

轻量化复合材料压力容器 研究进展

Research Progress of Lightweight Composite Pressure Vessel

哈尔滨工业大学复合材料与结构研究所 王荣国 矫维成 刘文博 杨帆 赫晓东



王荣国

教授、博士生导师, 现任哈尔滨工业大学复合材料与结构研究所副所长, 黑龙江省复合材料学会副理事长。长期从事高性能树脂基复合材料的设计与制备工作, 主要研究方向为轻量化复合材料压力容器优化设计与制备、复合材料成型工艺可视化仿真技术、高性能树脂基复合材料设计与制备等。作为课题负责人承担国家 973 项目 2 项, 主持 863 等重大专项课题 10 项。主编“九五”国家重点图书 1 部, 获省市科学技术奖 2 项, 授权国家发明专利 5 项。

复合材料压力容器已发展成为航空航天结构动力系统的关键组成部分之一^[1-3], 无论从结构重量还是

复合材料压力容器结构设计理论的发展, 薄壁金属内衬成型技术的创新, 缠绕成型工艺仿真技术的实现以及性能监测与评价体系的建立, 为最大化地减轻复合材料压力容器的重量奠定了基础, 有效地解决了新一代航天飞行器动力系统的减重技术“瓶颈”。

从所占据的几何空间上看, 都占有极高的比例, 而其减重要求是制约着新一代先进发动机系统的研制和发展的技术瓶颈之一。如何设计和制备出轻量化的复合材料压力容器, 最大化地减轻系统的重量, 是发动机设计者和复合材料研究人员追求的永恒目标。世界发达国家无不将发展航空航天动力系统用轻量化复合材料压力容器作为国家重点科研课题之一^[4-6], 如美国 NASA 提出的新航空研究计划(New Aeronautics Research Program)^[7]、2030 年前的太空探索规划(3rd space exploration conference&exhibit)^[8]、欧洲木星探索计划^[9]等, 均将发展轻量化复合材料压力容器技术列为太

空探索的关键技术之一, 并对这些技术实行严密封锁。

轻量化复合材料压力容器工作条件苛刻、技术难度大、费用高、研制周期长, 特别是在其设计制备过程中涉及材料、结构、制造工艺、试验和测试评价等关键技术的系统集成。因此建立高质、高效的轻量化复合材料压力容器设计、制备、评价一体化技术平台, 可以大大提高设计质量, 提供最优的成型工艺方案, 实现最大化减重目的, 为轻量化复合材料压力容器的可靠应用提供保障。

结构设计技术

复合材料压力容器是由双层结构组成^[10], 内层为内衬层, 其功能是:

表1 不同材料内衬气密性比较 Pa·cm³/s

内衬类型	金属内衬	橡胶内衬	塑料内衬
氦漏率	10 ⁻⁵	10 ⁻²	10 ⁻²

(1) 防止密封容器中贮存的高压气体及燃料泄漏;(2) 作为缠绕成型时的支撑芯模;(3) 内衬端接头作为容器对外的接口与连接界面^[11-13]。外层是用纤维作为增强材料,树脂作为基体材料,经缠绕固化形成的复合材料层壳体,主要用于承载容器中的高压载荷^[14-15]。

1 内衬材料选择与设计

复合材料压力容器在某些服役工况条件下,除了要有足够的强度外,还应具备良好的气密性,且与气体介质种类、压力有紧密联系。而纤维增强树脂基复合材料在高压作用下气密性较差,尤其是氦气、氢气等小分子气体介质,在高工作压力情况下极易穿透复合材料层,造成渗漏。为此要求复合材料压力容器必须设计有能够密封的内衬。

复合材料压力容器内衬常见形式有金属内衬、橡胶内衬、塑料内衬。同样厚度的情况下橡胶、塑料较之金属材料,密度小、重量轻,且材料成本低、耐腐蚀、疲劳性能好,但存在以下3个缺点:(1) 随着加压/卸压的工作循环压力,温度场变化较大,加压时温度升高,卸压时温度下降,从而容易导致塑料和橡胶老化,力学性能下降,使得接头与内衬间的气密性不易解决以及塑料和橡胶内衬变脆失稳而破裂;(2) 采用塑料或橡胶内衬的气瓶对于冲击损伤的响应比金属内衬更敏感,严重的冲击可能导致纤维断裂失效,也就是说导致气瓶破裂;(3) 无法满足复合材料压力容器对气密性的苛刻要求。表1为不同材料内衬的氦漏率情况。

从表1中我们能够看出金属内衬的气密性比塑料、橡胶内衬的气密性高2个数量级,能够有效抵抗气体介

质的渗透,满足复合材料压力容器对气密性的苛刻要求。因此,金属材料是成型复合材料压力容器内衬的理想选择。

常用的金属内衬材料有铝合金、不锈钢、钛、莫乃合金、因科乃尔合金等^[16-19]。对高循环寿命应用的压力容器宜采用较高屈服强度材料如钛合金、不锈钢、因科乃尔内衬,工作时内衬应变处于弹性范围^[20]。对低循环寿命应用的压力容器采用铝合金或纯钛超薄内衬,工作时内衬应变处于塑性范围^[21]。另外,还应考虑成形、焊接、材料相容性、强度、重量制造费用等技术因素及腐蚀、污染、氧化等风险问题。具体的内衬材料选择往往是为满足多因素需求而进行折中的结果。NASA研究机构的资料表明,美国航空航天领域现役中的复合材料压力容器均采用薄壁铝合金内衬,球形容器内衬的铝合金型号多为5086-T0,厚度为1.27mm,柱形容器内衬的铝合金型号为6061-T62,厚度为1.0mm^[22-25]。

不难发现标准航空航天用钢内衬复合材料氦气瓶比传统金属气瓶减重24%,而采用厚度为1mm的薄壁铝合金内衬复合材料氦气瓶比传统金属气瓶减重72%,比标准航空航天用钢内衬复合材料气瓶减重63%,结果表明薄壁金属内衬减重效果显著。因此综合考虑力学性能、减重和气密性要求以及对贮存介质的相容性,航天航空用低循环寿命的复合材料压力容器多采用厚度≤1mm的薄壁铝合金内衬,以实现有效减重。

2 复合材料结构层设计

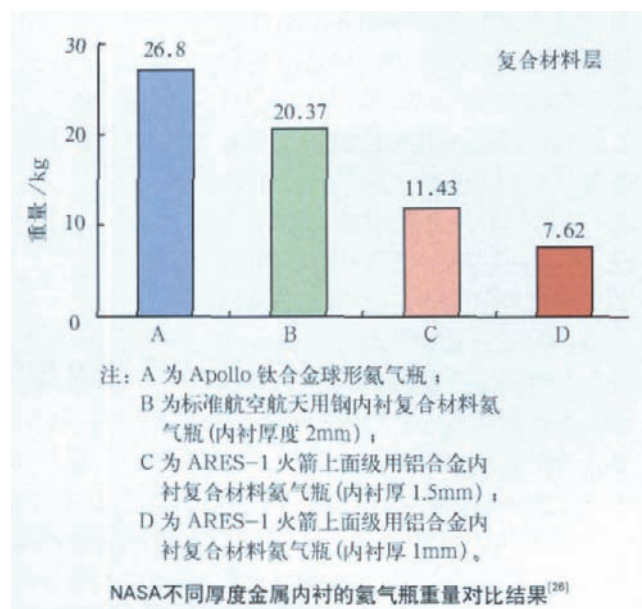
纤维缠绕复合材料压力容器结构层

本身的复杂性——封头及柱段筒身曲率厚度的突变、封头处的变厚度、变角度等等,都给设计、分析、计算带来了诸多困难,壳体不仅要在封头段进行变角度、变速比非测地线缠绕,而且有时在柱段也要进行等螺距或非等螺距的缠绕,同时还要考虑摩擦系数等实际因素的影响。NASA机构的研究文献表明要对复合材料压力容器进行“严格”的力学性能设计是一个非常复杂的问题^[27-29],应综合各种分析手段,根据复合材料压力容器的实际服役工况进行针对性的分析。课题组提出了一种预测复合材料压力容器封头段厚度的模型,利用该模型可有效预测封头段的厚度分布,为建立复合材料压力容器强度分析和刚度校核的精确有限元模型提供基础。

在此基础上通过对不等极孔复合材料压力容器非测地线缠绕线型的数值模拟与结构力学行为分析,提出了纤维轨迹沿主应力方向进行规划的设计方法,实现了复合材料压力容器的有效减重,成功研制出轻量化复合材料压力容器。

内衬技术

1 轻量化复合材料压力容器薄壁金属内衬成型技术



薄壁金属内衬虽然能够显著减轻复合材料压力容器的重量,但是其成型技术一直制约着复合材料压力容器的发展。薄壁金属内衬成型主要包含2个部分:(1)封头部分的成型工艺技术。薄壁金属内衬封头部分的成型工艺主要有锻造成型、旋压成型和冲压成型^[30];(2)薄壁金属内衬的焊接技术。薄壁金属内衬的焊接技术主要有:电子束焊接(EB)、惰性气体保护焊接(TIG)和搅拌摩擦焊等^[31]。

传统的钛合金贮箱和金属内衬多采用锻造法成型^[32]。但是由于锻造压力机的限制,采用该方法成型制品尺寸有限,无法满足卫星或火箭上面级用压力容器的成型。据此,W. Radtke提出了Net-Shape对滚旋压工艺结合EB和TIG焊接技术来制备厚度为0.7mm的薄壁钛合金内衬,以满足欧洲反坦克车(European ATV)全金属推进剂贮箱和欧洲阿尔法卫星(European Alphabus Satellite)推进剂贮箱的需求^[33]。传统铝合金内衬厚度一般在2mm以上,可采用这种旋压工艺一次性整体成型。但是当铝合金内衬厚度<1mm且封头直径较大时,由于铝合金内衬弹性模量比钛合金小的多,采用此种旋压工艺成型过程时,易产生边缘开裂和型面回弹等缺陷,并且超薄铝合金内衬在进行焊接时也极易产生烧穿、裂纹等现象,难以成型。

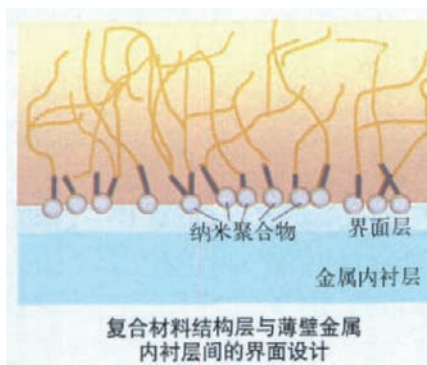
对此,课题组在传统旋压工艺的基础上,系统研究了缺陷产生的机理,提出分阶段热处理旋压成型方法,该方法使剪旋产生的铝合金材料加工硬化得以消除,有效控制超薄铝合金内衬旋压成型过程中的拉深失稳和塑性变形失稳,解决了大尺寸超薄金属内衬封头成型的技术难题,制备出薄壁金属内衬。

2 复合材料结构层与薄壁金属内衬层变形协调技术

当采用薄壁金属内衬成型复合

材料压力容器时,可有效减轻重量,然而由于复合材料和金属材料的弹性范围相差较大,使得重复使用过程中薄壁金属内衬与复合材料结构的变形协调问题成为值得研究的热点问题^[34]。这是由于在工作压力作用下,复合材料处在弹性变形内,而超薄金属内衬则进入了塑性变形阶段。卸载时,复合材料层发生完全弹性回复,超薄金属内衬只能发生弹性部分回复,很大一部分塑性变形无法回复。致使在重复加载/卸载循环过程中,超薄金属内衬与复合材料结构界面层容易产生分层现象,导致复合材料压力容器产生泄漏,降低可重复使用寿命。

课题组通过建立超薄金属内衬/界面层/复合材料结构三组元分析模型,对复合材料压力容器充放气过程进行数值模拟,获得了超薄金属内衬与复合材料层间的界面层失效门槛值。以此门槛值为基准,设计、制备出了一种高度支化的纳米聚合物,有效改善了超薄金属内衬与复合材料结构的界面层粘接性能,使界面层强度提高了28%,保证了金属内衬与复合材料结构的变形协调,提高了含超薄金属内衬轻量化复合材料压力容器的可重复使用寿命。



成型工艺仿真技术

轻量化复合材料压力容器的设计是一项多学科综合、复杂的系统工程,计算机辅助技术和先进的试验测试技术为轻量化复合材料压力容器的设计提供了高效、高质的设

计手段,如何充分利用这些现代手段,有效地构建轻量化复合材料压力容器的设计体系,使得复合材料压力容器的设计系统化、高效化、智能化和经济化是复合材料制造领域的发展方向之一。美国、德国、英国、法国等发达国家先后开发出了多种实用化的纤维缠绕仿真软件,如CADWIND^[35]、CADFIBER^[36]、CADFIL^[37]、CADWAR^[38]和CADMAC^[39]等等。

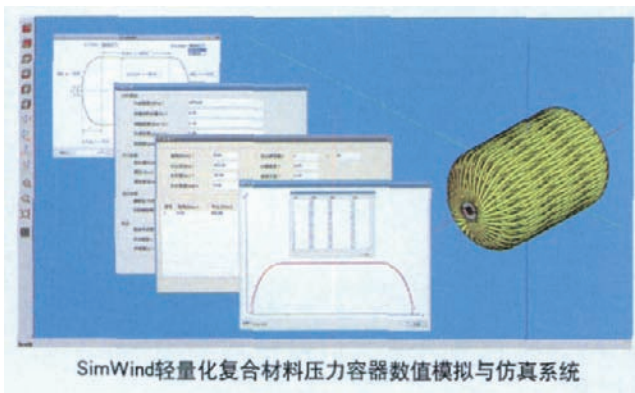
课题组与航天某研究单位合作,建立了以结构效率为控制因素的含超薄金属内衬轻量化复合材料压力容器数值模拟与仿真系统,开发了复合材料压力容器缠绕仿真软件平台SimWind。该软件系统主要由三维参数化建模模块、结构分析模块、缠绕轨迹优化设计模块、三维动态可视化仿真模块、后置处理模块组成,可以实现复合材料压力容器的快速设计,有效缩短复合材料压力容器的研制周期,降低制造成本,同时为轻量化复合材料有限元建模分析提供依据。

(1) 复合材料压力容器参数化三维建模。复合材料压力容器芯模曲面是进行缠绕轨迹线型规划的基础。基于不同形状封头型面应力应变场分布规律,建立了复合材料压力容器参数化三维建模。根据工作压力、容积、重量要求,给出封头型面参数化模型,实现了封头形状的优化设计,获得了最大的结构效率。

(2) 复合材料压力容器缠绕轨迹优化设计。基于纤维轨迹沿主应力方向规划的设计,提出了可缠绕范围的求解算法,建立了缠绕轨迹规划的数值计算模型,开发了缠绕线型的优化设计系统,实现了纤维强度的最大化发挥及结构的减重设计,解决了不等极孔压力容器缠绕线型优化设计的难题。

(3) 复合材料压力容器缠绕工艺过程与结果的可视化。基于多线程

技术,建立了可视化仿真模型,实现了缠绕角度、缠绕厚度、缠绕层数等三维动态数据的可视化,有效解决了多参量缠绕工艺参数的科学分析与优化选择。同时也使得设计人员对缠绕工艺过程的工艺参数和影响因素有了直观的了解,为轻量化复合材料压力容器的快速设计提供了依据。



SimWind轻量化复合材料压力容器数值模拟与仿真系统

性能监测与评价技术

1 轻量化复合材料压力容器健康监测技术

如何获取轻量化复合材料压力容器制造过程信息,提高其稳定性,一直是复合材料压力容器工作者关注的重要课题^[40]。轻量化复合材料压力容器成型工艺过程中包含复杂的物理化学变化,影响产品质量的因素十分复杂。传统的工艺过程控制由于无法得到加工材料内部状态变化的信息而只能遵循基于经验的固定规范,一旦原材料和环境稍有波动,就暴露出可重复性差、废品率高等缺点。光纤传感技术是近年来随着智能材料与结构在各行各业的广泛应用而兴起的一种全新的监测手段。光纤传感器具有体积小、重量轻、抗电磁干扰、信噪比高、测量对象范围广、与基体材料相容性好等特点,最适合于埋入式测量,因而使复合材料固化工艺过程的监测成为可能。利用最新发展的光纤传感技术可以对材料内部的固化情况进行全面有效的监测,例如监测温度、应力、粘

度、固化度等。同时,基于监测信号实时调整工艺过程,就可以保证产品的质量。根据复合材料固化工艺过程中既包括复杂的力学变化,又包括复杂的化学变化的特点,用多种手段对复合材料的工艺全过程、多种参量进行在线监控。将光纤智能化在线监测技术引入复合材料压力容器生产工艺中,将大大提高复合材料成型

工艺过程的效率,提高产品质量和性能,降低工艺成本。

实时获取复合材料压力容器服役条件下的状态信息,对提高结构安全与可靠性、降低维护成本以及理论模型的发展

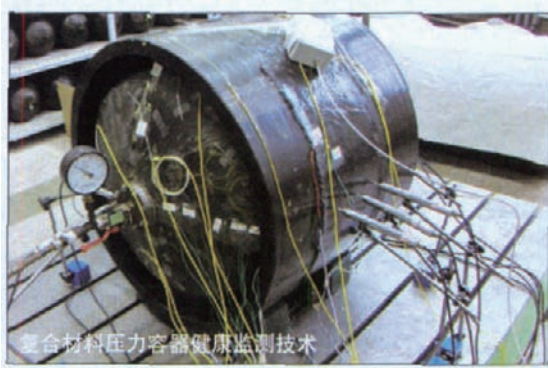
具有重要意义。通常所采用的一些复合材料结构的损伤检测方法成本较高,设备复杂,不能实时在线监测。因此,迫切需要建立一种有效的复合材料结构在线监测系统,实现快速、准确检测损伤的形成以及损伤的位置。由于复合材料的力学

和结构特点以及所处的特定环境,在设计阶段完全掌握和预测结构的力学特性和行为是非常困难的,基于理想模型的理论分析和模拟试验结果与结构的真实情况并不完全相符。因此,通过健康监测技术获得的实际结构的动静态行为,可以验证结构分析模型、计算假定和设计方法的合理性。应用光纤传感技术的健康监测方法,可以实现结构服役过程中温度分布和应力分布及损伤演化的问题。将材料开发、力学设计与在线监测技术有机结合,达到提高结构安全性,降低维护费用的目的。

2 复合材料压力容器性能检测平台

针对航天飞行器发动机系统用复合材料压力容器服役环境的要求:重

量、氦漏率、压力、可重复使用次数、容积、位移、内腔洁净度、装配精度等,有必要采用氦检漏技术、声发射技术、高精度变形测量技术、光纤健康监测技术等,建立一套满足航天飞行器服役环境要求的含超薄金属内衬轻量化复合材料压力容器使用性能评价方法,为超薄金属内衬轻量化复合材料压力容器的工程应用提供了相关的配套技术,保障其在航天飞行器上应用的可靠性和安全性。复合材料压力容器结构设计理论的发展,薄壁金属内衬成型技术的创新,缠绕成型工艺仿真技术的实现以及性能监测与评价体系的建立,为最大化地减轻复合材料压力容器的重量奠定了基础,有效地解决了新一代航天飞行器动力系统的减重技术“瓶颈”。



复合材料压力容器健康监测技术

结束语

计算机辅助设计技术的发展和复合材料结构设计理论、制备工艺、性能评价方法的不断突破,使得轻量化复合材料压力容器性能越来越高,同时也对轻量化复合材料压力容器的减重要求提出了新的挑战。随着登月计划的实施和深空探测计划的开展,低温液氧液氢复合材料压力容器和无内衬复合材料压力容器将会成为新的研发热点。

本文有参考文献 40 篇,因篇幅所限,未能一一列出,读者如有需要,请向本刊编辑部索取。

(责编 金卯)