

DOI:10.19344/j.cnki.issn1671-5276.2025.02.020

基于重要度公差叠加分析的固定球阀密封结构装配优化研究

黄晓云¹, 夏胜建¹, 全军¹, 厉陈足², 戴雄浩¹, 杨建¹

(1. 保一集团有限公司, 浙江 温州 325105; 2. 祺隆阀门有限公司, 浙江 温州 325103)

摘要:针对固定球阀装配后密封性能欠佳问题,以 Q347F-150Lb 固定球阀的阀座结构为研究对象。采用 SolidWorks 平台中的 TolAnalyst 插件以及多目标优化设计方法进行研究分析;以重要度为约束条件,以装配后最大尺寸、启闭转矩等为目标函数,以位置公差和形状公差为优化设计的变量;建立优化前、后的有限元模型,分析接触压力、应力及应变。研究结果表明:优化位置公差比形状公差的效果较好,可将关键位置的公差提升;基于有限元模拟方法,阐明了非连续接触密封结构开启过程中密封面接触压力、等效应力和等效应变的演变规律。基于 TolAnalyst 插件可快速获得对重要特征的公差分析结果,可为公差分配的优化提供理论基础。

关键词: SolidWorks; 计算机辅助公差设计; 固定球阀; 公差分析; 优化设计

中图分类号: TH122 **文献标志码:** A **文章编号:** 1671-5276(2025)02-0103-06

Research on Assembly Optimization of Sealing Structure of Fixed Ball Valve Based on Importance Tolerance Superposition Analysis

HUANG Xiaoyun¹, XIA Shengjian¹, QUAN Jun¹, LI Chenzu², DAI Xionghao¹, YANG Jian¹

(1. Baoyi Group Co., Ltd., Wenzhou 325105, China; 2. Qilong Valve Co., Ltd., Wenzhou 325103, China)

Abstract: To improve the poor sealing performance of fixed ball valve after assembly, the seat structure of Q347F-150Lb fixed ball valve taken as the object of exploration, the TolAnalyst plug-in on the Solidworks platform and the multi-objective optimization design method are adopted for research and analysis. With the importance degree as the constraint, the maximum size after assembly, the opening and closing torque, etc. as the objective functions, and the position tolerance and shape tolerance as the optimal design variables, the finite element model before and after optimization was established to analyze the contact pressure, stress and strain. The results show that the effect of optimizing the position tolerance is better than the shape tolerance, and the tolerance of the key position can be increased. Based on the finite element simulation method, the evolution law of the contact pressure, equivalent stress and equivalent strain of the sealing surface during the opening of the discontinuous contact seal structure is clarified. Based on the TolAnalyst plug-in, the tolerance analysis results for important features can be obtained quickly and provide a theoretical basis for the optimization of tolerance assignments.

Keywords: SolidWorks; computer-aided tolerancing design; fixed ball valves; tolerance analysis; design optimization

0 引言

固定球阀具有结构紧凑、密封性能优和可靠性好等优势,成为调节和阻断流体介质流量的一类阀门,被广泛应用于石油化工等工业领域^[1-3]。但在使用过程中,其密封结构受到磨损或损坏而导致其无法满足使用要求,进而报废。影响其密封结构使用性能的主要原因是公差分配不合理导致。为此,对于固定球阀而言,合理的公差设计显得很重要。

在公差设计过程中,需要同时考虑尺寸公差和形位公差,以保证产品的功能要求。传统的公差设计手段普遍依靠有关资料上的经验公式、数

据和图表,采用类比方法进行人工设计。由于形位公差较为复杂,所以人们往往只侧重于尺寸公差而很少关注形位公差。即使应用一些 CAD 软件,也仅能实现公差标注^[4],这种公差设计的方式不可能迅速达到满足产品精度要求,获得较低成本公差设计的效果。目前,计算机辅助公差设计的研究应用滞后于计算机辅助设计制造^[5-6],基于 ANATOLE 3D 软件,旨在实现制造规格转换的自动化和制造公差的优化。初红艳等^[7]采用了 SolidWorks 软件辅助进行零件公差设计和改进的方法,改进关键零件公差,实现机构功能精确化。孟巧凤等^[8]针对工程实践中所面临的公差分配与

基金项目:浙江省重点高新技术产品开发项目(浙经信技术[2021]111号)

第一作者简介:黄晓云(1982—),女,浙江温州人,高级工程师,从事机电产品及特种阀门的设计研发和标准化工作,171488658@qq.com。

优化问题,采用矢量的概念建立三维尺寸链向量环模型,探索基于等值分配公差采用“二分”法思想进行优化的改进方案。分析结果表明,改进方案较原有相等公差分配方法具有较大的优越性。

综上所述,本研究基于 CAT 技术,采用 TolAnalyst、DimXpert 和 MBD Dimensions 插件,以 Q347F-150Lb 型号球阀为研究对象,建立球阀密封结构的公差叠加分析模型和优化设计模型,对三维公差进行快速分析并基于重要度分析结果对公差进行优化设计。最后,采用 Abaqus 软件对优化后的密封结构进行验证。

1 密封结构及转矩分析

1.1 密封结构及其原理

阀门的密封结构是实现阀门功能正常运作最重要的一环。固定球阀通常由球体、阀座、阀体和阀杆等零件组成,如图 1 所示。

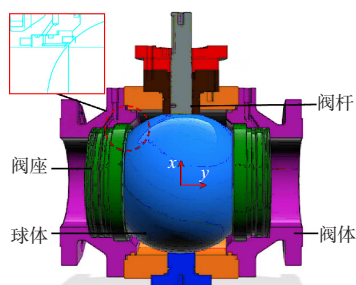


图 1 固定球阀

由图 1 可知,该固定球阀密封结构由阀座、球体、阀杆以及阀体组成。 y 方向为流体介质的流向, x 方向为球体启/闭时的轴线。通过旋转球体使球体的内腔通路与管路相连接,实现流体介质的输送。

球阀的密封判断标准通常是根据密封公式来判定,公式如下^[9]:

$$q_0 < q < [q] \quad (1)$$

式中: q_0 为必须比压,MPa; q 为实际比压,MPa; $[q]$ 为材料的许用比压,MPa。

在式(1)中,必须比压 q_0 的求解公式如下:

$$q_0 = m \left(\frac{a+cp}{\sqrt{b}} \right) \quad (2)$$

式中: m 为流体的介质系数; a 、 c 为密封结构的材料参数; p 为流体压力,MPa; b 为密封面的厚度,mm。

1.2 转矩分析

装配精度是影响球阀启闭转矩的关键因素之一。在装配过程中,公差过大可能会导致球体和密封圈的接触压力过小或者过大。当接触压力过

小时,如果流体压力比较大,会有泄漏的风险;当接触压力过大时,球体和密封圈所受的摩擦力会急剧地增大,降低密封结构的使用寿命^[10-12]。本文将转矩作为优化目标之一。

本案例中使用橡胶密封圈进行密封处理,橡胶材料由于其可压缩的性质,在一定程度上可以将密封圈等效成弹簧,因此可以得到如下公式^[13]:

$$M = [R(1+\cos\phi) \cdot \mu_1] / 2 \cdot \cos\theta \quad (3)$$

式中: M 为密封圈和球体接触引起的摩擦转矩, N/mm; $\cos\theta$ 为球体与密封面接触角度的余弦值; R 为球体半径,mm; μ_1 为球体和密封圈之间的摩擦因数。

2 SolidWorks 公差分析原理及流程

通过 SolidWorks 软件平台自带的 TolAnalyst 插件工具可以根据零件上的形位公差以及装配的约束关系进行求解,最终得到装配体中所需的关键位置的累积公差值。

TolAnalyst 插件可求解所需模型的形位公差。因此,在使用 TolAnalyst 插件进行分析之前,需要先对装配体中的零件进行尺寸标注。另外, TolAnalyst 插件公差分析基于尺寸链思路进行公差求解。因此,标注的尺寸仍然需要满足尺寸链中尺寸首尾相连的封闭性以及尺寸的公差之间应该有确定函数关系的关联性。

进行零件尺寸标注时,利用 DimXpert 模块可实现零件尺寸的快速标注。首先使用尺寸公差和形位公差工具将模型上相应的公差标注出来,生成重要尺寸已经被全约束的零件模型。然后进入装配环境,将零件进行装配从而得到装配模型。之后选择装配环境的 DimXpert 工具,确定需要的测量特征和零件的装配顺序。最后根据装配关系确定零件的装配参考基准面,得到所要测量特征间的公差值。

首先,建立所需装配的所有零件三维模型并进行零件的公差标注;然后,确定装配顺序、基准面及公差分析的特征建立;接着,建立装配尺寸链,包括封闭环和组成环以及增环/减环,利用极值法对尺寸链进行求解分析;最后,获得重要特征结构的公差结果。在传统装配尺寸链公差分析的基础上,引入了重要度评价指标,为优化设计装配公差提供重要的指导依据。根据重要度,优先调整该参数,可实现对装配公差的精准且快速设计。

在使用 TolAnalyst 插件进行分析之前,需要预先定义零件的 DimXpert 尺寸,对零件进行

DimXpert 尺寸标注。在标注过程中,可以使用显示公差状态功能进行各个面的约束,全约束、过约束以及欠约束会分别以不同颜色表现出来,便于检查欠缺的公差标注。

对所有零件尺寸标注完成后,将完成尺寸标注的零件进行装配。在装配环境中使用添加新的 TolAnalyst 算例功能,选择需要进行公差分析的两个 DimXpert 特征。按照装配顺序选择每个装配环节的重要参考基准,即可获得公差分析结果,并且可以列出相关公差对最后公差分析的数值大小的影响权重。

3 固定球阀公差叠加分析

研究对象为某阀门公司代号为 Q347F-150Lb 的固定球阀。采用 DimXpert 模块,固定球阀中阀座和球体尺寸公差标注后的效果图,分别如图 2、图 3 所示。根据图 4 可知, Φx 是整个装配环节中最重要的结构尺寸,该尺寸为后续优化目标。

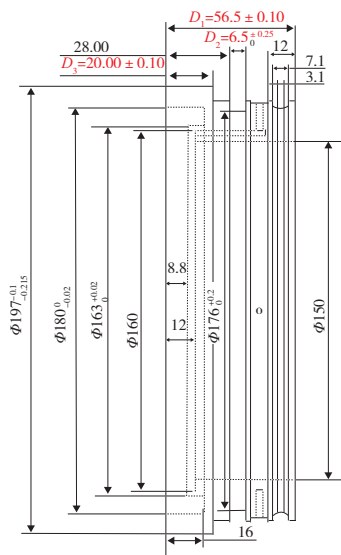


图2 阀座尺寸公差标注

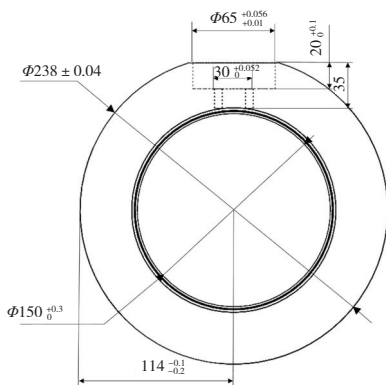


图3 球体尺寸公差标注

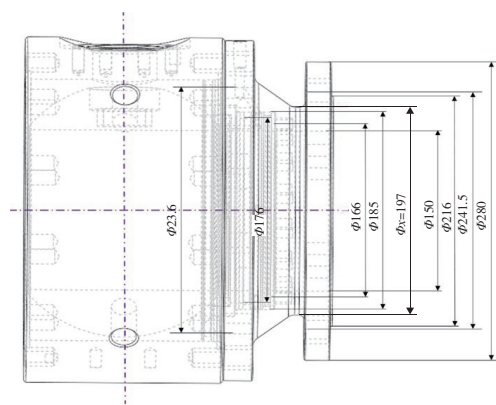


图4 装配后尺寸公差标注

本文为了进行球阀中球体与密封圈的公差分析,需要根据实际装配关系确定装配顺序。为了得到密封圈和球体接触面特征之间的公差关系,设计的装配顺序为密封圈—阀座—左/右阀体—阀体—球体。

选择需要进行公差分析的密封圈外侧面和球体的通口面的公差特征,并依次选择每步装配关系中的基准参考面,如图 5 所示。即可得到两个 DimXpert 特征之间的公差分析,其中名义尺寸 10.3 mm,最大尺寸 10.725 mm,最小尺寸 9.875 mm。在密封结构的相关公差中,对特征结构结果影响最大的是阀座位置公差,重要度约占 33.5%。

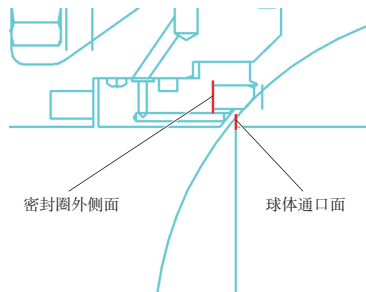


图5 公差分析面位置

根据求解得到的零/部件的公差分析结果可以得出,在所有相关零/部件的公差标注因素中,对关键位置的公差分析结果影响重要度值如表 1 所示。

表1 重要度分析结果

序号	参数	重要度/%
A	阀体形状公差	11.8
B	球体形状公差	23.5
C	阀座位置公差	33.5
D	阀体位置公差	17.6

4 基于重要度的优化设计

基于重要度分析,球阀的左/右阀座和阀体的公差对关键位置的最终公差影响最大。因此,为了更好地控制密封圈和球体的公差以达到工艺要求,本文针对该球阀的公差要求影响最大的公差参数进行调整优化,即通过更改左/右阀座的相关公差,即可实现对最后装配体中球体和阀座之间公差的快速调整。

4.1 设计参数优化

1) 设计变量

根据球阀密封结构的公差叠加分析结果,拟优化阀座的 D_1 、 D_2 和 D_3 等相关尺寸,以优化最终公差分配,提高密封结构的密封性能。其设计变量可表示为

$$\mathbf{x} = [x_1, x_2, x_3]^T = [D_1, D_2, D_3]^T \quad (4)$$

2) 目标函数

以最终影响装配精度的最终尺寸 $\Phi(\mathbf{x})$ 、固定球阀的启闭转矩最小 $M_t(\mathbf{x})$ 和接触应力 $S_c(\mathbf{x})$ 为 3 个子目标,其目标函数可表示为

$$\begin{cases} \text{Min: } M_t(\mathbf{x}), S_c(\mathbf{x}) \\ \text{Max: } \Phi(\mathbf{x}) \end{cases} \quad (5)$$

3) 约束条件

面对固定球阀密封结构装配后的公差设计问题,研究密封结构的装配公差相关性并与经验设计相结合,最终设计出变量的约束条件,如表 2 所示。

变量	初始值	上限值	下限值
D_1	56.50	56.60	56.40
D_2	6.50	6.75	6.50
D_3	20.00	20.10	19.90

综上所述,固定球阀密封结构优化设计的数学模型可表示为

$$\begin{cases} \text{Find: } \mathbf{x} = [D_1, D_2, D_3]^T \\ \text{Min: } M_t(\mathbf{x}), S_c(\mathbf{x}) \\ \text{Max: } \Phi(\mathbf{x}) \\ 56.40 < D_1 < 56.60, 6.50 \leq D_2 < 6.75 \\ \text{s.t. } 19.90 < D_3 < 20.10 \\ M_t < 223, S_c(\mathbf{x}) \leq 98 \\ \Phi(\mathbf{x}) = 197 \end{cases} \quad (6)$$

4.2 结果分析与讨论

为了提高密封结构的建模效率,基于 Abaqus 软件的二次开发技术进行了参数化建模。采用 DOE 测试方法进行了尺寸参数设计,并采用自行开发的参数化建模工具进行三维建模。简化后密封结构的有限元模型如图 6 所示。

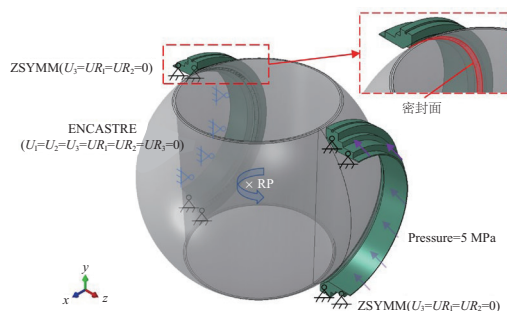


图 6 有限元模型

将球体设置为解析刚体,提高求解效率。由于阀座是对称结构,建立 1/2 模型并在对称面设置对称约束。求解分析时分为两步进行:第一施加介质压力;第二对球体施加载荷。在球体的质心位置设置参考点(RP点),用于施加载荷。根据不同尺寸的密封结构进行有限元分析,进行接触压力和等效应力分析。

1) 接触压力分析

基于有限元模型,固定球阀密封结构中阀座的尺寸 D_1 、 D_2 和 D_3 分别为 56.40 mm、6.50 mm 和 20.05 mm 时的开启过程中($t = 0 \sim 10$ s)密封面的接触压力云图如图 7 所示。由图 7 可知,随着密封结构开启,密封面的接触压力呈非线性变化趋势。

2) 等效应力分析

基于有限元模型,固定球阀密封结构中阀座的尺寸 D_1 、 D_2 和 D_3 分别为 56.40 mm、6.50 mm 和 20.05 mm 时的开启过程中($t = 0 \sim 10$ s)密封面的等效应力演变规律云图如图 8 所示。由图 8 可知,密封结构中阀座等效应力呈非线性变化趋势。

3) 等效应变分析

基于有限元模型,固定球阀密封结构中阀座的尺寸 D_1 、 D_2 和 D_3 分别为 56.40 mm、6.50 mm 和 20.05 mm 时的开启过程中密封结构的等效应变演变规律如图 9 所示。由图 9 可知,阀座的整体等效应变呈非线性变化趋势。

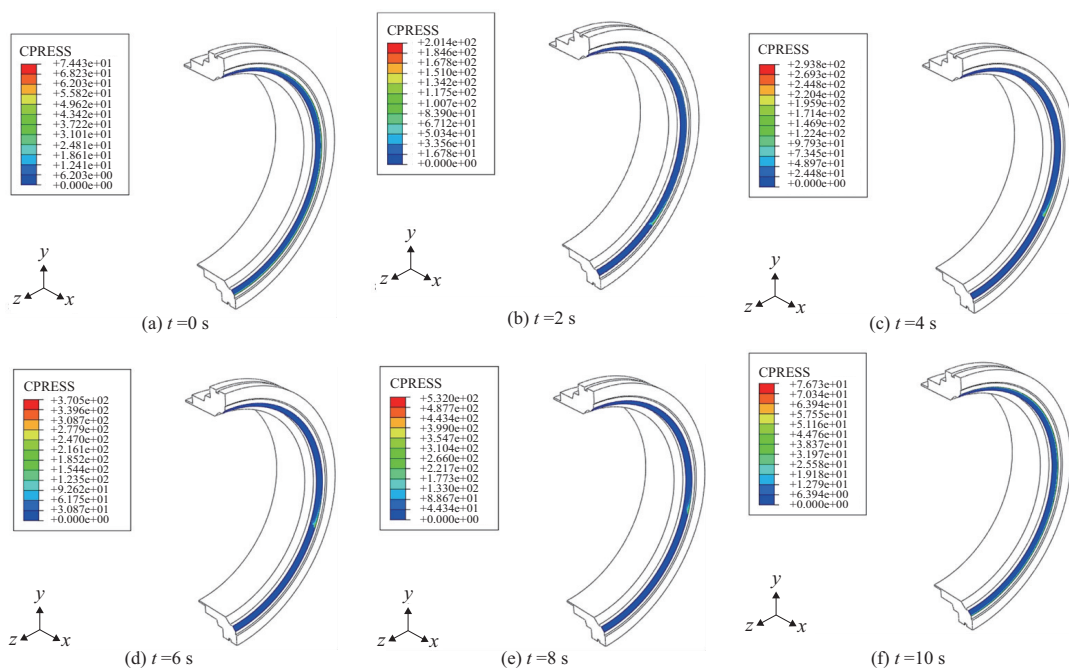


图7 接触压力演变规律

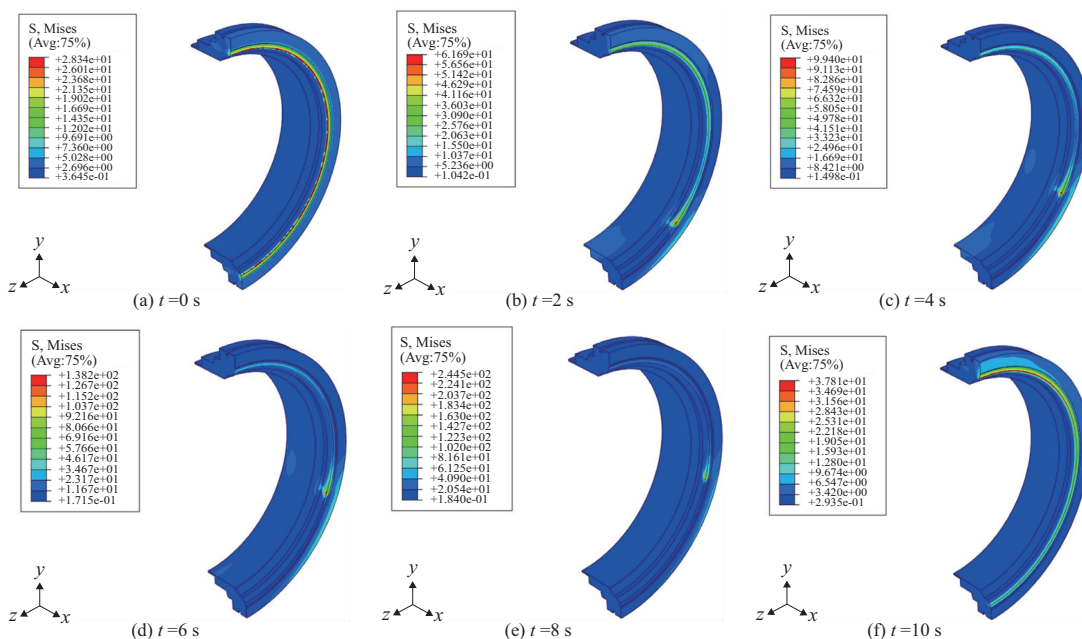


图8 等效应力演变规律

5 结语

本文利用 SolidWorks 软件中的 TolAnalyst 插件进行公差分析,得到所求密封圈和球体之间的公差分析结果。再根据尺寸链中各项的影响权重分析结果,对尺寸链中的公差进行了优化设计,使得公差参数能够比较好地满足设计使用要求。基于有限元方法,阐明了密封结构开启过程

中的接触压力、等效应力和等效应变的演变规律。基于分析结果得出以下结论:

1) 基于重要度结果,对关键特征结构进行针对性优化设计,可以实现密封结构的高效设计并满足使用要求;

2) 在开启过程中,阀座密封面上的接触压力、等效应力和等效应变均出现集中现象。这是非连续接触结构造成的点接触行为引起的。

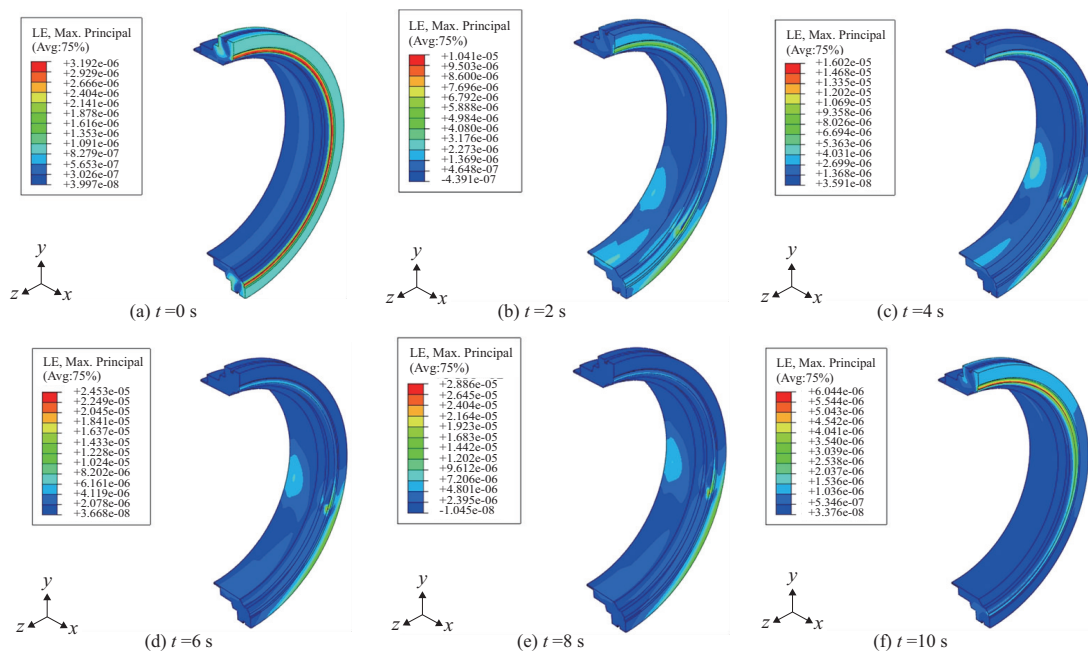


图9 等效应变演变规律

参考文献:

- [1] 赵明岩. 计算机辅助公差设计模块的研究[J]. 机械工程师, 2002(10): 10-11.
- [2] 许菊若. 计算机辅助公差设计技术的若干应用[J]. 江南大学学报, 2002(1): 17-19.
- [3] 苏朋. 365 nm 光刻照明系统中变焦系统的设计及公差分析[J]. 红外与激光工程, 2022, 51(7): 253-257.
- [4] 戴宏伟, 陈琨, 于慧, 等. 雅可比旋量的装配体并联结构公差分析方法研究[J]. 西安交通大学学报, 2022, 56(5): 156-165, 222.
- [5] FRÈRE L M, ROYER M, FOURCADE J. Tolerance analysis using a Computer Aided Tolerancing Software: ANATOLE 3D[J]. Procedia CIRP, 2018, 75: 267-272.
- [6] 冯玉龙, 杨康新, 杨昌群, 等. 新型四阀瓣式无摩擦球阀结构的研制[J]. 油气储运, 2021, 40(7): 796-801.
- [7] 初红艳, 于海辉, 蔡力钢, 等. 采用 SolidWorks 的印刷机咬纸机构装配误差分析[J]. 现代制造工程, 2012(5): 122-125.
- [8] 孟巧凤, 张林鎔, 尹琳峥, 等. 基于 3DCS 的三维尺寸公差的分析与优化[J]. 系统仿真学报, 2018, 30(5): 1730-1738.
- [9] 丁浩亮, 张凌东, 于晗, 等. 超低温球阀用聚三氟氯乙烯密封环的热压工艺与性能[J]. 合成树脂及塑料, 2021, 38(2): 67-70.
- [10] 于晗, 丁浩亮, 李星华, 等. 球阀阀座用聚三氟氯乙烯密封环工艺与性能[J]. 宇航材料工艺, 2020, 50(6): 59-63.
- [11] 茅健, 徐朋, 杨将新, 等. 基于白光扫描干涉的振动补偿方法[J]. 中国机械工程, 2015, 26(10): 1301-1305.
- [12] 张亦孟. 基于扭矩测量的球阀故障识别方法研究[D]. 北京: 北京化工大学, 2020.
- [13] 施钦天, 黄赛荣, 刘辉, 等. 温度变化对球阀扭矩的影响[J]. 阀门, 2023(2): 175-179.

收稿日期: 2024-06-06

(上接第 97 页)

- [8] 吴鑫, 乐源. 一类悬臂梁双侧碰撞系统的全局动力学研究[J]. 重庆理工大学学报(自然科学), 2020, 34(1): 140-147.
- [9] ATTARI DEZFULI M, ZEINODDINI M, MASHHADI HARATI R. An analytical model for the coupled-field dynamic fatigue crack growth in a metallic beam under chaotic excitations[J]. Theoretical and Applied Fracture Mechanics, 2020, 109: 102726.

- [10] 罗冠炜, 谢建华. 一类含间隙振动系统的周期运动稳定性、分岔与混沌形成过程研究[J]. 固体力学学报, 2003, 24(3): 284-292.
- [11] DENTSORAS A J, DIMAROGONAS A D. Resonance controlled fatigue crack propagation in a beam under longitudinal vibrations[J]. International Journal of Fracture, 1983, 23(1): 15-22.

收稿日期: 2023-07-17