

引文格式: 韩波, 杨平华, 林立志. 连续纤维增强钛基复合材料整体叶环的超声检测试验研究[J]. 航空制造技术, 2023, 66(12): 110-116, 127.
HAN Bo, YANG Pinghua, LIN Lizhi. Experiment on ultrasonic detection of continuous fibers reinforced titanium matrix composites bling[J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2023, 66(12): 110-116, 127.

连续纤维增强钛基复合材料整体叶环的超声检测 试验研究

韩波^{1,2,3,4}, 杨平华^{1,2,3,4}, 林立志^{1,2,3,4}

1. 中国航发北京航空材料研究院, 北京 100095;
2. 北京航空材料研究院航空材料检测与评价北京市重点实验室, 北京 100095;
3. 中国航空发动机集团材料检测与评价重点实验室, 北京 100095;
4. 检测与评价航空科技重点实验室, 北京 100095)

[摘要] 本文结合连续纤维增强钛基复合材料(TMCs)整体叶环的制备工艺和结构特点,重点分析了TMCs整体叶环内部质量的超声检测难点,并通过对特定尺寸TMCs整体叶环的超声检测试验及解剖对应分析,确定了纤维碎断、纤维束开裂、纤维屈曲、纤维挤出及焊缝处开裂(未焊合)等可能存在的主要缺陷类型及超声回波信号特征。试验结果表明,基于适当的超声检测工艺参数对TMCs整体叶环的内部质量进行检测,检测灵敏度可达 $\Phi 0.8$ mm当量平底孔。

关键词: 钛基复合材料(TMCs); SiC纤维; 整体叶环; 超声检测; 内部质量

Experiment on Ultrasonic Detection of Continuous Fibers Reinforced Titanium Matrix Composites Bling

HAN Bo^{1,2,3,4}, YANG Pinghua^{1,2,3,4}, LIN Lizhi^{1,2,3,4}

1. AECC Beijing Institute of Aeronautical Material, Beijing 100095, China;
2. Beijing Key Laboratory of Aeronautical Materials Testing and Evaluation, Beijing Institute of Aeronautical Materials, Beijing 100095, China;
3. Key Laboratory of Aeronautical Materials Testing and Evaluation, Aero Engine Corporation of China, Beijing 100095, China;
4. Aviation Key Laboratory of Science and Technology on Aeronautical Material Testing and Evaluation, Beijing 100095, China)

[ABSTRACT] Combined with the preparation process and structural characteristics of continuous fiber reinforced titanium matrix composite (TMCs) monolithic blade rings, this paper focuses on the analysis of the difficulties in ultrasonic detection of the internal quality of TMCs monolithic blade rings, and through the ultrasonic detection test and anatomical analysis of specific size of TMCs monolithic blade rings. The main defect types and ultrasonic echo signal characteristics such as fiber breakage, fiber bundle cracking, fiber buckling, fiber extrusion and crack at weld were determined. The test results show that the sensitivity of the inner quality of the integral blade ring of TMCs can reach $\Phi 0.8$ mm equivalent flat bottom hole based on appropriate ultrasonic detection process parameters.

Keywords: Titanium matrix composites (TMCs); SiC fiber; Bling; Ultrasonic testing; Internal quality

DOI: 10.16080/j.issn1671-833x.2023.12.110

连续纤维增强钛基复合材料(TMCs)具有较高的比强度和比模量,良好的耐高温、抗蠕变、疲劳性能,以及优异的减重效果,在航空航天领域得到了广泛关注。近年来,美国、英国、德国、日本等发达国家均投入大量的人力和物力对该金属基复合材料进行了系统和深入的研究^[1-2]。国外大型发动机公司已在TMCs整体叶环的制造上取得了突破,如美国NASA的IHPTET计划中,XTC-16系列核心机研制的4级压气机中的第3级和第4级采用SiC纤维增强的钛基复合材料整体叶环,减重效果明显^[3];英国罗·罗公司也制备出钛基复合材料叶环,并成功地进行了试验台试车,减重效果达到70%^[4]。由于TMCs材料和工艺的先进性,国外基本没有关于该制件工程应用中的无损检测相关资料,国内中科院金属所和北京航空材料研究院率先开展了相关工程应用研究,黄旭^[4]和王玉敏^[5]等认为超声C扫描对于TMCs制件内部宏观缺陷的检测能力强于X射线和CT检测技术,但对于1mm以下的纤维集中断裂分辨不足;武玉鹏等^[6]等利用爬波对试样级的钛合金复合材料中纤维丝断裂进行了检测试验,并证明了采用爬波检测竖直断裂缺陷的可行性,而针对工程应用中TMCs整体叶环的检测技术和能力的试验研究,由于相关基础研究工作起步较晚,评价方法、检测手段以及经验均不足,还未见相关资料和报道。

本文针对TMCs整体叶环制备工艺和结构特点,分析了TMCs整体叶环的超声检测难点,围绕TMCs整体叶环可能产生的缺陷类型,研究了特定结构和尺寸TMCs整体叶环的超声检测方法和缺陷特征,为后续的制备工艺控制、优化设计、检测和分析能力的提高提供了技术支持。

1 TMCs整体叶环制备工艺特点及超声检测难点

1.1 工艺特点

连续纤维增强TMCs制件的制备主要采用的是基体-纤维涂覆法(MCF)^[7],即通过采用物理气相沉积或电子束蒸发沉积等方法将基体合金涂覆在纤维表面得到先驱丝,然后将有涂层的纤维集束起来,通过真空热压或热等静压的方法进行致密化,进而制备复合材料的技术^[8]。先驱丝的直径约100 μm ,通过缠绕先驱丝可以获得整体叶环制件。典型的TMCs整体叶环纤维分布与结构如图1所示^[9]。

TMCs纤维是主要承载体,界面可有效传递载荷,调节材料的内应力分布,阻止裂纹扩展,纤维与金属界面结合质量相对材料的综合力学性能有重要影响^[10-11]。通过热等静压结合连续纤维TMCs整体叶环,若在制备过

程中由于纤维缠绕不均,界面纯净度、粗造度和热等静压工艺参数控制不当,或由于连续SiC纤维复合材料与钛合金基体的热变形不匹配、复合材料宏观热膨胀系数的各向异性等因素^[12],极易诱发界面的不连续性,从而产生纤维屈曲、纤维拔出、纤维束断裂、SiC纤维/金属界面开裂、焊缝开裂等缺陷^[13],这些缺陷的起始常出现在纤维/金属结合界面处,并沿轴向、周向或径向扩展,对性能产生较大影响。因此为保证TMCs制件的性能和使用寿命,在不断优化工艺避免缺陷产生的同时,也需建立相应的无损检测方法,对结合界面和纤维内部质量进行有效的检测和评价。

1.2 超声检测难点

针对TMCs整体叶环结合界面和内部质量的无损检测,超声是首选最有利的检测方法。但在TMC整体叶环内部质量的超声检测实施中,存在以下难点。

(1)不同介质本底反射对超声检测能力的影响。

基于超声理论,声波在传播到声阻抗不同的两种介质界面处时,能够产生不同程度的反射,声阻抗决定了两种材料是否对超声波有反射作用以及反射的强弱。如图2所示,对于同种材料结合界面,超声波几乎没有反射,接收不到反射信号;当界面存在缺陷时,超声波一部分能量被反射,被探头接收到,如图2(a)所示。连

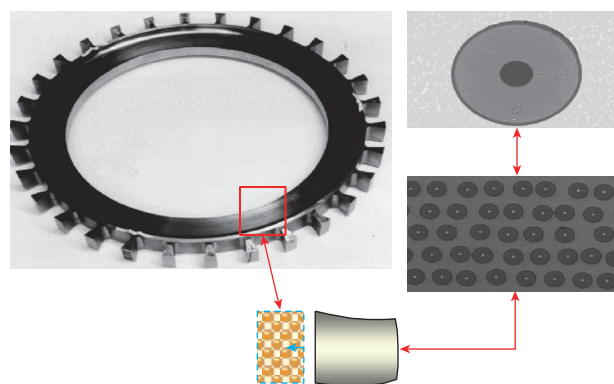
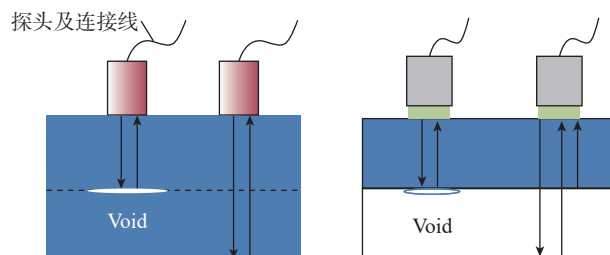


图1 TMCs整体叶环的结构分布^[9]

Fig.1 Structure of TMCs bling^[9]



(a) 超声波在同种材料界面传播 (b) 超声波在不同材料界面传播

图2 超声波在不同结合界面制件中的传播示意图

Fig.2 Schematic diagram of ultrasonic wave propagation in different bonded interface parts

接界面为不同材料时,界面处存在声阻抗的差异,声波传播到界面时会有部分能量被反射,即检测过程中存在本底反射,干扰了缺陷的识别,如图2(b)所示。

由于钛合金与连续纤维结合紧密,界面过渡区狭窄(微米级),声阻抗的差异导致结合界面处产生本底反射的深度和缺陷(如果存在)的深度相同,很难通过位置将两者有效区分;同时为了检出小缺陷而提高超声检测灵敏度时,来自界面处的本底反射信号幅度会随之提高,所需检测的缺陷信号可能被界面处本底的超声反射信号所掩盖,造成检测能力的不足。因此,界面处本底超声反射是影响检测能力、灵敏度和信噪比的主要因素。

(2) 结合界面处纤维形状对超声检测的影响。

TMCs 整体叶环中纤维束的截面形状一般设计为矩形结构,但在整体叶环的制备中,由于在各向同性的钛合金材料中加入了连续纤维,纤维与基体的热变形不匹配引发热残余应力,复合材料宏观热膨胀系数的各向异性等特征,纤维束在热等静压后形状会发生改变,导致纤维与钛合金的结合界面处可能产生弯曲、变形。纤维形状的改变,会导致垂直于结合界面入射的声波在该位置处的反射信号幅度产生变化,影响检测能力和缺陷信号的识别。

(3) 纤维束与钛合金基体声特性差异对检测的影响。

连续 SiC 纤维在喷溅钛合金基体涂层后按照一定的体积比排列缠绕于 TMCs 整体叶环中并热等静压,纤维束的密度比钛合金基体低,声特性(衰减和声速)与钛合金基体有差异,声速和衰减均大于钛合金基体。声速不同直接影响了纤维束的定位结果,衰减大则直接影响超声检测能力,对整体叶环内部缺陷的检测带来了不确定性。

2 TMCs 整体叶环的超声检测试验与结果分析

2.1 超声扫查面选择

超声检测试验采用的 TMCs 整体叶环结构如图3所示。整体叶环外径 300 mm、高度 35 mm,叶环中纤维束截面尺寸约 10 mm × 10 mm。TMCs 复合材料整体叶

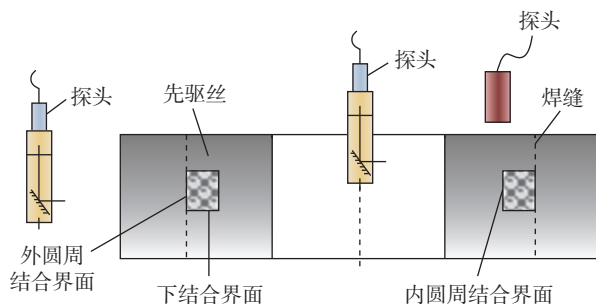


图3 TMCs 整体叶环试样检测示意图

Fig.3 Sketch of testing TMCs bling sample by ultrasonic inspection

环制作流程为:先将钛合金锻造成环状毛坯,切割为两个环,然后在内侧环面加工出U形环槽,在槽内缠绕排布涂覆钛合金的纤维预制体,并用钛合金外环覆盖封装环槽,焊接密封接缝以保证真空环境,再进行热等静压,最后完成机械加工。纤维束的上、下端面和内圆周与钛合金内环接触,纤维束的外圆周与钛合金外环相接触,形成4个结合界面,超声检测时,探头分别置于端面、内孔和外圆周向进行各结合界面质量的检测。

2.2 平底孔试块制备与超声检测参数试验

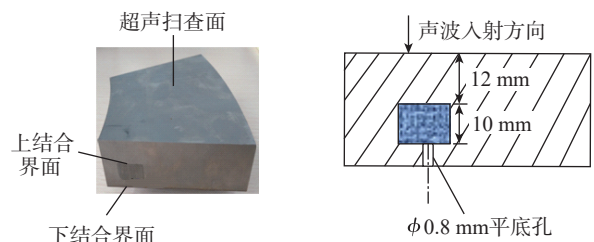
2.2.1 平底孔试块制备

从 TMCs 整体叶环上截取部分作为对比试块用料(图4(a)),并经 CT 及 X 射线检测,均未发现异常。由于纤维束的硬度高,机械加工困难,且加工过程中纤维极易碎裂,无法在纤维完好的情况下加工出上结合界面处的平底孔,因此仅加工了下界面平底孔,即平底孔孔底位于下界面结合处,平底孔直径为 $\Phi 0.8$ mm,埋深(距检测面)22 mm。在端面进行检测能力试验,试块料径向长度 120 mm、弦向宽度 100 mm、高度 28 mm(由于加工能力所限,下端面的钛合金部分切除 7 mm 后,加工孔深为 6 mm 的平底孔,因此总高度减为 28 mm),如图4(b)所示。上结合界面埋深 12 mm,下结合界面埋深 22 mm。

2.2.2 平底孔试块的超声检测试验与结果分析

采用水浸聚焦纵波 C 扫描进行检测试验。选取的水浸聚焦探头参数见表1,水距的调整使焦距落于上界面处,底波衰减评估时,将钛合金基体部分底波调至 80%,使用该灵敏度去检测进行整个试块的底波损失检测。TMCs 平底孔试块的超声检测试验结果见图5,从左到右分别为底波衰减 C 扫描图、平底孔 C 扫描图和平底孔 A 扫描图,其中 C 扫描图中标记 1 为平底孔显示;标记 2 为纤维束显示;标记 3 为纯钛合金部位显示。在同样检测条件下,将检测结果与钛合金 $\Phi 0.8$ mm 平底孔试块检测结果进行比较,结果如表2所示。

从 TMCs 平底孔试块的 A 扫描图可以看出,下界面平底孔反射波幅度为 80% 时,上界面处本底反射较



(a) 试块外形及超声扫查面选择 (b) 试块尺寸及平底孔分布

图4 TMCs 整体叶环平底孔试块形状和尺寸

Fig.4 Shape and sizes of TMCs flat bottom hole block

表 1 探头型号及参数
Table 1 Model and parameters of probes

编号	频率/MHz	晶片直径/mm	实测焦距/mm	焦点直径/mm	实测钛合金中焦柱长度/mm
1#	10	11	76	1.4	15
2#	5	19	150	2.4	26
3#	5	19	170	2.5	30

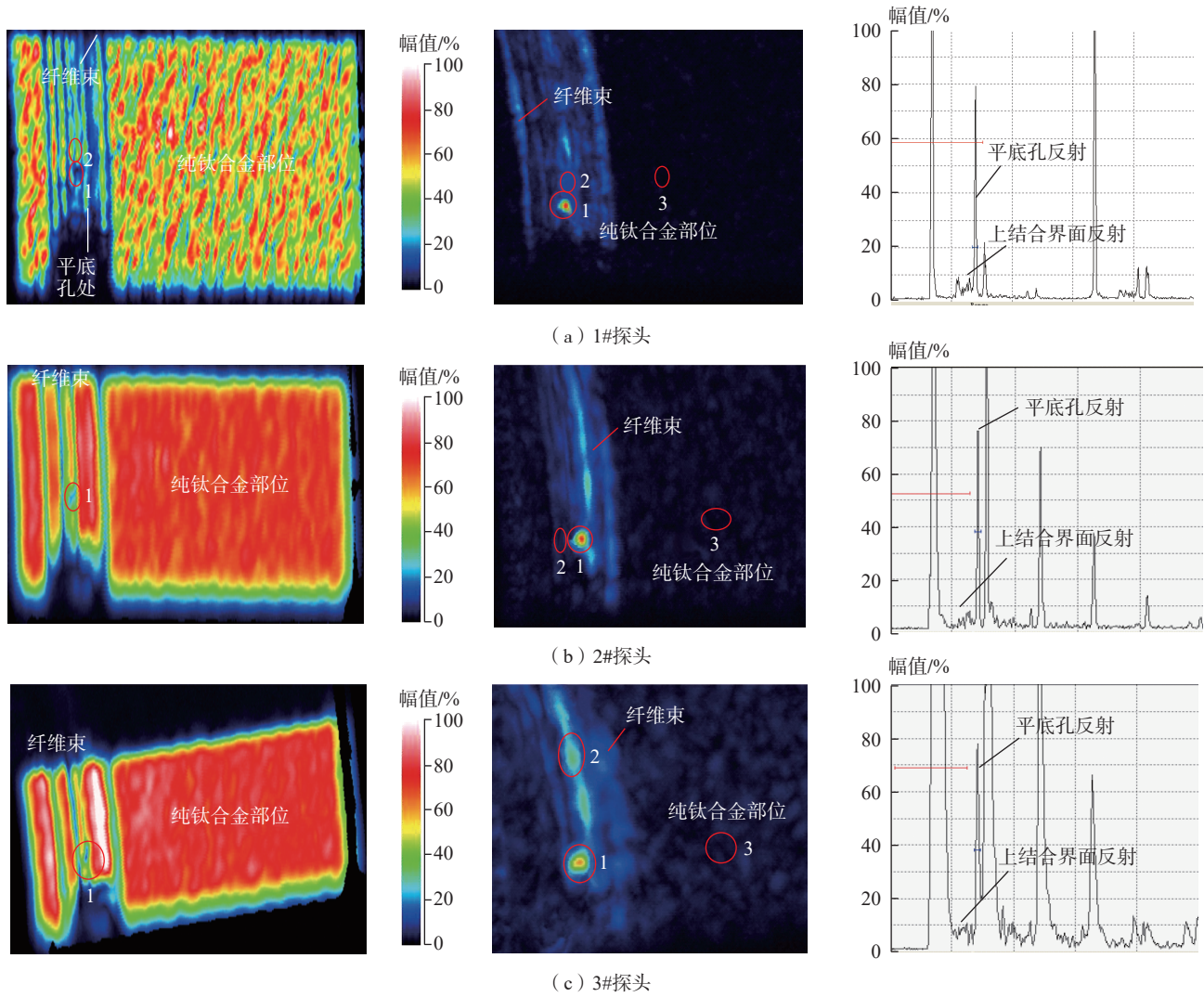


图 5 不同探头的 TMCs 平底孔试块检测结果

Fig.5 Testing result of different probes for TMCs flat bottom hole block

表 2 不同探头检测 $\Phi 0.8$ mm 平底孔试块的结果

Table 2 Testing result of different probes for $\Phi 0.8$ mm diameter flat bottom hole of TMCs block

编号	埋深 12 mm 钛合金平底孔 80% 时	埋深 22 mm 平底孔反射 80% 时			TMCs 试块	
		钛合金试块	TMCs 试块	Δ dB	信噪比	平底孔处底波衰减
1#	44	45	55	10	18	12
2#	62	64	64.5	0.5	18	无明显差异
3#	58	57	59	2	18	无明显差异

低,不大于 10%;从表 2 可以看出,3 个探头检测钛合金试块埋深 12 mm (上结合界面处)和 22 mm 的平底孔反射幅度 80% 时,增益值相近,相差不大于 2 dB,结合表 1 结果,3 个探头在钛合金中的焦柱区长度均不小于 15 mm,说明该厚度范围的钛合金衰减不大;检测 TMCs 试块时,3 个探头均可检出 TMCs 试块中的平底孔,但 1# 探头与同埋深钛合金平底孔试块灵敏度差异大,为 10 dB,缺陷处底波衰减也最大,为 12 dB,而其他两个 5 MHz 探头在平底孔处底波衰减与正常纤维束底损无明显差异,说明高频探头纤维束的衰减明显。

从 C 扫描图可以看出,没有平底孔的正常部位也存在纤维束信号反射幅度显示较高但底波损失检测结果正常的情况,出现该现象的原因,多与结合界面处纤维形状变化有关。

比较试验结果可以看出,在纤维截面尺寸不大于 10 mm × 10 mm 的 TMCs 整体叶环检测时,表 1 中的 3 个探头均可识别 $\Phi 0.8$ mm 的平底孔反射,但 1# 探头通过底波损失检测识别 $\Phi 0.8$ mm 平底孔的效果最好,因此选用该探头进行 TMCs 整体叶环的检测试验。

2.2.3 超声检测灵敏度和检测方向的选择

从上面的结果可以看出,该结构尺寸的 TMCs 整体叶环,在下界面试块的平底孔反射为 80% 时,上界面处的本底噪声仅为 10%,为了能够检测出可能存在的上界面处纤维异常(屈曲),检测时将上界面本底反射信号提高至满屏的 50%~90%,同时记录 $\Phi 0.8$ mm 的下界面试

块平底孔反射波幅度为 80% 的增益值以便于缺陷评定。这种调整方法既可监控工艺不稳定时上界面本底反射幅度的变化,也可保证纤维束及下界面的检测质量;底波损失评估时,先将钛合金基体底波调至 80%,然后以此灵敏度对整体叶环进行底波损失检测;焊缝检测时,使用同埋深钛合金平底孔试块调整检测灵敏度。

考虑到 TMCs 整体叶环具有 4 个结合界面的结构特点,声波从端面或者内、外圆周向单侧垂直入射至第 1 个结合界面时,结合界面的形状或结合质量会影响下结合界面的检测灵敏度和结果的可靠性,因此检测时声波应分别从上、下端面 and 内外圆周 4 个方向入射,检测不同方向的上界面结合情况以及纤维束内部,以保证检测质量。

2.3 整体叶环的超声检测试验与结果分析

按照上述检测条件、灵敏度调整方法和检测方向,选取 1# 探头对多个 TMCs 整体叶环工艺试验件的纤维内部、结合界面和焊缝进行了检测。对检测中发现的不连续性反射信号进行了特征统计及解剖对应,确定了该结构尺寸 TMCs 整体叶环的典型缺陷类型及特征。检出缺陷类型及特征主要有以下几点。

(1) 结合界面处的纤维碎裂。

超声信号特征:上界面反射信号升高且该部位底波反射信号降低。图 6 为 1#TMCs 整体叶环的超声检测结果中的标记部位。标记部位从端面、端面底损、外圆周向等检测方向均发现了异常反射信号,对标记部位进行

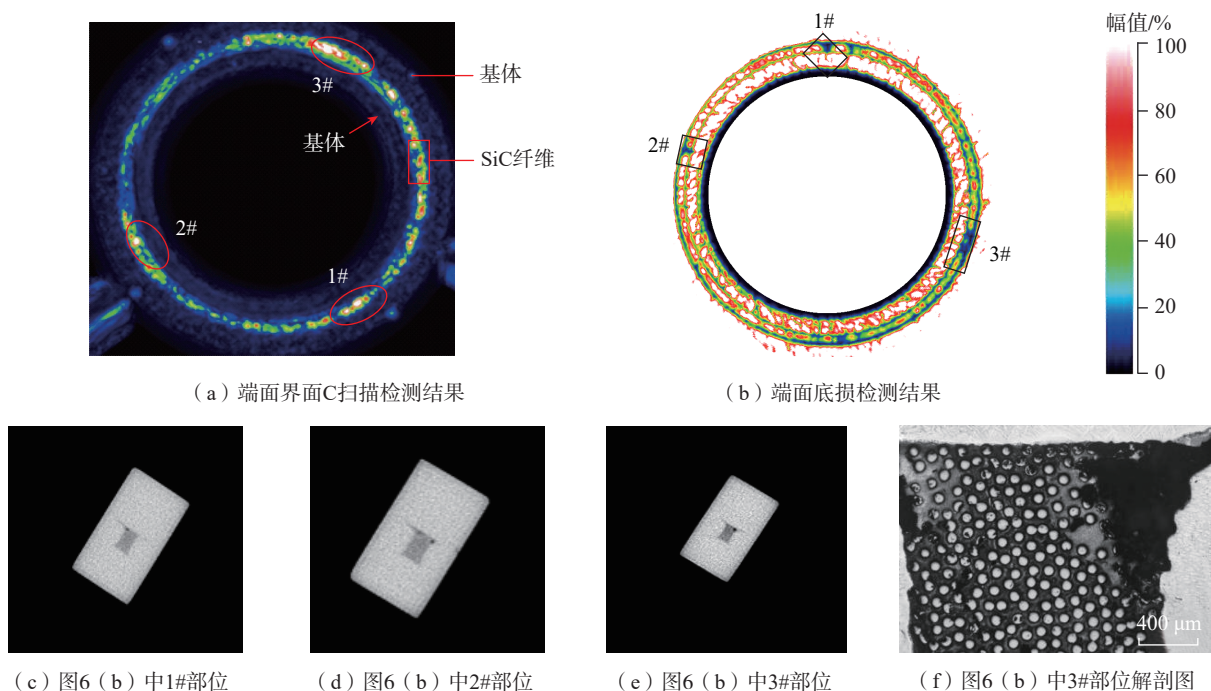


图 6 结合界面纤维碎断的检测和解剖对应结果
Fig.6 Combined with the detection and anatomical results of interfacial fiber breakage

了局部 CT 检测与解剖对应分析,显示均为纤维碎裂。

(2) 纤维束断裂。

超声信号特征: 上界面反射幅度高于正常的本底反射, 底波损失检测时该处有呈线性显示的明显降低。周向检测时上结合界面发现异常但不明显, 周向底损呈线性降低, 图 7 为 2# 整体叶环检测结果, 标记位置处纤维束发生断裂, 并呈径向贯穿了复合材料部分。

(3) 焊缝开裂。

超声信号特征: 焊接结合部位信号反射较高, 高于钛合金本底噪声信号至少 6 dB, 图 8 为 3# 整体叶环的焊缝检测结果。结合界面处的焊缝开裂可以通过焊缝部位的位置信息获得。

(4) 纤维屈曲。

超声检测信号特征: 图 9 为 4# 整体叶环的焊缝检

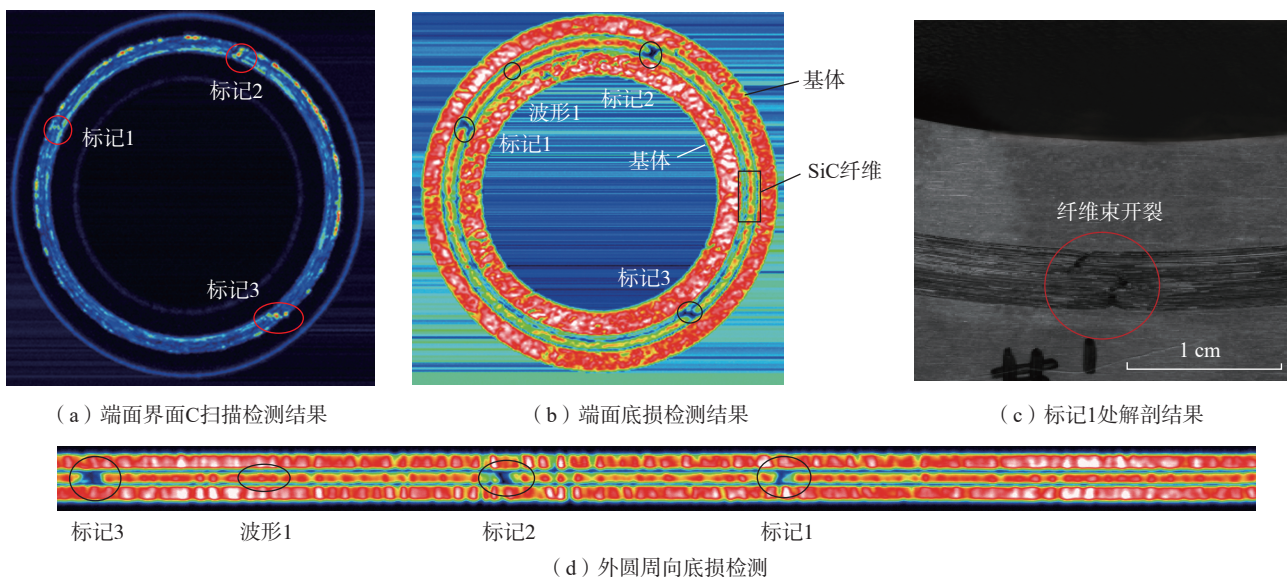


图 7 纤维束开裂的超声检测和解剖对应结果

Fig.7 Corresponding result of ultrasonic testing and dissection for fiber bundle cracking

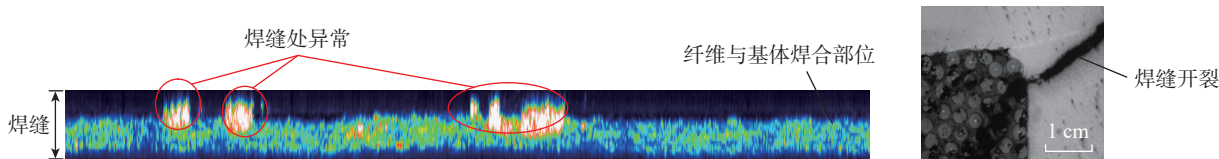


图 8 焊缝外圆周向的超声检测和解剖对应

Fig.8 Corresponding result of ultrasonic circumferential testing and dissection for welding

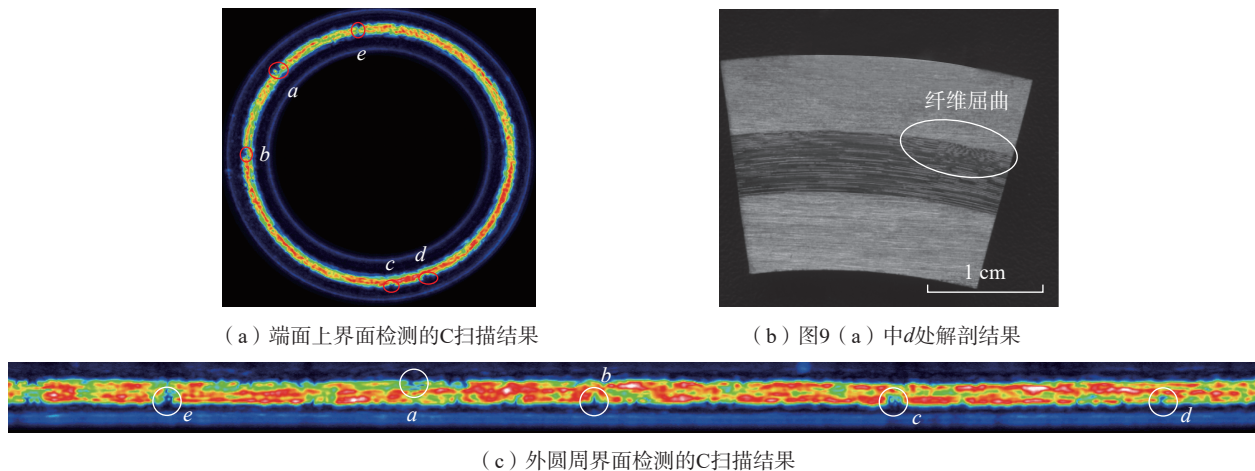


图 9 纤维屈曲的超声检测和解剖对应

Fig.9 Corresponding result of ultrasonic testing and dissection for fiber bending

测结果。结合界面处本底信号显著降低,同时 C 扫描图像中出现不连续性缺口显示,且该处信号幅度与钛合金金属基体反射幅度相同,底波损失检测结果正常。见图 9 (a) 端面和图 9 (c) 外圆周向 d 点处检测结果,解剖结果证实标记处纤维均出现了部分屈曲,如图 9 (b) 所示。纤维发生屈曲变形后钛合金金属填充进入,使得界面处的超声本底信号显著降低,信号幅度与钛合金基体反射幅度相同。

(5) 纤维挤出。

超声信号特征: 外圆周界面检测时,界面处信号反射幅度与本底噪声相同或略高,且该信号从纤维部位一直延伸至钛合金金属部位。图 10 为 5# 整体叶环的部分检测结果,标记处为纤维挤出。3 处纤维挤出最小当量为 $\Phi 0.8 \text{ mm}-1.5 \text{ dB}$,轴向长度 1 mm 左右。

3 结论

通过对采用基体-纤维涂覆法及热等静压工艺制备的 TMCs 整体叶环的超声检测试验得出以下结论。

(1) 连续 SiC 纤维束的衰减大于钛合金基体, TMCs 整体叶环中纤维束的尺寸和分布对超声检测能力有影响。

(2) 在纤维束尺寸不大于 $10 \text{ mm} \times 10 \text{ mm}$ 的 TMCs 整体叶环超声检测中,采用适当参数的探头和工艺对 TMCs 整体叶环的内部质量进行评估,检测灵敏度可优于 $\Phi 0.8 \text{ mm}$ 当量平底孔。

(3) TMCs 整体叶环内部缺陷类型主要有纤维折断、纤维束开裂、纤维屈曲、纤维挤出及焊缝处开裂(未

焊合)等,这些缺陷的起始常出现在纤维/钛合金结合界面处,并沿轴向、周向或径向扩展,且有一定的特征和规律,检测时可结合超声反射信号特征和底波损失检测结果,分析确定缺陷类型。

参考文献

[1] KOLK M, BLOK S, WILDT M, et al. Processing-structure-property aspects of particulate and whisker-reinforced titanium matrix composites[J]. Composites Science and Technology, 2008, 68(3-4): 583-601.

[2] HAUSMANN J, KUMPFERT H. Modelling of the influence of fibre distribution on residual stresses and strength of titanium matrix composites[C]//Extended Abstracts of the 13th International Conference on Composite Materials. New York: 2001.

[3] 张少平,李冠达,安利平,等.纤维增强钛基复合材料整体叶环设计技术[J].燃气涡轮试验与研究,2015,28(1):45-48,53.

ZHANG Shaoping, LI Guanda, AN Liping, et al. Design technology for fiber reinforced TMC bling[J]. Gas Turbine Experiment and Research, 2015, 28(1): 45-48, 53.

[4] 黄旭,李臻熙,高帆,等.航空发动机用新型高温钛合金研究进展[J].航空制造技术,2014,57(7):70-75.

HUANG Xu, LI Zhenxi, GAO Fan, et al. Recent development of high-temperature titanium alloys for aeroengine[J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2014, 57(7): 70-75.

[5] 王玉敏,张国兴,张旭,等.连续 SiC 纤维增强钛基复合材料研究进展[J].金属学报,2016,52(10):1153-1170.

WANG Yumin, ZHANG Guoxing, ZHANG Xu, et al. Advances in SiC fiber reinforced titanium matrix composites[J]. Acta Metallurgica Sinica, 2016, 52(10): 1153-1170.

[6] 武玉鹏,张博,李经明,等.航空发动机整体叶环中纤维断丝超声检测方法[J].金属学报,2020,56(8):1175-1184.

WU Yupeng, ZHANG Bo, LI Jingming, et al. Ultrasonic detection for fiber broken in aero-engine integral bladed ring[J]. Acta Metallurgica Sinica, 2020, 56(8): 1175-1184.

[7] 杨锐,石南林,王玉敏,等.SiC 纤维增强钛基复合材料研究进展[J].钛工业进展,2005,22(5):32-36.

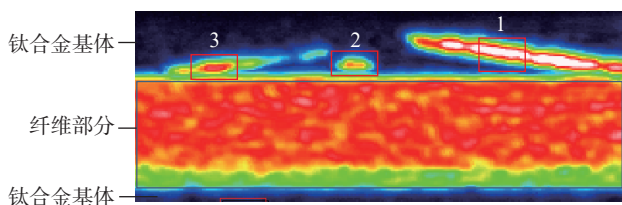
YANG Rui, SHI Nanlin, WANG Yumin, et al. Recent progress in SiC fibre reinforced titanium matrix composites[J]. Titanium Industry Progress, 2005, 22(5): 32-36.

[8] 成小乐,尹君,屈银虎,等.连续碳化硅纤维增强钛基(SiC_f/Ti)复合材料的制备技术及界面特性研究综述[J].材料导报,2018,32(5):796-807.

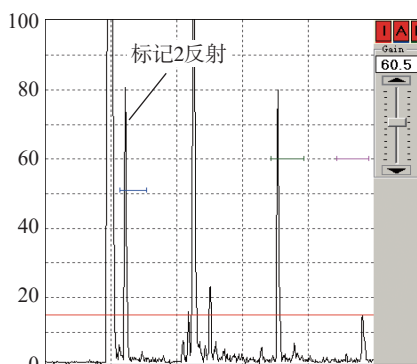
CHENG Xiaole, YIN Jun, QU Yinhu, et al. A review of the state-of-art preparation techniques and interface characteristics of continuous-silicon-fiber-reinforced titanium matrix (SiC_f/Ti) composites[J]. Materials Review, 2018, 32(5): 796-807.

[9] 李佩桓,张勇,王涛,等.连续 SiC 纤维增强金属基复合材料研究进展[J].材料工程,2016,44(8):121-129.

LI Peihuan, ZHANG Yong, WANG Tao, et al. Research progress on continuous SiC fiber reinforced metal matrix composite[J]. Journal of Materials Engineering, 2016, 44(8): 121-129.



(a) 外圆周向界面C扫描检测结果



(b) 标记2处A扫描波形

图 10 纤维挤出的检测结果

Fig.10 Ultrasonic testing result of fiber extrusion

(下转第 127 页)

distance[J]. Geomatics and Information Science of Wuhan University, 2020, 45(2): 250–257.

[21] HINTERSTOISSER S, CAGNIART C, ILIC S, et al. Gradient response maps for real-time detection of textureless objects[J]. IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, 2012, 34(5): 876–888.

[22] HINTERSTOISSER S, LEPETIT V, ILIC S, et al. Dominant orientation templates for real-time detection of texture-less objects[C]//2010 IEEE Computer Society Conference on Computer Vision and Pattern Recognition. San Francisco: IEEE, 2010: 2257–2264.

[23] HINTERSTOISSER S, LEPETIT V, ILIC S, et al. Model based training, detection and pose estimation of texture-less 3D objects in heavily cluttered scenes[C]//Computer Vision—ACCV 2012. Florence: Springer Berlin Heidelberg, 2013: 548–562.

[24] CHAI Z Q, BI S, GUO Z, et al. A new method for fast detection and pose estimation of texture-less industrial parts[C]//2018 25th International Conference on Mechatronics and Machine Vision in Practice (M2VIP). Stuttgart: IEEE, 2019: 1–6.

[25] YAMAZAKI K, HIGASHIDE T, TANAKA D, et al. Assembly manipulation understanding based on 3D object pose estimation and human motion estimation[C]//2018 IEEE International Conference on Robotics and Biomimetics (ROBIO). Kuala Lumpur: IEEE, 2019: 802–807.

[26] CHEN S L, HONG J, LIU X N, et al. A framework for 3D object detection and pose estimation in unstructured environment using single shot detector and refined LineMod template matching[C]//2019 24th IEEE International Conference on Emerging Technologies and Factory Automation (ETFA). Zaragoza: IEEE, 2019: 499–504.

[27] LUH Y P, HUANG L C, LU H J, et al. A smart manufacturing solution for multi-axis dispenser motion planning in mixed production of shoe soles[J]. International Journal of Precision Engineering and Manufacturing-Green Technology, 2020, 7(3): 769–779.

[28] LIU J T, GONG J, QIAN X L, et al. Marker location method based on improved LINE2D under standard condition[C]//2020 39th Chinese Control Conference (CCC). Shenyang: IEEE, 2020: 6480–6485.

[29] ZHANG T L, YANG Y, ZENG Y, et al. Cognitive template-clustering improved LineMod for efficient multi-object pose estimation[J]. Cognitive Computation, 2020, 12(4): 834–843.

[30] MIAO C X, ZHONG X G, ZHONG X Y, et al. Detection and grasping of texture-less objects based on 3D template matching[C]//2021 40th Chinese Control Conference (CCC). Shanghai: IEEE, 2021: 3943–3948.

[31] WAN G Y, WANG G F, XING K S, et al. Robot visual measurement and grasping strategy for roughcastings[J]. International Journal of Advanced Robotic Systems, 2021, 18(2): 172988142199993.

[32] WANG Y N, WANG X Y, CHEN Y Z. Multi-surface hydraulic valve block technique hole plug inspection from monocular image[J]. Measurement Science and Technology, 2021, 32(11): 115016.

[33] CAO P X, LI W X, MA W P. A tracking registration method for augmented reality based on multi-modal template matching and point clouds[J]. International Journal of Automation and Computing, 2021, 18(2): 288–299.

[34] WANG Y, ZHANG S S, YANG S, et al. Mechanical assembly assistance using marker-less augmented reality system[J]. Assembly Automation, 2018, 38(1): 77–87.

[35] WANG Y, ZHANG S S, YANG S, et al. A LINE-MOD-based markerless tracking approach for AR applications[J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2017, 89(5): 1699–1707.

[36] 王月. 面向产品装配引导的增强现实虚实融合技术研究[D]. 西安: 西北工业大学, 2018.

WANG Yue. Mixing of virtual and actual reality method for augmented reality aided products assembly guidance[D]. Xi'an: Northwestern Polytechnical University, 2018.

[37] DESCHAUD J E, GOULETTE F. A fast and accurate plane detection algorithm for large noisy point clouds using filtered normals and voxel growing[J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2010, 64(7): 1233–1265.

[38] PAPON J, ABRAMOV A, SCHOELER M, et al. Voxel cloud connectivity segmentation-supervoxels for point clouds[C]//2013 IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition. Portland: IEEE, 2013: 2027–2034.

[39] STEIN S C, SCHOELER M, PAPON J, et al. Object partitioning using local convexity[C]//2014 IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition. Columbus: IEEE, 2014: 304–311.

通讯作者: 白晓亮, 副教授, 研究方向为增强现实、智能装配和人机交互等。

(责编 晓月)

(上接第 116 页)

[10] 朱艳, 杨延清, 马志军, 等. SiC/Ti 基复合材料界面反应的热力学研究[J]. 稀有金属材料与工程, 2002, 31(4): 279–282.

ZHU Yan, YANG Yanqing, MA Zhijun, et al. Thermodynamic studies on interfacial reactions in SiC-fibre reinforced Ti-matrix composites[J]. Rare Metal Materials and Engineering, 2002, 31(4): 279–282.

[11] 李虎, 黄旭, 黄浩, 等. 连续 SiC 纤维增强钛基复合材料界面反应研究[J]. 锻压技术, 2016, 41(4): 103–108.

LI Hu, HUANG Xu, HUANG Hao, et al. Investigation on interface reaction in continuous SiC fiber reinforced titanium composites[J]. Forging & Stamping Technology, 2016, 41(4): 103–108.

[12] 黄浩, 王敏涓, 李虎, 等. 连续 SiC 纤维增强钛基复合材料研制[J]. 航空制造技术, 2018, 61(14): 26–36.

HUANG Hao, WANG Minjuan, LI Hu, et al. Preparation of SiC fibers reinforced titanium matrix composites[J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2018, 61(14): 26–36.

[13] 吉幸, 罗贤, 杨延清, 等. 连续纤维增强金属基复合材料无损检测研究进展[J]. 稀有金属材料与工程, 2013, 42(S2): 401–405.

JI Xing, LUO Xian, YANG Yanqing, et al. Research progress of nondestructive testing for continuous fiber-reinforced metal-matrix composites[J]. Rare Metal Materials and Engineering, 2013, 42(S2): 401–405.

通讯作者: 韩波, 高级工程师, 主要从事无损检测技术研究。

(责编 七七)