

前 言

镍基高温合金材料因其出色的力学性能被广泛地用于制造航空发动机涡轮叶片以及其他热端部件。这些热端部件在高温高压的极端恶劣环境中服役时，热应力和离心力等会造成材料的微观组织结构发生演化，从而引起其力学性能的变化，缩短构件的服役寿命，引发不可估量的灾难和损失。因此，对镍基高温合金材料进行损伤评估和强度寿命预测，是航空发动机无损检测和剩余寿命评估不可或缺的工作。

在多种服役工况下，材料位错、析出相、微裂纹等微观组织结构的变化不但会引发其力学性能发生变化，当超声波在其中传播时，还会引发高次谐波产生等非线性效应，根据所产生高次谐波的幅频信息可以对材料服役损伤和性能退化进行检测和评估。因此，本书针对镍基高温合金材料在静力加载、高温热暴露、疲劳和蠕变等多种载荷状态下的服役损伤行为和机理、材料微观组织结构演化和疲劳裂纹扩展造成的超声非线性响应与力学性能变化开展系统性研究，建立材料微观组织结构演化-超声非线性系数-力学性能变化的内在联系。

本书第1章介绍研究背景和镍基高温合金损伤及超声无损检测评估技术的基本知识，由王佳佳撰写；第2章介绍超声非线性的基本理论以及位错、析出相、微裂纹等微观组织结构引发超声非线性的响应机理，由王佳佳、温志勋撰写；第3章介绍超声线性及非线性检测系统的搭建，以及超声线性及非线性检测方法，由王佳佳、王婵撰写；第4~7章分别介绍基于经典声非线性的镍基高温合金静力加载塑性损伤、高温热暴露损伤、疲劳损伤、蠕变损伤的超声线性及非线性检测评估，揭示多种服役条件下的损伤机理和超声非线性响应机理，由王佳佳撰写；第8~10章分别介绍基于接触声非线性的微裂纹、含随机分布微裂纹构件和疲劳裂纹扩展的超声非线性评估，由温志勋、王婵、逯健撰写。温志勋、岳珠峰负责全书的统稿和定稿。

本书针对航空发动机的服役环境，系统介绍多元镍基高温合金在多种服役条件下的损伤机理、超声非线性损伤评估以及微观结构演化引发的超声非线性响应机理，主要涉及线性及非线性超声检测、静力加载、高温热暴露、疲劳、蠕变、裂纹扩展等试验技术，超景深光学显微镜、X射线衍射、扫描电子显微镜、透射

电子显微镜等分析测试技术，以及经典声非线性、接触声非线性、位错弦理论、位错-析出相相互作用理论、晶体塑性理论、损伤力学理论和断裂力学理论等理论方法。

本书的相关研究工作得到了技术基础科研项目、国家自然科学基金项目、国家“航空发动机和燃气轮机”科技重大专项基础研究项目等的资助，在此表示感谢。另外，感谢西北工业大学精品学术著作培育项目对本书出版的资助。

由于作者水平有限，书中难免存在不妥和疏漏之处，敬请读者批评指正。

目 录

前言

第 1 章	绪论	1
1.1	引言	1
1.2	镍基高温合金损伤	2
1.3	无损检测评估技术	6
1.4	超声非线性无损检测	9
1.5	本章小结	15
第 2 章	超声非线性理论	16
2.1	引言	16
2.2	经典声非线性理论	17
2.2.1	非线性弹性超声波动方程及求解	17
2.2.2	超声非线性位错模型	21
2.2.3	超声非线性位错-析出相模型	28
2.3	接触声非线性理论	31
2.3.1	微裂纹的超声非线性表征机理	31
2.3.2	微裂纹弹性接触模型	32
2.3.3	微裂纹非线性弹簧模型	33
2.4	本章小结	34
第 3 章	超声检测系统及方法	36
3.1	引言	36
3.2	超声检测系统	37
3.2.1	RITEC 高能声学检测系统	37
3.2.2	检测波形	41
3.2.3	压电超声换能器和耦合剂	44
3.3	超声线性检测系统及方法	46
3.4	超声非线性检测系统及方法	49
3.5	本章小结	51
第 4 章	静力加载塑性损伤超声非线性评估	52
4.1	引言	52

4.2	静力加载塑性损伤及超声检测试验	53
4.3	静力加载塑性损伤超声检测结果分析	56
4.3.1	静力加载塑性损伤超声线性检测结果分析	56
4.3.2	静力加载塑性损伤超声非线性检测结果分析	57
4.4	静力加载塑性损伤微观组织结构演化和宏观力学性能变化	59
4.4.1	静力加载塑性损伤微观组织结构演化	60
4.4.2	静力加载塑性损伤宏观力学性能变化	63
4.5	镍基单晶合金常温塑性变形机理和超声非线性响应机理	64
4.5.1	镍基单晶合金常温塑性变形机理	64
4.5.2	静力加载塑性损伤引发超声非线性响应机理	67
4.6	本章小结	71
第 5 章	高温热暴露损伤超声非线性评估	73
5.1	引言	73
5.2	高温热暴露损伤及超声检测试验	74
5.3	高温热暴露损伤超声检测结果分析	76
5.3.1	高温热暴露损伤超声线性检测结果分析	76
5.3.2	高温热暴露损伤超声非线性检测结果分析	77
5.4	高温热暴露损伤微观组织结构演化和宏观力学性能退化表征	79
5.4.1	高温热暴露损伤材料微观组织结构演化	79
5.4.2	高温热暴露损伤材料宏观力学性能退化	83
5.5	高温热暴露损伤引发超声非线性响应机理	84
5.6	本章小结	89
第 6 章	疲劳损伤超声非线性评估	91
6.1	引言	91
6.2	疲劳损伤及超声检测试验	92
6.3	镍基高温合金低周疲劳损伤超声评估	95
6.3.1	低周疲劳加载下的循环变形行为和断口分析	95
6.3.2	低周疲劳损伤的超声线性和非线性检测结果及分析	97
6.4	镍基高温合金高周疲劳损伤超声评估	100
6.4.1	高周疲劳加载下的循环变形行为和断口分析	100
6.4.2	高周疲劳损伤的超声线性和非线性检测结果及分析	102
6.5	本章小结	104
第 7 章	蠕变损伤超声非线性评估	106
7.1	引言	106
7.2	高温蠕变损伤和超声检测试验	107

7.3	蠕变损伤超声检测结果分析	109
7.3.1	蠕变损伤超声线性检测结果分析	109
7.3.2	蠕变损伤超声非线性检测结果分析	111
7.4	蠕变损伤微观组织结构演化	111
7.4.1	γ/γ' 相微观组织结构演化	112
7.4.2	位错组织结构演化	115
7.5	镍基单晶合金蠕变行为和超声非线性响应机理	119
7.5.1	镍基单晶合金在 980℃/360MPa 下的蠕变行为	119
7.5.2	蠕变损伤引发超声非线性响应机理	120
7.6	本章小结	122
第 8 章	微裂纹超声非线性评估	124
8.1	引言	124
8.2	试验材料与含微裂纹试样制备	125
8.3	微裂纹超声非线性有限元模型建立	126
8.3.1	激励信号	126
8.3.2	网格划分	127
8.3.3	时间步长	127
8.3.4	边界条件	128
8.3.5	有限元模型的有效性	131
8.4	微裂纹超声非线性有限元仿真	132
8.5	微裂纹超声非线性试验结果	135
8.6	本章小结	137
第 9 章	含随机分布微裂纹构件超声非线性评估	138
9.1	引言	138
9.2	微裂纹角度对超声非线性响应的影响	139
9.3	微裂纹分布对超声非线性响应的影响	140
9.4	微裂纹密度对超声非线性响应的影响	144
9.5	本章小结	146
第 10 章	疲劳裂纹扩展的超声非线性评估	148
10.1	引言	148
10.2	疲劳裂纹扩展试验	149
10.2.1	试验材料及试样制备	149
10.2.2	试验过程及结果分析	149
10.3	疲劳裂纹扩展超声线性检测	151
10.3.1	疲劳裂纹扩展超声线性检测方法	151

10.3.2 疲劳裂纹扩展超声线性检测结果及分析	152
10.4 疲劳裂纹扩展超声非线性评估	153
10.4.1 疲劳裂纹扩展表面波超声非线性检测	153
10.4.2 疲劳裂纹扩展纵波超声非线性检测	159
10.5 本章小结	161
参考文献	163

第1章 绪 论

1.1 引 言

航空发动机热端部件服役过程中,在高温高压等极端恶劣的环境下承受离心力、热应力、气流激振力等载荷的循环作用,极易发生疲劳、蠕变等塑性变形现象,导致材料损伤、性能退化,严重威胁航空发动机的安全运行。在材料损伤过程中,其内部微结构会逐渐产生变化,首先是晶格变形以及位错增殖和移动、滑移带的形成,这是早期力学性能退化的表现,其次是微裂纹和孔洞的萌生,之后微裂纹扩展和聚集形成宏观裂纹,最终导致构件断裂失效。材料的寿命可以总结为早期性能退化、损伤起始与积累以及最终断裂失效三个阶段,其中前两个阶段可能占据整个寿命的 80%~90%^[1]。当材料中出现宏观裂纹时,其承载能力已经被极大地削弱,构件可能即将失效。此时,已经错过了最佳维护时期,因此材料早期性能退化及服役损伤检测和评估对工程构件的安全可靠运行与剩余寿命评估有非常重要的意义。

为了准确了解材料的完整性,预测其剩余寿命,需要对服役过程中材料的微观组织退化情况及其力学性能进行检测和分析。常用的检测包括有损检测和无损检测。有损检测是指从服役工程构件上取一定尺寸大小的样品进行微观组织结构观察或者力学测试以获得相关的组织结构和力学参量,并以这些参量为依据进行损伤评估和寿命预测^[2]。例如,扫描电子显微镜(SEM,简称扫描电镜)和透射电子显微镜(TEM,简称透射电镜)微观组织结构观察都属于有损检测。有损检测能够在一定程度上对材料的损伤状态进行评估,但是在不损坏服役构件的情况下收集样本进行分析实际上是不可能的。因此,有损检测最大的缺点在于取样会破坏工程构件的完整性,尤其是对于航空发动机涡轮叶片这种在恶劣环境下工作且造价昂贵的构件来说,取样检测意味着构件可能会失去使用价值,成本太高。另外,有损检测取样一般情况下局限于工程构件表层的局部范围,很难代表构件的整体损伤情况。基于此,无损检测必不可少,它能够在不损害构件结构完整性的情况下获得其内部损伤。近年来基于无损检测的材料损伤评估技术受到国内外学者的广泛关注。

超声无损检测作为五大常规无损检测技术之一,有着检测范围广、灵敏度高、使用方便等突出优点,被广泛地应用于各种材料内部裂纹和缺陷的检测与定位。

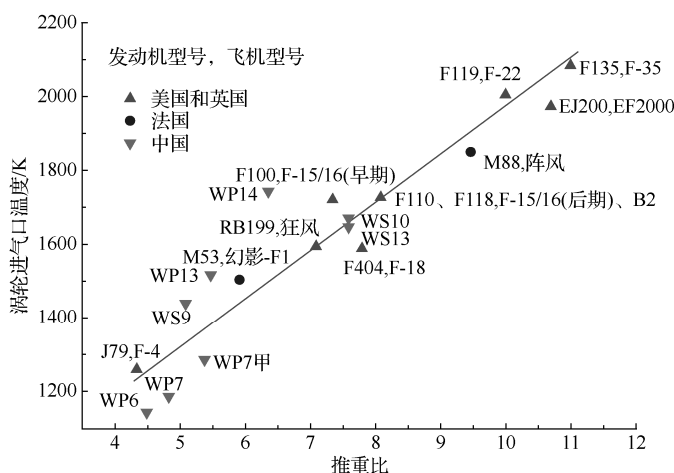
同时由于纵波声速、声衰减系数等参数与材料的弹性常数息息相关,因此也被用于对材料的晶粒尺寸、残余应力、抗压强度等的检测和评估^[3]。学者们发现材料在承载过程中位错和析出相的演化以及微裂纹的萌生和扩展等都会引发超声波的非线性效应,超声非线性检测能够对材料非常早期的微观组织结构损伤做出响应^[4,5]。目前,超声非线性相关理论以及多种材料的拉伸、热暴露、疲劳、蠕变等损伤的超声非线性检测评估方面都有了很大的研究进展^[6-8],但是对于航空发动机涡轮叶片镍基高温合金材料在多种服役损伤下的超声非线性检测技术和相应的损伤机理及超声非线性响应机理的研究相对较少。

本书在广泛收集国内外超声非线性损伤评估的相关文献的基础上,从力学、声学 and 材料学的角度出发,以航空发动机涡轮叶片材料镍基高温合金为对象,研究超声非线性现象的基本原理及声波与微观组织结构相互作用的相关理论,构建专用超声线性和非线性检测系统,采用 SEM、TEM、X 射线衍射(XRD)等多种手段观测并定量分析镍基高温合金在拉伸、高温热暴露、疲劳和蠕变等多种载荷状态下的微观组织结构演变,研究材料的力学行为,揭示其损伤失效机理,采用超声线性和非线性手段对镍基高温合金的多种服役损伤进行检测评估并从细观微观组织结构演化的角度定量揭示其超声非线性响应机理。

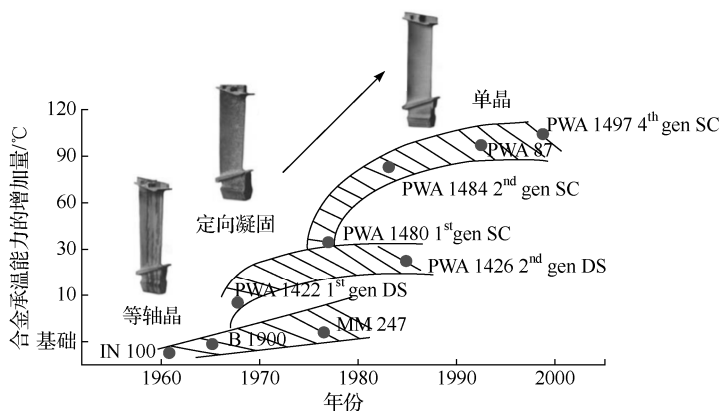
1.2 镍基高温合金损伤

航空发动机的性能直接决定着飞机的各项性能指标,是发展民用航空以及国防空军力量必须要突破的技术难题,是一个国家科技、工业水平以及国防实力的重要标志。航空航天工业的发展对发动机推力和推重比提出更高的要求,这是建立在进气口温度不断提高的基础上的,涡轮进气口温度每提高 55℃,发动机效率能够提高 10%左右。国内外发动机的发展历程如图 1.1 所示,从中可以看到推重比和涡轮进气口温度的提高。进气口温度的提高使得航空发动机涡轮叶片和其他热端部件需要在高温高压的条件下承受较大的离心力和热应力,其材料的性质决定了发动机的整机性能,这就要求材料具有更加优越的高温力学性能,因此高温合金材料的研制和生产水平成为一个国家金属材料发展水平的重要标志之一。镍基高温合金具有出色的高温强度、组织稳定性、抗氧化腐蚀能力和优异的疲劳蠕变性能,被广泛地应用于航空发动机涡轮叶片和其他热端部件的制造。

常用的镍基高温合金按照成型工艺可以分为变形镍基高温合金、铸造镍基高温合金和粉末镍基高温合金。随着熔模铸造技术、真空熔炼与浇筑技术、定向凝固技术等先进铸造技术的不断发展,铸造镍基高温合金经历了从等轴晶高温合金到定向凝固高温合金再到镍基单晶高温合金的发展历程,其承温能力得到了大幅

图 1.1 国内外发动机的发展历程^[9]

度的提高，如图 1.2 所示。等轴晶高温合金晶界处的杂质较多、原子排列不规则，在高温下承受载荷时，与应力垂直的晶界极易形成裂纹源，导致构件破坏失效。定向凝固高温合金消除了与应力方向垂直的横向晶界，使得材料的力学性能得到了很大程度的提高，但是裂纹仍有可能在纵向晶界上萌生。镍基单晶高温合金则由一整个晶粒构成，完全消除了晶界，并且增加了 Mo、Ta、Cr、Co 等难熔元素的含量，进一步提高了合金的疲劳和蠕变性能。目前，先进的航空发动机几乎都采用了镍基单晶高温合金作为其涡轮叶片材料。但是，由于镍基单晶高温合金造价昂贵，考虑到经济效益，一些民用航空发动机涡轮叶片仍然采用等轴晶高温合金和定向凝固高温合金材料，同时，这两种合金也被广泛应用于发动机导向叶片、涡轮盘及其他使用温度相对较低的部件。

图 1.2 铸造镍基高温合金的发展^[10]

DS 表示定向凝固高温合金；SC 表示单晶高温合金

镍基高温合金是一个含有 Ni、Al、Cr、Co、Ta、W、Mo 等多种合金元素的复杂合金体系。按元素在合金中的作用,可分为固溶强化元素(如 Ni、Cr、Co、Mo、W、Re 等)、沉淀强化元素(如 Ta、Ti、Nb、Al 等)和晶界强化元素(如 C、B、Hf、Zr 等),这些元素的共同作用和合金制备工艺的不断发展造就了镍基高温合金出色的高温力学性能以及抗氧化/腐蚀性能、工艺性能、涂层性能、铸造性能、组织稳定性等。在第二代和第三代镍基单晶高温合金中,还添加了 Y、La、Ce 等稀土元素,降低合金在长期高温服役状态下形成有害密排拓扑相的倾向。

铸态的镍基高温合金经过固溶和时效热处理之后形成均匀分布的微观组织结构,其组成为体积分数约为 70%的长程有序的 γ' 相(强化相)以共格形式镶嵌在无序的 γ 相(基体相)中^[11],如图 1.3(a)所示。 γ 相为面心立方结构,是 Cr、Mo、W 等元素溶入 Ni 元素中形成的固溶体,其晶格结构如图 1.3(b)所示, γ' 相是以 Ni_3Al 为基的 L1_2 型金属间化合物,通常含有 Ti、W 等元素,其晶格结构如图 1.3(c)所示,两相之间存在负的晶格错配度。除了 γ 相和 γ' 相外,镍基高温合金晶内和晶界处通常还存在体积分数约为 5%的少量块状 MC 型碳化物与链状分布的 M_6C 型和 M_{23}C_6 型碳化物相。

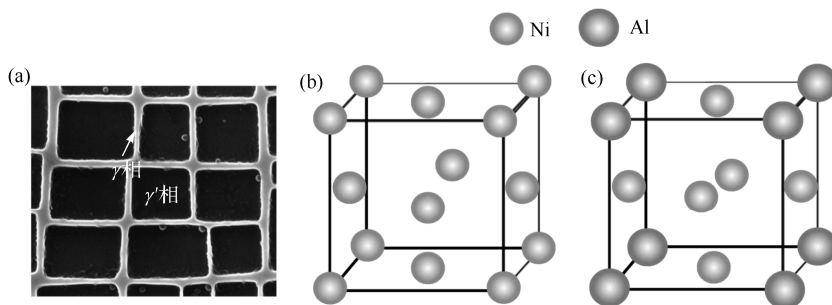


图 1.3 镍基高温合金微观组织结构

(a) γ 相和 γ' 相组织结构; (b) γ 相的晶格结构; (c) γ' 相的晶格结构

镍基高温合金的强化机理主要为固溶强化和第二相强化,固溶强化通过 Ni 元素中大量溶解的 Co、Cr、Mo 等金属元素提高基体的再结晶温度,产生难溶原子团,降低堆垛层错能,从而获得显著的强化效果。第二相强化通过 γ' 相对位错运动的阻碍作用减缓合金的塑性变形,通常认为,第二相强化是镍基高温合金优异高温强度的根本原因。因此, γ' 相的形态、尺寸、体积分数等对镍基高温合金材料的力学性能起着决定性作用,通过合适的热处理工艺可以对 γ' 相的成分和形貌进行控制以获得所需的力学性能。

涡轮叶片材料在高温服役状态下,主要的损伤失效形式包括以下几种。

(1) 拉伸塑性变形。涡轮叶片材料在加工和服役过程中,不可避免地会引入塑

性变形,适当的塑性变形可以提高材料的强度,而过量的塑性变形则会减弱材料的机械性能,严重时会导致构件断裂破坏。镍基高温合金塑性变形的主要微观机制表现为位错及层错的运动和增殖,在宏观上表现为滑移系的开动。

(2) 高温热暴露。航空发动机涡轮叶片材料在燃烧室中承受着 $850\sim 1150^{\circ}\text{C}$ 的超高服役温度,镍基高温合金在长期服役过程中 γ' 相会发生粗化甚至连接形成筏状结构(图 1.4),破坏组织的连续性和稳定性,导致材料性能迅速下降。此外,碳化物相和脆性密排拓扑相的析出也极易成为裂纹源,降低合金的高温力学性能。长期时效作为一种常用的试验方法在一定程度上用来模拟高温合金服役过程中的温度状态,研究合金的组织 and 性能变化,能够为合金的可靠使用提供依据。

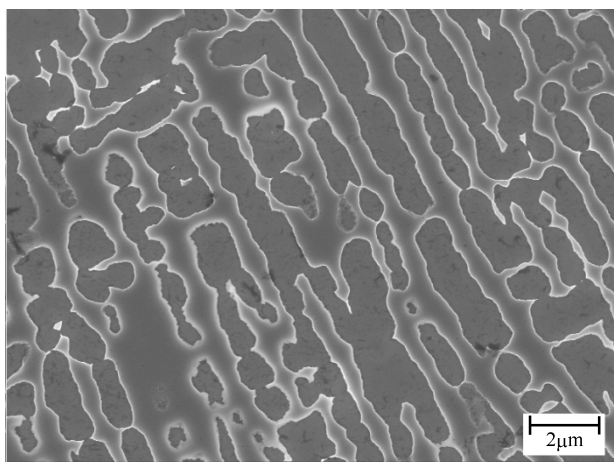


图 1.4 γ' 相粗化示意图

(3) 疲劳。金属构件在循环往复的载荷的作用下,会产生局部永久性累积疲劳损伤,从而引发疲劳裂纹萌生和扩展,导致材料性能退化,造成构件的疲劳断裂。疲劳破坏的应力往往小于材料的强度极限,甚至小于其屈服极限。疲劳破坏是航空发动机涡轮叶片的一种主要失效形式,如图 1.5 所示,由于损伤的隐蔽性和破坏的突发性,疲劳断裂极易引发严重的事故,造成巨大的经济损失^[12]。

(4) 蠕变。离心力导致的蠕变也是航空发动机高温服役部件的一种主要失效机制。蠕变是指在高温恒定应力(一般小于屈服强度)的条件下,材料的应变持续增大的现象。蠕变过程中材料微观组织的变化比较复杂,包括位错的运动和复杂位错结构的形成,还会发生析出相形态和体积分数的变化。在蠕变后期,微观结构的改变和应变累积会导致微孔洞的形成,之后会形成微裂纹,再扩展成宏观裂纹,直至构件断裂破坏。

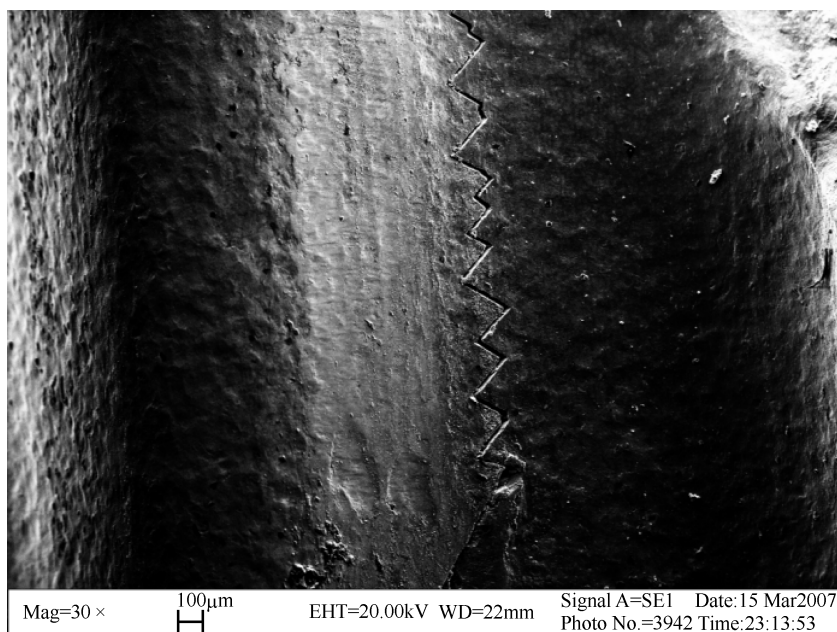


图 1.5 涡轮叶片疲劳破坏示意图

1.3 无损检测评估技术

无损检测(non-destructive testing, NDT)是一门以物理学、电子学和材料科学为基础的综合性应用技术。它能在不损伤被检测对象使用性能、形状及内部结构的条件下,利用材料内部的结构异常或者存在的缺陷所引起的对热、声、光、电、磁等反应的变化来对各种工程材料、零部件、结构等内部和表面缺陷进行探测,并对缺陷的类型、性质、数量、形状、位置、尺寸、分布及其变化做出判断和评价。

无损检测技术逐渐从单纯的检验测试技术发展为无损评估(non-destructive evaluation, NDE)技术,不仅要检测出构件在制造和使用过程中产生的结构不完整性及缺陷情况,及时发现故障,保证设备安全、高效和可靠地运行,还需要对缺陷做出定性或者定量评价,研究缺陷与材料性能的关系,分析缺陷的危害程度,判断构件在缺陷存在的情况下能否继续服役,评价构件的允许负荷、寿命或剩余寿命。

磁粉检测技术、渗透检测技术、涡流检测技术、射线检测技术和超声检测技术为五大常规无损检测技术,这些技术已经具备比较成熟的理论基础、检测方法和相应的检测设备,并且在机械制造、石油化工、造船、汽车、航空航天和核能

等工业领域零部件、构件，以及大型设备的质量管理、在役检测和质量鉴定等方面得到了非常广泛的应用。声发射检测技术、红外检测技术等新兴技术也逐渐在医学、航空航天、机械制造等领域被广泛应用。

(1) 磁粉检测(magnetic particle testing, MT)技术的使用可以追溯到 19 世纪，其利用缺陷与基体材料之间的磁特性差异使得穿过基体材料的磁力线在缺陷处产生弯曲并溢出基体表面形成漏磁场的原理检测基体材料表面和近表面缺陷的存在，如图 1.6 所示。磁粉检测能够直观地显示缺陷的位置、形状和大小，并且可以大致确定缺陷的性质，具有可检出缺陷宽度约为 $0.1\mu\text{m}$ 的高灵敏度，几乎不受试件大小和形状的限制，检测速度快、工艺简单。但是磁粉检测只能用于铁磁性材料，并且只能检测表面或者近表面取向满足一定要求的缺陷，为了提高磁粉检测的灵敏度，在检测之前还需要对待测表面进行充分干燥、去除表面附着物、预先清除导电部位的局部涂料等预处理，目前主要用于金属铸件、锻件和焊缝的无损检测。

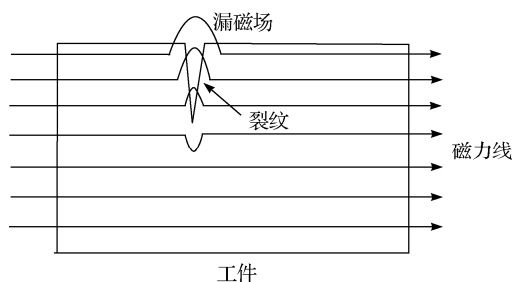


图 1.6 磁粉检测技术原理

(2) 渗透检测^[13](penetrant testing, PT)技术利用渗透液的润湿作用和毛细现象将渗透剂渗入结构损伤和缺陷处，然后用显像剂将渗透剂吸附到构件表面，形成人眼可观测的缺陷显像。渗透检测技术的基本过程包括预清洗、渗透、清洗、干燥、显像、观察等环节，其原理如图 1.7 所示。渗透检测不需要昂贵的设备，检测成本非常低，操作简单便捷，能够直观显示缺陷，具有很高的检测灵敏度，并

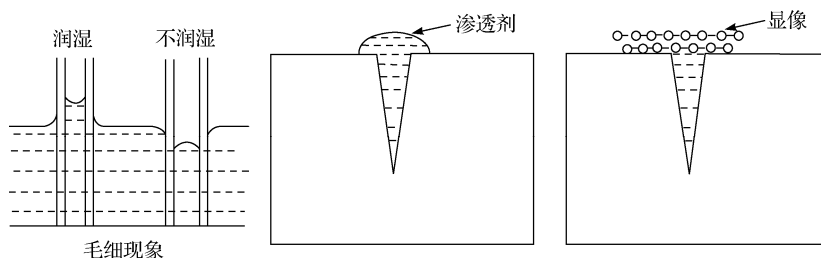


图 1.7 渗透检测技术原理

且不受试件形状、组织结构以及缺陷方位的限制。但是渗透检测只能检测工件表面的开口缺陷,检测结果很容易受到构件表面状态的影响,并且容易造成污染。目前渗透检测技术主要用于有色和黑色金属材料与塑料、玻璃制品的缺陷检测。

(3) 涡流检测^[14](eddy current testing, ECT)技术利用电磁感应原理,通过测量缺陷结构内感生涡流引发的原激发磁场阻抗等特性参数的变化完成缺陷和被测构件性能的检测。涡流检测技术属于非接触性检测,无需耦合,能够在高温、薄壁或者零部件的内孔等其他无损检测技术无法适用的场合进行检测,并且涡流检测技术易于实现快速自动化检测。因此,在工业生产中,涡流检测技术被广泛地应用于各种金属、非金属导电材料及其制作的零部件和构件生产工艺、维修检验的不同质量控制环节。但是,其只适用于导电材料表面或近表面缺陷的检测,并且检测结果不够直观,无法准确地定量解释信号变化的原因。

(4) 射线检测^[15](radiographic testing, RT)技术利用缺陷与被检材料对 X 射线、 γ 射线或中子射线的衰减特性的不同造成接收射线强度的差异,在胶片或者荧光屏上对构件和缺陷进行成像,其原理如图 1.8 所示。射线检测技术可以对缺陷进行定性、定量和定位,适用对象广泛,并且能够直接输出图像信息,检测结果直观,可长期保存。但是,射线检测技术所使用的 X 射线探伤机、成像胶片等比较昂贵,检测成本较高,并且存在一定的安全隐患,在测量时一定要对射线的防护,另外,射线衰减得较快,因此被检物体在射线照射的范围上尺寸不宜过大。

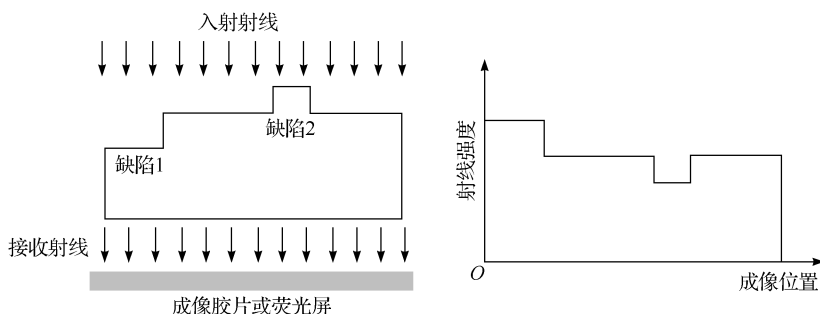


图 1.8 射线检测技术原理

(5) 声发射检测^[16](acoustic emission testing, AT)技术利用材料在外力或内力作用下发生范性形变(金属塑性变形、位错运动等)、裂纹发生及扩展、材料断裂时局部能量以弹性应力波的形式迅速释放发出的声发射信号对材料性能或者结构完整性进行评估。声发射检测技术是一种被动式的动态声学无损检测方法,可以在设备运行过程中对构件中裂纹的产生与发展、材料的塑性变形、显微组织变化等过程进行实时动态监测,检测灵敏度很高,几乎不受材料限制。目前,声发射检

测技术在高压容器、桥梁建筑等结构的完整性评价、焊接过程的监控、涡轮发动机的运行状态等应用领域都起到了非常重要的作用。但是,声发射检测技术需要对构件进行加载,有可能造成结构损伤,并且需要声传感器持续良好地耦合在被检构件表面,极易容易受到环境噪声的影响。

(6) 红外检测^[17](infrared testing, IT)技术通过向外辐射红外热能,在结构表面形成温度场,利用红外检测仪完成结构表面热成像,从而判断被检对象表面或者内部是否存在缺陷。红外检测技术的检测结果形象直观,可以以图像形式保存,能够实现大面积的快速检测,适用对象广,检测灵敏度高。但是红外检测技术的设备非常昂贵,检测成本较高且难以满足结构内部的损伤检测。目前,红外检测技术多用于电子元器件及设备的质量评定、电力和石化设备的运行状态监测、房屋建筑的热效率和安全性检测,也被越来越广泛地应用于火灾监测、农作物优种以及医学诊断等方面,有非常广阔的发展前景。

(7) 超声检测(ultrasonic testing, UT)技术包括超声线性检测技术和超声非线性检测技术。它利用超声波在材料内传播过程中与材料及其中的缺陷相互作用,其传播方向或者特征会因此改变的特性,通过对其声速、衰减系数、频散特性、非线性特性等特征参数的变化进行间接探测和定量表征来实现试件的宏观缺陷检测、几何特性测量、组织结构和力学性能变化的检测和表征,进而对材料特定应用性能进行评价。与其他无损检测技术相比,超声检测技术具有被检测对象范围广,检测深度大,缺陷定位准确,检测灵敏度高,成本低,使用方便,速度快,对人体无害以及便于现场使用等显著优点,是目前使用频率最高、发展最快、也是最有应用前景的一种无损检测方法。

无损检测技术对控制和改进生产过程中材料与构件的质量、保障构件在使用中的安全性和可靠性起着非常关键的作用。每种无损检测技术都有其应用领域及局限性,在工程应用中应该按照实际情况来选取合适的无损检测技术。目前,大多数的无损检测技术局限于对材料或构件损伤后期才出现的裂纹和孔洞等宏观缺陷的检测,而对材料早期损伤和性能退化非常不敏感^[3]。

1.4 超声非线性无损检测

超声检测技术在机械制造、航空航天等工业领域中有着非常广泛的应用。早期的传统超声检测技术主要是基于超声波在传播时与介质中的缺陷相遇发生反射及散射之后,其幅值、相位和能量等线性特征的变化来进行缺陷检测,这种检测本质上反映的是缺陷与周围介质材料的声阻抗差异,适用于对开放式裂纹以及声阻抗相差较大的夹杂等缺陷的检测^[18,19]。后来,纵波声速和声衰减系数等超声线

性系数被成功地用于材料微观组织特征的表征^[20,21],如晶粒的尺寸和分布^[22,23]、残余应力的检测等^[24]。然而,大量研究表明,超声线性系数对材料早期损伤过程中发生的位错、微塑性变形和微裂纹等微观特征变化不敏感,但是这些变化却会引发非常明显的超声非线性效应^[25,26]。超声非线性检测在本质上反映的是微观组织缺陷对介质材料非线性的影响,检测的特征参数并不受限于缺陷和损伤的大小^[27]。

频率超过 20kHz 的声波被称为超声波。超声波从本质上来说是一种以波动方式进行传播的机械振动,因此其在介质中传播时会引发介质内部质点的机械振动,这种振动遵循介质材料的本构关系。当超声激励信号的幅值比较小时,质点的运动会近似服从胡克定律,这是传统线性声学的研究范畴。当超声激励信号的幅值足够大时,质点的振动不再满足线性的应力-应变关系,在其中传播的超声波信号的波形和频率也会产生变化,这就是非线性声学理论的研究基础^[28]。在理想状态下,均匀介质中的质点在超声应力波的作用下其应力-应变关系是线性的,然而由于实际材料的不均匀性和晶格结构的非谐性,未损伤状态下的材料也会呈现出微弱的介质非线性,但是不太明显,可能不具备可检测性,而当介质材料中出现位错、微裂纹等微缺陷时,其应力-应变关系中会出现非线性项,当大振幅的超声波在该介质中传播时会表现出明显的超声非线性现象,超声接收信号的频率成分相对于激励信号会发生变化。由微缺陷引发的超声非线性比材料本身的固有非线性高出几个数量级^[29]。超声非线性检测技术就是通过对响应信号频率的分析来检测材料内部的微观组织缺陷从而进行材料的早期损伤评估。常用的超声非线性检测方法包括高次谐波法^[30]、非共线波混合法^[31]、共振频率偏移法^[32,33]等。其中,高次谐波法目前应用广泛,其检测原理为:当一列有限振幅的单一频率的超声波在介质表面或者内部传播时,声波和介质或材料及其中的微观缺陷发生作用,由于材料自身的非线性和材料损伤部位的强非线性,超声波形会发生畸变且基波能量向高次谐波转移,产生高次谐波信号,如图 1.9 所示。

近几十年来,国内外采用超声非线性检测技术对不同材料在多种载荷状态下的早期损伤进行的相关研究如图 1.10 所示,主要包含理论和试验两方面。理论方面主要集中在有线振幅超声波在固体介质中传播的相关理论,旨在揭示超声波与材料微观组织结构演化的相互作用机理,建立超声非线性与位错、析出相、微裂纹等的相互作用模型。早期研究结果显示,位错是金属材料在塑性变形过程中早期力学性能退化的主要微观组织特征^[34]。早在 18 世纪 50 年代,Granato 等^[35]就将位错引入超声波理论,提出了位错钉轧模型。Hikata 等^[36,37]提出在单一频率的超声应力波的激励下,被钉轧点固定两端的位错弦会发生受迫振动,产生高次谐波分量,并推导了超声非线性系数与位错密度和位错弦长等参数的理论关系。在此基础上,Cash 等^[38]采用位错动力学方法模拟了与伯格(Burgers)矢量夹角不同