

HJ

中华人民共和国国家生态环境标准

HJ 1201—2021

放射性物品运输容器防脆性断裂的安全 设计指南

**Guidelines for the safe design of packaging for radioactive material against
brittle fracture**

本电子版为正式标准文本，由生态环境部环境标准研究所审校排版。

2021-11-13 发布

2021-12-01 实施

生态环境部 发布

目 次

前 言	ii
1 适用范围	1
2 规范性引用文件.....	1
3 术语和定义	1
4 防脆性断裂设计方法的选取.....	2
5 防脆性断裂评价免除条件.....	2
6 用无塑性转变温度等材料韧性指标评价铁素体钢的方法.....	2
7 利用断裂力学理论评价抗断裂性能的方法.....	6



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》，防治放射性污染，保障人体健康，保护生态环境，规范放射性物品运输容器防脆性断裂的安全设计工作，制定本标准。

本标准规定了放射性物品运输容器的防脆性断裂安全设计评价方法，是与《放射性物品安全运输规程》（GB 11806）相配套的标准。

本标准首次发布。

本标准由生态环境部辐射源安全监管司、法规与标准司组织制订。

本标准起草单位：中机生产力促进中心、中国核电工程有限公司。

本标准由生态环境部 2021 年 11 月 13 日批准。

本标准自 2021 年 12 月 1 日起实施。

本标准由生态环境部解释。



放射性物品运输容器防脆性断裂的安全设计指南

1 适用范围

本标准规定了放射性物品运输容器防脆性断裂的安全设计评价方法。

本标准适用于铁素体钢、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的防脆性断裂设计，非包容系统的防脆性断裂设计可参照执行。

2 规范性引用文件

本标准引用了下列文件或其中的条款。凡是注明日期的引用文件，仅注日期的版本适用于本标准。凡是未注日期的引用文件，其最新版本（包括所有的修改单）适用于本标准。

GB 11806	放射性物品安全运输规程
GB 150	压力容器
GB/T 229	金属材料 夏比摆锤冲击试验方法
GB/T 4161	金属材料 平面应变断裂韧度 K_{Ic} 试验方法
GB/T 5482	金属材料动态撕裂试验方法
GB/T 6803	铁素体钢的无塑性转变温度落锤试验方法
GB/T 8363	钢材 落锤撕裂试验方法
GB/T 21143	金属材料 准静态断裂韧度的统一试验方法

3 术语和定义

下列术语和定义适用于本标准。

3.1

无塑性转变温度 nil-ductility transition temperature

按照落锤试验标准方法进行试验时，落锤试样断裂时的最高温度，用 T_{NDR} 表示。

3.2

断裂韧度 fracture toughness

通常指准静态单一加载条件下的裂纹扩展阻力的通用术语，用 K_{Ic} 表示。

3.3

动态断裂韧度 dynamic fracture toughness

表征材料抵抗裂纹扩展的能力，是度量材料在动态加载下韧性好坏的一个定量指标，用 $K_{Ic,d}$ 表示。

3.4

应力强度因子 stress intensity factor

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，用 K 表示。

3.5

屈服强度 yield strength

当金属材料呈现屈服现象时，在试验期间发生塑性变形而力不增加时的应力。应区分上屈服强度和

HJ 1201—2021

下屈服强度。上屈服强度用 R_{eL} 表示，下屈服强度用 R_{eH} 表示。屈服强度通常是指准静态加载速率下测得的下屈服强度。

3.6

动态屈服强度 dynamic yield strength

动态加载速率（如冲击）下测得的屈服强度，用 σ_{yd} 表示。

3.7

净截面应力 net section stress

净截面上的平均应力。净截面等于总体截面（毛截面）减去截面中孔洞面积。

4 防脆性断裂设计方法的选取

4.1 为满足运输容器在 GB 11806 规定的正常运输条件和运输事故条件下放射性物品运输的安全要求，限制外部辐射，确保对放射性物品的包容，并防止核临界，放射性物品运输容器在货包设计时应防止脆性断裂。

4.2 设计者可选用下述任何一种方法进行防脆性断裂设计评价：

第一种方法为通过选用材料免除防脆性断裂评价，其免除条件为选用在要求的使用温度范围内（包括低至 $-40\text{ }^{\circ}\text{C}$ ）能够保持延性和韧性比较高的材料。

第二种方法为通过测试无塑性转变温度等材料韧性指标评价铁素体钢的抗断裂性能。

第三种方法为利用断裂力学理论评价结构的抗断裂性能。

前两种方法是仅基于材料试验要求的准则，需证明某些材料参数（如冲击吸收能量）若不低于其许用值，则该材料具有良好的韧性。第三种方法基于断裂力学方法，适用于所有材料，需证明计算的运输容器包容系统的应力强度因子与测定的材料断裂韧度之间存在足够的裕度。

4.3 在实际工作中可以采用其他的替代方法，但应论证其合理性。

5 防脆性断裂评价免除条件

5.1 设计选用材料时，选用在 GB 11806 规定的正常运输条件和运输事故条件下，在要求的使用温度范围内（包括低至 $-40\text{ }^{\circ}\text{C}$ ）能够保持较高延性和韧性的材料，例如奥氏体不锈钢，可免除防脆性断裂评价。

5.2 对铸造奥氏体不锈钢，不能免除其防脆性断裂评价，需通过 6.2 所述的力学试验证明其具有足够的延性和断裂韧性。

6 用无塑性转变温度等材料韧性指标评价铁素体钢的方法

6.1 概述

确定无塑性转变温度的基础是确定某一温度，在此温度下进行标准落锤试验时，焊接接头处不会出现脆性断裂。6.2 提供了基于冲击吸收能量或侧膨胀值评价铁素体钢的方法，6.3 提供了基于无塑性转变温度评价铁素体钢的方法，可采用任意一种。本方法适用于运输容器用母材的评价，也适用于焊缝和热影响区的评价。

6.2 用冲击吸收能量或侧膨胀值作为验收指标的评价方法

对于铁素体钢（含螺栓），已建立大量的冲击吸收能量（夏比 V 型缺口冲击试验）与断裂韧度关系的数据库，冲击吸收能量可作为材料韧性的间接指标。其基础是确定无塑性转变温度方法，验收准则是

在规定温度下夏比 V 型缺口冲击试验测得的冲击吸收能量(或者侧膨胀值)大于标准规定的限值。在低温下的冲击吸收能量限值可参考相应的标准, 温度应至少包括要求的使用温度范围(包括低至 -40°C)。

6.3 用无塑性转变温度作为验收指标的评价方法

6.3.1 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下最低使用温度(-40°C)的最小温度差是截面厚度的函数。该温度差是以无塑性转变温度与断裂韧度的关系为基础。6.3 适用于 B 型货包容系统的防脆性断裂评价, C 型货包可参照 B 型货包 I 级进行评价, B 型或 C 型货包之外的其他货包可参照 B 型货包 III 级进行评价, 也可按照 GB 150 等其他标准评价。B 型货包 I 级包容系统对组合应力采用的失效理论是最大剪应力理论, 控制应力是应力强度; B 型货包 II 级、III 级包容系统对组合应力采用的失效理论是最大应力理论, 控制应力是第一主应力。第 7 章中应力分析可参照本条执行。

6.3.2 公称壁厚小于 100 mm 的铁素体钢评价准则

根据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, 分级原则见表 1。I 级需要对包容系统的每个试样进行断裂韧性试验, 评价结果应满足 I 级的评价准则, 参见表 2; II 级和 III 级可以进行试验或者参考相应标准数据, 评价结果应满足相应级别的评价准则, 参见表 3、表 4。关键部件是指因断裂失效而导致运输容器包容系统穿透或破裂的部件。

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 1000 TBq 或超过 3000A ₁ 或 3000A ₂	低于 1000 TBq 并且低于 3000A ₁ 或 3000A ₂
特殊形式	超过 3000A ₁ 或者超过 1000 TBq	在 30A ₁ 和 3000A ₁ 之间并且不超过 1000 TBq	低于 30A ₁ 并且低于 1000 TBq
一般形式	超过 3000A ₂ 或者超过 1000 TBq	在 30A ₂ 和 3000A ₂ 之间并且不超过 1000 TBq	低于 30A ₂ 并且低于 1000 TBq

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。

表 2 I 级的评价准则

壁厚 B/mm	断裂韧性验收准则
$16 \leq B < 100$	依据 GB/T 6803 测得的无塑性转变温度 T_{NDT} 必须低于图 1 中确定的 T_{NDT} 限值; 此外, 如果材料的屈服强度 $R_{p0.2} \geq 485 \text{ MPa}$, 还需满足以下要求: 试样厚度 16 mm, 在上平台温度下, 动态撕裂试验 (GB/T 5482) 结果应满足: 动态撕裂能 $DT > 540 \text{ J}$; 或在上平台温度下, 夏比 V 型缺口冲击试验 (GB/T 229) 结果应满足: 冲击吸收能量 $KV_8 > 61 \text{ J}$ 。
$5 \leq B < 16$	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 $\geq 80\%$; 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 $SA\% \geq 80\%$ 。

注: LST 为最低使用温度 (-40°C), 是运输容器用金属的最低温度, 下文所涉及的 LST 与此相同。

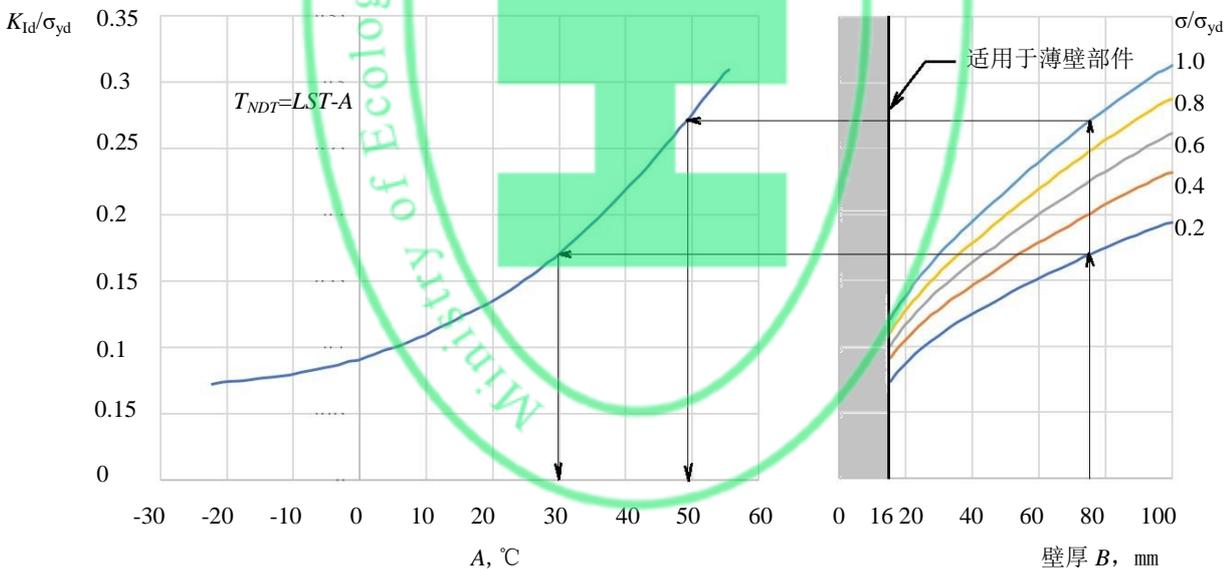
表 3 II 级的评价准则

壁厚 B/mm	断裂韧性验收准则
16 ≤ B < 100	全速加载下, 依据 GB/T 6803 测得的无塑性转变温度 T_{NDT} 必须低于图 2 中曲线 1 或图 3 中 $K_{Id}/\sigma_{yd}-A$ 曲线 1 确定的 T_{NDT} 限值; 减速加载下, 依据 GB/T 6803 测得的无塑性转变温度 T_{NDT} 必须低于图 2 中曲线 2、曲线 3 或图 3 中曲线 2、曲线 3 确定的 T_{NDT} 限值。
5 ≤ 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 ≥ 50%; 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 SA% ≥ 50%; 或使用细晶正火钢或韧性更好的钢材, 无需进行断裂韧性测试。
B < 5	B 小于 5 mm 时, 无要求。

注: 全速加载即为不使用减震装置(如减震器)情况下的加载; 减速加载即为使用减震装置降低加载速率。

表 4 III 级的评价准则

壁厚 B/mm	断裂韧性验收准则
10 ≤ B < 100	B ≥ 16 mm 时, 依据 GB/T 6803 测得的 T_{NDT} 应满足: $T_{NDT} \leq -13 \text{ }^\circ\text{C}$; 或使用厚度 16 mm 的试样时, 在 -13 $^\circ\text{C}$ 下动态撕裂试验 (GB/T 5482) 结果应满足: 动态撕裂能 $DT \geq 68 \text{ J}$; 或在 -13 $^\circ\text{C}$ 下, 夏比 V 型缺口冲击试验 (GB/T 229) 结果应满足: $KV_8 \geq 20 \text{ J}$; 或使用细晶粒正火钢或韧性更好的钢材, 或使用轧制钢, 假定焊缝残余应力已去除, 且满足无损检验验收准则。这两种情况下, 无需进行断裂韧性测试。
B < 10	B 小于 10 mm 时, 无要求。



注 1: σ 为基于线弹性分析的计算应力或试验测得应变通过广义虎克定律算出的应力, 单位: MPa。

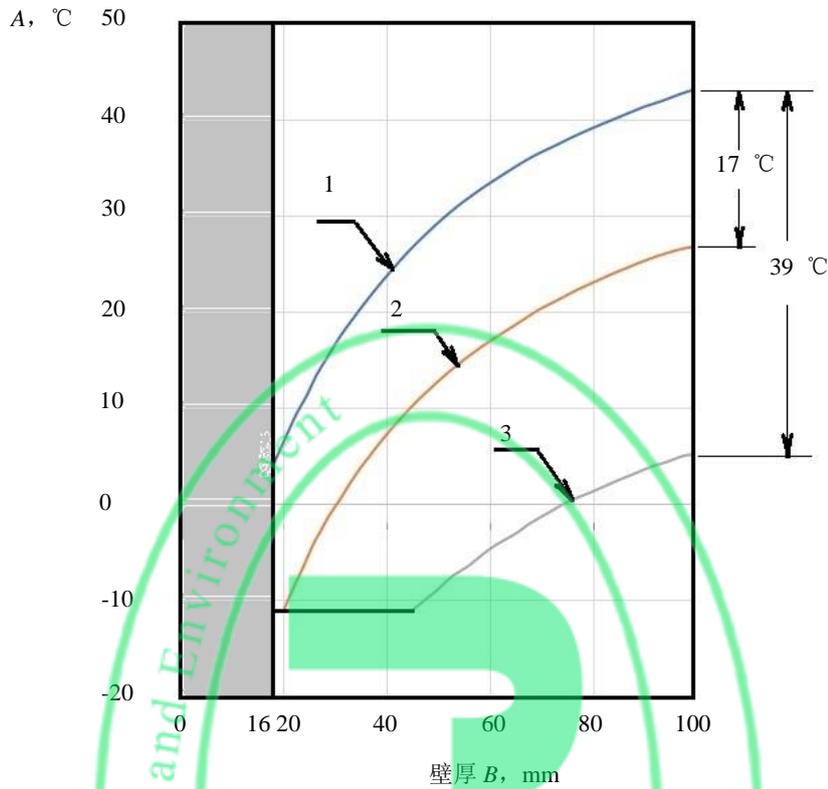
注 2: σ_{yd} 为动态屈服强度, 单位: MPa; 当 $R_{p0.2} \leq 415 \text{ MPa}$ 时, $\sigma_{yd} = R_{p0.2} + 205 \text{ MPa}$; $415 \text{ MPa} < R_{p0.2} < 485 \text{ MPa}$ 时, $\sigma_{yd} = R_{p0.2} + 140 \text{ MPa}$; $R_{p0.2} \geq 485 \text{ MPa}$ 时, $\sigma_{yd} = R_{p0.2} + 100 \text{ MPa}$; $R_{p0.2}$ 为材料标准室温 0.2% 非比例延伸强度。

注 3: K_{Id} 为动态断裂韧度, 单位: $\text{MPa} \cdot \sqrt{\text{m}}$ 。

注 4: A 为 LST 与 T_{NDT} 的温度差, $A = LST - T_{NDT}$, 单位: $^\circ\text{C}$, 下同。

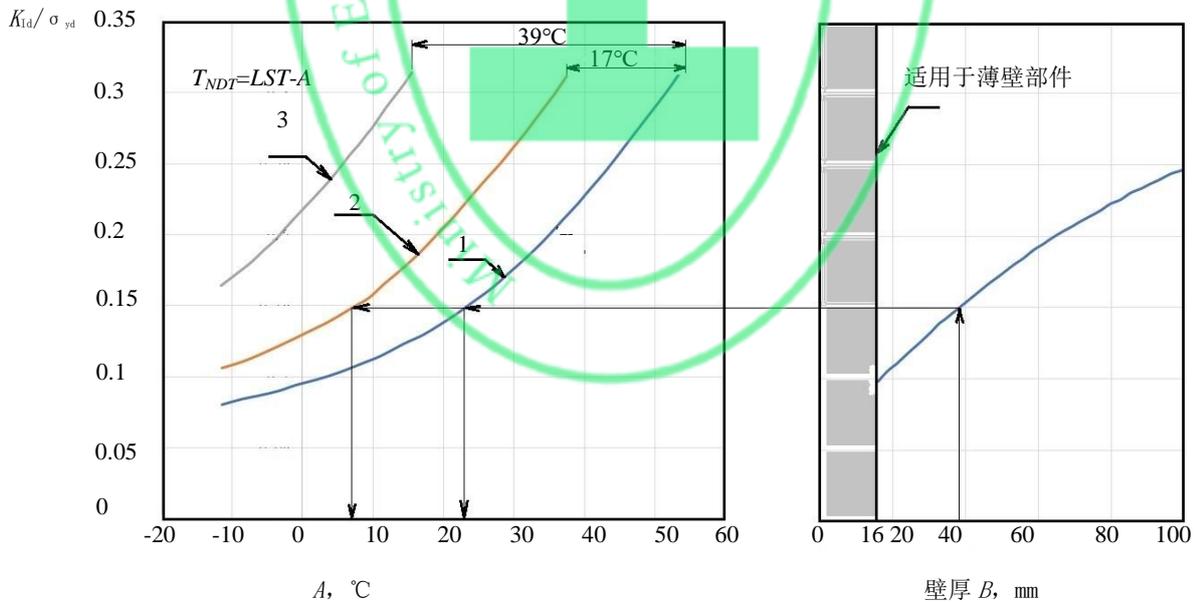
注 5: K_{Id}/σ_{yd} 为动态断裂韧度与动态屈服强度的比值, 单位: $\sqrt{\text{m}}$, 下同。

图 1 I 级的关键部件断裂设计图



注 1: 曲线 1 是屈服应力水平下全速加载时的基本 K_{Id}/σ_{yd} 曲线。
 注 2: 当有效载荷小于约 100 g 时, 曲线 2 由曲线 1 平移 17 °C 得到, 可用于 $415 \text{ MPa} \leq R_{p0.2} \leq 690 \text{ MPa}$ 范围内的钢; 曲线 3 由曲线 1 平移 39 °C 得到, 可用于 $R_{p0.2} < 415 \text{ MPa}$ 的钢, 其中 g 为重力加速度。

图 2 II 级的关键部件断裂设计图



注 1: 曲线 1 是屈服应力水平下全速加载时的基本 K_{Id}/σ_{yd} 曲线。
 注 2: 对于低于 100 g 的减速加载情况: 曲线 2 是由曲线 1 平移 17 °C 得到的, 可用于 $415 \text{ MPa} \leq R_{p0.2} \leq 690 \text{ MPa}$ 范围内的钢; 曲线 3 是由曲线 1 平移 39 °C 得到的, 可用于 $R_{p0.2} < 415 \text{ MPa}$ 的钢, 其中 g 为重力加速度。
 注 3: 加装减载装置时, 加载速率使货包关键部件的材料产生 0.1/s 量级的应变速率。

图 3 II 级的关键部件断裂设计图

6.3.3 公称壁厚为 100 mm~300 mm 的铁素体钢评价准则

在要求的使用温度（包括低至-40 °C）下，依据 GB/T 6803 测得的铁素体钢无塑性转变温度 T_{NDT} 应不高于表 5 中确定的限值。

表 5 无塑性转变温度限值

壁厚 B / mm	T_{NDT} / °C
100	-97
200	-104
300	-107

注：对于其他壁厚，可以利用线性插值法来确定 T_{NDT} 。

7 利用断裂力学理论评价抗断裂性能的方法

7.1 概述

该方法基于线弹性断裂力学，适用于所有工程材料。线弹性断裂力学是用弹性力学的线性理论对含裂纹的零部件进行力学分析，并由此求得应力强度因子等特征参量作为评价指标判断构件是否失效。

7.2 应力强度因子计算

基于线弹性断裂力学的应力强度因子计算式为：

$$K_I = Y\sigma\sqrt{\pi a} \tag{1}$$

式中：

- K_I ——应力强度因子， $\text{MPa}\cdot\sqrt{\text{m}}$ ；
- Y ——形状因子，是与缺陷和结构的尺寸、取向以及几何形状等有关的常数，无量纲参数；
- σ ——名义应力，是运输容器无缺陷时算出的运输容器包容系统的应力， MPa ；
- a ——裂纹深度， m 。

7.3 防脆性断裂准则

基于线弹性断裂力学的防脆性断裂准则为：

$$K_I \leq K_{I(\text{mat})} \tag{2}$$

式中：

- K_I ——应力强度因子， $\text{MPa}\cdot\sqrt{\text{m}}$ ；
- $K_{I(\text{mat})}$ ——货包在将要承受的加载速率下试验测得的断裂韧度， $\text{MPa}\cdot\sqrt{\text{m}}$ 。

使用公式（2）中的安全系数时，应考虑应力计算、缺陷检测、断裂韧度测试时产生的不确定度。在正常运输条件下，安全系数宜取 $\sqrt{10}$ ；在运输事故条件下，安全系数宜取 $\sqrt{2}$ 。公式（2）中的最小安全系数应使用载荷参数和假设缺陷尺寸的上限和断裂韧度的下限。安全系数应由货包设计者选择和证明是合理的，同时货包设计者应考虑确认应力分析方法（如有限元分析程序）的置信度、材料性能的分散性以及无损检验法检出缺陷及其尺寸的不确定度，该安全系数应为主管部门所接受。

7.4 评价过程

7.4.1 一般步骤

评价过程按照以下步骤开展：

- a) 在运输容器关键部位和垂直于最大主应力的方向假设一个参考缺陷；
- b) 计算 GB 11806 中规定的正常运输条件和运输事故条件下力学试验中的运输容器应力，并确保已考虑要求的各种载荷组合；
- c) 计算参考裂纹尖端的应力强度因子；
- d) 确定在运输容器可能承受的加载速率下材料断裂韧度的下限值；
- e) 在相关的载荷条件下，计算所施加的净截面应力与屈服强度的比值；
- f) 应力强度因子和材料断裂韧度之间的安全裕度，以及所受应力和屈服强度之间的安全裕度，应确保不会因 GB 11806 中规定的力学试验而导致不稳定的裂纹扩展或脆性断裂。

步骤 b) 与步骤 f) 也可采用力学试验的方法进行验证。

7.4.2 考虑因素

7.4.2.1 缺陷假设

本标准中提到了三种不同的缺陷尺寸：“参考缺陷尺寸”是用于分析的假定缺陷尺寸；“拒收缺陷尺寸”是在役前检查中发现不满足质量控制要求的缺陷尺寸；“临界缺陷尺寸”是指在设计基准载荷条件下将造成潜在不稳定扩展的缺陷尺寸。

无论是分析论证，还是试验验证，参考缺陷都应设置在运输容器包容系统的表面，该处应力在整个包容系统上最大。如果运输容器承受循环载荷或脉动载荷，则应考虑在役疲劳裂纹扩展的可能性。当最大应力的位置不确定时，需要多重论证。参考缺陷的方位应使通过计算或试验测试确定表面应力的最大分量垂直于缺陷所在平面。参考缺陷尺寸应与体积检验灵敏度、检测不确定度、拒收缺陷尺寸以及临界缺陷尺寸相适应。

参考缺陷形状应为半椭圆形，纵横比（即长度与深度之比）应为 6:1 或更大。参考缺陷在最大应力方向的投影面积应大于役前检查时容器壁内典型缺陷拒收或修理的限值。当采用人造缺陷进行试验验证时，人造缺陷的尖端应尽可能呈类裂纹状，并且具有被运输容器设计者证实且被主管部门接受的参考裂纹尖端锐度。对于球墨铸铁，推荐裂纹尖端的圆角半径不大于 0.1 mm。

铁素体钢的参考缺陷尺寸见表 6。在确保缺陷可检出并保证一定安全裕度的前提下可以假定更小的缺陷尺寸用于评价。

表 6 参考缺陷尺寸

壁厚 B / mm	缺陷深度 a / mm	缺陷长度 l / mm
$B \leq 40$	$\min(B/2, 10)$	$6\min(B/2, 10)$
$40 < B \leq 100$	25	150
$100 < B \leq 300$	$B/4$	$1.5B$
$B > 300$	75	450

7.4.2.2 无损检验

运输容器设计时应选择适当的无损检验方法，按照标准的程序进行表面检验和体积检验。表面检验可采用磁粉检验、液体渗透检验或涡流检验；体积检验可采用射线检验或超声波检验。如果使用参考缺陷概念和基于断裂力学的方法，则运输容器的设计者必须证明规定的无损检验方法具有足够的灵敏度，以保证能够检测到任何此类缺陷。

设计者应考虑缺陷萌生或扩展的可能性和可能的在役材料退化，以确定定期无损检验的要求。

7.4.2.3 应力计算或测试

参考缺陷尖端的应力强度因子的计算都应基于关键部件中的最大拉应力。应力应通过对无缺陷运输

HJ 1201—2021

容器的计算来确定。该应力是无缺陷运输容器中缺陷位置处由于外力作用所引起的应力,称为名义应力。如果采用有限元分析方法,有限元模型必须调整到关键区域的每个检测点和姿态都能给出精确的结果。当应力场是从表面应变测试(比例模型或全尺寸运输容器的性能试验)中推断所得,则推断出的应力场也应该证明是合理的。当应变测试仪用于应力集中区域时,应考虑到测点布置误差或应变计长度影响可能造成的测量误差。

使用动力学有限元分析应满足以下条件:

- a) 计算机程序能够分析冲击事件;
- b) 使用可靠或保守的力学性能参数;
- c) 模型精确或经过保守的简化。

从测试结果推导应力时,应考虑测试仪特性、测试位置和数据转换的合理性。

应力评价还需考虑材料的动态特性和结构特性。

7.4.2.4 断裂韧度的确定

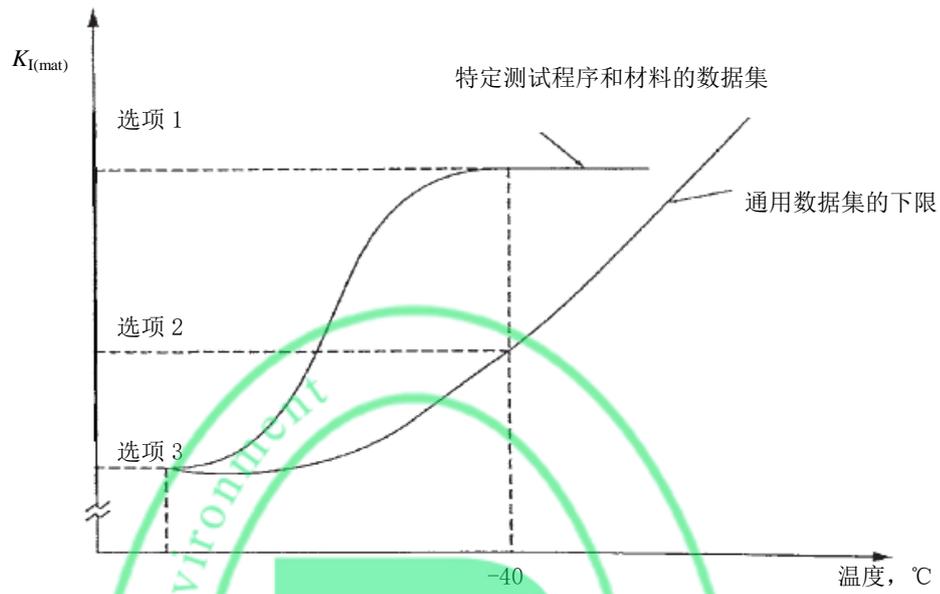
材料断裂韧度的确定方法应从图 4 所示的三个选项中选择。

选项 1 应是通过测试 $-40\text{ }^{\circ}\text{C}$ 下特定材料断裂韧度确定的最小值。它代表了从材料供应商提供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一组有统计意义的数据。对特定运输容器,试样应当具有代表性。

选项 2 应根据材料断裂韧度的下限值确定。作为一种极限情况,该选项包含标准中规定的铁素体钢断裂韧度的测试。下限值可以建立在静态、动态和止裂断裂韧度合成数据的基础上。可以通过参考下限(或接近下限)曲线来简化材料的测试程序。适量的数据点应足以证明该曲线对于材料的牌号、特定炉批号的适用性。

选项 3 应是基于满足 GB/T 4161 标准要求的静态加载速率和裂纹尖端约束的统计断裂韧度数据的最小值,或者基于弹塑性方法测试断裂韧度(可采用 GB/T 21143)。根据 GB/T 4161 进行的线弹性断裂力学测试的试验温度应至少低至 $-40\text{ }^{\circ}\text{C}$,但也可以选择更低的温度以满足 GB/T 4161 的试验条件。使用弹塑性断裂力学进行的断裂韧性测试应在最低的使用温度下进行。

前两个选项应包括代表实际运输货包应用的加载速率或应变率、温度和约束条件(如厚度)的材料断裂韧度。对于平面应变条件,静态加载时测断裂韧度 K_{Ic} 或 J_{Ic} 适用于许多大厚度的 B 型货包。此外,在高加载速率或冲击条件下的动态断裂韧度 K_{Ia} ,对于某些材料来说,可能明显低于相同温度下对应的静态断裂韧度 K_{Ic} 。



注： $K_{I(mat)}$ 单位： $\text{MPa}\cdot\sqrt{\text{m}}$ 。

图 4 基于选项 1、2、3 选择的断裂韧度的相对值