

浅析奥氏体不锈钢应变强化储罐设计要点

钟春燕 于雅强 张 健 (广西广汇低温设备有限公司, 广西 桂林 541100)

摘 要: 近年来随着国际市场上镍价格的大幅度上涨, 不锈钢的价格也随之上涨, 直接导致了低温绝热容器等以不锈钢为原料的产品成本的增加。目前, 应用奥氏体不锈钢材料应变强化技术是实现低温容器产品的设计制造轻型化、降低成本, 增强企业竞争能力一个好办法。不同于碳钢材料, 奥氏体不锈钢材料的屈服比很低, 即使在低温下, 其真应力应变曲线也表现出较好的塑性。其原理是降低了奥氏体不锈钢的塑性, 从而提高了许用应力, 进而减小了不锈钢的计算厚度, 从而降低成本。本文介绍了奥氏体不锈钢低温储罐的主要结构、技术参数, 主要设计要点及设计方法, 对该类设计要点进行了阐述及总结。

关键词: 低温储罐; 应变强化; 屈服强度; 设计压力

低温液体储罐是化工、冶金、医药、气体工业、航空航天行业中常见设备, 用途广泛, 实用效果好。由于它具备双壳程结构, 且夹层内为真空。因此它是集化工设备、热工学、真空学为一体的综合性设备。近年来随着国际市场上镍价格的大幅度上涨, 不锈钢的价格也随之上涨, 直接导致了低温绝热容器等以不锈钢为原料的产品成本的增加。目前, 应用奥氏体不锈钢材料应变强化技术是实现低温容器产品的设计制造轻型化、降低成本, 增强企业竞争能力一个好办法。以下结合奥氏体不锈钢低温储罐的结构特点, 对其设计要点进行梳理总结。

本文从低温储罐的设计方面展开说明其技术要点:

1 设计所依据的主要规范及标准

① GB/T150.1~150.4-2011 压力容器; ② GB/T713-2014 锅炉和压力容器用钢板; ③ GB/T18442.1~18442.6-2019 固定式真空绝热深冷压力容器; ④ GB/T18442.7-2017 固定式真空绝热深冷压力容器第 7 部分: 内容器应变强化技术规定; ⑤ GB/T24511-2017 承压设备用不锈钢钢板和钢带; ⑥ NB/T47015-2011 压力容器焊接规程; ⑦ TSG21-2016 固定式压力容器安全技术监察规程。

应变强化样罐样罐的设计、制造、检验和试验必须满足 GB/T150、GB/T18442、TSG21 和 GB/T18442.7-2017 的要求, 其低温绝热性能试验必须通过国家主管机关认可的权威检验机构的检验, 并取得相应检验证书。

2 主要技术参数说明

2.1 主要设计条件

见表 1。

2.2 设计压力的确定

2.2.1 安全阀整定压力的确定

设计制造的应变强化样罐, 介质为液化天然气 (LNG), 属于低温深冷液体, 根据 GB/T18442.1~18442.6-2019《固定式真空绝热深冷压力容器》应至少设置两组相互独立的超压泄放装置, 依据 GB/T150.1-2011 附录 B.3.6 和 B.3.7, 液氮属于易爆非剧毒介质, 优先选用安全阀。根据 GB/T150.1-2011 附录 B.4 及 GB/T18442.6-2019 中 4.2.1.2, 确定主安全阀整定压力为 $1.05 \times P_w = 1.26 \text{ MPa}$; 辅助安全阀整定压力为 1.3 MPa 。

2.2.2 设计压力确定

根据 GB/T150.1-2011 附录 B.4 及 GB50156《汽车加油加气站》中 9.1.1, 取容器的设计压力 $P \geq P_z$, $P = 1.2 P_w = 1.2 \times 1.2 = 1.4 \text{ MPa}$

2.2.3 计算压力的确定

根据 GB/T18442.3-2016《固定式真空绝热深冷压力容器》标准 8.2 规定, 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、 0.1 MPa 之和。液柱静压力按照水压试验工况计算, 其值低于设计压力 0.5% , 忽略不计; 所以计算压力取 1.54 MPa 。

2.2.4 强化压力 P_k 的确定

根据 GB/T18442.7-2017《固定式真空绝热深冷压力容器 第 7 部分: 内容器应变强化技术规定》规定, 取设计压力 1.5 倍, 同时, 经过非线性有限元分析, 可以满足强化的要求。所以取 2.31 MPa 。

2.2.5 材料许用应力 $[\sigma]$ 的确定

容器材料的许用应力为奥氏体不锈钢应变强化应力 σ_k 除以应变强化应力的安全系数 n_s 。[注: S30408 (06Cr19Ni10) 材料的最大强化应力 σ_k 为 410 MPa , 应变强化应力的安全系数 n_s 为 1.5, GB/T18442.7-

2017《固定式真空绝热深冷压力容器 第7部分：内容器应变强化技术规定》规定的许用应力为 273MPa。

2.3 设计温度的确定

根据 GB/T18442.3 附录 A 表 A.1 定，外壳设计温度取常温 50℃。内容器的设计温度取其在正常工况下可能达到的最高工作温度，介质为 LNG，取 -196℃。

2.4 几何容积及有效容积

几何容积 60m³ 由用户技术条件确定，根据 GB/T18442.3-2019 标准 4.9 条，LNG 属于易爆介质，取额定充满率为 0.9。故有效容积为 60×0.9=54m³。注：强化压力试验状态为充满水状态。

2.5 其他设计参数

①容器类别：LNG 介质属于液化气体为第一组介质，根据 TSG 21-2016 附录 A 中图 A-1 查表，容器类别为 II 类；②容器焊缝系数：根据 GB/T18442.3-2019 标准 4.9 条选取。容器 A、B 类焊接接头采用全焊透对接接头且进行 100%RT 无损检测，按 GB/T 150 规定焊缝系数取 1.0；③腐蚀余量：根据 GB/T18442.3-2019 标准第 11.2 条要求，内容器为奥氏体不锈钢，一般不考均匀腐蚀。腐蚀余量取 0mm。外容器内部不考虑腐蚀余量，外容器材料腐蚀余量取 1mm；④根据 GB/T18442.7-2017《固定式真空绝热深冷压力容器 第7部分：内容器应变强化技术规定》6.1.4 规定涉及的内容器直径、厚度均为应变强化处理前的参数，不考虑应变强化后的变化，因此筒体厚度、封头厚度设计按照 GB/T150、GB/T18442.3 进行强度计算。

2.6 结构设计

2.6.1 材料

由于样罐设计盛装的介质冷冻液体介质，在操作工况下需要保温，故本设计采用高真空深冷绝热结构，内容器奥氏体不锈钢材料应具有良好的塑形、韧性并与介质具有相容性，应为固溶处理热处理状态，优先选用原平板。

外容器用材料采用低合金钢钢板，应符合 GB/T713-2014 的相关规定。外壳用低合金钢锻件和不锈钢锻件应分别符合 NB/T47009 和 NB/T47010 的规定，其级别不得低于Ⅲ级。

绝热材料：采用高真空多层绝热被，应采用导热系数小、放气率低的纤维纸，不应采用可能与氧气或富氧气氛发生危险性反应的绝热材料。

真空夹层用分子筛吸附剂应符合 GB/T13550、HG/T2690 的规定。选用 5A 分子筛和氧化钡组合。

内支撑材料：非金属内支撑材料采用 -196℃专用低温绝热环氧玻璃钢材料，具有导热系数小、真空下表面放气率低和具有良好的低温冲击韧性。

2.6.2 焊接结构

内容器纵环缝采用全焊透结构，最后封闭环焊缝采用永久垫板结构，封头采用标准椭圆封头。由于应变强化工艺的需要，与内容器相焊接的加强圈、垫板等均应采取连续焊接的结构。由于应变强化样罐的设计，未包含绝热材料、支撑材料的设计计算。

2.6.3 清洁要求

应按照 GB/T18442.7-2017 标准 10 清洁要求进行。容器与介质接触的所有零部件表面，应进行脱脂与清洁处理，合格指标应符合 JB/T6896 要求。

3 材料

3.1 储罐材料

样罐材料为：S30408 (06Cr19Ni10) 材料 (GB/T 24511-2017，供货状态为固溶热处理装了，且满足 GB/T150.2 和 GB/T 24511 要求。材料应按照 GB/T18442.7-2017 标准 5.1.2 要求进行复验和验收，且按相应材料管理制度进行标记移植。内筒体相邻筒体应优先采用同一炉批号、同一厚度材料。采用不同炉批号材料时，相邻筒节材料实测的钢材 0.2% 规定非比例延伸强度差不得超过 30 MPa。因多层绝热深冷容器在罐体制作过程中，夹层进行气密试验，此时内容器受外压，为防止内容器失稳，在内容器筒体上设置了内加强圈，这些加强圈对内容器应变强化过程中的变形受到约束，筒体无加强圈支撑长度越长，在远离支撑处支撑圈对筒体的约束减小，导致筒体变形增大加强圈布置越密、刚性越大、加强圈与筒体的焊接强度越大，对筒体的约束越大，变形率越小。内封头材料采用拼接，应选取同一炉批号材料，并尽可能选用同一张板料。其拼接组装的对口错边量不得大于材料厚度的 8%，且不大于 1.5mm。

3.2 焊接材料

样罐的焊材应符合 GB/T18442.2、NB/T47018.1~47018.4 的相应规定和焊接工艺评定进行确定，并按相关规定进行验收和保管。

储罐筒体和封头所采用的焊接材料的熔敷金属化学成分应与母材相同或相近，且抗拉强度不得低于母材抗拉强度规定值的下限。

其他焊材按 NB/T47015 和焊接工艺评定要求进行选取，并按相关规定进行验收和保管。

4 制造

低温储罐的制造应按照 GB/T150、GB/T18442.4《固定式真空绝热深冷压力容器》制造部分、GB/T18442.7-2017《固定式真空绝热深冷压力容器 第 7 部分：内容器应变强化技术规定》相应规定和设计图样技术要求。产品焊接试件，应逐台制备产品焊接试件，试件应在筒节纵向焊缝的延长部位位于筒节同时施焊。产品焊接试件应按照 GB/T18442.7-2017 附录 D 的规定进行预拉伸。产品焊接试件和试样数量应符合 NB/T47016 的规定。

5 检验和试验

5.1 储罐的无损检测

储罐的无损检测按照 GB/T18442.7-2017 中 7.5 无损检测和设计图纸的要求进行，AB 类焊缝强化前进行 100%RT 检查，CD 类焊缝在强化前后均进行 100%PT 表面检测，合格级别按照图纸的规定。

5.2 强化压力试验

应变强化工艺验证样罐的强化试验严格按照 GB/T18442.7-2017 中附录 E 应变强化处理执行。注意压力表数量应不少于 2 个。

5.3 应变强化设计时应注意一下情况

①储罐应变强化后，内容器会发生局部变形，在设计管路时应考虑储罐的变形量，方便的话可以进行数值仿真，通过与试验结果进行对比，掌握采用应变强化工艺造成筒体的塑性变形的部位及变形量的规律。以便于内外壳体在套合时管道可以顺利安装；②内容器加强圈应预留出水口，内容器筒壁上应预留排水工艺管口，便于强化用水顺畅、全部流出；③内容器的水迹残留应充分干燥后再行套装。

5.4 内容器气密性试验

根据 GB/T18442.7-2017 标准规定，取内容器的设计压力 1.44MPa。

5.5 支座反力计算

在样罐强化试验工况，充装介质为水，样罐底部使用枕木做成鞍座，鞍座的设计应不影响内容器的变形。采用卧式进行强化试验，进行强化试验工况下支座反力校核。

6 风险评估报告

主要风险模式：风险评估报告的内容应按照 GB/T18442.3 附录 A 的要求进行编写。且应考虑内容器应变强化的结构特点及强化工艺工况下可能产生的实效模式，如泄露、腐蚀、环境开裂以及强度失效、泄露失效、低温脆断、真空失效、应变时效脆化等并提出安全防护措施。

7 结语

综上所述，在应变强化储罐设计过程中应按照 GB/T150、GB/T18442.1~.6-2019、GB/T18442.7-2017 规定进行设计计算，其计算书应包括强度计算、安全泄放计算、热力计算等，并对局部应力集中位置进行应力分析计算，且应结合现场实际情况，前程进行应变强化监护，及时分析比对数据，及时修正设计数据，以便更好的贴合实际生产情况。

参考文献：

- [1] 郑津洋,郭阿宾,缪存坚,马利,吴琳琳.奥氏体不锈钢深冷容器室温应变强化技术[J].压力容器,2010,27(08):28-32.
- [2] 邓阳春,陈钢,杨笑峰,徐彤.奥氏体不锈钢压力容器的应变强化技术[J].化工机械,2008(01):54-59.
- [3] 寿比南.压力容器标准技术最新进展与中国压力容器标准化[J].中国锅炉压力容器安全,2002,18(02):49-53.

作者简介：

钟春燕(1977-),女,汉族,河南长葛人,本科,高级工程师,研究方向:化工机械。

表 1

设计条件、规范及标准					
设计条件	内容器	外壳	设计条件	内容器	外壳
工作压力 MPa	1.2	真空	容器类别	II	
设计压力 MPa	1.44	-0.1	储存介质	LNG	珠光砂
最高允许工作压力 MPa	-	-0.1	介质密度 kg/m ³	426	堆积密度 30~60
气压试验压力 MPa	1.7	氦检漏	介质特性	易爆、无毒	-
工作温度℃	-162	环境温度	绝热方式	真空粉末	
设计温度℃	-196	50	容器使用地 自然条件	抗震设防烈度	7 (0.1g)
最低设计金属温度℃	-196	-20		基本风压 N/m ²	-
几何 / 有效容积 m ³	60/54	27.8 (夹层)		基本雪压 N/m ²	-
额定充满率	90%	-	设计使用年限年		20
腐蚀裕量 mm	0	0	封口真空度 Pa		≤ 5