海安会 MSC.597(111)决议
(2026 年 5 月 18 日通过)

经修订的散装运输液化氢临时建议案

海上安全委员会，

忆及《国际海事组织公约》关于本委员会职能的第 28(b)条，

注意到《1974 年国际海上人命安全公约》（“本公约”）和《国际散装运输液化气体船舶构造和设备规则》（“IGC 规则”）目前未特别规定海上散装运输液化氢的要求，

还注意到 IGC 规则前言第 5 段规定，对新货品及其运输条件的要求，在适当的修正案生效前，暂作建议案进行分发，

认识到有必要制定经修订的散装运输液化氢临时建议案，

承认在此期间，迫切需要向主管机关提供关于安全散装运输液化氢的建议案，

还承认经修订的临时建议案旨在便利制定试点船的三方协议，该协议的制定将用于长距离的海外安全散装运输液化氢的研究和证明，

审议了货物和集装箱运输分委会在其第 11 次会议上制定的经修订的临时建议案，

1 **通过**《经修订的散装运输液化氢临时建议案》，其文本载于本决议附件；

2 **提请**成员国对散装运输液化氢的试点船应用经修订的临时建议案，并虑及解释性说明；

3 **同意**在 IGC 规则修正案纳入液化氢之前，获得关于安全散装运输液化氢的信息；

4 **还同意**如果经修订的临时建议案应用于试点船以外的船舶，其可能需要评审；

5 **敦促**成员国和业界根据通过应用经修订的临时建议案获得的实际经验提交信息、观察结果、意见和建议，并提交关于散装运输液化氢船舶的相关安全分析；

6 **废除**海安会 MSC.565(108)决议。

附件

经修订的散装运输液化氢临时建议案

1 介绍

1.1 就船舶散装运输液化气体而言，船舶应符合经修正的 IGC 规则（“本规则”）的相关要求。1.1.1 中规定的规则适用范围为：

“本规则适用于各种尺度（包括 500 总吨以下）从事散装运输本规则第 19 章所列的温度为 37.8℃时其蒸气压力超过 0.28 MPa（绝对压力）的液化气体和其他货品的船舶。”

1.2 散装运输液化氢的船舶（以下称“液化氢运输船”）应符合本规则。

1.3 本规则要求气体运输船应符合第 19 章所列货物的最低要求。然而，本规则中未规定液化氢的要求。

1.4 本附件提供本规则前言第 5 段中所述的经修订的散装运输液化氢临时建议案，旨在提供将来运输该货物的最低要求的基础。经修订的临时建议案旨在便于相关主管机关之间制定散装运输液化氢的三方协议。然而，经修订的临时建议案并不旨在禁止主管机关自行决定采用除本规则或经修订的临时建议案中规定的设计和布置之外的其他设计和布置。

1.5 经修订的临时建议案的制定基于的假设为液化氢运输船不载运除液化氢外的液化气体。因此，经修订的临时建议案不适用于载运除液化氢外的气体的液化氢运输船。

1.6 在完成本规则附录 2“《国际散装运输液化气体适装证书》的格式样本”中的证书时，参见本规则前言第 5 段、1.1.6.1 和注 8。

1.7 经修订的临时建议案包括以下部分。A 部分适用于任何类型货物围护系统的船舶。B 部分及之后的部分规定特定类型的货物围护系统附加的特殊要求。

A 部分：通则（适用于任何类型货物围护系统的船舶）；

B 部分：使用真空绝热的独立液货舱的货物围护系统；

C 部分：使用绝热材料的独立液货舱的货物围护系统和在内部绝热处所的氢气；和

D 部分：使绝热处所保持真空的薄膜型液货舱的货物围护系统。

1.8 经修订的临时建议案的 A 部分是在 B、C 和 D 部分设计的基础上形成的。如果增加后续部分，可审议 A 部分规定的特殊要求。

A 部分
通则
（适用于任何类型货物围护系统的船舶）

2 通则

2.1 定义

2.1.1 就经修订的临时建议案而言，以下定义应适用。

*渗透*系指一种液体穿过其他材料的扩散流动，而后者没有缺陷或开口。[1]

2.2 散装运输液化氢的要求

2.2.1 散装运输液化氢的要求已基于本规则第 19 章中所列的类似货物（例如液化天然气）的比较研究结果制定。

2.2.2 在本规则第 19 章规定了各种货物一般要求的应用。各种货物一般要求见‘c’至‘g’栏。除一般要求外，特殊要求也可视货物的特性/危害适用于特定货物。

2.2.3 表 1 和表 2 分别规定了液化氢的一般要求和特殊要求的建议选项。除表 2 外，在 B 部分和后续部分还对特定类型货物围护系统的特殊要求做出了规定。

---

[1] 见 ISO/TR 15916:2015 第 3.79 段。

表 1：散装运输液化氢的要求

a	b	c	d	e	f	g	h	i
产品名称		船型	要求 C 型独立液货舱	液货舱内蒸气空间的控制	蒸气探测	测量		特殊要求
氢		2G	-	-	F	C		根据货物围护系统的类型，见表 2 及相应的表 4 或表 5 或表 6

表 2：散装运输液化氢的特殊要求

编号	特殊要求	相关危害
A-1	设计温度低于-165°C 的材料的要求应经主管机关同意，并注意到适当的标准。如果最低设计温度低于-196°C，应使用适当的介质在预期服务温度范围内进行绝热材料的性能测试。	低温（见 4.2.1）
A-2	构造材料和辅助设备（例如绝热材料）应能抵抗由于货物系统局部低温时的浓缩效应引起的高氧浓度影响（参见氮要求）。该特殊要求适用于在正常状态和可预知的单一故障场景下所有预计会接触到压缩氧气的处所。	低温（见 4.2.2）
A-3	对于含有液态氢和低温氢蒸气的货物管路，应采取措施防止暴露表面达到-183°C。对于低温预防措施不够充分有效的区域，例如货物总管，可允许其他适当的措施（例如通风可避免形成高富氧和安装液态空气回收盘）以替代预防措施。暴露在空气中的液态氢管系的绝热层应为不可燃材料，并应设计成外壳密封以防止空气冷凝和随后在绝热层内的富氧。	低温（见 4.2.2）
A-4	在货物管系中应有适当的方式（例如过滤）以去除低温下冷凝的杂质。	低温（见 4.2.3）
A-5	压力释放系统的设计和构造应能防止由于水或冰的形成而堵塞。	低温（见 4.2.4）
A-6	在预计会与氢接触的地方，在必要时应使用适当的材料，以防止由于持续暴露于氢气造成的氢脆、强度和疲劳性能退化而引起的结构损坏。	氢脆（见 4.3）
A-7	在可能发生氢气泄漏的受限部位（例如货物阀、法兰和密封圈）应设有确保无泄漏的双层管结构或能探测氢气泄漏的固定式氢气探测器。	易泄漏性（见 4.4.2）
A-8	对液货舱和货物管系，应使用氦或者 5%氢和 95%氮的混合物作为密性试验介质。	易泄漏性（见 4.4.3）
A-9	在所有情况下，二氧化碳灭火系统所携带的二氧化碳数量应足以提供相当于货物压缩机和泵舱总容积的 75%及以上的自由气体量。	氢气引起火灾（见 4.7.3） 较宽的可燃性极限范围（见 4.10）
A-10	如果单一损伤可能造成绝热能力降低，应虑及绝热降低而采取适当的安全措施。	高压（见 4.8）
A-11	应采取适当措施防止由于空气中水分凝聚成冰而造成透气孔堵塞。	低温

编号	特殊要求	相关危害
		（见 4.1）
A-12	应考虑处理蒸发气体的方法。	高压 （见 4.8）
A-13	除了本规则 5.7.4 对货舱、管系和设备的接地要求之外，还应考虑与旋转或往复式机械相关的静电，包括安装导电机械带和采取在操作和维护程序中纳入预防措施。 应为在货物区域工作的每个船员配备抗静电服和鞋以及一个便携式氢气探测器。	静电 （见 4. 9.2）
A-14	本规则 18.2 要求的货物操作手册应包括与环境条件相关的各种操作限制。	较宽的可燃性极限范围 （见 4.10）
A-15	应建立适当的暖舱、惰性气体驱气、除气、氢气驱气和预冷程序。程序应包括： .1 与温度限制有关的惰性气体选择； .2 气体浓度测量； .3 温度测量； .4 供气速率； .5 每个操作开始、暂停、恢复和终止的条件； .6 返回气体的处理；和 .7 气体排放。	防止危险驱气操作 （见 4.11）
A-16	应只装载几乎纯净的仲氢（即大于 95%）以避免正氢向仲氢转化导致过热。	通则 （见 4.1）
A-17	考虑到氢火的特征，应选择用于探测氢火的火灾探测器，并使主管机关满意。	氢火和火灾危险的特征 （见 4.7.4）
A-18	在设计阶段，应分析透气出口的氢气扩散以最大限度减少易燃气体进入起居处所、服务处所、机器处所和控制站的危险。应基于分析结果考虑危险区域的延伸。	低密度和高扩散性 （见 4.5）
A-19	应考虑采取适当的安全措施，防止在氢气泄漏和渗透时形成爆炸混合物，包括： .1 安装氢气探测器以探测可能在地面流动的低温氢气，和在温暖氢气可能聚积的处所高点；和 .2 应用于陆基液态氢储存的“最佳实践”，并虑及适当的导则，例如“低温学安全手册第 4 版（1998）”[8)]。	通则 （见 4.1）
A-20	当使用本规则 18.10.3.2 要求的易熔元件作为火灾探测方式时，在相同位置还应设置适用于氢气火焰的火焰探测器。应采取适当的方式防止由于火焰探测器误报而启动 ESD 系统，例如避免由单个传感器启动 ESD 系统（投票法）。	火灾危险 （见 4.7.4）
A-21	应考虑提高易发生液化氢泄漏和渗透的围蔽处所的通风能力，并虑及气化潜热、比热和与相邻处所的温度和热容量相关的氢气体积。	低密度和高扩散性 （见 4.5）
A-22	液态和气态氢管路不应穿过除本规则 5.2.2.1.2 中所述处所之外的围蔽处所，除非： .1.1 该处所设有气体探测系统，其在气体浓度不高于 LFL 的 20%时发出报警，并在不高于 LFL 的 40%时关闭隔离阀，如适用（见本规则 16.4.2 和 16.4.8）；和	易泄漏性 （见 4.4）

编号	特殊要求	相关危害
	.1.2 该处所有足够的通风；或 .2 该处所保持处于惰性状态。	
A-23	应进行风险评估，以确保液化氢货物对船上人员、环境、结构强度或船舶完整性产生的风险得以解决。在可合理预见的故障发生后，应考虑与液化氢和氢气的特性、物理布局、操作和维护相关的危险。对于风险评估，应采用适当的方法（例如 HAZID，HAZOP，FMEA/FMECA，what-if 分析等），并虑及 IEC/ISO 31010:2019“风险管理—风险评估技术”[7] 和 SAE ARP 5580-2001“推荐的非汽车应用的故障模式和影响分析（FMEA）实践”[9]。	通则 （见 4.1）
A-24	释放阀设定值应考虑最严重情况。评估应包括火灾场景，并应考虑由此产生的货物围护系统上的热通量大小。	高压危险 （见 4.8）
A-25	应不允许在基准温度时超过 98%的充装极限。	高压危险 （见 4.8）
A-26	如果焊接连接为可行，应避免氢气管路的螺栓法兰连接。	易泄漏性 （见 4.4.2）
A-27	应从发生火灾时的船舶尤其是人员安全角度，充分考虑氢火的不可见特性。	失火危险 （见 4.7.1）

3 一般要求的解释

3.1 液化氢的特性

本规则中的适用液化氢通用要求已基于液化氢和 LNG 物理属性的比较研究予以考虑。LNG 和液化氢是低温液体、无毒、可产生可燃高压气体。作为参考，表 3 显示氢与甲烷（LNG 主要成分）物理属性的比较。

表 3：氢和甲烷物理性能的比较

	氢	甲烷	参考文献
沸点（K）*	20.3	111.6	ISO[1]，附则 A，表 A.3
液体密度（kg/m^3）*	70.8	422.5	ISO[1]，附则 A，表 A.3
气体密度（kg/m^3）** （空气：1.198）	0.084	0.668	NIST RefProp[10]
粘度（g/cm s x 10^{-6}） 气体 液体	 8.8 13.49	 10.91 116.79	 NIST RefProp[10] NIST RefProp[10]
空气中的火焰温度（°C）	2396	2230	使用 Cantera 和 GRI 3.0 机制进行计算
最大燃烧速率（m/s）	3.15	0.385	使用 Cantera 和 GRI 3.0 机制进行计算
气化热（J/g）*	454.6	510.4	ISO[1]，附则 A，表 A.3
可燃性下限 （%容积率）***	4	5.3	ISO[1]，附则 B，表 B.2
可燃性上限 （%容积率）***	77	17.0	ISO[1]，附则 B，表 B.2
最低点火能（mJ）***	0.017	0.274	ISO[1]，附则 B，表 B.2
自燃温度（K）***	858	810	ISO[1]，附则 B，表 B.2

毒性	无	无	橙皮书 5)
临界点温度（K）	33.19****	190.55	氢气：ISO1)，附则 A，表 A.1 甲烷：日本机械工程师协会，数据手册，液体的热物理性（1983）
临界点压力（kPaA）	1315****	4595	氢气：ISO1)，附则 A，表 A.1 甲烷：日本机械工程师协会，数据手册，液体的热物理性（1983）

注：* 为进行比较，在其正常沸点。

** 在正常温度和压力下。

*** 25 °C 和 101.3kPaA 时，空气混合物的点火和燃烧特性。

**** 正常氢气。

3.2 各要求的解释

3.2.1 船型（‘c’栏）

由于与货物氢相关的危险是易燃性而非毒性，因此船型被视作 2G。

3.2.2 要求 C 型独立液货舱（‘d’栏）

C 型独立液货舱只指定于蒸气密度比空气重的 2.3 类危险货物。对液化氢，认为无需要求 C 型独立液货舱。

3.2.3 液货舱内蒸气空间的控制（‘e’栏）

考虑到货物蒸气和空气的反应，特殊环境控制（例如干燥和惰化）一般要求用于液体化学品。和 LNG 一样，对液化氢无需应用该要求。

3.2.4 蒸气探测（‘f’栏）

由于氢气易燃无毒，对液化氢的蒸气探测，要求按易燃（F）是适当的。

3.2.5 测量（‘g’栏）

鉴于原则上对于易燃或有毒货物（例如甲烷）要求闭式（C）测量，考虑到氢气具有高可燃性并且在空气中具有较宽的可燃范围，以及闭式测量能有效防止气体泄漏至空气中，认为对氢气要求闭式（C）测量是适当的。

4 针对液化氢危害的特殊要求

4.1 应考虑的液化氢的危害

4.1.1 与液化氢相关的危害是：低点火能、宽可燃性极限范围、火灾时的火焰低可见度、可能导致冲击波爆炸的高火焰传播速度、低温以及惰性气体和空气成分的液化/固化可能导致富氧氛、高渗透性、低粘度和包括焊接金属在内的氢脆。如果采用真空绝热，应适当考虑在液态氢预期载运温度下的绝热性能过早退化的可能性。真空绝热评估应明确冷真空压力（CVP）的正常范围或上限，并以该值作为基准界定真空失效。因此，在真空绝热管路的设计和试验阶段应考虑真空压力的影响。对支持结构和相邻船体结构的设计，应虑及由于绝热真空失效导致的冷却。

4.1.2 氢气本质上是正氢和仲氢混合物，在室温下平衡浓度为 75%正氢和 25%仲氢。在 20K 下液化时，正氢会缓慢且持续转变为仲氢。可能会发生氢（正氢至仲氢）核自旋异构体的热转换，且转换效应可能对容器设备的制冷能力和释放阀能力有影响。

4.1.3 在液化氢环境中，微量空气会冷凝或固化并可能导致不稳定和爆炸性的混合物。应采取预防措施，确保在适当保护的危险区域内考虑冷凝空气的可能性。

4.2 低温危害

4.2.1 选择合适的材料

4.2.1.1 本规则中表 6.3 和表 6.4 规定了设计温度不低于-165°C 的管系或液货舱的材料选择。

根据本规则表 6.3 的注 2 和表 6.4 的注 3，设计温度低于-165ºC 的材料要求应特别经主管机关同意。在这方面，AIAA[2)] 的出版物介绍了一些与设计温度相对应的适当材料，主管机关在选择材料时应考虑这些参考文献。

4.2.1.2　尽管本规则中 4.19.3 要求对绝热材料的各种性能进行适合预期服务温度的试验，最低试验温度为-196ºC。本规则要求不涉及氢的正常沸点-253ºC。如果载运液化氢，应采取特殊要求以考虑较低的设计温度。

4.2.2　防止冷凝空气的措施

4.2.2.1　在氮气正常沸点为-196ºC 时关注到空气的冷凝和富氧，下列特殊要求已纳入本规则 17.17：

“结构材料和附属设备（诸如绝热材料）应能承受低温时由于货物系统各部分氧冷凝和浓缩而产生的高浓度氧的作用。应适当考虑对这些可能产生冷凝的区域进行通风，以避免形成富氧气体空间。”

类似的特殊要求适用于氢。

4.2.2.2　空气中水分形成冰积聚可能造成透气孔堵塞，导致压力过大，造成透气孔和相关管路破裂（见 4.2.4）。

4.2.3　去除冷凝的杂质

应单独考虑去除杂质（例如管道中冷凝物包含的杂质）。安装过滤器可以作为适当措施并应视作特殊要求。

4.2.4　防止水或冰的形成而造成堵塞

根据空气温度和湿度，由于货物低温及其蒸气形成水或冰，压力释放系统可能被堵塞（见 4.2.2）。应有适当的措施防止此类现象。

4.3　氢脆

4.3.1　应要求选择合适的材料以防止氢脆引起失效。AIAA[2)] 的出版物介绍了一些抗氢脆的适当材料，并得出结论：铝是受影响最小的材料。

4.3.2　为在海洋环境中设计液化氢和气态氢装置而选择材料时，应遵循国际或国家标准。

4.4　易泄漏性

4.4.1　防止管路泄漏

为了减少密闭处所内未被探测到的氢积聚，虑及其泄漏特征，应采取有效措施降低氢泄漏的可能性。关于氢泄漏，有效措施可为双层管结构或在评定为氢泄漏风险较高的区域中安装固定式氢泄漏探测器。由焊缝、接头和密封件的氢泄漏是氢系统设计的一个重要考虑因素和重要操作问题。

4.4.2　实施有效密性试验

4.4.2.1　液货舱和货物管/阀的密性试验分别在本规则的 4.20.3.2、5.13.1 和 5.13.2.3 中予以要求。因为氢气极易泄漏，应以氦气或者 5%氢气和 95%氮气的混合物取代空气，用作密性试验的介质。

4.4.2.2　对于氢装置，管路系统应在其设计压力下进行压力测试。应考虑使用含有小分子示踪气体的无氧氮气（例如将氦气作为试验介质）和用于确定泄漏的电子测漏仪。

4.4.3　确定适当的操作程序

应提供须知/手册，包含运输期间防止泄漏的操作程序、发生泄漏时的早期探测方法和此类事件发生后采取的适当措施。为此，本规则的18.3要求船上应备有可供所有相关方使用的资料，为安全载运货物提供必要的数据。具体而言，本规则要求的资料包括：当发生货物溢出或泄漏时应采取的措施，当人员意外与货物接触时的防范措施，货物驳运程序以及船上应急程序。关于液化氢载运和驳运操作期间的程序手册，本规则中的要求适用且无需特殊要求。

4.5　低密度和高扩散性

尽管氢气的低密度和高扩散性可能降低开敞处所可燃气体形成的可能性，但对于货物区域的围蔽处所，仍可能形成氢气-氧气/空气混合物，有必要为其提供足够的通风。本规则的 12.2 要求这类围蔽处所中设有固定式通风系统或便携式机械通风。在这方面，本规则的上述要求适用于液化氢运输船，且无需特殊要求。

4.6 易燃性

4.6.1 本规则的 5.7.4 要求管路和液货舱应进行电气接地措施，11.1.2 要求排除所有点火源，10.2.1 要求电气装置应使易燃货品失火和爆炸的风险降至最低等，以防止易燃货物着火。

4.6.2 本规则要求符合国际电工委员会（IEC）发布的相关标准，IEC 标准详细规定了根据易燃气体（包括氢气）各自属性应采取的安全措施。关于氢气的易燃性，无需特殊要求[2]。

4.7 火灾危险

4.7.1 发生火灾时的人员安全

为了避免氢气火灾产生的火焰和 UV 辐射的影响，使用消防员装备和保护设备是有效的。本规则已要求载运易燃货品的船舶配备 11.6.1 中的消防员装备和 14.3 的安全设备。这个问题应作为本规则 18.3 要求的货物资料予以考虑。应考虑氢火的不可见性。

4.7.2 灭火系统的兼容性

对于氢火，化学干粉灭火或二氧化碳灭火系统视为有效，且本规则的 11.4 和 11.5 已要求此类灭火系统。除了如本文件下段所述之增加二氧化碳数量的要求，无需特别要求安装其他类型灭火系统。

4.7.3 增加二氧化碳灭火系统气体数量

4.7.3.1 本规则的 11.5.1 要求如下：

“满足1.2.10中货物机器处所衡准的围蔽处所和任何船舶货物区域内的货物机舱应设有符合FSS规则规定的固定灭火系统，并考虑到气体灭火所要求的必要的浓缩/施放比率。”

4.7.3.2 FSS 规则第 5 章（即固定式气体灭火系统）的 2.2.1.1 要求货物处所二氧化碳的数量，除另有规定外，应足以放出至少等于该船应受保护的最大货物处所总容积 30%的自由气体最小体积。

4.7.3.3 另一方面，NFPA12[3] 要求用于氢火的二氧化碳设计数量应为受保护处所总容积的75%及以上。对于二氧化碳灭火系统，应有增加二氧化碳数量的特殊要求。

4.7.4 氢火的特征

氢气燃烧温度高，但通常比丙烷或其他碳氢化合物发出的辐射热少（例如仅为相同尺寸丙烷火焰辐射热的 10%左右）。与碳氢化合物相比，尽管氢火的辐射热也相对较低，但应对燃烧热、燃烧速率和火焰大小的差异予以重视。氢火焰无色或接近无色，这些特征使得氢火探测更困难。即使相对较小的氢火也很难扑灭。灭火的唯一可靠方法是关闭氢气供应源。

4.8 高压危害

4.8.1 高压是氢气和本规则中所列其他易燃气体的共同危害。为防止过压，本规则要求不同措施，例如压力控制和压力设计。特别是 8.2 关于液货舱的压力控制，要求液货舱设有压力释放阀。此外，7.1.1 要求通过使用机械制冷和/或设计的温度控制以承受可能的温度和压力升高。另外，虑及其热膨胀引起的货物体积增加，15.2 规定了液货舱的充装极限。这些要求适用于氢气，在这方面，无需考虑特殊要求。

4.8.2 相比 LNG，蒸发气对于氢可能是更显著的问题，特别是当绝热性能降低。应慎重考虑处理蒸发气的方式，并虑及下列问题：

.1 氢气再液化涉及非常昂贵的特殊设备。为避免蒸发而进行的货物冷却也显示同样问题；以及

---

[2] 根据 ISO/IEC 80079-20-1[4]，氢气/空气混合物中使用的电气设备的类别（基于隔爆型外壳的最大实验安全间隔）和温度组别（基于最大表面温度）应分别至少为“II-C”和“T-1”型。

.2　尽管本规则 7.4.1 有规定，按照本规则 1.3 可能允许氢气的热氧化。

4.8.3　这些方面有必要特殊要求。

4.9　健康危害

4.9.1　低温下的人员安全问题

关于低温氢对人体的影响，适当的保护设备是有效的。在这方面，本规则 14.1 要求根据产品特性配备适当的保护设备，因此，无需特殊要求。

4.9.2　静电

氢气的点火能非常低，且氢气容易被静电点燃，按照本规则关于适当保护设备的要求，应充分考虑这个问题。

4.9.3　缺氧和窒息

氢气泄漏可造成低氧和相应的窒息。

4.10　较宽的可燃性极限范围

4.10.1　扑灭氢火

4.10.1.1　如 4.6 所述，对于易燃产品，本规则已要求消除点火源，包括使用适当类型的电气设备，以将火灾和爆炸的危险降至最低。关于氢气的可燃性，无需特殊要求。

4.10.1.2　此外，关于氢气较宽的可燃性极限范围，应如 4.7 所述明确作为灭火介质的二氧化碳的增加数量。关于氢气较宽的可燃性极限范围，无需考虑其他特殊要求。

4.10.2　低温氢气的处置

较宽的可燃性范围使得低温氢气的处置成为一个主要危害。释放氢气的低温羽流可能会妨碍氢气充分稀释至 4%以下，并可能导致从安全控制区域外的远处点火源回火至透气口。低点火能和较宽的可燃性范围可能带来重大的挑战。

4.11　危险驱气操作的预防

4.11.1　如下图所示，在维护期间的货物操作中，管路和液货舱应使用一种或多种惰性气体进行驱气。为安全起见，应充分考虑惰性气体的温度和沸点。如果驱气速度、持续时间或混合程度太低，氢气或吹扫气体的残余气穴将仍存留于封闭处所内。因此，应在系统内的多个不同位置进行可靠的气体浓度测量以进行适当的驱气。还应在多个位置测量温度。在含氢设备中可能存在氧化剂，特别是空气、包含氮气稀释空气的冷藏箱气体、或特殊情况下在冷藏箱内工艺管道上冷凝的富氧空气。

4.11.2　可能需要采取一些特殊措施以减轻危害，例如氢气进入货物管路或处理用设备前，应先用氮气驱气以消除空气。然后，如果后续有可能固化，应通过氢气驱气消除氮气。

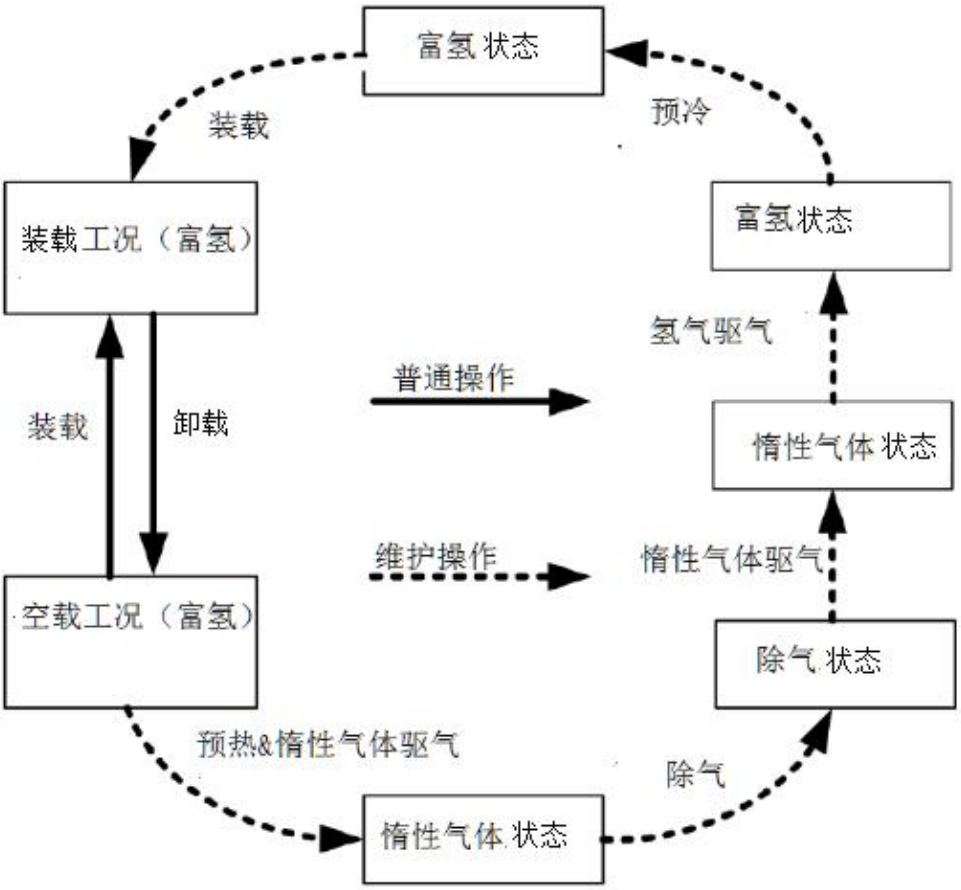

富氢状态
装载
预冷
装载工况（富氢）
富氢状态
氢气驱气
普通操作
装载
卸载
惰性气体状态
维护操作
惰性气体驱气
空载工况（富氢）
除气状态
预热&惰性气体驱气
除气
惰性气体状态

图 1

A 部分的参考文献：

1　ISO/TR 15916:2015，氢气系统安全的基本考虑（ISO）

2　美国航空航天局，“氢气和氢气系统的安全标准（氢气和氢气系统安全指南）”，2005（AIAA）

3　NFPA 12:二氧化碳灭火系统标准（2020 版）（NFPA）

4　ISO/IEC 80079-20-1:2017 爆炸性气体环境—第 20-1 部分：气体的材料特征和蒸气分类—试验方法和数据

5　联合国关于危险货物运输的建议案—示范条例，第 22 次修订版

6　NFPA 2:氢技术规则 2016 版（NFPA）

7　IEC/ISO 31010:2019 风险管理—风险评估技术

8　低温安全手册—第 4 版（1998）

9　SAE ARP 5580-2001“适用于非汽车行业的推荐故障模式和影响分析（FMEA）实践”

10　国家标准和技术学会（NIST）RefProp 数据库

B 部分
使用真空绝热的独立液货舱的货物围护系统

5　附加要求

5.1　使用真空绝热的独立液货舱的货物围护系统的附加特殊要求见表 4，除了表 2 中的要求外，这些特殊要求也应适用。

表 4：使用真空绝热的独立液货舱的货物围护系统的特殊要求

编号	特殊要求	相关危害
B-1	使用真空绝热的货物围护系统，必要时，其绝热性能应基于试验进行评估并取得主管机关满意。	通则（见 4.1 和 6.1）
B-2	尽管有 A -22 的特殊要求，液态氢和气态氢管路可能穿过构成使用真空绝热的货物围护系统一部分的处所，其真空度受到监控。	易泄漏性（见 4.4）
B-3	在选择特殊要求 A -24 中规定的最严重情况时，评估应包括火灾或整个绝热系统的真空失效，并应考虑在每种情况下货物围护系统发生单一故障时产生的热通量大小。	高压危害（见 4.8 和 6.2）

6　减轻液化氢危害的附加特殊要求

6.1　应考虑的液化氢的危害

6.1.1　除了 4.1.1 之外，还应充分考虑在液态氢预期载运温度下绝热性能过早退化的可能性。真空绝热评估应明确冷真空压力（CVP）的正常范围或上限，并以该值作为基准界定真空失效。因此，在货物围护系统的设计和试验阶段应考虑真空压力的影响。对支持结构和相邻船体结构的设计，应虑及由于绝热真空失效导致的冷却。

6.1.2　在考虑本部分的特殊要求时，对本文件文末的参考文献进行了文献研究，特别是 ISO/TR15916[1)]“高压气体安全法案”（日本法），AIAA[2)] 的“氢气和氢气系统安全标准”和 NFPA 2“氢技术规则”[3)]。液化氢运输船特殊要求的大部分是基于 ISO/TR15916 规定的。该标准涉及陆上液化氢储罐装置、液化氢槽车等，以及在讨论液化氢特性时的基本观点。

6.2　高压危害

除了 4.8 之外，真空绝热系统有可能用于液化氢围护系统，根据系统设计，该系统的绝热能力可能受到系统破损的不利影响。如果绝热系统迅速退化，液货舱将快速升温和/或液化氢的气化速率可能超过压力释放阀的能力。为了防止此类危险的绝热退化，应采取适当的安全

措施。

B 部分的参考文献：

1　ISO/TR 15916:2015，氢气系统安全的基本考虑（ISO）

2　美国航空航天局，“氢气和氢气系统的安全标准（氢气和氢气系统安全指南）”，2005（AIAA）

3　NFPA 2：氢技术规则 2016 版（NFPA）

C 部分

使用绝热材料的独立液货舱的货物围护系统和在内部绝热处所的氢气

7　本部分要求的适用范围

7.1　货物围护系统的设计

本部分规定的安全措施应适用于如下所述的使用绝热材料的独立液货舱的货物围护系统和在内部绝热处所的氢气。

图 2 所示为使用绝热材料的独立液货舱的货物围护系统和在内部绝热处所的氢气。在此货物围护系统中，内壳相当于液货舱。在内壳的外侧安装绝热结构。绝热结构由内向外，包括内部绝热处所、外壳和外部绝热层。位于内壳外侧的内部绝热层是内部绝热处所的一部分。内部绝热处所需要以适当的气体填充，以防止由于内壳表面的低温（约相当氢沸点）而造成大量气体冷凝和/或固化。因此，内部绝热处所填充的是氢气，没有液体。

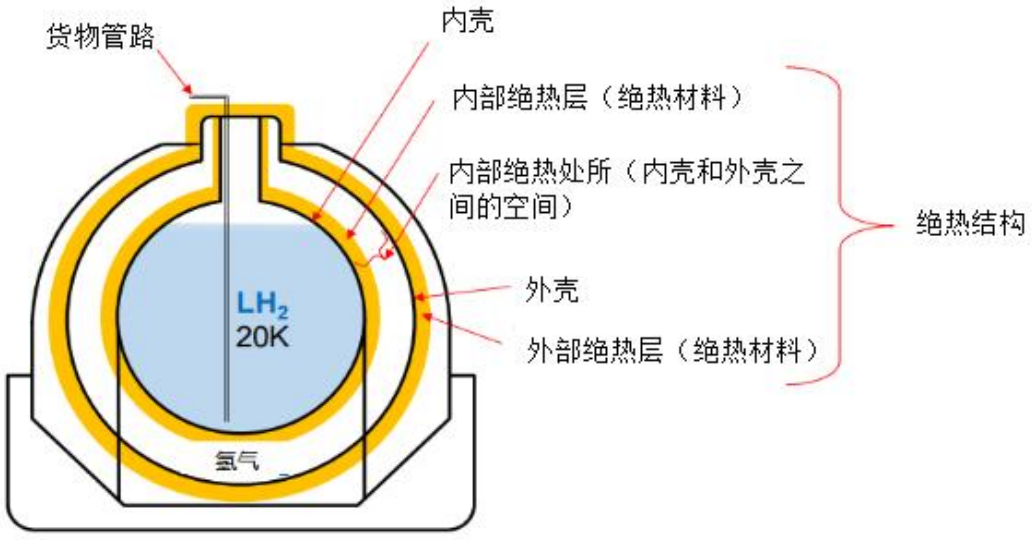


图 2　液货物围护系统的图示

7.2　适用本部分要求的条件

本部分规定的安全要求应在以下使用条件下适用：

.1　内壳满足本规则对液货舱的要求；和

注：本部分关注内部绝热处所和外壳的安全措施，作为绝热结构组成部分，本规则对此没有规定明确的要求。

.2　虑及该处所充满易燃气体，应采取适当措施防止气体从内部绝热处所泄漏，以确保绝热结构的可靠性。

8　附加要求

货物围护系统的特殊要求见表 5，除了表 2 中的要求外，这些特殊要求也应适用。

表 5：使用绝热材料的独立液货舱的货物围护系统和在内部绝热处所的氢气的特殊要求

编号	特殊要求	解释
C-1	货物围护系统的外壳所在位置应与船舶外壳保持距离，如本规则 2.4.1 和 2.4.2 对 2G 型船舶液货舱的要求。	
C-2	外壳的强度应根据本规则第 4 章的安全原则、所有适用的设计条件、所使用的材料和建造工艺，通过分析和试验予以确定，并应得到主管机关的批准。	
C-3	尽管有 C-2 的特殊要求，外壳的温度应通过温度计算确定，假定内壳处于货物温度。	
C-4	以下特殊要求应适用于外壳： .1 外壳的所有接头均应焊接并且为全焊透类型。外壳的所有接头应尽可能采用平面对接焊。由于外壳建造工艺和结构使得平面对接焊不可行时，根据焊接程序认可时进行的试验结果，可使用全焊透型 T 型焊接。 .2 如对人孔使用衬垫环进行焊接密封，在衬垫环不会造成明显有害影响的情况下，焊接后可保留衬垫环。	见 9.1
C-5	对外壳应进行气动压力试验，以检查其强度。	见 9.2
C-6	应采取适当的绝热措施，以保持外壳和外部绝热层的温度高于氧沸点。必要时，其绝热性能应基于试验进行评估并取得主管机关满意。在应用本规则 4.19.1.1.5 时，应考虑氢气造成的绝热性能的降低。应采取措施对绝热状态进行监控，以检测故障。	
C-7	虑及本规则 13.4 中对液货舱的要求，应对内部绝热处所的压力进行监控。	见 9.3
C-8	在正常情况下，应采取适当的措施以保持内部绝热处所的压力在设计限制内。	见 9.3
C-9	虑及本规则 8.2 和 8.3 中对液货舱压力释放系统的要求，对可能承受超过其设计能力的压力的内部绝热处所应配备压力和真空释放阀。虑及在正常货物操作时的船舶液货舱内部绝热处所的预期压降率，应配备适当容量的真空释放阀取代本规则 8.3.1.2 的要求。在应用本规则 8.3.2 时，真空释放阀不应允许空气进入内部绝热处所。如果内部绝热处所的压力释放阀启动，释放的氢气应被排放至安全区域。	见 9.3
C-10	本规则第 5 章除了 5.3 和 5.10 的要求（即货物区域外货物管系的要求）应适用于处理内部绝热处所中氢气的管系。	
C-11	应采取适当措施对内部绝热处所的气体进行控制，例如惰化、除气、充气和驱气等。（也见 A-15）。	
C-12	A-8 的特殊要求应适用于外壳的密性试验。	
C-13	A-3 和 A-4 的特殊要求应适用于处理内部绝热处所氢气的管系。	
C-14	A-8 和 A-26 的特殊要求应适用于处理内部绝热处所氢气的管系的暴露部分。	
C-15	A-7 的特殊要求无需适用于处理内部绝热处所氢气的管系，除了贯穿内壳、位于内部绝热处所内部的管系。	见 9.4
C-16	尽管有 A-22 的特殊要求，处理内部绝热处所氢气的管系可穿过其他内部绝热处所。	
C-17	C 型独立舱的要求应适用于内壳。	
C-18	不应允许由内壳进出内部绝热处所的人孔。	
C-19	连接至内壳内部的货物管系应直接从露天甲板引出。任何管路不应从内部绝热处所贯穿内壳进出内部绝热处所。	

9 特殊要求的解释

9.1 外壳焊接

9.1.1 如 7.2 所述，外壳是绝热结构的一部分，其功能是将氢气围护于内部绝热处所，但非围护液化氢。

9.1.2 由于内部绝热处所填充的氢气的高泄漏性，因此确保外壳密性的可靠性是至关重要的。该可靠性需经主管机关评估和认可。为确保外壳的密性，应尽可能将内壳（即液货舱）的等效焊接要求适用于外壳。因此，根据本规则 4.20.1，外壳的所有接头应为平面全焊透对接焊类型。另一方面，由于建造程序和结构，外壳采用平面对接焊可能不可行。虑及内部绝热处所仅填充气体，外壳上未施加任何液体压力。因此，根据焊接程序认可时进行的试验结果，在这些区域可使用全焊透型 T 型焊接。

9.1.3 对安装在外壳上的人孔，可通过垫圈或焊接进行封闭。焊接被视为防止氢气泄漏的更可靠方法，且由于建造程序通常不可能移除衬垫环。虑及人孔和衬垫环上未施加液体压力，从强度角度没有明显担忧。因此，不移除衬垫环被视作可接受，除非识别出可能存在有害影响，例如疲劳强度。

9.2 外壳试验

对外壳应进行压力试验以检查其强度，但由于内部绝热处所内已安装绝热材料，用水填充内部绝热处所是不切实际的。此外，假设内部绝热处所中仅存有气体，因此，气动压力试验足以再现外壳的运行条件。相关特殊要求见本规则 4.20.3.1 和 4.23.6.7。

9.3 内部绝热处所的压力

保持内部绝热处所的适当压力，对于防止内壳和外壳发生破裂和屈曲是至关重要的。

9.4 内部绝热处所内处理内部绝热处所氢气的管系的泄漏检测

特殊要求 A-7 的目的是防止易燃环境的形成。由于内部绝热处所充满氢气，因此内部绝热处所之内处理内部绝热处所氢气的管系的可能发生氢气泄漏处（如阀门、法兰和密封件）的氢气泄漏不会产生额外的风险。因此，不同于货物处理管系，特殊要求 A-7 并不能提升此类管系的安全其。C-15 的规定是必须要遵守的，以确保控制气体变化或维护的设计。

C 部分的参考文献：

1 ISO/TR 15916:2015，氢气系统安全的基本考虑（ISO）

2 美国航空航天局，“氢气和氢气系统的安全标准（氢气和氢气系统安全指南）”，2005（AIAA）

3 NFPA 2：氢技术规则 2016 版（NFPA）

D 部分
使绝热处所保持真空的薄膜型液货舱的货物围护系统

10 本部分要求的适用范围

10.1 定义

就本部分而言，下列定义适用：

.1 主绝热处所系指本规则 1.2.30 中所定义的屏壁间处所；和

.2 次绝热处所系指次屏壁和船体内壳之间的处所。

10.2 货物围护系统的设计

本部分规定的安全措施应适用于使绝热处所保持真空的液氢薄膜型货物围护系统，作为本规则 1.3 所述对 9.2.1 规定惰化要求的等效布置。

图 3 所示为货物围护系统示例。该系统由邻接的船体结构通过绝热层支持的薄液密层和气密层（图 3 中的主屏壁和次屏壁）组成。主绝热处所和次绝热处所内以绝热材料填充，并在围护系统正常运行期间保持真空状态。

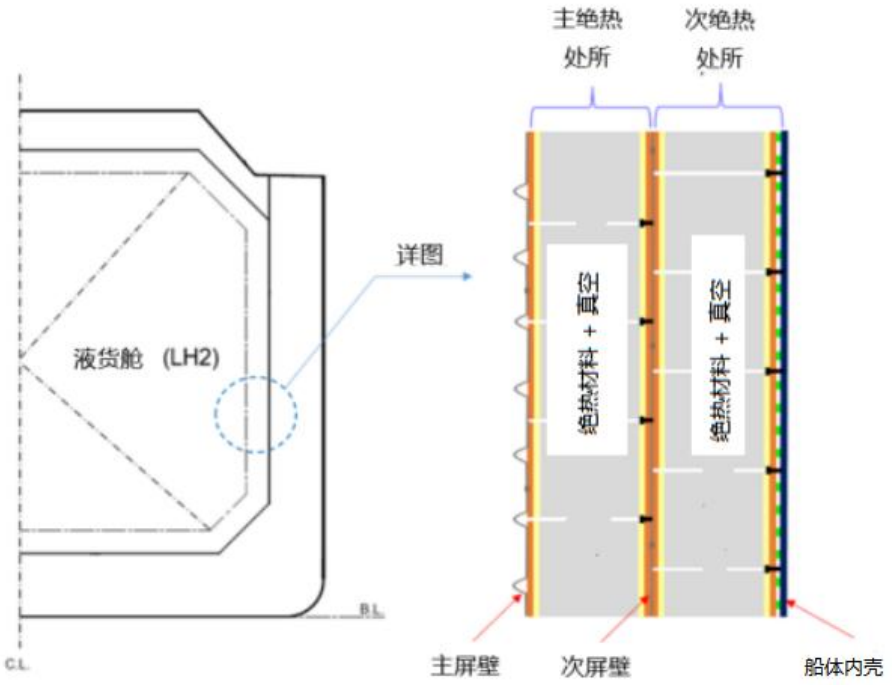


图 3：使绝热处所保持真空的薄膜型 LH_2 货物围护系统的图示

11 附加要求

货物围护系统并非用干燥的惰性气体充填绝热处所，而是在这些处所内建立并保持真空。因此，应针对以下方面规定附加安全要求：

.1 真空环境下船体内壳、主屏壁和次屏壁及处所内绝热部件的结构完整性；

.2 真空的建立、保持与监控；和

.3 紧急情况：货物泄漏至主绝热处所，或因空气进入绝热处所导致真空失效。

货物围护系统附加要求见表 6。除表 2 要求外，这些特殊要求也应适用。

表 6：使绝热处所保持真空的薄膜型货物围护系统的特殊要求

编号	特殊要求	解释
D-1	考虑绝热处所的真空环境，应对货物围护系统以及船体内壳结构的所有结构部件的结构完整性进行验证。	12.1.1
D-2	主屏壁和次屏壁均应由金属材料制成，并应液密和气密。为确保部件的焊接工艺评定、设计细节、材料、施工、检验及生产试验的持续符合性，应建立质量保证/质量控制程序，并使主管机关满意。	12.1.2
D-3	在安装后和换证检验期间，应使用 A-8 要求所规定的试验介质对主屏壁和次屏壁进行密性试验。	12.1.2
D-4	对可能承受超出其设计承载能力的压力的绝热处所，应设置压力释放系统。设计方应证明该压力释放系统对处所具有足够容量，并使主管机关满意。	12.1.2
D-5	对主绝热处所和次绝热处所，应制定营运维护与监控、初次和定期检查/试验程序，并使主管机关满意。	12.1.3
D-6	应考虑绝热处所的预期运行条件、真空度、真空随时间衰减以及设计公差水平，必要时基于实验，对绝热系统的绝热性能进行评估，并使主管机关满意。	12.2.1
D-7	绝热处所必需的真空度应足以防止由于残留气体成分的冷凝和/或固化而导致绝热系统部件发生任何损坏。	12.2.1

编号	特殊要求	解释
D-8	在正常运行期间，应对绝热处所的真空度进行监控并将其保持在设计水平。每个液舱应至少配备一套真空系统，该系统应具备足够容量以保持各绝热处所的设计真空度。真空系统应被视为必需的辅助设备，且每个液舱至少有一套真空系统由应急电源供电。此外，还应配备一台备用泵，足以使最大的真空空间保持真空。	12.2.2
D-9	除 A-15 要求外，对绝热处所还应制定适当的环境处理程序。应通过试验验证绝热部件不会妨碍针对处所的有效环境控制操作，包括但不限于气体置换、抽真空以及泄漏氢气的清除。	12.2.3
D-10	应制定适当的应急控制程序，以应对货物泄漏至主绝热处所的可能性。这些程序应包括但不限于泄漏探测、泄漏氢气的处理，以及恢复绝热性能和主屏壁密性的措施。	12.3.1.1
D-11	为探测和识别诸如氢气泄漏至主绝热处所或因空气进入绝热处所导致真空失效的紧急情况，应配备并布置适当的指示和探测仪表，仪表的冗余度应足够并使主管机关满意。	12.3.1
D-12	主绝热处所的压力控制系统，例如压力释放或真空泵系统，应防爆且应具备足够容量将低温氢气排出至安全位置。主绝热处所和次绝热处所的压力控制系统的设计和布置还应能防止因空气冻结或绝热材料松动/破损而导致堵塞。	12.3.1
D-13	绝热材料的氢相容性应通过试验验证。应确保在修复工作完成后，接触过泄漏氢气的绝热材料的绝热性能仍可接受并使主管机关满意。	12.3.1
D-14	绝热部件对氢的低渗透性应经证明，或提供充分措施和操作程序，以避免因氢气渗透而造成潜在损坏的风险，并使主管机关满意。	12.3.1.4
D-15	为防止空气进入绝热处所，应尽量减少穿过这些处所的管路数量，此外，所有与处所相连的管件接头均应采用焊接型式。	12.3.2
D-16	当外部空气进入次绝热处所，应采取适当措施控制进入的空气，并防止其进一步进入，措施应至少有效 15 天。 当采用惰性气体对次绝热处所进行加压作为防止空气进一步进入的措施之一时，考虑惰性气体在该处所内冷凝的可能性，应采取适当措施，例如将次绝热处所的内壁温度保持在惰性气体沸点以上。	12.3.2.2
D-17	绝热系统和船体内壳结构的钢材等级应布置成能够安全承受任一绝热处所的绝热性能退化或失效。	-
D-18	关于液货舱释放阀的选型，评估除按特殊要求 A-24 外，还应涵盖任一绝热处所发生火灾或真空失效的情况。	-

12 特殊要求的解释

12.1 部件的结构完整性

12.1.1 真空环境下的强度评估

除本规则第 4 章 B 部分所述设计载荷外，还应考虑预期运行场景的真空压力，对船体内壳结构、主屏壁和次屏壁和绝热处所的结构部件进行强度评估。

12.1.2 船体内壳、主屏壁和次屏壁

12.1.2.1 船体内壳、主屏壁和次屏壁均需具备液密性和气密性，以确保在运行期间能够保持真空环境，并且任何泄漏氢气应能被容纳于主绝热处所之内，至少 15 天不渗透至次绝热处所。

12.1.2.2 根据本规则 6.6.5，质量保证/质量控制计划应确保部件的焊接工艺评定、设计细节、

材料、施工、检验及生产试验的持续符合性，该计划的制定和建立应使主管机关满意。对主屏壁和次屏壁应进行 A-8 规定的密性试验。

12.1.2.3　除本规则 8.2.2 外，若次绝热处所可能承受超出其能力的压力，则该处所与屏壁间处所应配备压力释放系统。绝热处所压力释放系统的容量应经充分确定和证明，并使主管机关满意。

12.1.3　维护、监控和检查

对主绝热处所和次绝热处所，应制定营运维护与监控、初次及定期检查/试验程序，并使主管机关满意。

12.2　绝热处所的真空控制

12.2.1　必需的真空度

12.2.1.1　绝热性能受真空度的影响。若在绝热性能评估时考虑冷真空压力（CVP），则应根据评估条件确定所需的真空度，真空绝热评估应明确冷真空压力的正常范围或上限，并以该值作为基准界定真空失效。

12.2.1.2　由于货物的低温，残留气体成分可能发生冷凝和/或固化。因此，还需确定所需的真空度，以防止处所内残留气体成分的冷凝和/或固化而使绝热系统部件发生损坏。

12.2.2　真空度的监控和保持

在整个正常运行期间，绝热处所内的真空度应被持续监控并保持在设计水平。合适的真空系统（如真空泵系统）应为固定安装，且具备的容量和冗余度应使主管机关满意。

12.2.3　环境处理

除特殊要求 A-15 外，还应对绝热处所内的环境处理制定适当程序。在绝热处所建立真空之前可使用干燥的惰性气体进行驱气，以尽可能防止可燃混合物的形成。由于绝热处所内填充绝热材料，应确认这些材料不会使处所的气体置换和排空操作失效。此外，考虑货物泄漏场景，泄漏氢气可能渗入绝热材料，还应制定并验证清除已渗入氢气的方法，以确保泄漏后的修复工作能够安全进行。

12.3　应急控制

12.3.1　货物泄漏至主绝热处所

12.3.1.1　应制定适当的应急控制程序，以应对货物泄漏至主绝热处所的可能性。这些程序应包括但不限于泄漏探测、泄漏氢气的处理，以及恢复绝热性能和主屏壁密性的措施。

12.3.1.2　进入主绝热处所的任何货物泄漏可通过氢气探测器并结合监测绝热处所内的压力和温度变化予以探测和识别。同时，进入主绝热处所或次绝热处所的空气可通过氧气探测器并结合监测绝热处所内的压力变化予以探测和识别。应配备并布置适当的指示和探测仪表，其冗余度应足够并使主管机关满意。

12.3.1.3　货物氢可能泄漏至主绝热处所。因此，主绝热处所配备的压力控制系统（如压力释放阀或真空泵系统）应能将泄漏氢气排至安全位置，系统还应防爆并能处理低温气体。

12.3.1.4　主绝热处所内的任何泄漏氢气都可能渗入绝热材料，升温时造成屏壁和/或绝热部件损坏，还可能导致绝热性能退化。因此，绝热部件的低氢渗透性应经证明，或提供充分措施和操作程序，以避免因氢气渗透而造成潜在损坏的风险，并使主管机关满意。

12.3.2　由于空气进入导致绝热处所真空失效

12.3.2.1　与主绝热处所或次绝热处所相连的管路或阀发生外部泄漏时，外界空气可能进入处所。主绝热处所内进入的空气量较少时因温度极低空气会立即凝结，可能在一段时间内无法被探测到。因此，设计应尽可能防止空气进入主绝热处所和次绝热处所，应尽量减少穿过这些处所的管路数量，并且仅允许采用焊接式管接头。

12.3.2.2　在次绝热处所内应安装适当的仪器（如氧气探测器和压力指示器），以探测空气进入次绝热处所的情况。当探测到有空气进入时，应采取适当措施防止空气进一步进入，并

防止已进入的空气形成可燃混合物。为此，可使用船上惰性气体发生系统或船上储存的惰性气体实施惰性气体循环。应控制惰化压力以防止空气进一步进入该处所，在此情况下，惰性气体量应至少能满足 15 天的消耗。