

DOI: 10.7652/xjtuxb201911022

PVD 薄膜传感器的振动疲劳裂纹监测可行性研究

宋雨键¹, 崔荣洪¹, 刘凯², 马斌麟¹, 高志刚¹

(1. 空军工程大学航空工程学院, 710038, 西安; 2. 中国人民解放军 95606 部队, 646000, 四川泸州)

摘要: 为确定将离子镀膜技术制备的物理气相沉积(PVD)薄膜传感器用于监测振动疲劳裂纹的可行性,开展了以 PVD 薄膜传感器和 2A12-T4 铝合金试验件为对象的研究。通过有限元仿真分析确定了试验件易产生裂纹的位置,并通过离子镀膜技术完成了 PVD 薄膜传感器的制备。对比了不同表面处理状态试验件的共振频率与振动幅值的变化和疲劳强度,应用显著性分析方法分析了制备 PVD 薄膜传感器的过程对基体振动响应特性的影响。使用逐步加载法对不同表面处理状态的试验件进行了振动疲劳试验,并对其疲劳强度进行了对比。进行了 2A12-T4 铝合金试验件的振动疲劳裂纹初步监测试验,对制备有 PVD 薄膜的试验件的指定点电位差进行了测量。研究结果表明:PVD 薄膜传感器的制备过程不会对基体振动响应特性和振动疲劳性能产生不利影响;PVD 薄膜传感器与基体具有良好的损伤一致性;PVD 薄膜传感器适用于普通基体的振动疲劳裂纹监测。

关键词: 裂纹监测;物理气相沉积薄膜;传感器;振动疲劳

中图分类号: V215.6;TP212.1 **文献标志码:** A **文章编号:** 0253-987X(2019)11-0156-09

Feasibility Study on PVD Thin Film Sensor for Vibration Fatigue Crack Monitoring

SONG Yujian¹, CUI Ronghong¹, LIU Kai², MA Binlin¹, GAO Zhigang¹

(1. College of Aeronautics Engineering, Air Force Engineering University, Xi'an 710038, China;

2. 95606 Unit of the Chinese People's Liberation Army, Luzhou, Sichuan 646000, China)

Abstract: The physical vapor deposition (PVD) thin film sensor prepared by ion plating technology and the 2A12-T4 aluminum alloy test piece are investigated. The feasibility of PVD thin film sensor for vibration fatigue crack monitoring of common substrate is verified. Finite element simulation analysis is carried out to determine the location of cracks in the test piece, and the preparation of the PVD film sensor is completed by ion plating technology. Then, the resonance frequency, vibration amplitude and fatigue strength of the test pieces with different surface treatment states are compared. In the significance analysis, it is verified that the process of preparing the PVD film sensor does not exert an obvious impact on the vibration fatigue performance of the common substrate. The preliminary monitoring test of vibration fatigue crack in 2A12-T4 aluminum alloy test piece demonstrates that the monitoring results of the PVD film sensor coincide well with the actual observation results, and the PVD film sensor has good damage consistency with the substrate. The PVD film sensor meets the requirements for

收稿日期: 2019-04-22。 作者简介: 宋雨键(1996—),男,硕士生;崔荣洪(通信作者),男,副教授。 基金项目: 国家重点研发计划资助项目(2018YFF0214700)。

网络出版时间: 2019-07-22

网络出版地址: <http://kns.cnki.net/kcms/detail/61.1069.T.20190722.0931.002.html>

vibration fatigue crack monitoring of common substrates.

Keywords: crack monitoring; physical vapor deposition film; sensor; vibration fatigue

在飞机服役过程中,由于各种荷载和环境条件的作用,金属结构的强度和刚度会逐渐降低,进而出现疲劳、腐蚀、磨损等多种形式的损伤,最终导致结构失效^[1-3]。其中,疲劳失效是金属结构在服役过程中最常见的失效方式,约占全部失效构件的 50%~90%^[4]。疲劳失效时材料宏观上无塑性变形,失效形式往往为低应力下的破断,且疲劳失效受载荷历程的影响严重,这使得疲劳失效相比于静载荷下的失效更加危险和难以察觉^[5]。

在结构疲劳破坏中,有一类特殊情形,那就是振动疲劳破坏。振动疲劳失效相比于一般静态疲劳,往往具有载荷组成复杂(结构受多种冲击、瞬态或随机载荷影响)、响应不可控(结构受外载荷与结构自身模态惯性力与阻尼力影响)等特点,对结构安全的威胁更加致命^[6]。国内由于振动疲劳发生过多起飞机结构失效案例,例如:2002 年中国台湾的中华航空 611 号班机发生空中解体坠毁,机上人员全部罹难,原因是飞机在发生事故后维修不当,缺陷部位在振动载荷下发生高周疲劳失效^[7];中国某军机蓄压油箱曾发生过空中爆破事故,其原因是蓄压油箱所处位置的外部振动环境复杂,油箱壳体出现疲劳裂纹并扩展,导致燃油泄漏,从而造成了严重事故^[8]。由此可知,对机体主要承载结构和重要部位进行裂纹监测,是防止、减少安全隐患和灾难性事故发生的一种重要手段,对确保飞机的适航性、安全性有着重大意义。

目前,国内外应用于飞机结构裂纹监测的主要手段有压电薄膜传感器^[9]、光纤传感器^[10]、相对真空传感器^[11]、涡流传感器^[12]、声发射技术^[13]等。物理气象沉积(PVD)薄膜传感器以电位法原理^[14]和与基体结构的损伤一致性为基础,是一种用于结构健康监测的新型手段。文献[15]设计了一种基于电位法的裂纹监测传感器,并通过对传感器有限元模型的输出特性进行分析,验证了该方案的可行性。文献[16]使用编制的加速试验谱对采用最佳沉积材料和工艺参数制备的薄膜传感器开展了模拟服役环境下 PVD 薄膜传感器监测结构疲劳裂纹的应用验证。文献[17]尝试在孔挤压强化、喷丸强化和激光冲击强化试验件上制备了 PVD 薄膜传感器,通过试验验证了 PVD 薄膜传感器与强化基体具有良好的损伤一致性,适用于强化基体的疲劳裂纹监测。

以上研究表明,基于结构一体化的 PVD 薄膜传感器具有广阔的发展前景。但是,现阶段关于 PVD 薄膜传感器的研究还多集中于常规疲劳损伤监测领域,针对振动疲劳问题的研究还未开展,一些重要问题急需解决,例如:传感器与基体具有良好的损伤一致性是 PVD 薄膜传感器使用的重要前提^[17],因此 PVD 薄膜传感器能否在振动环境中、复杂多变的载荷的作用下具有与基体良好的损伤一致性需要进行深入研究;由于阳极氧化会对构件的疲劳性能造成影响^[18],所以阳极氧化以及传感器的制备过程是否会对基体的振动疲劳性能产生不利影响也需开展相关试验进行验证。

本研究以基于离子镀膜技术制备的 PVD 薄膜传感器为研究对象,从工程应用角度出发,利用对比试验,从损伤一致性和对普通基体振动疲劳性能的影响两个方面对 PVD 薄膜传感器应用于普通基体振动疲劳裂纹监测的可行性进行了验证,并进行了普通基体试验件振动疲劳裂纹的在线监测试验。

1 研究方法

1.1 PVD 薄膜传感器监测原理

PVD 薄膜传感器是采用现代表面工程技术中的 PVD 方法,将导电功能材料一体化集成在金属结构表面,通过监测导电薄膜结构中电场信息的变化来感知金属结构疲劳裂纹损伤的结构健康监测手段^[19]。由里及表,PVD 薄膜传感器依次由绝缘隔离层、导电传感层、封装保护层共 3 层功能梯度材料构成。PVD 薄膜传感器监测金属结构疲劳损伤原理如图 1 所示。与传统直流电位法的差别在于,PVD 薄膜传感器对金属结构裂纹的监测主要依赖于其自身与基体结构的损伤一致性,即当基体金属结构发生疲劳损伤时,具有随附损伤特性的导电传感层也在相同部位出现裂纹,并随基体裂纹不断扩展,引起损伤区域损伤传感层的电阻变化,通过监测分析损伤传感层的电位(电阻)信息就能得出基体结构的损伤情况。由于 PVD 薄膜传感器的损伤传感层厚度仅为微米级,且一般采用导电性能较强的 Cu、TiN 等材料制备,裂纹的萌生与扩展对其电阻将产生更大的影响。

1.2 可行性分析的必要性

飞机机体结构与机载设备、零部件的设计往往

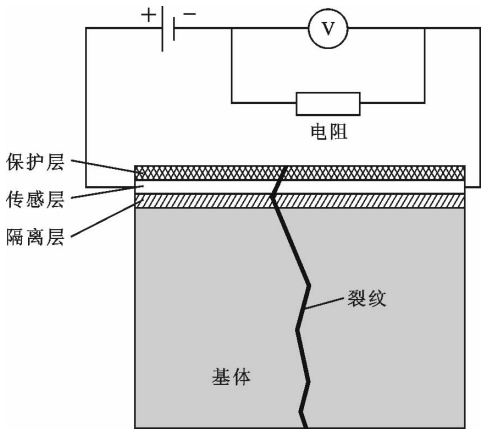


图 1 PVD 薄膜传感器原理示意图

都考虑了其振动模态,这些结构的固有共振频率会远离发动机工作及飞行中突风载荷的振动频率,从而避免了结构发生共振和疲劳失效加速。因此,PVD 薄膜传感器的制备若大幅度改变了结构的振动响应特性,将打破原有的规避设计,增加结构失效的风险。

如果结构健康监测手段的应用使结构基体的振动疲劳性能降低,那么对结构损伤的监测也将失去意义。在 PVD 薄膜传感器制备过程中,阳极氧化、离子镀膜等工艺会在强化基体时局部引入较高温度,复杂的表面处理工艺也有可能改变基体表面的应力分布,进而影响基体的振动疲劳性能。由于这些因素之间的关系十分复杂,本研究从工程应用角度出发,利用对比试验,研究 PVD 薄膜传感器的制备对试验件振动疲劳性能的影响。

2 试验件及传感器制备

2.1 试验件及传感器位置的确定

本研究选择飞机金属结构中使用广泛的 2A12-T4 铝合金作为基体材料,其具体成分(质量分数)如表 1 所示。参照航空工业部的发动机叶片及材料振动疲劳试验方法^[20]设计了平面结构,振动疲劳试验件平面尺寸如图 2 所示。

表 1 2A12-T4 铝合金的化学成分(质量分数)

元素	Al	Cu	Mg	Fe
质量分数/%	≥91.8	3.8~4.9	1.2~1.8	≤0.5
元素	Si	Zn	Ni	其他
质量分数/%	≤0.5	≤0.3	≤0.1	≤0.1

该型试验件的模型为对称模型,为保证分析结果的真实有效,同时提高计算效率,参照文献[21]中对于网格的划分方式,将试验件在厚度方向划分为

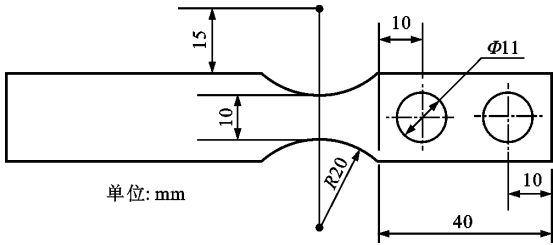


图 2 试验件平面尺寸

8 层网格,网格厚度约为 0.25 mm,网格边长约为 1.5 mm。采用 Abaqus 有限元仿真软件对试验件进行模态分析求解,得到第 1 阶振型(共振频率为 173.05 Hz)危险部位的应力分布,如图 3 所示。

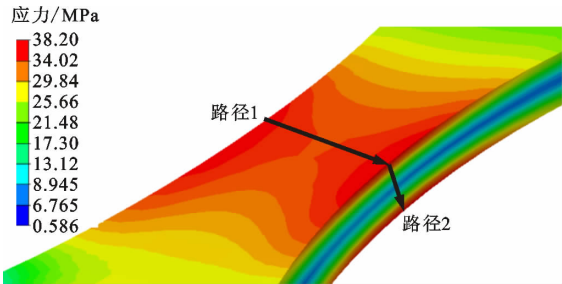
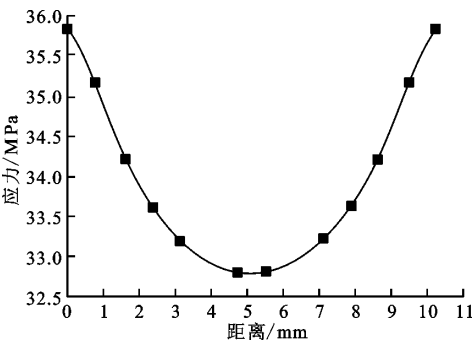


图 3 第 1 阶振型危险部位的应力分布

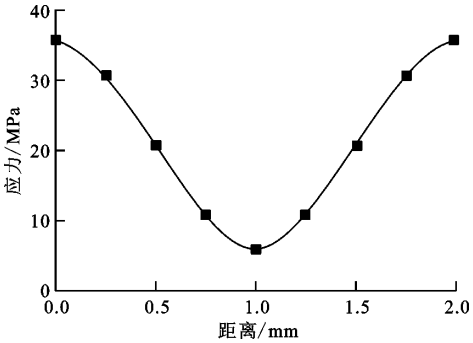
由图 3 可知,在狗骨型试验件弧边处,应力急剧增大。在弧边应力集中区域的中心,沿试验件宽度方向建立路径 1,沿厚度方向建立路径 2,做出第 1 阶振型 Mises 应力沿路径 1、2 的分布曲线,如图 4 所示。由图 4 可知:沿宽度方向,应力变化幅度较小,但两侧弧边应力较中部更为集中;沿厚度方向,试验件应力变化幅度巨大,试验件上下表面应力集中而截面中部应力较低,出现明显的分层现象。以上分析表明,试验件在该振型下的疲劳损伤部位可能位于上下表面靠近弧边的两侧。

2.2 PVD 传感器制备

根据试验件设计与有限元分析结果,参考适用于传统疲劳试验件的 PVD 薄膜传感器工艺参数^[17],在试验件危险部位制备 PVD 薄膜传感器。PVD 薄膜传感器的绝缘隔离层采用硫酸阳极氧化工艺制备 Al₂O₃ 薄膜,以模拟在飞机铝合金结构中广泛使用的阳极氧化表面处理,具体工艺步骤如图 5 所示。随后,应用脉冲偏压电弧离子镀技术,在阳极氧化处理后的试验件上制备 Cu 导电传感层,沉积工艺参数如表 2 所示。最终制备完成的 PVD 薄膜传感器形貌如图 6 所示,其在服役结构上使用前还需采用 AlN 薄膜与 705 硅胶进行封装处理。



(a) 路径 1



(b) 路径 2

图 4 应力沿不同路径的分布曲线

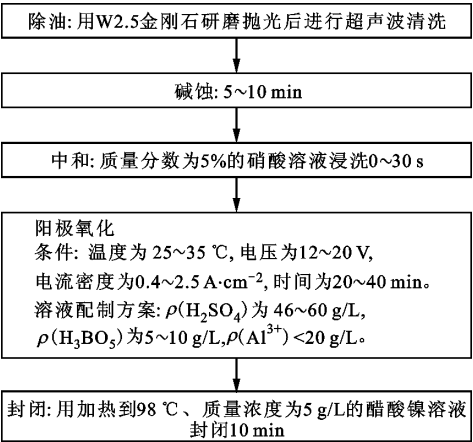


图 5 阳极氧化工艺流程

表 2 沉积工艺参数

负偏压/V	氩气分压/Pa	沉积时间/min	弧电流/A
140	0.3~1.3	85	60

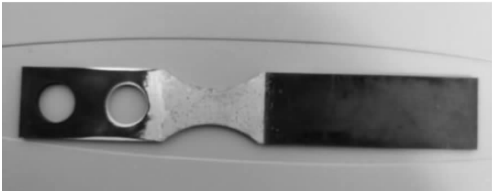


图 6 制备的覆有 PVD 薄膜传感器形貌

3 可行性验证

3.1 PVD 薄膜传感器对基体振动响应特性的影响

选择 3 个试验件(x-1、x-2、x-3),在阳极氧化及 PVD 薄膜制备前后,分别采用定加速度方式进行扫频,定加速度为 50 Hz/min,激振量级为 0.1 g,扫频范围为 100~300 Hz,扫频量级为 0.5%。通过分析试验件在阳极氧化和 PVD 薄膜制备前后第 1 阶共振频率与振动幅值的变化,来判定 PVD 薄膜传感器制备过程对试验件振动特性是否存在影响。统计的扫频结果如表 3 所示,其中 A 状态表示试验件原始状态,B 状态表示试验件阳极氧化后的状态,C 状态表示试验件阳极氧化后制备有 PVD 薄膜的状态。

由表 3 可知,经过阳极氧化处理后,试验件的固有频率出现较为明显的改变,下降幅度在 20%左右。除考虑试验过程中环境因素、试验因素和人为因素等造成的误差外,原因分析为阳极氧化的前处理和阳极氧化过程会造成杂质或第二相粒的溶解,产生点蚀等试样表面的缺陷^[22],从而使试验件厚度减小,造成试验件固有频率降低。阳极氧化处理后的试验件固有频率与有限元仿真的第 1 阶振型共振频率相差更大,更利于防止试验件共振破坏。阳极氧化处理后的试验件上再制备 PVD 薄膜,固有频率基本没有发生变化,所以制备 PVD 薄膜对试验件的固有频率几乎不存在影响。同时,阳极氧化处理能够减小试验件在相同量级下的位移振幅,变化率普遍达到 65%左右,有助于抑制金属结构的剧烈共振。同样地,制备 PVD 薄膜几乎对试验件的位移振幅不存在不利影响。因此,PVD 薄膜传感器制

表 3 试验件扫频结果

状态	x-1				x-2				x-3			
	频率 /Hz	频率变化 率/%	振幅 /mm	振幅变化 率/%	频率 /Hz	频率变化 率/%	振幅 /mm	振幅变化 率/%	频率 /Hz	频率变化 率/%	振幅 /mm	振幅变化 率/%
A	168.32	0.00	0.693 6	0.00	165.91	0.00	0.542 3	0.00	166.77	0.00	0.634 7	0.00
B	132.28	21.41	0.221 4	68.08	127.94	22.92	0.196 4	63.78	134.07	19.60	0.189 6	70.13
C	128.94	23.39	0.254 7	63.27	131.46	20.76	0.201 7	62.81	133.37	20.03	0.163 9	74.17

备不会对金属结构的振动响应产生不良影响。

3.2 PVD 薄膜传感器对基体振动疲劳强度的影响

试验采用东菱 ES-50-445 电动振动试验系统,该系统通过 Vibstar 振动控制仪产生激励信号,经功率放大器放大后由振动台经夹具传递给试验件,为了控制试验系统在指定频率下稳定振动,使用激光位移传感器监测试验件的位移,通过电荷式传感器测量该系统的加速度,并据此调整激励信号,形成闭环控制。对试验件边缘使用 280 号砂纸进行打磨处理,消除因切割加工产生的毛刺。使用有限力矩扳手,对 4 个螺栓施加 120 N·m 的扭矩,然后对试验件进行夹持。根据有限元仿真结果及几何对称原则,将应变片布置在狗骨型试验件弧形段上表面。这是因为试验件第 1 阶振型在该部位产生应力集中,在此处布置应变片便于后续的应力标定。考虑到升降法^[23]需要的试验件数量和耗费的时间较多,且对试验件的同一性要求特别高,因此在此次可行性探究试验中考虑使用逐步加载法进行振动疲劳试验,具体步骤为:在 105 MPa 应力下进行 10⁶ 次循环加载,若试验件未发生破坏,则增加 5% 应力后再进行 10⁶ 次循环加载,重复以上步骤直至试验件失效。

由于在振动疲劳试验中不便于直接观测裂纹损伤,依据前期试验经验,假设当试验件第 1 阶固有频

率相对于初始值下降 10% 为试验件失效^[24],并停止试验。试验件的疲劳强度计算公式为

$$\sigma_A = \sigma_{pr} + \frac{N_f}{N_t}(\sigma_f - \sigma_{pr})$$

(1)

式中: σ_A 为高周疲劳强度; σ_f 为失效力; σ_{pr} 为失效前一应力; N_f 为失效力下加载的循环数; N_t 为固定加载循环数,本文为 10⁶。

根据上述步骤,分别对 10 个狗骨型标准试验件(d-1~d-10)进行振动疲劳试验,试验结果如表 4 所示。对 10 个阳极氧化后危险弧段制备有 PVD 薄膜的试验件(p-1~p-10)进行振动疲劳试验,试验结果如表 5 所示。

从表 4 可得:除去 3 个试验件(d-3、d-9、d-10)在第 1 次加载时便出现裂纹不符合初步加载法要求致使数据无效外,剩余试验件的平均疲劳强度为 113.05 MPa。在对阳极氧化后危险弧段制备有 PVD 薄膜的试验件进行试验时发现,p-1 与 p-2 试验件均在逐级加载 4 次后,在 120 MPa 应力水平才失效破坏,因此从 p-3 试验件开始,将初始应力水平提高至 115 MPa 以节省试验时间。从表 5 可得,阳极氧化后危险弧段制备有 PVD 薄膜的试验件的平均疲劳强度为 121.36 MPa,且各试验件疲劳强度的分散性较小。相较于原始试验件,本组试验件的疲

表 4 标准试验件的振动疲劳试验结果

试件编号	初始频率/Hz	应力/MPa	循环数	频率下降量/Hz	失效形式	疲劳强度/MPa
d-1	167.97	110	10 ⁶	2.66	无失效	116.61
		115	10 ⁶	8.39	无失效	
		120	321 569	17.35	出现裂纹	
d-2	165.22	110	10 ⁶	4.69	无失效	114.34
		115	869 783	16.88	出现裂纹	
d-3	165.39	110	789 641	28.36	出现裂纹	—
d-4	163.98	110	10 ⁶	9.68	无失效	110.68
		115	135 976	17.35	出现裂纹	
d-5	168.22	110	10 ⁶	6.33	无失效	112.46
		115	492 028	17.35	出现裂纹	
d-6	165.66	110	10 ⁶	4.63	无失效	112.99
		115	597 684	17.66	出现裂纹	
d-7	166.31	110	10 ⁶	5.38	无失效	114.18
		115	836 791	16.57	出现裂纹	
d-8	161.29	110	10 ⁶	3.67	无失效	110.12
		115	25 697	17.38	出现裂纹	
d-9	167.55	110	66 753	17.29	出现裂纹	—
d-10	163.68	110	487 625	20.34	出现裂纹	—

表 5 阳极氧化后危险弧段制备有 PVD 薄膜试验件的振动疲劳试验结果

试件编号	初始频率/Hz	应力/MPa	循环数	频率下降量/Hz	失效形式	疲劳强度/MPa
p-1	128.94	110	10 ⁶	1.34	无失效	121.18
		115	10 ⁶	3.45	无失效	
		120	10 ⁶	6.87	无失效	
		125	236 879	15.32	出现裂纹	
p-2	131.46	110	10 ⁶	2.45	无失效	122.90
		115	10 ⁶	3.97	无失效	
		120	10 ⁶	7.63	无失效	
		125	579 682	14.58	出现裂纹	
p-3	133.37	115	10 ⁶	1.79	无失效	122.84
		120	10 ⁶	4.33	无失效	
		125	567 862	14.75	出现裂纹	
p-4	134.43	115	10 ⁶	2.21	无失效	121.69
		120	10 ⁶	5.32	无失效	
		125	338 947	15.38	出现裂纹	
p-5	129.64	115	10 ⁶	1.34	无失效	116.68
		120	336 794	14.77	出现裂纹	
p-6	135.24	115	10 ⁶	2.39	无失效	121.74
		120	348 976	15.48	出现裂纹	
p-7	131.32	115	10 ⁶	1.83	无失效	123.74
		120	748 659	14.74	出现裂纹	
p-8	130.97	115	10 ⁶	1.69	无失效	122.84
		120	10 ⁶	4.37	无失效	
		125	568 944	15.22	出现裂纹	
p-9	132.77	115	10 ⁶	1.48	无失效	119.34
		120	867 598	13.98	出现裂纹	
p-10	127.98	115	10 ⁶	1.25	无失效	120.62
		120	10 ⁶	3.49	无失效	
		125	124 547	15.11	出现裂纹	

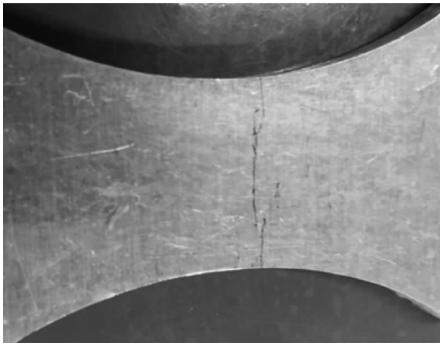
劳强度有小幅度的升高,普遍集中于 119~123 MPa。分析可能是阳极氧化工艺中的高温提高了铝合金基体的表面内应力,阳极氧化膜具有高于铝合金基材的硬度,致使试验件的振动疲劳性能略有提高。

4 振动疲劳裂纹监测初步验证

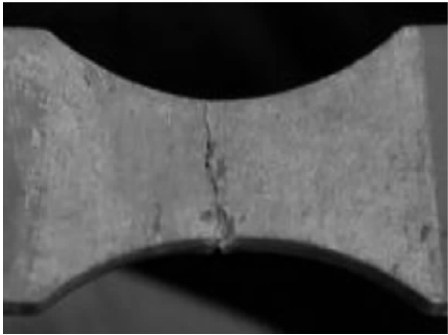
PVD 薄膜传感器已被验证能够在试验室条件下对常规疲劳裂纹进行有效监测^[25],但疲劳裂纹的萌生过程是复杂的,振动疲劳的损伤机理与常规疲劳存在一定差异,因此有必要通过可行性试验进行验证。

原试验件和阳极氧化后危险弧段制备有 PVD 薄膜的试验件的最终破坏形貌如图 7 所示。阳极氧

化后危险弧段制备有 PVD 薄膜的试验件最终破坏形貌与原试验件类似,裂纹在试验件弧段表面萌生并扩展,与有限元分析结果吻合。此外,由于整个试验周期较长,且未对 PVD 薄膜施加封装保护,试验结束时大多数 PVD 薄膜已经发生明显的氧化、变暗。同时,个别试验件疲劳裂纹周边的 PVD 薄膜出现脱落分层等失效现象,分析原因为狗骨型试验件的 1 阶模态在弧段表面应力最为集中。在振动疲劳载荷作用下,PVD 薄膜传感器与基体的损伤一致性有待提高,而 PVD 薄膜传感器损伤传感层与基体的结合力主要与薄膜制备工艺参数相关^[25],因此后期需要通过试验进一步确定最佳的薄膜制备工艺参数。



(a)原试验件



(b)制备有 PVD 薄膜的试验件

图 7 试验件破坏形貌

指定测量点位示意图如图 8 所示。在振动疲劳试验前后分别使用大华 DH1718E 直流稳压电源,从图 8 中 B 点输入、 C 点输出 3 A 的恒定直流电流,并分别测量试验件破坏前后的电压 U_{AC} 、 U_{AD} 、 U_{BC} 、 U_{BD} ,结果如图 9 所示。PVD 薄膜传感器的电阻值受诸多因素(如多次循环加载、温度等)的影响,但是由这些因素引起的电阻值变化均是微小、缓慢的,对最终的试验结果影响不大。

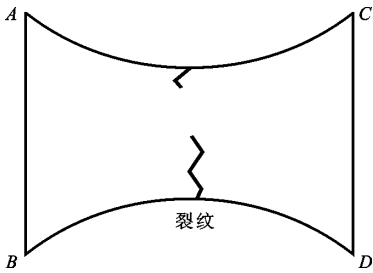
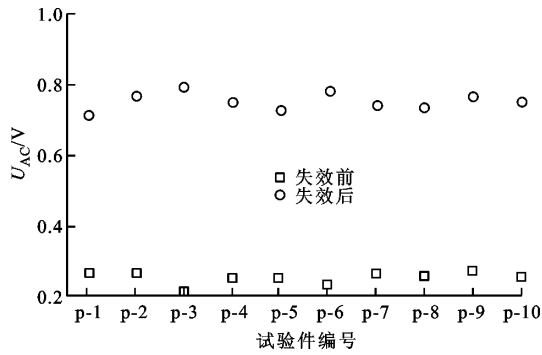
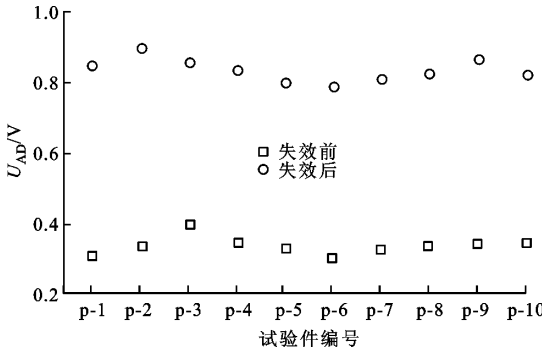


图 8 指定测量点位示意图

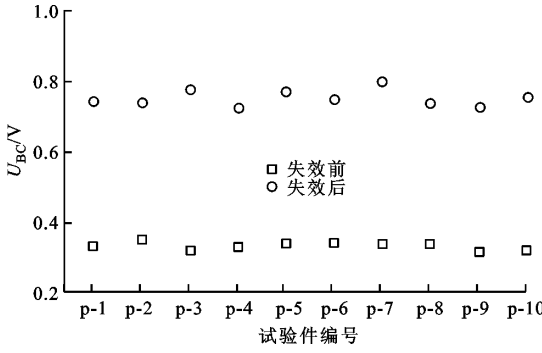
试验前后 PVD 薄膜传感器指定点位间的电位差对比如图 9 所示,可以看出:在疲劳试验前,PVD 薄膜传感器的指定点位间电位差基本保持恒定,而在振动疲劳失效后,几乎所有的试验件,不同监测位点之间的电位差均是显著增大的;同一试验件不同测量位点之间电位差在疲劳失效前后增大的幅度也存在较大差异。在此次试验中, U_{AC} 、 U_{AD} 、 U_{BC} 、 U_{BD}



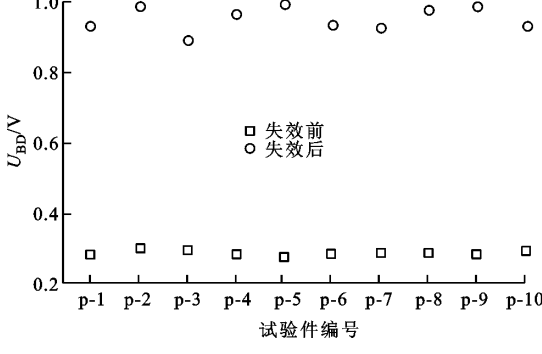
(a) U_{AC}



(b) U_{AD}



(c) U_{BC}



(d) U_{BD}

图 9 指定点位间的电位差对比

的均值分别从失效前的 0.26 、 0.34 、 0.33 、 0.29 V 增至失效后的 0.75 、 0.83 、 0.75 、 0.95 V ,试验件疲劳失效后指定点的电位差均值约为失效前的 $2\sim 3$ 倍,

增加幅度显著。因此,后期通过对传感器进行合理布置,可以实现 PVD 薄膜传感器的裂纹精确监测。

综上可知,PVD 薄膜与金属基体结构在振动载荷下具备损伤一致性,试验件疲劳失效后,PVD 薄膜部分指定点位间的电位差会发生显著变化,可以实现对基体振动疲劳裂纹的监测。

5 结 论

(1)不同状态下试验件的振动疲劳对比试验及显著性分析结果表明,PVD 薄膜传感器制备过程中的阳极氧化工艺及离子镀膜沉积过程不会对基体的振动疲劳性能造成不利影响。

(2)疲劳裂纹监测试验及结果分析表明,PVD 薄膜传感器与基体在振动疲劳载荷下具有较好的损伤一致性,但现有的镀膜工艺参数亟需改进优化。这为后续 PVD 薄膜传感器形状的确定以实现疲劳裂纹萌生与扩展的精准监测提供了参考。

(3)封装保护是确保 PVD 薄膜传感器耐久性的重要保证,而现有的镀膜工艺参数存在结合力差、易氧化等致命问题,因此后续有必要针对封装保护层的最优制备材料和工艺进行相关研究。

综上,PVD 薄膜传感器适用于对普通基体振动疲劳裂纹的监测。

参考文献:

- [1] 沈海军. 疲劳破坏: 飞机安全的“杀手”[J]. 百科知识, 2007(24): 13-14.
- [2] 邓增杰,周敬恩. 工程材料的断裂与疲劳[M]. 北京: 机械工业出版社, 1995: 1-5.
- [3] 张勇,孙强,卞贵学,等. 飞机结构的腐蚀防护与腐蚀疲劳研究的发展趋势[J]. 新技术新工艺, 2014(5): 128-131.
- ZHANG Yong, SUN Qiang, BIAN Guixue, et al. Research on development trend of corrosion protection and corrosion fatigue of aircraft structures[J]. New Technology & New Process, 2014(5): 128-131.
- [4] 戴婷. 应力和加载频率对疲劳寿命的影响[J]. 广州化学, 2017, 42(2): 64-67.
- DAI Ting. Effect of loading frequency on fatigue life[J]. Guangzhou Chemistry, 2017, 42(2): 64-67.
- [5] 陈传尧. 疲劳与断裂[M]. 武汉: 华中科技大学出版社, 2002: 2-5.
- [6] 刘文光,陈国平,贺红林,等. 结构振动疲劳研究综述[J]. 工程设计学报, 2012, 19(1): 1-8, 24.
- LIU Wenguang, CHEN Guoping, HE Honglin, et al. Review of studying on vibration fatigue[J]. Journal of Engineering Design, 2012, 19(1): 1-8, 24.
- [7] 刘文光. 结构共振疲劳试验及裂纹构件的振动疲劳耦合分析[D]. 南京: 南京航空航天大学, 2010: 1-2.
- [8] 张金亮. 飞机蓄压油箱的振动疲劳寿命分析[D]. 沈阳: 沈阳航空航天大学, 2016: 1-2.
- [9] 樊程广,潘孟春,罗飞路,等. 基于 PVDF 压电薄膜传感器的超声检测试验[J]. 无损检测, 2012, 34(1): 27-30.
- FAN Chengguang, PAN Mengchun, LUO Feilu, et al. Ultrasonic testing experiment based on the PVDF piezoelectric film sensor[J]. Nondestructive Testing, 2012, 34(1): 27-30.
- [10] KUANG K, CANTWELL W J. Use of conventional optical fibers and fiber Bragg gratings for damage detection in advanced composite structures: a review[J]. Applied Mechanics Reviews, 2003, 56(5): 493.
- [11] 李炳乾. MEMS 粗真空传感器研制[J]. 传感器技术, 2005, 24(1): 87-88.
- LI Bingqian. Development of MEMS vacuum sensor[J]. Journal of Transducer Technology, 2005, 24(1): 87-88.
- [12] 陈祥林,丁天怀,黄毅平. 新型接近式柔性电涡流阵列传感器系统[J]. 机械工程学报, 2006, 42(8): 150-153.
- CHEN Xianglin, DING Tianhuai, HUANG Yiping. Novel flexible eddy current array sensor system for proximity sensing[J]. Chinese Journal of Mechanical Engineering, 2006, 42(8): 150-153.
- [13] RABIEI M, MODARRES M. Quantitative methods for structural health management using in situ acoustic emission monitoring[J]. International Journal of Fatigue, 2013, 49: 81-89.
- [14] WEI R P, BRAZILL R L. An AC potential system for crack length measurement [C]// The Measurement of Crack Length and Shape during Fracture and Fatigue. Warley, UK: EMAS, 1980: 190-201.
- [15] 杜金强,何宇廷,崔荣洪,等. 基于电位法原理的金属结构裂纹监测传感器研究[J]. 南京航空航天大学学报, 2010, 42(3): 387-391.
- DU Jinqiang, HE Yuting, CUI Ronghong, et al. Crack monitoring sensor of metallic structures based on electric potential method[J]. Journal of Nanjing University of Aeronautics & Astronautics, 2010, 42(3): 387-391.

(下转第 170 页)