TC-I 型放射性材料运输容器的设计

陈治江,蔡吉庆,张志强,周丽凤,高博

(中国工程物理研究院 材料研究所, 绵阳 621907)

摘要:目的 设计开发 TC-I 型放射性材料运输容器,用以运输少量的放射性材料。方法 按照 GB 11806—2004《放射性物质安全运输规程》中 B(U)型货包的规定进行设计,设计的运输容器为三层嵌套 结构,主要由 3 部分组成,即外容器、隔热减振材料、内容器,其中外容器与内容器材料为 304 不锈钢, 隔热减振材料主要为云杉。结果 对设计的 TC-I 型容器进行了运输事故条件下的考核试验,包括水浸试 验、力学试验、耐热试验等,试验前后的漏率测试结果表明,该容器性能满足 GB 11806—2004 对内容 物漏失限制的要求。结论 成功设计了一种 B(U)型放射性材料运输容器,在规定的运输事故条件下能保 证放射性材料运输的安全。

关键词: 放射性材料;运输容器;B(U)型;运输事故条件试验 中图分类号:TB485.3 文献标识码:A 文章编号:1001-3563(2017)21-0006-04

Design of TC-I Type Transport Cask for Radioactive Materials

CHEN Zhi-jiang, CAI Ji-qing, ZHANG Zhi-qiang, ZHOU Li-feng, GAO Bo (Institute of Materials, China Academy of Engineering Physics, Mianyang 621907, China)

ABSTRACT: The work aims to design and develop TC-I type transport cask to transport small quantities of radioactive materials. The transport cask was designed in accordance with the stipulation of B(U) type package described in GB 11806—2004 Regulations for the Safe Transport of Radioactive Materials. The transport cask had a nested structure of three layers with three main components: drum, heat-resistant and vibration-resistant materials and containment vessel. The material of drum and containment vessel was stainless steel 304, and the main component of heat-resistant and vibration-resistant materials was spruce. The TC-I type transport cask designed was assessed with transport accident condition tests, including water immersion test, mechanical test and heat resistance test. The leak test results before and after the test showed that, the performance of such cask met the requirements of content leakage limit in GB 11806—2004. A B(U) type transport cask for radioactive materials is successfully designed. The transport cask can guarantee the transportation safety of radioactive materials in the stipulated transport accidents.

KEY WORDS: radioactive materials; transport cask; B(U) type; transport accident condition tests

放射性材料的应用通常分为示踪应用、辐射应用 和衰变应用三大类,随着人工放射性核素生产的发 展,放射性材料得到了日益广泛的应用,近年来放射 性材料运输的品种和数量不断增加^[1]。放射性材料由 于自身具有放射性的特性,其运输过程要求更为严 苛。运输过程中一旦发生事故,放射性材料的装载容 器可能会发生受损、破裂、泄露,造成放射性污染事 故^[2—3]。放射性材料的安全运输关乎环境保护和公众 健康,放射性物质运输容器的固有安全性是放射性物 质运输安全的前提。国外针对放射性材料的运输制定了 相关的法律法规,开展了系统的理论及实验研究^[4-6]。 美国针对放射性材料运输开展了系列研究工作,为了 包装放射性材料的运输安全,研制了多种用于运输放 射性材料的抗事故包装箱^[7-11]。

针对放射性材料运输安全问题,国际原子能组织 (IAEA)特别制定了相关法规,明确了放射性材料 运输时的包装防护等事项。我国是 IAEA 成员国,根据 IAEA 6号安全丛书制定了 GB 11806—2004《放射 性物质运输安全规程》(以下简称《规程》)。文中的 放射性材料运输容器根据 GB 11806—2004 的规定进 行设计及试验。

1 设计

设计的 TC-I 放射性材料运输容器采用嵌套结构,主要由 3 个部分组成,即外容器、隔热减振材料、 内容器。总体尺寸为 \u03c9466 mm×503 mm,货包按照对称结构设计,总体重心位置与货包中心基本重合。包 装容器整体结构见图 1。





1.1 内容器

内容器外壳与内容器盖采用 304 不锈钢,内容器 盖与内容器壳之间采用 12 个 M8 螺钉进行连接紧固, O 形圈材料采用全氟橡胶密封圈,其最高使用温度可 达 260~320 ℃。样品盒在内容器中的固定通过采用



图 2 内容器结构 Fig.2 Configuration of containment vessel

内容器盖压紧衬垫来实现,其中衬垫材料为硬质聚氨 酯泡沫,衬垫同时也可作为样品盒在内容器中的缓冲 部件。

内容器的密封采用斜口密封,密封圈采用 O 形 圈。当拧紧螺钉时,O 形圈的压缩量可以通过内容器 盖与内容器壳之间的贴紧程度进行判断,当内容器盖 与壳之间完全贴紧时,内容器的密封性能可以达到 10⁻⁹ Pa·m³/s 量级。样品盒在装入内容器时,由于运 输包装容器内空间狭小,拧紧螺钉操作不方便,且不 易观察螺钉的拧紧程度,因此样品盒的装卸需要将内 容器移出运输包装容器外进行操作。内容器盖上装有 拉环,便于内容器从运输包装容器中进行装卸。

1.2 外容器

运输过程中,外容器是发生事故时的牺牲结构, 它必须有足够的韧性、较大的延展性和抗裂纹扩展能 力,外容器在事故状态之后可以变形但不能破裂。同 时,外容器要尽可能薄,以便有适宜的抗变形能力及 较小的质量。该设计方案中,外容器采用的是 304 不 锈钢,这种不锈钢属于奥氏体不锈钢,可用于制作强 度高,韧性、塑性好,及有良好耐腐蚀性的零件,适 合用作放射性材料运输包装容器的外容器。

外容器结构见图 3, 主要分为外容器盖、外容器 壁、外容器底座、缓冲环以及固定法兰。外容器盖、 外容器壁和外容器底座都采用双层钢板结构,其中, 外容器壁单层钢板厚度为 1.5 mm,外容器盖、外容 器底座单层钢板厚度为 2 mm。采用双层结构可以使 得运输包装容器在进行跌落试验时,内外层之间产生 相对滑移。即使外层发生破裂,由于滑移作用,内层 也不易发生破裂。同时,在外容器壁的顶部和底部装 有缓冲环,可以保护外容器的直角边缘,因为在进行 跌落试验时,直角边缘处是最容易破裂的位置。双层 钢板之间采用点焊工艺;容器底座与容器壁之间采用 多段焊缝进行焊接;缓冲环与外容器壁之间采用满焊 进行焊接。

外容器盖与外容器之间通过固定法兰进行连接,



图 3 外容器结构 Fig.3 Configuration of drum

固定法兰通过 12 个 M8 螺钉固定在外容器壁上,容 器盖与固定法兰之间采用 12 个 M8 螺钉进行连接。 外容器上均匀分布 4 个起吊环,用于整个运输包装容 器的起吊。考虑到容器内的木材(文中采用云杉)在 耐热试验过程中会大量排放水汽以及其他有机物气 体,为了防止容器内压力升高过快,外容器没有进行 密封设计,通过自攻螺钉与外容器和云杉固定在一 起,外容器盖与外容器底部均匀分布 6 个自攻螺钉, 外容器筒体周向均匀分布 2 组 12 个自攻螺钉。耐热 试验中,产生的气体可以通过自攻螺钉的间隙排出。 另外,在外容器筒体上还额外布置了 12 个 Ø 3 mm 的 排气孔。

1.3 隔热、减振材料

运输包装容器需要经受 GB 11806—2004 规定的 力学试验、耐热试验,这就要求运输包装容器应该具 有隔热、吸振功能。该设计方案中,隔热、减振材料 的主体为云杉,还采用了少量的陶瓷纤维毯以及缓冲 垫(材料为硬质聚氨酯泡沫)。隔热、减振材料各部 分结构形状见图 4。

云杉的导热性能较差,热导率为0.35 W/(m·℃), 同时在高温下,云杉吸收大量的热量,发生热解,形 成的木炭热导率为0.18 W/(m·℃),是目前武器产品包 装箱防火减振设计的优选材料。国内外学者对云杉的隔 热以及缓冲性能做了许多实验与数值分析^[12—14],发 现云杉具有非常优异的缓冲吸能作用,且其在受热条 件下热解炭化形成的炭化层具有非常良好的隔热性能。 目前云杉作为缓冲、阻热材料已经在部分军用抗事故包 装箱中得到了应用,其实际功能也得到了验证。

云杉作为主要的隔热、减振材料,在设计时需要 对其厚度进行初步估算。根据理论计算,云杉的厚度 至少为 60 mm。同时根据中国工程物理研究院的实验 结果,直径为 490 mm 的云杉在密闭容器中,30 min 后直径收缩为 446 mm,炭化层厚度为 50 mm。综合 考虑云杉的力学性能和隔热性能,文中云杉的厚度选 择为 90 mm。

该设计方案中云杉分为3部分,即云杉底盖、云



杉筒体、云杉盖。云杉筒体的厚度为 90 mm, 云杉底 的厚度为 80 mm, 云杉盖的厚度为 73 mm, 这是因为 在内容器与云杉之间加有缓冲垫。为了方便云杉盖的 取出, 云杉盖与云杉筒体之间采用具有一定锥度的止 口进行卡合。云杉通过自攻螺钉与外容器固定在一 起, 外容器盖与外容器底部均匀分布 6 个自攻螺钉, 外容器筒体周向均匀分布 2 组 12 个自攻螺钉。

云杉存在吸水膨胀的现象,而陶瓷纤维具有一定 的可压缩量,可以防止云杉膨胀之后将内容器卡死。 同时陶瓷纤维毯中孔隙尺寸较大,在火烧环境中可以 作为云杉热解气体的排出通道。陶瓷纤维毯的厚度为 20 mm,陶瓷纤维毯内表面采用一层 304 不锈钢卡箍 进行固定定型。文中采用的硬质聚氨酯泡沫密度为 1200 kg/m³,其热导率为 0.022 W/(m·℃),隔热性能 良好,同时是一种良好的缓冲隔振材料。

2 试验

GB 11806—2004 中规定的验证经受运输事故条件能力的试验包括力学试验(自由跌落试验、穿刺试验和压碎试验)、耐热试验以及水浸试验。GB 11806—2004 规定,货包质量不超过 500 kg,总体密度不大于 1000 kg/m³,放射性内容物活度大于 1000*A*₂(*A*₂为放射性核素的基本活度限值),且不是特殊形式放射性物质时,需要进行压碎试验,设计的包装容器总体密度大于 1000 kg/m³,因此无需开展压碎试验。

设计的放射性材料运输容器经历的运输事故条件下的试验内容包括:自由跌落试验,要求货包从9m高处以最严重损坏货包的取向下落到试验用靶上;穿刺试验,要求货包从1m高处下落到直立在试验用靶上的直径为150mm、长度为200mm的圆形实心低碳钢棒上;耐热试验,耐热试验紧接着力学试验进行,要求货包在800℃热环境中暴露30min;水浸试验,要求货包在水深至少15m处浸没8h。

GB 11806—2004 中要求力学试验后紧接着进行 耐热试验,因为在实际情况中,存在着放射性材料运 输容器先受到力学冲击,然后起火燃烧的事故场景^[15]。 试验过程中安排力学试验、耐热试验依次在同一个试 样上进行。考虑到水浸事故与机械+热事故同时发生 的概率极小,水浸试验在另一试样上单独开展。

GB 11806—2004 对于 B(U)型货包试验的要求主要是放射性内容物漏失的限制,要求运输事故条件下,1周内放射性内容物的累计漏失不大于 $A_{2\circ}$ 。对于 B 型货包,考虑最大内容物装载的情况,经过计算,可知只要运输事故条件下,内容物的漏率小于 10^{-5} Pa·m³/s,则能保证 1 周内放射性内容物的累计漏失不大于 $A_{2\circ}$

容器设计完成后,加工了2套试样,利用这2套

试样进行运输事故条件下的试验,试验前后,检测了 试样内容器的漏率,试验结果为:试样1内容器经历 水浸试验前漏率值为8.0×10⁻¹⁰ Pa·m³/s,试验后漏率 值为6.1×10⁻¹⁰ Pa·m³/s,表明该运输容器能通过GB 11806—2004的水浸试验;试样2初始漏率值为 6.8×10⁻¹⁰ Pa·m³/s,在依次经历贯穿、自由跌落、击穿、 耐热试验后,检测其内容器漏率,漏率值为2.0×10⁻⁹ Pa·m³/s,表明该运输容器能通过GB11806—2004的 力学试验与耐热试验。

3 结语

TC-I 型放射性材料运输容器是按 GB 11806—2004《放射性物质安全运输规程》中对 B(U)型货包的规定进行研制及试验的。对容器开展了运输事故条件下的试验,试验结果表明,包装容器的结构设计能满足 GB 11806—2004 规定的力学试验、耐热试验及水浸试验要求。该包装容器设计能保证放射性材料在运输正常条件下及规定的运输事故条件下均处于安全状态。

参考文献:

- 范深根,汪佳明,刘学成. 我国放射性物质运输概况
 [J]. 辐射防护, 1989, 9(1): 12—17.
 FAN Shen-gen, WANG Jia-ming, LIU Xue-cheng.
 Survey of Radioactive Material Transport in China[J].
 Radiation Protection, 1989, 9(1): 12—17.
- [2] BIWER B M, MONETTE F A, LEPOIRE D J, et al. Assessment of Risks to Individuals from the Transport of Radioactive Materials[C]// WM'95 Conference, 1995.
- [3] KENDRICK S, TOOTH A S. Assessment of the Possible Radiation Risks to the Population from Environmental Contamination[J]. Journal of Strain Analysis for Engineering Design, 1986(21): 45–50.
- [4] MCKILLIP S T, BANNISTER C E, CLARK E A. Stress Analysis of Hydride Bed Vessels Used for Tritium Storage[J]. Fusion Technology, 1992, 21(2): 1011–1016.
- [5] HOHNSTREITER G F, SORENSON K B. Research and Development Program for Transportation Packag-

ing at Sandia National Laboratories[R]. Sandia: Sandia National Laboratories, 1995.

- [6] BLANTON P S, EBERL K R. Develop of the Bulk Tritium Shipping Packaging[C]// Proceedings of INMM 49th Annual Meeting, 2008.
- [7] ANDERSEN J A, COLE J K. Accident Resistant Transport Container: US, 4190160[P]. 1980-02-26.
- [8] BYINGTON G A, OAKES R E, FELDMAN M R. Fireproof Impact Limiter Aggregate Packaging Inside Shipping Containers: US, 6299950B1[P]. 2001-10-09.
- [9] FOULGOC S L, BUEIL N, LALLEMANT T. RD26 Packaging: New Solution for Plutonium Transportation[J]. Packaging, Transport, Storage & Security of Radioactive Material, 2013, 24(1): 19–22.
- [10] HEUNG L K. Design of Metal Hydride Vessels for Processing Tritium[J]. Fusion Science and Technology, 2001, 41(3): 753-757.
- [11] O'HIRA S, SUZUKI T, HODE S, et al. Design Study of a Tritium Transport Package for Future Fusion Reactors[J]. Fusion Engineering and Design, 1999, 45(2): 187—195.
- [12] 钟卫洲,谢若泽,黄西成,等.加载方向对云杉木材 缓冲吸能影响数值分析[C]//第十届全国冲击动力 学学术会议,2011.
 ZHONG Wei-zhou, XIE Ruo-ze, HUANG Xi-cheng, et al. Numerical Analysis on Spruce Cushion Property along Different Loading Directions[C]// Proceedings of the 10th National Conference on Impact Dynamics, 2011.
- [13] GONG M, SMITH I. Effect of Load Type on Failure Mechanisms of Spruce in Compression Parallel to Grain[J]. Wood Science and Technology, 2004, 37: 435-445.
- [14] TRTIK P, DUAL J, KEUNECKE D, et al. 3D Imaging of Microstructure of Spruce Wood[J]. Journal of Structural Biology, 2007, 159: 46—55.
- [15] 汪佳明. 解读《放射性物质安全运输规程》GB 11806—2004 中的货包试验[J]. 辐射防护, 2009, 29(5): 346—251.
 WANG Jia-ming. Summing-up and Explanation of Package Tests in GB 11806—2004 "Regulations for the Safe Transport of Radioactive Material"[J]. Radiation Protection, 2009, 29(5): 346—351.