

文章编号: 1000-4734(2019)02-0226-05

高温高压实验用特种阀门的热应力分析

王楚楠^{1,2}, 李和平^{1*}, 周宏斌¹

(1. 中国科学院 地球化学研究所 地球内部物质高温高压重点实验室, 贵州 贵阳 550081; 2. 中国科学院大学, 北京 100049)

摘要: 为了适应大型水流体-固体相互作用实验装置超高温(600 °C)、超高压(100 MPa)的极端工作环境, 保证阀门安全有效, 以高温高压截止阀为研究对象, 通过 SolidWorks 设计建立三维有限元模型, 运用 Ansys 软件分析该阀门在实际工况下的温度和应力分布。选取 4 种材料对比分析热传导系数、热膨胀系数、弹性模量对温度和应力分布的影响。对阀门的密封结构和性能进行说明讨论。研究认为, 选用镍基合金材料作为制作材料, 阀门能够在高温环境下保持足够强度, 并且满足实验装置的超高温、超高压工作环境的使用要求。在一定范围内, 阀门温度和应力随热传导系数和热膨胀系数的降低以及弹性模量的增大而减小。

关键词: 高温高压阀门; 有限元; 温度场; 应力场

中图分类号: TH137.52; TP391.9

文献标识码: A

doi: 10.16461/j.cnki.1000-4734.2019.39.032

作者简介: 王楚楠, 男, 1993 年生, 硕士研究生, 固体地球物理学专业. E-mail: wangchunan@mail.gyig.ac.cn

Thermal stress analysis of a special valve used in high-temperature and high-pressure experiment

WANG Chu-nan^{1,2}, LI He-ping^{1*}, ZHOU Hong-bin¹

(1. Key Laboratory of High-Temperature and High-Pressure Study of the Earth's Interior, Institute of Geochemistry, Chinese Academy of Sciences, Guiyang 550081, China; 2. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

Abstract: In order to adapt the extreme work environment for the experimental system of hydrothermal fluid and solid interaction at high-temperature (600 °C) and high-pressure (100 MPa) and to ensure safe and effective of the valve, taking the HTHP cut-off valve as a researching subject, we have designed and established 3D finite element model using the SolidWorks, and analyzed the temperature and stress distributions of this valve in actual working state using the Ansys software. 4 kinds of materials were selected for comparative analyzing the influences of the thermal conductivity coefficient, thermal expansion coefficient, and elasticity modulus on the temperature and stress distributions of those materials. The sealing structure and performance of valves at operation condition have been discussed. The results show that valve made with the selected nickel-based alloy material can maintain the enough strength at high temperature to satisfy the demand of experimental device working in the ultrahigh temperature and ultrahigh pressure environment. In a certain range, the temperature and stress of the valve are decreased along with the decrease of thermal conductivity coefficient and thermal expansion coefficient but the increase of elasticity modulus.

Keywords: the high-pressure and high-temperature valve; finite element; temperature field; stress field

实验室内模拟地球内部发生的反应是认识地球内各圈层结构、地球内部物质组成、性质和状态及其各种物理化学作用的重要方法^[1]。国内外一直缺少能模拟地壳浅层温度、围压和差异应力等热力学条

收稿日期: 2018-09-04

基金项目: 国家重点研发计划 (编号: 2016YFC0601101)

* 通讯作者, E-mail: liheping@vip.gyig.ac.cn

件,并在结构和空间上具备集成多种原位观测技术的高温高压水流体-固体相互作用实验平台,严重阻碍了人们对此类科学问题的研究。

针对此类科学问题和国内外相应实验平台现状,李胜斌等^[2-3]自主研发带差异应力作用功能且可同时集成多种原位观测技术的高温高压水流体-固体相互作用的大型实验平台,并建立了解决此类科学问题的专门实验室。该水流体-固体相互作用大型实验平台集温度、围压、空腔压、和差异应力发生和控制于一体。在此试验平台中,主体高压釜通过水受热膨胀而产生高压,其中压力由温度和水(水溶液)及外部高压泵控制。由于实验温度(600 °C)和压力条件(100 MPa)较为苛刻,国内外暂无完全适用于该实验条件截止调节的阀门。为满足实验需要,研制适用于此装置的特种阀门需要在材料、结构、热处理、密封等方面进行特殊的选择与设计。与此同时,运用仿真软件对高温高压下阀门的材料力学性能以及工程结构研究具有重要的意义,给实际研发与使用实验平台提供可靠的理论支持。

实验装置系统简图如图1。本文针对阀门处于高温高压下水热流体固体相互作用大型实验装置系统正常负荷工况下进行仿真分析,建立了高温高压阀门有限元模型,运用SolidWorks软件与Ansys联合仿真,建立起阀门的热固耦合分析,使其热边界条件能够实时的交换,得到了阀门的温度场和应力场,并根据分析结果进行相应优化,从而提高了阀门的可靠性。

1 结构设计

1.1 设计目的与要求

本文中所设计阀门的工况技术参数见表1。鉴于阀门工作介质为100 MPa, 600 °C水溶矿物介质,且具有一定腐蚀性,为保证水溶性矿物介质在通过阀门过程中温度不降低,阀体被保温材料包裹,也一直处于高温状态。

1.2 结构实例

针对实际使用情况,根据高压容器及阀门设计准则^[4-6],作得阀门结构简图,见图2。

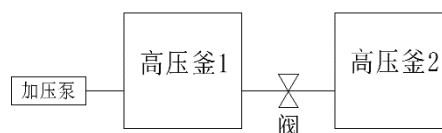
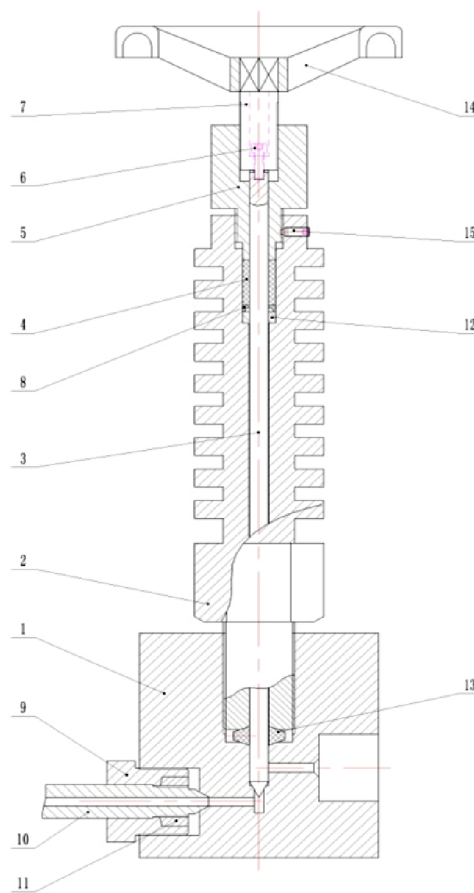


图1 高温高压水流体-固体相互作用实验系统简图
Fig. 1. The diagram of experimental system for hydrothermal fluid and solid interaction at high-temperature and high-pressure.

表1 高温高压阀门技术参数

Table 1. Technical parameters of the HTHP valve

公称压力	100 MPa
公称尺寸	4 mm
进口介质温度	600 °C
管接口内径	4 mm
阀体工作温度	600 °C



1-阀体 2-支撑杆 3-阀杆 4-密封填料 5-压紧块 6-压紧螺母 7-空心轴 8-隔环 9-螺母 10-钢管 11-螺套 12-导向块 13-透镜密封垫 14-手轮 15-锁紧螺钉

图2 高温高压阀门结构

Fig. 2. The structure of the HTHP valve.

考虑到高温环境中密封难的问题, 采取将密封填料区域通过支撑杆延伸到低温环境中, 保证阀体和内部介质在工作时依然处于正常温度而填料区域又不至于因受高温而导致性能下降。

2 有限元分析

在工程中, 当物体各部分温度发生变化时, 物体将由于热变形而产生应变, 当物体由于约束或出现温度不均匀时, 热变形受到影响, 则会在物体内部产生热应力。热应力问题实际上是热和应力两个物理场之间的相互作用, 属于耦合场问题。使用 Ansys 软件对阀门实际工况进行耦合场分析常使用间接法, 先进行热分析, 然后将求得节点温度作为载荷施加到结构应力分析模块中。

根据结构尺寸, 在 SolidWorks2014 中建立阀门三维实体模型, 并通过 SolidWorks 与 Ansys 结合将文件直接导入 Ansys 中完成有限元模型的建立。

2.1 耦合分析前处理

根据构建的有限元模型, 定义各零部件的材料属性。阀门的主要材料是镍基高温合金 GH4033。此材料为镍基变形高温合金, 在高温时拥有良好的屈服强度。该材料的主要物理属性见表 2。

2.2 稳态热分析

结合实际情况, 对阀门进行热力学分析主要考虑热传递与热对流两个方面。

对于稳态热传递过程中, 物体的温度不随时间变化, 系统处于热平衡状态, 即流入系统的热能与系统内生成的热能等于流出系统的热能^[7], 相应的有限元平衡方程为:

$$[K]\{T\} = \{Q\}$$

式中: $[K]$ 为传导矩阵, 包括导热系数, 对流系数、辐射系数和形状系数; $\{T\}$ 为节点温度向量; $\{Q\}$ 为节点热流向量, 包含热生成。

在本文描述情境下, 热-结构耦合分析过程分为 3 步: 1) 分析阀门工作环境下温度场; 2) 将温度场等效为节点载荷载入结构分析模型中; 3) 结合热载荷与实际载荷进行耦合分析^[8]。

由于阀门所应用实验装置的介质温度可达 600 °C, 出于减轻阀杆密封面处热应力以及保证介质保温的考虑, 阀体整体也处于 600 °C 高温中, 支撑杆及以上部分对流换热系数取 $5 \times 10^{-6} \text{ W}/(\text{mm}^2 \cdot \text{C})$, 分析得阀体的温度场云图如图 3 所示。

从图中可以看出顶端手柄连接处(手轮已省略)温度约为 182 °C, 在安装隔热手柄后能达到安全操作温度。密封填料处温度约为 206 °C, 远低于额定工作温度, 满足工作要求。

表 2 镍基高温合金 GH4033 主要材料参数
Table 2. Main material parameters of the nickel-based Superalloy GH4033

密度	8200 kg/m ³
弹性模量	184 GPa
泊松比	0.28
比热容	586.2 J/kg·°C
热传导系数	20.08 W/m·°C
热膨胀系数	$15.07 \times 10^{-6} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$

A: Steady-State Thermal
Temperature
Type: Temperature
Unit: °C
Time: 1

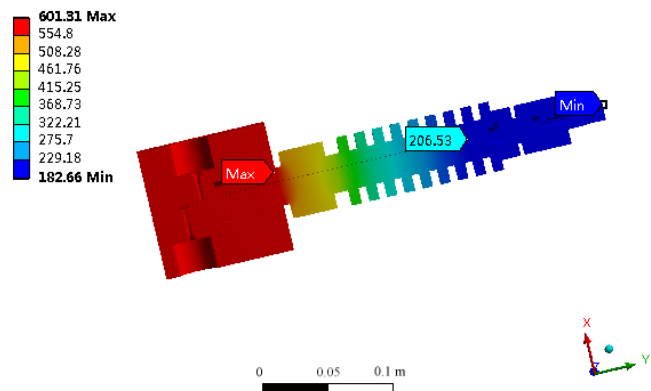


图 3 阀门工作时温度云图

Fig. 3. Temperature distribution of the valve at working state.

2.3 结构静力学分析

在 Ansys 中建立阀门的结构静力学分析模型, 导入添加模型材料属性, 并划分网格, 结果如图 4 所示。

现假定阀门处于关闭状态, 选定约束类型为 displacement, 阀体在 x 方向位移为 0, y, z 方向可自由移动, 施加载荷为阀体内进口端管道内壁及阀芯的密封面皆受 100 MPa 的压力, 并将稳态热分析结果作为等效热载荷加载进结构静力学分析模型中。

阀体与阀杆应力分析结果如图 5 所示。

阀体应力分布局部放大如图 6 所示, 可以看出最大应力位于管道内壁连接的尖角处, 应力强度达到 326.59 MPa, 管道内壁应力为 150 MPa 左右, 阀杆应力 100 MPa, 与理论计算值相仿。

阀门应变图如图 7 所示。

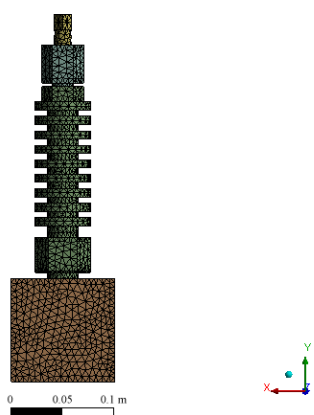


图 4 阀门网格图

Fig. 4. Grid graph of the valve.

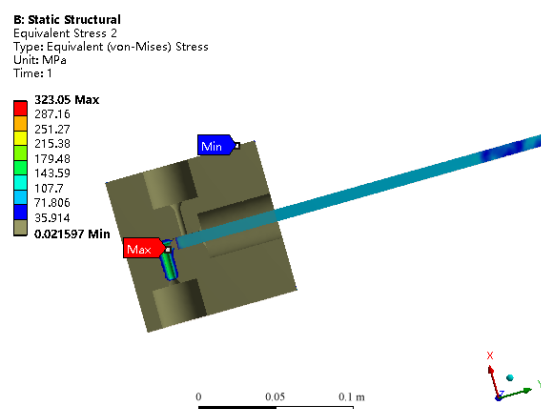


图 5 阀体阀杆应力图

Fig. 5. Stress distribution in the valve body and stem.

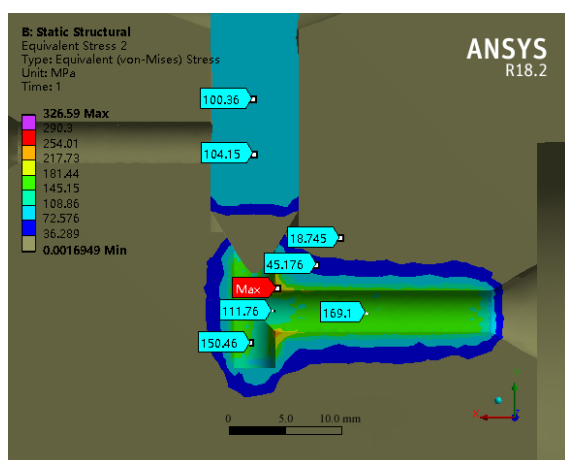


图 6 密封面应力分布放大图

Fig. 6. Enlarged stress distribution graph of the sealing surface.

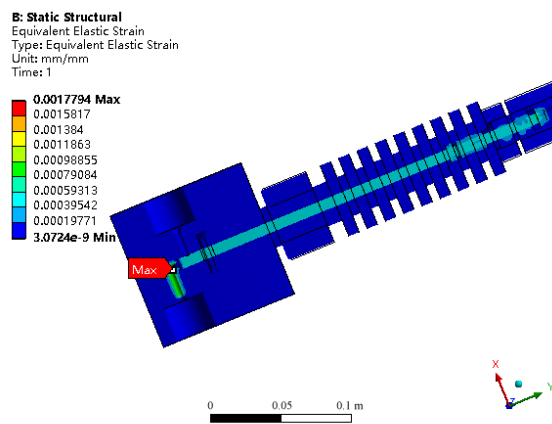


图 7 阀门应变图

Fig. 7. Variation stresses charts for the valve.

3 温度及应力场影响因素

在耐高温材料中, 热传导系数对温度场的影响较大, 在此基础上热膨胀系数弹性模量对应力场的影响较大^[9]。考虑到镍基合金价格高、制作工艺复杂、加工难度大, 为了甄选出更优的阀门材料, 又选择几种常用的耐高温钢与镍基合金进行仿真分析比较。

对比材料分别选择 Q235 结构钢、304 不锈钢、316L 不锈钢 3 种。3 种材料的主要参数如表 3 所示。温度与应力结果分别如表 4、表 5 所示。

由上述结果可观察到热传导系数越大的材料,最低温度及大部分区域温度越低;对于应力则可观察到弹性模量越大,应力越小,热膨胀系数越大,应力越小,考虑到这是因为两种系数都是影响受力或温度变化时物体形变量的参数,所以该结论也符合理论预期。

4 密封性能及讨论

压力容器的密封性能与系统刚度分布、密封面尺寸和工艺处理有关^[10]。高温高压阀门主要考虑的密封区域一般在密封连接处与密封面上。本文中的阀门采用的高压管道连接方式是液压中高压和高温连接行业的标准形式,可以保证反复拆装;密封面采用锥面密封,密封性能好,阀杆使用透镜密封垫和石墨密封填料共同作用,以满足密封要求。

在实际使用中,由于介质压力较大,阀门手轮的预拧紧力也较大,若能减小阀体内部通道直径则可以有效减小作用在阀杆上的密封力,操作手轮启闭阀门将更加省力。

5 结论

通过多种高温金属材料制造的阀门在实际工况条件下的应力场和温度场模拟仿真比较,筛选出热传导系数与热膨胀系数较低,并且在高温环境下仍有足够强度的高温镍基合金材料 GH4033 作为阀门主体材料。对阀门进行基于 Ansys 的热固耦合应力分析,阀门在工作过程中的最大应力皆在材料容许范围内,能够满足使用要求。同时也注意到针对高温高压阀门设计时尤为关注的密封问题,依然会受到现阶段的材料工艺限制,且为了保证高压设备的安全性,设计的结构安全裕量较大,结构尺寸也偏大,阀门的制造成本比较高昂,这些问题仍是现阶段制作高温高压阀门需要重点考虑的问题。

参 考 文 献:

- [1] 王慧媛, 郑海飞. 高温高压实验及原位测量技术[J]. 地学前缘, 2009(1): 17-26.
- [2] 李胜斌. 高温高压压差应力下水流体-固体相互作用实验装置的研制[D]. 北京: 中国科学院大学(博士论文), 2017.
- [3] 李胜斌, 李和平, 李涛, 等. 一种在高压水热环境下钛合金力学性能试验装置和方法[P]. 中国专利: 107091781A, 2017.
- [4] 陆培文. 阀门设计入门到精通[M]. 北京: 机械工业出版社, 2013.
- [5] 闻邦椿. 机械设计手册[M]. 北京: 机械工业出版社, 2013.
- [6] 陈凤棉. 压力容器安全技术[M]. 北京: 化学工业出版社, 2004.
- [7] 林鹏, 张瑞峰, 虞亚辉, 等. 汽轮机旁路阀门阀体温度场和应力场分析[J]. 热能动力工程, 2011, 26(2): 147-151.
- [8] 张桃沙, 苏小平, 包圳, 等. 某发动机排气歧管热应力仿真与分析[J]. 机械设计与制造, 2016(11): 171-174.
- [9] Li G, Liu J, Jiang G, et al. Numerical simulation of temperature field and thermal stress field in the new type of ladle with the nanometer adiabatic material[J]. *Advances in Mechanical Engineering*, 2015, 7(4): 1-13.
- [10] 陈敏, 汤文成, 张逸芳, 等. 阀门密封结构中超弹性接触问题的有限元分析[J]. 中国机械工程, 2007, 18(15): 1773-1775.

表 3 三种对比材料主要参数

Table 3. Main parameters of three comparative materials

材料	热传导系数/ (W/m·°C)	热膨胀系数/ (10 ⁻⁶ /°C)	弹性模量/ GPa
Q235	60.50	12.0	200
304	16.32	18.4	193
316L	20.90	18.8	206

表 4 对比材料温度分布

Table 4. Temperature distribution of comparative materials

材料	最低温度/°C	最高温度/°C	大部分区域/°C
Q235	361	600	580-390
304	158	600	550-190
316L	193	600	560-230

表 5 对比材料应力分布

Table 5. Stress distribution of comparative materials

材料	最小应力/MPa	最大应力/MPa	大部分区域/MPa
Q235	0.43	270	130-177
304	0.38	273	150-173
316L	0.45	268	110-170