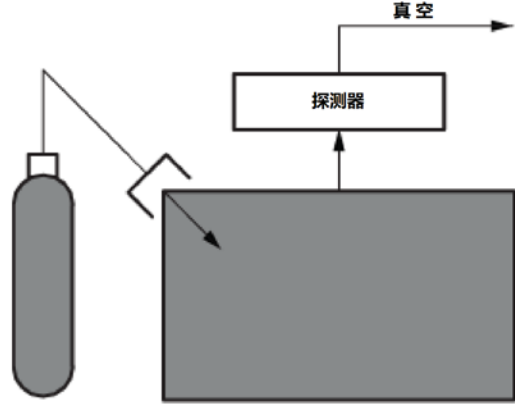
表 A1 泄漏检验灵敏度

	章节号	检验方法	标称检验灵敏度 (Pa·m ³ ·s ⁻¹ SLR)
定量法	A3.1	气压降低法	10 ⁻² ~10 ⁻⁶ 1)
	A3.2	气压升高法	10 ⁻² ~10 ⁻⁶ 2)
	A3.3	包层充气-气体探测器法	10 ⁻⁴ ~10 ⁻¹⁰
	A3.4	包层抽真空-气体探测器法	10 ⁻⁴ ~10 ⁻⁹
	A3.5	背压-包层抽真空法	10 ⁻⁴ ~10 ⁻⁹
定性法	A4.1	气泡技术	10 ⁻⁴ 2) 3)
	A4.2	气泡测试法	10 ⁻⁴ 2)
	A4.3	示踪气体-检漏探头法	10 ⁻⁴ ~10 ⁻⁷
	A4.4	示踪气体-喷射法	10 ⁻⁴ ~10 ⁻⁷
1) 灵敏度取决于体积、压力、时间、气体特性和温度稳定性。 2) 用标准漏孔去核查检验设备和所使用的技术，以获得较高的、可靠的灵敏度。 3) 气泡技术包括热水气泡法、真空气泡法和加压空腔气泡法。			

表 A2 推荐的泄漏检验法摘要

对应条目	示意图
<p>A3 定量检验</p>	
<p>A3.1 气压降低法</p> <p>本方法对检验物项或两 O 形圈之间的空间加压, 然后测量压力降低。本方法的灵敏度与检验体积成反比。</p> <p>本方法特别适用于检验双 O 形圈的密封性, 小的空间体积使本方法具有很高的灵敏度, 且不会破坏空间原来的密封性。</p> <p>标称检验灵敏度为 $10^{-2}\text{Pa}\cdot\text{m}^3\cdot\text{s}^{-1}\text{SLR} \sim 10^{-6}\text{Pa}\cdot\text{m}^3\cdot\text{s}^{-1}\text{SLR}$</p>	
<p>A3.2 气压升高法</p> <p>本方法对检验空腔抽真空至 10^3 Pa 或更低, 然后在规定的检验期限内测量压力的升高。</p> <p>本方法适用于可与压力阀相连接的检验物项, 但也能用于检验双 O 形圈密封性, 检验灵敏度与检验体积成反比。</p> <p>标称检验灵敏度 $10^{-2}\text{Pa}\cdot\text{m}^3\cdot\text{s}^{-1}\text{SLR} \sim 10^{-6}\text{Pa}\cdot\text{m}^3\cdot\text{s}^{-1}\text{SLR}$</p>	
<p>A3.3 包层充气法-气体探测器法</p> <p>本方法是将与气体探测器联接的检验物项抽真空, 然后向包围物项的包层内填充检验气体(一般是氦气或卤素化合物)。</p> <p>本方法适用于有一个可替换密封层的大型检验物项。使用几个密封层(如双 O 形圈封闭层)时, 可依次对每个密封层使用本方法。</p> <p>标称检验灵敏度 $10^{-4}\text{Pa}\cdot\text{m}^3\cdot\text{s}^{-1}\text{SLR} \sim 10^{-10}\text{Pa}\cdot\text{m}^3\cdot\text{s}^{-1}\text{SLR}$</p>	
<p>A3.4 包层抽真空法-气体探测器法</p> <p>该方法用检验气体(通常是氦气或卤气)给检验物项加压, 同时将检验物项置于一个与气体探测器相连的真空中。</p> <p>本方法适用于有一个可替换密封层的小型检验物项。使用几个密封层(例如双 O 型圈封闭层)时, 每个密封层可依次运用这个方法。</p> <p>标称检验灵敏度 $10^{-4}\text{Pa}\cdot\text{m}^3\cdot\text{s}^{-1}\text{SLR} \sim 10^{-9}\text{Pa}\cdot\text{m}^3\cdot\text{s}^{-1}\text{SLR}$</p>	

<p>A3.5 (背压) 包层抽真空法</p> <p>给处于充有检验气体 (通常为氦气) 的包层中的检验物项加压一段时间后, 转移检验物项至一个接有气体探测器的抽空包层中。</p> <p>本方法适用于从很小直到增压室最大尺寸的各种大小的焊接容器, 检验物项内空腔体积至少 10 mm^3。</p> <p>本方法适用于实验室和工程上, 并应是被仔细验证和使用过的。</p> <p>标称检验灵敏度 $10^{-4} \text{ Pa} \cdot \text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1} \text{ SLR} \sim 10^{-9} \text{ Pa} \cdot \text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1} \text{ SLR}$</p>	
<p>A4 定性法</p>	
<p>A4.1.4.1 热水鼓泡法</p> <p>将检验物项浸没于热水中增加其内部压力, 一串气泡指示一个漏孔。</p> <p>本方法适用于焊接容器和通常没有压力阀联接的小型检验物项。也适用于在没有高级仪器的场合使用。</p> <p>标称最大检验灵敏度 $10^{-4} \text{ Pa} \cdot \text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1} \text{ SLR}$</p> <p>注: 本方法也可作为一种定量方法, 但并非依照上述说明去使用。</p>	
<p>A4.1.4.2 真空鼓泡法</p> <p>使浸没检验物项的液面上形成一个真空, 一串气泡指示一个漏孔。</p> <p>本方法适用于焊接容器和小型检验物项, 也能用于空腔体积大于 10 mm^3 的源体或容器。检验物项的大小仅为真空容器的大小所限制。</p> <p>标称检验灵敏度 $10^{-4} \text{ Pa} \cdot \text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1} \text{ SLR}$。</p>	
<p>A4.1.4.3 加压空腔泡法</p> <p>给浸入水、乙二醇或异丙醇中的检验物项加压, 一串气泡指示一个漏孔。</p> <p>本方法适用于焊接容器、与压力阀相连的容器, 或可通过干冰的蒸发获得空腔内压力的检验物项。</p> <p>标称检验灵敏度 $10^{-4} \text{ Pa} \cdot \text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1} \text{ SLR}$</p> <p>注: 本方法也可作为一种定量方法, 但不是采用上述说明的方法。</p>	

<p>A4.2 气泡法</p> <p>对其表面涂有一层检漏液的检验物项加压，在表面上的一个气泡指示一个漏孔。</p> <p>本方法适用于与压力阀相连的容器，以及可通过干冰的蒸发而获得空腔内压力的容器。</p> <p>标称检验灵敏度 $10^{-4}\text{Pa}\cdot\text{m}^3\cdot\text{s}^{-1}\text{SLR}$</p>	
<p>A4.3 示踪气体检漏探头法</p> <p>对充有检验气体(一般是氦气或卤素化合物)的检验物项加压，移动气体探测器探头扫描可能有漏孔的区域，探测漏孔。</p> <p>本方法最适用于有清晰可见的可能存在漏孔区域的大型检验物项(例如焊缝或密封层)，应采用一些用气体给焊缝或密封层内增压的设备。</p> <p>标称检验灵敏度 $10^{-4}\text{Pa}\cdot\text{m}^3\cdot\text{s}^{-1}\text{SLR}\sim 10^{-7}\text{Pa}\cdot\text{m}^3\cdot\text{s}^{-1}\text{SLR}$</p>	
<p>A4.4 示踪气体喷射法</p> <p>将接有气体探测器的检验物项抽真空，同时在其表面喷射检验气体(通常是氦气或卤素化合物)。</p> <p>本方法适用于检验已部分完工的容器，当可能存在漏孔的一侧被抽空时，所用的检验气体很容易从另一侧进入。</p> <p>标称检验灵敏度 $10^{-4}\text{Pa}\cdot\text{m}^3\cdot\text{s}^{-1}\text{SLR}\sim 10^{-7}\text{Pa}\cdot\text{m}^3\cdot\text{s}^{-1}\text{SLR}$</p>	

A2.2 示踪物质

示踪物质应该纯净，不含可能影响检验结果的杂质。必须确保使已知的代表性示踪混合物能到达检验界面。确保不能产生可能影响包容系统内容物或泄漏检验示踪剂特性的有害反应。

A2.3 泄漏率

对于一些气泡检验法，在良好的实验室条件下，压力差为 10^5Pa ，则低至

$10^{-7}\text{Pa}\cdot\text{m}^3\cdot\text{s}^{-1}\text{SLR}$ 的单个泄漏率也能检验出来。但是，检验的能力因许多因素而减弱（如由于缺乏光线而导致能见度低、检验物体的形状、池液的扰动、气体可溶性、操作者疏忽、液体阻塞漏孔、检验时限、以及由于一些漏孔太小而不能检出等），从而使总的泄漏率有超过最大容许泄漏率的可能性。示踪气体气压应能克服浸液顶部的静液压头和表面张力的影响。

泡沫检验法还存在其他问题，例如要保证能同时覆盖检验的所有区域，以及考虑到环境相对湿度和温度的影响。因此气泡检验不能用于定量测量。

由于这些原因，当未观察到气泡时，一般认为总泄漏率为 $10^{-4}\text{Pa}\cdot\text{m}^3\cdot\text{s}^{-1}\text{SLR}$ ，除非个别情况下能证明有较高的灵敏度。

A2.4 避免浸湿检验物项

对于预计小于 $10^{-7}\text{Pa}\cdot\text{m}^3\cdot\text{s}^{-1}\text{SLR}$ 的漏孔，在泄漏检验以前应尽可能避免浸湿检验物项。当不能避免浸湿时，检验应在检验物项完全干燥后再进行。

A2.5 分压

检验混合物中示踪气体的分压应该是已知的，而且至少为总压力的 10%，必须使用分压百分率校正因子，参见公式 (B13)。

A2.6 真空状态

当在正压下进行常规操作时，应考虑在真空状态进行检验时包容边界、封闭层以及密封层的性能。

A2.7 进行泄漏检验

所有泄漏检验必须由合格的操作者进行。

A3 定量法

A3.1 气压降低法

A3.1.1 适用范围

本方法适用于可与压力阀相连接的物项，检验体积可以是容器的体积或是双 O 形圈密封层之间的空间体积。

A3.1.2 泄漏率指示

总泄漏率表示为在特定的环境温度和压力下，已知初始压力经过一段时间后的压力降低值。如果检验持续时间长，则要求对环境温度和压力的变化进行校正。

A3.1.3 检验灵敏度

灵敏度主要取决于检验体积、检验持续时间以及压力、温度测量的准确度。在体积较大的情况下这种方法不太灵敏；但对于小体积并使用精密仪器时，检验灵敏度能达到 $10^{-6}\text{Pa}\cdot\text{m}^3\cdot\text{s}^{-1}\text{SLR}$ 。需要指出的是，总体积包括容器的体积加上测量仪器的有关体积。

检验方法的实际灵敏度应根据公式（B12）计算。

A3.1.4 检验方法

给检验体积加压至规定的检验压力，然后测量规定时间内检验体积的压力和温度变化。为了计算总泄漏率，必须精确测量最大检验体积，包括检验设备的体积和密封层在槽内的极限位置。

压力的测量应精确到测量装置量程的 1% 之内（或更小），则此测量装置的量程应为规定检验压力的 1.5 倍至 4 倍，检验物项在进行测量前应处于或接近热平衡状态，否则测量平均温度过程中的误差可能掩盖泄漏。

A3.1.5 优缺点

用于检验的仪器也有可拆卸的密封层，为此检验结果给出的泄漏率包括了所有密封层（检验设备和容器的），故该方法得到的容器泄漏率可能偏高。如果要求的检验灵敏度为 $10^{-6}\text{Pa}\cdot\text{m}^3\cdot\text{s}^{-1}\text{SLR}$ 数量级，则检验设备连接的密闭性对检验灵敏度有影响。

若本方法用在检验工作（例如进行压力降低试验前后的检验）中，则至少有一个检验设备的连接处可被拆开并重新密封。

高压能提高检验灵敏度，但可能产生由于检验过程中双 O 形圈移动而造成给出的结果不可靠和高压能使密封层旁通而产生危险等缺点。

因为温度变化会引起相应的压力变化，应尽可能使检验在恒温条件下进行。

A3.1.6 注意事项

当检验体积增压时，由于气压升高有发生爆炸的危险，故应注意确保安全。

A3.2 气压升高法

A3.2.1 适用范围

本方法与气压降低法相似，适用于可与压力阀连接的检验物项。与气压降低法

相比，本方法的优点是受温度变化的影响较小。

A3.2.2 泄漏率表示

总泄漏率可以表示为在特定环境温度和压力下，已知初始压力经过一段时间后的压力增加值。若检验持续时间长，则应要求考虑对环境温度和压力的变化进行校正。

A3.2.3 检验灵敏度

检验的灵敏度主要取决于检验体积、检验持续时间以及温度与压力测量的准确度，本方法能用于测量低至 $10^{-6}\text{Pa}\cdot\text{m}^3\cdot\text{s}^{-1}\text{SLR}$ 的泄漏率。

检验方法的实际灵敏度可通过公式 (B12) 计算，但应注意，使用时将其下标 1 和 2 互换。

A3.2.4 检验方法

将检验物项抽真空至适当压力—— 10^3Pa 或更低（一般为 10^2Pa ），然后在测量规定时间内检验体积温度与压力的变化。特别注意避免在低压下结冰而导致的压力装置堵塞风险。为了计算总泄漏率，应准确测得检验体积，包括检验设备的体积和密封层在槽内的极限位置。

压力的测量应精确到测量装置量程的 1% 以内（或更少）、这些装置的量程应是规定检验压力的 1.5 倍至 4 倍。检验应尽可能在恒温条件下进行，因为较小的温度变化能导致较大的压力变化。

A3.2.5 优缺点

除气（当物项抽真空时从检验物项表面跑气）是本方法的一大问题。保持检验物项干净和干燥，可将影响泄漏率测量的除气减少到最低程度。

用于进行检验的检验设备，除待检的密封外，一般要求进一步的密封。检验结果得到的泄漏率包括所有的密封层。因此本方法得出的容器密封层泄漏率可能偏高。在灵敏度较高时，检验设备密封层的密封性能决定了检验的灵敏度。

A3.2.6 注意事项

注意操作真空设备的危险。

A3.3 包层充气-气体探测器法

A3.3.1 适用范围

本方法适用于能放入充满示踪气体的包层中的容器。当仅检验单个法兰接头时，可以将包层尺寸减少到刚好包围法兰表面。使用的示踪气体通常是氦气和卤素化合物。

A3.3.2 泄漏率指示

通过一个可探测容器内气体浓度的气体探测器来测量总泄漏率。

A3.3.3 检验灵敏度

灵敏度取决于使用的气体、压力差和探测方法，如果使用六氟化硫（ SF_6 ）等卤素气体化合物作为示踪气体，灵敏度可达到 $10^{-4}\text{Pa}\cdot\text{m}^3\cdot\text{s}^{-1}\text{SLR}\sim 10^{-7}\text{Pa}\cdot\text{m}^3\cdot\text{s}^{-1}\text{SLR}$ ；使用氦质谱仪探测器，灵敏度可达 $10^{-4}\text{Pa}\cdot\text{m}^3\cdot\text{s}^{-1}\text{SLR}\sim 10^{-10}\text{Pa}\cdot\text{m}^3\cdot\text{s}^{-1}\text{SLR}$ 。

A3.3.4 检验方法

将连接有探测器探头的真空系统连接在容器或两 O 形圈间空间的检验接口上，用标准漏孔或允许少量示踪气体进入的松开的接头或阀门以测定响应时间。

用示踪气体填充包层，同时监测探测器的响应。

A3.3.5 优缺点

包层内示踪气体的分压必须已知，且至少为总压的 10%。

卤素化合物气体仅能用于不锈钢系统，但首先应对不锈钢系统进行测定，以证明所用卤素不会由于晶间腐蚀而使不锈钢受到有害腐蚀。

卤素化合物气体泄漏检验要求在一个无烟雾（如烟草烟）和其他可能的卤素蒸汽源（如制冷系统的漏孔）的检验室中进行。

A3.3.6 注意事项

在易爆易燃气氛中，喷卤漏孔探测器不能使用正离子。卤素化合物接近高温能分解成剧毒混合物，有些卤素化合物气体本身有毒，因此检验区内应保持良好通风。

操作高压气瓶时应特别小心。

A3.4 包层抽真空-气体探测器法

A3.4.1 适用范围

本方法是用示踪气体给容器增压，然后将容器放入一个接有示踪气体探测器的真空包层里。当仅检验单个法兰接头时，可以将包层尺寸减少到刚好包住法兰表面，此外，若使用双 O 形圈密封接头，则示踪气体探测器应固定在与双 O 形圈之间空间

相连的真空体系上。

常用的示踪气体是氦气和卤素化合物。

A3.4.2 泄漏率指示

用可测量真空包层或空腔内气体浓度的气体探测器进行测量。

A3.4.3 检验灵敏度

灵敏度取决于所用气体、压力差以及检验方法，如果使用六氟化硫（ SF_6 ）等卤素气体化合物作为示踪气体，灵敏度可达到 $10^{-4}\text{Pa}\cdot\text{m}^3\cdot\text{s}^{-1}\text{SLR}$ 至 $10^{-7}\text{Pa}\cdot\text{m}^3\cdot\text{s}^{-1}\text{SLR}$ ；如使用氦质谱仪探测器，其灵敏度可能为 $10^{-4}\text{Pa}\cdot\text{m}^3\cdot\text{s}^{-1}\text{SLR}$ 至 $10^{-9}\text{Pa}\cdot\text{m}^3\cdot\text{s}^{-1}\text{SLR}$ 。

A3.4.4 检验方法

用示踪气体将容器增至检验压力，将包围容器的包层抽真空（如果检验一个带双 O 形圈的法兰，则将空隙抽真空），然后监测与真空系统相连的监测器的响应。

如果容器不能填充示踪气体，则将检验物项放在一个合适的容器内，用示踪气体从外部增压一段时间，然后减压，在抽成真空前，将检验物项转移至一个包层里。

注：本方法仅用于外部能承受高压的物项。

A3.4.5 优缺点

包层内示踪气体的分压必须已知，且至少为总压的 10%。

卤素化合物气体仅能用于不锈钢系统，但首先应对不锈钢系统进行测定，以证明所用卤素不会由于晶间腐蚀而使不锈钢受到有害腐蚀。

卤素化合物气体泄漏检验要求在一个无烟雾（如烟草烟）和其他可能的卤素蒸汽源（如制冷系统的漏孔）的检验室中进行。

渗透将会对结果产生影响，且应在后续分析中加以考虑。

A3.4.6 注意事项

在易爆易燃气氛中，喷卤漏孔探测器不能使用正离子。卤素化合物接近高温能分解成剧毒混合物，有些卤素化合物气体本身有毒，因此检验区内应保持良好通风。

使用高压气瓶时应特别小心。

A3.5（背压）包层抽真空法

A3.5.1 适用范围

本方法适用于不带压力阀的检验物项以及最终密封过程中不能用氦填充的密封

源。物项应能承受所选择的外部压力而不受损害。当使用精密的质谱仪时也可使用非氦气体。

A3.5.2 泄漏率指示

用质谱漏孔探测器 (MSLD) 测量泄漏率。

A3.5.3 检验灵敏度

灵敏度 $[10^{-7}\text{Pa}\cdot\text{m}^3\cdot\text{s}^{-1}\sim 10^{-9}\text{Pa}\cdot\text{m}^3\cdot\text{s}^{-1}\text{SLR}]$ 取决于设备，也取决于检验物项外表面氦气除气率。

A3.5.4 检验方法

将检验物相置于一个合适的检验室内，然后外部用氦增压一段时间。通常为 $3.0\times 10^6\text{ Pa}$ 加压一小时，停止加压后立即将检验物项转移至一个接有质谱漏孔探测器的检验室里，然后抽真空至操作压力，按照操作说明书操作质谱漏孔探测器。在此方法中，当检验物项置于真空中后，通过任何漏孔进入检验物项的氦气从漏孔中释出就会被检验到。

A3.5.5 优缺点

本方法特别适用于同时检验几个小型样品，使这些小样品在真空室内迅速地全部进行泄漏检验。

当样品易损时，可以采用长时间低压的方式加压。

渗透将会对结果产生影响，且应在后续分析中加以考虑。

A3.5.6 注意事项

因为背压室处于高压下，需要使用特殊设计的设备。操作人员应当接受专门培训并知晓可能出现的危险。

A4 定性法

A4.1 气泡技术

A4.1.1 适用范围

本方法适用于无压力阀接口的小型检验物项，其大小能方便地进出允许近距离观测液体情况的槽箱。

本方法可用于带压力阀或通过以下方式能获得要求的压力差的检验物项：

a) 干冰，液氦或致冷液体的蒸发。

b) 利用槽箱内液面上的真空。

c) 利用槽箱内热的液体。

A4.1.2 漏孔指示

由检验液体中的气泡串指示单个漏孔。

A4.1.3 检验灵敏度

本检验给出了定性的结果。如果没有气泡通过试液，表明其泄漏率在 $10^{-4}\text{Pa}\cdot\text{m}^3\cdot\text{s}^{-1}\text{SLR}$ 范围内。

各类液体（如水、醇类、矿物油、硅油、乙二醇等）与各种示踪气体配合使用，可提高本方法的灵敏度。

A4.1.4 检验方法

A4.1.4.1 热水鼓泡法

将室温下的检验物项浸入 90 °C 水中。浸没检验物项或将被检验部分置于一个合适的容器中，并使它浸入液面下至少 50mm，然后寻找气泡串。

检验持续的时间应该足以使检验物项和其中的气体被水加热，检验物项停留在水中的时间应通过计算或实验确定。

吸附在检验件表面的常压空气，在真空条件下形成气泡串几秒钟，然后消失，这种气泡串并非表示有漏孔。

A4.1.4.2 真空鼓泡法

将检验物项浸入液体浴中，将液面上空腔抽真空至适当的压力（一般为 10^4Pa ），然后寻找气泡串。

浸液应该具有较低的表面张力和较小的蒸气压，而且在检验完成后很容易从检验物项上清除掉。

吸附在检验件表面的常压空气，在真空条件下形成气泡串几秒钟，然后消失，这种气泡串并非表示有漏孔。

A4.1.4.3 加压空腔鼓泡法

用示踪气体将检验物项加压至规定的检验压力至少 15min，这个压力可通过相连的压力阀或利用干冰得到。当通过干冰蒸发产生内压时，2kg 的干冰将使 1m^3 的空间增加 10^5Pa 压力。

在检验物项仍然受压的状况下，将其可能存在漏孔的区域浸入液体浴中，然后寻找气泡串。吸附在检验件表面的常压空气，在真空条件下形成气泡串几秒钟，然后消失，这种气泡串并非表示有漏孔。

A4.1.5 优缺点

本方法普遍应用于能方便进出合适槽箱的小型容器和焊接小盒。

封口处和表面会吸附空气，从而增加欺骗性的气泡，干扰真正的泄漏。

对于真空气泡技术，检验液中溶解有空气，因此在泄漏检验进行以前，应对液体抽真空一段时间，抽真空的时间取决于液体的体积。

如果重复检验，漏孔有可能被液体阻塞。

A4.1.6 注意事项

应考虑到增压有使检验物项破损的危险。当借助于干冰产生压力时，应注意产生所需内压的干冰不要过量。

注意搬运干冰可能引起“冷烫伤”。

若使用酒精，则须考虑火灾风险。

使用安全眼镜或保护罩以保护操作者避免由于液体容器破损可能带来的伤害。

A4.2 气泡法

A4.2.1 适用范围

本方法适用于可与压力阀连接的容器或可通过干冰蒸发而获得所需压力的容器。

A4.2.2 漏孔指示

各个漏孔可由在检验件外表面涂上的检漏液中形成的气泡来指示。

A4.2.3 检验灵敏度

本检验得出一个定性的结果，没有气泡穿过检漏液表明泄漏率低于 $10^{-4}\text{Pa}\cdot\text{m}^3\cdot\text{s}^{-1}\text{SLR}$ 。增加检验压力可提高灵敏度，如果可能的话，应使用具有与包容要求灵敏度相当的标准漏孔对本方法进行核查。

A4.2.4 检验方法

将检验物项加压至规定的检验压力至少 15min，然后在仍然充压时，在所有可能的泄漏区涂上或涮上检漏液（低表面张力的工业用肥皂液较为适宜）寻找气泡。检漏液应覆盖所有可能的泄漏区或接头，检验后应将所测区域擦拭干净。

当通过干冰蒸发产生内压时，2kg 干冰将使 1m^3 空间增加 10^5Pa 的压力。

A4.2.5 优缺点

本方法与加压空腔鼓泡法相似，但并不受容器大小和质量的限制。如密封处不容易贴近或接头空隙不能被填补或注满的话，本方法是不可靠的。

A4.2.6 注意事项

应考虑到增压有使检验物项破损的危险，当借助于干冰产生压力时，应注意产生所需内压的干冰不要过量。

注意搬运干冰可能引起“冷烫伤”。

A4.3 示踪气体-探头技术

A4.3.1 适用范围

本方法最适用于大型容器或密封源可能存在漏孔的区域（例如一个明显可见的密封或焊缝）。应有向密封层的外露侧提供示踪气体的设备，并在另一侧安放探测装置进行探测。

常用示踪气体是氦气和卤素化合物气体。

A4.3.2 漏孔指示

由能测量漏出的示踪气体浓度的探测器指示。

A4.3.3 检验灵敏度

灵敏度取决于所用的示踪气体，压力差以及具体的探测器。对卤素化合物系统如六氟化硫(SF_6)，其测量灵敏度为 $10^{-4}\text{Pa}\cdot\text{m}^3\cdot\text{s}^{-1}\text{SLR} \sim 10^{-7}\text{Pa}\cdot\text{m}^3\cdot\text{s}^{-1}\text{SLR}$ 。如用氦气，质谱仪可以探测到泄漏率为 $10^{-4}\text{Pa}\cdot\text{m}^3\cdot\text{s}^{-1}\text{SLR} \sim 10^{-9}\text{Pa}\cdot\text{m}^3\cdot\text{s}^{-1}\text{SLR}$ 的漏孔。

A4.3.4 检验方法

按照说明书操作探测器，用示踪气体给检验物项或法兰接头加压至检验压力，并在可能存在泄漏的区域“嗅”。检漏探头应紧贴物项表面（小于 1 mm 的距离）且移动速度不超过 $20\text{mm}\cdot\text{s}^{-1}$ 。

开始检验以前，检漏探头应用标准漏孔进行核查。

A4.3.5 优缺点

检漏探头只能探测单个漏孔，因此不能用于确定容器泄漏率总量。

卤素化合物气体能用于不锈钢系统，但首先应对不锈钢系统进行测定，以证明

所用卤素化合物不会由于晶间腐蚀而使不锈钢受到有害腐蚀。

卤素泄漏检验要求在一个无烟雾（如烟草烟）和其他可能的卤素蒸汽源（如制冷系统的漏孔）的检验室中进行。

检验混合物中示踪气体的分压应至少为总压的 10%，而且必须已知。

A4.3.6 注意事项

在易爆易燃气氛中，喷卤漏孔探测器不能使用正离子。卤素化合物接近高温能分解成剧毒混合物，有些卤素化合物气体本身有毒，因此检验区内应保持良好通风。

使用高压气瓶时应特别小心。

A4.4 示踪气体-喷射法

A4.4.1 适用范围

本方法最适用于大型容器的有明显的可能存在漏孔的区域（如封口和焊缝）。利用某些设备向检验区域喷射示踪气体，并用探测器在焊缝或法兰的另一侧进行探测。

常用的示踪气体是氦气或卤素化合物气体。

A4.4.2 泄漏率指示

用测量示踪气体浓度的气体探测器测量泄漏率。

A4.4.3 检验灵敏度

灵敏度取决于所用示踪气体、压力差以及具体的探测器，对于卤素化合物，如六氟化硫（ SF_6 ），其测量灵敏度为 $10^{-4}\text{Pa}\cdot\text{m}^3\cdot\text{s}^{-1}\text{SLR} \sim 10^{-7}\text{Pa}\cdot\text{m}^3\cdot\text{s}^{-1}\text{SLR}$ 。氦质谱仪可探测到泄漏率为 $10^{-4}\text{Pa}\cdot\text{m}^3\cdot\text{s}^{-1}\text{SLR} \sim 10^{-9}\text{Pa}\cdot\text{m}^3\cdot\text{s}^{-1}\text{SLR}$ 的漏孔。

A4.4.4 检验方法

用真空泵将检验物项或双 O 形圈之间的空间抽真空，然后按照说明书操作气体探测器。将少量的示踪气体喷入已知的漏孔（如一个部分开启的阀门或松动的接头）或应用一个标准漏孔，来测定响应时间，并记下探测器响应所需要的时间。

隔离已知漏孔，再用示踪气体喷射可能存在的泄漏区，每个区域的喷射时间应比响应时间长，然后监测气体探测器的响应。

A4.4.5 优缺点

喷射法仅能探测单个漏孔，而不能用于确定容器的总泄漏率。

要求合格的操作者操作漏孔探测器。

卤素能用于不锈钢系统，但首先应对不锈钢系统进行测定，以证明所用卤气不会由于晶间腐蚀而使不锈钢受到有害腐蚀。

卤气泄漏检验要求在一个无烟雾（如烟草烟）和其他可能的卤素蒸汽源（如制冷系统的漏孔）的检验室中进行。

A4.4.6 注意事项

使用高压气瓶时应特别小心。

附录 B

(资料性附录)

计算方法

B1 范围

本附录归纳了有关计算方法的基本数据和公式。

如何应用本附录的计算方法请参见附录 D 的应用实例。

B2 气体泄漏

气体泄漏可以以本节所述的气流或 B13 所述的渗透的方式发生。

通过小漏孔的气体流量取决于气体的流体和热力学特征、漏孔特点以及流动状态。压力是流体特征，压力差是泄漏的驱动力。在本附录中，使用的漏孔模型是一个简单的笔直圆形毛细管，就本标准所涉及的泄漏范围（即 $10^{-8} \text{ Pa}\cdot\text{m}^3\cdot\text{s}^{-1} \sim 1 \text{ Pa}\cdot\text{m}^3\cdot\text{s}^{-1}$ ）而言，用修正的过渡流诺森方程（Knudsen）来计算流量是合适的。流量 Q 的单位为帕斯卡·立方米/秒（ $\text{Pa}\cdot\text{m}^3\cdot\text{s}^{-1}$ ）

$$Q = \frac{\pi}{128} \frac{D^4}{\mu \cdot a} \frac{(p_u^2 - p_d^2)}{2} + \frac{\sqrt{2\pi}}{6} \sqrt{\frac{RT}{M}} \frac{D^3}{a} (p_u - p_d) \quad (\text{B1})$$

公式 (B1) 对单一种类的气体有效。若用于混合气体，则要求有等效的气体特征参数（见 B4）。

上式第一部分表示粘滞层流 (Q_v)，是由层流的泊萧叶 (Poiseuille) 定理得来的，第二部分表示分子流 (Q_m)，是由自由分子流的诺森定律得来的。

公式 (B1) 可以用在仅有粘滞层流状态、仅有分子流状态或过渡流状态。当以层流为主时，计算出的分子流的贡献很小，可以忽略；同样当分子流占主导地位时，层流的贡献也很小，也可以忽略。

附录 E 的附件 B2 给出了公式 (B1) 的推导、使用的原因及限制条件。

B3 不同条件下的气体泄漏率的相关性

不同条件下的相关性可用公式 (B1) 求得。可从已知条件计算出毛细管直径，其他条件下的泄漏率可以利用计算出的直径来得到。

对于两不同条件均为纯层流状态的特殊情况，气体 x 与 y 的泄漏率 Q_x 和 Q_y 关

系为:

$$Q_x = Q_y \frac{\mu_y}{\mu_x} \times \frac{(P_u^2 - P_d^2)_x}{(P_u^2 - P_d^2)_y} \quad (\text{B2})$$

Q_x 和 Q_y 的单位为帕斯卡·立方米/秒 ($\text{Pa} \cdot \text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$), 同样的, 对于纯分子流状态:

$$Q_x = Q_y \frac{\sqrt{T_x M_y}}{\sqrt{T_y M_x}} \times \frac{(P_u - P_d)_x}{(P_u - P_d)_y} \quad (\text{B3})$$

B4 气体混合物

对于一个 n 组分的理想气体混合物, 公式 (B1) 第一部分中的混合物的特征参数 (总压 P (单位帕斯卡 (Pa)), 粘度 μ (帕斯卡·秒 ($\text{Pa} \cdot \text{s}$))) 可由下面各公式导出:

$$P_{\text{mix}} = \sum_{i=1}^n P_i \quad (\text{B4})$$

$$\mu_{\text{mix}} = \sum_{i=1}^n \frac{P_i \mu_i}{P_{\text{mix}}} \quad (\text{B5})$$

公式 (B1) 第二部分中的量 P/\sqrt{M} 可按下式计算:

$$\left(\frac{P}{\sqrt{M}} \right)_{\text{mix}} = \sum_{i=1}^n \frac{P_i}{\sqrt{M_i}} \quad (\text{B6})$$

B5 标准状态下的相关性

为了比较在不同状态下测得的泄漏率, 应该参考标准状态下的泄漏率。

通常, 标准状态是指入口压力 $1.013 \times 10^5 \text{ Pa}$ 、出口压力 0.0 Pa 、温度 298 K ($25 \text{ }^\circ\text{C}$) 的干燥空气, 任何给定的泄漏可由公式 (B2) 和公式 (B3) 根据标准状态得到, 在标准状态下的泄漏率在本标准中定义为标准化泄漏率 (SLR)。

B6 液体泄漏

液体泄漏在低流速时为层流, 高流速时为湍流。因为所涉及的孔很小, 所以只考虑层流。液体泄漏率可由泊萧叶 (Poiseuille) 定律推导而来:

$$L = \frac{\pi}{128} \times \frac{D^4}{\mu \cdot a} (P_u - P_d) \quad (\text{B7})$$

B7 不同状态下液体泄漏率之间的相关性

测量的泄漏率 (L_y) 和等效泄漏率 (L_x) 之间的关系, 如下式:

$$L_x = L_y \left[\frac{\mu_y}{\mu_x} \right] \frac{(P_u - P_d)_x}{(P_u - P_d)_y} \quad (\text{B8})$$

测量的泄漏率 (L_y) 和等效泄漏率 (L_x) 的单位为立方米/秒 ($\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$)。

B8 气体泄漏率和液体泄漏率的相关性

对于一个含有放射性液体的体系，最大容许等效毛细管漏孔直径 D (米 (m)) 可由公式 (B7) 得到，然后将该 D 值代入公式 (B1) 计算得到等效气体泄漏率。

B9 气溶胶泄漏

气溶胶是指在气体介质中微粒悬浮物 (如：固体粉末)。在货包中形成的气溶胶性质在时间和空间上都是不一致的，微粒悬浮物的产生是由无规律作用力作用于系统的结果；沉降是微粒从气溶胶中移出并且减少可能的释放量的一个持续的过程。悬浮微粒的释放是由微粒进入泄漏流而造成的。因为气溶胶性质的不确定性，以及微粒的进入和沉降既在系统内又在释放通道中发生，因此对气溶胶释放的分析预测是很困难的。所以，还没有一个公式可以描述气溶胶的泄漏率。

B10 气体泄漏率和气溶胶泄漏率的相关性

使用以下相关性，要求质量份额相对于微粒几何直径的分布是已知的。

该相关性要求使最大容许等效毛细管直径 D (米 (m)) 等于微粒的一个极限几何直径。所确定的极限几何直径应使可释放的所有微粒的总活度被限制在容许水平之内。

然后将极限几何直径值代入公式 (B1) 以得到等效气体泄漏率。

B11 相关性使用中的注意事项

在使用 B3、B5、B7、B8 和 B10 中的相关性时要特别注意以下注意事项。首先，在充分考虑了流体状态的影响之后，相关性才有效。其次，这些相关性考虑了温度、压力对泄漏流体的影响，但未考虑对漏孔的几何状态的影响。例如：如果一个系统在压力 P 时可正常运行，则在 $0.1 P$ 压力下进行的空气泄漏检验的结果是不可信的，这是因为该系统在检验条件下较之于运行条件下变形要小一些。

B12 表面张力

在气泡检验法中，除非气泡内压大于液面之上的大气压力、重力产生的液体压

力和表面张力引起的压力之和，否则将不可能冒出气泡。要求克服表面张力的气泡内压 P_u （帕斯卡（Pa））可由公式（B9）估算：

$$P_u > P_d + \frac{2\sigma}{D} \quad (\text{B9})$$

在气泡检验法中，还必须要考虑其他两个因素：气泡直径 D_B （米（m））和产泡率 ν （ s^{-1} ）计算如下：

$$D_B = \left[\frac{6D\sigma g_0}{g(\rho_l - \rho_g)} \right]^{1/3} \quad (\text{B10})$$

$$\nu = \frac{6L}{\pi \cdot D_B^3} \quad (\text{B11})$$

B13 渗透

渗透是流体以“吸附-扩散-解吸”的机制通过固体屏障（没有漏孔）的过程。除非流体本身是放射性的，否则不认为是泄漏或释放。如果确实是渗透引起的泄漏，必须将容器壁的这种渗透减至可接受水平。在本标准中，渗透仅适用于气体。

当泄漏检验步骤被用于验证包容系统的密封性时，如果包容系统中含有有机材料（例如高弹性密封 O 形圈），则应该考虑渗透。通常，O 形圈暴露于氦气时，对每 $1.013 \times 10^5 \text{ Pa}$ 的压差，氦气的标称渗透系数为每厘米 O 形圈 $5 \times 10^{-7} \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ 。在泄漏率的检验中减少渗透影响的一些方法如下：

- 1) 在渗透达显著水平之前完成泄漏检验。
- 2) 联合使用示踪剂/密封材料，减少或延迟渗透。
- 3) 当联合使用示踪剂/密封材料时，且在相应温度和压力差下标称稳态渗透率（由制造者提供的）是最大容许泄漏率的 50% 或更小，如果在检验前有足够的时间使数值达到稳定态数值的话，可以从测得的泄漏率中减去标称值。

附录 D 中的 D8 给出了气体渗透计算的进一步解释。

B14 气压升降法泄漏检验

气压降低检验的泄漏率 Q 帕斯卡立方米/秒（ $\text{Pa} \cdot \text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ ）是由理想气体方程推导而来。当检验过程中 V 体积的气体温度从 T_1 变为 T_2 ，归一化到气体参考温度 T_0 ，时的泄漏率 Q 为：

$$Q = \frac{VT_0}{H} \left(\frac{P_1}{T_1} - \frac{P_2}{T_2} \right)$$

(B12)

当假定层流为主时，公式 (B12) 适用。

当脚标 1 和 2 互换时，公式 (B12) 上式适用于气压升高法检验。

B15 示踪气体分压校正

如果混合物中包含示踪气体，由仅检验示踪气体（例如利用质谱泄漏检测仪）的方法得到的测量泄漏率 Q 帕斯卡立方米/秒 ($\text{Pa} \cdot \text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$) 必须经过校正：

$$Q = Q_{\text{mix}} \left(\frac{P_{\text{mix}}}{P_t} \right) \quad (11)$$

B16 泄漏检验法灵敏度

根据本标准 9.3 的规定，所用泄漏检验方法的灵敏度必须等于或小于示踪流体的最大容许泄漏率的一半。

附录 C

(资料性附录)

转换表

不同单位的转化系数在表 C1 到 C3 中给出。

表 C1 压力单位

	bar ^a	Pa N·m ⁻²	atm (标准)	torr ^b	inH ₂ O	lbf·in ⁻²	kgf·cm ⁻²
1bar =	1	1.00×10 ⁵	9.87×10 ⁻¹	7.50×10 ²	4.01×10 ²	1.45×10 ¹	1.02
1Pa =	1.00×10 ⁻⁵	1	9.87×10 ⁻⁶	7.50×10 ⁻⁶	4.01×10 ⁻³	1.45×10 ⁻⁵	1.02×10 ⁻⁵
1atm =	1.01	1.01×10 ⁵	1	7.60×10 ²	4.07×10 ²	1.47×10 ¹	1.03
1torr =	1.33×10 ⁻³	1.33×10 ²	1.32×10 ⁻³	1	5.35×10 ⁻¹	1.93×10 ⁻²	1.36×10 ⁻³
1 inH ₂ O =	2.49×10 ⁻³	2.49×10 ²	2.46×10 ⁻³	1.87	1	3.61×10 ⁻²	2.54×10 ⁻³
1 lbf·in ⁻² =	6.89×10 ⁻²	6.89×10 ³	6.80×10 ⁻²	5.17×10 ¹	2.77×10 ¹	1	7.03×10 ⁻²
1 kgf·cm ⁻² =	9.81×10 ⁻¹	9.81×10 ⁴	9.68×10 ⁻¹	7.36×10 ²	3.94×10 ²	1.42×10 ¹	1

a 1dyne·cm⁻² = 10⁻⁶bar
b 1mmHg = 1torr

表 C2 体积流量单位

	cm ³ ·s ⁻¹	m ³ ·s ⁻¹	m ³ ·min ⁻¹	m ³ ·h ⁻¹	litre·s ⁻¹	ft ³ ·min ⁻¹
1cm ³ ·s ⁻¹ =	1	1.00×10 ⁻⁶	6.00×10 ⁻⁵	3.60×10 ⁻³	1.00×10 ⁻³	2.12×10 ⁻³
1 m ³ ·s ⁻¹ =	1.00×10 ⁶	1	6.00×10 ¹	3.60×10 ³	1.00×10 ³	2.12×10 ³
1 m ³ ·min ⁻¹ =	1.67×10 ⁴	1.67×10 ⁻²	1	6.00×10 ¹	1.67×10 ¹	3.53×10 ¹
1 m ³ ·h ⁻¹ =	2.78×10 ²	2.78×10 ⁻⁴	1.67×10 ⁻²	1	2.78×10 ⁻¹	5.89×10 ⁻¹
1 l·s ⁻¹ =	1.00×10 ³	1.00×10 ³	6.00×10 ⁻²	3.60	1	2.12
1ft ³ ·min ⁻¹ =	4.72×10 ²	4.72×10 ⁻⁴	2.83×10 ⁻²	1.60	4.72×10 ⁻¹	1

表 C3 泄漏速率单位

	bar·cm ³ ·s ⁻¹	Pa·m ³ ·s ⁻¹	torr·litre·s ⁻¹	Lusec	atm·cm ³ ·s ⁻¹	atm·ft ³ ·h ⁻¹
1 bar·cm ³ ·s ⁻¹ =	1	1.00×10 ⁻¹	7.50×10 ⁻¹	7.50×10 ²	9.87×10 ⁻¹	1.25×10 ⁻¹
1 Pa·m ³ ·s ⁻¹ = (watt)	1.00×10 ¹	1	7.50	7.50×10 ³	9.87	1.25
1 torr·litre·s ⁻¹ =	1.33	1.33×10 ⁻¹	1	1.00×10 ³	1.32	1.67×10 ⁻¹
1 Lusec =	1.33×10 ⁻³	1.33×10 ⁻⁴	1.00×10 ⁻³	1	1.32×10 ⁻³	1.67×10 ⁻⁴
1 atm·cm ³ ·s ⁻¹ =	1.01	1.01×10 ⁻¹	7.60×10 ⁻¹	7.60×10 ²	1	1.27×10 ⁻¹
1 atm·ft ³ ·h ⁻¹ =	7.97	7.97×10 ⁻¹	5.98	5.98×10 ³	7.87	1

附录 D

(资料性附录)

工作实例

D1 概述

本附录所有实例均为假设，其目的是为了举例说明本标准中所包含的原理。它们在实际包装中的适用性必须经过审查。

本附录使用 3 中规定的术语和定义。

本附录所列工作实例包括：D2 干式乏燃料容器的泄漏率检验、D3 湿式乏燃料容器的泄漏率检验、D4 双 O 形圈密封的气压升高检验、D5 双 O 形圈密封的气压降低检验、D6 气压升高检验法和气压降低检验法的比较、D7 气压升高法或气压降低法中未知检验体积的确定、D8 气体渗透、D9 气溶胶泄漏、D10 气体泄漏率和液体泄漏率的相关性、D11 不同气体泄漏率之间的相关性、D12 气泡浸泡检验法的灵敏度、D13 氘水的包容、D14 使用双层包容并考虑辐解的液体包容系统、D15 使用低于大气压方法的干式乏燃料容器的包容。

D2 干式乏燃料容器的泄漏率检验

D2.1 本例描述了应用气体泄漏检验法来检验乏燃料在正常运输条件下的最大容许体积泄漏率。该乏燃料货包内装七个 PWR 燃料组件且有 2.32m^3 的自由体积空腔。

以下考虑是示范性的，检测步骤中采取的假设条件不应视作必须遵守的。

检验步骤及其顺序如图 1 所示。

D2.2 第 1 步

装运前该乏燃料已冷却 5 年，燃耗为 $35\text{MW}\cdot\text{d}/\text{kgU}$ 。有九种要考虑其释放的放射性核素，这些核素及其在单个燃料组件中的活度列于表 D1 中。

D2.3 第 2 步

假定在正常运输条件下有 3% 的乏燃料棒破损。列于表 D1 中的释放份额是以 3% 的破损燃料棒中所考虑的每种核素检验中测得的释放份额为依据的。杂质的释放份额假定为 1。对于固体，只考虑气溶胶从容器内释放到环境中的释放份额。各核素的释放量列于表 D1 中。

D2.4 第 3 步

规定的包容要求是通过计算释放核素的等效 A_2 值来确定的。等效 A_2 值可利用表 D1 由下式求得：

$$A_{2eq} = \frac{1}{\sum \frac{FC_{IN}}{A_{2i}}} = \frac{1}{0.376} = 2.66 \text{ TBq}$$

那么，正常运输条件下最大容许活度释放率为：

$$R_N = A_{2eq} \times 10^{-6} \times \frac{1}{3600} = 7.39 \times 10^{-10} \text{ TBq} \cdot \text{s}^{-1}$$

表 D1 正常运输条件下冷却 5 年的 PWR 组件中主要核素及其限值

核素	活度, TBq	释放份额	气溶胶份额	可释放活度, TBq	活度份额, FC_i	A_{2i} TBq	FC_i/A_{2i} , TBq^{-1}
^{60}Co	7.81×10^{-1}	1.0	1×10^{-1}	7.81×10^{-2}	9.93×10^{-2}	4×10^{-1}	2.48×10^{-1}
^{85}Kr	7.70×10	$3 \times 10^{-1} \times 0.03$	1.0	6.93×10^{-1}	8.81×10^{-1}	1×10^1	8.81×10^{-2}
^{106}Ru	2.88×10^2	$2 \times 10^{-5} \times 0.03$	1.0	1.73×10^{-4}	2.20×10^{-4}	2×10^{-1}	1.10×10^{-3}
^{134}Cs	9.62×10^2	$2 \times 10^{-4} \times 0.03$	1.0	5.77×10^{-3}	7.34×10^{-3}	7×10^{-1}	1.05×10^{-2}
^{137}Cs	1.60×10^3	$2 \times 10^{-4} \times 0.03$	1.0	9.60×10^{-3}	1.22×10^{-2}	6×10^{-1}	2.03×10^{-2}
^{238}Pu	5.22×10	$2 \times 10^{-5} \times 0.03$	1×10^{-1}	3.13×10^{-6}	4.0×10^{-6}	1×10^{-3}	3.98×10^{-3}
^{239}Pu	6.18	$2 \times 10^{-5} \times 0.03$	1×10^{-1}	3.71×10^{-7}	4.7×10^{-7}	1×10^{-3}	4.71×10^{-4}
^{240}Pu	7.62	$2 \times 10^{-5} \times 0.03$	1×10^{-1}	4.57×10^{-7}	5.8×10^{-7}	1×10^{-3}	5.81×10^{-4}
^{241}Pu	2.03×10^3	$2 \times 10^{-5} \times 0.03$	1×10^{-1}	1.22×10^{-4}	1.5×10^{-4}	6×10^{-2}	2.58×10^{-3}
			合计	0.787			0.376

注：为了简化，未将与 ^{85}Kr (见 E5.2) 的 A_2 值相关的因子 10 考虑在内，是相对保守的且不会显著影响计算结果。

D2.5 第 4、5 步

本例无渗透，因此第 4、5 步不适用。

D2.6 第 6 步

正常运输条件下平均活度浓度 C_N 可以由空腔的自由体积和内容物（7 组 PWR 组件）来确定：

$$C_N = \frac{7 \times RI_{TN}}{V_N} = \frac{7 \times 0.787}{2.32} = 2.37 \text{ TBq} \cdot \text{m}^{-3}$$

其中, $V_N=2.32\text{m}^3$

D2.7 第 7 步

最大容许体积泄漏率 L_N 为:

$$L_N = \frac{R_N}{C_N} = 3.11 \times 10^{-10} \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$$

D3 湿式乏燃料容器泄漏率检验

D3.1 本例说明了水冷型乏燃料货包所要求的最大容许泄漏率的确定, 及确定要求泄漏检验的标准化泄漏率 (SLR) 计算方法。

乏燃料以大型货包运输。装货前必须对货包进行泄漏检验以确保不仅在正常运输条件下而且在运输事故条件下, 放射性释放不大于规定限值。

检验步骤及其顺序如图 1 所示。

D3.2 第 1 步和第 6 步

货包内装有乏燃料和溶解有放射性物质的贮存水池的池水。

不论在正常运输条件还是在运输事故条件下, 假设该货包都没有燃料破损。

假设运输中泄漏的放射性物质有如下组分 (根据乏燃料中的裂变产物的组成):

核素	活度浓度 C_i , TBq/m ³	A_{2i} , TBq	C_i/A_{2i}
Sr-90	1.39×10^{-3}	0.3	4.63×10^{-3}
Ru-106	4.67×10^{-3}	0.2	2.34×10^{-3}
Cs-134	1.81×10^{-3}	0.7	2.59×10^{-3}
Cs-137	196×10^{-3}	0.6	3.25×10^{-3}
Ce-144	7.85×10^{-3}	0.2	3.93×10^{-3}
合计	1.77×10^{-2}	—	7.31×10^{-2}

D3.3 第 2 步

此外, 释放份额 FE_{iA} 和 FE_{iN} 假设为 1.0。释放份额 FC_{iA} 和 FC_{iN} 在第一步给出的确定活度浓度中已经考虑了。

D3.4 第 3 步

货包空腔内水的 A_2 等效值 (A_{2eq}) 为:

$$A_{2\text{eq}} = \frac{\sum C_i}{\sum (C_i/A_{2i})}$$

对于第 1 步中所列放射性核素：

$$\begin{aligned} A_{2\text{eq}} &= \frac{1.77 \times 10^{-2}}{7.31 \times 10^{-2}} \\ &= 0.24 \text{ TBq} \end{aligned}$$

同上，正常运输条件下的 R_N 和运输事故条件下的 R_A 有如下关系式：

$$\begin{aligned} R_N &= \frac{A_{2\text{eq}} \times 10^{-6}}{3600} \\ &= 6.7 \times 10^{-11} \text{ TBq} \cdot \text{s}^{-1} \\ R_A &= \frac{A_{2\text{eq}}}{7 \times 24 \times 3600} \\ &= 4.0 \times 10^{-7} \text{ TBq} \cdot \text{s}^{-1} \end{aligned}$$

D3.5 第 6 步

从图 1 中“液体”直接进行下去。活度浓度由上述第一步给出。

$$C_A = C_N = 1.77 \times 10^{-2} \text{ TBq} \cdot \text{m}^{-3}$$

D3.6 第 7 步

$$\begin{aligned} L_N &= \frac{R_N}{C_N} \\ L_N &= \frac{6.7 \times 10^{-11}}{1.77 \times 10^{-2}} \\ &= 3.80 \times 10^{-9} \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} L_A &= \frac{R_A}{C_A} \\ L_A &= \frac{4.0 \times 10^{-7}}{1.77 \times 10^{-2}} \\ &= 2.26 \times 10^{-5} \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1} \end{aligned}$$

D3.7 第 8 步

由第 B6 条来计算漏孔直径。

$$L = \frac{\pi}{128} \times \frac{D^4}{\mu a} (P_u - P_d)$$

在正常运输条件和运输事故条件下运输货包的温度压力状态和物理性质如下：

状态和物理性质	正常运输条件	运输事故条件
温度 T , K	380	480

内压 P_u , Pa	4.32×10^5	2.99×10^5
外压 P_e , Pa	2.50×10^4	1.013×10^5
水的粘度 μ , Pa·s	2.66×10^{-4}	1.27×10^{-4}
漏孔长度 a , m	1.2×10^{-2}	1.2×10^{-2}

$$L_N = 3.80 \times 10^{-9} m^3 \cdot s^{-1}, \text{ 那么 } D_N = 3.32 \times 10^{-5} m$$

$$L_A = 2.26 \times 10^{-5} m^3 \cdot s^{-1}, \text{ 那么 } D_A = 1.48 \times 10^{-4} m$$

D3.8 第 9 步

D_N 小于 D_A , 那么 Q 由 D_N 确定, 用公式 (B1) 来确定 Q_{SLR} 。

对于空气, 确定 Q_v :

$$P_u = 1.013 \times 10^5 \text{ Pa}$$

$$P_d = 0.0 \text{ Pa}$$

$$\mu = 1.85 \times 10^{-5} \text{ Pa} \cdot \text{s}$$

$$a = 1.2 \times 10^{-2} \text{ m}$$

$$D_N = 3.3 \times 10^{-5} \text{ m}$$

代入: $Q_v = 6.9 \times 10^{-4} \text{ Pa} \cdot \text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$

对于空气, 确定 Q_m :

$$R = 8.31 \text{ J} \cdot \text{mol}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$$

$$T = 298 \text{ K}$$

$$M_{(\text{空气})} = 0.029 \text{ kg} \cdot \text{mol}^{-1}$$

$$P_u = 1.013 \times 10^5 \text{ Pa}$$

$$P_d = 0.0 \text{ Pa}$$

$$a = 1.2 \times 10^{-2} \text{ m}$$

$$D_N = 3.8 \times 10^{-5} \text{ m}$$

代入

$$Q_m = 2.2 \times 10^{-5} \text{ Pa} \cdot \text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$$

那么, $Q_{SLR} = 7.3 \times 10^{-4} \text{ Pa} \cdot \text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1} \text{ SLR}$

D3.9 第 10 步

在第 9 步结果基础上, 确定相应阶段的泄漏率 Q_{TD} 、 Q_{TF} 、 Q_{TS} 和 Q_{TP} , 以便满足如下标准状态; $Q = 7.3 \times 10^{-4} \text{ Pa} \cdot \text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1} \text{ SLR}$

D4 双 O 形圈密封的气压升高检验

D4.1 本例目的在于阐明利用双 O 形圈密封原理如何提供一个简单的是否进行装运前泄漏检验的判断方法。双 O 形圈密封的优点是检验时气体体积很小，使得检验时间减至最短，也不需要高灵敏度的检验仪器，如果应用气压升高法而不用气压降低法，那么气体温度变化的影响也可以减至最小。同时，检测程序全面简化意味着检测人员仅需要需很少的资格培训。

货包用法兰接头密封，法兰连接装有两个 O 形圈，在两 O 形圈之间带有泄漏检验口。本例中假设装运前泄漏检验所要求的灵敏度为 $10^{-4} \text{ Pa}\cdot\text{m}^3\cdot\text{s}^{-1}\text{SLR}$ ，检验时气体体积为 $1.5\times 10^{-5}\text{m}^3$ 。

检验步骤及其顺序如图 1 所示。

D4.2 第 11 步

从表 A1 选择气压升高检验法：

检验泄漏率	$Q_{\text{TS}}=10^{-4} \text{ Pa}\cdot\text{m}^3\cdot\text{s}^{-1}$
检验体积	$1.5\times 10^{-5} \text{ m}^3$
规定初始压力	25000 Pa
规定最大升压	10000 Pa
规定检验时间	1800 s

有必要应用公式 (B12) 来核查规定的条件是否满足所要求的已知检验体积的检验泄漏率。

代入：

$$V=1.5\times 10^{-5}\text{m}^3$$

$$H=1800\text{s}$$

$$P_2=25\ 000 \text{ Pa}$$

$$P_1=35\ 000 \text{ Pa}$$

假设： $T_0=298\text{K}$ ， $T_1=T_2=T_0$

$$Q = \frac{1.5 \times 10^{-5}}{1800} (35000 - 25000) = 8.3 \times 10^{-5} \text{ Pa}\cdot\text{m}^3\cdot\text{s}^{-1}$$

通过利用公式 (B2) 计算标准化泄漏率。

对于参考条件：

$$p_{uSLR} = 1.013 \times 10^5 \text{ Pa}$$

$$p_{dSLR} = 0.0 \text{ Pa}$$

对于测试条件:

$$p_u = 1.013 \times 10^5 \text{ Pa}$$

$$p_d = 30\,000 \text{ Pa (测试开始和结束时的数值的平均值)}$$

当参考条件 (μ_{SLR}) 和测试条件 (μ) 的温度相同时, 气体的粘度相同:

$$Q_{SLR} = Q \frac{\mu}{\mu_{SLR}} \times \frac{(p_{uSLR}^2 - p_{dSLR}^2)}{p_u^2 - p_d^2}$$

$$Q_{SLR} = 9.1 \times 10^{-5} \text{ Pa} \cdot \text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1} \text{SLR}$$

此结果表明规定的检验条件能满足检验泄漏率的要求。

为了阐明检验气体温度变化的影响, 假设: $T_0 = T_2 = 298\text{K}$, $T_1 = 293\text{K}$

$$Q = \frac{1.5 \times 10^{-5} \times 298}{1800} \left(\frac{35000}{293} - \frac{25000}{298} \right) = 8.8 \times 10^{-5} \text{ Pa} \cdot \text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$$

应用公式 (B2), 标准化泄漏率为:

$$Q_{SLR} = 9.7 \times 10^{-5} \text{ Pa} \cdot \text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1} \text{SLR}$$

该结果表明检验中气体温度的变化对检验灵敏度影响很小 (此结论的例外见 C6)。如果检验气体体积是 $1.5 \times 10^{-3} \text{m}^3$ 而不是 $1.5 \times 10^{-5} \text{m}^3$, 不仅检验时间必须增加到 50h, 而且允许的压力升高值必须减少至 100Pa, 才能维持相同的检验灵敏度。然而如果允许压力升高值减小, 一些检验气体温度的变化可能较明显, 如下式:

$$Q = \frac{1.5 \times 10^{-3} \times 298}{1800} \left(\frac{25100}{298} - \frac{25000}{298} \right) = 8.3 \times 10^{-5} \text{ Pa} \cdot \text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$$

应用公式 (B2), 标准化磁漏率为:

$$Q_{SLR} = 8.9 \times 10^{-5} \text{ Pa} \cdot \text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1} \text{SLR}$$

但如果 $T_0 = T_2 = 298\text{K}$, $T_1 = 293\text{K}$,

$$Q = \frac{1.5 \times 10^{-3} \times 298}{1800} \left(\frac{25100}{293} - \frac{25000}{298} \right) = 4.4 \times 10^{-4} \text{ Pa} \cdot \text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$$

应用公式 (B2), 标准化泄漏率为:

$$Q_{SLR} = 4.7 \times 10^{-4} \text{ Pa} \cdot \text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1} \text{SLR}$$

D5 双 O 形圈密封的气压降低检验

D5.1 本例将说明在利用双 O 形圈密封的两圆之间具有较小空间的包容容器泄漏检

验中应用气压降低法。

本例还指明了温度变化对气压降低法灵敏度的影响，该检验方法简单并能应用某些压力指示仪，但使用数字显示的高灵敏度压力传感器和相应电子仪器为好，这类传感器还能与可自动计算泄漏率（并修正温度影响）和标准化泄漏率（SLR）的自动数据处理器相连接。

本例泄漏检验的对象是用双 O 形圈（ $\Phi 200\text{mm}$ ）密封法兰盖并带有压力传感器（准确度为 0.1%）的实际货包中的包容容器。

检验的合格标准是泄漏率应小于 $1.0 \times 10^{-5} \text{ Pa} \cdot \text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1} \text{SLR}$ 。

D5.2 检验数据：

两 O 形圈间空间： $V=5.0 \times 10^{-6} \text{ m}^3$

大气压力： $P_a=1.013 \times 10^5 \text{ Pa}$

包容容器内部压力： $P_a=1.013 \times 10^5 \text{ Pa}$

初始压力： $P_1=2.0 \times 10^5 \text{ Pa}$

检验时间： $H=10 \text{ min}$

包容容器和检验气体温度 $T_1=36^\circ\text{C}$ （309K，假设在检验过程中为常数）

注：本例中，包容容器内部为大气压力，因此出口压力也为大气压力。

D5.3 检验结果

检验结束时压力： $P_2=1.996 \times 10^5 \text{ Pa}$

压力降低值： $P_1-P_2=0.004 \times 10^5 \text{ Pa}$

D5.4 泄漏率的确定

利用公式（B12）计算泄漏率：

$$Q=3.3 \times 10^{-6} \text{ Pa} \cdot \text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$$

D5.5 标准化泄漏率的确定

标准化泄漏率是通过适用于层流泄漏（绝大多数实际情况下）的公式（B2）计算：

$$P_{uy}=1.998 \times 10^5 \text{ Pa} \text{（平均）}$$

$$P_{dy}=1.013 \times 10^5 \text{ Pa}$$

$$\mu_y=1.89 \times 10^{-4} \text{ Pa} \cdot \text{s} \text{（309K 时空气）}$$

脚标 x 表示在 SLR 条件下:

$$P_{ux}=1.013 \times 10^5 \text{Pa}$$

$$P_{dx}=0.0 \text{Pa}$$

$$\mu_x=1.85 \times 10^5 \text{Pa} \cdot \text{s}^{-1} \text{ (298K 时空气)}$$

上述检验的标准化泄漏率出公式 (B2) 计算:

$$Q_{SLR}=1.1 \times 10^{-6} \text{ Pa} \cdot \text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1} \text{SLR}$$

该泄漏率比合格标准低一个数量级。

D5.6 温度变化的影响

假设无泄漏且双 O 形圈密封空间内空气的压力变化仅与未检出的温度降低 0.5°C (从 309K 开始) 有关, 温度变化 0.5°C 可使压力由 P_1 下降至 $P_2=308.5/309 \times P_1=1.99676 \times 10^5 \text{Pa}$ (即变化 324Pa)。重复前面的计算过程, 即可看出温度变化的影响。

对于泄漏率的计算, 假设包容系统和检验气体的温度 $T_1=36^\circ\text{C}$ (309K) 在检验过程中为一定值 (即 $T_2=309\text{K}$)。

$$Q_{SLR}=0.95 \times 10^{-6} \text{ Pa} \cdot \text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1} \text{SLR}$$

由此可以看出, 在双 O 形圈密封空间内的空气温度变化 0.5°C , 将引起 $0.95 \times 10^{-6} \text{ Pa} \cdot \text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1} \text{SLR}$ 的表观泄漏。相对于本例的合格标准 $1.0 \times 10^{-5} \text{ Pa} \cdot \text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1} \text{SLR}$ 来说。这一“表观”泄漏率是不显著的。应该注意的是, 对于一个时间较短的检验, 因为包容容器的温度惰性, 将使温度变化小于 0.5°C 。即使环境强度变化几度, 上述情况也适用。

D6 气压升高检验法和气压降低检验法的比较

本例目的在于说明当考虑测量不确定度时气体升高法优于气压降低法。分析以公式 (B12) 为依据,

$$Q = \frac{VT_0}{H} \left(\frac{p_1}{T_1} - \frac{p_2}{T_2} \right)$$

气压降低检验条件:

$$\begin{aligned}
V &= 1\text{m}^3 \\
H &= 1.728 \times 10^5 \text{s} \\
T_0 &= 298\text{K} \\
p_1 &= 1.0 \times 10^6 \text{Pa} & E_p &= \pm 5 \text{Pa} \\
p_2 &= 0.9995 \times 10^5 \text{Pa} & E_p &= \pm 5 \text{Pa} \\
T_1 &= 293\text{K} & E_T &= \pm 0.1 \text{K} \\
T_2 &= 293\text{K} & E_T &= \pm 0.1 \text{K}
\end{aligned}$$

E_p 和 E_T 分别表示压力和温度的测量不确定度 (E_p , 表示 0.0005% 的准确度)。

气压升高检验条件:

$$\begin{aligned}
V &= 1\text{m}^3 \\
H &= 1.728 \times 10^5 \text{s} \\
T_0 &= 298\text{K} \\
p_1 &= 10\text{Pa} & E_p &= \pm 5 \text{Pa} \\
p_2 &= 510\text{Pa} & E_p &= \pm 5 \text{Pa} \\
T_1 &= 293\text{K} & E_T &= \pm 0.1 \text{K} \\
T_2 &= 293\text{K} & E_T &= \pm 0.1 \text{K}
\end{aligned}$$

E_p 表示 1% 的准确度。

本例中, V 、 T_0 和 H 在气压降低法和气压升高法中均假设为常数。那么, 公式 (B12) 可以简化为:

$$\begin{aligned}
Q &= C \left(\frac{p_2}{T_2} - \frac{p_1}{T_1} \right) \\
C &= \frac{VT_0}{H}
\end{aligned}$$

首先, 不考虑测量不确定度, 代入得:

$$Q = 1.706 \times C$$

其次, 考虑测量不确定度, 该方程可写为:

$$Q_D = C \left(\frac{p_1 + E_p}{T_1 - E_T} - \frac{p_2 - E_p}{T_2 + E_T} \right)$$

式中, Q_D 指的是气压降低检验。

另外, 交换脚标 1 和 2, 得:

$$Q_R = C \left(\frac{p_2 + E_p}{T_2 - E_T} - \frac{p_1 - E_p}{T_1 + E_T} \right)$$

式中 Q_R 指的是气压升高检验。

代入所给检验条件：

$$Q_D = 4.070 \times C$$

$$Q_R = -1.741 \times C$$

E_p 和 E_T 产生的总不确定度百分数为：

对于气压降低法： $E_D = |(Q - Q_D)/Q| = \text{约} 140\%$

对于气压升高法： $E_R = |(Q - Q_R)/Q| = \text{约} 2\%$

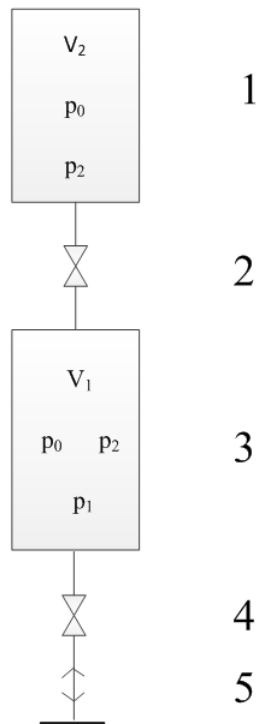
结论如下：尽管气压降低法使用了具有较高准确度（0.0005%）的压力计，但是气压升高法得到的结果却较好。

D7 气压升高法或气压降低法中未知检验体积的确定

D7.1 概述

本例目的在于说明如何利用气压升高法或气压降低法中使用的检验设备来确定未知检验体积。所用原理是气体玻义尔定律，本例仅适用于恒温条件。

按图 D1 准备测量装置。



1-未知体积；2-阀门1；3-已知体积；4-阀门2；5-气体进出口

V_1 -已知体积； V_2 -待测体积； p_0 - V_1 和 V_2 的初始压力（阀门 1 开启，阀门 2 为关闭）； p_1 - V_1 加压或抽空后， V_1 的压力（阀门 1，阀门 2 均为关闭）； p_2 - V_1 ， V_2 的最后压力，（阀门 1 开启，阀门 2 关闭）

图 D1 计算未知检验体积的示意图

D7.2 方法

- 打开阀门 1，测压力 p_0 ；
- 关闭阀门 1，打开阀门 2；
- V_1 抽真空或注入气体加压；
- 关闭阀门 2，测定压力 p_1 ；
- 打开阀门 1，测定压力 p_2 ；
- 用下列方程来确定 V_2 ；

$$p \times V = \text{常数}$$

$$(p_1 - p_0) \times V_1 = (p_2 - p_0) \times (V_1 + V_2)$$

$$(p_1 - p_0) \times V_1 = (p_2 - p_0) \times V_1 + (p_2 - p_0) \times V_2$$

$$(p_1 - p_0) \times V_1 - (p_2 - p_0) \times V_1 = (p_2 - p_0) \times V_2$$

$$V_1 \times [(p_1 - p_0) - (p_2 - p_0)] = (p_2 - p_0) \times V_2$$

$$V_1 \times (p_1 - p_0 - p_2 + p_0) = (p_2 - p_0) \times V_2$$

$$V_1 \times (p_1 - p_2) = (p_2 - p_0) \times V_2$$

$$V_2 = \frac{V_1 \times (p_1 - p_2)}{p_2 - p_0}$$

D8 气体渗透

D8.1 概述

本例描述了确定通过弹性材料的气体渗透率的分析方法。

渗透系数 P 由下式计算：

$$P = S \times DC$$

式中：

P —渗透系数， $\text{m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$ ；

S —溶解系数，在标准温度压力下，每立方米材料中含有的气体量， m^3 ；

DC —扩散系数， $\text{m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$ 。

气体通过某种弹性材料的稳态渗透率由下式表示：

$$Q_p = P \times A / l \times \Delta p$$

式中：

Q_p —渗透率， $\text{Pa} \cdot \text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ ；

A —垂直于气流的渗透材料面积， m^2 ；

l —渗透材料厚度， m ；

ΔP —气体在1两侧的分压差， Pa 。

对于O形圈，因为 $A = L \times l$ （ L 是O形圈的长度， l 是其环直径）并考虑下述作用相反的两个简化：

a) O形圈的压缩减小了面积，并扩大了渗透材料的厚度。

b) 非方形截面减小了渗透材料的有效厚度，则公式简化为：

$$Q_p = P \times L \times \Delta p$$

渗透和扩散系数与热力学活化能的关系由以下方程描述；：

$$P = C_p \times e^{-\frac{E_p}{RT}}$$

$$DC = C_D \times e^{-\frac{E_D}{RT}}$$

式中：

C_p 、 C_D —常数因子， $\text{m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$ ；

E_p 、 E_D —对应于渗透和扩散的热力学活化能， $\text{J} \cdot \text{mol}^{-1}$ ；

R —气体常数， $\text{J} \cdot \text{mol}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$ ；

T —渗透材料的绝对温度， K 。

D8.2 例 1：渗透引起的活度释放（氙）

辐照燃料中的重要放射性裂变气体是 ^{85}Kr ，它可以从损坏的燃料棒中释放到箱体空腔中，然后通过弹性密封材料渗透到环境中。

氙的典型渗透系数为：

	$P(23^\circ\text{C}=296\text{K})$ $\text{m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$	E_p $\text{kJ} \cdot \text{mol}^{-1}$	$P(T)$ $\text{m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$
硅橡胶	9.5×10^{-10}	8.8	$3.4 \times 10^{-8} \times e^{-1060/T}$

氟橡胶	5.0×10^{-13}	55.7	$3.4 \times 10^{-3} \times e^{-6700/T}$
-----	-----------------------	------	---

注：需要考虑弹性材料老化对渗透特性的影响。

在气体温度为 100℃ (373K) 时，箱体空隙内 ^{85}Kr 的分压可达到 100Pa。

在 373K (100℃) 下，尺寸 1000mm×10mm (长度×直径) 密封长度为 $L = \pi \times (1 + 0.01)\text{m} = 3.2\text{m}$ 的硅橡胶 O 形密封圈所允许的稳态氦渗透率为：

$$\begin{aligned} Q_P &= P \times L \times \Delta p \\ &= 2.0 \times 10^{-9} \text{m}^2 \cdot \text{s}^{-1} \times 3.2 \text{m} \times 100 \text{Pa} \\ &= 6.4 \times 10^{-7} \text{Pa} \cdot \text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1} (373\text{K}) \end{aligned}$$

^{85}Kr 的摩尔活度为 $1.234 \times 10^{15} \text{Bq} \cdot \text{mol}^{-1}$ 。利用理想气体定律，在 273K 和 $1.013 \times 10^5 \text{Pa}$ 时，单位体积 ^{85}Kr 的活度为 $5.51 \times 10^{16} \text{Bq} \cdot \text{m}^{-3}$ 。

在 373K, $1.013 \times 10^5 \text{Pa}$ 时，是 $4.03 \times 10^{16} \text{Bq} \cdot \text{m}^{-3}$ 或 $3.98 \times 10^{11} \text{Bq} \cdot \text{m}^{-3} \cdot \text{Pa}^{-1}$

在本例中， ^{85}Kr 被认为是与其他放射性裂变气体的混合气体的主要部分。因此，在正常运输条件下，活度释放限值应使用 $10^{-6} \times 10A_2 \times h^{-1}$ 或 $2.8 \times 10^4 \text{Bq} \cdot \text{s}^{-1}$ [见 2012 年版国际原子能机构 (IAEA) 放射性物质安全运输条例第 659 段]。

因此氦的渗透率为：

$$\begin{aligned} Q_P &= 6.4 \times 10^{-7} \text{Pa} \cdot \text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1} \times 3.98 \times 10^{11} \text{Bq} \cdot \text{m}^{-3} \cdot \text{Pa}^{-1} \\ &= 2.55 \times 10^5 \text{Bq} \cdot \text{s}^{-1} > 10^{-6} \times A_2 \times h^{-1} \end{aligned}$$

此值是不能接受的。

改用同样大小的氟橡胶， $P(100^\circ\text{C}) = 5.4 \times 10^{-11} \text{m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$ (见上面数据)，这时导出的氦的渗透率为：

$$\begin{aligned} Q_P &= 5.4 \times 10^{-11} \text{m}^2 \cdot \text{s}^{-1} \times 3.2 \text{m} \times 100 \text{Pa} \times 3.98 \times 10^{11} \text{Bq} \cdot \text{m}^{-3} \cdot \text{Pa}^{-1} \\ &= 6.88 \times 10^3 \text{Bq} \cdot \text{s}^{-1} < 10^{-6} \times 10A_2 h^{-1} \end{aligned}$$

此值是可以接受的。

D8.3 例 2：气体渗透检验（氦）

氦的扩散和典型渗透系数的示例：

	$\frac{DC(T)}{\text{m}^2 \cdot \text{s}^{-1}}$	$\frac{P(T)}{\text{m}^2 \cdot \text{s}^{-1}}$
硅橡胶	$3.3 \times 10^{-7} \times e^{-1160/T}$	$1.9 \times 10^{-7} \times e^{-1965/T}$
氟橡胶	$6.6 \times 10^{-6} \times e^{-2770/T}$	$3.5 \times 10^{-6} \times e^{-3625/T}$

首先考虑稳态渗透，O形圈的大小仍是1000mm×10mm，但 $\Delta P=1.013 \times 10^5 \text{Pa}$ 。

$$Q_p(\text{He, 硅橡胶, } 23^\circ\text{C}) = 2.5 \times 10^{-10} \text{ m}^2 \cdot \text{s}^{-1} \times 3.2 \text{ m} \times 10^5 \text{ Pa} = 8.0 \times 10^{-5} \text{ Pa} \cdot \text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$$

$$Q_p(\text{He, 氟橡胶, } 23^\circ\text{C}) = 1.7 \times 10^{-11} \text{ m}^2 \cdot \text{s}^{-1} \times 3.2 \text{ m} \times 10^5 \text{ Pa} = 5.4 \times 10^{-6} \text{ Pa} \cdot \text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$$

$$Q_p(\text{He, 氟橡胶, } 107^\circ\text{C}) = 2.5 \times 10^{-10} \text{ m}^2 \cdot \text{s}^{-1} \times 3.2 \text{ m} \times 10^5 \text{ Pa} = 8.0 \times 10^{-5} \text{ Pa} \cdot \text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$$

虽然上述这些计算只给出了近似的数量级，但在进行某些评估时有用。对于一些精确设计的评估而言，测得每一种气体在有关温度范围内通过某种弹性材料的渗透系数 P 值必将是有益的。

在氦泄漏检验中， $t=0$ 时开始在检验区的一侧用氦气加压。如果没有泄漏孔，则在另一侧检验不到氦气。在一些类似于弹性O形圈的渗透屏障情况下，渗透率将由无限小值开始，随时间而增大，可由下式表示：

$$Q_p'(t) = Q_p \times \frac{2l}{\sqrt{\pi DCt}} e^{-\frac{l^2}{4DCt}}$$

式中：

t —施加氦气压力后的时间，s；

Q_p —稳态渗透率， $\text{Pa} \cdot \text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ ；

l —屏障厚度（等于O形圈的环直径），m；

DC —扩散系数， $\text{m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$ ；

当 $Q_p'(t) \approx 0.9 \times Q_p$ 时，在 $DC \times t \times l^2 \leq 0.3$ 时该方程成立，然后 $Q_p'(t)$ 随时间的变化趋近于 Q_p 。

使用上述的O形密封圈在室温下进行氦气泄漏检验，做如下估算：

$$DC(\text{He, 硅橡胶, } 23^\circ\text{C}) = 6.6 \times 10^{-9} \text{ m}^2 \cdot \text{s}^{-1}, l = 10^{-2} \text{ m}, t = 15 \text{ min};$$

$$\text{那么, } DC \times t \times l^2 \approx 0.06$$

$$Q_p'(\text{硅橡胶, } 15 \text{ min}) \approx 0.07 Q_p(\text{硅橡胶}) \approx 5.5 \times 10^{-6} \text{ Pa} \cdot \text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$$

即是通过同样面积的氟橡胶密封圈的稳态氦气渗透率。

$$DC(\text{He, 氟橡胶, } 23^\circ\text{C}) = 5.7 \times 10^{-10} \text{ m}^2 \cdot \text{s}^{-1}, l = 10^{-2} \text{ m}, t = 1.5 \text{ h};$$

那么， Q_p' （氟橡胶，1.5h） $\approx 0.002 Q_p$ （氟橡胶） $\approx 1.10 \times 10^{-8} \text{ Pa} \cdot \text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ ，正好达到技术密封的水平（参见附录D的第D6条）。

本例表明，如果 $D \times t \times l^2$ 值保持很小、使用低扩散系数的弹性材料、厚的密封层

且进行快速测量，氦气泄漏检验结果已排除了渗透作用的影响。对于实际的氦气泄漏检验，如果安装了硅橡胶 O 形密封圈的话，有必要采取预防措施。氦气在其他常用的弹性密封材料中的渗透和扩散与氟橡胶相类似。

D9 气溶胶泄漏

本例目的是比较气体中固体粒子的散失和检验气体泄漏率的关系。

GB11806-2019 规定在正常运输条件下，B 型货包应当限制放射性物质的散失在 $10^{-6} \times A_2 \times h^{-1}$ 以内。

^{240}Pu 的 A_2 值为 $2 \times 10^{-3} \text{TBq}$ ，因此它从容器中散失必须小于每小时 $2 \times 10^{-9} \text{TBq}$ ， ^{240}Pu 的质量比活度为 $8.4 \text{TBq} \cdot \text{kg}^{-1}$ ，相当于 $7.4 \text{TBq} \cdot \text{kg}^{-1}$ 的 PuO_2 (氧的原子量为 16)。那么， PuO_2 的质量泄漏率应当小于 $1.35 \times 10^{-10} \text{kg} \cdot \text{h}^{-1}$ 。

本例中，空腔内悬浮气溶胶浓度为每立方米 10^8 个 $^{240}\text{PuO}_2$ 粒子 (粒子总体平均直径 $2 \times 10^{-6} \text{m}$ ，比重 $1.15 \times 10^4 \text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$)，假设这些粒子是无孔球形粒子，平均质量约为 $4.8 \times 10^{-14} \text{kg}$ 。

D 9.1 第一种情况

如果在驱动超压 10^5Pa 下有一个泄漏率为 $10^{-6} \text{Pa} \cdot \text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ 的单一密封缺口，且在漏孔中气溶胶的稀释可被忽略，那么体积泄漏率为 $10^{-11} \text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ ，假设在漏孔中为气溶胶无偏取样，则此值相当于每小时 4 个粒子或质量泄漏率 $2 \times 10^{-13} \text{kg} \cdot \text{h}^{-1}$ (即比限定值低三个数量级)。

D 9.2 第二种情况

如果保持上述条件和假设，但对泄漏率为 $10^{-3} \text{Pa} \cdot \text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1} \text{SLR}$ 的单一密封缺口，那么体积泄漏率相当于 $10^{-8} \text{Pa} \cdot \text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ 或每小时 3600 个粒子，对应的质量泄漏率为 2×10^{-10} (即大约限值的 2 倍)。

然而，如果容器中产生质量中位直径 $7 \times 10^{-6} \text{m}$ 的气溶胶粒子 (与前述浓度相同)，则每个粒子 (假设均为无孔球形) 的质量约为 $2.1 \times 10^{-12} \text{kg}$ 。

将该数值用于上述第一种情况 (泄漏率 $10^{-6} \text{Pa} \cdot \text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1} \text{SLR}$)，预期每小时 4 个粒子的气溶胶泄漏率相当于约 $8 \times 10^{-12} \text{kg} \cdot \text{h}^{-1}$ 的质量泄漏率 (即比限值低一个数量级)。

将同样数值用于第二种情况 (泄漏率 $10^{-3} \text{Pa} \cdot \text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1} \text{SLR}$)，预期每小时 3600 个粒子的气溶胶泄漏率相当于 $8 \times 10^{-9} \text{kg} \cdot \text{h}^{-1}$ 的质量泄漏率 (即高于允许的限定值两个数

量级)。

D10 气体泄漏率和液体泄漏率的相关性

D10.1 概述

本例目的在于表明放射性内容物总量的确定要仔细考虑，以及如何利用标准化泄漏率（SLR）来帮助选择泄漏检验方法。

包容系统是盛有 200mL 含 555TBq 的 ^{99}Mo ($T_{1/2}=66\text{h}$)、35TBq 的 ^{132}I ($T_{1/2}=2.3\text{h}$) 溶液的桶。 ^{99}Mo 衰变成 $^{99\text{m}}\text{Tc}$ ($T_{1/2}=6.0\text{h}$)，确定其运输事故条件下的标准化泄漏率。

其步骤及其序列在图 1 中定义。

D10.2 第 1 步

所含放射性核素衰变的时间函数曲线见图 D2。因为放射性核素的半衰期相对较短，所以这一信息很重要。

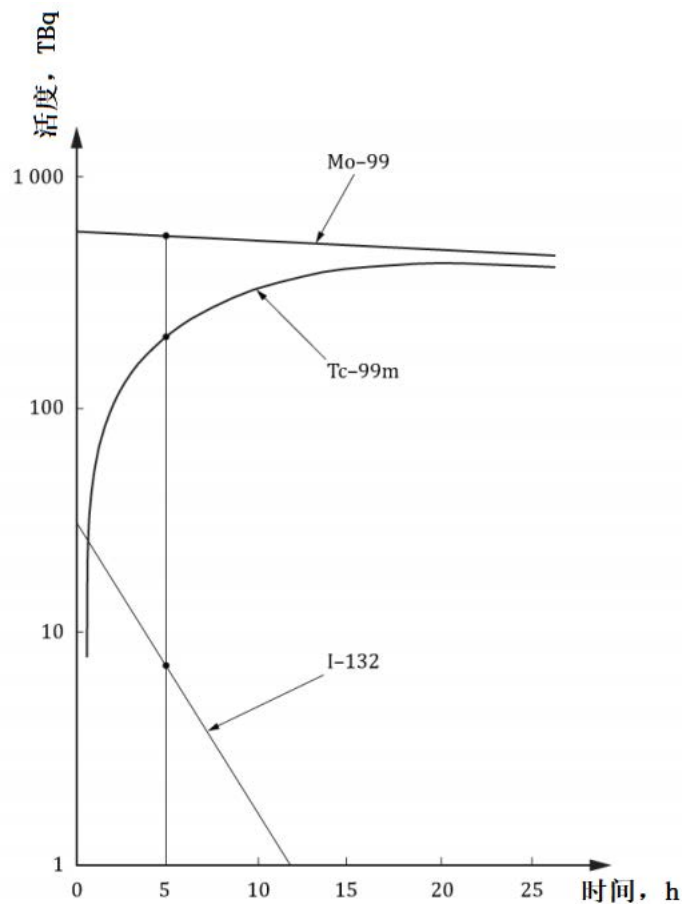


图 D2 ^{99}Mo 、 $^{99\text{m}}\text{Tc}$ 、 ^{132}I 的衰变曲线图

D10.3 第 2 步

假设释放份额 FC_i 和 FE_i 值为 1.0。

D10.4 第 3 步

在本例中，时间为 5h，活度如下：

Mo-99	527TBq	$A_2=0.6\text{TBq}$
Tc-99m	207TBq	$A_2=4.0\text{TBq}$
I-132	8TBq	$A_2=0.4\text{TBq}$
	742 TBq	

混合物的等效 A_2 值为：

$$A_{2\text{eq}} = \frac{\sum A_i}{\sum (A_i/A_{2i})} = \frac{527 + 207 + 8}{527/0.6 + 207/4.0 + 8/0.4} = 0.781 \text{ TBq}$$

$$R_A = A_{2\text{eq}} (\text{在一周内}) = 1.29 \times 10^{-6} \text{ TBq} \cdot \text{s}^{-1}$$

D10.5 第 6 步

因为各组分总活度是 742 TBq，体积是 200mL 或 $2.0 \times 10^{-4} \text{ m}^3$

则： $C_A=3.71 \times 10^6 \text{ TBq} \cdot \text{m}^{-3}$

D10.6 第 7 步

$$L_A=3.48 \times 10^{-13} \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$$

D10.7 第 8 步

为确定等效空气流量，参考 B8 来确定漏孔直径 D_A 。

假设：

$$p_u=2.026 \times 10^5 \text{ Pa}$$

$$p_d=1.013 \times 10^5 \text{ Pa}$$

$$a=5 \times 10^{-3} \text{ m}$$

$$\mu=5 \times 10^{-4} \text{ Pa} \cdot \text{s}$$

$$L_A=3.48 \times 10^{-13} \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$$

那么，

$$D_A=4.33 \times 10^{-6} \text{ m}$$

D10.8 第 9 步

由公式 (B1) 来确定标准化泄漏率。

假设:

$$D_A=4.33 \times 10^{-6} \text{ m}$$

$$p_u=1.013 \times 10^5 \text{ Pa, (SLR 状态, 空气)}$$

$$p_d=0.0 \text{ Pa 绝对压力 (SLR 状态, 空气)}$$

$$a=5 \times 10^{-3} \text{ m}$$

$$\mu=1.85 \times 10^{-5} \text{ Pa} \cdot \text{s (空气, 298K)}$$

$$T=298 \text{ K (SLR 状态, 空气)}$$

$$M=0.029 \text{ kg} \cdot \text{mol}^{-1}$$

$$\text{那么: } Q_{A(\text{SLR})} = 4.8 \times 10^{-7} + 2.0 \times 10^{-7} = 6.8 \times 10^{-7} \text{ Pa} \cdot \text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1} \text{ SLR}$$

(粘滞流) (分子流)

注: 此结果表明存在过渡流状态, 即粘滞流和分子流相结合的模式。

D10.9 第 10 步

如果使用气体泄漏检验法, 第 9 步的结果表明定量氦气泄漏检验法是适用的, 见表 A1。该方法也可以用于设计验证。

然而要进行装运的验证, 必须考虑液体内容物对某些漏孔的阻塞。这样做有两个原因, 首先包容系统中加注放射性液体内容物后不可能进行氦气泄漏检验, 其次, 可以证实 (不在本例中进行) 粘稠的液体内容物将堵塞 Q 值约为 $10^{-6} \text{ Pa} \cdot \text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1} \text{ SLR}$ 的单一漏孔。因此对于装运前验证, 在包容系统内完成气压升高法检验是可能和可行的。

D11 不同气体泄漏率之间的相关性

D11.1 本例目的是描述不同气体 (包括混合气体) 泄漏率之间的相互关系

包容系统是一个含有 $1.85 \times 10^{15} \text{ Bq}$ 的氟气, 压力为 $2.026 \times 10^5 \text{ Pa}$ 的容器。示踪气体是 50% 氮、50% 空气的气体混合物。检验方法是包层抽真空气体探测器法, 见表 A2。确定在正常运输条件下示踪气体的容许泄漏率。假设所有气流都是纯分子流, 标准状态下氟气的活度浓度是 $8.772 \times 10^4 \text{ TBq} \cdot \text{m}^{-3}$ 。

容器采用金属圆环密封, 氟通过容器壁的渗透忽略不计。

参照图 1 进行以下步骤。

D11.2 第 1 步

放射性内容物是氚气，总活度为 $1.85 \times 10^{15} \text{Bq}$ 。

D11.3 第 2 步

假设释放份额 FC_i 和 FE_i ，做均为 1.0，

D11.4 第 3 步

$$A_2 = 40 \text{TBq}$$

$$R_N = 1.11 \times 10^{-8} \text{TBq} \cdot \text{s}^{-1}$$

D11.5 第 4 步、第 5 步

可以省略，因为已忽略氚通过桶壁的渗透。

D11.6 第 6 步

介质的活度浓度为：

$$C_N = 8.772 \times 10^4 \left(\frac{2.026 \times 10^5}{1.013 \times 10^5} \right) = 1.754 \times 10^5 \text{TBq} \cdot \text{m}^{-3} \text{（工作状态下）}$$

D11.7 第 7 步

$$L_N = R_N / C_N = 6.33 \times 10^{-14} \text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1} \text{（工作状态下）}$$

对气体，泄漏是压力乘体积除时间的结果，因此 L_N 可以交换成 Q_N ：

$$\begin{aligned} Q_N &= (2.026 \times 10^5) \times (6.33 \times 10^{-14}) \\ &= 1.28 \times 10^{-8} \text{Pa} \cdot \text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1} \text{（氚、工作状态下）} \end{aligned}$$

D11.8 第 8 步

用公式 (B1) 来计算 D_N ，但本例该计算是不必要的。

D11.9 第 9 步

因为只考虑分子流， $Q_{N(\text{SLR})}$ 能直接用公式 (B3) 由 Q_N 导出。

为了转化为在标准状态下空气的泄漏率，令 x 代表空气， y 代表氚气。

因 $T_x = T_y$ ，公式 (B3) 为：

$$Q_x = Q_y \sqrt{\frac{M_y}{M_x}} \times \frac{(p_u - p_d)_x}{(p_u - p_d)_y}$$

对于氚： $M_y = 0.006 \text{kg} \cdot \text{mol}^{-1}$

$$Q_y = Q_N$$

对于空气： $M_x = 0.029 \text{kg} \cdot \text{mol}^{-1}$

$$Q_x = Q_{N(SLR)}$$

$$\text{那么, } Q_{N(SLR)} = 0.445 \times Q_N \times \frac{(p_u - p_d)_x}{(p_u - p_d)_y}$$

式中:

p_u 和 p_d ——气体 x 和 y 的分压。

$$\text{对于空气: } (p_u - p_d)_x = 1.013 \times 10^5 - 0 = 1.013 \times 10^5 \text{ Pa}$$

$$\text{对于氦: } (p_u - p_d)_y = 2.026 \times 10^5 - 0 = 2.026 \times 10^5 \text{ Pa}$$

那么, $Q_{N(SLR)} = 2.91 \times 10^{-9} \text{ Pa} \cdot \text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1} \text{SLR}$ 然而, 如果使用总压力, 那么:

$$(p_u - p_d)_x = 1.013 \times 10^5 \text{ Pa} \text{ 和以前一样, 但:}$$

$$(p_u - p_d)_y = 2.026 \times 10^5 - 1.013 \times 10^5 \text{ Pa}$$

$$Q_{N(SLR)} = 5.8 \times 10^{-9} \text{ Pa} \cdot \text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1} \text{SLR}$$

D11.10 第 10 步

示踪气体为 50% 氮和 50% 空气的混合物。检验中:

$$p_u = 1.013 \times 10^5 \text{ Pa}, \text{ 氮}$$

$$p_u = 1.013 \times 10^5 \text{ Pa}, \text{ 空气}$$

$$p_d = 0 \text{ Pa}$$

首先, 比较氮的泄漏和 $Q_{N(SLR)}$ 。

令 x 代表空气, y 代表氮气。使用公式 (B3), 假设 $T_x = T_y$, 由公式 (B3) 导出:

$$Q_x = Q_y \times \sqrt{\frac{M_y}{M_x}}$$

$$\text{由于 } Q_x = 2.91 \times 10^{-9} \text{ Pa} \cdot \text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1} \text{SLR}$$

$$M_y = 0.004 \text{ kg} \cdot \text{mol}^{-1}$$

$$M_x = 0.029 \text{ kg} \cdot \text{mol}^{-1}$$

$$\text{那么, } Q_y = 7.84 \times 10^{-9} \text{ Pa} \cdot \text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{SHeLR}$$

为了确定混合物的容许检验泄漏率 Q_{TDN} , 需在 Q_y 中引入两个因子。首先, 考虑到实际检验中, 只有混合物中的氮可以被检出, 则, 应通过因子 f 导出:

$$f = 1 + \frac{\sqrt{M_x}}{\sqrt{M_y}} = 1.37$$

其次，本标准要求的泄漏检验方法的灵敏度应是最大容许泄漏率的一半。

那么：

$$Q_{\text{TND}} = Q_y \times \frac{1}{2} \times \frac{1}{1.37} = 2.86 \times 10^{-9} \text{ Pa} \cdot \text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$$

D12 气泡浸泡检验法的灵敏度

本例目的是表明通过漏孔的不同液体和不同压差对产泡率的影响。

包容系统的密封层要经过气泡检验。包容系统用空气加压至 $2.0 \times 10^5 \text{ Pa}$ ，浸入液面深度为 0.1 m ，液体可以是水或乙二醇。

假设有一个直径为 $3 \times 10^{-5} \text{ m}$ 、在工作条件下（ 25° C ）空气泄漏率为 $1.0 \times 10^{-4} \text{ Pa} \cdot \text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ 的单一漏孔。

比较两种浸泡液体的气泡直径和产泡率：

$$g = 9.81 \text{ m} \cdot \text{s}^{-2}$$

$$g_0 = 1 \text{ kg} \cdot \text{m} \cdot \text{N}^{-1} \cdot \text{s}^{-2}$$

$$\rho_1 = 10^3 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3} \text{ (水)}$$

$$\rho_2 = 1.125 \times 10^3 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3} \text{ (乙二醇)}$$

$$\sigma = 7.2 \times 10^{-2} \text{ N} \cdot \text{m}^{-1} \text{ (水/空气)}$$

$$\sigma = 4.8 \times 10^{-2} \text{ N} \cdot \text{m}^{-1} \text{ (乙二醇/空气)}$$

$$\rho_g = 1.184 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3} \text{ (25}^\circ \text{ C 的空气)}$$

首先，根据 B12，气泡内压要克服液体的表面张力：

$$p_u = 2.0 \times 10^5 \text{ Pa}$$

对于水，浸入深度 0.1 m 产生 $0.0098 \times 10^5 \text{ Pa}$ 的压头。

那么， $P_d = 1.013 \times 10^5 + 0.0098 \times 10^5 = 1.023 \times 10^5$

对与空气接触的水：

$$\sigma = 7.2 \times 10^{-2} \text{ N} \cdot \text{m}^{-1}$$

$$D = 3 \times 10^{-5} \text{ m}$$

$$\text{那么, } P_d + \frac{2\sigma}{D} = 1.023 \times 10^5 + 2 \times \frac{7.2 \times 10^{-2}}{3 \times 10^{-5}} = 1.07 \times 10^5 \text{ Pa}$$

该值小于 P_u , 因此可产生气泡, 浸泡液体为乙二醇时可得到同样的结论。

其次, 应用公式 (B10) 估算气泡直径:

对于水,

$$D_B = 1.10 \times 10^{-3} \text{ m}$$

$$V_B \text{ (气泡体积)} = 6.97 \times 10^{-10} \text{ m}^3$$

对乙二醇,

$$D_B = 1.10 \times 10^{-3} \text{ m}$$

$$V_B = 4.08 \times 10^{-10} \text{ m}^3$$

最后, 用公式 (B11) 来估算产泡率:

用下列关系来确定 L ($\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$)

$$Q = P \times L$$

式中:

p ——漏孔出口处的气压 $P = P_d = 1.023 \times 10^5 \text{ Pa}$

那么

$$L = \frac{1.0 \times 10^{-4}}{1.023 \times 10^5} = 9.775 \times 10^{-10} \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$$

且

$$V = 1.4 \text{ s}^{-1} \text{ (水)}$$

$$V = 2.4 \text{ s}^{-1} \text{ (乙二醇)}$$

这些结果表明, 浸泡液体为乙二醇时气泡的直径要比水中气泡的直径小 15%, 而产泡率却高 70%, 因此气泡检验法用乙二醇作为浸泡液体好于用水。

应用乙二醇法常用的步骤是将乙二醇浴槽上方的空间抽真空, 该情况下计算得:

$$V = 220 \text{ s}^{-1}$$

该结果表明, 检验方法的灵敏度提高 100 倍。

D13 氙水的包容

D13.1 本例说明了在正常运输条件下应用气体泄漏检验法和在运输事故条件下应用另一不同方法, 本例还阐明了货包设计和放射性内容物对选择装运前验证泄漏检验

方法的影响。

该货包是由一层外部防护包装和一个装有 200L 活度浓度为 $1.25\text{TBq}\cdot\text{L}^{-1}$ 氟化重水的金属桶组成，金属桶有两个标准的 50mm 开口。为了进行设计验证和装运前验证规定了合适的检验方法。

根据图 1 选行以下步骤。

D13.2 第 1 步

放射性内容物是氟化重水，总活度为 $200\times 1.25=250\text{TBq}$ ，包容系统是一个金属桶，介质是氟化重水。

D13.3 第 2 步

假设释放份额 FC_i 和 FE_i 为 1.0。

D13.4 第 3 步

$A_2=40\text{TBq}$ ，（氟化重水）

$$R_N=1.11\times 10^{-8}\text{TBq}\cdot\text{s}^{-1}$$

$$R_A=6.61\times 10^{-5}\text{TBq}\cdot\text{s}^{-1}$$

D13.5 第 4 步

介质的活度浓度为：

$$C_N = C_A = 1.25\text{TBq}\cdot\text{L}^{-1} = 1.25\times 10^3\text{TBq}\cdot\text{m}^{-3}$$

D13.6 第 5 步

$$L_N = \frac{R_N}{C_N} = 8.89\times 10^{-12}\text{m}^3\cdot\text{s}^{-1}$$

$$L_A = \frac{R_A}{C_A} = 5.29\times 10^{-8}\text{m}^3\cdot\text{s}^{-1}$$

D13.7 第 6 步

只在正常运输条件下，氟化重水的 L_N 值通过附录 B 中 B8 给出的方法可换算成等效空气流量。首先，确定 D_N ：

假设： $p_u = 1.083\times 10^5\text{Pa}$ （由于重水位差）

$$p_d = 1.013\times 10^5\text{Pa}$$

$$\mu = 1.85\times 10^{-5}\text{Pa}\cdot\text{s}$$

金属桶壁厚度为 a ，假设其等于毛细管长度，

$$a=1.6\times 10^{-3}\text{m}$$

那么， $D_N=1.78\times 10^{-5}\text{m}$

D13.8 第 7 步

仅在正常运输条件下，由公式 (B1) 来计其标准化泄漏率 (SLR)。

假设：

$$p_u = 1.013 \times 10^5 \text{Pa}$$

$$p_d = 0.0 \text{Pa}$$

$$D_N=1.78\times 10^{-5}\text{m}$$

$$\mu = 1.85 \times 10^{-5} \text{Pa} \cdot \text{s}$$

$$a = 1.6 \times 10^{-3} \text{m}$$

$$T=298 \text{K.}$$

$$M=0.029 \text{kg} \cdot \text{mol}^{-1}$$

那么：

$$\begin{aligned} Q_{N(\text{SLR})} &= 4.3 \times 10^{-4} + 4.36 \times 10^{-5} \\ &\quad (\text{粘滞流}) \quad (\text{分子流}) \\ &= 4.7 \times 10^{-4} \text{Pa} \cdot \text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1} \text{SLR} \end{aligned}$$

注：本结果表明粘滞流模型占主导地位。

D13.9 第 8 步

见下面第 9 步的最后一条。

D13.10 第 9 步

按表 A1 选择合适的设计验证检验方法。

可以选择那些使用卤素和氦气的方法，但这些方法比较复杂。

因需要定量方法，所以选择气压升高或降低检验法。

仅在正常运输条件下，规定的包容要求是 $A_2 \times 10^{-6}/\text{h}$ 或 $40 \times 10^{-6} \text{TBq}/\text{h}$ 。在检验期间，金属桶中可加注普通水来模拟放射性内容物。因为当桶充满水时，不可能进行气体泄漏检验，因此有如下规定：

——桶中加注普通水；

- 按装运方式准备货包；
- 按正常运输条件进行检验；
- 在桶盖上钻一小孔；
- 把桶中的水排干；
- 真空干燥；
- 进行气压降低检验；

参照附录 B 中的 B14，为了满足第 8 步的要求确定合适的检验时间 (H)、 P_1 和 P_2 的值。

D13.11 第 10 步

在运输事故条件下，规定的包容要求是一周 A_2 或一周 40TBq 。该值是货包内容物的 16% (或 35kg)。在此情况下，不需确定 $Q_{N(\text{SLR})}$ ，因为通过简单的失重测量可得到结论。这是应用其他方法的一个例子。

为了选择合适的方法进行装运前验证，包装的设计和放射性内容物将影响检验方法的选择。当桶加注氘化重水且 50mm 盖子已经盖后，就不能接触桶的内容物。表 A1 中的所有方法都不适用于这种情况。

可应用下列替代方法：

- 装桶之前，给桶内用空气加压，然后在水溶槽中旋转该桶，进行气泡检验。
- 因为气压降低检验法费时间，因此选择气泡法检验而不用气压降低法。
- 在桶内装载放射性内容物。
- 按核查单的程序验封桶盖。

——将桶放入一密封间内，取气样进行监测，氘监测器具有能够探测到 $40 \times 10^{-6} \text{TBq} \cdot \text{h}^{-1}$ 规定限值的灵敏度。

D14 使用双层包容并考虑辐解的液体包容系统

D14.1 概述

本例说明装载有液体放射性内容物的 B(U)、B (M) 或 C 型货包符合包容要求的一种方法。本例考虑了液体的辐解，辐解导致产生气体而使压力升高，使泄漏率增加。

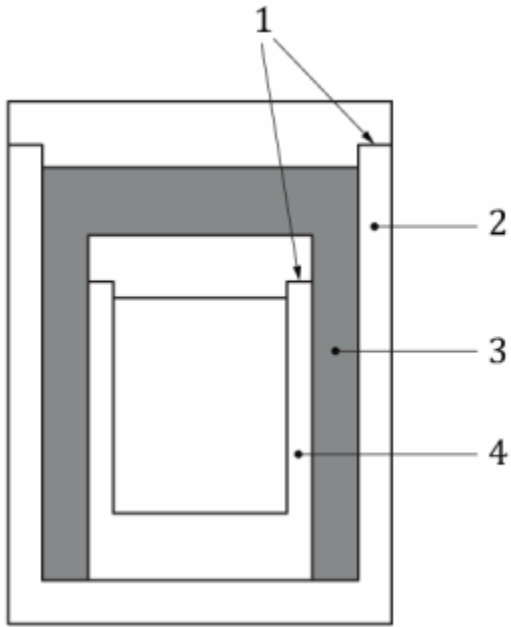
该货包是一个由内外两层包容容器组成的一个双层包容系统，通过对液体的高

度密封，能满足 GB 11806 的运输规定。

内层包容容器的密封要保证在一年内可能泄漏到内外层之间的放射性物质是很少的。内外层之间的吸收材料可以阻止内容器少量泄漏放射性内容物，避免其接触外层容器的密封层。因此，有足够的吸收材料存在时能使外包装容器没有泄漏。

D14.2 包容系统

图 D3 提供了双层包容系统的典型示例。本例中考虑的尺寸在下表中提供。



图例：

- 1 密封层
- 2 外容器
- 3 吸收材料
- 4 内容器

尺寸	外容器	内容器
外径, m	0.15	0.11
外高度, m	0.20	0.17
内直径, m	0.13	0.10

内高度, m	0.18	0.15
内容积, m ³	2.4×10 ⁻³	1.2×10 ⁻³

图 D3 包容系统

D14.3 液体容器的保留

为了证实从内容器中漏出的液体内容物还保留在外容器之内的情况,必须确定:

- 1) 辐解的气体产生率;
- 2) 导致泄漏的压力;
- 3) 一年中可从内容器中泄漏出的液体量;
- 4) 用于将液体保持在外容器内所要求的吸收材料量。

本例中, 假设内容器的内压升高仅由辐解所致。

假设:

泄漏率= $1 \times 10^{-6} \text{ Pa} \cdot \text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1} \text{SLR}$;

衰变能= 0.1 W;

大气压力= $1.0 \times 10^5 \text{ Pa}$;

溶液的气体产生常数 $G = 1 \times 10^3 \text{ 分子} \cdot \text{MeV}^{-1}$;

内容物的温度随环境温度的变化不明显;

液体内容物是水合溶液;

上述条件稳定存在一年。

D14.4 确定辐解气体产生率

由辐解导致的产气率 (v_g) 可由下式计算(单位: $\text{mol} \cdot \text{s}^{-1}$):

$$v_g = DP \times G \times k \times N_0^{-1}$$

式中:

DP ——衰变能, (0.1W);

G ——气体产生系数, $1 \times 10^3 \text{ 分子} \cdot \text{MeV}^{-1}$;

k ——转换系数, $6.24 \times 10^{12} \text{ MeV} \cdot \text{J}^{-1}$;

N_0 ——阿佛加德罗常数, $6.02 \times 10^{23} \text{ 分子/mol}$ 。

气体产生率为:

$$v_g = 1.04 \times 10^{-9} \text{ mol} \cdot \text{s}^{-1}。$$

D14.5 内层包容容器内压力的计算

假设辐解产生的气体由初始容器（盛有液体内容物的）向内层包容容器的自由空间释放，内容器的内压将随时间而升高，如下式：

$$p(t) = p_c + p_r$$

式中： $p(t)$ ——在时间 t 时包容容器的内压，Pa；

p_c ——包容容器的初始压力；

假设为环境压力 $p_a = 1.013 \times 10^5$ Pa；

p_r ——由于辐解升高的压力，Pa。

$$p_r = v_g \times t \times R \times T_c \times V_c^{-1}$$

t ——辐解的时间，s；

T_c ——包容容器内初始温度，298 K；

V_c ——包容容器的自由体积为 $0.7 \times 10^{-3} \text{ m}^3$ 。

使用上面的数据，

$$p_r = 3.67 \times 10^{-3} \times t ;$$

该值用于 D14.7 式中，以确定时间 t 的泄漏率。

为了确保不超过包容容器的安全工作压力，需要计算一年后内层包容容器由辐解引起的最高压力。

一年后（ $t = 3.15 \times 10^7$ s）包容容器内的压力升高为：

$$p_r = 1.16 \times 10^5 \text{ Pa};$$

$$p(\text{一年}) = 2.17 \times 10^5 \text{ Pa}。$$

D14.6 漏孔直径的计算

应用公式（B1）第一部分（层流部分）能够计算泄漏率为 $1 \times 10^{-6} \text{ Pa} \cdot \text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1} \text{SLR}$ 的漏孔直径。

假设具有均匀孔的毛细管漏孔，各参数为：

Q ——标准化泄漏率 $1 \times 10^{-6} \text{ Pa} \cdot \text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1} \text{SLR}$ ；

μ ——气体的动态粘度 $1.85 \times 10^{-5} \text{ Pa} \cdot \text{s}$ （25℃的空气）；

P_u ——入口压力， $1.013 \times 10^5 \text{ Pa}$ ；

P_d ——出口压力，0.0 Pa；

a ——毛细管长度 0.0022 m ($\phi 3\text{mm}$ 的 O 形圈典型长度)。

利用公式 (B1) 及上述数据, 计算漏孔直径为:

$$D=4.24 \times 10^{-6} \text{ m}$$

注 8: 考虑公式 (B1) 的两个部分将得出 $D=3.85 \times 10^{-6} \text{ m}$ 。该值小于之前的计算值和随后 D14.7 中的计算值。下面 D14.7 中的计算更保守。

D14.7 一年内总的液体泄漏量的计算

液体泄漏率可由公式 (B7) 计算:

假设同上节一样的具有均匀孔的毛细管漏孔, 各参数为:

液体—— 20°C 的水;

L ——液体的等效泄漏率, $\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$;

μ ——液体的动态粘度 $95 \times 10^{-5} \text{ Pa} \cdot \text{s}$ (20°C 水);

P_u ——入口压力, $P_u = P_a + P_r$, Pa;

P_d ——出口压力 $1.013 \times 10^5 \text{ Pa}$ 。

在公式 (B7) 中代入 $P_u = P_a + P_r$, 得到

$$L(t) = \frac{\pi}{128} \times \frac{D^4}{\mu \cdot a} \times 3.67 \times 10^{-3} \times t$$

利用上述数据计算: $L(t) = 1.39 \times 10^{-20} \times t$

时间 t 后液体的泄漏量为:

$$V_{\text{liq}} = \int L(t) dt = 1.39 \times 10^{-20} \times \frac{t^2}{2}$$

因此, 一年后液体泄漏的最大体积为:

$$V_{\text{lid}} = 6.9 \times 10^{-6} \text{ m}^3。$$

D14.8 吸收内容器中液体泄漏所需的吸收材料量的确定

处于内外两层容器之间吸收容量大于 $6.9 \times 10^{-6} \text{ m}^3$ 的一层吸收材料是足以吸收在最不利条件下内层泄漏的液体的, 这些吸收材料可防止能漏液体与外层容器的密封 O 形圈接触, 从而保证将放射性液体密封在包容系统内部。

D15 使用低于大气压方法的干式乏燃料容器的包容

D15.1 概述

这个例子说明了所使用的低于大气压的方法，用于乏燃料组件货包，以证明符合 B (U) 型、B (M) 型或 C 型货包的密封要求。相关的方法是使容器内腔低于大气压，这样在正常运输条件下，内部容器压力保持在低于大气压下，避免了在运输过程中放射性活度通过粘性层流泄漏而释放到环境中的任何风险。在这种情况下，活度的释放只由分子流和渗透引起。

不同的步骤是：

— 使容器内腔低于大气压，这样，在正常运输条件下处于热平衡时（38℃和条例规定的曝晒条件），内部压力保持低于环境大气压；

— 控制货包泄漏率在适当的标准化泄漏率 Q ；

— 评估裂变气体混合物的分压，该气体可能逸出于正常运输过程中可能失效的燃料棒；

— 评估在正常运输条件下一年期内内部压力的升高（对于泄漏率足够低且自由体积足够大的包容容器，可以省略此分析）。

在这个例子中，为了计算在正常运输条件下一年后的内部容器压力，假设：

— 内部容器压力升高仅仅是由于燃料棒失效和容器向内漏气；

— 忽略不计裂变气体以分子流和渗透方式经由密封面的释放。

D15.2 计算数据

在正常运输条件下，温度和压力条件以及容器的物理性质如下：

包容容器的标准化泄漏率， Q_{SLR} ($\text{Pa}\cdot\text{m}^3\cdot\text{s}^{-1}$)	3×10^{-4}
包容容器自由体积， V_C (m^3)	2.32
空腔中气体和密封件温度， T (K)	413
容器热平衡时的初始压力， $p_{C.\text{init}}$ (Pa)	0.5×10^5
最大环境压力， $p_{\text{ext.max}}$ (Pa)	1.04×10^5
最小环境压力， $p_{\text{ext.min}}$ (Pa)	0.6×10^{5a}
在 298 K 时空气动态粘滞度， μ_0 ($\text{Pa}\cdot\text{s}$)	1.85×10^{-5}

在 413 K 时空气动态粘滞度, μ (Pa·s)	2.40×10^{-5}
--------------------------------	-----------------------

a 该值在 2012 版 IAEA 放射性物质安全运输条例咨询材料的 659.10 段中建议。

放射性内容物:

— 容器装载 7 个 PWR 乏燃料组件;

— 在这个例子中,在正常运输条件下,认为每个组件不超过 5 个乏燃料棒失效,并且每个燃料棒释放的气体混合物(裂变气体产物+燃料棒填充气体)的体积 V_G 不超过 $1 \times 10^{-3} \text{ m}^3 \text{ STP}$ (标准温度和压力条件)。

D15.3 燃料棒失效后气体混合物分压的评估

假设在正常运输条件下,失效的乏燃料棒立即将其气体混合物释放到包容容器的自由体积中,则由裂变气体混合物的分压,内部容器压力增加如下:

$$P_G = \frac{N \times V_G \times T \times 10^5}{V_C \times 273}$$

其中 N 是燃料棒失效的总数 ($N = 5 \times 7$ 棒)。

$$P_G = \frac{5 \times 7 \times (1 \times 10^{-3}) \times 413 \times 10^5}{2.32 \times 273} = 0.02 \times 10^5 \text{ Pa}$$

D15.4 由于容器向内漏气一年内容器内部压力升高的评估

考虑到层流态占主导地位,正常运输条件下,泄漏率 Q_{NCT} 可以使用公式(B3)直接关联到标准化泄漏率 Q_{SLR} :

$$Q_{NCT} = Q_{SLR} \frac{\mu_0}{\mu} \times \frac{(p_{\text{ext.max}}^2 - p^2)}{[(1.0 \times 10^5)^2 - 0.0^2]}$$

由于密封面和包容容器之间的质量流率是守恒的,因此可以通过以下关系式定义内部容器压力的升高:

$$Q_{SLR} \frac{\mu_0}{\mu} \times \frac{(p_{\text{ext.max}}^2 - p^2)}{(1.0 \times 10^5)^2} = V_C \times \frac{dp}{dt}$$

上式可以推导如下:

$$dt = \frac{V_C \times \mu}{Q_{SLR} \times \mu_0} \times \frac{(1.0 \times 10^5)^2 (p_{\text{ext.max}}^2 - p^2)}{(p_{\text{ext.max}}^2 - p^2)} \times dp$$

$$dt = \frac{V_C \times \mu}{Q_{SLR} \times \mu_0} \times (1.0 \times 10^5)^2 \times \frac{1}{2 \times p_{\text{ext.max}}} \times \left(\frac{1}{p_{\text{ext.max}} - p} + \frac{1}{p_{\text{ext.max}} + p} \right) \times dp$$

积分上式，从下式中可得出容器内部压力 $P(t)$ ：

$$t = \frac{V_C \times \mu \times (1.0 \times 10^5)^2}{2 \times p_{\text{ext.max}} \times Q_{SLR} \times \mu_0} \times \text{Ln} \left\{ \frac{[1.04 + p(t)]}{[1.04 - p(t)]} + \frac{[1.04 - 0.5]}{[1.04 + 0.5]} \right\}$$

对于 $t = 1 \text{ 年} = 31\,536\,000 \text{ s}$ ，容器内部压力 p 的值为 $0.53 \times 10^5 \text{ Pa}$ 。

D15.5 1年内总的内部容器压力升高的评估

在正常运输条件下，包容容器内总的压力升高 P_C 等于上述燃料棒失效和容器内漏气的贡献，可以由下式确定：

$$p_C = p_G + p = 0.02 \times 10^5 + 0.53 \times 10^5 = 0.55 \times 10^5 < p_{\text{ext.min}} = 0.6 \times 10^5 \text{ Pa}$$

因此，排除了在运输过程中通过粘性层流泄漏，在环境中释放活度的风险。在这种情况下，运输过程中仅有裂变气体通过密封面的分子流和渗透引起的活度释放。

附录 E

(资料性附录)

注释

本注释的目的是为应用本标准条款提供建议和指导，以使与规定的包容要求达成一致。本注释仅是提供一种满足本标准的方法而不是符合本标准的唯一途径，所提供信息是建议性的而绝不是强制性的（除非审管部门要求使用本章的某部分）。

在准备这些注释时，有一些条目在特定情况下是不言而喻的，因而没有提供注释。为便于相互对照，本附录的章节段落号与标准中的相同，仅在其相应的标准段落号前加 E。

本注释对本标准中的各项子条款进行了解释，并由相应的子条款编号进行标识。

E1 适用范围

除了本标准规定的气体泄漏检验法以外，用户也可采用其他的方法。当使用其他方法时，必须证明该方法能验证货包的放射性内容物的释放将不超过规定的包容要求。

另外需要强调的是：

——审管部门有强制检查方法的可接受性和正确使用该方法情况的权力。

——选择一些不同的或新的检验方法及其规定的灵敏度通常要由使用者和审管部门协商解决。

E4 规定的包容要求

在本标准发布时，根据 GB11806-2019，B（U）型、B（M）型或 C 型货包应设计满足：

a) 为证明能够承受正常运输条件而规定的相关试验，将放射性物质的损失限制在不超过 $A_2 \times 10^{-6}$ /小时。

b) 为证明能够承受运输事故条件而规定的相关试验，在一周内放射性物质的累积损失对于 ^{85}Kr 不超过 $10A_2$ /周，而其他放射性核素不超过 A_2 。

对于不同放射性核素的混合物，国际原子能机构（IAEA）《放射性物质安全运输条例》第 405-407 段的规定应满足，但对于 ^{85}Kr ，有效 A_{2i} 值可使用 $10A_2$ 。

A_2 的值在 GB11806-2019 附录 B 中进行了规定中。

混合物的 A_2 等效值 A_{2eq} 按如下公式计算：

$$A_{2eq} = \frac{\sum A_i}{\sum (A_i/A_{2i})}$$

对于混合物中放射性核素 A_2 值的计算，以及对可释放的放射性物质进行的假设应被审管部门接受。

E5 检验程序

E5.1 概述

在所有泄漏机制中，在确定最大容许检验泄漏率前，都应确定正常运输条件和运输事故条件的标准化泄漏率。

与最大容许泄漏率相关的最大容许标准化泄漏率（使用气体做示踪剂）应依据如下有关泄漏机制来确定。

A 气体内容物

放射性气体的泄漏机制可能是通过毛细管（例如破损）的粘滞流、通过细毛细管或多个毛细管的分子流、或是通过弹性密封圈、容器薄壁或同时通过上述任何组合的渗透。

a) 粘滞流

放射性内容物是气体时，主要的泄漏机制可能是粘滞流。

粘滞流（也称作介质流）中流体的成分（例如混合气体）在漏孔内外的组成是相同的。粘滞流依赖于漏孔内外部的总压差。

通常，放射性气体被容器内的非放射性气体稀释（浓度减小）。应确定混合物的活度浓度。因为在正常运输条件或运输事故条件下泄漏的放射性气体可能是不同的，所以必须确定正常运输条件或运输事故条件下的活度相关性。例如，假设燃料棒在正常运输情况下不泄漏，但有一定百分比的燃料棒破损，因此，在运输事故条件下，该燃料棒将释放其气体内容物。

一旦计算出活度相关性，最大容许泄漏率很容易确定。

正常运输条件和运输事故条件下的最大容许泄漏率可用由附录 B 中公式（B1）

得到的最大容许体积泄漏率来确定。

b) 分子流

特别是当泄漏率低时或当通过大量细小漏孔泄漏时，分子流可能是主要的流体机制。

分子流中较小分子和原子通过漏孔的迁移速度比较大原子和分子快，分子流依赖于漏孔内外气体混合物组分的不同分压。如果内部包容压力低于环境压力，则在考虑放射性物质的活度释放时，应考虑由各种气态放射性物质的分压驱动的分流。

通常情况下，包容系统内的放射性气体将被其他非放射性气体稀释(浓度减小)。应确定正常和事故运输条件下的活度相关性，因为不同放射性气体的泄漏要求在正常和事故运输条件下可能不同。例如，假设燃料包壳在正常运输条件下不会泄漏，但可能需要假设在运输事故条件下破裂的百分比，从而释放其气态内容物。

正常运输条件和运输事故运输条件的最大容许泄漏可通过上述计算的最大容许体积泄漏率和附录 B 中公式 (B1) (分子流 SLR 的计算) 来确定。

c) 渗透

当使用弹性密封材料来有效地将粘滞流和分子流泄漏减小到很低水平时，渗透可能是主要的泄漏原因。

渗透泄漏率依赖于渗透性器壁内外压差。

当通过渗透泄漏时，使用标准化泄漏率是不适当的，有必要用附录 B 中第 B13 条的方法直接计算最大容许检验泄漏率

B 液体内容物

不管是放射性溶液还是含有粒状放射性物质的液体，其泄漏机制是通过漏孔(从最坏的情况分析，可看作单一毛细孔)的粘滞流。

因为液体有相对较高的粘度，液体被认为不能像气体那样以分子流通过细小毛细管而泄漏，也不能通过密封层而渗透。

液体可以以放射性液体、非放射性液体中悬浮有放射性固体、或一种放射性液体中悬浮有放射性固体等形式含有放射性物质。

a) 放射性液体

当内容物为放射性液体时，不论是放射性液体还是含放射性溶质的非放射性溶

剂，唯一的泄漏机制是粘滞流机制。

在正常运输条件下或运输事故条件下，应根据不同数据(例如不同的释放份额)来确定活度浓度。

一旦计算出活度相关性，最大容许泄漏率能很容易地确定，正常运输条件或运输事故条件下的标准化泄漏率也就确定了。

与最大容许活度释放率有关的检验气体的最大容许标准化泄漏率可用附录 B 给出的公式计算得。

b) 含有悬浮放射性固体的非放射性液体

当放射性内容物是非放射性液体中悬浮有极细微的放射性固体颗粒时，泄漏机制是粘滞流机制。

在正常运输条件下或运输事故条件下，应根据不同数据(例如不同的释放份额)来确定活度浓度。

在确定活度浓度中，要确定最有意义的物质颗粒，还应假设物质颗粒均匀地“悬浮”在液体中。当物质颗粒的物理性质已知时，只有一部分足够小的颗粒才能通过最大单个毛细管(具有等价于最大容许活度释放率的标准化泄漏率)泄漏孔，而只有这部分才认为是泄漏。大于毛细管直径的粒子被认为是保留在包容容器内。可释放的小粒子份额被认为是释放份额并用于计算活度浓度。

该液体可被当作如上述的放射性液体处理，用同样的方法来确定最大容许泄漏率和标准化泄漏率。

与最大容许活度释放率相关的检验气体的最大容许标准化泄漏率，可用附录 B 中给出的公式来计算。

c) 含有放射性悬浮固体的放射性液体

当放射性内容物是含有放射性颗粒的放射性液体时，泄漏机制是粘滞流机制，且活度浓度的计算要考虑放射性液体和可释放颗粒的悬浮份额两种因素。

该液体可被当作放射性液体处理，使用同样的方法来确定最大容许泄漏率和标准化泄漏率。

C 固体内容物

固体内容物(而非分散在液体中的颗粒)的泄漏机制是在重力作用下直接通过

漏孔，并且气溶胶中细微固体颗粒可由气体夹带以粘滞流通过漏孔。与液体内容物一样，固体内容物不存在像前面所涉及的气体分子流或渗透的泄漏。

a) 气溶胶中细微固体颗粒的泄漏

当放射性内容物含有可通过与最大容许检验泄漏率相关毛细管的细微颗粒时，最可能的泄漏机制是包容容器内的气体粘滞流将悬浮在气体中的放射性物质固体微粒以气溶胶形式带走。

了解颗粒形态可以在最不利的条件下（正常运输条件或运输事故条件下的）精确计算气体的活度浓度。如可能的话，应假设可能泄漏的全部细微颗粒物质都是悬浮的，其值常用在附录 B 中计算活度浓度。

一旦活度浓度根据附录 B 计算得出，则很容易确定最大容许泄漏率。

正常和事故运输条件下的标准化泄漏率可用上述由附录 B 的公式得出的最大容许泄漏率得到。

b) 堵塞机制造成的包容容器密闭

当放射性内容物是放射性固体时，只要粒子小于漏孔就可能从包容容器中释放。

如果一个特定数值的标准化泄漏率可以证明由于堵塞机制确保内容物（或内容物的一部分）的释放而包容在最大容许释放率内，该泄漏率可看作为最大容许标准化泄漏率。

还可证明（例如通过实验）细的粉末将堵塞直径比它大得多的毛细管。基于此种考虑，可以确定单个毛细管漏孔的最大直径，而后也可以确定与之相关的最大容许标准化泄漏率。影响细粉末堵塞的因素（例如微粒尺寸和形状的变化、粉末的温度、运输中的撞击和振动、以及其他现象）也必须要考虑。

应用堵塞机制应是审管部门可接受的。

D 内容物是气体、液体和固体混合物

当放射性内容物不只一种形态时（即气、液、固三种形态的任意组合），要用到上述对气体、液体、固体规定的方法，确定每一相（气、液、固）的最大容许标准化泄漏率。当某一相的标准化泄漏率占优势时（即，其他相的标准化泄漏率在数值上要小 10 倍），那么占优势相的最大容许标准化泄漏率可作为包容容器的最大容许标准化泄漏率。

当任一相的泄漏都不占优势时，应该确定一个在数值上小于各相分别计算得到的标准化泄漏率，以限制所有放射性物相的全部放射性释放，使其小于货包的最大容许释放率。对所选定的标准化泄漏率，应用附录 B 中的方法和公式计算各放射性物相的释放率。与最大容许活度释放率相关的最大容许标准化泄漏率应用迭代循环计算得到。

E7 标准化泄漏率的确定

包容容器的密封性是通过在已知温度、入口压力、出口压力等条件下测量检验气体泄漏率而确定。如果 SLR 由此泄漏率导出，则可确定该容器的密封性数值，该密封性可与同一包容容器用其他方法在别的检验条件下得到的结果比较。SLR 值还可用于直接比较不同容器的密封性。这样的比较只有在相同条件或在 SLR 所规定的标准条件下确定泄漏率时才是有意义的。

泄漏检验的验收准则

对于一个装载有规定的放射性内容物的容器，在类似于正常或事故运输条件下会造成最大泄漏的特定温度、入口压力和出口压力的规定条件下，附录 B 中的计算方法可用来确定最大容许泄漏率。如果计算出 SLR 值并与最大容许泄漏率相当，则在没有规定具体的泄漏检验方法或条件的情况下，该值就成为泄漏检验的验收准则。

在操作程序和认证中，规定验收准则是有用的，因此可以说：“对于规定的内容物，包容容器装载后泄漏检验的验收限值为 $1 \times 10^{-5} \text{Pa} \cdot \text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1} \text{SLR}$ ”。

SLR 值的使用（供参考）

在某些情况下，如果标准化泄漏率比较低，审管部门可以允许使用标准化泄漏率的某一规定值而不用其计算值。而当标准化泄漏率比较高时，审管部门可以认为泄漏检验是不适宜的和不必要的，也可能允许使用标准化泄漏率的某一规定值而不用其计算值。

容许标准化泄漏率 Q_{SLR}

泄漏率 $10^{-8} \text{Pa} \cdot \text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1} \text{SLR}$

本参考空气泄漏率是在实际应用中而不是绝对意义上定义密封性的，或是在释放份额的实际值很难得出时，提供一个标准化泄漏率（SLR）。标准化泄漏率 $10^{-8} \text{Pa} \cdot \text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1} \text{SLR}$ 的直径微米级甚至更小的漏孔，很容易被液体或被微粒堵塞。尽管

这种微小的泄漏能被测出，但在实际中很少被发现。

当计算出的允许标准化泄漏率 Q_{SLR} 等于或低于该数值时，制造、定期和维护验证只需证明测量的泄漏率不超过该值。

泄漏率 $10^{-2}\text{Pa}\cdot\text{m}^3\cdot\text{s}^{-1}\text{SLR}$

当计算的容许标准化泄漏率 (Q_{SLR}) 等于或大于此值时，货包在装运前验证阶段可以免除泄漏检验。

包容系统装运前验证

美国标准 ANSIN14.5“放射性物质运输货包的泄漏检验”给出参考空气泄漏率： $10^{-4}\text{Pa}\cdot\text{m}^3\cdot\text{s}^{-1}\text{SLR}$ 。

在装货前，包容系统的组装应按照书面的质量保证程序进行，这个书面程序包括了包容系统所有符合要求的部件都安装适位、同时又确实可靠的鉴定清单。

然后由如下公式计算装运前验证的容许检验泄漏率：

$$Q_{TS}=4\ 200Q_{SLR}$$

使用系数 4 200 是保持在装运前验证阶段是否进行简单的泄漏检验原则的一种方法，该系数是由最差情况的评估推导得来的，在长达 10 天的运输期内活度释放将限制在小于 A_2 。如果进行这样的检验，灵敏度不必大于 $10^{-4}\text{Pa}\cdot\text{m}^3\cdot\text{s}^{-1}\text{SLR}$ ，但至少为 $10^{-2}\text{Pa}\cdot\text{m}^3\cdot\text{s}^{-1}\text{SLR}$ 。按上述规定，容许标准化泄漏率 Q_{SLR} 等于或大于 $10^{-2}\text{Pa}\cdot\text{m}^3\cdot\text{s}^{-1}\text{SLR}$ 的货包无此要求。

泄漏检验方法灵敏度的比较

附录 A 提供了检验货包密封性的泄漏检验方法。各种检验方法要求在不同的条件下（特别是入口压力和出口压力）使用不同的气体。对检验某一特定包容容器而言，泄漏检验方法的灵敏度取决于方法本身的灵敏度和容器的检验体积。

当对包容容器进行一些特殊的泄漏检验时，可测得的最小泄漏率就是该容器该检验方法的灵敏度。为了比较泄漏检验方法，确定相同条件或标准条件下的灵敏度是必要的，建议根据 SLR 计算或规定灵敏度。

E8 包容系统验证要求

E8.1 包容系统的验证阶段

在运输事故条件下，引起泄漏的最重要的后果如下：

——机械撞击可引起一固定裂口泄漏且在一周内有不变得泄漏率；

——机械撞击引起临时的裂口漏孔，形成短时间的泄漏（小于 1s），这对于带压的放射性气体内容物的泄漏是有意义的，面对机械撞击导致破损燃料棒的乏燃料内容物泄漏意义不大，因为当释放的裂变气体到达盖区时，裂口将已经关闭。

——热冲击可能引起固定的泄漏，但一周内其漏率是变化的。

——热冲击可导致高温和高压，本标准中几乎所有定量的考虑都是基于假定泄漏的几何形状（主要是毛细管）是不变的。火焰检验之后，一些与入口压力关系较大的泄漏，其泄漏率将随时间显著地变化。

E8.1.2 设计验证

设计验证程序将证实 B 型货包的设计是否满足正常运输条件或运输事故条件下的规定的包容要求。

当检验包容系统和货包的部件时，它们要以载货形式进行组装，在正常运输条件或运输事故条件下进行检验，以证明它们具有小于或等于最大容许检验泄漏率（ Q_{TDA} ， Q_{TDN} ）的泄漏率，为证实包容系统承受运输事故条件的能力，在机械或热检验期间，应考虑瞬态条件可能是最极限条件的可能性。在这些条件下，通过计算（即计算材料热应力和机械应力，以判断材料是否变形，或焊缝、法兰接头、密封层是否有异常应力存在）来评估货包也是唯一可能的方法，这些评估的结果应是审管部门可接受的。

对于包容系统设计验证的检验，放射性内容物可用非放射性内容物来模拟，方法的选择取决于货包设计，附录 A 中所列各种方法都是可行的，但可能的话要考虑本标准应满足的要求。当进行检验时，仅检验某一设计的一个样品。使用缩小比例的模型进行泄漏检验已超出了本标准的范围。

如果检验包容系统全尺寸模型、密封部件或其他个别部件的话，它们应能够充分代表实际货包。模型应按装运条件组装，按照正常运输条件和运输事故条件根据本标准提交检验。

如果通过比较来表明包容系统的设计适当的话，那么应该使用一个合适的、精确验证的、且基本等效的设计来比较。有限检验可用作比较时的补充。

如果进行证实检验，组装的包容系统的实际泄漏率要在一些已知检验条件下测定，然后进行“证实”，此证实包括能证明在正常或事故运输条件下，密封部件没有异常变形或过分移位，密封部件的温度未超过限值，因而最大容许检验泄漏率 Q_{TDA} 和 Q_{TDN} 也未超出限值的计算、检验或其他技术。

E8.1.3 制造验证

假设货包在装运前受到适当维护且被正确组装，制造验证程序将证实制造出来的每一给定设计的包装满足正常运输条件和运输事故条件下规定的包容要求。实际泄漏率可以小于 Q_{TF} ，在正常运输条件下检验时允许降低包容系统检验要求。

第一次使用之前，每个可重复使用的包容系统应按装运要求组装并检验，以证明它的泄漏率小于或等于最大容许检验泄漏率 Q_{TF} 。 Q_{TF} 值要经审管部门同意，但该值一般是 Q_{TDA} 和 Q_{TDN} 的更严格值。在可能的范围内包容系统的所有接口和密封层要在完全组装状态下检验。在某些情况下，对接口和密封层的检验可能不得不在部分组装或部件水平进行以接近并检验其表面。

除了样本量小于 100% 或者在 12 个月内已进行过检验这两种情况外，一次性包容系统也要同重复使用包容系统一样，按同样的要求进行检验。

在选择规定样本量时，要考虑批量、最大可接受的缺陷百分数和置信水平。

有证据表明泄漏率可忽略的包容容器部件可不必检验，例如厚壁容器。

检验前，货包不须承受正常运输条件或运输事故条件。

E8.1.4 装运前验证

每次装运前，装运前验证程序应证实组装的货包在运输中和各种条件下（正常或事故）能满足规定的包容要求。为此，必须验证货包已正确组装且已具备包容功能。这可以通过一个质量保证的组装程序和泄漏率小于或等于最大容许检验泄漏率 Q_{TS} 的泄漏检验完成。

当欲采用的装运前泄漏检验法的检验泄漏率达不到按本标准确定的最大容许检验泄漏率时，必须要经审管部门的认可。

在装运前，包容系统的组装应按照书面的质量保证程序进行，这个程序包括了

包容系统的所有符合要求的部件都安装适位、同时又确实可靠的鉴定清单。

在制造或定期验证阶段在包容系统检验后已经打开的或关闭的部件，要进行装运前验证检验。被检验的部件，重点是封闭部件和装有密封垫圈的部位。

其他部件的装运前检验要按照审管部门的要求进行。

E8.1.5 定期验证

定期验证程序证实所有按照获准设计制造的包装即使重复使用仍符合管理包容要求。

应检验包装以证明其泄漏率小于或等于最大容许检验漏率 Q_{TP} ，因为拆开组件可能有困难，因此，包容程度和检验密封部件数目以及 Q_{TP} 的数值必须是审管部门可接受的。

包容系统的定期验证不必检验不能接近的接口和密封层，但要包括诸如封盖、阀门、管接头、防爆盘等部件。

可重复使用的 B (U) 型、B (M) 型或 C 型货包包容系统的部件变更时，或当不经常更换的部件被替换时，包容系统所受影响的部分应进行检验以证明其泄漏率小于或等于最大容许检验泄漏率 Q_{TP} ，不影响包容系统的零件在变更或替换后，不必进行检验。

E9 泄漏检测程序要求

E9.4 检验方法的要求

E9.4.1 概述

如果容器正常操作时具有正内压，在真空条件下测试时应考虑包容边界、封闭和密封的机械阻力。

E 附录 B 计算方法

E B2 气体泄漏

本标准表明气体泄漏检验方法可用来证实货包符合规定的包容要求。

根据活度释放准则来确定气体泄漏率基本是依赖于对源项的了解（即，放射性均匀分布在货包包容体积内），通常这是不能了解得很精确而要做最坏的假设。因此，当计算气体泄漏率时，没有必要将其计算到很精确的数字，因此本标准的公式也只是在可接受的准确度下给出流量。

有许多流动方式可调节通过毛细管的气流。这些方式及其泄漏率如下：

分子流 $<10^{-6}\text{Pa}\cdot\text{m}^2\cdot\text{s}^{-1}\text{SLR}$

粘滞流（层流） $10^{-2}\text{Pa}\cdot\text{m}^3\cdot\text{s}^{-1}\text{SLR}\sim 10^{-7}\text{Pa}\cdot\text{m}^3\cdot\text{s}^{-1}\text{SLR}$

湍流 $>10^{-3}\text{Pa}\cdot\text{m}^3\cdot\text{s}^{-1}\text{SLR}$

阻塞流 大的泄漏

一般认为随着固定大小的毛细管两侧的压力差的增加，通过毛细管的气流以分子流、粘滞流、湍流直至阻塞流的形式出现。

分子流和粘滞流 可以由诺森方程直接计算：

$$Q = \frac{\pi}{128} \times \frac{D^4}{\mu \cdot a} \times \frac{(p_u^2 - p_d^2)}{2} + \frac{1 + \sqrt{\frac{M}{RT} \frac{(P_u + P_d)D}{2\mu}}}{1 + 1.24 \sqrt{\frac{M}{RT} \frac{(p_u + p_d)D}{2\mu}}} \sqrt{\frac{2\pi}{6}} \sqrt{\frac{RT}{M}} \frac{D^3}{a} (P_u - P_d)$$

方程的第一部分代表粘滞流组分，是由泊肃叶定律导出的；第二部分代表分子流，由诺森定律对自由分子流导出。方程可以在不失较大准确度（ $Q \approx 10^{-8}\text{Pa}\cdot\text{m}^3\cdot\text{s}^{-1}\text{SLR}$ 时，最大为 10%）的情况下简化：

$$Q = \frac{\pi}{128} \times \frac{D^4}{\mu \cdot a} \times \frac{(p_u^2 - p_d^2)}{2} + \sqrt{\frac{2\pi}{6}} \sqrt{\frac{RT}{M}} \frac{D^3}{a} (P_u - P_d)$$

对于空气：

$$R = 8.31 \text{J} \cdot \text{mol}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$$

$$M = 0.02895 \text{kg} \cdot \text{mol}^{-1}$$

$$\mu(25^\circ\text{C}) = 1.85 \times 10^{-5} \text{Pa}\cdot\text{s}$$

简化的诺森方程为

$$Q_{(\text{空气}, 25^\circ\text{C})} = 1327 \times \frac{D^4}{a} \times \frac{(p_u^2 - p_d^2)}{2} + 122 \frac{D^3}{a} (P_u - P_d) \text{Pa}\cdot\text{m}^3\cdot\text{s}^{-1}$$

由于在计算中毛细管进出口的压力损失与毛细管大小和流速相比是不重要的，因此可忽略。

湍流 一般在雷诺（Reynold）数为 2100 以上发生，粘滞流一般在雷诺数大约为 1200 时发生，在 1200~2100 之间有一过渡区。

$$R_e = \frac{\mu \times D \times \rho}{\mu} = \frac{Q}{D} \times \frac{4M}{\pi \mu \times RT}$$

阻塞流 一般在孔板或很短的毛细管中发生。在 A/D 比率较大的毛细管中很难产生阻塞流。对于阻塞流：

$$Q = \left(\frac{2}{K+1} \right)^{\frac{1}{K-1}} \sqrt{\frac{2K}{K+1} \times \frac{RT}{M}} \times A \times P_u \quad (A = \text{面积})$$

$$K_{(\text{空气})} = 1.402 \rightarrow Q_{(\text{空气}, 25^\circ\text{C})} = 154.42 \times D^2 \times P_u$$

应用简化的诺森方程并假设毛细管长为 10^{-2}m ，计算标准化泄漏率（覆盖检验放射性货包所用的范围）毛细管直径是可能的。

$$Q = 10^{-8} \text{ Pa} \cdot \text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1} \quad D = 1.67 \times 10^{-6} \text{ m} \quad (\text{A})$$

$$Q = 10^{-5} \text{ Pa} \cdot \text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1} \quad D = 10.6 \times 10^{-6} \text{ m} \quad (\text{B})$$

$$Q = 10^{-2} \text{ Pa} \cdot \text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1} \quad D = 61.5 \times 10^{-6} \text{ m} \quad (\text{C})$$

$$Q = 10^0 \text{ Pa} \cdot \text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1} \quad D = 195 \times 10^{-6} \text{ m} \quad (\text{D})$$

图 E1 表示在不同的压力范围（高达 $4 \times 10^6 \text{ Pa}$ ）内，通过毛细管 A、B、C、D 的流动，指出了不同的流体状态（MNOP：最大正常工作压力）。

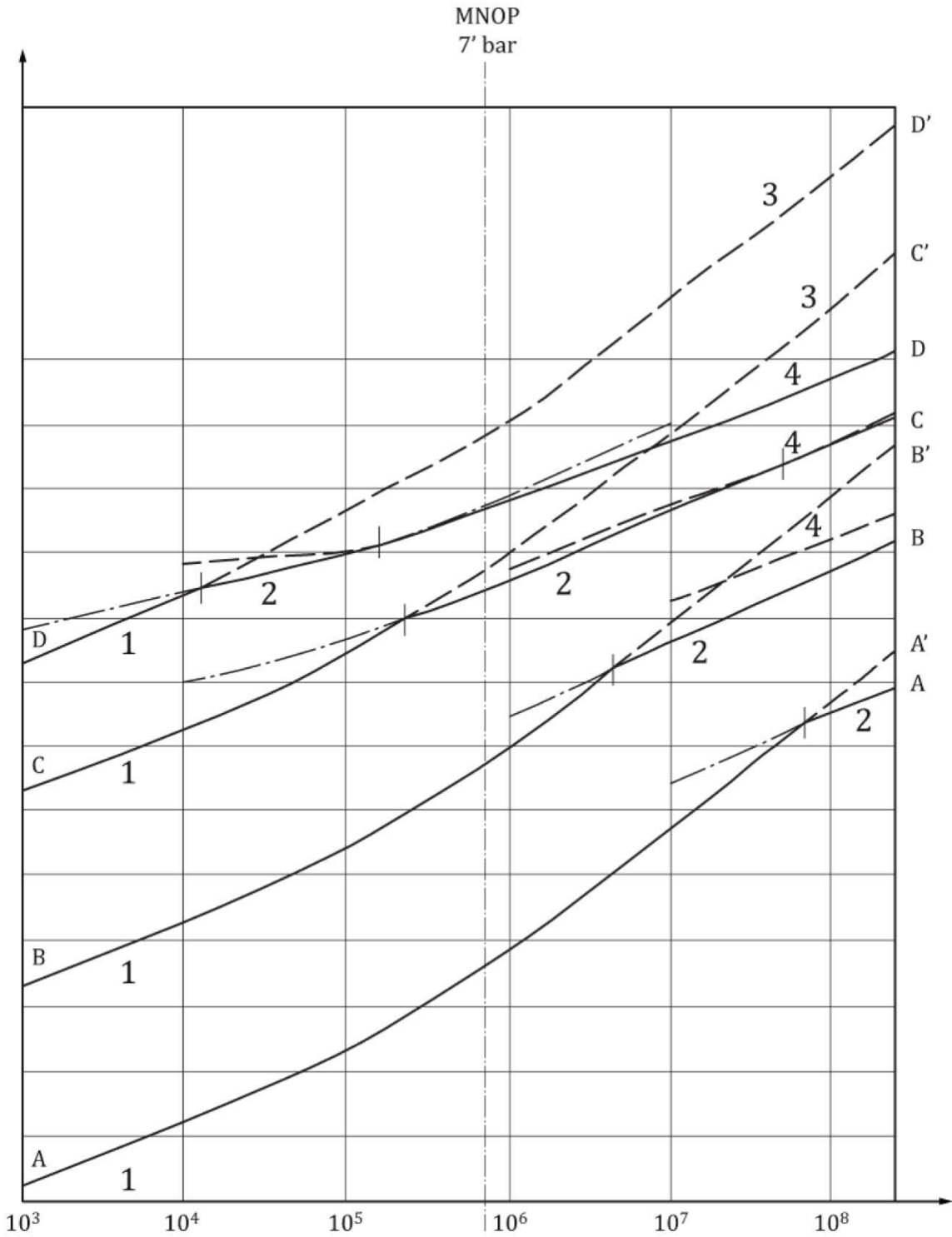


图 E1 流体示意图

在泄漏率从 $10^{-8} \text{ Pa}\cdot\text{m}^3\cdot\text{s}^{-1}\text{SLR}$ ~ $10^0 \text{ Pa}\cdot\text{m}^3\cdot\text{s}^{-1}\text{SLR}$ 和压力在 10^3Pa ~ $4\times 10^6\text{Pa}$ 的区间内，可以看出：

- a) 毛细管 A 和 B 的曲线位于诺森方程对分子流和粘滞流应用的范围内。
- b) 毛细管 C 的曲线刚进入湍流区，当其趋近区域边界时，毛细管 C 中的流动就成阻塞流机制。诺森方程在区域边界条件下使用时，将过高估计泄漏率 30%~40%。
- c) 毛细管 D 的曲线当趋近区域边界时刚刚进入湍流区。使用诺森方程将过高估计泄漏率 10%~20%。

上述数据表明，在 $10^0 \text{Pa} \cdot \text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1} \text{SLR}$ 和 $4 \times 10^6 \text{Pa}$ 的范围内应用诺森方程计算泄漏率是合适的。

E B6 液体泄漏

存在液体不可能达到的极限泄漏速率。该泄漏速率可能取决于压差、液体的性质和温度。

基于 Poiseuille 定律的理论计算和实验工作可能有助于确定这些极限泄漏率。

E B9 气溶胶泄漏

存在颗粒不可能达到的极限泄漏速率。应当合理的使用该极限泄漏。

附录 F

(资料性附录)

符号与单位

本标准使用表中的符号和单位。

表 F1 符号和单位

符号	定义	单位
A_i	放射性核素 <i>i</i> 的活度	Bq
A_2	GB11806 中定义的非特殊形式放射性物品的活度限值	Bq
A_{2i}	放射性核素 <i>i</i> 的 A_2 值	Bq
a	毛细管长度/漏孔长度	m
C	活度浓度, 以 C_A 或 C_N 表示	$Bq \cdot m^{-3}$
C_A	运输事故条件下, 可从包容系统释放的介质平均活度浓度	$Bq \cdot m^{-3}$
C_N	正常运输条件下, 可从包容系统释放的介质平均活度浓度	$Bq \cdot m^{-3}$
D	毛细管直径/漏孔直径	m
D	最大容许直径, 以 D_A 或 D_N 表示	m
D_A	运输事故条件下, 毛细管漏孔最大容许等效直径	m
D_B	气泡直径	m
D_N	正常运输条件下, 毛细管/漏孔最大容许等效直径	m
FC_{iA}	运输事故条件下, 放射性核素 <i>i</i> 由放射性内容物进入到包容系统的释放份额	—
FC_{iN}	正常运输条件下, 放射性核素 <i>i</i> 由放射性内容物进入到包容系统的释放份额	—
FE_{iA}	运输事故条件下, 放射性核素 <i>i</i> 由包容系统释放到环境中的份额	—

FE_{iN}	正常运输条件下, 放射性核素 <i>i</i> 由包容系统释放到环境中的份额	—
g	重力加速度	$g=9.81\text{m}\cdot\text{s}^{-2}$
g_0	常数	$g=1\text{kg}\cdot\text{m}\cdot\text{N}^{-1}\cdot\text{s}^{-2}$
H	检验周期	s
h	液体高度	m
L	体积泄漏率	$\text{m}^3\cdot\text{s}^{-1}$
L	最大容许体积泄漏率, 以 L_A 或 L_N 表示	$\text{m}^3\cdot\text{s}^{-1}$
L_A	运输事故条件下, 在压力为 P_A 时, 介质最大容许体积泄漏率	$\text{m}^3\cdot\text{s}^{-1}$
L_N	正常运输条件下, 在压力为 P_N 时, 介质最大容许体积泄漏率	$\text{m}^3\cdot\text{s}^{-1}$
M	相对摩尔质量	$\text{kg}\cdot\text{mol}$
M_i	成分 <i>i</i> 的相对摩尔质量	$\text{kg}\cdot\text{mol}$
M_{mix}	混合物的相对摩尔质量	$\text{kg}\cdot\text{mol}$
P_A	运输事故条件下包容系统的压力	$\text{kg}\cdot\text{mol}$
P_N	正常运输条件下包容系统的压力	Pa
P_d	出口压力	Pa
P_i	混合气体成分 <i>i</i> 的分压	Pa
P_{mix}	混合气体压力	Pa
P_s	参考大气压力	$P_s=1.013\times 10^5\text{Pa}$
P_t	示踪气体分压	Pa
P_u	进口压力	Pa
P_1	检验前气压	Pa
P_2	检验后气压	Pa
Q	泄漏率	$\text{Pa}\cdot\text{m}^3\cdot\text{s}^{-1}$
Q_{SLR}	标准化泄漏率, 以 $Q_{A(\text{SLR})}$ 或 $Q_{N(\text{SLR})}$ 表示	$\text{Pa}\cdot\text{m}^3\cdot\text{s}^{-1}$

Q_A	运输事故条件下，介质的容许泄漏率，由 L_A 计算得出	$\text{Pa}\cdot\text{m}^3\cdot\text{s}^{-1}$
$Q_{A(\text{SLR})}$	运输事故条件下，容许的标准化泄漏率（SLR）	$\text{Pa}\cdot\text{m}^3\cdot\text{s}^{-1}$
Q_m	分子流泄漏率	$\text{Pa}\cdot\text{m}^3\cdot\text{s}^{-1}$
Q_{mix}	混合气体泄漏率	$\text{Pa}\cdot\text{m}^3\cdot\text{s}^{-1}$
Q_N	正常运输条件下，介质的容许泄漏率，由 L_N 计算得出	$\text{Pa}\cdot\text{m}^3\cdot\text{s}^{-1}$
$Q_{N(\text{SLR})}$	正常运输条件下，容许的标准化泄漏率（SLR）	$\text{Pa}\cdot\text{m}^3\cdot\text{s}^{-1}$
Q_P	渗透率	$\text{Pa}\cdot\text{m}^3\cdot\text{s}^{-1}$
Q_{TDA}	在设计验证阶段相对于运输事故条件下，示踪气体或检验气体的容许检验泄漏率，他由 $Q_{A(\text{SLR})}$ 来确定	$\text{Pa}\cdot\text{m}^3\cdot\text{s}^{-1}$
Q_{TDN}	在设计验证阶段相对于正常运输条件下，示踪气体或检验气体的容许检验泄漏率，他由 $Q_{N(\text{SLR})}$ 来确定	$\text{Pa}\cdot\text{m}^3\cdot\text{s}^{-1}$
Q_{TF}	在制造检验阶段，示踪气体的容许检验泄漏率	$\text{Pa}\cdot\text{m}^3\cdot\text{s}^{-1}$
Q_{TM}	在维护检验阶段，示踪气体的容许检验泄漏率	$\text{Pa}\cdot\text{m}^3\cdot\text{s}^{-1}$
Q_{TP}	在定期检验阶段，示踪气体的容许检验泄漏率	$\text{Pa}\cdot\text{m}^3\cdot\text{s}^{-1}$
Q_{TS}	在装运前检验阶段，示踪气体的容许检验泄漏率	$\text{Pa}\cdot\text{m}^3\cdot\text{s}^{-1}$
Q_V	粘性流动泄漏率	$\text{Pa}\cdot\text{m}^3\cdot\text{s}^{-1}$
R	通用气体常数	$\text{Bq}\cdot\text{s}^{-1}$
R	最大容许活度释放率，以 R_a 或 R 表示	$\text{Bq}\cdot\text{s}^{-1}$
R_A	在运输事故条件下，内容物的最大容许活度释放率	$\text{Bq}\cdot\text{s}^{-1}$
R_N	在正常运输条件下，内容物的最大容许活度释放率	$\text{Bq}\cdot\text{s}^{-1}$
RG	气体内容物最大容许活度释放率，以 RG_A 或 RG_N 表示	$\text{Bq}\cdot\text{s}^{-1}$
RG_A	在考虑到渗透作用后的运输事故条件下，气体内容物的最大容许活度释放率	$\text{Bq}\cdot\text{s}^{-1}$
RG_N	在考虑到渗透作用后的正常运输条件下，气体内容物的最大容许活度释放率	$\text{Bq}\cdot\text{s}^{-1}$
RI_{iA}	在运输事故条件下，放射性核素 i 的可释放活度	Bq
RI_{iN}	在正常运输条件下，放射性核素 i 的可释放活度	Bq

RI_T	所有放射性核素总的可释放活度，以 RI_{TA} 或 RI_{TN} 表示	Bq
RI_{TA}	在运输事故条件下，所有放射性核素的总可释放活度	Bq
RI_{TN}	在正常运输条件下，所有放射性核素的总可释放活度	Bq
RP	由于渗透引起的活度释放率，以 RP_A 或 RP_N 表示	$Bq \cdot s^{-1}$
RP_A	在运输事故条件下，由渗透引起的活度释放率	$Bq \cdot s^{-1}$
RP_N	在正常运输条件下，由渗透引起的活度释放率	$Bq \cdot s^{-1}$
S	泄漏率灵敏度	$Pa \cdot m^3 \cdot s^{-1}$
SHeLR	标准化氦泄漏率	$Pa \cdot m^3 \cdot s^{-1} \text{SHeLR}$
SLR	标准化泄漏率	$Pa \cdot m^3 \cdot s^{-1} \text{SLR}$
T	流体绝对温度	K
T_0	参考温度	$T_0=298K$
T_1	检验前气体温度	K
T_2	检验后气体温度	K
u	速度	$m \cdot s^{-1}$
V	气体体积	m^3
V_A	运输事故条件下介质的体积	m^3
V_N	正常运输条件下介质的体积	m^3
μ	流体动力粘度	$Pa \cdot s$
μ_i	成分 i 的流体动力粘度	$Pa \cdot s$
μ_{mix}	混合物的流体动力粘度	$Pa \cdot s$
ν	气泡产生率	s^{-1}
ρ	密度	$kg \cdot m^{-3}$
ρ_g	气体密度	$kg \cdot m^{-3}$
ρ_l	液体密度	$kg \cdot m^{-3}$
σ	液体表面张力	$N \cdot m^{-1}$