**Hans** 汉斯

# 出渣门快开结构的有限元分析及评定

## 葛奕飞

上海理工大学能源动力工程学院,上海

收稿日期: 2025年6月9日; 录用日期: 2025年7月1日; 发布日期: 2025年7月9日

## 摘要

利用ANSYS软件对出渣门快开结构进行有限元分析,根据国家新颁布的压力容器分析设计标准 "GB/T 4732-2024"进行应力和疲劳评定。并对盖法兰和垫块啮合部位是否发生滑脱进行了非线性接触分析,得到了垫块接触面上的法向和切向摩擦力。结果表明,该结构满足应力限值要求,且盖法兰和垫块之间不会发生滑脱。旨在为工程设计中的快开结构有限元分析和评定提供参考。

## 关键词

快开结构,啮合分析,有限元分析,分析设计

# **Finite Element Analysis and Evaluation of Slag Door Quick Opening Structure**

#### Yifei Ge

School of Energy and Power Engineering, University of Shanghai for Science and Technology, Shanghai

Received: Jun. 9th, 2025; accepted: Jul. 1st, 2025; published: Jul. 9th, 2025

#### Abstract

The finite element analysis is performed by ANSYS software for the slag door quick-opening structure, and stress and fatigue assessments are carried out according to the newly standard of "pressure vessel design by analysis—GB/T 4732-2024". Moreover, non-linear contact analysis is carried out to determine will the meshing part between cover flange and sealing gasket slip, and the normal and tangential friction on the contact surface of the sealing gasket is obtained. The results show that the structure meets the requirements of stress limits and there is no slippage between the cover flange and the sealing gasket. It aims to provide reference for the finite element analysis and assessment of the quick-opening structure in engineering design.

#### **Keywords**

#### Quick-Opening Structure, Meshing Analysis, Finite Element Analysis, Design by Analysis

Copyright © 2025 by author(s) and Hans Publishers Inc. This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0). http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/

## 1. 引言

快开式压力结构因具有结构紧凑、开启便捷、承压能力较强等优点,在石油、化工、食品、轻工和航 天等众多行业中被广泛应用于需频繁开盖的容器或装置中[1]。诸多科研人员结合有限元软件对压力容器 中的快开结构进行了研究。李永泰[2]对卡箍式快开釜进行了分析设计,并研究了过渡段圆弧半径对危险 截面当量应力的影响,及过渡圆弧半径与应力集中的关系。范万春[3]和张璇[4]等分别对卡箍与平盖和筒 体端部之间的接触进行了分析,并得到了接触面上的应力分布规律。李煜[5]等设计了一种均温性能良好 的螺纹式快开结构反应釜装置,对平盖、碗形盖和凸形盖三种快开结构有限元模型进行了应力分析和评 定,并得出了凸形盖的承压承温综合性能最好。汪志福[6]等设计的高压卡箍式快开结构与多层包扎筒体 相连接,属于径向自紧式密封结构,运用有限元软件 ANSYS 建立相关的静力计算模型,计算了设计工况 下卡箍式快开结构各部件的应力,并进行了应力强度评定和疲劳分析,确定了结构尺寸,使其满足结构 静强度和疲劳强度的要求。

快开式压力结构常见的一般有齿啮式和卡箍式两类。本文对一个卡箍与法兰为单独部件的啮齿式卡箍连接组成的快开结构进行了有限元分析,并根据 GB/T 4732-2024 [7]进行评定。与上述文献中提到的快开结构不同的是,该结构的盖法兰与简体法兰之间采用了一个硅胶材料的密封垫连接,且在卡箍与简体连接的部位采用的是滚珠。因此,为了更真实地反应结构的应力状态,除了应力的分析和评定,不仅需要模拟密封垫处的预紧力,还需重点分析啮合部位的滑脱情况。旨在为工程中这类结构的有限元分析提供参考。

### 2. 出渣门快开结构有限元模型建立

#### 2.1. 几何模型及网格划分

该快开结构主要由球冠封头、盖法兰、卡箍和筒体法兰四个部件组成,其中包含垫块、密封垫以及 滚珠一些连接件。图 1 所示为 ANSYS 中建立的有限元三维模型。为简化计算量,并根据结构和载荷的 对称性,该设备可以只建立 30°进行分析。

网格划分如图 2 所示,采用 Solid186 单元,网格数量共计 359,945 个单元,999,059 个节点。网格无 关性已经通过验证。

#### 2.2. 设计参数

出渣门快开结构基本设计参数如表 1 所示。垫块采用 Q345R 材料,密封垫采用硅胶材料,其余部件都采用 S30408 材料。具体各个材料性能参数查 GB/T 150-2024。

## 2.3. 边界条件与载荷施加

设计工况下载荷及边界条件如图 3 所示,与介质接触的所有内表面施加压力 0.25 MPa,筒体底部限



制环向和轴向位移,密封垫右侧限制环向和径向位移,对称面施加对称约束。

Table 1. Basic design parameters 表 1. 基本设计参数

设计压力/MPa	操作压力/MPa	设计温度/℃	操作温度/℃	循环次数
0.25	-0.1~0.2	160	150	40,000

在没有施加载荷的状态下,结构为旋紧的状态,为了使计算的结果更加真实,需要模拟密封垫处产生的预紧力。此处通过施加一个温度使得密封垫膨胀以达到压缩的效果,如图 4 所示。经计算当密封垫整体温度为 700℃时,沿密封垫截面分布的正应力为-1.1728 MPa,说明此时密封垫处于压缩的状态。

操作工况下的载荷和边界条件如图 5 和图 6 所示,内压分别为-0.1 MPa 和 0.2 MPa, -0.1 MPa 是指 压力施加在承受压力部件的外表面。其他约束设置同设计工况一样。



Figure 4. Temperature boundary conditions of gasket 图 4. 密封垫温度边界条件

#### 2.4. 接触设置

盖法兰与垫块接触面设置摩擦接触,如图 7 所示,这是最符合实际的情况。两个接触面既可以发生 法向分离,也可以发生切向滑动,摩擦系数设为 0.3。滚珠与筒体法兰和卡箍之间的接触设置为绑定,分 别如图 8 和图 9 所示,绑定是指接触面或者接触边之间不存在切向的相对滑动或者法向的相对分离,该 分析是在静力学的基础上进行的,设置为绑定能确保计算不会因为滚珠的滑动变成动力学分析而停止。 密封垫与筒体法兰和盖法兰之间都设置为不分离,如图 10 所示,不分离接触是指接触面之间不发生法向 的相对分离,允许少量的切向滑移[8]。



**Figure 6.** Operating condition (0.2 MPa)-loads and boundary conditions 图 6. 操作工况(0.2 MPa) - 载荷及边界条件

## 3. 有限元结果分析

## 3.1. 应力评定

在设计工况下,有限元计算当量应力分布云图如图 11 所示,应力最大的位置位于卡箍与盖法兰啮合的位置,为 221.13 MPa,同时盖法兰与密封垫接触的位置以及滚珠与卡箍接触的位置应力也较大,其余位置应力较小。



 Figure 7. Contact setting between cover flange and pad

 图 7. 盖法兰与垫块之间的接触设置



 Figure 8. Contact setting between balls and cylinder flange

 图 8. 滚珠与筒体法兰之间的接触设置

#### 葛奕飞





Figure 10. Contact setting between sealing gasket and cylinder flange 图 10. 密封垫与筒体法兰之间的接触设置



Figure 11. The distribution of equivalent stress 图 11. 当量应力分布云图

按照 GB/T 4732-2024 的要求,将线弹性应力分析计算的结果进行线性化处理以分离出薄膜应力、弯 曲应力和峰值应力。应力分类线的布置通常在总体或局部结构不连续的地方以及几何形状、材料或载荷 发生突变的结构不连续区。根据上述原则,强度评定选择以下 8 条路径,如图 12 所示,并沿着壁厚方向 的最短距离设定应力线性化路径。在完成应力分类后,要进行应力评定,即根据 GB/T 4732-2024 中给定 的应力评定准则和所考虑压力容器部件内实际的应力水平来评判该部件能否满足强度安全和完整性的要 求[9]。若能满足则设计是合格的。应力评定结果见表 2,可知各路径的应力评定结果均满足标准所规定 的应力限值要求。



夜 2. 应力线性化结果					
评定位置	应力类别	当量应力计算值(MPa)	当量应力许用值(MPa)	a) 评定结果	
Path1 S <sub>1</sub>		31.294	135.6	通过	
Deth 2	$\mathbf{S}_{\mathbf{II}}$	42.317	203.4	通过	
Patn2	SIII	74.169	203.4	通过	
Path3	$S_{I}$	20.936	135.6	通过	
Deth 4	$\mathbf{S}_{\mathbf{II}}$	10.46	203.4	通过	
Pain4	SIII	33.943	203.4	通过	
Deth 5	$\mathbf{S}_{\mathbf{II}}$	3.72	203.4	通过	
Patho	$\mathbf{S}_{\mathrm{III}}$	6.504	203.4	通过	
Path6	$\mathbf{S}_{\mathrm{II}}$	10.159	245.4	通过	
Paulo	$\mathbf{S}_{\mathrm{III}}$	30.86	245.4	通过	
Deth 7	$\mathbf{S}_{\mathbf{II}}$	16.296	245.4	通过	
Patn/	SIII	26.824	245.4	通过	
Deth	$\mathbf{S}_{\mathbf{II}}$	15.748	245.4	通过	
Paulo	SIII	32.879	245.4	通过	

# Table 2. The stress linearization results 表 2. 应力线性化结果

# 3.2. 疲劳分析

在操作工况下进行疲劳分析,将内压分别施加为-0.1 MPa 和 0.2 MPa 时得到的应力分析结果在有限 元软件中进行组合,求得组合后的最大总应力范围如图 13 所示。根据 GB/T 4732-2024 第 6.6.6 节疲劳





<b>表 3.</b> 操作工况下允许的循环次数和疲劳评定结果									
工况	最大总应 力范围 /MPa	交变当量 应力幅 S <sub>alt</sub> /MPa	所用材料 弹性模量 <i>E</i> <sub>T</sub> /MPa	疲劳曲线 弹性模量 <i>E</i> <sub>FC</sub> /MPa	修正应 力幅 S <sub>alt</sub> ' /MPa	允许循 环次数 N	设计循环 次数 n	疲劳评定	
操作 工况	199.28	99.64	194×10 <sup>3</sup>	210×10 <sup>3</sup>	107.85	257038	40000	合格	

Table 3. The allowable number of cycles and the fatigue assessment results under operating conditions

设计曲线求得许用循环次数,疲劳评定结果见表 3,设计的循环次数小于许用的循环次数,即疲劳评 定满足设计要求。

#### 3.3. 啮合分析

本文介绍的快开结构中,盖法兰和卡箍是通过旋转一定角度进行啮合的,当设备在一定工况下运行 时,啮合齿块之间会产生摩擦,是典型的接触问题,当它们之间的静摩擦力不够时就会发生滑脱错位, 因此在设计工况压力为 0.25 MPa 下,还需对盖法兰与垫块啮合部位是否滑脱进行分析。如图 14 所示, 提取了盖法兰和垫块啮合部位的合力,将该合力沿着接触面的切向和法向分解分别求得切向的摩擦力和 法向的正压力。根据公式(1)计算啮合接触面上的最大静摩擦力。啮合分析结果见表4。

$$F_{\max} = \mu_s N \tag{1}$$

其中, μ。为静摩擦系数, 取 0.3。



Figure 14. The resultant force at the meshing position between the cover flange and the pad. 图 14. 盖法兰与垫块啮合处的合力结果

Table 4. The meshing analysis results under design conditions 表 4. 设计工况下啮合分析结果

工况	设计压力 /MPa	盖法兰和垫块啮 合部位的合力/N	切向力 /N	法向力 /N	摩擦系数 µ <sub>s</sub>	最大静摩擦力 /N	是否滑脱
设计工况	0.25	16081	841.61	16058.96	0.3	4817.68	否

## 4. 结论

(1) 有限元分析结果表明,在预紧力和内压共同作用下,结构的应力集中主要出现在卡箍与盖法兰、 密封垫的连接部位以及滚珠与各部件的接触点附近。滚珠的存在显著降低了卡箍与筒体法兰、盖法兰之 间的摩擦,改善了结构的力学性能,使应力分布更加均匀,提高了结构的承载能力和稳定性。

(2) 依据 GB/T 4732-2024 对结构进行应力评定、疲劳和啮合分析,结果显示,在给定工况下,盖法 兰、筒体法兰、卡箍和球冠封头等部件均满足设计要求,结构整体强度可靠,能够安全运行。

# 参考文献

- [1] 陈佳亮, 谢禹钧. 基于 ANSYS Workbench 的快开结构应力评定[J]. 机械工程与自动化, 2014(5): 42-43.
- [2] 李永泰, 王文仲, 张红梅, 等. 卡箍式快开釜分析设计[J]. 压力容器, 2016, 33(6): 18-25.
- [3] 范万春, 王永卫. 卡箍式快开盖结构应力分析[J]. 石油化工设备, 2008(1): 30-34.
- [4] 张璇, 王军. 齿啮式快开结构的有限元接触分析[J]. 化工设计, 2021, 31(5): 30-33.
- [5] 李煜, 李庆生, 陆玮. 高压反应釜螺纹式快开结构强度分析[J]. 轻工机械, 2024, 42(1): 98-104.
- [6] 汪志福, 李永泰, 姚志燕. 卡箍式快开结构的设计与疲劳分析[J]. 管道技术与设备, 2020(1): 29-32.
- [7] 中国标准出版社. GB/T 4732-2024 压力容器分析设计[S]. 北京:中国计量出版社, 2024.
- [8] 沈鋆, 刘应华. 压力容器分析设计方法与工程应用[M]. 北京: 清华大学出版社, 2016.
- [9] 陆明万, 沈鋆, 王汉奎. 压力容器分析设计理论和释义[M]. 北京: 清华大学出版社, 2024.