

# 基于弱磁技术的钛合金疲劳 监测试验研究\*

张 斌<sup>1</sup>, 于润桥<sup>2</sup>, 胡 博<sup>2</sup>

(1. 中国航空制造技术研究院检测中心, 北京 100024;

2. 南昌航空大学无损检测技术教育部重点实验室, 南昌 330063)

**[摘要]** 在复杂的载荷环境中钛合金受疲劳特性的影响, 容易导致构件出现疲劳断裂。为准确预测钛合金构件疲劳寿命及保障工业安全, 提出一种地磁场环境下基于弱磁测量的疲劳监测方法。在弱磁检测技术的基础上, 提出了弱磁监测的力磁模型, 制作标准拉伸试块, 采用弱磁监测系统和疲劳试验系统进行疲劳监测试验, 并测定试样疲劳前后的点阵常数。结果显示, 疲劳监测过程中, 弱磁信号的变化规律与材料疲劳过程相对应: 疲劳初期, 磁信号小幅波动增长, 晶胞与晶胞之间产生滑移带; 裂纹扩展时, 磁信号持续较长时间的平稳跳变; 最后试样断裂时, 磁信号大幅度增强。在疲劳最后阶段, 即瞬断区试样断裂, 监测磁曲线大幅跃变增强, 曲线结果和力磁模型相一致, 即晶胞被压缩时, 垂直方向上的磁力线的通过截面增大, 磁信号增强。弱磁技术为钛合金实时监测提供了新的思路和方法, 在预测金属疲劳寿命中有潜在的应用价值。

**关键词:** 弱磁; 疲劳寿命; 实时监测; 钛合金; 点阵常数

**DOI:**10.16080/j.issn1671-833x.2020.19.034



张 斌

高级工程师, 主要从事特种焊接结构和复合材料等无损检测技术及设备研究。主持和参与了多项国家及国防重大项目, 发表论文多篇。多次荣获国防与航空工业科技进步奖。

钛合金以钛为基础融合了其他元素的优越性能, 具有高比强度、耐腐蚀性好、耐热耐低温性好、抗冲击性好等突出优点<sup>[1-2]</sup>, 广泛应用于航空航天、海洋工程、化工和医疗等领域。钛合金在飞机要求强度高、耐热性好的部位应用增多, 已逐步淘汰了铝合金、镁合金及钢构件在飞机发动机中的使用<sup>[3]</sup>。在服役过程中, 钛合金受各种环境因素影响, 容易造成构件不同类型的缺陷和失效, 其中最常见的是反复应力作用下引起的疲劳断裂<sup>[4]</sup>。

疲劳破坏是一个日积月累、复杂难测的过程, 晶胞滑移带出现到局部裂纹的萌生, 裂纹的扩展再到整个零

件的报废, 是从微观到宏观的质变。疲劳断裂在远低于材料构件疲劳极限的循环应力作用下就有可能发生, 事先均无明显的塑性变形的预兆, 瞬间造成构件破坏。事实上, 构件在实际服役过程中引起疲劳断裂循环载荷的极大值往往小于估算的安全载荷<sup>[5-6]</sup>。对金属构件实时监测开发研究已成为众多学者的关注重点, 疲劳寿命监测对保障工业领域的安全具有极其重大的意义。许多学者将无损检测技术应用于疲劳检测中, 如最为成熟的声发射技术<sup>[7-9]</sup>。声发射技术可发现裂纹的萌生和开裂, 并通过信号波形和频谱来识别疲劳裂纹扩展信号。但不同的试验方法使得声发射参数缺乏统一的标准, 无法进行有效的对比。同时, 有学者将金

\* 基金项目: 国家自然科学基金(51765048)。

属磁记忆检测技术<sup>[10-11]</sup>用于疲劳监测中,对低周疲劳下叶片疲劳的监测有很好的试验结果。但金属磁记忆的应用范围局限于铁磁性构件,而航空工业的关键构件大多是铝合金、钛合金、镁合金等非铁磁性材料。除此之外还有导波<sup>[12]</sup>、非线性超声<sup>[13]</sup>、涡流<sup>[14]</sup>、红外热成像<sup>[15]</sup>等方法,都取得相应的研究成果,但由于监测环境和材料的限制,在工程应用中有一定的局限性。

为实现钛合金疲劳寿命预测,本文将研究开发弱磁实时监测系统,根据磁信号变化阐释疲劳过程,论证弱磁技术在金属疲劳监测中的可行性以及具有潜在应用价值。弱磁检测技术无需外加磁场磁化,以地磁场为激励源,灵敏度高,可对铁磁性和顺磁性材料实现快速检测。疲劳过程中,因材料在经受疲劳交变载荷时,晶胞发生形变,穿过晶胞的磁力线发生改变,影响材料的磁化率及探测到的磁信号变化。弱磁检测技术通过磁传感器探头探测材料在疲劳过程中的磁信号变化,从而实现疲劳实时监测。首先,在弱磁检测技术的基础上,提出了弱磁监测的力磁模型,阐释弱磁疲劳监测机理,理论上论证了弱磁检测技术的可行性;其次,制作标准拉伸试块,采用弱磁监测系统和疲劳试验系统进行疲劳监测试验,采集疲劳循环加载过程中的磁信号,观察疲劳试验过程中磁信号的变化规律,寻找与疲劳过程的3个阶段的对应关系;最后,测定试样疲劳前后的点阵常数,进一步验证弱磁技术在疲劳监测中的有效性。有效的监测手段能够对复杂在役环境下结构的疲劳寿命进行精准的预测,在构件疲劳断裂前给出警告,同时使构件的使用寿命最大化,提高材料的利用率,降低制造的成本。本文提出的基于弱磁检测技术的钛合金疲劳监测系统,对外在环境要求简单,无需对被测试件进行预处理,对铁磁性材料和非铁

磁性材料均可实现监测。该系统是对应用已经比较成熟的弱磁检测技术的一次探索,也是钛合金疲劳监测技术的大胆创新。

## 材料与方 法

### 1 弱磁疲劳监测原理

弱磁检测技术是以地磁场为天然激励源的被动式无损检测方法,该方法利用高精度高灵敏度的磁传感器探头采集被检试件的自发磁信号,根据磁信号特征对材料损伤进行定性和定量分析。由于其不需外加人工激励,操作便捷,灵敏度高,被广泛应用在石油管道、铁路运输和航空航天等领域。弱磁检测机理以地磁场为天然激励源,基于此提出一种新的力磁模型,即晶胞力磁模型。地磁场作为天然的激励源,一个个组成金属的晶胞可看作处在磁场的“线圈”,地磁场的磁力线穿过金属时,测磁传感器可获取材料表面的感应磁信号。疲劳过程中的监测磁信号反映出构件内部的形变,依据观测的磁信号可预警疲劳断裂及预测疲劳寿命。

假设材料的晶胞均匀分布且大小相同,当材料未发生损伤时,受地磁场的激励,经过每个小“线圈”(晶胞)的磁力线总量是确定的(图1)。如图1(b)所示,此时位于材料表面的磁传感器检测到的磁信号是平稳

波动的。在实际服役环境中,金属构件承受着形式复杂的交变载荷,微观上导致晶胞产生形变,宏观上构件产生损伤。假定循环载荷从织构方向施加,如图1所示,分别在拉力和压力作用下,微观上晶胞的变化导致通过的磁力线总数发生变化。当材料受拉伸作用力时,如图1(a)所示晶胞变得细长,由于垂直方向的磁感应线通过截面减小,通过晶胞的磁感应线随之减小,导致弱磁探头捕捉到的磁信号相应减弱;与之相反的,由于水平方向的磁感应线通过截面增大,通过晶胞的磁感应线随之增大,导致弱磁探头捕捉到的磁信号相应增强。同理,当材料受压缩应力时,如图1(c)所示晶胞变得粗短,由于垂直方向的磁感应线通过截面增大,通过晶胞的磁感应线随之增大,导致弱磁探头捕捉到的磁信号相应增强;与之相反,由于水平方向的磁感应线通过截面减小,通过晶胞的磁感应线随之减小,导致弱磁探头捕捉到的磁信号相应减弱。材料承受长期交变载荷,晶粒在最大切应力面产生滑移带,导致萌生疲劳裂纹。材料在外力的长期反复作用下裂纹持续扩展,金属构件在达到疲劳极限值时断裂。因此,可通过磁信号监测记录金属构件的疲劳过程,根据磁信号曲线阐释材料所处阶段,从而实现安全预警和预测构件寿命的作用。

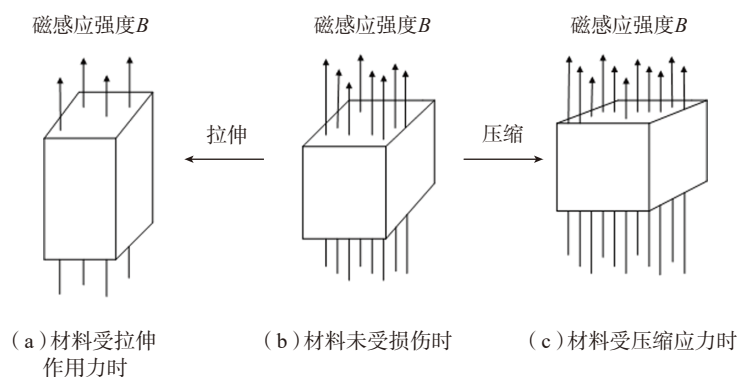


图1 晶胞的力磁模型

Fig.1 Magneto mechanical model of crystal cell

## 2 试件

根据退火状态下的室平衡组织,钛合金通常分为3大类( $\alpha$ 型、 $\beta$ 型及 $\alpha+\beta$ 型),国内此3大类钛合金对应的牌号分别为TA、TB和TC。其中 $\alpha+\beta$ 型钛合金是工业领域应用最广泛的一类钛合金, $\alpha+\beta$ 型钛合金在高温是两相钛合金,结合了两者的优点,如加工性能优越,可满足复杂的工作环境。 $\alpha+\beta$ 型钛合金中使用最广泛的是Ti-6Al-4V,每个国家对应牌号不同,国产Ti-6Al-4V牌号是TC4。TC4结合了 $\alpha$ 及 $\beta$ 两类钛合金的优点,主要特点是塑性好、耐高温,同时还具有优异的低温工作性能,且制造工艺简便,生产效率高。尤其在航空航天构造材料方面,TC4用量占比极高。在航天航空工业领域中如飞机发动机压气机部件、火箭和导弹的结构件,钛的使用量在美国号称全“钛”飞机(SR-71高空高速侦察机)中的占比高达飞机零件重量的93%。故在本试验中选用具有代表性的TC4钛合金材料加工制作试验试样,并展开测试,其化学成分含量如表1所示。

如图2所示,工件试样主要由试

验部分和夹持部分组成,即中间部分为试验区,两端为夹持区。通过夹具把试样两端固定,高频疲劳机通过两端的夹头将交变载荷施加到试样中间部分。试样中间部分是试验的关键区域,通过采集试样中间部分的监测磁信号来反映金属的疲劳状态,一般情况下设计试样时,中间部分往往比两端尺寸小,这样可以使承受应力比两端高,从而保证在试验区断裂。试验区与两端通过缓和的圆角与夹持部分相衔接,连接部分的平滑过渡可最大程度降低应力集中。试样为板厚为3mm的TC4钛合金轧制板材,按照Q/6S 977—2004标准制作而成,将4个试样装载于高频疲劳机上展开轴向拉-压疲劳试验。试样实物如图3所示,每个试样的尺寸相同均为206mm长,两端夹持区尺寸为40mm $\times$ 50mm,设计的尺寸适合夹具的安装及传感器的摆放;试验区与两端的连接区域为R120mm的过渡圆弧,中间的疲劳试验区宽度为15mm。如图3(c)所示,为保证试样在切削加工之后尺寸在合理的偏差范围内,每个试样之间间隔了足够的余量。同时为了不破坏材料原本

的特性,注意加工制造过程中的方向应与轧制方向相同。加工完成后对试样分别编号为1#、2#、3#、4#、5#和6#,以及对每个试样和母材的上下正反反面做标识,同时把每个试样对应的母材用作疲劳前样品,以测定疲劳断裂前后点阵常数。

## 3 疲劳监测系统

试验采用的疲劳监测系统主要由弱磁信号检测监测系统和疲劳试验系统两部分。弱磁信号监测系统

表1 TC4钛合金化学成分质量分数

Table 1 Chemical composition of TC4 titanium alloy %

Ti	Al	V	Fe	C	O	N	H
余量	5.5~6.75	3.5~4.5	$\leq 0.30$	$\leq 0.08$	$\leq 0.20$	$\leq 0.05$	$\leq 0.015$

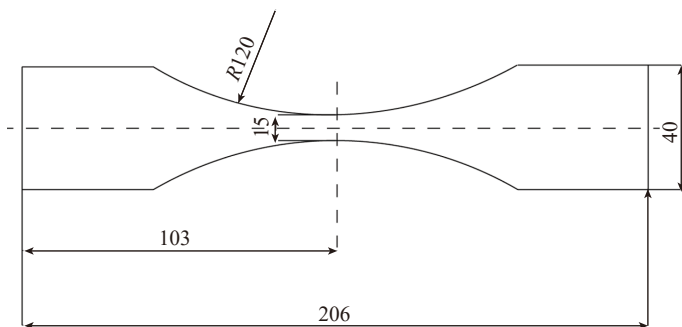
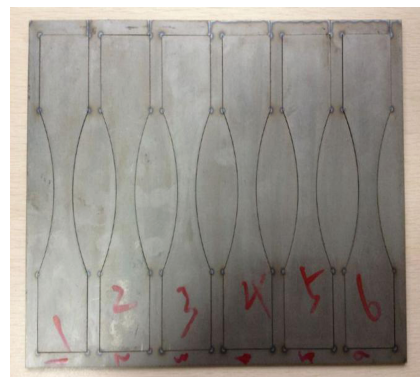


图2 轴向疲劳板材光滑试样

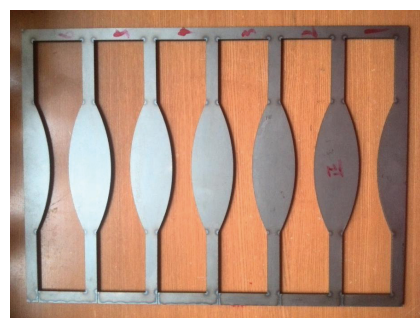
Fig.2 Plate specimen for axial fatigue



(a) 试样整体实物图



(b) 单个试样实物图



(c) 母材实物图

图3 试样实物图

Fig.3 Physical map of plate specimens

由自主研发的弱磁检测仪及高分辨率测磁传感器组成,德国 Zwick 电磁共振式高频疲劳试验机系统示意图如图 4 所示。弱磁监测系统首先利用测磁传感器捕捉材料表面的磁感应强度,通过监测磁信号与疲劳过程的对应关系分析材料内部的损伤状态。测磁传感器为  $\phi 12\text{mm}$  的圆柱形直探头,分辨率为  $1\text{nT}$ 。德国 Zwick 电磁共振式高频疲劳试验机通过正弦波共振产生循环载荷,将载荷施加在构件上可进行高频拉伸、压缩试验及拉压交变负荷下的疲劳性能、断裂力学性能测试。德国 Zwick 电磁共振式高频疲劳试验机的参数分别为:最大加载荷为  $150\text{kN}$ ,机器频率  $50/60\text{Hz}$ ,最高试验频率  $300\text{Hz}$ 。在装载试样之前,首先利用电机调整夹

具的高度,以便于后续操作。其次安装好试样上端后,再装载下半部分。在确认试样居中对齐之后,使用扳手进行固定。在固定试样之前同时应注意对角顺序,施加载荷才不会被分散。在实际工程应用中,钛合金构件的高周疲劳破坏往往是高频振动引起的。因此,本文采用应力比为  $0.1$  的非对称循环轴向拉-拉高周疲劳进行试验。量取各个试样的截面尺寸,并计算截面面积,通过载的应力确定最大加载力  $F_{\max}$ 。并根据式(1)、(2)计算动载、静载大小:

$$F_{\max} = \sigma_{\max} \times S_{\text{截面}} \quad (1)$$

$$x+y=z; x-y=0.1z \quad (2)$$

求得,  $x=0.55z$ ,  $y=0.45z$  其中,  $x$  为静载;  $y$  为动载;  $z$  为加载最大力。疲劳试验的参数如表 2 所示。

## 结果与讨论

### 1 弱磁疲劳监测结果

为保证加工后的试样的一致性,在进行疲劳试验前,采用磁法检测仪对每个试样预检。对每个试样正、反面进行检测,并重复多次。如图 5 所示,试样的检测结果为一条平滑的曲线,没有磁异常波动。说明试样在加工后无缺陷,排除了制造缺陷对疲劳试验的干扰,可以进行疲劳监测试验。

图 6 所示为 6 个试样的弱磁系统监测曲线图,可以看出,6 个试样的监测结果相似,即疲劳寿命有些许差异,但变化趋势一致,有良好的一致性和重合性。起始时信号有小幅增长,最后阶段信号波动剧烈,中间绝大部分时间信号处于平稳波动状态。如图 6 (a)所示,疲劳监测信号划分了 3 个阶段。(1)开始施加交变载荷时,磁信号突然小幅增长,说明晶粒沿最大切应力面开始产生滑移带,萌生疲劳裂纹。因为试件表面开始产生滑移时,磁感应线通过截面突然增大,通过晶胞的磁感应线随之增大,导致弱磁探头捕捉到的磁信号相应增强。滑移带的产生是突变的,导致平稳的磁信号在起始时出现小幅波动。(2)中间很长一段时间,磁信号处于平稳波动中,可视为裂纹扩展阶段。该阶段持续较长时间,几乎占了整个疲劳周期的 90%,磁信号相比于裂纹萌生时的变化较为缓慢。磁信号整体变化平稳,这与疲劳过程

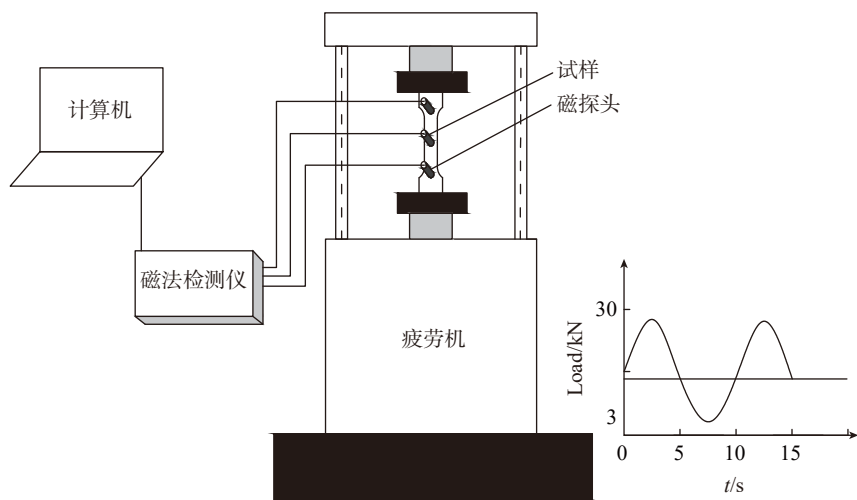


图4 疲劳监测系统示意图

Fig.4 Schematic diagram of fatigue monitoring system

表2 疲劳试验参数

Table 2 Fatigue test parameters

试样编号	应力比	截面尺寸/mm	$F_{\max}/\text{kN}$	加载频率/Hz	静载/kN	动载/kN
1#	0.1	$3.04 \times 14.96$	27.06	83	14.88	12.18
2#	0.1	$3.04 \times 15.03$	27.87	83	15.33	12.54
3#	0.1	$3.03 \times 14.99$	27.25	83	14.99	12.26
4#	0.1	$3.05 \times 15.00$	25.85	83	14.22	11.63
5#	0.1	$3.01 \times 14.93$	27.64	83	15.2	12.44
6#	0.1	$3.05 \times 14.97$	27.85	83	15.32	12.53

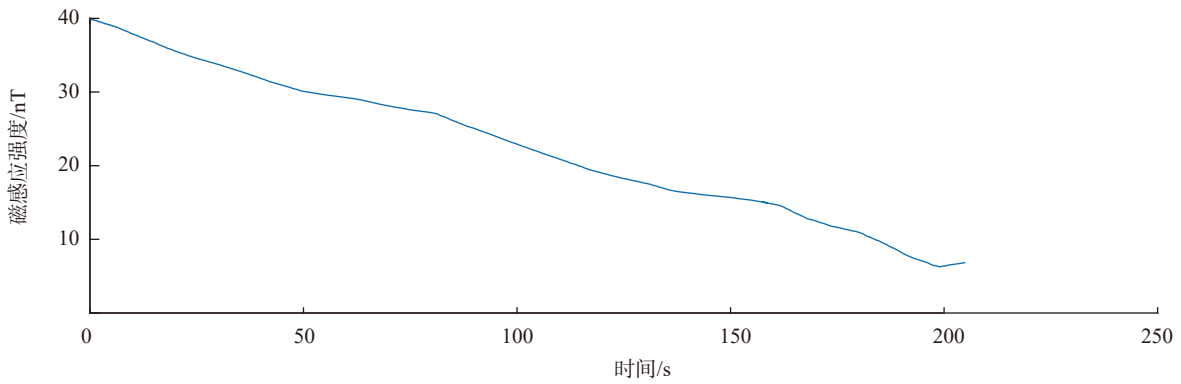


图5 疲劳试样磁法检测结果图  
Fig.5 Magnetic testing results of fatigue specimens

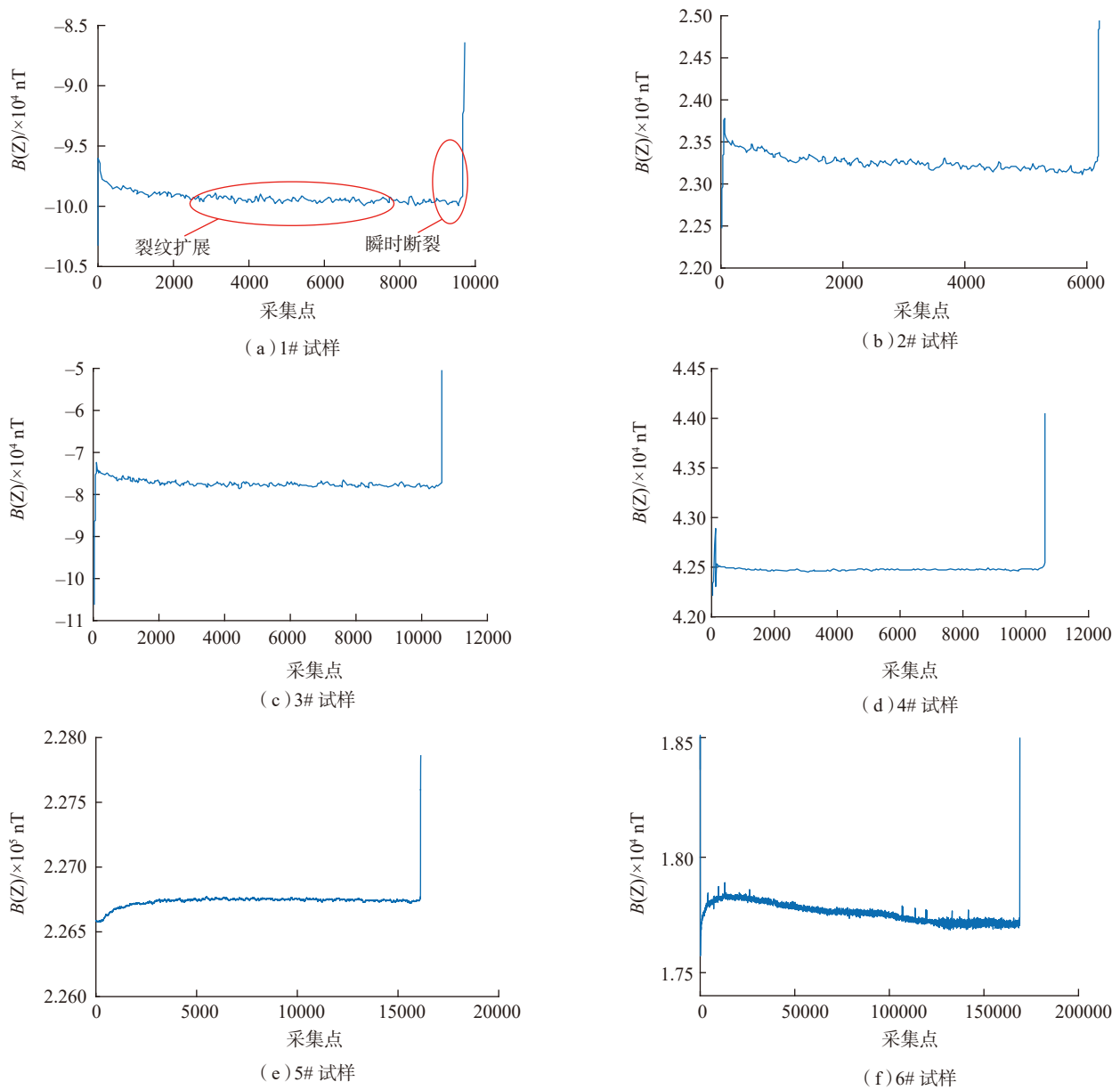


图6 疲劳监测曲线  
Fig.6 Fatigue monitoring curve

相吻合,即裂纹扩展阶段占据疲劳寿命绝大多数时间。(3)在曲线末端,磁信号迅速上升,同时试样断裂。试样断裂处内部晶胞被压缩,垂直方向的磁感应线通过截面增大,断裂间隙磁力线密度增加,从而磁传感器在试样表面采集到的磁感应强度急剧升高。根据弱磁监测系统中磁传感器探测到的磁信号,结合力磁模型理论,阐释了磁信号与材料疲劳过程的关系,说明基于地磁场的弱磁检测技术用于钛合金疲劳监测分析是可行的。

## 2 点阵常数的测定及结果分析

点阵常数表示了晶胞的大小及形状,共有6个常量,分别为3条棱的长度( $a$ 、 $b$ 和 $c$ ),棱两两之间的夹角( $\alpha$ 、 $\beta$ 和 $\gamma$ )。钛有 $\alpha$ -Ti和 $\beta$ -Ti两种同素异构体, $\alpha$ -Ti在25℃时的点阵常数分别为 $a=(2.9503 \pm 0.0004) \text{ \AA}$ , $c=(4.6831 \pm 0.0004) \text{ \AA}$ , $c/a=(1.5873 \pm 0.0004)$ 。 $\beta$ -Ti在25℃时的点阵常数为 $a=(3.2320 \pm 0.0004) \text{ \AA}$ ,其中 $\text{\AA}=10^{-10}$ 。本文采用TC4钛合金,常温下为 $\alpha+\beta$ 两相钛合金。

点阵常数是结晶物质的基本结构参数,反映了晶胞内部成分和受力状态。当温度、载荷或其他因素变化时,晶胞会随之变化,点阵常数也相应改变。在疲劳过程中,试样在载荷作用下产生疲劳裂纹,点阵常数必然随晶胞的形变发生变化。为测试疲劳前后晶胞的点阵常数,采用X射线衍射仪进行试验。在疲劳试样断口和母材处取样,采用线切割电火花技术将所取样品切割为 $15\text{mm} \times 10\text{mm}$ 的块状。点阵常数的测定结果如表3~5所示。

材料长期在交变载荷作用下萌生裂纹,裂纹不断扩展,晶胞的形变引起点阵常数的变化。如图7所示, $b$ 值沿 $x$ 轴方向, $a$ 值沿 $y$ 轴方向, $c$ 值沿 $z$ 轴方向,试样平行于 $xy$ 平面。其中,表3显示了疲劳前后 $a$ 值的变化,可看出疲劳后晶胞的 $a$ 值整体变

表3 疲劳前后 $a$ 值的变化

Table 3 Changes of  $a$  value before and after fatigue

Å

试样编号	疲劳前	疲劳后	$\Delta a$
1#	2.92037	2.93003	变大
2#	2.92754	2.92298	变小
3#	2.92040	2.93257	变大
4#	2.92122	2.92796	变大
5#	2.92638	2.92473	变小
6#	2.92181	2.93253	变大

表4 疲劳前后 $c$ 值的变

Table 4 Changes of  $c$  value before and after fatigue

Å

试样编号	疲劳前	疲劳后	$\Delta c$
1#	4.66501	4.64948	变小
2#	4.67117	4.65088	变小
3#	4.66539	4.65596	变小
4#	4.64974	4.65349	变大
5#	4.66393	4.64515	变小
6#	4.66281	4.66642	变大

表5 疲劳前后 $c/a$ 值的变化

Table 5 Changes of  $c/a$  value before and after fatigue

试样编号	疲劳前	疲劳后	$\Delta a(c/a)$
1#	1.5974	1.5868	变小
2#	1.5956	1.5911	变小
3#	1.5975	1.5877	变小
4#	1.5917	1.5893	变小
5#	1.5936	1.5882	变小
6#	1.5959	1.5912	变小

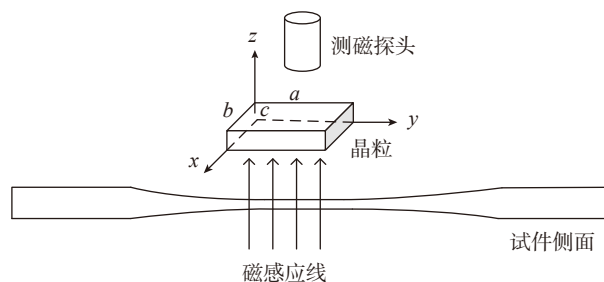


图7 弱磁监测示意图

Fig.7 Schematic diagram of weak magnetic field monitoring

大了,其中有两个试样略微减小;从表4可看出,疲劳后试样的点阵常数 $c$ 值基本减小了,其中有两个试样略微增大;表5显示了疲劳前后点阵常数 $c$ 与 $a$ 的比值, $c/a$ 数值全部变小。由于不同晶粒之间略有差异,部分晶

粒的形变并没有严格按照载荷加载方向发生变化,所以疲劳前后有两个试件的 $a$ 、 $c$ 值的改变与其他试件不同,但大部分试件的变化趋势是一致的,且全部试件的 $c/a$ 值是变小的。 $\alpha$ -Ti单晶的线膨胀系数是各向异性

的,  $c$  轴方向的线膨胀系数大于  $a$  轴方向的线膨胀系数。本文采用轴向拉-拉高周疲劳试验, 在交变载荷作用下,  $c$  轴相比于  $a$  轴方向更容易发生形变。晶胞发生形变,  $c/a$  值的减小说明了晶胞在  $z$  轴方向被压缩。在压缩状态下, 晶胞变得粗短, 由于垂直方向的磁感应线通过截面增大, 通过晶胞的磁感应线随之增大, 导致弱磁探头捕捉到的磁信号相应增强。点阵常数的测试结果解释了疲劳监测过程中, 当裂纹萌生和断裂时, 磁信号都是增大的, 同时印证了力磁模型的正确性。

### 结论

针对钛合金疲劳监测问题, 在理论上结合基于地磁场的弱磁检测机理, 研究了一种新的晶胞力磁模型, 并开展了弱磁无损检测技术在钛合金疲劳过程中相关测试及研究。根据点阵常数的测定结果, 阐释了监测过程中磁信号的变化与试样内部变化的关系。试验相关结果表明弱磁技术可用于钛合金疲劳寿命监测, 可得出以下结论:

(1) 疲劳试验中探测到的磁信号较好地反映了疲劳过程的各个阶段: 在起始阶段, 磁信号小幅上升, 随后较长时间的扩展阶段磁信号在保持稳定波动, 在试样断裂瞬间磁信号迅速跃变增强。监测系统中磁信号的变化与弱磁检测机理相吻合, 验证了弱磁检测技术可用于钛合金疲劳寿命监测。

(2) 点阵常数的测定结果显示, 疲劳断裂后  $a$  值整体趋势变大,  $c$  值整体趋势变小, 而  $c/a$  的数值全部变小了; 疲劳前后的点阵常数变化说明, 晶胞在疲劳过程中, 压缩产生的形变大于由拉伸产生的应变, 垂直方向的磁感应线通过截面增大, 通过晶胞的磁感应线随之增大, 导致弱磁探头捕捉到的磁信号相应增强。证实了提出的力磁模型的正确性, 进一步验证了弱磁技术的有效性。

### 参考文献

[1] 邢淑仪, 王世洪. 铝合金和钛合金[M]. 北京: 机械工业出版社, 1987.

XING Shuyi, WANG Shihong. Aluminum and titanium alloys[M]. Beijing: China Machine Press, 1987.

[2] 邓瑞刚, 毛小南, 杨冠军, 等. 钛合金疲劳行为研究现状[J]. 热加工工艺, 2011, 40(8): 1-4, 12.

DENG Ruigang, MAO Xiaonan, YANG Guanjun, et al. Research status of fatigue behavior of titanium alloy[J]. Hot Working Technology, 2011, 40(8): 1-4, 12.

[3] 陶春虎, 刘庆, 曹春晓, 等. 航空用钛合金的失效及其预防[M]. 北京: 国防工业出版社, 2002.

TAO Chunhu, LIU Qing, CAO Chunxiao, et al. Failure and prevention of aeronautical titanium alloy[M]. Beijing: National Defense Industry Press, 2002.

[4] 王仁智, 吴培远. 疲劳失效分析[M]. 北京: 机械工业出版社, 1987.

WANG Renzhi, WU Peiyuan. Fatigue failure analysis[M]. Beijing: China Machine Press, 1987.

[5] 鲁红权, 张俊乾, 范镜泓. 不同晶向金属纳米线拉伸力学性能分子动力学研究[J]. 固体力学学报, 2011, 32(5): 433-439.

LU Hongquan, ZHANG Junqian, FAN Jinghong. Molecular dynamics study of the tensile mechanical behavior of metallic nanowires with different orientation[J]. Acta Mechanica Sinica, 2011, 32(5): 433-439.

[6] 曾冬梅, 介万奇, 黄斌, 等. 碲镉镉晶体晶格畸变的测定与分析[J]. 人工晶体学报, 2006, 35(1): 58-62.

ZENG Dongmei, JIE Wanqi, HUANG Bin, et al. Measurement and analysis of lattice distortion of CdZnTe single crystal[J]. Journal of Synthetic Crystals, 2006, 35(1): 58-62.

[7] MASLOUHI A. Fatigue crack growth monitoring in aluminum using acoustic emission and acousto-ultrasonic methods[J]. Structural Control and Health Monitoring, 2011, 18(7): 790-806.

[8] 朱荣华, 刚铁. 铝合金疲劳裂纹扩展声发射监测[J]. 焊接学报, 2013, 34(3): 29-32.

ZHU Ronghua, GANG Tie. Fatigue

crack propagation of aluminum alloy based on acoustic emission monitoring[J]. Transactions of the China Welding Institution, 2013, 34(3): 29-32.

[9] MOHAMMAD M, ABDULLAH S, JAMALUDIN N, et al. Quantitative relationship between strain and acoustic emission response in monitoring fatigue damage[J]. Journal Teknologi, 2013, 66(1): 955-965.

[10] 金宝, 邸新杰, 张建军, 等. 疲劳裂纹扩展的金属磁记忆信号特征[J]. 材料工程, 2014, 42(11): 102-106.

JIN Bao, DI Xinjie, ZHANG Jianjun, et al. Metal magnetic memory signal feature of fatigue cracking propagation[J]. Journal of Materials Engineering, 2014, 42(11): 102-106.

[11] WITO M. High sensitive methods for health monitoring of compressor blades and fatigue detection[J]. The Scientific World Journal, 2013, 2013: 1-31.

[12] MASSEREY B, FROMME P. In-situ monitoring of fatigue crack growth using high frequency guided waves[J]. NDT & E International, 2015, 71: 1-7.

[13] CONNOLLY G D, LI J, ROKHLIN S. Fatigue crack monitoring in engine-grade titanium alloy by dynamic subtraction of surface acoustic wavemodulation[J]. NDT & E International, 2013, 55: 47-56.

[14] 丁华, 何宇廷, 杜金强, 等. 花萼状涡流传感器及其飞机金属结构疲劳损伤监测试验研究[J]. 机械工程学报, 2013, 49(2): 1-7.

DING Hua, HE Yuting, DU Jinqiang, et al. Rosette eddy current sensor and its experimental research on aircraft metallic structure fatigue damage monitoring[J]. Chinese Journal of Mechanical Engineering, 2013, 49(2): 1-7.

[15] 封硕, 王仲奇, 陈维维, 等. 基于疲劳热响应的高强钢疲劳剩余寿命预测[J]. 航空学报, 2014, 35(4): 1034-1041.

FENG Shuo, WANG Zhongqi, CHEN Weiwei, et al. Remaining fatigue life prediction of high-strength steel based on thermal response of fatigue[J]. Acta Aeronautica et Astronautica Sinica, 2014, 35(4): 1034-1041.

通讯作者: 于润桥, 教授, 硕士, 主要从事电磁检测技术研究、仪器研发, E-mail: yurunqiao@163.com.

(下转第 55 页)

## Online Monitoring for Porosity Prediction in Directed Energy Deposition Processes

ZHANG Min, WANG Xingcheng, CHAN Yufei, CHEN Changjun

( Laser Processing Research Center, School of Mechanical and Electric Engineering, Soochow University, Suzhou 215021, China )

**[ABSTRACT]** With the rapid development of manufacturing industry, additive manufacturing (AM) technology has attracted more and more attention in the world. Additive manufacturing has been rapidly developed and widely used in aerospace, industrial machinery, automobile electronics and other fields. The biggest theoretical challenge of direct energy deposition (DED) technology at present is the lack of a deep understanding of the inherent relationship between the process-microstructure-performance, and the lack of an effective and cost-effective online monitoring process in the actual production process. Therefore, the repeatability, uniformity and reliability of the products manufactured by DED are difficult to meet the increasing production requirements of industry. This article introduces the DED in the process of heat-physical mechanism of the process. On the basis of summarizing the changes in temperature, molten pool size and molten pool morphology during the manufacturing process, summarizes the research of AM based on DED of online monitoring in the stomatal monitoring, and points out the existing problems and future development direction.

**Keywords:** Additive manufacturing; Online monitoring; Melt pool; Directed energy deposition processes; Porosity

(责编 阳光)

(上接第40页)

## Experimental Study on Fatigue Monitoring of Titanium Alloy Based on Weak Magnetic Technology

ZHANG Bin<sup>1</sup>, YU Runqiao<sup>2</sup>, HU Bo<sup>2</sup>

(1. Testing Center, AVIC Manufacturing Technology Institute, Beijing 100024, China;

2. Key Laboratory of Nondestructive Testing of Ministry of Education, Nanchang Hangkong University, Nanchang 330063, China)

**[ABSTRACT]** Titanium alloy is subject to cyclic load for a long time in service, and the components are prone to fatigue fracture. Fatigue monitoring of titanium alloy structure is of great significance to industrial safety. In this paper, a fatigue monitoring method combined with weak magnetic field measurement is proposed. On the basis of weak magnetic testing technology, the force magnetic model of weak magnetic monitoring is put forward, the standard tensile test block is made, the weak magnetic monitoring system and fatigue test system are used for fatigue monitoring test, and the lattice constants before and after fatigue were measured. The results show that the change of magnetic signal in fatigue test has good coincidence and consistency with the fatigue process, and the magnetic signal in the most extended stage of fatigue life keeps stable and small amplitude fluctuation, and finally the magnetic signal rises sharply in the transient area. In the last stage of fatigue, the sample in the stage of instantaneous fracture is fractured, and the monitoring magnetic curve is greatly enhanced. The curve results are consistent with the force and magnetic model, the cross-section of the magnetic line of force in the vertical direction increases, and the magnetic signal is enhanced when the cell is compressed. It has been proven that it is feasible to monitor the fatigue of titanium alloy with weak magnetic field.

**Keywords:** Weak magnetic; Fatigue Life; Real-time monitoring; Titanium alloy; Lattice constant

(责编 阳光)