

附件3

**《放射性物品运输容器防脆性断裂的安全
设计指南（征求意见稿）》
编制说明**

放射性物品运输容器防脆性断裂的安全设计指南》标准编制组

二〇二一年四月

目 录

一、项目背景.....	1
(一) 任务来源.....	1
(二) 工作过程.....	1
二、标准编制的必要性分析.....	2
三、国内外相关标准情况.....	3
四、标准编制的基本原则和技术路线.....	4
五、标准主要技术内容.....	5
(一) 总体框架编制说明.....	5
1. 总体框架的调整.....	5
2. 删除 SSG-26 2012 版附录 V 中断裂力学的考虑一节的部分内容.....	6
3. 删除质量保证内容.....	6
(二) 标准技术内容编制说明.....	7
1. 范围.....	7
2. 规范性引用文件.....	7
3. 术语和定义.....	7
4. 评价方法选取原则.....	8
5. 方法 1.....	8
6. 方法 2.....	8
7. 方法 3.....	12
六、与国内外同类标准或技术法规的水平对比和分析.....	16
七、实施本标准的管理措施、技术措施、实施方案建议.....	16

《放射性物品运输容器防脆性断裂的安全设计指南 (征求意见稿)》编制说明

一、项目背景

(一) 任务来源

2020年，根据国家核安全局核监管项目JD202002“制定《放射性物品运输容器防脆性断裂的安全设计指南》”要求，中机生产力促进中心承担《放射性物品运输容器防脆性断裂的安全设计指南》的编写任务，并联合中国核电工程有限公司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。

(二) 工作过程

2020年3月，编制组起草完成该标准编制实施方案，提出了编制技术路线和实施计划。

2020年5月14日，国家核安全局组织召开了标准编制启动会，编制组就工作内容、工作方法、预期成果、实施计划等内容向辐射源安全监管司核燃料与运输处进行了汇报。

2020年6月28日，编制组按照技术路线和实施方案，充分调研国际防脆性断裂相关标准、设计准则，完成了《放射性物品运输容器防脆性断裂的安全设计指南》标准草案。

2020年7月28日，编制组召开了《放射性物品运输容器防脆性断裂的安全设计指南》单位内部评审会，对所形成的标准草案进行了内部评审。

2020年8-10月，编制组多次召开内部研讨会，针对内部评审意见修改标准草案。

2020年11月17日，编制组参加了国家核安全局组织的项目中期检查会，会上核安全局领导听取了编制组的阶段研究成果汇报，并对后期工作提出了指导意见。

2020年11-12月，编制组多次召开内部研讨会，针对中期检查意见修改标准草案。

2020年12月30日，编制组根据研究成果，召开了《放射性物品运输容器防脆性断裂的安全设计指南》评审会。与会专家肯定了编制组的研究成果并提出了对标准草稿的修改建议和意见，编制组根据专家意见对研究成果进行了进一步完善。

2021年1-2月，编制组多次召开内部研讨会，针对专家咨询会意见修改标准草案。

2021年3月17日、2021年4月14日，编制组参加国家核安全局组织召开的征求意见前的标准编制情况研讨会，根据国家核安全局意见对标准进一步修改，最终形成以下文件：

《放射性物品运输容器防脆性断裂的安全设计指南（征求意见稿）》

《放射性物品运输容器防脆性断裂的安全设计指南（征求意见稿）编制说明》

二、标准编制的必要性分析

《放射性物品安全运输规程》（GB11806）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《放射性物品安全运输规程》（GB11806）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要求。因此，设计运输容器时，必须考虑运输容器在各运输条件下的失效模式（例如脆性断裂），以满足上述安全要求。IAEA SSR-6《放射性物质安全运输条例》的配套资料《国际原子能机构〈放射性物质安全运输条例〉（2012版）的咨询材料》（SSG-26 2012版）附录V为防止容器结构部件脆性断裂提供了设计评价导则。

目前，在运输容器防脆性断裂安全设计中，我国主要参考SSG-26 2012版附录V、美国ASME B&PV III卷附录G、管理导则RG7.12《壁厚大于4英寸（0.1m）的铁素体钢运输容器包容系统壳体断裂韧性准则》和管理导则RG7.11《用于最大壁厚4英寸（0.1m）铁素体钢运输容器包容系统壳体的基体材料断裂韧性准则》、法国RCC-M第I卷附录ZG、俄罗斯ПНАЭГ-7-002-86与M-02-91等导则或规范标准。而在我国《放射性物品安全运输规程》（GB11806）中，还缺少一个相配套的运输容器防脆性断裂安全设计指南。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防脆性断裂设计

提供技术指导，为监管部门审查放射性物品运输容器防脆性断裂设计提供技术支持，制定《放射性物品运输容器防脆性断裂的安全设计指南》是十分必要的。

三、国内外相关标准情况

（一）IAEA 发布的放射性物品运输容器防脆断安全设计标准

1993 年 8 月，IAEA 在维也纳发布了 IAEA-TECDOC-717《Guidelines for Safe Design of Shipping Packages Against Brittle Fracture》。2002 年，IAEA 在维也纳发布 TS-G-1.1 (ST-2)《放射性物质安全运输规程咨询材料》，其附录 VI 中给出了运输货包抗脆性断裂的安全设计导则，该附录是在 IAEA-TECDOC-717 第 2 章基础上编写的，出版后又在随后的一系列咨询会议上进行了修订。2012 年，IAEA 在维也纳发布 SSG-26 2012 版《国际原子能机构〈放射性物质安全运输条例〉(2012 版)的咨询材料》，其附录 V 中给出了防止脆性断裂的运输包装的安全设计指南。SSG-26 2012 版附录 V 与 TS-G-1.1 (ST-2) 附录 VI 几乎完全相同，只有部分说法与格式略有改变，部分参考文献有升版。

（二）欧美等核电大国发布的放射性物品运输容器防脆断安全设计标准

放射性物品运输容器防脆性断裂评价有三种常用方法：一是豁免条件，如奥氏体不锈钢制成的运输容器可以免除评价；二是通过测量与抗断裂性能相关的无延性转变温度 (T_{NDT}) 来评价铁素体钢；三是基于断裂力学的防脆断评价。

防脆断评价的豁免条件各国都大抵相同。

使用基于无延性转变温度的评价方法的标准包括美国核管会管理导则 RG7.12《壁厚大于 4 英寸 (0.1m) 的铁素体钢运输容器包容系统壳体断裂韧性准则》和管理导则 RG7.11《用于最大壁厚 4 英寸(0.1m) 铁素体钢运输容器包容系统壳体的基体材料断裂韧性准则》、英国标准协会的 BS5500、ASME 第 III 卷和第 VIII 卷，以及法国核建造规则 RCC-M 附录 ZG。一方面，夏比冲击试验测得的冲击功可作为材料韧性的间接指标，其验收准则是在规定温度下的夏比冲击试验产生的冲击功（或横向膨胀）不低于要求的最低限值。另一方面，容器最低使用温度与参考无延性转变温度的差值不低于要求的最低限值。

基于断裂力学的防断裂评价方法的标准包括 ASME 第 III 卷附录 G、法国核建造规则 RCC-MR、日本的 MITI 通告、德国的核设计规程 KTA3201.2、英国标准协会文件 PD6493:1991 以及独联体(CIS)文件。这些标准在核电站核级部件设

计方面有广泛的应用，尽管不直接适用于运输容器设计的评价，但在断裂力学评价原则的使用方面有指导意义。

（三）国内相关标准

国内部分设计单位设计运输容器时，采用国家标准 GB150-2011《压力容器》、行业标准 NB/T 47003.1-2009 《钢制焊接压力容器》。

GB150.2-2011《压力容器第 2 部分：材料》3.7 节对压力容器承压部件用钢材的使用温度下限作了规定，如奥氏体钢使用温度不低于-196℃时，免做冲击试验；对于低温低应力工况的钢材，其使用温度下限在 GB150.3-2011 附录 E 中作了规定。3.8 节规定了冲击试验要求，如碳素钢和低合金钢冲击功最低值，试验方法、试样的取样位置、数量等内容。

GB150.4-2011《压力容器第 4 部分：制造、检验和验收》9 章试件与试样中对冲击试验也作了具体规定。

NB/T 47003.1-2009《钢制焊接压力容器》中对容器用钢的使用温度下限、冲击试验要求以及验收要求也有类似规定。

上述标准属于防脆断评价豁免条件，或者属于用与抗断裂性能相关的无延性转变温度（ T_{NDT} ）测量来评价铁素体钢的范畴。

行业标准 NB/T 20013-2010《含缺陷核承压设备完整性评定》用于压水堆钢制含缺陷核级承压设备的完整性评价，属于基于断裂力学的防脆断评价方法，尽管不直接适用于运输容器设计的评价，但在断裂力学评价原则的使用方面有指导意义。

总而言之，在运输容器防脆性断裂安全设计方面，我国目前尚无相关标准，亟需编制该标准，以填补这方面的技术空白。

四、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》以及其他标准的相关要求。

2. 结合我国放射性物品运输容器设计实践，以国际原子能机构安全标准特定安全导则《国际原子能机构《放射性物质安全运输条例》（2012 年版）的咨询材料》（SSG-26 2012 版）附录 V“运输货包防脆性断裂安全设计指南”为蓝本，

同时技术上吸纳美国核管会管理导则 RG7.12《壁厚大于 4 英寸（0.1m）但不超过 12 英寸（0.3m）的铁素体钢运输容器包容系统壳体的基体材料断裂韧性准则》和管理导则 RG7.11《最大壁厚为 4 英寸（0.1m）的铁素体钢运输容器包容系统壳体的基体材料断裂韧性准则》的相关内容。

3. 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。

4. 力求普遍性和可操作性，以便于推广使用。

五、标准主要技术内容

（一）总体框架编制说明

本标准的正文共包括七个章节，分别为：范围、规范性引用文件、术语和定义、防脆断设计方法的选取、方法1、方法2以及方法3，前三个章节参照GB/T 1.1-2020的格式要求，其余章节内容主要参照了SSG-26 2012版附录V的总体框架体系。

与SSG-26 2012版附录V相比，《放射性物品运输容器防脆性断裂的安全设计指南》主要作了如下调整：

1. 总体框架的调整

本标准第4章介绍了防脆断设计方法的选取。第5章介绍方法1，对应SSG-26 2012版附录V中的方法1，即防脆断评价免除条件，适用于延性断裂前不易遭受损坏的材料，如奥氏体不锈钢。第6章介绍方法2，对应SSG-26 2012版附录V中的方法2，即与防脆性断裂相关的无塑性转变温度评价方法，适用于铁素体钢。在起草该章节内容时，SSG-26 2012版附录V提到了美国RG7.11和RG7.12相关要求，为方便标准使用，本标准对相关内容予以吸收。第7章介绍方法3，对应SSG-26 2012版附录V中的方法3，即基于断裂力学的防脆断评价方法，适用于绝大多数材料，包括球墨铸铁，该方法适用范围最广。

因方法3适用范围最广，故本标准重点介绍了该方法。按照防脆断条件的计算步骤，第7章的结构安排如下：第7.1节为概述，7.2节介绍应力强度因子的计算，7.3节介绍了防脆性断裂准则，第7.4节介绍了评价过程。

总之，本标准总体框架的调整使其逻辑更严谨，结构更紧凑，脉络更清晰，衔接更顺畅，便于本标准的使用者遵照执行。

2. 删除 SSG-26 2012 版附录 V 中断裂力学的考虑一节的部分内容

SSG-26 2012版附录V中“断裂力学的考虑”一节V.18介绍材料断裂韧度在应力-应变关系为线弹性时由应力强度因子临界值来度量，应力-应变关系为弹塑性时由J积分的临界值来度量。V.20描述：运输容器设计断裂力学评价的推荐方法是建立在防止裂纹萌生和防止不稳定裂纹扩展基础上。在某些条件下，经货包设计者证明并被监管部门接受时，弹塑性断裂力学分析可能是合适的，但防止裂纹萌生仍然是控制准则，并且在设计中不应依赖于任何预计的延性撕裂强度。V.27描述：裂纹尖端塑性和局部屈服的影响将增大裂纹尖端的强度，使之大于线弹性应力条件下相同裂纹大小和应力水平的裂纹尖端的强度。在弹塑性断裂力学中，有许多方法考虑塑性与裂纹尖端强度之间关系。这些方法中有两种已编入国家文件，如应用J积分（参见美国电力研究院EPRI出版的《EPRI弹塑性断裂力学评价手册》）和失效评定图（参见英国标准协会BSI出版的PD6349《熔焊结构缺陷的验收评价方法指南》、英国中央电业局CEGB出版的R6标准《含缺陷结构的完整性评价》），并证明在运输容器评价中使用是正确的。这些弹塑性断裂力学评价比线弹性断裂力学评价要复杂得多。

删除弹塑性断裂力学基于以下三个方面的原因，一是脆性断裂基于线弹性断裂力学，断裂过程没有征兆，突然断裂，比较危险，断面比较光滑，而弹塑性断裂基于弹塑性断裂力学，断裂前有征兆，比如出现可观察到的较大变形，经历一段时间才缓慢断裂；二是脆断的判据为：应力强度因子 $>$ 考虑安全系数的材料断裂韧度，没有中间裂纹扩展过程，而弹塑性断裂的机理有载荷瞬态疲劳裂纹扩展，还有应力腐蚀等因素，要计算在评定周期末裂纹扩展量、临界裂纹尺寸、允许裂纹尺寸，如果无损检测检出的裂纹尺寸 $<$ 允许裂纹尺寸，则是安全的，计算过程比较复杂。疲劳裂纹扩展计算比较著名公式是Paris公式，公式中C、N参数需要大量长期的运行或试验数据来确定。目前核电厂反应堆主要部件用材料积累了大量的C、N数据，但运输容器方面还未看到类似数据。三是脆断分析相比弹塑性断裂分析，是偏于安全的。

出于以上考虑，本标准中删除了基于弹塑性断裂力学的评价内容。

3. 删除质量保证内容

考虑到质保的内容与本文件关系不紧密，故删除SSG-26 2012版附录V“断

裂力学的考虑” V.37~V.39中的有关质量保证的内容。

（二）标准技术内容编制说明

1. 范围

本文件提供了放射性物品运输容器防脆性断裂的安全设计指南。

本文件适用于铁素体钢、奥氏体不锈钢、球墨铸铁等金属材料制造的放射性物品运输容器包容系统部件的防脆性断裂设计，非包容系统部件的防脆性断裂设计可参照执行。

2. 规范性引用文件

（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，制定该标准。本标准中的制定准则的依据来自 GB11806。

（2）GB/T 6803 铁素体钢的无塑性转变温度落锤试验方法：该标准适用于测定铁素体钢（包括板材、型材、铸钢和锻钢）的无塑性转变温度。本文件推荐使用该标准进行铁素体钢的无塑性转变温度落锤试验。

（3）GB/T 229 金属材料夏比摆锤冲击试验方法：常见的测材料冲击功的方法。

（4）GB/T 5482 金属材料动态撕裂试验方法：评价准则中推荐的动态撕裂试验的方法。

（5）GB/T 8363 钢材落锤撕裂试验方法：评价准则中推荐的动态撕裂试验的方法。

（6）GB/T 4161 金属材料平面应变断裂韧度 K_{IC} 试验方法：评价准则中推荐的测材料断裂韧度 K_{IC} 的方法。

3. 术语和定义

本标准中给出了无塑性转变温度、断裂韧度、应力强度因子等术语的定义。

“无塑性转变温度”，GB/T 6803-2008《铁素体钢的无塑性转变温度落锤试

验方法》第 4.2 条“按照本方法的规定进行试验时，落锤试样断裂时的最高温度”，本标准等同采用了 GB/T 6803-2008 的定义内容，并进行了适应性修改。

“断裂韧度”，GB/T 10623-2008《金属材料 力学性能试验术语》第 6.3.8 条“准静态单一加载条件下的裂纹扩展阻力的通用术语”。本标准等同采用了 GB/T 10623-2008 的定义内容。

“应力强度因子”，GB/T 10623-2008《金属材料 力学性能试验术语》第 6.3.21 条“均匀线弹性体在特定的裂纹扩展类型下理想裂纹尖端应力场的幅值”。本标准等同采用了 GB/T 10623-2008 的定义内容。

4. 评价方法选取原则

第4章主要介绍三种防脆断设计方法的选取。

5. 方法 1

第 5 章对应 SSG-26 2012 版附录 V 中的方法 1（参见 V.8 至 V.10），即防脆断评价免除条件，适用于延性断裂前不易遭受损坏的材料，如奥氏体不锈钢，特别指出了铸造奥氏体钢并不总是具有良好的力学性能，应进一步证实其延性和高断裂韧性。

6. 方法 2

第 6 章对应 SSG-26 2012 版附录 V 中的方法 2（参见 V.11 至 V.15），适用于铁素体钢，介绍了采用冲击功的评价方法、采用无延性转变温度的评价方法。

第 6.2 节介绍了采用冲击功作为验收指标的评价方法，对于铁素体钢，冲击功可作为材料韧性的间接指标，其验收准则是在规定温度下夏比冲击试验冲击功（或者横向膨胀量）大于标准规定的限值。在低温下的冲击功限值可参考相应的标准，温度应至少包括要求的环境温度范围（包括低至-40℃）。

第 6.3 节介绍了采用无塑性转变温度作为验收指标的评价方法，按照美国 RG7.11 和 RG7.12 相关要求将评价准则划分为公称壁厚小于 100mm 的铁素体钢和公称壁厚 100mm-300mm 的铁素体钢分别表述。

6.3.1 节介绍评价基础，本章规定了不同货包级别和不同截面厚度铁素体钢应满足的断裂韧性评价准则。准则要求材料的无塑性转变温度与事故条件最低环

境温度（-40℃）的最小温度差是截面厚度的函数。温度差是以无塑性转变温度与断裂韧性的关系为基础。

6.3.2 节对于公称壁厚小于 100mm 的评价准则，参照 RG7.11 将货包装载放射性内容物活度水平的不同对 B 型货包进行了分级要求。

B 型货包分级原则见表 1。

表 1 B 型货包分级

内容物形式	I 级	II 级	III 级
低比活度	-	超过 30000Ci 或超过 3000A ₁ 或超过 3000A ₂	低于 30000Ci 且低于 3000A ₁ 或低于 3000A ₂
特殊形式	超过 3000A ₁ 或者超过 30000Ci	在 3000A ₁ 和 30A ₁ 之间并且不超过 30000Ci	低于 30A ₁ 并且低于 30000Ci
一般形式	超过 3000A ₂ 或者超过 30000Ci	在 3000A ₂ 和 30A ₂ 之间并且不超过 30000Ci	低于 30A ₂ 并且低于 30000Ci

注：A₁ 为对特殊形式放射性物品的活度限值；A₂ 为对所有其他放射性物品的活度限值。

参照 NUREG/CR-1815 的第 5 节提出的评价准则，三个级别的评价准则见表 2 至表 4。

表 2 I 级的评价准则

要求的安全裕度	很大的安全裕度， $\beta \geq 1$ （ β 的计算参见 6.3.3）
要求的断裂韧性	在动态载荷作用下足以防止大裂纹的扩展，断裂前一般会发生屈服。
壁厚 B mm	断裂韧性验收准则
$16 \leq B < 100$	GB/T 6803 测得的无塑性转变温度 T_{NDT} 必须低于图 1 中的值，其中 LST 为最低使用温度； 此外，如果材料的屈服强度 $\sigma_{ys} \geq 483\text{MPa}$ ，还需满足以下要求：对于 16mm 试样厚度，在上平台温度下，动态撕裂试验（GB/T 5482）结果满足：动态撕裂能 $DT > 542\text{J}$ ；或者在上平台温度下，夏比冲击试验（GB/T 229）结果满足冲击功 $KV \geq 61\text{J}$ 。
$5 \leq B < 16$	在最低使用温度（LST）下，动态撕裂试验（GB/T 5482）结果应满足纤维断面率达到 80% 以上； 或在最低使用温度（LST）下，落锤撕裂试验（GB/T 8363）结果应满足剪切面积百分数达到 80% 以上。

表 3 II 级的评价准则

要求的安全裕度	较大的安全裕度，即 $\beta \geq 0.6$ （ β 的计算参见 6.3.3）
要求的断裂韧性	在动态载荷作用下足以防止裂纹的萌生。
壁厚 B mm	断裂韧性验收准则
$16 \leq B < 100$	全速加载下， T_{NDT} 必须低于图 2 中的值； 减速加载下， T_{NDT} 可以由图 3 确定。
$5 \leq B < 16$	在最低使用温度（LST）下，动态撕裂试验（GB/T 5482）结果满足 50% 以上的剪切开裂；

	或在最低使用温度 (LST) 下, 落锤撕裂试验 (GB/T 8363) 结果满足 50% 以上的剪切开裂; 或使用细晶粒正火钢或低温性能更好的钢材。
$B < 5$	当壁厚 B 低于 5mm 时, 无要求。

表 4 III 级的评价准则

要求的安全裕度	足够的安全裕度, 即 $\beta \geq 0.4$ (β 的计算参见 6.3.3)
要求的断裂韧性	在良好制造工艺下足以防止小缺陷处裂纹的萌生。
壁厚 B mm	断裂韧性验收准则
$10 \leq B < 100$	不测试的情况下, 使用细晶粒正火钢或低温性能更好的钢材; 或 $T_{NDT} \leq -12.2^\circ\text{C}$ (壁厚 $B \geq 16\text{mm}$); 或使用壁厚 $B \geq 16\text{mm}$ 的试样时, 在 -12.2°C 下动态撕裂能 (DT 能) $\geq 68\text{J}$; 或在 -12.2°C 下, $KV \geq 68\text{J}$; 或不测试的情况下, 使用轧制钢, 假定焊缝残余应力已去除, 满足无损检验验收准则。
$B < 10$	当壁厚 B 低于 10mm 时, 无要求。

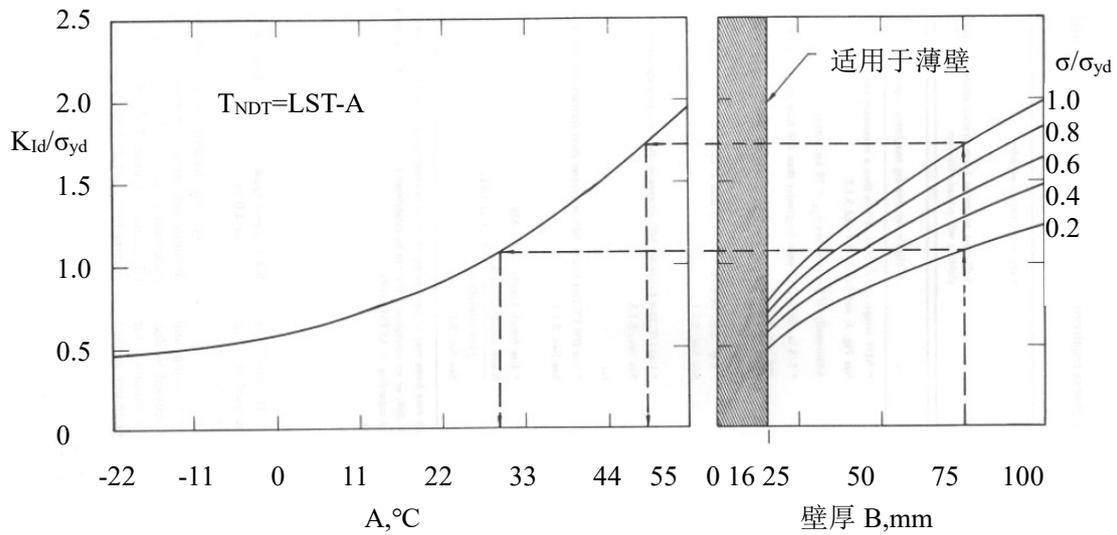


图 1 I 级的关键部件断裂设计图

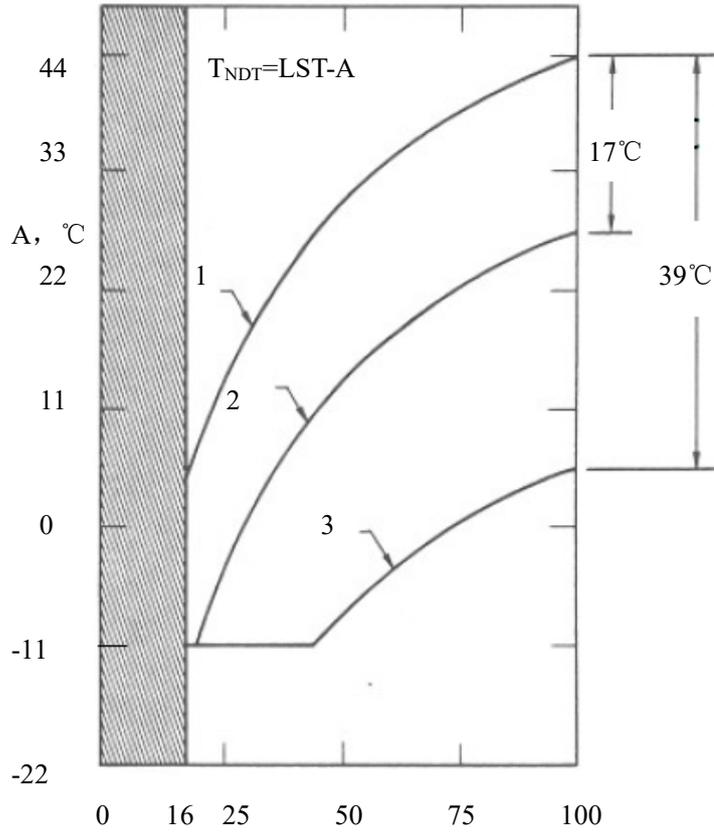


图 2 II 级的关键部件断裂设计图（全速加载下）

注：

- [1] 曲线 1 是 $\beta=0.6$ 时的基本 $K_{I(t)}/\sigma_{yd}$ 曲线，表示屈服应力水平下的全速加载；
- [2] 当有效载荷小于约 100g 时，曲线 2 是由曲线 1 平移 17°C 得到的，可用于 $414\text{MPa} \leq \sigma_{ys} \leq 689\text{MPa}$ 范围内的钢；
- [3] 曲线 3 是由曲线 1 平移 39°C 得到的，可用于 σ_{ys} 小于 414MPa 的钢。

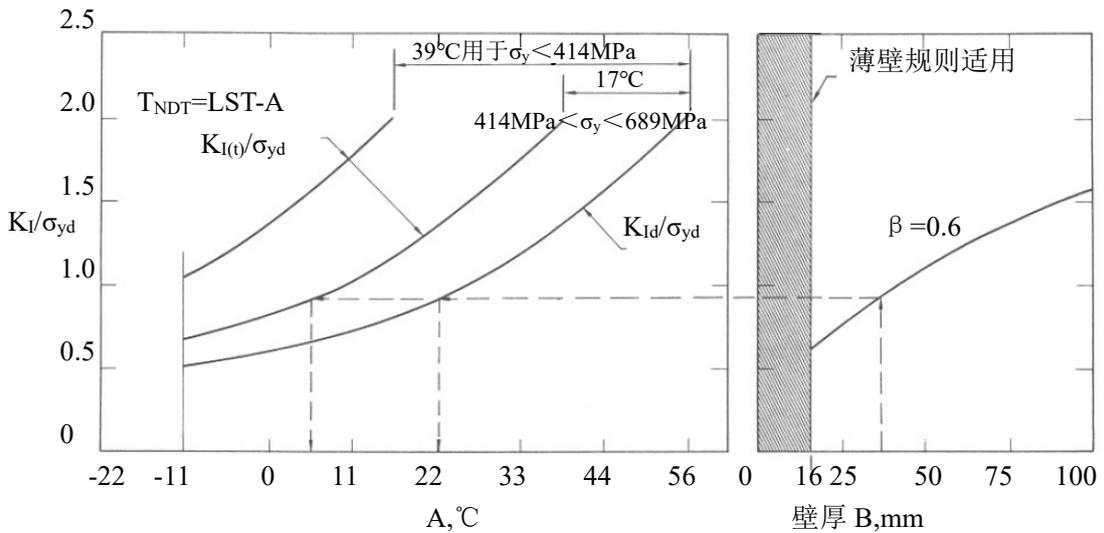


图 3 II 级的关键部件断裂设计图（减速加载下）

同时,根据 NUREG/CR-1815, 4.1Task4 明确要求“公称厚度为 16~100mm 的铁素体钢,在要求的环境温度范围(包括低至-40℃)下,I 级需要对包容系统每个关键部件进行试验,评价结果满足 I 级的评价准则;II 级和 III 级可以进行试验或者参考相应标准数据,评价结果满足相应级别的评价准则。”

除此之外,还引用了 NUREG/CR-1815, 4.1Task4 中的“对于评价准则中的无塑性转变温度,可采用无塑性转变温度上限值来代替实际无塑性转变温度的试验”要求。

6.3.2 节中三种验收准则对应的安全裕度要求分别为: $\beta \geq 1$ 、 $\beta \geq 0.6$ 、 $\beta \geq 0.4$ 。6.3.3 节给出了安全裕度的计算方法,计算方法摘自 SSG-26 2012 版附录 V 中 V.14、V.15。

6.3.4 节公称壁厚为 100~300mm 的评价准则是参照 RG.7.12 转化的,二者的区别是:RG.7.12 的表 1 中最低工作温度 LST 为-20°F(-29℃),考虑 IAEA SSR-6《放射性物质安全运输条例》以及国家标准《放射性物品安全运输规程》

(GB11806)中规定:运输容器最低工作温度通常为-40℃。因此,调整了表格中的无塑性转变温度 T_{NP} ,将最低工作温度设定为-40℃。

7. 方法 3

本标准第 7 章是方法 3 的内容,7.1 节概述评价范围;7.2 节介绍应力强度因子的计算,是基于线弹性断裂力学的应力强度因子,并给出计算公式;7.3 节介绍防脆性断裂准则;7.4 节介绍评价过程。

(1) 7.1-7.3 节“防脆性断裂条件”

该节给出了基于线弹性断裂力学的应力强度因子计算式,然后介绍了防脆断条件以及安全系数的选取。使用上述公式时,应统筹考虑该公式中应力、缺陷尺寸、断裂韧度等参数的安全系数。在计算或测量时必须考虑这些参数的不确定度。这些不确定度可能包括运输容器应力的计算、缺陷检测以及材料断裂韧度测量时产生的不确定度。因此要求的总安全系数取决于用于不同输入参数的值是平均值还是载荷参数和假设缺陷尺寸的上限,以及断裂韧度的下限,特别是对无损检测中不确定性的考虑,可以通过在选择参考缺陷时采取适当的保守性来调节。对于正常运输条件下,防脆断条件中的安全系数 n 取 $\sqrt{10}$;对于运输事故条件下,安

全系数为 $\sqrt{2}$ 。该部分内容摘自 SSG-26（2012 版）附录V的V.22~V.23、V.29 节~V.30 节。

(2) 7.4 节“评价过程”

该节参考了 SSG-26（2012 版）附录V的第V.31 节~V.32 节，与第V.31 节~ V.32 节等价。

7.4.2 节“评价过程的考虑”

7.4.2.1 节和 7.4.2.2 节“缺陷与无损检测”

第 7.4.2.1 节介绍了缺陷尺寸的考虑，摘自 SSG-26 2012 版附录 V 的 V.34-V.36。“参考裂纹尺寸”是整合了美国 ASME III卷附录 G、法国 RCC-M 第I卷附录 ZG 中参考缺陷尺寸的规定。运输容器零部件壁厚大于 40mm 时，则参考缺陷尺寸采纳 ASME III卷附录 G 第 G-2120 节最大假想缺陷尺寸。当壁厚 $t \leq 40\text{mm}$ ，参考缺陷尺寸采纳 RCCM 第I卷附录 ZG（2007 版）ZG3210 的规定。

美国 ASME III卷附录 G 第 G-2120 节最大假想缺陷尺寸参见下表：

表 5 ASME III卷附录 G 第 G-2120 节的参考缺陷尺寸

壁厚 B, mm	裂纹深度 a, mm	裂纹长度 l, mm
$B < 100$	25	150
$100 \leq B \leq 300$	$1/4B$	1.5 倍的 B
$B > 300$	75	450

RCCM 第I卷附录 ZG（2007 版）ZG3210 推荐的参考表面缺陷尺寸规定如下：

货包评价部件壁厚 $\leq 40\text{mm}$ 时， $a_c = \min(1/2 \text{ 壁厚}, 10\text{mm})$ ；

货包评价部件壁厚 $> 40\text{mm}$ 时， $a_c = \min(1/4 \text{ 壁厚}, 20\text{mm})$ 。

裂纹长度 a_c 应确保裂纹深长比 $a_c/(2c_c) = 1/6$ 。

此外，还必须对比参考缺陷小的缺陷进行分析，以确保安全。

整合美国 ASME III卷附录 G、法国 RCC-M 第I卷附录 ZG 中规定的参考缺陷尺寸后，参考缺陷尺寸规定如下：

表 6 本标准的参考缺陷尺寸

壁厚 t, mm	裂纹深度 a, mm	裂纹长度 l, mm
$t \leq 40$	$\min(1/2 \text{ 壁厚}, 10)$	$6\min(1/2 \text{ 壁厚}, 10)$
$40 < t < 100$	25	150
$100 \leq t \leq 300$	$1/4 \text{ 壁厚}$	1.5 倍的壁厚
$t > 300$	75	450

除此之外，：如果假想缺陷取较小尺寸能产生更大的应力强度因子，可采用较小的缺陷尺寸。该论述摘自 ASME III 卷附录 G 的 G-2120 节，本论述是 ASME III 卷附录 G 从美国焊接研究委员会 WRCB 175 号公告 (Welding Research Council Bulletin 175) 《PVRC 对铁素体钢断裂韧性的建议》第 5c(2) 段中摘选。

第 7.4.2.1.2 节“无损检测”介绍了运输容器设计、制造中无损检测的要求，该节摘自 SSG-26 2012 版附录 V 的 V.37~V.39 节。

7.4.2.2 节“应力的计算与测试”摘自 SSG-26 2012 版附录 V 的 V.44-V.45，二者完全等价。应力计算通常使用的方法包括通过专业的动力学分析软件，或依靠测试结果的间接应力计算，如运输容器做跌落试验时，在运输容器的测点处安装应变片，通过测应变进而利用广义虎克定律计算出测点处的应力。

7.4.2.3 节为“断裂韧度的确定”。该节参考了 SSG-26 (2012 版) 附录 V 的 V.18 节、第 V.40 节~V.43 节，在 V.18 节、第 V.40 节~V.43 节基础上进行了标准转化。

确定材料断裂韧度的试验方法应从图 4 中所示的三个选项里选择。每个选项都包括了有统计意义的材料断裂韧性数据库，这些材料的断裂韧度是从材料供应商和货包使用单位提供的有代表性的产品型号中获取的。前两个选项应包括代表实际货包应用的应变率、温度和约束条件（如厚度）的材料断裂韧度。

选项 1 应基于-40°C 温度下对特定材料断裂韧度最小值的测量。图 4 中给出了断裂韧度的最小值，代表从有限的材料供应商提供的有限数量的试样并在适当的加载速率和几何约束条件下获取的一组有统计意义的数据集。试样应代表适合特定货包应用的产品类型。

选项 2 应是基于材料断裂韧度下限值或接近下限值的测量，如图 4 所示。作为一种极限情况，该选项包括标准中规定的铁素体钢断裂韧度的测定。下限值或接近下限值可以建立在一组基于静态的、动态的以及裂纹止裂的断裂韧度的合成数据基础上。该选项的一个优点是可以减少可供下限曲线或接近下限曲线参考的材料的测试程序。相对少但适量的数据点足以证明曲线对特定炉批号、等级或材料类型的适用性。

选项 3 应基于满足 GB/T 4161 静态加载速率和裂纹尖端约束要求的具有统计意义的断裂韧性数据集的最小值，或基于测量断裂韧性的弹塑性方法。针对 GB/T 4161 的线弹性断裂力学测试的试验温度应至少低至-40°C，但也许不得以更低的温度以满足 GB/T 4161 的试验条件，如图 4 所示。使用弹塑性断裂力学方法进

行的断裂韧性测试应在最低的设计温度下进行。本选项的保守性在于，特别是在低于-40℃温度下进行测试时，可以使用较低的安全系数，前提是货包设计者确认合理并被主管部门接受。

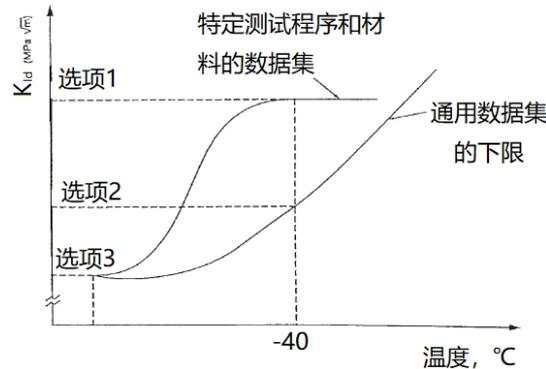


图4 基于选项1、2、3选择的断裂韧度 $K_{Ic(mat)}$ 测量的相对值

SSG-26（2012版）附录V的V.18节中指出：在平面应变条件下，静载临界断裂韧度 K_{IC} 或 J_{IC} ，适用于许多大厚度的B（U）型或B（M）型货包。此外，在大加载速率或冲击条件下的动态断裂韧度记作 K_{Id} ，目前动态断裂韧度标准试验方法有英国标准学会发布的《金属材料动态断裂韧性测定方法》（BS 6729-1987）、中国兵器工业标准化研究所发布的《金属材料平面应变动态断裂韧度 K_{Id} 试验方法》（WJ 2430-1997）。对于某些材料来说，可能明显低于在相同温度下的相应静态断裂韧性 K_{IC} 。

总之，若材料的断裂韧度在标准中可以查到，可直接查询；若材料牌号和材料的屈服强度等已知，可采用工程估算方法，确定断裂韧度。若查不到断裂韧度，可采用试验方法来测量断裂韧度。

本标准中未提供应力强度因子计算方法，本标准使用者可研究NB/T 20013-2010中的应力强度因子计算方法的适用性。本标准使用者也可选用其他计算方法，但需运输容器设计者论证是合理的，且被主管部门认可。

NB/T 20013-2010、GB/T 19624-2019中的应力强度因子计算式基本相同，只是符号略有差异。此外，NB/T 20013-2010、GB/T 19624-2019中的应力强度因子计算式与俄罗斯ПНАЭГ-7-002-86中应力强度因子计算式比较接近。

NB/T 20013-2010、GB/T 19624-2019中给出了几种典型结构缺陷尖端部位应力强度因子 K_I 的计算式，以及 K_I 中函数 f 的计算值。

六、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结构设计要求，主要参考了 SSG-26 2012 版附录 V，技术上吸收了美国核管会管理导则 RG7.12《壁厚大于 4 英寸（0.1m）但不超过 12 英寸（0.3m）的铁素体钢运输容器包容系统壳体断裂韧性准则》和管理导则 RG7.11《最大壁厚为 4 英寸（0.1m）铁素体钢运输容器包容系统壳体的基体材料断裂韧性准则》，同时参考了 ASME 第 III 卷（主要是第 3 册《用于运输与储存乏燃料和高放射性材料及废料的安全容器》、附录 G）和第 VIII 卷、RCC-M 附录 ZG、俄罗斯 ПНАЭГ-7-002-86、M-02-91 以及 NB/T 20013-2010《含缺陷核承压设备完整性评定》，涵盖铁素体钢、奥氏体钢、球墨铸铁等金属材料制成的放射性物品运输容器防脆性断裂评价，适用范围更广，吸纳了 IAEA 以及欧美核电发达国家的经验，更具先进性。

七、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防脆性断裂安全设计标准的技术空白。本标准可以为放射性物品运输容器的设计单位、评审单位、制造单位以及使用单位提供相应的技术依据，为所设计与制造的放射性物品运输容器能更好地满足我国相关法规及标准要求提供技术支持。