

疲 劳 试 验

〔美〕 S. R. 斯旺森 编
黄 子 健 译

上海科学技术出版社

第一章 引言

第一节 编写目的

自从《疲劳试验手册》(即《ASTM STP 91》)出版以来,已经过去了四分之一个世纪。在这段时期内,对材料疲劳的研究已有了很大的发展,以至即使只研究它的一个分支,也得花费许多研究人员的毕生精力。材料疲劳是一门由一些传统学科,例如冶金学、统计学和动力学分析等综合而成的学科。很少听到有专门学习“疲劳工程学”或者有关疲劳问题的大学生,从事疲劳研究工作的人员通常总是学习疲劳工程学诸基础学科中的某一门。编写这本《疲劳试验》正是为了给那些想成为疲劳技术方面的工程师的读者提供一些资料。

材料的各种工程性能中疲劳强度可能最易受影响,因为材料加工中产生的缺陷,对于材料的疲劳性能有着很大的影响。由于人们目前还不可能制造出理想的材料(没有丝毫缺陷和残余应力等);而当把材料制成一定结构时,又不能不采用某些将造成几何缺口和冶金缺陷的基本的连接方法;并且,人们也无法事先完全确定所设计的结构今后将在何种外界条件(载荷等)下工作。因此,要弄清和预测有关疲劳寿命的一些问题是困难的。

但是,为了妥善地规划和进行试验,还是应当对疲劳的本质有所了解。疲劳破坏常常是由一些微小的表面裂纹引起的。在交变应力的作用下,这些微小裂纹就会扩展;而当一条主要裂纹的尺寸达到临界值时,构件就发生破坏。能引发疲

劳裂纹的应力,常常比能使材料产生大量塑性变形的应力小。在材料的不连续处,常常要产生应力集中,而疲劳裂纹通常就是发生在这样的应力集中区内。由于实际材料总是不均匀的,所以即使采用名义上相同的材料做试样,并在相同的条件下进行试验,所得到的数据往往也是很分散的。从最初设计疲劳试验,直到最后评价试验结果,都应考虑这个事实。

进行疲劳试验的目的很多,而试样的大小也从微型的箔片样品到重达几吨的整架飞机。本书将介绍疲劳试验的原理和技术,以帮助读者准确地理解所要解决的问题,选择一种有效的试验方法,从而可避免在执行试验计划时走弯路,并能可靠地评价试验结果。

第二节 内 容 范 围

本书只论及一般的疲劳试验,至于一些特殊的试验(例如低周疲劳、高温疲劳等),已另有专书全面介绍。

由于本书是专门讨论试验本身的,所以有可能对相当新的试验技术作深入的介绍。这样做对于象疲劳试验那样发展得很快的技术来说,是很重要的。向疲劳工程师提出诸如“材料能否经受一百万周的定幅交变载荷(旋转弯曲)”之类简单问题的时代已经过去了,现在则要求疲劳工程师确定在复杂条件下工作的构件的实际疲劳寿命。因此,本书内容同以前出版的几本疲劳手册大不相同。

本书并不研究材料的疲劳性能本身,但要研究如何最有效地表示材料的抗疲劳性。为此,必须慎重地选择切合实际的试验方法、试样和试验步骤,以能得到切合上述目的的试验数据。因此,编写本书时是以有关材料疲劳性能的知识为指

导的。

疲劳试验在七十年代发展得很快。七十年代以前,疲劳试验是与许多有可能帮助它快速发展的学科相隔绝的,例如:伺服控制、电子学、数字技术、计算机科学和传感技术等。当然这些学科本身也都在迅速发展。目前,随着这些有关技术的迅速引入,疲劳试验也同样迅速地得到发展。

本书介绍了好几种类型设备的情况,试样设计和制备的要点以及有关试验监察和试验数据记录的一些注意事项。在介绍设备时,很难把现有的种类繁多的设备和各种专门试验都包括进去。因而只能着重谈一谈疲劳试验“技巧”的原则,以使工程师能够巧妙地选择合适的方案。

本书的编写原则是:即使是缺乏经验的疲劳试验工程师,也能从中得到完成试验所必需的知识,并保证达到所要求的精确度和可靠程度。书中首先强调指出制定试验计划的重要性,然后讨论所需的设备,进而讨论试样的设计和所处的环境。每章的末尾都列出与该章内容有关的参考文献。

可以认为,由于疲劳问题所涉及的面非常之广,以致没有一个试验方法能算是定型的。实际上全世界许多常设的专业委员会和政府部门,都在为制定疲劳试验的规范、规定和标准而不停地工作着。

应当考虑疲劳试验技术的社会影响。制造产品的人员负有一个非常明确的社会责任,也就是说产品应当长期地或在规定的使用期内是安全的。疲劳试验在估计使用寿命中起着关键性的作用,因而可导致进一步提高产品的可靠性。由于这种原因,读者一定要认识到,采用今天所能得到的设备,试验工作可以控制得很好,实际的使用情况也会得到很恰当的模拟,因而材料和产品的疲劳性能是能够得到正确估计的。

当然,疲劳研究中有相当大一部分内容,同整体结构的实际问题的关系是非常间接的(例如纯材料的基础研究),这方面的要求也将在本书中加以讨论。目前这样说可能并不夸张,即疲劳试验的能力实际上已远远超出了许多从事这方面工作的人员的想象。现在主要的限制实质上是经济问题。

第二章 制定疲劳试验计划时 所应考虑的一些问题

第一节 引 言

将来某个时候, 将会对疲劳研究人员或工程师提出这样一个要求: 制定出一个能满足某种特定技术要求的疲劳试验计划。这种技术要求可能很简单, 就是要在材料使用之前, 给出材料成分、显微结构、加工工艺和环境等因素对材料疲劳性能的影响的数据; 也可能是要得出一些能有把握地在机械设计中应用的疲劳经验规律(或理论); 也可能是要模拟实际使用时可能受到的变载和稳载的复合载荷, 对结构的部件和真实大小的组合件进行评价。

试验不管内容或要求如何, 都会有一些在制定试验计划时必须加以考虑的问题。本章将讨论如下一些问题:

1. 总规划, 包括确定试验目的, 考虑试验中的限制因素和费用等问题。
2. 试验计划的制定, 包括考虑计划结构、载荷和环境变量, 试样设计等问题。
3. 试验操作, 包括确定全部试验步骤和估计适应范围等问题。
4. 数据的表达, 包括结果分析和报告等问题。

本章在介绍完上述问题后, 紧接着将讨论一下两种形式的多试验室的试验计划。一种是多试验室产生数据的试验计划, 一种是试验室间交流对比的试验计划。

第二节 总 规 划

总规划包括:确定试验计划的内容范围,确定试验的实际目的,估计限制试验的因素和估计费用(第三、四、五各节也要谈到试验规划问题)。

一、试验目的

疲劳试验所要达到的目的,是规划人员根据需要,参阅了文献和参考了以往的试验之后确定的。从各个方面考虑并仔细而清楚地规定出试验目的,这是很重要的。下面就是进行疲劳试验的几个不同的目的。

1. 深化对材料疲劳性能的基本认识;
2. 增长关于材料疲劳性能的经验知识;
3. 取得部件对疲劳反应的数据;
4. 取得部件或结构在工作载荷下的性能数据。

一般说,不可能用一个简单形式的试验来达到几个试验目的。例如用材料试样做的试验室试验,就不能给出完全适于结构设计的数据,因为用试样并不能反映出影响结构疲劳性能的一切制造上和装配上的因素。即使有缺口的试样,也很难代表实际结构中可能存在的所有应力集中源、残余应力和表面条件等情况。这是由于用来取得材料性能数据的试样,为了容易再制和尽可能经济的缘故,往往设计得很简单。关于设计和制备试样的实例,将在第六章中介绍。

即使是这种简单的试验,也还有可能完成一些附属的目的,这要在试验规划细节中给予考虑。例如材料疲劳试验时可完成下列附属目的中的某一种。

几种材料的对比试验——把一种材料和另一种材料的疲

劳性能进行对比, 仅能用: (1)同一种载荷; (2)同一载荷比; (3)同一试验环境; (4)同一种热处理和同一种表面光洁度等。在对比试验中, 不能把在某种载荷下或某种环境中取得的试验结果, 推广到另一种载荷下或另一种环境中去。例如一些材料在定幅低应力试验中得到的疲劳强度, 并不总是与在变幅载荷下进行试验的一样, 因为在后一种情况下, 应力可能相互影响。如果两种材料的定幅 $S-N$ 曲线相交, 就更容易出现上述情况。

加工工艺的影响——评定加工工艺因素对疲劳性能的影响, 方法常常只是比较两组或三组采用不同热处理、表面处理或其他加工工艺(例如锻压或孔加工等)的试样的疲劳性能。

环境的影响——评定应力或环境的特有影响, 方法只是用几组试样, 分别模拟在使用中可能出现的不同的环境条件(腐蚀或温度), 比较它们的疲劳寿命。

几何形状不连续处的影响——评定几何形状不连续处对疲劳性能的影响, 方法只是研究一些典型缺口试样。每种缺口试样的 K_t 值(理论应力集中系数)或缺口底部圆角半径 r 都有一定的范围。

上述附属目的, 范围虽然很局限, 但却是有代表性的。在总规划时, 还需考虑这些有局限性的数据, 可以推广应用到多大范围。这种考虑, 可为确定试验计划内容的多少提供一个基础。

结构件或部件的疲劳试验的附属目的则稍有不同:

1. 确定一个构件或部件在类似于实际使用时的载荷和环境条件下的抗疲劳性;
2. 研究采用不同的材料或者不同的加工和组装工艺的

优点;

3. 评定由于实际结构设计的改变而可能引起的疲劳性能上的差异。

常常要对整个结构和结构组合件进行研究,以估计其在使用中的可靠程度。这种试验的方法是:模拟实际情况进行加载,这一点和用材料试样,甚至部件作试验不一样。这种试验也仍然可有几种不同的试验目的,例如:

1. 确定某特定加载条件下的破坏形式;

2. 确定在稍有变化的载荷(例如不同的载荷谱)作用下的相对寿命;

3. 为实际使用的结构规定出切合实际的检查时间间隔和切合实际的寿命极限。

结构越复杂,载荷越复杂,则进行一次试验的费用也越大。因此,考虑试验目的时应尽可能密切地结合实际情况,这是非常重要的。

二、限制因素

正如刚刚谈到的,定出主要目的和附属目的,可能要通过一个反复研究过程才能完成。要反复考虑的有:试验目的、规划细节和限制因素。正如下面将要指出的,有一些技术上的因素限制了研究人员的试验规划;对任何一种疲劳试验来说,其主要的限制因素都是完成一项试验工作所需要的时间和费用。这两个因素都显著地而通常又是直接地影响一个疲劳试验的内容和规划。当试验计划只是一个庞大的发展计划(例如一种新的高温合金或者一种新的成批生产飞机的研究)的一部分时,情况更是如此。即使试验计划主要是执行研究性的任务或者是为了制定结构设计的方法,时间和费用这两个限制因素也仍然很起作用。这是因为:确定一个总的发展规

划的时间和费用的是其他管理人员，而不是所谓的研究工作管理人员，而分摊给疲劳研究人员的只是其中的一部分。

疲劳研究人员如能及早知道这些限制试验的因素，就可以集中精力去完成一个良好的、能满足以下五点要求的试验^[1]：

1. 试验目的明确，范围有限；
2. 要能够测量出有关变量的影响，而又不会为非受控变量所干扰；
3. 合理地避免产生偏差；
4. 要能够测出试验误差或精确度；
5. 精确度要能满足所定试验目的的要求。

三、试验费用的估计

虽然各个研究和发展部门都有自己的一套征收和计算试验研究费用的方法，但还是可以原则上把疲劳试验的一些费用项目分列于下。其中某些项目的比重，在基本材料试验和大型结构试验两种不同情况下，相差甚大。

1. 试验计划的管理和指导；
2. 试验材料和辅助材料*；
3. 试样的制造；
4. 夹具的设计、制造和检验；
5. 测试设备的设计、装配和检验；
6. 试样的安装时间；
7. 技术人员在试验的监察、测量、数据记录和对破坏的试样的检查上花费的时间；
8. 设备的维修费和折旧费；

* 在结构件和部件试验中可能要用到应变片、应力涂膜等，这些都是辅助材料。

9. 数据的分析和报告的准备。

第三节 试验计划的制定

疲劳试验计划,即使内容不很广,实行起来花费却很大,且很费时。因此,疲劳试验计划应做到花最少的钱和用最短的时间就能得出大量的确切数据。疲劳试验的统计设计和统计分析,能在两个方面使试验人员得到“货真价实”的帮助,即能提供大量的有用数据及能定量地表达结论的可信性。

一些与材料和结构件有关的试验计划,通常是为了从一个(或少数几个)侧面来搞清一个工程问题(例如热处理工艺对一种合金的疲劳性能的影响和孔的冷加工工艺对结构接头的疲劳性能的影响)。这种试验计划的制定是按照这样的方法,即:除了所要考虑的参量外,使载荷和环境条件(或招致损伤的因素)保持不变。然后,再让这个待研究的参量在某一个有限的或比较大的研究范围内变动。

另外一些试验计划,特别是那些模拟实际使用情况的试验计划,就不是为了了解单一的变量的影响。因为,在模拟条件下,许多招致损伤的因素以及许多载荷和环境条件随时间的变化情况都非常复杂。上述的那种结构接头的问题,就是一个单一变量的试验计划不能完全解决问题的例子。在结构的接头中,孔的冷加工工艺仅仅是影响接头疲劳性能的一个变量。另外还有许多其他因素,如紧固件的形状和材质、紧固件中的夹紧力、接头材质、接头构造和连接面的情况等。如果制定的试验计划很简单,孔的加工方法虽有多种,但接头构造、紧固件、夹紧力和材质等都只有一种,那末所得结果是有局限性的,从而可能导致得出错误的结论。另一方面,要是

大型试验中的所有变量都评价一下，那又是费用和时间所不容许的。

由于认识到了制定试验计划(包括单变量试验计划)中的这些复杂性，所以人们非常重视试验计划制定技术的研究工作。因为试验计划制定得好，就能取得有用的结果，从而就能定量地表达试验结论的可信性。本书不拟详细讨论有关试验计划制定的复杂内容，只准备简单介绍一下有关制定良好试验计划的某些要点，进一步的内容可参考其他有关制定试验计划的文献，例如本章末所列的参考文献[1~11]。

一、良好试验的必要条件

在“总规划”一节中，有一个小节列出了为完成一个良好的试验所必须考虑的五点要求。这些要求和制定试验计划的过程有关。在这一小节中，再对其中的几条稍加说明。

试验目的明确——这一要求在“总规划”一节中已谈得很详细，这里不再赘述。只补充下面一点：明确试验目的和内容意味着试验人员对试验要求能心中有数，即弄清为了对材料性能建立某种经验规律，需要取得哪些数据和进行哪些分析。

准确地测出试验计划中的各变量的影响——试验的目的就是要测出有关的变量对疲劳性能的影响，并把这些变量的影响同非受控变量和试验误差的影响区分开来。这些有关变量就是要在试验计划中有规则地加以变动的因素。在制定试验计划阶段，就要定出这些待研究的变量的等级水平。这些等级可以是定性的(例如：在孔的加工中，可以分别评价钻、铰、珩磨和研磨等冷加工工序的影响)，也可以是定量的(例如：某种钛合金中含氧量的几种等级)。当要考虑确定加工工艺时，就用定性变量。当要在实际的工作范围内确定固定值或随机值时，就用定量变量(在划定等级时要考虑到准确度)。

非受控变量包括长时间试验中的环境影响、时间、和材料取样的不均匀性以及多功能试验机的使用等。制定试验计划时必须周密地考虑到这些因素。

避免偏差——系统误差或偏差可使试验结果含混不清，因而有得出错误结论的危险。试验人员只有在制定计划阶段，通过采用随机方法和局部控制，才能使试验中产生的偏差减至最小，从而保证得出正确的结论。

例如，属于下述情况中的任一种就会在试验中产生偏差：试样是从一种材料的两块(或根)不同的板(或棒)上切取的；试样是由几个工人加工制成的；为了缩短试验期，使用几台疲劳试验机，等等。在制定试验计划时，试验人员应当懂得，为了使试验数据偏差最小，必须把这些因素考虑进去。试验人员可以采取下述两种办法来减少这种偏差：(1)局部控制法，例如分组、或相关分析；(2)随机法，这种办法可保证：如果存在系统误差，则所有的试验都应有相等的偏差，但由于受控变量的变化所引起的试验结果相对差值就不存在偏差。

试验误差——要完成一个良好的试验，应该对试验技术以及与试验有关的仪器和试验机所组成的总体的精确度作一个估计。这个试验误差在数据分析时是要用到的，以评定受控变量的影响的统计意义。在试验计划进行这一部分内容时，试验人员应通过自己的反复试验，求得精确度的量值。

精确度——一个良好的试验，其精确度应适当，要能测出受控变量的影响，并保证一定的可靠性。增加试验重复次数能提高精确度，如果受控变量每变化一个等级都进行同样次数的重复试验的话，就可大大提高试验精确度。由于重复试验是要由试验人员一一去做的，所以很明显，提高精确度就会增加试验费用。因此，试验人员在制定计划时，既要衡量和估

价试验费用,又要衡量和估价错误的试验结论的后果。试验人员应该记住,试验精确度可以通过下述三种办法加以提高:(1)改进技术和仪器;(2)选用合适的试验计划;(3)采用局部控制。

试验计划应择优选用,这样,可使试验人员在制定试验计划的过程中,考虑问题更为实际。具体作起来可以是这样:试验人员先起草几个试验计划方案,然后再根据时间和费用的条件,对这些方案进行比较和评定。对其中的每个方案都要就如下三个方面进行评价:试验误差;能否在一定的可靠性水平下检测出变量影响的差别;能否区分开受控因素和非受控因素;等等。有些文献上提出了一些预测分析的方法^[8, 11~15],可供试验人员用来预测各种方案试验时的精确度,从而可以选出最有效的试验计划。

二、试样

由于疲劳或材料的研究目的是多种多样的,所以所采用的试样也五花八门。本书第六章中将谈到用来评定材料性能的试样的一些设计和制造特点。在试验规划阶段,试验人员就应当考虑试样的设计和研究试验计划、试验设备对试样设计的影响。这一方面,第六章讨论的内容将对此只提出一些原则指导,而有些标准推荐的方法,例如 ASTM 推荐的《金属材料定幅轴向疲劳试验方法》(E466-72T),为材料试样型式提供了具体的规定。

模拟结构部件和组合结构的试样就比较复杂了,常常要按照某一结构上的某一特定部位来设计。在这种情况下,试样设计、试样材料和试样制造工艺,就要根据这个结构而定。当一个试验计划是为了验证一个结构或者是为了得出设计结构时的许用应力时,那么一定要使试样材料、热处理、制造工

艺和设计细节等,都与结构或部件的实际情况非常接近。

如果是很复杂的结构,因为制造和试验费用都很大,所以经常要分部进行试验。这种分部试验法,可能要给疲劳工程师在处理数据时带来一些技术上的困难。这种困难表现在如何对结构和部件进行应力分析以及如何对部件中的应力进行实际模拟上。只知道这个部件在完好情况下的应力状态是不够的,还必须知道部件损伤时其应力是怎样变化的。比方说,在一个无冗余支承的部件中,疲劳损伤发生的速度,就要比在一个有冗余支承的部件中快得多。因为在后一种情况下,可以把载荷传递给结构中的毗邻部件,以阻止裂纹扩展。分析时假定的边界条件,实际上并不总是正确的,因此试验结果的正确性就常常会有问题。

当弄清楚了构件的应力或应变过程后,制定试验计划的人员就可以考虑或是进行理想化的加载;或是尝试模拟加载过程,不过后者会给试验人员带来另一个需要研究的技术困难。

如果疲劳试验中有几个应力等级的话,则必须安排几个可影响载荷谱的产生的因素。在几乎每一种变载荷的情况下,在加载时都存在一定程度的不确切性。定幅正弦波是一种确定的波形,因而不存在“程序化加载”的问题,而在这种理想状态下的累积疲劳损伤,对这种加载过程来讲,却是独有的。

对变幅情况进行统计处理,可以设计出能满足如下要求的载荷谱,即包含所有的载荷情况,可保证为部件确定一个较保守的最小寿命。虽然查看一下文献可以知道,有些因素,例如载荷顺序、几种等级载荷的相互影响和加载循环的曲线形状,能大大地改变疲劳寿命,但只要能仔细安排,那末也可用

一些预先确定的载荷从统计学角度来代表随机载荷。

对于许多种部件来讲,可制定一个试验“工作循环”,就是一个可以代表材料或结构的典型的使用情况的一个加载顺序(例如,模拟一架飞机的一个实际单次飞行任务的飞续飞载荷剖面图)。然后再把这个工作循环反复施加到这个试验部件上,以测定其寿命。但是即使是在这种情况下,这个假定的“工作循环”可能仍然没能把实际使用情况全模拟下来。因此就要试图制定出一个载荷谱,以取得一个保守的最低疲劳寿命。

第四节 试验操作

疲劳试验过程中(直到数据分析和提出报告之前为止)的各项操作的次序叫做试验步骤。试验操作前,试验计划应已制定好(按本章前几节所述),试验设备应已选好(按第三和第四章所述),并经检定(按第七章所述);试样应已设计好(按第六章所述)。

一、试验步骤

第一步——完成试样的全部制备过程,包括:

(a) 把试样坯料从母材(例如棒材、板材等)上切割下来,编上号*,并记下其在母材上的位置;

(b) 对试样进行粗加工;

(c) 需要时,进行热处理;

(d) 对试样进行精加工;

(e) 需要时,进行抛光。

第二步——检查校准情况(第七章)。应确实保证这台试

* 如试验计划中规定采用随机法的话,应按计划中的随机编号方法进行。

验机在试验前已进行过检定(在本次试验所要求的载荷范围内),并应保证自上次检定以来,试验机没有发生过不正常的现象。

第三步——建立试验记录本。试验记录本中应包括没有参加这一试验的研究者所需要的全部数据,以便必要时还可以重试。

第四步——调好试验机,并进行试运转。许多类型的疲劳试验系统在使用之前都需要有一段稳定工作性能的时间。

第五步——在机器上安装试样(参看第四节第二小节)。

第六步——开始试验。这时应把计数器或计时器调到零或者将当时的读数记下来。使程序装置开始工作(例如复位),并调定读出装置。

第七步——装好安全装置。在这一步中,如果可能的话,让用来保护试验不受意外载荷或应变影响的所有元件都进入工作状态。

第八步——试验开始(参看第四节第二小节)。

第九步——照管试验的进行(参看第四节第二小节)。

第十步——确定试样的破坏标准。这个标准最好应及早定下来,但是一般还是在这一步里确定。确定了怎样才算破坏(例如应变骤增,载荷滑跌等)之后,把测量这种参量的装置同试验系统连接起来,以使当这个参量达到极限值时,试验系统就会停止工作。

这个标准甚至也可以不是一个破坏标准;例如可以只要求在一个预定的时间内或按预定的循环周次,给试样施加疲劳载荷。

这个标准也可以是由试验人员来掌握的。例如可以要求