

# 基于ANSYS的可在线带压更换阀杆密封组件式全焊接球阀球体应力和变形研究

张新星<sup>1</sup>, 顾怡红<sup>1</sup>, 郑建军<sup>2</sup>

<sup>1</sup>衢州职业技术学院, 浙江 衢州

<sup>2</sup>浙江福瑞科流控机械有限公司, 浙江 衢州

Email: qzct99@163.com

收稿日期: 2021年3月9日; 录用日期: 2021年4月9日; 发布日期: 2021年4月16日

## 摘要

针对某公司设计的可在线带压更换阀杆密封组件式全焊接球阀球体, 利用SolidWorks建立三维模型, 然后导入ANSYS软件, 通过分析全焊接球阀球体在3种工况下的应力和变形。由实验数据可知, 球体的最大变形产生在流道边缘, 球体上转轴根部的最大应力约为368 MPa, 大于球体材料的屈服强度, 产生局部应力集中; 而球体外壁和流道内壁的应力均小于材料的许用应力。球体的最大变形产生在流道边缘处; 密封面处的变形较大; 由于在最大压差下受介质的作用, 进口端阀座和介质接触侧球体的变形较为明显。研究表明, 通过适当增大球体转轴根部过渡圆角半径有利于改善局部应力集中状况, 本研究可为全焊接球阀设计与制造提供参考依据。

## 关键词

全焊接球阀, 应力集中, 变形, ANSYS分析

# Research on Stress and Deformation of Ball of Fully Welded Ball Valve of Replacement Stem Seal with Online Pressure Assembly Based on ANSYS

Xinxing Zhang<sup>1</sup>, Yihong Gu<sup>1</sup>, Jianjun Zheng<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Quzhou College of Technology, Quzhou Zhejiang

<sup>2</sup>Zhejiang Furico Flow Control Machinery Co., Ltd., Quzhou Zhejiang

Email: qzct99@163.com

Received: Mar. 9<sup>th</sup>, 2021; accepted: Apr. 9<sup>th</sup>, 2021; published: Apr. 16<sup>th</sup>, 2021

文章引用: 张新星, 顾怡红, 郑建军. 基于ANSYS的可在线带压更换阀杆密封组件式全焊接球阀球体应力和变形研究[J]. 机械工程与技术, 2021, 10(2): 165-173. DOI: 10.12677/met.2021.102019

## Abstract

Aiming at the fully welded ball valve of replacement stem seal with online pressure assembly designed by a company, the three-dimensional model is established by SolidWorks, and then the ANSYS software is imported to analyze the stress and deformation of all welded ball valve under three working conditions. According to the experimental data, the maximum deformation of the sphere occurs at the edge of the flow channel, and the maximum stress of the sphere occurs at the root of the rotating shaft on the sphere, which is 368 mpa; the maximum stress is greater than the sphere of material yield strength; the local stress concentration is occurred. While the stress of the outer wall of the sphere and the inner wall of the flow channel is less than the allowable stress of the material. The maximum deformation of the ball occurs at the edge of the flow channel; the deformation of the sealing surface is larger. Due to the effect of the medium under the maximum pressure difference, the deformation of the ball on the contact side of the inlet valve seat and the medium is more obvious. The results show that the local stress concentration can be improved by appropriately increasing the fillet radius at the root of the ball shaft. This study can provide a reference for the design and manufacture of all welded ball valve.

## Keywords

Fully Welded Ball Valve, Stress Concentration, Deformation, ANSYS Analysis

Copyright © 2021 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

阀门在关系国计民生的重要领域有着庞大需求,是机械装备制造业的重要一环,阀门中的全焊接球阀已经迅速发展成为一种主要的阀类[1][2][3][4]。全焊接球阀的阀体结构有两种,一种是筒状结构,它是双焊缝的,因为焊接过程的热量输出大,残余应力复杂,所以轴向和径向的变形也大。该形状的阀体重量重,不易运输,成本高,没有竞争优势。另一种是球状结构,它一般由四条焊缝或一条焊缝焊接而成的,支撑方式分为上下阀杆支撑和枢轴支撑。随着热锻压工艺的进步,球状结构阀体的焊缝只有一条,焊接输出的热量小,减小了变形,该结构阀体的重量是筒状的三分之一,成本低,明显有竞争优势。全焊接球阀的阀座采用的是组合密封结构,主密封是金属材料,次密封是非金属材料,以确保零泄漏。阀杆的设计是防吹出,阀杆和阀座之间有填料,减少密封泄漏,全焊接球阀还具有排污和放空功能。

本文通过对可在线带压更换阀杆密封组件的全焊接球阀的球体的研究,设计出全焊接球阀球体结构[5][6][7],利用 SolidWorks 三维绘图软件建立出所需模型,应用 ANSYS 仿真软件对全焊接球阀球体模型进行力学分析,得到了压力下球阀开启瞬间、压力下球阀关闭瞬间和中腔泄压等 3 种不同工况下的全焊接球阀球体的应力和变形情况,确定不同工况下的全焊接球阀球体是否满足使用要求[8][9][10]。本课题立足于某公司可在线带压更换阀杆密封组件的全焊接球阀生产实际,以全焊接球阀为研究对象,本课题通过工作研究与生产实际相结合,对企业提高生产效率起到了切实的帮助作用,同时也为企业其他生产部门以及同行从业者提供了一个可借鉴、可复制的范本。

## 2. 有限元方法

有限元分析(FEA, Finite Element Analysis) [11]利用数学近似的方法对真实物理系统(几何和载荷工况)进行模拟, 利用简单而又相互作用的元素(即单元), 就可以用有限数量的未知量去逼近无限未知量的真实系统。它是由 R. Courant 于 1943 年首次提出并在 20 世纪 50 年代由航空结构工程师所发展起来的, 我国冯康教授对有限元的理论基础做出了巨大贡献。有限元方法经历了 70 年的发展已经是一个相对成熟的领域了, 但在巩固其物理数学基础方面, 以及扩大其应用领域, 例如非线性、多体机构分析、材料微观结构计算等, 有限元方法依然会不断发展。

当今有限元分析软件的一个发展趋势是与通用 CAD 软件的集成使用, 即在用 CAD 软件完成部件和零件的造型设计后, 能直接将模型传送到 CAE 软件中进行有限元网格划分并进行分析计算, 如果分析的结果不满足设计要求则重新进行设计和分析, 直到满意为止, 从而极大地提高了设计水平和效率。CAE 软件为了实现和 CAD 软件的无缝集成而采用了 CAD 的建模技术, 实现真正无缝的双向数据交换。

### 2.1. 等效积分形式与加权余量法

加权余量法的原理是基于微分方程等效积分的提法, 同时它也是求解线性和非线性微分方程近似解的一种有效方法。工程或物理学中的许多问题, 通常是以未知场函数应满足的微分方程和边界条件的形式提出来的, 可以一般地表示为未知函数  $u$  应满足微分方程组:

$$A(u) = \begin{pmatrix} A_1(u) \\ A_2(u) \\ \vdots \end{pmatrix} = 0 \quad (1)$$

域  $\Omega$  可以是体积域、面积域等, 如图 1 所示。同时未知函数  $u$  还应满足边界条件:

$$B(u) = \begin{pmatrix} B_1(u) \\ B_2(u) \\ \vdots \end{pmatrix} = 0 \quad (2)$$

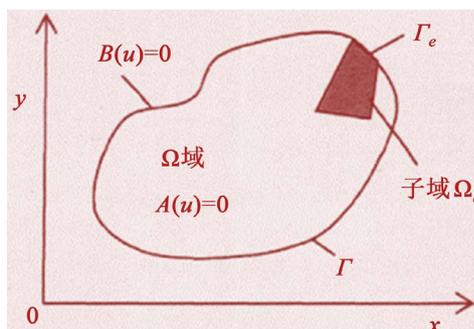


Figure 1. Area  $\Omega$  and boundary  $\Gamma$

图 1. 求解区域  $\Omega$  及边界  $\Gamma$

要求解的未知函数  $u$  可以是标量场(例如压力或温度), 也可以是几个变量组成的向量场(例如位移、应变、应力等)。  $A, B$  是表示对于独立变量(例如空间坐标、时间坐标等)的微分算子。微分方程数目应和未知场函数的数目相对应, 因此, 上述微分方程可以是单个的方程, 也可以是一组方程。所以在以上两式中采用了矩阵形式。

以二维稳态的热传导方程为例, 其控制方程和定解条件如下:

$$A(\phi) = \frac{\partial}{\partial x} \left( k \frac{\partial \phi}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( k \frac{\partial \phi}{\partial y} \right) + q = 0 \quad (3)$$

$$B(\phi) = \begin{cases} \phi - \bar{\phi} = 0 & (\text{在 } \Gamma_{\phi} \text{ 上}) \\ k \frac{\partial \phi}{\partial n} - \bar{q} = 0 & (\text{在 } \Gamma_q \text{ 上}) \end{cases} \quad (4)$$

这里  $\phi$  表示温度(在渗流问题中对应压力);  $k$  是流度或热传导系数(在渗流问题中对应流度  $K/\mu$ );  $\bar{\phi}$  和  $\bar{q}$  是边界上温度和热流的给定值(在渗流问题中分别对应边界上的压力和边界上的流速);  $n$  是有关边界  $\Gamma$  的外法线方向;  $q$  是源密度(在渗流问题中对应井的产量)。

在上述问题中,若  $k$  和  $q$  只是空间位置的函数时,问题是线性的。若  $k$  和  $q$  是  $\phi$  及其导数的函数时,问题则是非线性的。

由于微分方程组(1)在域  $\Omega$  中每一点都必须为零,因此就有:

$$\int_{\Omega} V^T A(u) d\Omega \equiv \int_{\Omega} (v_1 A_1(u) + v_2 A_2(u) + \dots) d\Omega \equiv 0 \quad (5)$$

其中

$$V = \begin{pmatrix} v_1 \\ v_2 \\ \vdots \end{pmatrix} \quad (6)$$

其中  $V$  是函数向量,它是一组和微分方程个数相等的任意函数。

式(5)是与微分方程组(1)完全等效的积分形式。我们可以说,若积分方程对于任意的  $V$  都能成立,则微分方程(1)必然在域内任一点都得到满足。同理,假如边界条件(2)亦同时在边界上每一点都得到满足,对于一组任意函数,下式应当成立:

$$\int_{\Gamma} \bar{V} B(u) d\Gamma \equiv \int_{\Gamma} (\bar{v}_1 B_1(u) + \bar{v}_2 B_2(u) + \dots) d\Gamma \equiv 0 \quad (7)$$

因此积分形式

$$\int_{\Omega} V^T A(u) d\Omega + \int_{\Gamma} \bar{V}^T B(u) d\Gamma = 0 \quad (8)$$

对于所有的  $V$  和  $\bar{V}$  都成立是等效于满足微分方程(1)和边界条件(2)。我们把(8)式称为微分方程的等效积分形式。

## 2.2. 变分原理

讨论一个连续介质问题的变分原理首先要建立一个标量泛函  $\Pi$ , 它由积分形式确定:

$$\Pi = \int_{\Omega} F \left( u, \frac{\partial u}{\partial x}, \dots \right) d\Omega + \int_{\Gamma} E \left( u, \frac{\partial u}{\partial x}, \dots \right) d\Gamma \quad (9)$$

其中,  $u$  是未知函数,  $F$  和  $E$  是特定的算子,  $\Omega$  是求解域,  $\Gamma$  是  $\Omega$  的边界。 $\Pi$  称为未知函数的泛函, 它随函数  $u$  的变化而变化。连续介质问题的解  $u$  使泛函  $\Pi$  对于微小的变化  $\delta u$  取驻值, 即泛函的“变化”等于零。

$$\delta \Pi = 0 \quad (10)$$

这种求得连续介质问题解的方法称为变分原理或变分法。

## 3. ANSYS 仿真

### 3.1. 球体三维模型和网格模型

全焊接球阀内部结构示意图如图 2 所示。表 1 为全焊接球阀零部件名称。阀体结构为筒形结构, 球

体利用上下支撑板支撑，这种结构能够将介质作用在球体上的推力通过支撑板传递至阀体上，使阀杆不承受介质的推力，从而大大降低了阀门的启闭力矩，有效提高了阀杆密封性。阀座密封采用双活塞效应的双向密封阀座，任何一个阀座失去密封能力，另一个阀座仍可以独立起作用，从而保证密封。

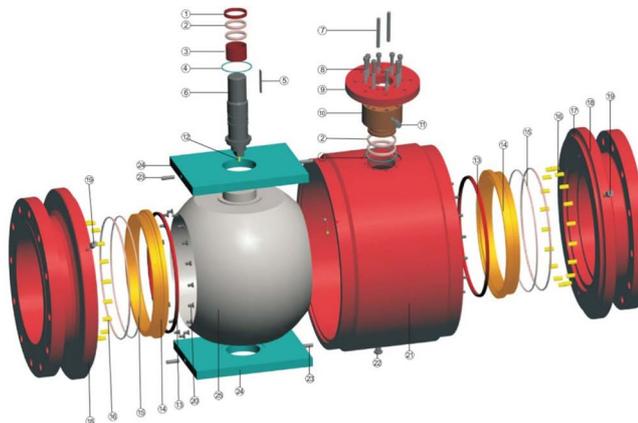


Figure 2. Full welded body ball valve dynamic drawing  
图 2. 全焊接球阀动态图

Table 1. Name of all welded ball valve parts

表 1. 全焊接球阀零部件名称

tem	Part Name	tem	Part Name	tem	Part Name	tem	Part Name	tem	Part Name
1	Stem gasket	7	Alignment bearing	13	Seat insert	19	Seat grease injection	25	Ball
2	Stem O-ring	8	Cap screw	14	Seat ring	20	Screw		
3	Stem bearing	9	Adapter plate	15	Seat O-ring	21	Body		
4	Thrust bearing	10	Gland	16	Spring	22	Drain plug		
5	Pin	11	Stem grease injection	17	Seam line	23	Block pin		
6	Stem	12	Antistatic spring	18	Cap	24	Trunnion block		

### 3.1.1. ANSYS 与 SolidWorks 之间的数据转换

使用 ANSYS 进行有限元分析时，技术人员在进行三维模型的建立过程中耗费了大量的时间与精力。由于 ANSYS 自带的建模功能非常有限，只能建立一些结构简单的模型。随着 ANSYS 的应用日益广泛，在很多时候需要对非常复杂的模型进行有限元模型的建立，其需要处理的模型也越来越复杂，ANSYS 自带的建模功能显出很多的不足之处。SolidWorks 作为一款三维 CAD 软件，其拥有强大的参数化建模能力，可以建立非常复杂的实体模型。

### 3.1.2. 使用 ANSYS 软件的图形接口进行数据的导入

在 ANSYS 中使用 Import 命令导入三维 CAD 模型，而后需要进行模型结构的失真处理与缺陷的修改。使用 ANSYS 导入 IGES 文件的时 ANSYS 软件对于细小的几何结构无法识别，因此，需要先修正几何模型，才能进行有限元网格划分和计算，保证精度和准确性。根据全焊接球阀的结构尺寸参数，利用 SolidWorks 软件建立球体三维模型。具体操作步骤如下：打开 SolidWorks，建立所需模型，依次选择 ANSYS-Simulation，便可直接把所建立模型完整地导入到 ANSYS 中，对于复杂模型也不会出现数据丢失现象，真正实现了两软件之间的无缝连接。导入后的模型及划分的网格，球体的 CAD 模型和网格模型

如图 3 所示。为了自动调节网格密度, 以便提高计算精度, ANSYS 提供了一种自动估计网格划分误差并细化网格的功能, 称作自适应网格划分。该功能可以自动估计特定分析类型中因为网格划分带来的误差。通过这种误差估计, 程序可以确定网格是否足够细。如果不够的话程序将自动细化网格以减少误差, 然后通过一系列的求解过程使得误差低于用户指定的数值或直到用户指定的最大求解次数。ANSYS 自适应网格划分[12] [13] [14] [15]只适用于单次求解的线性静力结构分析和线性稳态热分析, 模型必须使用支持误差计算的单元类型, 模型必须是可划分网格的, 即模型中不能有引起网格划分出错的部分, 在菜单中选择 Solution- > Solve- > Adaptive Mesh, 填写 ADAPT 宏参数。

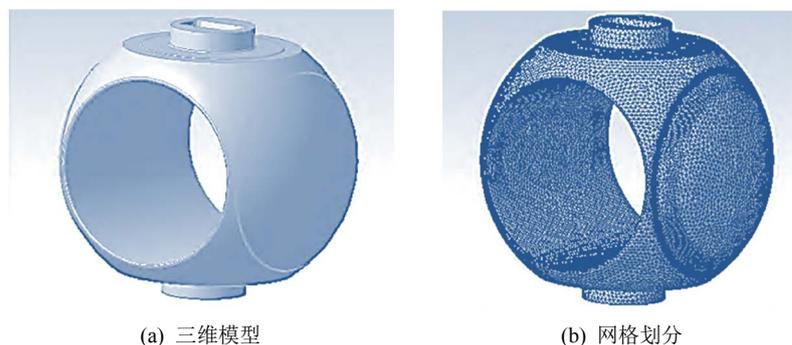


Figure 3. 3D model and meshing of sphere  
图 3. 球体三维模型和网格划分

### 3.2. 球体的应力和变形分析

选择在设计压力下可在线带压更换阀杆密封组件式全焊接球阀球体开启瞬间、全焊接球阀球体关闭瞬间和全焊接球阀球体中腔泄压 3 种工况进行应力和变形分析, 对设计的球体进行 ANSYS 仿真模拟。球体化学成份和力学性能如表 2 和表 3 所示。

Table 2. Chemical composition of materials

表 2. 材料的化学成份

C	Si	Mn	S	P	Cr	Ni
0.15 max	1.00 max	1.00 max	0.030 max	0.035 max	11.50~13.50	0.60 max

Table 3. Mechanical properties

表 3. 力学性能

名称	材料	屈服强度/Mpa	抗拉强度/Mpa	弹性模量/GPa	泊松比
球体	ASTM A182f6a	255	486	205	0.3

### 3.3. 求解与分析

#### 3.3.1. 设计压力下球阀开启瞬间

在设计压力条件下, 球阀在开启瞬间处于最大压差状态, 受力最大。通过模拟计算得到球体的等效应力分布云和变形分布云, 如图 4 所示。

全焊接球阀球体在其转轴根部的最大应力为 368 MPa, 超过材料的屈服强度, 产生局部应力集中; 球体外壁和流道内壁的应力小于材料的许用应力。流道边缘最大变形约为 0.193 mm; 密封面处的变形约为 0.186 mm, 全焊接球阀球体在进气阀座和接触侧的变形较大。

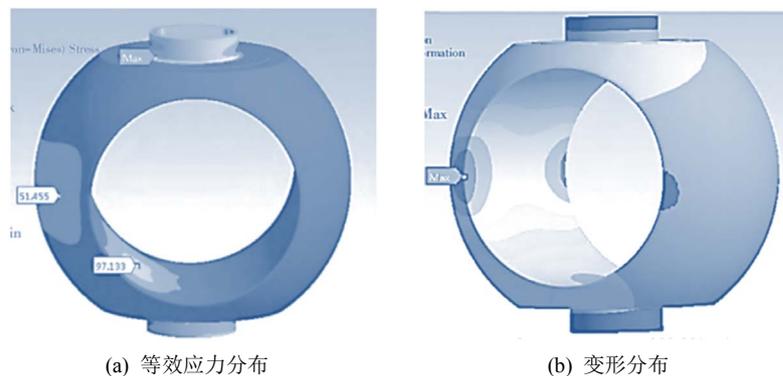


Figure 4. Opened instantly conditions  
图 4. 开启瞬间工况

### 3.3.2. 设计压力下球阀关闭瞬间

球体上的载荷主要包括：球体流道上的设计压力、球体进口端密封面上的密封压力、球体出口端密封面上的密封压力、球体密封面上的摩擦力矩，以及轴承摩擦力矩对上下转轴的摩擦转矩。施加约束和载荷后，通过模拟计算得到球体的等效应力分布和变形分布，如图 5 所示。

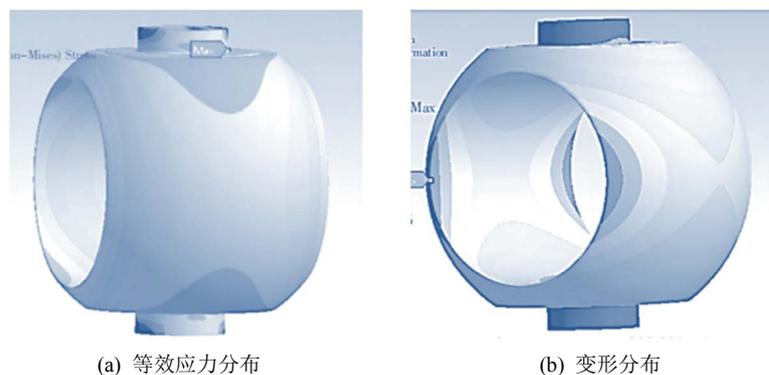


Figure 5. Closed moments conditions  
图 5. 闭合瞬间工况

全焊接球阀球体在其转轴根部的最大应力为 85 MPa，超过材料的屈服强度，产生局部应力集中；球体外壁和流道内壁的应力小于材料的许用应力。球体的最大变形发生在流道边缘，约为 0.0763 mm；密封面处的变形较大，约为 0.186 mm；与设计压力下球阀开启瞬间比较，设计压力下球阀关闭瞬间的应力与变形较小。

### 3.3.3. 设计压力下球阀中腔泄压

在中腔泄压工况下，球体所受的载荷包括：中腔介质作用在球体表面的压力、球体进口端密封面承受的密封比压、球体出口端密封面承受的密封比压。施加约束及载荷后，通过模拟计算得到球体等效应力分布云图和变形分布云图，如图 6 所示。

全焊接球阀球体在其转轴根部的最大应力为 122 MPa，超过材料的屈服强度，产生局部应力集中；球体外壁和流道内壁的应力小于材料的许用应力。球体的最大变形发生在流道边缘，约为 0.12 mm；密封面处的变形较大，约为 0.11 mm；由于最大压差下介质的作用，全焊接球阀球体在流道边缘处等效应力较大。

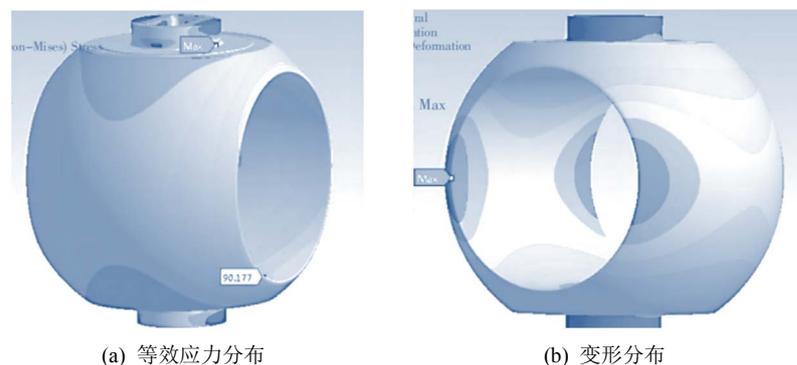


Figure 6. Pressured conditions  
图 6. 泄压工况

#### 4. 结束语

本文利用 SolidWorks 建立可在线带压更换阀杆密封组件式全焊接球阀球体的三维实体模型，然后基于 ANSYS 软件对所建可在线带压更换阀杆密封组件式全焊接球阀球体三维模型进行施加约束及载荷后，通过模拟计算得到球体的等效应力分布云图和变形分布云图，通过对全焊接球阀球体的应力和变形的分析，可以得到如下结论，球体的最大变形产生在流道边缘，球体上转轴根部的最大应力约为 368 MPa，大于球体材料的屈服强度，产生局部应力集中；而球体外壁和流道内壁的应力均小于材料的许用应力。球体的最大变形产生在流道边缘处；密封面处的变形较大；由于在最大压差下受介质的作用，进口端阀座和介质接触侧球体的变形较为明显。并且将模拟仿真结果与材料力学数据进行比较，结果表明，所建立的全焊接球阀球体接近实际情况，查阅相关文献可知，通过适当增大球体转轴根部过渡圆角半径有利于改善局部应力集中状况，本研究可为全焊接球阀设计与制造提供参考依据。

#### 基金项目

衢州市科技局科技计划竞争性项目(项目编号 2020K03)资助。

#### 参考文献

- [1] Bao, C., et al. (2019) A Method to Evaluate Ductile Fracture Toughness Based on Load Separation Principle. *Fatigue & Fracture of Engineering Materials & Structures*, 42, 178-186.
- [2] 汤伟, 张越, 王博, 等. 新型电动阀门的速度曲线算法研究[J]. 中国造纸, 2019, 38(9): 43-50.
- [3] 李岩松, 王剑波, 丁鼎倩, 等. 基于反问题理论的油库管道阀门控制方案[J]. 油气储运, 2019, 38(5): 554-561.
- [4] 李红, 张乾坤, 汤攀, 孙彩珍. 阀门调节式比例施肥泵性能分析与试验[J]. 农业工程学报, 2020, 36(18): 42-49.
- [5] 湖北省发展计划委员会. GB 50018-2002. 冷弯薄壁型钢结构技术规范[S]. 北京: 中国计划出版社, 2002.
- [6] 陈骥. 钢结构稳定理论与设计[M]. 北京: 科学出版社, 2006.
- [7] 陈绍蕃, 顾强. 钢结构[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2003.
- [8] 马新强, 成巍, 任远, 等. 基于 ANSYS Workbench 的激光器壳体结构优化设计[J]. 制造技术与机床, 2020(1): 30-33.
- [9] 马辉, 朱锦波, 李学军, 等. 利用 ANSYS 有限元模型进行钢丝绳结构分析的可行性研究[J]. 科技通报, 2020, 36(2): 54-58.
- [10] 李芑荃, 谭雪松, 张黎骅, 李举. 基于 ANSYS Workbench 对单螺旋榨油机榨膛温度分布情况的研究[J]. 中国油脂, 2020, 45(12): 146-150.
- [11] Mamtimin Geni. ANSYS Workbench 18.0 有限元分析入门与应用[M]. 北京: 机械工业出版社, 2018.

- [12] 胡仁喜, 康士廷. ANSYS 14.0 热力学有限元分析从入门到精通[M]. 北京: 机械工业出版社, 2013.
- [13] 万磊. 基于 ANSYS Workbench 的全焊接球阀球体应力和变形分析[J]. 机械制造, 2016, 54(11): 18-20.
- [14] 王胡振. “层内爆炸”数值模拟研究[D]: [硕士学位论文]. 大庆: 大庆石油学院, 2009.
- [15] 谢贤东. 爆炸压裂后储层裂缝的渗流机理研究[D]: [硕士学位论文]. 东营: 中国石油大学(华东), 2009.