

# 储罐下沉式人孔开孔补强分析

高彦峰, 刘贻雄, 杨泽涛

北京航天发射技术研究所, 北京

收稿日期: 2023年3月2日; 录用日期: 2023年4月21日; 发布日期: 2023年4月28日

---

## 摘要

为研究储罐下沉式人孔局部结构强度, 采用压力容器开口补强理论分析和有限元仿真方法对人孔处的静强度进行分析, 通过对不同罐径储罐人孔的有限元仿真和理论强度校核, 研究了储罐下沉式人孔的开孔补强和应力分布情况, 为储罐设计安全提供参考。

## 关键词

储罐, 强度, 人孔, 开孔补强

---

# Analysis of the Opening Reinforcement of the Tank on the Sinking Manhole

Yanfeng Gao, Yixiong Liu, Zetao Yang

Beijing Institute of Aerospace launch Technology, Beijing

Received: Mar. 2<sup>nd</sup>, 2023; accepted: Apr. 21<sup>st</sup>, 2023; published: Apr. 28<sup>th</sup>, 2023

---

## Abstract

The static strength of the manhole is analyzed by means of the open reinforcement theory and the finite element simulation method to study the local structural strength of the sinking manhole in the tank. The opening reinforcement and the stress distribution of the sinking manhole of tank of different tank diameters are studied by the finite element simulation and theoretical strength validation of manhole, which provide a reference for the design safety of the tank.

## Keywords

### Tank, Strength, Manhole, Opening Reinforcement

Copyright © 2023 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/>



Open Access

## 1. 引言

压力容器广泛应用于石油、化工、核能、航天等领域。为了满足工艺过程、生产操作以及制造、检验、安装、维修等需要,压力容器壁上不可避免地开不同孔径的孔(如介质进出口、排污口、仪表口、人孔等),开孔破坏筒体结构的连续性,不仅使得整体强度受到削弱,而且还使得开孔接管区域的应力集中造成开孔边缘局部的高应力[1]。一方面,接管的存在使得整体结构不连续,容器壳体与接管在内压作用下的变形量不一致,会引起变形协调过程中的局部应力;另一方面,开孔使筒体材料不连续,减少了原来的承压面积,在开孔接管边缘产生高的局部应力;再者,接管与壳体焊接,焊缝的结构、高度、圆角等因素也会形成局部应力集中。开孔会产生很高的局部峰值应力,通常可达正常应力的3倍,有时甚至能够达到5~6倍[2]。

国内压力容器开孔补强按GB150-2011《压力容器》、HG20582-2020《钢制化工容器强度计算规定》等常规设计规范开展设计计算。各规范对开孔直径的相对大小的限制为:GB150适用于 $d/D_1 \leq 0.5$ ,HG20582适用于 $d/D_1 \leq 0.8$ (其中, $d$ 为开孔直径, $D_1$ 为容器内径)[3][4][5]。压力容器开孔补强设计的方法有很多,如等面积法、压力面积法、安定性分析法、极限分析法、PVRC法、增量塑性理论方法及实验屈服法等。从设计成本和硬件限制条件考虑,一般采用等面积法和压力面积法进行开孔补强设计[6]。对于大开孔补强的问题,理论上可通过探寻开孔处接管的塑性最大的承载能力和采用弹性应力分析两种途径进行解决。

本文研究的公路槽车下沉式人孔开孔,开孔直径与容器内径比 $d/D_1 \leq 0.5$ ,可用GB150和HG20582方法进行开孔补强设计,结合下沉式人孔设计特点,采用有限元方法对人孔局部进行应力分析,对人孔开孔强度设计进行应力校核。

## 2. 槽车储罐下沉式人孔

### 2.1. 下沉式人孔结构

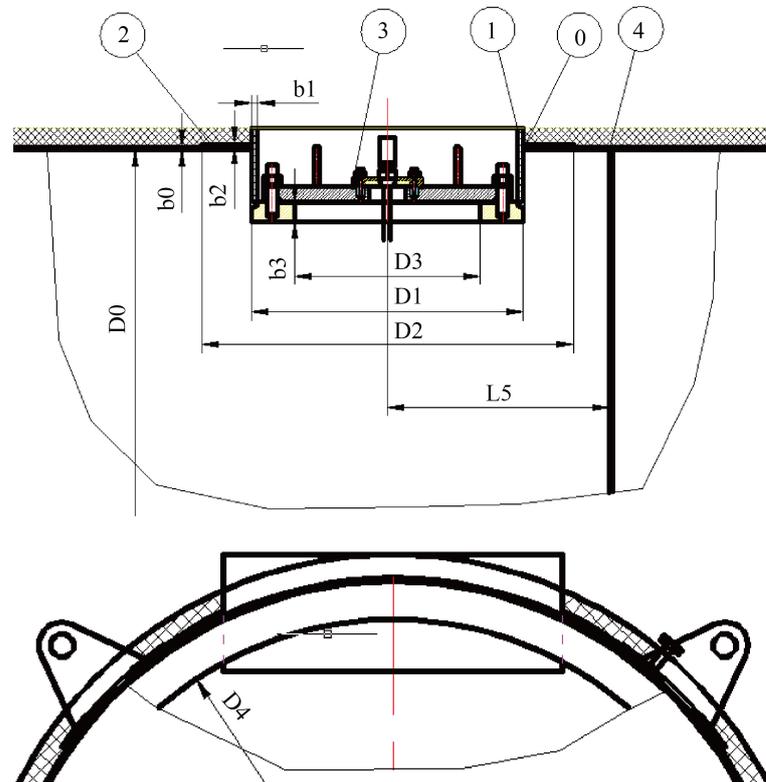
为方便公路槽车运输后的清洗和日常维护,在储罐筒体上设计便于人员通过的人孔,考虑到车辆高度限制,采用下沉式人孔设计,结构如图1所示。筒体开孔与接管焊接,筒体开孔外侧按面积补偿法设计补强圈,同时在开孔附近设计加强与筒体焊接,人孔法兰与接管焊接,人孔法兰盖与人孔法兰通过螺栓连接。其中,人孔法兰内径DN500,筒体开孔直径(接管外径)730 mm。

### 2.2. 人孔计算几何参数

本文对下沉式人孔的强度补强校核及应力强度进行研究,研究对象包括内径为1600 mm、2000 mm两种不同储罐,相关的几何参数如表1所示。

Case1: 储罐内径1600 mm

内径为1600 mm的储罐几何参数如表1所示。



0-筒体；1-接管；2-补强圈；3-人孔法兰；4-加强圈

Figure 1. Design parameters of the sinking manhole of the tank

图 1. 储罐下沉式人孔设计参数

Table 1. The geometric parameters (the diameter of the tank is 1600 mm)

表 1. 几何参数(储罐内径 1600 mm)

名称	单位	名称	单位
筒体内径 D0	Φ1602 mm	补强圈外径 D2	Φ1000 mm
筒体壁厚 b0	5 mm	补强圈厚度 b2	6 mm
接管外径 D1	Φ730 mm	法兰厚度 b3	50 mm
接管壁厚 b1	11 mm	法兰内径 D3	Φ500 mm
接管长度 L1	203 mm	加强圈厚度 b4	6 mm
接管外伸长度 L11	50 mm	加强圈内径 D4	Φ1436 mm

加强圈中心与接管轴线的距离 L5: 615 mm

Case2: 储罐内径 2000 mm 计算几何参数

内径为 2000 mm 的储罐几何参数如表 2 所示。

### 3. 储罐人孔局部仿真

#### 3.1. 人孔计算几何参数

考虑到储罐人孔结构处几何结构及载荷的对称性，可过筒体轴线的纵向对称面和横向对称面取如图

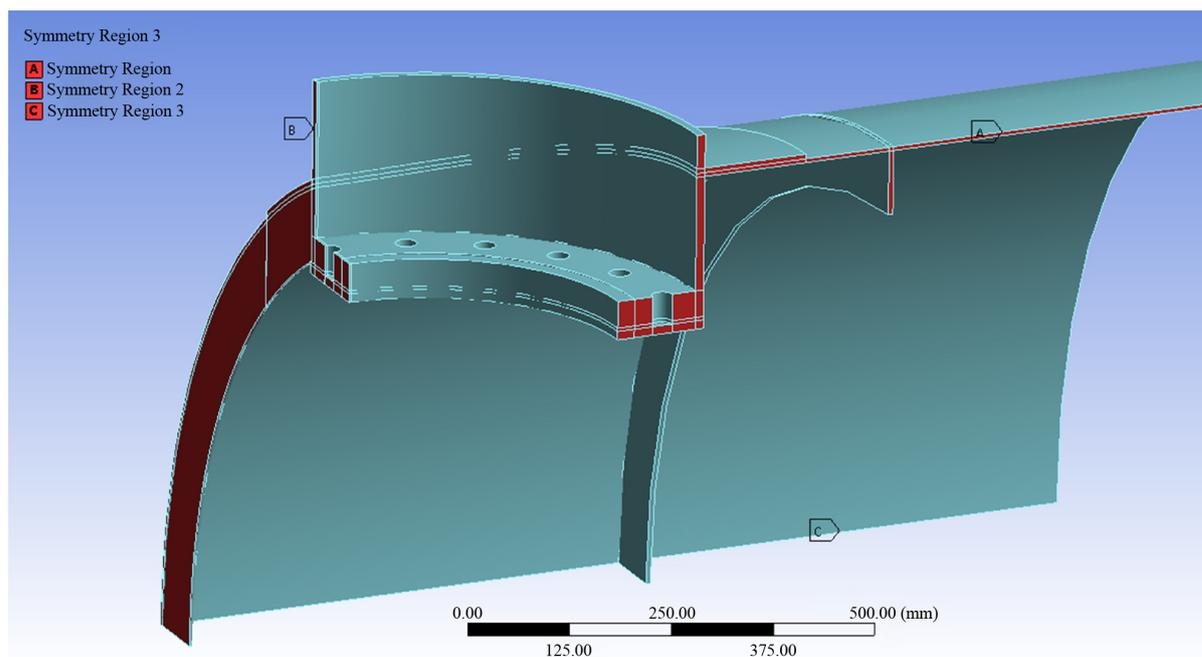
所示的几何结构(1/2 人孔接管、1/4 筒体)进行局部应力分析。几何模型中如图 2 所示,包括:储罐筒体、筒体加强圈、人孔接管、人孔法兰和人孔接管处的补强圈。

**Table 2.** The geometric parameters (the diameter of the tank is 2000 mm)

**表 2.** 几何参数(储罐内径 2000 mm)

名称	单位	名称	单位
筒体内径 D0	$\Phi 2000$ mm	补强圈外径 D2	$\Phi 1000$ mm
筒体壁厚 b0	8 mm	补强圈厚度 b2	8 mm
接管外径 D1	$\Phi 730$ mm	法兰厚度 b3	50 mm
接管壁厚 b1	16 mm	法兰内径 D3	$\Phi 500$ mm
接管长度 L1	203 mm	加强圈厚度 b4	8 mm
接管外伸长度 L11	50 mm	加强圈内径 D4	$\Phi 1836$ mm

加强圈中心与接管轴线的距离 L5: 615 mm



**Figure 2.** The geometric model of the manhole of the tank

**图 2.** 储罐人孔计算几何模型

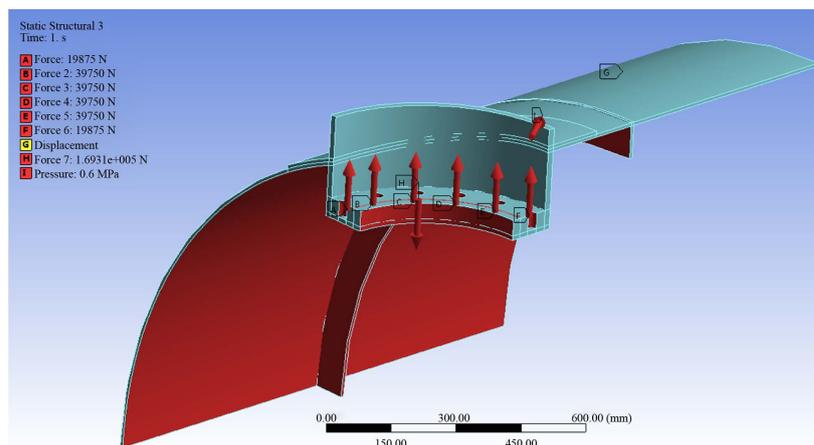
### 3.2. 边界条件

#### 1) 位移边界:

三个对称面上分别施加对称约束,筒体端面约束轴向及周向位移。

#### 2) 力边界:

筒体内表面及相应的承受内压的接管面、法兰面施加设计内压,其他载荷包括法兰的螺栓孔面上施加预紧状态设计螺栓载荷、内压引起的总轴向力等,具体加载条件如图 3 所示。



**Figure 3.** Tank manhole load applied  
**图 3.** 储罐人孔载荷施加

储罐材料物理特性如表 3 所示。

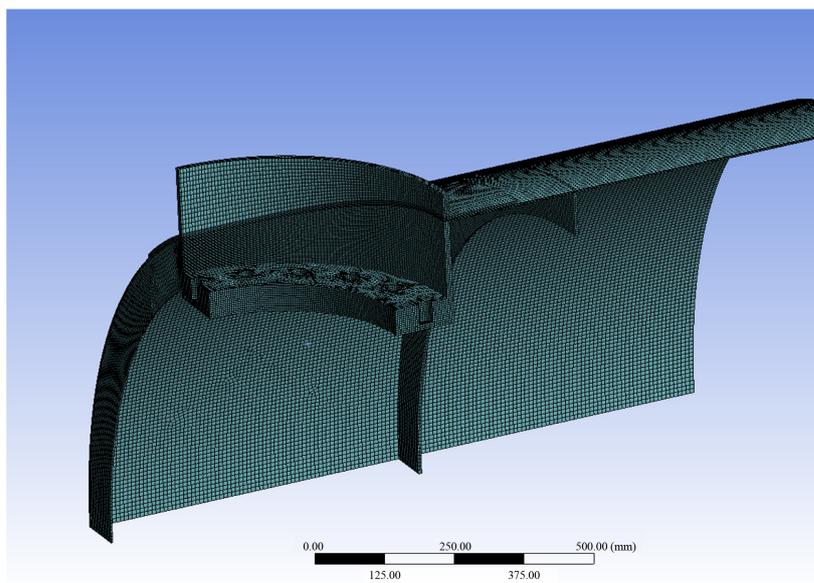
**Table 3.** Table of physical properties of materials

**表 3.** 材料物理特性表

部件	材料	弹性模量 E (GPa)	泊松比 $\mu$	密度 $\rho$ (kg/m <sup>3</sup> )	屈服强度 Sy (MPa)	抗拉强度 Su (MPa)	基本许用应力 S (MPa)
储罐	S32168	193	0.30	8030	205	485	137

### 3.3. 网格划分

采用 20 节点的六面体单元 solid186 进行网格划分, 经网格无关性验证, 最终选取计算域网格单元 140,810 个, 节点 685,886 个, 如图 4 所示:



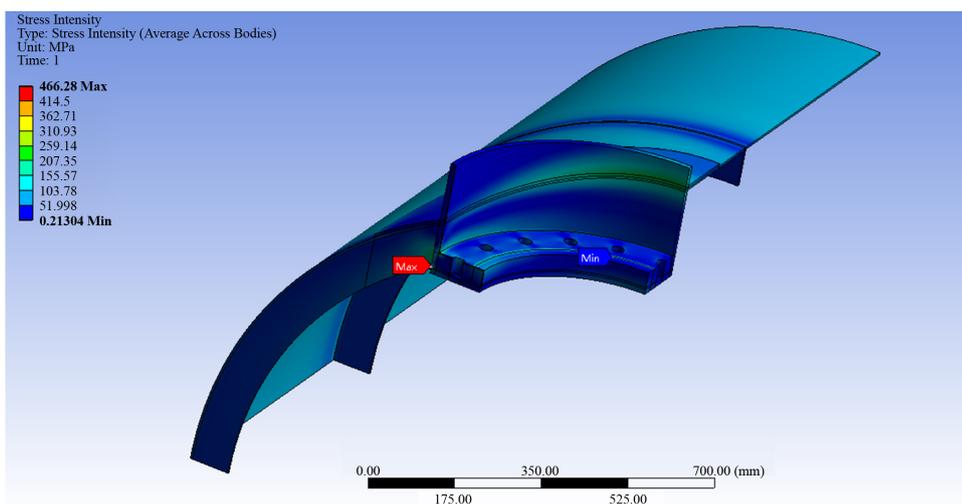
**Figure 4.** The calculation grid of the manhole of tank  
**图 4.** 储罐人孔计算网格

### 3.4. 结果分析

补充计算校核储罐筒体上的人孔接管处的局部强度。计算借助大型通用有限元分析软件进行,采用弹性应力分析方法,应力分类及评定按标准 JB4732 的规定[7],材料许用应力按 GB150 的相关规定选取。

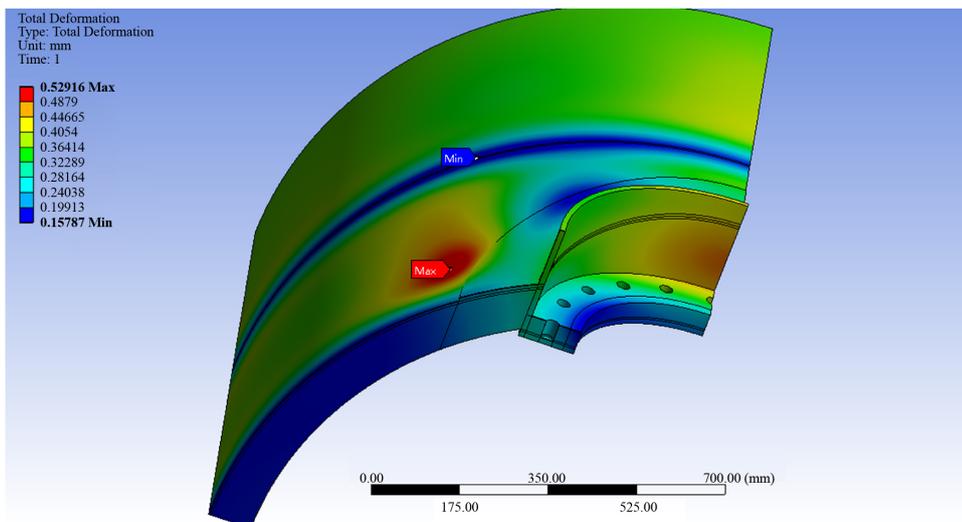
Case1: 储罐内径 1600 mm

储罐局部应力分布如图 5 所示,计算域范围内最大应力强度出现在人孔接管与筒体加强圈连接处,最大值为 466.28 (应力峰值)。



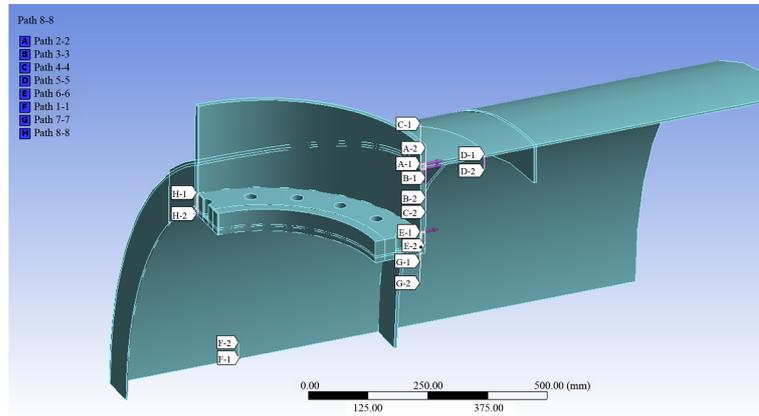
**Figure 5.** The cloud diagram of local stress intensity distribution of the tank  
**图 5.** 储罐局部应力强度分布云图

结构在载荷作用下的变形图如图 6 所示,最大位移值为 0.529 mm。

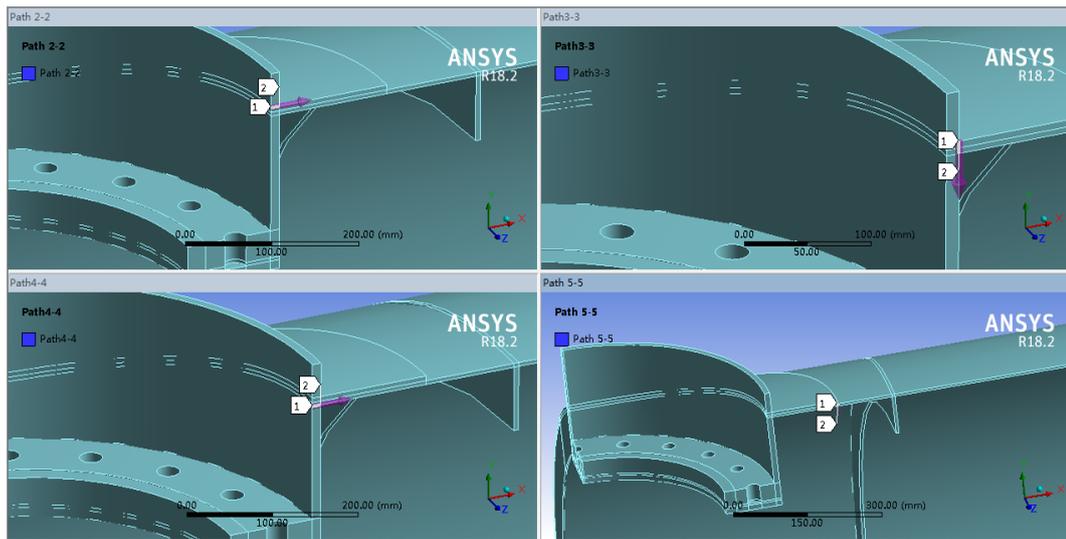


**Figure 6.** The cloud diagram of local displacement distribution of the tank  
**图 6.** 储罐局部位移分布云图

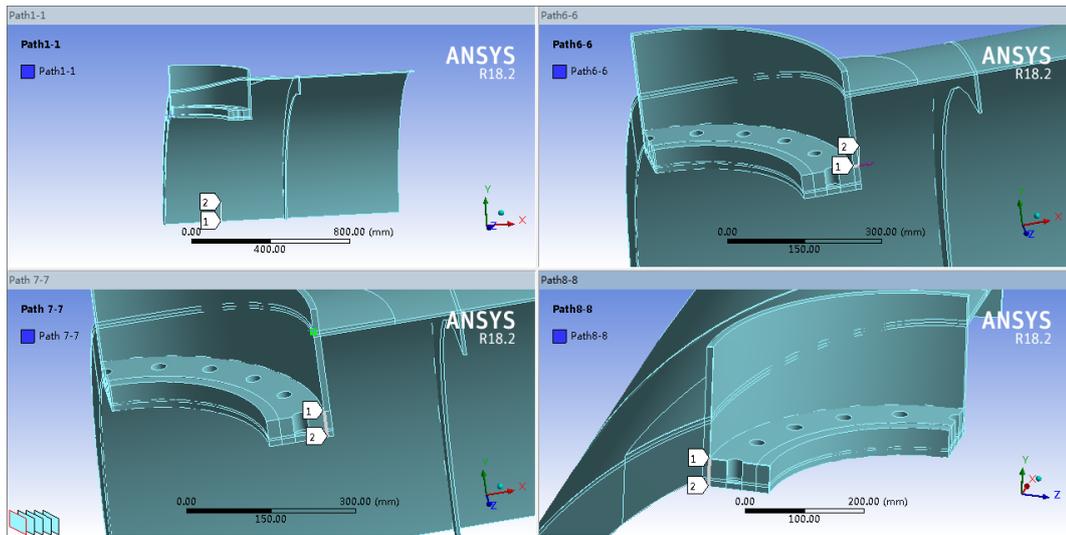
按 JB4732-2005《钢制压力容器——分析设计》标准和文献[8]进行该局部结构的强度校核,按照应力分类线的选取原则,选取如图 7 所示的 8 条应力分类线进行应力强度校核。



(a) 总的路径选取位置分布图



(b) 路径 2-2、3-3、4-4、5-5 的选取位置



(c) 路径 1-1、6-6、7-7、8-8 的选取位置

**Figure 7.** The schematic diagrams of the selection of stress linearization paths  
**图 7.** 应力线性化路径的选取示意图

沿以上各条路径的应力强度线性化结果如表 4 所示。可见, 选取路径下的应力强度均满足强度要求。

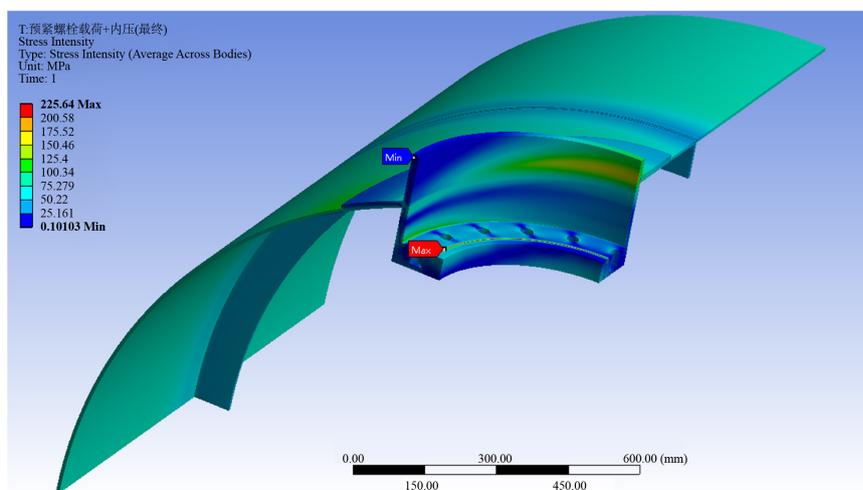
**Table 4.** The results of stress intensity linearization

**表 4.** 应力强度线性化结果表

校核路径	应力强度类别	计算值 (MPa)	许用值 (MPa)	校核结果
Path1-1	一次总体薄膜	96.276	137	合格
Path2-2	一次局部薄膜	128.77	$1.5 \times 137 = 205.5$	合格
	一次 + 二次	209.88	$3 \times 137 = 411$	合格
Path3-3	一次局部薄膜	111.53	$1.5 \times 137 = 205.5$	合格
	一次薄膜 + 一次弯曲	126.51	$1.5 \times 137 = 205.5$	合格
Path4-4	一次局部薄膜	114.61	$1.5 \times 137 = 205.5$	合格
	一次薄膜 + 一次弯曲	177.15	$1.5 \times 137 = 205.5$	合格
Path5-5	一次局部薄膜	63.978	$1.5 \times 137 = 205.5$	合格
	一次薄膜 + 一次弯曲	67.855	$1.5 \times 137 = 205.5$	合格
Path 6-6	一次局部薄膜	35.018	$1.5 \times 137 = 205.5$	合格
	一次薄膜 + 一次弯曲	44.291	$1.5 \times 137 = 205.5$	合格
Path 7-7	一次局部薄膜	16.307	$1.5 \times 137 = 205.5$	合格
	一次薄膜 + 一次弯曲	27.585	$1.5 \times 137 = 205.5$	合格
Path 8-8	一次局部薄膜	12.913	$1.5 \times 137 = 205.5$	合格
	一次薄膜 + 一次弯曲	101.34	$1.5 \times 137 = 205.5$	合格

#### Case 2: 储罐内径 2000 mm

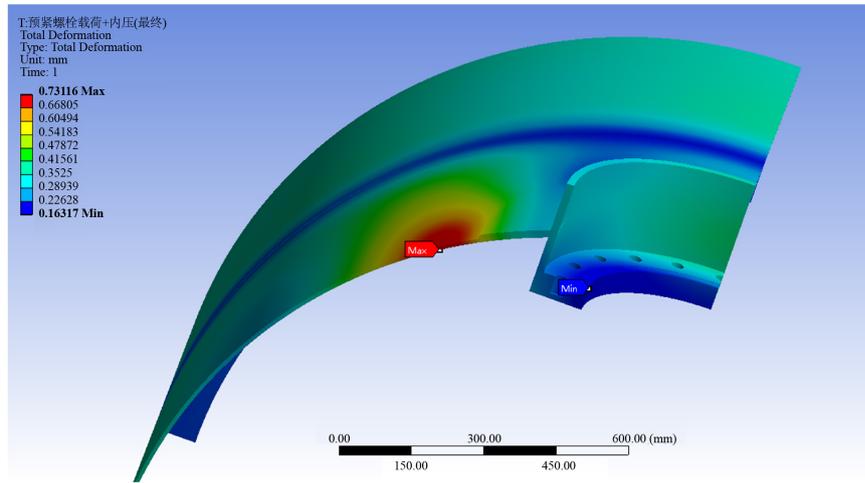
人孔计算域应力分布分析结果如图 8 所示, 结构的最大应力强度出现在垫片对法兰的反作用力线上 (即集中载荷施加线上), 最大值为 225.64 MPa。



**Figure 8.** The cloud diagram of local stress intensity distribution of the tank

**图 8.** 储罐局部应力强度分布云图

结构在载荷作用下的变形图如图 9 所示，最大位移值为 0.731 mm。



**Figure 9.** The cloud diagram of local displacement distribution of the tank  
**图 9.** 储罐局部位移云图

按照 JB4732-2005《钢制压力容器——分析设计》标准进行该局部结构的强度校核，按照应力分类线的选取原则，选取 8 条应力分类线进行应力强度校核。沿以上各条路径的应力强度线性化结果如表 5 所示，可见，选取路径下的应力强度均满足强度要求。

**Table 5.** The results of stress intensity linearization  
**表 5.** 应力强度线性化结果表

校核路径	应力强度类别	计算值 (MPa)	许用值 (MPa)	校核结果
Path1-1	一次总体薄膜	75.304	137	合格
Path2-2	一次局部薄膜	105.15	$1.5 \times 137 = 205.5$	合格
	一次薄膜 + 一次弯曲	154.42	$1.5 \times 137 = 205.5$	合格
Path3-3	一次局部薄膜	81.875	$1.5 \times 137 = 205.5$	合格
	一次薄膜 + 一次弯曲	89.375	$1.5 \times 137 = 205.5$	合格
Path4-4	一次局部薄膜	91.923	$1.5 \times 137 = 205.5$	合格
	一次薄膜 + 一次弯曲	129.79	$1.5 \times 137 = 205.5$	合格
Path5-5	一次局部薄膜	63.746	$1.5 \times 137 = 205.5$	合格
	一次薄膜 + 一次弯曲	114.33	$1.5 \times 137 = 205.5$	合格
Path6-6	一次局部薄膜	50.026	$1.5 \times 137 = 205.5$	合格
	一次薄膜 + 一次弯曲	60.187	$1.5 \times 137 = 205.5$	合格
Path7-7	一次局部薄膜	29.848	$1.5 \times 137 = 205.5$	合格
	一次薄膜 + 一次弯曲	93.077	$1.5 \times 137 = 205.5$	合格
Path8-8	一次局部薄膜	15.095	$1.5 \times 137 = 205.5$	合格
	一次薄膜 + 一次弯曲	46.972	$1.5 \times 137 = 205.5$	合格

## 4. 结论

本文结合压力容器开孔强度补强理论及有限元分析方法,对两种不同内径的储罐下沉式人孔开孔强度进行分析,校核了两种人孔开孔结构下应力分布情况。结果表明:

- 1) 开孔补强有限元分析方法与理论计算结果吻合,有限元计算方法可用于工程应用;
- 2) 对于相同尺寸的人孔,开孔补强处的一次应力随开孔直径与筒体内径的比值增大而增大;
- 3) 下沉式人孔开孔强度补强合理,开孔强度满足安全要求。

## 参考文献

- [1] 桑如苞. 压力容器强度设计技术分析(三) [J]. 石油化工设计, 2000, 17(1): 47-54.
- [2] 姜雪. 基于可靠性理论的压力容器开孔补强研究[D]: [硕士学位论文]. 大庆: 大庆石油学院, 2010.
- [3] 王娇琴. 浅析压力容器常规设计规范中的开孔补强设计[J]. 化工机械, 2005, 32(4): 248-252.
- [4] 全国锅炉压力容器标准化技术委员会. GB150-2011, 压力容器[S]. 北京: 中国标准出版社, 2011.
- [5] 工业和信息化部. HG/T20582-2020, 钢制化工容器强度计算规范[S]. 北京: 北京科学技术出版社, 2020.
- [6] 李家伟. GB150-2011 开孔补强分析在 SW6 软件的实现[J]. 化工设备与管道, 2012, 49(4): 6-10.
- [7] JB T 4732-1995, 钢制压力容器-分析设计标准[S]. 北京: 中国标准出版社, 1995.
- [8] 赵晨, 赵凤霞. 大型低温立式 LNG 储罐强度分析[J]. 化工设备与管道, 2022, 59(5): 42-48.