

NB

中华人民共和国能源行业标准

NB/T 20516—2018

轻水堆核电厂假想管道破损事故 防护设计准则

Design basis for protection of light water nuclear power plants against the
effects of postulated pipe rupture

2018 - 12 - 10 发布

2019 - 04 - 01 实施

国家能源局 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 总体要求 3

5 假想破损的位置和形状 3

6 防护要求 7

7 管道甩击效应和管内载荷效应的评定 9

8 喷射流冲击效应的评定 16

9 隔室升压效应的评定 18

10 环境效应的评定 20

11 水淹效应的评定 20

12 评定对关键系统和部件的潜在危害的步骤 21

13 先漏后破方法 24

附录 A（资料性附录） 流体方程的推导 27

附录 B（资料性附录） 计算流体推力的一种可接受的简化方法 29

附录 C（资料性附录） 可接受的喷射流几何模型 39

附录 D（资料性附录） 评定喷射流冲击效应的可接受的简化方法 48

附录 E（资料性附录） 破裂排除区 55

前 言

本标准根据GB/T 1.1—2009给出的规则起草。

本标准由能源行业核电标准化技术委员会提出。

本标准由核工业标准化研究所归口。

本标准起草单位：上海核工程研究设计院有限公司、中国核电工程有限公司、中广核工程有限公司、中国核动力研究设计院。

本标准主要起草人：祁涛、周劲翀、王高阳、周莹、余顺利、王佳、赵禹、黄慧剑、武桐、朱建新、徐清沐、宋煜。

轻水堆核电厂假想管道破损事故防护设计准则

1 范围

本标准规定了核电厂防护假想管道破损的潜在不利效应的设计准则。
本标准适用于轻水堆核电厂设计。

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。

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

ASME BPVC III :2007 锅炉与压力容器规范 核动力装置设备建造规则

ASME B31.1:2010 ASME 压力管道规范动力管道

RCC-M:2007 压水堆核岛机械设备设计和建造规则

3 术语和定义

下列术语和定义适用于本文件。

3.1

能动故障 active failure

能动部件在需求时功能故障,未能完成其预定的核安全功能。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。

3.2

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。

3.3

隔室 compartment

堆腔、隔间或子隔间的统称。

3.4

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。

3.5

高能管系 high energy piping system

在电厂正常运行工况下，最高运行压力超过1.9 MPa（表压）或最高运行温度超过95℃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一部分（小于等于2%系统运行时间或者小于1%电站运行时间），则可将其划作为中能管系。

3.6

冷却剂丧失事故 **loss-of-coolant accident(LOCA)**

反应堆冷却剂流失速率超过正常补给系统补给能力事故，对轻水堆，亦称失水事故。

3.7

中能管系 **moderate energy piping system**

在电厂正常运行工况下最高运行压力小于等于1.9 MPa（表压）且最高运行温度小于等于95℃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。

3.8

运行基准地震 **operating basis earthquake (OBE)**

考虑到地区及当地的地质学与地震学情况以及当地地表下岩层的材料的特征而可合理地预计的在电厂运行寿期内可能发生的会影响到厂址的地震。在此地震发生时，核电厂要确保电厂继续运行对公众健康和安全不会构成风险，并保持相应的安全功能。

3.9

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，在需求时不能提供其原定的核安全功能。

3.10

管段 **piping run**

至少包括一个端点一段管道，或作为另一段管道的分支管。

3.11

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。

3.12

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。

3.13

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。

3.14

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。

3.15

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。

3.16

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

在正常运行期间，由维持冷却剂装量的系统向反应堆冷却剂压力边界补给冷却剂。

3.17

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，为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. 18**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，安全壳的密封得到保证，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. 19**安全停堆地震 safe shutdown earthquake (SSE)**

考虑到地区及当地的地质学与地震学情况及当地地表下岩层材料的特征而估计可能发生的最大地震。在此地震发生时，执行如下功能的系统、部件和构筑物能保持其功能：

- a) 保证反应堆冷却剂压力边界的完整性；
- b) 停堆并使之维持在安全停堆状态；
- c) 防止或减轻可能引起向厂外放射性释放超过允许限值事故的后果。

3. 20**抗震 I 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。

3. 21**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。

4 总体要求

电厂的所有管系都应考虑假想管道破损，并应根据管系中的能量评定其危害关键系统和部件的可能性。管系应划分成高能管系或中能管系，破裂区、破裂排除区或破裂前先漏区。

首先应按照第5章确定假想破损的位置和形状：对假想的环向破裂与纵向破裂，应分别按第7章至第11章的要求进行管道甩击、喷射流冲击、隔室升压、环境状况及水淹等效应的评定。而且，如果要求论证电厂安全停堆，则应进行流体系统内部载荷的评定，评定流体力对流体系统内或流体系统边界上的部件的影响。本标准只给出对于除管道以外的其他部件进行这种评定的总的导则，如果假想破裂导致了飞射物的产生，则应另外进行飞射物效应的评定，在本标准中没有给出进行这种评定的专门导则。对假想的泄漏裂纹，应按第9章～第11章进行隔室升压、环境状况及水淹等效应的评定。对假想贯穿裂纹，应按第10章、第11章进行环境状况和水淹效应的评定。对关键系统和部件进行评定时应论证满足第6章中的防护要求。第12章给出了进行这种评定的一种推荐步骤。

5 假想破损的位置和形状**5.1 假想破损****5.1.1 环向破裂**

除非分离的程度受到限制（见7.2.4），应假定环向破裂造成管道断开而完全分离成两个断离的管段。应假定破口平面垂直于管道的纵轴线，而破口平面面积（ A_e ）为破口位置处管道的截面流通面积。两个破裂管道区段完全分离的环向破裂的破口流通面积（ A_f ）应等于破口平面面积（ A_e ）。部分分离的环向破裂的破口流通面积（ A_f ）见7.2.3、7.2.4及8.2 b）中的说明。部分分离的环向破裂的破口流通面积、排放系数及排放关系式应通过理论分析或试验加以证实。除非另有证明，完全分离的破裂的排放系数应假定为1.0。

5.1.2 纵向破裂

应假定纵向破裂造成管壁沿管道纵轴线裂开，但并不分离。应假定破口平面平行于管道的纵轴线，而破口平面面积（ A_e ）为破口位置处管道的截面流通面积。破口流通面积（ A_f ）应等于破口平面面积（ A_e ）。应假定破口形状为圆，或为长轴平行于管道轴线的椭圆（ $2D \times D/2$ ），其排放系数为1.0。若纵向破口的面积、形状或排放系数要取其他任何值，则应由分析或试验数据加以证实。

5.1.3 泄漏裂纹

应假定泄漏裂纹为一种穿透管壁的裂纹，而裂纹的尺寸及相应的流率由分析及泄漏检测系统等按13.3.2 b）所述来确定。

5.1.4 贯穿裂纹

应假定贯穿裂纹为一种穿透管壁的圆形小孔，其截面流通面积等于管道的内径一半与管壁厚度的一半的乘积，排放系数应取为1.0。

5.2 假想破损位置

5.2.1 核1级管道

5.2.1.1 对于按照 ASME BPVC III:2007 设计的核1级管道，应假定管道破损发生在每一管段的下列位置处：

- a) 管段的端点处；
- b) 中间点：
 - 1) 累积疲劳因子 U 值超过 0.1；
 - 2) S 值超过 $2.4S_m$ 的中间位置。 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 ASME BPVC III:2007 NB-3600 中公式（10）计算，当公式（10）超过 $2.4S_m$ 时，则按公式（12）和（13）计算 S 值。 S_m 表示许用应力强度值。

5.2.1.2 对于按照 RCC-M:2007 设计的核1级管道，应假定管道破裂发生在每一管网的下列位置处：

- a) 管段的端点处；
- b) 中间点：
 - 1) 累积疲劳因子 U 大于 0.1，且 RCC-M:2007 B3653 公式（10）的结果大于 $2.4S_m$ 的中间点；
 - 2) 累积疲劳因子 U 小于 0.1，且 RCC-M:2007 B3653 公式（10）的结果大于 $3S_m$ ，公式（12）和公式（13）的结果大于 $2.4S_m$ 的中间点。
- c) 如果用上述方法得不到任何中间点（或者只有一个点），就在几个最高应力点中选择两个点，这些最高应力点之间的差值按其应力水平至少为 10%，或者差值低于 10%，但两者之间至少隔着一个弯管。如果是直管道没有特别之处，且所有应力都低于允许值，可以选择应力最高的一个点。

5.2.2 核2级、3级管道或作抗震分析的非核级动力管道

5.2.2.1 对于按照 ASME BPVC III:2007 设计的核 2 级、3 级管道或做抗震分析的非核级动力管道，应假定管道破损发生在每一管段的下列位置处：

- a) 端点：管段承压部分的端点；
- b) 中间点：
 - 1) 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；
 - 2) 对核 2 级和核 3 级管道，应力 S 超过 $0.8(X+Y)$ 的中间位置处。其中， 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 ASME BPVC III:2007 NC-3600 中公式(9)与公式(10)之和计算。 X 表示 B 级使用限制的许用应力， Y 表示热膨胀应力的许用应力；
 - 3) 对做抗震分析的非核级动力管道，应力 S 超过 $0.8(X+Y)$ 的中间位置处。其中， S 表示在热膨胀、持续载荷及偶然载荷（包括 OBE）的载荷组合下的应力。该 S 值按 ASME B31.1:2010 中 104.8 公式(16)与公式(17)之和计算。 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， Y 表示热膨胀应力的许用应力。

5.2.2.2 对于按照 RCC-M 规范设计的核 2 级和 3 级管道，应假定管道破损发生在每一管段的下列位置处：

- a) 端点：所有端点；
- b) 中间点：RCC-M:2007 中公式(10)加公式(7)结果大于 $0.8(1.2S_b+S_A)$ 的中间点（有详细的应力分析）。其中， S_b 表示设计温度下材料的基本许用应力， S_A 表示按照 RCC-M:2007 中 C3653.3 确定的热膨胀应力允许的应力变化范围；
- c) 如果用上述方法得不到任何中间点（或者只有一个点），就在几个最高应力点中选择两个点，这些最高应力点之间的差值按其应力水平至少为 10%，或者差值低于 10%，但两者之间至少隔着一个弯管。如果是直管道没有特别之处，且所有应力都低于允许值，可以选择应力最高的一个点。

5.2.3 不做抗震分析的动力管道

对不作抗震分析的动力管道，应假定 5.2.4 和 5.2.5 所规定的管道破损发生在每一管段的下列位置处：

- a) 管段承压部分的端点；
- b) 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。

5.2.4 各种破裂位置

在所有高能管道系统上 5.2.1、5.2.2 或 5.2.3 所规定的位置处，都应假定发生环向和纵向两种破裂，但两者并不同时发生，但是，下列情况除外：

- a) 名义直径小于或等于 25 mm 的管段不假设环向破裂；
- b) 名义直径小于 100 mm 的管段上不假设纵向破裂；
- c) 在端点不必假设纵向破裂；
- d) RCC-M:2007，对于按照规定的最低数量要求（不超过 5.2.1.2 和 5.2.2.2 规定的应力限值）被选定的各种中间点，不必假设纵向破裂；
- e) 如果进行了详细的应力分析（如有限元分析），从而可以用某个位置处的应力状态来确定最可能发生的破裂类型，则在这样的位置处只需假设一种破裂类型。若在正常和异常电站工况使用限制的最严重的载荷组合下，某处轴向的一次加二次应力至少为环向的 1.5 倍，则该处只需假设环向破裂。反之，若在正常和异常电站工况使用限制的最严重的载荷组合下，某处环向的一次加二次应力至少为轴向的 1.5 倍，则该处只需假设纵向破裂；
- f) 在满足 5.2.6 要求的位置处不必假设环向破裂与纵向破裂；

- g) 在采用 5.2.5 b) 所述准则的位置处不必假设环向破裂与纵向破裂。

5.2.5 各种类型裂纹的位置

贯穿裂纹和泄露裂纹特殊情况规定如下：

- a) 贯穿裂纹。在所有名义直径大于 25mm 的高能和中能管道系统上，应在 5.2.1、5.2.2 或 5.2.3 所规定的位置处假定发生贯穿裂纹。但是，在下列位置处不必假设贯穿裂纹：
 - 1) 对核 1 级管道，5.2.1 中定义的 S 的计算值小于 5.2.1.1 b) 2)、5.2.1.2 b) 1) 和 5.2.1.2 b) 2) 中的限值的一半的位置处；
 - 2) 对核 2 级、3 级管道，5.2.2 中定义的 S 的计算值小于 5.2.2.1 b) 2) 和 5.2.2.2 b) 中的限值的一半的位置处；
 - 3) 满足 5.2.6 要求的位置处；
 - 4) 采用 5.2.5 b) 所述准则的位置处。
- b) 泄漏裂纹。若由按照第 13 章的要求进行的分析证实其合理性，则可以假设用泄漏裂纹来代替环向破裂、纵向破裂或贯穿裂纹。

5.2.6 安全壳贯穿区内的管道

5.2.6.1 按 ASME BPVC III:2007 设计且满足下列附加要求的管道，在其安全壳墙体与内侧或外侧隔离阀之间不必假设破损：

- 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（核 1 级管道遵照 5.2.1.1 b) 2) 的规定，对核 2 级、3 级管道遵照 5.2.2.1 b) 2) 的规定）；
- 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，从安全壳墙体到隔离阀之间（包括隔离阀）的管道上的应力应保持在 ASME BPVC III:2007 规定的 C 级使用限制以内；
- c) 应满足 6.2 和 6.3 所规定的设计要求和在役检查要求；
- d) 应恰当地鉴定安全壳隔离阀的合格性，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。

5.2.6.2 按 RCC-M:2007，如果下述全部要求得到满足，不必假设根据 RCC-M:2007 中 2 级规则设计的高能管道出现破裂和贯穿裂纹：

- a) 管道中间点的应力满足 5.2.2.2 b) 规定的限值；
- b) 在贯穿区以外的管道发生断裂时产生的载荷下，用 RCC-M:2007 C3650 中公式 (10) 计算得到的最大应力不超过 $1.8S_h$ ；
- c) 应满足 6.2 和 6.3 所规定的设计要求和在役检查要求。

5.2.6.3 附录 E 给出了一个安全壳贯穿区内管道具体设计要求的应用实例。

5.3 假想破损形状

5.3.1 破裂形状

如果假想破裂的位置在三通、弯头或下列管道位置处，则应按下述方法确定破裂的形状和类型：

- a) 没有详细的应力分析可供使用时，应假设如下：
 - 1) 在超出 5.2 准则的每个三通、弯头、管道与管件的焊缝处，应逐个假设发生环向破裂，且应逐个假设在三通或弯头的每一侧在其中心发生纵向破裂，破口取向垂直于管件平面；
 - 2) 在分支管段连接部，应假设在分支管段与主管段的焊缝处或分支管段与管件的焊缝处发生环向破裂，且应假设破口平面面积 (A_e) 为分支管的截面流通面积；

- 3) 在焊接附件（如吊耳、支杆等）处，应假设在焊接附件的中心线处发生纵向破裂，其面积等于由附件焊缝所界定的管道表面积；
- 4) 在轴对称的管道位置处，如大小头，应假设在每个超出 5.2 准则的管道与管件的焊缝处发生环向破裂与纵向破裂，纵向破裂取向应取成会使管道构形发生平面外弯曲。
- b) 另一方面，如果进行了详细的应力分析或试验，则可以利用分析或试验的结果来预计最可能的破损位置和破裂类型。

5.3.2 裂纹形状

除非另有论证，在假想泄漏裂纹或贯穿裂纹位置上应假设裂纹位于管道周边的每个点上。

6 防护要求

6.1 总的要求

对关键系统和部件应提供防护，以保证在电厂系统管道发生假想破裂后，它们仍能执行其核安全功能。这种防护可以通过以其优先级次序列出的下列方法中的一种或几种来实现：

- a) 把管道与关键系统和部件隔离开，设在远离关键系统和部件的地方。通过电厂的实体布置，使关键系统和部件与管道之间有足够的距离，从而使假想管道破损的效应不能影响安全停堆（见 12.2）；
- b) 设置部件和管道包容体；
- c) 在系统中设置附加设施（如隔离阀）；
- d) 关键系统和部件的设计应能够承受假想管道破损的影响；
- e) 设置附加的防护设施，如约束件与屏障。

6.2 设计要求

应满足下列设计要求：

- a) 关键系统和部件应按抗震 I 类的要求设计；
- b) 为满足 6.1 的要求而设置的管道包容体、部件包容体、防护结构屏障、支持管道甩击约束件的构筑物应按抗震 I 类的要求设计；
- c) 防护设施（如管道甩击约束件等）应如下设计，即如果二次破损会影响安全停堆，则一根管道上的假想破裂不得再导致其他邻近管道的破损；
- d) 应考虑管道甩击可能引起名义尺寸较小的被撞击管道（不论其壁厚如何）分别发生环向破裂和纵向破裂，可能造成名义尺寸相同或较大而壁厚相等或较薄的管道发生贯穿裂纹。可以采用分析法或试验数据或两者结合的方法来预测撞击能量范围，论证管道经受住撞击而不破损的能力，但应该考虑由于被撞击管道内流量减少而丧失功能；
- e) 安全壳贯穿区管道应满足下列要求：
 - 1) 这些部分管道的长度要切合实际地尽量短；
 - 2) 应避免采用要求直接焊在这部分工艺管道外表面上的焊接附件（如为了管道锚固体和约束件设计的需要）。若由于其他设计上的要求必须采用焊接附件，则这种焊缝应能进行 100% 体积的在役检查，并且应进行详细的应力分析来论证符合应力限制；
 - 3) 穿过双层安全壳环廊的那部分管道，如果其假想破损（按 5.2.4 确定）会影响安全壳构筑物的承压完整性，或者会引起安全壳环廊中的压力升高到超出其设计限值，则应设置封闭的防护结构（防护套管）；

- 4) 若防护套管是安全壳边界的一部分,则这种防护套管应按 ASME BPVC III:2007 和 RCC-M:2007 相应要求来建造。此外,整个防护套管应设计成满足下列要求与试验:
 - 设计压力与温度不应低于电厂正常运行工况下被围工艺管道的最高运行压力与温度;
 - 在与安全壳设计压力与温度相应的载荷与 SSE 载荷的组合作用下,不应超过 ASME BPVC III:2007 和 RCC-M:2007 相应工况的使用限值;
 - 防护套管组件应在不低于安全壳试验压力的压力下进行单独的压力试验。
- 5) 管道环向焊缝和纵向焊缝的数目及分支管接头的数目应尽可能少。若采用防护套管,除非满足体积检验的可达性,否则系统管道的被围部分应为无缝结构;
- 6) 几何上不连续的部分,如管道和阀门连接处截面发生变化的部分、管道分支接头部分、管壁变化的部分,设计应使它们的应力集中减少到最小。
- f) 假想管道破损的各种效应,不应妨碍控制室的可居留性,不应妨碍通向对安全控制反应堆运行重要的通道及处理管道破损后果所需区域的通道;
- g) 应防止由不构成 LOCA 的管道破损所产生的影响引发出 LOCA。应防止反应堆冷却剂系统某一环路管道破裂导致同一环路或其他环路的其他管段破裂;
- h) 对任何假想管道破损,安全壳壳体应保持结构完整性。此外,对于假设为 LOCA 的那些假想管道破损,安全壳应保持设计密封性。在实践中,应防止发生甩击的管道甩击到安全壳上,从而实现上述这两个目标;
- i) 当多机组电厂的一个机组的管道上发生假想破损事故时,受影响机组的安全停堆不应妨碍未受影响机组的安全停堆能力。

6.3 在役检查要求

在役检查和有关的设计措施应遵循下列要求:

- a) 为满足 6.1 的要求而采取的防护措施不应妨碍有关规范规定的进行在役检查所需的通道。对于防护套管中的那部分流体系统管道,应在防护套管上设置检查孔,以便进行工艺管道上环向焊缝的检查。检查孔不应位于防护管道穿过安全壳环廊的那一部分上;
- b) 如果在安全壳贯穿区管道上不假想破损(根据 5.2.6 中的条款),那么在每个检查周期中的在役检查应包括对这部分的管道边界内的所有环向焊缝和纵向焊缝实施的 100% 体积的检查;
- c) 需进行检查的区域应按有关规范来确定。

6.4 系统和部件的可运行性

评定假想管道破损效应需要详细的系统分析。应从可运行性的观点来评定可能受管道破损影响的关键系统和部件。关于系统和部件可运行性的一些事项如下:

- a) 除 6.4 b) 中所说明的情况以外,应假设在用于减轻假想管道破损后果的系统中发生单一能动故障。应同时考虑发生单一能动故障和假想管道破损及其直接后果,如机组跳闸或丧失厂外电;
- b) 当假设假想管道破损发生在双用途的中能系统(即在电厂正常运行期间要投入运行,而且停堆和缓解管道破损后果也需要的系统)的两个或多个系列之一上时,若系统是按抗震 I 类要求来设计的,由厂外电源和厂内电源两处供电的,且是按照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,则不必假设系统其他系列上的能动部件发生单一故障;
- c) 所有可供使用的抗震 I 类系统及其他按抗震 I 类系统的要求进行分析的系统,包括那些由操纵员的动作驱动的系统,都可以用来缓解假想管道破损的后果。在判断系统的可用性时,应考虑假想破损,并考虑所假设的单一能动部件故障。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。

7 管道甩击效应和管内载荷效应的评定

7.1 总的要求

从高能管道的环向或纵向破口释放出来的流体会引起管道系统内流动状态的重大变化，产生的反作用力会使管道产生动态的激励。如果这些力足以引起管道甩击，那么附近的关键系统和部件应加以保护，或确保其设计能够经受住管道甩击的影响。此外，破裂管道的流体系统内或其边界上的关键部件（若存在）也应保证其能经受住管道破裂载荷。因此，如第4章所规定的，应对由假想破裂引起的、可能发生的管道甩击以及管内载荷作出评定，以保证满足防护要求。对于破损管道，若由于其运动产生的影响不可接受，则应设置管道甩击约束件或屏障，或其他防护措施，以防止发生不可接受的危害，或者按6.1将其与关键系统和部件隔离开来。

应按7.2确定流体力，而所造成的管道运行、管道甩击约束件的载荷及有关结构的载荷则应用7.3~7.6中的准则来确定。

7.2 流体力

7.2.1 力的计算方法

作用在破损管道上的流体力是时间和空间的函数，取决于破损前管内的流体状态、破口截面流通面积、摩擦损失、电厂系统的特性、管系的几何特征以及其他因素。

描述作用在破损管道上的流体力的公式为：

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

式中：

\vec{T} ——作用在管道上的动态流体推力矢量；

$C.V.$ ——控制体容积；

$C.S.$ ——控制体表面；

V ——体积；

\vec{A} ——表面积；

ρ ——密度；

\vec{u} ——流体速度矢量；

P ——面积元（ $d\vec{A}$ ）中心处的当地压力；

\vec{A}_{in} ——流入控制体的面积；

\vec{A}_{out} ——流出控制的面积；

P_a ——管道周围的环境压力；

\vec{A}_{pipe} ——管道的外表面积。

对于在紧接90°弯头的下游处的等截面管道上的环向破裂（如图1 a）所示），或者对于纵向破裂或分支管路在分支接口处的环向破裂（这两者均如图1 b）所示），上述公式可简化为如下形式：

$$T_x = - \int_{C.V.} \frac{d}{dt} (\rho u_x) dV - \rho u_c^2 A_c - P_c A_c + P_a A_c \dots \dots \dots (2)$$

式中：

T_x ——沿 x 方向作用在管道上的动态流体推力；

- u_x ——控制容积流体沿 x 方向的速度；
 - u_e ——在破口平面面积处的流体速度；
 - P_e ——在破口平面面积处的流体压力；
 - P_a ——管道周围的环境压力；
 - A_e ——在破口平面处控制体的面积（或者破口平面面积）；
- 说明：对环向破裂及纵向破裂， A_e 为理想破口位置处管道的截面流通面积（见5.1.1与5.1.2）。式（2）的第一项为加速度项。对于稳定流动，加速度项为零。其余三项为稳态流体力。

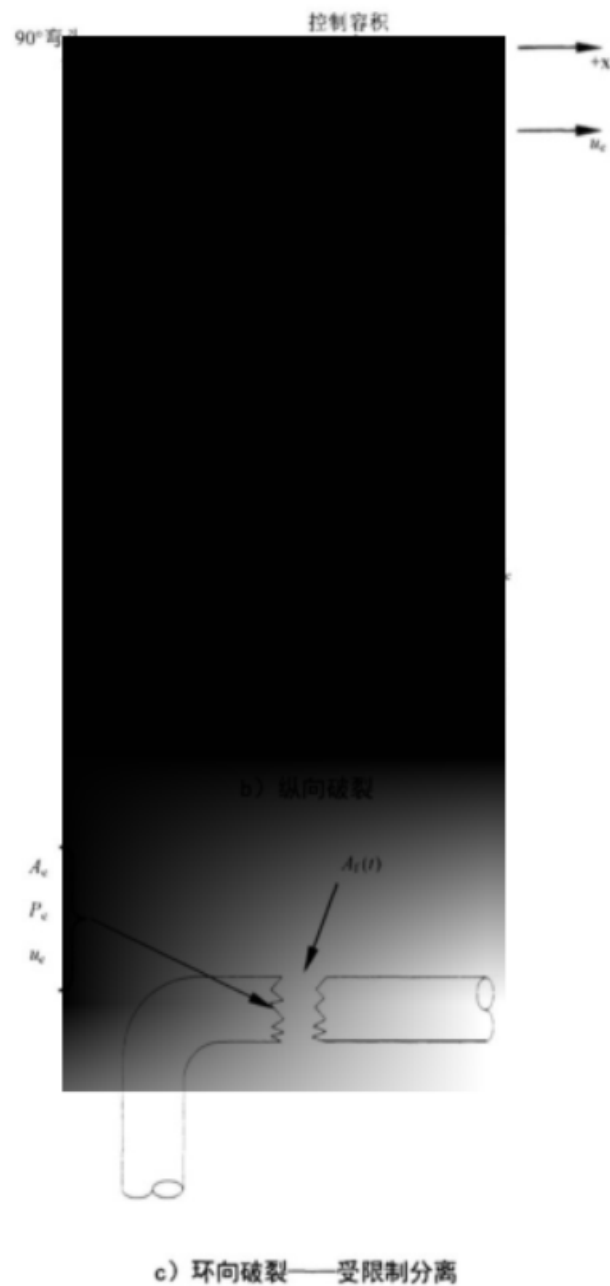


图1 控制体模型

可以用相应的程序来计算管道破损后管系中流体的瞬态热力学状态参数，然后用这些程序来计算作为时间函数的质量、能量及动量守恒方程。然后根据计算出来的流体瞬态参数，用式（1）或式（2）来

确定随时间变化的反作用力。也可用经证明为保守的简化方法来确定流体力。在5.1及7.2.2~7.2.5中给出了确定流体瞬态参数的要求。

附录A给出了公式(1)、式(2)的详细推导过程,附录B给出了计算破裂管道破口处流体推力的保守简化方法。

7.2.2 运行工况

应假设破损仅发生在电厂正常运行工况期间,而且应采用下列假设来确定管道及其相连容器(壳体、热交换器、稳压器等)内的热力学状态,以进行流体反作用力的计算:

- 对于通常在运行期间承压的管系,管道及其相连容器的热力学状态应与满功率时一致;
- 对于通常仅在电厂非满功率运行期间承压的那部分高能管系,应按最严重的模式来确定热力学状态及相关的运行工况。

7.2.3 破口开裂时间

应假设环向和纵向破口平面面积(A_e)是在破裂开始后的1 ms内扩展成的。若取其他值则应在理论上或试验上加以论证。在假定环向破裂时,可以假设破裂的管道充分分离所需的时间为10 ms,充分分离后破口流通面积(A_f)等于上游和下游破口平面面积之和($2A_e$)。部分分离的破口(见7.2.4)达到最大破口流通面积的时间应根据破口流通面积按比例取较短的时间,若取较长的分离时间则应加以证明。

7.2.4 管道几何状况的影响

在计算作用于管系的流体力时,可以考虑在破口和压力容器之间的流动阻力损失。可以考虑的典型部件有:孔板、管嘴、阀门、大小头、喷雾头、弯头、弯管及直管。还可以考虑在端部封闭的管段(端部封死或有常关阀)内的能量是有限的。

如果管道受结构(墙、管道甩击约束件等)的约束,管道分离后的破口流通面积(A_f)受限制,则应根据这个受到限制的破口流通面积进行热工水力分析,从而确定作用在破损管道上的流体力。在分离受到限制的情况下(如图1 c)所示), u_e 、 P_e 作用于破裂管道区段的力取决于与时间有关的破口流通面积 A_f ,破口平面面积 A_e 则为定值。

7.2.5 临界流模型

采用临界流模型来确定通过管道上的破口和限流区域,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 管道响应

7.3.1 管道甩击评定和整个系统的动态分析

假想破损管道与管道甩击约束件系统按7.2所述的流体动态力的响应进行分析,以评定发生管道甩击的可能性并确定管道甩击约束件及有关结构的载荷。

应评定两种设计上的考虑事项:在破裂起始时开始的动态过程及在管道运动停止后的稳态情况。一旦发生管道破裂,由管道、管道甩击约束件及支撑结构构成的系统将对所作用在其上的流体动态力作出动态响应。管道获得动能发生运动,与约束件或者与周围的构筑物或部件撞击。在按7.2.2假设发生管道破损的工况下,管道运动的距离应取运行工况期间可能出现的从约束件表面到管道外表面的最大距

离。在撞击后约束件和管道变形期间会获得附加的动能。在评定中，应论证所获得的总能量将耗散在管道、约束件和支撑结构中。

评定中还应论证在动态过程以后（当运动停止时）系统能承受住稳定流动状况下的流体力。在某些情况中，稳态流体力可能比动态过程期间存在的流体力大。在某些系统中管内流体的初始焓值与相连容器中的焓值是不同的。

在管道响应分析中应包括管道和管道甩击约束件两者的相互作用效应。如果管道甩击约束件的质量相对于管道系统而言相当大，则在管道甩击分析中还应考虑它的动态响应。下述方法为管道响应评定中可采用的分析方法。

管道和管道甩击约束件系统的计算模型应足够详细，以反映它的动态特性。可以采用集中质量法或连续质量法。系统的惯性效应和刚度效应及管道和约束件之间的间隙应包括在计算模型中。应施加管道破损的时程力函数，并且用数值积分计算出管道甩击约束件载荷及管道变形的时程响应。这种方法要使用数值或模拟计算机程序。

7.3.2 简化的动态分析

可以用对管系中的某一部分进行动态分析来代替对整个管系的分析，在表示管系的其余部分的柔度和惯性效应时，应考虑动态耦合及作用在所分析的那部分管系上的力函数。

7.3.3 准动态分析

对于一些有代表性的系统可以进行动态时程分析，以获得曲线、图形形式的设计数据，用于约束件的定位和设计。这种研究从性质上来说参数型的，考虑了动态耦合、系统力函数、间隙影响、支撑柔度、管道尺寸和规格。这种方法使管道甩击约束件的设计人员可在计算出来的数据之间进行内插，避免由于某一实际参数发生小的变更而要对标准设计进行重新分析。

7.3.4 能量平衡分析

与动态分析类似，在能量平衡分析中，应论证系统的能量在动态过程中被吸收掉，并且应说明系统保持有承受稳态推力的能力。

在能量平衡分析中，不考虑随时间的变化，因此应假设推力为恒定值。在分析中，应采用初始推力或最大的摩擦限定推力两者较大的一个。如果系统的载荷——变形关系已知，则可对第一个1/4周期（管道的初速度和末速度为零）进行能量平衡分析。

然而，由于在这类分析中动态惯性效应是未知的，所以不可能计算出管道与管道甩击约束件之间的能量分配关系。因此，一种可取的保守的近似方法是假设管道甩击约束件本身能够吸收系统的整个能量。若要假设更符合实际的能量分配关系，则应明确证明每个部件的能量分配是合理的。若系统的每个部件都能吸收所要求的能量，且这些部件仍具有承受稳态推力的能力，则认为该系统设计是合格的。

能量平衡法假定管道甩击约束件的最大应力或应变发生在初始1/4周期结束时。但经验表明并非总是如此。根据详细的时程分析，考虑发生回弹效应，约束件上的最大变形可能比初始1/4周期中发生的稍微大一些，应采用下列几种方法之一来考虑回弹可能造成的影响：

- 在假定管道与管道甩击约束件之间有能量分配时，用较详细的有关作用力或结构响应的时程分析来证实回弹在所有情况下不会引起大的增加；
- 将反作用推力增加10%来进行1/4周期的能量平衡分析；
- 将管道甩击约束件的设计限值减少20%。这个设计限值是依据7.6推荐的材料或管道甩击约束件的承载能力得到的。

7.3.5 静态分析

在静态分析中，喷射反作用力应用一个放大的保守静载荷来表示，并对管道与管道甩击约束件系统进行静态分析。

设计人员应核查：在确定标准管道甩击约束件的放大因子时所采用的参数在其他应用场合是否适用。而且，将最佳设计标准管道甩击约束件用于非最佳的应用场合可能会导致高的放大因子。该放大因子应使用静态分析以外的方法来确定。

7.4 管道的设计要求

假想管道破损是管道甩击事件的起因。一旦假定管道发生了破损，则压力边界的完整性已不再保持，因而原设计规范的要求就不再适用。管道承受管道破裂载荷的能力是由其直径和壁厚这类截面特性所限定的。

若能论证管道的承载能力大于动态过程发生后所作用的载荷，并且论证动态过程中管道与管道甩击约束件所耗散的能量小于它能够吸收的能量（用7.6中的材料设计限），则可以认为管道的运动是受控制的。管道的承载能力可以根据试验或适当的分析模型来确定。

7.5 管道甩击约束件的设计要求

管道甩击约束件的主要功能是控制管道在发生环向或纵向破裂时的运动。在本标准中，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，除了本标准的规则以外，还应采用适用于支撑的设计规则。

不起管道或部件支撑作用的管道甩击约束件可以按一次性使用来设计，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7.6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。

图2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，7.6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。

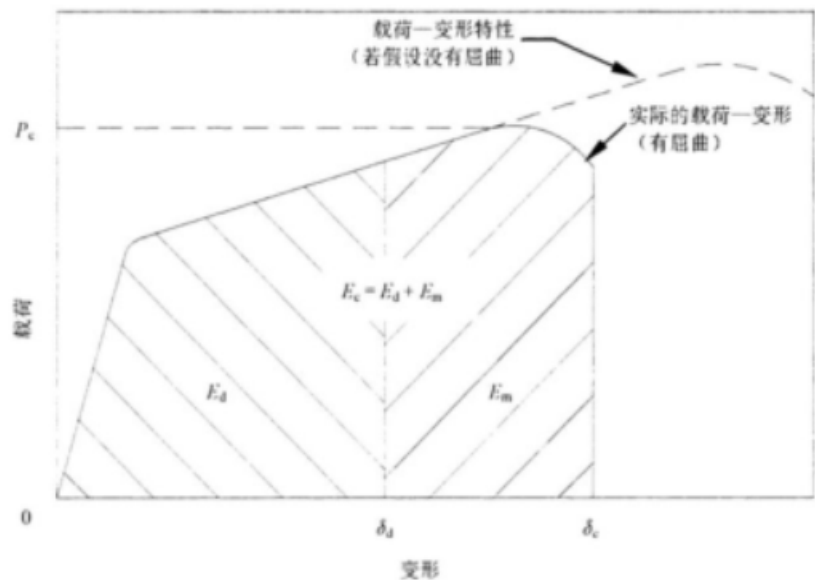
如果采用某种可压扁的吸收能量的材料或部件，则应假定可用的吸收能量能力不大于额定可用吸收能量能力的80%。额定可用吸收能量能力应通过试验或分析来确认，以保证材料变形是可控的。吸收能量的构件设计应使其在比非吸收能量的弹性承载构件包括锚固件更低的载荷下就发生屈服或永久变形。

对于按相当大的应变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7.6.1）。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。

7.6 材料性能

7.6.1 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。



说明：

P_c ——在开始发生屈曲坍塌时的载荷

δ_c ——坍塌变形；

δ_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2 某种结构类型管道甩击约束件的典型载荷-变形特性

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。

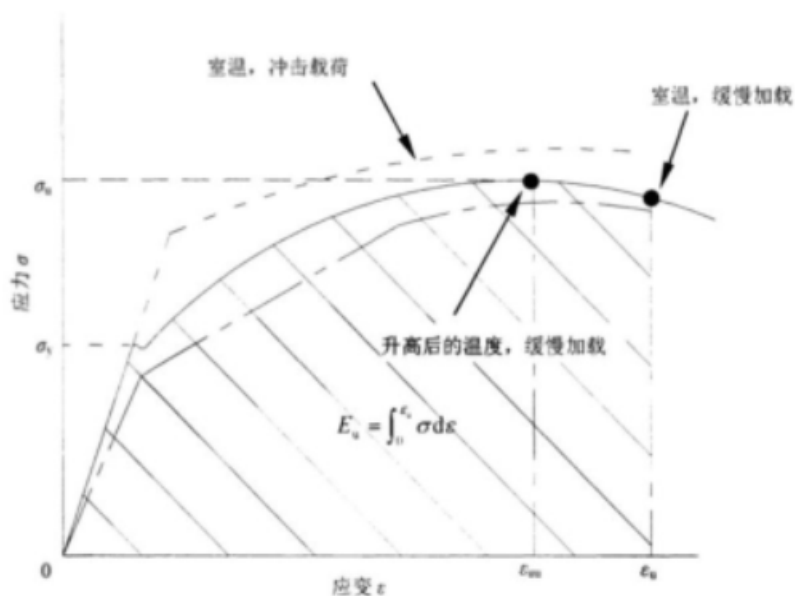
已有的试验表明，在一般管道破损过程中所发生的动态加载速率下，材料将表现出延性行为而不是脆性断裂。直接采用这些试验的结果一般可能不合适，因为这些测定主要覆盖的是最终载荷为零的冲击试验，而管道破损过程通常留存有相当高的稳态载荷。这些典型的延性金属在静载荷和动载荷两种情况下材料性能的总的变化趋势如图3所示。

在按7.6.2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。

7.6.2 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。



说明：
 σ_y ——屈服强度；
 σ_u ——极限强度；
 ϵ_u ——极限均匀应变；
 ϵ_b ——极限断裂应变；
 E_u ——极限能量吸收量。

图3 典型延性金属的应力-应变特性

- 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 ϵ_u ）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 σ_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。

7.6.3 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7.6.2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 7.6.3 a) 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。

8 喷射流冲击效应的评定

8.1 总的要求

高能管道上的环向或纵向破裂会产生一股从破裂点射出的喷射流。关键系统和部件应加以保护,或确保其设计能经受住这股喷射流冲击的影响。因此,如第4章中所规定的,在每个假想破裂位置,都应就流体喷射流冲击对附近建筑物和部件的可能影响作出评定。在评定中应考虑喷射载荷、流体温度和潮湿对受冲击靶物的影响,喷射流的形状和方向按8.2确定,而喷射载荷、温度及潮湿的影响则分别按8.3~8.5确定。在已经认定喷射流冲击会产生不可接受的影响的地方,应按6.1的要求设置屏障或采用其他保护方法以防造成损害,或者把管道与关键系统或部件分离开。

在8.2中的射流是相对于管道中心线来描述的。在评定喷射流冲击在特定靶物上的可能性时,应考虑由于管道甩击,包括管道与约束件相互作用所引起的喷射流中心线的移动。喷射流的参数受管道内流体的瞬态状况的影响。因此,最严重的冲击状况可能随时间而变化,取决于所评定的是何种影响,一种可取的做法是采用多组随时间变化的流体和环境参数。

所假设的在假想破裂发生前瞬时管内流体的状态应与7.2.2规定的相同,破口的排放率应与5.1及7.2相一致。

评定喷射流冲击效应的一种简化方法参见附录D。

8.2 喷射流的形状和方向

从管道破口喷放出来的喷射流的图像如图4所示。在图4 a) 中,假设喷射流不扩散到周围环境中;而在图4 b) 中则包含了向周围环境的扩散效应。

对流体温度低于周围环境压力下的饱和温度的过冷高能管道,喷射流的特征是其直径几乎保持不变,约等于破口的直径,见图4 a)。由于流体温度低于饱和值,它不会闪蒸,而是形成不可压缩的喷射流。

然而,试验数据表明,所定义的高能管道破裂通常会在破口出口平面处造成两相阻塞(临界)流,在出口平面处的流体压力通常比环境压力高。当流体离开管道破裂区域后,随着喷射流的压力从出口(破口)平面处的较高压力降到喷射流周围的大气压力,流体发生膨胀。

从饱和蒸汽管道喷放出来的喷射流将由于压差而加速并膨胀,而且,它的一部分将冷凝成低湿度的湿蒸汽,带有弥散形式的含小水滴的液相。从过冷的或饱和的热水管(温度高于100℃)喷放出来的喷射流将闪蒸成低含汽量的湿蒸汽。闪蒸将导致喷射流的直径迅速扩大,所考虑的是膨胀很不充分的喷射流。为了确定受假想管道破裂而引起的流体喷射流的冲击效应影响的建筑物和部件,应确定喷射流几何形状和方向的分析模型。任何此类模型都应考虑在破口出口平面处的喷射流体的状态参数,以及喷射流的初始自由膨胀导致局部环境压力。不论采用何种流体喷射模型,在确定喷射流是否会冲击到某一指定靶物时都应进行工程判断。对于那些与所采用的模型中的喷射流边界足够接近、只要喷射流的几何形

状参数或管道运动参数有些合理的变动就会受到冲击的靶物或大靶物的某些部分，应假定它们会受到喷射流的冲击。并应采用如下假设：

- a) 对于两个分离的管道端部没有受到实体约束的环向破裂，应假定两管端移动到彼此叉开，使得从两个断端口喷放出来的喷射流互不干涉，而且应假定在破口处每股喷射流的中心线与该假想破口处管道的中心线吻合，如图 5 a) 所示；
- b) 对于受到实体约束在破裂后不能完全分离（管道的轴向运动等于或小于 1/2 管道直径，横向运动小于管道壁厚）的管道上的环向破裂，应假定喷射流的中心线垂直于管道中心线，并环绕管道的周向 360° 向外扩展，如图 5 b) 所示；
- c) 对于纵向破裂，应假定喷射流形状为圆形，与完全分离的环向破裂的喷射流形状相同，且从破口处喷放出来的喷射流的中心线垂直于破口区及管道的中心线，如图 5 c) 所示。

喷射流形状和方向的简化计算方法参见附录C。

8.3 喷射流冲击载荷

喷射流冲击载荷定义为由冲击在某一靶物上然后被挡回或偏向其他方向的喷射流作用在靶物上的力。该载荷由在与靶物相互作用面（冲击平面）处喷射流的含汽量、速度、压力、温度及截面积等性质以及靶物本身的形状确定。喷射流冲击载荷可以通过确定部件上的压力分布并在整个靶物表面上进行积分求得，或通过计算由靶物引起的喷射流的动量变化求得。在表示作用在靶物上喷射流冲击载荷的特性时，应考虑由于管道甩击而引起的喷射流的中心线的运动。

在评定作用在靶物（设备或靶构筑物）上的喷射流冲击载荷时，喷射流冲击载荷的加载速率是重要的，应给予恰当考虑。靶物的响应取决于靶物的刚度特性及喷射流冲击载荷的加载速率。这一响应应按实际冲击力加载速率由动态分析确定，或者用下列动载荷系数由等效静态分析确定：

$$F_s = DLF(F_m) \dots\dots\dots (3)$$

式中：
 F_s ——等效静态冲击力；
 DLF ——动载荷系数；
 F_m ——喷射流冲击力的最大值。

对于实质上能表示为单自由度的弹性系统的靶物，可保守地假定冲击力是瞬时出现的，动载荷系数取 2.0。对于非弹性系统或多自由度系统或非弹性多自由度系统，没有简单公式，应进行分析来确定系统的动态响应或证明动载荷系数取某一值的合理性。

喷射流将在管道破裂期间及管道破裂后的短时间内形成。同喷射流的形成相关的最短时间的保守值与达到最大破口流通面积（ A_f ）的最短时间（见 7.2.3）相对应。喷射流的实际形成时间取决于破裂后流体的加速时间。建立准稳态条件需要一定的时间，该时间可用于确定喷射流的加载速率。

8.4 喷射流冲击温度

当一股自由喷射流被靶物减速或止挡时，动能就转换成热能，使靶物加热。靶物的这一效应可根据在冲击平面处喷射流的温度并相应考虑流体向靶物的传热以及靶物内部的导热来确定。所采用的传热系数和模型应通过试验数据或分析来验证。当喷射流被滞止（止挡）时，作用在靶物表面上的喷射流温度等于或高于静态温度，这时情况最为严重。

然而，滞止只可能发生在靶物的某一点上。而且，静态流体参数能够更真实的表示位于靶物扰动区内的流体状态。

如果不考虑向靶物的传热，则应假设靶物表面的温度等于喷射流的温度。

8.5 喷射流冲击湿膜

由于喷射流的冲击，在靶物上可能会覆盖上一层液体薄膜，这取决于喷射流体的状态、靶物的温度和靶物的形状。在大多数情况下，这层液膜会不断地被靶物周围的喷射流冲击并替代。在喷射效应的评定中应假设，在靶物上覆有一层处于喷射流温度、压力下的液体薄膜。若取用其他状态参数，则应通过试验数据或分析来证实其合理性。

9 隔室升压效应的评定

9.1 总的要求

如第4章所规定的，对每一假想管道破裂和泄漏裂纹，都应就隔室升压对关键系统和部件的影响作出评定。对假想破裂，应考虑动态和静态两种效应，而对泄漏裂纹则只需考虑静态效应。

由蒸汽管道或闪蒸水管道的假想破损排放出来的蒸汽或者由气体管道的假想破损排放出来的气体是引起压力升高的介质。因此，不论管道的压力如何，管内流体温度低于水的沸点的管道破裂不会造成压力升高，在隔室升压效应中不必加以考虑。

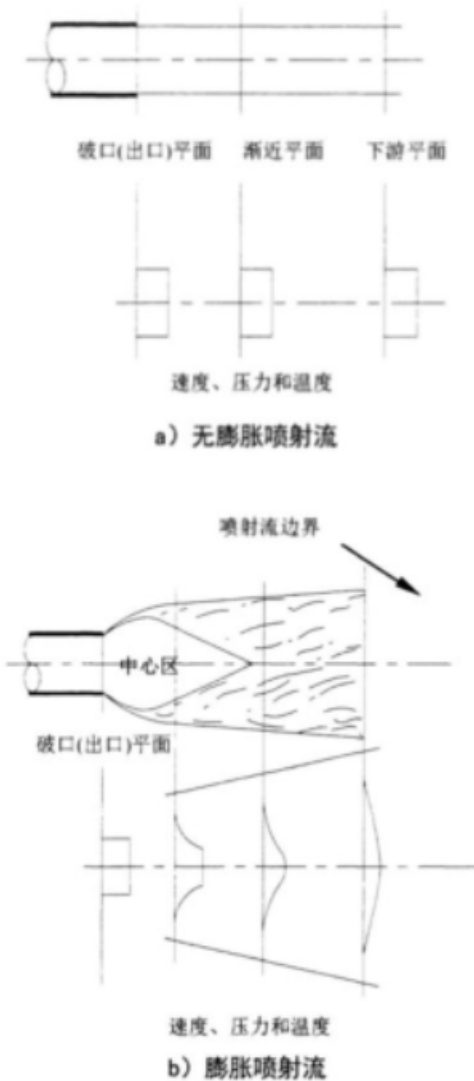


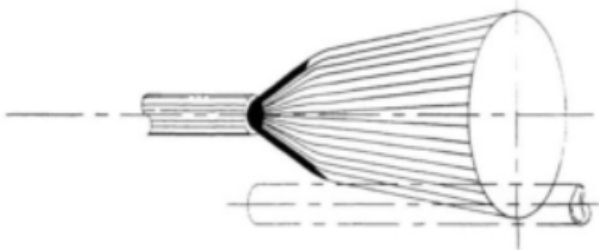
图4 流体喷射模型

对假想破裂，隔室升压包括一个短时间的瞬态过程，在几秒钟或更短的时间内出现，它的影响主要由隔室的结构单元如墙、楼板、屏障等承受，因此，这一效应与假想管道破损的其他效应有密切的相互作用。应将此类效应（若其存在而应考虑时）与隔室升压效应结合在一起加以评定。

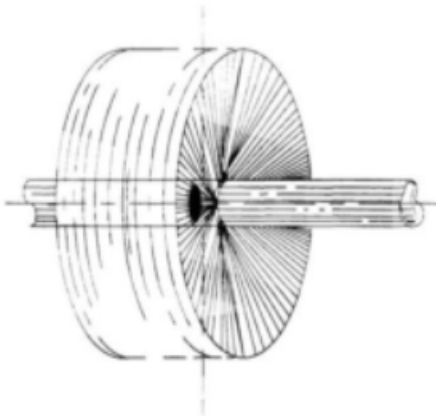
可以在假想管道破口的屏障如墙或楼板上开孔来降低压力载荷。

9.2 电厂运行工况

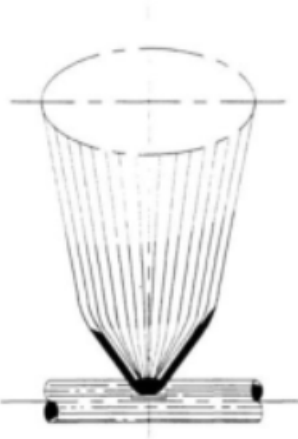
在评定中应采用7.2.2中规定的电厂正常运行工况。



a) 从端部不受约束管道的环向破口喷出的喷射流



b) 从端部受约束管道的环向破口喷出的喷射流



c) 从纵向破口喷出的喷射流

图5 喷射流模型

9.3 准则

关于质量与能量释放源项，压力与温度瞬态分析以及不对称压力分析的准则见NB/T 20403。在5.1、7.2和13.2中定义了管道破损的特征。

10 环境效应的评定

10.1 总的要求

高能管道上的破损（环向破裂、纵向破裂、泄漏裂纹或贯穿裂纹）或中能管道上的破损（贯穿裂纹或泄漏裂纹）会将流体排放到厂房区域中，并在一段时间内影响关键系统和部件周围的环境状况（如温度、压力、辐射和湿度）。随着连续不断地喷放，附近区域可能会受到通过门、窗、贯穿孔道以及暖通空调管道流入的流体的影响。环境状况的变化会损害受影响的关键系统和部件。因此，如第4章中所规定的，应对每一假想破损就其环境变化对关键系统和部件的影响作出评定。在10.2~10.5中给出了关于整个区域环境变化的这种评定中所要采用的准则。高能管道的环向和纵向破裂引起的局部环境效应主要表现为喷射流的局部效应（见8.4和8.5定义）。在考虑贯穿裂纹和泄漏裂纹引起的局部环境效应时，应假定从裂纹排放出来的流体喷淋到附近的所有构筑物 and 部件。

如果满足下述条件，则可以认为部件能经受住环境效应：

- a) 部件的每个部分都能经受住环境变化对其与核安全功能有关的物理、化学或其他性质的影响；
- b) 部件任何部分的物理特征的改变不能妨碍其核安全功能。

在评定关键系统和部件时，应确定在破裂发生后哪一段时间要求其执行核安全功能。且应论证这段时间内在管道破裂环境效应的影响下该安全功能不受到损害。

10.2 电厂运行工况

在评定中应采用7.2.2中规定的电厂正常运行工况。

10.3 排放率

应采用9.3中的要求来确定从破损管道向当地区域释放的质量和能量。

10.4 通流面积

在环境效应的评定中，可以考虑为房间、围墙或电厂区域通风用的开孔口的影响，包括适当的时间延迟的影响。流体从有破损管道的房间流入电厂其他区域，而这些区域关键系统和部件的评定应考虑其影响。排放系数采用NB/T 20403 中的定义。

10.5 分析模型

由破损管道的质量和能量释放引起的环境变化通常用计算机程序确定。程序中所采用的方法和假设应予以充分证明。并且应论证这些方法和假设所给出的温度、压力、辐射和湿度等环境参数在幅度上和时间上都是上限值。

若作过充分证明，可以考虑在某一区域内墙壁、天花板、楼板和设备的散热损失。

11 水淹效应的评定

11.1 总的要求

高能管道上的破损（环向破裂、纵向破裂、泄漏裂纹或贯穿裂纹）或中能管道上的破损（贯穿裂纹或泄漏裂纹）会造成水流流到楼板上并排到附近区域。因此，如第4章所规定的，对每一假想破损，都应就水的流动路线及所达到的水位作出评定，并评定对关键系统和部件的影响，有关准则可见EJ/T 1079—1998。

按第4章总的要求，对有可能引起水淹的所有系统都应进行评定。例如：

- a) 循环水系统；
- b) 主给水系统；
- c) 重要厂用水系统；
- d) 汽机厂房冷却水系统；
- e) 除盐水系统；
- f) 反应堆补给水系统；
- g) 加热和辅助蒸汽锅炉水系统；
- h) 消防系统；
- i) 设备冷却水系统；
- j) 反应堆水净化系统；
- k) 蒸汽发生器排污系统；
- l) 余热排出系统；
- m) 化学和容积控制系统；
- n) 安全壳喷淋系统。

11.2 电厂运行工况

在评定中应采用7.2.2中规定的电厂正常运行工况。

11.3 排放率

应采用9.3中的要求来确定从破损管道向当地区域释放的质量。

11.4 准则

在EJ/T 1079—1998中已经对淹没效应防护准则作了系统阐述。

12 评定对关键系统和部件的潜在危害的步骤

12.1 总的要求

核电厂的布置和设计相当复杂，因此如果在设计的早期阶段对假想管道破损问题没有做充分考虑，则以后解决这些问题的方法往往只是一些“修修补补”的解决方法。本章提供了：

- a) 对管道破损的评定的指导，使这种评定成为在设计的所有阶段都一直加以考虑的问题；
- b) 一种可接受的系统方法，以确保并用文件资料证明在评定对关键系统和部件的潜在危害中已经运用了本标准的要求。

对某一管道系统的每一假想破损进行评定的主要任务是论证电厂可以进入并维持在安全停堆状况。在6.1中规定了防护要求规则及设计人员为了实现这一任务可以采用的各种方法的次序。

在设计的布置阶段，把流体系统的管道与关键系统和部件远距离隔开是确保防护要求得到满足的最有效和优选的方法。建议在电厂的概念设计阶段，就要识别各管道系统，确定它们的能量等级，并确定对于给定的流体管道系统的假想破损哪些是关键系统和部件。这就要求除了识别为减轻管道破损的影响

所必需的系统外,还要确定电气、机械、可居留性及结构等方面的要求,一旦对每一假想破裂都明确了这些要求,就可以确定怎样与关键系统和部件做适当的隔离,并在正常的设计过程中及时实现这种隔离。适当的隔离意味着假想破裂不会对关键系统和部件造成不可接受的危害。在经受假想破裂引起的保守定义的加载效应时,电厂的设计不必要求系统运行,并尽量减少约束件和屏障的应用。

图6中给出的逻辑框图表示了一种可接受的评定方法。用这个图来进行评定可确保本标准中的要求和建议都已做了充分考虑。这个逻辑图都足以用来对于过程评定或对于最终评定(它为已完成的电厂设计的可接受性提供证明材料)。这两个阶段评定的主要区别在于解决不可接受的情况时所选择的方法。为了实现隔离要求,与添置约束件或屏障相反,应该重新布置管道与设备,或采取实现有效隔离的电厂设计措施,或同时在这两方面进行工作。

对图6中所表示的主要步骤说明如下:

12.2 评定的任务

12.2.1 设定会发生破损的系统

如第4章中所要求,对每个系统都应按高能和中能进行鉴别和分类。

12.2.2 确定关键系统和部件

针对名义直径大于25mm的管系上的每一假想破损,确定关键系统和部件。建议列出一些图表,建议以一个图表给出为使电厂进入安全停堆状态而必需投入运行的关键系统和部件。这些图表常称为停堆逻辑图。应根据实际情况保守的考虑单一能动故障和失去外电源。通过考虑辐射、环境及可居留性的要求确定关键系统和部件(它们组成了可供选用的停堆途径)及应安全可靠的构筑物。

12.2.3 实行布置上的隔离

针对管道破损的防护最重要的步骤是实行充分隔离。高能管道宜与有关的关键系统和部件实行实体隔离。中能管道宜充分隔离以防关键系统和部件由于水的喷淋及其相关效应而失去功能。

在设计合适的隔离时,还应该对其他效应(水淹、温度、湿度、隔室升压)做出评定。

12.2.4 确定管系上的破损位置

按照第5章或/和第13章设定破损的位置。每一破损都应独立地假设为一个单独的假想始发事件。

12.2.5 鉴别关键靶物

应确定在每一假想破损的影响范围内的关键系统和部件。如果可行,应尽可能将关键靶物从假想管道破损的影响区域移走,使关键靶物不再受影响。对于那些自身损伤可能危及到关键系统和部件的其他靶物也应加以评定。

12.2.6 确定靶物的完整性

为了确定靶物的完整性,应同时对与每一假想破损有关的各种效应作出评定。这些效应为:

- 管道甩击(高能管道),对环向破裂和纵向破裂,应采用第7章“管道甩击效应和管内载荷效应的评定”中的要求。如果存在由假想破裂产生的飞射物,也应予以考虑。
- 流体系统内部载荷(高能管道),这一效应考虑由假想管道破裂引起的系统迅速降压所造成的、作用在流体系统内或流体系统边界上的部件的载荷,对于如管系的未破裂部分、反应堆堆内构件、蒸汽发生器内部构件及反应堆冷却剂泵这些部件都应考虑这一效应。

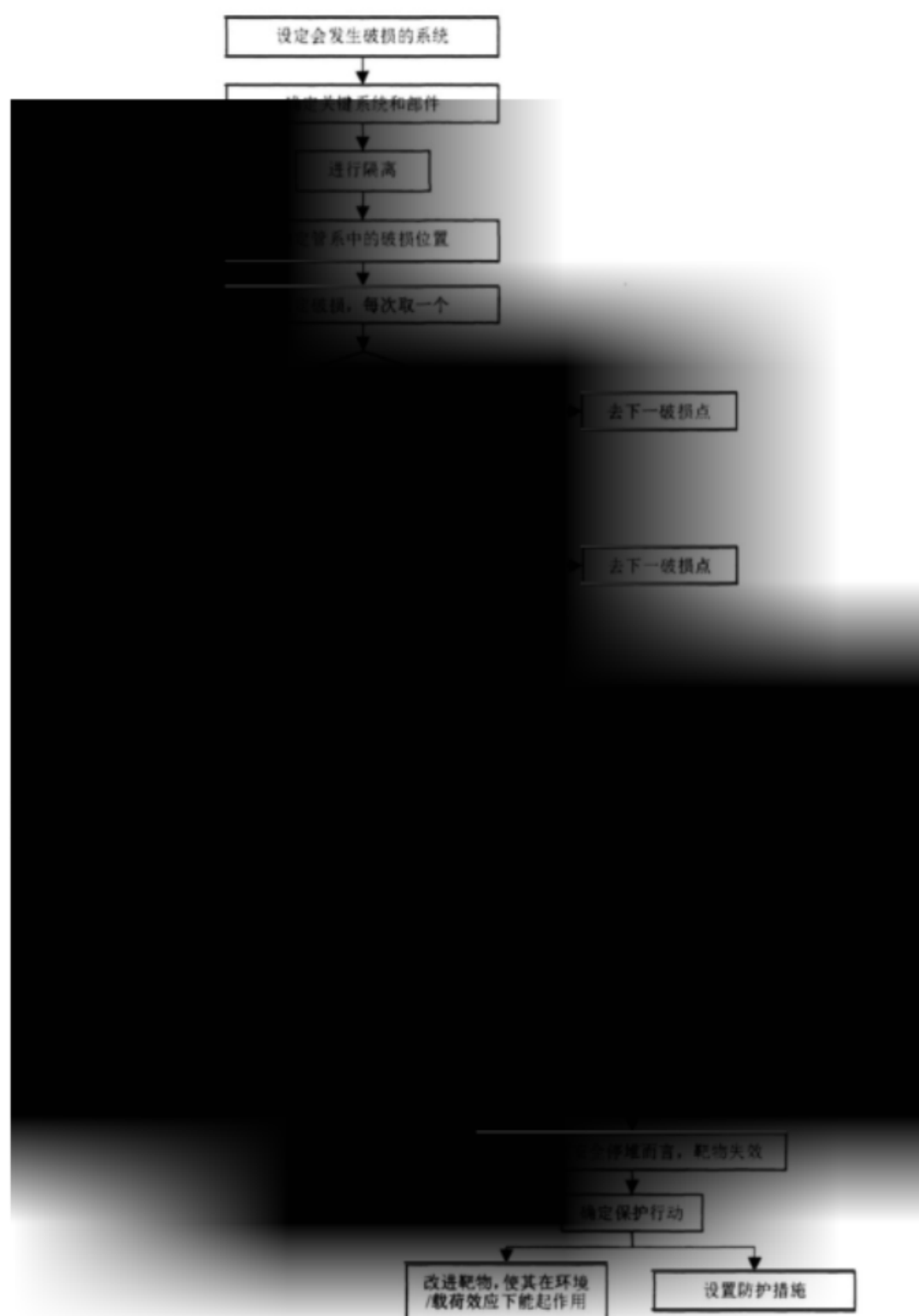


图6 管道破损评定的逻辑框图

c) 喷射流冲击(高能管道), 喷射流冲击效应包括两类:

- 1) 喷射流冲击载荷;
- 2) 在喷射流边界内的环境效应(温度和汽水混合物的干度),应采用第8章的要求来评定喷射流冲击效应。

- d) 隔室升压（高能管道），隔室升压效应指由压差引起的作用在构筑物上的载荷。应采用第 9 章的要求来评定在压力升高的边界内的状况。
- e) 环境（高能管道与中能管道），这一效应主要涉及破损所造成的大气状态参数，这些状态参数是指温度、压力、辐射、化学组分和湿度。关键部件应按这些状态参数来进行评定，以确保它们的可用性，以及能动部件的可操作性。可适当考虑要求关键部件投入运行的瞬态工况和时间段。此外，还应就由裂纹喷淋出的流体所造成的局部环境效应对关键部件的影响做出评定。
- f) 水淹（高能管道和中能管道），这一效应主要涉及：
 - 1) 由于流体压头而施加在构筑物上的载荷；
 - 2) 保证液位不超过关键部件运行所允许的高度。应采用第 11 章中的要求来评定水淹效应。

12.2.7 管道破损效应的评定

当已对载荷效应和环境效应作出评定后，关键靶物的可用性就被确定。当部件或构筑物所受的载荷效应或环境效应（由破损直接产生的；或由破损使其他构筑物和部件损坏而引发的次生危害所间接产生的）超出这些部件或构筑物设计上起作用的限度时，就应把这样的靶物判为不能提供其预定功能。当靶物受的载荷效应和环境效应不超过其设计限值时，则可以把这样的靶物判为能提供其预定功能。

对于已经判为不可用的关键靶物，应加以保护或者加以改进，使它们能够在假想的受载状况或者环境状况下执行它们的预定功能。

13 先漏后破方法

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漏后破（以下简称LBB）方法来论证假设发生泄漏裂纹而不是发生环向破裂、纵向破裂或贯穿裂纹的合理性。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验论证的泄漏裂纹，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破损的管道，这样的机理如晶间应力腐蚀裂纹、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) 管道甩击，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及反应堆冷却剂泵内的内部瞬态载荷；
- c) 喷射流冲击载荷；
- 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，则不必考虑由贯穿裂纹引起的环境效应和水淹效应。

然而，应按第4章考虑由每个假想泄漏裂纹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纹而不是根据假想环向破裂、纵向破裂或贯穿裂纹来评定时，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

假想泄漏裂纹的泄漏率应按13.3.2 a) 确定。

13.3 评定步骤

13.3.1 支持性材料

每个要采用LBB 方法的假想管道破损位置应具备下列材料：

- a) 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 $\pm 2.5[R_m \times t]^{\frac{1}{2}}$ ，其中 R_m 为管道平均半径， t 为壁厚。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。
- b) 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，则关于泄漏裂纹尺寸的 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，以排除结构不连续造成的影响。名义应力 $\sigma_{nominal}$ 可以采用下式（4）计算：

$$\sigma_{nominal} = \frac{F_x}{A} + (M_x^2 + M_y^2 + M_z^2)^{1/2} / Z \dots\dots\dots (4)$$

式中：

A ——管道截面积；

Z ——管道截面模量；

F_x ——轴向力；

M_x 、 M_y 、 M_z ——力矩。

- c) 提供下述结论的证明材料。该位置极不可能由于例如晶间应力腐蚀裂纹、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。
- d) 一般来说，LBB 方法并不依赖通过在役检查（ISI）来进行裂纹检测。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纹来代替这些假想破损的补充材料（与 LBB 分析一起提供）。

13.3.2 分析步骤

分析步骤如下：

- a) 假想泄漏裂纹—在 13.3.1 a) 中应用 LBB 方法的每一位置都应假设穿透管壁的泄漏裂纹，裂纹的尺寸应足够大，以保证所造成的泄漏能检测出来并有充分裕度。裂纹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。虽然泄漏测量频率、泄漏检测系统的响应时间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，因假想泄漏裂纹（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。
- b) 裂纹稳定性—应对局部及总体损坏机理进行评定，以确保在裂纹尺寸及载荷方面的裕度。损坏的局部模式用于处理裂纹尖端的行为：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、应变硬化及塑性铰形成。净截面为管道的总截面减去假想裂纹面积。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，则可以认为其韧性足够，此时可采用极限载荷法。当材料的韧性无法保证优于 A106B 级碳钢或和其相当时，可以用撕裂失稳法来保证充分的裕度。对于极限载荷法和撕裂失稳法分析时，需将正常载荷加 SSE 载荷进行组合后并考虑适当的裕量，作用于 2 倍步骤 a) 中的假想泄漏裂纹长度来论证裂纹尺寸的裕度。裕量取决于载荷组合方式，绝对值相加裕量取 1.0，代数相加裕量取 1.4。在有适当理由时，也可以用其他方法来论证裂纹尺寸与载荷的裕度。

附录 A
(资料性附录)
流体方程的推导

7.2.1中流体载荷公式(1)、(2)的推导如下。

作用在破裂管道上的流体载荷可由牛顿第二运动定律求得,即作用在控制体上的外力等于系统动量随时间的变化率。

方程表达形式为:

$$\sum \vec{F} = \sum \frac{d}{dt}(m\vec{u}) \dots\dots\dots (A.1)$$

式中:

$\sum \vec{F}$ ——作用在控制体上的全部外力矢量和;

m ——控制体中的流体质量;

\vec{u} ——流体速度矢量。

系统内动量随时间的变化率可表示为控制体内动量变化率+入口和出口处穿过控制体表面的进出通量差(见图A.1):

$$\frac{d}{dt}(m\vec{u}) = \int_{C.V} \frac{d}{dt}(\rho\vec{u})dV + \int_{C.S} \rho\vec{u}(\vec{u} \cdot d\vec{A}) \dots\dots\dots (A.2)$$

式中:

$C.V.$ ——控制体容积;

$C.S.$ ——控制体表面;

V ——体积;

A ——表面积;

ρ ——密度。

外力和是压力沿控制体外表面的积分。已知控制体入口、出口压力时,外力和可表示成如下形式:

$$\sum \vec{F} = \oint_{C.S} P d\vec{S} = \vec{R} - \int_{A_{in}} P d\vec{A}_{in} - \int_{A_{out}} P d\vec{A}_{out} \dots\dots\dots (A.3)$$

式中:

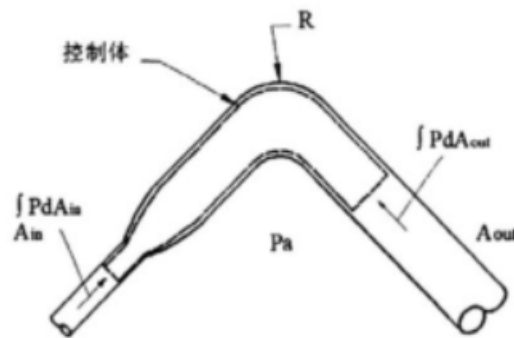
\vec{R} ——作用在流体上的管道反作用力;

P ——面积元(dA 或 dS)中心处的当地压力;

\vec{A}_{in} ——流入控制体的面积;

\vec{A}_{out} ——流出控制的面积;

S ——控制体的外表面。



图A.1 普遍适用的控制体

作用在流体上的管道反作用力 \bar{R} ，减去环境压力作用力等于作用在管道上的反推力（取反方向）。作用在流体上的管道反作用力 \bar{R} 可综合公式（A.2）、公式（A.3）得到，所以有：

$$\bar{T} = - \left[\int_{CV} \frac{d}{dt} (\rho \bar{u}) dV + \oint_{CS} \rho \bar{u} (\bar{u} \cdot d\bar{A}) + \int_{A_e} P d\bar{A}_e + \int_{A_o} P d\bar{A}_o - \int_{A_{eq}} P_e d\bar{A}_{eq} \right] \dots\dots\dots (A.4)$$

式中：

- \bar{T} ——作用在管道上的动态流体推力矢量；
- P_a ——管道周围的环境压力；
- \bar{A}_{eq} ——管道的外表面积。

公式（A.4）是描述作用于管道的动态流体推力方程的一般形式，方程可基于适当的假设进行简化。如7.2图1 a），以等截面 A_e 管道90°弯头下游处发生环向破口为例，x方向的反作用力可通过公式（A.4）得到。

假设任一横截面流量相同，则在任意时刻的流体推力为：

$$T_x = - \int_{CV} \frac{d}{dt} (\rho u_x) dV - \rho u_e^2 A_e - P_e A_e + P_a A_e \dots\dots\dots (A.5)$$

式中：

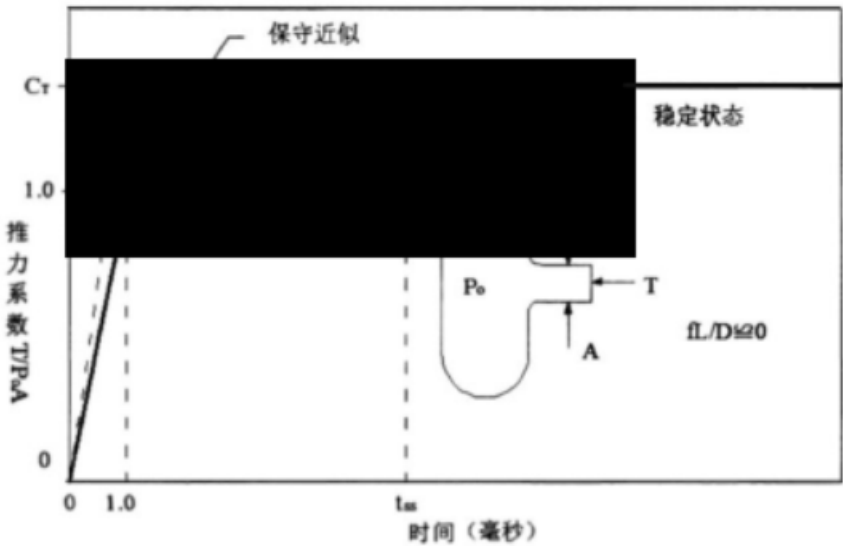
- T_x ——沿x方向作用在管道上的动态流体推力；
- u_x ——控制容积流体沿x方向的速度；
- u_e ——在破口平面面积处的流体速度；
- P_e ——在破口平面面积处的流体压力；
- A_e ——在破口平面处控制体的面积（或者破口平面面积）。

公式（A.5）中的第一项是加速度项。对于稳态流动，加速度项为零，此时其他三项即为流体推力。对于纵向破口或分支管连接处的环向破口（如7.2图1 b）），公式（A.5）仍然适用。

附录 B
(资料性附录)
计算流体推力的一种可接受的简化方法

B.1 计算流体推力的一种可接受的简化方法

这里给出的是计算作用在破裂管道破口处保守的流体推力的一种简化方法，该方法满足7.2的要求。



图B.1 推力瞬态（极小摩擦流动）

图B.1和图B.2所示为压力恒定的源作用下的典型推力瞬态曲线，分别对应无摩擦流动和有限摩擦流动。初始推力等于初始压力乘以破口面积。随着流体动量随时间的变化率减小，公式（2）中的加速度项趋近于0。动量通量项（第二项）一般随时间增加直至达到稳态下的最大值。

已知初始和稳态推力后，可以得到随时间变化的推力载荷的保守近似。在甩管分析中，当稳态推力大于初始推力，如图B.1所示，应当假设随时间变化的推力会在1 ms内增大至稳态推力值并保持不变。如果稳态推力小于初始推力，如图B.2所示，则在达到稳态前假定为初始推力，随后假设变为稳态推力。不需要假设初始推力到稳态推力变化的瞬时阶跃过程。在达到稳态时刻 t_{ss} 后，应当假设一个合适的时间间隔以避免计算不稳定。

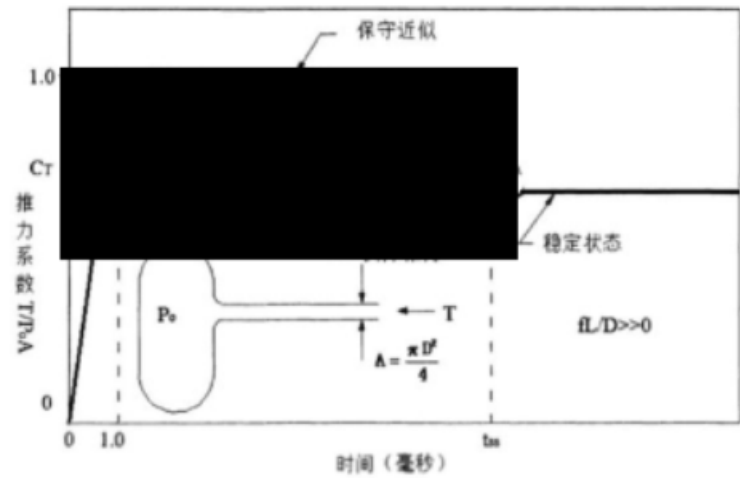
B.2 初始推力

初始推力为破口面积乘以管道内的初始压力：

$$T_{INT} = P_{o,pipe} A \dots\dots\dots (B.1)$$

式中：
 T_{INT} ——初始推力，推力见7.2T或 T_x 的说明；
 $A=A_c$ ——破口面积；
 $P_{o,pipe}$ ——管道内的初始总压（滞止压力）。

环向破口的初始推力载荷为 $P_{o,pipe}A$ 不考虑由于穿过破裂管道截面的初始不平衡纵向拉应力而导致的破口流动面积。纵向破口的初始推力载荷也为 $P_{o,pipe}A$ 。



图B.2 推力瞬态（考虑摩擦力流动）

B.3 稳态推力

B.3.1 稳态推力载荷

当流动达到稳态，瞬态波动力（公式（2）中的第一项，由于流体加速度导致）趋于0，此时只有稳态排放力继续作用。为了应用简化近似，稳态推力载荷可表示为：

$$T_{ss} = C_T P_o A_e \dots\dots\dots (B.2)$$

- 式中：
 - T_{ss} ——达到稳态时刻 t_{ss} 的稳态推力载荷；
 - C_T ——稳态推力系数；
 - P_o ——源的初始压力；
 - A_e ——破口面积。
- 稳态推力系数决定于流体和摩擦损失，应当将其建立为下列流体状态的函数。

B.3.2 饱和-过热蒸汽

对于推力计算，常将饱和和过热蒸汽视为比热容比 $\kappa=1.3$ 的理想气体。如果进一步认定流动为等熵过程，对于无摩擦流动的推力系数为：

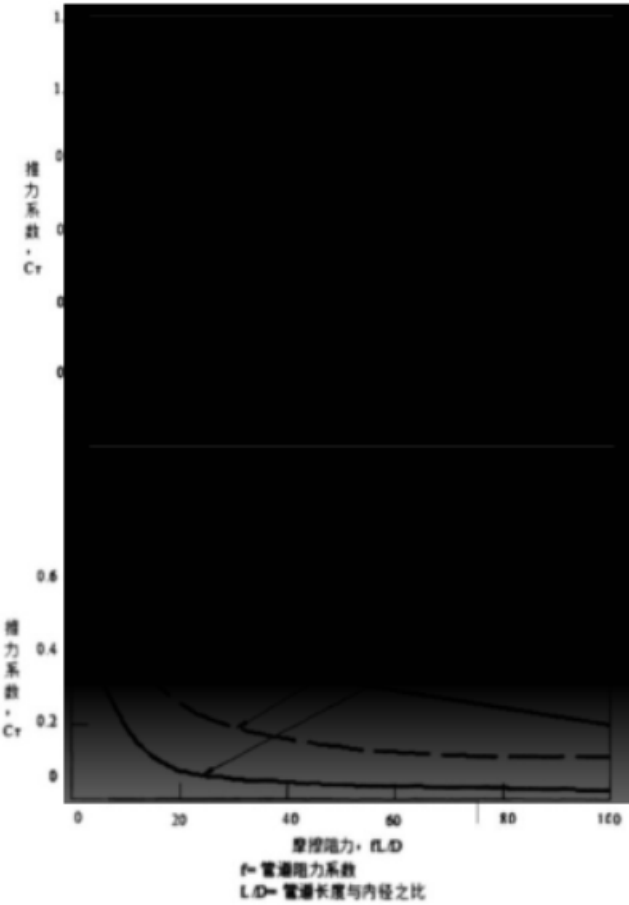
$$C_T = 1.26 - P_a / P_o \dots\dots\dots (B.3)$$

- 式中：
 - P_a ——管道周围的环境压力。
- 对于典型的高能管道系统， $P_a \ll P_o$ 且

$$C_T \cong 1.26 \dots\dots\dots (B.4)$$

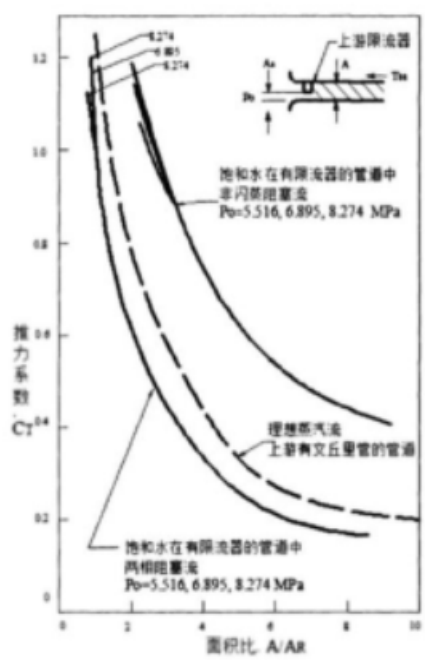
可通过假设流动过程符合Shapiro描述的Fanno曲线（参考文献[1]）来考虑管道摩擦的影响。Fanno分析预测了稳态推力系数是 fL/D 的函数，对于饱和蒸汽如图B.3所示，这里 f 为管道系统的摩擦因子， L/D 为管道长度与直径之比。

对于 $fL/D \cong 0$ 的情况，Fanno分析将其弱化为无摩擦流动，如公式（B. 3）。对于理想蒸汽流动，上游限流器的影响如图B. 4所示。图B. 3或图B. 4均可用于确定最大稳态推力系数 C_T 。管道摩擦的影响（图B. 3）不应与上游限流器影响（图B. 4）叠加来进一步减小 C_T 。



b) 摩擦阻力 100 以内对应的推力系数

图B. 3 摩擦对稳态排放力的影响



图B.4 考虑限流器的稳态排放载荷

B.3.3 饱和蒸汽-水混合物

多名学者对稳态饱和水-汽或两相混合物流动预测展开了研究，比较著名的包括Henry（参考文献[2]），Fauske（参考文献[3]、[4]），Henry和Fauske（参考文献[5]）和Moody（参考文献[6]、[7]）。Moody的研究高估了几乎全部工况的流动（包括推力系数 C_T ），除干度小于1%和非平衡流动（ $L/D \approx 0$ ）外。Moody（参考文献[8]）得到的稳态无摩擦推力系数如图B.5所示。关于出口干度的定义见参考文献[7]。

对于饱和水排放，管道摩擦的影响如图B.3所示，上游限流器对 C_T 的影响如图B.4所示。流道面积影响（图B.4）不应与摩擦影响（图B.3）叠加来进一步减小推力系数。

B.3.4 过冷水

过冷水无摩擦流动的稳态推力系数介于蒸汽的1.26和水的2.0之间。当过冷程度增加，推力系数也将增加最终达到非闪蒸水的值2.0。图B.6给出了无摩擦流动条件下过冷水的推力系数，为滞止焓 h_0 、滞止压力 P_0 （5.516 MPa~16.548 MPa）的函数。这些系数是用Henry-Fauske模型（参考文献[6]）计算得到的，该模型基于通过管嘴的过冷水排放的均质非平衡流动问题。

通过基于Henry-Fauske模型的过冷水无摩擦流动的稳态推力系数正则化可得到 C_T 的如下表达式：

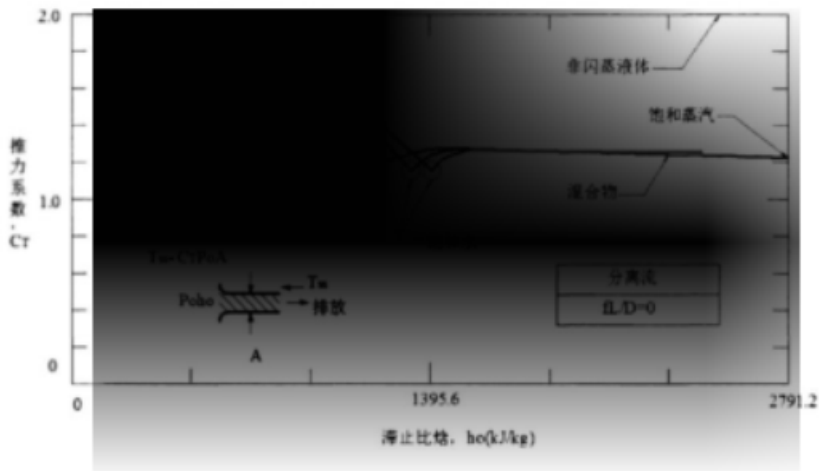
$$C_T = 2.0 - 0.861h^{\star 2}; 0 \leq h^{\star} \leq 0.75 \dots\dots\dots (B.5)$$

$$C_T = 3.22 - 3.0h^{\star} + 0.97h^{\star 2}; 0.75 \leq h^{\star} \leq 1.0 \dots\dots\dots (B.6)$$

式中：

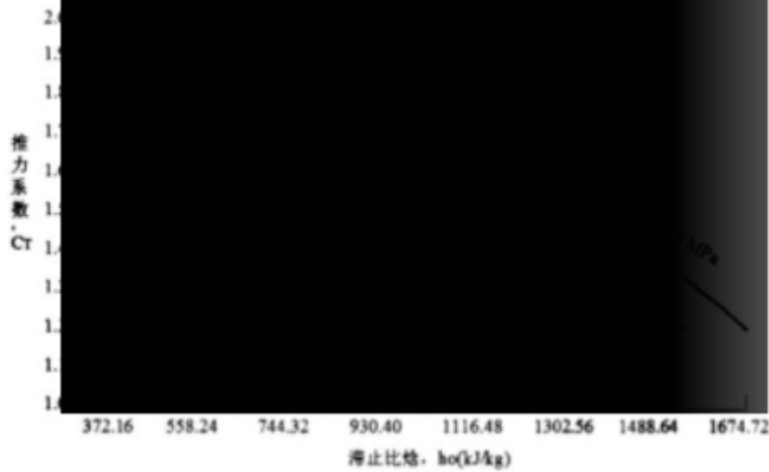
$h^{\star} \text{——} h^{\star} = (h_0 - 418.68) / (h_{\text{saturated}} - 418.68)$ ，单位为千焦每千克（kJ/kg）；

h_o ——滞止比焓，单位为千焦每千克（kJ/kg）；
 $h_{saturated}$ ——滞止压力下的饱和水的比焓，单位为千焦每千克（kJ/kg）。

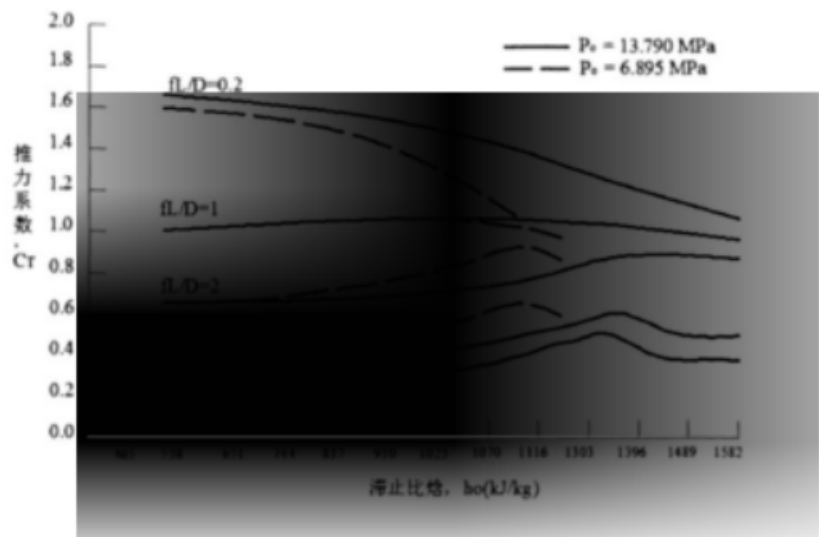


图B.5 忽略摩擦影响的 Moody 稳态分离流推力系数（参考文献[8]）

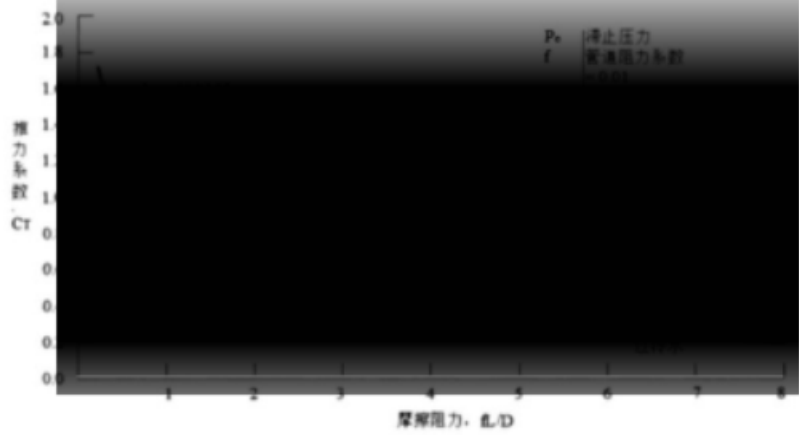
这些方程可用于替代图B.6。图B.7和图B.8给出了在6.895 MPa和13.790 MPa条件下考虑摩擦的过冷水推力系数，其为滞止焓和摩擦力的函数。这些曲线用于6.895 MPa和13.790 MPa，由Hastings和Jain（参考文献11）扩展Henry方法得到，以考虑摩擦引起的压力损失。同Henry-Fauske模型一样，仍然假设为均质非平衡流动。



图B.6 基于 Henry-Fauske 模型的推力系数（为滞止焓和滞止压力的函数）



图B.7 过冷水排放的推力系数（为滞止焓和管道摩擦阻力的函数，参考文献[11]）



图B.8 过冷水排放推力系数（为各滞止焓下管道摩擦力的函数，参考文献[11]）

B.3.5 不可压缩流体

压力高于大气压，温度低于100℃的过冷水的排放可以视为不可压缩流。推力系数的表达形式为：

$$C_T = \frac{2}{1 + fL/D} \dots\dots\dots (B.7)$$

图B.3给出了非闪蒸水的 C_T 曲线（为 fL/D 的函数）。

B.4 达到稳态的时间

达到稳态流动的时间可以根据Moody（参考文献[8]、[12]）的研究成果进行估算。Moody指出如果平均排放速度和密度根据参考文献[8]定义，则当初始管道介质被排尽时达到稳态流动。

$$\bar{U}_D \cong \frac{1}{2}(U_{D,initial} + U_{D,final}) \dots\dots\dots (B.8)$$

$$\bar{\rho}_D \cong \frac{1}{2}(\rho_{D,initial} + \rho_{D,final}) \dots\dots\dots (B.9)$$

式中：
 U_D ——流体排放速度；

ρ_D ——排放流体密度。

所以排尽长为 L 的管道内、质量为 $\rho_0 AL$ （参考文献[8]）的初始介质所需的时间为：

$$t_D = \frac{\rho_0 L}{\rho_D U_D} \dots\dots\dots (B. 10)$$

式中：

$t_D \cong t_{ss}$ ——排尽初始介质的时间或达到稳态推力的近似时间。

对于非闪蒸液体流动， U_D 大致为 $1/2 U_{D,final}$ ，相应的密度比 $\frac{\rho_0}{\rho_D}$ 约为1.0。根据参考文献[8]有：

$$t_{ss} \cong t_D \cong 2L \sqrt{\frac{\rho_0}{2P_0}} \dots\dots\dots (B. 11)$$

式中：

L ——从容器到破口的管道长度；

ρ_0 ——容器内的流体密度；

P_0 ——容器内压力。

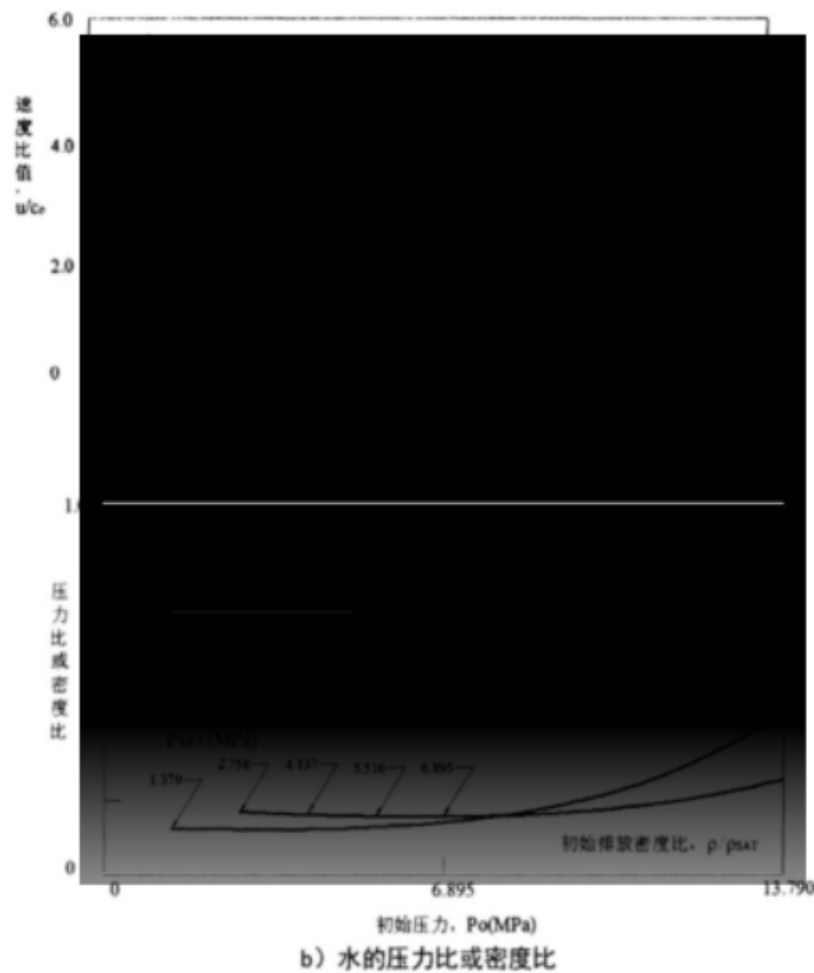
对于饱和或过热蒸汽和饱和或过冷水，适用可压缩排放。初始和最终的密度、速度大致相同。根据参考文献[1]，排尽初始介质的时间大致为：

$$t_{ss} \cong t_d \cong \left(\frac{\rho_0}{\rho}\right) \left(\frac{c_0}{u}\right) \left(\frac{L}{c_0}\right) \dots\dots\dots (B. 12)$$

式中：

c_0 ——流体声速。

图B. 9给出了水的初始排放特性的无量纲比值。当已知初始压力和饱和压力时，这些比值可以采用式（B. 12）来求解 t_{ss} 。从图B. 10可以获得当前状态下流体内的声速。对于冷水，流体内的声速可取1372 m/s。



图B.9 水的初始排放特性（参考文献[8]）

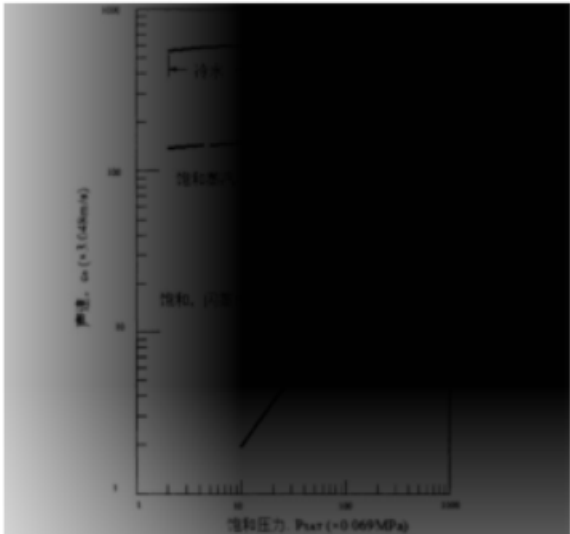
B.5 算例

问题：考虑一个容器和管道系统，包括两个弯头、一个闸阀，假想环向破口和容器间的管道长度为61m，破口面积为2258.06 cm²。初始时刻容器和管道内充满过冷水，初始压力为13.79 MPa，饱和压力为7.93 MPa。求简化的推力时程。

解：根据式（B.1），初始推力为：

$$T_{INT} = P_0 A = 13.79 \times 1000000 \times 2258.06 \times 0.0001 \text{ kN} = 3113.9 \text{ kN}$$

为了确定计算稳态推力时的C_T，需要考虑摩擦力的影响。



图B.10 水中声速

总的 fL/D =管道的 fL/D +弯头的 fL/D +阀门的 fL/D +接管嘴的 fL/D
 $=0.010\times 200/2+2\times 0.25+1\times 0.25+1\times 0.20=1.95$
考虑摩擦力的影响, 根据图B.7并已知饱和水的焓可以确定过冷水的 C_T 。
对于压力7.93MPa, 饱和水的滞止比焓 h_0 约为1302.56 kJ/kg。根据图B.7, 可以确定 $fL/D=1.95$ 、 $h_0=1302.56$ 时推力系数 C_T 约为0.85。根据式(B.2)可以得到稳态推力为:

$$T_{ss}=C_T P_0 A=0.85\times 13.79\times 1000000\times 2258.06\times 0.0001\text{kN}=2646.785\text{kN}$$

初始的波速(声速) c_0 根据图B.10在饱和压力下估算得到。对于这种情况, 可以忽略流体内部初始的非常短暂的减压-再压缩波。可以这样评估载荷的原因参见参考文献[1]。由图B.10, 有

$$c_0\cong 45.75\text{m/s}$$

可以根据图B.9和公式(B.12)中的无量纲比值来确定达到稳态推力的时间。由图B.9, 有

$$\frac{u}{c_0}\cong 2.1, \frac{\rho}{\rho_0}\cong 0.32$$

由式(B.10), 有

$$t_{ss}\cong \left(\frac{1}{0.32}\right)\left(\frac{1}{2.1}\right)\left(\frac{61}{45.75}\right)=2.0\text{sec}$$

得到的推力时程如图B.11



图B.11 算例的简化推力时程

B.6 参考文献

- [1] SHAPIRO, A. H., The dynamics and thermodynamics of compressible fluid flow, Vol. 1, Ronald Press. New York, N. Y. (1965).
- [2] Henry, R. E., An experimental study of Low-Quality steam-water critical flow at Moderate Pressures, ANL-7740, Argonne National Laboratory(1970).
- [3] Fauske, H. K., The discharge of saturated water through tubes, American Institute of Chemical Engineers Chem. Eng. Prog. Symposium Series, Vol. 61, No. 59(1965).
- [4] Fauske, H. K., Contribution to the Theory of Two-phase, one-component critical Flow, ANL-6633, Argonne National Laboratory(1962).
- [5] Henry, R. E., and Fauske, H. K., The two-phase critical flow of one-component mixtures in nozzles and short tubes, ASME Trans, Journal of heat transfer, May 1971.
- [6] Moody, F. J., Maximum flow rate of a single component two-phase mixture, Journal of heat transfer, ASME, Series C, Vol. 87, February 1965.
- [7] Moody, F. J., Maximum two-phase vessel blowdown from pipes, APED-4827(GEAP4), General Electric Company, April 1965.
- [8] Lahey, Jr., R. T. and Moody, F. J., loss-of-coolant accident evaluation, Thermal-hydraulics of a boiling water reactor, section 9.2. American Nuclear Society, La Grange Park, Illinois(1977).
- [9] WEBB, S. W., Evaluation of Subcooled water thrust Forces, Nuclear Technology, Vol. 31, October 1976.
- [10] Henry, R. W., Rhe two-phase critical discharge of initially saturated or subcooled liquid, Nuc. Sci. Engineer, Vol. 41(1970).
- [11] Jain, R. D., Hastings, G. A. (Bechtel)ANS Presentation, New Orleans, June 1975.
- [12] Moody, F. J., Time-dependent pipe forces caused by blowdown and flow stoppage, Journal of heat transfer, Trans. ASME, Vol. 95, Series 1, No. 3, September 1973.

附 录 C
(资料性附录)
可接受的喷射流几何模型

C.1 可接受的喷射流几何模型概述

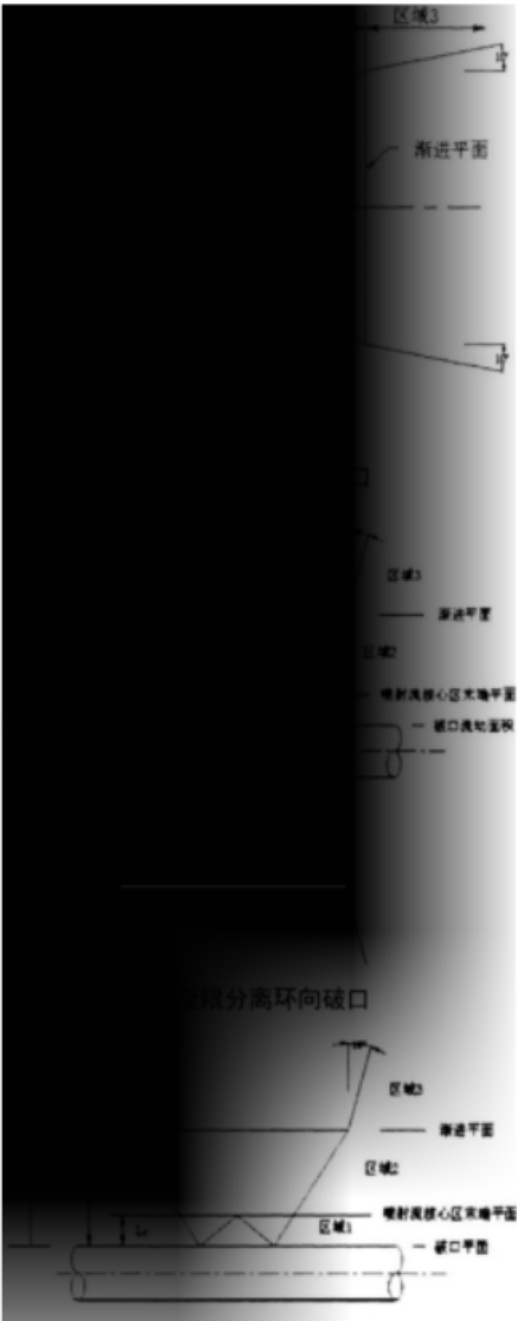
本附录给出的可接受的简化模型用于定义从管道破口喷出的喷射流的几何特征及方向,这些模型满足8.2的要求。喷射流的流体可以是过冷水、饱和液体、两相流或蒸汽。

喷射流几何模型采用的几个参数是滞止状态下的参数。如果在供给喷射流动的容器与破口平面之间没有不可逆的流动损失,那么容器的滞止状态就可以用来计算喷射模型参数。如果在容器与破口平面之间有不可逆的损失,那么可用本附录和附录B中的方法,根据容器的滞止状态和排放管线上不可逆的损失,来定义喷射流模型的参数。如果计算得到容器到破口平面之间滞止状态的变化,并考虑不可逆的损失,那么可以计算出破口平面滞止状态下的喷射流模型参数。

C.2 扩张型喷射流模型

C.2.1 概述

所讨论的模型基于Moody(参考文献[1])和EPRI(参考文献[2])的研究。考虑的几种破口形式的喷射流形状如图C.1所示。喷射流假设分为三个区域。区域1从破口延伸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。区域2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。在区域3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° 的角度膨胀。



c) 纵向破口

图C.1 喷射流几何形状

C.2.2 完全分离的环向破口

C.2.2.1 喷射区域1 ($0 \leq L \leq L_c$)

区域1包括喷射流核心的锥形区域和喷射流的其余部分。几何形状如图C.2所示。
喷射流核心区的长度与喷射破口平面喷射流的过冷度有关，采用下列公式计算：

$$\frac{L_c}{D_e} = 0.26\sqrt{\Delta T_{sub}/1.8} + 0.5 \dots\dots\dots (C.1)$$

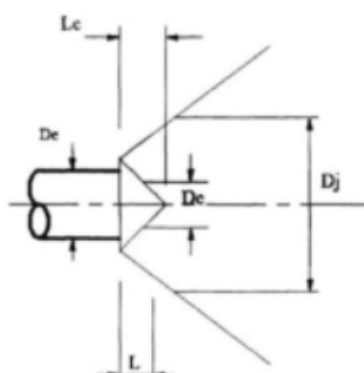
式中：

L_c ——喷射流核心的长度；

D_c ——管道内直径;

 ΔT_{sub} ——破口平面滞止状态下喷射流的过冷度,单位为摄氏度(°C)。

相对于容器处的条件,排放管线上不可逆流动损失降低了破口平面处喷射流的过冷温度,其影响如图C.3所示。



图C.2 完全分离的环向破口的喷射流核心区几何形状

区域1中, $0 \leq L \leq L_c$, 喷射流核心的直径 D_c 定义如下

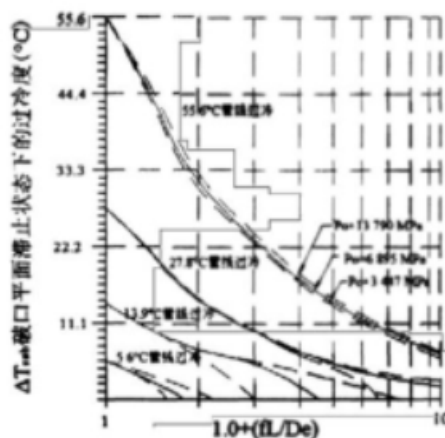
$$\frac{D_c}{D_s} = \sqrt{C_{Te}} \left(1 - \frac{L}{L_c}\right) \dots\dots\dots (C.2)$$

式中:

$$C_{Te}^* - C_{Te}^* = \begin{cases} 2.0 & \Delta T_{sub} > 0 \\ 1.26 & \Delta T_{sub} = 0 \end{cases}$$

L ——破口平面到靶物的距离

喷射流外部的面积由公式 (C.6) 给出, 在后续章节讨论。



图C.3 不可逆损失对喷射流过冷度的影响

C.2.2.2 喷射区域2 ($L_c < L < L_a$)

在喷射区域2中,喷射流体膨胀至渐进平面,射流面积比的计算公式如下:

$$\frac{A_2}{A_e} = \left(\frac{G_e^2}{\rho_m C_Y P_e} \right) \dots\dots\dots (C.3)$$

式中:

A_a ——渐进平面上的喷射流面积;

A_e ——5.1.1和5.1.2中描述的破口平面面积;

C_T ——稳态推力系数,在附录B中定义;

G_e ——破口平面单位面积上的质量流量;

P_o ——容器初始总压(滞止状态);

ρ_{ma} ——渐进平面处流体的密度。如果是两相流则密度则:

$$\rho_{ma}=1/[x/\rho_g+(1-x)/\rho_l]$$

其中:

x ——渐进平面压力 P_a 及滞止焓下的蒸汽中饱和蒸汽的质量含量,即干度;

ρ_l ——渐进平面压力下的饱和液体密度;

ρ_g ——渐进平面压力下的饱和蒸汽密度。

渐进平面喷射流压力 P_a 与下面的公式有关(参考文献[2])

$$\frac{P_a}{P_{amb}}=1-0.5\left(1-\frac{2P_{amb}}{P_o}\right)f(h_o) \dots\dots\dots (C.4)$$

式中:

P_{amb} ——环境压力;

P_a ——渐进平面的静压。

$$f(h_o) \text{——} f(h_o) = \begin{cases} \sqrt{0.1 + \left(\frac{h_o - h_l}{h_{fg}}\right)} & \left(\frac{h_o - h_l}{h_{fg}}\right) > -0.1 \\ 0 & \left(\frac{h_o - h_l}{h_{fg}}\right) < -0.1 \end{cases}$$

h_o ——容器内的滞止焓(假设容器内和破口平面处的 h_o 相同);

h_l, h_{fg} ——破口平面滞止压力下的饱和液体焓及汽化潜热。

该公式中,如果 P_{amb}/P_o 大于0.5,则令其等于0.5,滞止焓的函数 $f(h_o)$ 永远大于零。该公式用来计算渐进平面的静压,静压用于计算渐进平面处的密度。

渐进平面面积由公式(C.3)得到,为容器滞止压力和破口平面质量流量的函数。基于破口平面的滞止状态,可能需要利用两相临界流模型来计算喷射流。将均质平衡流动(HEM)模型(参考文献[3])用于饱和的或两相滞止状态下的喷射流,用滞止状态参数和Henry-Fauske模型(参考文献4)计算过冷喷射流,可以获得较好的结果(参考文献[2])。

随着排放管线损失的增加,渐进平面面积和破口平面滞止压力都减小。该影响可以从图C.4、图C.5中看出。然而,除非另外论证,公式(C.3)中 C_T, P_o, A_e 的值不能小于公式(D.1)中的初始喷射力,并且公式(C.3)中单位面积质量流量 G_e 也不能小于初始流量(参考文献[1])。

从破口平面到渐进平面的距离定义如下:

$$\frac{L_a}{D_e} = \frac{1}{2} \left(\sqrt{\frac{A_a}{A_e}} - 1 \right) \dots\dots\dots (C.5)$$

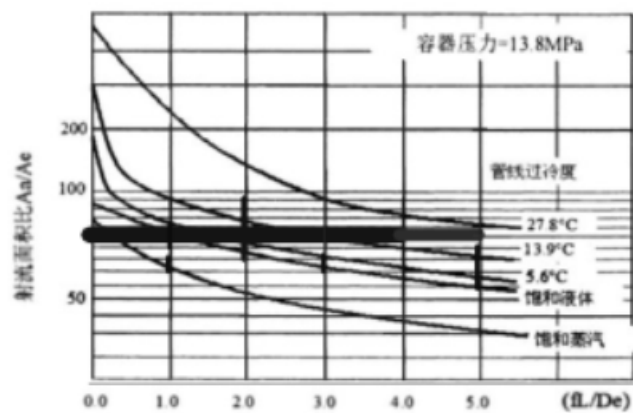
破口平面至渐进平面间(区域1和2)任意位置的喷射流面积有如下关系:

$$\frac{A_l}{A_{je}} = \left[1 + \frac{L}{L_a} \left(\frac{A_a}{A_{je}} - 1 \right) \right] \dots\dots\dots (C.6)$$

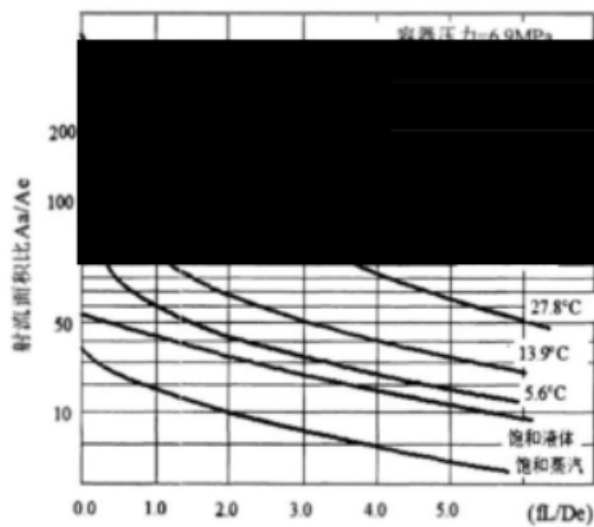
式中：

A_j ——喷射流面积；

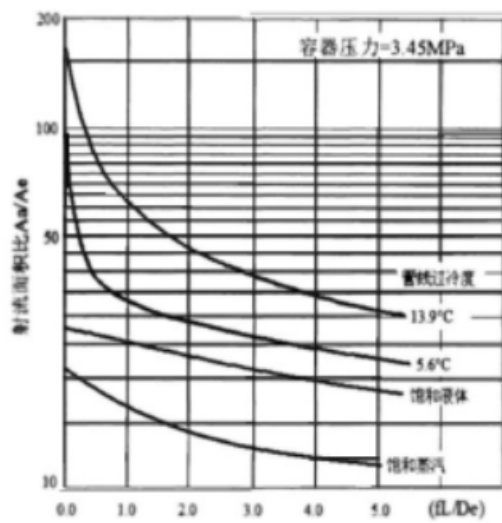
A_{je} —— $A_{je} = C_{Te}^* A_e$ 破口平面的喷射流面积。



a) 容器压力 13.8MPa



b) 容器压力 6.9MPa



c) 容器压力 3.45MPa

图C.4 不可逆损失对渐进平面面积比的影响（参考文献 2）



图C.5 不可逆损失对滞止压力的影响（参考文献[2]）

C.2.2.3 喷射区域3 ($L \geq L_a$)

区域3中，喷射流面积如下：

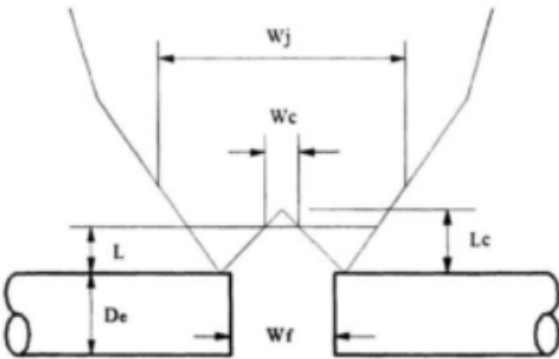
$$\frac{A_1}{A_s} = \left(1 + \frac{2(L - L_s)}{D_s} \tan 10^\circ \right)^2 \dots\dots\dots (C.7)$$

式中：
 D_s ——渐进平面的喷射流直径。

C.2.3 部分分离的环向破口

C.2.3.1 喷射流区域1 ($0 \leq L \leq L_c$)

喷射流形状如图C.6所示，应假设为一个完整的圆环，即 360° ，并从破口径向延展。喷射流形状基于C.1.1的喷射流参数，如下所示：



图C.6 受限环向破口的喷射流核心区几何形状

喷射流核心区的长度采用公式 (C.1) 计算，但用 W_f 代替其中的 D_c ：

$$\frac{L_c}{W_f} = 0.26 \sqrt{\Delta T_{sub} / 1.8} + 0.5 \dots\dots\dots (C.8)$$

式中：
 W_f ——分离距离， $W_f \leq D_c / 2$ 。
对于部分分离环向破口，喷射流核心区的长度不得大于 $D_c / 2$ 。若用公式 (C.8) 计算得到的核心区长度大于该值，则取 $D_c / 2$ 。

区域1中， $0 \leq L \leq L_c$ ，喷射流核心的宽度 W_c 定义如下：

$$\frac{W_c}{W_f} = C_{Tc}^* \left(1 - \frac{L}{L_c} \right) \dots\dots\dots (C.9)$$

喷射流面积按公式 (C.11) 计算，在下面章节讨论。

C.2.3.2 喷射流区域2 ($L_c < L < L_s$)

在区域2中，喷射流扩张至渐进平面。
 A_s / A_f 同完全分离环向破口一样，公式如 (C.3)。
其中：
 A_s —— $A_s = \pi (D_c + 2L_s) W_s$ 渐进平面上的喷射流面积；
 A_c —— $A_c = \pi D_c W_f$ 破口流通截面面积；
 W_s ——渐进平面上喷射流宽度。
到渐进平面的距离 L_s 如下：

$$\frac{L_s}{W_f} = \frac{1}{4} \left[\sqrt{\left(\frac{D_s}{W_f} - 1 \right)^2 + 4 \frac{D_s}{W_f} \left(\frac{A_s}{A_f} \right)} - \left(1 + \frac{D_s}{W_f} \right) \right] \dots\dots\dots (C. 10)$$

从破口到渐进平面（区域1和2）任意径向位置处的喷射流面积可按以下关系计算：

$$\frac{A_l}{A_f} = \left[1 + \frac{L}{L_s} \left(\frac{A_s}{A_f} - 1 \right) \right] \dots\dots\dots (C. 11)$$

式中：

$$A_{jf} \text{——} A_{jf} = C_{Te}^* A_f$$

C. 2. 3. 3 喷射流区域3（ $L \geq L_s$ ）

在渐进平面以外区域3的喷射流扩张角度与完全分离环向破口一样。

在区域3中， $L \geq L_s$ ，喷射流面积如下：

$$\frac{A_l}{A_s} = \left[1 + \frac{2(L - L_s)}{W_s} \tan 10^\circ \right] \left(\frac{D_s + 2L}{D_s + 2L_s} \right) \dots\dots\dots (C. 12)$$

C. 2. 4 纵向破口

纵向破口的喷射流形状如图C. 1 c) 所示，应假设与C. 1. 1完全分离环向破口相似。可以采用有相同面积圆形破口的喷射流直径，喷射流方向垂直于管道轴向。

C. 3 其他喷射流几何模型

如果采用参考文献[5]描述的“两相流喷射载荷模型”来计算喷射载荷，那么喷射流几何特征也可以用相同的模型来计算。该研究中的参数范围为：对于饱和蒸汽，滞止压力在60 bar～170 bar（6 MPa～17 MPa）之间；对于两相及过冷的喷射流，滞止状态过冷度不超过70℃（126°F）。

C. 4 非扩张喷射流

对于温度低于环境压力下饱和温度的液体喷射流和破口平面压力等于环境压力的气体喷射流，不会发生初始自由扩张。在这些情况下可压缩流体的喷射流假设以每侧10°的角度从破口平面开始扩张。不可压缩流体喷射流无喷射面积增加。这两种情况下在喷射面积内压力均布。

C. 5 参考文献

- [1] MOODY, F. J., Predictions of Blowdown Thrust and Jet Forces, ASME Transactions, 69HT31 (1969)
- [2] HEALZER, J. M. and SINGH, A., A Simplified Model for Jet Expansion and Impingement Loads, EPRI Report NP-4418 (1986)
- [3] HALL, D. G. and CZAPARY, L. S., Tables of Homogeneous Equilibrium Critical Flow Parameters for Water in SI Units, EG&G Report EGG-2056, September 1980.
- [4] HENRY, R. E. and FAUSKE, H. K., The Two-Phase Critical Flow of One-Component Mixtures in Nozzles, Orifices and Short Tubes, ASME Paper 70-WA/HT-5, November 1980, J. of Heat Transfer, May 1971.

- [5] WEIGAND, G.G. et al., "Two-Phase Jet Loads," NUREG/CR-2913, Sandia National Laboratory (prepared for the U.S. Nuclear Regulatory Commission) January 1983.

附 录 D
(资料性附录)

评定喷射流冲击效应的可接受的简化方法

D.1 概述

这里描述的是满足第8章要求的评定喷射流冲击效应的可接受的简化方法。附录C中的几何形状、假设及术语都适用于本附录。虽然D.2和D.3是专门针对完全分离破口的,但其中的给出的喷射流参数及D.4可用于部分分离破口的喷射载荷评定。

D.2 喷射流冲击力

广义动量方程描述的喷射排放力 F_b :

$$F_b = \frac{G_e^2 A_e}{\rho_e} + A_e (P_e - P_{amb}) \dots\dots\dots (D.1)$$

式中:

P_e ——破口平面的流体压力;
 ρ_e ——破口平面的流体密度。

为了计算靶物上的载荷,采用保守的准静态喷射力 F_j :

$$F_j = A_e (C_T P_o - P_{amb}) \cong C_T P_o A_e \dots\dots\dots (D.2)$$

然而,上述 F_j 要按下述内容修改:

- a) 对于 $\Delta T_{sub} > 0$ 的喷射流, C_T 在区域 1 内乘以 $2.0 / C_{Te}$, 其中根据 $fL / D = 0$ 及破口平面的滞止状态, 有 $C_{Te} = C_T$ 。
- b) 除非另外论证, F_j 不能小于公式 (D.1) 中的初始喷射力 (参考文献[1])。

达到恒力 F_j 的时间应与8.3一致。

施加到给定靶物上的喷射流冲击力是被靶物挡住的部分喷射流的函数。如果整个喷射流都被挡住,那么整个喷射力都施加到靶物上。

$$F_{jt} = F_j \dots\dots\dots (D.3)$$

如果靶物挡住了一部分喷射流,而非全部喷射流,则喷射力通过对靶物上的喷射压力分布进行积分得到:

$$F_{jt} = \int P_j dA_t \dots\dots\dots (D.4)$$

式中:

P_j ——冲击平面内径向喷射流压力分布,是时间的函数,如D.4中的描述;
 A_t ——靶物的面积。

通过喷射轴向力和一个近似的修正因子可以估算冲击载荷:

$$F_{imp} = K_\phi F_{jt} \dots\dots\dots (D.5)$$

式中:

F_{imp} ——靶物上的冲击力, 是时间的函数;

K_{ϕ} ——形状因子, 衡量靶物改变喷射流动量的能力, 如D. 3中的描述。

D. 3 形状因子

形状因子 K_{ϕ} 用来衡量靶物改变喷射流动量的能力, 与靶物的形状及靶物表面与喷射流之间的角度有关。可以这样理解形状因子, 一个法线方向与冲击流呈 ϕ 角的平面会使流动方向偏转至平行于平面的方向, 如图D. 1 a)所示。若平面的法向与喷射流轴线之间的夹角为 ϕ , 则该平面的形状因子等于 $\cos \phi$ 。曲面的形状因子可对喷射流冲击面积进行积分得到。按这种方法得到的可接受的形状因子在图D. 1中给出。

对于那些完全被喷射流包围在内的靶物, 可通过试验数据得到其形状因子。形状因子 K_{ϕ} 与阻力系数相关, 公式如下:

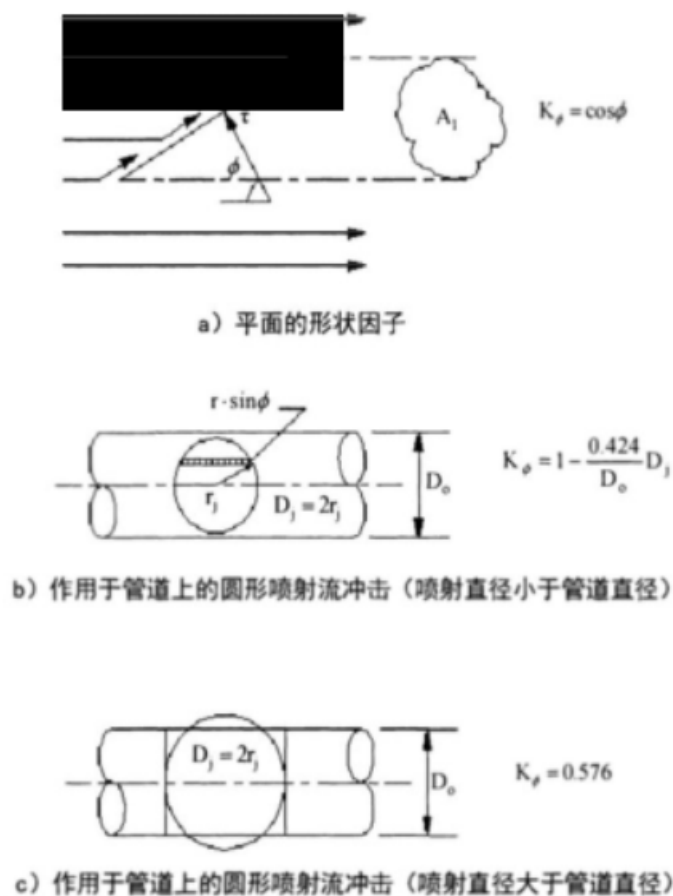
$$K_{\phi} = \frac{1}{2} C_D \dots\dots\dots (D. 6)$$

阻力系数是关于当地雷诺数的函数。只有当喷射流的截面覆盖整个靶物的时候才可以用阻力系数计算形状因子和喷射载荷。

为了确定不同形状物体在流场中的阻力系数, 进行了重要的试验。几种可接受的典型阻力系数在图D. 2、图D. 3和表D. 1中给出。

D. 4 喷射流压力

对于喷射流中心线上较大的靶物, 可能需要计算靶物上的压力分布。应承认在现有的应用中, 典型的喷射流是欠膨胀的, 也就意味着破口平面处的喷射流压力大于环境压力。当喷射流离开破口后迅速膨胀, 从而与周围压力平衡。喷射流放射状喷出, 远离破口, 喷射流的边缘以一个角度移动, 远离喷射流中心线。喷射流作用于靶物上的压力与垂直于靶物的流动分量相关。因此, 垂直于喷射流中心线的较大靶物上的压力分布沿径向或沿远离喷射流中心线的方向减小。



图D.1 喷射流冲击形状因子的计算

有几种方法可用于计算喷射载荷。一种与试验数据匹配（参考文献[4]）的简化方法是按附录C计算的喷射面积和公式（D.2）定义的总的喷射力得到压力分布。可以使用以下公式来应用该模型。

对于不在喷射流中心线上的小靶物，需要判断靶物上的冲击载荷是否可以用喷射流径向压力分布计算。特别是在喷射流边缘处，喷射流可能远离并且不平行于喷射流中心线。以下推荐的径向压力分布是通过垂直于喷射流中心线大靶物的压力分布数据相比得到的。

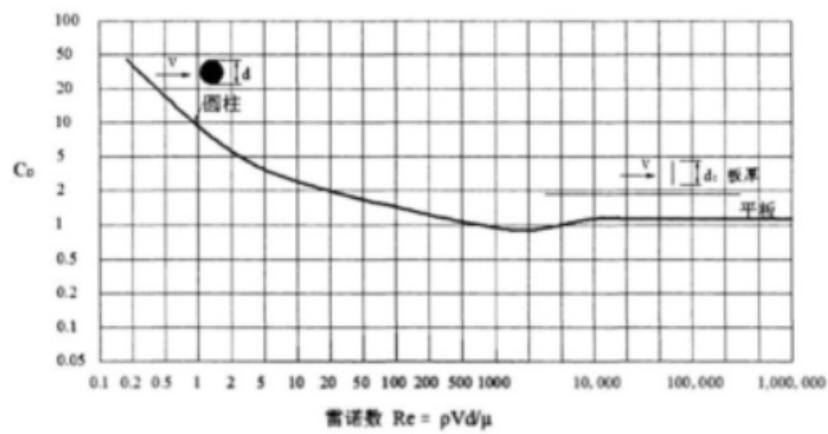
D.4.1 完全分离环向破口或纵向破口

D.4.1.1 区域1（ $0 \leq L \leq L_c$ ）核心内以及核心外的喷射流压力如下：

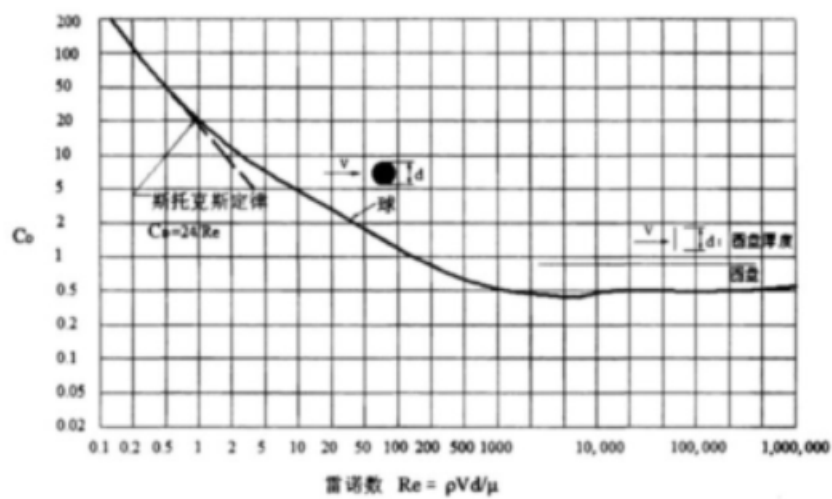
核心内： $0 \leq r \leq D_c / 2$

$$P_j = P_{oe} = \frac{F_j}{A_{je}} \dots\dots\dots (D.7)$$

式中：
 P_j ——为破口平面的滞止压力。
核心外： $D_c / 2 \leq r \leq D_j / 2$



图D.2 二维圆柱绕流和平板绕流的阻力系数（参考文献[3]）



图D.3 球和圆盘的阻力系数（参考文献[3]）

物体形状			Co	雷诺数
圆柱			1.2	10 ⁴ ~1.5×10 ⁵
椭圆柱			0.6	4×10 ⁴
			0.46	10 ⁵
			0.32	2.5×10 ⁴ ~10 ⁵
			0.29	2.5×10 ⁴
			0.20	2×10 ⁵
正方棱柱			2.0	3.5×10 ⁴
三角棱柱			1.6	10 ⁴ ~10 ⁵
			2.0	10 ⁴
			1.72	10 ⁴
			2.15	10 ⁴
			1.6	10 ⁴
			2.2	10 ⁴
			1.39	10 ⁴
半圆面			1.8	10 ⁵
			1.0	10 ⁵
半圆面			2.3	4×10 ⁴
			1.12	4×10 ⁴

图D.4 阻力系数数据（参考文献[2]）

如果 $\left[\left(D_j/D_c\right)^2+2\left(D_jD_c/D_c^2\right)+3\left(D_c/D_c\right)^2\right]<6C_{Te}^*$ 则

$$\frac{P_j}{P_{oe}} = \left(\frac{D_j - 2r}{D_j - D_c} \right) \left[1 - \frac{2[D_j^2 + D_j D_c + D_c^2 - 3D_c^2 C_{Te}^*]}{(D_j^2 - D_c^2)} \right] \left(\frac{2r - D_c}{D_j - D_c} \right) \dots\dots\dots (D.8)$$

如果 $\left[(D_j / D_c)^2 + 2(D_j D_c / D_c^2) + 3(D_c / D_c)^2 \right] > 6C_{Te}^*$ 则

$$\frac{P_j}{P_{oe}} = \left(\frac{D_j - 2r}{D_j - D_c} \right) \left[\frac{6(D_c^2 C_{Te}^* - D_c^2)}{(D_j - D_c)(D_j + 3D_c)} \right] \dots\dots\dots (D.9)$$

D.4.1.2 区域2 ($L_c < L < L_a$) 的喷射流压力如下:

$$\frac{P_j}{P_{jc}} = \left(1 - \frac{2r}{D_j} \right) \left\{ 1 - 2 \left(\frac{2r}{D_j} \right) \left[1 - 3C_{Te} \left(\frac{D_c}{D_j} \right)^2 \left(\frac{P_{oe}}{P_{jc}} \right) \right] \right\} \dots\dots\dots (D.10)$$

式中:

$$\frac{P_{jc}}{P_{oe}} \longrightarrow \frac{P_{jc}}{P_{oc}} = F_c - \left[F_c - 3C_{Te} \left(\frac{D_c}{D_a} \right)^2 \right] \frac{L_a (L - L_c)}{L (L_a - L_c)}, \text{ 为 } L_c < L < L_a \text{ 处喷射流中心线压力}$$

当 $(D_j / D_c)^2 \leq 6C_{Te}^*$ 时, 在 $L = L_c$ 处, $F_c = 1.0$;
当 $(D_j / D_c)^2 > 6C_{Te}^*$ 时, 在 $L = L_c$ 处, $F_c = 6C_{Te}^* (D_j / D_c)^2$ 。

C_{Te} ——破口平面状态的准静态推力系数。

D.4.1.3 区域3 ($L \geq L_a$) 的喷射流压力如下:

$$\frac{P_j}{P_{jc}} = \left(\frac{D_j - 2r}{D_j} \right) \dots\dots\dots (D.11)$$

式中:

P_{jc} —— $P_{jc} = 3F_j / A_j$, 为 $L \geq L_a$ 处的喷射流中心线压力。

D.4.2 部分分离环向破口

D.4.2.1 区域1 ($0 \leq L \leq L_c$) 核心内以及核心外的喷射流压力如下:

核心内: $0 < W < W_c$

$$P_j = P_{oe} = \frac{F_j}{A_{jf}} \dots\dots\dots (D.12)$$

核心外: $W_c < W < W_j$

如果 $\left(\frac{W_j - W_c}{W_f} \right) \leq 3C_{Te}^* \left(\frac{D_c}{D_c + 2L} \right)$ 则

$$\frac{P_j}{P_{oe}} = \left(\frac{W_j - W}{W_j - W_c} \right) \left\{ 1 - 3 \frac{(W - W_c)}{(W_j - W_c)^2} \left[(W_j - W_c) - 2C_{Te}^* W_f \left(\frac{D_c}{D_c + 2L} \right) \right] \right\} \dots\dots\dots (D.13)$$

如果 $\left(\frac{W_j - W_c}{W_f} \right) > 3C_{Te}^* \left(\frac{D_c}{D_c + 2L} \right)$ 则

$$\frac{P_j}{P_{se}} = 3 \left(\frac{W_j - W_c}{W_j - W_c} \right)^2 \left[\frac{W_c C_{Te} \left(\frac{D_e}{D_e + 2L} \right) - W_c}{(W_j - W_c)} \right] \dots\dots\dots (D. 14)$$

D. 4. 2. 2 区域2 ($L_c < L < L_a$) 的喷射流压力如下:

$$\frac{P_j}{P_{se}} = \left(1 - \frac{W}{W_j} \right) \left\{ 1 - 3 \left(\frac{W}{W_j} \right) \left[1 - 2C_{Te} \left(\frac{W_c}{W_j} \right) \left(\frac{D_e}{2L + D_e} \right) \left(\frac{P_{se}}{P_{jc}} \right) \right] \right\} \dots\dots\dots (D. 15)$$

式中:

$$\frac{P_{jc}}{P_{se}} \text{——} \frac{P_{jc}}{P_{se}} = F_c - \left[F_c - 2C_{Te} \left(\frac{D_e W_c}{(D_e + 2L_a) W_a} \right) \right] \frac{L_a (L - L_c)}{L (L_a - L_c)}, \text{ 为 } L_c < L < L_a \text{ 处的喷射流中心线处的压力。}$$

当 $\frac{W_j}{W_c} < 3C_{Te} \frac{D_e}{D_e + 2L_c}$ 时 $F_c = 1.0$;

当 $\frac{W_j}{W_c} > 3C_{Te} \frac{D_e}{D_e + 2L_c}$ 时 $F_c = 3C_{Te} \frac{W_c}{W_j} \left(\frac{D_e}{D_e + 2L_c} \right)$ 。

D. 4. 2. 3 区域3 ($L \geq L_a$) 的喷射流压力如下:

$$\frac{P_j}{P_{jc}} = \left(\frac{W_j - W}{W_j} \right) \dots\dots\dots (D. 16)$$

式中:

P_{jc} —— $P_{jc} = 2F_j / A_j$, 为 $L \geq L_a$ 处的喷射流中心线处的压力。

D. 4. 3 低压及非膨胀喷射流

如果破口平面的滞止压力足够接近环境压力, 公式 (C. 1) 计算得到的核心区长度 L_c 可能大于公式 (C. 5) 计算的破口到渐进平面的距离 L_a 。这种情况下核心区长度 L_c 可设为 0, 并且假定喷射流截面上的压力分布均匀, 为 F_j / A_j 。

对于环境压力下温度低于饱和温度的液体喷射流和破口平面处压力等于环境压力的气体喷射流, 可假定喷射流截面上的压力分布均匀, 并且喷射流面积和总的喷射力与式 (D. 1) 或式 (D. 2) 的定义一致, 这样总的喷射动量守恒。

D. 5 喷射流温度

对于饱和蒸汽, 两相流或过冷液体喷射流, 与环境混合在一起不会显著改变喷射流的焓。因此, 沿喷射流任何一点处, 流体的焓应该假设与管道内流体的焓相同。大致的喷射流温度可以根据靶物上的压力和焓通过水蒸气表查出。

D. 6 其他喷射载荷及压力模型

喷射流冲击载荷和压力分布也可以用 Sandia (参考文献 [5]) 描述的“两相喷射流载荷模型”来计算, 除了以下提到的例外。这种模型必须也用来计算喷射流几何形状, 并且只能在已开展研究的参数范

围内使用。这包括滞止压力在60 bar~170 bar (6 MPa~17 MPa) 的蒸汽, 破口平面滞止状态过冷度不超过70℃ (126°F) 的两相流和过冷液体喷射流。

Sandia模型没有提供方法来计算位于 $L < L_c$ 内靶物上的载荷。对于这些靶物, 喷射流冲击载荷可以用最小的 L/D 曲线来估算。对于处在 $L < L_c$ 范围内的靶物 (L_c 按Sandia模型或式 (C.1) 计算), 冲击载荷应假设为用Sandia模型, 或按D.2~D.4计算出的载荷的较大者。

D.7 参考文献

- [1] LAHEY, R. T., JR. and MOODY, F. J., Loss-of-Coolant Accident Evaluation, The Thermal-Hydraulics of a Boiling Water Reactor, Section 9.2, American Nuclear Society, La Grange Park, Illinois(1977).
- [2] LINDSEY, W. F., NACA Tech Report 619(1938).
- [3] BINDER, Fluid Mechanics, Prentice Hall, New York, N.Y. (1947).
- [4] HEALZER, J. M. and SINGH, A., A Simplified Model for Jet Impingement Loads, EPRI Report NP-4418, January 1986.
- [5] WEIGAND, G. G. et al., "Two-Phase Jet Loads," NURED/CR-2913, Sandia National Laboratory (prepared for the U.S. Nuclear Regulatory Commission) January 1983.

附录 E (资料性附录) 破裂排除区

E.1 破裂排除区边界

破裂排除区内的管道需满足E.2的准则。安全壳贯穿件密封头和远离隔离阀的辅助厂房固定点之间满足ASME BPVC III:2007或RCC-M:2007规范的核2级或3级高能流体管道不需要假想破裂(即破裂排除区邻近安全壳贯穿件)。

E.2 破裂排除区准则

E.2.1 对于按ASME BPVC III:2007设计的情形:

- 安全壳贯穿件应满足 ASME BPVC III:2007 NE-1120 的要求;
- 破裂排除区内管道的应力不应超过下述规定的排除中间破裂的限值:
考虑持续载荷、偶然载荷以及热胀载荷,由 ASME BPVC III:2007 NC/ND-3653 公式(9)和(10)之和计算得到的最大应力值,超过 $0.8(1.8S_h + S_A)$ 或者 $0.8(1.5S_y + S_A)$;
其中:载荷应取 A 和 B 运行工况下的;确定破裂位置时不包含地震载荷;
- 对于内压、自重和管道破裂组合的载荷,按照 ASME BPVC III:2007 NC-3652 中公式(9)得到的破裂排除区内管道的最大应力不应超过 $2.25 S_h$ 和 $1.8 S_y$ 之间的较小值;
- 应设计破裂排除区终端固定点和贯穿件来保护破裂排除区免受在破裂排除区外假设的管道破裂引起的甩管影响;
- 应分析终止在破裂排除区的管道的破裂对破裂排除区的影响(甩管、喷射流冲击、流体卸压瞬态);
- 安全壳和屏蔽厂房之间环形区域内高能管道的防护管道组件是安全壳边界的部分,应按照 ASME BPVC III:2007 NE 部分 MC 级设计;
- 除了在对封闭工艺管道最大运行压力下进行压力测试外,安全壳环形区域内的防护管道组件应按照本规范中的相关要求设计;
- 防护管道的设计压力和温度应等于或大于电厂正常工况下封闭工艺管道的最大运行压力和温度。安全壳设计压力和温度与安全停堆地震组合的载荷不应超过 ASME BPVC III:2007 NE-3221 (c) 规定的 C 级运行限值;
- 当隔离阀的可运行性、结构完整性或者安全壳完整性有要求时,能够约束由管道和构成安全壳隔离边界的阀门的上游或下游的管道破裂引起的扭矩和弯矩的固定点或五向约束要合理地布置在靠近隔离阀或贯穿件的地方;
- 固定点和五向约束不应阻挡进行 ASME 第 XI 卷规定的在役检查需要的通路;
- 应避免焊接附属物。在焊接附属物必要的地方,应进行详细的应力分析来证明符合本章的应力限值。

E.2.2 对于按RCC-M设计的情形:

如果下述全部要求都得到满足(被保护管段设计准则),不假设根据RCC-M:2007 2级规则设计的高能管道出现破裂和贯穿裂纹。

- 管段的长度尽可能短;

- 用 RCC-M:2007 C 3650 的公式 (10) 和公式 (7) 算得的应力比不超过 $0.8(1.2S_h + S_A)$;
- 在贯穿区以外的管道发生断裂时产生的荷载下, 用 RCC-M:2007 C 3650 公式 (10) 算得的最大应力不超过 $1.8 S_h$ (考虑的荷载是重量、压力和断裂后果);
- 至少能够进行 100% 体积检验, 且详细的应力分析表明, 所有的应力值不超过上两条的应力限值, 否则, 管道外表面不得有焊缝;
- 环焊缝或纵焊缝的数量受到限制, 如果使用套管, 除非为定期体积检验考虑了可达性, 否则不得有任何纵焊缝, 管道的直管段使用的是无焊缝的管子;
- 几何上不连续的部分, 如管道和阀门连接处截面变化的部分, 管道分支接头部分, 管壁变化的部分, 设计使它们的应力集中减少到最小;
- 所有的焊缝都要作加强的检验。

E.3 破裂排除区内的破裂

破裂排除区内的管道不假想破裂也不假设贯穿裂纹, 以下的除外:

- 在评价环境、水淹和隔室升压效应时, 主蒸汽和主给水管道上要假设纵向裂纹 (裂纹流通面积为 0.1 m^2), 且该处的裂纹对重要构筑物、系统和部件产生最不利影响。不需评价该裂纹的甩管和喷射流冲击的动态效应;
- 对于主蒸汽管道或主给水管道的更严重破裂的情况, 对承受甩管和喷射流冲击载荷的主蒸汽隔离阀间与主控室之间的墙体, 以及主蒸汽隔离阀间与安全相关的电力设备间之间的地板也应进行评价。 0.1 m^2 的破裂引起的隔室升压载荷不与更严重破裂的情况的甩管和喷射流冲击载荷进行组合;
- 由于主蒸汽排污管环向破裂最严重的情况会导致隔室升压效应, 因此应对蒸汽发生器排污的破裂排除区内的结构进行评价。

E.4 制造和安装要求

破裂排除区内的管道应满足下列制造和安装要求:

- 安全壳和屏蔽厂房之间环形区域内高能管道的防护管道组件是安全壳边界的部分, 应按照 ASME BPVC III:2007 NE 部分 MC 级制造;
- 除了在被封闭工艺管道的最大运行压力下进行压力测试外, 安全壳环形区域内的防护管道组件应按照本规范中的要求制造;
- 如果能实现, 应通过用弯管代替焊接的弯头使环向管道焊缝数量最小化;
- 破裂排除区内不应有纵向管道接合焊缝;
- 防护管道内的封闭管道不应有环向和纵向焊缝;
- 破裂排除区内的 ASME BPVC III:2007 3 级管道应满足 ASME BPVC III:2007 2 级管道的制造和检查要求。

E.5 在役检查准则

破裂排除区内的管道应按下列要求进行在役检查:

- 每个检查间隔完成的在役检查应包括对破裂排除区内环向管道焊缝的检查;
- 依照 ASME 规范 第 XI 卷 IWA-2400, 要进行 100% 体积的在役检查。