

附件 2

ICS



# 中华人民共和国国家标准

GB/T ××××—20××

## 乏燃料运输容器结构分析的载荷组合和 设计准则

Load combination and design criteria for structural analysis of spent  
fuel transport cask

(征求意见稿)

20xx -xx-xx 发布

20xx -xx-xx 实施

生态环境部  
国家市场监督管理总局

发布

—

# 目 录

前言 .....	II
1范围 .....	1
2规范性引用文件.....	1
3术语和定义.....	1
3.1应力强度 .....	1
3.2一次应力 .....	1
3.3二次应力 .....	2
3.4一次薄膜应力.....	2
3.5一次弯曲应力.....	2
3.6交变应力强度.....	2
3.7疲劳 .....	2
3.8安定性 .....	2
3.9包容边界 .....	2
3.10临界安全相关部件.....	2
3.11其他安全相关部件.....	3
3.12货包 .....	3
3.13包装 .....	3
3.14符号 .....	3
4载荷组合.....	3
4.1总则 .....	3
4.2初始条件 .....	6
4.3正常运输条件下的载荷组合 .....	6
4.4运输事故条件下的载荷组合 .....	8
5设计准则.....	9
5.1总则 .....	9
5.2包容边界结构的设计准则.....	9
5.3临界安全相关部件的设计准则 .....	10
5.4其它安全相关部件的设计准则.....	11

## 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》，防治放射性物质污染，保障人体健康，保护环境，规范乏燃料运输容器的结构分析工作，制定本标准。

本标准规定了乏燃料运输容器结构分析的载荷组合和设计准则，即乏燃料运输容器包容边界、临界安全相关部件以及其它安全相关部件在正常运输条件和运输事故条件下结构分析的载荷组合和设计准则。

本标准由生态环境部辐射源安全监管司和法规与标准司组织制订。

本标准主要起草单位：中国核电工程有限公司，中机生产力促进中心。

本标准生态环境部20XX年XX月XX日批准。

本标准自20XX年XX月XX日起实施。

本标准由生态环境部解释。

# 乏燃料运输容器结构分析的载荷组合和设计准则

## 1 范围

本标准规定了乏燃料运输容器结构分析的载荷组合和设计准则。

本标准第4章载荷组合适用于所有类型乏燃料运输容器；第5章设计准则适用于奥氏体不锈钢制乏燃料运输容器。主体为碳钢和低合金钢材料的乏燃料运输容器，其结构分析原则上可以采用本标准中第5章所规定的设计准则，但同时应考虑低温断裂韧性等附加要求。本准则不适用于蠕变起控制作用的情况。

总活度超过3000A<sub>1</sub>/A<sub>2</sub>或30000Ci的放射源货包，其结构分析的载荷组合与包容边界设计准则原则上可参照本标准相关内容。

本标准规定的设计准则应用于线弹性分析，其基本假设可以应用叠加原理来确定载荷组合对容器结构的影响。但其它安全相关部件（如减震器及其螺栓）可根据实际情况进行适当的非线性处理。

## 2 规范性引用文件

下列文件对于本文件的应用是必不可少的。凡是注日期的引用文件，仅所注日期的版本适用于本文件。凡是不注日期的引用文件，其最新版本（包括所有的修改单）适用于本文件。

GB11806-2019 《放射性物品安全运输规程》

ASME 核电规范与标准, BPVC-III核设施部件建造规则第1册 NB分卷

ASME 核电规范与标准, BPVC-III核设施部件建造规则第1册 NF分卷

ASME 核电规范与标准, BPVC-III核设施部件建造规则第1册 NG分卷

NUREG/CR-3854 运输容器制造规范

RG 7.6 运输容器包容结构分析设计准则

RG 7.8 放射性材料运输容器结构分析载荷组合导则

RG 7.11 壁厚不大于4 英寸（0.1米）的铁素体钢制运输容器包容边界基体材料的断裂韧性准则

ANSI N14.6 称重为10000磅（4500 千克）或其以上的放射性物质运输容器专用提升装置

## 3 术语和定义

### 3.1

**应力强度** stress Intensity

应力强度是组合应力基于第三强度理论的当量强度，规定为给定点处最大剪应力的2倍，即给定点处代数最大主应力与代数最小主应力（拉应力为正值，压应力为负值）之差。

### 3.2

**一次应力** primary stress

一次应力为平衡压力及其它机械载荷所必须的法向应力或剪应力。对理想塑性材料，一次应力所引起的总体塑性流动是非自限的，即当结构内的塑性区扩展到使之变成几何可变的机构时，达到极限状态，即使载荷不再增加，仍产生不可限制的塑性流动，直至破坏。

### 3.3

#### 二次应力 secondary stress

二次应力是为满足外部约束条件或结构自身变形连续要求所必须的法向应力或剪应力。二次应力的基本特征是具有自限性，即局部屈服和小量变形就可以使约束条件或变形连续要求得到满足，从而变形不再继续增大。只要不反复加载，二次应力不会导致结构破坏。

热应力被认为是二次应力，由于热应力是应变控制而非载荷控制的，而且这些应力会随着屈服的发生而减小。在总体结构不连续处的弯曲应力，如圆柱形筒体和平封头的连接处，通常被认为是二次应力。但是，当需要筒体和封头连接处的边缘力矩阻止封头的弯曲应力过大时，连接处的应力被认为是一次应力。矩形横截面筒体筒壁之间的连接处的弯曲应力被认为是一次应力。

### 3.4

#### 一次薄膜应力 primary membrane stress

一次薄膜应力指实体截面厚度上的平均一次法向应力。

### 3.5

#### 一次弯曲应力 primary bending stress

一次弯曲应力是平衡压力或其他机械载荷所需的沿截面厚度线性分布的弯曲应力。

### 3.6

#### 交变应力强度 alternating stress intensity

当主应力方向在循环中不变时，交变应力强度 $S_{alt}$ 是指在所有可能的应力状态(i和j)下 $S'_{12}$ 、 $S'_{23}$ 和 $S'_{31}$ 中最大绝对值的二分之一， $\sigma_1$ 、 $\sigma_2$ 和 $\sigma_3$ 是主应力

$$S'_{12} = (\sigma_{1i} - \sigma_{1j}) - (\sigma_{2i} - \sigma_{2j})$$

$$S'_{23} = (\sigma_{2i} - \sigma_{2j}) - (\sigma_{3i} - \sigma_{3j})$$

$$S'_{31} = (\sigma_{3i} - \sigma_{3j}) - (\sigma_{1i} - \sigma_{1j})$$

当循环中主应力方向发生变化时，需要通过先计算应力分量的差值，再通过分量差值计算主应力及应力强度。

### 3.7

#### 疲劳 fatigue

疲劳是在循环加载条件下发生在结构某点处局部的、永久性的损伤递增过程，经足够的应力或应变循环后，损伤累积可使材料产生裂纹，或使裂纹进一步扩展至完全断裂。

### 3.8

#### 安定性 shakedown

如果几次载荷循环后变形趋于稳定且随后的结构响应是弹性的，棘轮效应终止，结构趋于安定状态。

### 3.9

#### 包容边界 containment boundary

在运输过程中，用于包容放射性物品的包装部件的组合物，是防止放射性物品漏失或弥散的物理屏障。例如乏燃料运输容器的包容边界一般包括：内筒体、一次密封盖、贯穿件密封盖和连接螺栓等。

### 3.10

#### 临界安全相关部件 criticality related components

在运输过程中，除包容边界以外的对容器临界安全可产生影响的部件，例如乏燃料运输容器的临界安全相关部件一般包括吊篮等。

### 3.11

#### 其他安全相关部件 other safety components

除包容边界和临界安全相关部件以外，实现运输容器其他安全相关功能的所有部件，例如 $\gamma$ 和中子屏蔽部件、二次密封结构及其螺栓、减震器及其螺栓、提升装置（提升耳轴）、栓系结构等。

### 3.12

#### 货包 package

货包是提交运输的包装与其放射性内容物的统称。

### 3.13

#### 包装 packaging

包装是指一个或多个容器以及容器中起到包容和其他安全功能的任何其他部件或材料。

### 3.14

#### 符号 symbol

$S_{alt}$ ——交变应力强度；

$S_a$ ——交变应力强度分量的许用幅值；

$S_m$ ——设计应力强度，取 $S_u/3$ 和 $2S_y/3$ 中的较小者；

$S_n$ ——一次加二次应力强度；

$S_y$ ——设计温度下材料的屈服强度；

$S_u$ ——设计温度下材料的抗拉强度。

$A_1/A_2$ ——放射性核素限值（依据GB11806中的规定）

## 4 载荷组合

### 4.1 总则

为了确保乏燃料运输容器结构的安全，在对容器进行分析时设计者应合理的将容器可能经受的载荷进行全面的分析及组合，包括运输过程中的静载荷、动载荷和热载荷。本标准将容器的载荷归纳为初始条件、正常运输条件和运输事故条件，并给出了初始条件与正常运输条件和运输事故条件载荷的组合方式，详见表1。

表1正常运输和运输中事故条件下载荷组合汇总表

	初始条件								
	环境温度		日照		衰变热		内压 <sup>2</sup>		制造中的应力 <sup>3</sup>
	38℃	-40℃	最大值 <sup>1</sup>	0	最大值	0	最大值	最小值	
	正常运输条件（单独分析）								
高温环境（38℃）			√		√		√		√
低温环境（-40℃）				√		√		√	√
外压增加（140 kpa）		√		√		√		√	√
最小外压（60kpa）	√		√		√		√		√
正常运输过程中产生的振动和冲击 <sup>4</sup>	√		√		√		√		√
		√		√		√		√	
自由下落试验	√		√		√		√		√
		√		√		√		√	
堆积	√		√		√		√		√
		√		√		√		√	
贯穿（1m落棒）	√		√		√		√		√
		√		√		√		√	
	运输事故条件（依次施加）								
自由下落试验 I	√		√		√		√		√
		√		√		√		√	
自由下落试验 II	√		√		√		√		√
		√		√		√		√	
耐热试验 <sup>5</sup>	√		√		√		√		√

表1正常运输和运输中事故条件下载荷组合汇总表（续）

	初始条件								
	环境温度		日照		衰变热		内压 <sup>2</sup>		制造中的应力 <sup>3</sup>
	38℃	-40℃	最大值 <sup>1</sup>	0	最大值	0	最大值	最小值	
	运输事故条件 （依次施加，对于质量不超过500kg并依据外部尺寸计算的总体密度不大于1000kg/m <sup>3</sup> 的货包）								
自由下落试验II	√		√		√		√		√
		√		√		√		√	
自由下落试验III	√		√		√		√		√
		√		√		√		√	
耐热试验 <sup>5</sup>	√		√		√		√		√
	运输事故条件（单独分析）								
水浸没					√		√		√
						√		√	
强化水浸没（如需）					√		√		√
						√		√	
<sup>a</sup> 参见本标准4.2.2节 <sup>b</sup> 参见本标准4.2.3节 <sup>c</sup> 参见本标准4.2.4节 <sup>d</sup> 参见本标准4.3.5节 <sup>e</sup> 评价应在火烧开始后30分钟以及火焰熄灭后的稳定状态进行									



## 4.2 初始条件

初始条件下的载荷应作为正常运输条件和运输事故条件的基础,将其分别与正常运输条件和运输事故条件下的载荷进行组合,用以对容器进行结构评价。

### 4.2.1 初始温度

容器初始温度分布应为稳定状态。正常运输条件和运输事故条件的初始温度,应考虑环境温度-40℃无太阳曝晒和环境温度38℃有太阳曝晒两种情况。太阳曝晒应符合GB11806的要求。运输事故条件中的耐热试验工况无需考虑低温初始条件。

### 4.2.2 衰变热

初始条件还应考虑乏燃料组件的衰变热。最大衰变热通常应在环境温度较高的情况下叠加,并应考虑GB11806中的太阳曝晒要求,低温情况下通常可不考虑衰变热。

### 4.2.3 容器内压

4.2.3.1容器内压应与其他初始条件合理组合。最小内压应为大气压力,对于小于大气压力的设计,内压取值应为负值。

4.2.3.2对于商用核电站的乏燃料,应考虑乏燃料组件内所有气体释放的情况用以确定容器最大内压(容器内压主要取决于以下几个因素:容器内回充惰性气体的压力,容器温度分布以及乏燃料包壳内所有气体的泄漏)。

### 4.2.4 装配应力

评价容器时,应考虑容器装配和安装过程(包括连接、成形、装配和校形等)中产生的应力。若未采取后续措施消除这些应力,则应在确定容器最大应力时考虑这些应力。(装配是指容器主要部件的组装:包括内筒体、 $\gamma$ 屏蔽层、外筒体等,但不包括单个部件的制造。因此,装配应力应包括由过盈配合引起的应力和铅凝固过程造成边界收缩导致的应力,但不包括由板材成形、焊接等引起的残余应力)。装配前应认为无应力状态。

### 4.2.5 其它

本标准给出了对结构评价产生影响的初始条件的最大值和最小值。如果上述条件在结构分析中并不是最严苛情况,则还应合理考虑除上述最大值和最小值的其他初始条件。

## 4.3 正常运输条件下的载荷组合

正常运输条件下的载荷应依据4.2节中规定的初始条件按照表1进行组合。在对乏燃料运输容器进行结构分析时,以下载荷应单独考虑,不需相互叠加。

### 4.3.1 受热

应考虑容器在环境温度为38℃的静止空气和GB11806中规定的太阳曝晒的条件。如运输容器具有机械辅助冷却系统,在受热条件下结构评价时应认为该系统失效。

### 4.3.2 受冷

应考虑容器在环境温度为-40℃的静止空气中且无太阳曝晒的条件。同时应考虑容器无内部热载荷和最小内压的情况,也应考虑冷却剂结冰的可能性及其影响。

### 4.3.3 外压增加

应评价在外压增加至140 kPa时对容器结构的影响。

#### 4.3.4 外压减小

应评价在外压降低至60kPa时对容器结构的影响。

#### 4.3.5 振动和疲劳

在正常运输条件下，容器结构评价应考虑振动和冲击载荷。包括对容器-车辆系统的小激励产生的振动载荷；在铁路运输过程中连接处和道岔处，以及在公路运输中减速带、坑洼处产生的间歇性冲击载荷。重复的增压载荷以及任何对容器机械疲劳产生影响的其它载荷都应纳入分析范畴。

#### 4.3.6 堆积

4.3.6.1除非包装的形状能有效地防止堆积，否则应在24h内一直承受下述两种试验中压力荷载较大者：

- a) 相当于货包最大重量5倍；
- b) 相当于13kPa与货包竖直投影面积的乘积。

4.3.6.2应将荷载均匀地加在货包的两个相对面上，其中一个面应是货包通常搁置的底部。

#### 4.3.7 贯穿

应把货包置于在试验中不会显著移动的刚性平坦的水平面上。

- a) 应使一根直径为3.2cm、一端呈半球形、质量为6kg 的棒自由下落并沿竖直方向正好落在货包最薄弱部分的中心部位。这样，若贯穿深度足够深，则包容系统受到冲击。该棒不得因进行试验而显著变形。
- b) 所测棒的下端至货包的上表面预计的冲击点的下落高度应是 1 m。

#### 4.3.8 自由下落

4.3.8.1乏燃料运输容器应按表2中所列高度跌落在平坦刚性靶面上的情况进行评价，容器的撞击面应为预期对容器造成最大破坏的位置。同时应考虑容器内容物重量最大和最小时对冲击的影响。

4.3.8.2此外，还应考虑其他可能导致热疲劳产生的因素。这些因素应包含在乏燃料装载和卸载过程中遇到的热瞬态，以及栓系系统与容器热膨胀的相互作用。

4.3.8.3容器在正常运输条件下存在许多不同的载荷组合，可分别进行疲劳分析，评价应基于最不利的初始条件，并与正常冲击和振动环境下寿期的可靠频谱相一致。表1列出了最不利的情况。

**表2 正常运输条件下货包自由下落高度**

货包质量kg	自由下落高度m
货包质量<5000	1.2
5000≤货包质量<10000	0.9
10000≤货包质量<15000	0.6
货包质量≥15000	0.3

#### 4.4 运输事故条件下的载荷组合

运输事故条件下的载荷应依据4.2节中规定的初始条件按照表1进行组合。在对乏燃料运输容器进行结构分析时,应对同一个容器按照4.4.1至4.4.3的运输事故条件规定顺序依次施加(自由下落试验I和自由下落试验II或自由下落试验II和自由下落试验III、耐热),以确定最大累积效应。

##### 4.4.1 自由下落试验 I

4.4.1.1容器应自由下落在靶上,以使容器受到最严重的破坏,而从容器的最低点至靶的上表面高度应是9m。试验用靶应为平坦的水平平面靶,该靶在容器受到冲击后,其抗位移能力或抗变形能力的增加不会使容器的受损有明显地的增加。应考虑内容物重量最大和重量最小的情况。

4.4.1.2为了确定容器在自由下落试验I后发生最大变形的部位,应考虑不同跌落姿态下,容器顶端、顶角、侧向、底端、底角以及过重心冲击点的变形。如果容器的设计导致某一倾斜角方向下落对容器具有更大的破坏性,也应对这些角度跌落的影响进行评价。

##### 4.4.2 自由下落试验 II

容器应自由下落在牢固地直立在靶上的一根棒上,以使容器受到最严重的损坏。从容器的预计冲击点至棒的端面高度应是1m。该棒应由直径为 $(15 \pm 0.5)$  cm、长度为20cm的圆形实心低碳钢制成,如有更长的棒会造成严重的损坏,应采用一根足够长的棒。棒的顶端应是平坦而又水平的,其边缘成圆角,圆角半径不大于6mm。试验用靶规定为平坦的水平平面靶,该靶在容器受到冲击后,其抗位移能力或抗变形能力的增加不会使容器的受损有明显地的增加。应考虑内容物最大重量和最小重量对该工况的影响。

##### 4.4.3 自由下落试验 III

容器应经受动态压碎试验,即把容器置于靶上,让500kg重的物体从9m高处自由下落至容器上,使容器受到最严重的损坏。该重物应是一块 $1\text{m} \times 1\text{m}$ 的实心低碳钢板,并应以水平状态下落。钢板的底面边缘和角呈圆弧状,圆角半径不大于6mm。下落高度是从该板底面至容器最高点的距离。试验用靶规定为平坦的水平平面靶,该靶在容器受到冲击后,其抗位移能力或抗变形能力的增加不会使容器的受损有明显地的增加。

##### 4.4.4 耐热

4.4.4.1容器应在火烧的条件进行结构评估。火烧工况应保证整个容器被最小平均火焰发射系数为0.9的温度 $800^{\circ}\text{C}$ 的火焰所包覆,并持续30分钟。容器表面吸收系数为0.8。应在火焰熄灭后温度达到稳定后评估容器。容器应考虑中子屏蔽层在火烧工况下全部消失的可能性和结果。

4.4.4.2容器在经受放射性内容物在货包内所产生的最大设计的内释热率和在GB11806中表4中所规定的太阳曝晒条件下,在环境温度为 $38^{\circ}\text{C}$ 时仍处于热平衡状态。此外,允许这些参数在试验前和在试验期间具有不同的值,但在随后评定货包响应曲线时予以考虑。

4.4.4.3耐热试验包括:

- a) 使试样暴露在热环境中30min,该热环境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系数为0.9,平均温度至少为 $800^{\circ}\text{C}$ ,试样完全被火焰所吞没,使表面吸收系数为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;
- b) 使试样经受放射性内容物在货包内所产生的最大设计内释热率和在GB11806表4中所规定的太阳曝晒条件下,暴露在 $38^{\circ}\text{C}$ 环境温度中足够长的时间,以保证试样

各部位的温度降至或接近初始稳定状态。此外，允许这些参数在加热停止后具有不同的值，但在随后评定货包响应曲线时予以考虑。在试验期间和试验后，不得人为地冷却试样，并且应允许试样的材料自然燃烧。

#### 4.4.5 水浸没

应使容器在水深至少15m并会导致最严重损坏的状态下浸没不少于8h。如采用分析计算的方式进行评价，则应使容器承受至少150kPa的外部表压。

#### 4.4.6 强化水浸没

含有超过 $10^5 A_2$ 的乏燃料运输容器货包的强化水浸没试验，应使货包在水深至少200m处浸没不少于1h。如采用分析计算的方式进行评价，则应使容器承受至少2MPa的外部表压。

### 5 设计准则

#### 5.1 总则

本部分规定了容器在正常运输条件和运输事故条件下的包容边界、临界安全相关部件及其它安全相关部件的设计准则。乏燃料运输容器的结构评价应满足上述对应准则，从而确保其结构的安全性能。

满足标准或技术条件的材料应使用其对应规定的材料性能、设计应力强度、设计疲劳曲线等。进行结构分析时，材料性能值应根据相应温度选取。本章中描述的设计准则，如无特别说明，均指除螺栓以外的部件。

#### 5.2 包容边界结构的设计准则

5.2.1 在正常运输条件下，一次薄膜应力强度值应不大于设计应力强度 $S_m$ ，一次薄膜加一次弯曲应力强度应不大于 $1.5S_m$ 。

5.2.2 正常运输条件下的疲劳分析应按如下规定进行：

- a)  $S_{alt}$ ，应考虑正常操作循环时分布在每个点上总应力状态，以确定最大范围。
- b) 循环载荷不超过 $10^6$ 循环时，可使用标准规范中的设计疲劳曲线。当载荷超过 $10^6$ 循环时，应从适用的设计疲劳曲线上取由该曲线所限定的最大循环次数所得的 $S_a$ 值。
- c)  $S_{alt}$ 应乘以设计疲劳曲线上给出的弹性模量与分析中使用的弹性模量之比，从而得到与设计疲劳曲线一起使用的应力值。当只考虑一种工作循环时，可从适当的设计疲劳曲线中选取相应的数值作为允许寿命，如果存在由两种或两种以上的应力循环产生的明显的应力，应考虑累积效应。
- d) 当结构不连续时，应采用适当的应力集中系数。当该系数是未知时，通常取值为4。

5.2.3 在正常运输条件下，一次应力和二次应力之和 $S_n$ 应不大于 $3S_m$ ，应力强度 $S_n$ 的计算与 $2S_{alt}$ 的计算一致，但在疲劳计算中考虑的局部集中应力不包括在该应力范围中。

5.2.4 在以下情况时，一次应力和二次应力之和 $S_n$ 可能出现大于 $3S_m$ 限值的情况（这类情况通常只在热弯曲应力占总应力很大比例时才会发生）：

- a) 正常运输条件下的应力范围产生的应力强度 $S_n$ ，不包括由应力集中和热弯曲引起的应力，应不大于 $3S_m$ ；
- b) 用于设计疲劳曲线的 $S_a$ 值，是乘以系数 $K_e$ 确定的。

通常：

$$K_e = 1.0, S_n \leq 3S_m$$

$$K_e = 1.0 + \frac{(1-n)}{n(m-1)} \left( \frac{S_n}{3S_m} - 1 \right), \quad 3S_m < S_n < 3mS_m$$

$$K_e = \frac{1}{n}, \quad S_n \geq 3mS_m$$

关于 $S_n$ 的描述详见术语，各种材料材料参数 $m$ 和 $n$ 值详见表3。

- c) 温度不超过表3中列举的各类材料的温度；  
d) 材料的最小屈服强度与最小极限强度之比小于0.8。

**表3 不同材料类别的材料性能参数值 $m$ 和 $n$**

	m	n	最高温度
			°C
低合金钢	2.0	0.2	371
马氏体不锈钢	2.0	0.2	371
碳素钢	3.0	0.2	371
奥氏体不锈钢	1.7	0.3	427
镍-铬-铁合金	1.7	0.3	427

5.2.5 在正常运输条件下，承受纯剪切的截面上的剪切应力强度值应不大于 $0.6S_m$ ；承受支承载荷时，支承面上的应力强度值应不大于 $1.0S_y$ 。

5.2.6 无论正常运输条件或运输事故条件下，包容边界结构都不应发生屈曲。在设计外形尺寸和载荷时，应采用适当的系数计算偏心率。可采用弹塑性屈曲分析以确保材料不会发生不稳定性变形，容器也需满足本规范中的线弹性分析要求。

5.2.7 正常运输条件下，针对螺栓，一次薄膜应力强度值应不大于 $2/3S_y$ ，一次薄膜加一次弯曲应力强度应不大于 $S_y$ 。

5.2.8 运输事故条件下，一次薄膜应力强度值应不大于 $2.4S_m$ 和 $0.7S_u$ 中的较小值；一次薄膜加一次弯曲应力强度应不大于 $3.6S_m$ 和 $S_u$ 中的较小值；承受纯剪切的截面平均一次剪应力应不大于 $0.42S_u$ 。

5.2.9 在初始状态、制造状态、正常运输条件、运输事故条件的极限总应力应小于两倍的由适当的疲劳设计曲线给出的10次循环后的 $S_a$ 的调整值（调整用于计算模型在最高温下的弹性）。应采用适当的应力集中系数用于结构不连续性计算，当该应力集中系数未知时，通常取值为4。

5.2.10 运输事故条件下，针对螺栓，一次薄膜应力强度应不大于 $S_y$ 和 $0.7S_u$ 中的较小值；一次薄膜加一次弯曲应力强度应不大于 $S_y$ 。

5.2.11 运输事故条件下，允许对包容边界部分结构采用塑性分析的方法，可按照最大累积局部应变不超过5%进行结构评价，此时应评定塑性变形对密封的影响。

### 5.3 临界安全相关部件的设计准则

5.3.1 正常运输条件下，针对吊篮，一次薄膜应力强度值应不大于设计应力强度 $S_m$ ，一次薄膜加一次弯曲应力强度应不大于 $1.5S_m$ 。

5.3.2 正常运输条件下，针对吊篮，纯剪切应力应不大于 $0.6S_m$ ；支承应力应不大于 $1.0S_y$ 。

5.3.3 运输事故条件下，一次薄膜应力强度应不大于 $1.2S_y$ 和 $1.5S_m$ 的较大值，同时不超过 $0.7S_u$ ；一次薄膜加一次弯曲应力强度应不大于 $1.8S_y$ 和 $2.25S_m$ 的较大值，同时不超过 $1.0S_u$ 。

5.3.4 运输事故条件下，承受纯剪切的截面剪切应力应不大于  $0.42S_u$ ；承受支承载荷的支承面应力应不大于  $1.0S_u$ 。

5.3.5 运输事故条件下，允许对临界安全相关部件部分结构采用塑性分析的方法，可按照平均应变不超过 5% 进行结构评价。

#### 5.4 其它安全相关部件的设计准则

5.4.1 正常运输条件下，一次薄膜应力强度值应不大于设计应力强度  $S_m$ ，一次薄膜加一次弯曲应力强度应不大于  $1.5S_m$ 。

5.4.2 正常运输条件下，一次加二次应力强度值应不大于  $2S_y$  和  $S_u$  的较小值。

5.4.3 正常运输条件下，由载荷引起的纯剪切应力应不大于  $0.6S_m$ ；由载荷引起的支承应力强度应不大于  $1.0S_y$ 。

5.4.4 正常运输条件下，针对螺栓，一次薄膜应力强度值以及一次薄膜加一次弯曲应力强度值的要求参见 5.2.7。

5.4.5 正常运输条件下，螺栓的疲劳分析应根据适当的疲劳分析方法并考虑相应的疲劳强度减弱系数对循环使用的螺栓进行疲劳分析，其累计使用系数应不超过 1。

5.4.6 运输事故条件下，一次薄膜应力强度应不大于  $2.4S_m$  和  $0.7S_u$  中的较小值；一次薄膜加一次弯曲应力之和引起应力强度应不大于  $3.6S_m$  和  $S_u$  的较小值。

5.4.7 运输事故条件下，针对螺栓，一次薄膜应力强度及一次薄膜加一次弯曲应力强度要求参见本文 5.2.10。

5.4.8 对于大于 4500kg 的容器中提升装置（如耳轴），应在承受 6 倍最大吊装载荷时不屈服（一次薄膜加一次弯曲应力之和不大于  $1.0S_y$ ），承受 10 倍最大吊装载荷时不断裂（一次薄膜加一次弯曲应力之和不大于  $1.0S_u$ ）。对于 4500kg 以下的乏燃料运输容器，可参照执行本标准或参照其他标准执行。

5.4.9 减震器及其连接螺栓等作为减震吸能的安全相关部件，在自由跌落过程中，减震器等通过减震材料的压缩来吸收冲击能量，从而降低了容器本体及吊篮所受到的冲击，减震器的设计应确保其在运输事故条件下与容器本体不分离，同时应保证事故工况下容器重心处的加速度不超过设计者规定的限值。