

附件5

# 《放射性物品运输容器耐热试验指南（征求意见稿）》编制说明

《放射性物品运输容器耐热试验指南》标准编制组

二〇二三年十二月

# 目 录

1 项目背景 .....	1
1.1 任务来源.....	1
1.2 工作过程.....	1
2 标准编制的必要性分析 .....	2
3 国内外相关法规标准对耐热试验的管理要求.....	2
3.1 IAEA SSR-6 中对耐热试验的要求.....	2
3.2 GB 11806 中对耐热试验的要求.....	3
3.3 美国联邦法规 10CFR71 对于耐热试验的要求.....	4
3.4 国内外法规标准对耐热试验要求的对比分析 .....	5
4 国内外相关标准情况.....	6
4.1 美国 ASTM E 2230-22 《放射性材料 B 型货包的热鉴定标准试验规程》 .....	6
4.2 美国能源部 UCRL-ID-110445 《放射性物质运输货包假想事故条件下的耐热试验指南》 .....	17
4.3 国标 GB/T 9978.1 建筑构件耐火试验方法 第 1 部分：通用要求.....	20
4.4 小结 .....	21
5 标准编制的基本原则和技术路线 .....	21
6 标准主要技术内容.....	22
6.1 总体框架编制说明.....	22
6.2 标准技术内容编制说明 .....	23
7 与国内外同类标准或技术法规的水平对比和分析.....	29
8 实施本标准的管理措施、技术措施、实施方案建议.....	29

# 《放射性物品运输容器耐热试验指南（征求意见稿）》

## 编制说明

### 1 项目背景

#### 1.1 任务来源

根据国家核安全局《核与辐射安全监管项目 2022 年申报指南》以及辐射源安全监管司核燃料与运输处工作任务安排，中机生产力促进中心承担《放射性物品运输容器耐热试验指南》的标准编写任务。随后，中机生产力促进中心组织相关技术人员成立编制组，撰写相关调研报告和本标准。

#### 1.2 工作过程

2022 年，编制组根据国家核安全局任务安排，对国内外放射性物品运输容器耐热试验相关标准、技术文件、耐热性能验证技术现状等资料进行调研，形成了《放射性物品运输容器耐热试验研究报告》。

2022 年 12 月 26 日，编制组在充分调研国内外放射性物品运输容器耐热试验相关标准、技术文件、耐热性能验证技术现状等资料的基础上，编制了《放射性物品运输容器耐热试验指南（草稿）》、《放射性物品运输容器耐热试验指南（草稿）编制说明》。

2022 年 12 月 26 日至 2023 年 2 月 21 日，编制组对《放射性物品运输容器耐热试验指南》进行了单位内部评审，对所形成的标准草稿进行了修改。

2023 年 2 月 22 日，编制组向国家核安全局辐射源安全监管司核燃料与运输处进行《放射性物品运输容器耐热试验指南》编制开题汇报，会上国家核安全局有关领导对拟编制标准类别（如国家生态环境标准或国家标准）进行了咨询，确定本标准报批国家生态环境标准；此外，要求编制组组织一次专家咨询会，根据专家意见，编制《放射性物品运输容器耐热试验指南》（征求意见稿）及其编制说明，并上报国家核安全局。

2023 年 3 月 19 日，根据国家核安全局的意见，编制组对《放射性物品运输容器耐热试验指南（草稿）》、《放射性物品运输容器耐热试验指南（草稿）编制

说明》进行修订。

2023年4月，编制组开展了外部专家书面咨询，根据专家修改意见，对征求意见稿进行了升版。

2023年10月，编制组根据国家核安全局辐射源安全监管司核燃料与运输处意见，对耐热试验条件、试验装置等内容进一步进行调研与修改，最终形成了征求意见稿。

## 2 标准编制的必要性分析

《放射性物品安全运输规程》（GB 11806）是我国放射性物品运输领域最重要的国家标准，涵盖放射性物品运输容器设计、制造和维护，以及运输活动的组织、实施、运输监管等方面。用于运输放射性物品的运输容器必须满足该标准的要求，尤其是在运输事故条件下，必须满足限制外辐射水平、确保放射性物品的包容以及防止核临界等安全要求。因此，设计运输容器时，必须考虑运输容器在运输过程中可能遭遇的如燃料起火等意外火灾事故。在火焰高温作用下，力学效应会导致结构总体或局部产生较大变形，材料力学性能降低，使结构的承载能力降低甚至失效；热效应有可能导致运输容器中关键部件失效、核材料漏失，从而造成较大的经济损失和严重的社会影响。设计人员必须在运输容器设计阶段针对跌落、火烧、水浸没等运输事故可能产生的影响进行结构与材料优化设计，以满足上述安全要求。

美国 ASTM E 2230-22《放射性材料 B 型货包的热鉴定标准试验规程》、美国能源部发布的《放射性材料运输货包假想事故条件下的耐热试验指南》（文件编号：UCRL-ID-110445）2230-22 为容器进行耐热试验提供了指导，而在我国还缺少相配套的放射性物品运输容器耐热试验指南。为了逐步完善我国放射性物品运输及其相关领域的法律法规标准规范体系，为放射性物品运输容器耐热试验鉴定提供技术指导，为监管部门审查放射性物品运输容器耐热试验鉴定等工作提供技术支持，亟需制定《放射性物品运输容器耐热试验指南》。

## 3 国内外相关法规标准对耐热试验的管理要求

### 3.1 IAEA SSR-6 中对耐热试验的要求

SSR-6 中关于耐热试验的要求汇总归纳如下：

(1) SSR-6 第 603 条规定：特殊形式放射性物质必须设计成可经受第 708 条或第 709(b)条所规定的耐热试验。根据情况在接受第 708 条或第 709(b)条所规定的耐热试验时，必须在空气中将试样加热至 800℃并在此温度下保持 10 分钟，然后让其冷却，试验后试样不会熔化或弥散。

(2) SSR-6 第 605 条规定：低弥散放射性物质必须经受第 736 条规定的强化耐热试验，其气态和空气动力学当量直径不大于 100 微米的微粒形态的大气排放不超过 100A<sub>2</sub>。单个试样可用于每次试验。SSR-6 第 736 条“强化耐热试验”规定：该试验的条件必须符合第 728 条的规定，但在热环境中暴露的时间必须是 60 分钟。

(3) SSR-6 第 632 条 (c) 盛装 0.1 千克或以上六氟化铀的货包规定：在包容系统不破裂情况下能承受住第 728 条规定的热试验，第 634 条允许者除外。

(4) SSR-6 第 659 条、663 条规定：B(U)型货包和 B(M)型货包必须能够经受第 728 条规定的耐热试验。第 728 条(a)规定：使试样在这样的热环境中暴露 30 分钟，即其提供的热流密度至少相当于在完全静止的环境中烃类燃料-空气火焰的热流密度，给出的最小平均火焰发射率为 0.9，平均温度至少为 800℃，试样完全被火焰所吞没，表面吸收率达到 0.8 或当货包暴露在所规定的火焰中时可被证明将具有的值。

(5) SSR-6 第 680 条、685 条中规定：盛装易裂变材料的孤立的单个货包或在运输事故条件下的货包阵列，在经受第 719 条至第 724 条规定的正常运输条件下的喷水试验、自由下落试验、堆积试验以及贯穿试验、第 727(b)条以及第 727(c)条规定的 1 米击穿试验、9 米自由下落试验或者动态压碎试验后，随后进行第 728 条规定的耐热试验以及第 731 条至第 733 条规定的水泄漏试验。

(6) C 型货包的试验 SSR-6 第 734 条规定：C 型货包试样必须经受下述试验序列的效应：第 727(a)条、第 727(c)条、第 735 条和第 736 条规定的 9 米自由下落试验、动态压碎试验、击穿-撕裂试验以及强化耐热试验、第 737 条规定的冲击试验，并按此顺序进行。736 条强化耐热试验规定：该试验的条件必须符合第 728 条耐热试验的规定，但在热环境中暴露的时间必须是 60 分钟。

### 3.2 GB 11806 中对耐热试验的要求

GB 11806 标准修改采用了国际原子能机构 ( IAEA ) Specific Safety

Requirements No.SSR SSR-6: 2012 年版 《放射性物质安全运输条例》。

与 SSR SSR-6: 2012 相比, GB 11806 标准技术内容与所采用的国际标准一致, 只做了少量的修改, 在结构上进行了调整, 一是结合我国国情和实践, 对“第九章 需要审批的事项”进行了国内国际衔接; 二是将 SSR-6: 2012 中引用的一些其他国际标准替换为我国的对应标准; 三是删除了 SSR -6: 2012 的附录 I “批准和预先通知要求概要”、附录 II “换算系数和词头”和附录III “须采取独家使用方式运输的托货物概要”。

耐热试验与强化耐热试验的要求总结汇总如下:

(1) GB 11806 第 6.3.2b)条、附录 C 中 C3 “特殊形式放射性物品的试验”规定, 含有或模拟特殊形式放射性物品的试样应经受 C3.1 规定的耐热试验。GB 11806 附录 C 中“C3.1.4 耐热试验”规定, 应在空气中将试样加热至 800℃并在此温度下保持 10 min, 然后让其冷却。

(2) GB 11806 中第 6.4.1 条规定: 含有或模拟低弥散放射性物品的试样应经受“附录 C4.9.3 强化耐热试验”。GB 11806 附录 C 中“C4.9.3 强化耐热试验”中规定, 该试验应符合“C4.6.2 耐热试验”的要求, 但在热环境中暴露的时间应是 1 h。

(3) 六氟化铀货包、B 型货包 (B(U)型货包或 B(M) 型货包)、易裂变材料孤立单件货包 (仅对盛装铀-235 富集度最高为 5% (质量) 的六氟化铀货包)、易裂变材料在运输事故条件下货包阵列的评定时, 应经受耐热试验。依据 GB 11806 附录 C 中“C4.6.2 耐热试验”, 要求使试样暴露在平均温度至少为 800℃的热环境中 30 min。

(4) C 型货包评定时, 应经受强化耐热试验。该试验应符合 GB 11806 附录 C 中“C4.6.2 耐热试验”的要求, 但在热环境中暴露的时间应是 1 h。

### 3.3 美国联邦法规 10CFR71 对于耐热试验的要求

美国核管理委员会发布的联邦法规 10CFR71 “放射性废物的货包和运输”中规定了放射性物质与不同货包对于耐热试验的要求。

#### (1) 特殊形式放射性物质的要求

10CFR71.75(b)4)中规定, 特殊形式放射性物质的鉴定, 须经受耐热试验。试样必须在空气中加热至不低于 800℃ (1475°F) 的温度, 在该温度下保持 10

分钟，然后冷却。

(2) 易裂变材料货包的要求

10CFR71.55(f) (1) (iv) 中规定：易裂变材料空运货包须经受 10CFR71.73 (c) (4) 中的耐热试验，但试验持续时间必须为 60 分钟。

(3) 运输事故条件下铀空运货包的要求

10CFR71.74(a) (5)中规定，对于运输事故条件下的铀空运货包，货包必须在 JP-4 或 JP-5 航空燃料池火的发光火焰中暴露至少 60 分钟。发光火焰必须在所有水平方向上均超出货包至少 0.9 米（3 英尺），但不超过 3 米（10 英尺）。货包相对于燃料的位置和方向必须是在系列测试结束时预计会造成最大损坏的位置和方位。如果替代试验的持续时间不短，且不会导致货包的加热速率降低，则可采用替代的耐热试验方法替代本耐热试验。在耐热试验结束时，必须允许货包自然冷却或通过喷水冷却，以便在系列试验结束时造成货包最大损坏。

(4) B 型货包的要求

10CFR71.51(a) (2) 规定，B 型货包在经受第 71.73 条（“假想事故条件”）下的试验后，氦-85 在一周内内漏失不超过  $10A_2$ ，其他放射性物质在一周内漏失不超过总量  $A_2$ ，在距离货包外表面 1 米（40 英寸）处的外部辐射剂量率不超过 10 mSv/h（1 rem/h）。

10CFR 71.73 条 71.73(c)(4)对应耐热试验。

### 3.4 国内外法规标准对耐热试验要求的对比分析

表 3.4-1 汇总了国内外主要法规标准规范对耐热试验要求，可以看出我国 GB 11806 与 IAEA SSR-6 对耐热试验的要求是一致的。美国 10CFR71 对耐热试验的要求略有不同，对于低弥散放射性物品、C 型货包，10CFR71 无对应的相关条款；对于铀空运货包，10CFR71 有专门条款对耐热试验提出要求；其余与 IAEA SSR-6、GB 11806 基本一致。

表 3.4-1 国内外主要法规标准规范对耐热试验要求

放射性物质类别/货包类型	热鉴定试验名称	IAEA SSR-6 耐热试验要求相关条款	我国 GB 11806 耐热试验要求相关条款	美国 10CFR71 耐热试验要求相关条款
特殊形式放射性物品	耐热试验	第 603 条	6.3.2； 附录 C3.1.4	71.75(b)4)
低弥散放射性物品	强化耐热试验	第 605 条	6.4.1； 附录 C4.9.3	\

六氟化铀货包	耐热试验	第 632 条	7.6.2; 附录 C4.6.2	71.55 (g)
B 型货包	耐热试验	第 659 条、663 条	7.8.5; 7.8.7; 7.9.1; 附录 C4.6.2	71.51(a) (2)

易裂变材料货包	耐热试验	第 680 条、685 条	7.11.3; 7.11.5; 附录 C4.6.2	71.55(f) (1) (iv)
C 型货包	强化耐热试验	第 734 条	7.10.4 附录 C4.9.1	\
空运货包	耐热试验	\	\	71.74(a) (5)

## 4 国内外相关标准情况

### 4.1 美国 ASTM E 2230-22 《放射性材料 B 型货包的热鉴定标准试验规程》

#### 4.1.1 适用范围

该试验规程规定了依据美国联邦法规第 10 篇第 71 部分 (10CFR71), 或国际原子能机构法规 TS-R-1, 对 B 型放射性材料货包进行详细热鉴定的方法。根据这些法规, B 型放射性材料运输货包应证明能够承受一系列假设事故, 而不会发生大量内容物泄漏。

#### 4.1.2 实践总结

(1) 该文件概述了满足热鉴定要求的四种方法: 分析法鉴定、池火耐热试验、炉式耐热试验和辐射耐热试验。特定货包的认证方法的选择取决于货包供应商和相关监管机构在开始认证过程之前的讨论。影响方法选择的因素包括货包尺寸、结构和成本, 以及与认证过程相关的风险。空气污染和水污染等环境因素越来越成为选择鉴定方法的一个因素。每种方法的具体优点和局限性将在有关特定方法的章节中讨论。

(2) 完整的假设事故工况序列包括跌落试验、击穿试验和 30 分钟碳氢化合物火烧试验, 通常称为池火耐热试验。还需要对未损坏的货包进行水泄漏试验, 较小的货包也需要通过模拟搬运事故的动态压碎试验。所引用的法规中给出了测试和测试顺序的详细信息。本文件侧重于热鉴定, 这在美国和 IAEA 法规中都是类似的。本文件附录 X3 中包含了重要差异的总结。10CFR71 的第 71.73 部分和

TS-R-1 的第七章对总体耐热试验要求进行了总体描述。IAEA TS-G-1.1 (ST-2) 还包括耐热试验的其他指南。

(3) 规定的耐热试验旨在模拟油罐车或类似车辆上大量碳氢燃料泄漏的情况下引发火灾的运输事故，在完全吞没的池火中暴露 30 分钟。这些运输方式是相互独立的，这意味着它们可以涵盖卡车和铁路等多种货包运输方式。

#### 4.1.3 主要关注点

(1) 在编制货包安全分析报告(SARP)时,应考虑 10CFR71 或 IAEA TS-R-1 中规定的正常运输热条件和运输事故热条件。为了获得美国批准,有关热问题的报告应包含在根据核管理委员会(NRC)管理导则 RG 7.9 中所述格式编制的 SARP 中。经审查,如果材料温度在可接受的范围内,温度梯度导致可接受的热应力,货包内气体压力在设计范围内,安全功能在整个温度范围内继续发挥作用。试验初始条件随规定而变化,但其目的是为所考虑的特性提供最不利的正常环境温度,相应的内部压力通常为正常运输条件下的最大压力,除非显示较低的压力更不利。根据使用的规程,环境温度在 $-29^{\circ}\text{C}$  ( $-20^{\circ}\text{F}$ ) 至  $38^{\circ}\text{C}$  ( $100^{\circ}\text{F}$ ) 范围内。正常运输要求包括最高气温  $38^{\circ}\text{C}$  ( $100^{\circ}\text{F}$ )、曝晒和 $-40^{\circ}\text{C}$  ( $-40^{\circ}\text{F}$ ) 的低温。规定还包括用于人员保护的最大货包表面温度为  $50^{\circ}\text{C}$  ( $122^{\circ}\text{F}$ )。

(2) 第 71.73 部分或 IAEA TS-R-1 第七章中规定的假想事故热条件要求整个货包暴露在  $800^{\circ}\text{C}$  ( $1475^{\circ}\text{F}$ ) 的热环境中 30 分钟,火焰发射率为 0.9。货包的表面吸收率应为 0.8 或货包表面值,以较大者为准。根据规范中规定的温度和发射率,辐射热传递的基本定律允许直接计算到货包表面的最终辐射热通量。这意味着,乍一看似乎是火焰或加热炉温度规范,实际上是用于测试的热通量规范。测试时应牢记这一点。

(3) 火焰发射率有两种定义,这在鉴定过程中易造成混淆。2001 年,以 Siegel 和 Howell 为代表对露天池火耐烧试验中典型火焰区的热烟灰颗粒云提供了教科书式定义。在该定义中,火焰的黑体发射率  $\sigma T^4$  乘以火焰发射率  $\epsilon$ , 以说明火焰中的烟尘云表现为弱黑体发射器的事实。火焰发射率的第二个定义,通常用于货包分析,假设火焰发射率  $\epsilon$  是一个大的、高温的、灰体的表面发射率,该物体表面发射和反射能量,并完全包围被分析的货包。第二种定义导致货包表面的热通量略高(保守),并且当货包表面达到燃点时,也导致零热通量。对于第

一个定义，当货包表面略低于燃点时，热通量降至零。对于货包鉴定，使用第二个定义通常更方便，尤其是使用模拟面到面热辐射的计算机程序，并且通常是监管机构允许的。

(4) 800℃下流动空气的对流传热也应包括在分析中。对流相关性的选择应符合货包所用的表面结构（垂直或水平、平面或曲面）。在大火范围内测量的燃烧气体的典型流速在 1 到 10 m/s 范围内，平均速度接近该范围的中间（参见 Schneider 和 Kent，大型露天池火中气体速度和温度的测量，消防技术，25 卷第 1 期，1989 年；Gregory 等人，一系列大型池火耐热试验中热学参数的测量，SAND 85-0196，桑迪亚国家实验室，1987 年；以及 Koski 等人，大型池火中主动冷却式热量计的测量和环境表征，消防和材料，20 卷第 2 期，1996）。火烧试验开始后，不允许对热输入后的货包进行外部非自然冷却，燃烧应进行至自然熄灭。在火烧试验期间，出于分析和测试目的，太阳辐射的影响常常被忽略。

(5) 为便于分析，假设的事故热条件由表面热通量值指定。低表面温度的峰值调节热通量通常在 55~65 kW/m<sup>2</sup> 之间。空气的对流传热是根据对流传热相关性估算的，占总热通量的 15% 到 20%。15%~20%的数值与经验估计值一致。法规的最新版本指定了用于对流计算的流动热空气，并且应使用适当的强制对流相关性来代替假设静止空气对流的旧做法。标准 7.2 条中提供了对热通量值的进一步讨论。

(6) 虽然 10CFR71 或 TS-R-1 中的热通量值表示池火中典型的货包平均热通量，但在实际池火中观察到热通量随时间和位置变化很大。对于货包低表面温度，通常会观察到在小风条件下高达 150 kW/m<sup>2</sup> 的局部热通量。大风条件下，局部可观察到高达 400 kW/m<sup>2</sup> 的热通量。局部热通量值是几个参数的函数，包括油池上方的高度。因此，货包的尺寸、形状和结构会影响局部热通量条件。设计人员在设计和测试过程中应牢记假想事故和实际测试条件之间可能存在的差异。这些差异解释了一些令人不快的意外情况，例如测试过程中发生的密封或货物的局部高温。

(7) 为进行适当的测试，应实现对规定的碳氢化合物火烧试验热通量瞬态和由此产生的材料温度的精准模拟。除非同时再现热通量和材料表面温度瞬变，否则材料温度梯度和最终容器温度产生的热应力会被报告为过高或过低。一些

测试方法比其他方法更适合满足特定货包所需的瞬态条件。以下各条将讨论模拟池火环境各种方法的相对优势和局限性。

#### 4.1.4 程序

##### (1) 分析法鉴定的优点与局限性

①通过分析对放射性物质运输货包进行热鉴定的目的是确保内容物的密封、内容物的辐射屏蔽和保持次临界状态是按照规程进行的。该分析通过计算合格货包的各部件的最高温度和温度梯度，确定规程中规定的热环境中正常运输条件和假设事故条件下的热学性能。

②通常通过分析确定货包表面温度和整个货包在正常运输条件下和热事故条件下的温度分布。此外，确定正常和事故条件货包内的最大压力。

③虽然分析不能完全代替实际测试，但对放射性物质运输货包进行热分析可以让申请人以相对较高的精度估计货包在正常和事故条件下的预期热性能，而无需将货包实际暴露在热鉴定试验的极端条件下。在仅对设计进行鉴定并且还没有制造放射性材料货包实际样机的情况下，通过分析进行鉴定是必要的。

④虽然目前的热学计算程序提供了一种有用的工具，可以通过分析获得可靠的结果来进行热鉴定，但该方法的局限性在于用户的经验、模型的完整性和输入数据的准确性。由于在这些分析中，传热是主要现象，并且由于它主要是非线性的，因此应根据可用数据验证所使用的热学计算程序，或根据已验证的其他程序进行基准测试。此外，用于确定货包热学分析的局限性包括竣工货包几何形状、真实材料特性（包括相变和绝缘破坏）以及真实火灾特性（包括实际对流）。使用的计算软件应符合 NQA-1 或 ISO 9000 中概述的适当 QA 方法进行管理。

##### (2) 池火耐热试验的优点与局限性

①池火耐热试验是传统的测试方法，通过该测试，证明货包可经受法规规定的热事故环境考验。在测试中，将原型货包放置在燃料池上方 1 m 处，其相对于货包的横向尺寸满足法规中规定的要求。当大气处于稳定状态时，燃料被点燃，货包被火焰吞没。30 分钟后，燃料耗尽，火熄灭，原型货包自然冷却。

②形成油池的简便方法是在钢桶中的水面上加入燃油（JP-8），参见图 4.1.4-1。水为燃料提供了一个平坦的水平面，确保当燃料燃烧时，火在整个油池区域均匀燃烧。深桶（约 0.7m）提供足够的水来维持恒定的燃料温度，这有助于在火烧

试验期间保持恒定的燃料消耗率。使用不锈钢支架将货包固定在油池上方所需的高度。在整个水池中放置支撑结构以支持可能包括热电偶、热量计、热通量计和气体速度探测器的耐热试验仪器。该仪器的响应用于提供已满足所需热环境的证据。油池外侧的金属板侧坡道和烤架上的金属裙板提供火焰稳定性。这些是必要的,因为燃料表面上方的燃料蒸汽比空气重,并且会被速度非常低的气流置换。将油池围在一个6米高的防风围栏内,可以最大限度地减少风的影响。

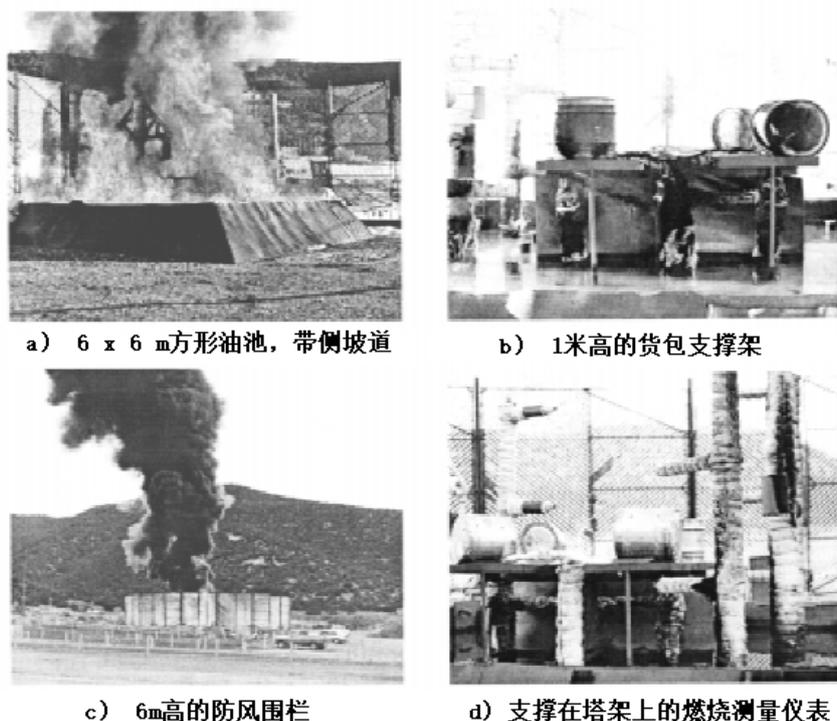


图 4.1.4-1 符合法规要求的池式耐热试验装置

③池火耐热试验的目的是使原型货包处于能够代表运输事故火烧试验条件的环境中。这里考虑了两种不同的环境。存在法规中描述的假设事故条件或碳氢化合物火烧试验环境,以及无风条件下在燃烧液态碳氢化合物燃料池上方1米处形成的实际池火环境。设计用于承受规定的碳氢化合物火烧试验的货包认为可以在运输事故中安全运行。实际的池火环境是测试货包的便捷方式,通常与下面讨论的假设事故条件有很大不同。

④法规中规定的假设事故条件环境通常简化为货包表面吸收的热通量随货包表面温度变化的函数。经受碳氢化合物火烧试验的货包表面在任意时刻的热平衡由下式给出:

$q_{\text{吸收}} = 0.9 \times 0.8 \times \sigma T_{\text{环境}}^4 - 0.8 \times \sigma T_{\text{表面}}^4$	(4.1.4-1)
--	-----------

上式中

$q_{\text{吸收}}$ -通过货包表面的热通量, kW/m<sup>2</sup>;

$\sigma$ - Stefan-Boltzmann 常数,  $5.67 \times 10^{-11}$  kW/(m<sup>2</sup> K<sup>4</sup>);

$T_{\text{环境}}$ - 10CFR71 中规定的温度,  $800\text{K} + 273\text{K} = 1073\text{K}$ ;

$T_{\text{表面}}$ -货包在任意时刻的表面温度, K;

0.9-火焰的规定发射率;

0.8-货包的表面吸收率 (最小值)。

⑤将调节热通量与实际池火环境的描述进行比较, 该描述是根据厚壁被动热量计的响应确定的, 在过去 20 年中收集了直径为 1 至 20m 池火的数据。宽范围是由于风和热量表表面方向相对于油池几何形状的微小变化。

⑥一般来说, 池火提供的环境比法规规定的事故环境更苛刻。因此, 使用池火进行货包鉴定既有好处, 也有局限性。

⑦使用池火的主要好处是, 它是一种方便的方式, 用相对较少的设备投资提供可接受的测试环境。基本设施需要一些燃料来源, 例如租用的油罐车, 一个大的露天平坦空地和一些一次性金属支撑结构。在灵活性和成本方面, 与加热炉或辐射热设备相比, 具有明显的优势。

⑧第二个好处是池火环境通常超过标准要求, 提供了保守的测试。从池火到被吞噬货包的热通量通常超过标准的四倍。此外, 环境是真正的火灾这一事实不容忽视。所谓的二阶特性, 如火焰化学或不均匀的空间和时间热通量, 以无法预见的方式影响货包性能; 此外, 由于设计中没有考虑到的特性, 使原型货包经受池火后产生缺陷。过去曾发生在池火耐热试验中货包由于加热不均匀而导致的意外密封事件, 以及由于温度远高于 800°C (1475°F) 设计标准而导致的意外材料事件 (排气、相变和分解)。

⑨主要的限制是, 测试代表了较高的计划风险, 因为测试具有破坏性, 且不在控制范围内。一旦开始测试, 就不可能停止, 也不可能重新调整。等待燃烧结束, 然后核对可用的物理数据, 以证明燃烧环境符合或超过了法规中规定的最低要求。测试后协调活动有四种可能的结果。

⑩高热通量组合的结果不确定, 是由于池火燃烧环境过于保守。低热通量组合的不确定结果是由于火烧试验环境可能不符合标准。在任何一种情况下, 都必须重新进行测试, 这需要重复整个货包测试试验 (如喷淋试验、自由下落试验、

贯穿试验、堆积试验、9 米跌落试验、1 米击穿试验或动态压碎试验等), 直到火烧试验。

### (3) 炉式耐热试验的优点与局限性

①B 类运输货包的假设事故条件 (HAC) 热测试的要求, 正如 10 CFR 71.73 (c)(4) 的当前版本中所定义的, 专门针对使用池火耐热试验方法而编写。然而, 本段还允许使用“任何其他热测试, 为货包提供等效总热输入, 并提供 800℃ 的平均环境温度的时间”。因此, 如果使用得当, 可以使用加热炉对 B 型运输货包进行热 HAC 测试。应注意, “当量总热输入” 包括辐射和对流分量。

②由于加热炉的可控性, 与露天池火相比, 使用加热炉进行测试有明显的好处。但使用此方法也有实际限制。

③炉式耐热试验最明显的好处是能够控制炉内的温度, 从而使测试结果符合 10 CFR 71.73(c)(4) 或 IAEA TS-R-1 的要求。对于露天池火, 风速等环境条件对火烧试验燃烧的温度有重大影响。由于池火对周围的风力条件很敏感, 因此通常在日出时分, 发现无风时进行测试。通常, 这将测试限制为每天一次测试。炉式耐热试验通常一次只用一台设备, 但由于测试不依赖于环境条件, 因此必要时可全天候进行测试。

④采用炉式耐热试验通常仅限于较小的货包 (即易裂变材料货包), 必须满足炉膛内表面积至少为试验运输容器表面积的 10 倍, 较大货包所需的炉式耐热试验装置较大, 保证货包在高温下的特性是快速 (不到 10 分钟) 将货包外层加热至接近测试设备的温度, 即 800℃。当货包外表面温度接近测试设备的温度时, 热传递机制从辐射到货包转变为向货包内的热传导, 导致传递到货包的热通量大大降低。对于较大的货包, 表面在 30 分钟的测试过程中不太可能在环境测试温度附近达到热平衡, 因此在测试期间货包的热通量比较小的货包稳定得多。在这种情况下, 炉壁内存储的热量在测试过程中会消散, 因此, 必须满足炉膛内表面积至少为试验运输容器表面积的 10 倍要求, 并确保最小平均火焰发射率为 0.9, 平均温度至少为 800℃, 试验运输容器完全被火焰吞没, 使试验运输容器表面吸收率为 0.8。。

### (4) 辐射耐热测试的优点与局限性

①池火耐热试验一直是测试货包是否符合 10CFR71 的传统方法, 即将货包

暴露在大火中 30 分钟。10CFR71 中还有指定环境的其他方法，例如炉式耐热试验。使用辐射热灯是货包热测试的另一种方法。

② 高温环境的辐射热模拟多年来一直用于高温测试（即高达  $1200^{\circ}\text{C}$  [ $2200^{\circ}\text{F}$ ]）。在这种方法中，红外灯是热源，由封闭在熔融石英外壳中并由电力驱动的螺旋缠绕钨丝制成。每盏灯长约 30 厘米，直径约 10 毫米（长 12 英寸，直径  $3/8$  英寸）。通常，这些灯的阵列形成灯板，如图 4.1.4-2 所示。灯板放置在不锈钢或铬镍铁合金外壳的前面，如图 4.1.4-3 所示，该外壳围绕着待鉴定的货包。灯加热钢制外壳（通常涂成黑色， $e=0.85$ ），加热货包。外壳通常装有许多矿物绝缘、金属护套热电偶，以测量外壳温度。外壳迅速从环境温度升至“火焰温度”，依据 10CFR71 规定，火焰温度为  $800^{\circ}\text{C}$  ( $1475^{\circ}\text{F}$ )。然后将外壳稳定在  $800^{\circ}\text{C}$  ( $1475^{\circ}\text{F}$ )，持续适当的时间，例如 30 分钟，如图 4.1.4-4 所示。

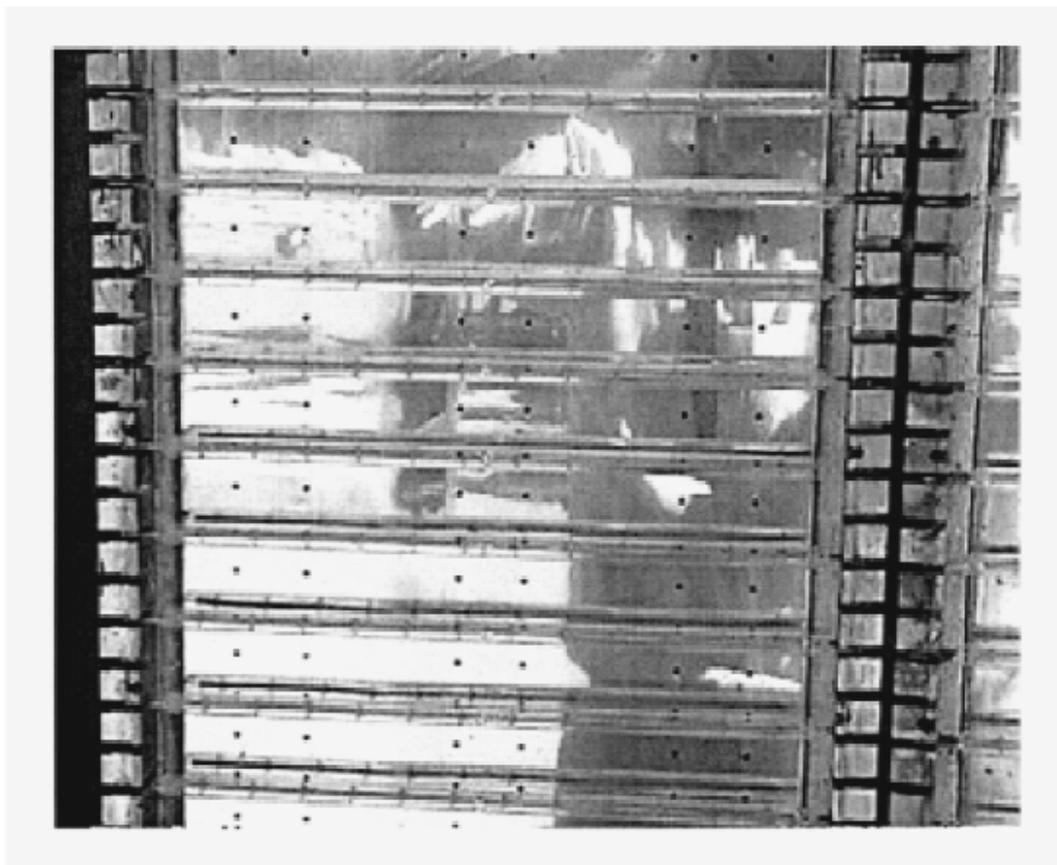


图 4.1.4-2 灯和灯面板的局部放大图

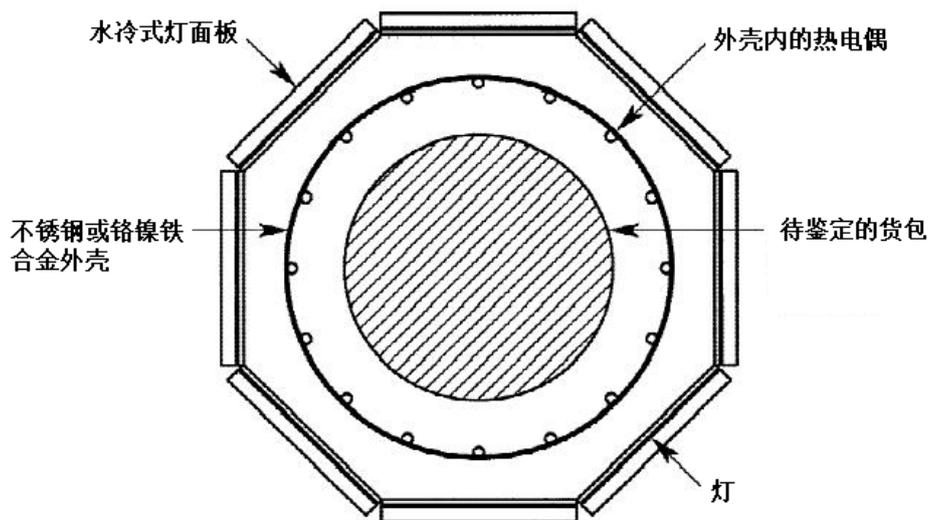


图 4.1.4-3 典型辐射热阵列的总体平面图

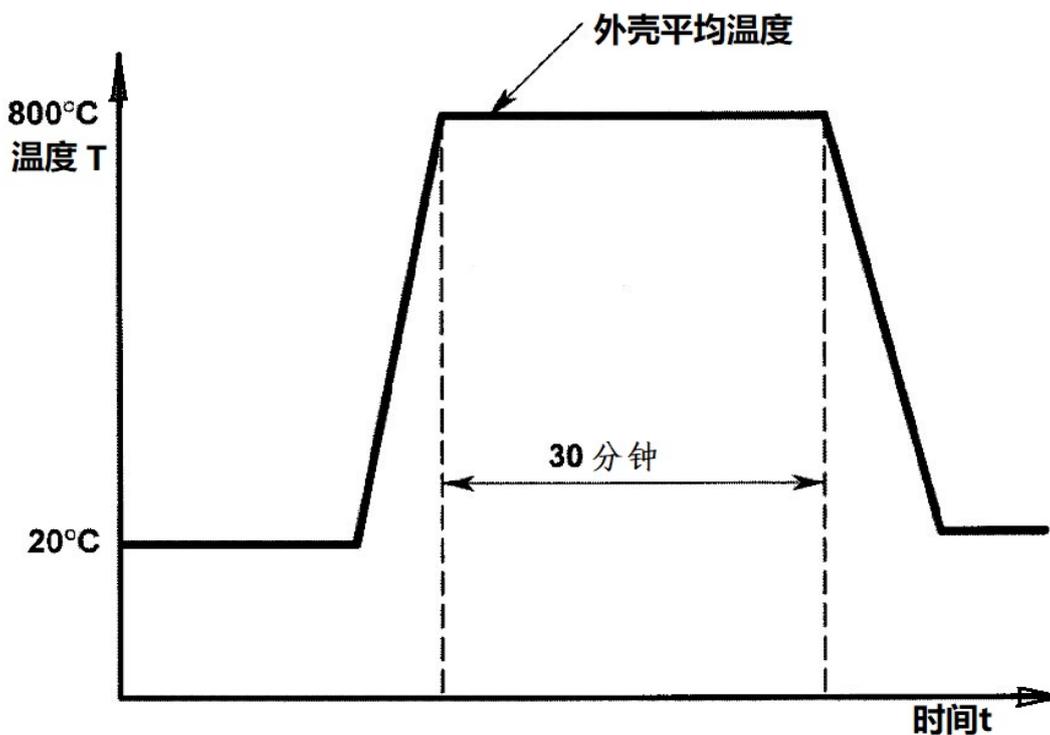


图 4.1.4-4 外壳温度-时间曲线

③当人们注意到传统池火耐热试验的局限性（参见 4.1.4(2)条）时，辐射热测试的好处就显而易见了。在池火耐热试验中，将货包暴露在吞没的池火中 30 分钟。10CFR71 中的火烧试验环境规定如下：“除了简单的支撑系统外，样机被完全吞没在碳氢化合物燃料/空气火焰中，在充分静止的环境条件下，火焰平均发射率系数至少为 0.9，平均火焰温度至少为 800°C(1475°F)，持续 30 分钟，或任何其他向货包提供等效的总热输入并保证热测试平均环境温度 800°C。燃料源

必须超出试样任何外表面至少 1m (40 英寸)，但不能超过 3 m (10 英尺)，并且试样必须放置在油池上方 1m (40 英寸) 高处。为了分析计算，表面吸收率必须是货包暴露在指定的火中时预期的值或 0.8，以较大者为准；并且对流系数必须是如果货包暴露在指定的池火中则可以证明存在的值。外部净输入停止后不得使用人工冷却，并且必须允许建筑材料继续燃烧，直到自然终止”。

④辐射热测试替代方案避开了传统池火耐热试验的一些限制。通过使用灯和涂有黑漆的钢制外壳，可以获得已知温度的热源（用热电偶测量），具有高发射率（黑色油漆），不依赖于风速或风向。Pyromarkt 牌黑漆的使用效果比较好。即使在初始固化后发射率仍然很高（约 0.85），但会产生一些黑烟。已发现在涂漆前后测得的发射率稳定在 0.85 左右。如果加工精密的话，制造的外壳温度相对均匀，因此热源在任何需要的温度下都是稳定的（例如 800°C (1475°F)）。通过在外壳达到所需温度时开始测试并经过 30 分钟后直接关闭电源来精确控制测试时间。最后，如果需要，所有池火中存在的温度不均匀性均可通过使用均匀温度的外壳来避免。

⑤控制测试对象顶部和底部的热流是辐射热测试中的一个重要考虑因素。加热灯阵列和钢制外壳通常垂直放置在测试对象周围的支架上，通过在测试对象上方和下方扩展灯阵列和外壳的高度来实现货包顶部和底部的加热。在设计测试时，应考虑从加热钢外壳到测试货包顶部和底部的视角系数。在某些情况下，可能需要在测试对象上方或下方添加额外的绝缘外壳，以创建一个完全包围测试货包的热腔。

⑥辐射热测试对于希望获得实验数据以与热模型预测进行比较的情况特别有用。对于控制良好的环境（与池火相比），辐射热测试提供了一个统一、恒定的边界条件，更适合与模型预测进行比较。辐射热模拟中不存在风效应。风在池火的热传递中起着重要作用。

⑦辐射热测试的一个主要限制是建造成本。辐射热测试设施需要一个大功率变电站（桑迪亚的辐射热设施有一个专用的 6 兆瓦变电站）、变压器、电源控制系统、开关、灯阵列水冷装置、灯板组和灯。一旦建成并投运，该设施的运行成本相对较低，并且与露天的池火耐热试验装置相比更具竞争力。露天的池火耐热试验通常需要额外的环境审批（例如，国家环境政策法案，NEPA），如果靠近有

空气质量限制的城市，还需要申请办理“燃烧许可证”。辐射热测试通常不需要此类许可，因为不燃烧燃料。

⑧池火和辐射热测试之间的传热机制存在一些差异。辐射热测试中的对流传热与池火不同，后者更大。这通常不是问题，因为人们认为火烧试验中的整体热传递主要是辐射热传递。通常，通过在外壳上涂油漆，可达到的最高发射率为 $e=0.85$ ，而不是法规要求的 $e=0.90$ 。通常需要调整外壳温度。在过去进行的许多辐射热测试中，用户指定了外壳上均匀的环向温度和轴向温度。这反过来会在货包上形成均匀的加热模式。这与露天池火中实际发生的情况区别很大。货包的非对称环向加热导致比对称环向加热环境中存在的热应力更大。这种非对称加热通常难以在辐射热测试中重现。由于钢制外壳底座在底部对外部空气开放，因此自然对流在钢制外壳内有充足的空气供应，以支持货包内材料的燃烧。

⑨在辐射热测试中模拟火焰速度为 5 到 10 m/s (11.2 到 27.4 mph) 的对流是困难的，但也是可能的。一个从外部热源产生 800°C (1475°F) 的空气，并将其输送到钢制外壳和货包之间的环形空间，然后为空气从加热器阵列周围的空间提供出口路径。现有的辐射热设施在过去的试验中没有提供这种对流边界条件。这与火中几乎所有的热传递都是由于辐射效应的概念有关。对流造成的影响很小，原因是火焰温度略有升高（在这种情况下，钢外壳温度略有升高）。两种方法都使用，但更简单的方法是提高钢外壳的平均温度，因为它需要较少的设备。

⑩总之，与池火相比，辐射热测试产生非常相似的辐射环境，但对流环境不太严苛。

#### 4.1.5 报告

(1) 为了获得美国批准，解决热问题的报告应包含按照 NRC RG 7.9 中描述的标准格式编写的安全分析报告 (SARP) 中。测试报告应尽可能全面，并应包括在测试期间所做的任何观察和对测试期间遇到的任何困难的评论。所有测量参数的单位应在报告中明确说明。

(2) 测试报告中应包括以下描述性信息

- a. 测试实验室的名称和地址；
- b. 报告的日期和文件编号；
- c. 测试申请单位的名称和地址，如适用；

- d.测试材料、产品或组件的制造商或供应商的名称;
- e.商业名称或其他识别标记和样品描述;
- f.货包的完整描述,包括类型、形式、基本尺寸、质量或任何涂层的密度、颜色和覆盖率;
- g.测试夹具构造和准备的完整描述;
- h.试样表面(如果适用);
- i.试样的调节;
- j.测试日期;
- k.测试方向和试样安装细节;
- l.测试详情,包括测试计划文件;
- m.测试次数;
- n.测试编号和任何特殊说明;
- o.所有测试热电偶和检定或校准数据;
- p.参考已批准的质量保证程序。

## 4.2 美国能源部 UCRL-ID-110445《放射性物质运输货包假想事故条件下的耐热试验指南》

### 4.2.1 目的

耐热试验是美国联邦法规 10CFR71.73(c) 规定的验证货包经受事故能力的一项试验,要求将整个货包暴露于不小于 800℃的热流密度环境中至少 30 分钟,发射系数至少 0.9,用以证明货包经受典型火烧试验事故后的安全性能。

### 4.2.2 试验方案

试验方案应包含以下几方面内容:

- (1) 试验目的与适用范围;
- (2) 依据文件;
- (3) 试验方法;
- (4) 仪器仪表及设备;
- (5) 场地;
- (6) 验收准则;

- (7) 试验步骤;
- (8) 质量计划;
- (9) 记录。

#### 4.2.3 试验条件

在热试验项目中 10CFR71 中要求的条件必须满足。

##### (1) 货包条件

由于全尺寸货包的热响应和包容泄漏率不能满意地由比例模型试验来确定,故试验货包必须是全尺寸试样,它代表准备用于运输时认为是合格的运输货包的所有设计特性。但有一例外:试验货包不必包含放射性或危险的物质。这些物质可以用合适的无毒替代物质代替。然而,试验货包对试验条件的力学和热响应必须与运输货包的一致。

##### (2) 初始条件

货包的初始条件能对热试验结果产生显著的影响。这样,必须创造满足 10CFR71 规定的条件。

###### ①温度

货包初始温度必须是由环境温度和相当的内容物内释热造成的稳态条件。分析必须使用介于 $-29^{\circ}\text{C}$ ~ $+38^{\circ}\text{C}$ 间的环境温度,该温度对货包是最不利的条件。

###### ②包容压力

根据 10CFR71,包容系统内的初始压力必须是最大正常工作压力,除非一个较低的内部压力是更不利的。在一些包容系统设计中,最大的内部压力并不总是最不利条件,即较低的压力可能导致较大的泄漏。

###### ③内容物

在试验序列中,包容系统内容物必须代表打算运输的实际内容物。如果货包运输多种内容物,对货包引起最坏条件的内容物必须在热试验中出现。但必须避免使用危险物来代表实际内容物。选择用来代表实际内容物的物质应该再现下列特征: 1) 质量, 2) 平均比热, 3) 热生成率, 4) 内压。

###### ④冲击损坏

10CFR71 要求在对货包实施耐热试验前在同一试验货包上相继做下落(或动态压碎)叠加击穿试验。

### ⑤试验姿态

热试验期间,货包必须调整至这样的试验姿态(例如水平、竖直或倾斜姿态),它对货包提供最不利的条件。

#### (3) 热条件

根据 10CFR71 的要求,试验货包必须暴露在规定尺寸的全吞没烃类燃料/空气火焰或一个相当的环境中不少于 30 分钟。该要求的意图是使试验货包暴露在一个热环境中,该环境供给货包表面超过一个最小值的热流密度。来自全吞没火焰环境的总热流密度包括辐射和对流热传递。

#### (4) 最终条件

在火焰或加热炉内加热货包后,该货包必须被留在与试验开始时相同的环境温度中自然冷却。另外,试验货包也必须受到保护,防止淋雨和大于 5km/h 的风。

货包从火焰或加热炉移出的运动应该比货包表面是 800°C 时上方自然空气循环的速度慢(典型地为 1 至 2m/s)。这将确保货包的运动不产生人工冷却。

根据 10CFR71,应允许试样的材料自然燃烧。

货包必须被放置冷却直到货包内所有温度实际上都处于稳态。

## 4.2.4 测量

### (1) 温度

温度测量位置应该是在螺栓、垫圈、阀门和其它包容系统边缘上或附近以及遍及货包。应根据判断、经验和分析来选择测量位置。

如果使用火焰加热,在火焰内若干位置应进行测温,以确定货包周围温度值、一致性和变化。如果使用加热炉加热,为相同的目的,应该测量炉壁上若干位置的温度。

典型的温度传感器包括热电偶和电阻温度计。

变色和熔化温度指示剂、测温贴片能用来测定容器表面达到的温度。

### (2) 压力

如果实际可行,在热试验期间应测量包容系统压力。

### (3) 热流密度

进行测量以证实货包表面上的热流密度是否超过所要求的最小值。可以使用总流量计(辐射+对流)、辐射计(辐射)、热量计测量热流密度。

#### (4) 摄影记录

摄影方法应用于记录试验事件、条件和结果。录像记录应涵盖全过程。

#### (5) 辅助试验

可以对选择的物项(例如部件或组件)做独立试验,以说明一个物项能经受热试验条件。

### 4.2.5 验收评价

货包必须总是满足三个主要的准则:(1)包容,(2)屏蔽,(3)次临界。10CFR71的意图是确保证明合格的货包能以合理安全裕量满足所有验收准则,提供不确定度,以及建立对货包设计的信心。

### 4.2.6 试验报告

建议包括如下内容:

- (1) 试验项目;
- (2) 试验地点和日期;
- (3) 试验单位和见证人员;
- (4) 试验方法;
- (5) 试验设计;
- (6) 试验程序;
- (7) 仪器仪表及其精度;
- (8) 结果和评价。

## 4.3 国标 GB/T 9978.1 建筑构件耐火试验方法 第1部分:通用要求

本标准 of GB/T 9978 的第1部分。本标准修改采用 ISO 834-1:1999《耐火试验 建筑构件 第1部分:通用要求》(英文版)。本标准根据 ISO 834-1:1999 重新起草。在其附录 A 中列出了本部分章条编号与 ISO 834-1:1999 章条编号的对照一览表,附 B 中列出了本部分与 ISO 834-1:1999 技术性差异及其原因。

GB/T 9978.1 规定了各种结构构件(即建筑结构的各个部件,如墙、隔墙、楼板、屋面、梁或柱)在标准受火条件下确定其耐火性能的试验方法。

GB/T 9978.1 第 5.2 条介绍了试验炉可采用的燃料(液体或气体燃料)、应满

足的条件。

GB/T 9978.1 第 5.3 条介绍了加载装置应提供的试件荷载、加载方式（液压、机械或重物）、可模拟的载荷形式（均布加载、集中加载、轴心加载或偏心加载）

GB/T 9978.1 第 5.4 条介绍了试件应采用特定支承框架或其他方式提供边界和支承条件的约束。

GB/T 9978.1 第 5.5 条介绍了仪器，如热电偶、炉内压力测量探头。

炉内热电偶采用类型，如丝径为 0.75 mm~2.30 mm 的镍铬-镍硅(K 型)热电偶，外罩耐热不锈钢套管或耐热瓷套管，中间填装耐热材料，其热端伸出套管的长度不少于 25 mm。

在试验前和试验期间，试验室内试件附近应配置的环境温度热电偶型号、规格，如外径 3 mm 不锈钢铠装热电偶或铂电阻显示环境温度。

#### 4.4 小结

美国 ASTM E 2230-02 《放射性材料 B 型货包的热鉴定标准试验规程》与美国能源部 UCRL-ID-110445 《放射性物质运输货包假想事故条件下的耐热试验指南》均适用于放射性材料 B 型货包的耐热试验鉴定；对于特殊形式放射性物品、低弥散放射性物品或者其它类型货包，两文件中未作出明确规定。

国标 GB/T 9978.1 《建筑构件耐火试验方法第 1 部分：通用要求》适用于墙、隔墙、楼板、屋面、梁或柱等结构构件类试件。但本指南适用试件为放射性物品运输容器，二者差距甚大。可借鉴的地方为热电偶、炉内压力测量探头等仪器。

总而言之，在放射性物品运输货包耐热试验鉴定方面，我国目前尚无相关标准，亟需编制本标准，以填补这方面的技术空白。

## 5 标准编制的基本原则和技术路线

本标准编制时遵循如下原则及技术路线：

(1) 遵循 GB/T 1.1-2020 《标准化工作导则 第 1 部分：标准化文件的结构和起草规则》《国家环境保护标准制修订工作管理办法》以及其它标准的相关要求。

(2) 结合我国放射性物品运输容器设计实践，以 GB 11806 《放射性物品安全运输规程》以及国际原子能机构（IAEA）Specific Safety Requirements No.SSR SSR-6: 2012 年版 《放射性物质安全运输条例》对耐热试验鉴定的规定为依据，

以美国 ASTM E 2230-22《放射性材料 B 型货包的热鉴定标准试验规程》与美国能源部 UCRL-ID-110445《放射性物质运输货包假想事故条件下的耐热试验指南》为蓝本，编制本试验指南。

(3) UCRL-ID-110445《放射性物质运输货包热试验指南》包括根据 10CFR71.73(c)计划和执行实际耐热试验的一般操作指南，但未规定详细的操作指南或方法，因此本标准中多引用 UCRL-ID-110445 大的原则，具体指标主要参考 ASTM E 2230-22。ASTM 国际标准组织是世界上最早、最大的“非盈利志愿性”标准组织，其制定的材料、产品、系统、和服务等领域的特性和性能标准、试验方法和程序标准是美国航空航天与国防工业最重要的参考标准，美国 ASME 第 II 卷材料篇直接引用 ASTM 标准。ASTM 已获得全球产业的认可并得到广泛应用。

(4) 本标准制订相关条款与现已生效的其他相关标准之间保持一致。

(5) 力求普遍性和可操作性，以便于推广使用。

## 6 标准主要技术内容

### 6.1 总体框架编制说明

本标准的正文共包括十个章节，分别为：范围、规范性引用文件、术语和定义、GB 11806中对耐热试验的要求、试验条件、耐热试验鉴定方法及适用条件、试验装置及测试仪器仪表、试验过程、验收准则、试验报告以及附录A，各章节的布局考虑与依据情况如下：

#### 6.1.1 总体框架与依据

标准前三个章节参照GB/T 1.1-2020的格式要求；标准第4章介绍了耐热试验目的；标准第5章试验方法采用并修改了ASTM 2230-22第7章程序的内容；标准第6章综合了法规标准的各项要求，具体如下：6.1条大气环境条件综合了GB 11806第7章、UCRL-ID-110445第3.2.1条以及SSG 26第728.15条的要求，6.2条运输条件参考了UCRL-ID-110445第3.1条；6.3条初始条件参考了UCRL-ID-110445第3.2条；6.4条热环境条件直接引用了GB 11806附录C4.6.2的规定；6.5条其他条

件参考了UCRL-ID-110445第3.4条；标准第7章融合了ASTM 2230-22第7章、SSG 26第728.5条至第728.38条、UCRL-ID-110445以及部分国内运输容器耐热试验规程的要求；标准第8章明确了试验过程要求；标准第9章综合GB 11806的规定与UCRL-ID-110445第5章的要求明确了验收准则；标准第10章明确试验报告应包含的内容。

### 6.1.2 删除质量保证内容

考虑到质保的内容可在试验单位质量保证大纲中规定，不在此赘述，故删除ASTM 2230-22中有关质量保证的内容。

## 6.2 标准技术内容编制说明

### 6.2.1 范围

本标准第1章规定了放射性物品运输容器耐热试验的设计验证方法。

本标准适用于全尺寸放射性物品运输容器的耐热试验鉴定，全尺寸特殊形式放射性物品、低弥散放射性物品的耐热试验可参照执行。

### 6.2.2 规范性引用文件

本标准第2章为规范性引用文件，引用了以下标准：

(1) GB 11806 放射性物品安全运输规程：该标准于2019年2月15日发布，2019年4月1日实施，同时老版本GB 11806-2004废止。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管理工作，制定本标准。本标准中制定准则的依据来自GB 11806。

(2) JJF 1664 温度显示仪校准规范：本规范适用于接受热电偶、热电阻等温度传感器信号或温度变送器输出信号的温度显示仪表，包括过程测量控制系统中温度显示部分的校准。接受直流电压或电流过程信号显示的二次仪表均可参照本规范进行校准。

(3) JJF 1262 铠装热电偶校准规范：本规范适用于测量范围(-40~1100)℃，金属套管长度不小于500 mm的廉金属铠装热电偶的校准。

(4) JJF 1637 廉金属热电偶校准规范：本规范适用于测量范围 $-40^{\circ}\text{C} \sim 1200^{\circ}\text{C}$ ，长度不小于 500 mm，可拆卸的镍铬-镍硅（K 型）、镍铬硅-镍硅镁（N 型）、镍铬-铜镍（E 型）、铁-铜镍（J 型）廉金属热电偶的校准。

### 6.2.3 术语和定义

本标准第 3 章中给出了黑体、灰体、辐射力、发射率、火焰发射率等术语的定义。

“黑体”，摘自杨世铭著《传热学》（第二版）第 6-1 节第 271 页“把吸收率 $\alpha=1$ 的物体叫做绝对黑体(简称黑体)”以及第 6-2 节第 272 页的内容。本标准等同采用了杨世铭著《传热学》（第二版）黑体的定义内容。

“灰体”定义为在热辐射分析中，单色吸收率与波长无关的物体称为灰体。对于灰体，单色吸收率 $\alpha = \alpha_{\lambda} = \text{常数}$ 。灰体是一种理想物体。工业上通常遇到的热辐射，其主要波长段位于红外线范围内(绝大部分能量位于 $0.76 \sim 10 \mu\text{m}$ 之间)。在此范围内，把大多数工程材料当作灰体处理引起的误差是可以接受的，而这种简化处理给辐射换热分析带来很大的方便。本定义摘自杨世铭著《传热学》（第二版）第 6-3 节第 290 页发射率的定义。本标准等同采用了杨世铭著《传热学》（第二版）灰体的定义内容。

“辐射力”定义为物体在单位时间内单位表面积向半球空间所有方向发射的全部波长的总辐射能，表征物体发射辐射能本领的大小，它的常用单位是 $\text{W}/\text{m}^2$ ，用 $E$ 表示，摘自杨世铭著《传热学》（第二版）第 6-2 节第 272 页辐射力的定义。本标准等同采用了杨世铭著《传热学》（第二版）辐射力的定义内容。

“发射率”定义为实际物体的辐射力与同温度下黑体辐射力的比值，称为实际物体的黑度，亦称发射率，用 $\varepsilon$ 表示，摘自杨世铭著《传热学》（第二版）第 6-3 节第 282 页发射率的定义。本标准等同采用了杨世铭著《传热学》（第二版）发射率的定义内容。

“火焰发射率”，摘自 ASTM E2230 第 6.3 条第二个定义“一个大型、高温灰体的表面发射率，该灰体表面既发射能量又反射能量，而且完全包围试验运输容器，用 $\varepsilon_f$ 表示”。本标准等同采用了 ASTM E2230 第 6.3 条第二个定义的内容。

此外，根据杨世铭著《传热学》（第二版）第 6-7 节描述，火焰除了总是存在着三原子气体辐射成分之外，还包含着具有强烈辐射能力的固体颗粒。按颗粒

的不同，一般可区分为以下三种类型：

(1) 不发光火焰

当气体燃料或者没有灰分的其它燃料完全燃烧时，得到略带蓝色而近于无色的火焰，通常称为不发光火焰。这种火焰中没有固体颗粒，其主要辐射成分是二氧化碳和水蒸气，其辐射可按气体辐射公式计算。

(2) 发光火焰

液体燃料及预先没有与空气充分混合的气体燃料燃烧时，由于烃类物质在高温下裂解时产生炭黑粒子，在燃烧器的根部火焰发光。这种火焰称为发光火焰。有很强辐射能力的固体炭黑粒子和三原子辐射气体都是发光部分的辐射成分，而炭黑粒子的辐射占主要地位。火焰气流离开燃烧器一段距离后，炭黑粒子逐渐燃尽。炭黑粒子燃尽部分的火焰不发光。包括发光、不发光部分的整个火焰辐射取决于发光部分所占的比例。

(3) 半发光火焰

各种固体燃料燃烧时形成半发光火焰。这种火焰的主要辐射成分是焦炭粒子和灰粒。焦炭粒子是指颗粒状煤粉等固体燃料在逸出水分和挥发物后的剩余部分。焦炭粒子在燃尽后形成灰粒。焦炭粒子辐射强烈，灰粒也有一定的辐射能力。在半发光火焰中，水蒸气、二氧化碳等辐射性气体也是存在的，但不起主要作用。

总之，发光和半发光火焰除三原子气体辐射之外，都有许多悬浮的固体颗粒(炭黑、焦炭和灰粒)，而这些微粒是辐射的主要成分。

火焰辐射是一个十分复杂的现象。首先，各种火焰的辐射成分不同，而且每种成分的辐射特性又有差别；其次，燃烧室中不同部位的温度及辐射成分的浓度也不一样，而且它们和燃料种类、燃烧方式和燃烧工况有关；再次，各种辐射成分的辐射相互之间还有影响。因此，要得到一个适用于多种不同场合的火焰发射率计算公式是困难的。

在现行锅炉热工计算中，对火焰辐射计算做了如下的简化假定：

- 1) 由于火焰的主要辐射成分是辐射光谱连续的固体微粒，所以近似地把火焰当作灰体处理；
- 2) 计算中所涉及的温度、烟气成分等均以炉膛出口截面处的数值为准；
- 3) 假定火焰发射率  $\epsilon_f$  可以套用气体发射率的公式形式，即

$$\varepsilon_f = 1 - e^{-kpL}$$

式中，

p 为烟气总压力，单位为 bar；

L 为平均射线行程，单位为 m；

k 为火焰的总减弱系数[bar<sup>-1</sup>.m<sup>-1</sup>]，等于各辐射成分减弱系数的代数和。例如，计算固体燃料的火焰发射率时， $k=k_1+\mu k_2+ck_3$ [bar<sup>-1</sup>.m<sup>-1</sup>]，其中 k<sub>1</sub>、k<sub>2</sub>、k<sub>3</sub> 分别为三原子气体、灰粒、焦炭粒子的减弱系数，μ 为火焰中飞灰的无量纲浓度，c 为反映焦炭粒子浓度的系数。

#### 6.2.4 试验目的

本标准第4章主要介绍耐热试验的目的，是为了验证放射性物品运输容器经受《放射性物品安全运输规程》（GB 11806）规定的运输事故条件下耐热试验后的安全性能。

#### 6.2.5 试验方法

本标准第 5 章对应 ASTM E2230 第 7 章的部分要求，介绍了池火耐热试验、炉式耐热试验方法。

标准第 5.1 条是 ASTM E2230 第 7 章的总结，提出两种鉴定方法供用户选用。

标准第 5.2 条介绍了池火耐热试验的方法，对应 ASTM E2230 第 7.2.1 条。

标准第 5.3 条介绍了炉式耐热试验的方法，对应 ASTM E2230 第 7.3.1 条。

#### 6.2.6 试验条件

本标准第 6 章 6.1 条规定了耐热试验的大气环境条件。

标准第 6.1 条（1）是在 ASTM E2230 第 6.1 条的规定“环境温度在-29℃（-20°F）至 38℃（100°F）范围内”基础上，依据 GB 11806 与 SSR-6 的要求，修改为“环境温度在-40℃至 38℃范围内”，ASTM E2230 第 6.1 条也提到：“正常运输要求包括最高气温 38℃（100°F）、日晒和-40℃（-40°F）的低温”，因此修改为“温度在-40℃至 38℃范围内”是合理的。

标准第 6 章第 6.1 条（2）对应 SSG-26 第 728.15 条的要求。

标准第 6.2 条运输容器要求对应 UCRL-ID-110445 《放射性物质运输货包热试验指南》 3.1 条的要求。

标准第 6.3 条初始条件对应 UCRL-ID-110445 《放射性物质运输货包热试验指南》 3.2 条。

标准第 6.4 条对应 GB 11806 附录 C4.6.2 “耐热试验”，规定了耐热试验的热环境条件。

标准第 6.5 条其他条件对应 UCRL-ID-110445 《放射性物质运输货包热试验指南》 3.4 条。

### 6.2.7 试验装置及试验用仪器仪表

本标准第 7 章 7.1 条“试验装置”介绍了池火试验装置、炉式耐热试验装置等要求，对应 ASTM E2230 第 7.2 条至第 7.3 条的要求。标准 7.1.1 条修改采用 ASTM E2230 第 4.1 条。标准 7.1.2 条（1）的要求摘自 ASTM E2230 第 7.4.1.3 条，标准 7.1.2 条（2）的要求摘自 IAEA SSG-26 第 728.5 条；标准 7.1.2 条（3）的要求摘自 ASTM E2230 第 7.2.2.2 条；标准 7.1.3 条（2）的要求对应 ASTM E2230 第 7.3.2.2 条的要求，即炉式耐热试验装置的内表面积应远大于试验运输容器的表面积，若炉膛内表面积至少为试验运输容器表面积的 10 倍时，可免除炉膛表面发射率的测试；否则应进行鉴定，以满足 GB 11806 附录 C4.6.2 条规定的要求“提供的热流密度至少相当于在完全静止的环境条件下烃类燃料 / 空气火焰的热流密度，以给出最小平均火焰发射率为 0.9，平均温度至少为 800℃，试样完全被火焰所吞没，使表面吸收率为 0.8 或采用货包暴露在所规定的火焰中其实际具有的吸收系数值”。

本标准第 7 章 7.2 条“试验用仪器仪表”介绍了热环境温度测量设备、风速计、试验运输容器温度测量设备、测量系统准确度要求等情况，对应 ASTM E2230 第 7.2 条至第 7.3 条以及国家计量技术规范 JJF 1664、JJF 1262、JJF 1637 等的要求，同时参考了国内部分运输容器耐热试验规程的内容。

### 6.2.8 试验过程

本标准第 8 章介绍了池火、炉式两类耐热试验的试验过程，其中第 8.1 条介绍了池火耐热试验的试验过程，第 8.2 条介绍了炉式耐热试验的试验过程。

应注意，在进行耐热试验前，应对货包进行预热处理，即采用电热毯等加温装置对试验运输容器进行 38℃ 预热，直至达到温度稳定状态。若为自热试验运输容器，应在自热条件下达到温度稳定。

其目的是保证试验运输容器在环境温度最苛刻的条件下，开始耐热试验，以便试验运输容器遭受最严苛的考验。试验运输容器用金属随着温度升高，其屈服强度、抗拉强度等参数将随之降低，其承载能力将随之降低。

依据 GB 11806 附录 C4.6.2 条规定，允许不进行预热，但应在随后评定货包响应时考虑初始热环境条件的差异。

该章对应 ASTM E2230 第 7.2 条至第 7.3 条中试验准备、测试性能等要求，同时参考了国内部分运输容器耐热试验规程的内容。

### 6.2.9 验收准则

本标准第 9 章 9.1 条规定了试验运输容器必须满足的总原则，即包容、屏蔽以及次临界原则，应确保证明合格的运输容器能以合理安全裕量满足所有验收准则。

9.2 条至 9.4 条分别规定了包容、屏蔽以及次临界的验收准则。

9.5 条介绍了试验后的检查要求。在适合时，耐热试验后应该检查试验运输容器，以证明保持了足够的安全裕量。为了采用合适的检查方法，可能有必要拆解运输容器和分割选择的部件。

该章对应 UCRL-ID-110445 第 5 章“验收”与 GB 11806 中对运输容器的包容、屏蔽以及次临界验收准则的要求。

### 6.2.10 试验报告

本标准第 10 章规定试验报告应至少包括以下信息：

- (1) 试验名称；
- (2) 试验目的和依据；
- (3) 试验日期、地点、参试单位、试验场所大气环境条件；
- (4) 试验运输容器技术状态，包括类型、编号、基本尺寸、质量、密度、颜色、涂层覆盖率、试验方向和安装要求等；
- (5) 试验条件；

- (6) 仪器设备；
- (7) 主要试验过程；
- (8) 试验结果分析及结论；
- (9) 其它有关事项。

该章融合了 ASTM E2230 第 8 章与 UCRL-ID-110445 第 6 章“报告”的要求。

## **7 与国内外同类标准或技术法规的水平对比和分析**

本标准是与《放射性物品安全运输规程》(GB11806-2019)配套的技术指南，其制订是基于 GB11806-2019 对放射性物品运输容器的热评价设计要求，主要参考了 GB11806-2019 《放射性物品安全运输规程》、IAEA SSR-6、SSG-26 以及美国联邦法规 10CFR71 的管理要求，参考了美国 ASTM E2230-22 《放射性材料 B 型货包的热鉴定标准试验规程》、美国能源部技术文件 UCRL-ID-110445 《放射性物质运输货包假想事故条件下的耐热试验指南》、SSG-26 以及国内部分耐热试验规程主要技术要求，涵盖池火耐热试验、炉式耐热试验的鉴定要求，适用范围更广，吸纳了 IAEA 以及欧美核电发达国家以及国内部分耐热试验实践的大量先进经验，更具先进性。

## **8 实施本标准的管理措施、技术措施、实施方案建议**

本标准的制定，是为了填补我国放射性物品运输容器耐热试验指南的技术空白。本标准可以为放射性物品运输容器的设计、评审等单位提供相应的技术依据，为所设计的放射性物品运输容器更好地满足我国相关法规标准要求提供技术支持。