

文章编号:1000-8055(2012)10-2194-06

燃油喷嘴封严弹簧失效与发动机冒烟的关系

许勇刚^{1,2}, 王 强¹

(1. 北京航空航天大学 能源与动力工程学院, 北京 100191;

2. 中国航空工业集团公司 西安航空发动机(集团)有限公司, 西安 710021)

摘 要: 通过流量试验对比分析、燃油喷嘴结构分析以及弹簧失效机理分析对某发动机长期存在的冒烟故障的根本原因进行了探索性研究。对冒烟发动机和无冒烟发动机燃油喷嘴及总管流量试验的实证分析表明:发动机冒烟故障的根本原因在于外场服役期间慢车工况某些燃油喷嘴反压降低导致的总管流量不均。对冒烟发动机 14 个燃油喷嘴的结构实证分析表明:发动机服役中燃油喷嘴及燃油总管流量特性发生漂移的根本原因在于封严弹簧顶紧机制的丧失,而造成顶紧机制丧失的根本原因是弹簧端过度不平导致螺母旋合过程中弹簧在不平端受力不均以致不规则歪倒塑性变形。

关 键 词: 喷嘴; 冒烟; 流量试验; 实证分析; 弹簧; 不规则歪倒; 塑性变形

中图分类号: V231.2

文献标志码: A

Relationship of failure of fuel nozzle seal spring and engine smoking failure

XU Yong-gang^{1,2}, WANG Qiang¹

(1. School of Jet Propulsion

Beijing University of Aeronautics and Astronautics, Beijing 100191, China;

2. Xi'an Aero-Engine (Group) Company Limited,

Aviation Industry Corporation of China, Xi'an 710021, China)

Abstract: The ultimate cause of the long-existing smoking failure of an engine type was explored by an explorative study of comparison analysis of flow tests, fuel nozzle structure analysis and spring failure mechanism analysis. The proof analyses of fuel nozzle and manifold flow tests on a smoking engine and a non-smoking engine show that the ultimate cause of engine smoking failure is the un-uniformity of manifold flow at the idle condition resulting from back pressure decrease on some fuel nozzles. The proof analysis of the structure of 14 nozzles of a smoking engine shows that the ultimate cause of the drifts of nozzle and manifold flow characteristics are the loss of the pressing mechanism of the seal spring, and the ultimate cause of that is the excessive un-evenness of the spring end leading to un-uniformity of pressure on the uneven end during nut screwing, which leads to abnormal fall-down and plastic deformation of the spring.

Key words: nozzle; smoking; flow test; proof analysis; spring; abnormal fall-down; plastic deformation

收稿日期:2012-05-18

网络出版地址:http://www.cnki.net/kcms/detail/11.2297.V.20121015.1020.201210.2194_017.html

作者简介:许勇刚(1963—),男,陕西礼泉人,高级工程师,博士,主要从事航空发动机燃烧研究。

航空发动机无论是在起飞滑跑、趋近停车还是在空中飞行,冒烟都是不许可的。而冒烟不管具体形态如何,其直接原因都与燃烧组织有关,在火焰筒气动结构正常的前提下,尤其值得关注的是燃油总管中的燃油分布,亦即喷嘴燃油流量均匀度。

航空发动机燃烧问题作为一个世界性广为关注的问题,已经有许多科学家在众多领域进行了研究和探讨。其中在与本文相关的喷雾与雾化、燃烧机理以及低污染物排放等有关方面,已有相当的进展:Lefebvre 等^[1-3]研究了油滴尺寸对点火、燃烧稳定性、燃烧效率和污染物排放的影响;Annon^[4]研究了喷嘴喷雾锥的倾斜和分散(有时因喷嘴内部的流动泄漏引起)问题;Longwell 和 Weiss 等^[5-7]在其搅拌反应器(或燃烧器)里研究了燃烧反应速率对压力的依赖关系;Burgoyne 和 Cohen 等^[8-12]研究了通过非均匀油气混和物的火焰传播。Koch^[13]给出了飞机发动机排放物种类,并介绍了世界主要航空发动机企业在减排方面的努力途径。然而,在航空发动机燃烧领域,对燃油总管燃油分布均匀度与喷嘴油路中的弹簧(如本文中的封严弹簧)关系的研究还不多,迄今在文献中鲜为发现。

某发动机自服役以来,长期存在在外场停车冒烟故障。本文将试图通过存在冒烟故障的发动机与没有冒烟故障发动机喷嘴流量试验和总管流量试验数据对比、喷嘴结构分析以及弹簧失效机理分析以找到导致发动机冒烟故障的根本原因。

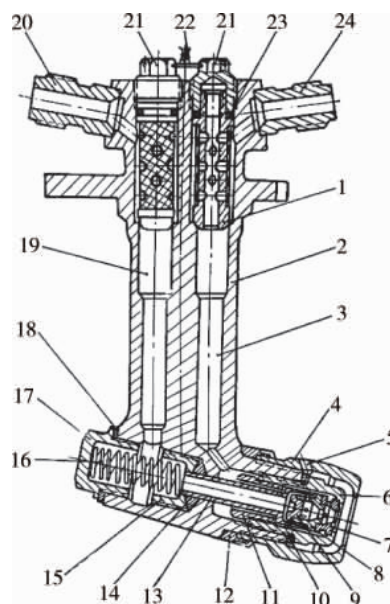
1 背景回顾

1.1 冒烟机理

燃烧室可见的冒烟成分主要是固体碳粒,大部分固体碳粒是在温度相对较高的主燃区局部富油区形成的,高温和富油缺氧使燃油液滴或蒸汽热分解、碳化而形成固体碳粒,如果主燃区给气量充分,则这些固体碳粒会随流动的主燃气流而进一步氧化烧掉,因此合理组织燃油喷射与雾化和空气气动布局可使燃烧室不冒烟^[14]。如果慢车状态下燃油喷嘴由于流量特性漂移造成燃烧室头部局部富油,就会导致头部内壁面产生大量 UHC(未燃烃),UHC 附着后焦化并最终碳化,随着服役时间延长,积碳层厚度和面积会逐渐增大,最终局部以至全部堵塞主燃孔,空气气动布局破坏,富油缺氧使碳粒生成速度加快,又因气动布局的破坏,使碳粒不能在燃烧室中及时烧掉而发生发动机冒烟。

1.2 燃油喷嘴结构

某发动机燃油喷嘴为双室二级离心式串联喷嘴。参见图 1,其主要组成部分有:网状油滤 1、喷嘴壳体 2(其上带有喷嘴安装座)、副、主喷口 7,8 和分隔管 13。



- 1 网状油滤; 2 喷嘴壳体; 3 副油路; 4 喷嘴套;
5 气孔; 6 螺母; 7 副喷口; 8 主喷口; 9 堵头;
10 密封圈; 11 接管嘴; 12 锁片; 13 分隔管;
14 锥形垫圈; 15 接管嘴; 16 封严弹簧; 17 螺母;
18 密封圈; 19 主油路; 20 接管嘴; 21 螺母;
22 锁紧丝; 23 橡胶圈; 24 接管嘴

图 1 燃油喷嘴结构

Fig.1 Profile of the fuel nozzle

喷嘴壳体内有 2 条油路:副油路 3 和主油路 19。喷口与分隔管 13 一起用螺母 6 和接管嘴 11 拧合组成喷雾器。喷雾器用螺母 6 固定在喷嘴壳体内。喷雾器的外面罩有装在喷嘴壳体上的喷嘴套 4。分隔管将主油路和副油路隔开。分隔管用锥形垫圈 14 密封,垫圈被接管嘴 15 压紧。接管嘴 15 又用弹簧 16 顶住,而弹簧 16 又被螺母 17 固紧。螺母 6 和 17 又用密封圈 10,18 冲口锁紧,防其自转。

1.3 喷嘴试验要求

供油量:在 30 kgf/cm^2 (2.942 MPa) 燃油压力下喷嘴的供油量应为,当慢车油路工作时为 $213 \pm 3.6 \text{ L/h}$;当 2 条油路工作时为 $760 \pm 12 \text{ L/h}$ 。

反压力:在 30 kgf/cm^2 燃油压力下慢车油路工作时,主油路内的副油路反压力应为 $4.15 + 0.1 \text{ kgf/cm}^2$ ($0.407 + 0.010 \text{ MPa}$)。

2 外场冒烟故障实证数据分析

2.1 某年度外场冒烟故障回顾

长期以来,某发动机在外场曾经发生多起冒烟故障.表 1 是近年来的某年度一段时期的外场发动机冒烟故障统计.

2.2 燃油总管流量均匀度与冒烟故障关系实证分析

表 1 中的 0013 发动机故障发生在服役 435 h 53 min 时,5 号火焰筒停车冒烟严重,外场除积炭(做法是使用工具清除主燃孔口积炭)后冒烟故障消除.该发动机在 600 h 后返厂大修.为了研究发动机长期以来的冒烟故障,在发动机返厂以后,对 0013 发动机的主燃油喷嘴流量及喷雾特性以及

燃油总管流量均匀度特性进行了原态复试,复测数据显示,出厂数据完全合乎试验要求的燃油喷嘴流量特性及燃油总管流量特性经过外场服役后,5 号喷嘴出现了明显的流量特性漂移,这种漂移不仅体现在 5 号喷嘴单个流量特性的恶化上,还体现在(慢车工况)总管流量均匀度试验中 5 号喷嘴流量过大上(参见表 2 和表 3).与此同时,对返厂大修但在外场未发生冒烟现象的 3020 发动机也进行了总管流量均匀度试验.试验结果表明:3020 发动机总管流量均匀度经过外场长期服役后并未出现漂移现象.这表明总管流量均匀度特性漂移,造成局部火焰筒内头部过于富油,导致积炭,堵塞主燃孔是 0013 发动机及其它类似发动机外场冒烟的根源.

表 1 某年度一段时期的外场冒烟故障统计

Table 1 Statistics of outfield smoking failure over a period of a year

发动机号	工作时间	故障现象	冒烟火焰筒编号	喷嘴积炭情况
0013	435 h53 min	停车冒黑烟严重	5	一般
0006	142 h32 min	停车冒黑烟严重	2,5	一般
0020	402 h	开车冒烟,停车冒烟,卸荷腔漏滑油	14	一般
0008	1 次大修,199 h16 min	停车冒黑烟严重,有点灯现象	14	一般
0044	109 h54 min	停车冒黑烟严重,有点灯现象	2,7,13	7 号积炭严重
0045	97 h57 min	停车冒黑烟严重	7	一般
0012	239 h	停车冒黑烟严重	14	一般

表 2 0013 发动机返厂燃油喷嘴流量复试结果

Table 2 Workshop retest results of fuel nozzle flow in 0013 engine

喷嘴编号	流量/(L/h)		反压/MPa	角度/(°)	
	748~772	209.4~216.6	0.407~0.417	主油路 70~80	副油路 83~93
1	<u>738.04</u>	<u>200.3</u>	<u>0.376</u>	74	89
2	757.38	213.06	0.407	72	85
3	748.79	<u>207.95</u>	<u>0.39</u>	73	84
4	757.38	<u>207.95</u>	<u>0.385</u>	74	88
5	731.59	195.2	0.35	74	87
6	755.23	210.5	<u>0.397</u>	74	88
7	<u>744.49</u>	<u>207.1</u>	<u>0.373</u>	74	86
8	750.94	<u>207.1</u>	<u>0.383</u>	76	89
9	<u>744.49</u>	<u>208.8</u>	<u>0.387</u>	73	85
10	<u>735.89</u>	<u>202</u>	<u>0.373</u>	78	88
11	<u>720.84</u>	<u>196.9</u>	<u>0.355</u>	75	88
12	<u>740.19</u>	211.35	0.417	75	87
13	<u>735.89</u>	209.65	<u>0.395</u>	77	88
14	<u>744.49</u>	216.47	0.415	77	88

注:带下划线者为不合格数值,加粗为极值,下同.

表 3 0013 发动机返厂燃油总管流量均匀度复试结果
Table 3 Workshop retest results of fuel manifold flow in 0013 engine

喷嘴编号	流量/(L/h)	流量/(L/h)	流量/(L/h)	流量/(L/h)
	副油路全开, 主油路部分节流(55 s)	主、副油路全开 (41 s)	慢车工况(只开副油路) 2.942 MPa (150 s)	慢车工况(只开副油路) 0.981 MPa(265 s)
1	613	719	201	112
2	625	736	194	110
3	628	738	196	113
4	627	736	199	115
5	608.5	718	233	130
6	630.5	742	195	113
7	621	731	214	121
8	624	735	198	114
9	615	728	197	115
10	616	724	205	115
11	611	716	199	112
12	614	726	193	110
13	617	726	195	114
14	619	724	194	110
总计	8669	10199	2813	1604
平均值	619	728.5	201	115
均匀度	1.80	1.80	16	13.20
百分数/%	-1.70	-1.70	-3.98	-4.35
设计要求/%	±1.5	±1.5	±5	±8
出厂检验数据/%	+0.8/-0.8	+1/-0.9	+3.6/-2.2	+3.3/-2.3

3 总管流量性能漂移成因的实证分析

3.1 喷嘴性能漂移的多层面实证分析

为什么出厂时单喷嘴流量(反压)性能合格、总管流量均匀度合格的发动机在外场服役 100~400 h 时后会出现冒烟现象?下面从积炭问题、喷嘴头部封严问题、喷嘴后部封严问题和封严弹簧失效机制 4 个层面分析外场服役过程中喷嘴性能漂移导致火焰筒冒烟的根本原因。

1) 积炭问题:参见图 1,发动机喷嘴为双路串联式离心喷嘴,主油路出口的主喷口在副油路出口的副喷口进深内侧,这样形成了服役中常态的主喷口冷却机制,使得主喷口形成积炭的可能性大为降低,几乎没有可能。副喷口暴露于外,在副喷口中心孔口形成一定数量积炭的可能性是存在

的,但在副喷口旋流室切向孔口形成积炭的可能性则非常小。为防止副喷口中心孔口积炭,在孔口设计及空气吹除帽罩方面做了专门考虑,返厂发动机喷嘴孔口积炭实际状况(冒烟发动机喷嘴积炭情况一般,参见表 1)也证实了这种除积炭机制的有效性。因此,积炭引起单喷嘴流量(反压)特性漂移的可能性很小,导致总管流量均匀度发生大幅度恶化的可能性几乎没有。

2) 喷嘴头部封严问题:参见图 1,发动机喷嘴的喷口与分隔管 13 一起用螺母 6 和接管嘴 11 拧合组成喷雾器。喷雾器用螺母 6 固定在喷嘴壳体内,螺母 6 又用密封圈 10 冲口锁紧,防其自转。螺母 6 的拧紧是加 50 N·m 拧紧力矩的,因此,如果密封圈 10 冲口锁紧正常(事实上 0013 发动机密封圈 10 冲口锁紧就是正常的),则喷嘴头部主、副油路串油造成喷嘴流量(反压)特性漂移的可能

性就不存在。

3) 喷嘴后部封严问题: 参见图 1, 封严顶紧弹簧 16 是被螺母 17 固定压紧的。螺母 17 又用密封圈 18 冲口锁紧, 防其自转。螺母 17 的拧紧是加 $120\text{ N}\cdot\text{m}$ 拧紧力矩的, 因此, 如果密封圈 18 冲口锁紧正常(事实上 0013 发动机密封圈 18 冲口锁紧就是正常的), 则喷嘴后部漏油造成喷嘴流量(反压)特性漂移的可能性就不存在。

4) 喷嘴封严弹簧失效机制: 参见图 1, 如前所述, 喷嘴壳体内有 2 条油路: 副油路 3 和主油路 19。分隔管 13 将主油路和副油路隔开。分隔管用锥形垫圈 14 密封, 垫圈被接管嘴 15 压紧。接管嘴 15 又用封严弹簧 16 顶住, 而封严弹簧 16 又被螺母 17 固紧。螺母 17 又用密封圈 18 冲口锁紧, 防其自转。因此, 如果锥形垫圈后部的接管嘴 15 不能压紧, 则主、副油路串油, 造成喷嘴流量(反压)特性漂移。接管嘴 15 不能完成压紧功能的原因只能有 2 个: ①螺母 17 的密封圈 18 冲口锁紧不正常, 造成螺母 17 回退, 封严弹簧 16 顶紧机制丧失; ②在螺母 17 的密封圈 18 冲口锁紧正常下, 螺

母 17 并未回退, 但是如果封严弹簧 16 自身顶紧机制丧失, 则接管嘴 15 也不能行使压紧功能。就 0013 发动机而言, 14 个喷嘴(尤其是发生火焰筒冒烟的 5 号喷嘴)螺母 17 的密封圈 18 冲口锁紧均完好无损, 因此造成喷嘴(尤其是 5 号喷嘴)封严弹簧顶紧机制破坏的唯一可能就是弹簧 16 自身顶紧机制丧失。

3.2 封严弹簧顶紧机制丧失成因的实证分析

按照塑性形变程度和表面镀镉层磨损情况以及复测静弹力(图纸要求值: $10\sim 12\text{ kgf}$ ($98.07\sim 117.68\text{ N}$))3 个方面判断封严弹簧顶紧机制丧失的原因。表 4 是 10 倍放大镜目检弹簧塑性变形、磨损结果及静弹力复测值。弹簧序号字体从正常→斜体→斜粗体依次为综合判断后得出的闭腔中弹簧真实顶紧就位情况, 即良→较差→最差。需要特别指出的是, 喷嘴流量(反压)特性及总管流量均匀度漂移最为严重的 5 号弹簧的静弹力复测值是合格的, 说明封严弹簧顶紧机制的丧失与静弹力值有否超下限没有必然联系。

表 4 0013 发动机封严弹簧塑性变形、磨损及静弹力复测值

Table 4 Plastic deformation, wear and retest values of static elasticity of 0013 engine seal springs

弹簧序号	弹簧塑性变形	端面磨损	侧面磨损	复测静弹力/N
1	工作圈呈现轻度 S 形	一端端面磨损不均	S 形头部侧面有磨损	101.93
2	基本未变	一端端面磨损局部不均	侧面无磨损, 镉层呈现均匀剥落	96.91
3	工作圈呈现轻度弓形	二端端面磨损不均匀	工作圈一侧局部轻度磨损	100.26
4	工作圈呈现轻度 S 形	二端端面磨损均匀	工作圈一侧局部轻度磨损	100.82
5	工作圈呈现轻度弓形	一端端面磨损严重不均	工作圈弓形顶部附近镉层轻度磨损	102.29
6	基本未变	二端端面磨损均匀	侧面无磨损	98.48
7	工作圈呈现轻度弓形	二端端面磨损不均匀	工作圈弓形顶部附近镉层轻度磨损	100.61
8	基本未变	二端端面磨损均匀	侧面无磨损	100.11
9	工作圈呈现 S 形	一端端面磨损不均	工作圈一侧均匀轻度磨损	105.68
10	工作圈呈现 S 形	端面磨损较均匀	工作圈 S 形顶部附近镉层轻度磨损	104.52
11	工作圈呈现轻度弓形	一端端面磨损非常不均	工作圈弓形顶部附近镉层明显磨损	100.00
12	工作圈呈现 S 形	一端端面磨损非常不均	工作圈 S 形顶部附近镉层明显磨损	97.36
13	整体倾斜	一端端面磨损不均	非工作圈侧面磨损	104.27
14	工作圈呈现弓形	端面磨损较均匀	工作圈弓形顶部附近镉层明显磨损	104.47

参见表 4 和图 2~图 3, 2 号弹簧虽然有一端端面隔层磨损不均, 但是弹簧经 435 h 53 min 服役后本身基本未发生塑性变形, 并且侧面镉层无磨损, 呈现均匀态剥落, 说明 2 号弹簧在喷嘴尾部闭

腔中经螺母 17 旋合拧紧后基本处于垂直顶紧状态, 因此即使复测静弹力略微低于弹力下限, 从 2 号喷嘴流量特性可知其弹簧封严顶紧机制没有发生实质性失效。作为另一个极端例子, 5 号弹簧工

作圈呈现轻度弓形塑性变形,弓形顶部附近镉层轻度磨损,一端镉层磨损均匀,另一端镉层磨损严重不均(见图 3 中圆圈示意处),说明 5 号弹簧在喷嘴尾部闭腔中经螺母 17 旋合拧紧后处于重度弯曲变形状态,且从不均匀磨损点和弓形部位来看,弹簧的重度弯曲变形出现在一端而未出现在弹簧高度中部,属于因制造时本应为 2 个平端的弹簧在一端过度不平,装配时在螺母旋合过程中不平端顶紧受力不均导致的不规则歪倒塑性变形^[15],这种不规则歪倒塑性变形在不平端产生反常高应力而对弹簧顶紧弹力造成重度损害,导致弹簧在远低于其弹性极限的载荷下失效^[16]。5 号弹簧封严顶紧机制失效导致对应接管嘴 15 在经过一定的服役时间(如 0013 发动机的 435 h 53 min)后回退使得锥形垫圈 14 封严分隔管 13 外表面的功能丧失,慢车工况 5 号喷嘴主、副油路串油,流量(反压)特性漂移(反压降低),从而导致慢车工况总管流量均匀度特性漂移(5 号喷嘴流量过大)。



图 2 2 号弹簧两端镉层磨损情况

Fig. 2 Wear of the cadmium layer at both ends of No. 2 spring

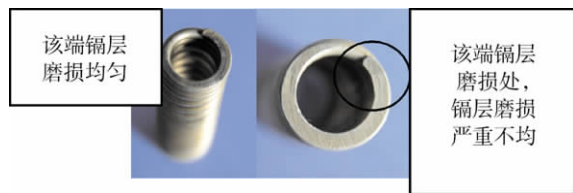


图 3 5 号弹簧两端镉层磨损情况

Fig. 3 Wear of the cadmium layer at both ends of No. 5 spring

4 结 论

1) 对冒烟发动机和无冒烟发动机燃油喷嘴及总管流量试验的实证分析表明:发动机冒烟故障的根本原因在于外场服役期间慢车工况某些燃油喷嘴反压降低导致的总管流量不均。

2) 对故障发动机 14 个燃油喷嘴的结构实证分析表明:发动机服役中燃油喷嘴及燃油总管流量特性发生漂移的根本原因在于封严弹簧顶紧机制的丧失,而造成顶紧机制丧失的根本原因是弹

簧端过度不平导致螺母旋合过程中弹簧在不平端受力不均以致不规则歪倒塑性变形。

参考文献:

- [1] Lefebvre A H. Fuel effects on gas turbine combustion-ignition, stability, and combustion efficiency[J]. ASME J. Eng. Gas Turbines Power, 1985, 107: 24-37.
- [2] Reeves C M, Lefebvre A H. Fuel effects on aircraft combustor emissions[R]. ASME Paper GT-86-212, 1986.
- [3] Rink K K, Lefebvre A H. Influence of fuel drop size and combustor operating conditions on pollutant emissions[R]. SAE Technical Paper 861541, 1986.
- [4] Anon. Atomizing nozzles for combustion nozzles[M]. West Des Moines, Iowa: Delavan Manufacturing Company, 1968.
- [5] Longwell J P, Weiss M A. High temperature reaction rates in hydrocarbon combustion[J]. Journal of Industrial and Engineering Chemistry, 1955, 47(8): 1634-1643.
- [6] Blichner O. A fluid dynamic study of a spherical and a cylindrical stirred reactor[C]// Eighth Symposium (International) on Combustion. Baltimore: Williams and Wilkins, 1962: 995-1002.
- [7] Clarke A E, Odgers J, Ryan P. Future studies of combustion phenomena in a spherical combustor [C] // Eighth Symposium (International) on Combustion. Baltimore: Williams and Wilkins, 1962: 982-994.
- [8] Burgoyne J H, Cohen L. The effect of drop size on flame propagation in liquid aerosols[J]. London Ser A: Proceedings of the Royal Society, 1954, 255(1162): 375-392.
- [9] Cekalin E K. Propagation of flame in turbulent flow of two-phase fuel-air mixture[C] // Eighth Symposium (International) on Combustion. Baltimore: Williams and Wilkins, 1962: 1125-1129.
- [10] Mizutani Y, Nishimoto T. Turbulent flame velocities in premixed sprays: Part I experimental study[J]. Combustion Science and Technology, 1972, 6(1/2): 1-10.
- [11] Ballal D R, Lefebvre A H. Flame propagation in heterogeneous mixtures of fuel droplets, fuel vapor and air[C] // Eighth Symposium (International) on Combustion. Pittsburgh, PA: The Combustion Institute, 1980: 321-328.
- [12] Myers G D, Lefebvre A H. Flame propagation in heterogeneous mixtures of fuel drops and air[J]. Combustion and Flame, 1986, 66(2): 193-210.
- [13] Koch O. Application of a common core, commercial transport-propfan, Part B Vol II. [D]. England: Cranfield University, 1998.
- [14] 张逸民. 航空涡轮风扇发动机[M]. 北京: 国防工业出版社, 1985.
- [15] Carlson H. Spring manufacturing handbook[M]. America, Michigan: M. Dekker, 1982.
- [16] Carlson H. Spring designer's handbook[M]. America, New York: M. Dekker, 1978.