



# 中华人民共和国国家标准

GB/T 18442.6—2019  
代替 GB/T 18442.6—2011

---

## 固定式真空绝热深冷压力容器 第 6 部分：安全防护

Static vacuum insulated cryogenic pressure vessels—  
Part 6: Safety protection

2019-12-31 发布

2019-12-31 实施

国家市场监督管理总局 发布  
国家标准化管理委员会

目 次

前言 ..... I

1 范围 ..... 1

2 规范性引用文件 ..... 1

3 术语和定义 ..... 2

4 安全附件、仪表和装卸附件..... 2

附录 A（规范性附录） 罐体安全泄放量和超压泄放装置排放能力计算 ..... 8



## 前 言

GB/T 18442《固定式真空绝热深冷压力容器》分为以下 7 个部分：

- 第 1 部分：总则；
- 第 2 部分：材料；
- 第 3 部分：设计；
- 第 4 部分：制造；
- 第 5 部分：检验与试验；
- 第 6 部分：安全防护；
- 第 7 部分：内容器应变强化技术规定。

本部分为 GB/T 18442 的第 6 部分。

本部分按照 GB/T 1.1—2009 给出的规则起草。

本部分代替 GB/T 18442.6—2011《固定式真空绝热深冷压力容器 第 6 部分：安全防护》，与 GB/T 18442.6—2011 相比，除编辑性修改外主要技术变化如下：

- 修改了一般要求，增加了带电气控制元件的防爆要求、安全阀、仪表和装卸附件与管路的连接要求；
- 修改了内容器超压泄放装置的设置要求，修改了超压泄放装置典型设置示意图；
- 修改了超压泄放装置的设计要求；
- 增加了内容器超压泄放装置的安装要求、外壳防爆装置的型式及其设置位置要求；
- 修改了紧急切断阀的设置要求、导静电接地装置的接地电阻值、液位测量装置和压力测量装置要求、装卸附件要求；
- 增加了温度测量装置、真空度测量装置和带传感器或电气控制元件的测量装置的相关要求；
- 删除了装卸软管及其相关要求；
- 附录 A 中增加了对于储存非易燃、易爆介质的罐体安全泄放量计算方法的规定，修改了式(A.5)。

本部分中罐体安全泄放量和超压泄放装置排放能力的计算参考了 ISO 21013-3:2016《深冷容器 深冷工况用超压泄放装置 第 3 部分：尺寸与排放能力的确定》。

本部分由全国锅炉压力容器标准化技术委员会(SAC/TC 262)提出并归口。

本部分起草单位：上海华理安全装备有限公司、上海市气体工业协会、张家港中集圣达因低温装备有限公司、液化空气(中国)投资有限公司、查特深冷工程系统(常州)有限公司、中国特种设备检测研究院、华东理工大学、沈阳特种设备检测研究院、上海华谊集团装备工程有限公司。

本部分主要起草人：史斐菲、周伟明、吴全龙、高洁、陈勤俭、滕俊华、陈文锋、陈朝晖、惠虎、刘铎、魏勇彪。

本部分所代替标准的历次版本发布情况为：

- GB/T 18442.6—2011；
- GB 18442—2001。

## 固定式真空绝热深冷压力容器

### 第6部分：安全防护

#### 1 范围

GB/T 18442 的本部分规定了固定式真空绝热深冷压力容器(以下简称“深冷容器”)使用的安全附件、仪表、装卸附件的选用原则、设置要求以及罐体安全泄放量和超压泄放装置排放能力的计算。

本部分适用于同时满足以下条件的深冷容器：

- a) 内容器工作压力不小于 0.1 MPa；
- b) 几何容积不小于 1 m<sup>3</sup>；
- c) 绝热方式为真空粉末绝热、真空复合绝热或高真空多层绝热；
- d) 储存介质为标准沸点不低於-196 ℃的冷冻液化气体。

本部分不适用于下列范围的深冷容器：

- a) 内容器和外壳材料为有色金属或非金属的；
- b) 球形结构的；
- c) 堆积绝热方式的；
- d) 移动式的；
- e) 储存标准沸点低於-196 ℃冷冻液化气体介质的；
- f) 储存介质按 GB 12268 规定为毒性气体的；
- g) 国防军事装备等有特殊要求的。

#### 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。

GB/T 150(所有部分) 压力容器

GB/T 567.1 爆破片安全装置 第1部分：基本要求

GB/T 567.2 爆破片安全装置 第2部分：应用、选择与安装

GB/T 567.3 爆破片安全装置 第3部分：分类及安装尺寸

GB/T 567.4 爆破片安全装置 第4部分：型式试验

GB/T 18442.1 固定式真空绝热深冷压力容器 第1部分：总则

GB/T 18442.3 固定式真空绝热深冷压力容器 第3部分：设计

GB/T 18442.5 固定式真空绝热深冷压力容器 第5部分：检验与试验

GB/T 24918 低温介质用紧急切断阀

GB/T 29026 低温介质用弹簧直接载荷式安全阀

JB/T 6804 抗震压力表

TSG 21 固定式压力容器安全技术监察规程

### 3 术语和定义

GB/T 150、GB/T 18442.1、GB/T 18442.3、GB/T 18442.5 界定的术语和定义适用于本文件。

### 4 安全附件、仪表和装卸附件

#### 4.1 一般要求

- 4.1.1 安全附件、仪表和装卸附件的设置,除应符合 TSG 21 和本部分的规定外,还应满足设计文件的要求。
- 4.1.2 安全附件包括超压泄放装置(安全阀、爆破片装置)、外壳防爆装置、紧急切断装置以及导静电装置等。
- 4.1.3 仪表包括压力测量装置、液位测量装置、真空度测量装置等。
- 4.1.4 装卸附件包括装卸阀门、装卸接头等。
- 4.1.5 选用的安全附件、仪表和装卸附件应与储存介质相适应。
- 4.1.6 安全附件和装卸附件的制造许可和型式试验应符合相应安全技术规范的要求。
- 4.1.7 安全附件、仪表和装卸附件应符合相应安全技术规范和产品标准的规定,且有产品质量证明书或产品质量合格证。
- 4.1.8 储存易燃、易爆介质的深冷容器,采用带电气控制元件的安全附件、仪表和装卸附件时,应符合电气元件防爆设计的相关标准的要求。
- 4.1.9 安全阀、压力表安装前,应进行校验和检定,合格后应重新铅封。
- 4.1.10 安全附件、仪表与管路之间的连接可采用焊接连接、法兰连接或螺纹连接等方式。
- 4.1.11 装卸附件与管路之间的连接应尽量采用焊接连接或法兰连接。

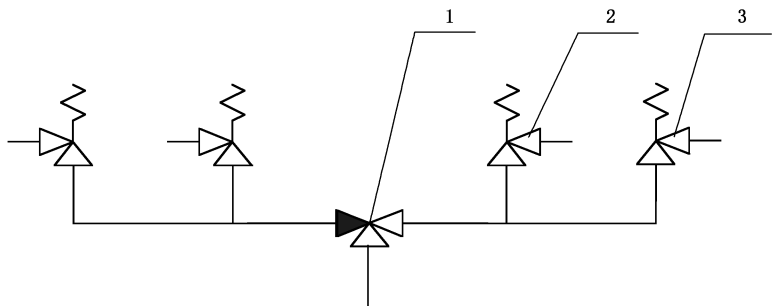
#### 4.2 内容器超压泄放装置

##### 4.2.1 内容器超压泄放装置的设置要求

4.2.1.1 内容器应至少设置两组相互独立的超压泄放装置,任何情况下应保证至少有一组超压泄放装置与内容器保持连通。为满足安全泄放的要求,每一组超压泄放装置应设置一个全启式弹簧安全阀作为主泄放装置,且并联一个全启式弹簧安全阀或爆破片作为辅助泄放装置。充装易燃、易爆介质的内容器,辅助泄放装置应选用安全阀。

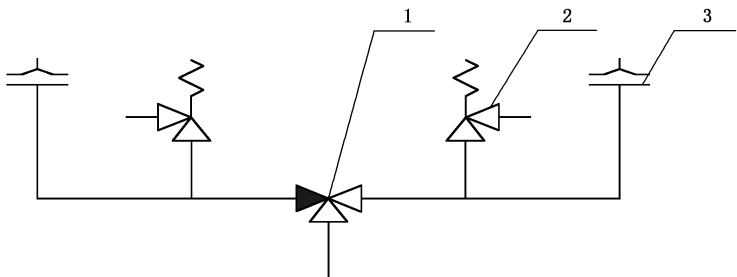
4.2.1.2 内容器按图 1 或图 2 设置超压泄放装置时,应满足下列要求:

- a) 主安全阀的整定压力应不大于内容器设计压力,回座压力应不低于整定压力的 0.90 倍;
- b) 辅助泄放装置的动作压力应不小于主安全阀的整定压力,且不大于内容器设计压力的 1.1 倍;
- c) 主安全阀的排放能力应保证内容器在非火灾条件下的压力不超过其设计压力的 1.1 倍,每组超压泄放装置的总排放能力应保证内容器在火灾条件下的压力不超过其设计压力的 1.21 倍;
- d) 每一个安全阀或爆破片装置的排放能力均应满足按非火灾条件考虑时内容器的安全泄放要求,每一组超压泄放装置的排放能力均应满足按火灾条件考虑时内容器的安全泄放要求。



说明：  
1——切换阀；  
2——安全阀；  
3——安全阀。

图 1 安全阀与安全阀组合设置示意



说明：  
1——切换阀；  
2——安全阀；  
3——爆破片装置。

图 2 安全阀与爆破片组合设置示意

- 4.2.1.3 内容器超压泄放装置的设计应符合下列要求：
- a) 安全阀应符合 GB/T 29026 的规定；
  - b) 爆破片装置应符合 GB/T 567.1、GB/T 567.2、GB/T 567.3、GB/T 567.4 的规定；
  - c) 超压泄放装置的入口管设计应符合 GB/T 18442.3 的规定；
  - d) 储存易燃、易爆介质时，超压泄放装置的出口应装设泄放管，将排放介质引至安全地点；
  - e) 选用的爆破片在爆破时不应产生碎片、脱落和火花，宜采用反拱刻槽型爆破片；
  - f) 气体的排放应畅通无阻，泄压排出的气体不应直接冲击容器和主要受力结构件；
  - g) 能承受容器内部的压力、可能出现的超压及包括液体冲击力在内的动载荷；
  - h) 出口处应防止雨水和杂物的积聚，并防止任何异物的进入；
  - i) 应考虑超压泄放装置的入口压降和出口背压的影响。
- 4.2.1.4 内容器超压泄放装置的安装应符合下列要求：
- a) 安全阀安装时应铅直安装；
  - b) 超压泄放装置与罐体之间不宜安装截止阀门。为便于超压泄放装置的校验、维修与更换，经使用单位主管压力容器安全技术负责人批准，且采取可靠的防范措施，方可在超压泄放装置与罐体之间安装截止阀门。在深冷容器正常使用和运行期间，截止阀门应保证处于全开状态（加铅封或锁定），且其结构和通径应不影响超压泄放装置的安全泄放。
- 4.2.1.5 内容器超压泄放装置应有清晰、永久的标记，标记内容应至少包括：

- a) 超压泄放装置动作压力；
- b) 额定的排气能力或最小泄放面积；
- c) 制造许可证编号及标志；
- d) 制造单位名称或标识商标。

#### 4.2.2 内容器安全泄放量

4.2.2.1 内容器超压泄放装置的排放能力应不小于内容器需要的安全泄放量。内容器需要的安全泄放量及超压泄放装置的排放能力计算方法按附录 A 的规定。

4.2.2.2 进行内容器需要的安全泄放量计算时,至少应考虑到下列工况及可能的组合:

- a) 绝热系统结构完好且处于正常的真空状态下,外部为环境温度,内容器的温度为泄放压力下所储存介质的饱和温度；
- b) 绝热系统结构完好且处于正常的真空状态下,外部为环境温度,内容器的温度为泄放压力下所储存介质的饱和温度,且增压系统处于全开工作状态；
- c) 绝热系统结构完好,但夹层已丧失真空的状态下,外部温度为环境温度,内容器的温度为泄放压力下所储存介质的饱和温度；
- d) 深冷容器的绝热系统结构完好或部分完好,但夹层真空已丧失,且外部遭遇火灾或遭遇 922 K 及以上高温；
- e) 深冷容器的绝热系统结构完全损坏,且夹套外部遭遇火灾或遭遇 922 K 及以上高温；
- f) 连接高压源与内容器的管路中的其他阀的流通能力；
- g) 泵的可能组合的循环使用的影响；
- h) 以可能的最大流量对工作温度下的储罐加注带液闪蒸气体。

4.2.2.3 设计人员应根据实际条件判明可能发生的各种工况,包括 4.2.2.2 列出的 a)~h) 的工况及可能的组合工况。

4.2.2.4 附录 A 未规定针对 4.2.2.2 中的工况 f)、g) 和 h) 的计算方法,设计人员应根据实际条件判明是否存在这些工况。存在这些工况时应按热力学基本理论的方法,充分估计这些工况可能产生的最大影响。

4.2.2.5 内容器超压泄放装置的排放能力应满足 4.2.2.2 中的 a)~d)、f)、g)、h) 中可能有几种工况同时发生时的安全泄放要求,但也应充分研究发生 4.2.2.2 中极端工况 e) 的可能。

#### 4.3 外壳防爆装置

##### 4.3.1 外壳防爆装置的设置要求

4.3.1.1 外壳应设置防爆装置,其泄放压力应不大于 0.05 MPa,其排放能力足以使夹层的压力限制在不超过 0.1 MPa。

4.3.1.2 防爆装置应能耐大气腐蚀,材料应与环境温度相适应。

4.3.1.3 防爆装置应能防止绝热材料的堵塞。防爆装置应尽可能设置在外壳顶部位置。

4.3.1.4 外壳防爆装置可采用自紧式防爆装置或焊接式爆破片装置。自紧式防爆装置的盖板应有相应的保护措施。采用焊接式爆破片装置时,与外壳本体连接也应采用焊接型式,并应有防雨、防尘等保护措施。

##### 4.3.2 外壳防爆装置的排放面积

外壳防爆装置的排放面积一般不小于内容器几何容积( $\text{m}^3$ )与  $340 \text{ mm}^2/\text{m}^3$  的乘积,但不必超过  $5\,000 \text{ mm}^2$ 。

## 4.4 紧急切断装置

### 4.4.1 紧急切断装置的设置要求

4.4.1.1 储存易燃、易爆介质的深冷容器,应按如下要求设置紧急切断装置,但确认在工程系统中已设置紧急切断装置或类似的能防大量泄漏的其他紧急闭止装置时除外:

- a) 应在液相进出管线上尽量靠近罐体的位置设置紧急切断装置。
- b) 紧急切断装置一般由紧急切断阀、远程控制系统以及易熔合金塞组成。紧急切断装置应动作灵活、性能可靠、便于检修,且不应兼作他用。
- c) 紧急切断阀应符合 GB/T 24918 的规定,且阀体不应采用铸铁或非金属材料制造,紧急切断阀的上阀杆不应安装手轮。

4.4.1.2 在遭遇火灾或充装、排液过程中发生意外泄漏时,紧急切断装置应能自动关闭,且该装置应能进行远程控制。

4.4.1.3 当远程控制系统采用气动控制系统时,所用气体宜采用外置式压缩空气源,且满足下列要求:

- a) 压缩空气应无油且洁净、干燥;
- b) 压缩空气的压力应与紧急切断阀的操作压力相匹配,且保持稳定;
- c) 气动控制系统的管路一般采用不锈钢材料。

4.4.1.4 设有远程控制接口,便于远程控制系统关闭操作的装置,应设置在工程系统中人员易于到达的位置。

4.4.1.5 紧急切断阀与罐体液相口、气相口、增压器口的连接可以采用法兰或焊接的连接方式。

### 4.4.2 紧急切断装置的性能要求

4.4.2.1 易熔塞应选用易熔合金材料,并应能在  $70^{\circ}\text{C} \pm 5^{\circ}\text{C}$  时熔融。

4.4.2.2 紧急切断装置应经耐压试验和气密性试验检验合格。

## 4.5 导静电接地装置

4.5.1 储存易爆介质的深冷容器,其罐体、管道、阀门和支座等连接处的导电性应良好,并设置可靠的导静电连接端子。

4.5.2 罐体金属与接地导线末端之间的电阻值应不大于  $5\ \Omega$ 。

## 4.6 液位测量装置

4.6.1 深冷容器应设置一个或多个液位测量装置,如机械指针式液位计(以下简称“液位计”)、数字式液位显示仪器等,用于罐体液位测量和充装量的辅助测量。

4.6.2 液位测量装置的选用和设置应符合以下要求:

- a) 应根据充装介质、设计压力和设计温度等设计参数正确选用;
- b) 指示应灵敏准确,安装结构牢固;
- c) 精度等级不低于 2.5 级;
- d) 对易燃、易爆介质,应采用防爆型液位测量装置,且有防止泄漏的保护装置;
- e) 应设置在便于观察和操作的位置,其允许的最高安全液位应做出明显的标志;
- f) 液位计应附有罐内介质密度的上限和下限、液位指示刻度与容积的对照表。

## 4.7 压力测量装置

4.7.1 深冷容器应设置一个或多个压力测量装置,如机械指针式压力表(以下简称“压力表”)或数字式



压力显示仪器,用以显示罐体内的工作压力。

4.7.2 压力测量装置的选用和设置应符合以下要求:

- a) 应与罐体内的介质相适应,且满足使用工况要求;
- b) 应符合相应国家标准或行业标准规定的规定;
- c) 压力表应符合 JB/T 6804 的规定,且表盘直径不小于 100 mm、精度等级不低于 1.6 级、表盘刻度极限值应为工作压力的 1.5 倍~3.0 倍;
- d) 安装位置应便于操作人员观察和清洗,且应避免受到辐射热、冻结或震动等不利因素的影响;
- e) 安装结构应牢固可靠,防止其脱落;
- f) 压力测量装置与罐体之间应装设针形阀或其他切断阀门。针形阀或切断阀门上应有开启标记和锁紧装置,并且不得连接其他用途的配件或接管。

4.7.3 压力测量装置检定应符合以下要求:

- a) 压力测量装置应按照国家计量部门的有关规定进行定期检定;
- b) 压力测量装置安装前应进行检定,检定合格后应加铅封锁定;
- c) 压力表应在刻度盘上画出指示工作压力的红线,并注明下次检定日期。

#### 4.8 温度测量装置

4.8.1 深冷容器应按照设计文件的要求设置温度测量装置,如机械指针式温度计或数字式温度显示仪器等。

4.8.2 温度测量装置的测量范围应与充装介质的工作温度相适应。

4.8.3 温度测量装置应按照国家计量部门的有关规定进行定期检定。

#### 4.9 真空度测量装置

4.9.1 真空度测量装置一般由真空隔离阀和真空规管组成,并与配套的真空计组合使用。罐体真空夹层应至少设置一套真空度测量装置。

4.9.2 真空度测量装置的选用和设置应满足以下要求:

- a) 真空度测量装置的整体漏气速率和漏放气速率,应优于真空夹层的漏气速率和漏放气速率;
- b) 真空规管以及配套的真空计的测量范围应满足产品制造、使用和定期检验的测量要求;
- c) 用于充装液氧或易燃、易爆介质的深冷容器,真空规管应满足防爆要求;
- d) 真空度测量装置的安装结构应牢固可靠、便于测量,并且设置安全保护装置。

#### 4.10 带传感器或电气控制元件的测量装置

4.10.1 带传感器或电气控制元件的测量装置,是为满足罐体内温度、压力、液位等参数的实时测量,用相应的传感器采集信号并转化为数据显示,必要时能实现远程传输功能的测量装置。

4.10.2 测量装置的测量范围以及精度等级应满足设计文件的要求。

4.10.3 测量装置的安装结构应牢固、可靠,其连接导线、导管等不应与相邻零部件干涉。

4.10.4 选用带有电气控制元件的机械指针或数字式仪表,应选用符合电气元件防护设计标准规定的产品,其中充装易燃、易爆介质的深冷容器,还应选用符合电气元件防爆设计标准规定的产品。

#### 4.11 装卸附件

4.11.1 阀门材料应与介质相容,阀体不得选用铸铁或非金属材料制造。

4.11.2 装卸阀门的公称压力应不低于管路的设计压力,其耐压试验和气密性试验压力应满足以下要求:

- a) 耐压试验压力为阀门公称压力的 1.5 倍;

b) 气密性试验压力为阀门公称压力,阀门应在全开和全闭工作状态下进行气密性试验合格。

4.11.3 手动阀门应在阀门承受气密性试验压力下能够全开、全闭操作自如,且不应有异常阻力、空转等。

4.11.4 装卸接头应符合下列要求:

- a) 应符合相应的产品标准或设计图样的规定,且应有产品质量证明文件;
- b) 表面应无油污、杂物等;
- c) 应能够防止介质错装;
- d) 应在产品的明显部位进行标识。

## 附 录 A (规范性附录)

### 罐体安全泄放量和超压泄放装置排放能力计算

#### A.1 从热壁(外壳)传入冷壁(内容器)的总热流量的计算

##### A.1.1 非火灾情况

A.1.1.1 绝热系统(夹层和绝热材料)完好且处于正常的真空状态下,外部为环境温度,内容器的温度为所储存的介质在泄放压力下的饱和温度,需考虑的从热壁传入冷壁的热流量的计算方法如下:

a) 在正常的真空状态下,通过绝热材料传入的热流量按式(A.1)计算:

$$H_{i,v} = U_{i,v} \times A_{i,m} \times (T_a - T_d) \dots\dots\dots (A.1)$$

$$U_{i,v} = \frac{\lambda_{i,v}}{t_i}$$

式中:

$H_{i,v}$ ——在正常真空状态下,通过绝热材料传入的热流量,单位为瓦(W);

$U_{i,v}$ ——在正常真空状态下,夹层绝热材料总的传热系数,单位为瓦每平方米开尔文  
[W/(m<sup>2</sup>·K)];

$\lambda_{i,v}$ ——在正常真空状态下,绝热材料在温度范围  $T_a$  与  $T_d$  之间的平均热导率,单位为瓦每  
米开尔文[W/(m·K)];

$t_i$ ——绝热材料的名义厚度,单位为米(m);

$A_{i,m}$ ——绝热层内外表面积的算术平均值,单位为平方米(m<sup>2</sup>);

$T_a$ ——非火灾情况下绝热容器外部最高环境温度,单位为开尔文(K);

$T_d$ ——对应于储存深冷介质的内容器或传热构件冷端表面温度,单位为开尔文(K);

对于亚临界流体, $T_d$ 是介质在泄放压力下的饱和温度,单位为开尔文(K)。

注:对于临界或超临界流体,临界或超临界状态下介质的温度、比容积、焓及 $q'$ 值的确定和计算可参考  
ISO 21013-3,临界或超临界流体物性参数可参考参考文献[3]。

b) 通过内容器的吊带或其他金属支撑构件传入的热流量按式(A.2)计算:

$$H_{s,t} = N_{s,t} \frac{\lambda_{s,t} \times A_{s,t} (T_a - T_d)}{L_{s,t}} \dots\dots\dots (A.2)$$

式中:

$H_{s,t}$ ——通过内容器的吊带或其他金属支撑构件传入的热流量,单位为瓦(W);

$N_{s,t}$ ——内容器吊带或其他金属支撑构件的数量;

$\lambda_{s,t}$ ——内容器吊带或其他金属支撑构件材料在温度  $T_a$  与  $T_d$  之间平均热导率,单位为瓦每  
米开尔文[W/(m·K)];

$A_{s,t}$ ——内容器金属吊带或其他金属支撑构件的截面积,单位为平方米(m<sup>2</sup>);

$L_{s,t}$ ——内容器吊带或其他金属支撑构件材料的长度,单位为米(m)。

c) 通过为约束内容器发生纵(轴)向位移而设置的限位构件传入的热流量按式(A.3)计算:

$$H_{b,l} = N_{b,l} \frac{T_a - T_d}{R_{t,l}} \dots\dots\dots (A.3)$$

$$R_{t,l} = \frac{L_{b,l}}{\lambda_b \cdot A_{b,l}} + \frac{L_{t,l}}{\lambda_{tu} \cdot A_{t,l}}$$

式中:

$H_{b,l}$ ——通过为约束内容器发生纵向位移而设置的限位构件传入的热流量,单位为瓦(W);

$N_{b,l}$ ——内容器纵向限位构件数量;

$R_{t,l}$ ——纵向限位构件的总热阻,单位为开尔文每瓦(K/W);

$L_{b,l}$ ——内容器纵向非金属限位构件的长度,单位为米(m);

$L_{t,l}$ ——内容器纵向金属限位构件的长度,单位为米(m);

$\lambda_b$ ——用于制作内容器纵向非金属限位构件的热导率,单位为瓦每米开尔文[W/(m·K)];

$\lambda_{tu}$ ——用于制作内容器纵向金属限位构件的热导率,单位为瓦每米开尔文[W/(m·K)];

$A_{b,l}$ ——内容器纵向非金属限位构件的截面积,单位为平方米(m<sup>2</sup>);

$A_{t,l}$ ——内容器纵向金属限位构件的截面积,单位为平方米(m<sup>2</sup>)。

d) 通过为约束内容器发生径向位移而设置的径向限位构件传入的热流量按式(A.4)计算:

$$H_{b,t} = N_{b,t} \frac{T_a - T_d}{R_{t,t}} \quad \dots\dots\dots (A.4)$$

$$R_{t,t} = \frac{L_{b,t}}{\lambda_b \cdot A_{b,t}} + \frac{L_{t,t}}{\lambda_{tu} \cdot A_{t,t}}$$

式中:

$H_{b,t}$ ——通过为约束内容器发生径向位移而设置的径向限位构件传入的热流量,单位为瓦(W);

$N_{b,t}$ ——内容器径向限位构件数量;

$R_{t,t}$ ——径向限位构件的总热阻,单位为开尔文每瓦(K/W);

$L_{b,t}$ ——内容器径向非金属限位构件的长度,单位为米(m);

$L_{t,t}$ ——内容器径向金属限位构件的长度,单位为米(m);

$A_{b,t}$ ——内容器径向非金属限位构件的截面积,单位为平方米(m<sup>2</sup>);

$A_{t,t}$ ——内容器径向金属限位构件的截面积,单位为平方米(m<sup>2</sup>)。

e) 通过真空夹层的管道传入的热流量按式(A.5)计算:

$$H_{\text{tube}} = \sum_{i=1}^n \left[ \frac{\lambda_t \cdot A_{\text{tube},i} (T_a - T_d)}{L_i} + \frac{\lambda_{\text{gas}} \cdot A_{\text{gas},i} (T_a - T_d)}{L_i} \right] \quad \dots\dots\dots (A.5)$$

$$\lambda_t = \frac{\lambda_a - \lambda_c}{T_a - T_d}$$

式中:

$H_{\text{tube}}$ ——通过真空夹层的管道传入的热流量,单位为瓦(W);

$\lambda_t$ ——通过真空夹层的管道的材料在温度  $T_a$  与  $T_d$  之间平均热导率,单位为瓦每米开尔文[W/(m·K)];

$\lambda_c$ ——真空夹层的管道材料在冷端(深冷介质在泄放压力下的饱和温度)的热导率,单位为瓦每米开尔文[W/(m·K)];

$\lambda_a$ ——真空夹层的管道材料在热端的热导率,单位为瓦每米开尔文[W/(m·K)];

$A_{\text{tube},i}$ ——穿过真空夹层的内容器第  $i$  管的横截面积,  $i=1, 2, \dots, n$ , 单位为平方米(m<sup>2</sup>);

$A_{\text{gas},i}$ ——穿过真空夹层的内容器第  $i$  管的流通截面积,  $i=1, 2, \dots, n$ , 单位为平方米(m<sup>2</sup>);

$L_i$ ——第  $i$  管在真空夹层内的长度,单位为米(m);

$\lambda_{\text{gas}}$ ——所储存介质的气体热导率,单位为瓦每米开尔文[W/(m·K)]。

A.1.1.2 绝热系统完好且处于正常的真空状态下,外部为环境温度,内容器的温度为泄放压力下所储存的介质的饱和温度,由热壁传入冷壁的总热流量按式(A.6)计算:

$$H_1 = H_{i,v} + H_{s,t} + H_{\text{tube}} + H_{b,l} + H_{b,t} \quad \dots\dots\dots (A.6)$$

式中:

$H_1$ ——在非火灾和绝热层完好且处于正常的真空状态下,由热壁传入冷壁的总热流量,单位为瓦(W)。

A.1.1.3 绝热系统完好且处于正常的真空状态下,外部为环境温度,内容器的温度为泄放压力下所储存的介质的饱和温度,且增压系统处于全开工作状态下,热壁通过绝热系统、构件和增压器输入内容器的总热流量按式(A.7)计算:

$$H_2 = H_1 + H_{P,B,C} \dots\dots\dots (A.7)$$

$$H_{P,B,C} = U_{P,B,C} \times A_{P,B,C} \times (T_a - T_d)$$

式中:

$H_2$  ——热壁通过绝热系统、构件和增压器输入内容器的总热流量,单位为瓦(W);

$H_{P,B,C}$ ——增压器产生的热流量,单位为瓦(W);

$U_{P,B,C}$ ——增压器总的对流传热系数,单位为瓦每平方米开尔文[W/(m<sup>2</sup>·K)];

$A_{P,B,C}$ ——增压器总的外部传热面积,单位为平方米(m<sup>2</sup>)。

A.1.1.4 绝热系统完好,但夹层已丧失真空的状态下,外部温度为环境温度,内容器的温度为泄放压力下所储存介质的饱和温度,从热壁传入内容器的总热流量按式(A.8)计算:

$$H_3 = H_{i,l} + H_{s,t} + H_{tube} + H_{b,l} + H_{b,t} \dots\dots\dots (A.8)$$

$$H_{i,l} = U_{i,l} \times A_{i,m} \times (T_a - T_d)$$

$$U_{i,l} = \frac{\lambda_{i,l}}{t_i}$$

式中:

$H_3$  ——绝热系统完好,但夹层已丧失真空,外部温度为环境温度,内容器的温度为泄放压力下所储存介质的饱和温度,从热壁传入内容器的总热流量,单位为瓦(W);

$H_{i,l}$ ——夹层丧失真空的状态下,通过绝热材料输入的漏热量,单位为瓦(W);

$U_{i,l}$ ——在大气压力下和环境温度下,绝热材料总的传热系数,单位为瓦每平方米开尔文[W/(m<sup>2</sup>·K)];

$\lambda_{i,l}$  ——夹层已丧失真空,在大气压力下绝热材料充满或吸附空气或介质气体,在温度  $T_a$  与  $T_d$  之间的平均热导率,单位为瓦每米开尔文[W/(m·K)];

$t_i$  ——绝热材料的名义厚度,单位为米(m);

$A_{i,m}$ ——绝热层内外表面积的算术平均值,单位为平方米(m<sup>2</sup>)。

## A.1.2 火灾情况

A.1.2.1 本条规定了深冷容器在通风条件良好、敞开空间着火的火灾工况(与外部油池火灾类似)安全泄放量的计算方法。对于储存非易燃、易爆介质的深冷容器遭受非池火工况时,设计者可根据火源距离、火焰强度、罐体辐射表面积、大气和外壳的热量吸收系数等因素确定安全泄放量计算方法。对于深冷容器遭受喷射火、部分密闭或全部密闭空间内火灾等严重火灾工况时安全泄放量的计算,设计者应另行考虑。

A.1.2.2 真空绝热容器的绝热系统完好或部分完好,但夹层真空已丧失,且外部遭遇火灾或遭遇 922 K 高温的情况下,由热壁传入内容器的总热流量按式(A.9)计算:

$$H_4 = 2.6 \times (922 - T_d) U_{i,f} \times A_r^{0.82} \dots\dots\dots (A.9)$$

$$U_{i,f} = \frac{\lambda_{i,f}}{t_i}$$

式中:

$H_4$  ——真空绝热容器的绝热系统完整,但夹层真空已丧失,且外部遭遇火灾或遭遇 922 K 高温的情况下,由热壁传入内容器的总热流量,单位为瓦(W);

$U_{i,f}$  ——在火灾条件下(外部温度为 922 K 和大气压下)绝热层总的传热系数,单位为瓦每平方米开尔文[W/(m<sup>2</sup>·K)];

$\lambda_{i,f}$  ——真空绝热深冷容器外部遭遇火灾或遭遇 922 K 的高温,夹层真空已丧失,在大气压力下,绝热材料充满介质气体或空气,但仍能有效地阻止热传导、热对流和热辐射;绝热材料在  $T_d$  与 922 K 之间的平均热导率,取两者(气体或空气)之中的较大值,单位为瓦每米开尔文[W/(m·K)];

$t_i$  ——绝热材料的名义厚度,单位为米(m);

$A_r$  ——内容器与外壳面积的平均值,单位为平方米(m<sup>2</sup>);

半球形封头的卧式容器: $A_r = \pi D_o L$ ;

椭圆形封头的卧式容器: $A_r = \pi D_o (L + 0.3 D_o)$ ;

立式容器: $A_r = \pi D_o h_1$ ;

$L$  ——外壳总长减去罐体中轴线处两端夹层厚度的平均值,单位为米(m);

$D_o$  ——内容器与外壳直径的平均值,单位为米(m);

$h_1$  ——设计最大液位高度,单位为米(m)。

A.1.2.3 真空绝热深冷容器夹套外部遭遇火灾或遭遇 922 K 高温,且绝热系统已完全损坏的情况下,由热壁传入内容器的总热流量按式(A.10)计算:

$$H_5 = 7.1 \times 10^4 \times A_r^{0.82} \quad \dots\dots\dots (A.10)$$

式中:

$H_5$  ——真空绝热深冷容器夹套外部遭遇火灾或遭遇 922 K 高温,且绝热系统已完全损坏的情况下,由热壁传入内容器的总热流量,单位为瓦(W);

$A_r$  ——内容器外表面积,单位为平方米(m<sup>2</sup>)。

## A.2 内容器的安全泄放量(质量流量)的计算



A.2.1 当内容器的超压泄放装置的泄放压力  $p_d$  小于介质临界压力的 40% 时,上述各种状态下的内容器的安全泄放量按式(A.11)计算:

$$W_{s,i} = \frac{3.6 H_i}{q} \quad \dots\dots\dots (A.11)$$

式中:

$W_{s,i}$  ——当内容器的超压泄放装置的泄放压力  $p_d$  小于介质临界压力的 40% 时,内容器的安全泄放量,单位为千克每小时(kg/h);

$H_i$  ——由热壁传入冷壁的总热流量,对应于  $i=1,2,3,4,5$ ,分别由式(A.6)、式(A.7)、式(A.8)、式(A.9)、式(A.10)计算,单位为瓦(W);

$q$  ——在泄放压力下液体介质的汽化潜热,单位为千焦每千克(kJ/kg)。

A.2.2 当超压泄放装置的气体泄放压力  $p_d$  小于介质的临界压力,但大于或等于临界压力的 40%,即  $0.4 p_{crit} \leq p_d < p_{crit}$  时,需对式(A.11)中的内容器安全泄放量计算式进行修正,即应按式(A.12)计算:

$$W'_{s,i} = 3.6 \times \left( \frac{v_g - v_c}{v_g} \right) \times \frac{H_i}{q} \quad \dots\dots\dots (A.12)$$

式中:

$W'_{s,i}$  ——当超压泄放装置的气体泄放压力  $p_d$  小于介质的临界压力,但大于或等于临界压力的



40%，即  $0.4p_{\text{crit}} \leq p_d < p_{\text{crit}}$  时，内容器的安全泄放量，单位为千克每小时(kg/h)；

$v_g$  ——泄放压力下，饱和气体介质的比容积，单位为立方米每千克( $\text{m}^3/\text{kg}$ )；

$v_e$  ——泄放压力下，饱和液体介质的比容积，单位为立方米每千克( $\text{m}^3/\text{kg}$ )；

$H_i$  ——由热壁(夹套)传入冷壁(内容器)的总热流量，对应于  $i=1, 2, 3, 4, 5$ ，分别由式(A.6)、式(A.7)、式(A.8)、式(A.9)、式(A.10)计算，单位为瓦(W)；

$q$  ——在泄放压力下液体介质的汽化潜热，单位为千焦每千克(kJ/kg)。

**A.2.3** 当超压泄放装置的气体泄放压力高于介质的临界压力时，亦需对式(A.11)中的内容器安全泄放量计算公式进行修正，即应按式(A.13)计算：

$$W''_{s,i} = \frac{3.6 H_i}{q'} \quad \dots\dots\dots (\text{A.13})$$

式中：

$W''_{s,i}$  ——当超压泄放装置的气体泄放压力高于介质的临界压力时，内容器的安全泄放量，单位为千克每小时(kg/h)；

$H_i$  ——由热壁(夹套)传入冷壁(内容器)的总热流量，对应于  $i=1, 2, 3, 4, 5$ ，分别由式(A.6)、式(A.7)、式(A.8)、式(A.9)、式(A.10)计算，单位为瓦(W)；

$q'$  ——泄放压力  $p_d$  和温度  $T_d$  (K)下，当  $\frac{\sqrt{v}}{v \left[ \frac{\partial h}{\partial v} \right]_p}$  取得最大值时的值  $v \left[ \frac{\partial h}{\partial v} \right]_p$ ，单位为千焦每千克(kJ/kg)；

$v$  ——临界或超临界介质在泄放压力  $p_d$  和操作温度范围内任一温度下的比容积，单位为立方米每千克( $\text{m}^3/\text{kg}$ )；

$h$  ——临界或超临界液体在泄放压力  $p_d$  下和操作温度范围内任一温度下的焓值，单位为千焦每开尔文(kJ/K)。

### A.3 质量流量与标准状态体积流量的换算

将泄放气体的质量流量  $W_{s,i}$  换算成标准状态空气体积流量，按式(A.14)计算：

$$Q_i = \frac{92.34 W_{s,i}}{C} \sqrt{\frac{ZT}{M}} \quad \dots\dots\dots (\text{A.14})$$

式中：

$Q_i$  ——按泄放气体的质量流量  $W_{s,i}$  换算成的标准状态空气体积流量，单位为立方米每小时( $\text{m}^3/\text{h}$ )；

$W_{s,i}$  ——当内容器的超压泄放装置的泄放压力  $p_d$  小于 40% 的介质临界压力时，上述各种状态下的真空绝热压力容器的安全泄放量，单位为千克每小时(kg/h)；

$C$  ——气体特性系数，查表 A.1 或按下式计算：

$$C = 520 \sqrt{k \left( \frac{2}{k+1} \right)^{\frac{k+1}{k-1}}}$$

$k$  ——气体绝热指数， $k = c_p / c_v$ ；

$c_p$  ——标准状态下气体比定压热容，单位为千焦每千克摄氏度[kJ/(kg·℃)]；

$c_v$  ——标准状态下气体比定容热容，单位为千焦每千克摄氏度[kJ/(kg·℃)]；

$Z$  ——泄放压力下饱和气体的压缩系数；

$T$  ——泄放装置进口侧的气体温度，单位为开尔文(K)；

$M$  ——气体的摩尔质量，单位为千克每千摩尔(kg/kmol)。

#### A.4 气体排放管长度对超压泄放装置入口的气体压力和温度的影响

当从内容器到泄放装置入口的气体排放管的长度超过 600 mm 时,应考虑气体流过这段管子的压力降和热量损失,采取措施补偿由此减少的泄放系统的有效泄放能力,或对泄放装置入口的气体压力和温度进行修正,相关修正方法可参照 CGA S-1.3。

#### A.5 安全阀排放能力计算

当  $\frac{p_o}{p_d} \leq \left(\frac{2}{k+1}\right)^{\frac{k}{k-1}}$  时,属于临界流动状态,安全阀排放能力按式(A.15)计算:

$$W_s = 7.6 \times 10^{-2} CK p_d A \sqrt{\frac{M}{ZT}} \quad \dots\dots\dots (A.15)$$

当  $\frac{p_o}{p_d} > \left(\frac{2}{k+1}\right)^{\frac{k}{k-1}}$  时,属于亚临界流动状态,安全阀排放能力按式(A.16)计算:

$$W_s = 55.84 \times AK p_d \sqrt{\frac{M}{ZT}} \sqrt{\frac{k}{k-1} \left[ \left(\frac{p_o}{p_d}\right)^{\frac{2}{k}} - \left(\frac{p_o}{p_d}\right)^{\frac{k+1}{k}} \right]} \quad \dots\dots\dots (A.16)$$

式中:

$k$  ——气体绝热指数,  $k = c_p / c_v$ ;

$c_p$  ——标准状态下气体比定压热容,单位为千焦每千克摄氏度[kJ/(kg·°C)];

$c_v$  ——标准状态下气体比定容热容,单位为千焦每千克摄氏度[kJ/(kg·°C)];

$p_o$  ——安全阀出口压力(绝压),单位为兆帕(MPa);

$W_s$  ——安全阀的排放能力,单位为千克每小时(kg/h);

$C$  ——气体特性系数,查表 A.1 或按下式计算:

$$C = 520 \sqrt{k \left(\frac{2}{k+1}\right)^{\frac{k+1}{k-1}}}$$

$K$  ——安全阀的额定泄放系数,与安全阀结构有关,根据试验数据确定。无参考数据时,可按下列规定选取:

全启式安全阀:  $K = 0.60 \sim 0.70$

$p_d$  ——安全阀的泄放压力(绝压),  $p_d = 1.1p + 0.1$ ,单位为兆帕(MPa);

$p$  ——安全阀的整定压力,单位为兆帕(MPa);

$A$  ——安全阀最小排气截面积,单位为平方毫米(mm<sup>2</sup>);

全启式安全阀,即  $h \geq \frac{1}{4}d_t$  时:  $A = \pi \frac{d_t^2}{4}$ ;

$h$  ——阀瓣的开启高度,单位为毫米(mm);

$d_t$  ——安全阀的最小流道直径(阀座喉部直径),单位为毫米(mm)。

#### A.6 爆破片装置排放能力计算

当  $\frac{p_o}{p_b} \leq \left(\frac{2}{k+1}\right)^{\frac{k}{k-1}}$  时,属于临界流动状态,爆破片装置排放能力按式(A.17)计算:

$$W_s = 7.6 \times 10^{-2} CK' p_b A \sqrt{\frac{M}{ZT}} \quad \dots\dots\dots (A.17)$$



当  $\frac{p_o}{p_b} > \left(\frac{2}{k+1}\right)^{\frac{k}{k-1}}$  时,属于亚临界流动状态,爆破片装置排放能力按式(A.18)计算:

$$W_s = 55.84 \times AK' p_b \sqrt{\frac{M}{ZT}} \sqrt{\frac{k}{k-1} \left[ \left(\frac{p_o}{p_b}\right)^{\frac{2}{k}} - \left(\frac{p_o}{p_b}\right)^{\frac{k+1}{k}} \right]} \quad \dots\dots\dots (A.18)$$

式中:

$k$  ——气体绝热指数,  $k = c_p / c_v$ ;

$c_p$  ——标准状态下气体比定压热容,单位为千焦每千克摄氏度[kJ/(kg·°C)];

$c_v$  ——标准状态下气体比定容热容,单位为千焦每千克摄氏度[kJ/(kg·°C)];

$p_o$  ——爆破片装置出口压力(绝压),单位为兆帕(MPa);

$W_s$  ——爆破片装置的排放能力,单位为千克每小时(kg/h);

$C$  ——气体特性系数,查表 A.1 或按下式计算:

$$C = 520 \sqrt{k \left(\frac{2}{k+1}\right)^{\frac{k+1}{k-1}}}$$

$A$  ——爆破片装置的最小净泄放面积,单位为平方毫米(mm<sup>2</sup>);

$p_b$  ——爆破片装置的设计爆破压力(绝压),单位为兆帕(MPa);

$K'$  ——爆破片装置的额定泄放系数,与爆破片装置入口管道形状有关,见图 A.1。

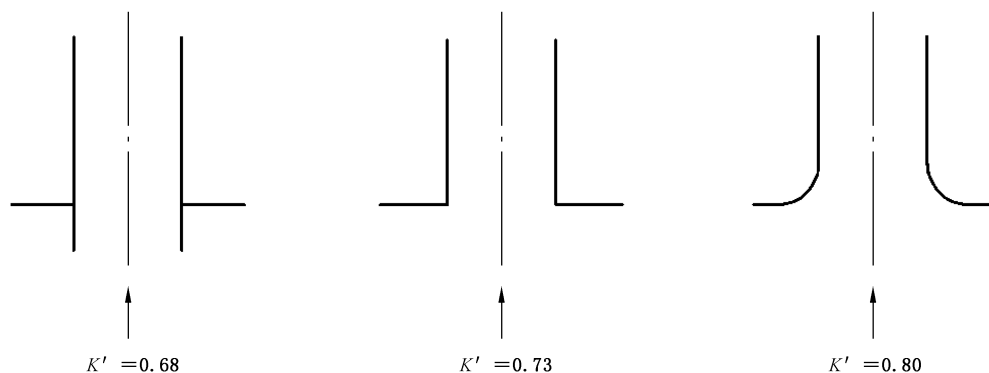


图 A.1 爆破片装置入口管道形状和额定泄放系数的关系

表 A.1 气体特性系数

$k$	$C$	$k$	$C$	$k$	$C$	$k$	$C$
1.00	315	1.20	337	1.40	356	1.60	372
1.02	318	1.22	339	1.42	358	1.62	374
1.04	320	1.24	341	1.44	359	1.64	376
1.06	322	1.26	343	1.46	361	1.66	377
1.08	324	1.28	345	1.48	363	1.68	379
1.10	327	1.30	347	1.50	365	1.70	380
1.12	329	1.32	349	1.52	366	2.00	400
1.14	331	1.34	351	1.54	368	2.20	412
1.16	333	1.36	352	1.56	369	—	—
1.18	335	1.38	354	1.58	371	—	—

参 考 文 献

- [1] ISO 21013-3 Cryogenic vessels—Pressure-relief accessories for cryogenic service—Part 3: Sizing and capacity determination
- [2] CGA S-1.3 Pressure relief device standards—Part 3: Stationery storage containers for compressed gases
- [3] Lemmon EW, Huber ML, McLinden MO. Reference fluid thermodynamic and transport properties. NIST standard reference database 23 Version 9.0. Physical and Chemical Properties Division 2010.
-