

# 碳纤维缠绕铝内胆压力容器水压动力爆破仿真分析

章杰锋

浙江蓝能燃气设备有限公司 浙江绍兴 312369

**摘要:** 20世纪60年代初,美国和欧洲一些国家采用纤维缠绕技术成功研制铝内胆玻璃纤维全缠绕复合材料容器,复合材料容器有很多优点,因此在消防呼吸器、医疗卫生及煤矿安全救护等行业应用广泛。压力容器的工作条件恶劣,容易因违章操作、安全附件失灵、容器内异常化学反应、强度不足及材质劣化等原因发生严重事故,因此在容器生产时必须进行抽检水压爆破实验,以确定容器的爆破压力。然而,由于实验成本较高,且存在很大的随机性,寻求准确可靠的爆破压力求解方法,为容器生产提供可靠的安全系数很有必要。碳纤维缠绕压力容器在几何形状、材料及结构等方面都非常复杂,复合材料层合板结构的破坏历程是一个逐步破坏和刚度不断退化的过程,仅靠理论分析不能准确求得容器的爆破压力,无法满足空间系统对压力容器高可靠性、高性能的要求。此时,数值模拟方法在碳纤维缠绕压力容器中的应用给碳纤维缠绕压力容器的深入研究提供了有力的手段,同时构建起了理论指导实践的桥梁。

**关键词:** 碳纤维缠绕; 压力容器; 动力爆破

## 引言:

压力容器 (pressure vessel) 是现代工业中不可或缺的重要设备,主要用于化学反应、材料分离、气体储存和运输等生产工艺。传统压力容器多由金属或合金组成,作为容器壁,成本高,质量好,结构简单,应力分布不均,耐高温和耐压差,耐腐蚀性差等缺陷,难以满足压力容器某些特殊工作条件的要求,限制了其在实际生产中的应用。因此,以碳纤维复合材料压力容器为代表的新型复合压力容器备受关注。碳纤维复合压力容器 (carbon fiber composite pressure vessels) 具有安全可靠、寿命长、压力承载力大等特点,在航天、医疗、新能源汽车等领域具有广泛的应用前景。近年来,研究人员对碳纤维复合材料压力容器的结构设计、性能优化、损伤和检查进行了大量理论和实验研究。本文首先简要介绍了碳基及其复合材料,然后介绍了碳基服务器合金压力容器,总结并重点讨论了碳基服务器合金压力容器的最新研究情况。最后对研究前景进行了展望<sup>[1]</sup>。

## 1 LS-DYNA 程序简介

LS-DYNA是功能齐全的几何非线性、材料非线性、界面状态非线性的有限元数值计算软件。它以Lagrange算法为主,兼有ALE和Euler算法;以结构分析为主,兼

有热分析、流固耦合功能;以非线性为主,兼有静力分析功能。目前,该软件在航空航天、汽车、国防、石油、核工业、电子、船舶、建筑及体育器材等领域都获得了广泛的应用。软件的使用过程包括:a.前处理。前处理用ANSYS来完成,主要包括设置Preference选项、选择单元类型和算法、定义实常数、定义材料属性、构建实体模型、有限元网格划分、创建PART及定义接触截面等。b.求解。求解过程主要包括施加约束、载荷、边界条件,设定初速度、设置求解过程的控制参数、选择输出文件和输出时间间隔、输出K文件、调用LS-DYNA进行求解<sup>[2]</sup>。c.后处理。进入LS-PREPOST进行应力、应变、位移及时间历程曲线等后处理。

## 2 碳纤维复合材料压力容器的结构设计

为了提高压力容器的力学性能,缩短生产周期,降低成本,有必要根据相关设计理论和标准设计复合压力容器的结构。采用非测地线缠绕成型方法研制了碳纤维复合材料球形压力容器T800。采用离散函数建立了有限元模型,对其应力分布和极限强度进行了仿真分析。此外,根据最大应力准则对爆破压力进行了预测和实验证明。实验结果与仿真预测一致,为纤维缠绕球形压力容器的设计提供了参考。采用网格理论和有限元模型设计了碳纤维缠绕超高压前端混合磨煤机,使传统磨煤机质量降低80%,机械性能更好。考虑到高强度介质—T800碳纤维的研究与应用较低的现状,采用干燥缠绕成型工艺获得了不同直径T800碳纤维全卷材复合压力容器,为高性能T800碳纤维的工业应用奠定了理论和实验基础。

**通讯作者简介:** 章杰锋,1977年6月,汉,男,浙江绍兴,浙江蓝能燃气设备有限公司,研发中心副主任,高级工程师,本科,邮箱:zhangjieafeng@163.com,研究方向:机电制造。

碳纤维缠绕层是复合压力容器的主要压力载体,在很大程度上决定了容器的质量、安全性和可靠性,因此其设计非常重要,包括缠绕角度、缠绕张力和纤维层厚度<sup>[3]</sup>。通过比较不同绕组角度对碳纤维复合压力容器应力的影响,并根据最大应变准则、最大应力准则和Tsai-Wu失效准则对失效进行评估,发现51绕组角度压力容器的性能明显优于其他绕组角度。以薄膜理论、网格理论和绕组原理为基础,采用非大地绕组模式优化了碳纤维的绕组参数。MATLAB对切点和砂宽对非大地绕组的影响进行了评价,得到了最优绕组参数,保证了光纤的稳定性和均匀性。最后采用有限元模型分析了绕组参数对衬层和纤维层应力分布的影响,预测了爆破压力。实验结果符合理论计算。

### 3 材料破坏准则

碳纤维复合材料缠绕容器铝内胆材料选用24#多线性弹塑性材料模型,即\*MAT\_PIECEWISE\_LINEAR\_PLASTICITY。复合材料层选用LS-DYNA3D中的MAT054,即MAT\_ENHANCED\_COMPOSITE\_DAMAGE材料模型。该模型适用于各向异性复合材料壳单元的模拟。材料的破坏准则采用Chang-Chang失效准则。MAT054材料模型中,材料有4种失效方式:a.当最大应变值未设定时,根据Chang Chang准则判断失效;b.当设置了最大应变值时,根据最大应变值判断失效;c.当设置了最大等效应变值时,根据最大等效应变值判断失效;d.当设置了最小时间步长时,达到最小时间步长的单元失效<sup>[4]</sup>。

### 4 压力容器质量优化措施

#### 4.1 压力容器成型误差的变形问题及控制策略

为了保证容器的质量和安全,制造企业需要注重选材、技术、操作等环节,但是,尺寸误差是很难避免的一种因素,一般压力容器的零件尺寸有误差就会影响后期容器压力设备运行安全。为了避免容器本身制造的安全问题,首先,需要对提高制造人员的安全意识和能力,通过他们的技术经验和理论知识设计出合理的容器制造方案。其次,还需要不断的去强化制造工艺制度,在整个生产流程中需要严格按照操作流程,保证容器的安全性和可靠性。

#### 4.2 选择标准化的制造材料

目前,石化企业正处于可持续发展过程中,对我国社会的现代化起到推动作用。压力容器作为其生产的重要设备,对其生产有重大影响。通过以上分析来看,压

力容器在材料方面有一定的局限性,导致其无法有效应用于实际生产作业。良好的材料对提升压力容器质量至关重要,但是曾经由于材料选择的问题,导致压力容器无法满足石化企业的实际应用需求。因此,相关采购部门应从实际出发,深入贯彻落实各种规范化标准来选购材料,而且在选购过程中还要对材料性能进行检验,再综合筛选质量最佳、价格最便宜的材料,来满足压力容器生产的基础条件<sup>[5]</sup>。

#### 4.3 压力容器内应力变形问题控制策略

内应力是变压器在使用中出现变形的主要原因之一。压力容器在投入使用后会受到内应力的影响,内应力会受压力容器工作时间发生相应的变化,从而导致压力容器的身体出现了裂痕。因此,制造企业需要通过一定的科学手段去消除内应力。除此之外,在对压力容器进行热处理时就是对消除内应力的过程,压力容器的热处理环节就是对设备进行调试<sup>[6]</sup>。

### 5 结束语

碳纤维缠绕铝内胆压力容器复合材料增强层先于金属内胆发生破坏,容器最先爆破位置位于筒身段。在复合材料层逐层破坏的进程中,环向缠绕层先于螺旋缠绕层发生破坏。

#### 参考文献:

- [1]徐燕生,刘祚时,王汉奎,俞跃.铝内胆碳纤维全缠绕气瓶疲劳应变监测方法[J].河南科技大学学报(自然科学版),2022,43(03):19-23+30+5.
- [2]鲍辛成,鲍性磊.碳纤维缠绕铝内胆压力容器水压动力爆破仿真分析[J].化工机械,2021,48(06):835-838.
- [3]唐伟华,陶宏新,刘润发,沈睿,朱宇平.H项目反应堆压力容器出厂水压试验应变测量与分析[C].中国机械工程学会压力容器分会.压力容器先进技术——第十届全国压力容器学术会议论文集(下).中国机械工程学会压力容器分会:中国机械工程学会压力容器分会,2021:590-598.
- [4]周静红.基于PLC控制的压力容器水压泄漏检测系统的设计[J].机械工程与自动化,2020(06):138-140.
- [5]何旺,谭云华,陈太军,邓清.压力容器制造质量检验控制的分析研究[J].石油和化工设备,2020,23(08):133-136.
- [6]郑智元.压力容器用聚乙烯/碳纤维复合材料界面设计及其渗漏性能分析[D].哈尔滨工业大学,2020.