

液化天然气罐式集装箱应 变强化内容器结构检验要点分析

巩富晓（中国船级社质量认证有限公司山东分公司，山东 青岛 266071）

摘要：液化天然气罐式集装箱内容器采用应变强化技术可以降低内容器壁厚，节省材料，实现罐式集装箱的轻量化。应变强化过程中应严格按照标准和工艺文件进行操作，内容器在应变强化后直径增大产生形变，应变强化过程的检验尤其是强化后的对各种变形位置的检验很重要，避免预计外的形变影响罐体套合组装和绝热性能。本文介绍了液化天然气罐式集装箱内容器应变强化过程，并结合以往制造检验过程遇到影响制造的问题进行汇总，对内容器结构在应变强化过程中的检验关注要点进行分析和总结。

关键词：液化天然气；罐式集装箱；应变强化；制造检验；检验要点

Abstract: The use of strain strengthening technology in the inner container of liquefied natural gas tank containers can reduce the wall thickness of the container, save materials, and achieve lightweight tank containers. During the strain strengthening process, strict adherence to standards and process documents should be followed. The inner container undergoes deformation as the diameter increases after strain strengthening. The inspection of the strain strengthening process, especially the inspection of various deformation positions after strengthening, is important to avoid unexpected deformation affecting the assembly and insulation performance of the tank body. This article introduces the strain strengthening process of the inner container of liquefied natural gas tank containers, and summarizes the issues that have affected manufacturing during previous manufacturing and inspection processes. It analyzes and summarizes the key points of inspection attention for the inner container structure during the strain strengthening process.

Keywords: liquefied natural gas; tank containers; strain strengthening; manufacturing inspection; inspection points

1 应变强化罐箱简介

室温应变强化技术最早出现在 20 世纪中叶的欧洲，作为一种轻量化技术，可大幅提高奥氏体不锈钢的许用应力，显著减薄容器壁厚，降低重容比。随着成功使用的案例和使用中积累的工程经验越来越多，国际标准化组织、欧盟、澳大利亚、美国、中国等已颁布了有关应变强化技术的标准。

奥氏体不锈钢材料具有良好的塑性，无明显的屈服平台，屈服强度和强拉强度之间应变硬化段较长，室温延伸率 $\geq 40\%$ 。常规压力容器是基于弹性设计准则设计的，通过限定危险截面应力值低于材料许用应力值，这对于具有较高抗拉强度和良好塑性，但屈服强度比较低的奥氏体不锈钢来说，并没有充分发挥其塑性承载能力。应变强化奥氏体不锈钢压力容器所依据的原理是：奥氏体不锈钢试样在外加载荷的作用下，让其变形量超过 0.2% 后继续加载至 σ_k 后卸载，此时材料发生了一部分永久塑性变形；再次对同一试样加载时， σ_k 将作为材料新的屈服强度，显然 $\sigma_k >$

$\sigma_{0.2}$ 。

因此在室温下通过水对奥氏体不锈钢制内容器按照强化压力进行超压处理，使壳体发生塑性变形并稳定后再进行泄压，可以提高奥氏体不锈钢材料的屈服强度，提高许用应力。

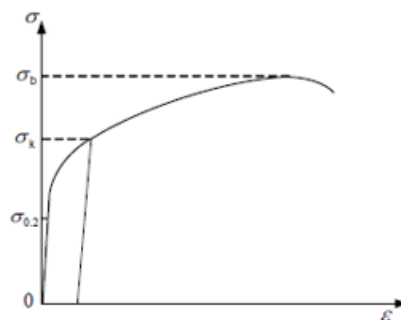


图1 奥氏体不锈钢应力-应变曲线示例

液化天然气罐式集装箱一般由内容器、外壳、真空绝热层、框架及管路系统组成，用于水路、公路、铁路及其相互间的联运。内容器一般采用奥氏体不锈钢材料，当其内容器采用应变强化技术可以降低内容

器壁厚，可减少 20%~50% 的钢材用量，实现罐式集装箱的轻量化。内容器采用应变强化对比示例如表 1 所示：

表 1 内容器采用应变强化计算对比示例（40 尺罐箱）

	非应变强化设计	应变强化设计	比较
设计压力 MPa	0.8	0.8	
选用材料	S30408	S30408	
材料许用应力 MPa	137	273	
筒体直径 mm	2250	2250	
封头计算厚度 mm	8.18	4.1	减薄 49.9%
筒体计算厚度 mm	8.19	4.1	减薄 49.9%
封头名义厚度 mm	10	6	减薄 40%
筒体名义厚度 mm	9	5	减薄 44.4%
内容器重量 kg	6200	3800	减少 38.7%

2 应变强化处理过程

①强化之前应完成与内容器焊接的零部件的焊接，焊缝应按要求经无损检测合格；

②内容器顶部应设置排气管，充液口位于内容器的底部。应变强化时，支座的设置应不影响内容器的变形。将水加满容器后，至少等待 15min 让溶解在水中的气体充分排尽；

③应变强化过程中应保持内容器外表面的干燥，强化完成后应立即将水排净吹干；

④内容器各拘束段可能产生最大变形的截面，均应采用经过标定的位移传感器测量周长。采用的附加测量的钢尺，其最小刻度至少达到 1mm，且应校验合格；

⑤应变强化时应缓慢升压，最大升压速度应不超过 0.5MPa/min。当压力升至设计压力时，经表面检查合格后方可继续升压，升压速度应不超过 0.1MPa/min；

⑥当压力升到强化压力后应进行保压，保压过程中每隔不超过 5min 重复测量每个可能产生最大变形的截面的周长，并计算该截面的周长变化率；

⑦同时满足下列两个条件时，可以终止保压，开始降压：保压时间不小于 1h；最后 30min 内的最大周长变化率不超过 0.1%/h；

⑧当压力下降到耐压试验压力时，保压时间应不少于 30min，然后对焊接接头进行形状尺寸检查、外观目视检查，应无渗漏、无异常声响；

⑨卸压结束后应计算强化处理后筒体最大变形截面的周长变化率；

⑩应变强化试验完成后，应立即将积存在容器内的试验用水排尽吹干；

⑪应变强化过程中应关注和记录下述内容：a 升压过程的压力和时间；b 强化实施前、强化实施过程中和强化实施后的周长（或变化量）测量值；c 筒体变形最大截面的周长变化率；d 任何影响内容器使用功能的形状、尺寸的显著变化。



图 2 采用位移传感器和卷尺测量变形

3 内容器结构检验要点

在应变强化的制造检验过程中遇到很多问题，其中比较典型的案例有：

①应变强化后内容器筒体中间部分的筒节变形率超出预测值导致外壳与内容器间隙较小难以套合组装，或套合后与外壳加强圈有接触导致绝热性能不满足要求；

②加强圈的拼接接头放置在通气、通液孔处，应变强化时此处拼接接头变形断裂导致筒体局部变形；

③内容器支撑位置的倒 U 型加强结构的封闭环在强化过程中被充满水；

④客户在实际使用过程中反馈初始充满率或最大充满率与设计标定值存在差异等。

在汇总以往遇到的制造检验案例后总结下述检验关注点：

内容器经过应变强化后，环向会发生形变，直径会增大，总体外形尺寸变化可控，但是局部结构形变并不可控。泄压放水后应仔细测量特别是未受约束变形量最大处的筒节，避免因应变强化产生的形变影响套装；应检查形变是否会与外壳加强圈或其他结构过于接近，影响真空绝热层的绝热性能；对于采用八点

支撑结构的内容器支撑位置发生变化的可能性会更大一些,理论上应变强化前可采用有限元分析支撑位置的变化,批量制造时可根据经验的积累进行确定和调整。应检查内容器支撑位置变化情况,避免影响内容器与外壳配合的结构件的安装。

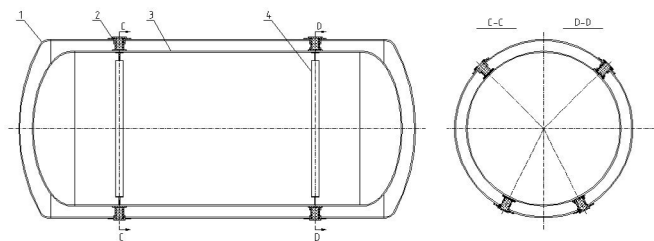


图3 八点支撑结构示意图

内容器的加强圈为角钢或T型钢,由于空间结构的限制,在筒体内进行组装拼接焊缝的焊接比较困难。加强圈拼接焊缝焊接应全截面熔透,加强圈的拼接接头处若有缺陷在应变强化过程中会有断裂的风险,因此拼接焊缝应仔细检查有无缺陷并进行无损检测;加强圈拼接接头放置在通气孔或通液孔处,虽然可以避开与筒体的连接并方便焊接,但此处连接焊缝强度是降低的,在应变强化过程中环向应力的作用下容易发生撕裂或断开,因此加强圈拼接接头应远离通气/通液开孔处,尽量避开筒体纵缝。



图4 加强圈撕裂后导致筒体局部变形示例

若罐式集装箱内容器和外壳的连接采用八点支撑的结构进行固定配合,为了加强内容器支撑位置的刚性,有些工厂会在此处的加强圈结构采用倒U型结构。此种支承加强环在焊接后易形成一定的空间或是封闭或是与外界有微缝隙连通,应变强化过程中内容器中的水在强化压力下会通过缝隙或甚至冲破角焊缝缺陷进入此封闭空间,这种情况会导致应变强化容积测量不准确,强化后无法清理干净积存水。积存水在低温下结冰膨胀对筒体结构产生安全隐患和阻塞管道。因此制造检验过程中应对此加强结构的最高和最低处不封闭,避免有上述类似封闭空间。

初始充满率和最大充满率是按应变强化前内容器尺寸计算确定溢流管位置。应变强化后的内容器容积

会增大,不同位置筒节直径变大并不一致,筒体的形变会导致溢流口位置及充装率发生变化,理论上此变化可在应变强化前通过有限元分析计算。因液化天然气罐式集装箱内容器应变强化一般控制变形较小,一般控制不超过3%~5%,因此溢流口一般仍根据未变形前位置进行固定和检查,但是实际应变强化后的充满率是会与设计初存在偏差。批量制造中如果具备条件可以对部分罐箱内容器进行真实容积和充满率进行测量,可以达到与理论计算的对比验证,也为后续同类型内容器的溢流口安装位置的调整积累数据经验。

4 结束语

采用应变强化技术的液化天然气罐式集装箱内容器的主体结构的承压和变形经过强度和有限元分析计算后,其理论安全性是有保证的,但内容器经应变强化后会发生总体可控,局部不可控的形变,不同筒节直径变形率不尽相同,因此内应变强化过程中应严格按照标准和工艺文件进行操作,应变强化过程的检验尤其是强化后的对各种变形位置的检验很重要,避免预计外的形变影响后续制造甚至返工。

参考文献:

- [1] T/CATSI 05001-2018. 移动式真空绝热深冷压力容器内容器应变强化技术要求[S]. 北京:中国技术监督情报协会,2018.
- [2] GB/T 150.2-2011. 压力容器 第2部分:材料[S]. 北京:国家质量监督检验检疫总局,2011.
- [3] 郑津洋,高晓哲,寿比南等. 奥氏体不锈钢制深冷容器室温应变强化技术常见问题探讨[J]. 压力容器,2013,30(03):45-51+62.
- [4] 郑津洋,郭阿宾,缪存坚等. 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+56.
- [5] 景鹏飞,谢阳紫,董鑫等. 深冷压力容器应变强化过程数值分析[J]. 当代化工,2020,49(10):2347-2350+2354.
- [6] 鞠晓锋. 国标低温罐式集装箱应变强化变形率预测方法[J]. 石油和化工设备,2022,25(08):54-57.
- [7] 孙强. 液化天然气罐式集装箱特点及优劣分析[J]. 石油工业技术监督,2022,38(12):20-24.
- [8] 王伟,朱英波,贺军等. 液化天然气罐式集装箱技术优化[J]. 集装箱化,2020,31(07):16-21.
- [9] 童文龙,刘蛟. 集装箱式液化天然气槽罐应用探讨[J]. 石油化工设备,2019,48(03):61-66.