DOI:10.16410/j.issn1000-8365.2021.01.004

铸铝合金构件 *R* 角涡流检测试验研究

汪洪量,卢新亮
(国营芜湖机械厂,安徽 芜湖 241000)

摘　要:针对飞机机体结构 *R* 角区域检测难问题,设计研发了铸铝合金 *R* 角涡流检测探头,结合 *R* 角实际检测工况,提出采用硅钢作为涡流探头的屏蔽层,可有效屏蔽金属对检测信号的影响;进行了检测工艺参数优化试验,确定了最佳的检测频率,以实现对飞机机体结构 *R* 角区域裂纹的快速可靠检测。试验结果表明:在激励频率为 400 kHz 时,检测信号幅值达到最大,研制的屏蔽涡流探头可有效检出裂纹参数为 5.00 mm×0.13 mm×0.20 mm(长×宽×深)的人工缺陷,且能够对缺陷进行精准定位,为飞机铸铝合金 *R* 角裂纹的定量检测提供依据。

关键词:*R* 角区域;屏蔽层;激励频率;硅钢;检测幅值

中图分类号: TG146.2　　**文献标识码**:A　　**文章编号**:1000-8365(2021)01-0012-04

Experimental Study on *R*-angle Eddy Current Detection of Cast Aluminum Alloy Members

WANG Hongliang, LU Xinliang
(State-owned Wuhu Machinery Factory, Wuhu 241000, China)

Abstract: Aiming at the difficult problem of detecting the R-angle region of aircraft structure, a die-cast aluminum alloy *R*-angle eddy current detection probe was designed and developed. Combining with the actual detection condition of *R*-angle, it was proposed to use silicon steel as the shield layer of eddy current probe, which can effectively shield the influence of metal on the detection signal. In order to realize the rapid and reliable detection of the crack in the R-angle region of the aircraft structure, the optimum detection frequency was determined. The results show that when the excitation frequency is 400 kHz, the detection signal amplitude reaches the maximum. The developed shielded eddy current probe can effectively detect the artificial defects with crack parameters of 5.00 mm×0.13 mm×0.20 mm (length×width×depth), and can accurately locate the defects. It provides the basis for quantitative detection of R-angle crack in aircraft cast aluminum alloy.

Key words: rangle area; shielding layer; excitation frequency; silicon steel; detection amplitude

飞机的关键承力构件大多数是由铝合金制造而成,铝合金因其密度低、比强度高、耐腐蚀及优良的加工特性等优点而广泛用于航空航天、机械制造等工程领域。同时,为满足结构设计要求,这些构件通常具有复杂的外形结构区,如*L*形、*T*形等,统称为*R*区,其中飞机机身等结构*R*角区占的比重较大,由于*R*角区域往往是结构材料厚薄变化的过渡区,容易发生应力集中而产裂纹[1-5]。而飞机在服役过程中,不可避免地会产生疲劳裂纹和新损伤,导致飞机结构件承载性能的降低,严重威胁飞机的飞行安全。

目前对于铸铝合金主要的无损检测方法有超声检测、渗透检测、涡流检剥。在复杂结构件铝合金的检测中,超声波检测技术由于角度的问题,存在检剥盲区;渗透检测需要对工件进行清洗,检测速度较慢且只能检测表面开口型裂纹,涡流检测以无接触、无需耦合且检测速度快等特点而适合于铸铝合金关键构件的缺陷检测[6-8]。国内外研究学者对于构件*R*角检测技术开展了大量的研究工作。如任吉林等通过分析热损伤过程中材料力学性能的改变与电导率数值变化之间的对应关系,将涡流电导率法应用于飞机铝合金结构热损伤检测。张祥林[10]针对航空航天飞行器中日益使用频繁的*R*角类复合材料构件,采用水浸大声束探头穿透法和超声相控阵检测方法,研究了各种检测方法的可行性和适用范围,刘菲菲[11]基于超声波在 *R*区的反射行为,利用宽带栏脉冲超声反射回波时域特征和成像特征进行复合材料结构*R*区缺陷检测与量化评估及层深定位。

本文作者主要开展了铸铝合金*R*角区域裂纹涡流检测试验研究,优化了检测工艺参数,通过试验获得了涡流检测探头的最佳频率,研制的*R*角屏蔽探

收稿日期: 2020-11-05

作者简介: 汪洪量(1990-),安徽绩溪人,学士,助理工程师. 主要从事无损检测新技术方面的工作.
电话:18255330609,E-mail:530100934@qq.com

(C)1994-2021 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

头可消除螺栓对于检测信号的干扰，有效识别出R角区域的裂纹，提高了探头的检测灵敏度，能够发现最小深度为0.2 mm的裂纹，以实现对飞机铸铝合金构件内R角裂纹的快速可靠检测。

1　试验

1.1　试块的设计

设计并制作对比试块，在R角采用电火花加工，缺陷倾斜角度为45°，每个缺陷相距100 mm，缺陷1参数为5.00 mm×0.13 mm×0.20 mm(长×宽×深)，其中一个缺陷设计在R角交界区域，缺陷2参数为5.00 mm×0.13 mm×0.20 mm(长×宽×深)，缺陷3参数为5.00 mm×0.13 mm×0.20 mm(长×宽×深)，研究设计制作机体R角检测所用的对比试，如下图1，用于检测灵敏度调整和比较、制作质量符合性。

1.2　激励频率对涡流检测信号的影响

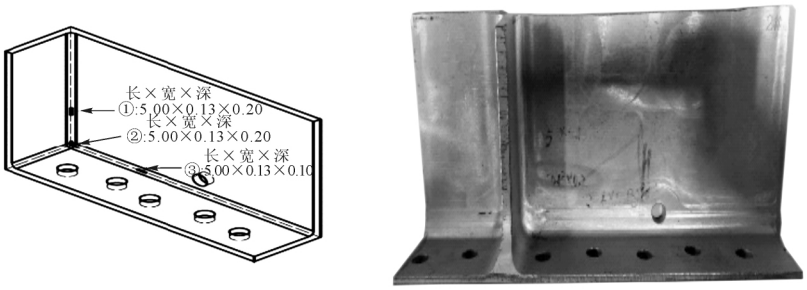
为优化涡流检测激励频率，测试频率分别为303、400、500、625 kHz，检测R角人工缺陷参数为5.00 mm×0.13 mm×0.20 mm(长×宽×深)。采用涡流绝对式探头对其检测，由于绝对式探头对平行于R角裂纹的灵敏度相比于差动式探头较高，涡流探头检测工艺参数如下表1，检测结果如下图2。

表1 检测参数

Tab.1 Detection parameters

前置放大 /dB	后置增益 /dB	数字滤波	高通 /Hz	增益比(Y/X)
10	35	5	3	4:0.4

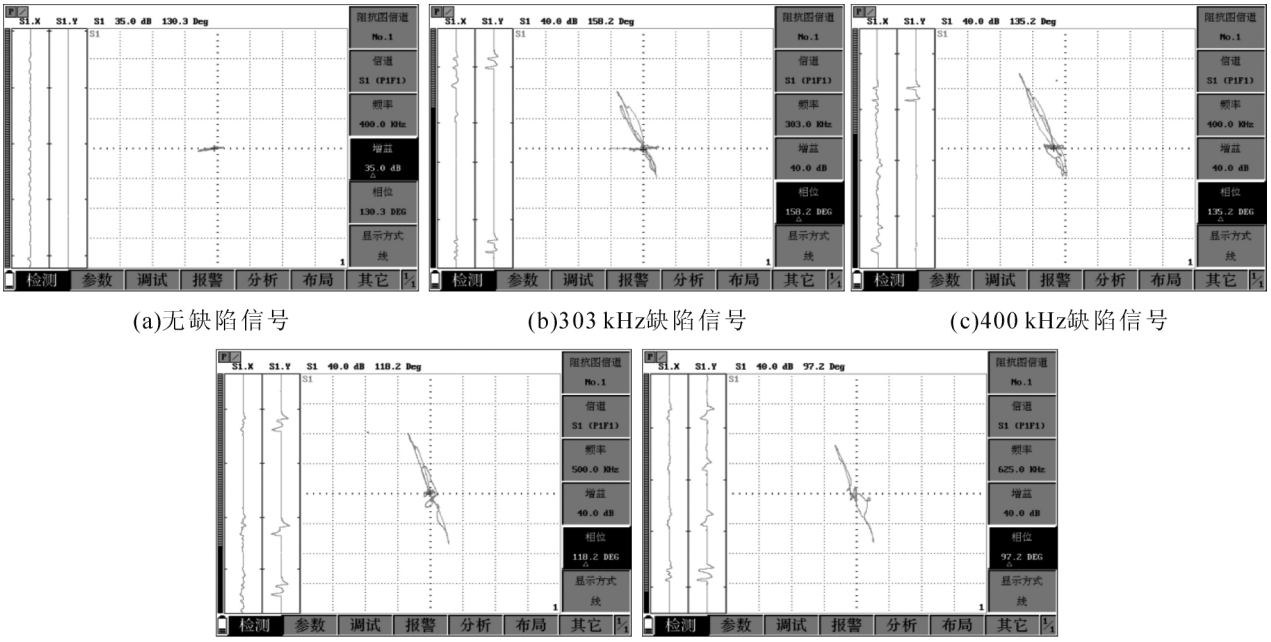
分析图2检测结果，可得出屏蔽涡流探头在303、400、500、625 kHz时缺陷信号分别为2.0格、2.6格、2.0格和1.7格，由于频率变化范围较大，表面涡流场实际分布有较大的差别，随检测频率的增加，涡流场能量增加，而频率提升后，集肤效应明显，能量聚集在表层，因此涡流强度加强。但频率增大到一定程度，由于频率的增大导致阻抗增加较大，使其强度也会下降，因此涡流场强度会逐渐下降。屏蔽涡流探头在400 kHz 时，灵敏度最高，信噪比最好，在该激励频率下，缺陷信号和扰动信号之间相位差也较大，有



(a)设计图　　(b)实物图

图 1 R 角试块

Fig.1 R angle test block



(a)无缺陷信号　　(b)303 kHz缺陷信号　　(c)400 kHz缺陷信号

(d)500 kHz缺陷信号　　(e)625 kHz信号

图 2 涡流探头频率优化结果

Fig.2 Frequency optimization results of eddy current probe

(C)1994-2021 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

利于缺陷的判别。

1.3 屏蔽探头的试验研究

涡流检测存在边缘效应，要是检测区域存在金属会对其检测结果产生干扰，因此需要研制屏蔽涡流探头，采用硅钢作为屏蔽体，可有效减小磁场的扩散范围，使其涡流场束缚在一定范围内，使用研制的屏蔽涡流探头进行屏蔽效果测试，将螺栓放置于平板上，使用屏蔽涡流探头对螺栓进行碰撞、沿着螺栓外壁扫查测试，并且将螺栓置于缺陷(10.00 mm×0.13 mm×0.20 mm)侧边1.5 mm处，再对缺陷进行扫查，如图3。检测工艺参数为：频率400 kHz、前置10 dB、驱动5、增益35 dB、数字滤波5、高通3 Hz、低通关闭、增益比(Y/X)：4.0:0.4。测试结果如图4。

由图4检测结果可知，探头对螺栓进行撞击或沿着外壁扫查信号和无缺陷的相位一致，并且螺栓对缺陷检测信号无影响，可有效区分裂纹的信号，使涡流的有效场扩散范围减小，检测相位角有明显的区分，进一步说明屏蔽涡流探头对螺栓能够起到有效的屏蔽作用。

1.4 不同深度缺陷涡流检测信号的特征

使用涡流设备及单通道屏蔽式涡流检测探头在R角试块上进行检测，速度保持匀速，检测工艺参数为：激励频率400 kHz，前置10 dB、驱动5、增益24 dB、数字滤波5、高通3 Hz、低通关闭、增益比(Y/X)：4.0:0.4。平行于缺陷扫查，检测结果如图5。

图5检测结果不难发现，无缺陷与有缺陷的检测信号有较大的差异，无缺陷的检测信号在X轴上，呈现0°角的直线，而有缺陷的信号向Y轴上扬的趋势，且缺陷深度越大，检测信号在Y轴上的信号越大，而图5(b)与图5(c)的检测结果相比，在同种参数的裂纹，处于不同R角上的裂纹，由于图5(c)在R角重叠

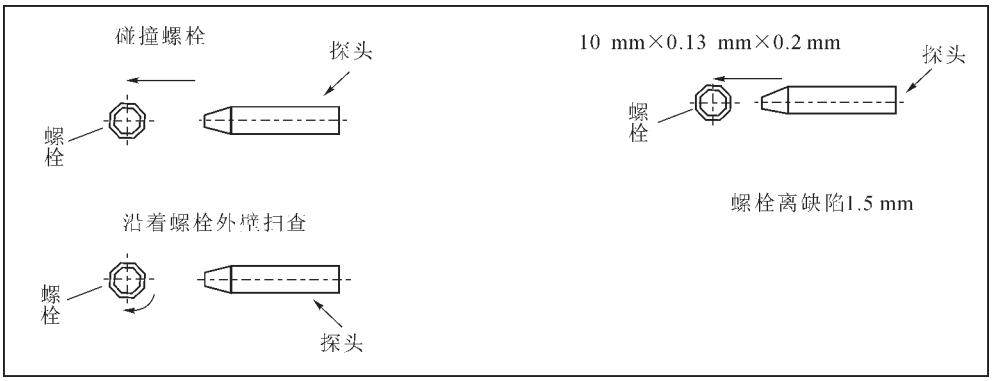
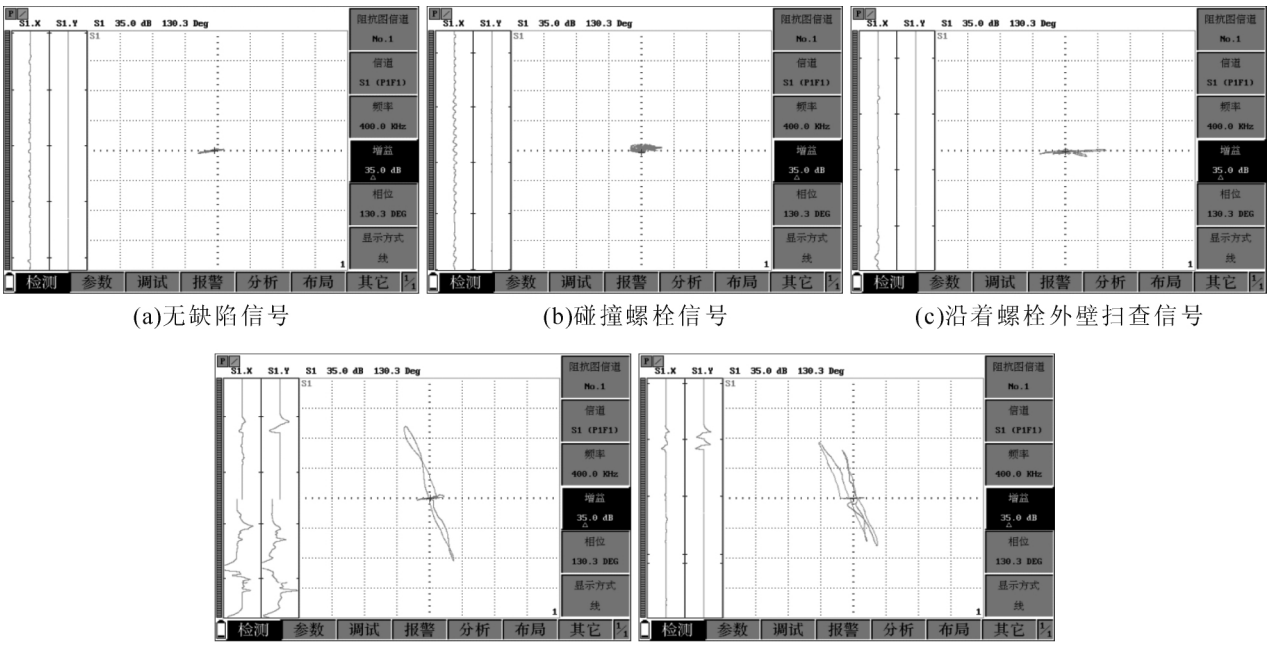


图 3 屏蔽测试方法
Fig.3 Shield test method

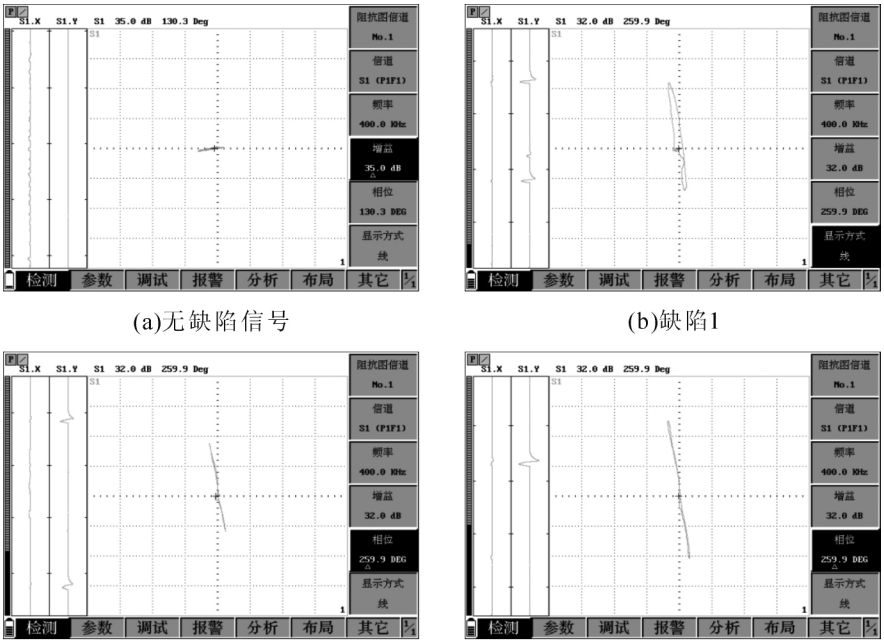


(a)无缺陷信号　(b)碰撞螺栓信号　(c)沿着螺栓外壁扫查信号

(d)螺栓在缺陷旁缺陷信号　(e)无螺栓时缺陷信号

图 4 屏蔽测试结果
Fig.4 Shield test results

(C)1994-2021 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net



(a)无缺陷信号　　(b)缺陷1

(c)缺陷2　　(d)缺陷3

图 5 检测结果

Fig.5 Test results

区，扫查时存在贴合不好的情况，涡流能量衰减较快，故检测信号相比较图5(b)较小，试验结果表明，研制的*R*角涡流检测探头能够有效检出*R*角的裂纹缺陷。

2 结论

(1)研制的单通道涡流探头可有效发现最小缺陷5.00 mm×0.13 mm×0.20 mm(长×宽×深)，且能精准对缺陷定位。

(2)经试验可知，当采用频率为400 kHz，对于*R*角的检测信噪比最高。

(3)当采用硅钢作为屏蔽层，可有效屏蔽螺钉对于检测信号的干扰，获得缺陷检测信号。

参考文献：

[1] 刘礼平，张放，钟晓琨，等. 飞机机身蒙皮均布增压疲劳裂纹萌生实验与仿真研究[J]. 机械强度，2020，42(4):960-965.

[2] 刘龙园，张斌，付细能，等. 某型飞机发动机前罩圈铆钉头裂纹和脱落故障诊断与分析[J]. 教练机，2020(2):65-68.

[3] 祖挥程，房顶. 某型飞机作动筒壳体裂纹故障分析[J]. 西安航空学院学报，2020，38(1):39-46.

[4] 张媛媛，贾智宇，邬建新，等. 飞机整流罩前支架裂纹原因分析[J]. 金属热处理，2019，44(S1):160-163.

[5] 王腾. 飞机蒙皮仿生耦合强化裂纹阻滞性能研究[D]. 南昌：南昌大学，2019.

[6] 魏培生. 碳钢换热管束远场涡流检测缺陷分析 [J]. 中国设备工程，2020(23):169-170.

[7] 王群，宋文爱. 在超声检测中利用小波分析降噪并提取伤信号[J]. 科技情报开发与经济，2005(3):186-187.

[8] 徐志祥，杨帆，关守岩，等. 基于表面波增强效应的圆柱表面缺陷检测方法研究[J]. 激光与红外，2020，50(10):1183-1189.

[9] 唐继红，任吉林，余海涛，等. 飞机铝合金结构热损伤的涡流检测[J]. 无损探伤，2005(1):9-11.

[10] 刘钊，张祥林，唐增武，等. 钛合金3D打印零件水浸超声检测技术研究[J]. 无损探伤，2020，44(4):20-23.

[11] 刘菲菲，刘松平，傅天航，等. 复合材料结构中*R*区的超声波反射行为及其检测应用[J]. 机械工程学报，2017，53(12):35-43.

《铸件均衡凝固技术及应用实例》

《铸件均衡凝固技术及应用实例》由西安理工大学魏兵教授编著。共 8 章：1 铸铁件均衡凝固与有限补缩；2 铸铁件冒口补缩设计及应用；3 压边浇冒口系统；4 浇注系统大孔出流理论与设计；5 铸件均衡凝固工艺；6 铸钢、白口铸铁、铝、铜合金铸件的均衡凝固工艺；7 浇注系统当冒口补缩设计方法；8 铸件填充与补缩工艺定量设计实例。全书 320 页，特快专递邮购价 280 元。

邮购咨询：李巧凤 029-83222071，技术咨询：13609155628

(C)1994-2021 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net