

失效分析基础知识

钟群鹏

(北京航空航天大学, 北京 100083)

1 基本概念

1.1 失效和失效分析

产品丧失规定的功能称为失效。

判断失效的模式, 查找失效原因和机理, 提出预防再失效的对策的技术活动和管理活动称为失效分析。

1.2 失效和事故

失效与事故是紧密相关的两个范畴, 事故强调的是后果, 即造成的损失和危害, 而失效强调的是机械产品本身的功能状态。失效和事故常常有一定的因果关系, 但两者没有必然的联系。

1.3 失效和可靠

失效是可靠的反义词。机电产品的可靠度 $R(t)$ 是指时间 t 内还能满足规定功能产品的比率, 即 $n(t)/n(0)$, $n(t)$ 为时间 t 内满足规定功能产品的数量, $n(0)$ 为产品试验总数量。累积失效概率 $F(t)$ 就是时间 t 内的不可靠度, 即 $F(t)=1-R(t)=[n(0)-n(t)]/n(0)$ 。

1.4 失效件和废品

失效件是指进入商品流通领域后发生故障的零件, 而废品则是指进入商品流通领域前发生质量问题的零件。废品分析采用的方法常与失效分析方法一致。

1.5 失效学

研究机电产品失效的诊断、预测和预防理论、技术和方法的交叉综合的分支学科。失效学与相关学科的边界还不够明确, 它是一个发展中的新兴学科。

2 失效的分类

2.1 按功能分类

由失效的定义可知, 失效的判据是看规定的功能是否丧失。因此, 失效的分类可以按功能进行分类。例如, 按不同材料的规定功能可以用各种材料缺陷(包括成分、性能、组织、表面完整性、品种、规格等方面)来划分材料失效的类型。对机械产品可按照其相应规定功能来分类。

2.2 按材料损伤机理分类

根据机械失效过程中材料发生变化的物理、化学的本质机理不同和过程特征差异, 可以分类如图 1 所示。

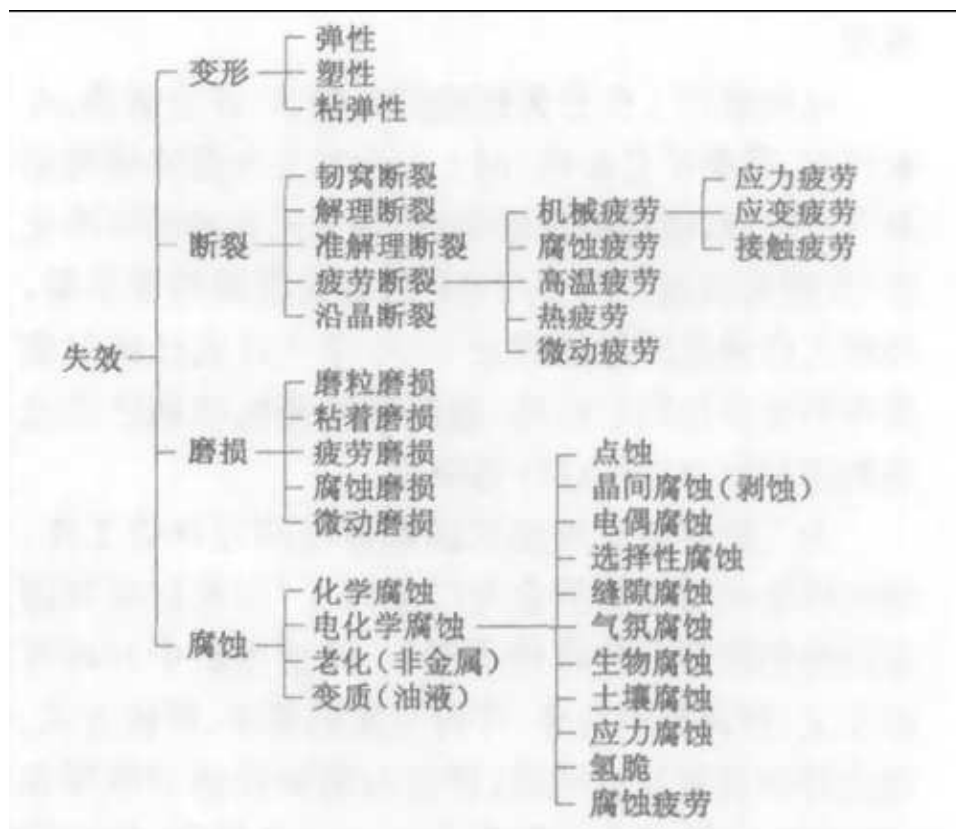


图 1 失效的分类

2.3 按机械失效的时间特征分类

- (1) 早期失效 可分为偶然早期失效和耗损期失效。
- (2) 突发失效 可分为渐进(渐变)失效和间歇失效。

2.4 按机械失效的后果分类

- (1) 部分失效
- (2) 完全失效
- (3) 轻度失效
- (4) 危险性(严重)失效
- (5) 灾难性(致命)失效

3 失效分析的分类

失效分析的分类一般按分析的目的不同可分为：

- (1) 狭义的失效分析 主要目的在于找出引起产品失效的直接原因。
- (2) 广义的失效分析 不仅要找出引起产品失效的直接原因,而且要找出技术管理方面的薄弱环节。
- (3) 新品研制阶段的失效分析 对失效的研制品进行失效分析。
- (4) 产品试用阶段的失效分析 对失效的试用品进行失效分析。
- (5) 定型产品使用阶段的失效分析 对失效的定型产品进行失效分析。

(6) 修理品使用阶段的失效分析 对失效的修理品进行失效分析。

4 失效分析预测预防的地位与作用

从人类认识客观世界的历史长河来说, 人的认识是有限的, 而客观时间是无限的。失效是人们的主观认识与客观事物相互脱离的结果, 失效发生与否是不为人们的主观意志为转移的, 因此, 失效是绝对的, 而安全则是相对的。失效分析是人们认识客观物理本质和规律的逆向思维探索, 是对正向思维研究的不可缺少的重要补充, 是变失效(失败)为安全(成功)的基本关键, 是人们深化客观事物认识的知识源泉。失效分析、改进提高、再失效分析研究、再提高发展, 如此往复循环、螺旋上升、发展飞跃, 就是人类科学技术发展的历史, 乃至社会历史的全过程。因此, 广义地说, 人类的科学技术发展史、社会发展史就是与广义失效不断作斗争, 变失效(失败)为安全(成功)的历史。

当今, 科学技术是第一生产力, 高科技的发展已成为国民经济和国防科技发展的主要关键和依托, 而高科技发展也依赖于高科技发展中的失效分析预测和预防, 因此, 高科技的发展更需要失效分析预测预防技术的进一步强化, 并将失效分析预测预防列为高科技的发展领域之内。具体来说有以下几点:

(1) 失效分析可以减少和预防机械产品同类失效事故的重复发生, 从而提高机械产品质量和减少经济损失, 它是创建名牌机械产品的必由之路和科学途径。

(2) 失效是产品质量控制网发生偏差的反映, 失效分析是可靠性工程必不可少的基础技术工作, 加强机械产品失效及其分析工作的管理必将强化全面质量管理工作, 因此它是机械产品全面质量管理中的重要组成部分和关键的技术环节。

(3) 失效分析是机械产品维修工作的技术基础, 它可以决定维修的可能性、技术和方法, 从而提高维修工作的质量、速度和效益。

(4) 失效分析可以为仲裁失效事故的责任、侦破犯罪案件、开展技术保险业务、修改和制定产品质量标准等方面提供可靠的科学技术依据, 它是经济立法工作中重要程序和基础技术工作, 从而可提高经济法的完整性、科学性和可观权威性。

(5) 失效分析是技术开发、技术改造、技术进步乃至整个科学技术水平的提高等方面的“开拓者”和“杠杆”, 它提供信息、方向、途径和方法, 从而提高国民经济发展和科学技术发展的速度。

(6) 机械产品失效及其分析工作的累积统计资料可以提供技术信息、经济信息和人才信息, 它可以反映经济工作、科学研究和人才培养方面的薄弱环节和失误或失调, 因此它是领导者们进行宏观经济和技术决策重要的信息来源, 它也是科学技术人员认识事物和改造事物的信息源泉。

总之, 失效分析预测预防是从失败入手着眼于成功和发展, 是从过去入手着眼于未来和进步的科学技术领域, 并且正向失效学这一分支学科方向发展。重视这一分支学科的发展, 有意识地运用它已有的成就来分析、解决和攻克相关领域中的失效(失败、故障)问题, 是人们走上成功, 科技发展少走弯路的捷径之一。

5 失效分析预测预防与相关学科、技术之间的关系

由于机械失效学是一门交叉、边缘、综合的新兴学科, 因此, 它与多种学科和技术有关。基础学科与机械失效学相结合, 形成不少边缘学科, 例如, 机械失效学与物理学交叉诞生了失效物理学; 与力学的交叉形成了失效力学和损伤力学; 数学与机械失效学相结合, 促成了可靠性数学的问世。

机械失效学与许多应用学科、技术有密切的联系。“机械”是失效分析的对象,因此失效分析与机械学的专门知识有关;“材料”是失效的载体,这样失效分析就自然地涉及材料科学和工程领域的各种知识“环境;是失效发生的条件,所以失效分析就与环境科学知识有关“检测;是失效分析中信息的获取的重要途径和手段,显然失效分析就离不开宏观和微观的检测有关的知识“;分析”是失效分析的核心,因此失效分析必将涉及逻辑学和数理统计有关的专门知识;此外,失效分析不仅是一种“技术活动”,而且还是一种“管理活动”,因此,失效分析过程和它的成果反馈,又与管理科学的专门知识有关。

可以认为,机械失效学是在其他学科基础上,在 20 世纪 70 年代形成和发展起来的新的应用性学科,它的发展又对其他学科有反馈促进作用。可以这样说,近代材料科学和工程力学对断裂、腐蚀、磨损及其复合型的失效模式和失效机理研究,为失效学奠定了理论基础。现代的检测仪器仪表学、断口分析术,为失效学奠定了技术基础。数量统计、模糊数学、可靠性工程和电子计算机科学的广泛应用为失效学提供了新的方法途径,以上三个方面的融合贯通,使机械失效学逐渐形成相对独立的、十分活跃的学科。

6 失效分析预测预防的技术工作

广义地说,失效分析的工作内容应包括失效分析的业务工作(即“门诊”工作)、失效分析的研究工作和失效分析的管理及技术反馈工作。下面就分别给予扼要地讨论。

6.1 失效分析的预测预防的业务工作

总的来说,失效分析的业务工作有两个方面,一方面是产品的失效分析,另一方面是产品的安全度评定和剩余寿命的预测。前者是失效事后的分析,而后者是失效事前的分析。

根据失效分析的定义,一个失效事件分析的全过程一般包括侦测(detection)、诊断(diagnosis)和事后处理(prognosis)三个阶段。即利用各种“侦测”手段,调查、侦查、测试和记录有关失效的现场、参数和信息;通过“诊断”鉴别和确定产品失效的模式、过程、原因、影响因素和机理;经过“事后处理”采取补救措施(对服役件)、预防措施(对新生产的产品)和其它技术的、管理的反馈活动,以达到预防、提高和开发的目的。侦测、诊断和事后处理是失效分析工作的三个要素。

产品失效分析的重点无疑是分析产品的早期失效事件、突发性失效事件以及致使的失效事件,因为这些失效事件的分析事关重大或关系到全局。

失效分析的深度应依其分析的目的和要求不同而异。失效分析工作者的任务是根据失效分析的不同目的和要求,作出确切而恰当的诊断及对策。按照产品发展的阶段—试制阶段、试生产阶段和定型生产阶段不同,其失效分析的内容也各不相同。

6.2 失效分析预测预防的研究工作

失效分析的研究工作主要是指失效分析物理的研究、失效机理的研究、失效诊断的研究和失效预防工程技术的研究等四个方面的工作。下面分别给予简要的介绍。

(1)失效诊断的研究工作 失效诊断是分析失效原因的思维学和方法论。具体的说,失效的诊断研究一般应包括失效诊断依据的研究、失效诊断思路的研究和失效诊断技术与方法的研究等三个方面。

(2)失效预防的研究工作 失效预防的研究工作是为了探讨失效的补救措施、预防方法和管理途径。失效分析成果的反馈和失效预防,以防止同类失效事故的重复发生是失效分析的重要目的之一。

失效预防的研究工作范围很广,它应包括机械系统或设备的性能参数的分析和诊断技术工况的监测方法、技术、装置和系统的开发和采用,产品的安全度评定和剩余寿命的估算,失效预防工程方法(包括表面损伤的预防方法,断裂失效临界状态的评定和预测方法—失效评定图、断裂控制图、变形机制图、蠕变机制图和疲劳机制图等)的研究开发和应用推广,关于机械产品失效维修的原则、原理、技术、方法及其应用方面的研究等。可以看出失效预防方法的研究工作是艰巨的、十分重要的却大有可为的。

(3)失效机理的研究工作 失效机理是研究失效的物理、化学原因、失效过程及其影响因素等。如果认为失效物理的研究内容主要是失效模式(模型)及其应用的话,那么失效机理的研究则主要集中在失效的本质(物理、化学原因)和过程。失效机理和失效模式不同,以人的生病来打比喻,失效机理相当于病理,而失效模式则相当于病症。具体地说,失效机理主要研究各种失效方式,研究材料成分、组织结构和性能等内部因素对失效过程的影响。

(4)失效物理的研究工作 所谓失效物理(或称为可靠性物理)就是从原理上,即从原子和分子的角度出发,来解释元件、材料失效的现象。失效物理学的基础是数理统计方法、可靠性工程和材料科学工程学。失效物理的基本研究内容则是失效的物理模型定性及定量的描述方法、失效物理模式的识别及其应用。无疑,对失效物理的深入研究和广泛应用,必将加强失效分析的广度和深度。

6.3 失效分析预测预防的管理和技术的反馈工作

失效分析的管理和技术反馈应该包括全国性、部门性、地区性的失效分析和管理机构的建立;失效分析的技术指导性文件、规程和标准的颁布实行;失效事件的分析工作的组织和管理;失效研究工作的组织和开展;失效及可靠数据库和技术反馈系统的建立和运转;各级失效分析人员的培训和提高等。

值得指出的是,从失效分析的定义中就已经把“管理活动”当作失效分析不可缺少的内容和环节之一,从以上的讨论中可进一步地看出,失效分析的管理和技术反馈内容和范围十分广泛和重要,因此,应给予足够重视。

7 失效分析人员的基本要求

由于失效分析重要性、复杂性和特殊性,失效分析人员除要有扎实宽广的基础理论外,还应在实践中逐步培养,并应具备以下基本素质:

- (1)彻底的求实精神,在任何情况下都要坚持实事求是,要用事实来说话,勇于坚持真理,修正错误。
- (2)敏锐的观察力和熟练的分析技术,善于利用一切手段(包括先进的仪器、设备)捕捉失效的信息和证据。
- (3)正确的失效分析思路和良好的失效模式、失效原因判断能力,要有“医生的思路,侦探的技巧”。
- (4)善于学习,向书本学习,向实践学习,向同行学习,向一切可能共事的人们学习。
- (5)要有扎实的专业基础知识和较广的知识面,工作能力要强,办事效率要高。

失效分析的任务、方法及其展望

李鹤林

(中国石油天然气集团公司管材研究所, 西安 710065)

摘要:概述了失效与失效分析的概念, 以及失效分析的意义、作用和任务; 以防止失效为出发点, 论述了失效分析的工作思路、程序和辩证方法; 展望了失效分析的未来。

关键词: 失效分析; 失效分析反馈; 失效预测预防

美国《金属手册》认为, 机械产品的零件或部件处于下列三种状态之一时, 就可定义为失效: ①当它完全不能工作时; ②仍然可以工作, 但已不能令人满意地实现预期的功能时; ③受到严重损伤不能可靠而安全地继续使用, 必须立即从产品或装备拆下来进行修理或更换时。

机械产品及零部件常见的失效类型包括变形失效、损伤失效和断裂失效三大类。

机械产品及零部件的失效是一个由损伤(裂纹)萌生、扩展(积累)直至破坏的发展过程。不同失效类型其发展过程不同, 过程的各个阶段发展速度也不相同。例如疲劳断裂过程一般较长, 发展速度较慢, 而解理断裂失效过程则很短, 速度很快, 等等。

机械产品及零部件在整个使用寿命期内失效发生的规律可用“寿命特性曲线”来说明, 即用失效率(λ)——单位时间内发生失效的比率来描述失效的发展过程。那么在不进行预防性维修的情况下, 失效率(λ)与其工作时间(t)之间具有图 1 所示的典型失效曲线, 俗称“浴盆曲线”。按照“浴盆曲线”的形状, 即按照机械产品使用的过程, 可将失效分为三类。

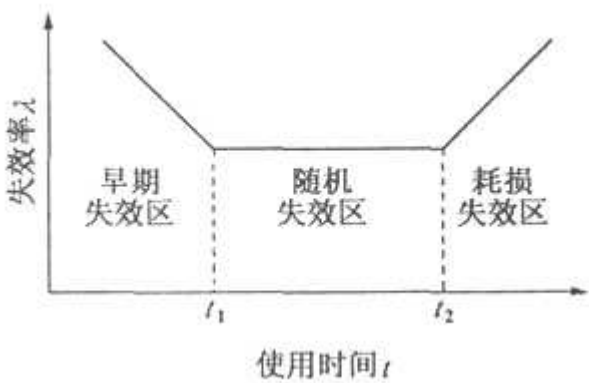


图 1 失效率浴盆曲线

(1) 早期失效 是在使用初期, 由于设计和制造上的缺陷而诱发的失效。因为使用初期, 容易暴露上述缺陷而导致失效, 因此失效率往往较高, 但随着使用时间的延长, 其失效率则很快下降。假若在产品出厂前即进行旨在剔除这类缺陷的过程, 则在产品正式使用时, 便可使失效率大体保持恒定值。

(2)随机失效 在理想的情况下,产品或装备发生损伤或老化之前,应是无“失效”的。但是由于环境的偶然变化、操作时的人为差错或者由于管理不善,仍可能产生随机失效或称偶然失效。偶然失效率是随机分布的,其很低而且基本上是恒定的。这一时期是产品最佳工作时间。偶然失效率(λ)的倒数即为失效的平均时间。

(3)耗损失效 又称损伤累积失效。经过随机失效期后,产品中的零部件已到了寿命后期,于是失效开始急剧增加,这种失效叫做耗损失效或损伤累积失效。如果在进入耗损失效期之前进行必要的预防维修,它的失效率仍可保持在随机失效率附近,从而延长产品的随机失效期。

1 失效分析的意义与任务

1.1 失效分析及其意义

按一定的思路和方法判断失效性质、分析失效原因、研究失效事故处理方法和预防措施的技术活动及管理活动,统称失效分析。

失效分析预测预防是使失败转化为成功的科学,是产品或装备安全可靠运行的保证,是提高产品质量的重要途径,是科学技术进步的强有力杠杆,是许多重大法律、法规及技术标准制定的依据。它着眼于整个失效的系统工程分析。其意义和作用在于:

(1)失效分析可减少和预防产品或装备同类失效现象重复发生,从而减少经济损失或提高产品质量。

(2)失效是产品质量控制网发生偏差的反映,失效分析是可靠性工程的重要基础技术工作,是产品全面质量管理中的重要组成部分和关键技术环节。

(3)失效分析可为技术开发、技术改造、科学技术进步提供信息、方向、途径和方法。

(4)失效分析可为裁决事故责任、侦破犯罪案例、开展技术保险业务、修改和制订产品质量标准等提供可靠的科学技术依据。

(5)失效分析可为各级领导进行宏观经济和技术决策提供重要的科学的信息来源。

1.2 失效分析的任务

失效分析预测预防的总任务就是不断降低产品或装备的失效率,提高可靠性,防止重大失效事故的发生,促进经济高速持续发展。从系统工程的观点来看,失效分析的具体任务可归纳为:①失效性质的判断;②失效原因的分析;③采取措施,提高材料或产品的失效抗力。

近代材料科学和工程力学对破断、腐蚀、磨损及其复合型(或混合型)的失效类型和失效机理做了相当深入的研究,积累了大量的统计资料,为失效类型的判断、失效机理及失效原因的解释奠定了基础。发展中的可靠性工程及完整性与适用性评价是预测、预防和控制失效的技术工作和管理工作的基础。可靠性工程是运用系统工程的思想和方法,权衡经济利弊,研究将设备(系统)的失效率降到可接受程度的措施。完整性和适用性评价则是研究结构或构件中原有缺欠和使用中新产生的或扩展缺陷对可靠性的影响,判断结构的完整性及是否适合于继续使用,或是按预测的剩余寿命监控使用,或是降级使用,或是返修或报废的定量评价。

产品或装备失效分析的目的不仅在于失效性质的判断和失效原因的明确,而更重要的还在于为积极预防重复失效找到有效的途径。通过失效分析,找到造成产品或装备失效的真正原因,从而建立结构设计、材料选择与使用、加工制造、装配调整、使用与保养方面主要的失效抗力指标与措施,特别是确定这种失效抗力指标随材料成分、组织和状态变化的规律,运用金属学、材料强度学、工程力学等方面的研究成果,提出增强失效抗力的改进措施。既能得到提高产品或装备承载能力和使用寿命,又可做到充分发挥产品或装备的使用潜力,使材尽其用,这是产品或装备失效分析、预测预防研究的重要目的与内容。

2 失效分析的思路及程序

2.1 防止失效的思路

图 2 是防止机械装备零件失效事故的基本思路。可见,失效分析在防止失效中占有很重要的地位。

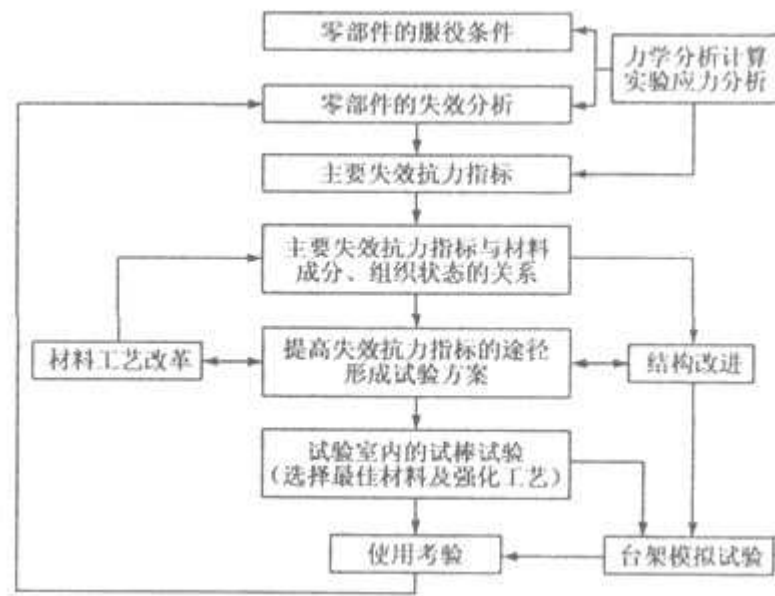


图 2 防止失效的基本思路

失效分析及失效的防止好比医生治病,正确的诊断、配合对症下药才能将病治好,这是紧密联系的两个方面。其基本思路是:

- (1) 对具体服役条件下的零部件进行具体分析,从中找出主要的失效形式及主要失效抗力指标。
- (2) 运用金属学、材料强度学和断裂物理、化学、力学的研究成果,深入分析各种失效现象的本质,以主要失效抗力指标与材料成分、组织、状态的关系,提出改进措施。
- (3) 根据“不同服役条件要求材料强度和塑性、韧性的合理配合”这一规律,分析研究失效零部件现行的选材、用材技术条件是否合理,是否受旧的传统学术观念束缚。在失效分析中常遇到一些“合法而不合理”的技术条件规定,如果把它当成金科玉律,则会犯分析上的错误,对防止零部件失效不利。
- (4) 采用局部复合强化,克服零部件上的薄弱环节,争取达到材料的等强度设计。
- (5) 在进行失效分析和提出防止失效的措施时,还应做到几个结合:
 - ① 设计、材料、工艺相结合,即对形状、尺寸、材料、成型加工和强化工艺统一考虑;

- ②结构强度(力学计算、实验应力分析)与材料强度相结合,试棒试验与实际零部件台架模拟试验相结合;
- ③宏观规律与微观机理相结合,宏观断口和微观断口分析相结合,宏观与显微、亚显微组织分析相结合;
- ④试验室规律性试验研究与生产试验相结合。

2.2 失效分析的程序

进行失效分析,对于具体零部件要具体对待,不能企求有统一的方法。图3是一般失效分析程序。在整个失效分析过程中,应重点抓住以下几个环节:

(1)收集失效件的背景数据 除了解失效零部件在机器中的部位和作用、材料牌号、处理状态等基本情况外,应着重收集下面两方面的资料:

①失效件全部制造工艺历史。从取得有关图纸和技术标准开始,了解冶炼、铸造、压力加工、切削加工、热处理、化学热处理、抛光、磨削、各种表面强化和表面处理及装配、润滑情况;

②失效件的服役条件及服役历史。除了解载荷性质、加载次序、应力状态、环境介质、工作温度外,应特别注意环境细节和异常工况,如突发超载、温度变化、温度梯度和偶然与腐蚀介质的接触等。

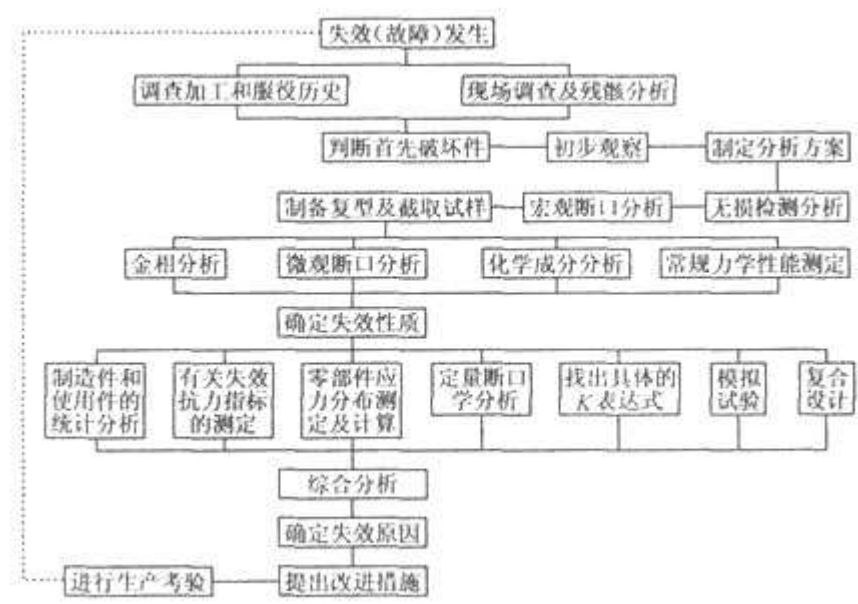


图3 失效分析程序图

(2)失效零部件及全部碎片的外观检查 在进行任何清洗之前都应经过彻底的外观检查,用摄影等方法详细做好记录。重点检查内容为:

- ①观察整个零部件的变形情况,看是否有翘粗、下陷、内孔扩大、弯曲、颈缩等;
- ②观察零部件表面冷热加工质量,如有无过烧、折叠、斑疤等热加工缺陷,有无刀痕、刮伤等机加工缺陷,有无冷热加工造成的裂纹;
- ③观察断裂部位是否在键槽、油孔、尖角、加工深刀痕、凹坑等应力集中处;
- ④观察零部件表面有无氧化、腐蚀、气蚀、咬蚀、磨损、龟裂、麻点或其它损伤;

⑤观察相邻零部件或配偶件的情况；

⑥观察零部件表面有无附着物。

(3) 试验室检验 在检验前, 对试验项目和顺序、取样部位、取样方法、试样数量等均应全面、周密地考虑。一般采用的分析手段有下列各项:

①化学分析 目的是鉴定零部件用材料是否符合原定要求, 有无用错材料或成分出格, 必要时可分析微量元素或进行微区成分分析。当表面有腐蚀产物时, 也应分析腐蚀产物成分;

②宏观(低倍)分析 主要用于检查原材料或零部件质量, 揭示各种宏观缺陷;

③断口分析 对于断裂失效零部件, 断口分析是最重要的一环。断口形貌真实地反映了断裂过程中材料抵抗外力的能力, 记录了对材料断裂起决定作用的主裂缝所留下的痕迹。通过对断口形貌特征的分析, 不仅可以得到有关零部件使用条件和失效特点的资料, 还可以了解断口附近材料的性质和状况, 进而可以判明断裂源、裂纹扩展方向和断裂顺序, 确定断裂的性质, 从而找出断裂的主要原因。断口分析先用肉眼或低倍实体显微镜和立体显微镜从各个角度来观察断口表面的纹理和特征, 然后用电子显微镜(特别是扫描电镜)对有代表性的部位进行深入观察, 以了解断口的微观特征;

④微观组织分析 即用金相显微镜、电子显微镜鉴定失效分析的显微组织, 观察非金属夹杂物, 分析组织对性能的影响, 检查铸、锻、焊和热处理等工艺是否恰当, 从而由材料的内在因素分析导致失效的原因;

⑤力学性能试验 在必要时可以进行某些项目的力学性能试验, 包括断裂韧性试验, 以校验该零部件的实际性能是否符合技术要求;

⑥其它检测项目 如用 X 射线衍射仪进行定性(如 σ 相)或定量(如残余奥氏体含量)分析, 对受力复杂的零部件进行实验应力分析等等。

(4) 判定失效原因 进行上述环节后, 把所得的资料进行综合分析, 搞清失效的过程和规律, 这是失效分析的重要环节。断裂失效原因的分析过程见图 4。一般要从影响零部件失效的结构设计因素、材料因素、工艺因素、装配因素和服役条件因素中进行全面分析, 真正找到导致该零部件早期失效的主导因素。重大的失效分析项目, 在初步确定失效原因后, 还应及时进行重现性试验(模拟试验), 以验证初步结论的可靠性。

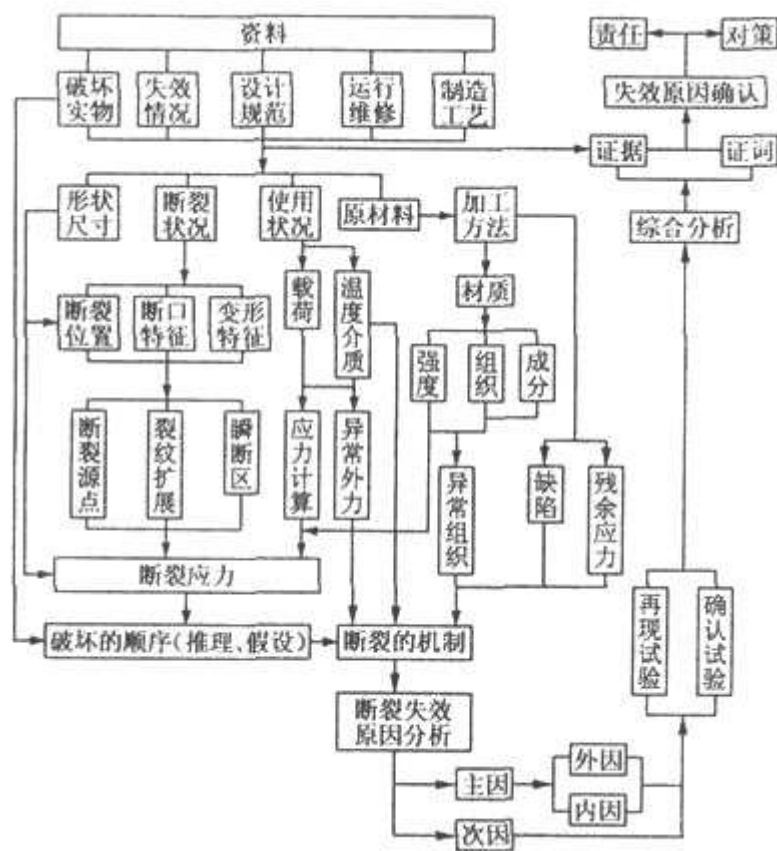


图4 断裂失效原因分析思路

(5) 失效分析的反馈 积极的失效分析,其目的不仅在于失效性质和原因的分析判断,更重要的是反馈到生产实践中去。

由于失效原因涉及到结构设计、材料设计、加工制造及装配使用、维护保养等各个方面,失效分析结果也要相应地反馈到这些环节。在一般情况下,失效分析反馈可按图5所示的基本思路进行,即从失效分析的结论中获得反馈信息,据以确定提高失效抗力的途径(形成反馈试验方案),并通过试验选择出最佳改进措施。反馈的结果可能是改进设计结构、材料、工艺、现场操作规程,也可能是综合改进。

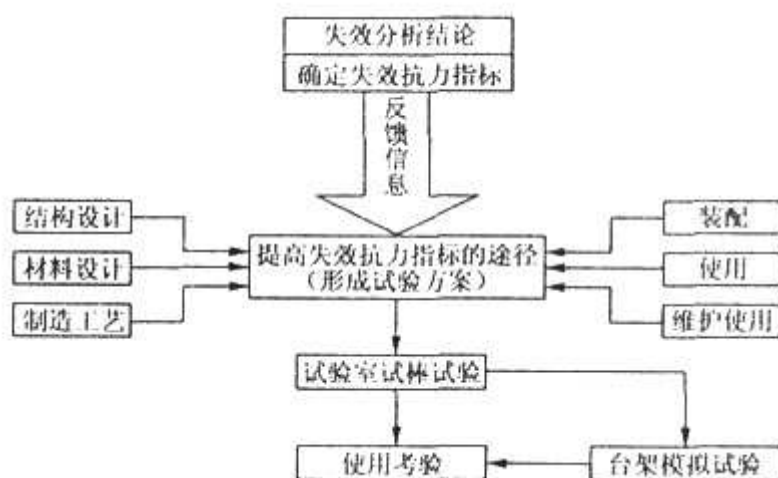


图5 失效分析反馈的思路

对于机械产品或零部件的设计制造单位,应着重于在结构设计、材料选择和制造工艺方面的反馈,特别是结构、材料、工艺上的综合反馈,因为这三者往往很难截然分开。例如在考虑结构因素对零部件强度的影响时,一般要联系到材料因素和工艺因素;同样,在考虑材料强度的影响时,亦必须考虑零部件的结构设计,主要是应力集中对材料强度的影响。在某些情况下,通过改进零部件的形状、尺寸来提高其失效抗力较之改进材料和工艺更为有效。而当设计结构的改进受到限制时,零部件的应力水平、应力分布和应力状态又要求制造零部件的材料和工艺与之相适应(例如几何形状复杂、应力状态较硬的零部件,要求材料有足够的塑韧性;带有尖锐缺口的零部件,要求材料有较低的缺口敏感度等等)。由此可见,在提高零部件的失效抗力时,零部件的结构设计与材料、工艺是相互渗透,相互依赖的。

2.3 失效分析的辩证方法

2.3.1 对具体问题进行分析

- (1)不同零部件的外在服役条件是不同的。不同的服役条件,有不同的失效类型及特征;
- (2)同一材料状态,在不同服役条件下也表现为不同的失效类型及特征;
- (3)在不同服役条件下,为了达到失效抗力的优化,有不同的材料强度、塑性、韧性的合理配合,即有不同的材料成分、组织、状态的最佳搭配;
- (4)即使在相同的服役条件下,由于零部件结构及装配不同,零部件的受力情况不同,这种最佳搭配也将随之变化。

2.3.2 抓主要矛盾和矛盾的主要方面

- (1)某一零部件存在两个以上的失效类型时,应分析和找出主要的失效类型及其主要的失效抗力的表征参量,例如,同时存在断裂及磨损时,前者是“急性病”,后者一般为“慢性病”,因此应首先抓断裂失效的分析及防止。
- (2)抓造成主要失效类型的原因综合分析,从造成失效的内因与外因中找出主导因素,即矛盾的主要方面。

2.3.3 注意矛盾的转化

- (1)当主要的失效类型解决后,可能原来次要的失效类型上升为影响零部件寿命的主要矛盾,或者出现新的失效类型;
- (2)当对某一零部件进行结构或工艺改进后,该零部件容易失效的薄弱环节转移,对此要有预见。

3 失效分析工作展望

3.1 加速失效学体系的形成和发展

在中国机械工程学会失效分析学会的组织下,我国机电装备失效分析预测预防实践和学术方面的重大进展之一,是促进和带动了一门交叉综合分支新兴学科——失效学体系的形成和发展,从而使失效分析完成了从一门技术门类逐渐提高到一个分支学科的飞跃。这是当代科学技术发展的结果,是我国几代失效分析工作者毕生为之奋斗的目标,它将对我国机电装备失效分析预防工作产生深远的影响和作用。

失效学是研究机电装备(系统、设备和元器件)的失效分析诊断(简称失效诊断)、失效预测和失效预防的理论、技术和方法及其工程应用的分支学科。它的产生是有其近代科学技术进步的深刻背景的。可以认为,近代材料科学和工程、工程力学、断裂力学等学科对断裂、腐蚀、磨损及其复合型(或混合型)的失效模式和失效机理的深入研究,积累了相当丰富的创新观点、见解和物理模型,为失效学的建立奠定了理论基础;现代的检测仪器、仪表科学的迅猛发展,以及检测技术的不断提高,特别是

断口、裂纹、痕迹分析技术体系的建立、发展和完善,为失效学的发展奠定了技术基础;数理统计学科的完善、模糊数学的突起、可靠性工程的发展应用和电子计算机的广泛普及,为失效学的完善奠定了方法基础。上述三者的融会贯通,使失效学逐渐建立、发展和完善成为一门相对独立的、综合的新兴学科成为可能。虽然关于失效学的“基本内容”、“内涵和外延”的雏形早在 1985 年已有人提出,但是就其体系的系统性和完整性,就其内容的深度和广度而言,近年来又有了很大的发展。

失效诊断是失效分析的主要任务之一。失效诊断的理论、技术和方法的核心是思维学、推理法则和方法论。

3.2 失效分析与预测预防一体化

近年来,国内外失效分析逐渐与适用性评价、可靠性评估、概率断裂力学、工况监测故障诊断技术、计算机技术及管理科学相结合,将失效事故的分析、预测、预防形成一个系统工程,产生了巨大的经济效益,如图 6 所示。失效预防处于核心部位,失效预防方案的实施(包括五个主要环节),必须通过具体工程应用专题,组织有关的设计、制造、运行、管理等部门形成有效的反馈系统,最后才能达到实现研究总目标的目的。失效预防方案的形成要依靠失效分析与失效预测两方面的研究成果。失效模式、失效机理、失效抗力指标的研究、失效案例库(失效数据库)的建立、计算机辅助失效分析系统的开发等项课题的研究,彼此是紧密联系的,最终目的是促进失效分析水平的提高。属于失效预测方面的研究课题主要有适用性评价规范、可靠性评价技术、概率断裂力学评价方法的研究及工况监测与故障诊断技术开发。这些课题都是当前国际上研究的热点。

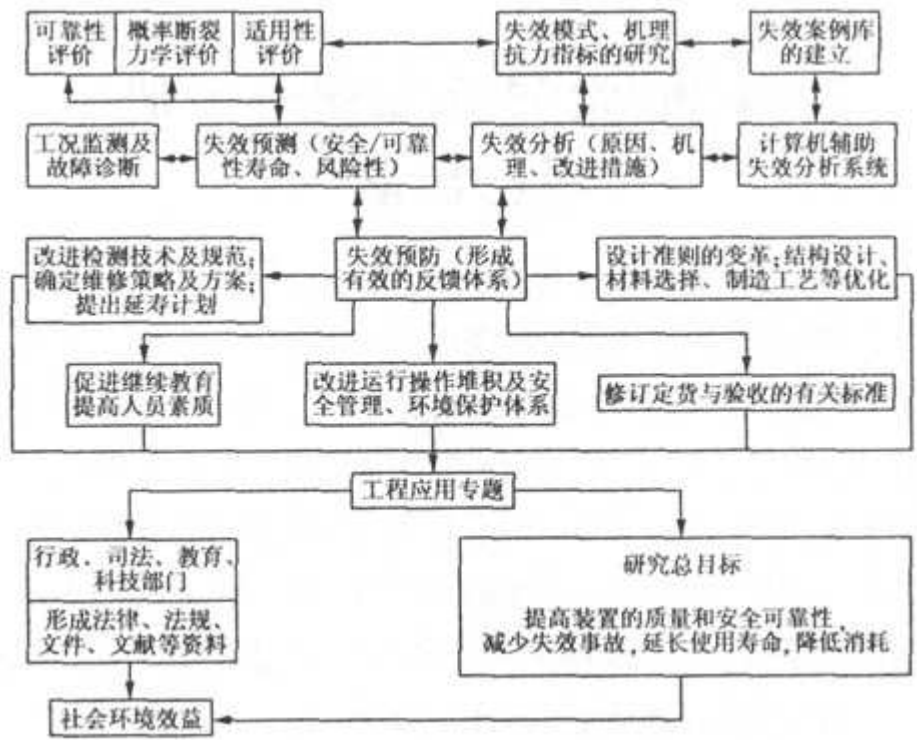


图 6 失效分析与预测预防的相关性

3.3 建立健全失效分析网及案例库

单个事故的失效分析往往具有偶然性。通过对同一类装备(或零部件)的大量事故的统计分析才能得出规律性的结论,用以有效地提高设计、制造、运行和决策、管理水平。行之有效的措施是建立失效分析网和失效案例库。

3.3.1 失效分析网

为了掌握全国各油田的钻柱失效情况, 进一步提高钻具失效分析的水平、速度和准确性, 1988 年石油工业部下文筹建钻柱失效分析网, 1991 年建成, 常设机构(秘书处)为石油管材研究所失效分析与预测预防研究室, 各油田设立网点, 并进一步通过钻井公司、管子工具公司、工程技术大队等网点成员单位, 最后延伸至井队, 形成了钻柱失效分析与预防的闭环系统。钻具失效分析网的建立属国内外首创, 它为失效事故的及时收集、预测预防措施迅速反馈提供了组织保证。失效分析网建立以来取得了重大成果。从 1990-2003 年共收集了失效案例 3000 多起。通过失效分析和反馈使钻具失效事故率大大降低, 取得了巨大经济效益。

截止目前, 失效分析网仅限于石油工业的上游。借鉴上游失效分析网取得的经验, 成立炼油化工设备失效分析网是很有必要的。通过炼化设备失效事故的积累和统计分析, 必将大大提高炼化设备的失效分析水平和准确性, 减少炼化设备失效事故, 取得巨大的经济效益和社会效益。石油行业建立失效分析网的经验值得其他行业借鉴。

3.3.2 失效案例库

通过失效分析网收集的大量失效案例, 需要快速、准确、科学地加以处理。因此, 必须利用现代科技的最新手段——计算机的快速计算的功能。石油管材研究所使用 Turbo2Prolog (T2P) 语言建立了钻柱失效案例库和综合分析库, 通过综合运用金属学、失效分析及人工智能技术, 把国内、外先进的钻柱失效分析知识集中起来, 使既能从大量案例进行综合分析, 又能从个别案例的计算机辅助分析中找到失效原因, 从而大大提高失效分析的水平, 减少了钻井事故, 促进了钻柱国产化。

失效分析思路

张 峰

(北京航空航天大学材料学院, 北京 100083)

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。

1 失效分析思路的内涵

世界上任何事物都是可以认识的, 没有不可以认识的东西, 只存在尚未能够认识的东西, 机械失效也不例外。实际上失效总有一个或长或短的变化发展过程, 机械的失效过程实质上是材料的累积损伤过程, 即材料发生物理的和化学的变化。而整个过程的演变是有条件的、有规律的, 也就是说有原因的。因此, 机械失效的客观规律性是整个失效分析的理论基础, 也是失效分析思路的理论依据。

失效分析思路是指导失效分析全过程的思维路线,是在思想中以机械失效的规律(即宏观表象特征和微观过程机理)为理论依据,把通过调查、观察和实验获得的失效信息(失效对象、失效现象、失效环境统称为失效信息)分别加以考察,然后有机结合起来作为一个统一整体综合考察,以获取的客观事实为证据,全面应用推理的方法,来判断失效事件的失效模式,并推断失效原因。因此,失效分析思路在整个失效分析过程中一脉相承、前后呼应,自成思考体系,把失效分析的指导思想、推理方法、程序、步骤、技巧有机地融为一体,从而达到失效分析的根本目的。

在科学的分析思路指导下,才能制定出正确的分析程序;机械的失效往往是多种原因造成的,即一果多因,常常需要正确的失效分析思路的指导;对于复杂的机械失效,涉及面广,任务艰巨,更需要正确的失效分析思路,以最小代价来获取较科学合理的分析结论。总之,掌握并运用正确的分析思路,才可能对失效事件有本质的认识,减少失效分析工作中的盲目性、片面性和主观随意性,大大提高工作的效率和质量。因此,失效分析思路不仅是失效分析学科的重要组成部分,而且是失效分析的灵魂。

失效分析是从结果求原因的逆向认识失效本质的过程,结果和原因具有双重性,因此,失效分析可以从原因入手,也可以从结果入手,也可以从失效的某个过程入手,如“顺藤摸瓜”,即以失效过程中间状态的现象为原因,推断过程进一步发展的结果,直至过程的终点结果;“顺藤找根”,即以失效过程中间状态的现象为结果,推断该过程退一步的原因,直至过程起始状态的直接原因;“顺瓜摸藤”,即从过程中的终点结果出发,不断由过程的结果推断其原因“顺;根摸藤”,即从过程起始状态的原因出发,不断由过程的原因推断其结果。再如“顺瓜摸藤+顺藤找根”、“顺根摸藤+顺藤摸瓜”、“顺藤摸瓜+顺藤找根”等。

2 失效分析的主要思路

常用的失效分析思路很多,笔者介绍几种主要思路。

2.1 “撒大网”逐个因素排除的思路

一桩失效事件不论是属于大事故还是小故障,其原因总是包括操作人员、机械设备系统、材料、制造工艺、环境和管理6个方面。根据失效现场的调查和对背景资料(规划、设计、制造说明书和蓝图)的了解,可以初步确定失效原因与其中一、两个方面有密切的关系,甚至只与一个方面的原因有关。这就是5M1E(Man(人)、Machine(机器设备)、Material(材料)、Method(工艺制作方法)、Management(管理)、Environment(环境条件))的失效分析思路。

如果失效已确定纯属机械问题,则以设备制造全过程为一系统进行分析,即对机械经历的规划、设计、选材、机械加工、热处理、二次精加工、装配、调试等制作工序逐个进行分析,逐个因素排除。加工缺陷、铸造缺陷、焊接缺陷、热处理不当、再加工缺陷、装配检验中的问题、使用和维护不当、环境损伤等11个方面,含有可能引起机械失效的121个主要因素。

上述“撒大网”逐个因素排除的思路,面面俱到,它怀疑一切,不放过任何一个可疑点。“撒大网”思路是早期安全工作中惯用的事故检查思路,一般不宜采用“撒大网”的办法,当找不到任何确切线索时,这种方法是一种比较好的办法。

2.2 残骸分析法

残骸分析法是从物理、化学的角度对失效零件进行分析的方法。如果认为零件的失效是由于零件广义的“失效抗力”小于广义的“应力”的缘故,而“应力”则与零件的服役条件有关,因此,失效残骸分析法总是以服役条件、断口特征和失效的抗力指标为线索的。

零件的服役条件大致可以划分为静载荷、动载荷和环境“载荷”。以服役条件为线索就是要找到零件的服役条件与失效模式和失效原因之间的内在联系。但是,实践表明,同一服役条件下,可能产生不同的失效模式;同样,同一种失效模式,也可能在不同的服役条件下产生,因此,以服役条件为线索进行失效残骸的失效分析,只是一种初步的“入门”方法,它只能起到缩小分析范围的作用。

断口是断裂失效分析重要的证据,它是残骸分析中断裂信息的重要来源之一。但是在一般情况下,断口分析必须辅以残骸失效抗力的分析,才能对断裂的原因下确切的结论。

以失效抗力指标为线索的失效分析思路,如图1所示,关键是在搞清楚零件服役条件的基础上,通过残骸的断口分析和其它理化分析,找到造成失效的主要失效抗力指标,并进一步研究这一主要失效抗力指标与材料成分、组织和状态的关系。通过材料工艺变革,提高这一主要的失效抗力指标,最后进行机械的台架模拟试验或直接进行使用考验,达到预防失效的目的。

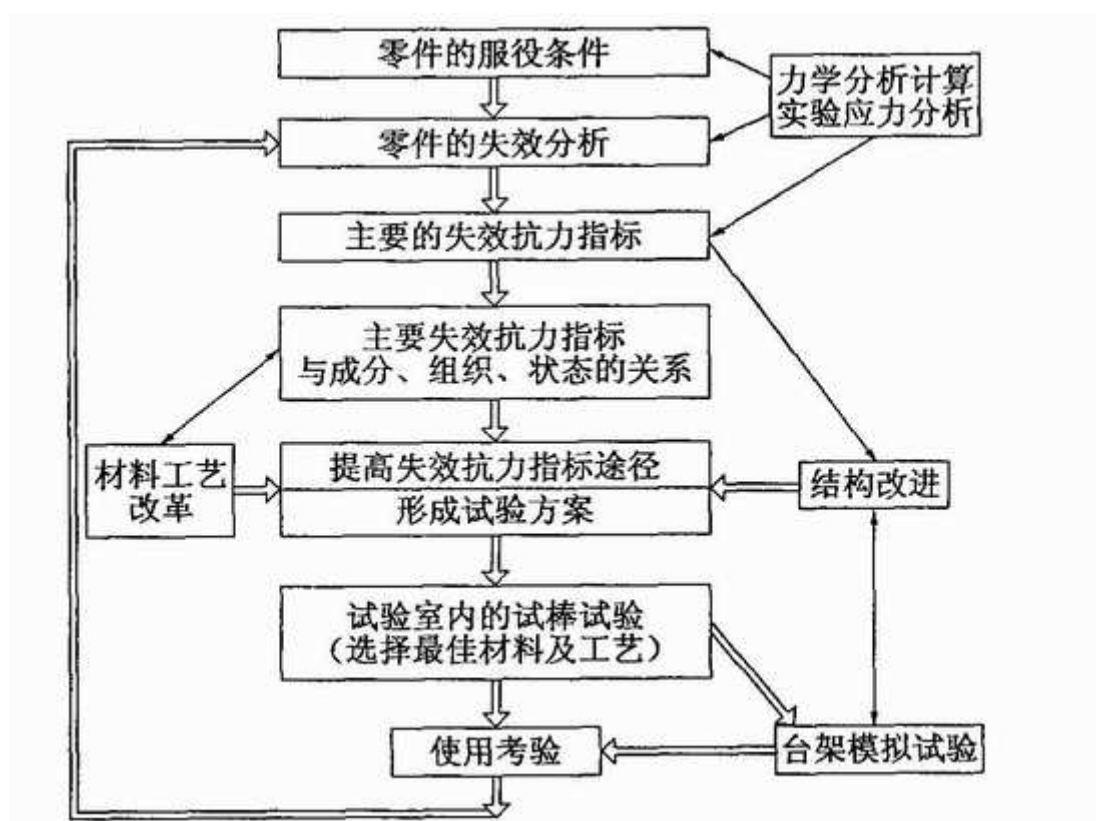


图1 以失效抗力指标为线索的失效分析思路示意图

很明显,以失效抗力指标为线索的失效分析思路是一种材料工作者常用的、比较综合的方法。它是工程材料开发、研究和推广使用的有效方法之一。

值得指出的是,在不同的服役条件下,要求零件(或材料)具有不同的失效抗力指标的实质是要求其强度与塑性、韧性之间应有合理的配合。因此,研究零件(或材料)的强度、塑性(或韧性)等基本性能及它们之间的合理配合与具体服役条件之间的

关系就是这一思路的核心。而进一步研究失效抗力指标与材料(或零件)的成分、组织、状态之间的关系是提高其失效抗力的有效途径(图 2)。

2.3 失效树分析法

失效树分析法是一种逻辑分析方法。逻辑分析法包括事件树分析法(简称 ETA)、管理失误和风险树分析法(简称 MORT)和失效树分析法(简称 FTA)等。这里只介绍失效树分析法。

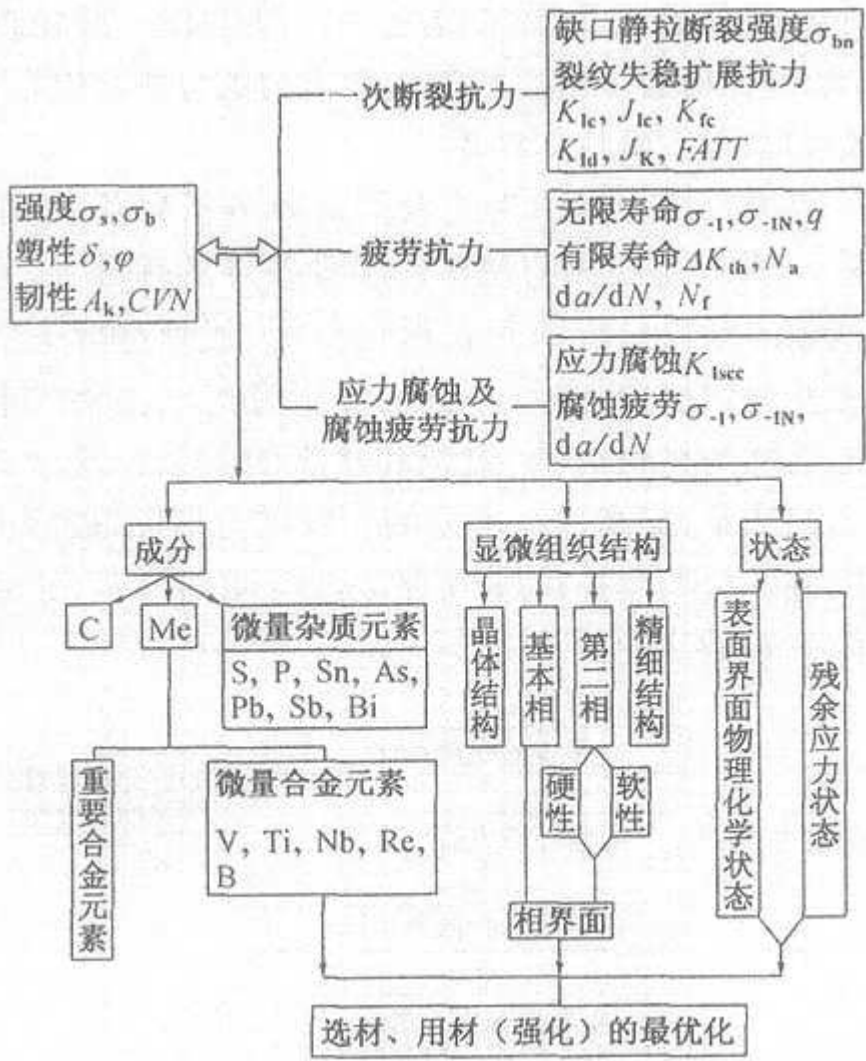


图 2 材料失效抗力指标与成分、组织、状态关系示意图

失效树分析(FaultTreeAnalysis)早在 20 世纪 60 年代初就由美国贝尔研究所首先用于民兵导弹的控制系统设计上, 为预测导弹发射的随机失效概率做出了贡献。此后许多人对失效树分析的理论和应用进行了研究。1974 年美国原子能管理委员会主要采用失效树分析商用原子反应堆安全性的 Wash-1400 报告, 进一步推动了对失效树的研究和应用。迄今 FTA 法在国外已被公认为当前对复杂安全性、可靠性分析的一种好方法。

失效树分析法是:在系统设计过程中,通过对可能造成系统失效的各种因素(包括软件、硬件、环境、人为因素等)进行分析,画出逻辑框图(即失效树),从而确定系统失效原因的各种可能的组合方式或发生概率,以计算系统失效概率,采取相应的纠正措施,以提高系统可靠性的一种设计分析方法。

FTA 法具有很大的灵活性,即不是局限于对系统可靠性作一般的分析,而且可以分析系统的各种失效状态。不仅可分析某些元部件失效对系统的影响,还可以对导致这些元部件失效的特殊原因进行分析。

FTA 法是一种图形演绎方法,是失效事件在一定条件下的逻辑推理方法。它可以围绕某些特定的失效状态作层层深入的分析。因而在清晰的失效树图形下,表达了系统的内在联系,并指出元部件失效与系统之间的逻辑关系,找出系统的薄弱环节。

FTA 法不仅可以进行定性的逻辑推导分析,而且可以定量地计算复杂系统的失效概率及其他的可靠性参数,为改善和评估系统的可靠性提供定量的数据。

FTA 法的步骤,因评价对象、分析目的、精细程度等而不同,但一般可按如下的步骤进行:①失效树的建造;②失效树的定性分析;③失效树的定量分析;④基本事件的重要度分析。

失效树的建造是一件十分复杂和仔细的工作,要求注意以下几点:

(1)失效分析人员在建树前必须对所分析的系统有深刻的了解。

(2)失效事件的定义要明确,否则树中可能出现逻辑混乱乃至矛盾、错误。

(3)选好顶事件,若顶事件选择不当就有可能无法分析和计算。对同一个系统,选取不同的顶事件,其结果是不同的。在一般情况下,顶事件可以通过初步的失效分析,可从各种失效模式找出该系统最可能发生的失效模式作为顶事件。

(4)合理确定系统的边界条件——规定所建立的失效树的状况。有了边界条件就明确了失效树建到何处为止。边界条件一般包括确定顶事件、确定初始条件和确定不许可的事件等。

(5)对系统中各事件之间的逻辑关系及条件必须分析清楚,不能有逻辑上的紊乱及条件上的矛盾。

例如,低合金超高强度钢一般在低温回火或等温(马氏体等温或贝氏体等温)淬火状态下使用。在服役期间,低合金超高强度钢也常发生断裂失效(破坏)。失效树的顶事件就是构件的破坏。这种破坏可由不同的事件——疲劳、过载、应力腐蚀开裂及具有最大可能性的氢脆等等——造成的。这些事件,每一个都通过“或门”与顶事件相连(图 3)。断口分析表明,失效残骸的断口形态不同于过载和疲劳。因此,过载和疲劳是不发展事件,并分别用棱形表示

在图 3 中。当然如果断口分析不能排除这些事件时,那么仍有必要进一步地发展。对于氢脆来说,它是在临界应力强度和临界含氢量共同作用下发生的,因此临界应力强度(图 3 中的事件 15)和临界含氢量(图 3 中的事件 14)应采用“与门”与氢脆(图 3 中的事件 4)相连,其中临界含氢量为不发展事件。

应力腐蚀开裂(图 3 中事件 3)则是临界应力强度(图 3 中事件 6)和造成开裂元素的临界浓度(可以是临界氢浓度(图 3 中事件 10),也可以是除氢以外的其他物质的临界含量(图 3 中事件 11)),这样事件 10 和事件 11 应用“或门”与事件 7 相连。事件 10 和事件 11 均为不发展事件,故均用棱形框表示。可以看出,如果认为应力腐蚀开裂与氢脆都是由于临界应力强度上临界氢浓度引起的,那末在失效树的第一行不能区分应力腐蚀开裂和氢脆,不过,应力腐蚀开裂和氢脆应该在断裂源的起始位置上找到差别。应力腐蚀开裂的临界氢浓度应在暴露表面上显示出来,因此它的断裂源一般在“暴露表面上”,而氢脆的临界氢浓度可能在电镀表面或次表面先达到,因此它的断裂源应在电镀表面上或次表面上。所以是应力腐蚀开裂还是氢脆在失效树的第二行就可以初步确定了。虽然应力腐蚀开裂和氢脆的条件之一都是临界应力强度,并且它们临界应力强度都取决于构件上的载荷(事件 8 和事件 16)和材料的流变应力大于材料的临界门槛应力 σ_i (当然,应力腐蚀的门槛应力数值与氢脆的门槛应力数

值不同),但是由于应力腐蚀开裂一般起始于暴露表面,构件的表面流变应力对构件的平均载荷不敏感,而对表面的加工缺陷等原因所造成应力集中或应变集中则十分敏感,因而在应力腐蚀系统中,加工缺陷处的流变应力大于材料的应力腐蚀门槛应力用“或门”与事件9相连;在氢脆系统中,由于氢脆一般起源于电镀层的次表面,构件上的载荷(事件16)可以是施加的载荷(事件18)也可以是构件内部的残余应力(事件19),故事件18和事件19用“或门”与事件16相连。材料的氢脆门槛应力受表面加工缺陷的影响较小,不需要进一步的展开分析(事件17为不发展事件)了。

从以上 FTA 法在构件断裂失效分析中的具体应用情况可以看出, FTA 法可以对特定的失效事件作层层深入地逻辑推理分析,在清晰的失效树的帮助下,最后找到这一特定失效事件的失效原因或该构件的薄弱环节,因此, FTA 法在进行失效分析的好方法之一。

失效树建立后可以进行的也可以是定量的分析。失效树的定性分析的目的是为了寻找系统的最薄弱的环节,即发现系统最容易发生失效的环节,以便集中力量解决这些薄弱环节,提高系统的可靠性。失效树的定量分析的任务就是要计算或估计系统顶事件发生的概率及系统的一些可靠性指标。一般来说,多部件复杂系统的失效树定量分析是十分困难的。有时无法用解析法求其精确结果,而只能用一些简化的方法进行估算。

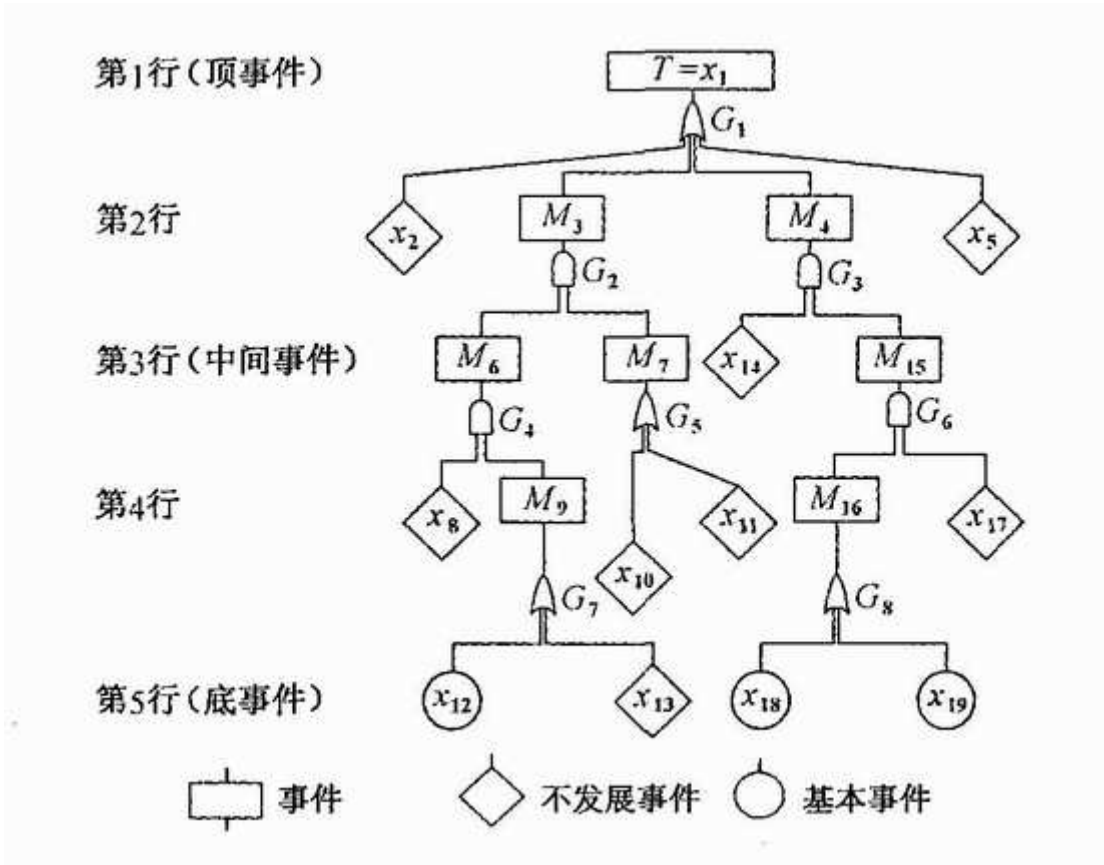


图 3 某超高强度钢构件破坏的失效树

1. 构件破坏 2. 过载 3. 应力腐蚀 4. 氢脆 5. 疲劳 6. 临界应力强度 7. 造成开裂元素的临界浓度
8. 构件上的载荷 9. 流变应力 σ_i 10. 临界氢含量 11. 除氢以外, 其它物质的临界含量 12. 加工缺陷 σ_i 13. 使用过程中的发展
14. 临界氢含量 15. 临界应力强度 16. 流变应力 σ_i 17. 构件上的载荷 18. 施加载荷 P_i 19. 残余应力 S_i

3 结语

失效分析思路是失效分析成败的关键之一,特别是在复杂的失效分析过程中失效分析思路显得尤为重要。根据失效状况的不同,需要合理选择正确的失效分析思路。笔者介绍了几种常用的分析思路,除此之外还有许多实用的思路,如基于安全系统工程分析法的统计图分析法、文字表格法和逻辑分析法等。

失效分析程序

张 峰

(北京航空航天大学材料学院, 北京 100083)

机械失效常常会出现多个机件发生失效,特别是机械事故发生的时候,往往有大量机件同时遭到破坏,情况相当复杂,而失效原因也错综复杂、多种多样。因此,需要有正确的失效分析思路和合理的失效分析步骤。失效分析的实施步骤和程序旨在保证失效分析顺利有效地进行,但是机械产品的失效常常是千变万化,很难制定一个统一的失效分析程序。因此,其细节的制定应根据失效事件的具体情况(失效设备的类型及其失效的严重性等)、失效分析的目的与要求(是为机理研究、技术改进,还是为法律仲裁等)、以及有关合同或法规的规定来决定。

下面介绍一般通用的失效分析实施步骤和程序,原则上可供参考和引用。图 1 示出了推荐的失效分析实施步骤和程序的流程图。

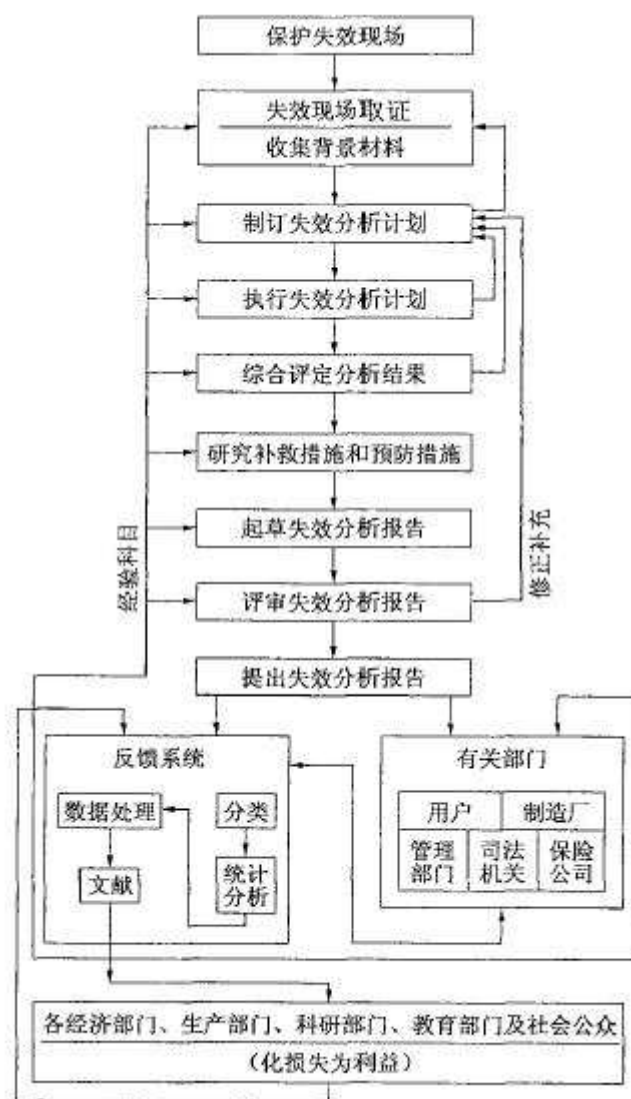


图 1 失效分析实施步骤和程序

1 保护失效现场

保护失效现场的一切证据,维持原状、完整无缺和真实不伪,是保证失效分析得以顺利有效地进行的先决条件。失效现场的保护范围视机械设备的类型及其失效发生的范围而定。

2 失效现场取证和收集背景材料

失效现场取证应由授权的失效分析人员执行,并授权收集一切有关的背景材料。失效现场取证可用摄影、录像、录音和绘图及文字描述等方式进行记录。

失效现场取证所应注意观察和记录的项目主要有:

- (1) 失效部件及碎片的名称、尺寸大小、形状和散落方位。
- (2) 失效部件周围散落的金属屑和粉末、氧化皮和粉末、润滑残留物及一切可疑的杂物和痕迹。
- (3) 失效部件和碎片的变形、裂纹、断口、腐蚀、磨损的外观、位置和起始点,表面的材料特征,如烧伤色泽、附着物、氧化物和腐蚀生成物等。

(4) 失效设备或部件的结构和制造特征。

(5) 环境条件(失效设备的周围景物、环境温度、湿度、大气和水质)。

(6) 听取操作人员及佐证人介绍事故发生时情况(录音记录)。

在观察和记录时要按照一定顺序,避免出现遗漏。例如观察和记录时由左向右、由上向下、由表及里和由低倍到高倍等。

所应收集的背景材料通常有:

(1) 失效设备的类型、制造厂名、制造日期、出厂批号,用户、安装地点、投入运行日期、操作人员、维修人员、运行记录、维修记录、操作规程和安全规程。

(2) 该设备的设计计算书及图纸、材料检验记录、制造工艺记录、质量控制记录、验收记录和质量保证合同及其技术文件,还有使用说明书。

(3) 有关的标准、法规及其他参考文献。

(4) 收集同类或相似部件过去曾发生过的失效情况。

3 制定失效分析计划

只有极少数的情况下,通过现场和背景材料的分析就能得出失效原因的结论。大多数失效案例都需根据现场取证和背景材料的综合分析结果来制定失效分析计划,确定进一步分析试验的目的、内容、方法和实施方式。

在制定失效分析计划前要初步确定肇事件(确定肇事件的方法在后续讲座中有详细介绍),通过肇事件的分析可以判断失效模式、确定失效原因和机理,失效分析的详细计划是围绕着肇事件进行的,因此,确定肇事件是一项非常重要的工作。

失效分析计划由授权的分析人员制定,根据具体情况或要求,可由有关方面的代表参加讨论。

失效分析试验过程通常包括如下内容:①金相检查;②化学成分分析;③无损检测;④材料性能测试;⑤试样的选取、保护和清洗;⑥试样的宏观检查和分析;⑦试样的微观检查和分析;⑧断裂力学分析;⑨模拟试验等。

对各项试验方案应考虑其必要性、有效性和经济性。一般宜先从简单的试验方法入手,如有必要时才进一步采用费用高的和较复杂的试验方法。如确属必要进行失效模拟试验,其设计应尽可能模拟真实的工况条件,使之具有说服力。

从失效部件上和残留物上制取试件或样品,对于失效分析的成败具有十分重要意义,务必要周密计划切取试样的位置、尺寸、数量和取样方法。应当特别强调,失效部件和残留物上具有说服力的位置和尺寸是十分有限的,一旦取样失误,就无法复原而完全丧失说明力,致使整个失效分析计划归于失败,造成不可挽救的后果。

失效分析计划要留有余地,以便在个别试验中发现意外现象时,为了适应新的情况,可中途改变某些方法,或做补充试验。

4 执行失效分析计划

失效分析的各项试验应严格遵照计划执行,要有详细记录,随时分析试验结果。失效分析的试验一般具有几个不同于一般科研试验的特点,应特别予以重视。

(1) 一般都要求在很短的时间内取得试验结果,因此既要保证按时完成、又要防止在匆忙中发生疏忽和差错。

(2) 许多失效分析工作涉及法律问题,为此,各项试验工作应建立严格的责任制度。试验人员在试验记录和报告上签名。

(3) 试件、样品都要直接取自失效实物,一般不能用其它来源的试件样品代替。

(4) 失效分析是人们进一步认识未知客观世界的一种科研活动, 试验人员切不可在思想上存在先入为主的概念, 错误认为失效分析的试验只不过是已知条件的复验、以致放松对试验过程中出现新现象的观察。实际上, 失效分析往往含有新发现和技术突破, 试验人员更应注意观察这种试验的全过程。

5 综合评定分析结果

授权的失效分析人员, 要经过充分的讨论, 对现场发现、背景材料及各项试验结果做综合分析, 确定失效的过程和原因, 做出分析结论。

综合分析, 特别是在复杂的失效案例情况下, 可来用故障树(Fault Tree) 找其它形式的逻辑图分析方法。

在大多数情况下, 失效原因可能有多种。应努力分清主要原因和次要原因。

综合分析讨论会应有详细的发言记录和代表共同意见的会议纪要及与会人员签名, 并存入失效案例档案。

6 研究补救措施和预防措施

失效分析的目的不仅限于弄清失效原因, 更重要的还在于研究提出有效的补救措施和预防措施。从大量同类和相似失效案例分析积累的丰富经验有利于这类措施的研究。

补救措施和预防措施可能涉及设备的设计结构、制造技术、材料技术、运行技术、修补技术以及质量管理的改进, 乃至涉及技术规范、标准和法规的修订建议。这类研究工作量往往很大, 除个别简单情况可由承担失效分析的人员进行外, 一般由失效分析人员提出问题或补救方案, 由负责单位责成有关专业部门或单位进行专题研究, 提出研究报告, 作为改进设备的依据。

7 起草失效分析报告

失效分析报告一般可不规定统一的格式, 但行文要简练, 条目要分明, 内容一般应包括下列项目:

- (1) 题目;
- (2) 任务来源, 包括任务下达者及下达日期, 任务内容简述, 要求的分析目的;
- (3) 各项试验过程及结果;
- (4) 分析结果——失效原因;
- (5) 补救措施和预防措施或建议;
- (6) 附件(原始记录、图片等) ;
- (7) 失效分析人员签名及日期。

对于大宗同类产品的失效分析, 宜规定一定的报告形式。以便于事后的统计分析和计算机辅助失效分析。

8 评审失效分析报告

失效分析评审会的组织形式及其参加人员可由有关方面协商决定, 一般宜由失效分析工作人员、失效设备的制造厂商代表、用户代表、管理部门代表、司法部门代表和聘请的其他专家组成。各方面代表应本着尊重科学、尊重事实和法律的态度履行其评审职责, 不得对失效分析人员以任何形式施加不正当的压力和影响。失效分析人员的客观公正立场应受维护和尊重。

9 提出失效分析报告

失效分析报告通过评审后,按评审决议修改并制定成报告正式文本,内容项目除起草报告中的7项外,还宜增加下列3项:

①评审意见,包括评审人员签名及日期;②呈送及抄送单位,包括抄送反馈系统;③密级。

10 反馈失效分析成果

反馈系统是失效分析成果的管理系统,目的在于充分利用失效分析所获得的宝贵技术信息、推动技术革新、促进科学进步和提高产品质量。

失效分析的反馈系统可采取多种组织形式,例如可与企业的技术开发和情报部门结合,可与国家的质量管理部门、可靠性研究中心、数据中心及数据交换网相结合。把输入的大量失效分析报告和来自数据交换网的其他信息,经过分类、统计分析、数据处理,制成各种形式的文献,例如快报、数据手册、指导性文件、年鉴和书刊等,传递到各个经济部门、生产部门、科研部门、教育部门和司法部门及新闻部门,把失效造成的损失化为巨大的效益。

失效分析技术(一)

傅国如 1, 2, 张 峥 1

(1. 北京航空航天大学材料科学与工程学院, 北京 100083; 2. 北京航空工程技术研究中心, 北京 100076)

摘 要:简要介绍了失效分析技术——痕迹分析技术、裂纹分析技术和断口分析技术等的基本概念、主要内容、一般程序和基本方法,以及它们在工程失效分析中的应用。

关键词:失效分析技术;痕迹分析技术;裂纹分析技术;断口分析技术

失效分析是一门系统工程,其中的分析技术是其理论和实践基础。失效分析技术主要包括痕迹分析技术、裂纹分析技术和断口分析技术等相关内容。

1 痕迹分析技术[1, 2]

痕迹分析是失效分析中常用的一种分析方法和技术。通过痕迹分析,不仅可对事故和失效的发生、发展过程做出判断,而且可为事故和失效分析结论提供可靠的佐证和依据。

1.1 痕迹及痕迹分析概念

广义地说,痕迹是指环境作用于系统,在系统表面留下的标记。在机械失效中,系统指的是失效的构件或零件,而环境则是指外来的力学、化学、热学、电学等因素。因此,对机械失效,痕迹可定义为力学、化学、热学、电学等环境因素单独地或协同地作用于机械,并在其表面或表面层留下的损伤性标记。

在失效分析范畴,痕迹的具体含义是指:痕迹的形貌(或称花样);痕迹区、污染物及反应产物的化学成分;痕迹颜色的种类、色度、分布和反光等;痕迹区材料的组织和结构;痕迹区的表面性能;痕迹区的残余应力分布;从痕迹区散发出来的各种气味;痕迹区的电荷分布和磁性等。痕迹分析即是对失效件的上述特征的变化进行鉴别,并找出其变化原因,为失效分析提供线索和依据的技术活动。

1.2 痕迹分析程序

在一般情况下,痕迹分析应按如下程序进行。

(1)发现和显现痕迹 这是痕迹分析的前提和基础。应以现场为起点,先收集能反应整体破坏顺序的痕迹,后收集具体零部件外部的痕迹,再收集零部件之间的痕迹,最后搜集污染物和分离物。

(2)提取、固定、显现、清洗、记录和保存痕迹方法有复印、制模法、静电法和 AC 纸粘附法等。痕迹的记录可以用文字、示意图和照片。

(3)鉴定痕迹 对具体的痕迹特征进行针对性检验,从而确定痕迹的性质、产生的时间和条件。鉴定时,应按由表及里、由简而繁、先宏观后微观、先定性后定量,按形貌 2 组织结构 2 性能的顺序进行。

(4)模拟再现痕迹 必要时可在产品上进行,拆检同型号的、已使用过的产品的相应痕迹加以对比是一种更真实的“试验”。

(5)综合分析 痕迹分析需综合考虑形成痕迹的过程、条件和影响因素,痕迹的可变性及与零件工作、失效的关系等,以确定痕迹的性质和原因。

1.3 痕迹的发现和显现技术

痕迹的发现和显现就是将隐藏的、不明显的痕迹特征揭示出来,以确定痕迹的分布及其规律,为进一步的痕迹性质鉴定提供目标。

痕迹是一种表面特征,寻找痕迹应在零部件的表面进行,并根据地点、机件等不同采取相应的方法。对大的机件,如飞机、汽车等,应着重从零部件的表面颜色变化、表面结构轮廓变化、形貌变化等肉眼易见的特征上来发现痕迹;当零部件较小时,在实验室借助一定的仪器设备来进行的同时,应在以上检查的基础上,重点从粗糙度变化、细小附着物、擦痕、划痕、材料成分和组织等方面来发现痕迹。

1.4 痕迹的提取、固定、清洗、记录和保存技术

为了得到痕迹的准确信息,需对痕迹进行清理,以去除保护涂层、腐蚀产物和灰尘之类的松散沉积物。常用的清理技术有机械刷洗法、有机溶剂清洗法、弱酸或碱性溶液处理法和超声清洗法。

1.5 痕迹的鉴定

1.5.1 痕迹的形貌鉴定

痕迹的形貌鉴定是痕迹分析的关键。应首先通过肉眼观察确定痕迹的整体分布特征与规律,然后以有代表性的局部痕迹来重点分析痕迹的性质。

(1)痕迹的形成要素和分类 一般来说,形成痕迹包含三个基本要素:①造痕物,即痕迹的制造者,是直接接触并作用于机械表面的物体或介质。②留痕物,即造痕物作用的对象,一般指机械表面。造痕物与留痕物是相对的,有时在两个匹配的接触面都会留下痕迹。③造痕物和留痕物发生相互接触或非正常作用。

图 1 示出了痕迹的形成原理。当造痕物与留痕物发生相互接触或作用,痕迹就会形成。对机械痕迹,造痕物与留痕物之间的这种作用就是力,而且一般为压应力。根据痕迹形成的机理和条件的不同,可将机械失效中的痕迹分为机械接触痕迹、腐蚀痕迹、电侵蚀痕迹、污染痕迹、分离物痕迹、热损伤痕迹和加工痕迹等七类。

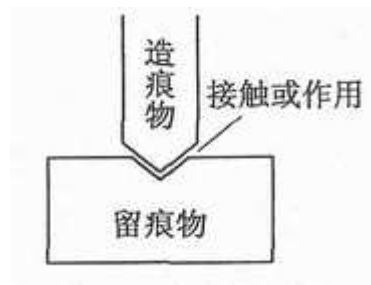


图1 痕迹的形成

(2)机械接触痕迹 由于机械力的作用而在接触部位留下的痕迹称为机械接触痕迹,简称机械痕迹。依据接触方式和相对机械运动方式的不同,机械痕迹又可分成如下五种。

①压入性机械痕迹 简称压痕,是造痕物压入留痕物,在接触面留下的痕迹。典型形貌是压坑、压伤、压陷和压痕,如压入法测量金属硬度时在金属表面留下的各种规则的印痕,在零件表面敲上的钢印编号、标记等。压痕一般具有如下特征:形貌规则,边界清晰,与造痕物接触部位的形状吻合;在垂直表面的方向上变形最大;面积大小和深度与作用在压头上的法向载荷成正比、与压头的接触面积成反比;保载时间越长,压痕越大;不会产生磨粒,很少有材料粘着和转移;材料不同,压痕也不相同。

图2是导致飞机座舱抛盖活门薄膜破裂的压痕形貌,其形状规则,底部减薄最大、边缘隆起、边缘至底部均匀过渡,为典型的容积形压坑。

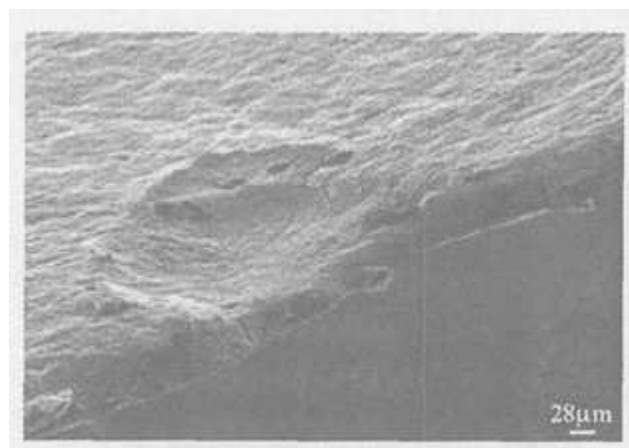


图2 飞机座舱抛盖活门薄膜表面压痕

通过压痕分析,一般可确定发生事故(或故障)时机件之间相对工作位置、仪表指示位置、是否存在外来物,以及失效件解体顺序等失效信息。

②撞击性机械痕迹 撞击性机械痕迹的机械力作用时间很短,变形速度大,接触面之间以垂直接触面方向的相对运动为主。如飞机坠毁时的接地痕迹等。撞击性机械痕迹可分为外物打伤痕迹、多次撞击表面疲劳痕迹和冲蚀损伤痕迹三种。

③滑动性机械痕迹 又称摩擦痕迹,是在摩擦过程中形成的痕迹,如机械表面的各种划痕、磨痕、刮痕等,是机械表面最常见的机械痕迹。根据其形成机理和特征,可分为犁痕(即划痕)、粘着痕迹、摩擦疲劳痕迹和摩擦腐蚀痕迹等四类。犁痕是最常见的一种,也是整个机械痕迹中较常见的一种痕迹,准确判断其形成的条件、方向和机理对诊断整个事故或失效的形成过程和原因具有重要的意义。一般需从犁痕的起始、末端、沟边和沟底四个部位的宏观、微观特征来对犁痕进行鉴别,其中特别要注意细微形貌和材料转移特征。犁痕的方向,一般可根据以下特点来鉴别:

(a)直接犁入的犁痕,起点处不但没有材料堆积,而且往往出现凹陷,如图3左边所示。

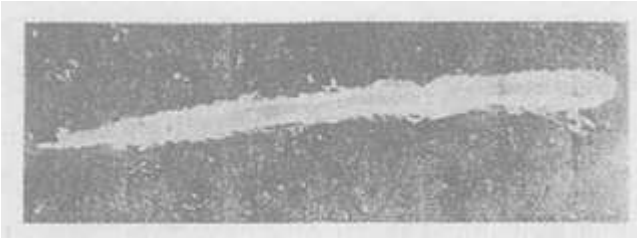


图3 犁痕方向的判断

(b)如果先形成压印痕,再发展成划痕,则起点处会留下压印痕的特征。

(c)一次性的划痕,结尾往往带有突然性,在犁痕的末端有比较明显的材料堆积,如图4所示。

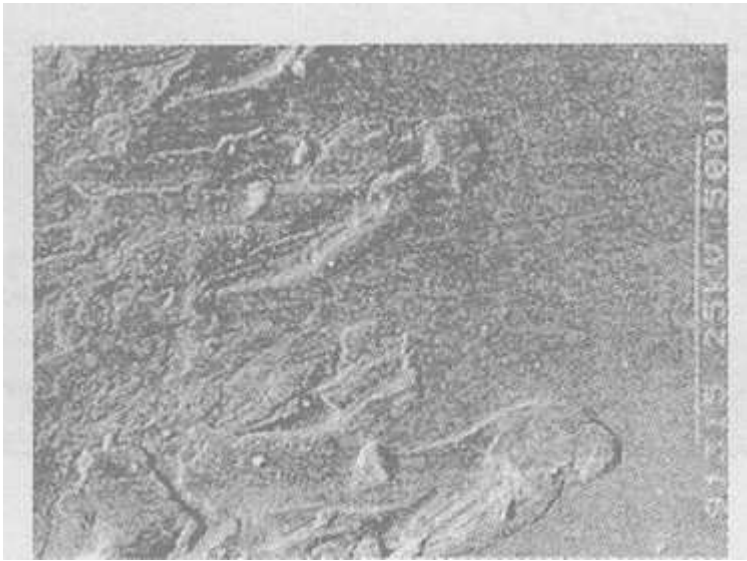


图4 犁痕末端材料堆积

(d)当划痕途经表面凹凸处时,会在凸起前缘形成材料碎渣的堆积,如图5所示。

(e)一般金属材料向犁沟外侧的两边翻起,翻起的金属毛刺的倾斜方向为表面犁沟的形成方向。图3中犁痕的方向为从左右,两侧的金属毛刺呈约 30° 的方向向右倾斜,指示了犁痕的形成方向。

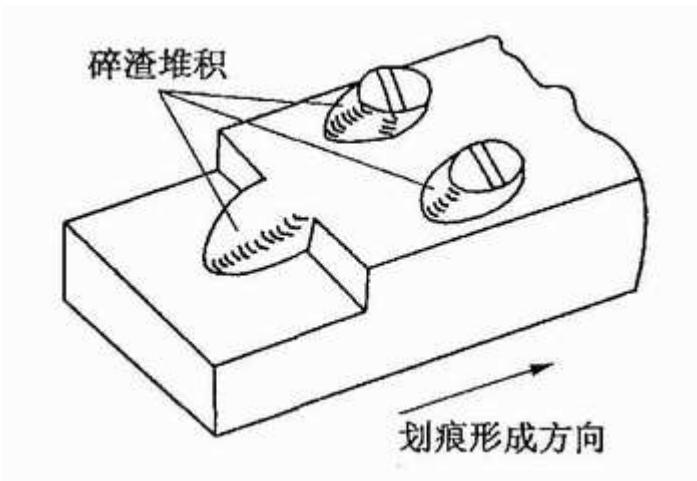


图5 材料碎渣在表面凸起处堆积

(f) 撞击型的犁痕, 由于造痕物对留痕物的作用力逐渐减小, 因此, 划痕宽度会由粗变细, 深度会由深变浅, 材料转移会由多变少; 犁痕的宏观形状呈收敛形, 收敛的方向就是犁痕的形成方向。

④滚动性机械痕迹 工程上所说的滚动性机械痕迹, 实际上都是滚压或滚滑性机械痕迹, 简称为滚动痕迹。如各种轮胎滚压痕迹和履带滚压痕迹, 滚动接触疲劳痕迹等。

⑤微动性机械痕迹 微动就是名义上相对静止的两个固体, 其相互接触的表面在法向压力作用下互相挤压并产生往复的相对滑动。相对滑动幅度在 $5\sim 400\mu\text{m}$ 。微动性损伤有微动疲劳、微动磨损和微动腐蚀等。

(3) 腐蚀痕迹 金属腐蚀是指金属与周围介质发生化学或电化学作用, 导致金属损伤的各种转变过程。金属腐蚀必有腐蚀产物出现。腐蚀经常与其它失效形式协同作用, 产生更为严重的复合失效形式, 如腐蚀磨损、腐蚀疲劳、热腐蚀和应力腐蚀等。

零件是否发生了腐蚀, 可以从表面颜色、形貌、表面层化学成分、物资结构等是否有变化和导电、导热、表面电阻等表面性能的变化等方面来鉴别。如钢和铸铁, 腐蚀开始时金属表面颜色发暗, 腐蚀轻时呈暗灰色, 进一步发展会变为褐色或棕黄色, 严重腐蚀呈棕色或褐色疤痕甚至锈坑。

(4) 污染痕迹 各种污染物附着在表面而留下的痕迹成为污染痕迹。污染痕迹分析的内容很多、范围很广, 除常规的各种理化检验方法外, 主要还有气氛分析、油液分析、腐蚀产物分析和磨粒分析。

(5) 分离物痕迹 分离物主要是指接触面在物理、化学作用下从接触面上脱落下来的颗粒。最常见的分离物有磨屑、腐蚀产物、毛刺、剥落的涂层、镀层、烧熔溅痕等。分离物痕迹分析主要是指分离物本身的形貌、成分、结构、颜色和磁性等方面的分析。

(6) 热损伤痕迹 在热能作用下, 接触部位发生局部不均匀的温度变化而在表层留下的痕迹称为热损伤痕迹。表面层局部过热、过烧、熔化、烧穿, 漆层及非金属表面烧焦都会留下热损伤痕迹。热损伤痕迹一般可从颜色的变化, 表面层成分、结构的变化, 显微组织的变化, 表面性能的改变, 形貌特征等五方面进行分析。如不锈钢, 在 $430\sim 480^{\circ}\text{C}$ 开始变色, 随温度上升, 颜色从黄褐色变为淡蓝色、蓝色和黑色。

(7) 电损伤痕迹 包括电侵蚀(电腐蚀)和静电损伤两大类。

①电侵蚀, 其痕迹主要有电蚀坑、金属熔球、金属转移等。电侵蚀的主要危害是使电路工作不稳定、电路元件烧毁、引起火灾。如, 一飞机的左操作台起火, 原因是开关内部电弧引起。

②静电放电痕迹, 由于静电放电现象而在放电部位留下的痕迹称为静电放电痕迹。其主要宏观特征是放电过程中形成的碳及碳化物, 使放电部位的表面颜色发黄、发灰或发黑。局部的高温熔融, 使放电部位表面颜色变成深蓝。放电过程中, 放电体会形成类似于火山口状的“火花放电微坑”。

(8) 与裂纹源有关的痕迹 与裂纹源有关的痕迹很多, 概括起来主要有冶金夹渣、挤压裂口、加工痕迹、电笔烙印、钎焊沿晶氧化微裂纹、焊接冷裂纹等 6 种。

1.5.2 痕迹的成分鉴定

痕迹的成分鉴定是对留痕物上的表面附着物、金属粘结物的元素种类和含量进行分析, 以确定造痕物的种类。常用的分析仪器为通过各种发射谱进行表面成分分析的各种表面分析谱仪。

1.5.3 痕迹的组织结构鉴定

痕迹的组织结构鉴定一般采用表面微区晶体结构分析技术。目前,适用于厚块试样表面结构分析的有低能电子衍射技术、反射式高能电子衍射技术、反射电子衍射技术、电子通道花样技术、电子背散射花样技术、X射线柯塞尔花样技术等。

1.5.4 痕迹区的性能鉴定

痕迹区的性能鉴定是指对痕迹区进行的各种物理性能、化学和力学性能的检测分析。包括表面力学性能检测,表面电阻、磁性等物理性能检测和耐磨性、耐蚀性等性能检测。用于这些性能检测的仪器主要有表面应力测定仪、显微硬度计、腐蚀电位仪、以及其它检测表面各种性能的测试仪器。

1.6 痕迹的模拟再现

通常的痕迹模拟再现试验有实验室实验和现场实验两种。实验室实验可在专用实验机上进行,试验件可以根据试验机的要求选用同类零件或试片,但实验参数应调整到与痕迹分析中得出的痕迹条件一致。现场试验是比实验室试验更准确、更可靠的模拟再现方法,其工作条件一般与失效时的情况更接近,但相应的一些试验参数也应该根据前面的分析进行适当的调整。

对由模拟试验得出的痕迹,应与失效件上的痕迹进行对比分析。如果模拟试验再现了失效痕迹特征,说明对痕迹形成的条件和原因分析基本正确;如果没有再现,应分析其中的原因,并对失效痕迹进行补充分析与完善,在此基础上调整试验参数,再次进行模拟试验,直到痕迹被再现。

1.7 痕迹的综合分析

痕迹的综合分析是在对痕迹的形貌、成分、组织结构和性能等进行鉴定的基础上,综合考虑痕迹的模拟再现试验情况,分析确定痕迹的性质和产生条件(原因),为整个失效分析提供依据的过程。痕迹综合分析的目的是要确定痕迹的性质和来源(产生的条件或原因)。

1.7.1 痕迹的性质

不同性质的痕迹具有不同的特征,不同的特征反应不同的痕迹形状,痕迹性质与痕迹特征之间具有对应关系。通过对痕迹进行全面的分析,可确定痕迹的各项特征,由此基本分析出痕迹的性质。分析中需要综合考虑痕迹的各方面特征后才能做出最后的结论,切不可只根据一两个特征,或只根据宏观特征或微观特征,就确定痕迹的性质。

如,一发动机的压气机叶片发生疲劳断裂,源区存在一凹坑痕迹(见图6)。宏观下该痕迹位于叶片的进气边缘,呈豁口状,底部已露出金属光泽;微观下底部可见细小的擦痕,盆面尾端有金属毛边,见图7。由以上痕迹特征可以判断,该痕迹为打伤痕迹,方向为从进气边缘指向叶盆面。进一步的分析表明,这一打伤痕迹是导致该叶片疲劳断裂根本原因。

1.7.2 痕迹的来源(产生)

痕迹的来源,即痕迹产生的原因或条件,这是失效痕迹分析的重点。痕迹原因分析的基础是痕迹的性质分析,不同性质的痕迹具有不同的产生条件,也就具有不同的产生原因,即痕迹的性质与原因之间具有对应关系。基本确定了痕迹的性质后,综合考虑零件的工作原理、工况条件和生产制造工艺过程,痕迹产生的原因也就基本清楚了,通过模拟再现试验,既完善了分析过程,又验证了分析结论。

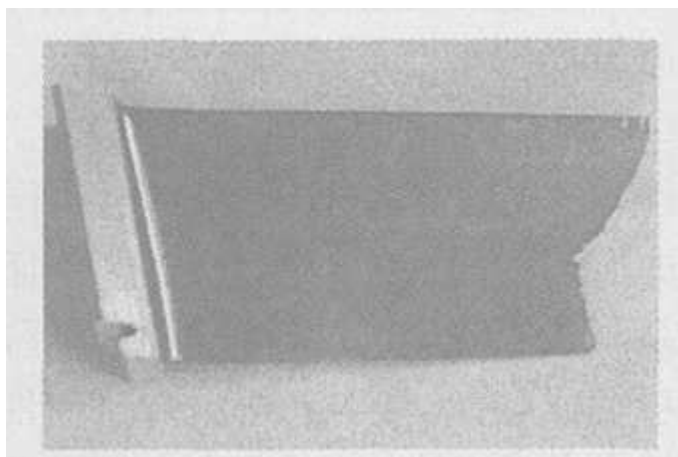


图 6 发动机压气机叶片断裂源处的打伤痕迹

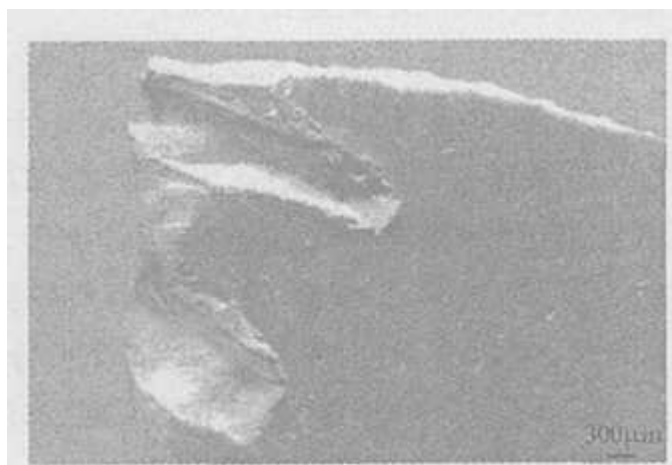


图 7 上图打伤痕迹的放大形貌

2 裂纹分析技术[2, 3]

裂纹是材料表面或内部完整性或连续性被破坏的一种现象,是断裂的前期;断裂则是裂纹发展的结果。裂纹分析包括裂纹的无损检测、表面分析、光学金相分析及裂纹打开后的断口分析等内容。

2.1 裂纹的无损检测

裂纹的无损检测是生产和使用过程中质量检验、安全控制的一项重要内容。常用的无损检测方法有:X射线、磁力、超声波、荧光、着色、声发射、敲击测音法和工业CT等物理检测方法,其中磁力、荧光和着色等方法主要用来检查表面裂纹,而X射线、超声波、声发射和工业CT等可检测表面和内部裂纹。声发射靠捕捉裂纹扩展中发射的声信号来检测裂纹,只能检测正在扩展中的裂纹。裂纹检测中,要注意检测的方向,超声波和磁力线必须垂直裂纹平面检测,而X射线须平行于裂纹所在的平面检测。

2.2 裂纹产生先后顺序的诊断技术和方法

在断裂失效分析中,往往存在有多条裂纹,而最先产生的裂纹往往是导致其它裂纹产生和整个事故(故障)发生的根本原因。因此,在分析中,首要任务就是从这些裂纹中确定首先产生的裂纹即主裂纹,然后对主裂纹进行分析。

2.2.1 确定主裂纹(首断件)的原则和方法

确定主裂纹或找出首先断裂失效件应根据各零件的功能特征,各相关零件的损伤痕迹,各零件的断裂形貌特征等加以综合分析判断。

- (1) 断裂件中既有延性断裂又有脆性断裂时,一般脆性断裂件发生在前,延性断裂件发生在后。
- (2) 断裂件中既存在脆性断裂件又存在疲劳断裂件时,则疲劳断裂件应为首断件。
- (3) 存在两个或两个以上的疲劳断裂件时,低应力疲劳断裂件在前,高应力疲劳断裂件在后。
- (4) 各断裂件均为延性断裂时,应根据各零件的受力状态、结构特性、断裂的走向和材质与性能等进行综合分析评定,才能找出首先断裂失效件。

2.2.2 常用判断裂纹先后顺序的方法

(1) 塑性变形量大小确定法 当零件断裂成多块,有的部位没有明显塑性变形,有的部位塑性变形明显,则无塑性变形的区域为首先断裂区域;当所有断裂部位均为延性断裂时,变形量大的部位为主裂纹,其它部位为二次或三次裂纹。

(2) T 型法 一个零件上同时出现两条或多条裂纹,裂纹间构成 T 型关系时,可根据裂纹的相对位置关系来确定主裂纹。图 8 中所示,横贯裂纹 A 形成在前为主裂纹,而 B 裂纹形成在后为次裂纹。

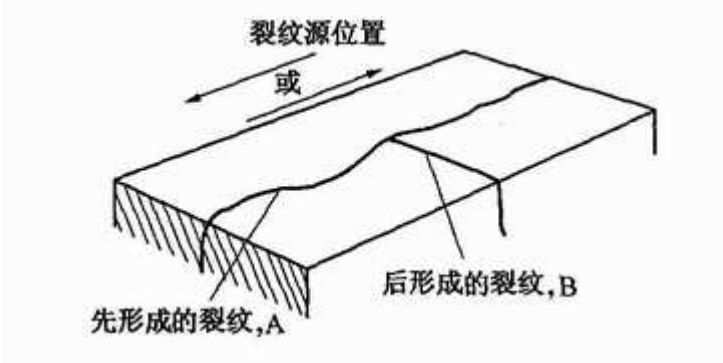


图 8 判别主裂纹的 T 型法示意图

A——主裂纹 B——二次裂纹

(3) 裂纹分叉法 机械零件在断裂的过程中,出现一条裂纹后,往往会引伸出多条分支裂纹或分叉裂纹,如图 9 所示。裂纹的扩展方向为从主裂纹向分叉或分支裂纹方向,分叉或分支裂纹汇集的裂纹为主裂纹。

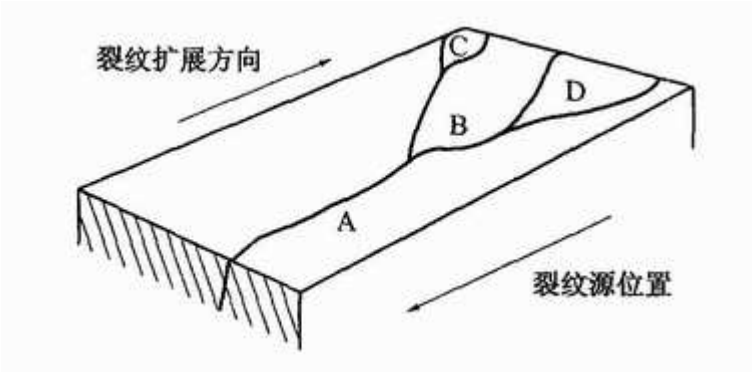


图 9 判别主裂纹的分叉法示意图

A——主裂纹 B, C, D——二次裂纹

(4)断面氧化颜色法 金属零件如暴露 in 环境介质或高温下会被腐蚀和氧化,而且腐蚀和氧化的程度会随时间的增加而加重。主裂纹较次裂纹形成时间早,主断面较次断面暴露 in 环境中的时间长,腐蚀与氧化程度严重,腐蚀产物多、氧化颜色深。

(5)疲劳裂纹长度法 当同一零件上出现多条疲劳裂纹时,一般可根据疲劳扩展区的长度、疲劳弧线和疲劳条带间距的大小来判断主裂纹。疲劳裂纹长、疲劳弧线或疲劳条带间距小的为主裂纹。

以上 5 种方法均是针对一般情况而言的。在实际失效分析中,应该根据具体情况和相关条件,结合结构特点、受力状态、工作原理、裂纹扩展规律、表面痕迹特点和零件材料与性能等综合分析,才能给出准确的判断。一般脆性断裂可用 T 型法或分叉法,延性断裂可用变形法,环境断裂可根据断面氧化与腐蚀程度及颜色深浅,疲劳断裂可利用断口的宏观与微观特征形貌来区分主次断裂。

2.3 裂纹的形貌分析

2.3.1 裂纹的宏观分析

(1)裂纹宏观分析的目的及内容 裂纹宏观分析的目的是确定裂纹的位置、类型、外观形貌及张开情况等。主要包括:裂纹产生的部位;裂纹的平直情况、分叉情况或宏观走向的变化等;裂纹与主应力方向(或切应力方向)之间的关系;裂纹与材料成形方向(轧制方向或流线方向)的关系;裂纹的啮合情况(紧密配合,还是分离);裂纹尖端的情况(尖锐或圆钝);裂纹起始位置与零件形状的关系(是否有应力集中)。

裂纹一般容易产生于尖角、转折或几何尺寸突然变化处等应力集中部位,受力最大部位,焊缝熔合区等组织薄弱部位和材料缺陷处。结合裂纹的外观形貌、张开情况和匹配情况,可诊断出裂纹的类型和起始源区。

根据裂纹产生的部位,以及是否是龟裂纹、线裂纹、多条裂纹、起始源区、匹配情况,结合应力状态,可初步判断裂纹产生的条件。如在应力集中部位,则可能与使用载荷有关;不在应力集中部位,则可能与材料性能、成分、缺陷和内应力等有关。裂纹的起源位置和扩展途径决定了裂纹的宏观形貌,它们都是构件局部受力状态和大小(外力)与材料强度(抗力)综合效应的结果,即应力 2 强度干涉作用的结果[4]。它们往往是应力较大(动力大)、强度值较低(阻力小)的路径,如应力集中处或材料局部缺陷处等。

(2)裂纹的宏观形貌 常见的裂纹宏观形貌有龟裂纹、线裂纹、环形裂纹、周向裂纹、辐射状裂纹和弧形裂纹等。

①龟裂纹 外观形貌类似于龟壳网络状分布的一类裂纹。龟裂纹一般是一种表面沿晶裂纹,深度不大。由于零件表面(或晶界)的成分、组织、性能及应力状态与中心(或晶内)不一致,在制造过程或使用过程中使晶界成为薄弱环节,并产生很大的组织应力和热应力等内应力,从而使晶界开裂,形成龟裂纹。龟裂纹按其形成条件,可分为铸造表面龟裂纹、锻造表面龟裂纹、热处理表面龟裂纹、焊接龟裂纹、磨削龟裂纹和使用龟裂纹。

②线裂纹 是指近似直线状的裂纹。最典型的线裂纹是由于发纹或其它非金属夹杂在后续工序中扩展而形成的裂纹。它们一般沿材料的纵向发展并较长,在裂纹的两侧和金属基体上一般有氧化物夹杂或其它非金属夹杂物。

③其它形状裂纹 常见的其它形状裂纹有环形裂纹、周向裂纹、辐射状裂纹和弧形裂纹等。

2.3.2 裂纹的微观分析

(1) 裂纹微观分析的内容 裂纹微观分析一般是通过光学显微镜和电子显微镜对裂纹表面形态和金相磨片进行观察和分析。其主要内容包括:裂纹的微观形态特征,如扩展路径是穿晶还是沿晶,主裂纹附近有无微裂纹;裂纹处及其附近的晶粒度有无显著粗化、细化或大小极不均匀现象;晶粒是否变形;裂纹与晶粒变形方向是否一致;裂纹两侧是否存在氧化和脱碳现象;裂纹附近是否存在碳化物或非金属夹杂物,其形态、大小、数量及分布如何;裂纹源是否产生于碳化物或非金属夹杂物周围,扩展方向如何;裂纹处是否存在异常组织,如粗大过热组织、魏氏组织和带状组织等;源区是否存在加工缺陷、材质缺陷和腐蚀损伤等;表面是否存在白色加工硬化层或回火层。

(2) 裂纹微观分析技术 通过对裂纹区及其附近的显微组织和晶粒度检查,可判断出裂纹起始的部位,定性判断出裂纹部位的受力大小及加工质量等。

在微观上,裂纹源区一般均是材料的薄弱环节,如零件的表面或次表面及应力集中处和材料缺陷处(有时可见到明显的缺陷)。对于一条主裂纹,由粗到细的形态就是裂纹的扩展过程。当存在放射状微裂纹时,其收敛点位置即为裂纹源。

裂纹的扩展途径有沿晶、穿晶和沿晶与穿晶混合三种。一般制造过程中产生的铸造热裂纹、过烧引起的锻造裂纹、回火脆性裂纹、磨削裂纹、焊接裂纹、使用中出现的冷热疲劳裂纹、蠕变裂纹、热脆裂纹、环境因素引起的应力腐蚀裂纹和氢脆裂纹等均是沿晶界扩展的;而疲劳裂纹、解理裂纹、延性断裂裂纹等使用中形成的裂纹和因冷却速度过大、零件几何尺寸突变等引起的淬火裂纹和焊接裂纹等制造裂纹都是穿晶裂纹。

根据裂纹及其周围的形状和颜色,可以判断裂纹经历的温度范围和零件的工艺历史,从而找出裂纹产生的具体工序。若裂纹两侧具有明显的氧化和脱碳现象,则裂纹的形成肯定与制造热工艺过程有关。而淬火工件的裂纹断口颜色发黑,氧化物层厚,说明淬火加热前即已存在裂纹。淬火前就已存在的裂纹,裂纹两侧常有脱碳现象。

在裂纹的微观分析中,还应该注意观察裂纹两侧的耦合情况,一般裂纹两侧的耦合性很好,但发裂、拉痕、磨削裂纹、折叠裂纹及经过变形后的裂纹,两侧的耦合性均较差。

一般情况下,疲劳裂纹的末端是尖锐的;拉痕、发裂纹的末端圆秃;折叠裂纹的末端粗钝。在金相磨片下观察,淬火裂纹细直、线状、棱角较多、末端尖细;两侧显微组织与其它部分无异常,无氧化和脱碳现象。铸造热裂纹呈龟裂网状,沿原始晶界延伸,裂纹内侧一般有氧化和脱碳,末端圆秃。磨削裂纹一般细又浅,呈龟裂状或规则直线排列。

由于过热、过烧引起的锻造或热处理裂纹,往往晶粒粗大,并常在晶界处伴有析出物。局部应力超过材料的强度极限所引起的裂纹,裂纹处往往具有明显的塑性变形痕迹。裂纹表面的附着物对裂纹的分析也有一定的参考价值。如水淬时产生的裂纹,会出现红锈。

必要时,可对裂纹进行解剖分析。目的是分析裂纹的起始和走向、经过的路径、裂纹中有无其他物质、裂纹两侧附近区域有无材质变化,从而确定裂纹形成过程与显微组织之间的对应关系、断裂过程、断裂机理、变形程度、表面状态及其损伤情况等,以揭示零件在制造、加工等过程中产生的缺陷、使用状况和环境条件等对断裂失效的影响。

一般张开较大区域为裂纹的起始区,裂纹中夹有氧化物或腐蚀产物等,说明裂纹形成后(或形成过程中)经历过复杂的环境过程,如高温或腐蚀环境等。裂纹的走向及两侧的材质变化情况往往对确定裂纹的性质有重要作用。如碳钢裂纹两侧脱碳,

则说明裂纹为热裂纹或开裂后经过了热过程;裂纹扩展过程中有无分叉现象,对区分氢脆与应力腐蚀有重要帮助,氢脆裂纹扩展过程中一般无分叉现象,而应力腐蚀裂纹往往有分叉现象。裂纹的扩展是沿晶还是穿晶等也是应该特别注意的问题。一般沿晶扩展的裂纹均与腐蚀介质的作用有关。

2.3.3 裂纹断口分析

(1) 裂纹的打开与断口切取技术 在对裂纹断口分析前,必须人为地将裂纹打开,以获得需要的裂纹断口。有时为了实验室观察的需要,还要对断口进行选取,并切取断口。

在打开裂纹前,应做好相关的记录、测量和照相,特别是裂纹与相关结构的相对位置和表面的痕迹特征等,以保证裂纹打开后,仍能准确确定裂纹的位置、结构特点和受力状态等。

打开裂纹时,需注意保持断面的原始形貌特征不受到机械的和化学的损伤;断口及其附近区域的材料显微组织不能因为受热发生变化。具体实施时,应根据裂纹的位置及扩展方向来选择人为施力点,使零件沿裂纹扩展方向受力,使裂纹张开形成断口,而不会在打开过程中损伤断面。常用的裂纹打开方法有三点弯曲法、冲击法、压力法和拉伸法等。打开裂纹时,最好采用一次性快速打开方法,而不用重复的、交变的或分阶段处理的方法,如振动疲劳和反复弯曲等,以免打开时在断面上形成的特征与原始断裂特征混淆。对大型结构件,如锅炉、飞机等,为便于运输和深入的观察分析,需将大型零件切割成小试样。常用的切割方法有砂轮切割、火焰切割、线切割和锯切等,对会产生高温的切割,切割位置应与裂纹保持一定的距离,并用适当的方法进行冷却,以免裂纹附近的材料组织、性能因受热发生变化,断面特征产生化学损伤。

(2) 断口分析 裂纹断口分析与断裂面断口分析的技术和方法均相同,适用于断裂面断口分析的方法和手段在裂纹断口分析中均可应用;两者的形貌特征和规律也相同。因此,裂纹的断口分析技术和方法可参考下面的断裂面断口分析部分。

2.4 裂纹综合诊断

通过对裂纹的宏、微观分析,可确定裂纹的部位、形态和裂纹源的位置,初步判断裂纹的形成时期和扩展途径,结合应力分析、制造工艺和使用条件及材料性能综合分析,可初步诊断出裂纹的性质及产生的原因。

(1) 裂纹的起始位置 裂纹的产生是应力作用的结果,其起始的位置取决于应力集中和材料强度两方面综合作用的结果。因此,零件结构形状上易引起应力集中的部位,如工件截面尺寸突变、厚薄不均、孔槽边缘和尖锐棱角处等;材料缺陷和内应力部位,往往是裂纹出现的部位。根据裂纹存在的部位和受力状态,可以初步判断裂纹产生的条件。

① 材质原因引起的裂纹 金属的表面缺陷,如夹砂、斑疤、划痕、折迭、氧化、脱碳和粗晶环等,以及金属的内部缺陷,如缩孔、气泡、疏松、偏析、夹杂物、白点、过热、过烧和发纹等,不仅本身直接破坏金属的连续性,降低材料的强度和韧性,而且往往在这些缺陷周围造成很大的应力集中,使得材料在很低的平均应力下产生裂纹。由金属的表面缺陷和内部缺陷为源的裂纹源处,一般可以找到作为裂纹源的缺陷特征,见图 10。如疲劳裂纹源处的砂眼、加工刀痕、锻造裂纹起始区的残余缩孔和淬火裂纹起始区的白点等。金属材料光滑表面上的疲劳裂纹多起源于驻留滑移带,而当材料表面或内部存在缺陷时,缺陷本身就成为裂纹源,所以具有缺陷(表面或内部)的金属材料往往具有低的疲劳强度(寿命)。

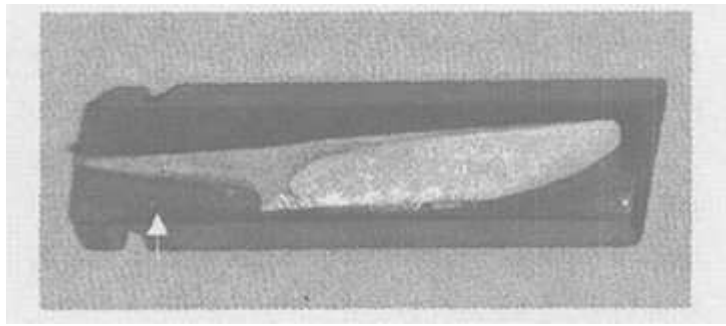


图 10 裂纹起源于锻造折叠(箭头所指为折叠)

②零件形状因素原因引起的裂纹 当零件由于某种原因,或者设计上的考虑不周,其几何形状上存在内外圆角、凸边或缺口时,在零件的制造和使用过程中,这些圆角、凸边或缺口的部位会产生应力集中,从而容易产生裂纹。对需进行淬火处理的零件,不但圆角、凸边或缺口的部位容易产生淬火裂纹,而且凡是截面尺寸相差大的部位,都可因为冷却速度的差异而产生高的组织应力,加之应力集中作用而形成淬火裂纹。在焊接件的应力集中处也可能产生焊接裂纹。在深拉或冷冲压时,由于总的变形程度过大、或零件的圆角过小、或材料的晶粒度不均匀,往往在圆角根部(变形程度最大)产生裂纹或开裂。

③受力状况不同引起的裂纹 除了金属材料的质量和零件的几何形状影响裂纹的起始位置外,零件的受力状况也对裂纹的起源位置有重要影响。如零件在形状设计合理和材料质量合格的情况下,裂纹将在应力最大处起始。如单向弯曲疲劳情况下,裂纹一般起源于受拉一侧的最大应力处;双向弯曲疲劳情况下,裂纹一般起源于受力两边的最大应力处。

(2) 裂纹的走向 从宏观上看,裂纹的走向是由应力原则和强度原则决定的。按照应力原则,裂纹应该沿着最大应力方向扩展。如金属脆性断裂、疲劳断裂和应力腐蚀断裂,裂纹的扩展方向一般都垂直于拉伸应力的方向。当韧性金属承受扭转载荷或金属在平面应力的情况下,裂纹的扩展方向一般平行于剪切应力的方向。如塔形轴疲劳情况下,在凹角处起源的疲劳裂纹,在与主应力垂直的方向上扩展,而并不与轴线相垂直,最后形成所谓碟形断口,裂纹的实际扩展方向与主应力的垂线基本垂直,即沿最大应力方向走向。但在局部区域可能有不重合的情况,那是由于材料缺陷引起的走向偏离。当裂纹按应力原则在某一方向的扩展不利时,就会按材料的强度原则来扩展。所谓强度原则,就是指裂纹沿着材料最小阻力路线,即材料的薄弱环节扩展的原则。材料内部的薄弱环节可使按应力原则扩展的裂纹途中突然转折。

在一般情况下,当材质比较均匀时,应力原则起主导作用,裂纹按应力原则扩展;而当材质存在明显的不均匀性时,裂纹按强度原则扩展,强度原则起主导作用。当应力原则和强度原则一致时,无疑裂纹将沿着一致的方向扩展。这就是存在于最大应力部位的缺陷对裂纹产生的影响很大的原因。

各种裂纹的形成原因很多,其形貌也各异。需要从裂纹的宏、微观形貌,源区位置,扩展途径,周围情况、末端的特征及制造、使用履历来综合分析确定裂纹的性质和形成原因。

图 11 是一飞机航炮固定座支臂在维护检查中发现的裂纹。该裂纹位于支臂外侧表面,与支臂圆弧基本平行,长约 65mm、宽约 1mm,局部有分支。宏观观察,可见裂缝内有漆层。

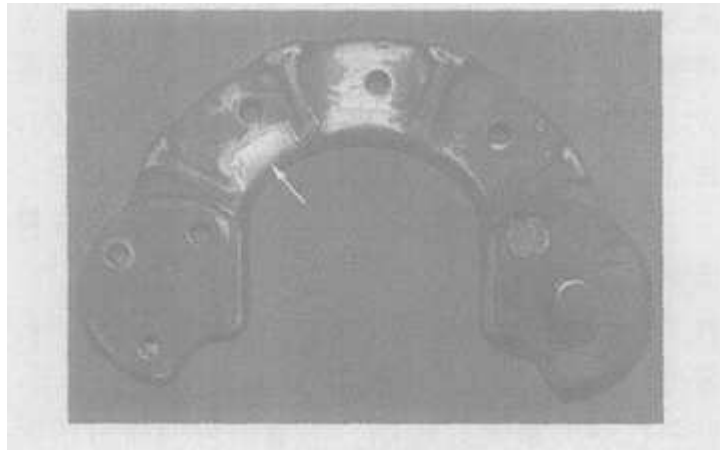


图 11 支臂外观

将裂纹打开,断口可分为原始裂纹段断口和人为打开段断口两部分,其中原始裂纹断口深约 3mm,颜色暗灰,与人为打开断口间有明显的、整齐的分界线,如图 12 所示。在电镜下观察,原始裂纹区断口基本是颗粒状的附着物,没有断裂形貌特征;微区成分分析,表面含有较高的氧元素。

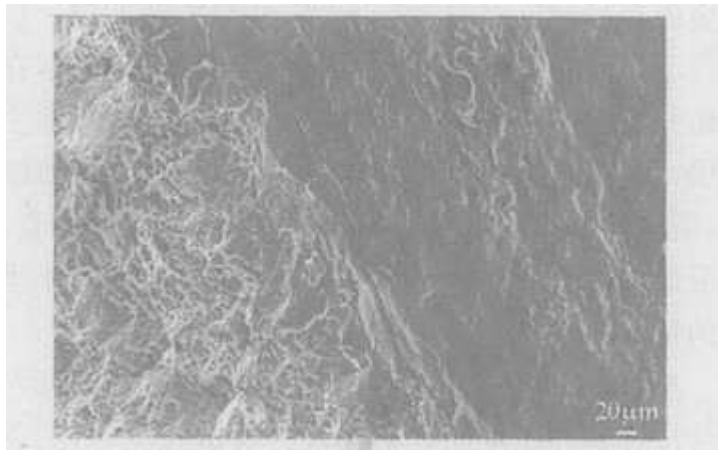


图 12 陈旧性裂纹与瞬断区边界形貌

沿支臂裂纹的横切面切取剖面制作金相样品,可见裂纹平直,与支臂表面约成 30° 角;裂纹两侧的金属变形流线与裂纹基本平行,见图 13。裂纹末端圆钝,周围金属变形流线围绕裂纹末端弯曲呈回流状,见图 14。

以上特征说明,该裂纹在制造过程中的涂漆前就已存在;是在模锻生产过程中产生的一种锻造缺陷——折叠,是金属在高温变形流动过程中,已氧化了的表层金属汇合在一起而形成的。

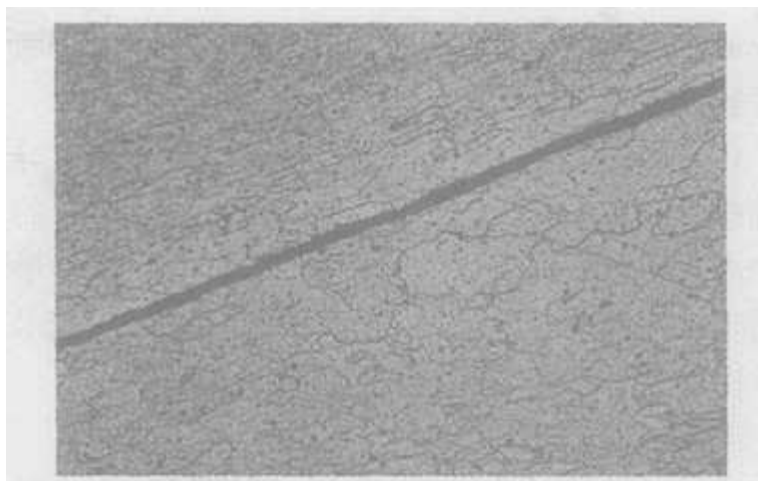


图 13 支臂裂纹两侧的金属流线

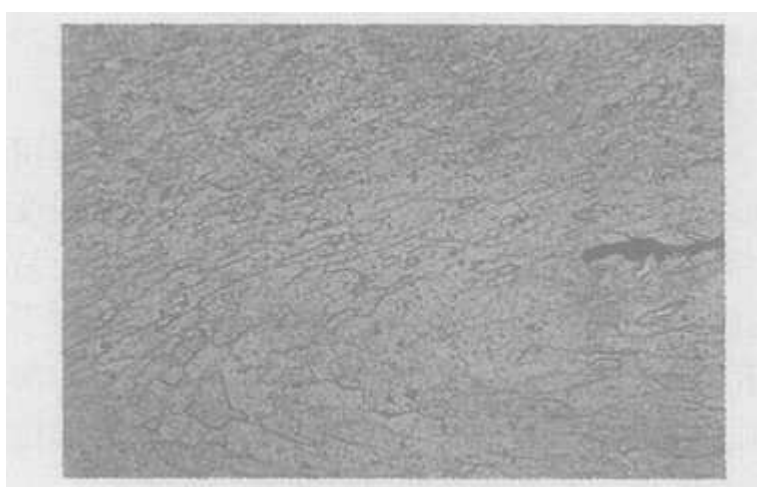


图 14 支臂裂纹尾部及其周围流线

失效分析技术(二)

傅国如 1, 2, 张 峥 1

(1. 北京航空航天大学材料科学与工程学院, 北京 100083; 2. 北京航空工程技术研究中心, 北京 100076)

3 断口分析技术

断口是断裂失效中两断裂分离面的简称。由于断口真实地记录了裂纹由萌生、扩展直至失稳断裂全过程的各种与断裂有关的信息。因此, 断口上的各种断裂信息是断裂力学、断裂化学和断裂物理等诸多内外因素综合作用的结果, 对断口进行定性和定量分析, 可为断裂失效模式的确定提供有力依据, 为断裂失效原因的诊断提供线索。

3.1 断口准备

断口准备的目的是为下一步的断口分析提供适于分析的断口。要求断口保存得尽量完整、特征原始; 尽量不产生二次、甚至三次损伤。对断口上附着的腐蚀介质或污染物, 还需进行适当清理。当失效件体积太大时, 还需分解或切割。总之, 在断口准备过程中, 要尽量保证断口(特别是关键断口、起始区断口)的原始特征不被破坏和污染。

对断口的清理应遵循以下基本原则:先判断后清理,先表面后内层,尽量采用物理方法清理而少用化学方法。常用的清洗方法有机械剥离法、化学腐蚀法、阴极电解法和真空蒸发法等,可根据断口材料特性和附着物的种类等选定。

对断口常用的保护方法有涂保护性涂料、密封于内置干燥剂的塑料袋或干燥皿中和浸泡在无水酒精溶液中等。

切割大块失效残骸件时,应先对断口进行宏观分析,确定首断件,然后进一步确定断裂的起始部位。切割前,先将需要分析的部位保护起来;切割时,尽量使用锯、切等不会产生高温的机械方法。需要使用火焰切割或砂轮切割等会产生高温的切割方法时,切口位置应离开需分析部位一定的距离,同时对切割区域进行冷却,以确保需重点分析部位不会因高温而产生二次损伤。

3.2 断口分析设备和技术

3.2.1 断口宏观分析设备和技术

宏观分析是指在小于 40 倍的条件下对断口进行观察判断的技术方法。主要手段是人的肉眼、普通放大镜和体式显微镜。

3.2.2 断口微观诊断仪器设备和技术

断口的微观分析设备主要有金相显微镜、扫描电子显微镜、透射电子显微镜和 X 射线能谱仪及波谱仪等。其中三种显微镜主要用来进行形貌观察,两种谱仪主要用来进行微区成分分析。

扫描电子显微镜由于其具有制样简单、使用方便、可直接观察大样品(如 100mm×100mm)、并具有景深大、分辨率较高、放大倍数范围宽、可连续调节、可进行化学成分和晶体取向测定等一系列优点,在失效分析中得到了广泛的应用。用扫描电镜进行断口形貌观察时,一般遵循以下基本技术原则:

①首先对断口做低倍观察,以全面了解和掌握断口的整体形貌和特征,并确定重点观察部位。

②在整体观察的基础上,找出断裂起始区,并对断裂源区进行重点分析,包括源区的位置、形貌、特征、微区成分、材质冶金缺陷、源区附近的加工刀痕及外物损伤痕迹等。

③对断裂过程不同阶段的形貌特征要逐一加以观察,找出各区断裂形貌的共性与个性。

④断裂特征的识别。在断口观察过程中,发现、识别和表征断裂形貌特征是断口分析的关键。在观察未知断口时,往往是和已知的断裂形貌加以比较来进行识别。各种材料在不同外界条件下的断裂机制不同,留在断口上的形貌特征也不同。

⑤扫描电镜断口照片的获得。一般一个断口的观察结果要用如下几部分的照片来表述:断口的全貌照片及断裂源区照片和扩展区、瞬断区的照片。

⑥利用背散射电子像观察,可观察到第二相和夹杂物等对裂纹萌生与扩展的影响。

X 射线能谱仪的最大优点是不损伤被测件表面,可同时适用于光滑表面和粗糙断口表面的元素分析,可以分析某一区域的元素平均成分和样品表面某一区域某一元素的分布情况(面分布),也可对某几种元素进行沿指定线路的线分布分析。是目前失效分析中应用最广泛的微区成分分析仪器。

在进行微区成分分析时应注意,微区成分分析的结果只能代表分析部位的局部成分,而不能代表样品宏观总体的成分。X 射线微区成分定量分析的准确性和样品的制备有关。由于微区成分分析的灵敏度和精确度的限制,其分析结果不能代替其它分析方法所做的结果。

断口分析一般包括宏观分析和微观分析两个方面。宏观分析可有效地确定断裂起源和扩展方向,初步判断断口的断裂性质;微观分析可有效地确定断裂类型及机理。宏观分析和微观分析是不可分割的整体,两者不能互相取代,只能互相补充。

3.3 断口形貌的宏观诊断技术和方法

3.3.1 断口宏观分析的任务和内容

断口宏观分析可为断口的微观分析和其它分析工作指明方向,是断裂失效分析中的关键环节。其主要任务是,判断断口的基本特征、变形情况和裂纹的宏观走向;确定断裂的类型和方式,为断裂失效模式诊断提供依据;寻找断裂起源区和断裂扩展方向;估算断裂失效应力集中的程度和名义应力的高低(疲劳断口);观察断裂源区有无宏观缺陷等。断口宏观分析需要解决如下主要问题:断口的平直情况和断口的主要特征形貌;断口的颜色(氧化色、腐蚀产物颜色、夹杂物颜色和光亮情况等);断口与主正应力(或主切应力)方向的关系;断口与成形方向(轧制方向或流线方向)的关系。以上四方面是断口宏观诊断的主要依据,因此,断口宏观诊断应包括以下六个方面的内容:①断裂的位置及其结构特征和周围的工作环境;②断裂位置及其附近的变形程度;③断裂区域的痕迹特征;④断裂源的位置、特征及裂纹的走向;⑤断口的宏观形貌特征;⑥断口的颜色及附着物等。

3.3.2 断口的宏观形貌特征

对韧性金属材料一次过载造成的延性断裂,宏观上的基本特征通常表现为三个特征区,即纤维区、放射区和剪切唇区。这三个特征区是断口的三要素。图 15 是光滑拉伸断口的三要素示意图,其中纤维区一般位于断口的中央,是断裂的形核区,其中心或放射条纹收敛处为裂源位置,它呈粗糙纤维状,其宏观平面与拉伸应力相垂直,属正断型断裂。放射区紧接纤维区,是裂纹由缓慢扩展向快速扩展的不稳定扩展转化的标志,其特征是放射线花样,放射线发散的方向为裂纹扩展方向。对板材零件,放射区的宏观特征为人字条纹,其反方向为裂纹的扩展方向。剪切唇区是断裂过程最后阶段出现的断裂特征区,其表面较光滑,与拉伸应力轴约呈 45° 角,属切断型断裂,是在平面应力状态下发生的快速不稳定扩展。

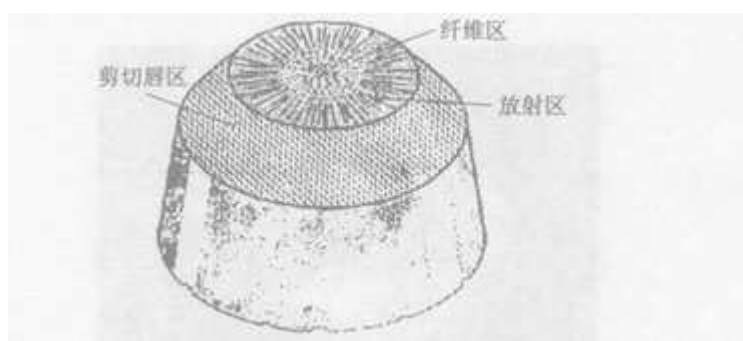


图 15 光滑圆试样拉伸断口三要素示意图

需要注意的是,不是所有的一次过载断口均具有断口三要素特征,有时只表现出两个要素特征。零件形状对断口三要素有很大影响。

按断口上的宏观塑性变形不同,断口宏观上可分为延性断裂断口和脆性断裂断口。按断裂方式的不同,断口宏观上可分为正断断口和切断断口。

在实际的宏观失效分析中,一般将断口分为延性断裂断口、脆性断裂断口和疲劳断裂断口。表 1 列出了这三种典型断口的宏观形貌特征,根据这些特征,可诊断出断口的宏观类型。图 16 为金属光滑圆棒试样的拉伸断口形貌,呈杯锥状,为典型的

金属延性断裂断口形貌。图 17 断口上具有疲劳断口的三个典型特征区, 疲劳弧线清晰, 疲劳台阶明显, 为典型的金属疲劳断口。

表 1 3 种典型断口的宏观形貌特征 ^[9]						
Tab. 1 Macro-appearance characteristic of three kinds typical fracture						
断口特征	延性断裂断口		脆性断裂断口		疲劳断裂断口	
	切断型	正断型	缺口脆性	低温脆性	低周疲劳	高周疲劳
色泽	较弱的金属光泽	灰色	白亮色, 接近金属光泽	结晶状金属光泽	白亮色	灰黑色
断面粗糙度	较光滑	粗糙锯齿状	极粗糙	粗糙	较光滑	光滑
放射线	一般无, 但高碳钢中有时会出现	无	明显	不太明显	较不明显, 板材有近似人字纹	明显, 且细腻
弧形线	无	无	无	无	一般可见疲劳弧线, 但在恒载时无	一般可见疲劳弧线, 应力幅变化越大越明显
与主应力的交角	约 45°	约 90°	约 90°	约 90°	裂纹扩展速率小时接近 90° (K_{I1}), 大时接近 45° (K_{II})	约 90°

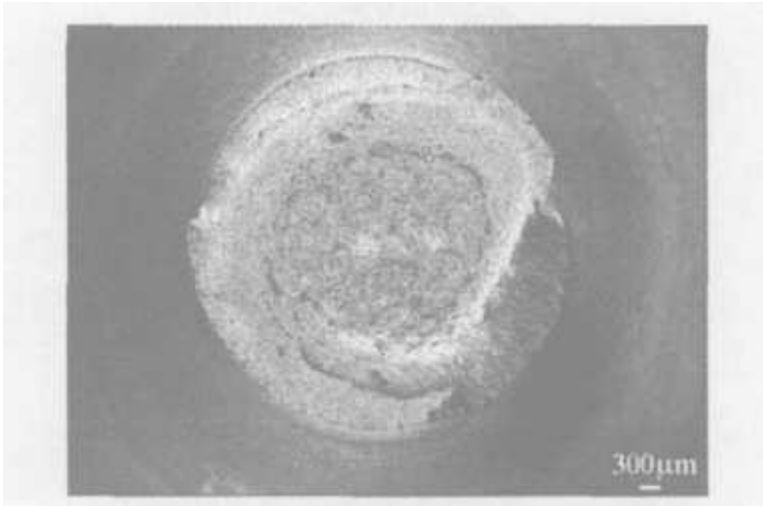


图 16 光滑试样拉伸断口形貌



图 17 疲劳断口的宏观形貌

3.3.3 断口宏观分析技术和方法

对断口进行宏观观察时,应注意观察的角度和照明的角度,自然光是最好的照明源,观察时应从不同的角度进行观察。宏观断口分析的第一步是用肉眼观察断口形貌特征及失效件的全貌,包括断口的颜色、变形程度和断口之外的损伤痕迹等,然后对主要特征区用放大镜或体式显微镜等进行进一步的观察,确定重点分析的部位。

在分析过程中,要特别注意以下几个特征:

①断口上是否存在放射花样及人字纹花样。这种特征表征裂纹的扩展是不稳定的或快速的,沿着放射方向的逆向或人字纹尖顶可找到裂纹源。

②断口上是否存在弧形迹线。这种特征是裂纹在扩展过程中,因应力状态变化、断裂方向变化、环境介质影响及裂纹扩展速率明显变化等在断口上留下的痕迹,如图 18 所示断口上的疲劳弧形等。

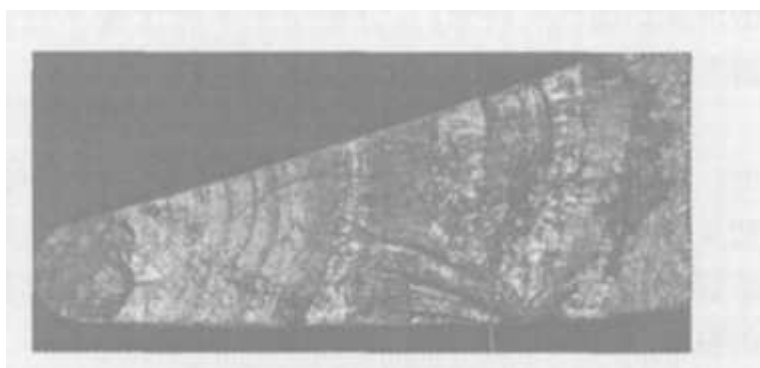


图 18 航空发动机涡轮叶片断口宏观形貌

③断口的粗糙度。一般说来,断口越粗糙,即表征断口特征的花样越粗大,则剪切断裂所占的比例越大;如果断口细平,多光泽,或者花样越细,则晶间断裂或解理断裂所起的作用越大。

④断面的光泽与色彩。如准解理和解理断裂的金属断口在阳光下转动断面进行观察时常可看到闪闪发光的小刻面。

⑤断面与最大正应力的交角(倾斜角)。不同的应力状态、不同的材料及外界环境,断口与最大正应力的夹角不同。

⑥判定特征区的划分、分布和面积大小等。

⑦材料缺陷在断口上所呈现的特征。若材料内部存在缺陷,则缺陷附近存在应力集中,因而在断口上留下缺陷的痕迹。

确定断裂起源的位置是断口宏观分析的一个重要任务。在一般情况下,从宏观特征来说,断裂的起始位置一般位于断口上的以下位置:纤维区的中心;放射花样的收敛处;人字纹的最尖顶处;断口的平坦区内;无明显塑性变形区或无剪切唇形貌特征区;疲劳弧形的最小半径处;腐蚀氧化最严重的部位;台阶高差最大处。

当断裂源的位置确定后,其裂纹扩展的宏观方向随之确定。一般裂纹的宏观扩展方向与断口的以下特征方向相同:裂纹源区指向最后断裂区的方向;放射线发散的方向;纤维区指向剪切唇区的方向;与疲劳弧线相垂直的放射状条纹分散方向;人字纹的人字张开的方向;断口的平坦区指向斜断口的方向;无塑性变形或塑性变形小的区域指向变形大的区域的方向;台阶高差减小的方向;氧化或腐蚀减轻的方向。

3.4 断口微观分析技术和方法

3.4.1 断口微观分析的任务和内容

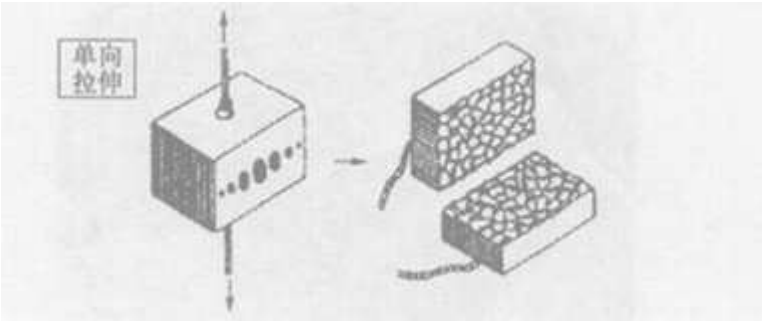
断口的微观分析包括微观形貌分析和微区成分及结构分析。具体内容有:断口周围的塑性变形大小或有无;断口的边缘锐利情况;断口与零件形状或应力集中的情况;断口各特征形貌面积的比例;断口与晶面和晶向之间的关系;断口与晶界的关系;断口与显微组织的关系;断裂源区的情况;断口的化学成分或杂质环境元素的分布情况;断口上二次裂纹的有无或多少及分布情况。

3.4.2 断口的微观形貌特征

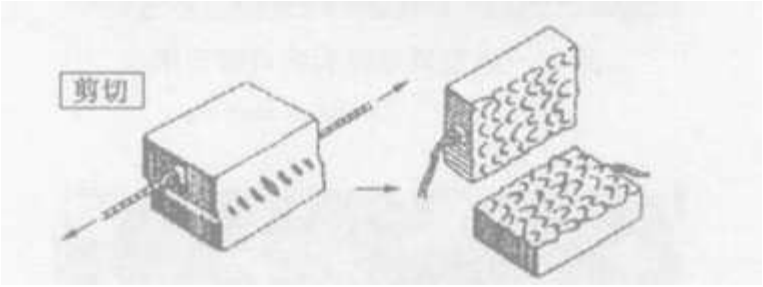
断口上常见的微观特征有韧窝、滑移特征、解理特征、准解理特征、沿晶断裂特征和疲劳断裂特征等断裂特征花样。

① 韧窝特征

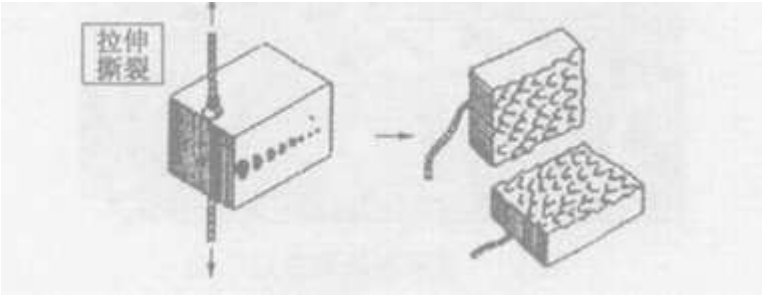
金属延性断裂的主要微观特征是,材料在微区范围内塑性变形产生的显微孔洞经形核、长大、聚集直至最后相互连接而导致断裂后在断口表面上所留下的痕迹。由于其它断裂模式上也可观察到韧窝,因此不能把韧窝特征作为延性断裂的充分判据,而只能作为必要判据来应用。零件受力状态不同,韧窝可有不同的形状,即韧窝的形状可反映零件的受力状态。韧窝的最基本形态有等轴韧窝、剪切韧窝和撕裂韧窝三种,如图 19 所示。



(a) 等轴韧窝



(b) 剪切韧窝



(c) 撕裂韧窝

图 19 韧窝的三种基本形态示意图

②滑移特征

属于金属延性断裂的一种微观特征,包括滑移线、滑移带、蛇形花样和连波花样,是在正应力作用下,金属沿滑移面滑移分离的主要微观特征。

③解理特征

金属在正应力作用下,由于原子结合键破坏而造成的沿一定晶体学平面(解理面)快速分离的过程称为解理断裂。解理断裂属于脆性断裂的一种,解理面通常是表面能量最小的晶面,不同的晶体结构具有不同的解理面;面心立方晶系的金属一般不发生解理断裂。解理断裂区宏观上没有明显的塑性变形,在太阳光下转动时可观察到反光的小刻面,属于脆性断裂。严格意义上说,解理断裂面上是没有任何解理特征花样的,但在实际材料中,由于各种因素的作用,解理面局部均会发生微观的塑性变形,从而形成解理台阶、河流花样、舌状花样、鱼骨状花样、扇形花样及瓦纳线等特征。图 20 是解理断口上常见的典型微观形貌。

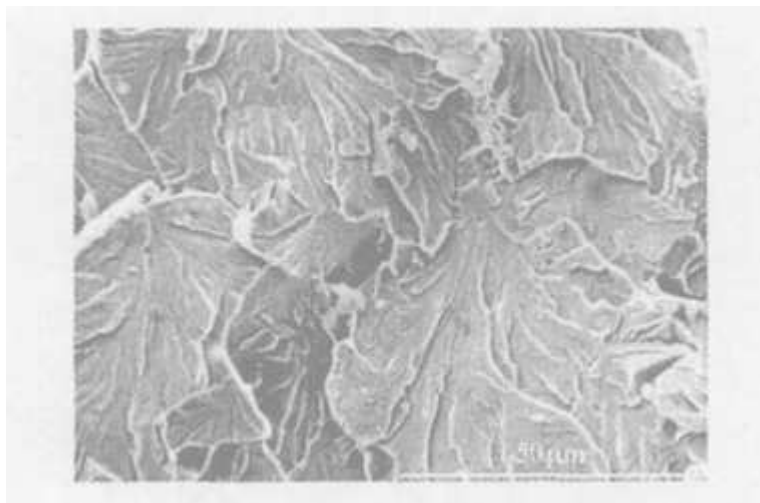


图 20 典型解理断裂断口特征形貌

④准解理断裂特征

介于解理断裂与延性断裂间的一种过渡断裂形式。宏观上无明显塑性变形或变形较小,断口平整,具有脆性断裂特征;微观形貌有河流花样、舌状花样及韧窝与撕裂棱等,如图 21 所示。

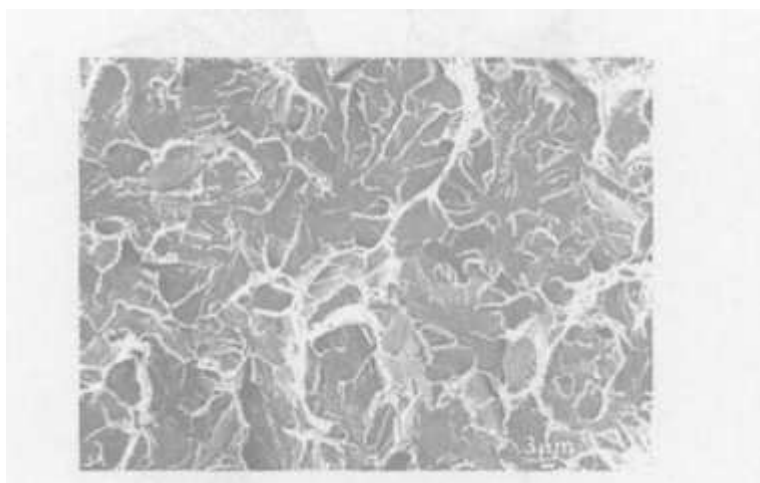


图 21 准解理断裂微观形貌

⑤沿晶断裂特征

属于脆性断裂的一种, 又称为晶间断裂, 是多晶材料沿晶界面发生断裂的现象, 如图 22 所示。可分为沿晶韧窝断裂和沿晶脆性光面断裂。沿晶面上具有线痕(鸡爪痕)特征的沿晶断裂是氢脆断裂的典型形貌, 如图 23 所示;沿晶面上具有核桃纹特征的沿晶断裂是应力腐蚀断裂的典型形貌;液体金属致脆的沿晶面上一般可看到致脆的金属残留痕迹。

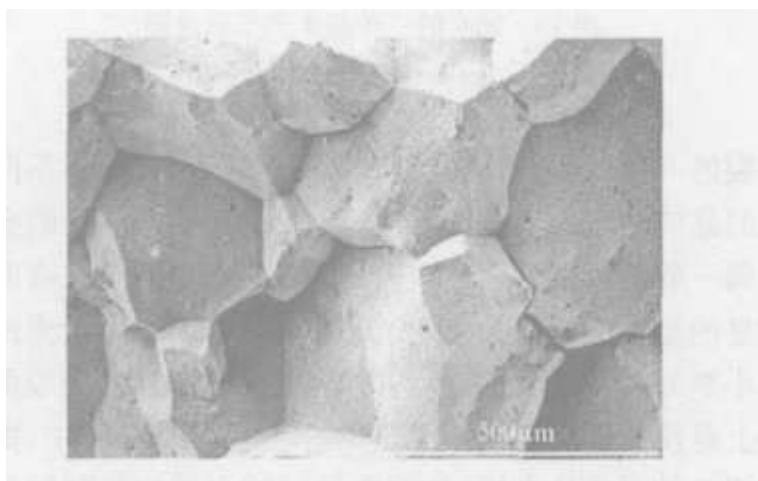


图 22 沿晶断裂微观形貌

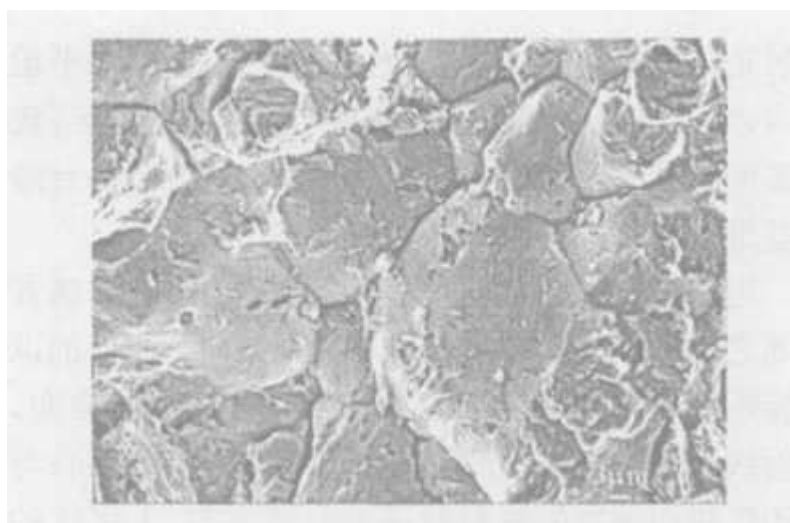


图 23 沿晶面上线痕特征

⑥疲劳断裂特征

疲劳断裂过程可分为疲劳裂纹萌生、稳定扩展和失稳扩展三个阶段。疲劳条带是疲劳裂纹扩展第二阶段的最重要的显微特征, 也是疲劳断裂断口的基本形貌特征;它是判断断口为疲劳断裂的充分判据, 但不是必要判据。一般韧性材料容易形成疲劳条带, 而脆性材料则比较困难。轮胎花样、排列规则的平行韧窝带、平行的多条二次裂纹带等也是疲劳裂纹扩展第二阶段常见的微观形貌特征。图 24 是典型的疲劳条带形貌。

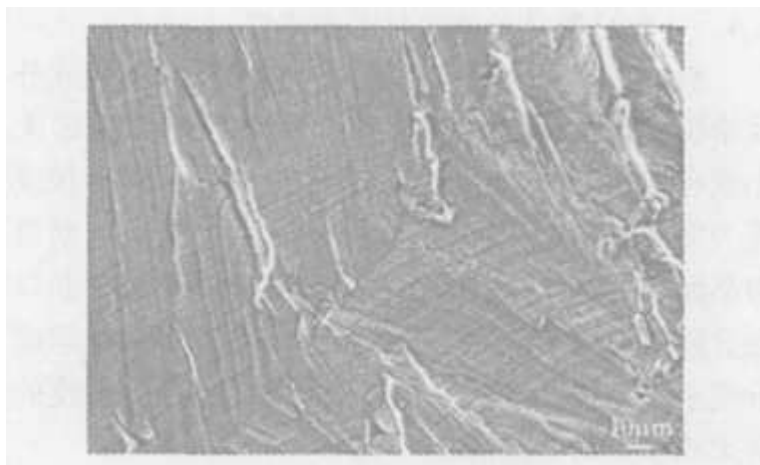


图 24 典型疲劳条带

3.4.3 断口微观诊断技术

断口的微观观察一般是借助扫描电子显微镜和透射电子显微镜等工具来完成的。由于放大倍数较高,在电子显微镜下一般难以准确确定观察的位置。因此应在微观分析之前,熟练掌握断口的宏观形貌特征,并以此来指导微观观察。

断口的微区成分分析一般是根据需要来选择进行的。选择进行成分分析的微区一般有:微观形貌异常区域、裂纹起始区(源区)、断口上覆盖有外来物特征和腐蚀产物的区域。对基体成分进行定性判断时,应选择没有污染的瞬断区进行分析。进行微区成分分析时,应根据特征区域的大小,合理地选择分析区域大小,如面区域或点区域。为了分析某一元素或一些元素在某一区域的分布情况,可进行元素的面分布分析;为了确定某一元素沿某一特征线的含量变化情况,可进行元素的线分布分析。

3.5 断口定量诊断技术和方法

在失效分析中,有时不仅需要对接口进行定性诊断,而且需要对接口进行定量分析,以推断材料性能及导致断裂失效的一些基本参数。同时,断口的定量分析也可确定零件的安全寿命与检修周期提供科学依据。断口定性诊断是定量分析的前提,而定量分析则是断口定性分析的深入和发展。

断口定量分析涉及的领域非常广,内容很丰富。金属断口的定量分析主要包括断口表面的成分、结构和形貌特征等定量参数的描述和表征。

3.5.1 断口表面的成分分析

断口表面的成分定量分析是指对接口表面的平均化学成分、微区成分、元素的面分布及线分布、元素沿深度的变化、夹杂物及其它缺陷的化学元素比等参数进行分析和表征。这类分析仪器主要有俄歇电子谱仪、离子探针、电子探针、X射线能谱仪和X射线波谱仪等。

3.5.2 断口表面结构分析

断口表面结构定量分析的对象是断口所在面的晶面指数、断口表面微区(夹杂、第二相等)的结构和残余应力。通过测量点阵参数,可解决金属学及热处理中如固溶体的类型、宏观应力的测定和表面层的分析等问题。通过物相分析可确定混合物

中各个物相的类型、结构及其含量。通过应力测定可确定应力的类型(宏观应力、微观应力和超微观应力)和大小。目前,断口表面结构分析的主要仪器是 X 射线衍射仪。

3.5.3 断口形貌特征的定量分析[9]

断口形貌特征的定量分析是对断口上的各种花样,包括各种特征花样区域的相对大小及材料组织、结构、性能及导致发生断裂的力学条件与环境条件之间的相互关系进行分析,以反推裂纹扩展的过程。

目前断口形貌定量研究进行得较好的是疲劳断口的定量分析,特别是实验室已知条件下的疲劳断口的定量分析,已成功地应用于低周疲劳寿命估算、恒载与谱载下的疲劳寿命估算、起源于先天性裂纹或缺陷的高周疲劳寿命估算、结构原始疲劳质量反推和疲劳应力反推等方面。

疲劳断口定量分析利用的主要参量是断口上的宏观疲劳弧线和微观疲劳条带。理论依据是宏观上的每一条疲劳弧线相当于裂纹扩展过程中载荷或应变发生一次大的改变,如发动机的一次起动循环、飞机的一次飞行等载荷谱的加载和环境条件的改变;微观上的每一疲劳条带则相当于载荷或应变的一次循环,如发动机叶片振动一次等。准确地确定疲劳特征与载荷历程之间的对应关系是断口定量分析的关键之一。另一关键是确定裂纹扩展速率与裂纹长度之间的变化规律。

目前高周疲劳断口寿命反推估算的基础是 Paris 公式,其基本形式是:

$$da/dN=c(\Delta K)^m(6.2-3)$$

式中 da/dN ——裂纹扩展速率

ΔK ——应力强度因子范围($\Delta K=\Delta K_{\max}-\Delta K_{\min}$)

c, m ——常数

严格地说,该公式只对小范围屈服有效,这时 K 的计算可以接受,并为大多数实验结果所证实就可以应用。虽然后人在他的基础上发展了许多修正公式,但增加了许多参数,使参数确定需要大量的试验,在实际的失效分析中均难以应用。

失效分析与安全

钟群鹏

(北京航空航天大学材料科学与工程学院, 北京 100083)

摘 要:扼要阐述了失效分析相关名词定义,讨论了失效、失效分析预测预防的特点和属性;介绍了安全的概念和安全问题的重要性,并且指出了我国安全生产现状和面临的严峻形势。在此基础上,论证了失效分析预测预防和安全工作之间相互需求的重要关系。

关键词:失效分析; 预测预防; 安全; 安全生产

1 失效分析

(1) 失效及失效研究的内涵

机电元器件(或零件)、设备、装置或系统统称为机电产品。机电产品丧失规定功能的现象称为失效,对可修复产品通常也称为故障。产品是否失效,主要是在使用(包括检验)中考察。在失效研究中,针对具体失效事件的技术活动一般可分为三

个层次:失效诊断、失效预测和失效预防。其中失效诊断是失效研究的核心,失效预测和预防则是失效研究的目的。失效诊断是失效发生以后的研究,失效预测和预防则是事前的。

(2) 失效分析、事故分析、废品分析和状态诊断

失效分析是对进入商品流通领域后发生故障的分析;对导致产品无法修复的严重失效的分析也称为事故分析;对进入商品流通领域前发生的质量问题的分析则称为废品分析。失效分析、事故分析和废品分析均是指事后的分析,三种分析所采用的方法基本一致。状态诊断则是针对可能的主要失效模式、原因和机理的在线、适时和动态的诊断。

(3) 失效模式、原因和机理诊断

失效研究的首要任务之一就是失效诊断。失效诊断是失效研究的基础,其准确与否决定了失效研究的成功与否。失效诊断的目的是要诊断出失效的模式、原因和机理,从而为采取预防措施指明方向和提供依据。失效模式是指失效的表现形式,一般可理解为失效的类型。失效模式诊断是失效研究首当其冲的重要问题,具有“定向”的意义。失效模式常可分为一级失效模式、二级失效模式和三级失效模式。一般要求诊断到“二级”甚至“三级”。失效模式诊断得越具体和越准确,对失效原因诊断的准确性和预防措施制定的针对性就越有指导价值。失效模式诊断一般从现场残骸分析(失效件断口、裂纹、痕迹和变形等)、零件制造工艺、显微组织和力学性能分析、结构和受力分析、工况和使用环境分析及失效模拟等方面入手,其中首断件(肇事件)的残骸分析是最重要的诊断依据,也是目前使用得最多和最好的一个方面。

表 1 失效信息与失效模式、原因和机理的诊断系统									
Tab. 1 Relationship between failure characteristics and diagnosis system of failure mode, reason, mechanism									
项目	失 效 信 息 名 称				主要失效模式和特征 ¹⁾				
					1	2	3	4	5
裂纹 信息	裂纹起源 位置和扩展 方向	宏 观	与零件应 力、焊缝的关 系	①在应力集中处(R处)	-	-	-	✓	✓
				②在焊缝区	-	-	-	✓	-
				③非应力集中区	-	-	-	-	-
		与接触介质 的关系	与接触介质 的关系	①在介质接触的表面	-	-	-	-	✓
				②在点蚀(磨蚀)坑处	-	-	-	-	✓
				③与接触介质无关	✓	-	-	-	-
		与主正应力 或主切应力方 向的关系	与主正应力 或主切应力方 向的关系	①与主正应力方向垂直	✓	-	-	-	✓
				②与主切应力方向平行	-	-	-	✓	-
				③与主正应力、主切应力无关	-	-	-	-	-
		微 观	与显微组织 的关系	①在夹杂物处	-	-	✓	-	✓
				②在某一相组织处	-	✓	-	-	-
				③与显微组织无关	-	✓	-	-	-
		与晶粒边界 的关系	与晶粒边界 的关系	①在晶粒边界或相界处	-	-	-	-	✓
				②在晶内或相内	-	-	-	✓	✓
				③既在晶界也在晶内处	-	-	-	-	-
		与晶面晶向 的关系	与晶面晶向 的关系	①在某一特定的晶面或晶向	✓	-	-	-	-
				②非特定的晶面、晶向	-	-	-	✓	-
				③混合情况	✓	-	-	-	✓

续表 1

项目		失效信息名称		主要失效模式和特征 ¹⁾									
				1	2	3	4	5	6	7	8		
裂纹分布和形貌	宏观	按点、线分布情况	①以点放射分布	-	-	-	-	-	-	-	-		
			②沿线分布	✓	-	-	-	-	-	-	-		
			③不规则分布	✓	-	-	-	✓	-	✓	✓		
		数量和平直情况	①单条、“平直”状	-	-	-	-	-	-	-	-		
			②分叉或台阶或锯齿状	-	-	✓	-	✓	✓	-	✓		
			③网状或龟裂形貌	-	✓	-	-	-	-	-	-		
		啮合和间隙情况	①啮合好、间隙小、裂尖尖锐	✓	✓	-	-	✓	-	✓	✓		
			②啮合差、间隙大、裂尖圆钝	-	-	✓	-	-	-	-	-		
微观		与裂纹起源位置和扩展方向的微观栏相同											
断口信息	断口的形貌和特征	宏观	断口附近的残留塑性变形	①塑性变形大、断口凹凸不平	-	-	-	✓	-	-	-	-	
				②塑性变形小、断口比较平直	✓	-	-	-	✓	✓	✓	✓	
			断口的颜色	①断口为本色	✓	-	-	-	✓	-	-	-	
				②断口上有氧化或腐蚀产物的颜色	-	✓	-	-	✓	✓	✓	✓	
			断口形貌特征	①纤维状(鹅毛绒状)	-	-	-	✓	-	-	-	-	
				②结晶状(颗粒状)	-	✓	✓	-	-	-	✓	-	
				③放射状(人字纹)	✓	-	-	-	-	-	-	-	
				④贝壳状(弧线状)	-	-	-	-	✓	✓	-	-	
	微观	断口的形貌特征	①切窝(撕裂棱、微孔等)	-	-	-	✓	-	-	-	✓		
			②解理(河流、扇形、台阶等)	✓	-	-	-	-	-	-	-		
			③沿晶(岩石、冰糖块等)	-	✓	✓	-	-	-	✓	-		
			④条带(辉纹、“轮胎”痕迹等)	-	-	-	-	✓	✓	-	-		
			⑤“鸡爪状”形貌	-	-	-	-	-	-	✓	-		
			⑥腐蚀产物(氧化物、腐蚀产物、泥纹等)	-	-	-	-	-	✓	-	-		
			⑦其它形貌	-	-	-	-	-	-	-	-		
			腐蚀信息	材料与腐蚀介质和腐蚀特征形貌	材料与腐蚀介质	①碳钢及合金钢在 HCl、碱、硝酸盐、HNO ₃ 、海岸大气、工业大气、H ₂ S 和 H ₂ SO ₄ + HNO ₃ 等介质中	-	-	-	-	-	-	✓
②铬不锈钢在 NaCl、氧化物、氟化物、溴化物、碘化物、HCl、海岸大气、工业大气、水及蒸汽、H ₂ S 等介质中	-	-				-	-	-	-	✓	-		
③奥氏体不锈钢在氟化物、氯化物、碱、海岸大气等介质中	-	-				-	-	-	-	✓	-		
④奥氏体不锈钢在 FeCl ₂ 、FeCl ₃ 、H ₂ SO ₄ 和碱等介质中	-	-				-	-	-	-	-	✓		
腐蚀形貌特征	⑤材料上有腐蚀性的介质	-				-	-	-	-	✓	-	-	
	①腐蚀产物附着、剥离	-				-	-	-	-	-	✓	✓	
	②表面颜色发暗、敲击声音频率降低	-				-	-	-	-	✓	-	-	
	③腐蚀坑	-				-	-	-	-	-	-	-	
应力信息	应力性质和特征		①静载荷($\sigma > \sigma_s$ 或 $K_{I1} > K_{Ic}$)	-	✓	✓	✓	-	-	✓	✓		
			②交变载荷($\sigma > \sigma_{-1}$)	-	-	-	-	✓	✓	-	-		
			③冲击载荷($\sigma > \sigma_c$ 或 $K_{I1} > K_{Id}$)	✓	-	-	-	-	-	-	-		

注：1) 该栏目中 1 为脆性(解理)断裂,2 为脆性(沿晶)断裂,3 为脆性(沿夹杂物)断裂,4 为塑性断裂,5 为疲劳断裂,6 为腐蚀疲劳断裂,7 为应力腐蚀(沿晶)断裂,8 为应力腐蚀(穿晶)断裂;✓表示存在相对应的失效模式和特征。

失效原因是指酿成失效事故的直接关键因素。失效原因也可分为一级、二级和三级失效原因。一级失效原因一般指酿成

该失效事故的首先失效件(肇事件)失效的直接关键因素处于投入使用过程中的哪个阶段或工序(如设计原因、制造原因、使用原因和环境原因等);二级失效原因是指一级失效原因中的直接关键原因。失效原因的诊断是失效研究的核心和关键。失效机理的诊断是指对失效的内在本质、必然性和规律性的研究,是对失效性质认识的理论升华和提高。失效机理是内因和外因共同作用而最终导致失效事件发生的热力学、动力学和机构学,即失效内在的必然性和固有的规律性。

(4) 失效分析、预测和预防

失效分析是分析诊断失效的模式、原因和机理,研究采取补救、预测和预防措施的技术活动和管理活动。失效预测可以分为安全状况预测、剩余寿命预测和累积失效概率(可靠度)预测等三个层次的内容。失效预防则应包括失效的工程预防、失效(或安全)法规或标准的制定或修改,以及失效(或安全)数据库和专家系统的建立和应用。

(5) 失效学

研究机电产品失效的诊断、预测和预防理论及技术和方法的交叉或综合的分支学科。失效学是一个正在发展中的新兴学科,由失效诊断学、失效预测学和失效预防学三部分组成。失效学的实践基础是对大量的失效事故模式、原因和机理的定性、定量的分析诊断和随后行之有效的预测预防的工程实践经验的积累和总结;失效学的技术和方法基础是现代检测仪器,可靠性技术和工程方法;失效学的理论基础是近代材料学、力学和化学对断裂失效、腐蚀失效、磨损失效及其混合型的失效模式和机理的深入研究。

(6) 失效模式、原因和机理的诊断

与失效有关的失效对象、失效现象和失效环境统称为失效信息。表1列出了5大类16项共52种失效信息。每一种失效信息都是失效的一个特征,反映影响失效的某个因素或条件;综合几种失效信息可以诊断出失效的模式,进而推断出失效的原因和机理。反之,也可认为某一特定的失效模式、原因和机理总要表现出一些相应的失效信息(特征)。因此,可以建立通过失效事件本身反映出来的失效信息来诊断失效模式、原因和机理的失效诊断系统,帮助进行失效研究。

2 安全

无危则安,无损则全。“安全”顾名思义,指没有危险,不受威胁,不出事故,没有受伤,完整无损,平安健康。安全的反义词是灾害。灾害是对人类生命、财产和生存条件造成危害性后果的各种变异现象的总称。

从科学的含义上看,“安全”可以认为是一种状态,是指满足人和物不受损伤、身心健康和完整完满的一种环境、物态和状态;也有人认为,“安全”是一种能力,是指人类对自身利益——包括生命、健康、财产、资源、生存空间、信息、无形资产、商业机会、传统、文化、社会结构、运行机制和秩序等的捍卫、维护和控制的能力。将上述“物态论”和“能力论”相结合,安全是通过“能力”达到的一种“状态”。

安全的内涵和外延可以有狭义的(传统的)和广义的(非传统的)安全之分:狭义的安全(又可称为传统的安全)包括国家安全(即国防安全)、社会安全和公共安全。国家安全是指在国家、民族和领土层面上的安全,侧重于在国家和民族之间的冲突和对抗中捍卫国家利益问题;社会安全是指社会秩序和运行机制层面的安全,侧重于社会犯罪、破坏和威胁中维护社会利益问题;公共安全是指在生产经营层面上的安全,侧重于对安全生产事故的控制问题。广义的(非传统的)安全是人类进入21世纪后,由于社会、经济及科学技术的发展引发的新的安全问题,包括环境安全、技术安全、城市安全和经济安全等。其中环

境安全又可分为生态、人口、资源(能源、土地、水资源和矿产) 和气候等相关的安全问题, 环境安全的本质是由于经济高速发展引发的人与自然不能和谐发展的问題; 技术安全是指新技术和新产品的出现, 包括生物技术、基因技术、新的化工产品大型工程给人和自然构成的风险和威胁; 城市安全是由于城市规模和生产的集约化发展带来的突出的安全问题; 而经济安全则是由于世界经济的一体化, 使得社会经济的关联性、依赖型和“脆弱”性大大的增加带来的附加的安全问题, 例如动力安全(核安全)、信息安全和金融安全等。

鉴于安全的内涵及其外延不断的深化和扩大, 安全的概念成为一个动态的、发展的, 带有全局性、关键性和战略性的问题, 安全与社会经济发展之间的关系越来越紧密依赖和互为制约, 因此与安全有关的安全文化、安全科学、安全技术、安全管理、安全经济和安全伦理等也将应运而生和蓬勃发展, 其重要性也日益突出, 安全不再是人类被动的追求目标状态, 而且将对经济社会和政治发展起反转的促进作用。

建国以来, 我国安全生产取得了很大的进步。特别是近几年来, 我国在安全生产的治理和整顿方面成绩显著, 安全生产状况虽好于前几年, 但安全形势仍然十分严峻, 发展趋势也不容盲目乐观。

我国安全生产的现状是: ①道路交通事故伤亡人数呈逐年上升趋势; ②重大火灾隐患依然严重存在; ③工矿企业事故发生频率和死亡人数仍然居高不下; ④职业危害严重, 从1998年来呈现回升趋势; ⑤中小企业的安全生产成为薄弱环节。

我国安全生产的形势是: ①传统的安全生产管理模式面临挑战; ②经济高速发展与安全生产基础薄弱的矛盾更加尖锐; ③西部大开发中的安全生产问题将日益突出; ④经济高速发展与“安全风险”转嫁; ⑤加入WTO之后挑战和机遇并存。

我国安全生产现状和形势如此严峻, 究其原因是因为我国在总体的安全生产的水平、安全生产监督和管理体制、安全生产的保险机制、安全生产的技术保障体系和安全文化的意识等方面与工业发达国家相比还存在较大的差距的缘故。

3 失效分析与安全的相互关系

失效分析预测预防是安全工作的需求, 积极的失效分析预测预防工作对安全工作具有促进作用, 对保证安全具有不可替代的作用; 安全工作离不开失效分析预测预防, 是失效分析预测预防科学存在、发展的基础。两者具有相互依赖共同发展的特点。

可以认为, 失效分析预测预防加上监察就是安全工作。

失效分析预测预防和安全之间的相互关系见表2。

4 结语

(1) 失效分析预测预防是认识客观事物本质和规律的逆向思维过程, 是推动高科技发展的积极因素之一, 是变失效为成功的必由之路。

(2) 失效分析预测预防具有“原则性”——客观性、公正性和科学性, 整个失效分析过程必须坚持八个原则。

(3) 安全的重要性日益突出, 各学科在研究安全问题时存在大量共性问题, 公共安全应成为一级学科。

(4) 安全与全面建设小康社会及可持续发展战略之间存在十分密切的关系, 应当与人口、资源和环境一样把安全列为我国的一项基本国策。

- (5) 失效分析可以预防事故、保安全和促进机电装备的发展。
- (6) 失效分析大有作为。

表 2 失效分析预测预防和安全之间的相互关系

Tab. 2 Relationship between safety and failure analysis, prediction, prevention

项目	安全工作	失效分析预测预防
定义	对生产经营活动中的生产事故(失效)、事故隐患和事故风险进行分析、识别、评价和控制全过程的监察、监督、管理和科技活动。	对生产经营活动中的安全事故、事故隐患和事故风险进行分析诊断预测控制和预防根治的科学、公正的技术活动和管理活动的总称。
基本性	安全是人类为其生存和发展向大自然索取和创造物质财富的生产经营活动中一个最重要的基本前提,它具有“基本”性质。	失效是人们的主观认识与客观事物相互脱离的结果,失效分析预测预防是人们深化客观事物认识的知识源泉,它具有“基本”性质。
绝对性	在生产经营活动中,安全问题无所不在,无时不有,它具有“绝对”性质。	人的认识是有限的,而客观世界是无限的,因此失效是绝对的,安全是相对的,它具有“绝对”性质。
时代性	在人类进化发展的各个历史时期,生产方式和生产水平不同。随着生产经营活动的手段、设备和工艺不断复杂,安全工作的内容和重点也各不相同,它具有“时代”性质。	随着科学技术的发展,特别是安全科学技术的发展,失效分析预测预防的内容、重点、技术和方法也有所不同,它具有“时代”性质。
在社会生活上	从社会发展的角度,安全生产是社会稳定、文明的重要因素;从实现可持续发展战略的角度,安全生产是保障和促进社会经济持续健康发展的重要保证;从提高社会文明的角度,安全生产是体现和提高社会文明与进步的重要标志;从全面建设和实现小康社会的角度,安全生产是全面建设和实现小康社会目标的本质内涵。	是促进安全、保护生产力的有效武器;是贯彻“安全第一”“预防为主”方针的一项重要工作;是保证社会安定、经济持续发展的重要保证;是社会主义市场经济体制优越性的重要体现。
在经济和管理上	在经济发展的角度,安全生产是减少负效益(增加正效益)的必由之路;在全面建设小康社会的目标角度,安全是安居乐业的重要前提;在可持续发展战略的角度,安全是经济发展良性循环的重要指标;在发展国际经济贸易的角度,安全生产将是打破和通过国际经济贸易中“绿色壁垒”或“技术性贸易壁垒”和市场准入条件的必不可少的“通行证”。	是防止失效事故的再发生、减少经济或人员伤亡的必由之路;是对国内外经济纠纷进行仲裁或判决、索赔的科学技术依据;是创建优质名牌产品、提高产品的质量和更新换代的重要途径;是为各级领导提供反馈和进行技术经济规划和决策的重要参考依据。
在工程技术上	从安全科技发展的角度,安全是国家科技水平的综合体现;从安全科学技术发展的角度,安全是国家安全科学技术理论、技术、工程和产业协调发展的重要结果。	是机电产品维修工作的技术基础和前提条件;是可靠性工程的基础技术工作之一;是发展和完善安全工程技术的重要实践基础;是修改和完善产品和技术标准的科学实践依据。
在科技进步上	从发展科学技术水平的角度,安全是发展和完善安全科学技术的重要组成部分;从提高国家综合国力的角度,安全是反映和提高国家综合国力和国际声誉的重要体现。	是认识客观世界事物本质的重要知识源泉;是发展新学科、新理论、新材料、新工艺、新方法的重要窗口和“产婆”;是发展科学技术,包括发展高科技的不可避免的机遇和挑战;是从失败入手着眼于成功和发展的科技领域;是从过去入手着眼于未来和进步的科技领域;可以认为是科技是第一生产力中最活跃的因素之一。