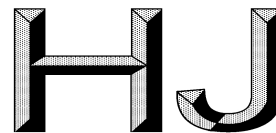


附件2



中华人民共和国国家生态环境标准

HJ□□□□—202□

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

(征求意见稿)

202□-□□-□□发布

202□-□□-□□实施

生态环境部 发布

目 次

前 言.....	II
1 范围.....	1
2 规范性引用文件.....	1
3 术语和定义.....	1
4 防脆断设计方法的选取.....	1
5 方法 1.....	2
6 方法 2.....	2
6.1 概述.....	2
6.2 采用冲击功作为验收指标的评价方法.....	2
6.3 采用无塑性转变温度作为验收指标的评价方法.....	2
7 方法 3.....	6
7.1 概述.....	6
7.2 应力强度因子计算.....	6
7.3 防脆性断裂准则.....	7
7.4 评价过程.....	7

前 言

为贯彻《中华人民共和国核安全法》《中华人民共和国环境保护法》和《中华人民共和国放射性污染防治法》，防治放射性污染，保障人体健康，保护环境，指导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。

本标准是与《放射性物品安全运输规程》(GB 11806) 配套的标准，提供了放射性物品运输容器的防脆性断裂设计指南。

请注意本标准的某些内容可能涉及专利。本标准的发布机构不承担识别专利的责任。

本标准为首次发布。

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 202×年×月×日批准。

本标准自 202×年×月×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 范围

本标准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

下列文件中的内容通过文中的规范性引用而构成本标准必不可少的条款。其中，注日期的引用文件，仅该日期对应的版本适用于本标准；不注日期的引用文件，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/T 6803 铁素体钢的无塑性转变温度落锤试验方法

GB/T 229 金属材料夏比摆锤冲击试验方法

GB/T 5482 金属材料动态撕裂试验方法

GB/T 8363 钢材 落锤撕裂试验方法

GB/T 4161 金属材料 平面应变断裂韧度 K_{IC} 试验方法

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_{NDT} 表示。

3.2

断裂韧度 fracture toughness

准静态单一加载条件下的裂纹扩展阻力的通用术语。

3.3

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。

4 防脆断设计方法的选取

4.1 为满足运输容器在《放射性物品安全运输规程》（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。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。

方法 1 选用在要求的环境温度范围内（包括低至-40℃）能够保持延性和韧性的材料。

方法 2 通过测量与防脆性断裂性能相关的无塑性转变温度评价铁素体钢。

方法 3 使用断裂力学原理评价抗断裂性能。

方法 1 和方法 2 是通过材料自身的韧性达到防止脆性断裂的目的，方法 3 是通过设计减震器或利用无损检验技术确定缺陷尺寸来限制运输容器各部件的应力达到防止脆性断裂的目的。

4.2 在实际工作中可以采用其他的替代方法，但必须论证其合理性，并被主管部门接受。

5 方法 1

5.1 设计选用材料时，选用在《放射性物品安全运输规程》（GB 11806）规定的正常运输条件和运输事故条件下，要求的环境温度范围内（包括低至-40℃）能够保持延性和韧性的材料，例如奥氏体不锈钢。

5.2 对铸造奥氏体不锈钢，需通过力学试验证实其具有足够的延性和断裂韧性。

6 方法 2

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，焊缝的母材区不会出现脆性断裂。第 6.2 节或 6.3 节提供了两种基于无塑性转变温度确定原理评价铁素体钢的评价方法。

6.2 采用冲击功作为验收指标的评价方法

对于铁素体钢，已建立大量的冲击功（夏比冲击试验）与断裂韧度关系的数据库，冲击功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冲击试验测得的冲击功(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℃）。

6.3 采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 公称壁厚小于 100mm 的评价准则

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。三个级别的评价准则见表 2 至表 4。

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 3000A ₂	低于 30000Ci 并且低于 3000A ₁ 或 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。

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 6.3.2）
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
$16 \leq B \leq 100$	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 6.3.2）
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
$16 \leq B \leq 100$	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 6.3.2)
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
$10 \leq B \leq 100$	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, $KI \geq 68\text{J}$; 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。

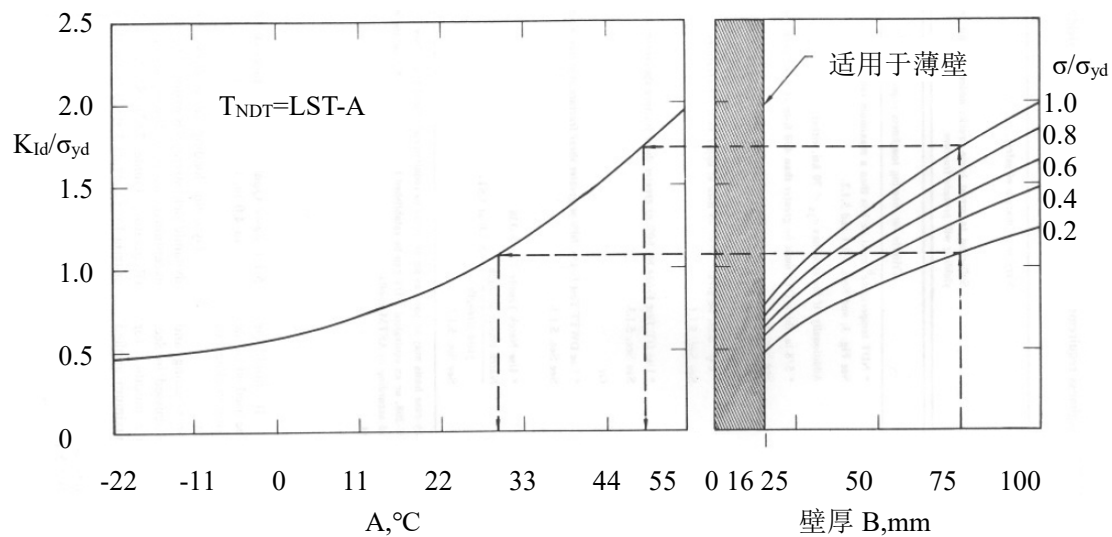


图 1 I 级的关键部件断裂设计图

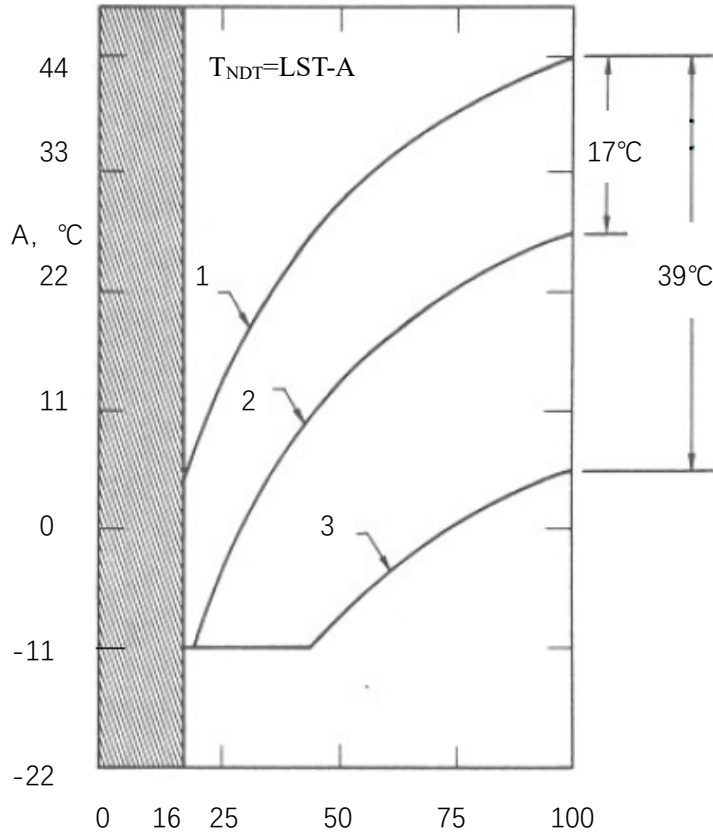


图 2 II 级的关键部件断裂设计图（全速加载下）

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。

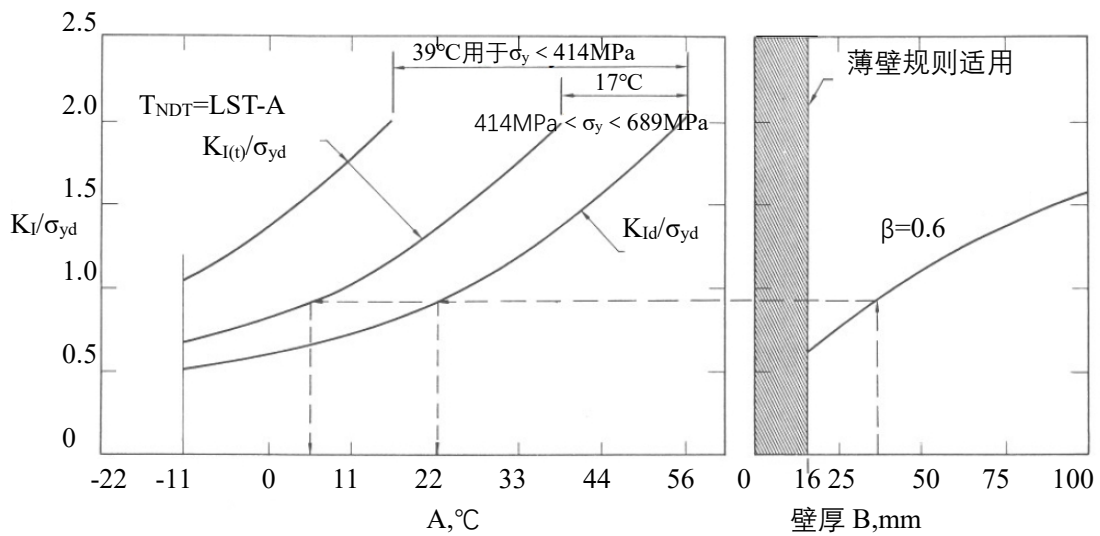


图 3 II 级的关键部件断裂设计图（减速加载下）

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°C）下，I

级需要对包容系统每个关键部件的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。

6.3.3 根据材料的裂纹止裂特性，对 I 级、II 级和 III 级的评价准则采取不同的安全裕度。安全裕度 β 的计算式为：

$$\beta = \frac{1}{B} \left(\frac{K_{Id}}{\sigma_{yd}} \right)^2 \quad (1)$$

式中：

B 为安全裕度，为无量纲量；

σ_{yd} 为动态屈服强度 (MPa)；

K_{Id} 为动态断裂韧性 ($\text{MPa} \cdot \text{m}^{1/2}$)；

B 为截面厚度 (m)。

6.3.4 公称壁厚为 100~300mm 的评价准则

要求的环境温度范围 (包括低至 -40°C)，铁素体钢的无塑性转变温度 (T_{NDT}) 应不高于表 5 中的限值。

表 5 无塑性转变温度的限值

壁厚 B mm	T_{NDT} $^\circ\text{C}$
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 方法 3

7.1 概述

方法 3 是基于线弹性断裂力学的防脆性断裂评价方法，适用于广泛的工程材料。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判断裂纹扩展失效的准则。

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：

$$K_I = Y\sigma\sqrt{\pi a} \quad (2)$$

式中：

K_I 为应力强度因子 ($\text{MPa} \cdot \text{m}^{1/2}$)；

Y 为形状因子，是与缺陷和结构的尺寸、取向以及几何形状有关的常数；

σ 为名义应力 (MPa)；

a 为裂纹深度 (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：

$$K_I \leq K_{I(mat)} \quad (3)$$

式中：

K_I 为应力强度因子；

$K_{I(mat)}$ 为货包将要承受的加载速率下进行的试验中测得的断裂韧度。

在使用公式时，应统筹考虑应力、缺陷尺寸、断裂韧度等参数的安全系数。在正常运输条件下，安全系数取 $\sqrt{10}$ ；在运输事故条件下，安全系数取 $\sqrt{2}$ 。

7.4 评价过程

7.4.1 一般步骤

- a) 在运输容器关键部位和关键方向假设一个参考缺陷。
- b) 计算《放射性物品安全运输规程》(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) 满足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，确保不会因《放射性物品安全运输规程》(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。

在上述步骤中可以采用力学试验方法直接证明其防脆性断裂性能。具体包括：应力强度因子计算中的应力分布，如步骤b)；验证防脆性断裂的推荐安全裕度，如步骤f)。

7.4.2 评价过程的考虑

7.4.2.1 缺陷尺寸的确定

7.4.2.1.1 缺陷尺寸的假设

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，参考缺陷位置都应设置在运输容器包容边界表面上应力最大的位置。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得通过计算或试验测量确定表面应力的最大分量垂直于缺陷所在平面，并应考虑应力集中。参考缺陷的深度应与体积检测灵敏度、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的尖锐度。对于球墨铸铁，推荐裂纹尖端的圆角半径不大于0.1mm。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。

建议铁素体钢的参考缺陷尺寸见表6。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。

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

7.4.2.1.2 无损检测

运输容器设计时应选择适当的无损检测方法，按照标准的程序进行表面检测和体积检测。表面检测可采用磁粉检测、液体渗透检测或涡流检测；体积检测可采用射线检测或超声波检测。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测方法应具有足够的灵敏度，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，以确定定期无损检测的要求。

7.4.2.2 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断裂关键部件中的最大拉应力。断裂关键部件是指因断裂失效而导致运输容器包容边界穿透或破裂的部件。应力应通过对无缺陷运输容器的计算来确定。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。

7.4.2.3 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 应是通过测量 -40°C 下特定材料断裂韧度确定的最小值，如图 4 所示。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的数据。对特定运输容器，试样应当具有代表性。

选项 2 应是根据材料断裂韧度的下限值确定的，如图 4 所示。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量。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量断裂韧度。根据 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 ，但也可以选择更低的温度以满足 GB/T 4161 的试验条

件，如图 4 所示。使用弹塑性断裂力学进行的断裂韧性测试应在最低的环境温度下进行。

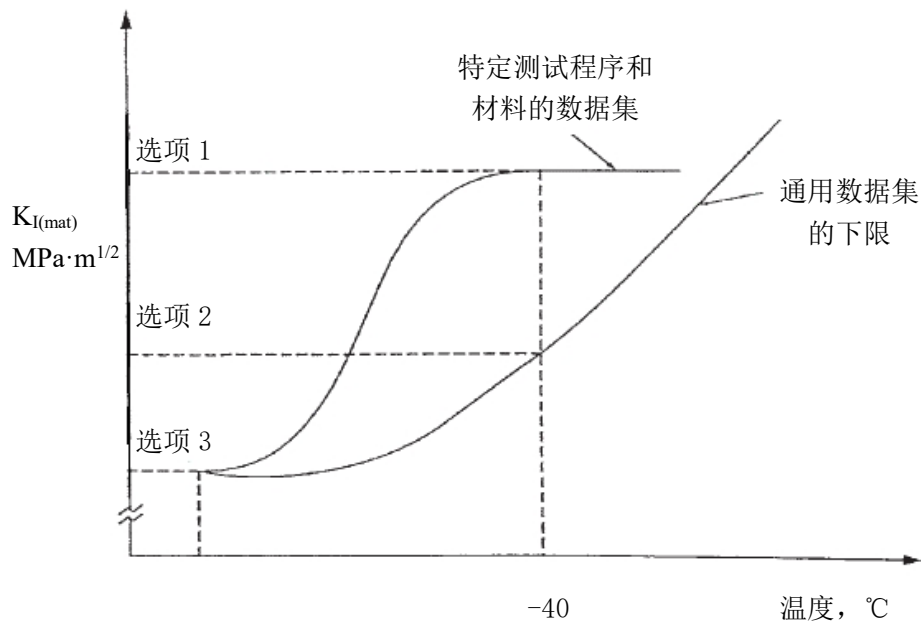


图 4 基于选项 1、2、3 选择的断裂韧度的相对值