

DOI: 10.13382/j.jemi.B1902836

零件表面损伤对再制造修复件承载能力影响的超声相控阵检测研究*

黄海鸿^{1,2} 刘文杰^{1,2} 钱正春^{1,2} 王江龙^{1,2} 柯庆镒^{1,2}

(1. 合肥工业大学 机械工程学院 合肥 230009; 2. 合肥工业大学 机械工业绿色设计与制造重点实验室 合肥 230009)

摘要:零件使用过程中出现的表面损伤会影响其再制造修复时的界面结合质量,从而降低承载能力。为得到零件表面损伤大小对修复件承载能力的影响,对表面预制不同宽度损伤的基体材料进行等离子喷焊再制造修复,采用超声相控阵对施加三点弯曲载荷的修复件进行检测。根据检测结果,提取A扫波形图中二次底波声程,得到不同载荷下二次底波声程变化曲线,根据曲线转折点得出修复件界面裂纹萌生时的载荷 F_A ;通过量化处理C扫俯视图中缺陷并计算其面积占比,得到不同载荷下缺陷面积占比的变化曲线,根据曲线转折点得出界面初始缺陷演化时的载荷 F_C 。结果表明, F_A 和 F_C 都能够反映修复件承载能力与基体表面损伤的线性关系;在误差小于5%的前提下,表面损伤宽度每增加1 mm,修复件承载能力约下降0.1 kN;并且相较于 F_A , F_C 的大小降低了11.12%,从而能够建立表面损伤对修复件承载能力的影响规律,为评定表面损伤零件的再制造质量提供了及时有效的途径。

关键词:表面损伤;承载能力;超声相控阵;A扫波形图;C扫俯视图

中图分类号: TB553 **文献标识码:** A **国家标准学科分类代码:** 430.25

Influence of surface damage on load carrying capacity of remanufactured repair parts based on ultrasonic phased array

Huang Haihong^{1,2} Liu Wenjie^{1,2} Qian Zhengchun^{1,2} Wang Jianglong^{1,2} Ke Qingdi^{1,2}

(1. School of Mechanical Engineering, Hefei University of Technology, Hefei 230009, China; 2. Key Laboratory of Green Design and Manufacturing of Mechanical Industry, Hefei University of Technology, Hefei 230009, China)

Abstract: The surface damage during the use of parts will affect the interface bonding quality during remanufacturing and repair, so that reducing the bearing capacity. In order to obtain the effect of surface damage on the load carrying capacity of repaired parts, plasma arc welding was used to repair the matrix materials with different width of the surface prefabricated damage, and ultrasonic phased array was used to detect the repaired parts with three-point bending load. According to the test results, the sound path of the second bottom wave is extracted from the A-scan waveform, and the change curve of the sound path of the second bottom wave under different loads is obtained, which can get the load at the interface crack initiation of the repair part (F_A) from the turning point of the curve. By quantifying the defects in the C-scan top view and calculating the area proportion, the change curve of the defect area proportion under different loads is obtained, which can get the load at the interface initial defect evolution of the repair part (F_C) from the turning point of the curve. The results show that both F_A and F_C can reflect the linear relationship between the load carrying capacity of the repaired parts and the surface damage of the matrix; on the premise of the error less than 5%, the load carrying capacity of the repaired parts decreases by 0.1 kN for every 1 mm increase in the width of the surface damage. Moreover, compared with F_A , the size of F_C decreases by 11.12%, which provides a timely and effective way to evaluate the remanufacturing quality of surface damaged parts.

Keywords: surface damage; load carrying capacity; ultrasonic phased array; A-scan waveform; C-scan top view

0 引 言

工业生产过程中,零件会因为恶劣的服役环境发生失效,但是其中大多数均可通过再制造技术修复再次使用^[1-3]。等离子喷焊、激光熔覆和超音速喷涂技术作为目前应用最为广泛的几种再制造修复技术,能产生较高的输入热量,并在冷却凝固后形成稀释率低、结合强度高的熔覆涂层^[4]。然而,零件在使用过程中产生的复杂表面损伤形式(磨损、腐蚀、划痕、锈蚀等),会导致再制造修复件界面处结合质量变差,造成承载能力降低,甚至出现界面缺陷,严重影响修复件的质量与安全,因此,需要采取有效的检测手段对修复件界面进行评估^[5-6]。

常见材料内部缺陷的检测手段主要有涡流检测^[7-8]、射线检测^[9]、超声^[10-12]等。涡流检测适用于检查金属近表面缺陷,并且由于涡流效应的影响因素比较复杂,对缺陷定性和定量还比较困难。射线检测虽然能够检测内部缺陷,但是对于安全防护和操作人员的要求较高,且成本较高。超声技术可检测较深的缺陷,但是其探头声束角度的单一性容易产生检测盲区,造成漏检,不适用于检测复杂工件。与上述检测手段相比,相控阵超声技术不仅检测灵敏度高、速度快、成本低,而且能够动态地控制声束的发射和接收,可在不移动换能器的情况下检测较大范围的工件,提高了检测效率^[13-14]。借助相控阵超声技术,一些研究者对声波在不同介质的界面处传播规律进行研究。Abdessalem 等^[15]针对复合材料分层面缺陷现象,提出一种基于阈值修改 S-变换(TMST)算法的超声相控阵信号增强技术,并通过对 b 扫描信号的仿真,验证该算法可以提高包含分层缺陷复合材料的图像质量。黄佩等^[16]通过相控阵换能器在多层介质中的声场特性,建立了层状多界面的折射声场模型并提出声束聚焦偏转的时间延迟计算方法。赵霞等^[17]构建了相控阵超声换能器的辐射声场模型,并选择合适的延迟控制,研究了超声相控阵技术在不等厚复合构件界面脱粘检测的可行性。除了界面处的声传播理论研究,一些研究者在界面缺陷的检测试验中也运用了超声相控阵手段。Amineroa 等^[18]在碳纤维层合板中嵌入不同尺寸和形状的人工缺陷,通过相控阵超声技术测量并评估了其位置、尺寸和形态;李树健等^[19]采取相控阵超声手段检测复合材料层合板界面,实现了 C 扫描图像对层板孔隙缺陷的定量表征。Li 等^[20]对发动机叶片采用对接焊并选用超声相控阵技术检测不同区域对接焊缝界面裂纹,实现了复杂表面零件对接焊缝界面裂纹的快速准确检测;Guo 等^[21]通过设计超声相控阵测量装置,检测了聚乙烯熔焊对接接头结合面中的气孔、熔合面夹杂等各类典型缺陷。

研究表明,通过超声相控阵技术可以有效识别与表征界面缺陷的形态和尺寸,从而对再制造修复件的界面缺陷情况做出准确判定,但关于该缺陷对修复件承载能力影响的研究较少。鉴于零件表面损伤会导致修复件界面产生缺陷,本文对不同表面损伤大小的基体进行再制造修复,采用超声相控阵对施加三点弯曲载荷的修复件进行检测。根据超声信号图特征得出修复件的承载能力,并将无缺陷修复件的承载能力作为标准,得到基体表面损伤面积对修复件承载能力的影响规律,实现超声相控阵技术在精确评定损伤零件再制造质量方面的应用。

1 试样制备与试验方法

1.1 制备试样

采用武汉材料保护研究所研制的 PTA-400E4-ST 等离子喷焊机在基体上喷焊粉末制备涂层试样,基体材料为 45#钢平板,粉末为 Ni60 镍基自熔性粉末。该粉末具有较高的耐磨耐蚀性与良好的抗氧化性^[22-24],其化学成份如表 1 所示。试样尺寸为 120 mm×20 mm×15 mm,基体与喷焊层的厚度分别为 10、5 mm,共喷焊 5 组试样。试样制作如图 1 所示,喷焊之前,清洗 45#钢平板表面,并分别在板中间预置深 1 mm,宽 L 为 0(空白对比)、8、16、24、32 mm 的表面损伤缺陷(由于实际零件表面损伤的形式比较复杂,为量化损伤面积,缺陷采用规则开槽形式)。根据前期的正交实验结果,为获取性能良好的熔覆涂层,选取表 2 所示的工艺参数进行喷焊。采用线切割方法加工试样至预定尺寸,如图 2 所示。

表 1 Ni60 粉末化学成分

Table 1 Chemical constituents of Ni60 powder						
元素	Si	C	Fe	B	Cr	Ni
含量/%	5.5	1	≤4	2.5	21	余量

表 2 等离子喷焊工艺参数

Table 2 Process parameters of plasma spray welding					
工艺参数	送粉电 压/V	焊接电 流/A	喷嘴高 度/mm	摆动宽 度/mm	摆动速度/ (mm·min ⁻¹)
参数数值	23	120	10	20	1 800

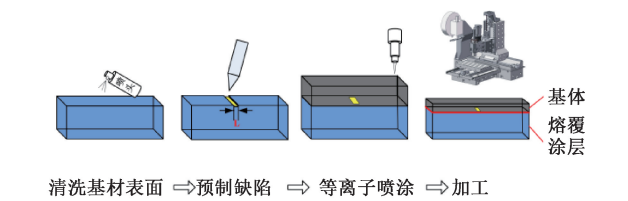


图 1 试样制备工艺过程

Fig. 1 Sample preparation process

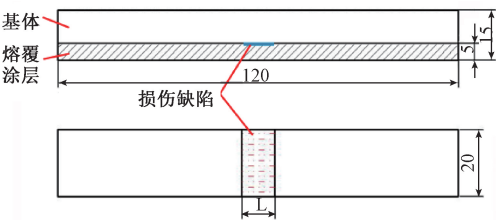


图 2 试样尺寸图

Fig. 2 Sample dimension

1.2 试验设计

实际工程中,零件承受的载荷非常复杂,不仅会受到拉压力作用,还会受到剪切力作用。综合考虑上述受载情况,本试验选择能同时对样件产生拉压应力和剪切应力作用的三点弯曲加载方式。采用 SDS-100 型电液伺服试验机进行三点弯曲试验,如图 3 所示,试样两端支承的跨距 $L=80\text{ mm}$,通过中间压头对每一试样施加载荷(采用位移方式控制)。每次加载至预定载荷后,卸载并取下试样,通过超声相控阵检测界面处的变化情况;采用多浦乐公司研制的便携式超声相控阵检测仪,探头型号为 4L32-0.5 $\times$ 10,发射频率为 4 MHz,阵元长度为 $W=10\text{ mm}$,共有 $N=32$ 个阵元,楔块型号为 SD2-N0L,其超声检测参数如表 3 所示。测量前,在楔块与工件表面涂抹耦合剂油以保证楔块与工件表面无气隙耦合;测量时,如图 4 所示,将探头放在工件基体表面,从工件左端匀速移动到右端,仪器记录下方试件的 A 扫波形图与 C 扫俯视图,重复测量三次保证检测的准确性。同时通过读数显微镜观察试样界面,直至出现横向裂纹,记录此时外部载荷大小。

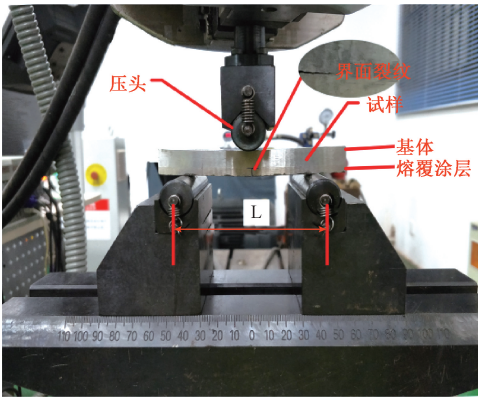


图 3 三点弯曲试验

Fig. 3 Central-point loading test

表 3 超声检测的工艺参数

Table 3 Process parameters of ultrasonic testing

扫查方式	扫查阵元数目	阵元步进量	聚焦深度	扫查速度
线性扫查	12	1	10 mm	25 mm $\cdot$ s ⁻¹

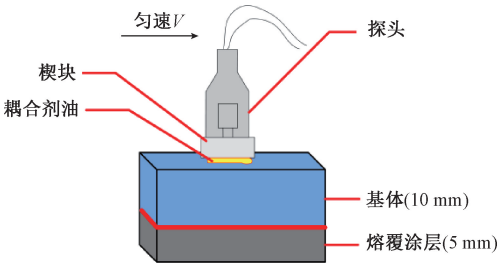


图 4 超声相控阵检测试样

Fig. 4 Ultrasound phased array testing samples

2 测量数据分析

2.1 界面缺陷演化与声传播规律分析

如图 5 所示,表面损伤基体经喷焊后得到再制造修复件,相较于界面其他部位,原基体损伤处的界面结合性能比较差。外加载荷较小时界面能保持稳定,随着载荷逐渐增大,界面结合性能较差的部位将会率先发生脱粘^[25]并出现缺陷演化;而后外载进一步增大,缺陷继续演化变大,直至扩展到外部边界,此后修复件外界面横向裂纹萌生(宏观上仍属于微裂纹,肉眼不易观察)。选取缺陷演化过程中两个关键点进行研究。1)界面裂纹萌生时刻,主要通过外部裂纹萌生时刻的载荷反映修复件承载能力,其载荷大小通过 A 扫波形图分析得到;2)界面初始缺陷演化时刻,主要通过内部初始缺陷演化时刻的载荷反应修复件承载能力,其载荷大小通过 C 扫图分析得到。

外载荷较小时,修复件界面比较稳定;当载荷增至界面发生脱粘时,界面开始出现缺陷演化,此时其声传播规律如图 6 所示。A 界面两侧的声阻抗差变大,声波传至 A 界面会部分透射,部分反射;对于 O 表面和 B 底面,它们两侧介质声阻抗差异极大,声波在界面处几乎全部反射回去。外部载荷持续增大,直到内部缺陷演化至边界,外界面裂纹萌生时,基体与熔覆涂层会产生间隙,其声传播规律如图 7 所示。由于 A 界面两侧为声阻抗相差很大的 45#基体和空气,声波在 A 界面全部反射回去,几乎没有声波传入熔覆涂层到达 B 底面。

2.2 A 扫波形图的数据分析

当界面处于内部缺陷演化阶段时,试样的 A 扫波形图如图 8 所示,图中有 4 个比较明显的波峰 U1、U2、U3、U4,这些波峰是由主能量回波反射产生;可根据波峰位置声程确定其组成回波的传播路径,如图 9 所示。其中 U1 的声程为 10 mm,传播路径如图 9(a)所示,为 O $\rightarrow$ A $\rightarrow$ O,在 A 界面处发生反射,反应了 A 界面缺陷的深度,

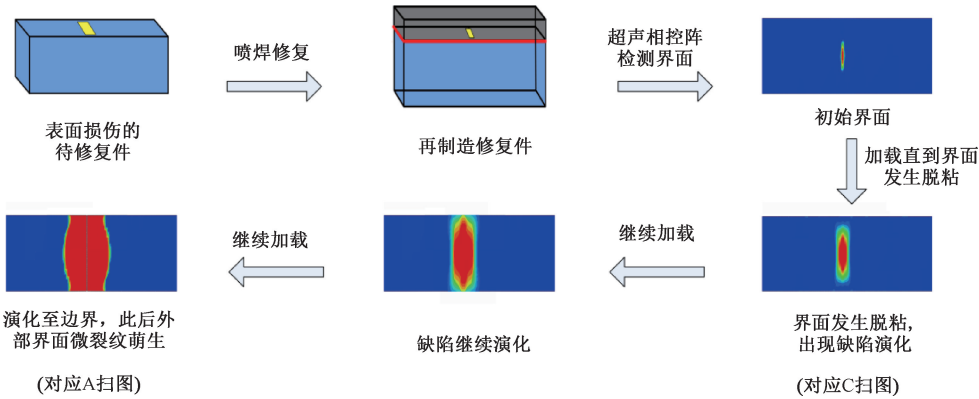


图 5 界面处缺陷演化示意图

Fig. 5 Diagram of interface defect evolution

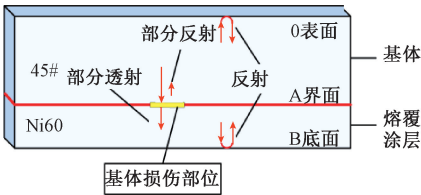


图 6 界面内部缺陷演化时声传播规律

Fig. 6 Acoustic propagation law during the evolution of interface internal defects

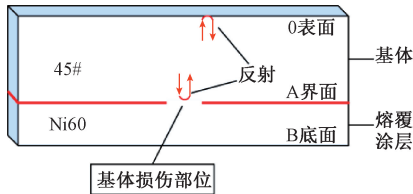


图 7 界面裂纹萌生时声传播规律

Fig. 7 Acoustic propagation law at the interface crack initiation

记为缺陷一次波 f1; U2 的声程为 15 mm, 传播路径如图 9 (b) 所示, 为 $O \rightarrow A \rightarrow B \rightarrow A \rightarrow O$, 在 B 底面发生反射, 反映了 B 底面的深度, 记为一次底波 b1; U3 的声程为 25 mm, 其两种传播路径如图 9 (c) 与 (d) 所示, 为 $O \rightarrow A \rightarrow O \rightarrow A \rightarrow B \rightarrow A \rightarrow O$ 和 $O \rightarrow A \rightarrow B \rightarrow A \rightarrow O \rightarrow A \rightarrow O$, 相当于界面缺陷深度与一次底波声程之和, 记为缺陷二次波 f2。U4 的声程为 30 mm, 传播路径如图 9 (e) 所示, 为 $O \rightarrow A \rightarrow B \rightarrow A \rightarrow O \rightarrow A \rightarrow B \rightarrow A \rightarrow O$, 在 B 底面发生两次反射, 记为二次底波 b2。

当载荷继续增加, 内部缺陷演化至边界时, 试样外界面萌生微裂纹, 基体与熔覆涂层间产生空隙, 声波在界面处发生全反射。如图 10 所示, 0~4 号试样的 A 扫波形具有 3 个明显的波峰 Q1、Q2、Q3, 根据波峰位置声程确定其组成回波的传播路径, 如图 11 所示。其中 Q1 的声程为 10 mm, 传播路径为 $O \rightarrow A \rightarrow O$; Q2 的声程为 20 mm, 其

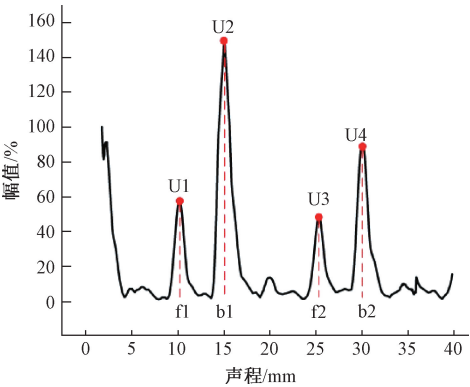


图 8 内部缺陷演化时试样的 A 扫波形

Fig. 8 A-scan waveform of sample during the evolution of interface internal defects

传播路径为 $O \rightarrow A \rightarrow O \rightarrow A \rightarrow O$; Q3 的声程为 30 mm, 其传播路径为 $O \rightarrow A \rightarrow O \rightarrow A \rightarrow O \rightarrow A \rightarrow O$ 。

当界面裂纹萌生后, 基体与熔覆涂层会产生间隙, 声波无法从基体传入熔覆涂层, 一次底波 b1 将在 A 界面处发生反射, 其声程将由 15 降为 10 mm; f2 仅在基体中传播, 在界面处发生两次全反射, 其声程由 25 降为 20 mm; 二次底波 b2 与 f2 类似, 只在基体内传播, 其声程由 30 降为 20 mm。显然, b1、f2、b2 声程的突降都是在界面裂纹萌生时刻发生的, 即在同一载荷下突变的。因此, 选取突降幅度更大的二次底波 b2, 做出其声程随载荷的变化关系曲线, 如图 12 所示, 其中, 曲线转折点即为界面裂纹萌生时的载荷。

根据图 12 中转折点得到界面裂纹萌生时的载荷, 如表 4 所示。与基体未预制表面损伤的 0 号试样相比, 当损伤宽度分别为 8、16、24、32 mm 时, 通过计算界面裂纹萌生时载荷变化的大小, 得到试样承载能力分别下降 5.30% (0.786 kN)、9.90% (1.467 kN)、15.57% (2.308 kN)、21.44% (3.177 kN)。

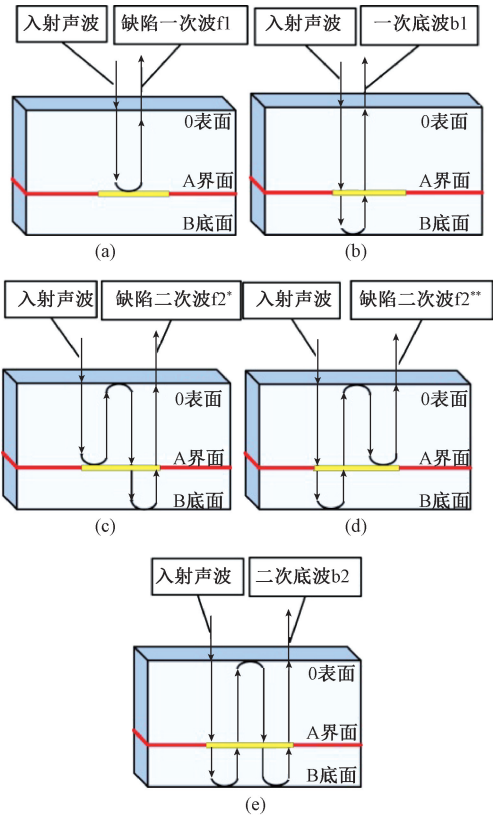


图 9 内部缺陷演化时试样的声传播路径
Fig. 9 Sound propagation path of sample during the evolution of interface internal defects

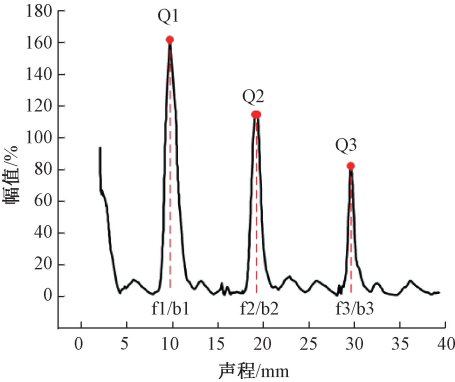


图 10 0~4 号试样界面裂纹萌生时试样的 A 扫波形
Fig. 10 A-scan waveform of sample 0~4

表 4 0~4 号试样界面裂纹萌生时载荷
Table 4 Load of interface crack initiation of sample 0~4

试样（基体损伤宽）	界面裂纹萌生载荷/kN
0 号（0 mm）	14. 821
1 号（8 mm）	14. 035
2 号（16 mm）	13. 354
3 号（24 mm）	12. 513
4 号（32 mm）	11. 644

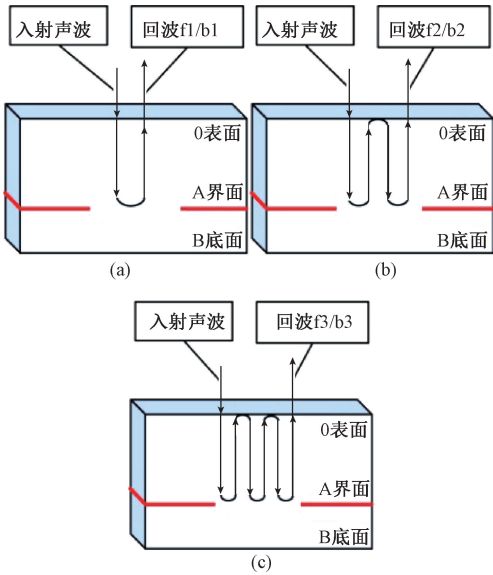


图 11 界面裂纹萌生时试样的声传播路径
Fig. 11 Sound propagation path of sample at the interface crack initiation

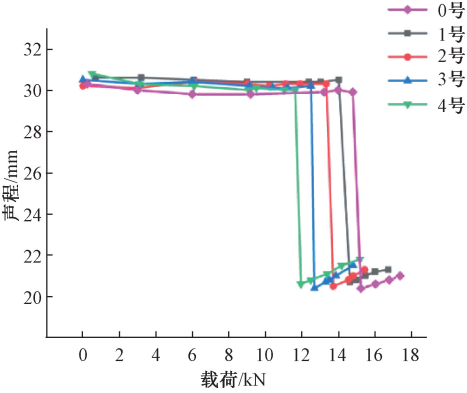


图 12 0~4 号试样 b2 声程随外加载荷变化
Fig. 12 Variation of b2 sound distance of sample 0~4 due to load

2.3 C 扫图的数据分析

C 扫图作为试样的俯视图,能够用来研究界面内部缺陷的演化情况。试样在受载时(从左至右载荷递增),其界面缺陷的演化情况如图 13 所示。中间的深色区域表示界面缺陷,颜色越深表明该处超声信号的反射量越多,其缺陷就越严重。从图 13 可以看出试样承受载荷越大,界面缺陷越严重。

为研究缺陷面积与载荷大小的具体关系,还需要对 C 扫图缺陷面积进行量化处理。如图 14 所示,选取黄色边界及其内部作为缺陷区域,则图 14 缺陷面积占比的计算公式可以表示为:

$$P = \frac{n}{ab} \tag{1}$$

式中： p 为缺陷面积占比； a 为宽度方向的像素数量； b 为长度方向的像素数量； n 为缺陷面积的像素数量。

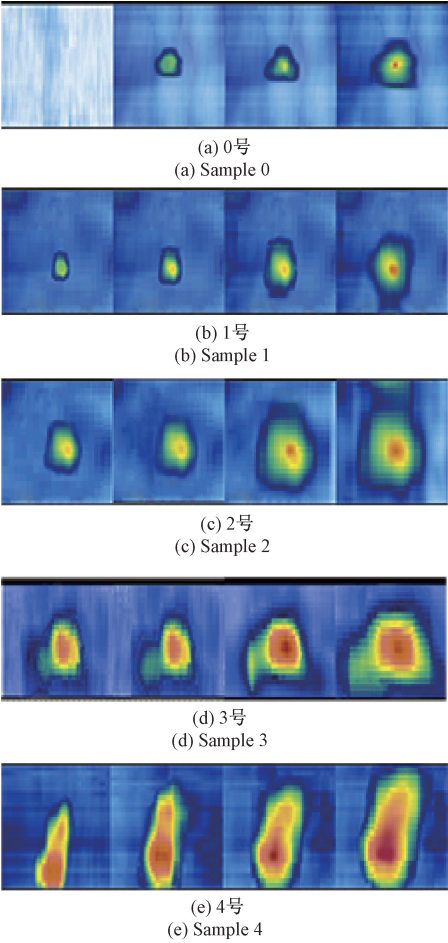


图 13 0~4 号试样缺陷演化 C 扫示意图
Fig. 13 C-scan diagram of defect evolution of sample 0~4

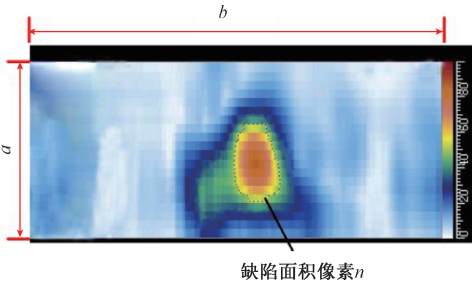


图 14 界面缺陷 C 扫图
Fig. 14 C-scan diagram of interface defects

通过式(1)可以计算出 0~4 号试样界面缺陷面积占比,其随载荷的变化关系如图 15 所示。初始外载荷较小,界面能够保持稳定,C 扫图中缺陷面积占比几乎不变,曲线较为平缓;当载荷增加至转折点处大小时,界面将发生脱粘同时开始出现缺陷演化,进而导致 C 扫图中

缺陷面积占比增加,曲线出现上升转折点。因此,根据图 15 转折点可以得到界面初始缺陷演化时的载荷,如表 5 所示。与基体未预制表面损伤的 0 号试样相比,当损伤宽度分别为 8、16、24、32 mm 时,通过计算初始缺陷演化时载荷变化的大小,得到试样承载能力分别下降 6.26% (0.829 kN)、13.68% (1.811 kN)、19.79% (2.619 kN)、26.00% (3.441 kN)。

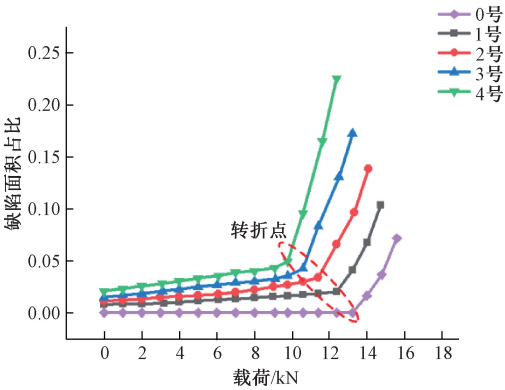


图 15 界面缺陷面积占比随载荷变化
Fig. 15 Variation of the proportion of interface defects due to load

表 5 0~4 号试样界面初始缺陷演化时载荷

Table 5 Load on sample 0~4 when interface defects begin to evolve

试样(基体损伤宽)	初始缺陷演化载荷/kN
0 号(0 mm)	13.234
1 号(8 mm)	12.405
2 号(16 mm)	11.423
3 号(24 mm)	10.615
4 号(32 mm)	9.793

2.4 结果分析

将表 4 与 5 的数据在同一坐标轴中作出并进行线性拟合,如图 16 所示。图 16 上方蓝线为界面裂纹萌生载荷随基体损伤宽度变化曲线 C_1 ,下方灰线为界面初始缺陷演化载荷随基体损伤宽度变化曲线 C_2 。根据表 4 与 5 的数据,采用最小二乘法,求出两条线的回归方程如下。

C_1 为:
 $y_1 = -0.098x + 14.872$ (2)

C_2 为:
 $y_2 = -0.104x + 13.219$ (3)

式中: y_1 为界面裂纹萌生的载荷; y_2 为初始缺陷演化的载荷; x 为基体损伤宽度。

提取上述回归方程的斜率与截距值,如表 6 所示,表 C_1 与 C_2 的斜率值近似为-0.1,且近似误差都小于 5%。

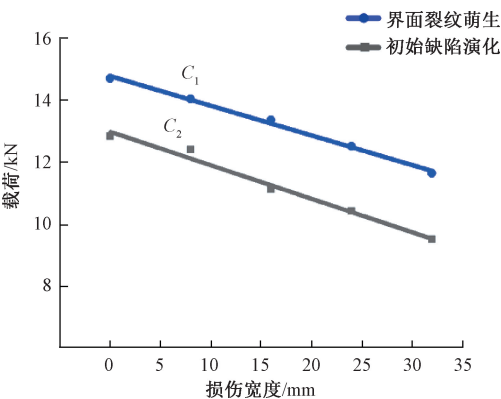


图 16 界面裂纹萌生与初始缺陷演化时刻的载荷随损伤宽度变化

Fig. 16 Variation of load with damage width for interface crack initiation and initial defect evolution

在该误差范围内,曲线 C_1 与 C_2 都描述了表面损伤宽度对修复件承载能力的影响,即当基体表面损伤宽度增加 1 mm,修复件承载能力下降约 0.1 kN。根据表 6 截距值 $b_2 < b_1$,并且 $\Delta b/b_1 = 11.12\%$,可知相较于界面裂纹萌生时的载荷,界面初始缺陷演化时的载荷大小降低了 11.12%,从而能够建立基体表面损伤对修复件承载能力的影响规律。

表 6 曲线 C_1 与 C_2 的斜率与截距值		
Table 6 Slope and intercept values of curves C_1 and C_2		
	C_1 (界面裂纹萌生)	C_2 (初始缺陷演化)
斜率 k_1, k_2	$k_1 = -0.098$	$k_2 = -0.104$
近似斜率 k	$k_1 \approx k_2 \approx k = -0.1$	
近似斜率误差 Δ	$\Delta_1 = 2\%$	$\Delta_2 = 4\%$
截距 b_1, b_2	$b_1 = 14.872$	$b_2 = 13.219$
截距差 Δb	$\Delta b = 1.653$	

2.5 与电磁检测评价结果的比较

为验证实验结果的可靠性,采用金属磁记忆方法进行了对比。金属磁记忆检测法作为一种新型的电磁检测技术,能够在地磁场作用下,利用铁磁构件受载后的磁记忆效应对构件内部早期损伤进行检测与评估^[26]。

试样界面外部微裂纹萌生时,裂纹尖端会产生应力集中,从而造成磁记忆信号发生变化,表现为磁记忆切向分量出现峰值,法向信号出现峰谷值且信号过零点^[27-28]。研究表明,磁记忆切向信号峰值与裂纹尖端应力集中部位具有良好的对应关系,可以通过切向信号 $H_p(x)$ 峰值出现时的载荷判定试样的承载能力^[29]。

如图 17 所示,采用金属磁记忆检测仪对施加 3 弯曲载荷的修复件进行检测,并记录 0~4 号试样磁记忆切向信号 $H_p(x)$ 峰值出现时的载荷如表 7 所示。

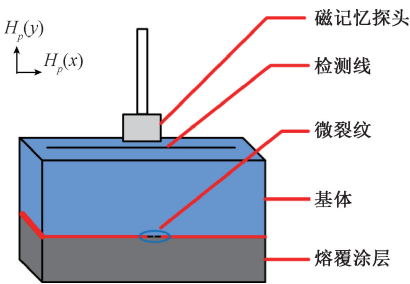


图 17 磁记忆检测示意图

Fig. 17 Diagram of magnetic memory test

表 7 0~4 号试样 $H_p(x)$ 峰值出现时载荷	
Table 7 Load at the peak of $H_p(x)$ of sample 0~4	
试样(基体损伤宽)	$H_p(x)$ 峰值出现时的载荷/kN
0 号(0 mm)	15.623
1 号(8 mm)	14.987
2 号(16 mm)	13.524
3 号(24 mm)	13.205
4 号(32 mm)	12.383

如图 18 所示,将表 7 的数据在二维坐标中作出并进行线性拟合。从图 18 可以看出,随着基体表面损伤宽度的增加,修复件承载能力近似成线性降低。图 18 数据点的整体拟合效果较好,但仍会出现个别误差较大的点。这是因为磁记忆会受到外界环境的影响,容易对测量数据产生较大的影响。与之相比,超声波几乎不受外部环境的影响,在缺陷检测方面具有较高的准确性和较好的重复性。

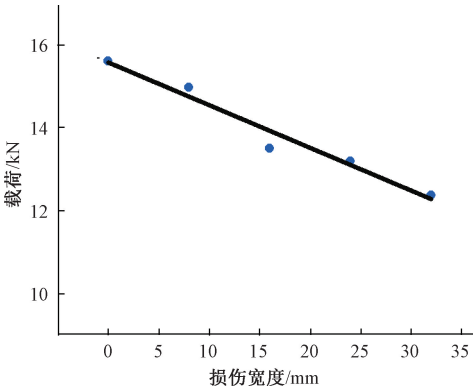


图 18 $H_p(x)$ 峰值出现时载荷随基体损伤宽度的变化关系

Fig. 18 The relationship between load and matrix damage width when $H_p(x)$ peak appears

2.6 材料一致性对声速的影响

超声声速作为反应介质声学特性的一项重要参数,其稳定程度会影响超声检测的准确性。因此需要对不同试件声速进行比对,来判断试样材料一致性对声速的影

响程度。选取 0~4 号试样表面 3 个不同位置进行声速测量,取 3 次测量的平均值如表 8 所示。

表 8 0~4 号试样的声速及最大声速差
Table 8 Sound velocity and maximum sound

velocity difference of sample 0~4 (m·s ⁻¹)					
试样	0 号(<i>c</i> ₀)	1 号(<i>c</i> ₁)	2 号(<i>c</i> ₂)	3 号(<i>c</i> ₃)	4 号(<i>c</i> ₄)
声速 <i>c</i>	5 795	5 964	5 952	5 873	5 920
声速差 Δ <i>c</i>	Δ <i>c</i> _{max} =(<i>c</i> ₁ - <i>c</i> ₀)= 169,Δ <i>c</i> _{max} / <i>c</i> ₁ =2. 834%				

选取表 8 声速相差最大的两个值 *c*₀ 与 *c*₁,得到最大声速差 Δ*c*_{max} = 169 m/s,Δ*c*_{max}/*c*₁ = 2. 834%。表 8 得到试样间声速误差都在 3%以内,说明材料一致性对声速的影响极小,声速比较稳定,保证了超声检测结果的准确性。

3 结 论

本文采用超声相控阵检测手段,研究了三点弯曲加载形式下,零件表面损伤大小对再制造修复件承载能力的影响规律。主要结论如下。

1)通过超声 A 扫图与 C 扫图可以得到界面裂纹萌生载荷与初始缺陷演化载荷,二者都反映了修复件承载能力与基体表面损伤的线性关系;那在误差小于 5%的前提下,表面损伤宽度每增加 1 mm,修复件承载能力约下降 0.1 kN。

2)相较于界面裂纹萌生时的载荷,界面初始缺陷演化时的载荷降低了 11. 12%,从而可以全面建立基体表面损伤对修复件承载能力的影响规律,为评定表面损伤零件的再制造质量提供及时有效的途径。

本文试样所承受的是静态载荷,但是在实际工况中,零件承受的往往是复杂的交变载荷。因此还需要探究疲劳载荷下零件表面损伤与修复件寿命之间的关系,从而更好地评估表面损伤件的再制造修复质量。

参考文献

[1] 徐滨士. 再制造工程的现状与前沿[J]. 材料热处理学报, 2010, 31(1):10-14.
XU B SH. State of the art and future development in remanufacturing engineering [J]. Transactions of Materials and Heat Treatment, 2010, 31(1):10-14.
[2] 李聪波, 李玲玲, 曹华军, 等. 废旧零部件不确定性再制造工艺时间的模糊学习系统[J]. 机械工程学报, 2013, 49(15):137-146.
LI C B, LI L L, CAO H J, et al. Fuzzy learning system for uncertain remanufacturing process time of used components[J]. Journal of Mechanical Engineering,

2013, 49(15):137-146.
[3] 钱正春, 黄海鸿, 韩刚, 等. 面向再制造的金属磁记忆检测技术研究综述及工程应用案例[J]. 机械工程学报, 2018, 54(17):235-245.
QIAN ZH CH, HUANG H H, HAN G, et al. Review on metal magnetic memory detection technology in remanufacturing and case study in engineering [J]. Journal of Mechanical Engineering, 2018, 54 (17): 235-245.
[4] 蔡振兵, 王璋, 朱旻昊, 等. 硬质涂层冲击、冲蚀性能的研究进展[J]. 机械工程学报, 2017, 53(24):12-24.
CAI ZH B, WANG ZH, ZHU M H, et al. Research progress on impact and erosion properties of hard coatings[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2017, 53 (24):12-24.
[5] 郭伟, 董丽虹, 王海斗, 等. 再制造喷涂层界面结合性能脉冲红外热像评估技术[J]. 中国表面工程, 2018, 31(3):168-176.
GUO W, DONG L H, WANG H D, et al. Pulse infrared thermal imaging technology for evaluating interfacial bonding properties of remanufactured spray coatings [J]. China Surface Engineering, 2018, 31 (3):168-176.
[6] CONSTANTIN N, MIHAI A, ANGHEL V, et al. Results of nondestructive inspection of layered composites using IR thermography and ultrasonics [J]. Key Engineering Materials, 2009, 413-414:343-350.
[7] CHENG J, JI H, QIU J, et al. Novel electromagnetic modeling approach of carbon fiber-reinforced polymer laminate for calculation of eddy currents and eddy current testing signals [J]. Journal of Composite Materials, 2014, 49(5):617-631.
[8] MIZUKAMI K, MIZUTANI Y, TODOROKI A, et al. Detection of delamination in thermoplastic CFRP welded zones using induction heating assisted eddy current testing [J]. NDT & E International, 2015 (74): 106-111.
[9] 张丽涵, 李宏岩, 王瑛, 等. 切向射线照相技术在固体推进剂装药包覆层/药柱粘接界面脱粘缺陷检测中的应用[J]. 无损检测, 2013, 35(4):60-64.
ZHANG L H, LI H Y, WANG Y, et al. Application of tangential radiography in the detection of debonding defects at the interface between solid propellant charge cladding layer and grain [J]. Nondestructive Testing, 2013, 35 (4):60-64.
[10] 黄刚. 基于超声透射时差法的金属棒缺陷检测研究[J]. 仪器仪表学报, 2016, 37(4):818-826.
HUANG G. Research on defect detection system for

- material based on ultrasonic transmission method [J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2016, 37 (4): 818-826.
- [11] 陈振华, 郑志远, 卢超. 不锈钢焊缝中超声传播特性及 TOFD 检测方法研究 [J]. 电子测量与仪器学报, 2017, 31(7): 1129-1136.
- CHEN ZH H, ZHENG ZH Y, LU CH. Research on wave propagation characteristics in austenite stainless steel weld and ultrasonic TOFD testing technique [J]. Journal of Electronic Measurement and Instrumentation, 2017, 31(7): 1129-1136.
- [12] PALUMBO D, TAMBORRINO R, GALIETTI U, et al. Ultrasonic analysis and lock-in thermography for debonding evaluation of composite adhesive joints [J]. NDT & E International, 2015, 78: 1-9.
- [13] 周正干, 李文涛, 李洋, 等. 相控阵超声水浸 C 扫描自动检测系统的研制 [J]. 机械工程学报, 2017, 53(12): 28-34.
- ZHOU ZH G, LI W T, LI Y, et al. Development of ultrasonic phased array immersion C-Scan automatic detection system [J]. Journal of Mechanical Engineering, 2017, 53 (12): 28-34.
- [14] 章东, 桂杰, 王晓玲, 等. 等高度聚焦算法的超声相控阵检测技术 [J]. 电子测量与仪器学报, 2018, 32 (2): 42-47.
- ZHANG D, GUI J, WANG X L, et al. Phased array ultrasonic detection using equal height focusing algorithm [J]. Journal of Electronic Measurement and Instrumentation, 2018, 32 (2): 42-47.
- [15] ABDESSALEM B, REDOUANE D, AHMED K, et al. Enhancement of phased array ultrasonic signal in composite materials using TMST algorithm [J]. Physics Procedia, 2015(70): 488-491.
- [16] 黄佩, 王召巴, 赵霞. 层状多界面的超声相控阵换能器声场研究 [J]. 压电与声光, 2010, 32(6): 1059-1061, 1065.
- HUANG P, WANG ZH B, ZHAO X. Acoustic field study of layered multi-interface phased array transducers [J]. Piezoelectrics & Acoustooptics, 2010, 32 (6): 1059-1061, 1065.
- [17] 赵霞, 王召巴, 陈友兴. 不等厚复合构件相控阵超声脱粘检测技术仿真研究 [J]. 声学技术, 2014, 33(4): 341-344.
- ZHAO X, WANG ZH B, CHEN Y X, et al. Simulation study on phased array ultrasonic debonding detection technology for composite components of different thickness [J]. Technical Acoustics, 2014, 33 (4): 341-344.
- [18] AMINEROA M. A, GARCÍA-MORENOA I, RODRÍGU-ZA G. P, et al. Internal damage evaluation of composite structures using phased array ultrasonic technique: Impact damage assessment in CFRP and 3D printed reinforced composites [J]. Composites Part B: Engineering, 2019(165): 131-142.
- [19] 李树健, 湛利华, 周源琦, 等. 基于图像处理的碳纤维增强树脂基复合材料固化压力-缺陷-力学性能建模与评估 [J]. 复合材料学报, 2018, 35 (12): 3368-3376.
- LI SH J, ZHAN L H, ZHOU Y Q, et al. Modeling and evaluation of curing pressure-defect-mechanical properties of carbon fiber reinforced resin matrix composites based on image processing [J]. Acta Materiae Compositae Sinica, 2018, 35 (12): 3368-3376.
- [20] LI W T, ZHOU ZH G, LI Y. Inspection of butt welds for complex surface parts using ultrasonic phased array [J]. Ultrasonics, 2019, 96: 75-82.
- [21] GUO W C, SHI J F, HOU D S. Research on phased array ultrasonic technique for testing butt fusion joint in polyethylene pipe [C]. 2016 IEEE Far East NDT New Technology & Application Forum (FENDT), 2016: 1-5.
- [22] SUI Y D, HAN L N, JIANG Y H, et al. Effects of Ni60WC25 powder content on the micro-structure and wear properties of WC_p reinforced surface metal matrix composites [J]. Transactions of the Indian Institute of Metals, 2018, 71(10): 2415-2422.
- [23] CHEN T, WU F, WANG H J, et al. Laser cladding in-situ Ti (C, N) particles reinforced Ni-based composite coatings modified with CeO₂ nanoparticles [J]. Metals, 2018, 8(8): 601.
- [24] WEN Z H, BAI Y, YANG J F, et al. Effect of vacuum re-melting on the solid particles erosion behavior of Ni60-NiCrMoY composite coatings prepared by plasma spraying [J]. Vacuum, 2016(134): 73-82.
- [25] 董丽虹, 郭伟, 王海斗, 等. 热障涂层界面脱粘缺陷的脉冲红外热成像检测 [J]. 航空学报, 2019, 40(8): 288-297.
- DONG L H, GUO W, WANG H D, et al. Inspection of interface debonding in thermal barrier coatings using pulsed thermography [J]. Acta Aeronautica et Astronautica Sinica, 2019, 40 (8): 288-297.
- [26] QIAN Z C, HUANG H H. Coupling fatigue cohesive zone and magnetomechanical model for crack detection in coating interface [J]. NDT&E International, 2019(105): 25-34.
- [27] 刘涛, 鲍宏, 朱达荣, 等. 基于磁记忆和表面纹理特征融合的再制造毛坯疲劳损伤评估 [J]. 中国机械工

程, 2018, 29(13):1615-1621.

LIU T, BAO H, ZHU D R, et al. Fatigue damage evaluation of remanufacturing cores using feature fusion of magnetic memory and surface texture [J]. China Mechanical Engineering, 2018, 29(13):1615-1621.

- [28] 王帅, 黄海鸿, 韩刚, 等. 基于 PCA 与 GA-BP 神经网络的磁记忆信号定量评价[J]. 电子测量与仪器学报, 2018, 32(10):190-196.

WANG SH, HUANG H H, HAN G, et al. Quantitative evaluation of magnetic memory signal based on PCA & GA-BP neural network [J]. Journal of Electronic Measurement and Instrumentation, 2018, 32(10):190-196.

- [29] 任吉林, 孙金立, 周培, 等. 磁记忆二维检测的研究与工程应用[J]. 机械工程学报, 2013, 49(22):8-15.
- REN J L, SUN J L, ZHOU P, et al. Engineering application prospect and research on magnetic memory in two-dimensional testing [J]. Chinese Journal of Mechanical Engineering, 2013, 49(22):8-15.

作者简介



黄海鸿, 2006 年于合肥工业大学获博士学位, 现为合肥工业大学教授、博士生导师, 主要从事绿色制造与再制造方面的研究。

E-mail: huanghaihong@hfut.edu.cn

Huang Haihong received Ph. D. from Hefei University of Technology in 2006. He is a professor and Ph. D. supervisor at Hefei University of Technology now. His main research interests include green manufacturing and remanufacturing, nondestructive testing and so on.



刘文杰, 2017 年于合肥工业大学获得学士学位, 现为合肥工业大学硕士研究生, 主要从事机电一体化、超声无损检测方面的研究。

E-mail: 1281376821@qq.com

Liu Wenjie received B. Sc. from Hefei University of Technology in 2017. Now he is a M. Sc. candidate at Hefei University of Technology. His main research interests include mechatronics and ultrasonic nondestructive testing.