

内部资料

# 金属构件断裂失效分析文集

劳动人事部 锅炉压力容器检测研究中心

1985 年

## 出版说明

《金属构件断裂失效分析文集》一书是邀请国内从事失效分析工作多年、具有丰富经验的同志撰写的专题文集。其中包括国内外失效分析概况综述，失效分析中常用电子光学仪器 and 断口学介绍，以及疲劳、腐蚀疲劳、应力腐蚀、氢损伤、高温和焊接工程中的失效分析问题论述。在选题和取材上注意了系统性和内在联系。内容简明扼要，深入浅出，通俗易懂。对失效事故分析颇有帮助。本文集可供从事锅炉压力容器监督检验的技术人员和管理干部阅读，对机械、石油、化工和电站等行业的技术人员亦有较大的参考价值。

中国科学院金属研究所曾祥华同志为文集选题和审稿做了许多工作，在此表示感谢。

杨澄宇同志为文集责任编辑。

劳动人事部锅炉压力容器检测研究中心

1984年11月

# 序 言

金属材料是各种类型机械产品和工程构件赖以制作的物质基础，它与生产建设和人民生活息息相关。它的失效往往威胁安全生产并造成重大经济损失。美国调查结果表明，由于金属材料腐蚀失效所招致的直接经济损失每年高达700亿美元。仅腐蚀失效一端，就已引起如此巨大灾害，而金属材料失效原因多种多样，涉及范围极其广泛，所造成损失之巨大可以想见。因此，失效分析越来越受到人们普遍的关注。

失效分析是人类长期生产经验的总结。毫不夸张地说，金属材料的发展史就是一部失效分析史。虽然失效分析起源可以追溯到久远的年代，但它从技艺发展到科学大体上开始于第一次工业革命时期，而形成一门独立的新兴的学科则迟至晚近数十年。近代工业的兴起使机械产品和工程构件日趋大型化、精密化和复杂化，这就要求比以往更高的可靠性和安全性。失效分析也就日益显示出它的重要作用。对于失效产品和结构进行分析，查找损坏原因，制订改进措施，杜绝事故发生，可以获得巨大的经济效益和社会效益。所以一些工业发达国家都十分重视失效分析，把它作为改善产品质量，促进经济发展的重要手段，竞相投入力量，开展研究。许多先进的测试仪器陆续问世，也为失效分析的发展提供了方便条件。因而，在科学技术领域里，失效分析正处于蓬勃发展之中。

近些年来，我国失效分析工作也取得了可喜的进展。已经召开两次全国性失效分析学术会议，发表和出版了一些论文和专著。失效分析是一门综合性很强的学科，它涉及广泛的科学领域和技术门类，因此需要有关方面科技工作者大力协同，进行富有成效的努力，促进我国失效分析工作更迅速地发展，为四化建设作出贡献。

锅炉、压力容器是国民经济有关部门和人民生活中广泛使用的设备，在运行中承受压力，易发生安全事故。由于使用条件苛刻，锅炉、压力容器的失效率比其它机械产品高得多。因而失效分析的作用显得尤为突出，提高有关人员对失效分析的认识就成为重要的、紧迫的课题。

摆在读者面前的这本文集除介绍国内外失效分析发展概况和常用的分析仪器、测试技术外，还用较多篇幅阐述金属材料在使用中常见的几种失效类型及其分析方法。这些论文虽然由多位作者执笔，但在选题和取材上注意了系统性和内在联系。这可以说是这本文集有别于一般文集的一个明显的特点。

通过这本文集，增进读者对失效分析的了解，帮助他们掌握有关的分析知识，使失效分析工作取得更好的发展。这就是我们编辑这本文集的期望之所在。

庄 育 智

1984年11月

# 目 录

|                         |               |
|-------------------------|---------------|
| 1. 从国外动向看失效分析在经济建设中的重要性 |               |
| 西安交通大学金属材料及强度研究所.....   | 周惠久、顾海澄 ( 1 ) |
| 2. 失效分析的思路与分析方法         |               |
| 成都科技大学.....             | 刘民治 ( 10 )    |
| 3. 锅炉压力容器失效情况调查         |               |
| 劳动人事部锅炉压力容器检测研究中心.....  | 杨澄宇 ( 36 )    |
| 4. 机器设备的失效研究及失效预防在西德    |               |
| 西安交通大学.....             | 涂铭旌 ( 46 )    |
| 5. 失效分析常用的电子光学仪器概述      |               |
| 中国科学院金属研究所.....         | 苏会和 ( 53 )    |
| 6. 图像分析及其在材料科学与失效分析中的应用 |               |
| 中国科学院固体物理研究所.....       | 佟世华 ( 77 )    |
| 7. 金属的显微断口分析            |               |
| 中国科学院金属研究所.....         | 曾祥华 ( 93 )    |
| 8. 金属与零件的疲劳失效           |               |
| 中国科学院金属研究所.....         | 于维成 ( 111 )   |
| 9. 腐蚀疲劳失效分析             |               |
| 中国科学院金属腐蚀与防护研究所.....    | 柯 伟 ( 139 )   |
| 10. 应力腐蚀破裂失效分析          |               |
| 劳动人事部锅炉压力容器检测研究中心.....  | 李有柯 ( 171 )   |
| 11. 氢损伤的失效分析            |               |
| 中国科学院金属研究所.....         | 曾祥华 ( 215 )   |
| 12. 金属构件的高温失效           |               |
| 中国科学院金属研究所.....         | 常春城 ( 239 )   |
| 13. 焊接工程中的失效分析          |               |
| 劳动人事部锅炉压力容器检测研究中心.....  | 金恒昀 ( 273 )   |

## 从国外动向看失效分析在经济建设中的重要性

**[摘要]**本文叙述了美、英、西德、日、苏等国失效分析机构的概况，并分别援引能源资源、交通运输、材料加工制造等部门的实际事例，说明失效分析与防止在国家经济建设中的作用和重要性。

### 一、概 况

失效分析是一门新兴的学科，它具有两个显著的特点：第一是综合性，即它涉及广泛的学科领域和技术门类；第二是实用性，即它有很强的生产应用背景，与国民经济建设有极其密切的联系。本文针对它的第二个特点，根据国外在失效分析方面的某些动向，来说明它在经济发展中的重要性。“前车之覆，后车之鉴”。一些工业发达国家在实践中已经遇到的问题和已经发生的事故，可以为我们提供有用的教训。只要我们能够从我国经济建设实际出发，及时部署对失效分析的研究和应用，我们就可以避免因机械装备失效所带来的重大损失。

失效分析和防止是人类生产经验的总结。失效分析从技艺发展到科学，大体上可追溯到第一次工业革命时期。失效分析与疲劳、断裂等学科有大致相近的发展历史。但是直到十年以前，尽管有人进行倡导，失效分析并未能在科技界和工程界引起普遍的重视。1974年美国金属学会在编辑出版《失效分析资料书》(Source Book in Failure Analysis)时曾写过一段话：“与对一些不太活跃的学科所作的报导相比，关于失效分析的公开发表的论文的数量实在太少了；这桩事实难以反映出失效分析在工业和工程中的重要性”。1975年美国金属学会出版了《金属手册第十卷失效分析与防止》(Metals Handbook, Volume 10, Failure Analysis and prevention)，以后情况逐步发生变化，近年来有关失效分析的专著和论文急剧增加，以至可与疲劳或断裂学科并驾齐驱<sup>[1-2]</sup>。但除了西德有专门的《机械失效》(Der Maschinen Schaden)杂志外，在其它国家并没有类似的专业杂志，所以有关失效分析的论文常散见于各有关的杂志中，从而不为人们所熟知。下面分述一些工业发达国家中失效分析的概况。

#### (一) 美 国

在国防尖端部门，如原子能、宇航等，失效分析主要是在国家的研究机构，如橡树岭国立研究所、肯尼迪中心、约翰逊中心等进行。在民用工业部门，失效分析主要是在一些公司

进行。例如,福特汽车公司、通用电气公司、西屋公司、波音公司等都有很强的技术发展部门,进行了大量的失效分析工作。美国是一个畸形发展的国家,失效分析与保险公司和法院有最密切的关系,机械产品的失效常常以打官司而告终。在美国还有一些商业性的失效分析公司;在飞机失事中丧生的科学家 A. Tetelman 曾创办过一个失效分析公司;他的合作者 A. McEvily 至今仍在失效分析公司中任顾问。上述这些机构的资料常常是保密的,只有到过境迁“解密”以后才能看到。失效分析资料交流的公开渠道是在各种学会。美国金属学会(ASM)在倡导失效分析方面作了很大的努力。早在1966年,它就汇编出版了《零件是怎样失效的》(How Components Fail)一书;以后逐年出版了一些手册、论文集或资料汇编<sup>[6-13, 20]</sup>。美国机械工程师学会(ASME)和美国材料与试验学会(ASTM)也都围绕失效分析这个主题,开了一些讨论会,出版了一些论文集<sup>[4-18]</sup>。

## (二) 英 国

除了私营工业以外,英国还有相当强大的国有工业。重大事故的失效分析主要是由国家的研究机构、如国立工程研究所(NEL)、国立物理研究所(NPL)、英国原子能(UKAEA)、焊接研究所(WI)等,以及国有工业的研究和发展部门,如中央电力局(CEGB)、英国石油(BP)、英国煤气公司等进行。英国的大学与这些机构有密切的联系,承担相当数量的任务。英国的一些大学开设《失效分析》课程,由有经验教师讲课。英国还没有专门的失效分析的学会和会刊,但他们经常参加美国同行的活动。美国金属学会在1981年出版了一本资料汇编,即为《失效分析:英国机械科技报告集》(Failure Analysis: The British Engine Technical Reports),反映了英国在这方面的工作。

## (三) 西 德

西德是失效分析工作组织化程度最高的一个国家。联邦政府重点投资建设一批材料检验中心(MPA)。以设立在斯图加特大学的国立材料检验中心为例,其主要任务是:“研究随着工业化水平提高而不断增长的构件和零件的失效,为了进一步发展技术装备和产品而开辟材料的新领域,以及研究不同载荷条件和服役条件下材料的行为”。西德的技术监督组织规定:机器设备发生事故后必须申报备案。西德有专门的《机械失效》杂志,还出版了《失效分析案例集:调查——判断——防止》(Das Buck der Schapensfille: Untersuchen——Beurteilen——Vermeiden)。美国出版的好几种关于失效分析的书籍即取材于西德资料。涂铭旌同志已写了《机器设备的失效研究及失效预防在西德》一文,此处不再赘述。

## (四) 日 本

日本的经济的发展得益于科技进步。除了一些国立的研究机构,如日本原子力研究所、金属材料技术研究所、产业安全研究所等从事失效分析工作外,一些大的企业如新日铁、日立、三菱、三井等都有很强的研究所,进行机械装备失效的研究。过去人们以为:资本家总不免讳疾忌医,怕说出自己的产品发生失效事故,以免影响市场销路。实际上失效分析是提高产品质量的必要手段,有识的企业家也已认识到这一点。近年来有些企业陆续公开发表一些产品失效分析案例以收到广告的效果。现在日本生产的汽车冲击整个世界市场,其实早在20多年以前,日本就对各国生产的汽车齿轮进行分析、比较。由此可见,日本能很快摔掉



“东洋货”的帽子（指产品价廉质差）是有其一定的科学技术基础的。这种情况也可以从一些书刊看出<sup>[22-25]</sup>。

## （五）苏 联

早在四、五十年代，苏联就出版了一系列的有关失效分析的专著<sup>[26-32]</sup>，从当时的世界水平来看，他们是领先的。在苏联曾发生过船舰、桥梁、壳体、火箭、飞机、核电站等的重大事故；但由于六十年代来从苏联进口的科技书籍骤减，难以获得较全面的情报，只可从学术刊物的一些论文中看到一些信息。又在苏联的学术刊物上，公开报导失效事故的比较少；对于失效分析紧密相关的一些问题，如材料的强度与断裂、以及机械的可靠性与耐用性等，则讨论得较多。1982年苏联曾对提高金属材料结构强度的途径、以及提高农业机械零件的可靠性和耐久性问题，组织过几次大范围的讨论。在莫斯科的中央机械和工艺研究院（ЦХИИТМАШ）、乌克兰学派（包括物理力学研究所、材料研究所、金属物理研究所等）、乌拉尔派（包括苏联科学院乌拉尔分院金属学研究所、乌拉尔工业学院等）在这些方面发表文章较多。

还应该指出：除了上述工业发达国家以外，某些发展中国家如印度、巴西等国家也都开始重视机械装备的失效分析工作。这点可以从文献资料中反映出来。

下面根据国外在国民经济重要部门开展失效分析的实际事例来说明失效分析在经济建设中的重要性。分“能源资源”、“交通运输”、“材料加工和制向”三方面来叙述。

## 二、能 源 和 资 源

能源和资源是每一个国家进行经济建设所不可缺少的物质条件。特别在世界范围内能源和资源日益枯竭的今天，每个国家经济建设的规模和速度都要受到能源和资源等客观条件的制约。

### （一）发 电

50年代在美国先后发生了数起电站设备飞裂事故，引起了人们的震惊，当时曾对这些事故进行了大量的失效分析。到60年代，又根据断裂力学的概念，重新对这些事故进行了分析，取得了令人满意的结果。鉴于同类型的电站设备尚在大量运行，当时美国西屋公司、通用电气公司曾对这些电站设备的寿命和可靠性进行研究。但以后各国电站飞裂事故续有发生。1969年9月19日，在英国 Hinkley point A 核电站的第五号透平——发电机机组，有一是低压叶轮发生飞裂。该核电站有两座反应堆给六个 87MW 的透平发电机供应蒸汽。叶轮材料为 3Cr-Mo 钢（ $\sim 0.3\%C, 3\%Cr, 0.5\%Mo$ ）， $\sigma_s 690-770 \text{ MN} \cdot \text{m}^{-2}$ ， $\sigma_b 850-930 \text{ MN} \cdot \text{m}^{-2}$ 。断口分析发现在键槽应力集中处由于应力腐蚀产生了一个 3mm 长、1.5mm 深的半椭圆裂纹，材料由于偏析严重， $K_{Ic}$  值波动很大，在  $39-120 \text{ MN} \cdot \text{m}^{-3/2}$  之间。经估算临界裂纹深度为 0.75—1.5mm，与实测结果非常符合。1974年6月19日，在美国 Tennessee Valley Authority Gallatin 的第二号蒸气透平的中、低压组合转子发生飞裂，碎片达 30 块。有一块重量为 454 公斤的碎块贯穿水泥屋顶后再打穿锅炉炉壁。转子为 Cr-Mo-V 钢，其成分相当于 ASTM A4708 级钢。在断上口发现两个椭圆裂纹，一个长轴 140mm、短轴 6mm，另一个长轴

82mm、短轴 61mm。据分析，断裂原因是由于疲劳与蠕变的交互作用，又根据苏联学术刊物上的论文透露：苏联在 1966—1979 年期间，至少发生了近 10 起电站转子开裂事故。

为了防止电站转子飞裂造成的严重事故，在各个国家开展了对转子用钢回火脆性的研究，以澄清 P、Sn、As、Sb 等杂质和 Ni、Mn 等元素对回火脆性的影响；并研究用亚临界区热处理工艺来提高材料的韧性。近年来应用断裂力学方法来防止转子失效也取得了一些成功。英国有一个 500MW 的发电机转子，用 2.5Ni-Cr-Mo-v 钢制造，已经运行了 35055 小时；后因发生故障电流达到设计指标的 5-7 倍，而使转子严重过热并产生很大拉伸应力，以致 56 个纵向槽中有 49 个槽产生了裂纹，个别裂纹深度达 180mm。经过用断裂力学方法计算，证明这个转子是安全的，仍可继续使用。在失效分析的基础上，在有些国家已经制订了透平转子延寿和寿命保险的一套方法。

除了转子、护环等大锻件外，对叶片、锅炉的失效分析也作得很多。

核电站的失效分析与防止始终是一些工业发达国家所关注的课题。由于发生了一些事故，影响公众和政府核电站的态度，据估计原子能发电的进程可能要比预期的要慢，这可从下表看出。

主要西方国家的原子能发电能力

| 国 家 | 77 年运行 | 77 年在建 | 85 年原计划达到 | 85 年前估计 |
|-----|--------|--------|-----------|---------|
| 法 国 | 3      | 23     | 45        | ~30     |
| 西 德 | 6      | 14     | 45~50     | ~25     |
| 日 本 | 7      | 10     | 49~60     | ~25     |
| 美 国 | 46     | 75     | 230~275   | ~120    |

核电除了与火电相同的问题外，还有其特殊的问题，主要是管系和压力容器的失效。压力容器的问题将在下节讨论，这里只叙述管系的问题。据资本主义国家的资料统计，到 1979 年 1 月为止，沸水堆的管系损伤共达 133 次，主要是晶界应力腐蚀；而压水堆的管系损伤在美国即达 83 次，主要是由于振动引起的疲劳，同时也有晶界应力腐蚀问题。又据日本核电示范堆的经验，304 不锈钢管系曾在使用中开裂而泄漏，在焊缝热影响区主要是应力腐蚀引起的晶界开裂，在热影响区以外也有较浅的晶内开裂。

三哩岛核电站的事故是美国历史上最严重的一次核事故。由橡树岭国立研究所进行分析。事故发生在 880MW 的压水堆。1979 年 3 月 28 日，使热水进入二次回路的供水泵停止工作，而两个辅助泵又不能开动，以至一次系统的压力增高，核芯过热、损伤，裂变物质逸出；受核污染的水进入辅助建筑，流溢到地面，带放射性的气体经通风系统进入环境，扩散到市区。3 月 30 日，高温蒸汽与包壳合金作用放出大量的氢，有可能与一次系统的氧化合而发生爆炸；估计堆芯温度已达 980—1930℃，可能引起火灾和更严重的污染。直到 4 月 2 日，才渡过危机。失效分析表明：事故是由于运行操作不当引起的。

## (二) 海洋开发

今后海洋是人类获取能源和资源的重要场所。一些工业发达国家现在正在开发海洋、争



夺海洋。

海上采油已逐步向深海洋发展。英国北海油田的Shetland区,水深达180m;Forties区,水深达140m。海上平台连同起重设备的高度已超过伦敦最高建筑物 National Westminster Tower 的高度(200m)。建设平台困难固然很大,但经济收益也很不小, Forties 油田每天可出油600,000bbl。值得注意的是:海上采油已几次发生严重事故。1980年3月27日在北海的石油钻探船 Alexander Kielland 号完全倾覆,据分析是连接五条立柱的水平横梁有焊接缺陷、且发生腐蚀疲劳所致。同一时期,挪威的一个平台也发生毁灭性事故,有几十人丧生。鉴于这些惨重的教训,一些国家已经组织起来进行研究,包括对巨型的海上构件实物进行疲劳试验,并且已制定一些材料选择和安全设计的规程。

输油管系也遇到重大问题。在深水敷设输油管的费用为岸上的5~6倍。据美国 Geological Survey 的统计资料,1967~1975年间墨西哥湾的125起管系事故中,主要失效原因为腐蚀、磨粒磨损、疲劳、屈折等。

海洋还蕴藏着丰富的金属矿产资源,锰瘤等的储量早就吸引了一些工业强国的兴趣。日本三菱在研制2000m水深的深海潜水调查船的过程中曾应用了失效分析的方法。这种潜水器实际上是一种球状的耐压壳体。球的内径为2350mm,板厚35mm。他们进行了大量的疲劳裂纹萌生、扩展试验,以及断裂韧性和应力腐蚀试验;最后将模型壳体作模拟耐压试验。发现用18Ni马氏体时效钢制成的壳体在高压下裂成碎片,用10Ni高强度钢制成的壳体则产生裂纹并形成一部分碎片,用Ti-6Al-4V制成的壳体也产生裂纹,而用5Ni-Cr-Mo-V钢(NS90)制成的壳体则仅发生凹入变形;根据这些试验结果拟用选用5Ni-Cr-Mo-V钢( $\sigma_{0.2}$  900MN $\text{m}^{-2}$ )。

### (三) 石油贮运装置

据日本的统计资料:全国共有石油贮罐10,000个,其中容积在100,000Kl以上的共有3000个。因贮罐底部常有积水,且原油中含有氢、氯、硫酸等,钢板的平均腐蚀速度可达0.1mm/年,储罐除承受液压静负荷外,还承受由于液面高度变化、搅拌、地震、台风等引起的动负荷。焊缝中也可能存在缺陷。因此,贮罐开裂、泄漏的事故屡有发生,有酿成大火之潜在危险。日本消防研究所对石油贮罐作了失效分析,认为造成储罐开裂的主要原因是应力腐蚀和腐蚀疲劳。

这类问题在美国也很严重。美国现在每天要消耗18MMB(百万桶)的石油,其中45~50%的原油要依靠进口,美国现在发展一种超级油轮。比最大的航空母舰还要大,可运输1.02到2.04MMB的石油,显然,对于这样超巨型的油轮,安全问题是必须首先考虑的。又美国能源与几家石油公司合作,把中空的地下盐矿作为战略石油贮备之用。其办法是打一井到地下盐层,然后用泵注水,再将盐水排出,留下一个巨大的空穴可供贮油。美国能源部已有19个这样巨大的盐矿空穴,总贮存量已达261MMB。它还计划最终建成总量达750MMB的贮存能力。1978年9月21日,在West Hackberry, Louisiana的第6号洞穴第6口井发生了重大事故。在修理套管时,洞穴里的高压使油喷出,以至油雾弥漫,引起大火。这次大火延续了5天,排出的石油达67,510桶,其中一半烧掉。事后由橡树岭国内研究所进行失效分析。据说井口漏油的原因可能是焊缝处有裂纹和油中含硫量高而加速了管子的腐蚀—氧化过程。

#### (四) 煤转化装置

石油危机使人们将注意力转到煤的开发和利用。很多国家都在研究煤转化技术。美国橡树岭国立研究所对煤转化装置也进行了失效分析。煤液化设备的反应容器,其工作压力为 9.6—17.6MPa,工作温度为 415—524℃。其中有溶剂油、粉煤、氢气和它们的反应产物。经过连续三年使用以后,发现用 347 不锈钢制造的法兰和用 310 不锈钢制造的容器上有裂纹。经分析裂纹是由应力腐蚀造成的。又流态床燃烧室是煤和石灰石颗粒在气流中加热的一种装置。其中的配气板经使用 6 个月后开裂,配气板用 310 不锈钢钢板制成,上面冲有 2.5mm 六角形的孔,孔与孔的间距为 16mm。315℃ 的空气从下面进入,燃烧后温度达到 840℃。经分析,开裂的原因是由于热膨胀造成的塑性变形;又在晶界上析出块状的  $\sigma$  相,使材料的塑性降低,也是一个原因。

### 三、交通运输

第二次世界大战中“自由轮”脆断事故早为人们所熟知。50年代在美国由七个与造船有关的组织联合召开了多次会议,几次经过修改,到 1959 年公布了《船用钢的统一要求》文件。从 1960 年到 1965 年仍然有 19 艘船只发生断裂。1972 年 1 月 10 日,美国一艘驳船 Ingram 号在纽约州 Jefferson 港断裂成两段。船长 178m;服役才 9 个月。当时气温 7℃,风平浪静。船板性能符合 ABS—B 钢的要求。据分析,断裂原因是吊杆柱与甲板连接处存在高度的应力集中。又 1977 年 1 月 10 日油轮 Chester A. Poling 号在北大西洋靠近 Gloucester 的地方断成两段。当时气温 -1℃,浪高 7.6—10.7m。油船长 85.6m,宽 12.2m,深 5.2m。为了分析原因把一块 1.5×7.3m 沿断口的钢板从海底捞起。发现钢板和加强筋都有严重变形,断口上有解理与剪切特征。钢板在使用温度下的 CVN 冲击值为 8J(6ft lb)。据分析,断裂主要是由过载造成的。

在上半世纪,桥梁的脆性断裂也是一种重大的事故。以后对桥梁钢板的机械性能、包括疲劳强度也提出了相当的要求。但仍然不断有桥梁断裂的事故。例如在澳大利亚墨尔本的 Kings Bridge 倒塌,其原因是钢板的含炭量偏高,影响焊接性,又焊接时不适当予热,使用了湿焊条,检查不严。0℃时的 IZOD 冲击值为 16—50NM,分散度太大,按规定应不小于 27NM。这些综合因素都促使脆性断裂,由此可解释在一个寒冷的晚上当载重车通过时桥梁发生破坏。英国根据在伦敦泰晤士河建造数座桥梁的经验。制订了桥板的新标准,有关的委员还先后出版了《焊接结构的疲劳破坏》和《疲劳失效调查》两本书。这些对今后防止类似事故的发生起了重要的作用。

美国纽约市的地铁和公共汽车也都发生过早期疲劳断裂事故。失效分析结果表明其主要原因是由于设计不良。

飞机的发展史更是一部和失效作斗争的历史。当 Wright 兄弟发明飞机的时候,为了更换一根疲劳裂纹的空心轴而不得不推迟首次航行。1954 年“惠星号”客机失事后曾经进行了彻底的失效分析,为此把飞机的残骸从海底打捞起来,从而开辟了疲劳研究的新阶段。从 1934 年起到 1979 年在芝加哥的 DC-10 失事为止,据不完全统计,总共发生过 306 次飞机失事,死难者 1803 人。失效分析的统计资料表明:固定翼式飞机占事故总数的三分之二,

又其中 88 次是由于机翼失效, 56 次是由于发动机失效; 在 90 起直升飞机事故中, 三分之一是主旋翼失效, 四分之一是尾翼失效。

导弹、火箭的研制, 各国都经历了多次失败, 通过失效分析找到失败原因。美国对航天飞机的材料控制和断裂控制, 也是多次的性能试验和失效分析为基础的。

液化气运输船的设计和制造是另一个综合应用现代化技术的例子。日本日立造船和美国芝加哥桥梁和钢铁公司联合研制运送液化气的 LNG 船, 在设计中应用了失效分析和安全性评估的方法。液化气的温度可达到  $-162^{\circ}\text{C}$ 。已建成的 LNG 船可运输  $1000\text{m}^3$  液化气; 船上装有 5 个球形贮罐, 周围用绝热层隔开, 现在正在着手造  $130,000\text{m}^3$  的液化气运输船。为了保证安全, 储罐绝不允许泄漏; 否则漏出的液化气将使船体降温, 增大脆断倾向, 以至会引起重大事故。储罐用 9% Ni 钢制造, 焊缝用 Ni 基合金。用 X 射线检查焊缝缺陷。失效分析和安全性评估的主要依据有两条: 要使裂纹从焊接区扩展到母材的时间大于船的使用寿命 (20 年), 要从裂纹从可被检测出来的尺度扩展到穿透板厚的时间大于一航程 (15 天)。

#### 四、材料、加工和制造

对于金属材料来说, 矿山、冶金机械的失效极为严重。最惊险的是人员和矿石提升机构的失效。据一份资料, 提升距离可达  $3000\text{m}$ , 装载人员可达 80 人。为了确保安全, 工程师在设计中总是采用很高的安全系数。但是有一次一条大轴仍发生了断裂。轴的长度为  $12\text{m}$ , 最大直径为  $1.1\text{m}$ , 重量为 40 吨。该轴按装于 1950 年 12 月, 经运行 27.5 年后, 于 1977 年 7 月 7 日突然断裂。钢材的性能为:  $\sigma_b 483\text{MNm}^{-2}$ ,  $\sigma_s 293\text{MNm}^{-2}$ ,  $\delta 16\%$ , HB170。据分析, 是由于应力集中引起的疲劳断裂。又如澳大利亚的一个厚板轧机, 建于 1958 年, 到 1972 年主传动轴断裂。该轴直径  $400\text{mm}$ , 长度为  $8\text{m}$ , 用 SAE4150 钢制造。据分析是由于在键槽处产生疲劳裂纹, 然后扭转破坏。苏联有一篇文章透露: 每年全苏轧钢厂所消耗的轴达 400—500 根。日本新日铁八幡技术研究室曾报导压延机立柱在螺纹部位疲劳断裂的案例; 立柱直径  $450\text{mm}$ , 长度  $14\text{m}$ , 螺纹处直径  $478\text{mm}$ 。日本还发生过炼铁车间 20 吨吊钩的断裂事故。

对于化工科技来说, 高压容器的事故是触目惊心的。英国 Midlands 有一个高压容器爆炸, 碎片之一重达 2 吨, 抛掷到  $45\text{m}$  以外。爆炸的主要起因是: 在焊接热影响区有显微裂纹; 再加上去应力退火温度过低, 严重降低材料的韧性。在化工机械中, 由于介质和应力同时作用, 造成容器爆炸的例子更为常见。英国有一合成氨的反应容器, 高  $12\text{m}$ , 直径  $3\text{m}$ , 壁厚  $225\text{mm}$ , 用真空除气的 3Cr-Ni-Mo 制造。气体介质为  $\text{H}_2$ 、 $\text{N}_2$ 、 $\text{NH}_3$ , 工作压力为  $40\text{MPa}$ , 氢分压为  $31.5\text{MPa}$ , 温度为  $50^{\circ}\text{C}$ , 连续工作 4 年后发生氢致断裂。英国的另一个例子是: 有一  $\text{CO}_2$  的吸收塔, 高度  $40\text{m}$ , 直径  $4.5\text{m}$ , 壁厚  $40\text{--}30\text{mm}$ , 用 C-Mn-V 高强度低合金钢制造。介质为含 30%  $\text{K}_2\text{CO}_3$  (含 15%  $\text{As}_2\text{O}_3$ ) 的水溶液, 压力为  $2.8\text{MPa}$ , 温度为  $100^{\circ}\text{C}$ , 运行 4 年后爆炸, 原因是焊缝处有贝氏体-铁素体的混合组织, 对苛性脆敏感。

核容器对失效防止提出了更高的要求。为了确保核压力容器的安全性和可靠性, 橡树岭国立研究所曾对一批厚壁中试容器进行爆破试验。容器直径  $1\text{m}$ , 高度  $2.5\text{m}$ , 壁厚  $150\text{mm}$ , 用 ASTM A508 二级钢制造, 在内壁予制不同尺寸的半椭圆裂纹, 在  $54^{\circ}\text{C}$  进行爆破试验, 然后进行失效分析。发现在早期裂纹扩展是以塑性方式进行, 当裂纹尺寸达到  $500\text{mm}$  长、 $83\text{mm}$  宽时, 则以脆断方式进行。有些国家也对压水堆压力容器的断裂分析与防止进行了一

些工作;压力容器高10m,内径4m,壁厚200mm,总重量是330吨。他们设想反应堆可能发生的两种严重故障,并对压力容器上应力集中和热应力最大的5处部位裂纹的产生和止竭进行了计算。

国外对常规武器的失效分析也很重视。例如大炮炸膛事故在各国都有发生,西德发表过8时榴弹炮事故分析报告。日本在第二次世界大战中发生鱼雷破裂事故,现在已查明是由于硫化物应力腐蚀引起的。

对民用机械的失效分析有助于提高产品质量。例如美国的Caterpillar拖拉机公司对大量失效零件进行分析,发现粗大的非金属夹杂物,特别是带状分布的氧化铝夹杂是促使疲劳裂纹萌生、导致零件早期破坏的主要原因。又如日本机械学会对基础件齿轮失效的原因及对策进行了研究,提出了一些指导性的文件。

可以说失效分析已渗透到人民生活的各个方面。例如对人工髋关节的失效分析指出:铸造的Co-Cr-Mo合金中裂纹易于沿薄弱部位发展,这是人工髋关节疲劳断裂的原因之一,以后改用锻造合金就收到了较好的效果。又例如登山靴金属爪的损坏也是一个严重的问题。据日本51所大学登山队的统计,在552名登山运动员中竟遇到了104次金属爪破损事件。他们用扫描电镜和透射电镜对金属爪进行分析,提出了改进办法。

从上面一些片断的事例可以看出:失效分析是提高机械产品质量的重要手段,是顺利开展经济建设的必要环节。只要我们善于从国外事故中充分吸取教训,并结合我国实际及早部署失效分析与防止的研究和应用,我们就能防患于未然;反之,如果我们掉以轻心,置若罔闻,我们就会吃大亏;客观现实就会迫使我们付出重大的代价。

## 参 考 文 献

- [1] R.D. Barer and B.F. Peters, Why metal fail, 1970.
- [2] V.J. Colangelo and F. A. Heiser, Analysis of metallurgical failures, 1974
- [3] J.A. Collins, Failure of materials in mechanical design, Analysis, prediction, prevention, 1981.
- [4] G.G. Garrett and D.L. Marriott, Engineering applications of fracture analysis, 1979.
- [5] S. Kocanda, Fatigue failure of metals.
- [6] Donald J. Wulpi, How components fail, ASM, 1966.
- [7] Metals Handbook Vol. 9, Fractography and atlas of fractographs ASM.
- [8] Metals Handbook Vol. 10, Failure analysis and prevention ASM, 1975.
- [9] Source book in failure analysis, ASM, 1974.
- [10] Prevention of structural failures, ASM, 1974.
- [11] Case histories in failure analysis, ASM, 1979.
- [12] Failure analysis: the British engine technical reports, ASM, 1981.
- [13] Fracture and failure: analysis, mechanisms and applications ASM, 1981.
- [14] Failure data and failure analysis, ASME, 1978.
- [15] Failure prevention and reliability, ASME, 1977.
- [16] Fracture problems and solutions in the energy industry, 1981.
- [17] Metallography in failure analysis, ASTM, 1977.
- [18] Fractography in failure analysis, ASTM, 1977.

- [19] Failure of Components operating in the creep range, IMech E 1976.
- [20] Wear and fracture prevention, ASM, 1980.
- [21] Wear of materials, ASME, 1979.
- [22] 吉田享, 金属破断面の见方, 谷口潤三郎, 谷口公雄共著.
- [23] 长冈金吾, 机械部材の破損解析.
- [24] 北川英夫 小寺沪良一, フラクトラフイ.
- [25] 机械部品・铁钢材料の事故例集——原因と対策——.
- [26] И.А. Одинг, Структурные признаки усталости металлов как средство установления причин аварий деталей Машин, 1949.
- [27] В.А. Барышев, В.К. Краковях, и С.Н. Коренюк, Исследование деталей самолетов и моторов, разрушенных в эксплуатации, 1949.
- [28] Р.С. Николоаев, Причины поломок деталей подвижного состава и рельсов, 1955.
- [29] М.П. Мещеряков, А.М. Зайцев и В.Г. Смирнов, Расследование поломок авиадвигателей в эксплуатации, 1955.
- [30] А.М. Зайцев, Строение усталостных изломов, 1956.
- [31] А.М. Зайцев, и И.Н. Костоглодов, Причины поломок деталей авиадвигателей и их устранение, 1959.
- [32] Я.Б. Фридман, Т.А. Гордеева и А.М. Зайцев, Строение и анализ изломов металлов, 1960.



# 失效分析的思路与分析方法

## 一、概 述

### (一) 失效的定义:

凡机械系统设备或装置零件, 只要不再能满足设计规定的功能者, 统称“失效”。譬如设备不能正常运转; 或者虽然能运转但达不到设计规定的功能; 或者因受损伤不能安全可靠地继续服役, 需要立即更换零件或修理。有上述三种情况之一者, 即为失效。

### (二) 失效分析的目的和重要性

失效分析的主要目的是要找出引起失效的原因, 经过采取有效措施, 使同样失败不致再次发生。因为灾难性的失效不仅经济损失很大, 而且还造成严重的人身伤亡。如 1979 年 12 月 18 日, 吉林市石油液化气贮罐爆裂引起大火, 经济损失达 600 多万, 死 33 人, 伤 54 人。是当年全世界四大事故之一。

世界上工业发达的国家, 每年由于失效(断裂、腐蚀和磨损)造成的经济损失占国民经济总收入一个很大的比重。以美国为例: 1982 年断裂造成的损失达 1190 亿美元[\*], 可以避免的占 53% (631 亿), 通过失效分析研究后可避免的占 47% (559 亿)。这还没有包括间接的经济损失和人身伤亡的统计。

失效分析的重要性, 概括地说表现在以下十个方面: [1]

1. 避免事故重演, 挽回巨额的经济损失;
2. 可以引出大量的经验和教训, 为改进设计制造工艺和使用法规提供科学依据;
3. 对进口设备的失效分析, 可为向外商索赔提供可靠证据或技术仲裁;
4. 促进“吃透”先进技术和提高技术引进的质量和效率;
5. 失效分析结果是修订或制订现行技术规范、规程、标准和法规的重要依据;
6. 维修工作以失效分析为基础能收到良好的效果;
7. 失效分析结论和技术知识常常是制订各种经济法(如产品质量法、安全法、责任法等)的必要资料;
8. 失效分析的统计资料是制订科技开发规划和经济发展规划的重要依据之一;
9. 可为各级技术指挥员正确处理现场技术问题提供决断性的科学依据。
10. 失效分析结果可为公安侦破提供重要信息。

在生产厂中进行质量分析(或废品分析)可收到以下五点好处: [2]

1. 缩短研制新产品的周期;
2. 使老产品的质量得到迅速地改进;
3. 有利分清责任、加强责任制, 保护用户的经济利益;

[\*] 涂铭旌教授提供资料



4.有利于开展材料代用和材料的合理使用;

5.为制订合理的工艺要求、金相标准等提供依据。

### (三) 失效分析的内容以及与其它学科之间的关系

失效分析的内容很多,只针对失效的直接原因进行分析的,即所谓狭义的失效分析,如果把管理的因素也包括在内,即为广义的失效分析。狭义的失效分析按失效现象出现的前或后进行的分析。又划分为三种:事前分析、事中和事后分析。我们常说的失效分析多指事后的失效分析。见表1:

表 1 失效分析的内容、方法和目的

|        | 内 容         | 方 法                                              | 目 的          |
|--------|-------------|--------------------------------------------------|--------------|
| 狭义失效分析 | 事前分析        | 逻辑思维方法(故障树分析法,失效型式后果及危险度分析法,事件时序树分析法,特征一因素图分析法等) | 失效预测         |
|        | 事中分析        | 设备的故障诊断与状态监测                                     | 防止运行中的设备发生故障 |
|        | 事后分析        | 实验检测技术与方法 过程思路的因果关系                              | 找出系统或部件失效的原因 |
| 广义失效分析 | 狭义失效分析+管理分析 |                                                  | 同上           |

失效分析是一门涉及和应用其它学科最多的多边缘学科,如图1所示

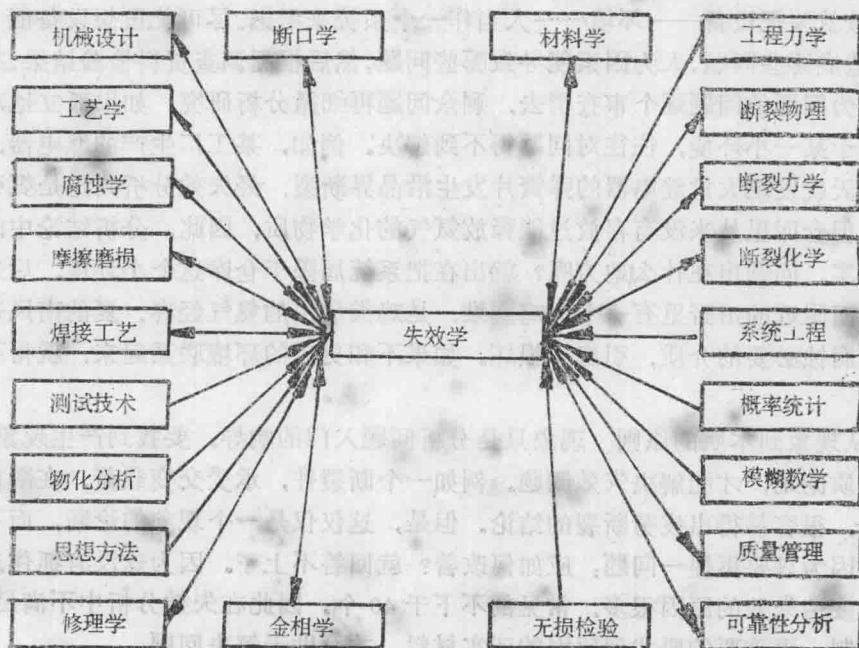


图 1 失效学(分析)与其它学科的关系

\*失效学一词已出现于德文(schadenskunde)

从上可以看出,失效学是以许多学科和技术作为它的基础建立起来的一门新的多边缘学科,通过它的分析结果,又为其它学科或技术提供新的反馈资料来促进它们的发展,图中的箭头符号就表明它们之间的关系,单箭头表示只为失效分析提供“营养”或依据,而双箭头就表示互为提供“营养”或依据,如断口学是失效分析的重要支柱和基础,而失效分析中的某些结果又能丰富断口学的内容,并推动其发展。如氢脆和应力腐蚀的区分,动态应力腐蚀和腐蚀疲劳的区分,却是通过实际事例的分析来促进其发展。又如机械设计的知识,能促进分析的效率和水平,而失效分析结果是属设计问题的,多次反馈能提高设计师的可靠性设计水平。其它的也是如此。

## 二、分 析 思 路

所谓失效分析的思路,就是对具体失效问题要有一个比较深刻周到的思考方法。要求它所确定的程序和步骤,既严密又不繁琐,既高效率又无遗漏,保证分析出发点正确,不导致错误结论。因此,在思想方法上要求遵守并能正确运用以下五个基本原则和五种具体方法。

### (一) 思想方法<sup>[3]</sup>

#### 1. 五个基本原则

(1) 整体观念原则 失效分析工作者在分析失效问题时,始终都要树立牢固的“整体”观念。因为一套设备在运转中某个部件失效引起“停车”,它有这样一些联系:①它与邻近别的部件有关,②它和周围环境的条件或状态有关,③它和操作人员的使用情况有关。因此,一旦失效就要把设备——环境——人当作一个系统来考虑。尽可能设想设备能出哪些问题,环境能造成哪些问题,人为因素能导致哪些问题,然后根据调查资料检验结果,采去“消去法”把不成为问题的问题逐个审查消去,剩余问题再细微分析研究。如果孤立地对待失效部件,或局限于某一小环境,往往对问题得不到解决。例如,某工厂生产的继电器,春天存放在仓库到秋天就发现大批继电器的弹簧片发生沿晶界断裂,经失效分析判定是氨引起的应力腐蚀开裂,但仓库里从来没有存放过能释放氨气的化学物质,因此,分析结论中的腐蚀介质还得不到证实。问题出在什么地方呢?就出在把系统局限于仓库这个小环境。后来查明,在仓库大门南面附近的田野里有一个大鸡粪堆,是鸡粪放出的氨气经春、夏的南风送进仓库,提供了应力腐蚀必要的介质,引起了损坏。如果不和更广的环境联系起来,就得出可靠的结论来。

(2) 从现象到本质的原则 现象只是分析问题入门的响导,要找到产生现象的原因,即失效的本质问题,才能解决失效问题。例如一个断裂件,承受交变载荷,在断口上有清晰的贝壳花样,很容易得出疲劳断裂的结论。但是,这仅仅是一个现象的论断,而不是失效本质的结论。因为只要再提一问题:应如何改善?就回答不上了。因为这没有抓住这一失效的本质。导致疲劳失效的原因很多,常见的不下于40个。因此在失效分析中不满足于找到断裂或失效机制,更重要的要找到原因的证实材料。才有助于解决问题。

(3) 动态原则 这里是指设备或部件对周围的环境或条件或位置,总在那里作相对运

动, 部件在服役中是如此, 就是存放在仓库里也是如此。例如, 一个部件的受力条件, 环境的温度, 湿度和介质这些外部条件的变化, 以及部件本身的某些元素或氢有无随时间发生偏聚的内在变化, 甚至操作人员的变动, 都应包括在这一原则中。上述继电器例子就是由于环境介质的变化。

(4) 一分为二原则 这个认识论的原则用于失效分析, 常指对进口设备不要盲目地以为没有缺点, 而大量的事实表明, 我国引进的设备不少失效原因是属于设计、用材、制造工艺或漏检。找出原因取得索赔, 并把这些结果反馈给有关设计部门, 又可提高我们的设计水平和制造水平。

(5) 纵横交汇原则 既然客观事物总是在不同的时、空范围内变化, 那么同一设备在不同的服役阶段、不同环境, 就具有不同性质或特点。所有机电设备的失效率都服从“浴盆曲线”, 即在服役初期和后期最易出现失效, 但在中期失效率相对地低得多。这是从设备本身来看的特点。另外, 同一温度、介质或外界强迫振动, 在服役不同阶段的介入所起的作用也是不同的。

## 2. 五种具体方法

(1) 系统方法 系统方法又称相关性方法, 就是把失效类型、失效模式、断口形貌特征、服役条件、材质情况、制造工艺水平和过程, 使用和维护情况等放在一个研究系统中, 是从总体上加以考虑的方法, 看失效原因是否与设计、材质、制造、使用、维护等有关, 并据此深入测试分析 (包括模拟或失效重现试验), 寻找具体失效原因, 本方法的前提和出发点整体性原则, 基本特点是: 从一般到个别, 从普遍到特殊, 从单项分析到综合联系和一致上找原因, 这就要求尽可能地搜集与全局性有关的资料和测试信息, 从而确定分析系统的范围, 范围太大就浪费时间、精力和费用; 如范围太小, 问题提得不全, 又会使分析带有片面性。

(2) 抓主要矛盾方法就是抓失效中起主要作用的因素, 如断裂失效中的断裂源和断机理及其导致因素。

(3) 比较方法 选择一个没有失效的而且整个系统能与失效系统一一对比的系统, 然后与失效系统进行比较, 从中找出差异, 这样来找引起失效的原因。

(4) 历史方法 历史方法的客观依据, 是物质世界的运动变化和因果制约性。就是根据同样设备同样服役条件在过去表现的情况和变化规律, 来推断现在失效的可能原因。这主要依赖过去失效资料的积累, 运用归纳法和演绎法。

(5) 逻辑方法 就是根据背景资料 (设计、材料和制造的情况) 和失效现场调查材料以及分析、测试获得的信息, 进行分析、比较、综合、归纳、和概括, 作出判断和推论, 得出可能的失效原因。

以上这些原则和方法掌握程度和运用水平, 决定着失效分析的速度和结论正确的程度, 掌握这些原则和方法, 可以防止失效分析人员在认识上主观片面性, 技术运用上的局限性。在判断上实事求是, 不搞无事实根据的推论, 保证分析结论正确无误。

## (二) 常用的几种失效分析思路

### 1. 根据失效分类的分析思路