

基于 Workbench 的二通阀疲劳分析及结构优化设计

孙亮^{1,2}, 陈希良², 齐明思¹

(1.中北大学, 太原 030051; 2.中国科学院宁波材料技术与工程研究所, 宁波 315201)

摘要: **目的** 为了研发设计某型号二通阀, 使其正常工作 2 年内 (5000 h) 不失效。**方法** 基于 Ansys Workbench 仿真软件对二通阀阀芯撞击盖板过程进行显式动力学分析和疲劳分析, 得到二通阀的薄弱环节, 并对关键易损部位进行优化设计和对比分析。**结果** 将最小截面处直径由 24.5 mm 增至 28 mm 后, 在不影响二通阀密封性能的前提下, 满足二通阀持续工作 5000 h 不发生疲劳破损。**结论** 对二通阀进行显式动力学分析后, 再以阀芯撞击盖板时的最大应力加载阀芯进行了疲劳分析, 使分析结果更为可靠。

关键词: 二通阀; Workbench; 显式动力学; 疲劳分析; 优化设计

中图分类号: TH137.5 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-3563(2016)19-0132-05

Fatigue Analysis and Structure Optimization of Two-way Valve Based on Workbench

SUN Liang^{1,2}, CHEN Xi-liang², QI Ming-si¹

(1.North University of China, Taiyuan 030051, China;

2.Ningbo Institute of Materials Technology & Engineering, Chinese Academy of Sciences, Ningbo 315201, China)

ABSTRACT: The work aims to design a two-way valve to make it normally run over 2 years (5000 h) without failure. Based on the Ansys Workbench simulation software, the explicit dynamics and fatigue for the valve core that impacted the cover plate were analyzed. Weak links of the two-way valve were obtained. Optimization design and contrastive analysis were conducted for key vulnerable elements. When the diameter of the minimum cross section of the valve core was changed from 24.5 mm to 28 mm without affecting the sealing performance of the two-way valve, the optimized two-way valve was able to run continuously for 5000 h without fatigue damage. In conclusion, fatigue analysis is carried out to after explicit dynamics of two-way valve is analyzed and then the maximum stress obtained when the valve element impacts the cover plate is applied to the valve element. Therefore the results of analysis are more reliable.

KEY WORDS: two-way valve; Workbench; explicit dynamics; fatigue analysis; optimization design

二通阀是具有 2 个管路的控制阀, 用以控制流量、压力、方向等^[1]。在注塑机、灌装机等各类包装机械中均有广泛的应用^[2]。某厂液压阀国产化项目欲

研发某型号二通阀, 要求在满足正常工作情况下, 2 年内 (5000 h) 不失效。通过对产品测试发现, 阀芯连续工作 3 h 左右, 在阀芯持续撞击盖板的工况下,

收稿日期: 2016-05-09

基金项目: 宁波市重大科技攻关项目 (2015B11031)

作者简介: 孙亮 (1993—), 男, 黑龙江牡丹江人, 中北大学/中科院宁波材料所联合培养硕士生, 主攻计算机辅助设计与分析、机械系统动态分析等。

通讯作者: 陈希良 (1965—), 男, 湖南岳阳人, 博士, 中科院宁波材料所研究员, 主要研究方向为计算力学、振动和动力学分析等。

阀芯就受到了严重破坏,使得二通阀失效。强度、刚度和疲劳寿命是机械结构的 3 个基本要求,疲劳是结构失效的最主要原因。文中基于 Ansys Workbench 软件对二通阀阀芯撞击盖板的过程进行显式动力学和疲劳分析,以确定易损部位,并对关键易损部位进行优化设计,从而满足应用需求。

1 三维模型及工作原理

在 SolidWorks 中建立二通阀的三维模型,见图 1。二通阀的工作原理:阀芯在下方液压载荷作用下,向上运动直至盖板停止,液压油从下方进入阀套内,并由侧向油口排出;下方载荷消失,阀芯在弹簧力及盖板小孔进入的液压油控制力作用下,回复至与阀套封闭处,关闭下方与侧向油口的通道。阀芯在工作时的运动状况类似活塞,上下运动频率为 30 次/min,下方载荷液压压强约 30 MPa。由于上方弹簧力很小,阀芯与阀套间隙配合,用格来圈作为活塞运动的密封,摩擦阻力也很小,阀芯高速上升撞击盖板。回复时,相应的液压压力和弹簧力较小^[3-4]。

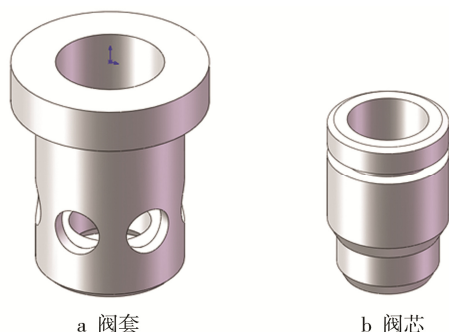


图 1 二通阀三维模型
Fig.1 3D model of two-way valve

2 显式动力学分析

显式算法主要用于高速碰撞及冲压成型过程的仿真。Ansys Explicit STR 是基于 Ansys Workbench 仿真平台环境的结构高度非线性显式动力学分析软件,可以求解二维、三维结构的跌落、碰撞、材料成型等非线性动力学问题^[5]。

2.1 几何模型的建立

利用 SolidWorks 与 Ansys Workbench 的接口,

将所建立的二通阀三维模型以“.x_t”格式导入 Workbench 中。鉴于二通阀形状的复杂性,依据圣维南局部作用原理对非关键部位结构模型进行简化,关键部位结构的特征则全部保留。在研究二通阀撞击盖板问题时,阀套对运动的影响可忽略,弹簧的作用也可通过施加约束来实现,故只保留阀芯和盖板结构,简化后的模型见图 2。根据模型特点进行网格划分(见图 3),有限元网格模型网格单元划分为 9028 个,节点 24 165 个。



图 2 简化后几何模型
Fig.2 Simplified geometric model

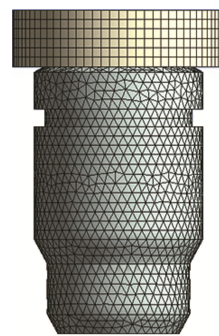


图 3 网格划分后的模型
Fig.3 Meshed model

2.2 材料设定

二通阀的阀芯使用的材料为 40Cr,其余结构均为普通结构钢。40Cr 材料的弹性模量为 0.206 GPa,泊松比为 0.28,屈服应力为 550 MPa,密度为 7.87 g/cm³。

2.3 边界条件及载荷设置^[6]

文中以二通阀为研究对象,结合二通阀的实际工况,将盖板进行固定约束,并对阀芯施加 x, z 方向的位移约束。在阀芯下表面施加 30 MPa 的压力,方向为沿 y 轴正向。通过计算得知阀芯撞击盖板的加速度为 12 mm/s。

2.4 仿真结果分析

有限元显式动力学分析之后,在 Workbench 平台下直接观察结果,二通阀的 Von-Mises 等效应力云图见图 4。可以发现,较大应力发生在撞击时,产生在最小截面(格来圈)处,最大应力为 234.27 MPa。如果阀芯以每分钟 30 次的频率持续在此应力环境下工作,则极易发生疲劳断裂,影响二通阀的使用寿命。

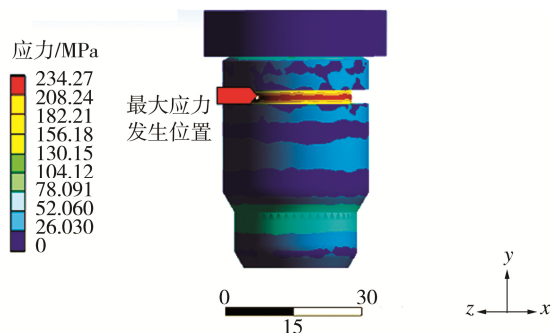


图4 二通阀等效应力云图

Fig.4 Equivalent stress of two-way valve

3 二通阀疲劳寿命分析

疲劳是指材料、零件和构件在循环加载下,在某处产生的局部永久性损伤,并在经历一定循环次数后形成裂纹直至完全断裂的现象^[7]。疲劳理论和试验对于各类承受循环交变载荷的机械结构设计都十分重要^[8]。机械零件的疲劳寿命预测没有理论公式可以解决,现阶段都是依靠有限元技术进行仿真分析^[9]。文中借助 Ansys Workbench 的 Fatigue 模块对阀芯高速冲击盖板的问题进行疲劳分析。疲劳分析的具体过程为:导入几何体—定义材料—添加载荷—插入疲劳模块—求解。

3.1 材料应力-寿命曲线

材料应力-寿命曲线表达式:

$$\lg N = a + b \lg \sigma \quad (1)$$

式中: N 为力的循环次数; σ 为交变应力; a , b 为材料常数。

通过大量实验得到材料 40Cr 的应力-寿命曲线系数 $a=23.945$, $b=-6.861$ 。标准光滑试样的疲劳性能可通过材料的疲劳极限和应力-寿命曲线表征,而实际零件的应力-寿命曲线则需考虑尺寸、形状和表面情况等诸多影响因素,根据疲劳强度降低系数 $K_{\sigma D}$ 修正材料的应力-寿命曲线^[10]。

常用修正公式^[11]

$$K_{\sigma D} = \frac{K_{\sigma}}{\varepsilon} + \frac{1}{\beta} - 1 \quad (2)$$

$$\sigma_{-1D} = \frac{\sigma_{-1}}{K_{\sigma D}} \quad (3)$$

式中: K_{σ} 为疲劳缺口系数; ε 为尺寸系数; β 为表面加工系数; σ_{-1} 为试样疲劳极限; σ_{-1D} 为零件疲劳极限。

取 $K_{\sigma}=1.2$, $\varepsilon=0.7$, $\beta=0.7$, $\sigma_{-1}=421.69$ MPa。计算可得 $K_{\sigma D}=2.1429$, $\sigma_{-1D}=196.79$ 。修正后的零件应力-寿命曲线为:

$$\lg N = a_m + b_m \lg \sigma \quad (4)$$

$$b_m = \frac{(3-a)/b - \lg \sigma_{-1}}{(3-a)/b - \lg \sigma_{-1D}} b = -7.2857 \quad (5)$$

$$a_m = 3 + \frac{b_1}{b} (a-3) = 25.241 \quad (6)$$

零件应力-寿命拟合曲线见图 5。

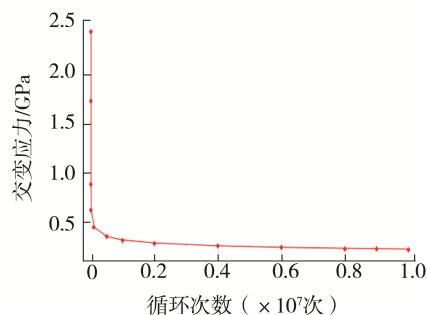


图5 应力-寿命曲线

Fig.5 Stress-life curve

3.2 材料修正

利用材料的应力-寿命曲线进行机械结构疲劳计算时,需要利用材料修正公式来消除平均应力的影响^[12]。Ansys Workbench 中的材料修正公式有: Goodman 公式、Gerber 公式和 Soderberg 公式^[13]。其中 Goodman 公式适用于高强度钢,使得计算结果更具可靠性。故应用 Goodman 公式对其进行修正^[14],其公式为:

$$\sigma_a = \sigma_{-1} \left(1 + \frac{\sigma_m}{\sigma_b} \right) \quad (7)$$

式中: σ_a 为非对称循环的应力幅值; σ_{-1} 为对称循环疲劳极限; σ_m 为非对称循环的应力均值; σ_b 为静强度极限。

3.3 疲劳分析

考虑到实际工况下的应力集中系数、表面质量系数、尺寸系数等因素对机械结构的影响^[15-16],设定其修正理论均为 Goodman,分析类型设置为 stress life^[14];设置无限寿命次数为 1×10^7 次。以显式动力学分析得到的阀芯撞击盖板时最大应力 234.27 MPa 进行加载,分析计算结果见图 6。可以观察得知,在阀芯最小截面处的循环次数均低于 6000 次,即: $6000 \text{ 次} \div 0.5 \text{ 次/s} \approx 3.33 \text{ h}$ 。说明阀芯

在此工作环境下持续工作 3 h 左右,其最小截面处易发生疲劳破坏与实际情况基本吻合,验证了有限元分析的可靠性。

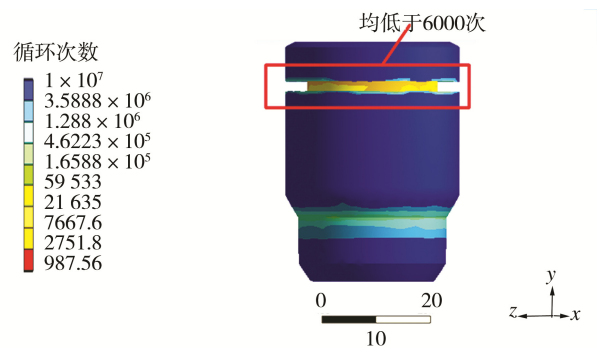


图 6 改进前疲劳寿命
Fig.6 Original fatigue life

4 结构优化设计与对比分析

结合三维建模软件和有限元仿真软件的反复设计和验证,对阀芯最小截面处的结构进行改进。研究发现将其直径由 24.5 mm 增至 28 mm 时,二通阀寿命满足需求。通过实际实验发现此时二通阀仍具有良好的密封性能。

采用第 2 节中方法对阀芯撞击盖板进行显式动力学分析,得到最大应力值为 160.85 MPa,发生在最小截面处,等效应力云图见图 7。采用第 3 节中的分析方法对阀芯进行疲劳分析,以阀芯撞击盖板的最大应力 160.85 MPa 进行加载,得到改进后阀芯最小截面处疲劳循环次数(见图 8)均高于 9×10^6 次。即: $9 \times 10^6 \text{ 次} \div 0.5 \text{ 次/s} = 5000 \text{ h}$ 。说明阀芯在此工作环境下可持续工作 5000 h(2 年)以上,其最小截面处不发生疲劳破坏,满足设计需求。

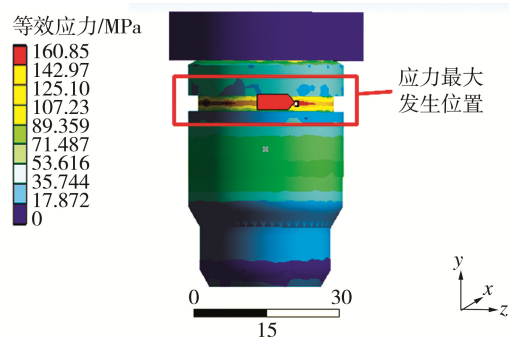


图 7 等效应力云图
Fig.7 Equivalent stress of two-way valve

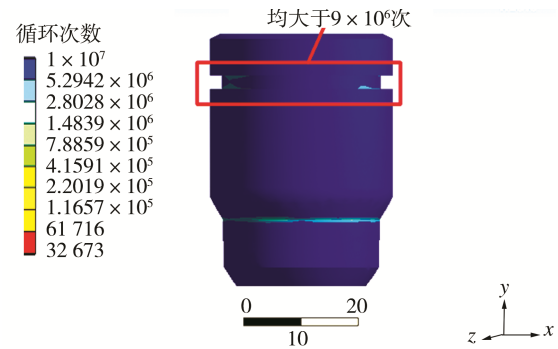


图 8 改进后疲劳寿命
Fig.8 Improved fatigue life

5 结语

1) 利用有限元软件 Ansys Workbench 对某型二通阀进行显式动力学分析,得到了阀芯撞击盖板时的等效应力云图,掌握了阀芯的薄弱部位。利用经验公式得到了零件的应力-寿命曲线表达式,并拟合了曲线图,通过 Fatigue 模块对阀芯疲劳寿命进行研究,得到零件疲劳寿命云图,为预测二通阀整体工作寿命提供参考。改进阀芯关键部位结构后,由有限元仿真结果可预测二通阀的使用寿命将由 3 h 提高至 5000 h,满足设计需求。

2) 对二通阀进行了显式动力学分析,并进行了疲劳分析,以阀芯撞击盖板时的最大应力加载阀芯对其进行寿命分析,使分析结果更接近实际,更加准确,更为可靠,也为功能部件的寿命分析提供了新思路。

参考文献:

[1] 王浩. 智能化控制阀在石油化工中的应用设计[J]. 科技与创新, 2015(21): 115—116.
WANG Hao. Application Design Intelligent Control Valve in the Petrochemical Industry[J]. Science and Technology and Innovation, 2015(21): 115—116.

[2] 姜冰. 液压泵伺服驱动在注塑机中的应用[J]. 机电一体化, 2014(3): 111.
JIANG Bing. Hydraulic Servo Drive in the Application of Injection Molding Machine[J]. Mechanical and Electrical Integration, 2014(3): 111.

[3] 陆一心. 液压阀使用手册[M]. 北京: 化学工业出版社, 2009.
LU Yi-xin. The Hydraulic Valve Manual[M]. Beijing: Chemical Industry Press, 2009.

[4] 李明. 液动阀门电液控制系统的分析与研究[J]. 阀门, 2014(4): 18—20.

- LI Ming. Analysis and Research of Electro Hydraulic Control System for Hydraulic Valve[J]. Valve, 2014(4): 18—20.
- [5] 凌桂龙. ANSYS Workbench 15.0 从入门到精通[M]. 北京: 清华大学出版社, 2014.
- LING Gui-long. ANSYS Workbench 15.0 from Entry to Master[M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2014.
- [6] 傅旻, 林立峰. 钢板热处理前标识设备支撑横梁的强度分析及优化设计[J]. 机械设计与制造, 2016(4): 94—97.
- FU Min, LIN Li-feng. Steel Plate Heat Treatment before Marking Equipment Supporting Crossbeam Strength Analysis and Optimization Design[J]. Mechanical Design and Manufacture, 2016 (4): 94—97.
- [7] 赵宏伟, 马志超, 李秦超, 等. 基于拉伸/压缩模式的扫描电镜下原位高频疲劳材料力学测试平台: 中国, 102331370B[P]. 2013-01-25.
- ZHAO Hong-wei, MA Zhi-chao, LI Qin-chao, et al. Based on the Pattern of Tension/compression under the Scanning Electron Microscope in Situ High Frequency Fatigue Material Mechanics Test Platform: China, 102331370B[P]. 2013-01-25.
- [8] 刘健. 考虑复杂应力状态的焊接结构疲劳寿命估算研究[D]. 南京: 南京航空航天大学, 2009.
- LIU Jian. Considering the Complex Stress State of Welded Structure Fatigue Life Estimation Research [D]. Nanjing: Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 2009.
- [9] 刘光宇. 面向再制造的机床部件剩余寿命预测技术研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2014.
- LIU Guang-yu. Machine Tool Parts of the Residual Life Prediction for Remanufacturing Technology Research [D]. Harbin: Harbin Industrial University, 2014.
- [10] 沈亮. 齿轮疲劳寿命及齿根裂纹仿真分析[D]. 重庆: 重庆大学, 2011.
- SHEN Liang. The Fatigue Life of Gear and Gear Tooth Crack Simulation Analysis[D]. Chongqing: Chongqing University, 2011.
- [11] 范永斌, 尹明德, 丁奇. 基于 ANSYS Workbench 的叉车货叉疲劳寿命研究[J]. 煤矿机械, 2015, 36(1): 105—106.
- FAN Yong-bin, YIN Ming-de, DING Qi. Based on the ANSYS Workbench Forklift Pallet Fork Fatigue Life Research[J]. Journal of coal mine machinery, 2015, 36 (1): 105—106.
- [12] 王军, 邱志平, 金延伟. 疲劳寿命的区间名义应力法及灵敏度分析[J]. 飞机设计, 2012(6): 42—46.
- WANG Jun, QIU Zhi-ping, JIN Yan-wei. Fatigue Life of the Range of Nominal Stress Method and Sensitivity Analysis[J]. Journal of Aircraft Design, 2012(6): 42—46.
- [13] 董聪, 董树利, 刘建华. 非对称荷载下疲劳强度临界值的统一公式[J]. 工程力学, 2001(2): 92—98.
- DONG Cong, DONG Shu-li, LIU Jian-hua. Under Asymmetrical Loading Fatigue Strength Unified Formula of the Critical Value[J]. Journal of Engineering Mechanics, 2001(2): 92—98.
- [14] 苏高峰, 薄玉成, 孔静静, 等. 杆端向心关节轴承动应力下疲劳寿命分析研究[J]. 机械设计, 2013(3): 89—92.
- SU Gao-feng, BO Yu-cheng, KONG Jing-jing, et al. Centripetal Joint Rod End Bearing under the Dynamic Stress Fatigue Life Analysis[J]. Journal of Mechanical Design, 2013(3): 89—92.
- [15] 王维振, 董玉平, 周淑霞, 等. 基于 ANSYS 的生物质成型机平模疲劳寿命分析[J]. 农机化研究, 2011, 33(9): 81—84.
- WANG Wei-zhen, DONG Yu-ping, ZHOU Shu-xia, et al. Based on the ANSYS Biomass Molding Machine Flat Die Fatigue Life Analysis[J]. Journal of Agricultural Mechanization Research, 2011, 33(9): 81—84.
- [16] QI M, SUN L, WANG X, et al. High Gn Shock-cushioning and Energy-absorption-performance Analysis on Aluminum Foam-polyurethane Composite[J]. Metallurgical & Mining Industry, 2015, 7(3): 303—310.