

## 基于 ANSYS 的锻造液压机工作缸缸体可靠性分析

王晓敏<sup>1</sup>, 王雅峰<sup>2</sup>, 张立香<sup>1</sup>, 薛应芳<sup>1</sup>

(1. 河北工程大学机械与装备工程学院, 河北邯郸 056038; 2. 上海大学材料科学与工程学院, 上海 200444)

**摘要:** 考虑随机不确定性因素的影响, 对 50 MN 三梁四柱式锻造液压机工作缸缸体进行可靠性分析。通过 ANSYS/APDL 参数化设计语言, 建立缸体三维参数化模型; 根据应力-强度干涉原理, 建立缸体可靠性模型; 将缸体的几何参数、载荷及屈服强度等参数设为服从一定分布规律的随机变量, 运用 ANSYS/PDS 模块, 采用 Monte-Carlo 模拟技术, 对其进行可靠性仿真, 给出了缸体的可靠度数值; 通过灵敏度分析, 探讨了各不确定性变量对缸体可靠度的影响规律。

**关键词:** 锻造液压机; 缸体; 可靠性分析; 灵敏度; ANSYS

**中图分类号:** TG315.4

**文献标志码:** A

## Reliability analysis of working cylinder body of forging hydraulic press based on ANSYS

WANG Xiaomin<sup>1</sup>, WANG Yafeng<sup>2</sup>, ZHANG Lixiang<sup>1</sup>, XUE Yingfang<sup>1</sup>

(1.College of Mechanical and Equipment Engineering, Hebei University of Engineering, Hebei Handan, 056038, China; 2.School of Materials Science and Engineering, Shanghai University, Shanghai, 200444, China)

**Abstract:** Considering the influence of random uncertain factors, the reliability analysis for the working cylinder body of the 50MN three-beam and four-post forging hydraulic press is carried out. Using parametric design language ANSYS (APDL), the three-dimensional parametric model of cylinder body is established. According to the stress-strength interference principle, the reliability model of cylinder is constructed. Setting the geometry size, load and material strength of the working cylinder body as random variables obeying a certain distribution, using the ANSYS/PDS module and Monte-Carlo simulation technology, the paper analyzes the reliability of the cylinder body. Through the sensitivity analysis, the influence of the uncertainty variables on the cylinder body reliability is discussed. This study can provide a theoretical basis for the design of the working cylinder body of the forging hydraulic press, and it has important significance for the reliability research of the cylinder block.

**Key words:** forging hydraulic press; cylinder body; reliability analysis; sensitivity; ANSYS

液压机作为一种采用高压液体传送工作压力的基础设备, 在机械生产制造行业得到了广泛应用。随着现代化工业技术的不断发展, 人们对锻造产品的要求不断提高, 为满足广大用户的需求, 相继出现了许多高技术含量的重型锻造液压机。采用先进的设计技术, 提高锻造液压机的设计质量, 已成为广大学者关注的焦点。但是目前对锻造液压机的设计分析大多是在确定性参数下进行的。然而, 在实

际工程中, 锻造液压机受加工、制造、装配等因素的影响, 使得零部件的几何参数、载荷参数和材料参数等设计参数不再是一个确定性的值, 而是存在很大的不确定性。此时, 如果仍然采用确定性设计方法对锻造液压机进行设计, 其质量必然不能满足工程需求。因此, 针对不确定性因素影响的锻造液压机设计逐渐引起人们的关注。如戴庆辉等<sup>[1]</sup>在考虑几何参数、载荷参数和材料参数等不确定性因

素的影响下,对大型液压机架进行了强度可靠性分析和灵敏度分析。刘忠伟等<sup>[2]</sup>利用大型有限元分析软件(MARC)对液压机主工作缸进行了应力分析,并根据应力-强度干涉模型对主工作缸的结构可靠度进行了研究。本文运用ANSYS/PDS模块对50 MN三梁四柱式锻造液压机工作缸缸体进行了仿真分析,探究了各不确定性量对缸体可靠性的影响,以期对锻造液压机工作缸缸体的可靠性设计提供技术支持。

## 1 可靠性相关概念

在结构可靠性分析中<sup>[3-4]</sup>,影响产品的设计变量包括几何尺寸、材料性能和载荷等,描述成具有一定概率分布的随机不确定性参数,这些含有不确定性分布的随机参数称为基本变量(basic variables),又称随机变量。结构的可靠度求解公式为:

$$R = Pr\{g(X) \geq 0\} = \int_{g(X) \geq 0} f_X(X) dX \quad (1)$$

式中,  $X=(x_1, x_2, \dots, x_n)$  为结构的随机变量矢量;  $f_X(X)$  为随机变量  $X=(x_1, x_2, \dots, x_n)$  的联合概率密度函数;  $Pr$  表示取概率;  $g(X)$  是关于各随机变量的函数,即  $g(X)=g(x_1, x_2, \dots, x_n)$ , 用来表示结构处于失效与安全的状态函数,被称为性能函数。当性能函数  $g(X)=0$  时,结构处于可靠与不可靠的临界状态,即结构的极限状态,因此性能函数又称为极限状态函数;当  $g(X)>0$  时,结构处于可靠状态,此区域被称为安全域;当  $g(X)<0$  时,结构处于不可靠状态,此区域被称为失效域。一般情况下,在求解可靠度时,结构的临界状态即  $g(X)=0$  亦归为可靠域。结构的可靠度  $R$  即为性能函数  $g(X) \geq 0$  的概率。

## 2 三梁四柱式锻造液压机工作缸缸体模型

### 2.1 缸体有限元建模

50 MN三梁四柱式锻造液压机缸体的结构图如图1所示。建模时根据该缸体的对称性,为减少计算量,取缸体的1/4进行有限元建模。采用ANSYS/APDL参数化设计语言(ANSYS Parameter Design Language)直接构建缸体的参数化模型,并使用\*set命令定义参数化变量,共需要定义7个直径尺寸变量  $D_1 \sim D_7$  和5个长度尺寸变量  $L_1 \sim L_5$ , 以及1个材料属性变量  $S$  和1个载荷变量  $P$ , 共计14个基本变量。选用实体结构单元 SOLID185 即8节点3D六

面体单元对实体模型进行网格划分,建立的有限元模型如图2所示。

### 2.2 可靠性建模

根据应力-强度干涉模型,建立缸体的可靠性模型为:

$$R = Pr\{S - S_{max} > 0\} \quad (2)$$

式中,  $S$  为许用应力;  $S_{max}$  为缸体的最大应力;  $S - S_{max}$  为性能函数  $G(X)$ 。当缸体的最大应力大于许用应力时,性能函数  $G(X) = S - S_{max} < 0$ , 缸体处于失效状态;当时  $S_{max} \leq S$ , 性能函数  $G(X) = S - S_{max} \geq 0$ , 缸体处于可靠状态。 $S_{max}$  是关于前述定义的14个基本变量的隐函数,通过ANSYS静力学分析获得。

## 3 可靠性仿真分析

### 3.1 施加载荷和约束

参照文献[5]对缸体施加的载荷和约束如图3所示,具体为:(1)在缸体1/4模型的分离面上施加对称约束, SYMM; (2)对上法兰面施加法向约束(即

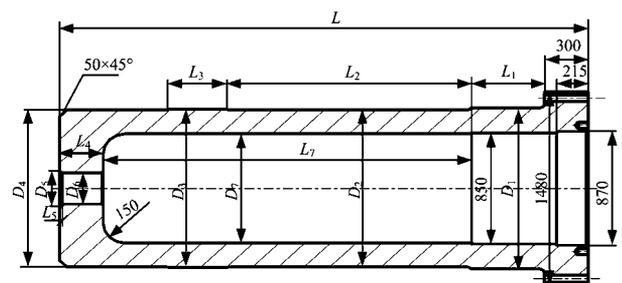


图1 缸体结构图

Fig.1 Structural diagram of the cylinder body

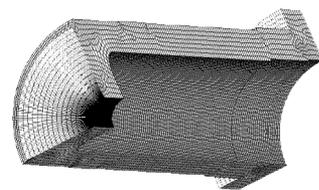


图2 缸体有限元模型图

Fig.2 Finite element model of the cylinder body

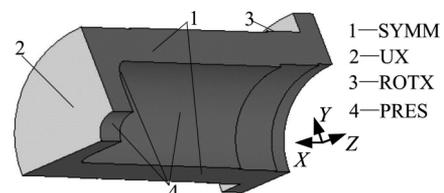


图3 缸体载荷与约束的施加

Fig.3 The load and constraint of the cylinder body

X 方向的约束), UX; (3) 在缸体与上横梁相配合的环形面上施加周向约束, ROTX; (4) 在缸体内部施加压力载荷, PRES。

### 3.2 生成分析文件

将节点的等效应力取绝对值,然后按升序排列,使用 \*get 命令提取应力最大值并赋值给  $S_{max}$ , 并建立性能函数  $g(X) = S - S_{max}$ 。整理建立有限元模型、施加载荷和约束以及构建性能函数的 ANSYS/APDL 命令流,生成缸体可靠性分析文件(.txt 文件),进入 ANSYS/PDS 分析模块进行可靠性分析。

### 3.3 设定输入变量和输出变量

在对缸体进行可靠性仿真分析时,设定的随机输入变量如表 1 所示。仿真分析的输出变量即为缸体的性能函数  $g(X)$ 。

表 1 中 GAUS 表示正态分布。提取 ANSYS 定义输入变量和输出变量的 APDL 命令流,生成可靠性分析数据库。

### 3.4 选取分析方法

ANSYS/PDS 概率模块提供了两种可靠性分析方法:蒙特卡罗法(Monte Carlo, MC)和响应面法(Response Surface Method, RSM)法<sup>[6]</sup>。其中,在采用 MC 法进行仿真时,可采用的抽样方法有直接抽样法和拉丁超立方抽样法(简称 LHS 抽样法);

表 1 随机输入变量  
Tab.1 Random input variables

随机变量	分布类型	均值	标准差
直径 $D_1$ /mm	GAUS	1 230	4
直径 $D_2$ /mm	GAUS	1 200	4
直径 $D_3$ /mm	GAUS	1 210	4
直径 $D_4$ /mm	GAUS	1 200	4
直径 $D_5$ /mm	GAUS	256	3
直径 $D_6$ /mm	GAUS	240	3
直径 $D_7$ /mm	GAUS	820	3
长度 $L_1$ /mm	GAUS	500	3
长度 $L_2$ /mm	GAUS	1 680	4
长度 $L_3$ /mm	GAUS	400	3
长度 $L_4$ /mm	GAUS	300	3
长度 $L_5$ /mm	GAUS	10	2
许用应力 $S$ /MPa	GAUS	300	22
内部压强 $P$ /MPa	GAUS	60	12

而 RSM 法中抽样方法则包括中心合成设计抽样和矩阵抽样。MC 法是最简单、最直观、最精确的可靠性分析方法,也是概率分析中最常用的方法<sup>[7-8]</sup>。MC 法求解可靠度的基本原理为:由基本随机变量的联合概率密度函数产生  $N$  组基本变量的随机样本  $X_j (j=1, 2, \dots, N)$ , 将这  $N$  个随机样本代入功能函数  $g(X)$  中,统计落入可靠区域  $g(X) \geq 0$  的样本个数  $N_R$ ,用安全时发生的频率  $N_R / N$  近似的代替可靠度  $R$ 。MC 法的一个仿真循环就代表将一个加工制造的零件进行一次在特定载荷和边界条件作用下的静力学分析,即一次抽样试验,循环次数越多,说明抽样数目越大,精度就越高<sup>[9-10]</sup>。由于 LHS 抽样法具有抽样“记忆”功能,可以避免直接抽样法数据点集中而导致的仿真循环重复问题<sup>[11-12]</sup>。因此,本文选择 MC 模拟技术中的 LHS 抽样法进行仿真分析。

## 4 仿真结果分析

### 4.1 抽样次数分析

在对缸体进行可靠性分析时,设置的仿真次数为 1 000。当 MC 仿真分析结束,在进行结果分析之前,首先要确定仿真的结果是否能够真实反映结构的可靠性。图 4 为性能函数的抽样历程。由图 4 可以看出,当抽样次数达到 750 次之后,输出变量的抽样历程已经趋于平稳,置信区间的间隔变化也逐渐趋于平稳。这说明本次仿真所设置的 1 000 次仿真次数足够反应缸体样本空间的特性,模拟抽样的次数足够多,仿真结果是可信的,已能够真实地反映缸体的可靠性。

### 4.2 可靠度与累积分布分析

通过 ANSYS/PDS 模块的 Prob Results 的 Proba-

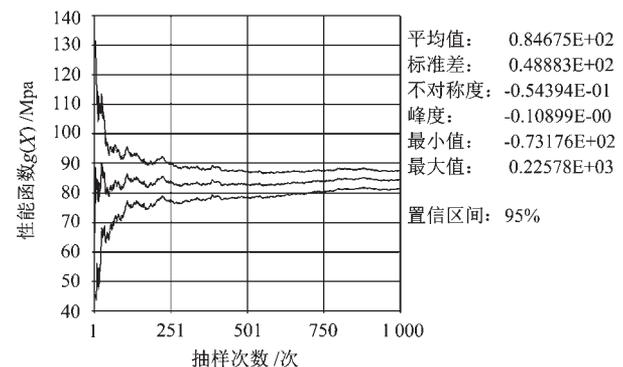


图 4 性能函数抽样历程

Fig.4 Sampling process of performance function

bilitise 命令查看缸体的可靠度得出, 当置信度为 95 时, 缸体性能函数的概率即缸体的可靠度为 0.953 006, 满足可靠度要求。通过 CumulativeD 命令查看缸体的累积分布曲线, 如图 5 所示。

由图 5 可以看出, 性能函数的分布占据了主要空间, 通过该图可获得缸体性能函数,  $C$  取任意值时的可靠度, 这为计算缸体在大于给定目标控制值的概率(即可靠度)提供了方便。

### 4.3 灵敏度分析

灵敏度是可靠性分析中一个非常重要的参数, 可以反映出随机变量的参数变化对可靠度的影响程度。在设计和制造过程中, 应严格控制对可靠度影响较大的随机变量, 可以得到更可靠质量更好的产品。如图 6 为缸体可靠度对随机输入变量的灵敏度图。条状图按灵敏度的数值大小从左到右依次排列, 刻度以上的表示可靠度与该随机变量成正比, 刻度以下的表示可靠度与该随机变量成反比。饼状图从 12 点方位轴线开始, 按灵敏度的数值大小呈顺时针

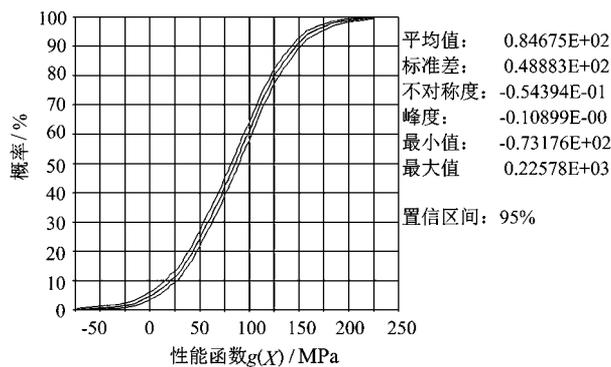


图 5 性能函数累积分布曲线

Fig.5 Cumulative distribution of performance function

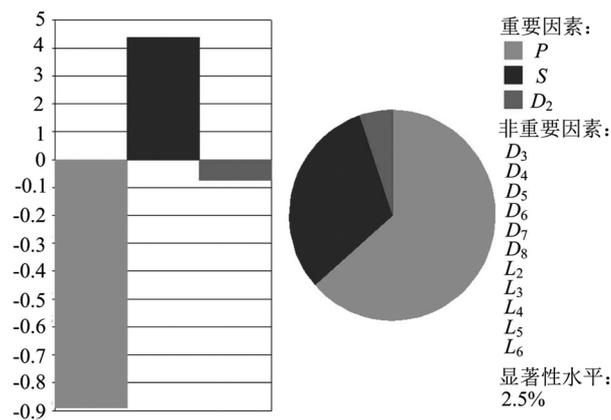


图 6 随机变量灵敏度图

Fig.6 Random variables sensitivity

旋转排列。条状图不仅能反映各随机变量对可靠度的影响程度, 而且能反映可靠度的变化规律, 但是饼状图只能反映随机变量对可靠度的影响程度。

由图 6 可以看出, 在显著性水平为 2.5% 时, 对缸体可靠性影响最大的不确定性因素为内部压强  $P$ 、许用应力  $S$  和直径  $D_2$ , 其余均为非重要因素。许用应力  $S$  对可靠性的灵敏度为正值, 缸体的可靠度随着许用应力  $S$  随机分布均值的增大而升高。内部压强  $P$  和直径  $D_2$  对可靠性的灵敏度为负值, 缸体的可靠度随着其随机分布均值的增大而降低。

### 4.4 应分布分析

当各不确定性量取随机分布的均值时, 缸体的等效应力云图如图 7 所示。

由图 7 可以看出, 当随机变量取均值时, 缸体的最小应力为 0.159 826 MPa, 最大应力为 217.769 MPa, 最大应力发生在缸体的内壁位置。

## 5 结论

1) 通过 ANSYS/APDL 命令流建立了锻造液压机缸体的参数化模型, 并根据应力 - 强度干涉模型建立缸体的可靠性模型。

2) 采用 ANSYS/PDS 模块对缸体进行可靠性分析, 得出当前不确定性分布下缸体的可靠度为 0.953 006, 对缸体可靠性影响最大的不确定性因素为内部压强  $P$ 、许用应力  $S$  和直径  $D_2$ , 且缸体的最大应力发生在其内壁位置。

3) 建立了缸体可靠性分析文件, 通过修改分析文件的相关数据, 即可在不同随机分布参数下对缸体进行可靠性分析。

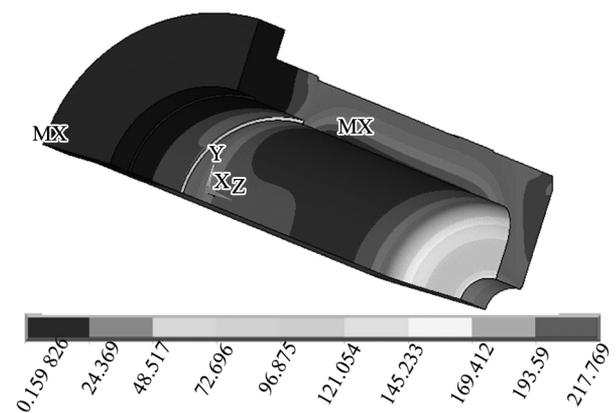


图 7 缸体等效应力云图

Fig.7 Equivalent stress of the cylinder body

## 参考文献:

- [1] 戴庆辉, 方俊元. 基于响应面法的液压机机架可靠性设计[J]. 计算机辅助工程, 2013, 22(1): 30-32.
- [2] 刘忠伟, 刘少军, 邓英剑, 等. 巨型模锻水压机主工作缸的可靠性分析[J]. 锻压技术, 2007, 32(2): 82-86.
- [3] 王正. 零部件与系统动态可靠性建模理论与方法[D]. 沈阳: 东北大学, 2008.
- [4] PECHT M G, KAPUR K C, 康锐, 等. 可靠性工程基础[M]. 北京: 电子工业出版社, 2011.
- [5] 杨振民. 45 MN 快锻液压机本体关键部件结构设计与分析[D]. 秦皇岛: 燕山大学, 2009.
- [6] 宫恩祥, 黄铭科, 叶娟, 等. 基于 ANSYS 的液力透平轴可靠性分析[J]. 石油机械, 2011, 39(1): 39-42.
- [7] 彭翠玲, 艾华宁, 刘青松, 等. 基于 ANSYS 的压力容器可靠性分析[J]. 核动力工程, 2009, 30(1): 109-111.
- [8] SOBEY A J, BLAKE J I R, SHENOI R A. Monte Carlo reliability analysis of tophat stiffened composite plate structures under out of plane loading[J]. Reliability Engineering and System Safety, 2013, 110: 41-49.
- [9] 叶勇, 郝艳华, 张昌汉. 基于 ANSYS 的结构可靠性分析[J]. 机械工程与自动化, 2004 (6): 63-65.
- [10] 张爱华, 任工昌. 基于 ANSYS 的概率设计的高速电主轴抗共振的可靠性分析[J]. 机械设计与制造, 2010 (7): 112-114.
- [11] GOU Tong, LI Aiqun, MIAO Changqing. Monte Carlo numerical simulation and its application in probability analysis of long span bridges[J]. Journal of Southeast University: English Edition, 2005, 21(4): 469-473.
- [12] 张洪才, 何波. 有限元分析: ANSYS13.0 从入门到实战[M]. 北京: 机械工业出版社, 2011.  
(责任编辑 王利君)
- 
- (上接第 85 页)
- [2] 汤连生, 周翠英. 渗透与水化学作用之受力岩体的破坏机理[J]. 中山大学学报, 1996, 35(6): 95-100.
- [3] ERGULAR Z A, RUGLAR R, ULUSAY R. Water-induced variations in mechanical properties of clay-bearing rock[J]. International Journal of Rock Mechanics Sciences, 2009, (46): 355-370.
- [4] 周翠英, 谭祥韶, 邓毅梅, 等. 特殊软岩软化的微观机制研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2005, 24(3): 394-400.
- [5] 孙强, 姜春露, 朱术云, 等. 饱水岩石水稳试验及力学特性研究[J]. 采矿与安全工程学报, 2011, 28(2): 236-240.
- [6] 张春会, 赵全胜. 饱水度对砂岩模量及强度影响的三轴试验[J]. 岩土力学, 2014, 35(4): 951-958.
- [7] 郭军, 冯国瑞, 郭玉霞, 等. 饱和水煌斑岩单轴压缩力学特性变化及其微观机理[J]. 煤炭学报, 2015, 40(2): 323-330.
- [8] 王伟, 刘桃根, 吕军, 等. 水岩化学作用对砂岩力学特性影响的试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2012(31): 3607-3617.
- [9] 丁梧秀, 冯夏庭. 化学腐蚀下灰岩力学效应的实验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2004, 23(21): 3571-3576.
- [10] 刘建, 乔丽苹, 李鹏. 砂岩弹塑性力学特性的水物理化学作用效应 - 试验研究与本构模型[J]. 岩石力学与工程学报, 2009, 28(1): 20-29.
- [11] 滕宏伟, 任松, 姜德义, 等. 共和隧道页岩饱水软化试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2010, 29(21): 2657-2661.
- [12] 夏冬, 袁雪涛. 浸水时间对饱水岩石抗剪强度参数影响的试验研究[J]. 2015, 35(12): 65-69.
- [13] 金成, 王芳, 石崇. 泥页岩浸水力学特性试验研究[J]. 长江科学院院报, 2017, 34(9): 122-126.
- [14] 谢和平, 彭瑞东, 鞠杨. 岩石变形破坏过程中的能量耗散分析[J]. 岩石力学与工程学报, 2004, 23(21): 3565-3570.
- [15] 黄达, 黄润秋, 张永兴. 粗晶大理岩单轴压缩力学特性的静态加载速率效应及能量机制试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2012, 31(2): 245-255.  
(责任编辑 王利君)