



中华人民共和国国家标准

GB/T 18442.3—2019
代替 GB/T 18442.3—2011

固定式真空绝热深冷压力容器 第 3 部分：设计

Static vacuum insulated cryogenic pressure vessels—
Part 3: Design

2019-12-10 发布

2019-12-10 实施

国家市场监督管理总局
国家标准化管理委员会 发布

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 一般要求 3

5 设计文件 3

6 载荷 4

7 温度 6

8 压力 6

9 焊接接头系数 6

10 许用应力..... 6

11 腐蚀裕量..... 7

12 罐体厚度..... 7

13 充满率..... 7

14 真空绝热性能指标..... 8

15 夹层的真空性能..... 9

16 耐压试验..... 9

17 泄漏试验 10

18 结构设计 11

附录 A（规范性附录） 风险评估报告 15

附录 B（资料性附录） 常见冷冻液化气体热力学数据 16

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 3 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 18442.3—2011《固定式真空绝热深冷压力容器 第 3 部分：设计》，与 GB/T 18442.3—2011 相比，主要技术变化如下：

- 修改了规范性引用文件；
- 删除了计算压力、封口真空度等 2 个术语和定义，增加了有效容积、充满率、额定充满率、维持时间、静态蒸发率、封结真空度等 6 个术语和定义；
- 按照 TSG 21 的规定，修改了设计的一般要求；
- 增加了对设计文件的规定，对设计文件的内容、设计总图和管路系统图应注明的内容等提出明确的要求；
- 修改了对设计载荷的规定，并按载荷的性质进行分类；
- 修改了疲劳分析免除准则的规定；
- 修改了材料许用应力的规定，按整体规则设计、整体分析设计和局部结构采用应力分析方法，分别规定相对应的材料许用应力或设计应力强度；对于非金属材料，规定了确定材料许用应力的安全系数；
- 修改了内容器和外壳设计温度的规定；
- 增加了最低设计金属温度的规定；
- 修改了内容器承受外压的设计压力的规定；
- 修改了外壳承受内压的规定；
- 修改了腐蚀裕量的规定；
- 增加了罐体厚度的规定，取消了 2011 年版标准中对钢材负偏差的规定；
- 修改了充满率的规定，提出确定最大充满率、额定充满率和初始充满率的原则；
- 修改了高真空多层绝热深冷容器的静态蒸发率、真空夹层漏气速率、真空夹层漏放气速率和封结真空度指标，增加了液化天然气(甲烷)的静态蒸发率指标，取消了 2011 年版表 5 中封口真空度作为推荐值的规定；
- 增加了罐体泄漏试验的要求；
- 修改了真空夹层中吸附剂的设置要求；
- 修改了罐体设计的要求；
- 增加了焊接结构设计的要求；
- 修改了夹层支撑及罐体支座设计的要求；

- 增加了结构件与罐体连接的设计要求；
- 修改了绝热设计的要求；
- 修改了自增压器的设计要求；
- 增加了汽化器的设计要求；
- 修改了管路系统设计的要求，增加外部管路设计压力、耐压试验压力等的规定；
- 增加了附录 A“风险评估报告”。

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：查特深冷工程系统(常州)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、中国特种设备检测研究院、南通中集能源装备有限公司、液化空气(中国)投资有限公司、杭州杭氧低温容器有限公司、荆门宏图特种飞行器制造有限公司、中车长江车辆有限公司、华东理工大学、江苏国富氢能技术装备有限公司、上海华谊集团装备工程有限公司。

本部分主要起草人：陈文锋、周伟明、罗晓钟、杨坤、陈朝晖、罗永欣、滕俊华、陈勤俭、毛荣大、肖学文、何远新、惠虎、魏蔚、魏勇彪。

本部分所代替标准的历次版本发布情况为：

- GB/T 18442.3—2011；
- GB 18442—2001。



固定式真空绝热深冷压力容器

第3部分:设计

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”)设计的设计文件、设计参数、性能参数及结构设计等基本要求。

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 m³;
- 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于-196 °C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) 储存标准沸点低于-196 °C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—2011(所有部分) 压力容器

GB/T 1448 纤维增强塑料压缩性能试验方法

GB/T 1450.1 纤维增强塑料层间剪切强度试验方法

GB/T 9341 塑料 弯曲性能的测定

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 20801.3—2006 压力管道规范 工业管道 第3部分:设计和计算

GB/T 20801.5 压力管道规范 工业管道 第5部分:检验与试验

GB/T 24511 承压设备用不锈钢和耐热钢钢板和钢带

GB/T 26929 压力容器术语

GB/T 31481 深冷容器用材料与气体的相容性判定导则

HG/T 21574 化工设备吊耳设计选用规范

JB 4732 钢制压力容器 分析设计标准

NB/T 47041 塔式容器

NB/T 47065.1 容器支座 第1部分:鞍式支座

NB/T 47065.2 容器支座 第2部分:腿式支座

3 术语和定义

GB/T 150、GB/T 18442.1 和 GB/T 26929 界定的以及下列术语和定义适用于本文件。

3.1

有效容积 effective volume

在使用状态下,深冷容器允许充装冷冻液化气体的液体最大液体体积。

3.2

充满率 filling rate

深冷容器充装冷冻液化气体的液体体积与内容器的几何容积之比。

3.3

额定充满率 specified filling rate

深冷容器充装时,充装液体量达到设计规定最高液面时的液体体积与内容器几何容积之比。

3.4

维持时间 holding time

按额定充满率充装冷冻液化气体,内部静置的冷冻液化气体在大气压力下与外部环境温度达到热平衡后,补液至额定充满率,且关闭气相阀门后,内容器从环境大气压力开始上升到安全泄放装置整定压力所经历的时间,且换算为标准大气压($1.013\ 25 \times 10^5$ Pa)和设定环境温度(20℃)下的时间。

注:单位为小时(h)。

3.5

静态蒸发率 static evaporation rate

深冷容器在额定充满率下,静置达到热平衡后,24 h 内自然蒸发损失的冷冻液化气体质量与内容器有效容积下冷冻液化气体质量的百分比,换算为标准大气压($1.013\ 25 \times 10^5$ Pa)和设定环境温度(20℃)状态下的蒸发率值。

3.6

夹层真空度 annular space vacuum degree

深冷容器中夹层空间的气体绝对压力。

3.7

封结真空度 sealing-off vacuum degree

罐体夹层抽真空结束并且封闭抽真空接口后,在常温下真空夹层压力相对稳定时的真空度。

3.8

真空夹层漏气速率 leakage rate of vacuum annular space

单位时间内漏入真空夹层的气体量。

3.9

真空夹层放气速率 outgassing rate of vacuum annular space

真空夹层内材料、器壁表面等在单位时间内放出的气体量。

3.10

真空夹层漏放气速率 outgassing and leakage rate of vacuum annular space

真空夹层漏气速率与真空夹层放气速率之和。

4 一般要求

- 4.1 深冷容器的设计除应符合本部分的要求外,还应符合 TSG 21 和 GB/T 150.3 的规定。
- 4.2 设计单位应严格依据设计委托方所提供的深冷容器设计条件,综合考虑所有相关因素、失效模式和足够的安全裕量,以保证深冷容器具有足够的强度、刚度、稳定性和耐腐蚀性。同时应考虑深冷容器的夹层支撑、支座、吊耳等主要受力构件与罐体的焊接接头的强度要求,确保深冷容器在设计使用年限内的安全。
- 4.3 罐体、管路、安全附件、仪表及装卸附件的布置应满足使用和安全的要求。
- 4.4 风险评估报告的基本内容应符合附录 A 的规定。常见冷冻液化气体热力学数据参见附录 B。



5 设计文件

5.1 深冷容器的设计文件应至少包括下列各项:

- 风险评估报告,包括设计、制造及使用等阶段的主要失效模式和风险控制等;
- 设计说明书,包括对充装介质的主要物理、化学性质(编号、名称、类别及与工作温度相对应的饱和蒸气压力与密度等),危险特性,混合介质的限制组分以及有害杂质的限制含量要求,与罐体材料相容性等作出说明,还应对设计规范与标准的选择、主要设计结构的确定原则、主要设计参数的确定原则、材料的选择、安全附件的选择、仪表及装卸附件的选择、自增压器等的选用作出说明;
- 设计计算书,包括罐体强度、刚度、外压稳定性、结构强度应力分析报告(需要时)、容积、传热、安全泄放量、超压泄放装置的排放能力的计算、夹层支撑及罐体支座的强度计算等;
- 设计图样,至少包括总图、内容器图、管路系统图及流程图等,必要时还应提供深冷容器基础条件图等;
- 制造技术条件,包括主要制造工艺要求、检验与试验方法等;
- 安装与使用维护说明书,包括主要技术性能参数、充装的介质特性、安全附件、仪表及装卸附件的规格和连接方式、操作说明、维护说明、使用应注意的事项、必要的警示性告知以及应急措施等。

5.2 设计总图上应至少注明下列内容:

- 产品名称、型号、容器类别,设计、制造所依据的安全技术规范和产品标准;
- 工作条件,包括工作压力、工作温度、介质特性(毒性、爆炸危害程度、氧化性等);
- 设计条件,包括设计温度、最低设计金属温度、设计载荷(包含压力载荷和其他应考虑载荷)、介质(组分)、焊接接头系数、腐蚀裕量、自然条件(环境温度、地震设防烈度、基本风压或风速、基本雪压等),对有应力腐蚀倾向的还应注明腐蚀介质的限定含量;
- 内容器主要受压元件、外壳壳体和管路的材料牌号与材料标准;
- 主要特性参数,包括深冷容器内容器的几何容积、额定充满率、夹层的几何容积、深冷容器自重和盛装介质重量等;
- 内容器封头与筒体的计算厚度、名义厚度和最小成型厚度,外壳封头与筒体的名义厚度和最小成型厚度;
- 外形尺寸;
- 深冷容器设计使用年限;
- 耐压试验和泄漏试验要求;
- 制造要求,包括无损检测要求、热处理要求(必要时)、对表面清洁处理的要求、氮气或惰性气体

置换要求、外壳表面处理与涂敷的要求等；

- k) 罐体绝热方式、真空绝热性能指标和夹层真空性能指标等；
- l) 罐体安全附件、仪表和装卸附件的规格、性能参数和连接方式；
- m) 管口的方位、规格、连接法兰标准等；
- n) 产品铭牌位置；
- o) 包装、运输和安装要求。

5.3 管路系统图应至少注明以下内容：

- a) 管路系统设计、制造所依据的标准；
- b) 设计参数，包括设计温度、设计压力、焊接接头系数等；
- c) 管路受压元件材料牌号以及材料标准号、规格等；
- d) 安全附件（包括管路超压泄放装置）、仪表及装卸附件的型号、规格、性能参数、连接方式、管口方位等；
- e) 无损检测要求；
- f) 耐压试验要求；
- g) 泄漏试验要求。

6 载荷

6.1 总体要求

深冷容器应能承受在正常操作和空罐运输等可能出现的各种工况条件下的机械载荷（含压力载荷、重力载荷、惯性力载荷和动力载荷）及热应力载荷，并考虑这些载荷可能发生的最苛刻的组合。同时，应考虑在设计使用年限内由于内容器压力波动等造成的结构疲劳失效。

6.2 内容器设计载荷

6.2.1 压力载荷应考虑下列载荷：

- a) 内压、外压或最大压差；
- b) 储液量达到额定充满率时，介质产生的液柱静压力。液柱静压力按介质在标准大气压下沸点的密度进行计算。

6.2.2 重力载荷应考虑下列载荷：

- a) 内容器的自重以及附在内容器上的绝热材料、夹层管路等附件的重力载荷；
- b) 正常工作条件下或耐压试验状态下，内容器盛装介质的重力载荷。

6.2.3 动力载荷应考虑下列各项引起的载荷：

- a) 内容器充液时，液体流动对内容器的冲击力；
- b) 介质压力急剧波动引起的冲击载荷；
- c) 地震载荷。

6.2.4 热应力载荷至少应考虑下列工况下，由温度递变引起的不均匀应变载荷以及内容器与夹层管路的热膨胀或冷收缩所引起的管路反作用力：

- a) 内容器从环境温度冷却到工作温度过程中，内容器在支撑点处承受的载荷。
- b) 由于内容器、夹层管路的热膨胀或冷收缩引起的管路施加于内容器的反作用力，并至少考虑下列3种工况：
 - 1) 预冷工况：内容器热状态，夹层管路冷状态，外壳热状态；
 - 2) 充装及出液工况：内容器、夹层管路均是冷状态，外壳热状态；
 - 3) 储存液体工况：内容器冷状态，夹层管路热状态，外壳热状态。

c) 罐体制造过程中夹层加热抽真空时,由于内容器与外壳处于不同的温度,应考虑下列连接处的载荷:

- 1) 内容器在支撑点处的热应力载荷;
- 2) 夹层管路施加于内容器连接处的热应力载荷。

6.2.5 空罐运输过程中,夹层支撑结构承受的惯性力载荷按下列要求转换成等效的静态力,最大质量取内容器及其附件质量之和:

- a) 运动方向:最大质量乘以 2 倍重力加速度;
- b) 与运动方向垂直的水平方向:最大质量乘以重力加速度;
- c) 垂直向上:最大质量乘以重力加速度;
- d) 垂直向下:最大质量乘以 2 倍重力加速度。

6.3 外壳设计载荷

6.3.1 压力载荷应考虑由于内压或外压引起的载荷。

6.3.2 重力载荷应考虑在正常工作条件下罐体支座承受的重力载荷(罐体和外部管路、扶梯、平台等附件的自重)以及在正常工作条件下或试验状态下内容器盛装的介质的重力载荷。在支座连接处外壳承受的支反力等于支座承受的重力载荷。

6.3.3 热应力载荷应考虑 6.2.4 b)、c)工况下,夹层管路施加于外壳的载荷。

6.3.4 惯性力载荷至少应考虑下列 a)和 b)工况下运输支座或吊耳施加于外壳的载荷:

- a) 空罐运输过程中,深冷容器运输支座承受的惯性力载荷等于其空罐时的质量乘以 6.2.5 规定的不同方向的惯性力载荷系数;
- b) 计算空罐吊装时,罐体吊耳承受的惯性力载荷,载荷系数按照 HG/T 21574 的规定;
- c) 罐体与运输支座或吊耳连接处所承受的惯性力等于运输支座或吊耳的支反力。

6.3.5 动力载荷应考虑风载荷、地震载荷和雪载荷等载荷的作用。

6.3.6 对于立式深冷容器应考虑在制造、运输、吊装工况中,罐体处于卧置状态时,夹层支撑件承受的载荷以及外壳在支撑处的支反力。

6.4 疲劳分析的免除准则

6.4.1 满足 6.4.2、6.4.3 或 6.4.4 任一条的所有要求时,可免除疲劳分析。否则,内容器应按照 JB 4732 进行疲劳分析设计。

6.4.2 对于循环次数 $\leq 10^6$ 的内容器,如所设计的深冷容器与已有成功使用经验的深冷容器具有可类比的形状与载荷条件,且经过了足够长时间的操作,并有使用经验证明的,可免除疲劳分析。但对下列情况所产生的不利影响应予特别注意:

- a) 内容器采用了非整体结构,如开孔采用补强圈补强或角焊缝连接件;
- b) 内容器相邻部件之间有显著的厚度变化;
- c) 位于成型封头过渡区的连接件和接管。

6.4.3 内容器采用奥氏体型不锈钢材料时,下列各项循环次数的总和不超过 4 000 次:

- a) 包括充装与出液在内的全范围压力循环的预计(设计)循环次数;
- b) 内容器的压力波动范围超过 50%设计压力的工作压力循环的预计(设计)循环次数;
- c) 包括管路在内的任意相邻两点之间金属温差波动的有效次数,该有效次数的计算方法按 JB 4732 的相关规定;
- d) 由热膨胀系数不同的材料组成的部件(包括焊缝),当 $(\alpha_1 - \alpha_2)\Delta T > 0.000\ 34$ 时的温度波动循环次数,其中 α_1 、 α_2 是两种材料各自的平均热膨胀系数, ΔT 为工作时温度波动范围。

6.4.4 满足 JB 4732 规定的相应的疲劳分析免除条件。

7 温度

7.1 设计温度

7.1.1 内容器的设计温度应不低于元件金属在正常工况下可能达到的最高工作温度。

7.1.2 外壳的设计温度应考虑环境温度和使用条件的影响,且不低于 50 °C。

7.1.3 对各元件进行稳定性校核时,其设计温度考虑正常工作条件下及罐体加热抽真空时可能出现的最高温度。

7.2 最低设计金属温度

7.2.1 内容器的最低设计金属温度应考虑正常工作条件下及检验、试验条件下介质最低工作温度对内容器金属温度的影响,且应不高于介质的沸点。

7.2.2 外壳的最低设计金属温度,应考虑使用地点大气环境低温以及使用条件(如外壳悬挂汽化器)对罐体外壳金属温度的影响,且不高于-20 °C。

8 压力

8.1 设计压力

8.1.1 内容器的设计压力应按下列要求确定:

- a) 内压不小于充装、出液工况的工作压力,且不小于设计温度下介质的饱和蒸气压力(表压);
- b) 外压应不小于深冷容器在制造、运输、充装、出液、检验与试验或其他工况中可能出现的最大内外压力差。

8.1.2 外壳的设计压力按下列要求确定:

- a) 内压应不低于外壳防爆装置设定的排放压力,当采用真空粉末绝热时,还应考虑粉末充填时夹层可能出现的最大内压;
- b) 外压不小于 0.1 MPa。

8.2 计算压力

8.2.1 内容器受压元件的计算压力应不小于设计压力、液柱静压力与 0.1 MPa 之和。

8.2.2 当液柱静压力小于设计压力的 5% 时,可忽略不计。

9 焊接接头系数

9.1 内容器的焊接接头系数取 1.0。

9.2 外壳的焊接接头系数取 0.85。

10 许用应力

10.1 当罐体承受压力载荷时,采用规则设计的罐体材料的许用应力按 GB/T 150.2 的规定选取,采用分析设计的罐体材料的设计应力强度按 JB 4732 的规定选取。

10.2 采用规则设计的罐体,局部结构采用应力分析设计时,材料的设计应力强度按 GB/T 150.2 中对应材料的许用应力确定。

10.3 当罐体采用的材料在 GB/T 24511 中规定了 $R_{p1.0}$ 值,且在设计文件中提出了钢板附加检验 $R_{p1.0}$ 值时,可使用 $R_{p1.0}$ 来确定材料的许用应力值。

10.4 罐体夹层内支撑件、罐体支座(或裙座)、吊耳等受力构件,其许用应力不大于以下要求确定的值,且满足相应受力构件标准的要求,其最大应力强度或最大当量应力不超过 0.75 倍的材料常温屈服强度:

- a) 具有明确屈服点的材料,其许用应力不大于材料标准常温下的屈服强度除以 1.5;
- b) 不具有明确屈服点的材料,其许用应力不大于材料标准常温下的 0.2% 规定塑性延伸强度除以 1.5;
- c) 低温用环氧玻璃钢等非金属材料(管、棒或板),其弯曲、压缩和剪切的许用应力值应为相应产品标准规定的常温下对应方向弯曲、压缩和剪切强度值除以安全系数,安全系数不小于 4。试样弯曲、压缩和剪切的试验方法应分别符合 GB/T 9341、GB/T 1448 和 GB/T 1450.1 的规定。

10.5 当地震载荷或风载荷与 6.2 中其他载荷相组合时,允许罐体承压元件和承力构件的设计应力不超过许用应力的 1.2 倍,其组合要求按相应标准的规定。

10.6 螺栓材料在不同温度下的许用应力按 GB/T 150.2 和相应标准的规定选取。

11 腐蚀裕量

11.1 深冷容器的腐蚀裕量应由设计者根据设计委托方提供的条件确定。

11.2 对于有均匀腐蚀或磨损的元件,应根据深冷容器预期的设计使用年限和介质对材料的腐蚀速率(及磨损速率)确定腐蚀裕量。内容器为奥氏体型不锈钢材料时,一般不考虑均匀腐蚀。

11.3 罐体各元件受到的腐蚀程度不同时,可采用不同的腐蚀裕量。

11.4 碳素钢或低合金钢制外壳内表面一般不考虑腐蚀。当外壳外表面有可靠的防腐蚀措施时,可不考虑腐蚀裕量;当外壳外表面无可靠的防腐蚀措施时,其腐蚀裕量应不小于 1 mm。

12 罐体厚度

12.1 罐体最小厚度的确定应考虑制造、运输、安装等因素的影响,内容器和外壳的壳体加工成型后不包括腐蚀裕量的最小厚度应符合下列要求:

- a) 碳素钢、低合金钢制外壳,应不小于 3 mm;
- b) 奥氏体不锈钢制内容器和外壳,应不小于 2 mm。

12.2 罐体的设计厚度应不小于下列值的较大值:

- a) 计算厚度与腐蚀裕量之和;
- b) 按 12.1 确定的罐体最小厚度与腐蚀裕量之和。

13 充满率

13.1 最大充满率应符合下列规定:

- a) 充装非易燃、易爆介质的深冷容器,在任何情况下可能达到的最大充满率应不大于 98%;
- b) 充装易燃、易爆介质的深冷容器,在任何情况下可能达到的最大充满率应不大于 95%。

13.2 额定充满率应符合下列规定:

- a) 充装非易燃、易爆介质的深冷容器,额定充满率应不大于 95%;
- b) 充装易燃、易爆介质的深冷容器,额定充满率应不大于 90%。

13.3 在确定初始充满率时,应考虑深冷容器储存冷冻液化气体预期所需要的维持时间(包括可能遇到

的长时间没有使用液体的情况)、最大充满率等因素,初始充满率应不超过额定充满率。

13.4 深冷容器应设置溢流口。溢流口应根据设计使用工况设置一个或多个,并符合 13.3 的规定。

14 真空绝热性能指标

14.1 常见冷冻液化气体介质的深冷容器的静态蒸发率应符合表 1 的规定。当设计委托方对维持时间有规定时,还应满足维持时间的要求。

14.2 采用真空复合绝热方式的深冷容器,其静态蒸发率应满足表 1 中高真空多层绝热方式的指标要求。

表 1 静态蒸发率

几何容积 V/m^3	静态蒸发率(上限值)/(%/d)							
	液氮		液氧		液氩		液化天然气(甲烷)	
	高真空 多层绝热	真空粉末 绝热	高真空 多层绝热	真空粉末 绝热	高真空 多层绝热	真空粉末 绝热	高真空 多层绝热	真空粉末 绝热
1	1.000	1.200	0.625	0.800	0.680	0.800	0.620	0.780
2	0.700	1.000	0.450	0.670	0.490	0.700	0.440	0.65
3	0.660	0.900	0.400	0.600	0.440	0.630	0.400	0.58
5	0.450	0.650	0.300	0.435	0.315	0.460	0.300	0.430
10	0.350	0.550	0.220	0.360	0.245	0.380	0.220	0.360
15	0.280	0.530	0.175	0.350	0.190	0.370	0.175	0.340
20	0.230	0.500	0.153	0.330	0.160	0.350	0.150	0.320
25	0.215	0.450	0.140	0.300	0.147	0.320	0.140	0.300
30	0.200	0.440	0.133	0.290	0.140	0.310	0.130	0.290
35	0.185	0.405	0.120	0.270	0.130	0.285	0.120	0.270
40	0.170	0.370	0.115	0.250	0.120	0.260	0.115	0.250
50	0.150	0.350	0.100	0.230	0.110	0.240	0.100	0.230
65	0.135	0.300	0.090	0.200	0.095	0.210	0.090	0.200
85	0.120	0.280	0.085	0.180	0.088	0.190	0.085	0.180
100	0.105	0.250	0.070	0.160	0.078	0.170	0.070	0.160
150	0.085	0.225	0.055	0.145	0.060	0.155	0.055	0.145
200	0.075	0.200	0.050	0.130	0.053	0.140	0.050	0.130
250	0.070	0.180	0.048	0.120	0.050	0.130	0.048	0.120
300	0.065	0.160	0.045	0.110	0.046	0.120	0.045	0.110
500	0.060	0.150	0.038	0.100	0.040	0.110	0.038	0.100
注:中间值采用内插法确定。								

15 夹层的真空性能

- 15.1 真空夹层的漏气速率应符合表 2 的规定。
- 15.2 真空夹层的漏放气速率应符合表 3 的规定。
- 15.3 常温下真空夹层的封结真空度应符合表 4 的规定。装有冷冻液化气体介质时,真空夹层的冷态真空度应不大于封结真空度的 0.1 倍。
- 15.4 夹层真空性能一般满足 5 年真空使用年限的要求。
- 15.5 采用真空复合绝热方式的深冷容器,夹层的真空性能要求应满足高真空多层绝热深冷容器的要求。

表 2 真空夹层漏气速率

几何容积 V/m^3	漏气速率/ $(\text{Pa} \cdot \text{m}^3/\text{s})$	
	高真空多层绝热	真空粉末绝热
$1 \leq V \leq 10$	$\leq 1 \times 10^{-8}$	$\leq 5 \times 10^{-8}$
$10 < V \leq 100$	$\leq 5 \times 10^{-8}$	$\leq 1 \times 10^{-7}$
$100 < V \leq 500$	$\leq 1 \times 10^{-7}$	$\leq 5 \times 10^{-7}$

表 3 真空夹层的漏放气速率

几何容积 V/m^3	漏放气速率/ $(\text{Pa} \cdot \text{m}^3/\text{s})$	
	高真空多层绝热	真空粉末绝热
$1 \leq V \leq 10$	$\leq 1 \times 10^{-6}$	$\leq 1 \times 10^{-5}$
$10 < V \leq 100$	$\leq 5 \times 10^{-6}$	$\leq 5 \times 10^{-5}$
$100 < V \leq 500$	$\leq 1 \times 10^{-5}$	$\leq 1 \times 10^{-4}$

表 4 封结真空度

几何容积 V/m^3	真空度/ Pa	
	高真空多层绝热	真空粉末绝热
$1 \leq V \leq 10$	≤ 0.01	≤ 2
$10 < V \leq 50$	≤ 0.02	≤ 3
$50 < V \leq 100$	≤ 0.03	≤ 5
$100 < V \leq 500$	≤ 0.05	≤ 8

16 耐压试验

- 16.1 耐压试验一般采用气压试验。
- 16.2 内容器与外壳组装前,内容器的耐压试验压力最低值的确定:
- a) 液压试验按式(1)计算:

$$p_T = 1.25(p + 0.1) \quad \dots\dots\dots (1)$$

b) 气压试验按式(2)计算:

$$p_T = 1.10(p + 0.1) \quad \dots\dots\dots (2)$$

式中:

p_T ——试验压力,单位为兆帕(MPa);当立式容器卧置液压试验时,试验压力应计入立式时的液柱静压力;

p ——设计压力,单位为兆帕(MPa)。

16.3 内容器与外壳组装完毕,且夹层形成真空后,内容器的耐压试验压力最低值的确定:

a) 液压试验按式(3)计算:

$$p_T = 1.25(p + 0.1) - 0.1 \quad \dots\dots\dots (3)$$

b) 气压试验按式(4)计算:

$$p_T = 1.10(p + 0.1) - 0.1 \quad \dots\dots\dots (4)$$

16.4 当采用大于 16.2 或 16.3 规定的耐压试验压力时,在内容器耐压试验前,应校核各受压元件在试验条件下的应力水平。内容器壳体元件应校核最大总体薄膜应力,并满足下列条件:

a) 液压试验

$$\sigma_T \leq 0.9R_{eL}(R_{p0.2}) \quad \dots\dots\dots (5)$$

b) 气压试验

$$\sigma_T \leq 0.9R_{eL}(R_{p0.2}) \quad \dots\dots\dots (6)$$

式中:

σ_T ——试验压力下圆筒的最大总体薄膜应力,单位为兆帕(MPa);

$R_{eL}(R_{p0.2})$ ——内容器材料在试验温度下的屈服强度(或 0.2%规定塑性延伸强度。当壳体采用的材料在 GB/T 24511 中规定了 $R_{p1.0}$ 值,且在设计文件中提出了钢板附加检验 $R_{p1.0}$ 值时,则可以选用该值作为屈服强度),单位为兆帕(MPa)。

16.5 管路的耐压试验应符合 GB/T 20801.5 的规定。夹层内部管路以及无法与罐体隔离(无根部阀)的外部管路可与内容器一同进行耐压试验,试验压力与内容器相同。设置了根部隔离阀的外部管路应将根部阀关闭后,单独进行耐压试验,试验压力不低于下列要求:

a) 液压试验

$$p_T = 1.5p \quad \dots\dots\dots (7)$$

b) 气压试验

$$p_T = 1.15p \quad \dots\dots\dots (8)$$

式中:

p_T ——试验压力,单位为兆帕(MPa);

p ——管路设计压力,单位为兆帕(MPa)。

17 泄漏试验

17.1 泄漏试验方法包括气密性试验和氦质谱检漏试验等。

17.2 内容器的泄漏试验宜采用气密性试验,试验压力取内容器的设计压力,试验介质应为干燥洁净的空气、氮气或其他惰性气体。

17.3 真空夹层的泄漏试验宜采用氦质谱检漏试验,其漏气速率指标应符合表 2 的规定。

17.4 管路的泄漏试验宜采用气密性试验。夹层管路以及无法与罐体隔离(无根部阀)的外部管路的气密性试验压力取内容器的设计压力,外部管路的气密性试验压力取管路的设计压力。

18 结构设计

18.1 罐体设计

18.1.1 深冷容器应采用双层金属壳的结构,内容器和外壳的截面应为圆形。

18.1.2 设计时,应考虑深冷容器在制造、试验和正常工作过程中,因内容器、夹层管路、外壳之间的温度梯度而引起的载荷。夹层管路满足 GB/T 20801.3—2006 中 7.1.2 的条件之一时,可免除管路的应力分析,否则应按照 GB/T 20801.3—2006 中第 7 章的规定对管路进行应力分析。

18.1.3 罐体进行强度计算和外压稳定性校核时,采用规则设计的应符合 GB/T 150.3 的规定,采用分析设计的应符合 JB 4732 的规定。

18.1.4 罐体总体按 GB/T 150.3 设计时,局部应力分析可按 JB 4732 的规定进行。

18.1.5 内容器的结构应尽量简单、避免结构形状的突然变化,以减少约束和局部应力集中。

18.1.6 深冷容器的罐体一般不设人孔或检查孔。当设置工艺人孔时,开孔位置宜布置在封头中心区域,开孔边缘应在封头中心 $0.8D_i$ 范围内,开孔中心线沿封头法线方向。工艺人孔封盖宜采用成型封头,封头与工艺人孔筒体的连接应采用焊接结构。

18.1.7 内容器的开孔补强宜采用整体补强结构。

18.1.8 夹层管路宜布置在内容器的固定端。

18.1.9 当内容器采用液压试验方法时,应设置排水口以便试验后排尽积水。

18.1.10 储存液氧的罐体结构设计应考虑避免碳氢化合物的积聚。

18.1.11 罐体外壳悬挂自增压器或汽化器时,应考虑自增压器或汽化器外部低温气流环境对外壳材料的影响。

18.2 焊接结构

18.2.1 焊接接头的结构应尽可能采用具有承受较高的静载荷能力和疲劳强度的接头型式。

18.2.2 内容器除最后一道封闭环焊缝外,A、B类焊接接头应采用全截面焊透的对接接头,封闭环焊缝允许采用带永久性垫板的对接接头。对于立式深冷容器,带永久性垫板的封闭环焊缝宜布置在上封头与筒体连接处。

18.2.3 外壳除最终组装形成封闭外壳的封闭环焊缝外,A、B类焊接接头也应采用全焊透的对接接头。封闭环焊缝允许采用带永久性垫板的单面焊对接接头。

18.2.4 夹层内的管子应通过管座与内容器壳体连接,管子对接接头、管子与管座的对接接头宜采用等壁厚对接焊接接头。

18.2.5 管座与内容器壳体连接的 D 类接头,应采用 GB/T 150.3—2011 中图 D.4 所示的全截面焊透焊接接头。

18.2.6 壳体上 B 类焊接接头两侧钢板厚度不等时,按 GB/T 150.4 的要求进行削边处理。应避免壳体上焊缝的布置过于集中,以减少焊接接头处壳体的变形和应力集中。

18.2.7 两种不同材料焊接时,其焊接接头型式应考虑材料的热膨胀特性、熔化温度、导热系数和低温条件下的收缩等因素。

18.2.8 焊接结构的设计应尽可能减少焊后修磨和加工的工作量。

18.3 夹层支撑

18.3.1 夹层支撑结构应能承受正常操作工况和空罐运输工况下的载荷。

18.3.2 夹层支撑结构除满足强度与刚度的要求外,还应尽量减少漏热量。

18.3.3 支撑结构在压、弯组合载荷作用下,应有足够的稳定性。

18.4 罐体支座

18.4.1 罐体支座应至少能够承受 6.3 规定的重力载荷、动力载荷和惯性力载荷。

18.4.2 罐体支座应按深冷容器的型式、直径、高度和所承受的载荷选择合适的支座型式。支座的设计按照 NB/T 47065.1、NB/T 47065.2、NB/T 47065.4 或 NB/T 47041 的规定。

18.5 吊耳

为了满足深冷容器运输及安装的要求,罐体应设置用于起吊的吊耳,并满足如下要求:

- a) 适合于空罐状态下起吊;
- b) 吊耳应具有足够的强度及刚度,设置位置合理,方便起吊;
- c) 吊耳的型式、承载能力和技术要求应符合 HG/T 21574 的规定。

18.6 结构件与罐体的连接

18.6.1 重量较轻的结构件与罐体直接相连接应满足下列要求:

- a) 结构件材料强度应不大于与其相连接的罐体材料的强度;
- b) 结构件材料厚度一般不大于与其相连接的罐体材料厚度的 0.7 倍。

18.6.2 主要受力构件宜通过垫板与罐体连接,垫板材料应与罐体材料牌号相同或垫板材料屈服强度标准值应为罐体材料屈服强度标准值的 0.8 倍~1.2 倍,且应符合下列规定:

- a) 垫板厚度不大于圆筒或封头厚度的 1.5 倍,且不小于 4 mm;
- b) 垫板与罐体的焊接接头高度应不大于所在位置的罐体材料的厚度;
- c) 结构件在垫板上的焊脚距离垫板边缘的尺寸应不小于 4 倍的垫板厚度;
- d) 垫板的边缘应为圆角形状,圆角半径应不小于 4 倍的垫板厚度;
- e) 垫板上应设置一个透气孔;
- f) 垫板与罐体应连续焊接;
- g) 垫板宜避开 A、B 类焊缝。

18.7 绝热设计

18.7.1 绝热方式和绝热结构应根据深冷容器所充装的介质特性以及对真空绝热性能的要求进行选择 and 设计。

18.7.2 充装标准大气压下沸点不高于 $-182\text{ }^{\circ}\text{C}$ 介质的罐体,不应采用可能与氧或富氧气氛发生危险性反应的绝热材料。

18.7.3 采用真空粉末绝热时,可向粉末中添加阻光剂。充装沸点不高于 $-182\text{ }^{\circ}\text{C}$ 介质的罐体不得选用铝粉等易燃阻光剂。

18.7.4 当夹层支撑的漏热量不能按经验公式计算时,宜采用有限元热分析计算。当夹层支撑材料的表观导热系数未知时,应采用试验方法确定。

18.7.5 采用高真空多层绝热的深冷容器,绝热材料的漏热量可按介质工作温度和高真空条件下的绝热材料表观比热流 $q(\text{W}/\text{m}^2)$ 乘以绝热层的表面积进行计算,且应考虑绝热层包扎松紧度、夹层间隙和夹层真空度等对绝热材料表观比热流的影响。

18.8 真空夹层中吸附剂的设置

18.8.1 真空夹层中冷侧应放置在深冷、真空状态下对极性分子气体具有较强吸附性能的低温吸附剂,如 5A 分子筛、13X 分子筛等。低温吸附剂应经活化处理后,尽可能紧贴内容器壳体底部放置。

18.8.2 采用高真空多层绝热的深冷容器,真空夹层的热侧应放置具备吸氢能力的常温吸附剂。

18.8.3 深冷容器中使用的吸附剂,应按 GB/T 31481 判断其相容性。氧化钬不宜用于储存液氧的深冷容器。

18.8.4 真空夹层内放置的吸附剂应避免集中布置,其用量一般按 5 年真空设计使用年限的要求确定。

18.9 专用结构设计

18.9.1 防超装设计

内容器应设置溢流口。几何容积不大于 10 m^3 的小型深冷容器,还应配备防过充装置。

18.9.2 排尽设计

排尽口应能使容器内的液体及可能存在于深冷液体中的固体颗粒杂物完全排尽。

18.9.3 真空封结装置

真空夹层应设置真空隔离阀或自吸式堵头等真空封结装置。真空隔离阀的漏气速率应比夹层漏气速率指标至少小一个数量级。

18.9.4 自增压器的设计

18.9.4.1 自增压器的压力等级应不低于内容器的设计压力,所选用的材料应与充装介质相容,且考虑使用工况中材料的热胀冷缩的影响。

18.9.4.2 自增压器的汽化能力应能满足用户在正常工作状态和应急调峰状态对深冷容器供液(供气)流量和内容器升压速率的要求,且考虑冷冻液化气体过冷度和环境条件对自增压器性能的影响。

18.9.4.3 自增压器的结构设计应避免液体或气体的偏流。

18.9.5 汽化器的设计

18.9.5.1 与深冷容器出液管路相连的汽化器,其压力等级应不低于内容器的设计压力,所选用的材料应与充装介质相容,且考虑使用工况中材料热胀冷缩的影响。

18.9.5.2 汽化器的设计应能满足用户在正常工作状态和应急调峰状态对供气压力、流量和气体温度的要求,且考虑冷冻液化气体过冷度和环境条件对汽化能力的影响。

18.10 管路系统的设计

18.10.1 管路系统

深冷容器一般应设置超压泄放管路、放空管路、顶部喷淋充液管路、底部充液与出液管路、增压管路、溢流管路、液位与压力测量等管路和附件,以满足泄压、放空、充液、出液、增压、溢流、压力测量、液位测量等使用要求。

18.10.2 设计方法

管路系统设计条件的确定原则、设计准则和设计计算方法按照 GB/T 20801.3 的规定。

18.10.3 夹层管路

18.10.3.1 夹层管路的设计压力应不小于内容器的设计压力。

18.10.3.2 夹层管路应具有足够的柔性以承受内容器和外壳之间的温差及管端位移引起的管路载荷,避免出现下列情况:

- a) 由于管路应力超过许用应力,导致夹层管路损坏;
- b) 管路与管座连接部位发生泄漏;
- c) 因存在过大的管路推力或弯矩导致管路元件、管座以及与管座相连接的内容器的应力超过许用应力。

18.10.3.3 夹层内管路的管子与管子、管子与管件之间的连接尽可能采用等壁厚、全截面焊透的对接接

头。管子与内容器管座的连接优先采用等壁厚、全截面焊透的对接接头,必要时也可采用承插焊结构。

18.10.3.4 顶部充液管路在内容器的出口端应设置喷淋装置,充液时尽可能使内容器被均匀冷却。如采用喷淋孔的装置,喷淋孔的截面积总和应不小于喷淋管的内截面积。

18.10.3.5 底部充液、出液管路的管径应满足充液、出液流量的要求。底部充液管口宜设置挡液板,向离心泵供液的出液管入口应设置防旋涡装置。

18.10.3.6 在夹层内的液相管应设置液封结构,液封的高度一般不小于3倍管子内径,液封管尽可能靠近内容器。

18.10.3.7 超压泄放管路应与内容器顶部气相空间直接相通,其入口应设置在内容器顶部气相空间不大于2%的位置。管路的流通面积应不小于超压泄放装置入口的流通面积,且满足内容器超压泄放的流量要求。

18.10.3.8 立式深冷容器的压力测量管路的取压口应设置在内容器上封头的顶部。卧式深冷容器的压力测量管路的取压口应设置在内容器的顶部,尽可能靠近筒体横向的中心,且应避免其他管口流体对其造成的冲击和扰动。

18.10.3.9 压差式液位测量管路应分别设置气相取压管和液相取压管。气相取压口的设置应按压力测量管路的取压口要求,也可与压力测量管路的取压口共用。液相取压口应尽可能设置在内容器最低处,且应避免底部充液、出液时流体对其造成的冲击和扰动。液相取压管路的设计应能将管路内的液体充分气化,确保测量的压差值的准确性,且不损坏液位测量装置。

18.10.4 外部管路

18.10.4.1 外部管路的阀门和充液、出液的管路接口、安全泄放装置、紧急切断装置(如有)、仪表等装置应布局合理、相对集中,便于操作、检查和维护。

18.10.4.2 外部管路系统设计压力的确定原则按照 GB/T 20801.3 的规定,并应满足下列要求:

- a) 管路(或管段)的设计压力应不小于内容器的设计压力;
- b) 两端均可关闭且有可能存留冷冻液化气体的管路,应设置管路超压泄放装置,其整定压力不超过管路设计压力的1.5倍;
- c) 未设置管路超压泄放装置或可能发生与超压泄放装置隔离、堵塞的管路,其设计压力应不小于管路两端阀门切断时或介质不流动时介质可能达到的最大饱和蒸气压;
- d) 与离心泵出口相连的管路的设计压力应不小于泵出口被关闭时的压力;
- e) 与工艺管道相连的管路的设计压力应不低于工艺管道的设计压力。

18.10.4.3 管子与管件的公称压力等级应不小于管路设计压力,且所有的管路应在承受4倍管路系统工作压力时不会破裂。

18.10.4.4 管路焊接接头应优先采用全焊透的对接接头型式,管路 with 仪表之间的连接可采用卡套接头或活套接头等连接方式。

18.10.4.5 管路的结构应避免因热胀冷缩、机械颤动或振动等所引起的损坏,必要时应考虑设置补偿结构和管路支撑与紧固装置。

18.10.4.6 管路中法兰组件的压力等级应与管路的压力等级相匹配。

18.10.4.7 管路的阀门应标志介质的流向,截止阀应标明开启和关闭方向。每只阀门和仪表应带一个标牌,在标牌上标明其在流程图中的代号和用途。

18.10.4.8 储存易燃、易爆介质的深冷容器,排放气体的管路出口应汇总集中排放,气体排放口应装设导管。

18.10.4.9 充装管路的充装口还应配置合适的阀门和装卸接头,装卸接头应带有防尘盖。装卸接头可按用户的要求配置防错装的快速连接接头。

18.10.4.10 自增压的进液管路和气体回流管路应与自增压器的汽化能力及其压力相匹配,尽量减少其流体阻力,且避免自增压的气体回路形成气阻。

附 录 A
(规范性附录)
风险评估报告

A.1 总则

A.1.1 本附录规定了风险评估报告的基本要求。

A.1.2 设计单位应根据 TSG 21、GB/T 150.1—2011 附录 F 的规定或设计委托方的要求,针对深冷容器建造阶段和使用阶段预期的工况编制风险评估报告。风险评估报告是设计的重要依据。

A.1.3 设计单位应充分考虑深冷容器的结构特点、绝热方式、制造工艺和各种工况条件下可能产生的失效模式,在材料选择、结构设计、制造检验和使用要求等方面提出安全防护措施,防止可能发生的失效。

A.2 制定原则和程序

A.2.1 设计阶段的风险评估是设计者针对产品设计阶段、制造阶段和使用阶段预期的失效模式进行的危害识别和风险控制,说明应采取的技术措施和依据。

A.2.2 设计阶段风险评估按以下程序进行:

- a) 根据设计委托方的设计条件和其他设计输入信息(如设计任务书等),确定深冷容器的各种使用工况;
- b) 根据深冷容器的充装介质、环境因素、操作条件等进行危害识别,确定可能发生的危害及其后果;
- c) 针对可能发生的危害和相应的失效模式,说明应采取的安全防护措施和依据;
- d) 形成完整的风险评估报告。

A.3 风险评估报告内容

风险评估报告至少应包括如下内容:

- a) 深冷容器的基本设计参数:工作条件(如工作压力、工作温度、腐蚀环境等)、充装介质(如编号、名称、危害特性等)、结构特征和制造工艺(如内容器是否采用应变强化、绝热方式、夹层支撑和罐体支座型式)、材料等;
- b) 所有可能工况条件的描述,至少应考虑:内容器应变强化处理(如采用)、内容器冷冲击试验(如设计委托方要求时)、夹层充填绝热材料、夹层加热抽真空、空罐运输、吊装、热罐首次充液、正常充液与储存冷冻液化气体、增压、对外供液或供气、低温性能型式试验等工况;
- c) 设计阶段时,应考虑所有工况条件下可能发生的失效模式,如内容器或外壳的韧性断裂或脆性断裂、局部过度变形、循环载荷引起的疲劳、超量变形引起的管接头泄漏、介质对壳体的腐蚀、夹层真空失效、吸附剂失效等;
- d) 对标准、安全技术规范或规范性文件已经有规定的失效模式,说明采用的条款;
- e) 对标准、安全技术规范或规范性文件没有规定的失效模式,说明设计中载荷、安全系数和相应设计计算方法的选取依据;
- f) 提出针对介质少量泄漏、大量涌出和爆炸状况下如何处置的措施;
- g) 根据可能发生的事故情况,规定合适的操作人员的防护装备和防护措施;
- h) 风险评估报告应具有与深冷容器设计总图一致的签署。

附 录 B
(资料性附录)
常见冷冻液化气体热力学数据

B.1 R728(氮)在饱和状态下热力学数据见表 B.1。

表 B.1 R728(氮)在饱和状态下热力学数据

温度 K	压力 MPa	蒸气比体积 m ³ /kg	液体密度 kg/m ³	液体比焓 kJ/kg	蒸气比焓 kJ/kg	液体比熵 kJ/(kg·K)	蒸气比熵 kJ/(kg·K)
63.15 ^a	0.012 53	1.481 7	867.78	—150.45	64.739	2.427 1	5.838 1
64	0.014 612	1.286 2	864.59	—148.78	65.552	2.453 4	5.805 7
65	0.017 418	1.094 2	860.78	—146.79	66.498	2.484 1	5.768 8
66	0.020 641	0.936 08	856.9	—144.79	67.433	2.514 6	5.733 4
67	0.024 323	0.804 98	852.96	—142.77	68.357	2.544 9	5.699 2
68	0.028 509	0.695 69	848.96	—140.75	69.27	2.574 8	5.666 4
69	0.033 246	0.604 06	844.9	—138.71	70.17	2.604 5	5.634 8
70	0.038 584	0.526 85	840.77	—136.67	71.058	2.633 8	5.604 2
71	0.044 572	0.461 46	836.58	—134.62	71.931	2.662 7	5.574 8
72	0.051 265	0.405 81	832.33	—132.57	72.791	2.691 3	5.546 3
73	0.058 715	0.358 24	828.02	—130.51	73.635	2.719 6	5.518 8
74	0.066 979	0.317 39	823.65	—128.45	74.463	2.747 5	5.492 2
75	0.076 116	0.282 17	819.22	—126.39	75.275	2.775	5.466 4
76	0.086 183	0.251 68	814.74	—124.32	76.07	2.802 2	5.441 4
77	0.097 241	0.225 19	810.2	—122.25	76.847	2.829 1	5.417 2
77.35 ^b	0.101 325	0.216 8	808.61	—121.53	77.113	2.838 4	5.409
78	0.109 35	0.202 08	805.6	—120.18	77.606	2.855 7	5.393 7
79	0.122 58	0.181 85	800.95	—118.1	78.345	2.881 9	5.370 8
80	0.136 99	0.164 09	796.24	—116.02	79.065	2.907 8	5.348 6
81	0.152 64	0.148 44	791.48	—113.94	79.763	2.933 4	5.326 9
82	0.169 6	0.134 61	786.66	—111.85	80.44	2.958 8	5.305 8
83	0.187 94	0.122 35	781.79	—109.76	81.095	2.983 9	5.285 2
84	0.207 73	0.111 46	776.86	—107.66	81.726	3.008 7	5.265 1
85	0.229 03	0.101 74	771.87	—105.56	82.334	3.033 3	5.245 5
86	0.251 92	0.093 06	766.82	—103.45	82.917	3.057 6	5.226 3
87	0.276 46	0.085 27	761.71	—101.33	83.474	3.081 8	5.207 4
88	0.302 72	0.078 28	756.54	—99.2	84.005	3.105 7	5.189
89	0.330 78	0.071 99	751.3	—97.062	84.508	3.129 4	5.170 9

表 B.1 (续)

温度 K	压力 MPa	蒸气比体积 m ³ /kg	液体密度 kg/m ³	液体比焓 kJ/kg	蒸气比焓 kJ/kg	液体比熵 kJ/(kg·K)	蒸气比熵 kJ/(kg·K)
90	0.360 71	0.066 31	745.99	—94.914	84.982	3.153	5.153 1
91	0.392 58	0.061 17	740.62	—92.756	85.428	3.176 3	5.135 6
92	0.426 46	0.056 51	735.18	—90.585	85.842	3.199 6	5.118 3
93	0.462 42	0.052 28	729.66	—88.401	86.225	3.222 6	5.101 4
94	0.500 55	0.048 43	724.06	—86.203	86.575	3.245 6	5.084 6
95	0.540 9	0.044 91	718.38	—83.991	86.89	3.268 4	5.068
96	0.583 57	0.041 7	712.62	—81.765	87.17	3.291 1	5.051 6
97	0.628 62	0.038 76	706.77	—79.517	87.413	3.313 7	5.035 4
98	0.676 14	0.036 07	700.83	—77.253	87.616	3.336 3	5.019 2
99	0.726 19	0.033 59	694.79	—74.97	87.78	3.358 7	5.003 2
100	0.778 86	0.031 32	688.79	—72.666	87.901	3.381 1	4.987 3
101	0.834 22	0.029 21	682.4	—70.34	87.977	3.403 4	4.971 4
102	0.892 35	0.027 28	676.04	—67.99	88.007	3.425 7	4.955 5
103	0.953 34	0.025 48	669.55	—65.616	87.988	3.448	4.939 6
104	1.017 3	0.023 82	662.94	—63.215	87.917	3.470 3	4.923 7
105	1.084 2	0.022 28	656.2	—60.785	87.791	3.492 6	4.907 8
106	1.154 2	0.020 85	649.31	—58.324	87.607	3.514 9	4.891 7
107	1.227 5	0.019 51	642.26	—55.83	87.361	3.537 2	4.875 5
108	1.304	0.018 27	635.04	—53.30	87.048	3.559 7	4.859 2
109	1.383 8	0.017 11	627.64	—50.731	86.664	3.582 2	4.842 6
110	1.467 1	0.016 02	620.04	—48.119	86.203	3.608 4	4.825 8
111	1.554	0.015	612.21	—45.461	85.659	3.627 6	4.808 7
112	1.644 5	0.014 05	604.14	—42.751	85.023	3.650 6	4.791 2
113	1.738 8	0.013 15	595.8	—39.984	84.288	3.673 8	4.773 3
114	1.836 9	0.012 3	587.15	—37.152	83.441	3.697 2	4.754 9
115	1.939	0.011 5	578.14	—34.247	82.471	3.721 1	4.735 8
116	2.045 2	0.010 74	568.72	—31.258	81.36	3.745 4	4.715 9
117	2.155 5	0.010 02	558.82	—28.17	80.088	3.770 2	4.695 2
118	2.270 3	0.009 331	548.35	—24.967	78.629	3.795 7	4.673 3
119	2.389 5	0.008 671	537.17	—21.624	76.948	3.822	4.650 1
120	2.513 3	0.008 035	525.12	—18.105	74.996	3.849 5	4.625 1
121	2.642	0.007 417	511.92	—14.362	72.702	3.878 5	4.597 8
122	2.775 7	0.006 808	497.15	—10.316	69.957	3.909 7	4.567 4

表 B.1 (续)

温度 K	压力 MPa	蒸气比体积 m ³ /kg	液体密度 kg/m ³	液体比焓 kJ/kg	蒸气比焓 kJ/kg	液体比熵 kJ/(kg·K)	蒸气比熵 kJ/(kg·K)
123	2.914 7	0.006 198	480.11	—5.829	66.576	3.944	4.532 4
124	3.059 2	0.005 566	459.33	—0.627	62.194	3.983 6	4.490 1
125	3.209 9	0.004 863	431.03	6.015	55.882	4.034 2	4.433 1
126.20 ^c	3.4	0.003 184	314	30.7	30.7	4.227	4.227
注：以上数据摘自 American Society of Heating, Refrigeration and Air-Conditioning Engineers, Inc. <1997 ASHRAE Handbook, Fundamentals> Atlanta, GA, U.S.A. ASHRAE 1997。							
^a 三相点。							
^b 沸点。							
^c 临界点。							

B.2 R732(氧)在饱和状态下热力学数据见表 B.2。

表 B.2 R732(氧)在饱和状态下热力学数据

温度 K	压力 MPa	蒸气比体积 m ³ /kg	液体密度 kg/m ³	液体比焓 kJ/kg	蒸气比焓 kJ/kg	液体比熵 kJ/(kg·K)	蒸气比熵 kJ/(kg·K)
54.36 ^a	0.000 15	96.543	1 306.1	—193.61	49.11	2.088 7	6.553 7
55	0.000 18	79.987	1 303.5	—192.55	49.68	2.108 3	6.512 4
60	0.000 73	21.462	1 282	—184.19	54.19	2.253 7	6.226 6
65	0.002 33	7.219	1 259.7	—175.81	58.66	2.387 8	5.995
70	0.006 26	2.892 5	1 237	—167.42	63.09	2.512 1	5.805 1
75	0.014 55	1.329 3	1 213.9	—159.02	67.45	2.627 9	5.647 6
80	0.030 12	0.680 9	1 190.5	—150.61	71.69	2.736 3	5.515 1
85	0.056 83	0.380 47	1 166.6	—142.18	75.75	2.838 3	5.402 1
90	0.099 35	0.227 94	1 142.1	—133.69	79.55	2.934 9	5.304 2
90.19 ^b	0.101 32	0.223 86	1 141.2	—133.37	79.69	2.938 4	5.300 8
91	0.110 22	0.207 22	1 137.1	—131.98	80.276	2.957 1	5.289 6
92	0.121 97	0.188 79	1 132.1	—130.27	80.987	2.975 6	5.271 9
93	0.134 67	0.172 35	1 127.1	—128.56	81.685	2.994 0	5.254 7
94	0.148 36	0.157 66	1 122.0	—126.84	82.369	3.012 3	5.237 9
95	0.163 08	0.144 50	1 116.9	—125.12	83.039	3.030 3	5.221 5
96	0.178 89	0.132 68	1 111.8	—123.40	83.694	3.048 2	5.205 4
97	0.195 84	0.122 05	1 106.6	—121.84	84.333	3.066 0	5.189 7
98	0.213 97	0.112 45	1 101.4	—120.13	84.957	3.083 6	5.174 3
99	0.233 34	0.103 78	1 096.2	—118.41	85.564	3.101 1	5.159 3
100	0.254 00	0.095 925	1 090.9	—116.68	86.155	3.118 4	5.144 5

表 B.2 (续)

温度 K	压力 MPa	蒸气比体积 m ³ /kg	液体密度 kg/m ³	液体比焓 kJ/kg	蒸气比焓 kJ/kg	液体比熵 kJ/(kg·K)	蒸气比熵 kJ/(kg·K)
101	0.276 01	0.088 798	1 085.6	—114.95	86.729	3.135 7	5.130 0
102	0.299 41	0.082 320	1 080.2	—113.22	87.286	3.152 7	5.115 8
103	0.324 26	0.076 420	1 074.8	—111.48	87.824	3.169 7	5.101 8
104	0.350 62	0.071 036	1 069.3	—109.74	88.344	3.186 6	5.088 1
105	0.378 53	0.066 116	1 063.8	—107.99	88.846	3.203 3	5.074 6
106	0.408 06	0.061 613	1 058.2	—106.24	89.328	3.220 0	5.061 3
107	0.439 25	0.057 483	1 052.6	—104.48	89.790	3.236 5	5.048 2
108	0.472 17	0.053 691	1 047.0	—102.71	90.233	3.252 9	5.035 3
109	0.506 87	0.050 203	1 041.3	—100.94	90.654	3.269 3	5.022 6
110	0.543 40	0.046 990	1 035.5	—99.165	91.054	3.285 5	5.010 0
111	0.581 83	0.044 026	1 029.6	—97.381	91.433	3.301 7	4.997 7
112	0.622 20	0.041 288	1 023.7	—95.589	91.789	3.317 8	4.985 4
113	0.664 58	0.038 756	1 017.8	—93.790	92.122	3.333 8	4.973 3
114	0.709 02	0.036 411	1 011.7	—91.983	92.432	3.349 8	4.961 3
115	0.755 59	0.034 236	1 005.6	—90.168	92.717	3.365 7	4.949 5
116	0.804 33	0.032 216	999.42	—88.345	92.978	3.381 5	4.937 7
117	0.855 32	0.030 338	993.16	—86.512	93.212	3.397 3	4.926 0
118	0.908 59	0.028 589	986.81	—84.669	93.421	3.413 0	4.914 5
119	0.964 23	0.026 960	980.38	—82.817	93.601	3.428 7	4.902 9
120	1.022 3	0.025 440	973.85	—80.954	93.754	3.444 4	4.891 5
121	1.082 8	0.024 020	967.24	—79.080	93.877	3.460 0	4.880 1
122	1.145 9	0.022 692	960.52	—77.195	93.970	3.475 6	4.868 8
123	1.211 5	0.021 449	953.70	—75.297	94.032	3.491 1	4.857 4
124	1.279 8	0.020 284	946.77	—73.386	94.061	3.506 7	4.846 1
125	1.350 9	0.019 190	939.72	—71.461	94.056	3.522 2	4.834 8
126	1.424 7	0.018 164	932.55	—69.522	94.015	3.537 8	4.823 5
127	1.501 4	0.017 198	925.25	—67.567	93.938	3.553 3	4.812 2
128	1.580 9	0.016 290	917.81	—65.596	93.822	3.568 9	4.800 9
129	1.663 5	0.015 434	910.22	—63.608	93.665	3.584 5	4.789 5
130	1.749 1	0.014 626	902.48	—61.600	93.466	3.600 1	4.778 0
132	1.929 6	0.013 144	886.48	—55.348	92.931	3.631 5	4.754 8
134	2.123 2	0.011 816	869.70	—50.916	92.195	3.663 1	4.731 1
136	2.330 3	0.010 623	852.02	—46.347	91.232	3.695 2	4.706 8

表 B.2 (续)

温度 K	压力 MPa	蒸气比体积 m ³ /kg	液体密度 kg/m ³	液体比焓 kJ/kg	蒸气比焓 kJ/kg	液体比熵 kJ/(kg·K)	蒸气比熵 kJ/(kg·K)
138	2.551 6	0.009 544 5	833.28	—41.617	90.006	3.727 8	4.681 6
140	2.787 8	0.008 56	813.2	—36.70	88.47	3.757 7	4.651 8
145	3.447 8	0.006 46	755.1	—23.22	82.83	3.846 4	4.577 7
150	4.218 6	0.004 65	675.5	—6.67	72.56	3.951 2	4.479 4
154.58 ^c	5.043	0.002 29	436.1	32.42	32.42	4.197 4	4.197 4
注：以上数据摘自 American Society of Heating, Refrigeration and Air-Conditioning Engineers, Inc. <1997 ASHRAE Handbook, Fundamentals> Atlanta, GA, U.S.A. ASHRAE 1997。							
^a 三相点。							
^b 沸点。							
^c 临界点。							

B.3 R740(氟)在饱和状态下热力学数据见表 B.3。

表 B.3 R740(氟)在饱和状态下热力学数据

温度 K	压力 MPa	蒸气比体积 m ³ /kg	液体密度 kg/m ³	液体比焓 kJ/kg	蒸气比焓 kJ/kg	液体比熵 kJ/(kg·K)	蒸气比熵 kJ/(kg·K)
83.80 ^a	0.069	0.246 5	1 417.2	—121.1	42.59	1.331 4	3.284 1
84	0.070 5	0.241 5	1 416	—120.8	42.65	1.333 9	3.280 3
86	0.088 2	0.196 7	1 404.1	—118.7	43.29	1.359 1	3.242 6
87.29 ^b	0.101 3	0.173 1	1 396.3	—117.3	43.69	1.375 1	3.219 3
88	0.109 1	0.161 7	1 392	—116.5	43.91	1.383 8	3.206 9
90	0.133 6	0.134 2	1 379.7	—114.4	44.5	1.408 1	3.173
92	0.162 1	0.112 3	1 367.2	—112.2	45.06	1.432	3.140 8
94	0.195	0.094 7	1 354.5	—109.9	45.59	1.455 5	3.11
96	0.232 7	0.080 5	1 341.6	—107.7	46.08	1.478 8	3.080 7
98	0.275 5	0.068 8	1 328.4	—105.4	46.55	1.501 8	3.052 6
100	0.324	0.059 1	1 315	—103.2	46.97	1.524 5	3.025 7
102	0.378 5	0.051 1	1 301.3	—100.9	47.35	1.546 9	2.999 8
104	0.439 5	0.044 5	1 287.4	—98.51	47.68	1.569 1	2.974 8
106	0.507 4	0.038 8	1 273.1	—96.15	47.96	1.591 2	2.950 7
108	0.582 7	0.034	1 258.6	—93.75	48.19	1.613	2.927 2
110	0.665 7	0.03	1 243.7	—91.32	48.35	1.634 7	2.904 4
112	0.757	0.026 5	1 228.5	—88.85	48.44	1.656 2	2.882 1
114	0.857 1	0.023 5	1 212.9	—86.35	48.46	1.677 7	2.860 2

表 B.3 (续)

温度 K	压力 MPa	蒸气比体积 m ³ /kg	液体密度 kg/m ³	液体比焓 kJ/kg	蒸气比焓 kJ/kg	液体比熵 kJ/(kg·K)	蒸气比熵 kJ/(kg·K)
116	0.966 2	0.020 9	1 196.9	—83.80	48.4	1.699	2.838 7
118	1.085	0.018 6	1 180.4	—81.21	48.25	1.720 4	2.817 4
120	1.213 9	0.016 6	1 163.4	—78.56	48.01	1.741 7	2.796 4
125	1.583 5	0.012 6	1 118.4	—71.69	46.92	1.795 1	2.744
130	2.027	0.009 6	1 068.5	—64.33	45.01	1.849 6	2.690 7
135	2.553	0.007 4	1 011.5	—56.29	41.97	1.906 5	2.634 4
140	3.171	0.005 6	942.4	—47.15	37.26	1.968 4	2.571 3
145	3.892 9	0.004 1	849.1	—35.87	29.57	2.041 8	2.493 1
150.66 ^c	4.86	0.001 9	530.9	—3.56	—3.56	2.25	2.25
注：以上数据摘自 American Society of Heating, Refrigeration and Air-Conditioning Engineers, Inc. <1997 ASHRAE Handbook, Fundamentals> Atlanta, GA, U.S.A. ASHRAE 1997。							
^a 三相点。 ^b 沸点。 ^c 临界点。							

B.4 R50(甲烷)在饱和状态下热力学数据见表 B.4。

表 B.4 R50(甲烷)在饱和状态下热力学数据

温度 K	压力 MPa	蒸气比体积 m ³ /kg	液体密度 kg/m ³	液体比焓 kJ/kg	蒸气比焓 kJ/kg	液体比熵 kJ/(kg·K)	蒸气比熵 kJ/(kg·K)
90.68 ^a	0.011 719	3.978 1	451.23	—357.68	185.75	4.289 4	10.282 3
92	0.013 853	3.411 2	449.52	—353.36	188.31	4.336 7	10.224 4
94	0.017 679	2.726 8	446.90	—346.76	192.16	4.407 5	10.140 8
96	0.022 314	2.202 2	444.26	—340.10	195.97	4.477 5	10.061 6
98	0.027 877	1.795 4	441.59	—333.39	199.73	4.546 6	9.986 6
100	0.034 495	1.476 9	438.89	—326.63	203.44	4.614 7	9.915 4
102	0.042 302	1.225 0	436.15	—319.84	207.10	4.681 8	9.847 8
104	0.051 441	1.024 0	433.39	—313.00	210.70	4.748 0	9.783 5
106	0.062 063	0.862 2	430.59	—306.13	214.23	4.813 2	9.722 3
108	0.074 324	0.730 8	427.76	—299.22	217.70	4.877 5	9.663 8
110	0.088 389	0.623 5	424.89	—292.28	221.11	4.940 8	9.608 0
111.63 ^b	0.101 325	0.550 0	422.53	—286.59	223.83	4.991 9	9.564 3
112	0.104 43	0.535 0	422.00	—285.31	224.44	5.003 3	9.554 6
113	0.113 24	0.496 7	420.53	—281.81	226.08	5.034 2	9.528 8
114	0.122 61	0.326 5	419.06	—278.30	227.69	5.064 9	9.503 5

表 B.4 (续)

温度 K	压力 MPa	蒸气比体积 m ³ /kg	液体密度 kg/m ³	液体比焓 kJ/kg	蒸气比焓 kJ/kg	液体比熵 kJ/(kg·K)	蒸气比熵 kJ/(kg·K)
115	0.132 57	0.429 7	417.58	−274.79	229.29	5.095 4	9.478 7
116	0.143 13	0.400 5	416.10	−271.26	230.87	5.125 7	9.454 5
117	0.154 32	0.373 7	414.60	−267.73	232.43	5.155 8	9.430 7
118	0.166 16	0.349 1	413.09	−264.33	233.96	5.185 8	9.407 3
119	0.178 67	0.326 5	411.57	−242.73	235.47	5.215 5	9.384 4
120	0.191 89	0.305 7	410.05	−257.07	236.97	5.245 0	9.362 0
121	0.205 83	0.286 5	408.51	−253.50	238.43	5.274 4	9.339 9
122	0.220 52	0.268 8	406.97	−249.92	239.88	5.303 5	9.318 3
123	0.235 99	0.252 4	405.41	−246.33	241.30	5.332 5	9.297 0
124	0.252 25	0.237 3	403.85	−242.73	242.69	5.361 4	9.276 0
125	0.269 33	0.223 3	402.27	−239.12	244.06	5.390 0	9.255 5
126	0.287 27	0.210 3	400.69	−235.49	245.41	5.418 5	9.235 2
127	0.306 07	0.198 2	399.09	−231.86	246.73	5.446 9	9.215 3
128	0.325 78	0.187 0	397.48	−228.21	248.02	5.475 1	9.195 7
129	0.346 41	0.176 6	395.86	−224.56	249.28	5.503 2	9.176 3
130	0.368 00	0.166 9	394.23	−220.89	250.51	5.531 1	9.157 2
131	0.390 56	0.157 8	392.58	−217.20	251.72	5.558 9	9.138 4
132	0.414 13	0.149 4	390.93	−213.51	252.90	5.586 5	9.119 9
133	0.438 72	0.141 5	389.26	−209.80	254.04	5.614 0	9.101 6
134	0.464 37	0.134 1	387.57	−206.08	255.16	5.641 4	9.083 5
135	0.491 11	0.127 3	385.87	−202.34	256.24	5.668 7	9.065 6
136	0.518 95	0.120 8	384.16	−198.58	257.29	5.695 9	9.047 6
137	0.547 93	0.114 7	382.43	−194.81	258.31	5.722 9	9.030 4
138	0.578 07	0.109 0	380.69	−191.03	259.29	5.749 9	9.013 1
139	0.609 41	0.103 6	378.93	−187.22	260.24	5.776 8	8.995 9
140	0.641 96	0.098 51	377.15	−183.40	261.15	5.803 6	8.978 9
142	0.710 82	0.089 25	373.54	−175.70	262.85	5.856 9	8.945 3
144	0.784 88	0.081 02	369.85	−167.92	264.41	5.909 9	8.912 1
146	0.864 36	0.073 69	366.08	−160.05	265.79	5.962 7	8.879 4
148	0.949 48	0.067 13	362.22	−152.09	267.00	6.015 2	8.846 9
150	1.040 50	0.061 25	358.26	−144.02	268.02	6.067 7	8.814 6
152	1.137 60	0.055 96	354.19	−135.84	268.84	6.120 0	8.782 4
154	1.241 00	0.051 19	350.01	−127.54	269.45	6.172 4	8.750 2

