

燃油泵波形弹簧可靠性设计改进研究

文红武

(海军装备部, 西安 710077)



摘要: 通过对现用波形弹簧进行反设计分析和刚度计算, 采取改变材料, 选用三波形, 改变单件厚度等技术措施, 并进行了系列考核验证, 提高了波形弹簧工作的可靠性。

关键词: 波形弹簧; 可靠性; 设计改进

Reliability Design Improvement for Wave Spring used in Fuel Pump

Wen Hongwu

(Department of Navy Equipment, Xi'an 710077)

Abstract: Anti-design and stiffness calculation are carried out for wave spring. The operation reliability of wave spring are improved by taking a series of measurement: such as changing the material and thickness of the spring, choosing three wave form. Then a series of performance test are validated.

Key words: wave spring; reliability; design improvement

1 引言

某型燃油泵是一型节流离心泵, 用于向燃油调节系统提供高压燃油。为保证轴承正常稳定运转, 需要给轴尾端轴承外环施加一预紧负荷, 如图1所示, 使轴承的滚珠和滚道完全吻合, 起到了消除径向游隙的作用, 从而减少了振动和噪音^[1]。波形弹簧的主要特点是很小的变形即能承受较大的载荷, 并且受力对称及具有较小的安装尺寸和较小的材料应用, 主要用在变形量和轴向空间要求很小的、减小振动的场合^[2~4]。

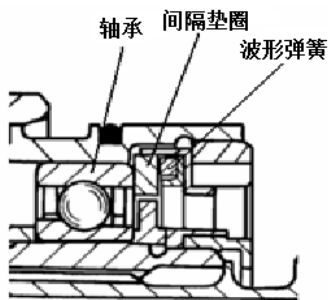


图1 波形弹簧装配关系图

某型燃油泵使用中多次出现轴承失效故障, 轴承跑道出现剥落现象, 严重影响叶轮供油品质。经检查发现是因为波形弹簧发生了永久变形, 施加给轴承的预紧力变小, 导致轴承非正常运转, 提高波形弹簧工作的可靠性成为当务之急。

2 波形弹簧工作可靠性分析

2.1 波形弹簧工作特性

轴承的预负荷力-位移曲线(图2)。该曲线是通过将装配好的燃油泵叶轮施加负荷, 测量相应负荷下的位移值拟合。合格曲线应具有两处拐点B、D, 其中B点的力值应在 $(445.22 \pm 44.522)N$ 内, B和D的位移差值应在 $0.0254 \sim 0.0762mm$ 之间, C点力值比B点大110N。该曲线表明燃油泵装配后轴承的预紧情况, 其中B-D段为产生预紧力的波形弹簧的弹性变形, B和D的位移差符合波形弹簧组件的制造要求: 从445N起始的最大位移量为 $0.0254 \sim 0.0762mm$ 。A-B段为克服445N预紧力消除的轴承游隙, D-E段为零件的微

观间隙及变形。波形弹簧片须使轴承外圈最大位移处于弹力范围内，其预紧力必须增大到使轴承在受到外部所有负荷的影响下都处于动态吻合状态^[5]。

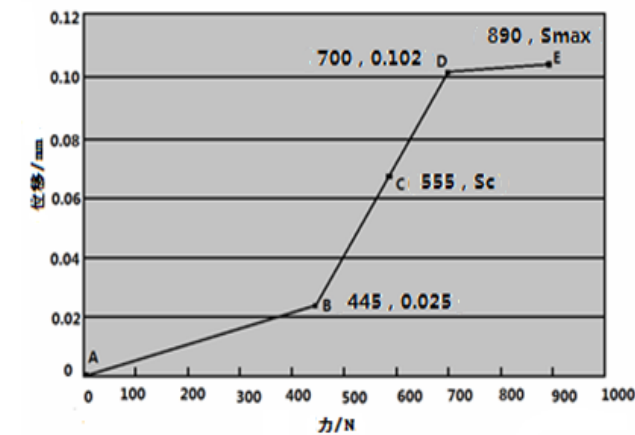


图 2 力-位移图

2.2 波形弹簧故障现象及典型特性试验

根据对贮存时间较长的波形弹簧进行统计，发现波形弹簧的弹力发生了衰减，与燃油泵力-位移曲线对波形弹簧的弹力要求存在较大的偏离，见图 3 所示。

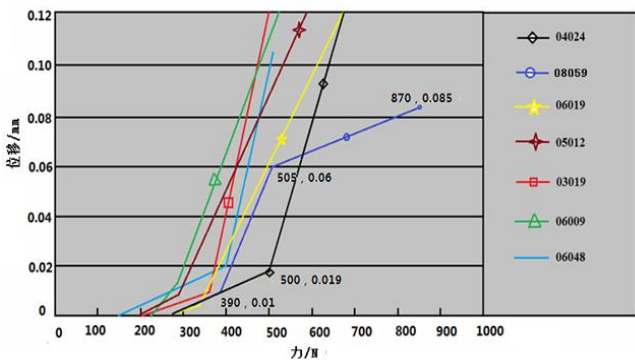


图 3 7 台泵保存 7 年后的力-位移图

通过分析认为，造成上述问题的原因可能是波形弹簧在长期使用过程中发生衰减，刚度减小，施加的预紧力变小，使波形弹簧预变形减小，导致 B 点提前。针对以上分析结果，对波形弹簧弹力进行检查，结果如表 1。

由以下结果可见，波形弹簧弹力较设计要求的 2.29~2.54mm 均有不同程度的衰减，即波形弹簧预紧力出现了减小。

表 1 长时间贮存的波形弹簧特性检查情况

序号	泵号	力值/N	波形垫高度/mm
1	06048	445.8	2.2
2	03019	445.1	2.19
3	06009	445.3	2.16
4	06019	445.5	2.2
5	04024	445	2.22
6	08059	445.1	2.31
7	05012	445	2.09

2.3 波形弹簧典型特性试验

通过调研发现波形弹簧的残余变形主要发生在前 100h，之后变形很小。依据这一情况，根据波形弹簧预紧力 445N，工作温度 150℃的工作状态，制定将波形弹簧施加 445N 负荷后放置在 150~155℃油温下保持 100h 的“双百试验”方案。试验结果见表 2。

表 2 现用波形弹簧“双百试验”结果 mm

序号	试验前		试验后		变化量	
	自由高度	445N 负荷下的压缩高度	自由高度	445N 负荷下的压缩高度	自由高度	445N 负荷下的压缩高度
5	6.28	2.54	5.9	2.39	0.38	0.15
8	5.98	2.54	5.68	2.37	0.3	0.17
74	6.14	2.50	5.63	2.25	0.51	0.25
82	6.11	2.48	5.72	2.26	0.39	0.22
86	6.03	2.45	5.67	2.34	0.36	0.11

通过以上性能数据对比可见，波形弹簧经过试验后发生明显塑性变形，自由高度及 445N 负荷下的压缩高度均降低，自由高度变化量为 0.3~0.39mm；445N 负荷下的压缩高度变化量为 0.11~0.25mm。

通过试验可知，现用波形弹簧塑性变形明显，在实际使用过程中难以保证为轴承提供稳定的预紧力。为确保使用安全，必须对现用波形弹簧进行改进。

3 波形弹簧可靠性设计改进研究

3.1 现用波形弹簧反设计计算

现用波形弹簧材料为 T8A 工具钢，中径 49.022mm，厚度 2.1mm，波数为 2，见图 4。

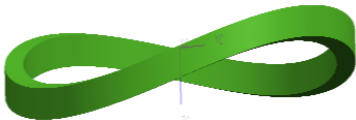


图 4 现有波形弹簧外形图

对波形弹簧最大允许变形量进行计算验证：

$$h_{\max} \leq \frac{\pi^2 D_0^2 \delta_s}{12 E N^2 \delta^2}$$

(1)

式中： D_0 ——波形弹簧（外径+内径）/2； δ_s ——材料屈服强度； E ——材料弹性模量； N ——波数； δ ——厚度。

将现用波形弹簧相关参数 $\delta_s=900\text{MPa}$ 、 $E=2\times10^5\text{MPa}$ 、 $D_0=49.022\text{mm}$ 、 $N=2$ 、 $\delta=2.1\text{mm}$ ，代入公式（1），计算得 $h_{\max} \leq 0.5\text{mm}$ ，而现用波形弹簧正常工作时的最小压缩量 $3.26\text{mm} \geq h_{\max}$ 。因此，现有波形弹簧不能满足产品使用要求，为确保产品使用可靠性，必须提高波形弹簧最大允许变形量。根据公式

（1）可知，影响波形弹簧最大允许变形量的因素有内外径、材料、波形弹簧的波数以及厚度。由于波形弹簧的装配工作需要，其内外径已定，所以只有通过改变材料、波数以及厚度改变波形弹簧的最大允许变形量。

3.2 波形弹簧材料改进

改进波形弹簧材料选用弹性合金 PH15-7Mo，与 T8A 工具钢比较，该钢具有良好的抗氧化性和耐腐蚀性以及很高的弹性和强度，高温机械性能较好，可用于 420°C 以下。

其力学性能 $\delta_s=1490\text{MPa}$ ， $\delta_b=1607\text{MPa}$ ， $E=2\times10^5\text{MPa}$ 。根据公式计算可得此时 $h_{\max} \leq 0.83\text{mm}$ ，虽然允许变形量高于现用材料 T8A，但仍不能满足设计要求。

3.3 波形弹簧波形参量的改进

由 3.1 分析可知当材料一定时，要提高 $h_{\max}$ 值，只能通过调整波形弹簧波数和厚度。根据波形弹簧刚度简化计算公式

$$p' = \frac{EB\delta^3 N^4}{2.4 D_0^3} \times \frac{D}{D_1}$$

(2)

式中： D ——波形弹簧外径； D_1 ——波形弹簧内径； D_0 ——波形弹簧中径； B ——波形弹簧宽度。

由于波形弹簧的材料、外形尺寸已定，所以影响刚度的因素只有波形弹簧的厚度和波数。

结合公式（1）（2）的分析，波数两波已最小，为增大 $h_{\max}$ ，使波形弹簧不发生永久变形，只有减小厚度，但厚度减小会使波形弹簧的刚度降低，难以保证使用要求。因此采用减小厚度，增加波数和层数的方案来改进波形弹簧。

表 3 波形弹簧参数计算结果

厚度 δ/mm	两波最大允许变形 量 $h_{\max}/\text{mm}$	刚度 P' / N mm^{-1}	三波最大允许变 形量 $h_{\max}/\text{mm}$	刚度 P' / N mm^{-1}
2.1	0.83	290.62	0.37	1471
1.5	1.63	105.9	0.73	536.2
1.2	2.55	54.23	1.14	274.52
1	3.68	31.38	1.63	158.87
0.9	4.54	22.88	2.02	115.81
0.8	5.74	16.07	2.55	81.34
0.7	7.50	10.76	3.34	54.59
0.65	8.70	8.62	3.87	43.63

根据波形弹簧实际工作的性能要求和制造工艺性，最终决定选用厚度 $\delta=0.7\text{mm}$ ，波数 $N=3$ ，三层叠加的方案进行研制，如图 5 所示。

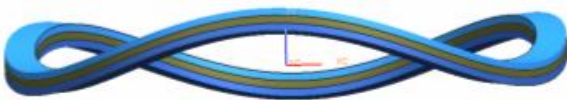


图 5 改进波形弹簧外观图

按照以上设计方案，研制生产 16 组波形弹簧，最终波形弹簧的性能数据见表 4。

表 4 波形弹簧性能改进结果

序号	原始状态/mm		双百试验后/mm		“X”-0.102mm 的载荷/N	变化量/mm	
	自由 高度	加 445.2N 下高度	自由 高度	加 445.2N 下高度		自由 高度	压缩 高度
1	6.67	2.42	6.62	2.46	466.03	0.05	0.04
2	6.64	2.44	6.7	2.41	466.7	0.06	0.03
3	6.60	2.43	6.61	2.39	467.4	0.01	0.04
4	6.70	2.48	6.78	2.5	465	0.08	0.02
5	6.83	2.50	6.8	2.51	467.5	0.03	0.01
6	6.76	2.48	6.8	2.5	465.6	0.04	0.02
7	6.74	2.45	6.7	2.42	468	0.04	0.03
8	6.69	2.42	6.71	2.44	468.5	0.02	0.02
9	6.75	2.43	6.63	2.39	468.1	0.12	0.04
10	6.75	2.49	6.75	2.46	478	0	0.03
11	6.68	2.48	6.59	2.46	467.5	0.07	0.02
12	6.75	2.52	6.77	2.52	463.5	0.02	0
13	6.80	2.49	6.74	2.49	463.8	0.06	0
14	6.73	2.50	6.75	2.51	464.7	0.02	0.01
15	6.78	2.52	6.8	2.54	462	0.02	0.02
16	6.72	2.40	6.74	2.42	466.2	0.02	0.02

根据上述性能检查数据显示，试验前后新研波形弹簧自由高度的最大变化量为 0.12mm，压缩高度的最大变化量为 0.04mm，满足设计要求。

4 改进后的波形弹簧可靠性试验

4.1 改进后的波形弹簧性能试验

从 16 组波形弹簧里边任意抽取 3#、12#、15#三组波形弹簧进行试验（150~155℃油温下保持 100h），试验后数据见表 5。

表 5 试验前后特性检查情况 mm		
序号	试验前/后压缩高度	变化量
3	2.42/2.41	0.01
12	2.54/2.52	0.02
15	2.48/2.47	0.01

此次改进的波形弹簧试验前后的压缩高度变化量不超过 0.05mm，最大为 0.02mm。将表 5 与表 2 对比分析，改进的波形弹簧与现用波形弹簧相比具有很好的抗衰减能力。

4.2 改进后的波形弹簧试验循环考核

从 16 组波形弹簧中随机抽取第 13 组正常装配后进行以下考核工作，试验前测量第 13 组波形弹簧在 445N 载荷下的压缩高度为 2.53mm，按燃油泵组件工艺规程进行装配，绘制力-位移曲线见图 6。

其中 $P_A=480\text{N}$ ， $S_A=0.010\text{mm}$ ， $S_B=0.068\text{mm}$ ， $S_C=0.049\text{mm}$ ， $S_B-S_A=0.058\text{mm}$ ， $S_C-S_A=0.039\text{mm}$ ，参数均符合工艺规程，曲线合格。

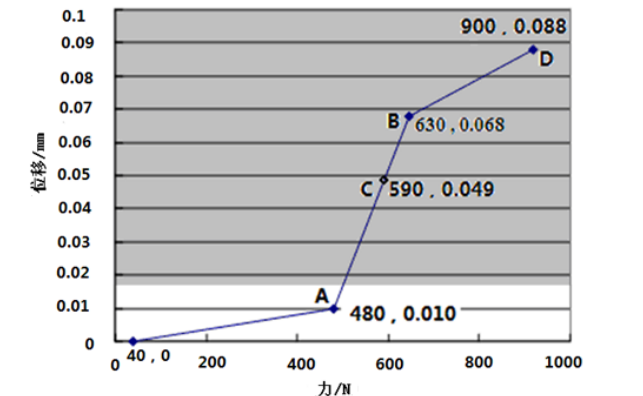


图 6 考核前力-位移曲线

将装配、调试好的产品贮存三个月后，按技术条件进行考核试验，考核完录取产品性能合格。

分解定检试验后的燃油泵组件，分解前检查力-位移曲线，绘制力-位移曲线见图 7。

其中 $P_A=476\text{N}$ ， $S_A=0.006\text{mm}$ ， $S_B=0.057\text{mm}$ ， $S_C=0.031\text{mm}$ ， $S_B-S_A=0.051\text{mm}$ ， $S_C-S_A=0.025\text{mm}$ ，参数符合工艺规程，曲线合格。

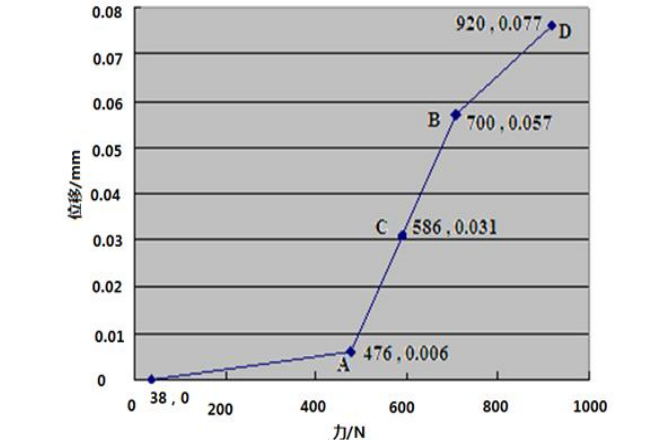


图 7 考核后力-位移曲线

对完成考核试验的波形弹簧施加 445N 的载荷，测量压缩高度，具体数据见表 6：

表 6 定检试验后力特性检查情况 mm			
序号	考核前	考核后	变化量
13	2.53	2.49	0.04

最终 13 号波形弹簧的衰减量为 0.04mm，满足设计要求，装配该波形弹簧的产品通过三个月的保存性能仍然符合技术规定，波形弹簧改进达到了预定目标。

5 结束语

通过对比实验分析可以看出，改进后的波形弹簧大幅度提高了抗变形能力，有效地改善了原有波形弹簧存在的弹力衰减情况，能够确保产品长时间保存及使用要求。

参考文献

1 曹和生. 小型电机波形弹簧片的作用和预压力的选择[J]. 电机技术, 1983(1): 19~21

2 胡增强, 孙梅君, 郭昌宸. 波形弹簧的载荷—挠度关系[J]. 机械制造, 1985(10): 7~9

3 姜春英. 波形弹簧曲面方程及制造工艺的确定[J]. 郑州纺织工学院学报, 1995, 6(4): 21~23

4 卢宝生, 李长有. 波形弹簧的优化设计[J]. 焦作大学学报综合版, 1996(1): 37~39

5 吴光跃, 盛康琪. 波形弹簧片对电机轴向窜动及其噪声的影响[J]. 中小型电机, 1992, 19(6): 47~48