

机械产品失效分析丛书

JIXIECHANPIN
SHIXIAOFENXI

● 基础—3

失效分析的思路与诊断

● 中国机械工程学会材料学会主编

● 机械工业出版社



TG 115
Z 5.9

机械产品失效分析丛书
(基础—3)

失效分析的思路与诊断

中国机械工程学会材料学会 主编

刘民治 钟明勋 编著



机械工业出版社

失
效

(京)新登字054号

任何机械系统、机械装置、机械零件的失效均应分析其原因，并提出有效的改进措施。本书系统地阐述如何着手进行失效分析；失效分析人员应具备怎样的素养；采取哪些分析步骤；如何正确而经济地选择分析手段和测试设备；进行失效分析应注意那些事项；怎样才能保证分析正确、改进措施合理等等。本书是机械产品失效分析丛书基础类中之一本，是失效分析理论与实践结合的指南。

111144/01
机械产品失效分析丛书

(基础—3)

失效分析的思路与诊断

中国机械工程学会材料学会 主编

责任编辑：~~张增江~~ 测试设计：胡金瑛

封面设计：~~王景云~~ 责任校对：李悦茹

责任印制：~~王福光~~

机械工业出版社出版（北京阜成门内大街25号）

（北京市书刊出版业营业许可证出字第117号）

机械工业出版社京丰印刷厂印刷

新华书店北京发行所发行·新华书店经售

*

开本 850×1168¹/₃₂·印张10·插页1·字数262千字

1993年10月北京第1版·1993年10月北京第1次印刷

印数 0 001—1 400·定价：14.00元

*

ISBN 7-111-03535-6/TG·775

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、管理等的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

1992

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

本书是编者从事各类机械产品失效分析工作二十多年实践和教学的总结，是引导如何正确进行失效分析工作的提钢，是帮助读者较快查明失效原因的简明“手册”，是有志从事失效分析工作的入门书，也是知识工程师着手编制“失效分析专家系统”和负责处理事故现场领导等的参考书。

本书既介绍了如何进行失效分析和诊断，又介绍了失效分析全过程的具体程序和实施步骤，以及如何更经济而高效地选择分析手段，以便读者能较快地掌握失效分析并运用自如。

本书共分四章。第一章介绍作为失效分析工作者应具备的思想方法、知识范围和品德素养，也是对失效分析工程师要求的水平。第二章介绍七种常用的分析思路和大型设备失效分析的四种系统分析思路。这些可作为具体分析时的总纲，同时列举出各种工艺、各种部件可能诱发失效的种种因素，有助于提示读者迅速找出原因。第三章给出了分析程序和分析步骤，是分析全过程的通用样本。读完这三章就知道如何正确进行失效分析，并能写出规范化的失效分析报告。第四章介绍失效分析工作者应该掌握的各种分析技术的基本原理、特长和所能提供的信息数据，以便在委托他人作专门技术分析时能提供合适的分析样品，并取得必不可少的判据，以便作为最终综合诊断的依据。

本书第四章和附录中的失效专家系统简介由钟明勋同志编写，其余由刘民治同志统稿。

王仁智、鹿鹏、钟群鹏三同志审阅了本书全稿并提出许多宝贵意见和建议，苏会和同志为本书二、三章绘制墨线图并提供了部分照片，张绪江同志为本书投入了超越编辑职责的许多劳动，特此一并致谢。

限于编者的知识和水平，书中不妥之处和错误在所难免，敬希读者来函〔610065〕成都科技大学批评指正。

编者

1993年4月于成都

目 录

第一章 概论	1
第一节 失效分析思路与诊断的重要性	1
第二节 失效分析的内容及一般注意事项	3
一、失效分析的内容	3
二、失效分析涉及的学科知识和失效分析人员应具备 的素养	6
三、失效分析中应当遵守的一般注意事项	7
第三节 失效分析过程中的思想方法	10
一、五条基本原则	10
二、五种具体方法	13
参考文献	15
第二章 失效分析的思路	16
第一节 常用的几种失效分析思路	16
一、“撒大网”逐个因素排除法	15
二、以设备制造全过程为一系统进行分析	21
三、根据部件失效模式分析	28
四、根据裂纹产生背景分析	30
五、根据部件服役条件分析	33
六、根据部件和设备类别分析	35
七、不合格产品分析	33
第二节 应用于失效分析的几种系统工程思路和方法	54
一、概述	54
二、系统工程的一些基本概念	55
三、故障树分析法	58
四、特征-因素图分析法	89
五、失效模式及后果分析法(FMEA法与FMECA法)	91
六、事件时序树分析法(ETA)	107

参考文献	115
第三章 失效分析的程序和步骤	117
第一节 失效分析程序的重要意义	117
第二节 失效分析程序的内容和步骤	117
第三节 各类失效分析程序的工作流程图	120
一、事故分析调查程序方框图	120
二、失效事故原因分析流程图	123
第四节 失效分析程序与步骤的实施	127
一、现场调查与背景资料的搜集	128
二、失效部件的宏观检验	136
三、试样的选取、标号、清洗与保存	145
四、断口的微观检验	150
五、金相试验	152
六、无损检验	153
七、化学成分分析	157
八、X-射线技术分析	159
九、力学性能测试	159
十、断裂力学分析	160
十一、机械设备失效中的人为因素和失误概率	160
十二、失效率与部件失效百分比	162
十三、失效机理的确定	168
十四、全部信息的归纳、综合分析和判断	186
十五、写出结论和建议	190
十六、回访与促进建议的贯彻	192
参考文献	192
第四章 失效分析的实验检测技术	195
第一节 失效分析中常用实验检测技术的种类和选用原则	195
一、失效分析检测技术的种类	195
二、选用失效分析检测技术的原则	195
第二节 失效形态观测技术	198
一、概述	198
二、宏观失效形态观测技术	199
三、光学金相技术	204

四、扫描电镜技术·····	210
五、透射电镜技术·····	214
第三节 成分分析技术·····	220
一、概述·····	220
二、常规湿法化学分析·····	226
三、发射光谱分析·····	222
四、原子吸收分光光度分析·····	225
五、电子探针分析·····	226
六、离子探针分析·····	230
七、俄歇电子能谱分析·····	235
八、铁谱技术·····	239
第四节 力学性能和断裂韧性试验·····	241
一、常规力学性能测定·····	241
二、特定的力学性能试验·····	246
三、断裂韧度测试·····	249
四、常用的两种环境因素试验·····	252
五、X-射线应力测定技术·····	254
第五节 失效零部件的基体组织及第二相的分析·····	255
一、概述·····	257
二、金相组织分析·····	257
三、电子衍射分析·····	258
四、X-射线衍射分析·····	262
五、钢和合金的物理化学相分析·····	266
第六节 无损检测技术·····	269
一、概述·····	269
二、缺陷的成因及缺陷的识别·····	269
三、超声波探伤·····	270
四、射线照相法探伤·····	271
五、磁粉探伤·····	272
六、渗透探伤·····	274
七、电磁感应(涡流)检测·····	276
八、应变测试·····	278
九、各种无损检测方法的比较及应用示例·····	281

参考文献	285
附录	288
附录(1) 焊接构件的破断原因	288
附录(2) 焊接结构件疲劳原因的分配比例	288
附录(3) 不同焊接工艺容易造成的焊接缺陷	289
附录(4) 电气机械零部件的失效模式及其比例	289
附录(5) 影响滚动轴承疲劳寿命的变量因素	290
附录(6) 轴承失效的原因	291
附录(7) 压力容器发生事故的原因	291
附录(8) 压力容器、安装管道的事故原因分类表	292
附录(9) 检验冷应变、锻件流线和偏析的浸触法	294
附录(10) 德国核技术材料实验室采用的方法	295
附录(11) 德国检验技术研究所应用的实验方法	296
附录(12) 专家系统及其在失效分析与诊断中的应用	297
参考文献	305

第一章 概 论

一个机械系统、机械装置、机械零件，甚至于十分简单的一个螺栓，一旦失效，要正确回答它为什么会失效，并提出有效的改进措施就需要进行失效分析。本书的目的，是系统地阐述如何着手进行失效分析；失效分析人员应具备怎样的素养、采取那些分析步骤、如何正确而经济地选择分析手段和测试设备；进行失效分析应注意哪些事项；怎样才能保证分析正确、改进措施合理等等。

第一节 失效分析思路与诊断的重要性

“凡产品丧失规定功能的现象，称为失效”^{〔1〕}。包含以下三种情况：

- ① 完全不能继续服役。如断裂或扭曲；
- ② 虽然还能运行，但已部分失去它原有的功能。如车床主轴因磨损而产生跳动，达不到原有的精度；高真空密封面上因出现划痕而导致微漏，达不到原有的真空度；
- ③ 虽然能运行，发挥原有功能，但因受损伤而不能安全可靠地继续服役。

有以上三种情况之一的零部件或装置，均称做失效^{〔2〕}。

为了研究失效的原因，确定失效的模式或机理，并采取补救或预防措施以防止失效再度发生的技术活动与管理活动，叫做“失效分析”。

目前失效分析活动在国内外都很活跃，说明失效分析是不可缺少的。假如一套装置，尤其是大型设备，一旦失效，不但会造成直接的重大经济损失，还会危及人们的生命安全，甚至破坏生态环境，引起严重的政治及社会问题。1984年印度博帕尔市美国

联合碳化物公司农药工厂毒气外泄，造成375人死亡，2000多人受伤。又如1985年8月12日，一架日航波音747飞机坠毁，死亡524人，是世界航空史上最大的单机空难。其它，如美国三里岛核电站泄漏事故；苏联核潜艇火灾事故，也是众所周知的。在工业生产、交通运输、压力容器和石油化工等大型机械设备中，各种事故所造成的损失之巨大也是令人触目惊心的。现以美国1982年的失效统计数字为例：断裂失效损失为1140亿美元，其中可避免的为360亿美元；腐蚀失效损失为720亿美元，可避免的为100亿美元；其中磨损失效损失数目很大还未包括在内。由此可见，一方面失效能引起惊人的经济损失，另一方面通过失效分析亦能挽回巨大的经济效益。

失效分析的重要性，在本书的第一分册^[1]，已有详细论述，现简要归纳如下：

① 可总结经验教训，为产品设计和制造工艺的改进及其合理使用提供科学依据，避免同类事故再次发生；

② 能促进引进技术的消化；对进口设备的失效分析，可提供与外商索赔谈判需要的技术依据；

③ 失效分析的结果，是修订或制定各科规范、标准或法规（如产品质量法、安全法）的主要依据；

④ 维护和修理工作以失效分析为基础，能收到事半功倍的良好效果；

⑤ 失效分析的统计资料是制定科技开发规划和经济发展规划的重要依据之一；

⑥ 为各级技术工作者正确处理现场技术问题提供必要的科学依据；

⑦ 可为公安部门侦破案情提供关键性证据。

失效分析在生产建设中极其重要，失效分析的限期往往要求很短，分析结论要正确无误，改进措施要切实可行。导致零部件或系统失效的因素往往很多，加之零部件相互之间的受力情况很复杂，如果再考虑外界条件的影响，这就使失效分析的任务更加

繁重。此外，大多数失效分析的关键性试样十分有限，只容许一次取样，一次观察和测量。在分析程序上走错一步，可能导致整个分析的失败。由此可见，如果分析之前没有一条正确的分析思路，要能如期得出正确的结论几乎是不可能的。

有了正确的分析思路，才能制定正确的分析程序。大的事故需要很多分析人员按照分工同时进行，做到有条不紊，不走弯路，不浪费测试费用。所以从经济角度也要求有正确的分析思路。

总之，正确的分析思路是顺利进行失效分析的基础。而只有正确的分析程序，才能保证顺利地进行失效分析。有关这两方面的详细内容，见本书第二章、第三章。

第二节 失效分析的内容及一般注意事项

一、失效分析的内容

失效分析涉及的内容很多，大体上可分为以下几个方面：

1. 早期失效分析

指产品在未达到设计规定的使用寿命前所发生的早期失效。这是企业为了发展产品，提高质量应特别着重进行的一种失效分析。

2. 突发失效分析

指产品未能通过事前的检测或监控未预计到的一种失效。它往往造成较大的损失，涉及经济法问题，因而常需由授权的失效分析人员进行分析。

3. 产品缺陷安全度预测

又称产品缺陷危险性分析。产品的各类缺陷虽然不符合质量标准的要求，但并非所有的缺陷一定会导致产品的失效，如果一律报废会造成很大的经济损失。产品缺陷可分为三类：

- (1) 危险缺陷 会导致产品失效，而且是不能修复的缺陷。
 - (2) 可修复缺陷 这种缺陷如不排除会导致产品失效，但它
- 可以修复。

(3) 安全缺陷 不会导致产品在规定的 工作条件下失效，因而是 不需要修理的缺陷。

产品缺陷安全度预测是根据缺陷位置、大小、形状，运用应力分析、环境因素分析、断裂力学分析等方法，确定缺陷属于上述三类中的哪一类。如属危险缺陷，应予报废；属可修复缺陷，则需提出合理的修复办法和修复后的检验方法。安全缺陷可正常使用。

4. 设备剩余寿命预测

有些超龄（即超过设计规定的使用寿命）的设备，实际上可能还处于良好的工作状态，如果停止使用或报废会造成很大的经济损失。为了能够继续安全使用，应做剩余寿命预测。要做仔细的工况检验（包括部件的无损检验），运用应力分析、环境因素分析、断裂力学和统计概率分析等方法，确定继续安全运行的寿命期，或减额运行的条件。

5. 失效后果预测

运用失效分析方法及积累的失效分析经验，预测某零部件在某种用途、时机和维修条件下万一失败后可能造成的损失及其影响。这种预测对于设计及管理都具有重大意义。美国有些军用标准明确规定，在设计阶段对那些关键的零件应进行失效模式及后果分析（FMEA）。

6. 失效补救措施和失效预防措施

前者是找出失效原因后，分析所采取的恢复失效系统或部件功能的各种措施，分析这种措施在技术条件和管理条件上的有效性和经济上是否合算。后者指预防失效的各种技术措施、管理措施和行政措施。包括制订质量保证规划、产品责任法、安全规程、建立产品认证制度、技术监督制度及失效分析制度等。根据失效分析结果采取针对性强、收效大、又经济的预防措施。

7. 失效分析方法学的运用和研究

利用逻辑流程图来诊断复杂系统失效的模式、原因和后果的方法学，有助于人们把复杂的因素有条不紊地逐个进行分析，使

问题极大简化，从而易于找出失效原因及诱发条件。这类方法很多，最常用的有“故障树分析法”和“特征-因素图分析法”。详见第二章。

8. 失效数据统计分析

失效分析所得到的各种信息和数据是技术开发的宝贵资料，它们对解决个别的具体问题时是很有价值的。然而当需要对一个系统进行总体评价和预测发展趋势时，要收集大量同类和异类失效案例，进行统计对比分析，找出它的统计分布规律。经过统计分析的失效数据称为“可靠性数据”，它含有双重的意义：其一是它常被可靠性设计和可靠性管理所应用；其二是因为失效分析数据经过统计分析可以去伪存真，此数据是可信赖的。

9. 失效物理研究

由一些具有失效分析经验的科技人员从事或协助失效物理的研究工作，可收到理论与实践密切结合的优良效果。失效物理的研究，目的在于弄清各种部件或装置在不同因素影响下，失效的特征、模式和机理，这有助于提高失效分析的准确性和效率。

10. 失效经验的反馈

失效的经验是从损失巨大的代价中得来的，应当充分利用。具体地说，应把经过统计分析的各种失效数据和信息制成各种形式的技术文献（例如快报、可靠性数据手册、指导性技术文件、年鉴、书刊等），传递到各个经济部门、生产部门、科研部门、教育部门及社会公众，作为产品规划、设计、选材、加工、检验、质量管理等的改进和革新参考，作为技术规范、规程、标准、法规等修订与制定的依据，作为制定科学技术开发和经济发展的参考。

以上这些分析内容是属于狭义的失效分析。再加上管理分析就成为广义的失效分析。狭义的失效分析又分为事前分析、事中分析和事后分析。事前分析，目的在于对产品可能发生的失效进行事先预测，以防止早期或中期失效，如逻辑思维方法（如故障树分析法，特征-因素图分析法，事件时序树分析法，以及系统工程分析法，可靠性分析法，等等），前述失效分析内容的3、4、