文章编号:1001-5078(2020)10-1207-05　　·红外技术及应用·

铝合金疲劳裂纹振动红外热成像检测研究

高治峰[1],董丽虹[2],王海斗[2],吕振林[1],郭　伟[2],王博正[2],杨　洁[2]
(1. 西安理工大学材料科学与工程学院,陕西 西安 710048;2. 陆军装甲兵学院 装备再制造技术国防科技重点实验室,北京 100072)

摘　要:航空铝合金经过多次使用存在紧密闭合型裂纹严重威胁飞行安全,以带有疲劳裂纹的 7075 铝合金为检测对象,利用超声振动做为振动红外热成像技术的激励源,通过多次调节功率、焊枪与平板之间预紧力和激励位置实现对铝合金板缺陷的识别,实验结果表明,振动热成像技术能检测出紧密闭合裂纹,同时发现检测效果受控于激励功率的影响,功率大振幅显著检测效果好,且功率较大的情况下预紧力对检测效果影响较大,功率较低时预紧力对检测效果小,最后发现在功率一定的情况下合理的调节预紧力和激励位置能使缺陷成像结果更加清晰。

关键词:振动红外热成像;功率;预紧力;振幅
中图分类号:TG115.28　　**文献标识码**:A　　**DOI**:10.3969/j.issn.1001-5078.2020.10.009

Study on vibrothermography detection of fatigue crack in aluminum alloy

GAO Zhi-feng[1], DONG Li-hong[2], WANG Hai-dou[2], LÜ Zhen-lin[1], GUO Wei[2], WANG Bo-zheng[2], YANG Jie[2]
(1. School of Materials Sciences and Engineering, Xi'an University of Technology, Xi'an 710048, China;
2. National Key Lab for Remanufaeturing, Academy of Armored Forces, Beijing 100072, China)

Abstract: Aviation aluminum alloy after many use were tightly closed type crack a serious threat to flight safety, with fatigue crack of 7075 aluminum alloy as test object, the use of ultrasonic vibration as vibration excitation source of vibrothermography, by adjusting the power, between welding torch and tablet pre-tightening force and incentive location, the recognition of defects of aluminum alloy plate is realized. The experimental results show that the vibration of thermal imaging technology can detect the tightly closed crack, also found that detection effect is controlled by driving power, the influence of large amplitude detection significantly effect is good. In addition, under the condition of high power, preload has a great influence on the detection effect, while under the condition of low power, preload has a small effect on the detection effect. Finally, it is found that reasonable adjustment of the preload and excitation position can make the defect imaging result clearer.

Keywords: vibrothermography; power; pre-tightening force; amplitude

1　引　言

铝合金因其密度低、强度高、塑韧性好、热膨胀率小等优良特性而广泛应用于航空航天领域,如机翼、蒙皮、支架等结构都由不同型号的铝合金制成,然而在加工以及长期使用中会给材料带来一定的损伤,最典型的就是长期飞行受往复交变应力而产生

基金项目:国家自然科学基金项目(No. 51675532;No. 51535011)资助。
作者简介:高治峰(1993 -),男,硕士,主要从事红外检测方面的研究工作。E-mail:gzfdxnh@163.com
通讯作者:王海斗(1969 -),男,研究员,博士生导师,博士,主要从事再制造工程,表面工程等方面研究。
E-mail:wanghaidou@aliyun.com
收稿日期:2019-10-29;**修订日期**:2019-12-02

疲劳裂纹,轻则仅是影响使用性能,重则会对产生生命财产安全问题[1-2]。因此,对于主结构铝合金部件损伤检测评估极其重要。

主动红外热成像(IRT)具有非接触、效率高、画面实时呈现等优点,近年来受到越来越多的关注,主动红外热成像中,根据激励方式发热不同,红外热成像技术可分为脉冲相位热成像[3]、激光热成像[4]、涡流热成像[5]和振动热成像等。在这些技术中,振动热成像(vibrothermography,又称超声红外热成像或热声学)将械振动和红外成像技术结合在一起用来检测材料缺陷的无损检测(non-destructive testing, NDT)技术。该技术在 1980 年左右由 Henneke 等人[3,6]首次提出,最初用于陶瓷材料、复合材料等非金属材料的裂纹、冲击损伤以及分层缺陷等方面的研究,随红外技术的发展,利用振动热成像对金属零件的裂纹进行检测已成为研究热点之一,且相关工作主要集中在检测机制机理的研究、影响因素分析和缺陷表征的方法等方面。

目前大多数的研究者通常采用大功率设备对裂纹试样进行激励,如郭兴旺[7]等人发现该技术能对重型铝合金试件内部裂纹快速检测;管和清[8]等人分别从试件厚度、裂纹开口宽度、激振力等因素来研究它们对温升的影响; Park 等[9]采用该技术发现当振动作用于管道外表面时,通过从管道内拍摄的热像图可以检测到更为清晰的缺陷图像;他们所使用的设备功率在 1.5 kW 以上,虽然能检测到裂纹,但其往往会对部件产生新的损伤,因此有必要研究,在采用合理的方式降低功率的情况下对裂纹的检测效果。低功率换能器在复合材料缺陷检测的研究越来越广泛,但对金属构件的相关研究却十分有限。Xuchanghang[10]等人采用隐式有限元法建立了热-电耦合分析方法,模拟了一个低功率压电陶瓷超声驱动器及其在具有多个表面裂纹的金属板中产生热量,为了进一步研究基于低功率作动器的振动热像仪检测金属表面多裂纹的可行性,他们通过对薄铝板试样进行了详细的实验研究,通过调节激励幅值及控制约束条件成功的检测出铝板表面的多裂纹,但该课题组实验的不足在于检测的裂纹较宽,对于闭合疲劳裂纹检测还没有相关工作。

基于此,本文采用可调功率的振动红外热成像技术对 7075 铝合金平板疲劳裂纹进行检测。实验表明,振动红外热成像技术能检测出铝合金疲劳裂纹,通过可调功率的设备进行实验,发现在此类型的检测机制下,功率大小对检测效果具有极大的影响,功率越大平板振幅越大裂纹面接触较为频繁检测效果越好;通过对预紧力的发现,功率降低情况下预紧力对生热影响较小,功率大的情况下预紧力对生热影响大,距离缺陷越近检测效果越好。

2 试验研究

振动热成像的基本概念是将机械能转化为热能,当将机械振动引入试样时,缺陷周围会产生摩擦、粘弹、塑性变形等引起热,这些热可以通过红外摄像机记录下来以检测缺陷[11]。振动热像法的一个主要优点是选择性激励且只有存在缺陷才会引起局部温升,这使得它成为一种快速、安全的无损检测技术。

2.1 振动红外热像检测系统

本实验采用自行搭建的振动红外热像检测系统对铝合金件进行缺陷检测,系统主要结构单元包括超声波发生器、超声焊枪、红外热相仪、夹持装备等,设备如图 1 所示,其中超声波发生器频率为 28 kHz,超声焊枪最大功率为 800 W,红外热像仪(NEC R300),灵敏度为 0.02 ℃,采样频率 30 Hz,本实验对超声波发生器等设备进行了改装,通过外加电压表来控制输出功率,压力传感器来控制焊枪与测试件之间的预紧力。

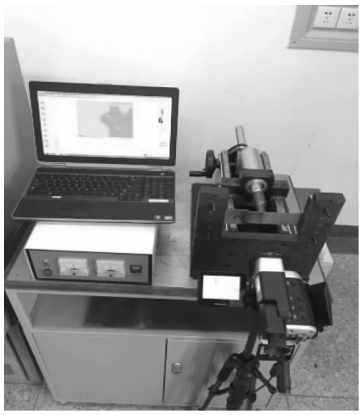


图 1 振动红外热像检测系统

Fig. 1 Vibration infrared thermal image detection system

2.2 试样准备

本次试验件选用的材料为 7075 铝合金,首先将材料制备成拉伸件,试件大小为 220 mm × 50 mm × 2 mm 并在其中部边上端预制了一个 0.3 mm 的线切割口,产生应力集中部位,然后通过疲劳拉伸实验制备了长为 5 mm 左右,开口宽度为 10 μm 级的裂

纹,最终制成试样如图 2 所示,在对裂纹进行局部放大,所萌生裂纹宽度在 1.5 ~ 10 μm 之间,肉眼难以发现。

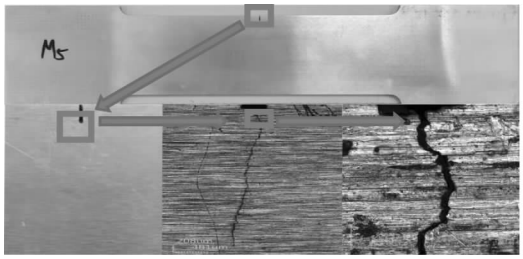


图 2　预制裂纹试样

Fig. 2 Pre-cracked sample

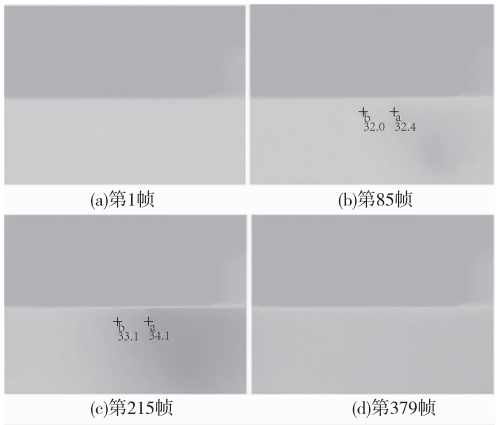
3　结果与讨论

在本部分,给出了可调功率的振动热成像技术对铝合金疲劳裂纹检测的实验结果,并对裂纹处的温谱图和温度数据进行了分析,实验验证了可调功率对疲劳裂纹检测的极限及该方法的有效性,此外还讨论了试样约束条件以及试样与焊枪之间的预紧力等因素对检测效果的影响。

3.1　热图分析

超声焊枪的改装是在振动热成像测试之前进行的,本装置通过外加电压表来实现功率的控制。实验中所使用的换能器谐振频率约为 28 kHz,这个频率也被作为激励频率,在该频率的正弦波范围下换能器有最大的输出功率,每次调节功率后都要对频率进行校正使其达到功率最大输出。每次测试一共连续记录 400 帧热图像,热图记录分为三个周期:激励前 1 ~ 50 帧,激励中 51 ~ 350 帧,激励后 351 ~ 420 帧。

其中激励电压为 180 V 时热图如图 3 所示,由于所制取裂纹与周围区域的热对比度较差,所以从激励前的图像难以识别裂纹位置,当激励开始时裂纹部位热图表现出明显特征,如图 3(b)所示。在热图中裂纹处出现一个很明显的区域,这表明裂纹部位温度发生了上升,通过对比图 3(b)和图 3(c),可以发现在激励阶段裂纹处温度一直有略微升高,但当激励停止后,裂纹处的热图回很快变暗,直到一段时间后裂纹处迹象完全消失图 3(d)。因此,实验结果表明,振动热成像技术在高能量时对于疲劳裂纹能够实现检测,而且发现裂纹右侧温度比左侧温度高,这是因为激励位置在裂纹右侧且超声焊枪与试样接触会产生热,使得试样产生从右到左的热传导。



(a)第1帧　(b)第85帧　(c)第215帧　(d)第379帧

图 3　电压 180 V 时的热图

Fig. 3　Heat diagram at a voltage of 180 V

3.2　温度数据分析

为了揭示在振动时平板及裂纹处更多的热特性,我们测量并分析了该处的温度数据。如图 4 所示,分别在平板选取 2 个点,其位置如图 3(b)所示,整个实验过程可以从 2 个点的温度变化趋势来反映,温度急速上升阶段、激励时温度增加阶段、最后激励结束温度下降阶段,从图中可以发现 a、b 温度都在上升,这是由于超声焊枪与板接触产生热使板整体温度上升,a 点温度高于 b 点是因为 a 点位于缺陷处且离激励源较近,超声能量在缺陷处衰减较大,导致温度上升较大,实验结果表明振动热成像技术对疲劳裂纹检测有明显的效果。

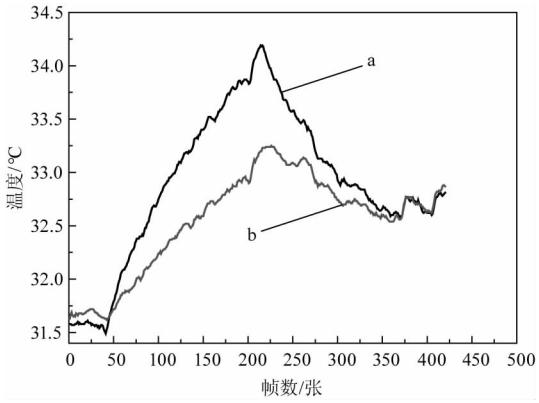


图 4　缺陷 a 与无缺陷 b 点的温度图

Fig. 4 Temperature diagram of defect a and no defect b

3.3　影响因素分析

为了进一步研究振动热成像技术对于疲劳裂纹等紧密闭合型裂纹检测的有效性,从三个方面进行了探究,这些因素包括激励功率(电压)、试样与焊枪之间的预紧力和激励位置。通过一系列的实验研究了激发电压对裂纹处热特性的影响,图 5 分别给出了 90 V、120 V、150 V、180 V、220 V、250 V 对应

峰值点的热图，我们发现当激发电压不小于 90 V 时，裂纹能从原始热图直接观测到，当电压在 90 ~ 250 V 范围时，换能器的电压大约在 330 ~ 900 W 之间，为了评估每个热图的效果，提取裂纹处温度峰值点为研究对象做出电压 - 温度图，如图 6 所示，从图中可以看出随激励电压增大峰值点温度也增大，从而使裂纹处更加清楚的显现出来，表明了功率对检测效果影响较大，在 90 V 以下时从热图上看不出明显的现象。

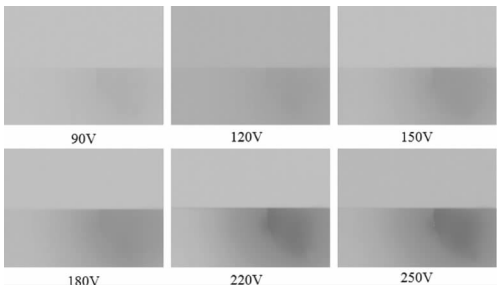


图 5 不同电压下峰值点热图

Fig. 5 Heat diagram of peak points at different voltages

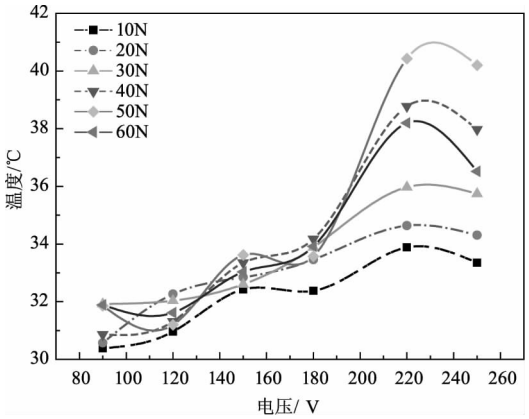


图 6 不同电压下的温度变化图

Fig. 6 Temperature variations under different voltages

在实验中我们发现当功率越大时，裂纹处生热越明显，这是由于功率大时会使得裂纹面两侧的振幅变大，使裂纹面相互接触面积增多，经过高频往复摩擦裂纹处会产生发热，根据实验测得的数据可知，最高温升有 2.56 ℃左右，且经过多次实验后发现，裂纹处有黑色粉末出现，通过 EDS 进行成分分析，结果如图 7，发现其主要元素为 Al，通过对比 7075 铝合金牌号，发现其他元素为该型铝合金的必要成分，这为摩擦生热机理提供了直接的证据。

根据振动热成像的生热原理可知，裂纹周围产生的热量与机械波的传播密切相关，实验对象与超声焊枪之间力的大小会影响机械波传播，因此有必要研究预紧力对裂纹检测产生的一些影响。如前文所述，我们在发现功率对检测效果影响较大的情况下，通过控制试样与焊枪之间的预紧力来探究裂纹处的温升，所加持的预紧力分别为 10 N、20 N、30 N、40 N、50 N、60 N，实验中发现当预紧力超过 60 N 时铝合金薄板会发生略微变形，从而会对试样造成损伤，所以在实验中预紧力小于 60 N。同样也是提取裂纹处某点的峰值点做出力 - 温度图，如图 8 所示。

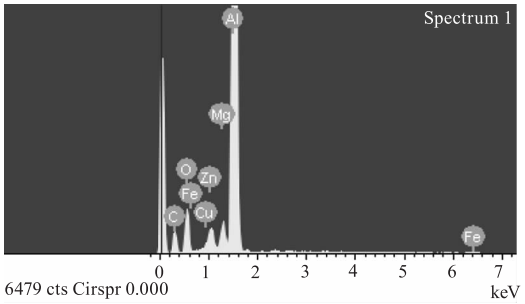


图 7 粉末成分分析

Fig. 7 Powder composition analysis

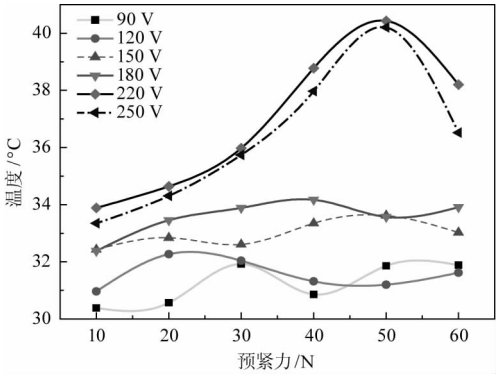


图 8 不同预紧力下的温度变化

Fig. 8 Temperature changes under different preloading forces

从图 8 中可以看出在 90 ~ 120 V 时随预紧力的增大温度波动较小，没有明显的规律，当 180 ~ 250 V时随预紧力的增大，温度呈现先上升后下降的趋势，分析其可能产生的原因是，在激励初期随预紧力增大焊枪与试样接触逐渐紧密是机械波导入较多，但预紧力增大到一定程度，由于试样两端固定，在某一边施加的预紧力会使试样发生轻微变形，从而使裂纹处接触不再紧密，裂纹面无法产生有效的摩擦使得生热减少。这一实验结果表明，振动热成像技术在较低功率下检测紧密闭合裂纹时，预紧力对检测效果影响不大，当功率较大时，预紧力对检测效果有较大的影响，但过大的预紧力会使得平板发生形变，所以预紧力要控制在合适的范围内。

在实验过程中我们发现激励位置对检测结果有直接的影响，做了一系列实验，分别选取裂纹两侧和

下方的位置进行激励,当激励位置离裂纹较远时,其整体温度略有下降,激励位置离缺陷较近时检测效果较好,但当激励位置在缺陷位置上检测效果反而不太好,猜想可能的原因是激励头相对缺陷较大,当激励位置在缺陷上时,缺陷无法产生相对运动而产生热,使得检测效果较弱。

4 结 论

采用振动热成像技术对航空铝合金薄壁结构紧密闭合型疲劳裂纹进行检测研究,并通过调节激励功率、预紧力和激励位置的参数来探究对裂纹处检测的效果。

实验结果表明:

(1)利用超声产生的振动作为红外热成像技术的激励源,能快速准确的识别裂纹所在的位置。

(2)功率对检测裂纹效果有很大的影响,功率在 300 W 低将会很难识别这类裂纹,功率越高裂纹面两侧振幅越大摩擦效果好所以峰值点温度高,裂纹识别速度快图像会更为清晰的显示出来且激励时间会变短。

(3)激励源的位置距离裂纹越近识别越精准,在功率较低情况下预紧力对裂纹识别影响较小,功率较大时,随预紧力增大裂纹处峰值点温度呈现先上升后下降的趋势,根据实验可得最佳范围在 40 ~ 60 N 之间。

参考文献:

[1] Qian Xichang, Yang Shoujie, Zhang Kun, et al. Development and application of aluminum alloys on the transport planes [J]. Light Alloy Fabrication Technology, 2005, (10): 1 – 7. (in Chinese)
骞西昌,杨守杰,张坤,等. 铝合金在运输机上的应用与发展[J]. 轻合金加工技术,2005,(10):1 – 7.

[2] Xie Jiang, Jiang Chao, Zhou Shuting, et al. Dynamic response of fully clamped circular aluminum alloy plate subjected to near field explosion[J]. Transactions of Beijing Institute of Technology, 2018, 38(12): 1222 – 1230. (in Chinese)
解江,姜超,周书婷,等. 近爆场下固支铝合金圆板的动态响应研究[J]. 北京理工大学学报,2018,38(12):1222 – 1230.

[3] Henneke E G, Reifsnider K L, Stinchcomb W W. Thermography-an NDI method for damage detection[J]. JOM, 1979, 31(9): 11 – 15.

[4] Schlichting J, Maierhofer C, Kreutzbruck M. Crack sizing by laser excited thermography[J]. NDT E Int. 2012, 45(1): 133 – 140.

[5] Xu C H, Zhou N W, Xie J, et al. Investigation on eddy current pulsed thermography to detect hidden cracks on corroded metal surface[J]. NDT E Int, 2016, 84: 27 – 35.

[6] Xu Changhang, Xie Jing, Zhang Wuyang, et al. Experimental investigation on the detection of multiple surface cracks using vibrothermography with a low-power piezoceramic actuator[J]. Sensors, 2017, 17(12): 2705.

[7] Guo Xingwang, Li Bin. Modeling and analysis of vibrothermography of cracks in heavy aluminum alloy structures [J]. Journal of Mechanical Engineering, 2014, 50(24): 31 – 37. (in Chinese)
郭兴旺,李彬. 重型铝合金结构裂纹振动红外热像检测的建模和分析[J]. 机械工程学报,2014,50(24):31 – 37.

[8] Guan Heqing, Guo Xingwang, Ma Fengnian. Numerical simulation of vibrothermography testing of crack in aluminum alloy beams[J]. Nondestructive Testing, 2016, 38(9): 1 – 5. (in Chinese)
管和清,郭兴旺,马丰年. 铝合金梁裂纹振动红外热像检测的数值模拟[J]. 无损检测,2016,38(9):1 – 5.

[9] Heesang Park, Manyong Choi, Jeounghak Park, et al. A study on detection of micro-cracks in the dissimilar metal weld through ultrasound infrared thermography[J]. Infrared Physics and Technology, 2014, 62: 124 – 131.

[10] Seyed Mohammad Parvasi, Changhang Xu, Qingzhao Kong, et al. Detection of multiple thin surface cracks using vibrothermography with low-power piezoceramic-based ultrasonic actuator – a numerical study with experimental verification [J]. Smart Materials and Structures, 2016, 25(5): 055042.

[11] Xiang Ming, Dong Lihong, Wang Haidou, et al. Research progress on ultrasonic infrared thermography nondestructive testing of fatigue cracks in metal[J]. Laser & Infrared, 2018, 48(6): 667 – 674. (in Chinese)
向明,董丽虹,王海斗,等. 金属结构疲劳裂纹超声红外无损检测研究现状[J]. 激光与红外,2018,48(6):667 – 674.