

产品·设计

# 六西格玛管理在O形橡胶密封圈内径控制中的应用

赵 晴

(中国航空工业集团公司 金城南京机电液压工程研究中心,江苏 南京 211100)

**摘要:**通过六西格玛管理DMAIC(定义、测量、分析、改善、控制)流程并结合Minitab软件,对O形橡胶(氟硅橡胶)密封圈(简称O形密封圈)内径控制进行研究。通过试验数据分析得出O形密封圈影响因子最优组合,通过回归分析确定O形密封圈内径的关键影响因子,通过流程控制使O形密封圈内径合格率得到提高。

**关键词:**O形橡胶密封圈;六西格玛;DMAIC流程;内径;控制

**中图分类号:**TQ336.4<sup>+</sup>2;TH165<sup>+</sup>.4

**文献标志码:**A

**文章编号:**1000-890X(2021)04-0286-05

**DOI:**10.12136/j.issn.1000-890X.2021.04.0286



OSID开放科学标识码  
(扫码与作者交流)

O形橡胶密封圈(简称O形密封圈)作为常见的橡胶密封件,结构简单、性能可靠、拆装方便,广泛应用于飞机液压和气动系统<sup>[1-4]</sup>,其中O形特种橡胶(氟橡胶、硅橡胶和氟硅橡胶等)密封圈由于其出色的耐高温、耐低温和耐油等性能得到了越来越多的应用<sup>[5-8]</sup>。但由于胶料收缩率较大和波动范围较宽,O形密封圈生产中常常出现尺寸超差<sup>[9]</sup>,因此寻找O形密封圈的胶料收缩规律并掌握其尺寸控制的方法,具有重要意义。

六西格玛管理是一种质量流程管理与统计技术相结合的方法,遵循一套完善的改进流程<sup>[10]</sup>,运用统计工具分析数据,将数据转换成改进决策。六西格玛管理分为定义、测量、分析、改善和控制(DMAIC)5个阶段,每个阶段都有相应的管理工具和方法。六西格玛管理比传统的质量管理更敏捷、更具前瞻性<sup>[11]</sup>,在航空工业中得到了广泛应用<sup>[12]</sup>。

本工作以某规格O形氟硅橡胶密封圈为例,采用六西格玛管理方法,分析影响O形密封圈内径的因素,对其进行改进流程控制,提高产品质量。

## 1 六西格玛概述

六西格玛在统计学上表示一个流程或产品在100万次使用机会中只出现3.4个缺陷,六西格玛管理的目标是消除变量、优化流程、提高质量,满足客户需求<sup>[13]</sup>。

依靠统计学解决问题是六西格玛管理的特点,其运用因果图、流程图、时间序列图、矩阵图和回归分析等工具进行数据分析。而Minitab软件作为一个全面的统计分析工具,提供了普通统计学涉及的大多数功能,并包含了大量的质量工具,可以绘制多种统计图形,直接显示数据分析的过程与结果,充分满足六西格玛管理各个阶段的数据测量、收集、分析和改进的需求,是实施全面六西格玛管理的重要工具<sup>[14]</sup>。

## 2 O形密封圈内径改进与控制

### 2.1 定义阶段

O形密封圈的主要尺寸有内径和截面直径(见图1),但经统计O形密封圈内径超差频率远大于截面直径,同一批次O形密封圈内径差别较

**作者简介:**赵晴(1984—),女,河北辛集人,中国航空工业集团公司金城南京机电液压工程研究中心工程师,硕士,主要从事橡胶制品模压硫化成型工艺研究和管理工作的。

**E-mail:**13739192626@139.com

**引用本文:**赵晴.六西格玛管理在O形橡胶密封圈内径控制中的应用[J].橡胶工业,2021,68(4):286-290.

**Citation:**ZHAO Qing. Application of six sigma management in inner diameter control of rubber O-ring[J]. China Rubber Industry, 2021, 68(4): 286-290.

大是影响产品合格率的重要原因。本工作以内径 (75±0.4) mm的O形密封圈为例进行分析。

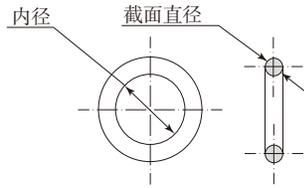


图1 O形密封圈示意  
Fig. 1 Diagram of O-ring

2.2 测量阶段

目前O形密封圈内径的检测方法是将密封圈套在有尺寸刻度的圆锥上,利用重力自然下落,读取最终所在水平线的刻度值。由于测量仪器经过校准,因此测量误差主要来自于检验员的操作和读数。为验证该测量系统的可靠性,需进行抽样调查,方法如下:随机选出10个O形密封圈,由2名检验员分别测量内径并重复操作1次,检测结果如表1所示。

表1 O形密封圈内径测量数据  
Tab. 1 Measurement data of O-ring inner diameters mm

序 号	检验员1		检验员2	
	第1次	第2次	第1次	第2次
	1	74.20	74.20	74.20
2	74.95	75.00	75.00	75.00
3	75.30	75.30	75.30	75.30
4	75.15	75.15	75.15	75.20
5	74.35	74.35	74.35	74.35
6	74.30	74.35	74.30	74.30
7	75.70	75.70	75.70	75.70
8	75.20	75.20	75.15	75.15
9	75.10	75.10	75.10	75.10
10	74.80	74.80	74.80	74.80

利用Minitab软件对表1数据进行精确度分析,结果表明合计量具重复性和再现性(R&R)为11.75%(<30%),表示测试的重复性与再现性水平较高,测量系统可接受;可区分的类别数为37 (>4),表明测量系统分辨不合格能力较好,能够用于参数分析,测量系统合格。

2.3 分析阶段

该阶段通过数据分析确定影响输出的关键影响因子,是六西格玛管理DMAIC流程中的中枢阶段。

首先通过因果图寻找O形密封圈内径控制影响因子,从操作者、设备、材料、环境、测量系统和工艺方法6个方面分析,排除设定因素,初步确定模具尺寸、胶料收缩率、胶料返炼时间、胶料停放时间、用料质量、硫化压力8个影响因子,见图2。

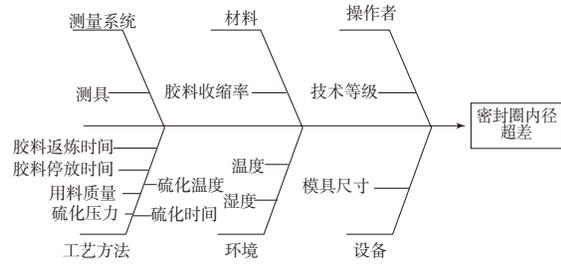


图2 因果图  
Fig. 2 Diagram of causes and effect

由于胶料的线膨胀因数较钢材大约20倍,因此经模压硫化、启模、冷却至室温后,橡胶制品会产生较大收缩,目前常用的模压橡胶制品胶料收缩率(C)计算公式如下:

$$C = \frac{L_2 - L_1}{L_2} \times 100\% \quad (1)$$

式中,  $L_1$  是室温时橡胶制品尺寸,  $L_2$  是室温时模具型腔尺寸<sup>[15]</sup>。

在O形密封圈的实际生产中,硫化温度和硫化时间是根据胶料性质和产品尺寸共同确定的,无法更改,因此再排除其作为影响因子;模具尺寸是按胶料收缩率3.2%制作的,已经固定,也排除其作为影响因子。最终选定O形密封圈内径的影响因子为胶料收缩率、胶料返炼时间、胶料停放时间、用料质量和硫化压力。

为了判定各影响因子对O形密封圈内径的影响,需用统计学中假设检验的P值法。P值表征某一事件发生的概率,P值小于0.05表示有统计学上的显著差异,即对立假设成立。同时,用回归分析方法评定各影响因子对结果的贡献率( $R^2$ ), $R^2$ 越接近100%,表示选定的影响因子对结果波动的贡献率越大。当P值小于0.05且 $R^2$ 值较大时,表明找到了关键的影响因子。

随O形密封圈生产收集的数据如表2所示。其中,由于胶料外购,因此胶料的收缩率无法控制,此处按经验设定胶料收缩率。使用Minitab软件作回归分析,检验其回归模型是否成立(P值是否小于0.05),并评定各影响因子对O形密封圈内径影

表2 O形密封圈生产数据  
Tab.2 Producing data of O-rings

序号	胶料收缩率/%	胶料返炼时间/min	胶料停放时间/min	用料质量/g	硫化压力/MPa	密封圈内径/mm
1	3.20	4	40	4.0	12	75.20
2	3.20	6	40	4.0	12	75.25
3	3.20	8	40	4.2	12	75.30
4	3.20	10	40	4.1	12	75.30
5	3.20	6	20	3.8	12	74.30
6	3.20	6	360	3.9	12	74.50
7	3.20	6	1 440	4.1	12	75.25
8	3.20	6	4 320	4.2	12	75.30
9	3.20	6	30	4.0	12	75.25
10	3.20	6	40	3.0	12	74.20
11	3.20	6	65	3.0	6	74.55
12	3.20	6	90	3.2	7	74.75
13	3.20	6	120	3.4	8	74.70
14	3.20	6	40	3.8	9	74.80
15	3.20	6	100	3.9	10	75.15
16	3.20	6	130	3.8	12	75.00
17	3.20	6	40	4.0	12	74.90
18	3.20	6	65	4.4	14	75.20
19	3.20	6	90	3.4	6	74.65
20	3.20	6	150	3.5	8	74.80
21	3.20	6	40	3.6	9	74.85
22	3.20	6	85	3.8	10	75.00
23	3.20	6	110	4.3	13	75.20
24	3.20	6	135	4.5	15	75.30
25	2.50	6	40	3.5	12	75.50
26	2.60	6	40	3.5	12	75.40
27	2.70	6	40	3.5	12	75.40
28	2.80	6	40	3.5	12	75.30
29	2.90	6	40	3.5	12	75.20
30	3.00	6	40	3.5	12	75.10
31	3.10	6	40	3.5	12	75.10
32	3.30	6	40	3.5	12	74.90
33	3.40	6	40	3.5	12	74.90
34	3.50	6	40	3.5	12	74.80

响的 $R^2$ 。O形密封圈内径与胶料收缩率、用料质量及硫化压力的回归分析结果如图3所示。

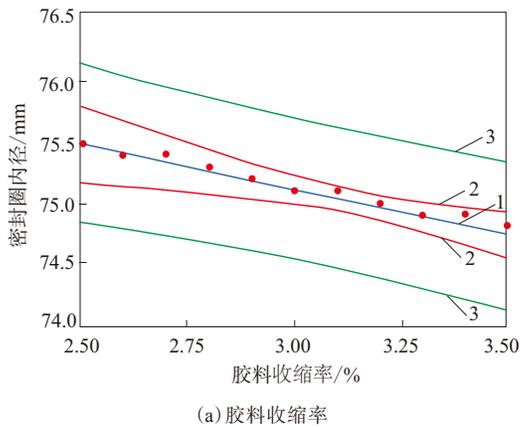
据计算,胶料收缩率、用料质量和硫化压力3个回归模型的 $P$ 值分别为0.003,0.003和0.005,均不大于0.05,说明3个影响因子对O形密封圈内径统计相关,其 $R^2$ 分别为21.5%,21.9%和20.0%,三者之和为63.4%,说明这3个影响因子为影响O形密封圈内径的关键影响因子。

#### 2.4 改善与控制阶段

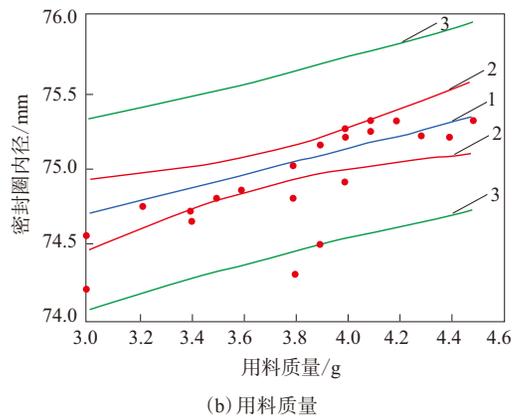
该阶段要确定关键影响因子及其之间的交互影响,以利于O形密封圈内径达到最优值,完成流程改善,使O形密封圈质量的缺陷或变异减至最小。

本阶段对O形密封圈内径的影响因子进行试验设计并分析,采用“一次一个+保留胜者”的方法进行试验,对第1个影响因子设置不同的数值,其他影响因子不变,试验确定令O形密封圈内径达到最优的数值,并固定下来,之后继续对第2个影响因子进行数值设置和试验,从而得到最佳组合。试验结果表明,O形密封圈内径影响因子的最优组合为:胶料收缩率为3.2%,胶料返炼时间为8 min,胶料停放时间为20 min,用料质量为2.6 g,硫化压力为12 MPa。

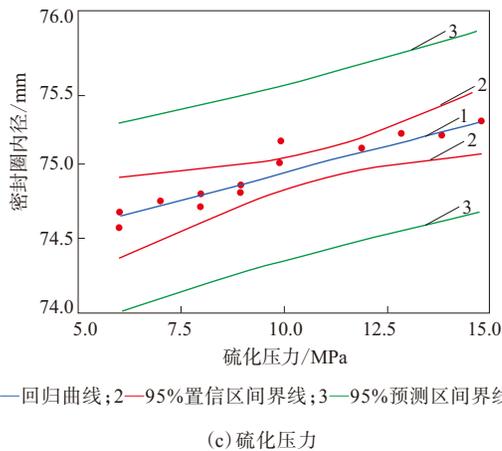
使用Minitab软件做O形密封圈内径与胶料收缩率、胶料返炼时间、胶料停放时间、用料质量及硫化压力的矩阵图,评定多个因子间的相关性并



(a) 胶料收缩率



(b) 用料质量



1—回归曲线; 2—95%置信区间界线; 3—95%预测区间界线。

(c) 硫化压力

图3 O形密封圈内径与3个影响因子的回归分析  
Fig.3 Regression analysis of inner diameter of O-ring and three influence factors

得出以下结论:O形密封圈内径与胶料收缩率呈负相关,与用料质量和硫化压力呈正相关,与胶料返炼时间和停放时间关系不明显。

根据影响因子最优组合和关键影响因子对O形密封圈内径的影响方式,可采用相应的方法进

行O形密封圈内径流程控制。其中,胶料收缩率无法改变,但可通过首检提前确定,然后调整工艺参数(用料质量和硫化压力的增大都会导致密封圈内径增大)。调整结果落实到相应的工艺文件中,由操作人员参照执行,从而提高O形密封圈内径的合格率。

按照流程控制计划执行后,随机抽取生产中的25个样件进行测量,测量结果见表3。改进后O形密封圈内径保持在(75±0.2) mm的范围内,达到了可控制的稳定状态。

表3 流程控制后O形密封圈内径的测量结果  
Tab.3 Measurement results of inner diameter of O-rings after process control mm

序号	密封圈内径	序号	密封圈内径
1	74.90	14	74.80
2	74.80	15	74.90
3	75.10	16	74.80
4	74.80	17	74.95
5	75.00	18	75.00
6	75.20	19	74.85
7	75.00	20	75.15
8	74.90	21	75.20
9	74.80	22	75.15
10	74.80	23	75.10
11	75.10	24	75.15
12	74.95	25	75.15
13	74.80		

### 3 结论

六西格玛管理作为一种系统科学的管理方法,适用于产品设计、生产和维护等各个环节,在航空工业得到了大力推广。本工作在O形密封圈内径控制中开展六西格玛管理,使用六西格玛管理DMAIC流程分析O形密封圈内径的影响因子,得出影响因子最优组合,确定关键影响因子为胶料收缩率、用料质量和硫化压力,其中胶料收缩率与O形密封圈内径呈负相关,用料质量和硫化压力与O形密封圈内径呈正相关,通过流程控制使O形密封圈内径的合格率得到了提升。

### 参考文献:

[1] 徐金鹏,胡荣霞. O形橡胶密封圈泄露问题的原因分析及预防措施[J]. 橡胶工业,2013,60(11):677-681.  
XU J P, HU R X. Root cause analysis of leakage of rubber O-ring

- seal and corrective actions[J]. China Rubber Industry, 2013, 60(11): 677-681.
- [2] 窦志伟, 李俊昇. 某型飞机用O形密封圈工艺稳定性研究[J]. 航空标准化与质量, 2008(4): 29-33.  
DOU Z W, LI J S. Study on the process stability of O-ring in an aircraft[J]. Aeronautic Standardization & Quality, 2008(4): 29-33.
- [3] 王红. 飞机用O型橡胶密封圈测绘与设计[J]. 航空维修与工程, 2011(4): 68-69.  
WANG H. Survey and design of aircraft rubber O-ring seal[J]. Aviation Maintenance & Engineering, 2011(4): 68-69.
- [4] 刘浩平. 某型航空O形橡胶密封圈性能测试系统的研究[D]. 沈阳: 东北大学, 2012.  
LIU H P. Research on performance test system of a certain type of aviation O-shaped rubber sealing ring [D]. Shenyang: Northeastern University, 2012.
- [5] 徐聰, 陆浩, 周毅博, 等. 氟硅橡胶与氟橡胶O形圈密封性能仿真[J]. 航空发动机, 2019, 45(5): 48-52.  
XU C, LU H, ZHOU Y B, et al. Simulation of sealing performance of fluorosilicone rubber O-ring and fluoro rubber O-ring[J]. Aeroengine, 2019, 45(5): 48-52.
- [6] 杨璠, 陈风波, 王腾, 等. 氟弹性体在航天航空领域的应用[J]. 化学与黏合, 2019, 41(1): 62-67.  
YANG F, CHEN F B, WANG T, et al. Application of fluoroelastomer in aerospace area[J]. Chemistry and Adhesion, 2019, 41(1): 62-67.
- [7] 朱淮军, 李凤仪, 廖洪流. 氟硅橡胶制品的生产及应用概况[J]. 橡胶工业, 2005, 52(11): 694-697.  
ZHU H J, LI F Y, LIAO H L. Production and application of fluorosilicone rubber articles[J]. China Rubber Industry, 2005, 52(11): 694-697.
- [8] 崔小明. 氟橡胶的改性及应用研究进展[J]. 中国橡胶, 2015, 31(8): 42-45.  
CUI X M. Research progress on modification and application of fluorine rubber[J]. China Rubber, 2015, 31(8): 42-45.
- [9] 赵志正. 模压硫化后橡胶制品的收缩率[J]. 世界橡胶工业, 2010, 37(10): 29-32.  
ZHAO Z Z. Shrinkage of mold press cured rubber products[J]. World Rubber Industry, 2010, 37(10): 29-32.
- [10] 王玺. 精益六西格玛在某电子产品生产项目中的应用研究[D]. 北京: 中国科学院大学, 2015.  
WANG X. Application of lean six sigma in an electronic product production project[D]. Beijing: University of Chinese Academy of Sciences, 2015.
- [11] 常鸿雯. 六西格玛设计在航空发动机试验设备设计中的应用[J]. 机械工程师, 2020(6): 150-152, 156.  
CHANG H W. Application of six sigma design in the design of aeroengine test equipment[J]. Mechanical Engineer, 2020(6): 150-152, 156.
- [12] 温鹏. 六西格玛设计(DFSS)在航空科研院所的应用研究[D]. 长春: 吉林大学, 2013.  
WEN P. Application of design for six sigma (DFSS) in aviation research institutes[D]. Changchun: Jilin University, 2013.
- [13] 黄艳, 赵振辉, 采峰, 等. 六西格玛绿带培训教材[M]. 2版. 北京: 中航工业精益六西格玛研究所, 2012.  
HUANG Y, ZHAO Z H, CAI F, et al. Six sigma green belt training materials[M]. 2nd ed. Beijing: AVIC Lean Six Sigma Institute, 2012.
- [14] 王润周. 基于六西格玛管理的S公司质量改进研究[D]. 天津: 天津理工大学, 2020.  
WANG R Z. Research on quality improvement of S company based on six sigma management[D]. Tianjin: Tianjin University of Technology, 2020.
- [15] 郭祥久, 脱锐, 王菲, 等. 模压橡胶制品收缩率测试方法及结果影响因素分析[J]. 橡胶工业, 2012, 59(11): 691-692.  
GUO X J, TUO R, WANG F, et al. Testing method and influencing factors of shrinkage ratio for molded rubber products[J]. China Rubber Industry, 2012, 59(11): 691-692.

收稿日期: 2020-10-21

## Application of Six Sigma Management in Inner Diameter Control of Rubber O-ring

ZHAO Qing

(AVIC Jincheng Nanjing Engineering Institute of Aircraft System, Nanjing 211100, China)

**Abstract:** By using the DMAIC (definition, measurement, analysis, improvement, control) process of six sigma management combined with Minitab software, the inner diameter control of rubber (fluorosilicone rubber) O-ring (referred to as O-ring) was studied. The optimal combination of the influence factors of the O-ring was obtained through test data analysis, and the key factors influencing the inner diameter of the O-ring were determined through regression analysis, and the pass rate of inner diameter of the O-ring was improved through process control.

**Key words:** rubber O-ring; six sigma; DMAIC process; inner diameter; control