

机械产品失效分析丛书

JIXIECHANPIN
SHIXIAOFENXI

● 零件—3

轴及紧固件的失效分析

● 中国机械工程学会材料学会主编

2

机械工业出版社



内 容 简 介

本书概括地介绍了轴及紧固件的失效分析方法程序,系统地论述了这两大类零件失效的基本类型、破坏特征和鉴别方法,同时对零件的受力状态、材料与加工工艺的质量控制进行了全面的分析,书中例举了大量典型失效分析案例供读者借鉴。

本书可供产品设计、生产试验、质量管理和失效分析人员阅读,也可供大专院校有关专业的师生参考。

机械产品失效分析丛书

(零件-3)

轴及紧固件的失效分析

中国机械工程学会材料学会 主编

王大伦 赵德真 郑伯芳 编著

责任编辑:张绪江

封面设计:郭景云

机械工业出版社(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)

通县曙光印刷厂印刷

新华书店北京发行所发行·新华书店经售

开本 850×1168¹/₁₆·印张 11¹/₄·字数 283千字

1988年6月北京第一版·1988年6月北京第一次印刷

印数 0,001~4,250 定价:4.65元

ISBN 7-111-00750-6/TD·43

前 言

机械产品失效分析是一门新的跨学科的综合性的技术,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导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,而且对于设计工程师、材料和工艺工程师以及生产管理人员,也是十分必要的。只有对产品一切可能的失效形式,其发生的条件、控制与预防等有深刻的理解,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,中国机械工程学会委托材料学会于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这套《机械产品失效分析》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。因为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宜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的设计、制造、使用、维修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，并可作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

主任委员：王仁智

副主任委员：钟群鹏

委员（按姓氏笔划序）

王仁智 方炳莹 刘氏治 陈玉民 陈南平 张绪江

赵 坚 钟群鹏 辟汝钧 涂德莲 虞 鹏 粟 溢

顾问：周惠久 张协和 陶正跃

编 者 的 话

机械产品失效分析的目的在于查清失效事故的原因,提出切实地改进意见,以避免类似事故再度发生。这不仅对于改进某一个具体产品的质量是重要的,而且由于在分析中可能发现原来的材料选用、设计理论以及工艺过程中存在的种种问题——这些问题的解决就意味着科学与技术的进步,因而具有更为深刻的意义。

轴是各种机械产品中用得最多、最重要的零件之一,其工作条件较为复杂,失效事故时有发生。小至仪器仪表的微型轴件,大至大型水轮及汽轮发电机组的主轴,每每导致严重损失。因而轴件失效的分析工作无疑是极为重要的。紧固件虽小,但就其应用的广泛程度和所担负的工作职能而言,却也是绝不可忽视的。几乎任何一种机械中都不能不用各种类型的紧固件。由于紧固件失效而导致重大事故的例子在过去和现代化的今天均不鲜见。

本分册较详尽地阐述了对轴件和紧固件进行失效分析所必需的知识。各类零件的失效分析及其调查工作遵循着很多共同的规律,然而每类零件的失效又都具有独自的特征。掌握规律,了解特殊性,对于各种具体零件的失效分析是极为重要的。本书对轴与紧固件失效的基本类型、破坏特征、鉴别方法以及零件的受力状态,材料与工艺的质量控制和它们对产品失效的影响均作了较全面的讨论,最后给出了失效分析案例。这些实例按照失效分析的调查与推理程序陈述。希望读者了解实际进行失效分析的方法并得到启示。

这套丛书前面诸分册已对各类零件失效分析的基本知识和方法作了详细的介绍。故在本分册中凡涉及到这些基本知识时,只略予提及,读者如须了解其详细内容,请参阅各有关分册。

由于我们的水平所限，书中谬误与不妥之处在所难免，恳请读者批评指正。

最后，仅向为本书提供资料和实例的同志致以衷心感谢。

编者 1988年2月

目 录

轴 篇

第一章 轴件失效分析方法概述	(1)
第一节 失效分析的基本概念	(1)
一 轴件的失效及其基本类型	(1)
二 失效分析的目的	(2)
三 失效分析的步骤	(3)
第二节 原始资料搜集	(4)
一 设计参数与制造工艺	(4)
二 服役史	(5)
三 照相记录	(5)
四 选择试样	(5)
第三节 失效件的初步检查与断口处理	(6)
一 失效件的初步检查	(6)
二 断口处理	(7)
第四节 无损探伤检验和机械性能试验	(8)
一 无损探伤检验与实验应力分析	(8)
二 机械性能试验	(10)
第五节 断口分析与金相检查	(12)
一 宏观分析	(12)
二 光学显微镜断口分析	(13)
三 电子显微镜断口分析	(14)
四 金相检查	(15)
第二章 轴类零件的力学分析原理	(17)
第一节 轴的基本类型与工作条件	(17)

一	轴的基本类型	(17)
二	轴的工作条件	(18)
第二节	静强度分析	(20)
一	拉伸	(20)
二	压缩	(21)
三	扭转	(22)
四	弯曲	(24)
五	组合变形	(25)
第三节	疲劳强度分析	(26)
一	交变应力	(26)
二	疲劳极限	(28)
三	轴的疲劳强度计算	(29)
第四节	应力集中	(31)
一	应力集中因素的类型	(31)
二	应力集中的分析方法	(32)
三	降低应力集中的措施	(33)
第五节	刚度与振动分析	(35)
一	轴的刚度计算	(35)
二	轴的振动计算简介	(36)
第三章	轴类零件的失效形式及其鉴别	(41)
第一节	轴类零件的疲劳断裂	(41)
一	轴类零件疲劳断裂的一般特征	(41)
二	轴类零件的单向弯曲疲劳	(44)
三	轴类零件的双向弯曲疲劳	(48)
四	轴类零件的旋转弯曲疲劳	(50)
五	轴类零件的扭转疲劳	(54)
六	轴类零件的接触疲劳	(62)
第二节	轴类零件的扭转断裂	(63)
一	轴类零件扭转断裂的产生	(63)
二	轴类零件扭转断裂的特征	(64)
三	案例分析	(65)
第三节	轴类零件的脆性断裂	(66)

一	轴类零件的脆性断裂及其特征	(66)
二	轴类零件的解理断裂及其断口形态	(67)
三	轴类零件的沿晶脆性断裂及其断口形态	(69)
第四节	轴类零件的延性断裂	(74)
一	轴类零件延性断裂的产生	(74)
二	轴类零件延性断裂的特征	(75)
三	案例分析	(77)
第五节	轴类零件的变形失效	(78)
第六节	轴类零件的磨损	(79)
一	磨粒磨损	(79)
二	粘着磨损	(79)
三	微振腐蚀(摩擦磨损)	(80)
第七节	轴类零件的蠕变失效	(81)
一	轴类零件蠕变的产生	(81)
二	轴类零件蠕变断裂的特征	(82)
第八节	轴类零件的腐蚀失效	(83)
一	轴类零件腐蚀疲劳的特征	(83)
二	腐蚀疲劳的断口形貌	(84)
第四章	轴类零件的材料选择及其生产工艺流程	(85)
第一节	轴类零件选用材料的一般原则	(85)
一	选材的依据	(85)
二	选材的具体方法	(89)
三	一般选择钢种方法举例	(89)
第二节	钢的淬透性	(93)
一	调质钢的淬透性	(93)
二	调质处理的轴类零件淬硬深度的确定	(95)
三	渗碳钢的淬透性	(95)
四	根据淬透性选择钢种的方法	(97)
第三节	调质轴类零件的生产工艺流程及其质量控制	(98)
一	调质轴类零件的生产工艺流程	(98)
二	典型零件的质量检验	(98)
第四节	感应加热淬火轴类零件的生产	

工艺流程及其质量控制	(101)
一 感应加热淬火轴类零件的生产工艺流程	(101)
二 典型零件的质量检验	(102)
第五节 渗碳处理轴类零件的生产工艺流程及其质量控制	(104)
一 渗碳处理轴类零件的生产工艺流程	(104)
二 典型零件的质量检验	(104)
第六节 几种轴类零件的常用材料	(107)
第五章 轴类零件生产过程中常见的缺陷	
与失效案例分析	(110)
第一节 几种主要轴类零件生产过程中常见缺陷综述	(110)
一 曲轴	(110)
二 半轴	(110)
三 凸轮轴	(110)
四 连杆	(110)
五 齿轮轴	(114)
第二节 锻造过热与过烧	(114)
一 锻造过热和过烧的产生与鉴别	(115)
二 案例分析	(117)
第三节 锻造折叠裂纹	(126)
一 折叠裂纹的产生与鉴别	(126)
二 案例分析	(128)
第四节 铜裂	(132)
一 铜裂的产生	(132)
二 铜裂的鉴别	(132)
三 案例分析	(133)
第五节 淬火裂纹	(136)
一 淬火裂纹的产生及类型	(136)
二 淬火裂纹的鉴别	(138)
三 淬火裂纹形成的影响因素	(139)
四 案例分析	(143)
第六节 磨削裂纹	(147)
一 磨削裂纹的产生	(148)

二 磨削裂纹的鉴别	(149)
三 案例分析	(152)
第七节 淬火软点及淬硬层不均	(157)
一、渗碳淬火轴件的淬火软点	(157)
二、调质轴件的淬火软点	(159)
三、感应加热淬火轴件的淬硬层不均及淬火软点	(159)
第六章 轴类零件典型案例的失效分析	(161)
第一例 某中型载重汽车前轴断裂分析	(161)
第二例 减摆器转子轴断裂失效分析	(176)
第三例 齿轮轴疲劳断裂分析	(182)
第四例 中合金热轧辊破断分析	(186)
第五例 离合器轴断裂分析	(193)
第六例 摩托车边轮轴失效分析	(197)
第七例 柴油机喷油泵凸轮轴断裂分析	(204)
第八例 曲轴的断裂分析	(212)
第九例 柴油机曲轴断裂分析	(219)
第十例 越野车传动轴破损分析	(222)

紧 固 件 篇

第七章 • 紧固件的基本类型与受力分析	(226)
第一节 概 述	(226)
第二节 螺纹紧固件	(228)
一 螺纹紧固件的结构与分类	(228)
二 螺纹紧固件的工作状况	(230)
三 螺纹紧固件的受力分析与强度计算	(232)
第三节 铆 钉	(242)
一 铆钉联接的结构类型与失效形式	(242)
二 铆钉联接的设计计算	(244)
第四节 销 钉	(246)
第八章 紧固件的材料选择	(249)
第一节 材料选择	(249)
一 选材的一般原则	(249)
二 钢材的化学成份	(252)

三	钢材的原始组织	(253)
四	钢的淬透性能	(255)
五	常用紧固件用钢及其技术条件	(256)
第二节	钢材冶金缺陷对紧固件性能的影响	(263)
一	钢材的发纹	(264)
二	钢材碳偏析	(264)
三	缩孔残余	(266)
五	钢材的脱碳	(267)
第九章	紧固件的工艺废品分析及质量控制	(269)
第一节	紧固件的生产工艺流程	(269)
第二节	紧固件工艺废分析	(271)
一	冷拔开裂	(271)
二	冷墩开裂	(276)
三	搓丝 滚丝造成的缺陷	(279)
四	热处理工艺造成的缺陷	(282)
第三节	紧固件的质量控制	(288)
一	螺纹紧固件的机械性能标准	(289)
二	拉力试验	(289)
三	硬度试验	(290)
四	保证载荷试验	(290)
五	楔负载试验	(292)
六	螺栓头部坚固性试验	(293)
七	脱碳试验	(294)
第十章	紧固件主要失效形式及其典型案例分析	(296)
第一节	紧固件的脆性断裂失效	(296)
一	断裂特征	(296)
二	案例分析	(298)
第二节	紧固件的延滞破坏失效	(306)
一	紧固件的氢损伤	(306)
二	紧固件的应力腐蚀破坏	(312)
三	液体金属脆断	(320)

第三节 紧固件的腐蚀失效	(323)
一 裂纹特征	(323)
二 断口特征	(323)
三 案例分析	(323)
第四节 螺栓在高温条件下的断裂失效	(330)
一 螺栓在高温使用中断裂的起因	(330)
二 螺栓的高温蠕变断裂	(330)
三 螺栓在高温下因碳化物沉淀而脆断	(336)
第五节 紧固件的疲劳失效	(339)
一 影响紧固件疲劳性能的几个因素	(339)
二 案例分析	(341)
第六节 紧固件的变形与脱扣	(345)
一 概 述	(345)
二 案例分析	(345)
参考文献	(346)

轴 篇

第一章 轴件失效分析方法概述

第一节 失效分析的基本概念

一、轴件的失效及其基本类型

轴几乎是任何一种机械中都不可缺少的重要零件之一。它在机械中须完成其特有的功能，这包括：支承其他零件，承担载荷，传递力或能量等等。当它丧失其应有的功能时，即称为失效。轴件的失效可分为以下三种类型：

（一）过量变形

指轴件在使用过程中产生超出设计允许的过度变形。这种变形可能是弹性变形，如车床主轴、镗刀刀杆因刚度不足发生大弹性变形影响加工精度的情形；也可能是塑性变形，即由于设计失误或使用不当，使轴发生不可恢复的过量的残余变形，这其中还包括轴在高温条件下工作的高温蠕变。

（二）断裂

指轴件在外加载荷，或与其它环境因素（温度、腐蚀性介质等）相互影响共同作用之下，发生断裂破坏的情形。很显然，与其它失效形式相比，断裂是最危险的，它常常导致灾难性事故。根据其发生的条件与机理的不同，断裂失效可细分为以下诸类：

1. 一次性静载断裂。指在常温或低温下于空气中服役的轴件，由于一次性施加的静载荷过大（比如意外的严重超载），致使其最大应力超过了材料的极限强度，引起轴件断裂。
2. 一次性冲击加载断裂。指一次性高速冲击载荷引起的断裂。
3. 高温长期载荷作用下的断裂。指轴件在高温环境中承受

载荷的长时间作用而引起的高温蠕变开裂。

4. 应力腐蚀及腐蚀疲劳断裂。在腐蚀性介质中服役的零件,当承受的是静应力(拉应力长时间作用)时,则所引起的断裂称为应力腐蚀断裂;若承受的是交变应力时,则相应的断裂称为腐蚀疲劳断裂。

5. 疲劳断裂。指轴件在交变应力的长期作用下所引起的断裂。疲劳断裂是断裂失效中最常见的形式。据统计,在发生断裂失效的零件中,约有80%归咎于疲劳。估计轴件疲劳失效的比例还要高于此数,因而这是轴类零件失效最重要的形式。

(三) 表面损伤

指零件由于磨损、腐蚀、接触疲劳及其复合作用造成表面尺寸及粗糙度的变化,出现腐蚀坑、麻点、剥落等,使零件接触精度降低,振动增大,直至最终完全丧失其功能。

1. 磨损。指零件表面材料由于两接触表面的相对运动而不断损失的现象。零件的磨损一般属正常的失效。对于缸套和活塞环、凸轮和挺杆、轴瓦和轴等类零部件,磨损对其使用寿命常有决定性意义。

2. 腐蚀。是指零件在酸、碱或盐等特殊介质环境中服役时,金属与周围介质发生化学或电化学反应形成腐蚀产物或腐蚀坑致使表面损伤的现象。

3. 接触疲劳。是指零件在交变接触应力作用下,经过多次应力循环后出现表面的疲劳剥落现象。这是齿轮、凸轮、滚动轴承和某些轴的重要的失效形式。

在上述诸种失效形式中,要以磨损、腐蚀和疲劳为最重要。它们使得每年都有大量的零件报废,不断给人类带来灾难和惊人的经济损失。人类一直在和它们进行顽强的斗争。

二、失效分析的目的

失效分析工作的主要目标,是分析和确定导致零件失效的原因,以便据此提出积极有效的改进措施(包括建立新的设计计算

理论等），预防类似事故的再度发生。

一根轴可能在超出其预定寿命期限，或在意外的非正常工作（如不应有的超载）下失效，这就不能归咎于设计或制造的失误。从设计与制造的角度看，这种失效并不算是非正常的。

零件的非正常失效主要是指，在预定的寿命期间内，在正常的工作条件下，所发生的早期损坏。这种失效可能由各方面的多种原因引起，其中常见的如下：

1. 原材料存在不符合质量控制标准的缺陷，而未能被预先发现。

2. 对零件的实际服役条件，如载荷与环境方面的诸因素，掌握的不够确切，因而导致设计工作的失误。

3. 设计工作中，在材料选择、结构的确定、分析计算等方面的失误。

4. 工艺过程中失误，造成零件外在或内在的损伤或不合设计技术要求的状态。如毛坯制造过程中造成的成分偏析、夹杂、气孔、微裂等缺陷；热处理过程中的脱碳、软点、裂纹、残余应力等；酸洗、电镀工艺中的氢渗入；机械加工过程中不慎导致的深刀痕、清根、磨削裂纹等。

5. 装配失当，从而造成机械中不适当的受力状态。磨损不均、接配精度不足等，如零件偏斜，预紧力过大或过小等等。

6. 使用维修不当，如润滑不足，使用中造成意外损伤，操作失误等。

失效分析工作者，通过各种技术手段，判明机件失效的原因，提出有效的改进措施，并不断揭示出设计与制造领域中的新矛盾与新问题。这些新矛盾与新问题不断得到解决的过程，也就是科学技术不断发展进步的过程。因此，失效分析工作对推动科学技术的进步有着重大的意义。

三、失效分析的步骤

零件失效的性质与条件不同，分析的方法与步骤也各有差