

文章编号:1674-2869(2016)01-0088-06

高温高压快开门压力容器的强度评定及疲劳分析

舒安庆,陈西茜,鲍冲,邓陆,魏化中
武汉工程大学机电工程学院,湖北 武汉 430205

摘要:通过对快开门压力容器的实际问题的本质认识和分析,建立了符合实际情况的高温高压快开门压力容器的有限元分析模型,求得工作载荷下的应力状态,对危险路径进行了强度评定并对应力峰值点进行了疲劳分析.结果表明,该设计参数的高温高压快开门压力容器在工作状况下同时满足设计强度要求和疲劳要求.对高温高压快开门压力容器的结构优化,定期检测维护等提供了参考.

关键词:高温;高压;快开门压力容器;强度评定;疲劳分析

中图分类号:TQ053 **文献标识码:**A **doi:**10.3969/j.issn.1674-2869.2016.01.016

Evaluating Strength and Analyzing Fatigue of Quick-Opening Pressure Vessel Based on Finite Element Method

SHU Anqing, CHEN Xixi, BAO Chong, DENG Lu, WEI Huazhong

School of Mechanical and Electrical Engineering, Wuhan Institute of Technology, Wuhan 430205, China

Abstract: We constructed the finite element analysis model of quick open-door pressure vessel according to the actual situation. After getting the stress state in working loads, the strength of the dangerous path was evaluated and the fatigue of the peak point of the corresponding force was analyzed. The analysis results show that the design parameters of the high temperature and high pressure quick-opening pressure vessel meet both the design strength and fatigue requirements. This method provide a reference for the structural optimal plan and the development of regular inspection and maintenance programs for the high temperature and high pressure quick-opening pressure vessel.

Keywords: high temperature; high pressure; fast open-door pressure vessel; strength evaluation; fatigue analysis

1 引言

快开门压力容器具有开启速度快、物料装卸方便等特点,被广泛应用于化工、石油、医疗、纺织、食品、航天、建材、造纸等工业领域,其工作压力一般为0.8~6.4 MPa.随着工业的需求和科学技术的不断发展,高温、高压甚至超高压快开门压力容器也逐渐投入到生产应用当中^[1].

快开门压力容器需要频繁启闭,承受着升温、升压、降温、降压等循环工作载荷,局部不连续结构在循环载荷下产生疲劳裂纹甚至发生疲劳破坏

是快开门压力容器的主要破坏形式之一^[2].随着高温高压快开门压力容器应用日趋增多,它的频繁使用对容器安全带来新的问题:1)快开门压力容器在高温和高压交互作用下的结构强度是否能够满足设计使用要求;2)快开门压力容器主要受压部件受温度、压力等循环交变载荷的情况越来越多,局部发生疲劳的可能性增大.然而,在设计阶段要检验一个产品是否符合要求往往要做出系列样品进行试验,试验后样品原件已经遭到破坏,这样不仅过程繁琐而且造成极大的资源浪费^[3],因此利用ANSYS有限元分析软件,对内径为

收稿日期:2015-11-02

作者简介:舒安庆,硕士,教授. E-mail: shuanqing@wit.edu.cn

Φ1 100 mm、内部工作温度为 800 ℃、工作压力为 15 MPa 的高温高压快开门压力容器进行了数值模拟分析,进而对其进行强度评定和疲劳分析,以弥补设计试验验证的不足,为找出高温高压快开式压力容器结构疲劳薄弱部位,进行结构优化,制定定期检测维护方案等提供参考。

2 实验部分

2.1 快开门压力容器强度评定及疲劳分析方法

2.1.1 快开门压力容器强度评定方法 快开门压力容器强度评定的目的是验证在高温高压环境下其结构强度是否满足强度设计要求。其强度评定方法如下:1)确定分析工况;2)分析各工况下的结构应力分布状况;3)选取危险截面并定义危险路径;4)将求解工况下的应力映射到选取的危险路径上;5)提取应力结果,并按照钢制压力容器分析设计标准进行强度评定。

2.1.2 快开门压力容器疲劳分析方法 快开门压力容器疲劳分析的目的是验证在高温高压条件下其结构是否满足疲劳设计要求,并通过疲劳分析确定结构的疲劳薄弱部位,从而为结构优化及制定定期检测维护方案提供参考。利用 ANSYS 进行疲劳分析的步骤如下:1)通过静强度分析得到各波动主应力差的最大波动范围;2)在危险点设置事件数及组成这些事件的载荷,保存这些位置上的应力结果;3)参照钢制压力容器分析设计标准输入材料的疲劳参数;4)在选定的位置上定义应力集中系数并给每个应力循环定义比例系数;5)求解得到危险点的疲劳累积使用系数^[4]。

2.2 快开门压力容器有限元分析

2.2.1 问题分析 高温高压快开门压力容器由上法兰、下法兰、上平盖、下平盖、上卡环、下卡环、筒体、夹套及辅助工具等组成。其工作原理如下:在筒体内腔充入惰性气体至一定压力后停止加压;对筒体内部气体加热至 800 ℃;此时容器内压力为 15 MPa。装置内壁设有保温隔热层,外壁设有冷却水夹套,因此筒体壁温在 200 ℃以下。整体结构如

图 1 所示。

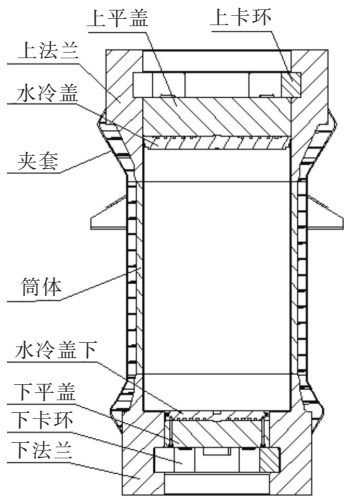


图 1 快开门压力容器示意图
Fig. 1 Schematic diagram of quick-opening pressure vessel

2.2.2 快开门装置结构参数和材料属性 快开门压力容器主要设计基本参数如表 1 所示,材料性能参数如表 2 所示。

表 1 快开门压力容器主要设计参数
Tab. 1 Main design parameters

结构	尺寸 / mm
总体高度	3 350
筒体高度	55
筒体内径	1 100
法兰高度	990
上瓶盖厚度	290
下瓶盖厚度	200
上卡环厚度	190
下卡环厚度	190

由于快开门模型具有对称性,为节省计算时间,取模型的 1/3 作为计算对象。快开门压力容器几何模型如图 2 所示。对于快开门模型,选用 8 节点六面体单元 Solid185、三维热单元 Solid70 分别对实体模型中相应部分进行网格划分^[5],划分结果为模型含单元 171 761 个,节点共 55 188 个。快开门压力容器网格模型如图 3 所示。

表 2 材料性能参数
Tab. 2 Material property parameters

部位	材料	弹性模量 N/mm^2	屈服强度 / MPa	传热系数 $W/(mm \cdot ^\circ C)$	热膨胀系数 $W/(mm \cdot ^\circ C)$	对流传热系数 $W/(mm \cdot ^\circ C)$
筒体	Q370R(15MnNbR)	2.06E ⁵	270	4.5E ⁻²	1.2E ⁻⁵	2.5E ⁻⁶
法兰	20MnMo III					
卡环	20MnMo III	2.06E ⁵	305	4.5E ⁻²	1.2E ⁻⁵	2.5E ⁻⁶
平盖	20MnMo III					

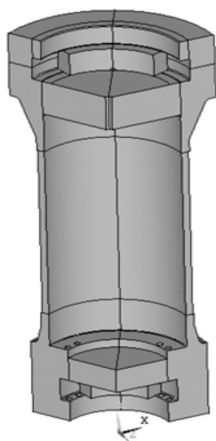


图2 快开门压力容器几何模型

Fig. 2 Geometric model of quick-opening pressure vessel

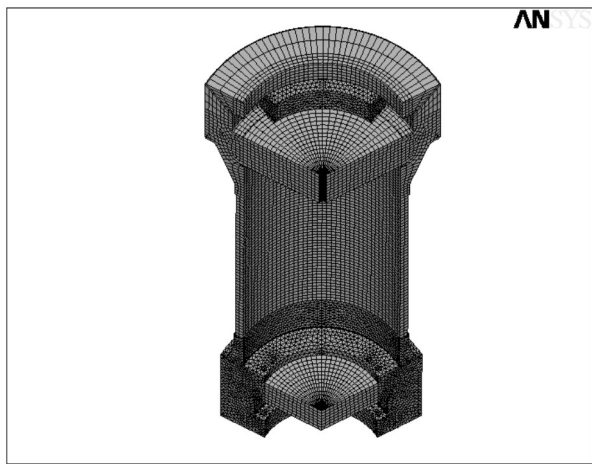


图3 快开门压力容器网格模型

Fig. 3 Meshing model of quick-opening pressure vessel

2.2.3 接触设置 在有限元分析中,当两个分离的表面互相接触并互切时,就称它们处于接触状态。如果不同的部件之间没有共节点或粘接在一起,有时还需要考虑相互之间相对运动摩擦力的问题,就有必要在模型中定义接触。当施加载荷后,快开门压力容器上、下卡箍与卡环的接触面产生相互滑动和挤压,这种接触可以定义为面与面的接触问题^[6]。因此在上平盖、上法兰及上卡环和下平盖、下法兰及下卡环之间分别定义两组面-面接触,接触对目标单元和接触单元分别采用 TARGET170 和 CONTA174。

2.2.4 施加边界条件 根据该容器的受力特点,分别为模型施加对称约束和位移约束、结构载荷和热载荷。由于快开门压力容器模型为 1/3 模型,需在各对称面上施加轴对称约束^[7]。根据实际工作状况,容器的工作压力为 15 MPa,因此在整体结构内表面施加大小为 15 MPa 的内压。共设置模型外表面与空气和水两种对流传热边界,内表面温度

设为容器可能到达的最高温度 200 ℃。在容器端面设置轴向位移约束。快开门压力容器边界条件如图 4 所示。

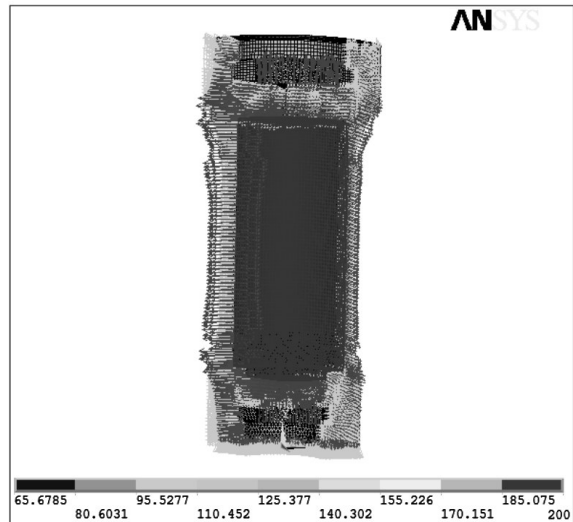


图4 快开门压力容器边界条件

Fig. 4 Boundary conditions of quick-opening pressure vessel

2.3 快开门压力容器强度评定及疲劳分析

2.3.1 快开门压力容器强度评定 分析结果表明,快开门压力容器在工作状况下筒体与上法兰连接部位应力最大,其大小为 330.8 MPa。其他部位应力仿真结果如表 3 所示。

分别选取结构不连续部位或有较高应力集中的那些截面作为危险截面,根据 JB4732-2005 第四部分应力强度的相关规定对其进行强度评定。快开门压力容器的 23 条危险评定路径如图 5 所示,强度评定结果如表 4 所示。

由表 4 的评定结果可以看出,按照钢制压力容器分析设计标准进行强度评定,其 23 条路径评定结果均为合格。

2.3.2 快开门压力容器疲劳分析 产生疲劳破坏的主要因素包括:载荷的循环次数;每个循环的平均应力;存在局部应力集中现象。

1) 快开门压力容器有限元疲劳分析计算

高温高压快开门压力容器的两个循环事件分别为 0~15 MPa 的工作载荷循环(循环次数为 10 000 次)和 0~20 MPa 的水压试验载荷循环(循环次数为 30 次),最高工作载荷为 15 MPa、200 ℃,最低工作载荷为 0 MPa、0 ℃; S_a 值取为 JB4732-2005 中极限抗拉强度 ≤ 552 MPa 的 S_a 值;应力集中系数为 1,水压试验和实际工作状况下的循环比例系数分别为 1.34 和 1.1。快开门压力容器的整体应力波幅云图及各部件应力波幅图如图 6 所示。

表 3 应力分析结果
Tab. 3 Stress analysis results

评定路径	材料	温度 / ℃	S_m / MPa	计算应力 / MPa	许用极限 / MPa	结论
PATH1	Q370R	200	180	179.7	270	合格
PATH2	20MnMo III	200	189	79.20	283.5	合格
PATH3	20MnMo III	200	189	21.69	283.5	合格
PATH4	20MnMo III	200	189	30.75	283.5	合格
PATH5	20MnMo III	200	189	18.08	283.5	合格
PATH6	20MnMo III	200	189	22.04	283.5	合格
PATH7	20MnMo III	200	189	134.6	283.5	合格
PATH8	20MnMo III	200	189	159.4	283.5	合格
PATH9	20MnMo III	200	189	124.4	283.5	合格
PATH10	20MnMo III	200	189	132.6	283.5	合格
PATH11	20MnMo III	200	189	95.41	283.5	合格
PATH12	20MnMo III	200	189	105.4	283.5	合格
PATH13	20MnMo III	200	189	158.0	283.5	合格
PATH14	20MnMo III	200	189	126.5	283.5	合格
PATH15	20MnMo III	200	189	84.15	283.5	合格
PATH16	20MnMo III	200	189	27.15	283.5	合格
PATH17	20MnMo III	200	189	37.34	283.5	合格
PATH18	20MnMo III	200	189	80.81	283.5	合格
PATH19	20MnMo III	200	189	100.0	283.5	合格
PATH20	20MnMo III	200	189	120.1	283.5	合格
PATH21	20MnMo III	200	189	155.6	283.5	合格
PATH22	20MnMo III	200	189	144.8	283.5	合格
PATH23	20MnMo III	200	189	43.66	283.5	合格

注:其中:许用极限为 1.5 KS_m , S_m 为许用应力, K 为载荷组合系数.

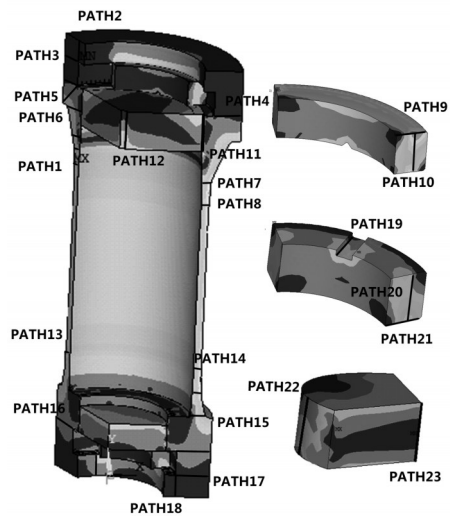


图 5 强度评定路径图
Fig. 5 Diagram of strength evaluation path

由图 6 可知,在压力载荷和温度载荷的共同作用下,该高温高压快开门压力容器的应力最大值位于上法兰和筒体连接结构不连续处,最大应力

表 4 工作载荷下路径评定结果
Tab. 4 Evaluation results in work load path

序号	结构部位	应力 / MPa
1	上法兰	330.8
2	上卡环	185.6
3	上平盖	217.4
4	下法兰	316.1
5	下卡环	193.4
6	下平盖	158.0

值为 330.82 MPa,节点号为 49 693. 由 ANSYS 计算可得,累积使用系数值为 0.304 84,小于 1.0,容器不会发生疲劳失效.

2)快开门压力容器疲劳理论计算

为进一步验证 ANSYA 有限元软件疲劳分析模块的准确性和可靠性,按照行业标准 JB4732-1995 (2005 年确认)通过计算疲劳累积系数与有限元疲劳分析计算结果进行比较.

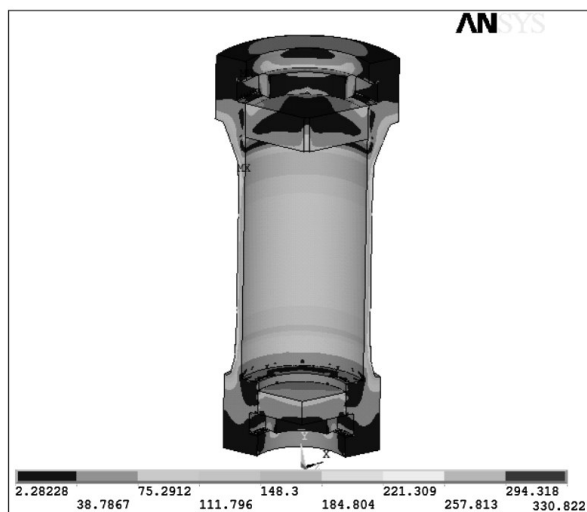


图6 整体应力波幅图

Fig. 6 Integral stress wave amplitude

考虑实际正常工作循环与水压试验循环这两个应力循环的疲劳累积损伤效应。

正常工作循环时:

压力 $P=15$ MPa, 温度 $t=200$ °C, 产生应力差值由 0 到 330.84 MPa 之间变换, 应力循环次数 $n_1=10\ 000$ 。

波动主应力差的交变应力强度为

$$\begin{aligned} S_{alt1} &= 0.5 \frac{E}{E'} \\ &= 0.5 \times 1.1 \times 330.84 \\ &= 181.96 \end{aligned}$$

水压试验循环时, 压力 $P=20$ MPa, 温度 $t=20$ °C, 产生应力差值由 0 到 440.02 MPa 之间变换, 应力循环次数 $n_2=30$ 。

波动主应力差的交变应力强度为

$$\begin{aligned} S_{alt2} &= 0.5 S_{r2} \\ &= 0.5 \times 440.02 \\ &= 220.01 \end{aligned}$$

利用设计疲劳曲线和精确插值公式^[8]

$$\frac{N}{N_i} = \left(\frac{N_j}{N_i} \right)^{\frac{\log(S_i/S_j)}{\log(S_j/S_i)}}$$

计算得到 S_{alt1} 、 S_{alt2} 单独作用时的允许循环次数 $N_1=32\ 982$ 、 $N_2=18\ 190$ 。工作载荷与水压试验载荷应力循环使用系数分别为:

$$U_1 = \frac{n_1}{N_1} = \frac{10\ 000}{32\ 982} = 0.303\ 20$$

$$U_2 = \frac{n_2}{N_2} = \frac{30}{18\ 190} = 0.001\ 65$$

计算累积使用系数为

$$U = U_1 + U_2 = 0.304\ 85$$

通过理论计算结果 $U=0.30$ 与 ANSYS 分析结果 $U'=0.304\ 84$ 进行对比, 误差为

$$\delta = \frac{|U' - U|}{U} = \frac{|0.304\ 84 - 0.304\ 85|}{0.304\ 85} = 0.003\%$$

由于理论方法计算气压釜所有节点上的应力值十分困难, 目前尚无文献可供参考, 可利用 ANSYS 有限元仿真结果得到各点应力幅值及其分布, 通过提取危险节点的应力幅值带入 JB4732 精确插值公式中进行理论计算, 并将其理论值与仿真结果进行对比。对比结果显示, 利用 ANSYS 疲劳分析模块进行疲劳失效分析与 JB4732 理论计算结果基本一致, 可以得出结论: ANSYS 疲劳分析计算具有较高的准确性与可靠性, JB4732 为 ANSYS 疲劳仿真计算提供理论支撑, 同时 ANSYS 疲劳仿真计算既能得到高的精度又能得到模型任意位置的疲劳累积次数, 从而避免传统设计试验阶段的不足, 两者相辅相成, 共同为设计提供可靠而有效的依据。

3 结 语

通过对实际问题进行认识和分析, 才能建立与实际工作状态相符并且求解精度较高的有限元分析模型。

通过对快开门压力容器的有限元分析可以看出, 快开门压力容器在内压 15 MPa、温度 800 °C 的工作条件下, 筒体与上法兰连接部位应力最大, 其大小为 330.82 MPa。

对快开门压力容器选取的 23 条危险路径依据钢制压力容器分析设计标准进行强度评定, 评定结果表明 23 条危险截面路径强度均满足强度设计要求, 且部分路径强度有较大的余量。

对快开门压力容器两个循环事件条件下疲劳分析结果表明快开门压力容器在节点号为 49 693 处的累积使用次数最大, 其值为 0.304 84 小于 1, 分析结果证明高温高压快开门压力容器满足内压 15 MPa、工作温度 800 °C 条件下的 10 000 次循环的设计要求。

对于此次分析的工作温度 800 °C、工作压力 15 MPa、内径 1 100 mm 的高温高压快开门压力容器, 使用过程中应重点检查筒体与上法兰连接部位、筒体与下法兰连接部位、上卡环和下卡环等。

参考文献:

- [1] 郑津洋. 快速开关盖式压力容器(一)[J]. 化工装备技术, 1997, 18(1): 30-38.
- ZHENG J Y. Pressure vessel with quick switch cover type (1)[J]. Chemical equipment technology, 1997, 18(1): 30-38.

(下转第 102 页)