

“亡羊补牢”的一门学问 ——金属断裂失效分析

曾祥华

(金属研究所)

1985 年 8 月,一架波音 747 巨型客机在日本轰然坠落,520 人遇难,仅 4 人幸免,造成民航史上最大的一次单机事故。1984 年 11 月,墨西哥城液化石油气贮罐爆炸,死亡 500 余人,5000 多人受伤。紧接着同年 12 月,又发生了一件震惊世界的工业事故:美国联合碳化物公司开设在印度博帕尔邦的农药厂毒气(异氰酸甲脂)泄漏,造成 2500 多人死亡,数万人受伤。在世界范围内,这类灾难性事故屡有发生,小型事故就举不胜举了。构成机械设备的主要材料是金属,很多事故究其根源,起因往往是设备的某些部位(常是关键部位)的金属材料在使用条件下承受不了设计要求而受到破坏,称之为“金属失效”。金属失效与设备被毁的关系,犹如千里之堤,溃于一穴。

金属失效给社会带来的危害是多方面的。常有某种机械设备只经过短期运行,就因出现裂纹或断裂面使整个设备失效,甚至使生产线中断而无法运转,虽不一定造成人身伤亡,但常带来很大经济损失,并影响产品信誉。那么,造成金属失效的原因是什么?怎样才能提高产品的质量和可靠性?再者,谁应对造成的损失负责?是制造,安装不当呢?还是操作失误?受损者是否应该要求索赔?这些问题,在各项新技术迅猛发展的今天,越来越引起人们的重视和关注。

“金属断裂失效分析”这门学科正是在这样的社会需要和背景下诞生和发展起来的。它综合运用金属学、机械学、断裂学、尤其是断口学等多种学科的知识 and 电子显微镜等近代仪器设备,研究分析金属在各种条件下断裂的机制(过载、疲劳、氢脆、应力腐蚀等)和原因(设计、材质、制造、使用等),从而找出改进和防止的方法,以提高产品质量和运行可靠性,避免再发生类似事故,同时使人们对有关学科理论的认识得到进一步的深化。这门综合性和实用性都很强的新兴边缘学科,在国民经济和国防建设上有不容忽视的作用

从“断口学”起步

事实上,人们早就开始了断裂失效分析活动。就金属断裂来说,人们最初只懂得材料必须具有一定的静强度,才不至于在外载荷作用下断裂(过载断裂)。因此机械在设计、制造时,或者设法降低工作应力,或者选用较高强度的材料,或增大截面的尺寸。但后来发现,在许多情况下,即使采取了上述措施,仍会发生断裂。在对断裂失效原因深入分析后才发现,除“过载”这一因素外,其它一些条件,如变动的应力或是存在腐蚀性环境等,也会促使金属断裂,且需要的

王中光同志对本文提出了很好的建议,周敬、艾素华同志提供了部分图片,谨此致谢。

应力比静强度低得多。这就大大开阔和加深了人们对断裂现象的认识,并推动了断裂、材料等学科及与之有关的仪器设备的研究及发展。

断裂失效分析需要运用的多种学科知识中,最主要的是断口学的知识。所谓断口,就是断裂时形成的断裂面。不同原因(机制)造成的断裂,其断口形貌(色泽、粗糙程度、纹理、外形等)是不同的,在断口学研究中用显微镜来观察不同断裂机制的断口特征形貌。我们如果事先在实验室内,在可以控制的条件下,故意使金属以某种已知的机制断裂,纪录下这种机制的特征断口形貌、并汇编成图谱,作为参照标准,那么,在发生断裂事故后,把待分析确定的断口形貌和它比较,就可“按图索骥”,确定出失效部件的断裂机制或原因,这就是利用断口进行断裂失效分析的基本过程。

观察仪器的不断更新是推动断口学发展的重要因素,早期使用的是光学显微镜,虽然看到了一些新的现象,但因为它分辨率不高,景深短,不适宜用来研究这种凹凸不平的断口,因而限制了它的推广应用。五十年代透射电子显微镜,尤其是六十年代扫描电子显微镜广泛使用后,由于它们克服了光学显微镜的上述缺点,断口的研究才取得突破性进展,并逐渐出版了一些断口图谱及专著。如 1965 年美国空军材料实验室组织编写了《电子断口学手册》;美国金属学会分别在 1974 年和 1975 年出版了《断口金相与断口图谱》、《失效分析及其预防》;此外,欧洲共同体委员会也在 1979 年出版了《宏观断口学及显微断口学》等。至此,常用金属材料在较简单的内、外部条件下的断裂特征等已基本清楚,并分析、处理了大量工业事故。断裂失效分析作为一门能有效地应用于生产实践的学科,也逐渐形成并发展起来。

断口与断裂机制

金属最常见的断裂机制主要有过载、疲劳、腐蚀疲劳、氢脆、应力腐蚀等八、九种、下面对这些机制的断口特点及产生条件等作一简要的介绍。

可以用手把一根细铁丝一下子折断,这就是人们最熟悉的过载断裂。它是由于应力超过了材料的强度后造成的。这是一种静载荷,容易预防。因此,在通常情况下,过载造成的工业事故并不多见。

人们都有这样的经验:若不能把细铁丝一次折断,反复多次弯曲后,就可使之断裂。这说明、交变(循环)载荷比静载荷更容易使金属断裂,这称之为疲劳断裂。由于各种动态因素不断变化,机械或构件承受的载荷经常是变动的,在断裂失效的实例中,这种机制占的比例最大。本文开头提到的波音 747 客机坠毁就是金属疲劳造成的。

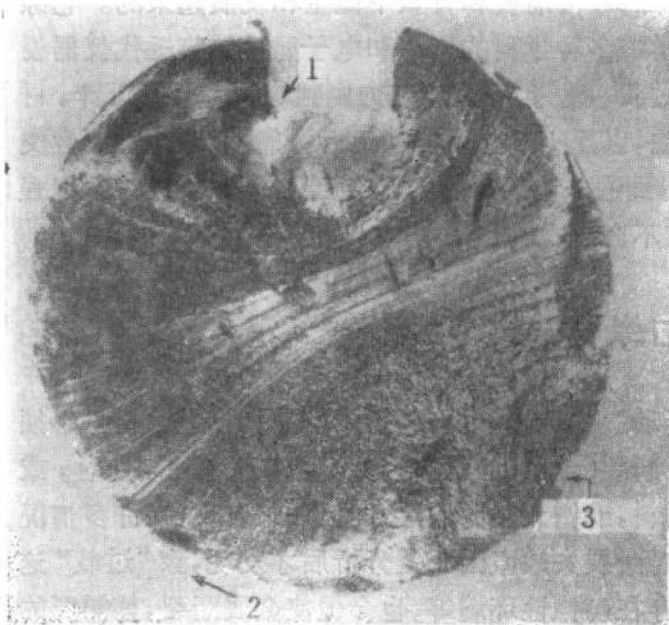


图1 汽车轴的疲劳断口。

1.断裂源(键槽根部) 2.轴旋转方向 3.最后断裂区

多数情况下,疲劳断口具有鲜明的特征。肉眼观察时,断口上常有和贝壳的花纹相似的一层层弧线,它勾画出裂纹慢速扩展时经过的位置。见图 1。而在电子显微镜中,可看到疲劳断口上有许多彼此平行的条纹,就象田野里的垄沟一样。一条“垄沟”常表示应力出现了一次循环、裂纹则向垂直于“垄沟”的方向扩展,见图 2。

若金属在承受交变载荷的同时,还受腐蚀性介质的作用,这样的断裂称为腐蚀疲劳。1980 年 3 月,在英国北海油田作业的亚历山大·基兰德号 (Alexander L. Kieiland) 海洋平台在风暴中倾覆。后查明是桩腿间撑管上的角焊缝上事先已存在裂纹造成的,而这裂纹的性质很可能就是腐蚀疲劳。

金属在熔炼或酸洗、电镀过程中会吸收氢、若含量较高,就会形成“白点”等冶金缺陷,或使材料变脆,称为氢脆。只要含有百万分之几的氢,就会使高强度钢明显变脆,而且材料的强度越高,对氢脆越敏感。这是工业界长期感到困扰的问题,其确切原因学术界至今仍有争论。我国已故科学家李薰四十年代在英国工作时,就对氢脆作过深入的研究。七十年代初,由于对飞机框架因氢脆造成的废品做了成功的分析,而得到周总理等国家领导人的亲切接见。前些年,飞机上的铝合金大锻件在制造时常出现所谓“氧化膜”缺陷,我国科学家郭可信和他的助手研究后确定,它们中的大多数也是由于氢含量太高造成的。

另一种常见的断裂机制是应力腐蚀。它是金属在特定的腐蚀性介质中承受超过一定数值的应力后发生的,一个很突出的特点是材料和腐蚀性介质必需满足一定的搭配关系。例如,常用的铬镍不锈钢在许多腐蚀性介质中都很耐腐蚀,但在含氯离子的介质中(如海水及未经处理的淡水),却很容易因应力腐蚀出现裂纹。目前的核动力大多利用有大量薄壁管的蒸汽发生器进行热交换。尽管对水质有严格要求,但运行实践表明,这些管子仍很容易发生应力腐蚀。如世界上第一条核潜艇——美国的“鲟鱼”号上热交换器的不锈钢管束,就先后发生过两起应力腐蚀引起的破裂事故。



图 2 钛合金的疲劳断口在扫描电子显微镜中的形貌。
(斜穿过视场的白带是疲劳沟。放大 2500 倍。)

蒸汽轮机叶轮的键槽和叶片的榫齿等部位杂质元素容易浓缩,英、美、日本和我国都发生过高速旋转的叶轮应力腐蚀破裂后,碎块飞出机壳及厂房的重大事故。此外,在石油钻探开采过程中,尤其是遇到酸性油、气井时,由于应力腐蚀造成的各种事故在国内外经常发生。

断裂失效分析的思路及过程

一个完整的失效分析应包括三方面内容,或者说是三个阶段。即确定断裂机制;找出具体原因;在随后的实践中检验或修正分析结论。

首先是确定断裂机制,这主要需应用断口学的知识。因此,分析时最重要的是必须得到失效的部件,尤其是断裂的起源部分,即断裂源。这是最关键的部位,整个事故就是根据断裂源的性质来确定的。否则,仅根据叙述和回忆是不可能得出可靠结论的。例如,1954年1月,世界第一架喷气式民航客机“彗星号”首次航行就堕入地中海中。3个月后,另一架又遭同样厄运。为了查明原因,英国政府不惜巨额资金,把残骸从海底捞起,进行失效分析,终于查明是由于设计不当造成的金属疲劳断裂。而1963年4月,美国导弹核潜艇“长尾鲨”号在深海试航时破裂。但因未找到较完整的残骸,无法进行失效分析。事后除有种种猜测之外,该艇沉没的原因至今仍是谜。

又如我国一个贮存液化石油气的大型球罐突然出现长达13米的裂口,泄漏的液化石油气引起大火,并导致其它大型球罐和数千个民用液化气小罐爆炸。经金属研究所分析后确定,主要是由于球罐建造时焊接质量低劣,焊缝上事先存在一条氢致延迟裂纹造成的,找不到这条裂纹,事故也就无从分析。因此,事故后,保护好现场,从残骸中找出断裂源,对分析工作的成败是至关重要的。

确定出断裂机制之后,要通过对设计、材质、环境条件等的全面调查分析,找出导致断裂的具体原因,从而对症下药,提出改进的措施。目前,寻找断裂原因的较成熟的思路是所谓“消去法”和“反证法”。发生事故,尤其是重大而复杂的事故,潜在原因可能是很多的。完成分析的第一步——确定断裂机制后,有可能排除部分假定因素而使范围缩小。然而,仍然还会存在许多种可能性。这就需要对所有可能的因素进行全面的分析,既要分析断裂源的材料与质量、制造工艺等,更要研究、分析它在整个设备或系统中的作用。它和其它零部件的关系、环境介质对它的影响等等。然后将所分析的各种因素归纳集中,提出种种假设和反证。通过这样一个过程、逐个排除不可能的因素而找出导致事故的真正原因。这一方面要求失效分析工作者对各种断裂机制及其特征等有较全面、深入的了解,并且应具备较广博的知识,对机械设计、冶金材质、冷热加工等等都要有所了解。另一方面,也要求与事故有关的各方主动配合和支持,如提供真实的数据、资料 and 情况等。这样才能迅速而准确地找出原因,并提出既有效、又切实可行的改进措施。

复杂的事故通常不是单一原因、甚至不是单一机制造成的。因此分析复杂事故时,为了防止遗漏可能的原因,并帮助分析各种可能原因之间的关系,事先按一定的规则绘出一个逻辑演绎图形常是有帮助的。在可靠性分析学科中,已发展了一些图式分析法。如故障树分析法、事件时序树分析法,特征-因素图分析法等等。目前,国外已开始将这些方法应用于断裂失效分析。

失效分析的第三阶段是把分析结论及据此提出的建议反馈回设计和制造部门,并采取相应的改进措施。只有这样才能检验分析是否正确,也才能达到提高产品可靠性、防止出现类似事故的目的。在完成上述三阶段构成的循环后,有时效果仍不理想,这时,需继续进行失效分析,以便找出最佳的解决方案。

面向经济 面向社会

断裂失效分析这门实用性很强的学科,是由于生产和社会的需要而诞生和发展起来的。因而,它的效用和价值也只有将它用于指导生产实践时才能得到体现和检验。正像病人只有愿意接受医生治疗,并按医生要求服药才会痊愈一样,失效分析的结论和建议即使正确,如果把它束之高阁,也是不会产生经济或社会效益的。然而,失效分析成果的实际应用有时会碰到各种具体的困难和问题。我们知道,金属失效给社会带来的往往是灾难性的事故。无疑,失效分析的结论及所提改进措施将使社会整体受益。可是,针对一个具体事故所作的结论,对与事故有关的各方来说,不但不能利益均分,相反,却恰恰是祸福不同的。因为它可能会导致某个(或某些)部门承担事故责任,赔偿经济损失;另一方面又将为受损的一方争得索赔的权利,这些都与事故各方的经济利益,名誉声望等息息相关。因此,常常围绕结论发生种种争议。争议一旦发生,就已不单纯是科学家们之间的事情,而是牵涉到社会的各个方面,包括设计、制造、使用部门乃至保险公司、司法机构等部门,有时候还会有权力、社会和人事关系等多种因素干预,使问题变得错综复杂,势必影响失效分析结论和改进措施的贯彻与落实。为使失效分析尽快应用于实践,必须有失效分析工作者与社会有关机构的共同努力。首先,失效分析工作者要有高尚的职业道德,态度公正,有胜任工作的知识水平和能力,工作严谨慎重,确保结论的可靠性,使事故的责任者难以抗争。例如,我国曾购买一家美国公司的余热锅炉,使用时炉管发生破裂。事故发生后把破裂部分截开,一半由美方分析后提出系我国工人操作失误超温所致,另一半由金属研究所分析,证明是管材事先存在严重冶金缺陷造成的。双方交换意见后,由于我们的证据更为充分,美方才被迫同意我们的结论,并赔偿了经济损失。另一方面,社会应该制订必要的法规,除了保障前面提到的保护现场,提供数据、资料等基本要求要切实做到之外,对于少数单位出于暂时的小团体利益,讳疾忌医,隐瞒不报、或者大事化小、小事化了,还有在分析结论对己不利时就推诿扯皮,以及受损者借故提出过份的索赔要求等等不正当的做法和不法行为,应当受到法律的约束,由有关职能部门乃至司法机关干预。在我们国家提倡法制并开始重视科技立法的今天,上述问题的解决想见是指日可待的了。现在,在西德等工业发达的国家,失效分析除与各种机械制造和使用部门经常联系之外,还和质量监督、保险公司、司法部门等建立了牢固的联系,或者在这些部门中设有失效分析机构。这使失效分析工作更具有权威性,有利于促进产品质量的提高。这种经验是值得我们借鉴的。

在我国,断裂失效分析这门新兴学科正逐渐得到社会的了解和承认。一些产业部门已先后开展了这项工作以提高产品质量,并已取得明显效果。一些工科高等院校也先后把它编入教材。我院在此领域里起步较早,以金属所为例,六十年代就开始了这方面的研究,七十年代初,组建了断裂失效分析课题组。十多年来,他们已做了数百起案例分析,与社会建立了广泛的联系,并已取得明显的经济效益和社会效益,在国内有较好的声誉。仅以协助有关部门分析引

进机械设备失效而向外商谈判索取赔偿来说,由于他们提供了令人信服的分析结论,已先后使四家外商向我方赔偿了 110 余万美元,维护了我方的正当权益。最近,金属所不但邀请国外学者来华讲学,还自己编写了《金属断裂失效分析》一书,并多次应邀到全国各地举办讲座,很受欢迎。他们翻译的《宏观断口学与显微断口学》一书也即将与读者见面。

为了更好地担负起社会责任,我院今后的工作应扬长避短,发挥自己的特点。首先,在学科的理论和方法上,应先走一步、深入一步,不断有新的建树;其次,分析事故,尤其是分析牵涉到多个部门的利益或责任的重大事故时,特别要求结论准确、公正和具有权威性。科学院的研究机构,地位较超脱,又已有了较好的基础,因此应争取承担跨部门的较重大的分析项目;此外,目前仍有相当一批部门或单位还没有开展这项工作,我们有责任通过办讲座等形式为他们培养人才或提供咨询。总之,以我院的地位和前阶段的工作基础,应该并且有可能对社会做出更大的贡献。

全社会都要重视这“亡羊补牢”的工作

断裂失效分析工作虽然在国民经济和国防建设中有着并已发挥重要的作用,但至今仍有人轻视这项工作,也有人认为它不足以登科学的大雅之堂。这除了与学科比较年轻,发展尚不完善有关以外,也是有些同志对当代科学技术在生产建设中的重大作用重视不够的一种表现。中国有句古语叫做“亡羊补牢,犹未为晚”。金属失效分析工作担负的社会责任是在事故发生后,查明事故原因,提出改进措施,杜绝同类事故再发生,做的是“亡羊补牢”的工作。失效分析工作者所要处理的往往是一个包括材料、设备、环境、人物等复杂因素的大系统。面对灾难性事故所造成的触目惊心的废墟,试图查清事故的原因,即使对一个知识渊博,经验丰富的科学家来说,也是一个十分艰巨,有时甚至是令人生畏的任务,他们必须聚学识、技术和技巧于一身,综合运用多种自然科学乃至社会科学的知识,通过大量的调查研究,周密的分析思考以及仔细的检查判断等,才有可能得出正确的结论。尽管这些结论既不表现为新的技术发明,也不一定有新的学术创见,对分析工作者本人可能既无名也无利,但它却对各种技术系统的改进起有效的指导作用,一旦应用于生产实践即可能产生重大的经济效益和社会效益,同时学科本身也在实践中不断丰富和发展。失效分析工作既需要渊博的学向,又要求崇高的精神境界,是一个不容忽视的学科领域,也是一项需要更多的科学工作者为之献身的光荣而艰巨的科学工作。

最后应指出,如果能把金属断裂失效分析与可靠性分析等学科结合起来,预测一个系统或设备中何处最为薄弱,并采取措施,“防患于未然”,那就更为理想了。当然,在科技工作者的脚下,这还是一条漫长的路。