DOI 编码：10.13646/j.cnki.42-1395/u.2021.11.042

应变强化工艺及其在深冷罐式集装箱的应用

郑静

（中国船级社质量认证公司，北京 100006）

摘　要：本文介绍了常温应变强化工艺及其在国内外发展历程、应用常温应变强化工艺的深冷罐式集装箱在我国不同发展阶段的设计制造模式。从材料选择及应变率控制、内容器结构设计、适装介质及内容器最高设计温度等方面对当前常温应变强化工艺在深冷罐式集装箱的应用问题及注意事项进行了分析探讨。最后对夯实常温应变强化工艺的推广应用基础，也即当下亟待深入细致研究的方向进行了展望。

关键词：罐式集装箱；移动式深冷压力容器；应变强化；冷冻液化气体；LNG；多式联运

中图分类号：U169.47　　**文献标识码：**A　　**文章编号：**1006—7973（2021）11-0113-03

当今世界工业发展及人民生活对氧、氮、氩、天然气等的需求日益增加，这些工业气体具有液化后体积大幅减小的共性这一特性使得其采用液态储运具有更好的经济性。

深冷罐式集装箱（以下简称深冷罐箱）因其较高的安全性、可便捷的实现不同运输方式（公路、水路、铁路）的切换[1]，成为实现 LNG 等冷冻液化气体多式联运的最优选择。深冷罐箱作为一种运输装备其容重比一方面是重要的经济性指标，另一方面在当前节能减排要求日趋严格的背景下深冷罐箱的轻量化可以降低运输单位质量货物的运输负荷从而达到节能减排效果，助力绿色经济发展。

深冷罐箱属于移动式深冷压力容器，其内容器通常采用奥氏体不锈钢材料制造，应变强化技术的应用可有效降低内容器壁厚从而达到罐箱轻量化的目的，当前已得到较广泛应用。

1 奥氏体不锈钢常温应变强化

1.1 常温应变强化工艺

传统容器设计方法是基于弹性设计准则，将最大许用应力限定在材料的弹性范围内，只利用了材料的弹性承载能力[2]。但奥氏体不锈钢屈强比低，具有较高的塑性承载能力，按照传统设计，其许用应力受屈服强度限制，不能充分发挥其塑性承载潜力。

奥氏体不锈钢常温应变强化工艺原理是，当奥氏体不锈钢承受一个大于屈服强度 $R_{P0.2}$ 的拉伸应力 σ_k 时，卸载后将会产生塑性变形，而当再次加载时，应力应变将沿着卸载曲线按照弹性增长，直到应力大于 σ_k 时材料才再次进入塑性变形阶段，也即相当于将奥氏体不锈钢的屈服强度由 $R_{P0.2}$ 提高到了 σ_k。研究表明，奥氏体不锈钢在变形量小于 10% 的情况下，其塑性指标没有显著下降，其微观组织无显著变化[3-4]。利用应变强化工艺，可有效提高奥氏体不锈钢的屈服强度，从而达到容器轻量化效果，是一种绿色经济的工艺方法。

1.2 国际常温应变强化工艺发展

常温应变强化工艺最早出现在 20 世纪中叶的瑞典，经过 60 多年的发展，技术已经较为成熟。当前应用较广泛的为澳大利亚的 AS1210，欧盟标准 EN 13458（固定式）及 EN13530（移动式）以及美国的 ASME BPVC-VIII-1（Mandatory Appendix 44）（以下简称 ASME）[5]。上述标准适用于壁厚不超过 30mm 的真空粉体（或纤维）绝热储罐内容器的制造，适用温度范围均涵盖 -196℃ ~ +50℃，另 AS1210 允许最高温度为 +400℃，且列明对于低于 -196℃的情况下，可以采用增加钢板质量检验及焊接工艺验证性试验的方法[6]。

1.3 国内常温应变强化工艺及其在深冷罐箱的应用范围

我国的常温应变强化工艺起步较晚，本世纪初浙江大学率先开展了相关研究。随着研究的开展及应变强化深冷压力容器开发制造，国内形成并发布了两个相关标准，分别为 GB/T 18442.7-2017《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》及 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》。

国内应变强化深冷压力容器开发制造也经历了不同的模式，从一开始的企业与高校联合开发并经主管部门批文的形式；发展到经技术机构技术评审加主管部门

批文的形式；市场监管总局办公厅于 2019 年 1 月 29 日发布了“市场监管总局办公厅关于规范压力容器安全技术有关要求的通知”（市监特设函 [2019]195 号，以下简称“195 号文”），至此国内应变强化深冷压力容器的开发制造进入经型式试验机构进行深冷容器型式试验的阶段。

“195 号文”中列明：“采用应变强化技术制造移动式深冷压力容器，在相应国家标准颁布前，制造技术要求应不低于标准 T/CATSI 05001–2018”。T/CATSI 05001 标准规定其适用于同时满足以下要求的移动式真空绝热深冷压力容器内容器：①盛装介质为冷冻液化气体（非有毒介质，且沸点不低于 –196℃）；②材质为奥氏体不锈钢；③名义厚度大于等于 4mm 且小于等于 16mm，由单一内直径的圆筒和标准椭圆形封头构成；④对于装运液化天然气（LNG）介质的移动式压力容器，设计压力不大于 1.0MPa；⑤非国防军事装备等有特殊要求的。

对以上 T/CATSI 05001 标准界定的适用范围进行简单分析，并与 ASME 标准对照说明如下：

（1）适装介质及设计温度要求：TSGR0005–2011 中定义“冷冻液化气体”是指在运输过程中由于温度低而部分呈液态的气体（临界温度一般低于或者等于 –50℃）。鉴于上述定义，当前国内相关监管机构要求采用应变强化技术的深冷罐式集装箱充装介质的临界温度不得高于 –50℃，对应的内容器设计温度亦不得高于 –50℃。ASME 中规定的最高设计温度不得超过 50℃；未限制适装介质临界温度。两个标准对于最低设计温度均要求不得低于 –196℃。

（2）允许使用的内容器材质均为奥氏体不锈钢，但 ASME 列明的可使用的材料牌号较 T/CATSI 05001 更多。

（3）容器壁厚及结构构成：ASME 中规定容器壁厚不得超过 30mm；仅限由单一直径的圆筒体及与其相连的凸形封头构成；与 T/CATSI 05001 的要求相比，ASME 的要求更宽泛。

（4）ASME 未对 LNG 介质设计压力列明额外要求。

（5）ASME 要求在用户同意情况下应用应变强化技术。

由以上对照可以得出 T/CATSI 05001 与 ASME 相比，在最高设计温度、最大允许壁厚以及封头型式等方面提出了更严格的要求。

2 常温应变强化工艺在深冷罐箱应用中的关键问题

2.1 材料选择及应变率控制

当前深冷罐式集装箱内容器材料绝大多数采用的 S30408（GB/T 24511–2017），S30408 材料标准规定的 $R_{P0.2}$ 下限值为 220MPa，当前市场上供应的钢板 $R_{P0.2}$ 往往显著高于 220MPa，其值大多分布在 220MPa ~ 330MPa 范围内。不同的 $R_{P0.2}$ 材料钢板制成的容器在相同的强化压力作用下得到的变形率也会不同。图 1 为某型号深冷罐式集装箱内容器分别选用 $R_{P0.2}$ 为 220MPa 标准值及某 $R_{P0.2}$ 为 310MPa 的实测数据 [7] 作为材料本构关系进行有限元分析得到的应变对照图，从应变对比云图可以看出，其最大应变量分别为 0.056、0.029。

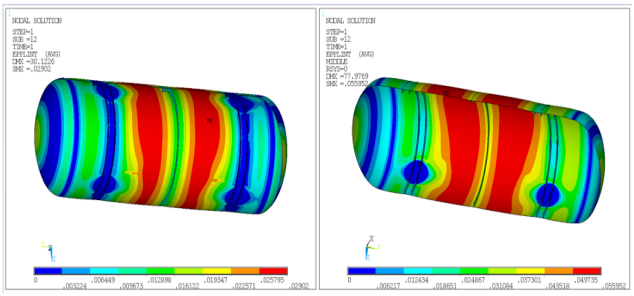

图 1 不同 $R_{P0.2}$ 值情况下内容器相同应变压力下应变云图

对于深冷罐式集装箱其内外容器之间的空间间隔有限，如内容器材料为不同批次钢板则其 $R_{P0.2}$ 可能存在较大差别的情况，这样进行内容器应变强化后就有可能造成部分内容器变形率较大进而导致内外容器空间间隔过小，导致套装失败，进而造成不必要的经济损失。故对于采用应变强化工艺制造的深冷罐式集装箱，应密切关注其 $R_{P0.2}$ 性能的稳定性；并充分校核内外容器间隔及允许的内容器变形量。

2.2 内容器结构设计

采用应变强化的内容器结构应尽量简单，减少约束；尽量避免结构形状的突然变化，以减小局部应力。图 2 左图为某型号采用 8 点径向支撑形式的深冷罐箱内容器在强化压力作用下的应变分布云图；图 2 右图为将左图所述加强结构删除后的均匀结构在相同强化压力下的应变分布云图。

由对比云图可以看出加强结构的存在使得容器变形受限，其变形量显著降低；同时受力及变形分布直接

受加强件的影响，使得其受力及变形沿轴向及环向不均匀分布。在应变强化压力作用下设置加强构件的部位其附近应力及应变变化剧烈易造成相应位置的焊缝开裂。故设计中应尽量使得结构形状过渡均匀，减少结构突变、降低应力 / 应变变化率。

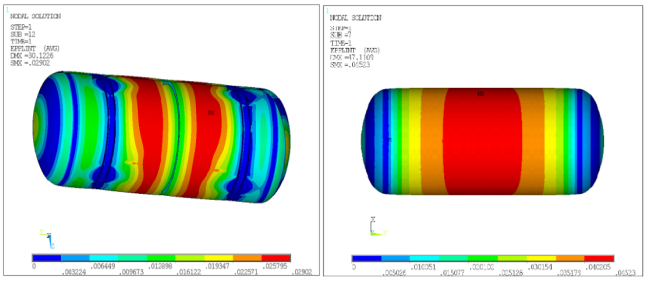

图 2　某型号深冷罐箱内容器及去除加强结构后在强化压力作用下的应变云图

2.3 适装介质及内容器最高设计温度

当前国内相关监管机构要求采用应变强化技术的深冷罐箱充装介质的临界温度不得高于 -50℃，对应的内容器设计温度亦不得高于 -50℃。

究其原因是考虑到应变强化工艺提高的仅是材料的屈服强度而对抗拉强度（Rm）并无显著提升效果[8]，容器设计许用应力的确定需同时考虑屈服强度及抗拉强度，以 GB/T 150–2011 为例，规则设计时许用应力取 min（$R_{P0.2}$/1.5；Rm/2.7），所以仅采用应变强化工艺还不能够作为奥氏体不锈钢制容器选用较高的许用应力的充分条件。研究表明在低温下奥氏体不锈钢抗拉强度性能会有显著提高[9]，故满足应变强化及低温两个条件时，才可以选用较高的许用应力。从这一角度来看，T/CATSI 05001 对最高设计温度的限定是审慎的、必要的。

笔者认为限定最高设计温度已可保证材料的抗拉强度性能，T/CATSI 05001 中又限定允许充装介质为冷冻液化气体（临界温度不得高于 -50℃）是非必要的、冗余的，且这项规定在一定程度上限制了一些介质对应变强化工艺罐箱的选用。

3 展望

常温应变强化技术是一项绿色经济的工艺方法，但也正如上文所述，当前该工艺在我国的深冷罐式集装箱及其他类型移动式深冷压力容器的应用中还存在各方面的限制，这也源于该工艺在国内发展的欠成熟状态。为更安全地推广应用该技术，也就需要更深入和广泛的对其进行研究，从奥氏体不锈钢材料本身的特性（例如其低温性能、强化后的疲劳性能等）、应变强化工艺本身（例如其适用材料种类、厚度、温度范围等）、应用该技术的容器的使用工况的影响（例如，移动式容器不同运输模式的运行工况差异）等方面开展深入细致的研究及实践，为该工艺的成熟广泛应用夯实基础。

参考文献：

[1] 赖永才 . 道路运输液体危险货物安全性分析 [J]. 中国船检 , 2015.05:101–102.

[2] GB/T 150—2011, 压力容器 [S].

[3] 韩豫 , 陈学东 , 刘全坤 , 等 . 奥氏体不锈钢应变强化工艺及性能研究 [J]. 机械工程学报 ,2012,48(2):87–92.

[4] 周连东 , 江楠 . 国产 S30408 奥氏体不锈钢应变强化低温容器许用应力及应变确定 [J]. 压力容器 ,2011,28(2):5–10.

[5] ASME BPVC–VIII–1–2019,ASME boiler and pressure vessels code –Rules for Construction of Pressure Vessels Section VIII Division 1[S].

[6] 陈挺 , 王步美 , 徐涛 , 等 . 奥氏体不锈钢压力容器应变强化技术的发展及国外标准比较 [J]. 机械工程材料 ,2012,36(3):1–4.

[7] 段文峰 , 邓泽鹏 , 刘文渊 , 等 . 不锈钢 S30408 材料本构模型试验研究 [J]. 钢结构 ,2016,31(5):37–40.

[8] 刘蓉 , 刘世龙 , 蒋六保 , 等 .S30408 奥氏体不锈钢焊缝应变强化后力学性能试验研究 [J]. 焊接技术 ,2018,47(3):26–28.

[9] 丁会明 , 吴英哲 , 郑津洋 , 等 . S30408 焊接接头低温力学性能试验 [J]. 浙江大学学报（工学版）,2018,52(2):217–223.