



中航工业首席专家  
技术丛书

“十二五”国家重点图书出版规划项目  
中航工业科技与信息化部组织编写

陶春虎 编著

# 紧固件的失效分析 及其预防

FAILURE ANALYSIS AND  
PREVENTION OF FASTENERS

航空工业出版社

中航工业首席专家技术丛书

“十二五”国家重点出版物出版规划项目

# 紧固件的失效分析及其预防

陶春虎 编著

航空工业出版社

## 内 容 提 要

本书简要介绍了失效分析基本概念及方法,对紧固件的基本类型与受力分析、紧固件常用材料及其特点、紧固件性能检测试验方法进行了较为详细的论述,并且结合紧固件生产和使用中常见的问题,重点介绍了紧固件制造过程中常见缺陷与控制、紧固件常见失效模式与特征、紧固件失效预防措施,并对收集整理的有关高温合金、钢、有色金属紧固件典型失效分析案例进行了深入分析与提炼。

本书可为从事失效分析的科技人员以及从事材料研制、机械设计、机械维修、紧固件制造等方面的工程技术人员提供借鉴和帮助。

### 图书在版编目(CIP)数据

紧固件的失效分析及其预防/陶春虎编著. --北京:  
航空工业出版社, 2013. 11

(中航工业首席专家技术丛书)

ISBN 978 - 7 - 5165 - 0268 - 6

I. ①紧… II. ①陶… III. ①航空器—紧固件—失效  
分析 IV. ①V229

中国版本图书馆CIP数据核字(2013)第258243号

## 紧固件的失效分析及其预防 Jingujian de Shixiao Fenxi Jiqi Yufang

航空工业出版社出版发行

(北京市朝阳区北苑路2号院 100012)

发行部电话: 010 - 84936555 010 - 64978486

北京世汉凌云印刷有限公司印刷厂印刷 全国各地新华书店经售

2013年11月第1版

2013年11月第1次印刷

开本: 787 × 1092 1/16

印张: 13.5 字数: 343千字

印数: 1—2000

定价: 70.00元

## 总 序

航空工业被誉为“现代工业之花”，是国家战略性高技术产业，同时也是技术密集、知识密集、人才密集的行业。中国是世界航空产业格局中的后来者，而中航工业作为支撑中国航空工业发展的核心力量，履行国家使命，必须大力推进自主创新，必须在科技创新和知识创新上有所作为。

从2009年开始，中航工业按照航空技术体系，在科研一线技术人才中陆续遴选出近百位集团公司级“首席技术专家”。此举既是集团公司对这些技术人才技术水平和能力的肯定，也意味着集团公司赋予了他们更大的责任和使命。我们希望这些技术专家在今后的工作中，要继续发挥科研技术带头人的作用，更加注重学习和创新，不断攀登航空科技新的高峰；要坚持潜心科研，踏实工作，不断推动航空科技进步；要带队伍、育人才，打造高水平的科研队伍，努力培养更多的高层次专业技术人才，为中航工业的发展做出更大的贡献。

21世纪企业的成功，越来越依赖于企业所拥有知识的质量，利用企业所拥有的知识为企业创造竞争优势和持续竞争优势，这对企业来说始终是一个挑战。正因如此，“知识管理”在航空工业等高科技产业领域得以快速推广和应用。依照这个思路，将首席技术专家们所积淀和升华出来的显性或隐性知识纳入知识管理体系，是进一步发挥其人才效益的重要方式，也是快速提升中航工业自主创新能力的重要途径。

知识管理理论的核心要义，就是把知识作为一种重要资产来进行管理，正如知识管理的创始人斯威比所说：“知识资本是企业的一种以相对无限的知识为基础的无形资产，是企业核心竞争能力的源泉。”如果专家们把其掌握的各类显性或隐性知识，用书面文字的形式呈现出来，就相当于构建了一个公共资料库，提供了一个交流平台，可以让更多的人从中受益——这就是出版这套“中航工业首席专家技术丛书”的初衷。

集团公司的这近百位“首席技术专家”，基本覆盖了航空工业的所有专业。每位专家撰写一部专著，集合起来，就相当于一个航空工业的“四库全书”，很有意义。在此，我要特别感谢这些专家们，他们在繁重的科研生产任务中，不辞辛劳地撰写出了自己的专著，无私地将自己的宝贵经验呈现给大家，担当起了传承技术、传承历史的责任。

相信这套丛书的出版，会使更多的航空科技工作者从中获益，也希望在一定程度上能助力中航工业的自主创新，对我国航空工业的科技进步产生积极影响。



中国航空工业集团公司董事长

# 前 言

紧固件是量大面广的基础性元件之一，是各产业必不可少的重要零件，广泛用于各种机械设备。紧固件其中重要的作用之一是传递载荷，且产品种类繁多，应用范围非常广泛。因此，紧固件的失效也在所难免，甚至常常会带来灾难性的后果。

虽然不同材料、不同零件的失效及其失效分析都具有一定的共性和规律可循，但各类零件又都具有各自的特点。在充分掌握各种材料与零件失效及其失效分析规律与共性问题的基础上，全面总结与了解各类零件失效的规律性和特殊性，对于各类零件的失效分析及其预防具有重要的科学意义和实用的工程应用价值。本书首先简要介绍了失效分析基本概念及方法，对紧固件的基本类型与受力分析、紧固件常用材料及其特点、紧固件性能检测试验方法进行了较为详细的论述，并且结合紧固件生产和使用中常见的问题，重点介绍了紧固件制造过程中常见缺陷与控制、紧固件常见失效模式与特征、紧固件失效预防措施，最后，对中航工业失效分析中心以及有关厂所有关高温合金、钢、有色金属紧固件典型的失效分析案例进行了进一步的深入分析与提炼。

本书可作为从事失效分析的科技人员以及从事材料研制、机械设计、机械维修、紧固件制造等方面的工程技术人员的参考书。

全书共分为 10 章，主要由陶春虎、刘昌奎和许宗凡撰稿，王盼盼、张兵、何玉怀、姜涛、刘德林、郑真、赵文侠、肖淑华、许裕、李璠、刘永恒、陈昌达等参加了部分内容的撰写。全书由陶春虎研究员和刘昌奎博士负责统稿与审定。

在本书的撰写过程中，得到了中航工业失效分析中心、中国商飞机械失效分析中心、中航工业北京航空材料研究院、中航工业标准件制造有限责任公司的大力支持。同时本书的编撰过程也得到了中航工业失效分析中心同仁们的大力协助，刘高远、李运菊、缪宏博、李春光、李莹、白明远、于洋、刘高扬等人在中航工业失效分析中心工作期间所作的相关研究工作，也为本书增添了色彩。

由于失效分析是一项科学性、工程性很强的工作，涉及的研究领域广泛，受到工作和认识的局限，书中谬误与不妥之处在所难免，恳请读者批评指正并提出宝贵意见。

作者

2013 年 6 月

# 目 录

<b>第 1 章 失效分析基本概念及方法</b> .....	( 1 )
1.1 失效分析基本概念 .....	( 1 )
1.2 失效分析基本程序 .....	( 4 )
1.3 失效分析基本思路 .....	( 6 )
1.4 紧固件失效分析基本方法 .....	( 8 )
1.4.1 宏观形貌分析 .....	( 9 )
1.4.2 电子显微镜分析 .....	( 9 )
1.4.3 金相分析 .....	( 11 )
1.4.4 化学成分分析 .....	( 12 )
1.4.5 力学性能测试 .....	( 14 )
1.4.6 无损检测 .....	( 14 )
1.4.7 残余应力测试 .....	( 15 )
<b>第 2 章 紧固件的基本类型与受力分析</b> .....	( 17 )
2.1 紧固件的概念 .....	( 17 )
2.2 紧固件结构特点与工作条件 .....	( 17 )
2.3 螺纹紧固件的受力分析 .....	( 19 )
2.3.1 螺栓受力分析及螺纹的载荷分布 .....	( 19 )
2.3.2 螺栓破坏位置分析 .....	( 20 )
2.3.3 塑性、脆性材料螺栓的拉伸应力分析 .....	( 21 )
2.3.4 塑性、脆性材料螺栓的扭转应力分析 .....	( 21 )
2.3.5 螺栓疲劳应力分析 .....	( 22 )
2.3.6 螺栓和螺母紧固时的受力分析 .....	( 22 )
2.4 螺纹紧固件的预紧与防松 .....	( 23 )
2.4.1 螺纹紧固件的预紧 .....	( 23 )
2.4.2 螺纹紧固件的防松 .....	( 24 )
2.5 铆接接头的结构与受力分析 .....	( 25 )
2.6 销的选择和受力分析 .....	( 27 )
<b>第 3 章 紧固件常用材料及其特点</b> .....	( 29 )
3.1 紧固件选材 .....	( 29 )
3.1.1 紧固件选材一般原则 .....	( 29 )
3.1.2 紧固件选材一般标准和钢用螺纹紧固件性能等级 .....	( 30 )
3.2 高温合金 .....	( 31 )
3.2.1 紧固件用高温合金 .....	( 31 )
3.2.2 高温合金材料的工艺特点 .....	( 31 )

3.3	不锈钢	( 33 )
3.3.1	紧固件用不锈钢	( 33 )
3.3.2	不锈钢材料的工艺特点	( 33 )
3.4	结构钢	( 34 )
3.4.1	紧固件用结构钢	( 34 )
3.4.2	结构钢材料的工艺特点	( 34 )
3.5	钛合金	( 35 )
3.5.1	紧固件用钛合金	( 35 )
3.5.2	钛合金材料的工艺特点	( 35 )
3.6	铝合金	( 37 )
3.6.1	紧固件用铝合金	( 37 )
3.6.2	铝合金材料的工艺特点	( 37 )
3.7	铜合金	( 38 )
3.7.1	紧固件用铜合金	( 38 )
3.7.2	铜及铜合金材料的工艺特点	( 38 )
<b>第 4 章</b>	<b>紧固件性能检测试验方法</b>	<b>( 40 )</b>
4.1	紧固件的金相试样制备	( 40 )
4.1.1	金相试样的制备	( 40 )
4.1.2	金相试样的截取	( 41 )
4.1.3	金相试样的镶嵌	( 41 )
4.1.4	金相试样的磨制	( 41 )
4.1.5	金相试样的抛光	( 42 )
4.1.6	金相试样的浸蚀	( 43 )
4.2	紧固件的金相试验方法	( 43 )
4.3	紧固件的性能试验方法	( 45 )
4.3.1	拉力试验	( 45 )
4.3.2	楔负载试验	( 46 )
4.3.3	保证载荷试验	( 47 )
4.3.4	硬度试验	( 48 )
4.3.5	机加工试件的冲击试验	( 48 )
4.3.6	螺栓头部坚固性试验	( 48 )
4.3.7	氢脆试验和应力持久试验	( 49 )
<b>第 5 章</b>	<b>紧固件制造过程中常见缺陷与控制</b>	<b>( 52 )</b>
5.1	紧固件生产工艺流程	( 52 )
5.1.1	紧固件的成形	( 52 )
5.1.2	紧固件的机械加工	( 52 )
5.1.3	紧固件的热处理	( 54 )
5.1.4	紧固件的表面处理	( 54 )
5.1.5	紧固件的检验工序	( 54 )



5.2	紧固件因原材料质量造成的常见缺陷	( 54 )
5.2.1	原材料表面裂纹缺陷	( 54 )
5.2.2	原材料表面折叠	( 55 )
5.2.3	原材料表面脱碳	( 56 )
5.2.4	原材料表面粗晶环	( 56 )
5.2.5	原材料残余缩孔	( 57 )
5.2.6	原材料夹杂缺陷	( 57 )
5.3	紧固件成形工艺原因造成的缺陷	( 58 )
5.3.1	成形工艺不当所致粗晶或晶粒不均匀	( 58 )
5.3.2	成形工艺不当所致流线分布不顺或穿流	( 59 )
5.3.3	螺纹滚压工艺不当造成的缺陷	( 60 )
5.3.4	加工工艺不当造成的缺陷	( 63 )
5.3.5	成形工艺不当导致裂纹或过烧缺陷	( 63 )
5.3.6	锻造过程出现的热剪切	( 64 )
5.4	热处理工艺不当造成的缺陷	( 65 )
5.4.1	淬火裂纹	( 66 )
5.4.2	粗大组织	( 67 )
5.4.3	表面氧化	( 67 )
5.4.4	表面变质层	( 68 )
5.5	表面处理工艺不当造成的缺陷	( 69 )
<b>第 6 章</b>	<b>紧固件常见失效模式与特征</b>	<b>( 72 )</b>
6.1	过载断裂	( 72 )
6.1.1	韧性过载断裂	( 73 )
6.1.2	脆性过载断裂	( 77 )
6.2	氢脆	( 85 )
6.2.1	氢的来源	( 85 )
6.2.2	氢脆与应变速率	( 86 )
6.2.3	氢脆的宏观特征	( 87 )
6.2.4	氢脆的微观特征	( 88 )
6.2.5	影响氢脆的因素	( 91 )
6.3	应力腐蚀开裂	( 92 )
6.3.1	应力腐蚀开裂的条件与机理	( 92 )
6.3.2	应力腐蚀开裂的宏观特征	( 93 )
6.3.3	应力腐蚀开裂的微观特征	( 93 )
6.3.4	应力腐蚀开裂的影响因素	( 96 )
6.4	疲劳断裂	( 97 )
6.4.1	疲劳断裂机制	( 97 )
6.4.2	疲劳断裂特征及判断方法	( 98 )
6.4.3	影响紧固件疲劳性能的因素	( 105 )

6.5	腐蚀失效	(108)
6.5.1	腐蚀的分类	(108)
6.5.2	紧固件常见的腐蚀类型	(109)
6.5.3	腐蚀的形貌特征	(110)
6.5.4	紧固件腐蚀的影响因素	(112)
6.6	液态金属致脆	(113)
6.6.1	液态金属致脆的宏观特征	(114)
6.6.2	液态金属致脆的微观特征	(114)
6.7	高温所致失效	(115)
6.7.1	蠕变所致失效	(115)
6.7.2	二次回火脆性所致失效	(118)
6.8	变形与脱扣	(118)
<b>第7章</b>	<b>紧固件失效预防措施</b>	<b>(120)</b>
7.1	预防紧固件失效的通用措施	(120)
7.2	预防紧固件过载断裂失效的措施	(122)
7.3	预防紧固件氢脆和应力腐蚀导致失效的措施	(123)
7.4	预防紧固件疲劳所致失效的措施	(125)
7.5	预防紧固件液态金属致脆的措施	(126)
<b>第8章</b>	<b>高温合金紧固件典型失效案例分析</b>	<b>(127)</b>
8.1	GH738 自锁螺母裂纹失效分析	(127)
8.1.1	试验过程与结果	(127)
8.1.2	模拟试验	(127)
8.1.3	分析与讨论	(128)
8.1.4	结论与启示	(129)
8.2	GH2036 螺母裂纹失效分析	(129)
8.2.1	试验过程与结果	(130)
8.2.2	分析与讨论	(131)
8.2.3	结论与启示	(132)
8.3	GH2696 高温合金螺桩断裂失效分析	(132)
8.3.1	试验过程与结果	(132)
8.3.2	分析与讨论	(132)
8.3.3	结论与启示	(133)
8.4	GH4037 高温合金偏心衬套点状缺陷分析	(134)
8.4.1	试验过程与结果	(134)
8.4.2	模拟试验	(134)
8.4.3	分析与讨论	(135)
8.4.4	结论与启示	(135)
8.5	GH2132 高温合金螺栓断裂失效分析	(135)
8.5.1	试验过程与结果	(135)

8.5.2	模拟试验 .....	(136)
8.5.3	分析与讨论 .....	(136)
8.5.4	结论与启示 .....	(137)
8.6	GH4037 紧固件用高温合金棒材裂纹分析 .....	(137)
8.6.1	试验过程与结果 .....	(137)
8.6.2	分析与讨论 .....	(138)
8.6.3	结论与启示 .....	(138)
<b>第9章</b>	<b>有色金属紧固件典型失效案例分析 .....</b>	<b>(139)</b>
9.1	TC4 钛合金托板螺母裂纹原因分析 .....	(139)
9.1.1	试验过程与结果 .....	(139)
9.1.2	模拟试验 .....	(139)
9.1.3	分析与讨论 .....	(140)
9.1.4	结论与启示 .....	(140)
9.2	TB3 钛合金螺钉脆性断裂原因分析 .....	(140)
9.2.1	试验过程及结果 .....	(140)
9.2.2	分析与讨论 .....	(142)
9.2.3	结论与启示 .....	(142)
9.3	钛合金螺栓强度低断口异常的故障原因分析 .....	(142)
9.3.1	试验过程与结果 .....	(142)
9.3.2	分析与讨论 .....	(143)
9.3.3	结论与启示 .....	(144)
9.4	2A10 铝合金铆钉镢头开裂失效分析 .....	(144)
9.4.1	试验过程与结果 .....	(144)
9.4.2	模拟试验 .....	(145)
9.4.3	分析与讨论 .....	(146)
9.4.4	结论与启示 .....	(147)
9.5	2A12 铝合金卡箍强度偏高原因分析 .....	(147)
9.5.1	试验过程与结果 .....	(147)
9.5.2	分析与讨论 .....	(148)
9.5.3	结论与启示 .....	(148)
9.6	2A01 铝合金铆钉强度超高原因分析 .....	(148)
9.6.1	试验过程与结果 .....	(148)
9.6.2	分析与讨论 .....	(149)
9.6.3	结论与启示 .....	(149)
9.7	QBe2 铜合金导电柱螺栓断裂分析 .....	(149)
9.7.1	试验过程及结果 .....	(149)
9.7.2	分析与讨论 .....	(150)
9.7.3	结论与启示 .....	(150)
9.8	HPb59-1 铜合金螺母裂纹分析 .....	(151)

9.8.1	试验过程与结果	(151)
9.8.2	分析与讨论	(151)
9.8.3	结论与启示	(152)
9.9	TC4 钛合金螺栓断裂原因分析	(152)
9.9.1	试验过程与结果	(152)
9.9.2	分析与讨论	(152)
9.9.3	结论与启示	(154)
9.10	TB3 钛合金螺栓断裂分析	(154)
9.10.1	试验过程与结果	(154)
9.10.2	分析与讨论	(154)
9.10.3	结论与启示	(155)
<b>第 10 章</b>	<b>不锈钢与结构钢紧固件典型失效案例分析</b>	<b>(156)</b>
10.1	1Cr11Ni2W2MoV 不锈钢螺栓断裂原因分析	(156)
10.1.1	试验过程与结果	(156)
10.1.2	分析与讨论	(157)
10.1.3	结论与启示	(157)
10.2	45 碳钢止动销中心孔洞原因分析	(157)
10.2.1	试验过程与结果	(158)
10.2.2	工艺试验	(158)
10.2.3	分析与讨论	(159)
10.2.4	结论与启示	(160)
10.3	ML15 碳钢铆钉表面缺陷分析	(160)
10.3.1	试验过程与结果	(160)
10.3.2	分析与讨论	(161)
10.3.3	结论与启示	(161)
10.4	ML25 碳钢螺母裂纹原因分析	(161)
10.4.1	试验过程与结果	(161)
10.4.2	分析与讨论	(162)
10.4.3	结论与启示	(162)
10.5	30CrMnSiA 结构钢螺钉螺纹掉齿的原因分析	(162)
10.5.1	试验过程与结果	(163)
10.5.2	分析与讨论	(163)
10.5.3	结论与启示	(164)
10.6	30CrMnSiA 结构钢镀镉螺栓断裂分析	(164)
10.6.1	试验过程及结果	(164)
10.6.2	分析与讨论	(165)
10.6.3	结论与启示	(166)
10.7	1Cr18Ni9Ti 不锈钢铆钉头部裂口分析	(166)
10.7.1	试验过程与结果	(166)

10.7.2	分析与讨论	(166)
10.7.3	结论与启示	(167)
10.8	30CrMnSi 结构钢螺钉断裂失效分析	(167)
10.8.1	试验过程与结果	(167)
10.8.2	分析与讨论	(168)
10.8.3	结论与启示	(169)
10.9	40CrNiMoA 结构钢螺栓的断裂失效分析	(169)
10.9.1	试验过程与结果	(169)
10.9.2	模拟试验	(170)
10.9.3	分析与讨论	(171)
10.9.4	结论与启示	(171)
10.10	30CrMnSiA 结构钢螺栓吸附磁粉的故障原因分析	(171)
10.10.1	试验过程与结果	(171)
10.10.2	分析与讨论	(172)
10.10.3	结论与启示	(172)
10.11	40CrNiMoA 结构钢收口自锁螺母断裂分析	(173)
10.11.1	试验过程及结果	(173)
10.11.2	分析与讨论	(173)
10.11.3	结论与启示	(174)
10.12	30CrMnSiA 结构钢镀锌螺栓断裂分析	(174)
10.12.1	试验过程及结果	(174)
10.12.2	分析与讨论	(175)
10.12.3	结论与启示	(176)
10.13	30CrMnSiA 结构钢螺栓断裂原因分析	(176)
10.13.1	试验过程与结果	(176)
10.13.2	模拟试验	(177)
10.13.3	分析与讨论	(178)
10.13.4	结论与启示	(179)
10.14	30CrMnSiA 结构钢紧固螺栓开裂原因分析	(180)
10.14.1	试验过程与结果	(180)
10.14.2	分析与讨论	(180)
10.14.3	模拟试验	(181)
10.14.4	结论与启示	(183)
10.15	1Cr17Ni2 不锈钢卡箍螺栓失效分析	(183)
10.15.1	试验过程与结果	(183)
10.15.2	分析与讨论	(185)
10.15.3	结论与启示	(185)
10.16	40CrNiMoA 结构钢螺栓拉力试验脆性断裂原因分析	(185)

紧固件的失效分析及其预防

10. 16. 1 试验过程与结果·····	(185)
10. 16. 2 分析与讨论·····	(186)
10. 16. 3 结论与启示·····	(187)
<b>附录 1 紧固件常用材料的牌号、技术标准与状态·····</b>	<b>(188)</b>
<b>附录 2 航空发动机各类主要紧固件材料一览表·····</b>	<b>(194)</b>
<b>参考文献·····</b>	<b>(198)</b>

# 第 1 章 失效分析基本概念及方法

失效分析的发展最早可追溯到公元前 2025 年。公元前 2025 年，由巴比伦国王汉莫拉比撰写的法典中，就提出了对存在制造质量问题的人进行严厉处罚的条文。但由于生产力的落后以及检测技术手段的欠缺，对制造质量原因和责任的认定缺乏技术依据，因而该法律并没有得到严格意义上的执行，随后的罗马法律肯定了“产品出门概不负责”的总原则，而真正把失效分析作为仲裁事故的法律手段和提高产品质量的技术手段是在现代工业革命开始的，其代表性事件是英国在 1862 年建立的蒸汽锅炉监察局，是世界上第一个从事故障诊断、失效原因分析和质量监控的专门技术机构。失效分析走上系统化、综合化、理论化的新阶段，则是从 20 世纪中叶，随着微电子技术的异军突起以及材料科学所需的检测仪器迅速发展开始的。

## 1.1 失效分析基本概念

各类机电产品的机械零部件、微电子元件和仪器仪表等以及各种金属与非金属及其他形成的构件（工程上习惯地统称为零件，以下简称零件）都具有一定的功能，承担各种各样的工作任务，如承受载荷、传递能量、完成某种规定的动作等。当这些零件失去了它应有的功能时，则称该零件发生了失效。

失效分析的信息，客观上能够反映机械失效的起始、发展、变化和完成的全过程，以及导致这一失效过程的内、外原因和条件等，通过与失效事件有关的各种途径传出，经过失效分析人员运用各种必要、可能的调查、检验等科学技术手段（借助科学仪器）等接收，产生回溯反馈，在人类已有失效规律和知识的基础上，就能较完整地在认识或实践上再现失效的全过程。失效事件中的信息量，是由每个具体的失效过程所决定的，而接收这种失效信息的多少，则在一定程度上取决于失效分析人员的专业水平和失效分析的科学技术水平。

零件失效即失去其原有功能的含义包括 3 种情况：

- ①零件由于断裂、腐蚀、磨损、变形等，从而完全丧失其功能。
- ②零件在外部环境作用下，部分地失去其原有功能，虽然能够工作，但不能实现规定功能，如由于磨损导致尺寸超差等。
- ③零件虽然能够工作，也能实现规定功能，但继续使用时，不能确保安全可靠性。如经过长期高温运行的压力容器及其管道，其内部组织已经发生变化，即微观或习惯上的损伤已经开始，当达到一定的运行时间，继续使用就存在开裂的可能。

国家标准 GB 3187—1982 中定义：

“失效（故障）——产品丧失规定的功能。对可修复产品，通常也称为故障。”该定义中涉及到产品、可修复产品、功能、规定的功能和丧失等几个概念。

### (1) 产品

按经济学上的定义：企业进行生产活动所创造的、符合于原定的生产目的和用途的直接生产成果，物质产品按其完成程度可分为成品、半成品和在制品。它包括任何元件、器件、设备或系统，可以表示产品的总体、样品等。总之，其确切含义在使用这一词时应加以说明，但废品不能算产品。在可靠性和失效分析领域内，如不加说明，产品一般指具有明确规定功能的成品。

### (2) 可修复产品

当产品丧失规定的功能时，按规定的程序和方法进行维修后，可恢复规定功能的产品。即发生故障后可以修复的产品。

一个产品是否可以修复，是一个历史的相对的概念，受多方面因素的制约。一看技术上是否可能；二看经济上是否值得；三看时间上是否允许。例如电阻、电容、电子管、日光灯管、铆钉、垫片等，一般归于不可修复产品；而起落架、油泵、机床等，只要符合规定的技术条件，一般属于可修复产品，但当超过规定的修理深度时或修理的费用超出所能承受的限度时，又变成不可修复产品。所有发生故障的产品，在一定程度上处于“可修状态”或“不可修状态”。

对一个复杂的设备或系统来讲，其中某些零件失效后是不可修复的（如轮胎爆破和前面所说的铆钉和垫片等），但对系统来说（如飞机或发动机）却是可修复的，只需将这些失效的零件替换。

### (3) 功能

功能是指作为产品必须完成的事项，产品的功能和用途。不同产品有着不同的功能，差异很大。

### (4) 规定的功能

规定的功能不仅指国家有关法规、质量标准、技术文件以及合同规定的对产品适用、安全和其他特性的要求，而且包含人们常识所能理解应具备的功能。它既是产品质量的核心，又是产品是否失效的判据。因此，产品是否失效主要是在使用（包括检验）过程中考察。一般来说，产品的规定功能与规定的条件相对应。还应具有常识上所应具备的一些功能，如儿童玩具必须具备在儿童误操作的情况下不会对儿童造成伤害的功能。

### (5) 丧失

一般理解为产品原有规定的功能在商品流通或使用过程中失去（或消失了），也就是说，产品的规定功能有一个从有到无、从合格到不合格的过程。

丧失，可能是暂时的、间断的或永久性的；可能是部分的、全部的；丧失可能快也可能慢；而丧失规定的功能，经过修理后有可能恢复，也可能无法恢复。无论上述哪种情况，都在丧失规定功能之列，即均处于失效状态。

也可能有这样的情况，产品一开始就不具备规定的功能。因此，这里建议采用“不具备”来代替“丧失”。

从以上可以看出，失效强调的是产品所处的功能状态，失效产品从某种意义上讲也是潜在的不合格产品（虽然出厂时已经贴上了合格的标签），包括在使用初期是合格品而在规定的有效使用时间内功能失效的产品。而故障强调的是产品失效以后可以修复（但不是自然恢复），或者说，故障是产品处于可修复的失效状态。



失效分析是判断产品的失效模式，查找产品失效机理和原因，提出预防再失效的对策的技术活动和管理活动。失效分析的主要工作内容包括：

- ①调查（包括确认是否失效、取证、普查等）；
- ②判断失效模式；
- ③查找失效原因（包括与产品失效相关的管理因素）；
- ④探讨失效机理及其与失效模式的关系（过程的因果关系）；
- ⑤失效后果（影响和危险性）分析；
- ⑥合理制定或修改失效判据（必要时才进行）；
- ⑦失效的数理统计分析（必要并有条件时才进行）；
- ⑧模拟再现和失效预测（必要并有条件时才进行）；
- ⑨明确产品失效责任（必要时才进行）；
- ⑩提出防止再失效的对策（失效分析成果的反馈和响应），注意新的失效因子。

失效模式是指失效的外在宏观表现形式和过程规律。一般可理解为失效的性质和类型。失效模式按其所定义的范围、属性、标准和参量，可分为一级失效模式、二级失效模式等。模式准确，就是要将失效的性质和类型判断准确，尤其是要将一级失效模式和二级失效模式判断准确。

一级失效模式的分类如图1-1所示。

二级失效模式分类所依据的“标准”和“参量”繁杂多样，其判断也要比一级难得多。有兴趣的读者还可参阅有关的失效分析文献。

失效机理是指失效的物理、化学变化本质和微观过程可以追溯到原子、分子尺度和结构的变化，但与此相对的是它迟早也要表现出一系列宏观（外在的）性能、性质变化和联系。机械失效，乃是一种物质的运动，并表现为一定的形态，故而必然会和一定的客体物发生相互作用，这一作用的结果必然要引起原客

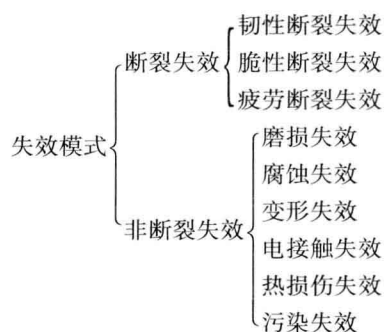


图1-1 一级失效模式的分类

体物发生相互作用，必然要引起原客体物结构和能量的变化，改变客体物的形态，产生一定的反映特征。这种反映特征，就是失效分析中信息源的最主要的物质基础。至于信息量的多少，不仅是由客观事物本身决定的，而且取决于分析人员的技术能力和水平，取决于所采用的技术手段和仪器设备等。

失效原因的判断是整个失效分析的核心和关键，通常是指酿成失效甚至事故的直接关键性因素。与失效模式一样，失效原因也可分为一级失效原因和二级失效原因等。一级失效原因的判断，一般指造成该失效事故的直接关键因素处于设计、材料、制造工艺、检测、使用及环境的某一环节，即通常所谓的“设计是根本，材料是基础，工艺是关键，检测是保证”的某一关键环节。失效原因的判断建立在失效模式判断的基础上，当一个失效件的二级以上失效模式确定以后，一般而言，一级失效原因基本上就很容易确定了。在一级失效原因正确的基础上，探讨和分析二级失效原因。例如设计原因引起的失效还可细分为设计思想、结构、对载荷分析的准确性、选材等二级失效原因。

同样，失效原因的确定也分为定量确定和定性确定，在必要时，还要采用失效模拟技