

航空燃油泵柱塞弹簧断裂分析

贵州红林机械厂 黄朝辉

本文以航空燃油泵柱塞弹簧为研究对象,立足于工厂生产实践,从故障分析的角度论述了柱塞弹簧工作中的应力特点,总结了柱塞弹簧断裂的常见类型、形成原因,提出了防止其早期断裂的措施,对于指导生产有一定价值。

Fracture Analysis of Plunger Springs of Aeronautical Fuel Pump

Huang Zhaohui

(Guizhou Honglin Machinery Factory)

On the basis of the productive practice and from the failure analysis point of view of plunger springs, the stress characteristics of the springs during service have been discussed, and the customary fracture mode and the failure reason of the springs have been summarized. The measures for the prevention of early failure of the springs, which exhibit the special value for guiding the production, have been proposed in the present paper.

一、前言

燃油泵柱塞弹簧承受反复压缩应力,其功用是通过积蓄和释放能量,使柱塞紧靠斜盘轴承并做往复运动,达到调节油泵供油量的目的。

柱塞弹簧选用 50 CrVA 钢丝绕制而成。其制造工艺为:钢丝退火→车绕→盐浴炉淬火→电炉或碱槽回火→钳加工→除应力回火→振动试验→氧化→终检入库。

柱塞弹簧在制造、储运及试验、使用中常出现断裂失效现象。据统计,涡喷-5 型发动机燃油泵柱塞弹簧在外场服役中的断裂失效率约为 0.1%,涡喷-7 型中的断裂失效率约为 0.4% (含厂内试车)。由于柱塞弹簧折断会引起供油量失调、油门开关卡滞等危险后果,所以,了解柱塞弹簧的服役条件、研究其失效形式及影响因素,从而采取有效的预防措施,就成为生产中必须解决的课题之一。

二、柱塞弹簧的服役条件

柱塞在燃油泵工作中的运动有随转子的“公转”和自身的“自转”两种形式。公转给柱塞弹簧以往复压缩,自转给柱塞弹簧以反复扭转。往复压缩在弹簧圆截面上产生剪切力与扭矩,反复扭转给簧杆以反复弯曲力矩。除此之外,还存在弹簧外侧与柱塞内壁的摩擦作用。

(1) 根据计算(计算过程从略),当弹簧在燃油泵中因公转而受到反复压缩力时,在簧杆表面各点所受剪切力的大小和方向均不相同,其最大剪应力发生在簧杆横截面周边上靠近簧圈轴线最近的一点(即簧圈内圈侧表面处)。而在簧杆任意截面上,不管是由

正应力引起的最大切应力还是由扭转引起的最大正应力,都发生在与簧杆轴线成 45° 角的斜截面上。工厂发生柱塞弹簧断裂的诸多事例表明,在正常状态下,弹簧的疲劳裂纹大都从弹簧内圈侧表面开始,逐渐向沿着与簧杆本身轴线成 45° 倾角的方向裂去,直至折断。图 1 为折断弹簧的实物照片。

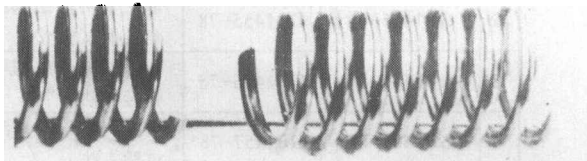


图 1 断裂弹簧实物($\times 1.5$)

(2) 当柱塞弹簧在转子柱塞腔中随公转作惯性型自转时,它做反复扭转运动,于是簧杆本身将受到反复弯曲力矩的作用。假定引起弯曲力矩的外力与簧杆始终在同一平面内,则主要在簧杆内作用着正应力。经分析,该正应力比起柱塞弹簧公转时所受应力来要微小得多,对弹簧断裂影响不大。

(3) 当柱塞弹簧受往复压缩时,可以把它看作一端固定、另一端受冲击载荷的弹性杆。在动态冲击振动中,柱塞弹簧第一工作圈变形量最大,所受应力亦最大,是整个弹簧的最“危险”区。我厂曾多次发现柱塞弹簧早期断裂发生在第一工作圈的事例,可能与此有关。

(4) 由于柱塞弹簧与柱塞腔间隙、动态冲击振动以及弹簧受压时的弯曲等原因,使弹簧外侧表面与柱塞腔壁发生摩擦,造成弹簧外侧面的磨损。生产实践中曾出现过这种情况。其磨损面多出现在弹簧第 6~12 工作圈的外侧表面,最大有磨掉 0.30 mm 的情

况。这种偏磨使簧杆有效截面减小，应力增加，造成断裂。

上述分析说明，柱塞弹簧在燃油泵中的服役条件是苛刻的，应引起足够重视。

三、柱塞弹簧断裂失效的常见形式

柱塞弹簧断裂失效有在服役过程中的正常疲劳断裂和由于表面缺陷引起的早期疲劳断裂两大类。前者比率很小，后者约占失效数的 60% 以上。

1. 正常疲劳断裂

由于柱塞弹簧在高循环应力条件下工作、环境条件苛刻、选材安全系数低（经计算仅近似于临界值），经长期工作后则发生此类断裂。例如，外场到寿命的油泵分解后发现的柱塞弹簧断裂，厂内做振动疲劳试验后断裂的弹簧多属此类。

这类断裂，其宏观断口形貌符合典型疲劳断口特征。断裂从弹簧内圈侧表面开始，沿与簧杆轴线 45° 角方向扩展。断口明显可见放射状条纹（即所谓疲劳沟线），该区所占面积比例较大，呈正应力作用下的张开型脆断形貌。最后有小部分光亮细粒状瞬时破断唇口。

2. 早期疲劳断裂

这类折断的宏观断口特征仍具有疲劳断口的特征。所不同的是断口中疲劳沟线不明显或所占面积比例不大，源区有其它缺陷存在，源区除大多在弹簧内侧表面外，也有其它不确定部位，瞬时破断区面积较大。

早期疲劳断裂的成因大致有下面几种：

(1) 钢丝本身存在冶金残留裂纹 钢丝在冶炼和轧坯时，由于夹渣或氧化皮去除不净等原因，经轧制或拔丝，在钢丝表面形成裂纹，弹簧绕制或热处理后暴露出来。图 2 为我厂发现成品弹簧内侧沿轴线分布的细长直条裂纹的纵向高倍照片。裂纹附近有明显的网络状氧化物。该裂纹造成应力集中，使弹簧发生早期疲劳断裂。

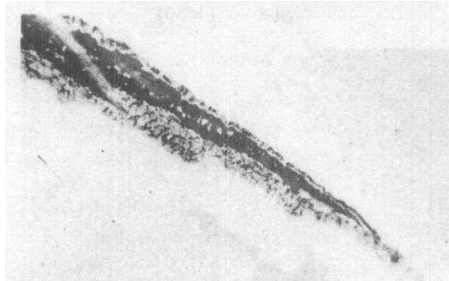
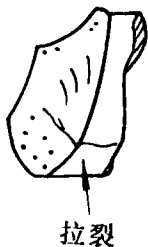


图 2 ($\times 100$)

(2) 钢丝拉裂 在钢丝拉制中，由于冷拉工艺不当而产生。金相观察，这种裂纹横向末端圆钝，裂纹中常留有热处理盐迹或锈迹，纵向大多沿夹杂物分

布。具有拉裂缺陷的弹簧发益后常伴有白色印痕出现。图 3 为拉裂缺陷造成的早期疲劳断口示意图。

(3) 钢丝磨削裂纹 钢丝经磨光后往往出现因磨制工艺不当造成的磨削裂纹。在弹簧上，这种裂纹表现为沿钢丝表面圆周分布，近似等距离，且垂直于钢丝轴线，如图 4。横向金相高倍观察，裂纹较浅，底部秃钝，其周围往往看不到夹杂物和氧化脱碳现象。



拉裂

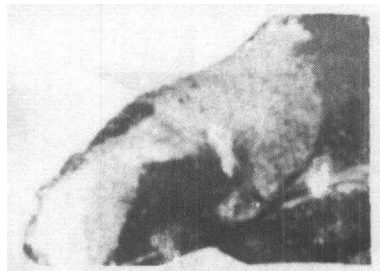


图 3 ($\times 15$)

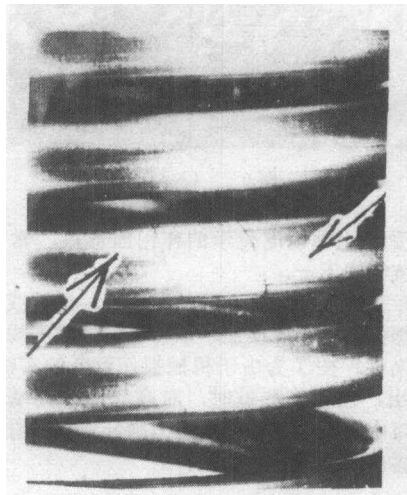


图 4 ($\times 15$)

(4) 钢丝表面折叠 钢丝在拉、轧过程中，由于型孔不当、型孔磨损、轧件擦伤等原因，使再轧、拉时钢丝表面形成折叠。它的特征是沿轧制方向与钢坯表面有一定倾斜角度，一般呈直线或锯齿状，深浅不一，内有氧化夹杂存在，见图 5。

(5) 钢丝表面夹渣、疏松、穴孔等缺陷 拉丝时表面残存的氧化皮及夹杂物卷入钢丝基体形成表面夹渣（有的分布在次表面）和疏松，脱落后造成穴孔。它同其它表面缺陷一样，起着分割基体、引起断裂的效应。图 6 为表面夹渣和孔穴缺陷引起早期疲劳断裂的宏观断口形貌。

(6) 表面锈坑、蚀坑（麻点） 柱塞弹簧在生产中不可避免地要接触热、表处理环境。当其遇到腐蚀介质（水气、盐浴、电解液等）时，表面不光滑的部



图 5 (×150)

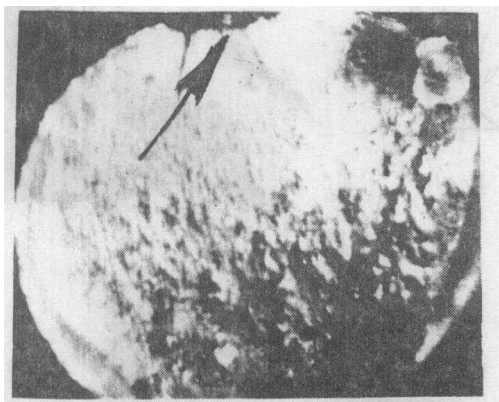


图 6 (×35)

位，将受到化学或电化学的作用而形成。常有锈色斑，凹坑深浅不一。

(7) 表面机械损伤 钢丝在包装、运输或弹簧在加工中都会出现机械损伤。该种伤痕形状不规则，无明显方向性。图 7 为由于机械损伤致断的实物断口。从图看出，当碰伤严重时，对高应力的柱塞弹簧而言，断口中几乎表现为全部静力脆断形貌，看不见疲劳瞬断唇口。

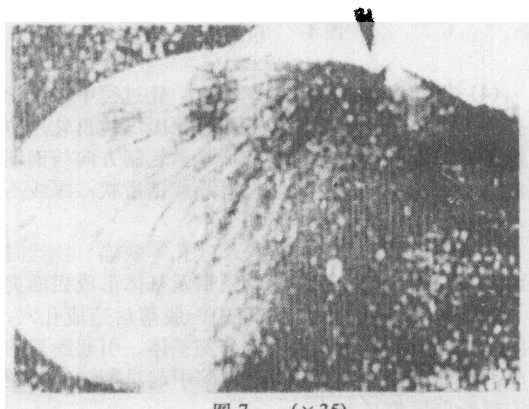


图 7 (×35)

(8) 钢丝表面脱碳 50CrVA 钢由于含碳量不高，钢中又含有能提高抗氧化性作用的铬元素，一般脱碳倾向不算很大。但是，由于脱碳对柱塞弹簧的

使用寿命影响很大，所以要严格予以控制，在工艺文件中明确规定不允许有脱碳现象。脱碳主要是由于原材料在冶炼、轧制或弹簧热处理中加热氧化造成的。它会明显降低钢的表面强度和疲劳强度极限，导致弹簧在使用中过早地发生断裂失效。由脱碳而造成断裂的断口形貌，同疲劳断口特征相似，只是疲劳扩展区面积较小而已。

(9) 弹簧淬火裂纹 图 8 为油泵经两小时三十分运转后断裂的柱塞弹簧断口处的裂纹形貌。该裂纹与断口相连，细瘦而略带弯折，断口呈脆断的平直特征。该批弹簧硬度偏高。分析认为，造成裂纹的原因主要是淬火介质由油改为碱水所致，当然还与该批钢丝表面存在残留拉痕有关。图 9 是该批钢丝用水冷淬火重复出现的裂纹高倍照片。裂纹宽窄不均，似有折叉，刚直有力，与断裂弹簧上的裂纹相似。

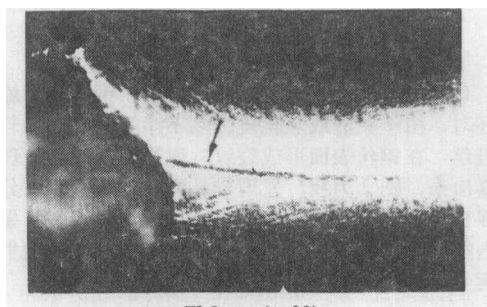


图 8 (×30)

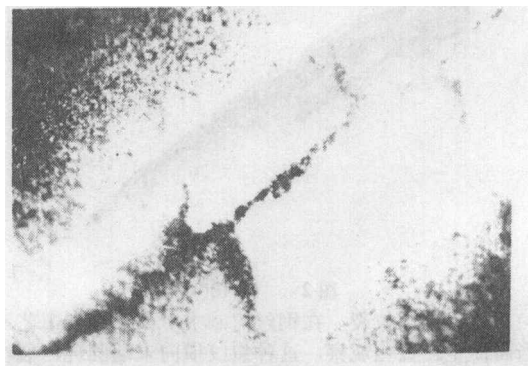


图 9 (×100)

(10) 金相组织不正常 我们曾发现一批柱塞弹簧断裂, 其断口较细腻、灰暗, 未见明显的表面缺陷, 疲劳裂纹始于弹簧内侧表面, 如图 10。进一步做电子断口分析, 除出现穿晶疲劳条带外, 还分布有韧性疲劳条带, 说明基体较软, 不均匀性较重, 并发现断口过载区有碳化物粒子。这是奥氏体化不充分、碳化物溶解不良的标志。这批弹簧还伴有弹力不足或弹簧负荷不够的情形发生。

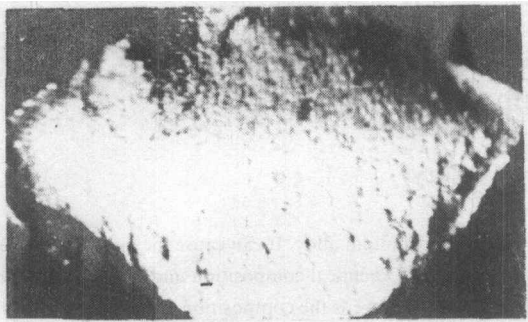


图 10 ($\times 80$)

四、防止柱塞弹簧早期断裂的措施

从上述分析可见, 由表面缺陷造成的柱塞弹簧断裂, 比率很高, 影响程度较大。一段时间内, 不仅折断次数多, 而且生产合格率低到 30% 以下, 主要原因就是弹簧的表面缺陷。

生产实践及理论分析都指出, 柱塞弹簧的断裂多是从应力最大的地方开始的, 而应力最大的地方均在弹簧簧杆表面或应力集中部位。为此, 我们拟从以下几方面采取措施, 防止其早期断裂失效。

1. 提高钢丝及弹簧的冶金及表面质量, 降低应力集中的有害效应

(1) 原材料的订货应有专用技术条件 (协议) 保证, 提高钢丝的冶金质量。近年来, 江西钢厂、陕西钢厂为满足航空燃油泵柱塞弹簧的特殊要求, 在总结过去生产实践的基础上, 采用二次电渣重熔、干拉变水拉、调整化学组成、严格控制脱碳和表面缺陷等一系列工艺改进措施, 提高了钢的纯度和机械性能指标, 降低了钢丝表面缺陷的尺寸。这为提高柱塞弹簧寿命创造了条件。实践验证指出, 采用定点定专用技术条件的钢丝绕制的弹簧经振动试验, 其寿命较好, 应力循环次数达到 10^7 数量级以上, 使折断率大为降低。

(2) 加强生产过程的质量控制, 努力减少表面缺陷的产生。高强度冷拉弹簧钢丝很容易产生划伤、损伤, 热表处理过程中的盐浴、碱槽、电解液的腐蚀也常产生表面坑点。为此, 我们组织攻关, 先后采用改进缠绕方法、专炉专槽处理、改进清洗工艺、选用合理的电抛光规范 (或取消电抛光工序)、加强工序

间的防锈以及控制生产周期等措施, 收到了较好的效果。

(3) 加强对弹簧成品的表面检验。这几年工厂采用超声波表面探伤法代替传统的目视检查法。实践证明, 这种方法不仅能检查表面凹坑, 还能检查夹杂、脱碳、皮下缺陷等。它是把对表面缺陷从定性检查过渡到定量检查的一次飞跃, 对提高柱塞弹簧使用可靠性是很有作用的。

2. 对弹簧表面进行喷丸处理

高强度弹簧钢丝对缺口的敏感系数一般很大, 采用喷丸处理可以使钢的表层形成残余压应力, 提高钢的疲劳强度极限, 是强化效果很显著的一种工艺。实践表明, 采用此法可以使原来仅能支持 7×10^6 次振动的弹簧提高到 23×10^6 次, 将应力循环次数扩大了两倍多。喷丸工艺已在一些工厂应用, 收到良好效果。

3. 寻求新的弹簧材料

在这方面, 要做的文章还很多, 潜力还很大, 应列为专题论述。

※ ※ ※ ※ ※ ※ ※ ※ ※ ※ ※

航空航天工业部激光全息

无损检测技术座谈会在京召开

为了促进我国激光全息无损检测技术的应用和发展, 航空航天工业部科学技术研究院于 1989 年 3 月 6 日至 8 日在北京召开了激光全息无损检测技术座谈会。参加会议的有来自我部有关院校、研究所和工厂从事激光全息无损检测工作的专家、教授共 17 人。部科学技术研究院胡元凯同志主持了会议, 国家科委高技术司李军同志应邀出席了会议, 六二一所总工程师刘伯操同志在会上作了讲话。与会代表交流总结了各自的工作经验和取得的科研、生产成果, 提出了目前存在的问题, 着重就“八五”期间我部本专业的研究方向、具体目标以及应采取的措施进行了认真而深入的讨论, 并取得了一致意见。最后一致通过了会议纪要。

(六二一所 郭新民)