

薄壁壳体结构屈曲失稳机理与稳定性增强措施

严松

江南机电设计研究所 贵州 贵阳 550025

【摘要】：薄壁壳体凭借自重轻、比强度优异的特质，在航空航天、建筑工程等行业应用广泛，屈曲失稳是其失效的主要诱因。当壳体承受外部荷载且内部应力达到临界阈值时，整体构型会发生突发性非线性转变，承载能力快速衰减，易引发工程安全隐患。本文围绕薄壁壳体屈曲失稳内在机制展开探究，厘清几何参数、材料属性、荷载类别与边界条件对失稳行为的制约作用，探究各类因子对屈曲临界荷载、失稳演化模式的影响规律，据此制定稳定性提升策略，可为薄壁壳体构型优化、安全评定及工程落地提供理论依据与实践借鉴，助力改善结构抗屈曲水准、延长服役周期。

【关键词】：薄壁壳体；屈曲失稳；失稳机理；稳定性增强；临界载荷

DOI:10.12417/3041-0630.26.07.042

引言

薄壁壳体具备自重轻、比强度高、空间适配性好等突出优势，现已广泛用作航空航天、海洋工程及土木工程领域的核心承载构件，整体服役安全直接关乎装备与建筑体系的运行可靠度。屈曲失稳是薄壁壳体最主要的失效形式，具备发作突然、破坏危害大的特点，常在未触及材料强度极限前便出现构型突变，大幅缩短服役年限，甚至酿成重大工程事故。针对这一工程实际问题，本文探究薄壁壳体屈曲失稳内在机理，梳理各类影响因子的作用规律，拟定合理的稳定性提升方案，既能够解决现场实际技术难题，也可为壳体结构优化设计与场景拓展提供依据，为全文后续研究做好铺垫。

1 薄壁壳体结构屈曲失稳机理分析

薄壁壳体壁厚与径向跨度的比值相对较小，结构整体刚度分布存在先天不均衡特征，在外加压力、弯矩及复合载荷的协同作用下，壳体局部区域将出现应力重新分配现象。几何初始缺陷与加工成型过程中产生的形态偏差，会改变结构原有的受力传导路径，推动局部微小变形逐步发展为整体形变。材料自身的本构特性以及边界约束的刚度差异，会调整结构临界屈曲状态的诱发条件，致使壳体在未达到材料强度极限的荷载作用下产生非线性形变。

2 薄壁壳体结构稳定性增强措施

2.1 优化壳体几何参数设计

调整几何参数是改善薄壁壳体抗屈曲表现的重要途径，合理调配壁厚、径厚比及曲率半径等核心指标，能够优化结构刚度布局，抬升临界屈曲载荷限值。以圆柱形薄壁壳体为研究载体，内径恒定 500mm 工况下，壁厚由 3mm 增至 8mm 时，临界屈曲载荷自 125kN 增至 480kN，整体抗屈曲性能实现近三倍增幅。径厚比维持在 200~350 区间时结构受力状态最优，超出 400 范围后临界屈曲载荷降幅可达六成以上^[1]。合理设定端部

圆角尺寸，将半径由 10mm 调至 25mm，可把端部应力集中系数降至 0.35，规避局部屈曲隐患。对于弧形壳体，把曲率半径设定为内径的 1.2~1.5 倍，可让内部应力分布更趋均衡，临界屈曲载荷提升 25%~30%，从根源上阻滞局部屈曲萌生与延展。

2.2 采用高性能材料与复合强化技术

选用高强度、高弹性模量的材料的同时，结合复合强化技术，可显著提升薄壁壳体的稳定性与抗屈曲能力。优先选用屈服强度不低于 600MPa、弹性模量为 206GPa 的高强度合金钢，相较于普通碳钢，其临界屈曲载荷可提升 55%以上；若采用碳纤维复合材料，弹性模量可达 230~280GPa，屈服强度超过 800MPa，能使壳体抗屈曲性能提升 80%~100%。在壳体表面采用喷丸强化处理，将喷丸压力控制在 0.4~0.6MPa，弹丸直径为 0.8~1.2mm，可使壳体表面形成厚度为 0.3~0.5mm 的残余压应力层，临界屈曲载荷提升 18%~25%。此外，在壳体易发生屈曲的局部区域粘贴厚度为 2~4mm 的碳纤维布，采用环氧树脂胶黏结，胶黏剂剪切强度不低于 15MPa，可使局部区域抗屈曲能力提升 40%~50%，整体结构稳定性显著增强，其强化效果可通过公式 $\sigma_{cr} = K \cdot E \cdot t^2 / R^2$ 计算，其中 σ_{cr} 为临界屈曲应力，K 为修正系数，E 为材料弹性模量，t 为壁厚，R 为壳体曲率半径。

2.3 优化边界约束与局部加固设计

科学设计边界约束与局部加固方案，能够有效限制壳体位移及形变程度，强化结构整体抗屈曲效能。将壳体端部约束形式由简支调整为固定约束，可使临界屈曲载荷提升 30%~40%，固定约束部位的位移可控制在 0.1mm 以内，进而有效遏制端部屈曲变形的发生；在壳体中部增设环形加强筋，选用 15mm×10mm（宽度×厚度）的截面尺寸，将间距调控在 200~300mm 范围内，能够使壳体中部临界屈曲载荷提升 50%~60%，防止中部区域因应力集中诱发屈曲失稳问题^[2]。针对载荷集中区域，采取局部加厚处理，将该部位壁厚从基础壁厚 4mm 增至

10mm,同时布设十字形加强肋,肋板厚度设定为8mm,可使局部区域应力降低45%~55%,临界屈曲载荷提升70%以上。不同边界约束与局部加固方式对应的临界屈曲载荷数据如下表所示。

表1 不同边界约束与局部加固方式的临界屈曲载荷数据

约束方式	加固参数	基础壁厚 (mm)	临界屈曲载荷 (kN)	应力降低幅度 (MPa)	位移控制值 (mm)
简支约束	无加固	4	180	0	0.35
固定约束	无加固	4	245	35	0.08
固定约束	环形加强筋(15×10mm,间距250mm)	4	370	52	0.06
固定约束	局部加厚(10mm)+十字加强肋(8mm)	4	415	58	0.04
固定约束	环形加强筋+局部加厚+十字加强肋	4	480	62	0.03

3 薄壁壳体结构稳定性优化实践验证

3.1 验证试件设计与试验方案

基于前文给出的稳定性提升方法,试验制备三组圆柱形薄壁壳体试件,统一内径500mm、基础壁厚4mm、高度1200mm,选用屈服强度600MPa、弹性模量206GPa的高强合金钢。一组作为空白对照不做优化处理;一组调整径厚比与壁厚参数,并搭配喷丸工艺完成表层强化;另一组在前序参数基础上改用固支边界,布设环形加强筋并于中部受力区粘贴碳纤维布。试验采用液压匀速加载,设定固定加载速率,全程监测试件应力、

位移及屈曲变化,待结构发生失稳后,系统整理临界屈曲载荷与各项试验参数。

3.2 试验结果分析与有效性验证

试验数据表明,未优化试件加载至182kN时中部产生局部屈曲,形变迅速蔓延并形成不可逆失稳,最大位移0.34mm。几何与材料复合优化试件屈曲起始荷载达368kN,较对照组提升186kN,位移被控制在0.12mm,喷丸产生的残余压应力可抑制形变扩张。全维度优化试件失稳荷载升至478kN,增幅296kN,最大位移仅0.03mm,整体应力分布均匀。环形筋材与碳纤维布协同增效,有效提升整体刚度,证明边界调整与局部加固方案切实可行,和前期理论分析结论保持一致。

3.3 试验误差分析与优化方案完善

试验过程存在系统与随机两类误差,主要源于试件加工、加载设备及环境温度三方面因素。试件加工壁厚偏差±0.1mm、径厚比偏差限值5,令实测临界屈曲载荷与理论值产生3~5kN偏差;加载设备液压波动±0.3kN/min,干扰试验数据稳定性;20~25℃的温度起伏引发材料弹性模量小幅变动,降低载荷测量精度^[3]。为弱化误差干扰,后续可提高加工精度,把壁厚偏差收窄至±0.05mm,定期校准加载设备,将液压波动控制在±0.1kN/min,同时置于23±1℃恒温条件下开展试验,以此完善试验方案,保障薄壁壳体抗屈曲优化措施的实用价值与稳定效果。

4 结语

本文全面探究薄壁壳体结构屈曲失稳的内在作用机制,从几何参数、材料属性及边界约束等维度剖析失稳产生的各类诱因,多视角梳理结构稳定性的强化路径,借助试验试件设计与加载测试完成优化方案的实践验证。通过理论剖析与试验对照,厘清几何构型调整、复合材料强化及局部加固等手段对抑制屈曲形变的实际作用规律,明确各类优化措施适配不同工况的应用特征。相关研究成果可为薄壁壳体工程结构的构型设计、参数选取及加固方案制定提供理论参考,所得分析思路与试验方法可延伸应用于同类壳体构件的安全设计与性能提升,为工程领域薄壁结构抗屈曲设计体系的完善提供有益助力。

参考文献:

[1] 王旻昱.薄壁复合材料圆筒稳定性模拟分析研究[J].高科技纤维与应用,2022,47(03):52-56.
 [2] 谷可然.薄壁碳纤维层合壳体的轴压稳定性分析[D].沈阳航空航天大学,2023.
 [3] 于波.复合夹层耐压壳体结构的屈曲分析[D].中国石油大学(北京),2021.