

# 氧舱舱体结构设计流程及注意事项

梁俊虎

(武汉海博瑞科技有限公司 湖北 武汉 430205)

**摘要:** 近几年来,国内氧舱厂家陆续对其氧舱产品的舱体结构进行了设计改进。改进后的氧舱舱体结构超出了标准设计法所适用的范围,需要采用分析设计法对其进行强度校核。本文通过梳理氧舱舱体结构分析设计的流程,归纳分析设计过程中需要注意的若干事项,为氧舱舱体结构分析设计工作提供参考。

**关键词:** 医用氧舱; 舱体结构; 分析设计; 设计流程

## 1 概述

氧舱是采用空气、氧气或者混合气体等可呼吸气体为压力介质,用于人员在舱内进行治疗、适应性训练的载人压力容器<sup>[1]</sup>。氧舱舱体结构的主要设计方法有标准设计法、对比经验设计法以及分析设计法。其中,标准设计法和对比经验设计法主要遵循的技术标准为《压力容器》(GB 150-2011),分析设计法主要遵循的技术标准为《钢制压力容器-分析设计标准(2005年确认)》(JB 4732-1995),各种设计方法的对比情况见表1。

传统氧舱的舱体结构大多为圆筒+椭圆形封头/球冠封头+鞍式支座的 结构形式(图1)。这种舱体结构设计

简单,主要采用标准设计法进行设计。

近几年来,国内氧舱厂家陆续推出了新的氧舱产品,其中最显著的一个创新就是氧舱舱体结构的改变。其由原来的圆形截面改进为上圆下平的异形截面(图2)。改进后的氧舱空间利用率更高、检修工作更容易、装潢工作量更少、设备基础更简单。然而,改进后的氧舱舱体结构超出了标准设计法所适用的范围,其结构强度需要采用分析设计法进行设计校核,设计难度也随之提高。虽然分析设计法的应用难度相对较高,但其技术理念较为先进,且在氧舱产品技术创新中的应用已初现成效,是氧舱产品设计技术发展的一种趋势。

本文主要对氧舱舱体结构的分析设计流程进行梳理,

表1 压力容器各种设计方法的对比情况

设计方法	适用范围	设计难度
标准设计法	GB 150-2011 适用范围内的标准舱体结构。如圆筒、球壳;标准球冠形封头、椭圆形封头、碟形封头、平盖;圆形法兰;开孔补强;部分非圆形截面容器以及钢带错绕筒体等。一般只考虑总体应力,不包含局部应力与疲劳强度的计算	一般 (掌握基本理论知识,熟悉标准技术条款与计算公式即可进行设计)
对比经验法	要有相同或相近结构与设计条件的参照容器进行对比并满足 GB 150.1-2011 附录 D 中的各项限制条件	低 (根据标准技术条款,对比参照容器相关设计条件即可进行设计)
分析设计法	标准范围内外的几乎所有舱体结构,涵盖总体应力、局部应力、疲劳强度、失稳临界载荷等计算	难 (深度掌握相关理论知识与分析软件,且能根据计算结果进行分析和判断)

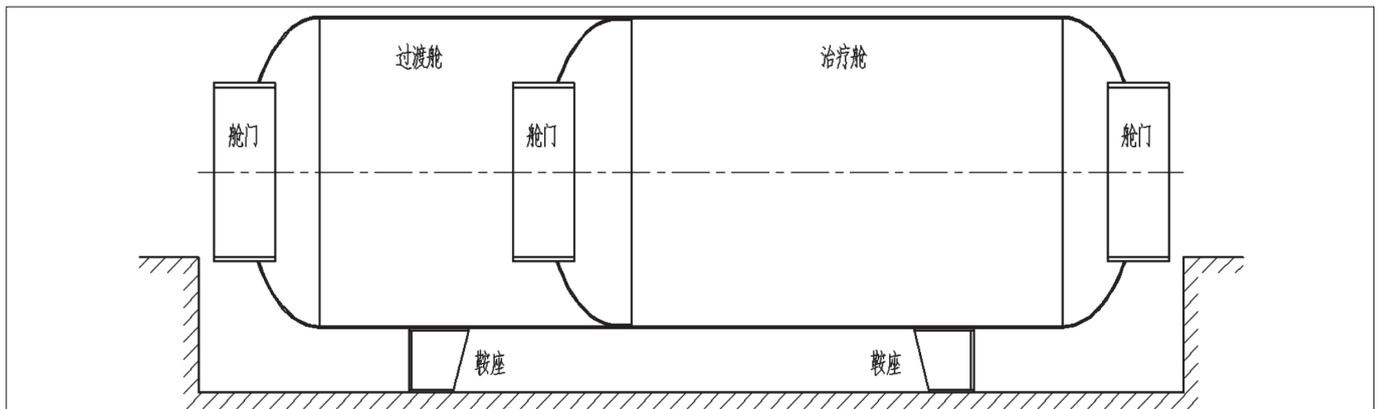


图1 传统氧舱舱体结构形式

同时归纳分析设计过程中需要注意的若干事项，供氧舱厂家及相关从业者参考及交流讨论。

## 2 分析设计流程

### 2.1 确定分析设计标准及设计参数

氧舱舱体结构分析设计遵循的技术标准为《钢制压力容器 - 分析设计标准 (2005 年确认)》(JB 4732-1995)。当进行总体分析设计时，材料的许用应力按照 JB 4732-1995 (2005 年确认) 选取；当进行局部分析设计时，材料的许用应力按照 GB 150.2-2011 选取<sup>[2]</sup>。

需要确定的设计参数见表 2。

表 2 分析设计参数

序号	参数	参数应用
1	设计压力	静力学计算载荷
2	工作压力	疲劳强度计算载荷
3	设计温度	选取材料许用应力
4	承压材料	选取材料许用应力 设定材料弹性模量、泊松比等参数
5	腐蚀余量及材料负偏差	确定材料计算厚度
6	压力循环次数	疲劳强度计算
7	设计需要的其他必要条件	

### 2.2 确定分析设计内容

氧舱属于典型的承受循环载荷的容器，故氧舱舱体结构分析设计的内容一般包含静力学分析和疲劳强度计算。对于存在外压工况的舱体结构，还应进行结构稳定性分析。

### 2.3 建立分析模型

分析模型应严格按照施工图进行建模。建模时，结构壁厚应扣除材料腐蚀余量及材料负偏差。对于结构对称的分析模型，可以以对称面为基准，镜像建立部分模型进行分析，降低计算工作量。

### 2.4 确定分析工况

根据氧舱的舱室数量，确定氧舱舱体结构的分析工况。氧舱至少有两个舱室，对于有两个及两个以上舱室的氧舱，需要对每个舱室单独加压的工况进行分析计算，再对所有舱室共同加压的工况进行分析计算。例如，一台氧舱有两个舱室（一个治疗舱和一个过渡舱），根据标准要求，需要对氧舱舱体结构进行三个工况下的分析计算，见表 3。

表 3 两个舱室氧舱的分析工况

工况	治疗舱	过渡舱
工况 1	设计压力	-
工况 2	-	设计压力
工况 3	设计压力	设计压力

疲劳强度计算的分析工况可根据静力学分析的结果来选定，应选择峰值应力强度最高的工况作为疲劳强度计算的分析工况。

### 2.5 设置边界条件与载荷

边界条件的设置应与氧舱基座的布置方式一致。氧舱的基座一般都是采用一端固定一端滑动的布置方式，这种方式能有效地释放氧舱舱体的轴向形变量，降低基座与舱体连接处的局部应力强度。其边界条件一般设置为一端的基座完全固定，另一端的基座仅约束其支承方向上的自由度。但如果氧舱基座采用全固定的布置方式，则其边界条件应设置为两端的基座全固定。

静力学分析中，载荷为设计压力；疲劳强度计算中，载荷为工作压力；采用线性屈曲进行稳定性计算时，载荷可自行确定；采用非线性屈曲进行稳定性计算时，载荷需大于结构失稳临界载荷。载荷应施加在所有承压面的法面上，对于开孔的部位，应将其受到的压力换算施加到开孔接管或凸缘等结构的端面。

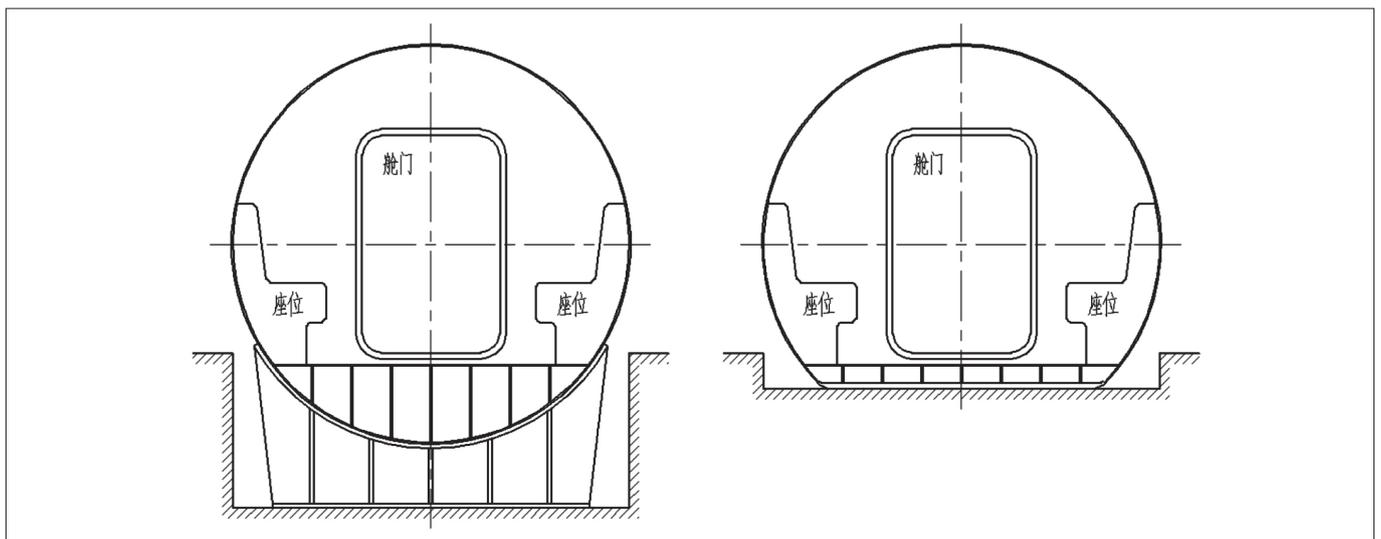


图 2 氧舱舱体结构截面 (左为改进前, 右为改进后)

### 2.6 分析结果处理

分析结果处理是整个分析设计过程中最为重要的环节。这一环节含有大量分析设计人员的主观判断,分析设计人员的知识技能和经验水平会直接影响分析设计结果的准确性。

#### 2.6.1 静力学分析结果处理步骤

##### 2.6.1.1 初步判断分析结果是否与预想一致

可以通过氧舱舱体结构的总体形变情况和总体应力分布情况进行快速判断。一般来说,约束部位的形变量最小,离约束部位越远的结构形变量越大。应力的最大值一般出现在约束部位附近或者结构不连续部位附近。如果分析结果与预想一致,则可进行下一步工作,否则需要检查问题并重新分析。

##### 2.6.1.2 判断高应力部位的应力分类

高应力部位指的是应力强度值超过材料许用应力的部位。分析软件一般会标注出应力强度值最大的节点,其余部位则依据应力强度值的大小被赋予不同颜色进行显示。故应力最大值以外的其他高应力部位需要依靠分析设计人员借助软件的探针或者显示功能进行判断确定。当确定高应力部位后,再对该部位的应力进行分类。

根据 JB 4732-1995 (2005 年确认) 的规定, 应力分类主要有一次应力、二次应力和峰值应力, 其中一次应力包含总体薄膜应力、局部薄膜应力和弯曲应力。分析软件无法对一次应力和二次应力进行区分, 需要分析设计人员根据分析结果自行判断确定。一些典型情况的应力分类在 JB 4732-1995 (2005 年确认) 中的表 4-1 里有介绍说明, 分析设计人员可以将其作为应力分类的参考。

##### 2.6.1.3 应力线性化处理

应力线性化处理是将分析所得到的结构应力分布曲线根据静力等效的原理进行线性化处理, 将应力分成薄膜应力、弯曲应力和峰值应力。应力线性化处理需要分析人员在高应力部位设置一条路径, 路径的两端一般在结构截面的内外壁上。在不同应力分类的高应力部位, 均需设置路径进行应力线性化计算, 得到各个高应力部位的薄膜应力、弯曲应力和峰值应力。

#### 2.6.2 疲劳强度计算分析结果处理步骤

(1) 计算交变应力强度幅: 将静力学分析中得到的峰值应力值除以 2 得到交变应力强度幅。

(2) 查设计疲劳曲线: 在查设计疲劳曲线前, 应根据设计疲劳曲线中给定的材料弹性模量和使用材料的弹性模量对交变应力强度幅进行修正计算。用修正后的交变应力强度幅查设计疲劳曲线, 得到允许循环次数<sup>[3]</sup>。

(3) 计算累积损伤: 氧舱一般仅有 1 个显著应力循环(即工作压力循环), 所以该步骤在氧舱舱体结构分析设计过程中一般可以免于计算。部分分析设计人员将氧舱定期检验时的试验压力载荷看作应力循环计入疲劳累积损伤计

算, 这也是可以的, 但对于计算结果的影响极小。

#### 2.6.3 稳定性分析结果处理步骤

(1) 线性屈曲分析结果处理步骤: 将线性屈曲分析结果中求得的系数与计算载荷相乘, 即可得到线性屈曲分析所需要的氧舱舱体结构失稳临界载荷。

(2) 非线性屈曲分析结果处理步骤: 根据非线性屈曲分析的结果绘制载荷-位移曲线, 找到曲线由线性变化过渡到非线性变化的拐点, 该点所对应的载荷即为氧舱舱体结构失稳临界载荷。

### 2.7 强度评定

静力学强度根据各路径应力线性化计算的结果, 按 JB 4732-1995 (2005 年确认) 中 5.3 条的规定进行评定。

疲劳强度根据查表得到的允许循环次数, 对比氧舱设计使用循环次数进行评定。累积损伤按 JB 4732-1995 (2005 年确认) 附录 C 中 C.2.4 条的规定进行计算评定。

稳定性应结合安全系数  $m$  进行评定。不同结构的安全系数  $m$  见表 4<sup>[4]</sup>。

表 4 稳定安全系数  $m$

结构类型	安全系数 $m$
圆筒	3.0
成形封头	14.52

## 3 分析设计注意事项

### 3.1 分析设计强度理论

JB 4732-1995 (2005 年确认) 中的应力强度是组合应力基于第三强度理论的当量强度, 规定为给定点处最大剪应力的 2 倍, 即给定点处最大主应力与最小主应力的代数值(拉应力为正, 压应力为负)之差。当遵循 JB 4732-1995 (2005 年确认) 进行分析设计时, 需要注意从分析软件中提取正确的应力强度值。

### 3.2 材料许用应力的选取

由于 JB 4732-1995 (2005 年确认) 制订时间比较早, 其规定的材料许用应力是根据同时期我国材料性能的总体情况确定的。目前我国相关材料技术标准已经随着工业技术的发展有了更新, 故 JB 4732-1995 (2005 年确认) 中某些材料的许用应力取值与我国相关材料性能的现状不相符。这种情况下, 为了避免浪费材料, 可以根据《固定式压力容器安全技术监察规程》(TSG 21-2016) 的相关规定计算求得材料的许用应力<sup>[5]</sup>。

### 3.3 稳定性分析方法的选取

结构稳定性分析又叫屈曲分析, 屈曲分析可分为线性屈曲分析和非线性屈曲分析。线性屈曲分析是以小位移小应变的线弹性理论为基础, 其平衡方程总是在结构的初始构形上建立, 忽略了结构缺陷、误差以及形变对稳定性的影响, 得到的失稳临界载荷往往要高于结构实际的失稳临

界载荷,使用时需谨慎。但其分析简单,计算速度快,在实际工程中的应用比较多。非线性屈曲分析考虑到了结构的几何非线性、结构的初始缺陷或载荷扰动等因素,其计算难度和工作量都要高于线性屈曲分析,但其计算精度是优于线性屈曲分析的。具体采用哪种稳定性分析方法,需要设计人员结合产品使用经验、安全系数、设备工况等因素综合考虑。

### 3.4 分析模型单元设置的注意事项

氧舱舱体结构在其结构突变处(封头与舱体连接处、基座与舱体连接处、开孔接管处)往往存在较大的局部应力(局部膜应力、弯曲应力、峰值应力),建议选用实体(solid)单元进行分析设计。为了更准确地计算结构的局部应力,结构壁厚方向上的单元数量一般不少于3层或节点不少于5个。

### 3.5 疲劳强度计算载荷的注意事项

在对氧舱舱体结构进行疲劳强度计算时,JB 4732-1995(2005年确认)规定的计算载荷是工作压力。但为了减少设计工作量,分析设计人员一般会直接采用静力学分析中得到的峰值应力进行疲劳强度计算。由于设计压力大于工作压力,故该方法提高了氧舱舱体结构的交变应力强度幅,使疲劳强度计算的结果更加保守。当然,如该方法疲劳强度计算不通过,则可按工作压力对疲劳强度进行重新计算。

### 3.6 生产及检验技术条件的注意事项

由于分析设计法所使用的力学模型结构(特别是焊缝处)是均匀连续的,所以JB 4732-1995(2005年确认)中对生产和检验提出的技术要求一般情况下是高于GB 150.2-2011的。当对采用分析设计法设计的氧舱舱体结构

提出生产及检验技术要求时,应该满足JB 4732-1995(2005年确认)中的相关条款。

## 4 结语

分析设计法是一种适应性极强的设计方法,许多工业产品的结构设计创新都需要借助分析设计的手段来实现。目前,分析设计法越来越多地被应用于各行各业中。氧舱舱体结构的设计改进只是应用分析设计进行技术创新的案例之一。随着我国工业技术水平的发展以及从业技术人员整体水平的提升,分析设计法必将成为推动我国工业创新发展的重要力量之一。

### 参考文献:

- [1] 国家市场监督管理总局, 国家标准化管理委员会. 氧舱 GB/T 12130-2020[S]. 北京: 中国标准出版社, 2020: 9.
- [2] 中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局, 中国国家标准化管理委员会. 压力容器 第一部分: 通用要求 GB 150.1-2011[S]. 北京: 中国标准出版社, 2011: 11.
- [3] 原中华人民共和国机械工业部, 原中华人民共和国化学工业部, 原中华人民共和国劳动部, 原中国石油化工总公司. 钢制压力容器-分析设计标准(2005年确认) JB 4732-1995[S]. 北京: 新华出版社, 1995: 3.
- [4] 寿比南, 杨国义, 徐锋, 等. GB 150-2011《压力容器》标准释义[M]. 北京: 新华出版社, 2021: 103-181.
- [5] 中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局. 氧舱安全技术监察规程 TSG 24-2015[S]. 北京: 新华出版社, 2015: 11.

(上接第18页)

及生产效率等方面也表现较好。但是,我国烟盒设计与国外存在一定的差异,国外设备也需要进行一定的改动才能使用,并且国外烟支包装设备价格昂贵,在我国工业基础日趋完善的背景下实现烟支自动包装系统的自主研发、设计与制造,对于推动我国烟支包装产业的发展具有较好的示范作用。

### 参考文献:

- [1] 马学成, 张国华, 李剑秋, 等. 异型烟自动化高速分拣包装关键技术研究与应用[J]. 物流技术与应用, 2021, 26(06): 145-148.
- [2] 彭骥, 黄建平, 顾丹, 等. 混合通道分拣模式在异型烟分拣中的设计与应用[J]. 中国储运, 2021(02): 157-159.
- [3] 徐明阳, 杨旭东, 蒲睿强, 等. 异型烟全自动码垛控

制系统设计[J]. 包装工程, 2020, 41(23): 187-194.

[4] 金兆丹. 新型烟草制品包装设计发展趋势的探索研究[J]. 绿色包装, 2020(10): 56-63.

[5] 倪敏, 蔡小尧, 朱玉波. 烟草包装机械可靠性设计[J]. 湖北农机化, 2020(04): 176.

[6] 刘粮. 未来烟草包装的整合设计思考[J]. 山东工业技术, 2018(06): 223.

[7] 周光祥, 李鹏. 基于机器学习的烟草包装封口处视觉缺陷图像检测方法[J]. 科技通报, 2022, 38(03): 47-51.

[8] 赵雪莹. 设计创新驱动烟草包装企业转型升级策略与方法研究[D]. 武汉: 武汉理工大学, 2020.

**作者简介:** 马晓伟(1972.07-), 男, 回族, 云南玉溪人, 硕士研究生, 高级工程师, 研究方向: 烟草工艺。