

工程事故的系统分析

〔联邦德国〕G·A·兰格 主编

庄育智 李有柯等译

劳动人事出版社

343244

工程事故的系统分析

〔联邦德国〕 G·A·兰格 主编

庄育智、李有柯 等译

劳动人事出版社

内 容 简 介

工程事故分析是一门新兴的边缘学科，其目的在于利用各种现代科学技术和有关的理论知识分析各类工程事故的发生原因。本书共分15章，系统地介绍了这门学科，并阐述了各类事故的起因、特征、分析方法和预防措施。内容上兼顾原理和应用两个方面，取材丰富，实用性强，是本不可多得的通用和入门的书籍。

本书可作为高等院校安全工程、材料科学与工程、金属腐蚀与防护等专业的参考教材，也可作为失效分析技术人员的培训教材，并可供机械、冶金、化工等部门从事金属材料工作的科研人员和工程技术人员参考。

工程事故的系统分析

主编 G·A·I 兰格

中育智、李有柯 等译

责任编辑 张建英

劳动人事出版社出版

(北京市和平里中街12号)

北京怀柔县东茶坞印刷厂印刷

新华书店北京发行所发行

787×1092毫米 32开本 11.375印张 253千字

1989年9月北京第1版 1990年1月北京第1次印刷

印数：4,000册

ISBN 7-5045-0417-3/TG·046 定价：7.20元

译 者 的 话

1984年12月，一个和平宁静的夜晚，印度博帕尔市居民在白天劳作之后，都已酣然入睡。突然，一场意料不到的灾难正降临到他们头上，开设在该市的美国联合碳化物公司的农药厂异氰酸甲酯储罐泄漏，顿时毒气扩散弥漫，笼罩了工厂附近很大一片地区，造成2500人死亡，20000人受伤。1985年8月，日本一架波音747客机轰然坠毁，520人罹难。第二次世界大战期间，美国的焊接运输船发生大量破坏：238艘完全报废，19艘沉没。这些是发生在空中、海上和陆地的彰明较著的大事故，其后果令人惊心动魄。至于小型事故，就世界范围而言，真是不胜枚举。随着世界的经济发展，工程事故数量有增无减，其灾难性的影响愈益惨烈，引起各方的瞩目和关心。

工程事故分析这门学科正是在这样严峻的社会背景和紧迫的社会需要下产生和发展的。因而它具有两个鲜明的特点：一是实用性，即有很强的生产应用背景；二是综合性，即作为一门新兴的边缘学科，它涉及广泛的学科领域和技术门类。目前，工业发达国家纷纷在高等院校中设置事故分析课程，积极培养人材，建立专门机构，从事事故分析研究，出版大量书刊，传播必要的知识。总之，为工程事故分析的发展投入了很大的力量，也因此获得了巨大的社会效益和经济效益。

近几年来，工程事故分析在我国日益受到重视，但就其发展总体来说，尚处于起步阶段，极需这方面书籍，使广大读者增长知识，开阔眼界，启迪心智，以求得工程事故分析工作的健康发展。

这本书从工程事故分析工作程序讲起，继而介绍事故分类、起因和特征，常规和先进的分析方法，最后广泛讨论了各种类型的事故。循序渐进，深入浅出，兼顾原理和应用，内容新颖翔实，是本不可多得的通用和入门的书籍。

本书由多位作者分章撰写，前后呼应，自成系统。这些作者都是事故分析方面的专家、学者。筹划经营，总其事者是G.A.兰格 (Lange) 教授，他在联邦德国不伦瑞克工业大学材料研究所主持工程事故分析有年，1985年曾来我国讲学。本书1986年末在联邦德国出版后，他即惠赠译者，情谊感人。读后深感这是一本适合我国需要的书籍，介绍给读者，定会有所裨益。这就是我们翻译这本书的缘由。

我们期待着批评和指正。

译 者

1988年4月

序 言

金属材料失效事故中有相当大的比例是因忽视它们应用的基础原理这一事实所造成的。由于难预见效应的复杂交互作用，而使部件发生事故是不常见的。与通常的认识相反，仅是在个别情况下，材料的缺陷导致机器、车间或部件的损毁。

在了解金属和合金的应用极限及可能做出修改建议之前，必须知道超载和破坏时所发生的材料过程。这方面知识对设计者和事故研究者都是重要的。一方面可以将可能发生事故的次数减至最少，另一方面全部了解事故的原因并反馈到设计、选材、制造、试验和加载条件中，能大大地防止类似事故的重演。

本书内容着重在材料方面。在介绍事故分析的工作程序和各種分析方法后，对腐蚀和磨蚀的各种断裂形式及失效过程与材料情况和加载情况的关系，进行了讨论。应用有关机制解释断裂的宏观和微观形貌。对断裂力学和焊接损伤单独分章介绍。选择了案例说明一些基本概念，使其与实际紧密结合。

编者对本书合著者的许诺和编写本书的热忱，表示衷心的感谢。

G. A. 兰格

1986年3月于Braunschweig

目 录

译者的话

序 言

第一章	工程事故分析的工作程序·····	1
第二章	断裂的分类、起因及特征·····	8
第三章	材料研究·····	16
第四章	金相学在失效分析中的应用·····	35
第五章	韧性超载断裂的微观和宏观外貌·····	61
第六章	脆性断裂的宏观和微观形貌·····	79
第七章	疲劳失效的宏观外貌·····	102
第八章	疲劳失效的微观形貌·····	132
第九章	热感生断裂·····	159
第十章	无应力条件下腐蚀引起的失效·····	178
第十一章	腐蚀和机械载荷联合作用引起的失效·····	201
第十二章	高温腐蚀失效·····	232
第十三章	磨损造成的失效·····	264
第十四章	焊缝失效·····	290
第十五章	断裂力学在失效分析中的应用·····	335

第一章 工程事故分析 的工作程序

G.A. 兰格 (Lange)

一、事故分析的目的与目标

事故分析应首先提供一个部件失效的原因，另外它可以影响设计、选材、制造、试验技术或操作条件，防止事故再度发生。可以通过检查，在真正发生事故之前，将正在工作的机器、设备、仪器和车间内的可疑部件换掉。

造成事故的原因很多，同样事故本身显示的方法也是多样的。因此本文仅讨论一些基本的处理方法和评价判据。对某一具体案情，选择得当，能解决大多数服役中失效的问题。

二、事故资料編集

第一步必须保存已损坏部件的残物。与此并行的是必须收集有关讯息。下述诸点，必须牢记：

证据

1. 两断裂面或所有断裂面都必须保留；一个断裂面能够显示出对面看不到的或已被破坏的形貌。

2. 容易受腐蚀的部件必须加以保护：保存在干燥器里或喷涂油漆。如需研究腐蚀产物，应特别小心切莫触摸断裂面。

3. 有可能时要拍照记录(录下腐蚀产物的颜色)，要不然

必须进行描绘，标出尺寸（照相的目的不仅是为了保存资料，如在检查过程中原物已被切开，可供重新确定原始状态之用）。

若当场或在原地检查事故（不是检查从外面送来的部件），则必须按以下步骤进行：

1. 对断口原始状态进行宏观检查。
2. 记录总的印象、周围环境和见证人的陈述。
3. 提供拆卸或切下供研究部件的说明材料，避免随后的更改（如在断裂面足够远的地方用火焰切割或砂轮切割，对冷却的可能要求）。
4. 对所取下准备检查的试样进行编号（对样品打钢号，防止样品搞乱），在部件备纸上标明所取试样的位置。

有关事故的讯息。

广泛可靠的讯息可以简化分析工作，并大大防止错误判断。根据事故类型，应建立以下档案材料（必须预料到难免有错误的讯息）：

1. 材料（有可能时附检验证明）；
2. 材料或部件的热处理；
3. 生产，制造，部件验收检验；
4. 部件设计：结构图，功能模式，加载形式及程度，尺寸，结构改变情况，部件为单件或大量生产；
5. 在机器、设备或工厂中部件的位置及其功能（记住失效源的远处影响）；
6. 运行细节：寿命，运行时间，以前损伤，修理，大修，检查时间间隔，运行改变情况，停车；
7. 环境：温度，压力，腐蚀或侵蚀介质；
8. 发生事故时运行情况：刚启动，部分加载，满载，超

载，升温或降温，

9. 事故发生过程：特殊的观察，时间和事故发生先后次序的意义，

10. 事故后发生的事件：事后损伤，不恰当处理或存放，预先检查。

实际上事故研究者只能得到这些讯息中的一小部分，因此有一部分讯息常常是研究的对象（本章末尾讨论了两个重要案例）。

三、事故分析的执行

事故分析程序和研究范围必须得到委托者的同意，往往仅需要迅速和低代价的解答，而不需要对事故所有方面给予详细的解释。必须强调实验方法的局限性，特别是当要求使用特殊技术时，查询结果常常表明所要求的特殊技术往往是不恰当的。委托者未提供背景讯息而要求孤立地进行试验一般是无用的（例如要求做化学分析而实际上需要的是寻找疲劳失效的原因）。应该详细做出计划，使后来需要的证据不致于丢失。这特别适用于取样，样品必须对所研究的性能具有代表性，同时必须不受取样过程的影响（如加热引起金相组织改变，铸铁样品制备过程石墨脱落等）。取样位置必须在照片或图纸上做标记。

断裂类型的确定在大多数情况下是研究的主要目的。往往确定了断裂类型已足够解决问题。断裂的类型和形貌提供了应力状态的讯息并部分地提供材料情况，因而提供了断裂起因的讯息。另外它还可以区别究竟是原始断裂抑或后来造成的损伤。

在任一情况都必须先应用肉眼，放大镜或立体显微镜对断口进行宏观评价。显著的宏观形貌常常足够帮助我们识别

断裂的类型。即使有大量破损部件(例如飞机撞毁、爆炸),也能先依靠宏观检查查找可能引起事故的断裂。

当宏观检查对明确地认定事故起因不够充分时,需要依靠微观检查——一般应用扫描电镜。对于薄壁部件或小截面以及事后发生破损的断口更需要这样做。扫描电镜除了能够确定断裂类型外,还可获得有用的讯息,如断裂源的特色,裂纹的传播,显微组织(对180起民航事故案例的统计评价获得以下的分布情况:24%的碎片用宏观检查可以明确地确定断裂类型。43%用宏观检查只能得到象征性的结果,必须依靠扫描电镜加以肯定。30%用宏观检查不能得到确定的预测,非使用扫描电镜不可。在35%的案例中能够得到另外一些讯息)。

理想的情况是微观检查结果证实宏观检查结果。如结果不理想可借助于模拟试验。在失效部件上切取试样(如需要保留原物,可从新替换的部件上切取),并在与使用相似条件下进行试验直至发生断裂。然后将断口表面与部件断口表面比较,若工作条件不清楚,可用几个试样产生不同类型的断口。

取决于事故的类型,可能需要进行各种各样的材料研究。它们提供了材料类型和状态的讯息,特别是与保证值有欠缺和偏离的情况。最重要的技术包括金相,机械试验,化学分析和非破坏性试验。若没有得到所规定或期望状态讯息,则对其它工厂,机器或备品中相似部件进行平行试验,也是有帮助的。然后能够得出的评论意见是材料可疑,但针对本具体应用具有足够好的质量。

在事故报告中,一般包括分析程序,研究结果和结论。报告应包括对可能补救方法的建议。

从文献^[1-3]可以找到事故分析说明单。Schmitt-Tho-

mas^[4]提出了标准表格。Allians^[5-7]，美国金属学会^[8]，Naumann^[8]和Colangelo^[9]提出了事故的材料原因报告并列出了许多案例。

下面举了两个例子说明一些看来是不重要的因素对事故萌生的影响。成熟的直升飞机透平轴向多级压缩机的结构形貌受到显然不重要的改变——在盘的边缘开了一条环形沟。

这样在调整平衡时能容易挪走多余的材料。经过大约在每分钟44000周的转速工作1000小时后，有两个透平盘由于发生晶粒间界应力腐蚀而断裂(图1-1与图1-2)。其它直升飞机的相应盘子受显著腐蚀都被换掉。供制盘子用的钢X15Cr13(0.15%C, 13%Cr)，为了得到高的强度，淬火后仅在540℃热处理而未加热到700~750℃，因而对由于晶间沉淀碳化物使铬贫乏所引起的腐蚀特别敏感。从空气凝聚下来的水分不再为离心力所抛离，停留在沟里，使这一区域处于应力腐蚀敏感状

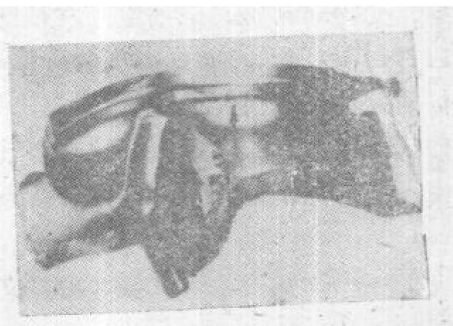


图 1-1 轴向压缩机碎片。沟内受到腐蚀(箭头所示)盘直径130mm

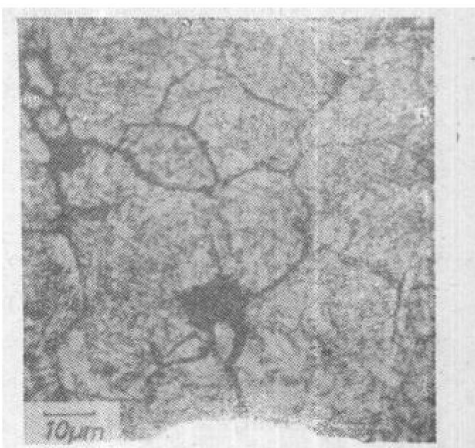


图 1-2 沟附近晶粒间界腐蚀(Vilella试剂蚀刻)

态的钢发生断裂⁽¹⁰⁾。

另一个实例是一个射击手用来福枪射击时，因一些经过盐浴硬化处理的枪锁部件发生断裂而受到了重伤。这支来福枪射击过50发子弹，第一次大约超载30%。参加射击的人对这一事故都不理解。发生这一事故的解释是这样的：所有枪锁部件都毁于解理断裂。材料本身由于不正确热处理的结果，变得非常脆。来福枪是六月里得到的；事故发生在同年11月，温度为+1℃。温度的降低进一步降低了原来已经是低的韧性，为脆性断裂提供了先决条件。从断裂部件及与其相似武器中取样，通过金相检查和进行20℃及1℃缺口样本冲击试验对比，证实了所研究的结果⁽¹¹⁾。

参 考 文 献

- (1) VDI-Richtlinien 3822; "Schadensanalyse"; Bauth-Verlag, Berlin.
- (2) VDI-Berichte 243; "Methodik der Schadensuntersuchung", VDI-Verlag, Düsseldorf 1975.
- (3) American Society for Metals; Metals Handbook, Vol. 10, Failure Analysis and Prevention, 1975.
- (4) K. G. Schmitt-Thomas; Formblätter "System-Schadensanalyse", TU München.
- (5) Allianz, "Bruchuntersuchungen und Schadensklärung", Allianz Versicherungs-AG, München and Berlin 1976.
- (6) Allianz, "Handbuch der Schadensverhütung", Allianz Versicherungs-AG, München and Berlin 1976.
- (7) E. J. Pohl; "Das Gesicht des Bruches metallischer Werkstoffe", Vol. I, II, III, Allianz-Versicherungs-AG, München and Berlin 1956.

- (8) F. K. Naumann, "Das Buch der Schadensfälle", Riederer-Verlag, Stuttgart 1976.
- (9) V. J. Colangelo and F. A. Heiser, "Analysis of Metallurgical Failures", John Wiley and Sons, New York 1974.
- (10) G. Lange, Zerstörung von Hubschrauberturbinen durch Einsatz eines Stahles in korrosionsanfälligen Zustand bei gleichzeitig nicht werkstoffgerechter Konstruktion. z. f. Werkstofftechnik 5 (1974), 9-13.
- (11) G. Lange, Bruch eines Gewehrschlusses infolge fehlerhafter Wärmebehandlung. Härtereitechn. Mitt. 37 (1982), 284-285.

第二章 断裂的分类、 起因及特征

G.A. 兰格 (Lange)

一、断裂型

对断裂的分类有一系列不同的意见。另外对同一断裂类型有不同的名称，其中有一部分不准确或有错误。本书采用 VDEh-DVM 分委员会与编者共同拟订的名词^[1]。根据加载形式，断裂分类如表 2-1 所示。本章未讨论的其它断裂类型，将在有关章节中加以介绍。

二、断裂类型的定义

不受本书有关章节对各类断裂详细叙述的约束，将表 2-1 所有概念的定义整理如下。

机械载荷引起的断裂

超载断裂发生在相当迅速或突然单向载荷作用下。微观韧性或韧窝断口通过在最大剪切应力面滑移而产生。微观脆性断口通过克服材料的结合力发生于垂直最大张应力面方向，几乎没有范性形变。单轴应力，韧性材料，低加载速率和高温有利于韧性断口的形成。相反的情况有利于脆性断口的形成。根据显微组织形貌，韧窝断口又可分为穿晶和沿晶韧窝断口。另一方面脆性断口又可分为穿晶解理和沿晶脆性断

表 2-1 断裂类型分类

-
- 1. 机械载荷断裂
 - 1.1. 过载断裂
 - 1.1.1. 微观的韧性断裂=韧窝断裂
 - 1.1.1.1. 穿晶韧窝断裂
 - 1.1.1.2. 沿晶韧窝断裂
 - 1.1.2. 微观的脆性断裂
 - 1.1.2.1. 穿晶脆断(解理)
 - 1.1.2.2. 沿晶脆断
 - 1.1.3. 混合型断裂
 - 1.2. 疲劳失效
 - 2. 腐蚀诱发裂纹和断裂
 - 2.1. 沿晶腐蚀
 - 2.2. 沿晶应力腐蚀开裂
 - 2.3. 阳极应力腐蚀开裂
 - 2.4. 氢诱发开裂和断裂
 - 2.5. 氢诱发应力腐蚀开裂
 - 2.6. 腐蚀疲劳
 - 2.7. 金属脆化
 - 3. 热诱发裂纹和断裂
 - 3.1. 蠕变失效
 - 3.2. 焊接开裂
 - 3.3. 热开裂
 - 3.4. 硬化开裂
 - 3.5. 打磨开裂
 - 3.6. 热震裂纹
-

口。混合型断裂由上述不同断裂类型组合而成。

疲劳失效是在交变应力下所引起的失效。疲劳裂纹自一个或数个成核区萌生,而逐渐扩展到部件的内部一直到剩余部分不能够承受逐步增大的应力而断裂(剩余断裂)。一般情况下裂纹传播跟随裂缝尖端的范性形变并发展成高形变疲劳失效。对于脆性材料这种范性形变多数不存在,在这种情

况形成了低形变疲劳失效。上述任一情况宏观分析一般观察不到这种范性形变。

疲劳腐蚀的一种特殊形式是点蚀。点蚀出现于预先加应力的部件中（如轧辊轴承，齿轮等）。过大的赫兹压力加上切力导致在表面下面发生范性形变和微裂缝。微裂缝的传播便形成特征的细碎形貌。

腐蚀诱发的裂纹和断裂

产生沿晶腐蚀（晶界腐烂）的必要条件是材料在晶界区域的抗腐蚀力减弱。这一情况的出现是由于在这一区域能防止腐蚀的合金元素耗尽或在这个区域促进腐蚀的合金元素集中起来，或在晶界上析出对腐蚀敏感的组成。产生晶粒间界腐蚀不需要有张应力存在。如张应力起作用，则称为沿晶应力腐蚀开裂。

阳极应力腐蚀开裂指受张载荷或张内应力作用的材料在一定介质影响下的穿晶或沿晶开裂。在裂纹尖端一个受阳极控制的溶解过程促进了裂纹的传播。断裂的危险性随正电位的增加而增大。特定的材料与介质的组合，在一个临界电位范围内承受足够大的应力或临界的应变率能导致对阳极应力腐蚀敏感。

材料吸入足够量的氢，例如在熔化或焊接过程中与气氛（压缩氢气保护气氛）或与电解质（酸洗，电解浴）反应，能够发生氢诱发裂纹与断裂。由于氢以原子状态溶解于点阵中，再以分子形式在结构不均匀的地方析出，并迅速扩散，因而失效的形貌多种多样（如鱼眼，白点，起泡，迟后断裂等）。裂纹萌生的条件是张应力（或张内应力）与局部氢浓度的临界组合。氢诱发断口表面类似以穿晶或沿晶裂纹传播的脆性断口。