

用平板式多支点疲劳试验夹具求弹簧 疲劳极限方法的分析与探讨

五一厂 魏拔鳌 王春林 葛振环

我厂自1973年以来,结合新产品试制和新材料应用,对Cr12Mn5Ni4Mo3Al、S 205(不锈钢弹簧钢丝)、S202(高载荷碳素弹簧钢丝)等材料制成的弹簧进行了疲劳试验。先后用近千个试样进行过50余次试验。实践中摸索出在平板式多支点疲劳夹具上用一种较为简便的试验方法,能较快地得到试验结果。

由于疲劳试验结果存在很大的分散性,如用单个弹簧进行,每得到一组疲劳极限数据需要相当长的时间。本文在分析了弹簧力学特性的基础上,利用试验夹具多支点的特点,在一台试验机上同时安排几组试样进行试验。

一、调整平均应力 一致的试验方法

通常高寿命的疲劳极限都是用升降法求得。但是在升降法安排试验过程中,如果一定等到前一个试件提供信息再安排后一个试件,时间上很不经济。若把升降法的试验顺序改为并列进行,将可缩短试验周期。如能在一次试验中包括几个应力水平的所有试件,试验进度可以加快。

平板式多支点试验夹具如图1所示,这是螺旋压缩弹簧的专用试验夹具。它的特点是试验过程中每个弹簧被压缩后的高度相同,由于每个弹簧自由长度和刚度不可能完全一致,因而每个弹簧产生的弹力 P_1 、 P_2 也各有差异。

按弹簧应力计算公式则有:

$$\tau_1 = \frac{8KD}{\pi d^3} P_1, \tau_2 = \frac{8KD}{\pi d^3} P_2$$

$$\tau_m = \frac{1}{2} (\tau_2 + \tau_1) \quad (1)$$

$$\tau_a = \frac{1}{2} (\tau_2 - \tau_1) \quad (2)$$

式中 τ_1 ——应力循环最小应力;

τ_2 ——应力循环最大应力;

τ_m ——平均应力;

τ_a ——应力幅;

P_1 ——试验中弹簧最小压缩时的弹力;

P_2 ——试验中弹簧最大压缩时的弹力;

D ——弹簧中径,即弹簧内外径的平均值;

d ——弹簧的钢丝直径;

K ——弹簧应力修正系数。

由于各个弹簧之间 P_1 、 P_2 的差异,致使各弹簧间 τ_m 、 τ_a 各不相同。为了使同批试验弹簧 τ_m 相同,可以用加调整垫圈改变每个弹簧的变形来达到,而 τ 不同恰是升降法求疲劳极限所必需的。

当在某一试验弹簧支座上加一厚度为 ΔL 的调整垫圈后,根据虎克定律

$$P_1' = P_1 + \Delta P$$

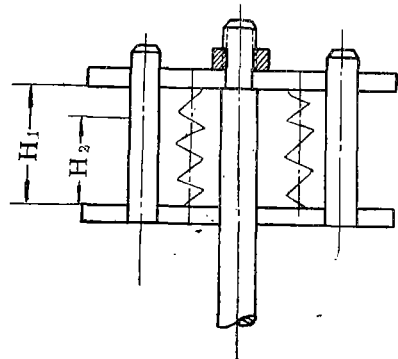


图1 弹簧疲劳试验夹具

$$P_2' = P_2 + \Delta P$$

式中 P_1 、 P_1' ——弹簧加调整垫圈前和后的最小弹力；

P_2 、 P_2' ——弹簧加调整垫圈前和后的最大弹力；

ΔP ——由于加调整垫圈而引起的弹力增量。

将 P_1' 、 P_2' 代入 (1)、(2) 式中化简后得

$$\tau_m' = \frac{1}{2} (\tau_2' + \tau_1') = \tau_m + \frac{8KD}{\pi d^3} \Delta P \quad (3)$$

$$\tau_a' = \frac{1}{2} (\tau_2' - \tau_1') = \tau_a \quad (4)$$

式中 τ_m' ——加调整垫圈后的平均应力；

τ_a' ——加调整垫圈后的应力幅。

由 (3)、(4) 式可见，加调整垫圈后只改变了原来的平均应力值，而不改变原来的应力幅值。据此，先将一批弹簧都压缩至 H_1 、 H_2 测出弹力 P_1 、 P_2 ，再用公式计算出每个弹簧的 τ_m 、 τ_a 值，并按升降法要求挑选出 τ_a 符合需要的几组弹簧，最后计算出每个弹簧应加的调整垫圈厚度，这样一次试验的试件就确定了（见图 2）。

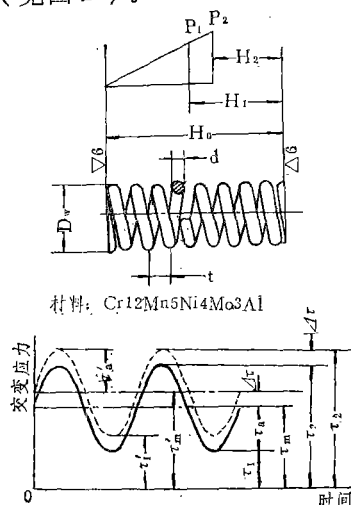


图 2 弹簧工作图

调整垫圈厚度的计算：

$$\Delta L = \frac{H_0 - H_2}{\tau_2} \times \Delta \tau \quad (5)$$

式中 H_0 ——弹簧自由长度；

H_2 ——弹簧最大压缩后长度；

$\Delta \tau$ ——弹簧实测平均应力与预计平均应力之差。

值得强调的是，从理论上说有：

$$\Delta L = \frac{H_0 - H_2}{\tau_2} \Delta \tau = \frac{H_0 - H_1}{\tau_1} \Delta \tau$$

实际上弹簧由于制造误差，只能基本上符合虎克定律。统计了一批弹簧弹力与变形的关系，得出了如图 3 所示的曲线。由此可见，用公式 (5) 计算的结果要精确些。

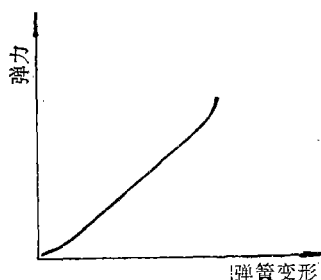


图 3

表 1 所列为调整 τ_m 一致的试验弹簧计算实例。设计应力水平 $\tau_m \approx 60$ 公斤/毫米²、 $\tau_a \approx 50$ 公斤/毫米²。实测一批弹簧后挑选出 17 个试件。可把表 1 中试件划分为：48 公斤/毫米² 4 件全未断，50 公斤/毫米² 9 件断 2 件，52 公斤/毫米² 4 件断 1 件这样三组。

按相同方法安排第二次试验，选平均应力为 60 公斤/毫米²，应力幅为 52、54 公斤/毫米² 两组试样各 6 件，结果 $\tau_a = 52$ 公斤/毫米² 试件断 2 件， $\tau_a = 54$ 公斤/毫米² 试件断 4 件。两次试验结果合并后示于图 4。

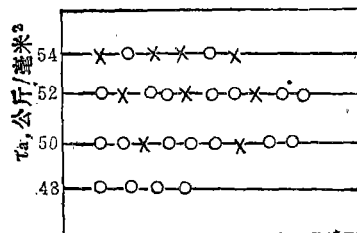


图 4 升降图

○— 10^7 次未断；
×—不足 10^7 次破坏。

按升降法计算疲劳极限法则，当 $\tau_a = 48$ 公斤/毫米²，一个试件 10^7 次未断； $\tau_a = 50$ 公斤/毫米²，一个试件不足 10^7 次即破坏，这一对试件反映的疲劳极限为 49 公斤/毫米²。同理，应

表 1

弹簧 编号	自由 长度 毫米	当 $H_1=28.5$ 毫米时弹力 P_1' , 公斤	当 $H_2=17.5$ 毫米时弹力 P_2' , 公斤	τ_1' 公斤 毫米 ²	τ_2' 公斤 毫米 ²	τ_m' 公斤 毫米 ²	τ_a' 公斤 毫米 ²	预定 $\tau_m=60$ 公斤/毫米 ² + ΔL 后 时 ΔL	H_1 P_1	H_2 P_2	τ_1 公斤 毫米 ²	τ_2 公斤 毫米 ²	τ_m 公斤 毫米 ²	τ_a 公斤 毫米 ²	寿命 N 次
53	30.2	3.14	23.52	15.7	117.6	66.7	51	-0.7	1.80	22.24	9	111.2	60.1	51.1	9.9×10^6
61	29.7	2.16	22	10.8	110	60.4	49.6	0	2.16	22	10.8	110	60.4	49.6	1×10^7
57	30.4	3.36	22.84	16.8	114.2	65.5	48.7	-0.6	2.28	21.92	11.4	109.6	60.5	49.1	1×10^7
46	29.3	1.48	21.86	7.4	109.3	58.4	51	+0.2	1.90	22.38	9.5	111.9	60.7	51.2	1×10^7
60	29.4	1.66	22.04	8.3	110.2	59.3	51	0	1.66	22.04	8.3	110.2	59.3	51	1×10^7
36	29.2	1.26	22.08	6.3	105.4	55.9	49.6	+0.5	2.18	22.10	10.9	110.5	60.7	49.8	1×10^7
58	30.2	3.04	22.68	15.2	113.4	64.3	49.1	-0.5	2.24	21.76	11.2	108.8	60	48.8	1×10^7
32	30.2	2.96	22.08	14.8	110.4	62.6	47.8	-0.3	2.32	21.48	11.6	107.4	59.5	47.9	1×10^7
1	29.4	1.64	21.66	8.2	108.3	58.3	50.1	+0.2	2.06	22.18	10.3	110.9	60.6	50.3	1×10^7
2	29.8	2.28	21.50	11.4	107.5	59.5	48.1	0	2.28	21.50	11.4	107.5	59.5	48.1	1×10^7
3	29.7	2.16	22.02	10.8	110.1	60.5	49.7	0	2.16	22.02	10.8	110.1	60.5	49.7	4.4×10^6
4	29.3	1.42	20.96	7.1	104.8	56	48.9	+0.5	2.24	21.92	11.2	109.6	60.4	49.2	1×10^7
5	29.1	2.28	21.28	11.4	106.4	59	47.4	0	2.28	21.28	11.4	106.4	59	47.4	1×10^7
6	29.2	1.3	21.82	6.5	109.1	57.8	51.3	+0.2	1.10	22.08	8	110.4	59.2	51.2	1×10^7
7	29.5	1.86	22.38	9.3	111.9	60.6	51.3	0	1.86	22.38	9.3	111.9	60.6	51.3	1×10^7
8	29	0.9	20.92	4.5	104.6	54	50.1	+0.6	2.0	22.12	10	110.6	60.3	50.3	6.7×10^6
10	29.1	1.1	21.1	5.5	105.5	55.5	50	+0.5	2.26	22.14	11.3	110.7	61	49.7	1×10^7

- 注: 1. 本表所列 P_1' 、 P_2' 、 P_1 、 P_2 均为实测数据。
2. τ_1' 、 τ_2' 、 τ_1 、 τ_2 为相对于 P_1' 、 P_2' 、 P_1 、 P_2 计算的应力值。
3. ΔL 为达到 $\tau_m=60$ 公斤/毫米²弹簧变形至所需弹力调整垫圈的厚度(毫米)。

力幅为50、52公斤/毫米²和52、54公斤/毫米²，每一对试件反映的疲劳极限分别为51和53公斤/毫米²。把图4中9对疲劳极限取平均值，即是试验求得的当 $\tau_m=60$ 公斤/毫米²时 10^7 次疲劳极限。

$$\bar{\tau}_a = \frac{1}{9} (53 \times 4 + 51 \times 3 + 49 \times 2) = 51.44$$

(公斤/毫米²)

这样，仅用2次试验就能求出弹簧的疲劳极限来。

二、调整最小 应力一致的试验方法

调整平均应力一致的试验方法，虽然能做到一次试验求得几组数据，但挑选试样比较麻烦，特别是当行程(H_1-H_2)估计不恰当时，往往挑不出满意的试样来，有时甚至须重复多次测定弹力。而调整 τ_1 一致求疲劳极限比上述

方法来得简便。

现以表2为例说明本方法要点：

1. 设计试验应力水平： $\tau_1 \approx 50$ 公斤/毫米²， $\tau_2 \approx 105$ 公斤/毫米²。

2. 按 $P = \frac{\pi d^3}{KD} \tau$ 计算出预计弹力

$P_{1预}=10$ 公斤， $P_{2预}=21$ 公斤。

3. 用弹力计测出每个弹簧产生10公斤时的长度 H_{1i} 。

4. 由表2可见， H_{1i} 为25.5毫米和25.6毫米的弹簧较多。在 $H_{1i}=25.5$ 毫米或 $H_{1i}=25.6$ 毫米试件中测出产生21公斤弹力时的平均长度 H_2 ，计算出 $L=H_1-H_2=5.4$ 毫米。

5. 测出将每个弹簧压至 $H_{1i}-L$ 长度时的弹力 P_{2i} 。

6. 计算每个弹簧的最大应力 τ_{2i} 。

7. 根据一批 τ_{2i} 选择试件：

$\tau_2=105$ 公斤/毫米² 10件， $\tau_2=107$ 公斤/毫米² 2件， $\tau_2=103$ 公斤/毫米² 6件。

8. 每个弹簧应加调整垫圈厚度：

$$\Delta L = 25.6 - H_{1i}$$

9. 确定疲劳试验条件：预压缩至 $H_1=25.6$ 毫米，行程 $L=5.4$ 毫米。

实践证明，用上述方法的好处，一是节约时间，二是对试样的制造精度要求（自由长度、刚度）可以放宽。有时为了得到应力水平有更宽的挑选余地，还有意把弹簧自由长度公差做得大些。其试验误差完全可以满足通常所需要的5%或者更小些。而试验效率比用单个弹簧试验可提高几倍到十几倍。

表 2

序号	产生10公斤弹力长度 H_1 毫米	当 $H_2=H_1-5.4$ (毫米)时弹力 P_2 ,公斤	τ_1 公斤/毫米 ²	τ_2 公斤/毫米 ²	调整垫圈 厚度 毫米
1	25.6	21	50	105	0
2	25.5	21	50	105	+0.1
3	25.6	20.9	50	104.5	0
4	25.5	20.7	50	103.5	+0.1
5	25.5	20.7	50	103.5	+0.1
6	25.5	20.9	50	104.5	+0.1
7	25.5	20.9	50	104.5	+0.1
8	25.4	20.7	50	103.5	+0.2
9	25.4	20.5	50	102.5	+0.2
10	25.5	20.9	50	104.5	+0.1
11	25.4	21	50	105	+0.1
12	25.4	21	50	105	+0.1
13	25.4	20.7	50	103.5	+0.1
14	25.6	21	50	105	0
15	25	21.4	50	107	+0.6
16	25	21.5	50	107.5	+0.6
17	25.5	20.7	50	103.5	+0.1
18	25.6	21	50	105	0