

机械产品失效分析丛书

JIXIECHANPIN
SHIXIAOFENXI

● 零件—2

弹簧的失效分析

● 中国机械工程学会材料学会主编

● 机械工业出版社





数据加载失败，请稍后重试！

机械产品失效分析丛书

(零件—2)

弹簧的失效分析

中国机械工程学会材料学会主编

苏德达 李忆莲 编著

本书属于《机械产品失效分析丛书》第二部分常用机械零件的失效(零件-2),书中论述了弹簧的种类和工作特点,弹簧失效的主要形式、特征及其影响因素,收集了最近几年来国内外已发表的许多有关弹簧失效实例及对失效原因的分析,最后提出了一些预防弹簧失效的措施和提高弹簧使用寿命的途径。

本书可供从事弹簧设计、科研、生产、检验和使用等方面的工程技术人员和工人使用,对于从事弹簧材料研究、生产的技术人员和大专院校从事金属材料及热处理方面的师生亦有参考价值。

机械产品失效分析丛书

(零件-2)

弹簧的失效分析

中国机械工程学会材料学会主编

苏德达 李忆莲 编著

责任编辑:张绪江

封面设计:郭景云

机械工业出版社出版(北京阜成门外百万庄南里一号)

(北京市书刊出版业营业许可证出字第117号)

河北省涞水县印刷厂印刷

新华书店北京发行所发行·新华书店经售

开本 850×1168¹/₃₂·印张11³/₈·字数284千字

1988年12月北京第一版·1988年12月河北第一次印刷

印数 0,001—3,450 ·定价:5.70元

ISBN 7-111-00792-1/TH·134

前 言

机械产品失效分析是一门新的跨学科的综合性技术，在一些国家中已将它作为一门新的独立学科加以研究和发展。这是因为尽管人们所掌握的机械设计、材料、工艺、管理等知识不断地丰富与深化，所运用的技术手段不断地更新与完善，但机械产品的失效事故仍经常发生，一些重大的失效事件往往会招致生命和财产的巨大损失。所以必须系统地研究机件的失效类型、鉴别失效类型的技术、预测及监控失效的方法、改进与预防失效的措施等。这方面的知识不仅对专业失效分析工作者是不可缺少的，就是对于设计工程师、材料和工艺工程师以及生产管理人员也都是十分必要的。只有对产品一切可能的失效形式、发生的条件、控制及预防措施等有深刻的理解，才可望在创造优质产品方面获得成功。

为了在我国开展失效分析工作，中国机械工程学会于1980年在北京召开了第一次全国机械产品失效分析学术会议。随后，中国机械工程学会材料学会又组织过多次全国性的失效分析学术会议。为了广泛开展失效分析工作，普及失效分析的基本知识，提高失效分析的技术水平，扩大失效分析工作队伍，进一步促进失效分析工作在机械工业中的深入发展，使失效分析工作在国民经济的发展中发挥更大的作用，材料学会决定组织编写《机械产品的失效分析》丛书，并责成材料学会编辑出版委员会负责组织丛书的编写工作。

丛书共分三大部分：第一部分为失效分析的基础知识，第二部分为常用机械零件的失效分析，第三部分为工艺失效分析。

丛书编写的特点是讲求实用性，强调综合分析，引导读者如

何正确地进行失效分析工作，因此用较多的篇幅介绍近期的应用实例，反应我国失效分析的技术水平、主要成果和经验，同时适当地引入国外先进经验以资借鉴。

在丛书编写过程中，中国机械工程学会秘书长许绍高，中国机械工程学会出版编辑委员会主任陈元直给予了极大的关注和指导。在此对参加丛书编写人员所在单位的领导对本丛书编写所给予的大力支持表示感谢。

这套丛书是供从事机械产品设计、制造、使用、维修的具有中专以上程度的工程技术人员及技术管理人员使用，也可供科研人员和大专院校师生参考，并可做为组织失效分析训练班的教材使用。

由于编著者水平有限，缺点错误之处在所难免，望各界读者批评指正，以便进一步修改补充。

中国机械工程学会材料学会

1988

中国机械工程学会材料学会

机械产品失效分析丛书编委会成员

主任：王仁智

副主任：钟群鹏

委员（按姓氏笔划）：

王仁智，方婉莹，刘民治，陈玉民，

陈南平，张绪江，赵 坚，钟群鹏，

唐汝钧，涂铭旌，庾 鹏，栗 滋

顾问：周惠久，张协和，陶正跃

编 者 的 话

随着我国四化建设事业的飞速发展和人民生活水平的不断提高,在生产和日常生活中弹簧的应用更趋广泛,对弹簧的需求量日益增加。尽管不少人对弹簧本身并不怎么了解,但是他们几乎每天都要直接或间接地和弹簧打交道。例如,生活中经常应用的计时刻表、弹簧秤、启动各种录音机和电视机,乃至许多日用家具中都能看到弹簧的作用。在工业生产中,例如各种交通工具、电器及仪表、发动机及机械设备、控制阀及安全装置中,弹簧都是一种非常重要的基础件。从事工业生产并经常选用弹簧的技术人员对弹簧的重要性都有足够的认识;不过,对于弹簧的设计与选用、弹簧的各种失效形式及其防止方法等方面往往了解较少,很需要一些简明的参考资料,用以解决生产实践中的问题。对于从事弹簧生产者来说,为了保证产品质量、提高生产率、生产出各种各样的弹簧,也需要这方面的资料。

目前,关于弹簧设计、弹簧材料、弹簧的制造与应用方面的参考书较多^[1~4]。本书着重讨论弹簧的失效及其分析方面的问题。首先,对典型弹簧的工作与受力特点进行了扼要分析,接着介绍弹簧的主要失效形式和分析弹簧失效的方法,并以典型实例进行具体说明,然后讨论弹簧的结构因素、弹簧材料以及弹簧的生产过程等因素对弹簧失效的影响,最后,选择有代表性的弹簧失效案例进行分析。这些内容不仅对于从事机械产品失效分析的科技人员提供了一些有关弹簧失效分析方面的专业知识,¹也为从事弹簧设计、生产、管理和使用人员提供了一些有益的参考资料。

本书是在《机械产品失效分析丛书》编委会组织和领导下,

由李忆莲同志编写第五章及第六章中的一部分，其余由苏德达同志编写并定稿，最后由主编王仁智和钟群鹏同志等负责组织审稿。

在编写过程中，天津大学辛梦玲工程师和安明成同志在弹簧断口分析和金相组织拍照等方面做了大量工作。曾经得到了全国很多单位及个人的积极支持和帮助。上海材料研究所的吴连生和李晋、第一汽车研究所的李维拥、第二汽车制造厂钢板弹簧厂敖炳秋和毕传普、天津机车车辆机械厂董洪业及刘诚勇、南宁手扶拖拉机厂杨松枝和刘列格、洛阳第一拖拉机厂的姜增和郭丽洁、南京航空附件厂魏拔鳌、重庆长安机器厂冯仪丰、国营伟建机器厂雷洪、重庆仪表材料研究所杨亲民、上海柴油机厂郭大威、上海钢铁研究所郭林娣、天津大学蔡文华、重庆红岩汽车钢板弹簧厂廖代明、南昌航空工业学院余植中和杨世芳以及吉林工业大学谭玉光等同志都及时提供了宝贵的资料和照片。此外，上海中国弹簧厂、天津市弹簧厂及天津动力机厂也提供了一些素材。在此，向上述单位和个人表示衷心的感谢。

由于编者水平有限，书中的错误或不妥之处在所难免，敬希广大读者批评指正。

编者 1988

常用符号和单位

- A ——弹簧材料截面面积, mm^2 ; 系数
- a ——矩形截面材料垂直于弹簧轴线边的边长, mm
- B ——系数
- b ——矩形截面材料平行于弹簧轴线边的边长, mm ; 弹簧的高径比
(弹簧稳定性)
- C ——系数 (与端部固定方法有关)
- C_1 ——系数
- c ——旋绕比(弹簧指数)
- D ——弹簧外径, mm
- D_i ——弹簧内径, mm
- D_r ——弹簧中径, mm
- d ——圆形截面弹簧材料直径, mm
- E ——弹簧材料的正弹性模量 (简称弹性模量), MPa
- F ——弹簧的变形量, mm
- F_s ——组合弹簧的变形量, mm
- F_f ——板弹簧自由端挠度, mm
- F_r ——弹簧的径向或切向变形量, mm ; 径向惯性力, N
- F_{gr} ——径向背压力, N
- f ——弹簧一阶自振频率, $\text{Hz (S}^{-1}\text{)}$; 单片弹簧的变形量, mm
- f_r ——载荷频率, $\text{Hz (S}^{-1}\text{)}$
- G ——弹簧材料的切变模量, MPa
- G_s —— 0°C 时的切变模量, MPa
- g ——重力加速度, m/s^2
- H ——弹簧的工作高度 (长度), mm
- H_s ——弹簧的自由高度 (长度), mm
- H' ——弹簧在平衡状态上下支承面之间的距离, mm
- H_u ——显微硬度, MPa
- h ——碟形弹簧的内截锥高度, mm
- I ——截面的惯性矩, mm^4
- I_s ——板簧固定端截面惯性矩, mm^4

- I_p ——极惯性矩, mm^4
 K 和 K' ——圆形截面和矩形截面曲度系数
 K 或 K_1' ——扭转曲度系数
 K_F ——垂直载荷影响系数
 K_s ——形状系数
 k ——材料利用系数
 L ——弹簧展开长度, mm
 l ——板簧的悬臂长度, mm
 M ——弯曲力矩, $\text{N}\cdot\text{m}$
 m ——作用于弹簧上物体的质量, $\text{N}\cdot\text{S}^2/\text{m}$; 温度系数
 M_0 ——当量质量
 N ——应力循环次数; 喷丸强度 N 试片, mm
 n ——弹簧的工作圈数或板簧片数
 P ——弹簧所受载荷, N
 P_0 ——载荷幅, N
 P_c ——弹簧稳定性的临界载荷, N
 P_m ——平均载荷, N
 P_0 ——拉伸弹簧的初拉力, N
 P_r ——弹簧所受径向剪切载荷, N
 P' ——弹簧的刚度, N/mm
 P_s' ——组合弹簧的刚度, N/mm
 P_r' ——弹簧的径向刚度, N/mm
 R ——弹簧中径的一半, mm ; 力臂长度, mm
 r ——应力循环特征系数; 曲率半径, mm
 S ——疲劳安全系数; 碟片的厚度, mm
 T ——扭矩, $\text{N}\cdot\text{m}$
 T' ——扭转弹簧的刚度, $\text{N}\cdot\text{m}/\text{deg}$
 t ——时间, s ; 弹簧的节距, mm ; 温度, $^{\circ}\text{C}$
 U ——应变能或变形能, J
 U' ——弹簧材料单位体积的弹性应变能(比应变能), J/mm^3
 V ——弹簧材料有效部分的体积, mm^3

- v ——冲击体的运动速度, m/s
- W ——冲击体的重量, N
- W_s ——弹簧的重量, N
- Z_t ——抗扭截面系数, mm^3
- Z_m ——抗弯截面系数, mm^3
- Z_{m0} ——固定端抗弯截面系数, mm^3
- α ——螺旋角 deg ; 弹簧特性线与横坐标的夹角, deg ; 系数: 扭杆受载时力臂中心线与水平线所成的夹角, deg
- β ——扭杆卸载时力臂中心线与水平线所成的夹角, deg ; 圆锥角, deg ; 系数
- γ ——弹簧材料的密度, kg/m^3 , 对于钢铁 $\gamma = 7850 kg/m^3$; 系数
- ζ ——质量转化系数
- η ——应力松弛率 $\%$; 系数; 板簧的宽度比值
- θ ——弹簧轴线与水平线之间的夹角, deg
- μ ——摩擦系数
- ν ——泊桑比
- σ ——正应力, MPa
- σ_s ——抗拉强度极限, MPa
- σ_{ms} ——最大弯曲应力, MPa
- σ_r ——残余应力, MPa
- σ_s ——抗拉屈服极限, MPa
- σ_{-1} ——对称弯曲疲劳极限, MPa
- τ ——切应力, MPa
- τ_a ——应力幅, MPa
- τ_s ——抗扭强度极限, MPa
- τ_m ——平均切应力, MPa
- τ_{ms} ——最大切应力, MPa
- τ_{mn} ——最小切应力, MPa
- τ_s ——抗扭屈服极限, MPa
- τ_{-1} ——拉伸簧的初切应力, MPa ; 脉动疲劳极限, MPa
- φ ——扭转变形角, deg ; 或 rad ; 摩擦角, deg

目 录

第一章 弹簧的工作特点及受力分析	(1)
第一节 概述	(1)
一、弹簧的特点和功能	(1)
二、弹簧的类型、工作特性及其应用	(2)
第二节 螺旋弹簧的工作特点及受力分析	(6)
一、螺旋弹簧的类型、特点和应用	(6)
二、圆柱压缩螺旋弹簧的受力分析	(8)
三、圆柱拉伸螺旋弹簧的受力分析	(20)
四、圆柱扭转螺旋弹簧的受力分析	(22)
第三节 板簧的工作特点及受力分析	(25)
一、板簧的形状、特性和类型	(25)
二、板簧的受力分析	(28)
第四节 其他类型弹簧的工作特点及受力分析	(34)
一、扭杆弹簧的工作特点及受力分析	(34)
二、碟形弹簧的工作特点及受力分析	(37)
三、环形弹簧的工作特点及受力分析	(40)
参考文献	(43)
第二章 弹簧的主要失效形式及其分析	(44)
第一节 概述	(44)
第二节 弹簧的脆性断裂失效	(47)
一、脆性断裂失效的原因	(47)
二、脆性断裂的断口特征及识别方法	(48)
三、实例及预防措施	(51)
第三节 弹簧疲劳断裂失效	(54)
一、疲劳断裂发生的原因及其影响因素	(54)
二、疲劳断裂的断口特征及鉴别方法	(58)
三、疲劳失效实例及预防措施	(64)

第四节 弹簧的腐蚀疲劳及应力腐蚀断裂失效	(81)
一、弹簧腐蚀疲劳断裂失效	(81)
二、弹簧的应力腐蚀断裂失效	(89)
第五节 弹簧的氢脆、镉脆及黑脆失效	(92)
一、弹簧的氢脆失效	(92)
二、弹簧的镉脆失效	(97)
三、弹簧的黑脆失效	(101)
第六节 弹簧的松弛与变形失效	(106)
一、松弛与变形失效产生的原因及其影响因素	(106)
二、松弛与变形失效实例分析	(108)
第七节 弹簧的磨损失效	(110)
一、活塞式压缩机阀簧的磨损失效	(111)
二、板簧的磨损失效	(112)
参考文献	(112)
第三章 结构因素与工作条件对弹簧失效的影响	(114)
第一节 结构因素对弹簧失效的影响	(114)
一、螺旋弹簧的几何形状及尺寸对失效的影响	(114)
二、板簧的截面形状及尺寸对失效的影响	(119)
三、弹簧的组装方式对失效的影响	(127)
第二节 工作条件对弹簧失效的影响	(129)
一、受力条件的影响	(130)
二、环境的影响	(133)
三、工作温度的影响	(135)
参考文献	(139)
第四章 弹簧材料的选用对弹簧失效的影响	(140)
第一节 热轧弹簧钢及其选用	(141)
一、热轧弹簧钢的种类和技术条件	(141)
二、热轧弹簧钢的选用	(151)
第二节 弹簧钢丝、钢带及其选用	(160)
一、弹簧钢丝的种类及其选用	(162)
二、弹簧薄钢带及其选用	(179)
第三节 不锈钢弹簧钢及耐热弹簧钢	(180)

一、不锈钢弹簧钢及其选用	(181)
二、耐热弹簧钢和合金及其选用	(191)
第四节 非铁基弹性合金及其选用	(191)
一、镍基高温高弹性合金及其选用	(191)
二、钴基合金及其选用	(193)
三、铜基合金及其选用	(195)
第五节 材料的冶金因素对弹簧失效的影响	(205)
一、冶金生产过程中造成的原材料缺陷	(206)
二、钢丝冶金质量不良引起的生产故障及弹簧失效	(215)
参考文献	(225)
第五章 弹簧生产工艺过程对弹簧失效的影响	(227)
第一节 冷成型工艺缺陷对弹簧失效的影响	(227)
第二节 热成型工艺缺陷对弹簧失效的影响	(230)
第三节 热处理工艺对弹簧失效的影响	(237)
一、弹簧热处理概述	(237)
二、淬火裂纹	(239)
三、热处理不当产生的非正常组织	(247)
四、弹簧的热处理变形	(254)
五、表面氧化与脱碳	(257)
第四节 表面处理不当对弹簧失效的影响	(264)
一、表面喷丸强化	(264)
二、镀镉和镀锌	(270)
三、煮黑(发蓝)	(274)
四、其他表面处理	(275)
第五节 磨加工与整形对弹簧失效的影响	(276)
一、整形与失效	(276)
二、磨簧	(277)
三、整形和磨加工缺陷对失效的影响	(277)
参考文献	(279)
第六章 弹簧失效案例分析	(280)
一、转子发动机刮片弹簧的失效分析	(280)

二、汽车风挡玻璃雨刮器胶条弹簧的失效分析.....	(289)
三、AM500采煤机主泵马达弹簧的失效分析.....	(294)
四、S6102汽油机气阀弹簧的失效分析.....	(299)
五、弹簧垫圈断裂的失效分析.....	(304)
六、飞机用4230-1弹簧的断裂失效分析.....	(309)
七、汽车玻璃升降器平衡弹簧的失效分析.....	(314)
八、1t矿车缓冲弹簧的失效分析.....	(319)
九、高应力弹簧的失效分析.....	(323)
十、活塞式压缩机阀门弹簧的失效分析.....	(331)
十一、长江-750型摩托车减震器弹簧失效分析.....	(343)
参考文献.....	(347)

第一章 弹簧的工作特点及受力分析

第一节 概 述

一、弹簧的特点和功能

弹簧对于工程师、特别是对机械设计工程师来说有很大意义。因为，弹簧常可用来制作一些最简单的机械储存或放出能量的装置。和某些紧固件相似，在各种机械产品中，几乎都缺少不了各种各样的弹簧。

在机械产品中，弹簧的用途非常广泛，它的种类繁多，形状、大小各异。有头发丝那样细小的钟表弹簧、价格低廉的圆珠笔弹簧，也有尺寸相当大的用于各种交通工具方面的缓冲弹簧，还有一些质量要求很高的宇航业使用的精密弹簧。

弹簧的基本作用就是利用材料的弹性和弹簧本身的结构特点，在产生及恢复变形时，可以把机械功或动能转变为形变能；或者把形变能转变为动能或机械功，即弹簧内部储存能量的大小是变形（位移）的函数。从某种意义上讲，每一个机械零件都可看作是一个弹簧，因为，所有材料都有一定的弹性。在适当外力的作用下，通常它都可以产生一定程度的弹性变形甚至扭曲，这就是弹性体的共同特点。

弹簧有许多宝贵的功能，用它可以达到下列目的^[1]：

1. 外力去除后能自动恢复到原来位置。例如，凸轮从动装置、阀门顶杆、压缩机气阀以及一些执行元件中使用的弹簧；
2. 储存和释放能量，对一些机构提供动能。这是最早使用的弹簧、且目前仍在广泛使用弹簧的一种方法。例如，各种钟表、电影摄象机及各种玩具等使用的弹簧；