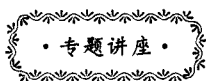


**编者按** 失效分析对提高机电产品质量和确保机械构件安全运行发挥越来越大的作用,普及与提高失效分析技术已成为广大理化人员普遍关心的问题。为了满足广大读者的要求,我们特邀请中国机械工程学会材料分会失效分析委员会主任、上海失效分析与安全评估中心常务副主任、国家级突出贡献专家上海材料研究所高级工程师吴连生高工撰写“失效分析技术及其应用”的专题讲座。本讲座拟分九讲刊出,分别为:第一讲 失效背景材料的收集;第二讲 失效现场调查;第三讲 失效样品的选择;第四讲 失效件初步检查;第五讲 韧性脆性断裂失效分析;第六讲 疲劳断裂失效分析;第七讲 环境断裂失效分析;第八讲 蠕变断裂失效分析;第九讲 其它断裂失效分析。

读者对本讲座的安排有何意见和要求欢迎与我编辑部联系。



## 失效分析技术及其应用

### 第一讲 失效背景材料的收集

吴连生

(机械工业部上海材料研究所 200437)

随着现代科学技术的飞跃发展,失效分析已经成为一门综合性的边缘学科正蓬勃崛起,在工程上正得到日益广泛的应用和发展。为了提高机电产品质量和对其寿命进行评估,国内外对机电产品的失效现象进行了大量的分析与研究,积累了丰富的经验教训,日益完善了失效分析技术及其基本理论。应用失效分析技术,可以指导机电产品规划、设计、选材、加工、制造、寿命评估、检验及质量管理等方面的工作;同时失效分析技术又是制定技术规范、科技发展规划、法律仲裁和对外索赔等的重要依据。大力开展失效分析研究及应用,对全面实现我国农业、工业、国防和科学技术的现代化,具有极其重要的作用。

国外为控制事故,主要根据事故教训,生产实践和传统理论、制定强制性安全措施和技术规范,改进用材与设计制造、检验技术,加强新投用设备质量控制和在役旧设备的更新与定期检验防范,使事故率大幅度下降。普遍建立失效案例库与失效研究系统,使失效分析及预防技术正进一步从分析定性或定量阶段期向优化、动态和系统安全的方面发展。

由于长期以来的历史原因,我国现有设备如化工容器、电站设备、冶金装备、交通工具和轻纺设备等超期服役,带“病”运行的还相当普遍,这些设备若盲目的使用,而不及及时采取措施、进行监控,必将发生事故。因此,治理和预防事故已刻不容缓,必须十分重视失效分析的研究及应用方面的工作。

本讲座将结合近年来从事失效分析工作实践的心得和研究成果,较为系统、深入地介绍有关发电设备、化工容器、冶金装备、交通运输工具、轻纺机械等失效分析过程、方法、原因及影响因素等。

本讲座既介绍了金属材料组织与性能,机械构件的设计水平、加工状态、使用条件及其环境介质等对机电产品质量和使用寿命的影响,又着重分析探讨了机械构件失效的内因和外因,把握规律,吸取经验教训,以避免类似失效现象的重复发生。

读者对本讲座的具体内容有何要求和建议欢迎与作者联系。下面开始叙述第一讲的内容。

失效分析立足于失效背景材料和失效样品的分析研究。因此,任何类型的失效分析,都需要收集失效背景材料和失效样品。失效背景材料,包括:失效现场调查、失效残骸观察和有关文献资料的检索等。在这里着重介绍收集有关失效件服役前后的经历和有关文献资料的检索问题。

#### 1 失效背景材料的内容和作用

失效分析一开始,就应当尽力收集有关事故的一切重要情况。首先应仔细研究事故的背景材料和特征,并提出失效分析的研究方案。

##### 1.1 失效背景材料的内容

失效背景材料的内容,主要是指失效零件或构件的加工及制造史;服役前的各种经历;工作历史;失效

条件和环境;反常状态等。

1.1.1 失效零件或构件的加工与制造史 失效零件或构件的加工与制造历史背景材料,主要包括零件或构件的名称,用于何种机器,何部位,生产厂家和生产日期;该零件或构件的设计图纸及其设计要求和依据,材料的选择等全部的设计观点;各种加工或制造工艺等。工艺历史材料又可以分为:(a)冷加工,包括机加工、拉伸、弯曲、抛光、研磨和校直等。(b)热加工,包括铸造、锻造、热处理、焊接等。(c)表面加工,包括电镀、清洗、涂层及其他表面强化处理工艺等。

1.1.2 失效零件或构件服役前的经历 机械零件或构件经加工与制造成型后,还要经过装配、包装、出厂、运输、贮存、按装和调试等阶段。每个阶段的细节都要尽量收集,这对失效分析人员来说是有重要参考价值的。例如运输阶段,要了解是用什么交通工具,是空运、陆运还是海运;若是海运还要了解是什么船,通过什么海域,花费多长的时间,由什么码头到达用户所在地什么码头以及远洋轮在运输期间是否发生海事等情况。

1.1.3 工作历史 获得完整的工作记录,会有助于失效分析程序或计划的制定,会减少失效分析人员的工作量。然而,要想得到一套完整的工作历史是不容易的,很大程度上取决于事故发生前的记录详尽与否和保存得完整与否。在收集工作历史的过程中,要特别注意:(a)反常载荷;(b)偶然的过载荷;(c)循环载荷;(d)温度变化;(e)温度梯度;(f)腐蚀介质等因素对工作状况的影响。但是,在大多数情况下,获得不到完整的工作记录,这就迫使失效分析工作人员根据不完整的工作记录进行工作。在缺少工作记录条件下,失效分析人员必须竭尽全力判断出工作状态。这在很大程度上取决于失效分析人员的技能和经验。此时,要特别注意不要产生错误的判断,它可能比缺少资料更加有害。

还要了解失效零件或构件在什么条件下发生事故的,即所谓“失效条件”和“失效环境”等材料。

## 1.2 失效背景材料的作用

失效分析是一项极其复杂的研究工作,涉及多方面的因素。对于失效分析人员来说显然不能“胡子眉毛一把抓”,必须根据失效背景材料制定失效分析计划或方案。在进行失效分析时,必须占有大量的和丰富的失效背景材料和有关的试验数据或结果等,这是失效分析的基础。在这个基础上,对材料、数据、结果等进行加工、整理、分析和综合,才能揭示出失效的性质和找出失效的规律。没有这些基础,一切均无从说起。由此可见,收集失效背景材料在整个失效分析中所占的地位之重要,就如同成炊之米。

在分析研究零件或构件失效时,调查研究事故全过程是很花费时间的,有时失效分析人员不能或不可

能到失效现场去。在这种情况下,失效背景材料和失效样品可以由现场工程人员或其他工作人员在现场收集。现场情况报告和检验记录等均可作为失效分析的依据或参考资料。

失效分析是一门综合性的边缘学科。它涉及到很多专业或学科,而失效分析人员所学的专业或学科仅是一种或二种,若想得到确切的失效原因,失效分析人员必须要不断地学习和提高失效分析技术与方法。收集失效背景材料的过程,就是失效分析人员的学习和提高的过程。通过收集失效背景材料的过程,可以掌握和了解失效零件或构件的功能、原理、运行等情况,所以说,它也是促进人才成长的重要因素。总之,人们要进行失效分析,首先必须收集失效背景材料。它是失效分析中最繁琐最复杂的一个阶段,是失效分析活动中具有战略意义的第一步。只有对这个问题有了足够的认识,才能成为真正有价值的失效分析,才能准确地找到失效原因。

## 2 失效背景材料的收集方法

任何一项失效分析都离不开失效背景材料,因此,收集必要的失效背景材料,就是进行失效分析的基础工作。失效分析人员要充分发挥失效背景材料在失效分析中的作用,就必须学会掌握收集失效背景材料的方法。

### 2.1 收集失效背景材料应遵循的原则

所谓失效背景材料收集方法,就是通过多种途径收集各种与失效分析有关情报的方法。要有效地发挥失效背景材料收集方法在失效分析中的作用,在应用它收集失效背景材料时,应遵循如下原则:

2.1.1 实用性 所收集的失效背景材料,是应对失效分析有用的有关资料。否则,失去了收集失效背景材料的意义。失效分析的根本目的是为生产建设服务,这就要求失效分析工作者要熟悉和掌握生产实践中的主要环节,善于发现生产中可能存在的实际问题。

2.1.2 内容上要尽可能丰富 收集失效背景材料时,既要查找现代资料,又要查询历史资料;既要查找正常运行记录,又要了解反常运行记录或事故分析报告等;既要查找与失效件密切相关的专业性资料,又要了解相关专业的资料;同时还要了解中外的文献资料,等等。从内容上看,所收集的失效背景材料越丰富越好。

2.1.3 新信息、新动向 要特别注意收集有关失效背景材料的最新资料。就是说,要尽量了解与失效分析有关的各种新资料、新信息、新动向,并及时研究和利用;只有这样才能提高失效分析的时效性和实用价值。

总之,在收集失效背景材料时,关键在于要有一个正确的立场和观点,并能对所收集的失效背景材料作

出正确的分析和鉴别。所收集的失效背景材料既要有科学性、客观性,又要有典型性、代表性。

## 2.2 收集失效背景材料的基本方法

所谓收集失效背景材料的方法,就是人们为了完成失效分析,找出失效原因的任务,达到提出改进或预防的目的,所采取的各种手段和进行的步骤。在收集失效背景材料时,也必须要有正确的研究方法作为手段,才能有效地进行。通常失效分析时,主要应用(1)查阅技术档案;(2)检索科技文献;(3)走访调查;(4)观察现场等四种方法获取失效背景材料。

**2.2.1 查阅技术档案** 一个机械产品从设计、选材、加工、制造、装配、试车、包装、运输等,最后到用户使用。在这些过程中所积累的技术资料,经过整理即成为所谓的技术档案。例如产品说明书、图纸及其说明、工艺流程,材质检验报告、产品合格证书、安装调试情况、技术合同、运输和贮存情况等等。当机械产品发生事故时,要及时查阅这些技术档案资料为制定失效分析计划或方案做依据。

**2.2.2 检索科技文献** 以往的科学知识及现代的研究情况,大量的或者说主要是通过各种书籍、报刊、行政报告和文件及会议记录等记载而传留下来的,一部分是通过文物传留下来的。从科技文献中获得科学技术资料,这是一条重要途径。

当今是知识激增的信息时代,科技文献资料逐年成倍增长,失效分析人员必须学会用索引来检索科技文献资料。在失效分析中经常应用的索引有:(a)篇名索引;(b)人名索引;(c)主题索引等。学会利用索引,这对于失效分析人员来说,关系到能否尽快完成失效分析任务的大事。一旦你学会利用索引,那你将会发现一个新的世界,将会使你得到数不尽的宝藏。

**2.2.3 走访调查** 到广大群众中去,调查了解他们的实践经验,这是获取失效分析资料的一个极为重要的来源。尤其是在查阅技术档案和检索科技文献较困难的条件下,走访调查显得更为重要。

走访对象主要是指事故现场工程技术人员、机械产品生产厂家和用户有关人员。不仅要走访事故的当事人,而且也要向非当事人了解有关事故的情况。

在走访调查中,要作好登记和记录。对新发现的重要证据,要详细登记。如事故发生的时间、具体地点、特征、环境条件、损坏程度、经济损失和人员伤亡等,都要详细地写清楚。对于所收集到的失效背景材料的情况和过程等要作好记录。对于记录和收集的失效背景材料,要分类保管。

**2.2.4 观察现场** 观察现场方法,是观察者有目的、有计划地运用自己的感觉器官或借助科学仪器,直接收集正在发生或发生后的事故现场环境中的有关失效

背景材料的方法。

观察现场的效果,主要取决于观察者自身的素质,取决于有无明确的观察目的和能否进行认真、系统和全面地观察。

除了运用人的感觉器官,主要是通过眼睛获得的之外,还常常借助于各种观察仪器进行的观察活动。观察仪器主要有:(a)照像机;(b)摄影机;(c)内窥镜;(d)放大镜;(e)探测器;(f)录音机;(g)录像机;(h)大工件金相显微镜等。

总之,任何一种研究方法,都有自己的特殊作用,同时,都不是唯一的,各自都有一定的局限性。一般说来,所收集的失效背景材料,必须经过思维加工,使之上升为失效分析的依据或理论。

## 3 背景材料收集方法的应用实例

以管式工业锅炉炉管爆裂失效分析为例,具体说明失效背景材料收集方法的应用。

### 3.1 管式加热工业锅炉炉管爆裂失效分析简况

某型管式加热炉,分为对流段和辐射段两部分。辐射段共有8组炉管,合计88根炉管,炉管材质为13CrMo44、15CrMo等低碳低合金钢。

这次事故主要是发生在辐射段,有两根炉管出现爆破口,其余20多根炉管均有不同程度的变形。离爆破口附近的炉管外表面有较厚的氧化皮。

对流段炉管烧损严重,有部分炉管熔化为残渣和残骸散落到炉底。

该加热炉炉管内的载热体为导热油,它是联苯26.5%和联苯醚73.5%的低熔混合物。

该加热炉凌晨发生事故,值班人员首先发现加热炉炉顶冒烟,听到巨响,接着引起火烧,烧了3个小时才全部熄灭。加热炉从安装、使用到爆管火烧共运行了2年多左右时间。

通过现场调查及取样、炉管变形测量、材料的化学分析、力学性能测量、金相检验、炉管残骸分析、SEM分析、TEM分析、EPMA分析、热分析、X-射线结构分析、炉管氧化速率计算及管壁受热状况判断、炉管受力分析及估算、综合分析等得出结论并提出改进措施。

该管式加热炉炉管是由于长期过热引起的炉管内壁产生蠕变裂纹,当裂纹扩展到一定程度时,最后导致爆管。

建议定期检查炉管的外径尺寸,掌握管内积碳情况和管外壁氧化皮厚度的测量等。

### 3.2 炉管爆破失效背景材料的收集

**3.2.1 观察现场** 钻到炉温尚未冷却下来的炉膛(如图1所示)内观察现场。发现辐射段炉管B组、C组炉管损坏严重,其中B-9、C-9两根炉管出现爆破口。B-9

炉管爆破口较小,C-9 炉管爆破口较大,如图 2、3 所示。

B 组和 C 组炉管除了外表面有较厚的氧化皮之外,敲击检查发现 B 组 9~11 根炉管,C 组 9~11 根炉

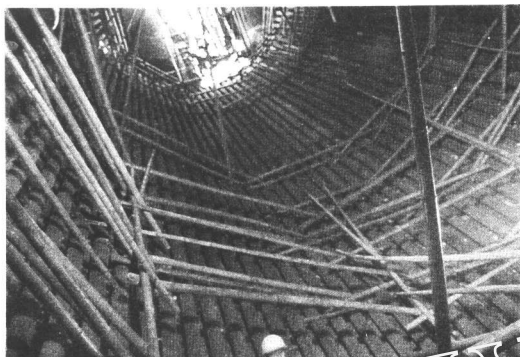


图 1 管式加热炉炉堂宏观形貌,图中所见炉管为辐射段炉管,竹杆为收集失效样品做的手脚架,图中顶部白色区域为对流段炉管位置,因大火已经将炉管烧毁



图 2 辐射段炉管,B 组炉管在失效过程中形成较小的破口,图中显示出破口与附近氧化皮的宏观形貌特征

管的沉闷声响最为明显。

另外,通过炉管外径测量和炉管变形程度观察,也证实了 B 组和 C 组炉管外径增大较多和变形较严重,尤其是 B-8、B-10、C-8、C-10 等炉管严重变形并向炉心弯曲,离炉壁有 400~440mm 的距离。

最后,还观看了有关炉管爆裂事故现场的录象、彩色照片、现场事故记录等,对事故现场整体、事故过程、失效残骸所处位置等情况有较深的感性认识和了解。

3.2.2 走访调查 首先,走访了发生事故时的值班人员,了解到炉管爆裂事故在凌晨 4:40 分左右发生的,开始时炉顶部冒烟,听到响声,接着引起火烧,直到凌晨 6 时许才控制住火情,到 7 时火烧全部熄灭。

另外,经厂方有关人员介绍该筒式加热炉共发生三次事故,此项事故最为严重。不仅辐射段炉管爆裂,

而且对流段炉管由于火烧几乎全部破损,其经济损失相当可观。

第三召开有关厂领导、车间负责人、技术人员及工人的座谈会,从中了解到了该管式加热炉炉管爆裂的时间、经过、特点、环境条件、损坏程度、经济损失和出场人员等详细的情况。

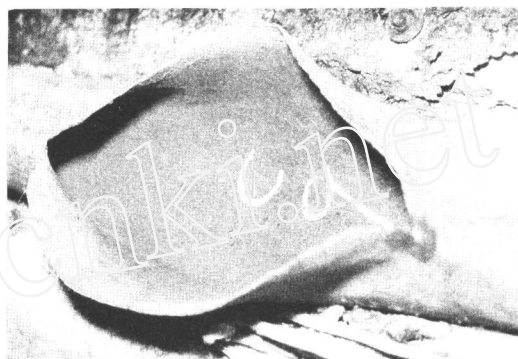


图 3 辐射段炉管,C 组炉管在失效过程中形成较大的破口,该图为大破口及管壁锈蚀的宏观形貌特征

从会中察觉到厂领导干部在介绍事故情况时,有些顾虑,尤其是分管生产的负责人更为担心,怕负责任。

3.2.3 查阅技术资料 查阅技术档案,知道炉管有日本进口和国产管两种,从产品质量证明书可了解到炉管材质合格,符合管式加热炉炉管用材要求。

其次,还查阅了该厂和某研究所的炉管材质的金相检验、化学成分分析、力学性能测试报告等 9 份资料。

第三查阅了有关该管式加热炉火烧或事故报告、厂技术科和车间主任写的炉管外径测量和对流段炉管损坏程度的现场检查报告。

第四查阅管式加热炉设计图纸、说明书和该加热炉运行记录等资料。

3.2.4 检索有关文献 首先检索有关锅炉或压力容器设计中的热应力及其计算、管式加热炉的工作原理、构造及特征等方面的文献。

其次是有炉管材料的蠕变或热疲劳等方面的文献。

第三检索了有关导生油的物理、化学性质及其事故防范,使用导生油载热体时应注意的几个问题和导生油生产厂家或国外公司所提供数据及资料等。

最后还查阅有关炉管受热积碳,热传导,热膨胀和热力学等方面的文献资料。