

低浓六氟化铀运输容器 (UX-30/30B) 铁路运输使用 环境温度适用性研究

刘念¹, 曹芳芳¹, 薛光磊², 张恒³, 张敏¹, 潘玉婷^{1*}

(1.生态环境部核与辐射安全中心, 北京 102401; 2.中核第七研究设计院有限公司, 太原 030012;
3.中国原子能工业有限公司, 北京 100032)

摘要: **目的** 研究低浓六氟化铀运输容器 (UX-30/30B 运输容器) 在夏季进行铁路运输的安全性。**方法** 分析国内外法规标准, 分析容器材料性质, 并利用法国达索公司开发的大型有限元分析软件 Abaqus 对不同工况进行热工分析, 综合评价高温对运输安全的影响。**结果** 运输容器设计批准书规定的“-40~38 °C”为大气环境温度, 而非封闭车厢内的温度; 70 °C在六氟化铀运输容器主要材料的设计温度范围内, 对容器性能影响甚微; 在国内铁路网运输时, UX-30/30B 运输容器可在 70 °C的封闭车厢内安全运输 24 h; 而在运输容器初始温度 38 °C、每天车厢内持续 8 h 70 °C高温的情况下运输 10 d 后, 运输容器内六氟化铀平均温度最高为 49.66 °C, 在海拔高度低于 3 141 m 时可满足安全运输的要求。**结论** 低浓六氟化铀运输容器 UX-30/30B 可安全地在夏季进行铁路运输。

关键词: 六氟化铀; 运输容器; 铁路运输; 热工分析

中图分类号: TB48

文献标志码: A

文章编号: 1001-3563(2024)21-0081-06

DOI: 10.19554/j.cnki.1001-3563.2024.21.013

Applicability of Using Ambient Temperature for Low Enriched Uranium Hexafluoride Transport Containers (UX-30/30B) in Rail Transportation

LIU Nian¹, CAO Fangfang¹, XUE Guanglei², ZHANG Heng³, ZHANG Min¹, PAN Yuting^{1*}

(1. Nuclear and Radiation Safety Center of the Ministry of Ecology and Environment, Beijing 102401, China;

2. China National Nuclear Corporation Seventh Research and Design Institute Co., Ltd., Taiyuan 030012, China;

3. China Atomic Energy Industry Co., Ltd., Beijing 100032, China)

ABSTRACT: The work aims to ensure the safety of low enriched Uranium Hexafluoride (UF₆) transport container UX-30/30B for railway transportation in summer. National and international regulations and standards as well as the material nature of the container were analyzed. Abaqus, large-scale finite element analysis software developed by Dassault Company was used to conduct thermal analysis on different working conditions to evaluate the effects of high temperature on transportation safety. "-40~38 °C" specified in the design approval certificate referred to the ambient temperature of the atmosphere, not the temperature inside the closed carriages; 70 °C was within the design temperature range of the main materials of the uranium hexafluoride transport packaging and had few effects on the container performance. The package could be safely transported in a closed carriage at 70 °C for 24 h when transported in China's railway network; After 10 d of transportation in the case of initial temperature of 38 °C in the transportation container as well as the temperature in the carriage of 70 °C for 8 h every day, the maximum average temperature of uranium hexafluoride in the transport container was 49.66 °C, which could meet the requirements of safe transportation at altitudes

lower than 3 141 m. To sum up, low enriched uranium hexafluoride transport containers UX-30/30B are safe for railway transportation in summer.

KEY WORDS: uranium hexafluoride; transport container; railway transportation; thermal analysis

六氟化铀 (UF_6) 是核燃料循环过程中的重要中间产物^[1-2], 极具化学毒性, 与潮湿空气接触会立即反应生成氟化氢 (HF) 气体以及白色水溶性残渣氟化铀酰 (UO_2F_2)。HF 易溶于水, 具有高毒性与强腐蚀性, 直接接触会对皮肤、眼睛、呼吸道造成严重灼伤, 过量吸入、接触、吞咽均可能致命, 这种化学毒性危害已经大于它的放射性危害^[3-6]。

六氟化铀具有特殊的物理性质, 包括较低的三相点温度 (0.151 MPa , $64\text{ }^\circ\text{C}$)、较大的液体热膨胀系数以及较低的固气转化温度。当六氟化铀运输容器长时间暴露于高温环境下时, 其内部饱和蒸气压上升, 发生固气转化, 可能存在破裂的风险。鉴于六氟化铀具有放射性、毒性、强腐蚀性等多种危害特性, 公路运输风险较大, 我国一直采用 TP₉、TP₇₀、TP_{64G} 等型号的特种铁路货运车实施铁路运输。据铁路运输实践反馈, 夏季铁路运输封闭车厢内温度可达 $70\text{ }^\circ\text{C}$, 不仅超过了我国最常用低浓六氟化铀运输容器 (UX-30/30B 运输容器) 设计批准书批复的使用环境温度 $-40\sim 38\text{ }^\circ\text{C}$, 也超过了六氟化铀的三相点温度和标准大气压下的固气相转化温度。在此温度下, 运输容器内容物的气化情况、运输容器内的压力变化可能会对运输容器安全性产生影响。

虽然多年来国内六氟化铀铁路运输从未发生安全事件, 但对于车厢内温度达到 $70\text{ }^\circ\text{C}$ 的情况, 并未分析研究其运输的安全性, 故开展 $70\text{ }^\circ\text{C}$ 环境温度下 UX-30/30B 运输容器的安全性, 以及不同工况下低浓六氟化铀内容物及低浓六氟化铀运输容器的安全性分析研究具备理论和实践双重意义。

1 低浓六氟化铀运输容器 (UX-30/30B 运输容器) 现状

UX-30/30B 运输容器由圆柱形的 30B 运输容器和吸收冲击力的 UX-30 外包装组成, 2 个部分均由美国设计制造, 于 2014 年 6 月 13 日获得国家核安全局颁发的使用批准书。

30B 运输容器由筒体及 2 个椭圆形封头组成, 2 个封头侧分别安装有裙座, 其中一端封头设置 1 个进出料接头, 另一端封头设置 1 个堵头, 进出料接头处安装倒料阀门。30B 运输容器三维图见图 1。

UX-30 外包装为卧式正圆柱体容器, 可水平分为上、下 2 个不锈钢壳, 2 个半壳由 10 个可伸缩的用钢索拴住的球形锁销装配固定在一起。UX-30 外包装分内、外 2 层, 在内外壁之间有 6 in (152.4 mm) 的空间, 用于填充可吸收能量和隔热的聚氨酯闭孔泡沫材料。UX-30 外包装示意图见图 2。

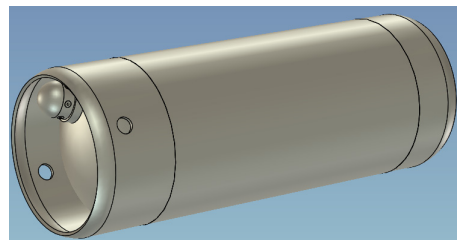


图 1 30B 运输容器三维图
Fig.1 Three-dimensional drawing of 30B transport container

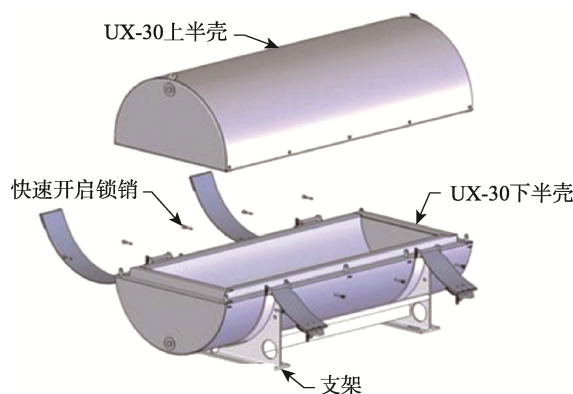


图 2 UX-30 外包装示意图
Fig.2 Schematic of UX-30 outer packaging

迄今为止, 使用 UX-30/30B 运输容器进行六氟化铀运输从未发生过异常或紧急情况, 亦从未提出过对该运输容器的设计结构及质量的批评意见。

2 国内外法规标准的要求及目前铁路运输存在的问题

国内外涉及运输温度的放射性物品运输法规标准中, 《军用物资运输环境条件》(GJB 3493—1998)^[7]规定, 各种运输方式封闭车厢内的温度不超过 $70\text{ }^\circ\text{C}$; 《放射性物品安全运输规程》(GB 11806—2019)^[8]规定, 易裂变材料货包设计环境温度范围为 $-40\sim 38\text{ }^\circ\text{C}$, 根据《国际原子能机构放射性物质安全运输条例咨询材料》(SSG-26)^[9]的解释, 使用环境温度 $-40\sim 38\text{ }^\circ\text{C}$ 是指大气环境温度, 而非运输工具封闭车厢内的温度。故以上标准的使用范围不同, 彼此并不冲突。

在我国铁路运输实践中, 夏季 (5—10 月) 期间, 铁路运输封闭车厢内温度可达 $70\text{ }^\circ\text{C}$, 尽管满足相关法规要求, 但此温度下能否保证六氟化铀运输容器的运输安全性是个未知数。环境温度偏高的主要不利影响如下。

1) 对运输容器及其外包装材料的影响。70℃的使用环境温度对运输容器及其外包装构件组成材料的强度、老化、热膨胀等方面的影响, 可能导致构件变形、屏蔽减弱、临界限值变化和泄漏等现象。

2) 对六氟化铀内容物的影响。六氟化铀三相点温度较低, 封闭车厢内持续的 70℃高温和内容物本身衰变释热可能会使六氟化铀达到其固气相转化点, 产生气化、液化等相变, 致使容器内部压力增大。

3 UX-30/30B 运输容器铁路正常运输情况下安全性评估分析

铁路运输中, 环境温度升高对运输容器的影响包括对容器材料的影响和对内容物的影响, 下面分别进行分析。

3.1 铁路正常运输工况下温度对 UX-30/30B 运输容器材料的影响

GJB 3493—1998 综合考虑了我国高温记录极限值 47.7℃与黑漆外壳的日照辐射升温 20.9℃, 规定各种运输工具封闭车厢内的温度为 70℃。

GB 11806—2019 考虑太阳暴晒的影响, 要求运输容器及其外包装设计时应保证材料在 40~70℃的温度范围内不产生脆性断裂、强度降低、老化加速、热膨胀差异性明显等问题, 避免发生运输容器及其外包装构件的几何形状变形、屏蔽减弱、临界限值变化和泄漏等现象。

30B 运输容器材料为 ASTM A516 的 65 级钢, UX-30 材料为 ASTM A240 304 型不锈钢和聚氨酯闭孔泡沫。考察材料性能, ASTM A516 的 65 级钢在 100℃下的许用应力为 126 MPa, ASTM A240 304 型不锈钢在 100℃下的许用应力为 137 MPa, 聚氨酯闭孔泡沫的裂解温度在 200℃以上, 70℃的使用环境温度对其影响均较小^[10]。

综上所述, 70℃的使用环境温度对运输容器主要材料性能的影响较小, 且在设计温度范围内, 不会对运输容器的形变、临界安全、辐射水平、泄漏等方面产生安全隐患, 对运输容器屏蔽及临界没有影响。

3.2 铁路正常运输工况下温度对内容物的影响

铁路正常运输工况下, 车厢内较高的环境温度与放射性核素衰变释放的衰变热均会导致内容物升温, 继而导致相态变化、容器内部压力变化等情况, 需要综合考虑其影响。

3.2.1 内容物的衰变热

衰变热是指放射性核素衰变时所产生的能量, 其大小为放出粒子的辐射能量。保守地取 UX-30/30B 运输容器达到满载装料量 2 277 kg, ²³⁵U 富集度为容器设计

上限的 5%, 则内容物中主要放射性核素为 ²³⁵U、²³⁴U 和 ²³⁸U, 其余放射性核素为其衰变子体, ²³⁵U、²³⁴U 和 ²³⁸U 的丰度分别为 5.061%、0.054%和 94.885%^[11]。

根据天然放射性核素的衰变历程和主要衰变数据^[12], 可得各个核素衰变过程中所产生的主要辐射能量, 并计算出一定时间内各个衰变链的衰变热贡献份额, 相加即可得出衰变热总量, 据此计算出该时间段内衰变热的平均功率。

选取衰变累积时间间隔为 7 d, 按照上述装料丰度及质量进行计算, 结果如表 1 及图 3 所示。

表 1 衰变热平均功率

Tab.1 Average power of decay heat

序号	物料存放时间/d	衰变热平均功率/W
1	1 周 (0~7)	0.160 93
2	1 个月 (31~37)	0.164 75
3	3 个月 (91~97)	0.167 01
4	6 个月 (181~187)	0.167 47
5	10 个月 (301~307)	0.167 50
6	12 个月 (361~367)	0.167 50
7	18 个月 (541~547)	0.167 50
8	24 个月 (721~727)	0.167 51

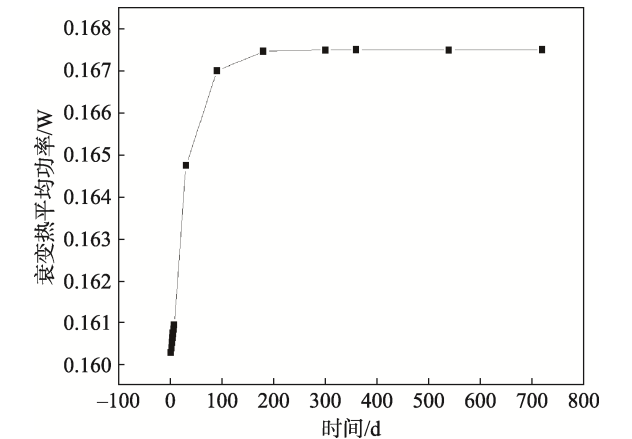


图 3 衰变热平均功率随时间的变化
Fig.3 Average power of decay heat over time

最初 1 个月内, 衰变热平均功率上升较快; 约 10 个月后, 衰变热平均功率趋于稳定, 此变化趋势与放射性总活度随时间的变化一致。在 24 个月之内的短期存放时间中, 满载 UX-30/30B 运输容器中的六氟化铀固体的衰变热平均功率最大值约为 0.167 5 W。温度不影响核素活度, 故分析中可认为内容物衰变热恒定为 0.167 5 W。

3.2.2 情景设定与接收准则

运输过程中, 环境温度升高与衰变热释放均会导致内容物升温, 该环境温度下六氟化铀的饱和蒸气压即为运输容器的内部压力。列车停靠时, 由于太阳暴

晒, 封闭车厢内温度会达到最高温度 70 °C; 而在行驶过程中, 外部空气流动会使车厢内温度降低。根据铁路运输实践, 正常工况下列车停靠编组站的时间不会超过 1 d, 而 UX-30/30B 运输容器运输活动正常不超过 7 d, 极端情况下为 10 d。

故此, 设定 UX-30/30B 运输容器初始温度为 38 °C, 选取最常用的 TP_{64G} 型车厢为代表, 采用法国达索公司开发的大型有限元分析软件 Abaqus, 分别对“封闭车厢内环境温度 70 °C 下持续 24 h (工况 I)”和“1 个运输周期内 (7 d) 以及极端情况下 (10 d) TP_{64G} 型车厢内的实际温度 (工况 II)”2 种工况进行热工分析, 由六氟化铀最高平均温度可知对应的饱和蒸气压, 据此可计算出对应的外部海拔高度^[13]。只要运输高度不超过该海拔高度, 即可保证 UX-30/30B 运输容器内部压力不超外部大气压。

1) 工况 I

本文在建模时进行了适当简化, 省略了支架部件在受热过程中会吸收部分热量、金属材料与聚氨酯闭孔泡沫的导热系数有数量级的差别 2 个因素, 并假设 UX-30 外包装与 30B 容器外壁之间为理想接触, 不存在间隙, 忽略了空气层的存在, 从而使热量更快地传递。总体而言, 计算结果较实际情况更为保守。

根据上述简化, 采用 CAXA3D 建立 UX-30/30B 运输容器 3D 模型并导入 Abaqus 软件。设定外包装外层及 L 型接合面金属厚度为 3 mm, 外包装内层金属厚度为 2 mm, 外包装内层端板金属厚度为 6 mm; 设定六氟化铀内容物均匀附着在 30B 容器内壁, 这种四周均匀分布模型比内容物沉在底部模型的受热面积更大, 受热模型与实际接近, 计算结果比较保守。

有限元软件是通过计算单元上节点的物理量进而计算出整个模型的响应值, 分析计算前需要对模型进行离散化处理 (划分网格)。网格划分的质量直接关系到计算结果的精确度和计算效率, 为保证计算结果的精度以及计算效率, 整个运输容器采用 8 节点六面体线性单元, 划分后网格数量为 580 670 个, 节点数为 594 587 个, 网格类型为 C3D8R。离散模型如图 4 所示。

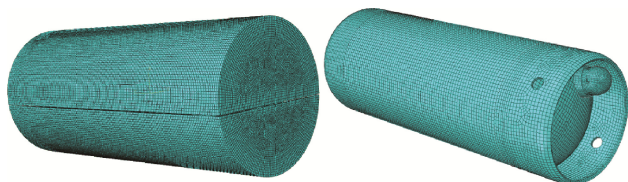


图 4 UX-30/30B 运输容器离散模型

Fig.4 Discrete model of UX-30/30B transport container

根据运输实践, 保守地设置边界条件: 运输容器及内容物初始温度为 38 °C, 封闭车厢内温度 70 °C 持续 24 h, 六氟化铀衰变热为 0.167 5 W。

UX-30/30B 运输容器主要构成包括 A516 (6 级)、S304、聚氨酯闭孔泡沫和内容物六氟化铀等, 其材料性能参考通用标准。

计算可知, 该总工况下 UX-30/30B 运输容器的最高温度为外包装外层金属最高温度 69.96 °C; 外包装内层金属最高温度为 57.19 °C, 位于外包装内层接合面处; 30B 运输容器最高温度为 49.12 °C, 位于容器阀门端裙座靠近上、下外包装接合面处。内容物六氟化铀最高平均温度为 42.51 °C, 平均温度随时间的变化见图 5。

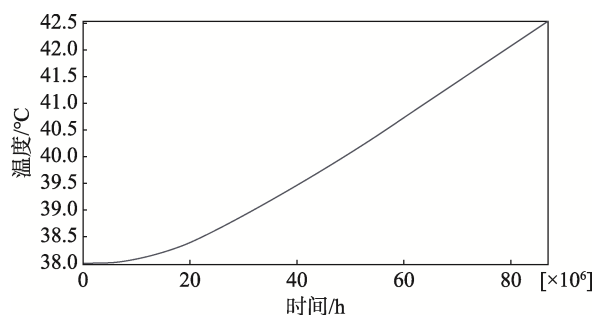


图 5 内容物平均温度随时间的变化

Fig.5 Average temperature of contents over time

六氟化铀固气压力平衡方程为^[14]:

$$\log_{10} P = -\frac{2751}{T} - 75.0e^{-\frac{2560}{T}} - 1.01 \times \log_{10} T + 12.921 \quad (1)$$

式中: P 为气压, kPa; T 为六氟化铀物料温度, K。

式 (1) 可变为:

$$P = 10^{-\frac{2751}{T} - 75.0e^{-\frac{2560}{T}} - 1.01 \times \log_{10} T + 12.921} \quad (2)$$

计算可知, 当六氟化铀温度为 42.51 °C (315.66 K) 时, 对应的饱和蒸气压为 45.622 kPa。在标准大气压 101.325 kPa 下, UX-30/30B 运输容器承受的内外压力差为 -55.703 kPa, 此值在 UX-30/30B 运输容器的设计值 -0.17~1.4 MPa 内, 可以保证 UX-30/30B 运输容器的密封性, 确保六氟化铀安全运输。

海拔高度在 11 000 m 以下时, 海拔高度和大气压之间的关系为^[13]:

$$P = P_0 \times \left(1 - \frac{Lh}{T_0}\right)^{g/RL} \quad (3)$$

式中: P_0 为海平面标准气压, 取 101.325 kPa; L 为温度递减率, 取 0.006 5 K/m; T_0 为海平面标准温度, 取 288.15 K; h 为海拔高度, m; g 为重力加速度, 取 9.806 65 m/s²; R 为通用气体常数, 取 287.053 J/(kg·K)。

式 (3) 可变为:

$$h = \frac{T_0}{L} \left[1 - (P/P_0)^{RL/g}\right] \quad (4)$$

据此可计算出饱和蒸气压为 45.622 kPa 时, 对应的运输容器外海拔高度为 6 244 m, 远高于中国铁路的最高海拔 (5 068 m, 唐古拉站), 故 UX-30/30B 运

输容器可在全国安全运输。

2) 工况 II

在较长时间的运输中,由于昼夜循环,列车并非始终处于太阳暴晒下,故有必要对车厢内的温度变化进行计算分析。

典型的 TP_{64G} 型车厢自重 23.8 t,长 154 78 mm,宽 2 804 mm,高 2 855 mm,主要材料为碳钢。据此建立计算模型,边界条件设置如下。1) 车厢初始温度设置为 38 °C。2) 环境温度。采用《军用设备气候极值地面气温》(GJB 1172.2—1991)^[15]中“与最高气温全国 1%’工作极值相应的气温和有关气象要素的日变化”中的极值温度作为外界大气温度,并根据 GJB 3493—1998,将其中 14:00—16:00 的极值温度由 45.5、45.5 和 45.2 °C 分别修正至 47.7、47.7 和 47.4 °C。3) 太阳辐射强度。采用 GJB 1172.2—1991“与最高气温全国 1%’工作极值相应的气温和有关气象要素的日变化”中的暴晒量作为对车厢的暴晒量,车厢顶面暴晒量按 100%计,侧面按 50%计。

计算可得封闭车厢内温度随时间的变化,结果如图 6 所示。封闭车厢内温度呈周期性循环,循环周期为 24 h,与外界大气环境温度循环周期一致。24 h 中,车厢内空气平均温度最高为 60.03 °C,最低为 34.16 °C,超过 55 °C 的时间约为 6 h。

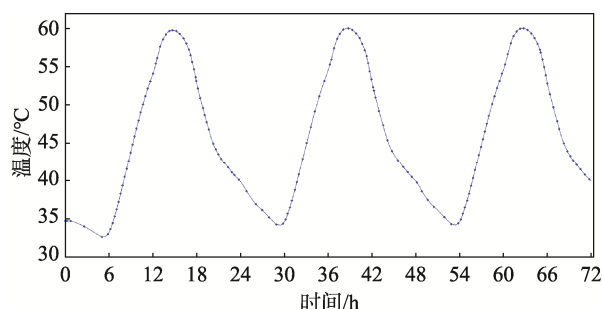


图 6 车厢内平均温度随时间的变化

Fig.6 Average temperature inside the carriage over time

由于未考虑外部空气流动使车厢内温度降低,故计算结果较之实际情况更为保守。

在此基础上,对 UX-30/30B 运输容器进行热工分析。计算中,保守地取每天 00:00—10:30 和 18:30—24:00 的车厢空气平均温度为计算环境温度,而 10:30—18:30 的计算环境温度调整为 70 °C,相当于 1 d 内 70 °C 持续 8 h,其余计算模型同第 3.2.3 小节。运输实践中,UX-30/30B 运输容器单次运输最长时间为 7 d,极端情况为 10 d。

计算可得内容物平均温度随时间的变化,结果如图 7 所示。内容物在 7 d 内平均温度最高为 48.08 °C,对应的六氟化铀饱和蒸气压为 62.982 kPa,对应的海拔高度为 3 834 m,UX-30/30B 运输容器承受的压力为 -38.343 kPa; 10 d 内平均温度最高为 49.66 °C,对应的六氟化铀饱和蒸气压为 68.857 kPa,对应的

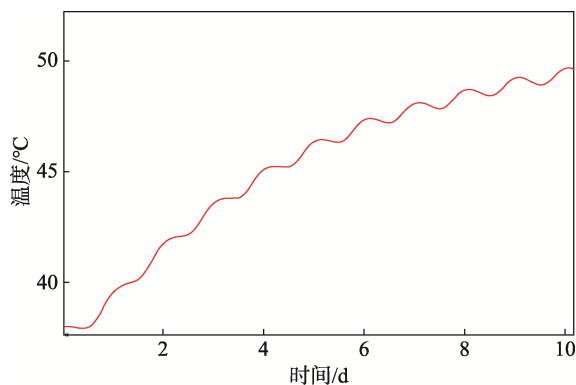


图 7 内容物平均温度 10 d 内随时间的变化

Fig.7 Average temperature of contents within 10 d over time

海拔高度为 3 141 m, UX-30/30B 运输容器承受的压力为 -32.468 kPa。

可见在满足海拔高度要求时,六氟化铀呈固态,且容器内压力不超过外部大气压,内外压力差均在 UX-30/30B 运输容器的设计压力之内,可以保证 UX-30/30B 运输容器的密封性,确保六氟化铀安全运输。

4 结论

本文分析了封闭车厢铁路运输六氟化铀的安全性,重点论证了封闭车厢内环境温度达 70 °C 时 UX-30/30B 运输容器的安全性及运输合规性。得出结论如下:

1) GB 11806—2019 所规定的“使用环境温度 -40~38 °C”是指大气环境温度,而非运输工具内的温度;考虑太阳暴晒引起的升温, GJB 3493—1998 规定各种运输方式封闭车厢内的温度不超过 70 °C。经分析论证: 70 °C 的使用环境温度对 UX-30/30B 运输容器主要材料的性能影响较小,且在设计温度范围内,正常运输情况下不会对运输容器的结构、包容、屏蔽和临界安全等方面产生安全隐患。

2) 在国内铁路网运输时, UX-30/30B 运输容器可在环境温度 70 °C 的封闭车厢内运输 24 h,容器内六氟化铀饱和蒸气压始终低于外部大气压,满足运输要求。

3) 根据 GJB 1172.2—1991 中相关温度的最高极值,分析得出的 TP_{64G} 车厢温度情况,结合本项目实际运输线路,可知运输容器初始温度 38 °C、每天运输车厢内温度持续 8 h 70 °C 高温的情况下, 10 d 内 UX-30/30B 运输容器内容物平均温度最高为 49.66 °C,在海拔高度 < 3 141 m 时,六氟化铀呈固态且容器内部压力不超过大气压,满足运输要求。

4) 铁路实践中,常规低浓六氟化铀运输方案的途经站点(阿拉山口站、满洲里站、包头站、兰州站、

汉中站、乐山站、宜宾站、上海站)及沿途线路海拔高度均不超过 3 000 m,运输时长均不超过 10 d,可保证夏季运输的安全性。

参考文献:

- [1] PELUZO B M T C, KRAKA E. Uranium: The Nuclear Fuel Cycle and Beyond[J]. International Journal of Molecular Sciences, 2022, 23(9): 4655.
- [2] PASTOOR K J, KEMP R S, JENSEN M P, et al. Progress in Uranium Chemistry: Driving Advances in Front-End Nuclear Fuel Cycle Forensics[J]. Inorganic Chemistry, 2021, 60(12): 8347-8367.
- [3] MOHSENDOKHT M. Risk Assessment of Uranium Hexafluoride Release from a Uranium Conversion Facility by Using a Fuzzy Approach[J]. Journal of Loss Prevention in the Process Industries, 2017, 45: 217-228.
- [4] MELDRUM M. Toxicology of Hydrogen Fluoride in Relation to Major Accident Hazards[J]. Regulatory Toxicology and Pharmacology, 1999, 30(2 Pt 1): 110-116.
- [5] OZCAN M, ALLAHBEICKARAGHI A, DÜNDAR M. Possible Hazardous Effects of Hydrofluoric Acid and Recommendations for Treatment Approach: A Review[J]. Clinical Oral Investigations, 2012, 16(1): 15-23.
- [6] PETERS D, MIETHCHEN R. Symptoms and Treatment of Hydrogen Fluoride Injuries[J]. Journal of Fluorine Chemistry, 1996, 79(2): 161-165.
- [7] 中国人民解放军总装备部.军用物资运输环境条件: GJB 3493—1998[S].北京: 中国石化出版社, 1998.
- General Equipment Department of the Chinese People's Liberation Army. Environmental Conditions for Military Material Transportation: GJB 3493—1998 [S]. Beijing: China Petrochemical Press, 1998.
- [8] 生态环境部, 国家市场监督管理总局. 放射性物品安全运输规程: GB 11806—2019[S]. 北京: 中国环境出版社, 2019: 17.
- Ministry of Ecology and Environment, State Administration for Market Regulation. Regulations for the Safe Transport of Radioactive Material: GB 11806—2019[S]. Beijing: China Environmental Science Press, 2019: 17.
- [9] IAEA. No. SSG-26 Advisory Material for the IAEA Regulations for the Safe Transport of Radioactive Material (2018 Edition) [S]. Vienna:IAEA, 2018: 98.
- [10] ASME 锅炉及压力容器动力锅炉委员会. ASME 锅炉及压力容器规范: 第 II 卷 D 篇材料性能[M].北京:中国石化出版社, 2022:18,110.
- ASME Boiler and Pressure Vessel Committee on Materials. ASME Boiler and Pressure Vessel Code Section II Part D Materials Properties[M]. Beijing: China Petrochemical Press, 2022:18,110.
- [11] 李德平,潘自强. 辐射防护手册: 第三分册 辐射安全 [M]. 北京: 原子能出版社, 1990: 229.
- LI D P, PAN Z Q. Handbook of Radiation Protection: Part III Radiation Safety[M]. Beijing: Atomic Press, 1990: 229.
- [12] 李德平,潘自强. 辐射防护手册: 第一分册 辐射源与屏蔽[M]. 北京: 原子能出版社, 1987: 21-22.
- LI D P, PAN Z Q. Handbook of Radiation Protection: Part I Radiation Sources and Shielding[M]. Beijing: Atomic Press, 1987: 21-22.
- [13] 国家质量监督检验检疫总局, 中国国家标准化管理委员会. 环境条件分类 自然环境条件 气压: GB/T 4797.2—2017[S]. 北京: 中国标准出版社, 2018: 17.
- General Administration of Quality Supervision, Inspection and Quarantine of the People's Republic of China, Standardization Administration of the People's Republic of China. Classification of Environmental Conditions—Environmental Conditions Appearing in Nature—Air Pressure: GB/T 4797.2—2017[S]. Beijing: Standards Press of China, 2018: 17.
- [14] USEC. USEC-651 The UF₆ Manual: Good Handling Practices for Uranium Hexafluoride (Revision 9) [M]. USEC Inc, 2006.
- [15] 国防科学技术工业委员会.军用设备气候极值 地面气温: GJB 1172.2—1991[S].1991.
- National Defense Science, Technology and Industry Committee. Extreme Climate Values for Military Equipment—Ground Temperature: GJB 1172.2—1991[S].1991.