

# 团 体 标 准

T/CNS 24—2020

---

## 高温气冷堆核动力厂假想管道破损事故 防护设计准则

**Design criteria for protection against the effects of postulated pipe  
rupture of high temperature gas cooled reactor nuclear power plant**

2020-12-31 发布

2021-04-01 实施

---

中 国 核 学 会 发 布



## 目 次

前言 .....	III
1 范围 .....	1
2 规范性引用文件 .....	1
3 术语和定义 .....	1
4 总体要求 .....	3
5 管道破损防护的要求和措施 .....	3
6 假想管道破损的位置、类型、面积和开裂时间 .....	5
7 管道甩动效应的评定 .....	7
8 喷射冲击效应的评定 .....	14
9 隔室升压效应 .....	17
10 环境效应的评定 .....	18
11 水淹效应的评定 .....	19
12 评定假想管道破损对关键系统和部件的潜在危害的步骤 .....	19
13 先泄漏后破裂方法 .....	21
附录 A (资料性) 管道应力计算公式 .....	24



## 前 言

本文件按照 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》的规定起草。

请注意本文件的某些内容可能涉及专利。本文件的发布机构不承担识别专利的责任。

本文件由中国核学会提出。

本文件由核工业标准化研究所归口。

本文件起草单位：清华大学核能与新能源技术研究院。

本文件主要起草人：傅激扬。



# 高温气冷堆核动力厂假想管道破损事故 防护设计准则

## 1 范围

本文件给出了球床模块式高温气冷堆核动力厂对假想管道破损的潜在不利效应的防护设计要求。

本文件适用于球床模块式高温气冷堆核动力厂(以下简称“本厂”)对假想管道破损事故的防护设计,其他高温气冷堆核动力厂可以参考。

## 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文件必不可少的条款。其中,注日期的引用文件,仅该日期对应的版本适用于本文件;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。

GB/T 16702 压水堆核电厂核岛机械设备设计规范

EJ/T 1079 轻水堆隔间淹没效应防护准则

NB/T 20379 核电厂安全相关的操纵员动作时间响应设计准则

NB/T 20403 压水堆核电厂隔间压力与温度瞬态分析

## 3 术语和定义

下列术语和定义适用于本文件。

### 3.1

**假想管道破损 postulated pipe rupture**

假想的管道环向破裂、纵向破裂、贯穿裂纹或泄漏裂纹的统称。

### 3.2

**假想管道破裂 postulated pipe break**

假想的管道环向破裂或纵向破裂的统称。

### 3.3

**环向破裂 circumferential break**

管道沿着环向绕管壁一周完全裂开,即管道断裂成两段(亦称“双端断裂”)。

### 3.4

**纵向破裂 longitudinal break**

管道的管壁沿着轴线方向裂开。管道的纵向破裂会引起管道沿轴向裂开,但不发生断裂。

### 3.5

**破裂排除区 break exclusion zone**

不需要进行管道破裂假设的高能管道系统区域。

### 3.6

**穿透管壁的裂缝 through-wall crack**

管道上从内壁一直穿透到外壁的裂缝,简称穿壁裂缝,其尺寸仅与管道尺寸有关。

3.7

**泄漏裂缝 leak crack**

管道上内壁与外壁之间贯穿的裂缝,其尺寸及流率由分析及泄漏检测系统确定。

3.8

**高能管系 high energy piping system**

在正常运行工况下,最高运行压力 $>1.9$  MPa(g)、或者最高运行温度 $>95$  °C的任何系统或系统的组成部分。如果管系在这些限值以上运行的时间,相对于其执行预定功能的时间而言,仅为很短的部分( $\leq 2\%$ 系统运行时间、或者 $<1\%$ 本厂运行时间),则可将其划作为中能管系。

3.9

**中能管系 moderate energy piping system**

在正常运行工况下,最高运行压力 $\leq 1.9$  MPa(g)、且最高运行温度 $\leq 95$  °C的任何系统或系统的组成部分。所有承压高于大气压力而没有划作为高能管系的管系均应划作为中能管系。

3.10

**管段 piping run**

至少包括一个端点和一段管道,或作为另一段管道的分支管。

3.11

**端点 terminal end**

当管道连接到构筑物或部件时,在静态或动态载荷下,连接处基本上起刚性约束作用。典型的管道端点为设备接管嘴,结构固定点和分支管上的分支交叉点。

3.12

**管道甩击 pipe whip**

由于假想管道破裂而引起的偏离管道轴向的迅速运动。

3.13

**管道甩击约束件 pipe whip restraint**

用来控制管道甩击的一种装置,包括其锚固部分。

3.14

**关键系统和部件 required system and component**

在有关的假想管道破损发生的情况下,实现安全停堆所需的系统和部件(系统中的构筑物、设备、部件或整个系统)。

3.15

**隔室 compartment**

堆腔、隔间或子隔间的统称。

3.16

**管道包容体 piping enclosure**

一种把管道围住的构筑物,它设计成能包容住在包容体内或在包容体边界处管道破损的效应,防止其影响邻接的或邻近的关键系统和部件的核安全功能。

3.17

**部件包容体 component enclosure**

围住关键系统和部件的一种构筑物,它具备防止包容体外的管道破损效应影响包容体内的关键系统与部件的核安全功能。

3.18

**能动故障 active failure**

能动部件在需要运转时发生功能故障,未能完成其预定的核安全功能。



注：能动故障不包括与部件运动部分的转动或位置变化无关的故障，该故障属于非能动故障。由动力驱动的部件因其驱动系统或控制系统的原因而产生的误动作应作为能动故障，除非有专门的设计性能或运行限制来排除这种误动作。

### 3.19

#### 非能动故障 **passive failure**

不依靠触发、机械运动或动力源等外部输入执行功能的部件，在需求时不能实现其原定的核安全功能。

### 3.20

#### 反应堆冷却剂正常补给 **reactor coolant normal makeup**

在正常运行期间，由氮净化系统向反应堆压力边界补给氮气。

### 3.21

#### 冷却剂丧失事故 **loss-of-coolant accident; LOCA**

反应堆冷却剂氮气流失速率超过氮净化系统补给能力的事故。

### 3.22

#### 安全停堆 **safe shutdown**

反应堆处于足够次临界深度，并以可控速率排出堆芯余热，包容体对放射性的包容能力得到保证，从而使放射性产物的释放保持在允许范围内，以及为维持这些条件所必需的系统正在其正常范围内工作的停堆状态。

### 3.23

#### 抗震 1 类 **seismic category I**

在经受安全停堆地震或在安全停堆地震之后要求执行其必要的核安全功能以应付安全停堆地震中的任何事件（如反应堆安全停堆并维持停堆状态、排出反应堆余热、减轻核事故破坏后果等）的这类核安全有关构筑物、系统和部件类别。

## 4 总体要求

所有管道都应考虑假想管道破损，每个假想破损应分别作为单个假想始发事件考虑，根据管系中的能量划分为高、中能进行评定。

## 5 管道破损防护的要求和措施

### 5.1 防护要求

假想管道破损的防护要求是，在发生假想管道破损事故并同时失去外电源的情况下，应不影响反应堆安全停堆，应把反应堆的余热（包括反应堆的衰变热和系统的显热）排出，应使放射性物质向周围环境的释放量不超过有关规范的规定值。

因此，流体系统的假想管道破损不得引起关键系统和部件丧失其要求的功能。本厂应能经受流体系统管道破损事故的影响，而其所造成的后果是可接受的。

### 5.2 防护措施

为了实现上述防护要求，本厂应采取下列以优先序列出的一种或几种防护措施：

- a) 采用距离分隔，使高能、中能流体系统管道远离关键系统和部件；

- b) 设置管道包容体；
- c) 设置部件包容体；
- d) 在系统中设置附加设施(如隔离阀)；
- e) 把关键系统和部件设计成能经受假想管道破损有关的效应；
- f) 设置附加措施,如使系统具有一定的多重度,设置管道甩动约束件与屏障。

上述这些专门的防护措施应满足下述要求:在任何一个可能的管道破损事故发生时,为本厂安全和减轻事故后果所需的系统仍应满足单一故障准则。

在选择管道破损的防护措施时,要综合考虑本厂的其他设计要求和系统功能要求。

### 5.3 设计要求

为了满足假想管道破损事故的防护原则,本厂设计应满足下列要求:

- a) 关键系统和部件应按抗震Ⅰ类的要求来设计。
- b) 为了实施 5.2 的规定而需设置的构筑物或隔室、防护屏障及支承管道甩动约束件的结构应按抗震Ⅰ类的要求来设计。应将它们设计成能经受住假想管道破损效应,包括管道甩动、喷射流冲击、隔室压力升高、环境状况恶化、水淹等与地震载荷相组合的影响。
- c) 高能流体系统管道的约束件及其他防护措施应设计成某一管道的假想破损及其任何直接的和间接的影响不会再造成附近其他管道破损或部件损坏(如果这两个破损加上它们的二次效应所造成的综合后果是不可接受的话)。
- d) 除非相应的理论分析或实验数据证明被撞击管道能经受这类撞击而不发生破损,否则应该认为破裂管道的甩动有可能在被撞击的名义直径比它小的管道上造成环向和纵向破裂(每次只考虑一种破裂),并可能在名义直径相同的或名义直径较大但壁厚较薄的管道上造成穿透管壁的裂缝。
- e) 假想管道破损的各种效应,不应妨碍主控制室的可居留性,不应妨碍通向对安全控制反应堆运行重要的、或处理管道破损后果所需的周围区域的通道。
- f) 当多机组电厂的一个机组的管道上发生假想破损事故时,该受影响机组的安全停堆不应妨碍其他机组的安全停堆能力。
- g) 如果某一假想破裂导致了喷射物的产生,则应另外进行喷射物效应的评定。

### 5.4 系统和部件的可运行性

在评定假想管道破损的影响时,对系统和部件的可运行性应作如下假设:

- a) 如果反应堆保护系统引发事故停堆是假想管道破损的直接后果,则应假定同时失去厂外电源。
- b) 除了 5.4 c) 中说明的情况外,应假定在发生假想管道破损及其各种直接后果(如失去外电源)的同时,在用来减轻假想管道破损后果及停闭反应堆的系统中还同时发生某个单一能动部件故障。
- c) 若在某一双重功能的关键中能系统的两重或多重序列中,已假设有一列发生了假想管道破损,若系统是按抗震Ⅰ类要求来设计的,是由厂外电源和厂内电源两处供电的,且是按适合于核安全系统的质量保证、试验和在役检查标准来进行建造、运行和检查的,则在该系统的其他列中不需要假设单一能动部件故障。
- d) 在管道破损时,可以认为所有可利用的系统(包括由运行人员的动作来操作的系统)都可以用来减轻管道破损的后果。但在判断系统的可运行性时,应考虑假想管道破损及其直接后果,并

应考虑所假设的单一能动部件故障及其直接后果。应按照 NB/T 20379, 根据对所要执行的动作而言可供使用的时间的长短及设备的可达性, 来判断操纵员采取动作的可行性。

## 5.5 在役检查要求

本厂管道破损的防护措施应满足下列在役检查方面的要求:

- a) 为满足管道破损的防护要求而采取的措施不应妨碍部件进行在役检查所需的通道的畅通;
- b) 需要进行检查的区域应按照有关规范中关于二级管道焊缝的检查要求来确定。

## 6 假想管道破损的位置、类型、面积和开裂时间

### 6.1 假想管道破损的位置

#### 6.1.1 高能流体系统管道的假想破损位置

对管道名义直径大于 25 mm 的高能流体系统的每一管段, 都应假设会发生管道破损, 破损位置见表 1。

此外, 对于各安全级高能管道, 如果它位于把它与某个关键部件隔开的隔离构筑物内, 则应假设该高能管道会在对该隔离构筑物产生最不利影响的位置上发生破裂, 而且该隔离构筑物应设计得能经受这一管道破裂的后果。

若按破前漏分析证实其合理性, 可以用泄漏裂缝代替破裂或穿透管壁的裂缝。

表 1 高能流体系统管道的假想破损位置

管道	假想破裂位置	假想裂缝位置
安全 1 级管道	<ol style="list-style-type: none"> <li>a) 管段的端点;</li> <li>b) 中间点:               <ol style="list-style-type: none"> <li>1) 可能有高应力或高疲劳的中间位置, 如管件、阀门、法兰及焊接附件处;</li> <li>2) <math>U &gt; 0.1</math> 或 <math>S &gt; 2.4 S_m</math> 的中间位置<sup>a</sup></li> </ol> </li> </ol>	a) 管段上应力范围 <sup>a</sup> 超过 $1.2 S_m$ 的位置
安全 2、3 级管道或非安全级抗震动力管道	<ol style="list-style-type: none"> <li>a) 管段承压部分的端点;</li> <li>b) 中间点:               <ol style="list-style-type: none"> <li>1) 可能有高应力或高疲劳的中间位置, 如管件、阀门、法兰及焊接附件处;</li> <li>2) <math>S &gt; 0.8(X+Y)</math> 的中间位置<sup>b</sup></li> </ol> </li> </ol>	a) 管段上应力 <sup>b</sup> 超过 $0.4(X+Y)$ 位置
非安全级管道	<ol style="list-style-type: none"> <li>a) 管网承压部分的端点; 以及</li> <li>b) 可能有高应力或高疲劳的中间位置, 如管件、阀门、法兰及焊接附件处</li> </ol>	a) 管段上应力 <sup>b</sup> 超过 $0.4(X+Y)$ 的位置; 若未作应力分析, 则取在环境后果最严重处
<sup>a</sup> S 值参照附录 A.1 计算。 <sup>b</sup> S、X、Y 值按附录 A.2 或 A.3 计算。		

### 6.1.2 中能流体系统管道的假想裂缝位置

中能流体系统管道的假想破损按下列准则考虑：

- a) 对于中能流体系统管道可以不假设发生破裂。但对于名义直径超过 25 mm 而位于关键系统和部件附近的中能流体系统管道,应假设会发生穿透管壁的裂缝。裂缝位置假设在由于流体从裂缝处排出所造成的水喷雾和水淹等影响为最严重的位置,但以下 b)、c) 两项所规定的除外。
- b) 对安全 1 级中能管道,若  $S < 1.2 S_m$ , 对安全 2 级、3 级中能管道,若  $S < 0.4(X+Y)$ , 则这些管道可以不假设发生穿壁裂缝。
- c) 对于与高能流体系统相邻的中能流体系统,若高能系统管道已假设了破裂,而中能系统管道即使发生穿壁裂缝也不会比高能管道的破裂造成更严重的环境状况,则可假设该中能管道不发生穿壁裂缝。否则,还是应假设在该中能管道上发生穿壁裂缝。
- d) 在不按抗震标准设计的中能系统管道上应假设裂缝。
- e) 在对于高能流体系统所相应的压力、温度条件下运行的时间  $\leq$  该系统作为中能流体系统运行的时间的 2% 或  $\leq 1\%$  电站运行时间,因而划作为中能系统的管道,可假设仅发生假想裂缝而不发生破裂。

对于按 6.1 的上述准则确定每一假想管道破裂,都应就破裂引起的管道甩动、喷射流冲击、隔室升压、环境状况、水淹和飞射物等效应对关键系统和部件的影响作出评定,并应论证满足第 5 章中的防护要求。对于按上述准则确定的每一假想裂缝,则应就环境状况(水喷雾)和水淹效应对关键系统和部件的影响作出评定,并应论证满足第 5 章中的防护要求。

## 6.2 假想管道破损的类型

### 6.2.1 高能流体系统管道的假想破损类型

在高压流体系统管道上按上述 6.1.1 的准则所确定的每个假想破裂位置处,都要假设环向和纵向两种破裂类型,但这两种破裂并非同时发生,但是,以下的情况除外：

- a) 名义直径小于或等于 25 mm 的高能管道不需要假设破裂；
- b) 名义直径大于 25 mm 而小于 100 mm 的高能管道不需要假设纵向破裂而只需假设环向破裂；
- c) 管段端点不需要假设纵向破裂而只需假设环向破裂；
- d) 如果进行了详细的应力分析得出了某个位置的应力状态,则可根据该应力分析结果来假设破裂类型:若某处轴向的一次加二次应力大于等于该处相应环向应力的一倍半,则该处只需要假设环向破裂;反之,若某处环向的一次加二次应力大于等于该处相应轴向应力的一倍半,则该处只需要假设纵向破裂；
- e) 如果所选定的假想破裂位置是在某一个管件(三通、弯头等)上,则在该管件上的具体破裂位置及类型应如下确定:如果没有进行详细的应力分析或试验,则应假定在管道与管件的每个焊缝处发生环向破裂,而在管件的每一侧沿中心都发生纵向破裂;如果进行了详细的应力分析或试验,则可根据分析或试验的结果来确定最可能的破裂位置和类型。

对于高能流体系统管道除了应按上述准则假设破裂(纵向破裂和/或环向破裂)之外,还应在按 6.1.1 所确定的裂缝位置上假设发生裂缝(除非能证明裂缝的影响比管道破裂的影响要小)。

### 6.2.2 中能流体系统管道的假想破损类型

如 6.1.2 所规定的,对中能流体系统管道只需要假设裂缝。

### 6.2.3 破裂排除区

按 GB/T 16702(或其他相当的标准或规范)设计且满足下列附加要求的管道,在其一回路舱室墙体与外侧隔离阀之间属于破裂排除区,不必假设破损:

- a) 在该部分管道上的  $S$  值或  $U$  值不应超过要假定中间破损位置的限值;
- b) 在两个隔离阀范围外的高能管道发生假想管道破裂以后,从一回路舱室墙体到隔离阀之间(包括隔离阀)的管道上的应力应保持在 C 级使用限制以内;
- c) 应满足 5.3 和 5.5 所规定的设计要求和在役检查要求;
- d) 应恰当地鉴定一回路舱室隔离阀的合格性,以确保当其受到该阀门范围外的假想管道破裂所引起的可能传到阀门上的任何载荷组合时仍保持其可操作性和密封性。

如一回路压力泄放系统、二回路的主蒸汽或主给水系统从蒸汽发生器舱室墙体到外侧的隔离阀之间的区域。

## 6.3 假想管道破损的面积

### 6.3.1 环向破裂的面积

环向破裂的破口面积假定为破口所在处管道的有效流通面积。破口排放系数应根据试验的结果来确定。否则通过 0.1~1.0 之间的破口排放系数谱分析来确定最保守的工况。

### 6.3.2 纵向破裂的面积

纵向破裂的破口形状假定为一圆形或长轴为两倍管道直径、短轴为管道直径二分之一的椭圆形。破口面积为破口所在处管道的有效流通面积。破口排放系数按 6.3.1 中的规定处理。

### 6.3.3 穿壁裂缝的面积

穿壁裂缝的开口为一个长度等于管道直径二分之一、宽度等于管壁厚度二分之一的矩形。裂缝的排放系数按 6.3.1 中的规定处理。

## 6.4 假想管道破损的开裂时间

为了便于分析,对于假想管道破损,假定从破损开始发生到扩展至 6.3 所规定的全破损面积所需的时间为 1 ms,环向破裂时,上下游流体都达到按此破损面积排放的时间为 10 ms。若采用其他值,则应由理论分析或试验加以证实。

## 7 管道甩动效应的评定

### 7.1 总的要求

高能管道破裂时,流体的排放将对管道产生很大的反作用力,使管道系统发生运动,严重时发生管道甩动。因此,对每个假想破口都应进行管道运动的分析,并对其所产生的影响作出评定。评定的结果应表明:关键系统和部件的功能不受损害。对可能发生管道甩动的情况,应确定破裂管道对约束件或其他部件、构筑物的撞击载荷及被撞击物体的响应。

对某些管道系统或管段,如能证明即使发生破裂也不会引起管道甩动(如由于管道内所储存的能量不足,或者管道被某些结构部件约束住而不可能发生大的运动),则对这些管道系统或管段可不进行管道甩动效应的评定。

在计算管道和约束件系统对管道破裂的流体力的响应时,应考虑下列效应:

- a) 系统的质量、惯性和刚度特性；
- b) 撞击和回弹；
- c) 管道和约束件的弹性与非弹性变形；
- d) 支撑的边界条件。

管道甩动效应的评定中,首先应确定管道破裂时的流体力,然后确定管道的运动和管道甩动约束件及有关部件上的载荷。在进行上述评定时应考虑材料性能的影响。

## 7.2 管道破裂时的流体力

### 7.2.1 概述

破裂管道上的流体力与下列因素有关:破裂前管内流体的状态参数、破口流通面积、管道的流动摩擦损失、管系的几何特征以及其他因素。

### 7.2.2 流体力的计算

作用在破裂管道上的流体力的通式见公式(1):

$$\vec{T} = - \left[ \int_{C.V.} \frac{d}{dt} (\rho \vec{U}) dV + \int_{C.S.} \rho \vec{U} (\vec{U} \cdot d\vec{A}) + \int_{A_{in}} P d\vec{A}_{in} + \int_{A_{out}} P d\vec{A}_{out} - \int_{A_p} P_a d\vec{A}_p \right] \dots\dots\dots (1)$$

式中:

- $\vec{T}$  ——作用在管道上的流体力,单位为牛(N);
- C.V. ——控制容积;
- C.S. ——控制表面;
- V ——体积,单位为立方米(m<sup>3</sup>);
- $\vec{A}$  ——表面积,单位为平方米(m<sup>2</sup>);
- $\rho$  ——密度,单位为千克每立方米(kg/m<sup>3</sup>);
- $\vec{U}$  ——速度,单位为米每秒(m/s);
- P ——单元面积中心处的压力,单位为帕(Pa);
- $\vec{A}_{in}$  ——流入到控制容积的流通面积,单位为平方米(m<sup>2</sup>);
- $\vec{A}_{out}$  ——从控制容积流出的流通面积,单位为平方米(m<sup>2</sup>);
- $\vec{A}_p$  ——管道外表面积,单位为平方米(m<sup>2</sup>);
- $P_a$  ——管道周围的环境压力,单位为帕(Pa)。

对于在紧接 90°弯头的下游处的等截面管道上的环向破裂,或者对于纵向破裂或分支管段在分支接口处的环向破裂,公式(1)可简化为公式(2):

$$T_x = - \int_{C.V.} \frac{d}{dt} (\rho U_x) dV - \rho U_e^2 A_e - P_e A_e + P_a A_e \dots\dots\dots (2)$$

式中:

- $T_x$  ——沿 X 方向作用在管道上的动态流体推力,单位为牛(N);
- $U_x$  ——抗制容积流体沿 X 方向的速度,单位为米每秒(m/s);
- $U_e$  ——在破口平面面积处的流体速度,单位为米每秒(m/s);
- $P_e$  ——在破口平面面积处的流体压力,单位为帕(Pa);
- $P_a$  ——管道周围的环境压力,单位为帕(Pa);
- $A_e$  ——在破口平面处控制容积的面积(或者破口平面面积),单位为平方米(m<sup>2</sup>)。

当流体从恒压源向外喷放时,开放管段上的流体实际推力随时间的变化如图 1 及图 2 所示。  
 在设计中也可以用下面一种保守的简化方法计算作用于破口处的喷射推力。将喷射推力表示成图 1 及图 2 虚线所示的阶跃函数。该阶跃函数的上升时间取 1 ms。喷射推力的大小见公式(3):

$$T = KPA \quad \dots\dots\dots (3)$$

式中:

$P$  ——管道破裂前的系统压力;

$A$  ——管道破口面积;

$K$  ——推力系数。

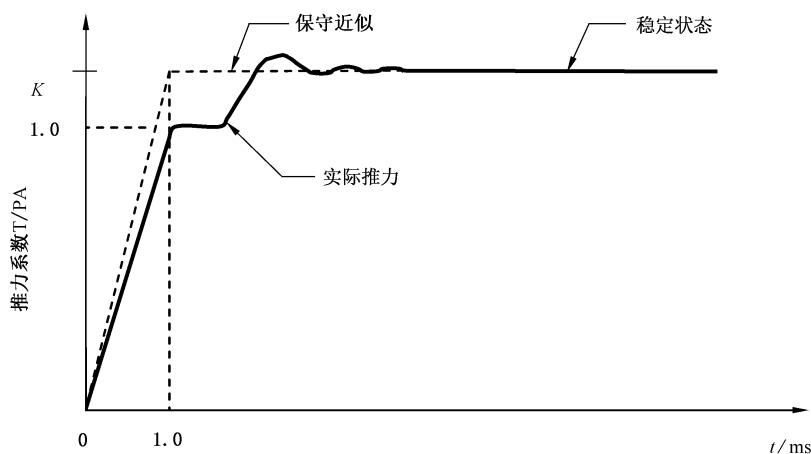


图 1 推力瞬态(极小摩擦力流动)

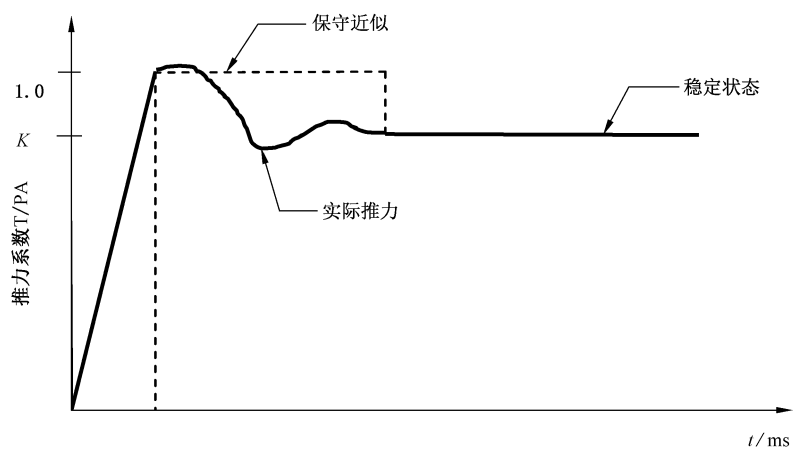


图 2 推力瞬态(考虑摩擦力流动)

推力系统  $K$  取决于管内流体的种类与状态参数、管道摩擦损失、上游处限流装置的情况等。在不考虑摩擦损失及限流装置的影响时,氮气和过热蒸汽可视为理想气体, $K$  值取 1.26;对饱和蒸汽-水混合物, $K$  值不应小于 1.26;对过冷水, $K$  值不超过 2.0。

### 7.2.3 流体的初始状态参数

在计算管道破裂的喷射推力时,应按下列假设来确定管道及其相连容器中流体的初始状态参数。

- a) 对于在功率运行期间承受额定压力的管系(或其中的一部分),管道和相连容器中流体的状态参数可取满功率(100%功率)运行时的参数。

- b) 对于启动、热备用或冷停堆期间受额定压力的管系(或其中的一部分),应按焓值最高的状态来确定管内流体的状态参数。

但是,虽然有的系统在其他工况时的压力和焓可能比满功率运行时更高(如主蒸汽管系),但从总的防护要求来看,在满功率运行时发生管道破裂对安全系统的要求最高且反应堆处在满功率运行的时间比其他工况长,对这样的系统管内流体的状态参数也取满功率运行时的参数。

对于流体的焓值随时间变化的系统,则应取焓值最高时的状态参数。

#### 7.2.4 破口流通面积的特性

破口流通面积一般按 6.3 的规定执行。对于环向破裂,如果由于管道受到的约束而使其破口流通面积受到限制,则应按受到限制后的流通面积进行分析。

#### 7.2.5 流动摩擦损失

在计算流体力时,应考虑破口与其上游压力容器之间的限流部件和管路的流动阻力损失。需要考虑的限流部件有:孔板、管嘴、阀门、截面收缩口、喷雾头等。这种流动摩擦损失将减少排放流的流率及能量,从而减小作用在管系上的流体力。但为了简化计算,并使计算偏于安全,也允许不计流动摩擦损失。

#### 7.2.6 临界流模型

采用临界流模型来确定通过管道上的破口,该计算模型会直接影响计算出来的反作用力。对于喷放平面处于滞止状况下的闪蒸流体或含汽率大于零的汽水混合物,可采用穆迪(Moody)的临界流模型或均匀平衡模型。对于过冷流体,可采用 Henry-Fauske 模型。如果能通过试验数据或分析加以证明,也可以采用其他临界流模型。

### 7.3 材料性能

#### 7.3.1 动态与静态力学性能比较

在管道及防管道甩击约束件的设计中,通过塑性变形来吸收能量是可取的,而且通常是最理想的方法。在采用这种设计方法时,应仔细考虑材料在该使用温度下整个应力-应变曲线范围内的性能。而且,由于管道破损是一种动态过程,还应仔细考虑撞击载荷和应变率对材料性能的影响。

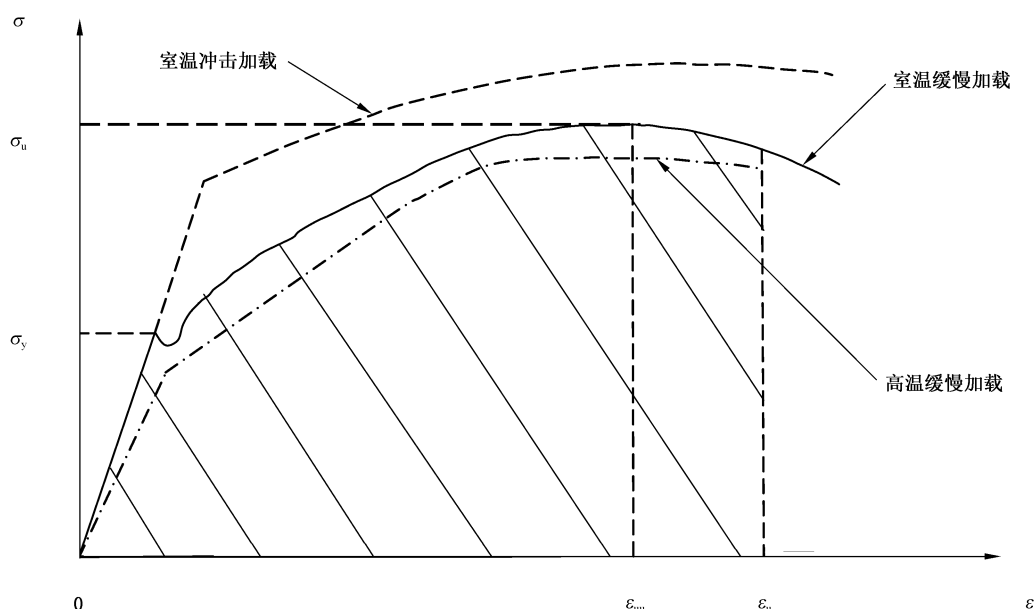
在核电厂管道、管道甩击约束件和结构设计中所用的材料应为具有良好冲击性能的延性金属。对这些类型的金属在缓慢加载(静力)情况下及冲击载荷情况下的性能已进行了广泛的测定。

已有的试验表明,在一般管道破损过程中所发生的动态加载速率下,材料将表现出延性行为而不是脆性断裂。直接采用这些试验的结果一般可能不合适,因为这些测定主要覆盖的是最终载荷为零的冲击试验,而管道破损过程通常留存有相当高的稳态载荷。这些典型的延性金属在静载荷和动载荷两种情况下材料性能的总的变化趋势如图 3 所示。

在按 7.3.2 的规则确定材料设计限制时,应考虑在动载荷下应变硬化(见图 3)性能变化对设计的影响。因为,虽然材料的机械强度性能比缓慢加载(静载)情况下要高,但这种潜在的性能变化会减弱吸收能量的能力,并增加管道甩击约束件上和结构上总的载荷。图 3 还表明,通常延性金属在温度增高时强度降低,这种倾向一般而言是正确的,但并非总是如此。因此,应小心确保在设计中所用的材料性能与管道破损发生时材料的实际温度相对应。

在有些规范或标准中给出了材料性能,可供使用。





标引序号说明：

$\sigma_y$  —— 屈服强度；

$\sigma_u$  —— 极限强度；

$\epsilon_{uu}$  —— 极限均匀应变；

$\epsilon_u$  —— 极限断裂应变；

$E_u$  —— 极限能量吸收量，图中阴影面积。

图 3 典型延性金属的应力-应变特性

### 7.3.2 材料的设计限值

在对管道和管道甩击约束件采用塑性变形设计时，对于金属延性材料应采用在相应温度下的下列设计上限。

a) 对于动态过程，取下列两者之一：

- 1) 根据对管道和管道甩击约束件所用的实际材料进行的试验，取最小极限均匀应变（即工程应力-应变曲线上的最大应力所对应的应变，如图 3 中的  $\epsilon_{uu}$  的 50%）；
- 2) 若能证实，在适用的规范、规格书或标准中所规定的最小百分延伸量的 50% 小于根据有代表性的试验结果所得的最小极限均匀应变的 50%，则可取规定的最小百分延伸量的 50%。

b) 对于稳态平衡情况，取下列两者之一：

- 1) 根据对管道和管道甩击约束件所用的实际材料在预计温度下进行的试验，取极限强度（如图 3 中所示的应力  $\sigma_u$  的 80%）；
- 2) 取在适用的规范、规格书或标准中规定的材料在预计温度下的（或按温度进行修正后的）最小极限强度的 80%。

对于上述 b)1) 和 b)2) 中的任何一条，设计许用应力对应的应变不应大于动态过程中的许用应变。在有些规范或标准中给出了材料性能，可供使用。

对于稳态情况，给定温度下的强度值为所推荐的最小值。在确定管道甩击约束件之间的允许间距及计算各个约束件支撑载荷时，对管道采用这一最小值一般将会使整个设计最为保守。在确定作用在锚固点、部件或接管上的最大载荷时，采用这些最小值而给出的载荷通常比实际可能出现的值低，因此

一般来说是不恰当的。对于对载荷敏感,且材料特性并未表现出类似的在高应变率下强度增加的锚固件、部件等可能要特别加以注意。

### 7.3.3 材料的设计推荐值

为确保充分的管道甩击防护设计,一种可取的方法是遵守下列准则之一及 7.3.2 中的准则:

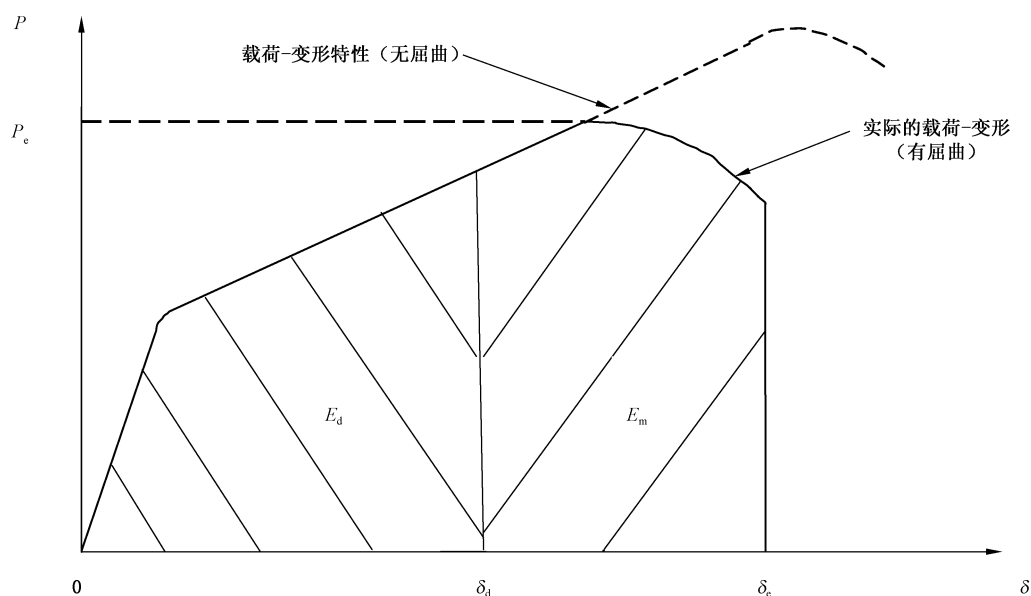
- a) 对动态和稳态过程,对受影响的部件和支撑结构采用规范或规格书中的最小屈服强度和极限强度值;
- b) 对动态过程,对受影响的部件和结构采用规范或规格书中的屈服强度和极限强度值的 110%。对稳态过程,采用 7.3.3a) 规定的值;
- c) 对所有受影响的部件和结构,采用有代表性的或实际试验数据中的屈服强度和极限强度值;
- d) 对动态和稳态过程两种情况,对任何受影响的管道和管道甩击约束件部件,采用有代表性的试验数据中的屈服强度和极限强度值,而对支撑结构则采用规范或规格书中的最小值。

### 7.4 管道甩动约束件的设计要求

管道甩动约束件的主要作用是:在管道发生破裂时控制管道的运动,以防破裂的管道撞击到周围的关键系统和部件。在本文件中,管道甩击约束件是不同于管道支撑的。在某些情况下,管道甩击约束件可以作为管道支撑起作用。对于这类情况,除了本文件的规则以外,还应采用适用于支撑的设计规则。

管道甩动约束件的设计和布置应满足下列要求。

- a) 不起管道或部件支撑作用的管道甩击约束件按一次使用来设计,因而可以允许其发生比管道支撑设计所允许的更大的畸变和塑性变形。若用系统的弹性动态分析来确定管道约束件的载荷,则应注意:永久变形的量要保持在为维持该分析的有效性所必需的限值以内。对于系统的塑性动态分析,这时应变率与应变硬化应限制在 7.3 所规定的限值以内。对于在因材料拉伸或剪切损坏而断裂之前可能发生屈曲现象的那些结构类型的管道甩击约束件,应给予恰当的考虑,以保证其有足够的吸收能量的裕度。
- b) 图 4 表示在材料发生极限应变之前先发生屈曲的某种有代表性的结构约束件的载荷-变形关系的一般特性。对于这种设计方法,7.3 中的材料设计限值并不完全合适。因此,在动态过程中,吸收的能量应不超过在屈曲坍塌之间约束件吸收能量的总能力的 50%。对于稳态情况,应采用屈曲坍塌发生时的载荷的至多 80% 作为设计限值。
- c) 如果采用某种可压扁的吸收能量的材料或部件,则应假定可用的吸收能量能力不大于额定可用吸收能量能力的 80%。额定可用吸收能量能力应通过试验或分析来确认,以保证材料变形是可控的。吸收能量的构件设计应使其在比非吸收能量的弹性承载构件包括锚固件更低的载荷下就发生屈服或永久变形。
- d) 对于按相当大的应变率来设计的管道甩击约束件,所选用的材料应具有很明确的延性动态机械性能(见 7.3.1)。材料检查、制造工艺及设计应保证:在一旦发生管道破损时会表现预期的材料性能。然而,如果约束件的实际材料比假设的更强,则在相同的载荷作用下材料的变形更小,这可能会引起作用在支撑结构上的反作用载荷比预计的更高,对此应加以考虑。还应考虑脆性断裂控制。
- e) 约束件不应影响管道系统在正常和异常工况载荷下的响应,不对管道系统的应力造成有害的影响。
- f) 约束件不应影响任何管道焊缝的在役检查。
- g) 如果次级破裂造成的后果对于初次假想破裂来说是不可接受的,则管道约束件的设计应保证该管道上的某一假想破裂不会再造成附近其他管道或部件破裂。



标引序号说明：

$P_e$  —— 在开始发生屈曲坍塌时的载荷；

$\delta_c$  —— 坍塌变形；

$\delta_d$  —— 在  $E_d$  时的设计最大变形；

$E_d$  —— 最大设计能量吸收量 ( $\leq 0.5E_c$ )；

$E_m$  —— 设计能量吸收裕度 ( $\geq E_d$ )；

$E_c$  —— 屈曲前总的能量吸收量  $E_c = E_d + E_m$ ，图中阴影面积。

图 4 某种结构类型管道甩击约束件的典型载荷-变形特性

## 7.5 管道——约束件系统的分析方法

在管道甩动效应的评定中，不但要考虑动态过程，还要论证动态过程后系统能承受稳态流动状态下的流体力。可采用下列几种分析模型。

- 整个系统的动态时程分析。针对管道-约束件系统建立足够详细的数学模型，以反映系统的动态特性。可以采用堆聚质量法或连续质量法。在分析中应考虑系统的惯性和刚度特性的影响。管道和约束件之间的间隙，在计算中应取最大的可能初始间隙，以便计算出最不利的管道甩动动力效应。
- 简化的动态时程分析。在管道甩动效应的评定中也可以用对管系的某些部分进行动态时程分析来代替对整个系统的分析，分析中应考虑管系其余部分的刚度和惯性的影响。
- 准动态时程分析。对于某些系统也可以用准动态时程分析法来确定约束件的位置和进行约束件的设计。该方法考虑了动态耦合、系统的力迫函数、管道与约束件之间的间隙、支撑柔度、管径和壁厚的影响。这种方法从性质来说是参数形式的。
- 能量平衡分析。如果系统的载荷-变位关系已知，则可以对第一个四分之一周期进行能量平衡分析。在第一个四分之一周期内破裂管道的运动所产生的、通过撞击传给管道和约束件系统的动能等于系统所吸收的应变能。在计算中约束件的间隙应该取最大的可能初始间隙，以便计算出最不利的管道甩动动力效应。管道和约束件的变形应该与被吸收的能量值相一致。管道变形所吸收的能量可以从传给系统的总能量推出来。对于一旦撞击在约束件上可能发生管道回弹的情况，应该取放大系数 1.1 来确定函数的大小，以便计算在响应的第一个四分之一

周期之后约束件的最大反作用力。

- e) 静态分析。喷射推力用一个比较保守、经放大的静载荷来表示,并用静态方法来分析已破裂的系统。

## 8 喷射冲击效应的评定

### 8.1 总的要求

高能管道破裂时,流体的喷射流将对它周围的关键系统和部件产生直接或间接影响,使它们受到损害。因此,对每个假想破口都应进行喷射流的冲击效应的评定。评定的结果应表明:喷射冲击不会损害或妨碍关键系统和部件的功能。否则,就应设置防喷射冲击的屏障或采取其他措施以使关键系统和部件免受这种有害的影响。

### 8.2 喷射流的形状和方向

#### 8.2.1 完全分离的环向破裂

如果管道发生环向破裂,两个断开端面没有受到实体约束,则应假定这两个端面会发生很大的相对移动而分开,使得从这两端破口排放出来的喷射流互不干涉,这时喷射流的形状如图 5 所示,其中假设:

- a) 喷射流分成三个区,1 区从破口到射流核心区的末端。在此区域的靶物,也在喷射流的锥形核心区内,将受到破口上游喷射流滞止压力的作用。2 区从核心区末端延伸到渐进平面。从破口平面到渐进平面,假设喷出的流体自由膨胀至渐进平面压力。在 3 区中,假设开始与周围环境相互作用,并且喷射流应假设以半边  $10^\circ$  的角度膨胀。
- b) 对于温度低于隔室压力所相应的饱和温度的喷射流或者破口处的压力等于隔室压力的喷射流,则认为不发生 2 区中的自由膨胀。对于这种情况,假定可压缩的喷射流从破口平面处开始以  $10^\circ$  的半角均匀地扩张。
- c) 对于不可压缩的喷射流,假定它在进行中直径不变。
- d) 喷射流在行进中沿直线前进。

#### 8.2.2 部分分离的环向破裂

如果发生环向破裂的两端面受到实体约束不能显著分离,破裂后管道破口两端面的轴向相对运动小于等于管道直径,横向相对运动小于壁厚度,则应假设喷射流的中心线垂直于管道中心线,并环绕着管道的周向  $360^\circ$  向外扩展。对这种情况,喷射流的形状如图 6 所示,这时,喷射流假设分成三个区域,且 8.2.1a) 中的假设 2)、3) 仍成立。

#### 8.2.3 纵向破裂

对于从纵向破口排放出来的喷射流,假定破口为流通面积等于破裂处有效流通面积的一个圆孔。喷射流的形状与环向破裂相似,见图 7。喷射流在三个区中的形状可以用 8.2.1a) 中关于环向破裂的方法来确定。

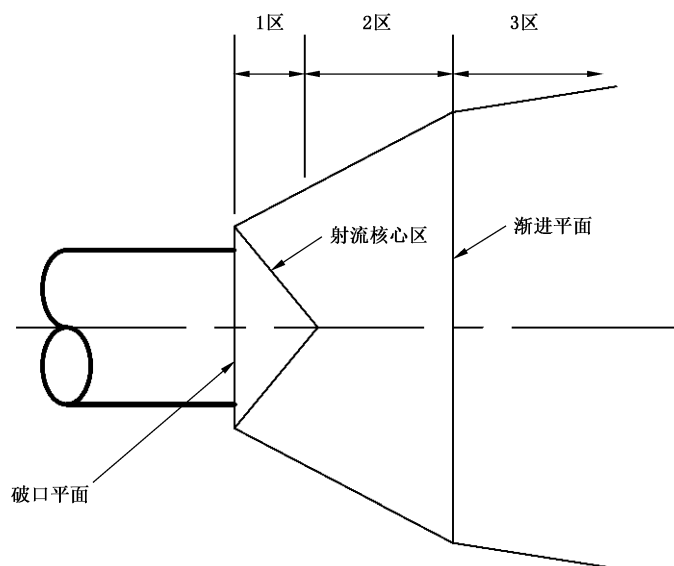


图 5 完全分离的环向破口喷射流几何形状

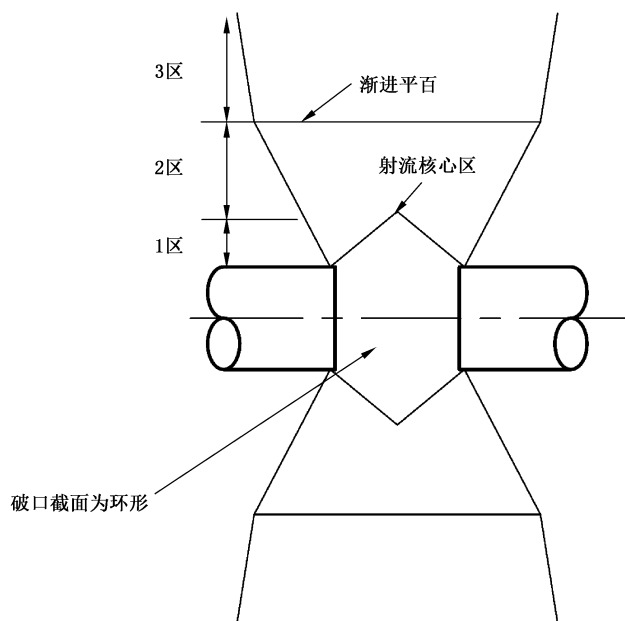


图 6 部分分离的环向破口喷射流几何形状

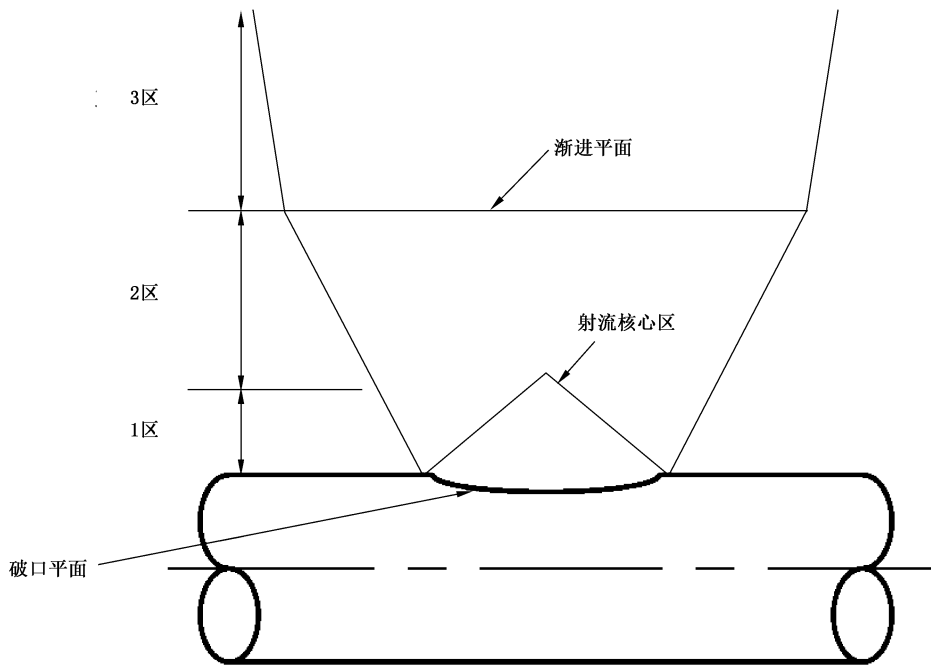


图7 纵向破口喷射流几何形状

### 8.3 靶物的确认

对于每个假想管道破裂位置,需确认在该处发生破裂时可能受到喷射流冲击的构筑物、系统和部件。在评定中要考虑管道运动而引起的喷射流中心线的移动以及重力的影响而引起的喷射流在行进中偏转。

### 8.4 喷射冲击载荷

喷射冲击载荷是指喷射流冲击在靶物上的作用力。该载荷由喷射流与靶物的相互作用面处的喷射流的速度、压力、温度、含汽量等性质和喷射流的截面积、靶物的形状尺寸及其相对于喷射流取向等来确定。

喷射冲击载荷可按下述方法确定:即假定,作用在喷射流任一截面上的总冲击载荷不随时间及距离变化,其值等于作用在破口处的喷射推力而方向相反;冲击载荷在喷射流的截面上是均匀分布的,只需要考虑被靶物截住的那部分喷射流即可;靶物形状及取向的影响可以用一个形状因子来反映。

在确定喷射流载荷时,要考虑加载速率的影响,对于实质上是单自由度系统的靶物,取动载因子为2.0。

### 8.5 喷射流冲击的温度与湿度

当需要考虑喷射流冲击而使靶物温度上升这一影响时,考虑向靶物传热时,假设靶物的温度等于流体静态温度,否则,取喷射流的温度。

由于喷射流冲击的影响,在靶物上会帖上一层流体薄膜。若需要考虑喷射流冲击所造成的湿度影响,则应假设在靶物上复盖着一层具有喷射流温度和压力的液膜。

## 9 隔室升压效应

### 9.1 总的要求

隔室升压效应是指由蒸汽管道或闪发水管道的假想破裂排放出来的蒸汽或者氮气管道的假想破裂排放出来的氮气所引起的该管道所在隔室中及其相连通的邻近隔室中的压力升高。对每个假想破口,都应对它所引起的隔室升压效应作出评定。

- a) 由于隔室中压力升高的结果,隔室的墙壁、天花板、楼板及其他构件的两侧就会受到压差的作用。该压差力的大小取决于破口的质量释放率、能量释放率以及隔室的容积,通流面积、流动特性等因素。因此,首先应对每个假想破裂进行排放分析,以确定质量释放率与能量释放率。然后联列求解各容积中的质量守恒方程、能量守恒方程和状态方程,计算出各容积在不同时刻的压力。
- b) 隔室升压效应与假想管道破损的其他效应有密切联系。如隔室的结构部件除了受升压效应的压差力作用外,还可能受喷射冲击载荷的作用。因此,隔室升压效应应与其他效应一起加以评定。
- c) 在设计中可采取在假想破口附近的屏障(墙、楼板等)上开孔等措施来降低压差力。
- d) 对温度低于 100 °C 的水管道,不论管内压力如何都不需要考虑它的破裂引起的隔室升压效应。

### 9.2 流体的初始状态参数

在评定隔室升压效应时,应假设管道破损刚发生时本厂处于对所考察的构筑物或部件会产生最严重的隔室升压效应的那种正常运行工况。

### 9.3 排放率

破口排放出来的质量释放率和能量释放率与管内流体的参数及管道的尺寸、布置、破口位置等有关。因此,为了得出会在隔室中引起最严重升压效应的最大排放率,需要对隔室内一系列破裂位置和情况进行排放分析。

### 9.4 通流面积

在评定隔室升压效应时,可以考虑隔室各界面上的通流面积的影响,包括通流的时间延迟的影响。这些通流口的存在会减轻隔室中的管道破裂时所造成的该隔室的升压效应。但是,在对位于某一区域的关键系统和部件进行评定时,应考虑相连通的邻近区域内的管道破裂所排放的质量和能量进入到该区域而造成的升压效应。

### 9.5 分析模型

在计算隔室升压效应时应采用下列假设:

- a) 在每个隔室中,环境空气与破口处排放出来的蒸汽或气体瞬时就达到均匀混合并处于热平衡状态。
- b) 对蒸汽可采用均匀两相流模型,或者分离两相流模型。对氮气,可按理想气体处理。对于所有管道破损,其破口的排放系数均取 1.0。在评定破损位置所在隔室的升压效应时,该隔室的通流口的流动系数取 0.6。若采用其他值则应予以论证,在评定与破裂位置所在隔室相邻的隔室的升压效应时,这两隔室间的通流口的流动系数应取 1.0。

- c) 排放流的势能和动能可忽略不计,而流动功则作为内能回收储存。
- d) 忽略热阱的存在。
- e) 在评定中假设初态为隔室中和管道中的流体的实际状态;终态为带液相(如果有的话)的饱和蒸汽或过热蒸汽。该液相处于饱和态或过冷态。
- f) 可以把建筑物的容积分成一个个小容积来进行分析。这种小容积可以是整个隔室容积,也可以是为要简化计算而假定的任意控制容积。
- g) 在评定中应考虑可能存在的各种不确定性,包括通流面积、隔室容积等方面的不确定性。

## 10 环境效应的评定

### 10.1 总的要求

当高能管道上发生环向或纵向破裂或者中能管道上发生穿透管壁的裂缝时,将有流体排放到管道所在区域,并在一段时间内影响这一区域的环境状态(如温度、压力、放射性及气雾等)。这些流体还可能通过各种通道(如门、窗、贯穿区及暖通管等)进入邻近区域,影响那里的环境状态。这些环境状态的变化可能会损害关键系统和部件的功能。因此,对每个假想破损位置都应就这种环境状态的变化对关键系统和部件可能造成的直接或间接影响作出评定。

如果满足下列条件,则认为该部件能经受住管道破损所造成的环境状态的影响:

- a) 部件的每个部分都能经受住环境变化对它的与功能有关的物理、化学或其他性质的影响;
- b) 部件任何部分的物理特性的改变不致于损害其整体安全功能。

在环境效应的评定中,也应先作排放分析,确定质量释放率和能量释放率,并计算出周围区域的温度、压力、放射性等环境参数的变化。对关键性部件,应确定在管道破损发生后哪一段时间要求该部件执行那些重要功能,并应论证在整个这段时间内这些重要功能都不受到损害。

### 10.2 流体的初始状态参数

在评定环境效应时,应假设管道破损刚发生时,本厂处于对所考察的构筑物或部件会产生最严重的环境效应的那种正常运行工况。

### 10.3 排放率

在确定从破损管道排放到当地区域的质量释放率和能量释放率时,应按照 9.3 中的要求考虑。

### 10.4 通流面积

在评定环境效应时,对区域间通流面积的影响应按照 9.4 中的要求考虑。

### 10.5 分析模型

对评定环境效应时所采用的假设和方法,应证明其所得出的温度、压力、放射性等环境参数在数值上和时间区段上都是合理而且偏保守的。关于破口的排放系数和通流口的流动系数应采用 9.5b) 中的规定。

如果作了充分证明,则可以考虑区域中的墙壁、天花板、楼板与设备的吸热和散热对管道破损时的环境效应的影响。



## 11 水淹效应的评定

### 11.1 总的要求

当管道破损时管内的水流到地面上及相连通的邻近区域内,从而使该区域及邻近区域水淹。因此,对于每个假想管道破损都应确定其所造成的水淹水位,并评定对关键系统和部件的直接和间接影响。

- a) 为了保护关键性部件使其免受水淹效应的危害可采用的措施:
  - 1) 把部件设置在不会水淹的地方;
  - 2) 把部件设置在防水的水密室内;
  - 3) 用足够高的水密屏障把部件围起来;
  - 4) 使部件所在区域具有足够的储水空间或排流能力;
  - 5) 设置适当的检测和隔离装置,以使水的泄漏量减到最少或防止泄漏的发生。
- b) 在设计上还应满足的要求:
  - 1) 保护关键性部件的水密屏障的通道门在打开时应在主控制室内给出信号指示;
  - 2) 若某一管道发生假想破损所造成的水淹效应可能会损害关键性部件,则该管道破损处所在的房间应装有水位报警和泵自动停闭装置(在必要的地方),以向主控制室报警并限制水淹的水量。有关的开关和电路应具有多重度。

对于可能引起水淹的所有系统都要进行水淹效应的评定。

### 11.2 流体的初始状态参数

在评定水淹效应时,应假设管道破损刚发生时,本厂处于对所考察的构筑物、系统或部件会产生最严重的水淹效应的那种正常运行工况。

### 11.3 排放率

在确定从破损管道排放到当地区域的质量释放率和能量释放率时,应按照 9.3 中的要求考虑。

### 11.4 通流面积

在评定水淹效应时,对区域间通流面积的影响应按照 9.4 中的要求考虑。

### 11.5 分析模型

假想管道破损所造成的水淹水位取决于从破损管道排放出来的流体的排放率、流体状态、区域的几何形状尺寸、排流特性以及隔离措施等。破口的排放系数应取 1.0。排流口的排流系数应按排流口具体情况来确定,并证明其合理性。对确定排流速率、水淹水位时所采用的假设和方法,应证明其所得出的结果是合理且偏保守的。

## 12 评定假想管道破损对关键系统和部件的潜在危害的步骤

### 12.1 目的

由于本厂布置和设计的复杂性,应在设计的早期阶段就对管道破裂问题作适当的考虑。如果在设计的后期阶段才作考虑,则往往会产生很多困难和矛盾,且不易取得经济合理的防护效果。本章的目的在于根据本文件的要求给出评定假想管道破损事故的方法与步骤,使评定工作贯穿于各个设计阶段。

## 12.2 评定的步骤及目标

### 12.2.1 假想破损系统的确定

应用本文件的有关规则,将每个系统按高能系统或中能系统进行鉴别分类。

### 12.2.2 关键系统和部件的确定

对于每个假想管道破损,要确定关键系统和部件,建议制定出停堆逻辑图,应规定为了使本厂进入到安全停堆状态所必须达到的主要要求,至少应该有两条途径使堆进入到安全停堆状态。同时,应考虑单一能动部件故障与失去厂外电源。关键系统和部件的确定应考虑环境与可居留性等要求。

### 12.2.3 布置的分隔

在抗管道破损的防护中,最重要的措施是实现适当的分隔。高能管道系统必须与关键系统和部件加以实体分隔,对中能管道系统也必须充分分隔,以防由于喷雾及其他有关的影响而使关键性部件丧失功能。

在考虑恰当的分隔时,还应评定其他效应。如水淹、温度、隔室升压等。

### 12.2.4 管道系统上破损位置的确定

按第6章的规定,根据系统的能量级别和安全等级确定管道破损的位置、类型和面积,每一个管道破损都应假设为假想的单一始发事件。

### 12.2.5 关键性靶物确认

应该确定对每一假想管道破损有哪些关键系统和部件将受到影响。在设计中要尽量把关键性靶物从假想管道破损的影响区移开,或者把会发生假想破裂的管道进行重新布置,以使原关键性靶物不再成为靶物。对发生损坏后可能会把危害扩展到关键系统和部件的其他靶物也必须加以评定。

### 12.2.6 确认靶物的完整性

为了确定靶物的完整性,对于每一假想管道破损有关的各种效应必须同时加以评定,这些效应包括下列诸方面。

- a) 管道甩动(高能管系)应以第7章中的规定和要求作为最低要求来评定。
- b) 喷射流冲击(高能管系)应采用第8章中的规定和要求来评定。喷射流冲击效应有两类:
  - 1) 喷射流冲击载荷;
  - 2) 喷射流边界以内的环境效应(汽-水混合物的温度和蒸汽含量)。
- c) 隔室升压(高能管系)效应是指由于压差而引起的作用在构筑物上的瞬态载荷,应采用第9章中的规定和要求来评定。
- d) 环境效应(高能管系和中能管系)主要涉及的是假想管道破损所造成的环境状态的变化。这种状态主要是指温度、压力、放射性、湿度等。对关键性部件应按这些状态来加以评定。并确保在这样的环境下仍能发挥其功能。对于能动部件来说,要确保它的可操作性。此外,对关键性部件还必须就中能管道的穿透管壁的裂缝喷出来的流体的局部环境效应作出评定。环境效应应采用第10章中的规定和要求来评定。
- e) 水淹(高能管系和中能管系)效应应采用第11章中的规定和要求来评定。水淹效应主要涉及:
  - 1) 由于水淹位的高度而施加在构筑物上的载荷;

- 2) 保证水位不超过关键性部件运行所允许的水位。

### 12.2.7 管道破损效应的评定

在对载荷效应和环境效应作出评定后,关键性靶物的功能的有效性即可明确。若载荷和环境对部件或构筑物的影响超过这些部件或构筑物发挥其功能的设计限,则应认为该靶物失效;若靶物所受的载荷和环境影响不超过设计限,则认为该靶物有效。

对已经判断为失效的关键性靶物,应该采取外加的保护措施或者加以改进,以使它们能在假想载荷和环境影响下执行其预定的功能。

只有当假想管道破损效应的评定表明所有关键性靶物都能完成其预定功能时,才能认为抗管道破损的防护设计是合格的。

## 13 先泄漏后破裂方法

### 13.1 总的要求

可以在各个假想管道破损位置处逐个应用本节所述的先泄漏后破裂(以下简称 LBB)方法来论证假设发生泄漏裂缝而不是发生环向破裂、纵向破裂或穿壁裂缝的合理性。在这种做法中,某一特定管道在某些位置可能会有假想的大破损,而在另一些位置可能会有经论证的泄漏裂缝,然而 LBB 方法的应用应仅限于运行经验、试验或分析表明很少会或不会由于下述机理而损坏的管道,这样的机理如:晶间应力腐蚀裂缝、极端或反复载荷(如水锤或疲劳)、劈裂型损坏或间接原因。

如果按 13.3 节的要求证实了 LBB 方法的合理性,则不必考虑由假想环向破裂或纵向破裂引起的下列效应:

- a) 管道甩动,包括由假想管道破裂所产生的飞射物;
- b) 在流体系统的未破裂部分或相连系统——如分支管道、堆内构件或蒸汽发生器内部构件的内部瞬态载荷;
- c) 喷射冲击载荷;
- d) 隔室升压,如堆腔升压瞬态效应;
- e) 环境效应;
- f) 水淹效应。

如果按 13.3 的要求证实了 LBB 方法的合理性,则不必考虑由穿壁裂缝引起的环境效应和水淹效应。

然而,应按 5.3 考虑由每个假想泄漏裂缝引起的静态升压效应、环境效应和水淹效应。

当某一隔室中的环境效应或水淹效应是根据假想泄漏裂缝而不是根据假想环向破裂、纵向破裂或穿壁裂缝来评定时,应该对隔室内的其他可能泄漏源进行评定。这种泄漏源包括但不限于以下各项:阀门泄漏、法兰泄漏、泵泄漏以及波纹管泄漏,并应该考虑向周围房间的泄漏及来自周围房间的泄漏。

### 13.2 设计要求

假想泄漏裂缝的泄漏率应按 13.3.2.2 确定。

### 13.3 评定步骤

#### 13.3.1 支持性材料

13.3.1.1 为了将 LBB 方法应用于某一特定位置,在确定该管道破损位置时应考虑并核实所有管道材

料的类型和技术规格,以及在破损位置邻近区域内的包括所有基材金属、锻件、焊缝、热影响区及安全端的载荷情况。破损位置的邻近区域应从预计位置沿管道长度方向扩展至 $\pm 2.5[\text{平均半径} \times \text{壁厚}]^{1/2}$ 。应报告 LBB 分析中所采用的专用材料特性数据及这些数据的来源。应说明会改变材料特性的长期效应。

13.3.1.2 如果要用一个评定来取消一个以上的破损位置,则要核实并证明在该位置应用 LBB 方法的合理性。若在某一包含有不同直径、壁厚或材料的分支管路的管道段上采用 LBB 方法,则关于泄漏裂缝尺寸的 LBB 评定和 13.3 所要求的支持性材料应考虑不同的参数。支持性材料应该包括作用在该位置处的载荷的类型(力和力矩)与大小,它们的来源(如热、自重)以及组合方法的详细说明。在采用 LBB 方法时,应该小心确保所作的分析恰当体现了管系的实际竣工情况。在不同位置处的应力的比较可以根据名义应力场来进行,排除结构不连续性的影响。名义应力  $\sigma_m$  可按公式(4)计算:

$$\sigma_m = F_x/A + (M_y^2 + M_z^2)^{1/2}/Z \quad \dots\dots\dots(4)$$

式中:

- A ——管道截面积,单位为平方米( $\text{m}^2$ );
- Z ——管道截面模量,单位为立方米( $\text{m}^3$ );
- $F_x$  ——轴向力,单位为牛(N);
- $M_y$ 、 $M_z$  ——弯矩,单位为牛米( $\text{N} \cdot \text{m}$ )。

13.3.1.3 下述结论的支持性论述。这一结论即:这一位置极不可能由于例如晶间应力腐蚀裂缝、极端或反复载荷(如水锤或疲劳),劈裂型损坏或间接原因等机理而发生损坏。

13.3.1.4 一般来说,LBB 方法并不依赖通过在役检查(ISI)来进行裂缝检测。然而,如果所选的位置不满足 13.3.2 的准则,则应提供在这些位置增添在役检查的详细情况,以作为用假想泄漏裂缝来代替这些假想破损的补允材料(与 LBB 分析一起提供)。

### 13.3.2 分析步骤

#### 13.3.2.1 假想泄漏裂缝

在 13.3.1.1 中应用 LBB 方法的每一位置都应假设穿透管壁的泄漏裂缝,裂缝的尺寸应足够大,以保证所造成的泄漏能检测出来并有充分裕度。裂缝长度取为管道受到正常运行载荷(包括考虑试运行情况)条件下其泄漏为最小泄漏检测能力的  $N$  倍时的长度。 $N$  通常取 10。若取其他值则应根据泄漏探测系统的质量、系统的冗余度或多样性、监测的频度和容易程度、泄漏量的示数指示、人员的培训和规程以及被检测的系统泄漏的重要性作出论证。例如,包容体内包容有反应堆冷却剂的安全一级管系,一般要用几个不同的检测系统由经过培训的操纵员按预定规程对其泄漏经常进行监测,应取  $N$  等于 2 来确定这一分析中泄漏裂缝的尺寸。 $N$  取值为另一极端的例子是包容体外的非安全级管系。它可以由维修人员用肉眼观察或地坑水位检测来作不很频繁的监测, $N$  的值应取为 10。

也可以根据别的考虑因素来论证  $N$  的值小于 10 是合理的。例如,在特定的 LBB 位置增添在役检查或就地泄漏检测措施。同样,低应力的管道相应的泄漏概率也较低,泄漏检测因子  $N$  可以取较低的裕度。也可以根据某一管道破裂的后果较轻来论证取较低的  $N$  值的合理性。

虽然泄漏测量频率、泄漏检测系统的响应时间以及操纵员的响应时间都对短期泄漏检测能力有影响,但在 LBB 方法应用中,因假想泄漏裂缝(满足 LBB 方法的要求)增长极慢,实质上排除了这些因素对泄漏检测能力不确定性的贡献。论证了假想泄漏裂缝的这种慢速增长,泄漏检测因子  $N$  的裕度就可以取得较低。

#### 13.3.2.2 裂缝稳定性

应对局部及总体损坏机理进行评定,以确保在裂缝尺寸及载荷方面的裕度。损坏的局部模式用于

处理裂缝尖端的行为；钝化、起始、扩展和失稳。损坏的总体模式用于处理净截面的行为；初始屈服、应变硬化以及塑性铰形成。净截面为管道的总截面减去假想裂缝面积。对于有足够韧性的材料，可以用极限载荷法来保证局部稳定性和总体稳定性。材料的韧性与 A106B 级碳钢的相当或比其更好，则可以认为它的韧性是足够的。可以在将正常载荷加 SL-2 载荷作用于两倍步骤 a) 中的假想泄漏裂缝长度来论证裂缝尺寸的裕度。可以用极限载荷法将三倍的正常加 SL-2 载荷作用于假想泄漏裂缝来论证载荷的裕度。在有适当理由时，也可以用其他方法来论证裂缝尺寸与载荷的裕度。

另一种方法是，可以用撕裂失稳分析来保证充分的裕度。将正常载荷加 SL-2 载荷作用于两倍步骤 a) 中的假想泄漏裂缝长度，用撕裂失稳分析论证裂缝尺寸的裕度；也可将 $\sqrt{2}$  倍的正常加 SL-2 载荷作用于假想泄漏裂缝，用撕裂失稳分析论证载荷的裕度。可以对裂缝尺寸的裕度或者对载荷的裕度进行一次分析。当采用撕裂失稳分析时，还应如下论证总体稳定性有足够的裕度；应采用极限载荷法将正常载荷加 SL-2 载荷作用于两倍假想泄漏裂缝长度来论证裂缝尺寸的裕度，而且，应采用极限载荷法 $\sqrt{2}$  倍的正常加 SL-2 载荷作用于假想泄漏裂缝来论证载荷的裕度。

附 录 A  
(资料性)  
管道应力计算公式

### A.1 安全 1 级管道

按 GB/T 16702(或其他相当的标准或规范),S 表示在规定为 A 级或 B 级使用限制的载荷组合下的一次加二次应力强度范围。该 S 值应按公式(A.1)计算,当公式(A.1)超过  $2.4 S_m$  时,则按公式(A.2)和公式(A.3)计算 S 值。

$$S = \frac{C_1 P_0 D_0}{2t} + \frac{C_2 D_0 M_i}{2I} + C_3 E_{ab} \times |\alpha_a T_a - \alpha_b T_b| \quad \dots\dots\dots (A.1)$$

$$S = \frac{C_2 D_0 M_i^*}{2I} \quad \dots\dots\dots (A.2)$$

$$S = \frac{C_1 P_0 D_0}{2t} + \frac{C_2 D_0 M_i}{2I} + C'_3 E_{ab} \times |\alpha_a T_a - \alpha_b T_b| \quad \dots\dots\dots (A.3)$$

式中:

- $C_1, C_2, C_3, C'_3$ ——特定管件的二次应力指数;
- $D_0$ ——管道外径,单位为毫米(mm);
- $P_0$ ——使用压力范围,单位为兆帕(MPa);
- $t$ ——管道名义壁厚,单位为毫米(mm);
- $I$ ——惯性矩,面积二次矩( $\text{mm}^4$ );
- $M_i$ ——系统从一个使用载荷组转变到另一个使用载荷组时产生的合力矩范围,用于公式(A.3)中时不包括热膨胀和锚固点位移引起的力矩,单位为牛毫米( $\text{N} \cdot \text{mm}$ );
- $E_{ab}$ ——室温下载总体结构不连续或材料不连续的两侧的平均弹性模量,单位为兆帕(MPa);
- $d_a(d_b)$ ——总体结构不连续或材料不连续的  $a(b)$ 侧上的内径,单位为毫米(mm);
- $t_a(t_b)$ ——长度 $\sqrt{d_a t_a}$ ( $\sqrt{d_b t_b}$ )上的平均壁厚,单位为毫米(mm);
- $T_a(T_b)$ ——在总体结构不连续或材料不连续的  $a(b)$ 侧上的平均温度范围,单位为摄氏度( $^{\circ}\text{C}$ )。对于普通的圆柱形,平均值  $T$ ,对  $T_a$  为 $\sqrt{d_a t_a}$ 距离内取平均,对  $T_b$  为 $\sqrt{d_b t_b}$ 距离内取平均;
- $\alpha_a(\alpha_b)$ ——室温下在总体结构不连续或材料不连续的  $a(b)$ 侧上的热膨胀系数, ( $1/^{\circ}\text{C}$ );
- $M_i^*$ ——系统从一个使用载荷组转变到另一个使用载荷组时产生的合力矩范围,但只包括热膨胀和锚固点位移引起的力矩,单位为牛毫米( $\text{N} \cdot \text{mm}$ );
- $S_m$ ——许用应力强度值,单位为兆帕(MPa);
- $U$ ——累积疲劳因子。

### A.2 安全 2、3 级管道

S 表示在规定为 A 级或 B 级使用限制的载荷组合下的应力,该 S 值按公式(A.4)计算。X 表示 B 级使用限制的许用应力  $1.8 S_b$ ,Y 表示热膨胀应力的许用应力  $S_A$ 。

$$S = \frac{B_1 P_{\max} D_0}{2t} + \frac{B_2 (M_A + M_B)}{Z} + \frac{i M_C}{Z} \quad \dots\dots\dots (A.4)$$

式中：

$B_1, B_2$ ——管道制品的主应力指数；

$P_{\max}$ ——峰值压力，单位为兆帕(MPa)；

$M_A$ ——重量和其他持续载荷在横截面上产生的合力矩，单位为牛毫米(N·mm)；

$M_B$ ——非交变动载荷在横截面上产生的合力矩，单位为牛毫米(N·mm)；

$M_C$ ——由于热膨胀产生的合成力矩的范围，如公式(A.4)略去固定点位移的影响，则还包括非交变动载荷引起的固定点位移对力矩的影响，单位为牛毫米(N·mm)；

$Z$ ——管道截面模量，单位为立方毫米(mm<sup>3</sup>)；

$S_h$ ——设计温度下原材料许用应力，单位为兆帕(MPa)；

$S_A$ ——热膨胀应力的许用应力范围，单位为兆帕(MPa)；

$i$ ——应力增强系数。

### A.3 非安全级抗震动力管道

$S$  表示在热膨胀、持续载荷及偶然载荷(包括 SL-1)的载荷组合下的应力。该  $S$  值按公式(A.5)算。 $X$  表示在压力、重量、其他持续载荷及偶然载荷(包括地震)的载荷组合下的许用应力  $kS_h$ ， $Y$  表示热膨胀应力的许用应力  $S_A$ 。

$$S = \frac{P D_0}{4t} + \frac{0.75i(M_A + M_B)}{Z} + \frac{i M_C}{Z} \dots\dots\dots (A.5)$$

式中：

$P$ ——设计压力，单位为兆帕(MPa)；

$k=1.15$ ，对于在任一时期内作用时间 $\leq 8$  h 和每年 $\leq 800$  h 的偶然载荷；

$k=1.2$ ，对于在任一时期内作用时间 $\leq 1$  h 和每年 $\leq 80$  h 的偶然载荷。



中国核学会  
团体标准  
高温气冷堆核动力厂假想管道破损事故  
防护设计准则  
T/CNS 24—2020

\*

中国标准出版社出版发行  
北京市朝阳区和平里西街甲2号(100029)  
北京市西城区三里河北街16号(100045)  
网址 [www.spc.net.cn](http://www.spc.net.cn)  
总编室:(010)68533533 发行中心:(010)51780238  
读者服务部:(010)68523946  
中国标准出版社秦皇岛印刷厂印刷  
各地新华书店经销

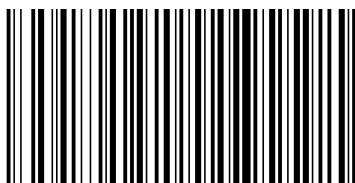
\*

开本 880×1230 1/16 印张 2 字数 56 千字  
2021年8月第一版 2021年8月第一次印刷

\*

书号: 155066·5-3463 定价 30.00 元

如有印装差错 由本社发行中心调换  
版权专有 侵权必究  
举报电话:(010)68510107



T/CNS 24-2020



码上扫一扫 正版服务到