

# 铝合金氧化物夹杂超声波检测技术

周双锋 李大海 徐丽霞 高静 万蕾

(北京卫星制造厂有限公司, 北京 100094)

**文 摘** 针对航天器用铝合金内部的氧化物夹杂缺陷的检测难题,开展了超声波检测技术试验研究,采用一种基于过盈配合和快速氧化原理的铝合金氧化物夹杂缺陷模拟方法进行了氧化物缺陷模拟,并对缺陷的微观组织和成分进行分析,分析结果验证了氧化物夹杂缺陷的制作有效性。测试结果表明机械C型扫描能够有效分辨 $\Phi 1.2$  mm当量左右的夹杂缺陷,其直观性、耦合稳定性和重复性相较手动扫描,检测效果更优。该方法已应用于航天器铝合金产品氧化物夹杂检测,效果良好。

**关键词** 氧化物夹杂缺陷,铝合金材料,超声波检测

中图分类号: TG115.28

DOI: 10.12044/j.issn.1007-2330.2021.Z1.015

## Ultrasonic Testing Technology of Aluminum Alloy Oxide Inclusions

ZHOU Shuangfeng LI Dahai XU Lixia GAO Jing WAN Lei

(Beijing Spacecrafts, Beijing 100094)

**Abstract** For the problem of detecting oxide inclusion defects in aluminum alloy for spacecraft, the experimental research on ultrasonic detection technology was carried out. An oxide inclusion defect simulation method of aluminum alloy based on interference fit and rapid oxidation principle was used to simulate oxide defects, and the microstructure and composition of defects were analyzed. Analysis results verify the fabrication effectiveness of oxide inclusion defects. Test results show that the mechanical C-scan can distinguish defects under  $\Phi 1.2$  mm effectively. For inclusion defects of about 1.2 mm equivalent, the detection effect is better than manual scanning in terms of intuition, coupling stability and repeatability. The method has been applied to the detection of oxide inclusions in spacecraft aluminum alloy products with good results.

**Key words** Oxide inclusion defects, Aluminum alloy, Ultrasonic testing

### 0 引言

氧化物夹杂是铝合金材料中一种常见的冶金缺陷,目前只能控制在一定范围而无法完全消除,但它破坏组织的连续性,造成疲劳强度的降低,甚至直接断裂<sup>[1-4]</sup>。它的形成一般是在冶金熔炼和铸造过程中,熔体表面与空气接触,高温氧化形成氧化物夹杂,在搅拌和熔铸时,少量氧化物被卷入熔体内部,最后留在铸锭中而形成氧化物膜状夹杂<sup>[5-7]</sup>,氧化物夹杂体现在不同类型元素氧化物,在随材料变形中产生不同的外形体现,一般在产品上体现为不同形状、颜色、分布等,其断口一般呈现白色灰色或金黄色,图1为产品检测中发现的一处氧化物夹杂缺陷。

目前,铝合金内部质量即组织连续性检测最有效的是超声波检测方法<sup>[8-10]</sup>,能够对组织内不连续进行准确定位,并定量的表达,氧化物夹杂也是组织不



图1 氧化物夹杂缺陷

Fig. 1 Aluminum alloy oxide film defects

连续的一种表现,但因为其形成的复杂多样性、大小方向的不确定性给检测带来很大的不确定性。

本文首先通过模拟氧化物夹杂试验分析摸索超声波检测参数,总结检测经验,再进行试验验证检测

收稿日期:2021-09-07

第一作者简介:周双锋,1974年出生,高级工程师,研究方向为无损检测技术。E-mail:xulixiabuaa@163.com

方法的合理性来确定氧化物夹杂超声波检测方法。

### 1 氧化物夹杂模拟试验

氧化物夹杂可以过盈配合的方案模拟。设计总

体思路是制作一套棒和环结构件,利用高低温热胀冷缩物理特性实现过盈配合套装来模拟氧化物夹杂缺陷的制作。

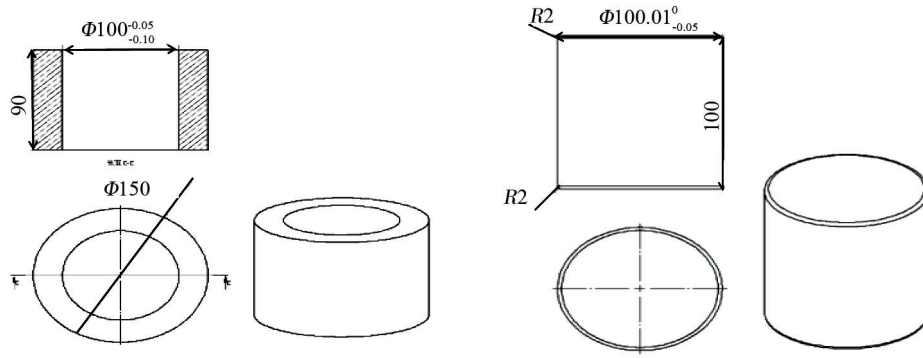


图2 氧化物夹杂试件设计图(环、棒)

Fig. 2 The diagram of the oxide inclusions specimen

共研制环试件(图2)9件,加工尺寸内径尺寸为99.92~99.93 mm;研制棒试件一(低过盈配合)3件,加工尺寸内径尺寸为99.99 mm;研制棒试件二(中过盈配合)3件,加工尺寸内径尺寸为100.09 mm;研制棒试件三(高过盈配合)3件,加工尺寸内径尺寸为100.19 mm。每种规格分别制作不同性质的氧化物夹杂如高温氧化、磷酸氧化、硫酸氧化。

表1 各试件含氧量百分比值表

Tab. 1 The oxygen content of the specimen %

试件	缺陷类型		
	高温氧化	硫酸氧化	磷酸氧化
1	2.17	57.93	23.37
2	1.42	54.17	22.37
3	3.11	55.81	24.25

通过取样分析,得到不同氧化方法的含氧量表1,由于磷酸氧化、硫酸氧化会残留有多余物,含氧量数据有一定偏差。

### 2 氧化物夹杂模拟试件验证

表2 不同检测参数下缺陷的当量

Tab. 2 Equivalent of defects under different detection parameters

检测参数	试件1			试件2			试件3		
	高温氧化	硫酸氧化	磷酸氧化	高温氧化	硫酸氧化	磷酸氧化	高温氧化	硫酸氧化	磷酸氧化
2.5 MHz 接触	17.5	16.5	17.5	14.5	11	12.5	10	10	11.5
5 MHz 接触	15.5	15	15	13.5	12.5	13.5	10	13.5	12.5
10 MHz 接触	14.5	13	14.5	12	11	12.5	8.5	11	10.5
10 MHz 水浸聚焦	7.4	6.9	5.3	4.3	3.7	5.8	1.9	5	4.8
15 MHz 水浸聚焦	7.5	7.8	5	3.5	3.6	6.2	1.1	6.4	5.2
25 MHz 水浸聚焦	5.5	5.5	1.9	2.1	1.3	2.5	-1.4	4	2.9

### 2.1 氧化物夹杂模拟试件超声波检测

针对制作的氧化物夹杂模拟试件,进行了一系列的超声波检测试验:为保证试验的准确性可靠性,根据试件特点研制相应的专用对比试件,对比试件缺陷大小为 $\Phi 2$  mm、 $\Phi 1.2$  mm、和 $\Phi 0.8$  mm,见图3。通过对试验结果的整理,我们发现对任意一种模拟缺陷,不同频率探头检测也呈现一定的规律,具体见表2。

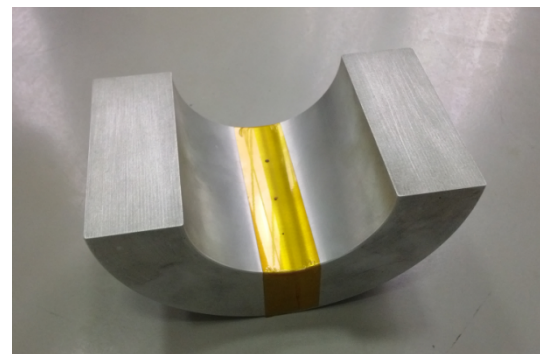


图3 氧化物夹杂模拟试件对比试件

Fig. 3 Oxide inclusion specimen

## 2.2 检测结果分析

从表2中可以看出,很明显随着频率增加缺陷的检测能力在快速降低,尤其是25 MHz探头,另外平探头检测效果要好于聚焦探头。超声波材料衰减公式如下,对于中厚的材料,与衰减相关其微观的相、相变、晶粒大小及方向、造成声学各向异性因子 $F$ 放大;晶粒 $d$ 也会明显变多甚至变大,尤其是衰减与频率 $f$ 的4次方关系,这些因素造成高频超声波信号在中厚衰减严重的关键因素。

$$\alpha_s = CFd^2 f^4 \quad (1)$$

式中, $\alpha_s$ 为散射衰减系数, $C$ 为与材料弹性有关的常数, $F$ 为声学各向异性因子, $d$ 为晶粒直径, $f$ 为频率。

经过不同频率探头的试验,从检测数据及结果上来说,模拟氧化物夹杂虽然不可能替代真实的氧化物夹杂缺陷,但仍可以摸索出一些实用的检测参数和检测频率。经过对上述试验数据的分析可以看出,几乎所有的检测缺陷的检测灵敏度可以以 $\Phi 2$  mm检测灵敏度检测出,这与缺陷的制作过程中缺陷处反射界面光滑(接触面双面表面粗糙度 $1.6 \mu\text{m}$ ,造成镜面反射过大有关,影响了正常氧化物夹杂的反射信号,与正常氧化物夹杂的反射幅度相比明显偏高,实际氧化物夹杂表面粗糙度明显要大一些;因此,实际的检测灵敏度应通过实际氧化物夹杂的检测和解剖验证的对应中得到。但可以肯定一点,就是比模拟氧化物夹杂的灵敏度要低一些。

图4为三种频率探头对9件氧化物夹杂检测结果分布。可以看出,25 MHz探头在检测中厚件产品时,不仅对缺陷的检出率和检测能力降低了,而且检测结果的离散性也较大,也就是说越是高频探头,对中厚材料的缺陷越无法保证稳定有效的检出。

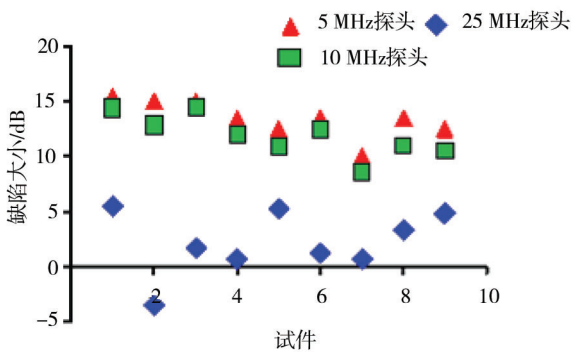


图4 不同频率检测缺陷离散性

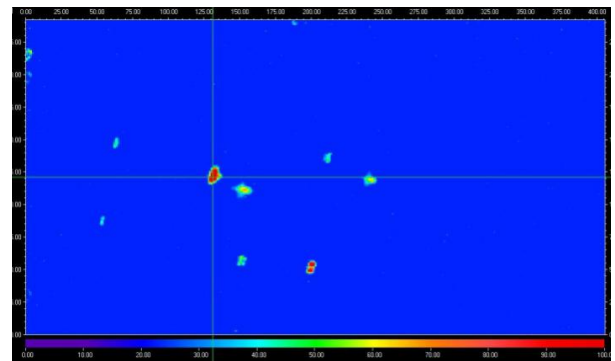
Fig. 4 The discreteness of ultrasonic testing for the oxide inclusion defects

## 2.3 氧化物夹杂试验结论

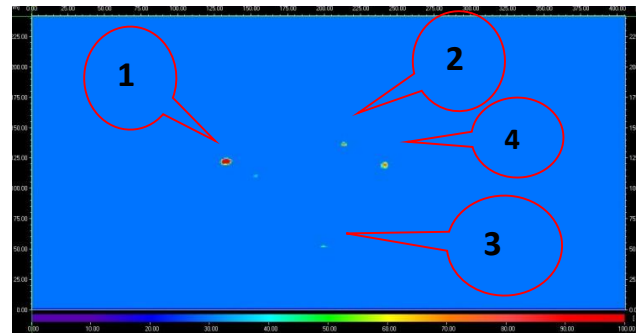
经过上述模拟氧化物夹杂试验可以得出以下结论:表面光滑的氧化物夹杂缺陷可以被超声波检测

顺利检出;对于较厚试件的氧化物夹杂缺陷检测,由于高频探头衰减较大,较低频率探头检测检出。而实际氧化物夹杂缺陷表面光滑度较差,而且期间也存在间断性连续,因此,真实氧化物夹杂检测当量应该明显低于 $\Phi 2$  mm当量值。

验证检测试验选择的试件是一件厚度为90 mm厚且有缺陷较为集中的一块铝合金锻件。试验采用机械扫描的检测方式,检测内容为 $\Phi 1.2$  mm平底孔灵敏度和底波跟踪扫描两种,下面是5和10 MHz探头检测的C扫描图,见图5。



(a) 5 MHz探头1.2mm平底孔C扫描图



(b) 10 MHz探头检测的C扫描图结果

图5 超声波C扫描图结果

Fig. 5 Results of the C scan of the ultrasonic testing

从上面检测结果来看,明显5 MHz探头的当量检测结果要优于10 MHz探头。对比上面几幅超声波检测图,选取图5所示几点较为明显的缺陷进行分析。检测结果见表3

表3 不同频率探头检测当量

Tab. 3 The equivalent of the ultrasonic testing dB				
探头频率/MHz	1缺陷	2缺陷	3缺陷	4缺陷
5	14	2	6	2
10	10	5	1	6

技术人员将以上4处缺陷进行加工,制作断口并进行拍照取证和电镜分析。几处断口的25倍低倍形貌,见图6。几处断口扫描电镜检测微观形貌,见图7。

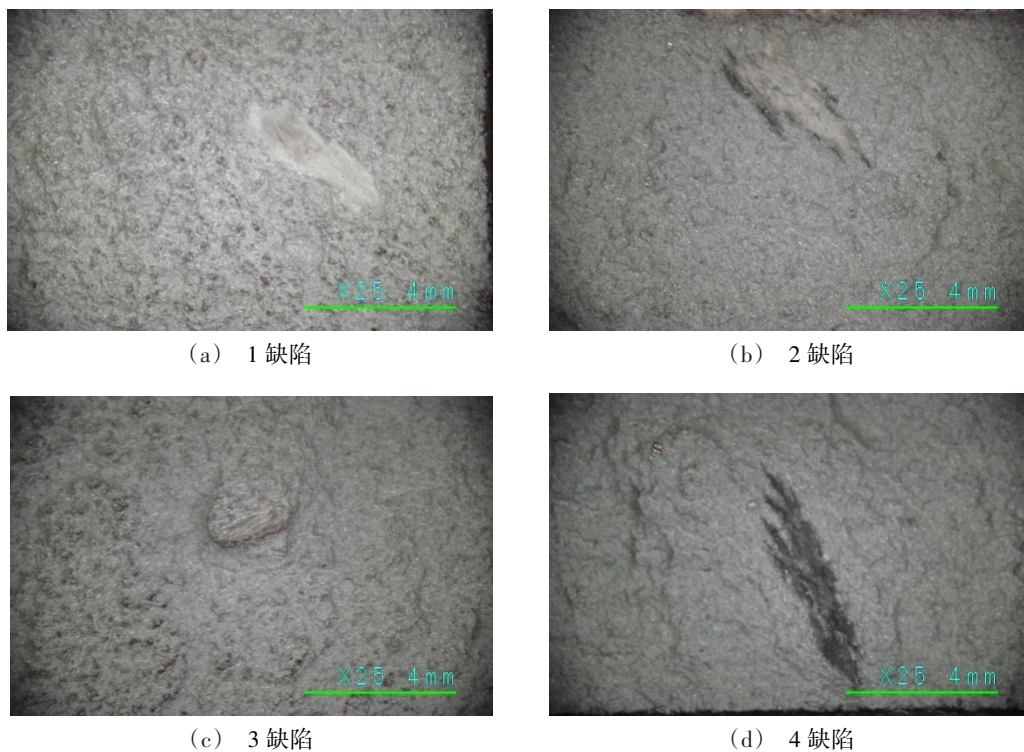


图6 4处缺陷的低倍形貌  
Fig. 6 The macro-spectrum of four defects

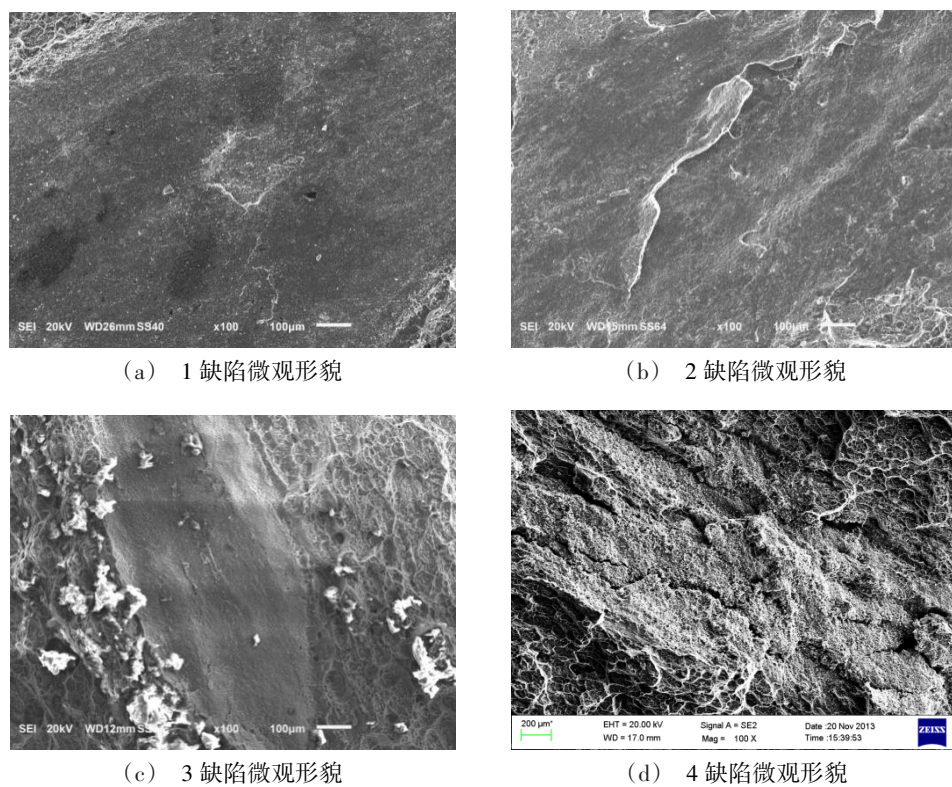


图7 缺陷的微观形貌

Fig. 7 The microstructure of the aluminum alloy oxide film defects

表4 能谱分析结果

Tab. 4 The result of EDS spectrum analysis %

O	Mg	Al	Ti	Mn
1.81	7.40	89.94	0.32	0.54

对其中1缺陷进行能谱分析,得到缺陷处的各元素分布比例见表4,根据结果可以推断出缺陷是氧化镁。

### 3 结论

根据铝合金氧化物夹杂模拟缺陷和实际产品的超声波检测结果可以得出以下结论:

(1)对于较厚锻件或板材铝合金材料,5 MHz探头具有较好的检测效果;

(2)对于中厚锻件或板材铝合金材料5 MHz、10 MHz探头检测效果相当;

(3)氧化物夹杂缺陷分布比较随机,检测当量不大,一般在 $\Phi 1.2$  mm当量左右;

(4)从缺陷检测效果方面来看,机械扫描检测的可视性、耦合稳定性和试验重复性相比较手动扫描检测有明显的优势。

#### 参考文献

[1] 韩静涛,张永军,赵中里,等. 控制大型饼类锻件夹杂性缺陷的锻造工艺及应用[J]. 大型铸锻件,2007(2):34-36.

HAN Jingtao, ZHANG Yongjun, ZHAO Zhongli, et al. Forging process and application of controlling inclusion defects of large cake forgings [J]. Large Castings and Forgings, 2007(2):34-36.

[2] 林顺财. 宝钢汽车板夹杂缺陷的分析与控制[R]. 2016年(第十九届)全国炼钢学术会议论文集,2016.

LIN Shuncai. Analysis and control for inclusion defects on automobile sheet of baosteel [R]. Proceedings of 2016 (19<sup>th</sup>) National Steel-Making Academic Conference, 2016.

[3] 张之卫. 消失模铸铁件夹杂缺陷分析及预防措施[J]. 锻造与铸造,2018(7):88-89.

ZHANG Zhi wei. Analysis and preventive measures of inclusion defects in EPC iron castings [J]. Forging and casting, 2018(7):88-89.

[4] 曹胜利,张庆军,朱立光. 氧化类夹杂引起冷轧产品表面缺陷的观察与分析[J]. 铸造技术,2016(1):62-66.

CAO Sheng Li, ZHANG Qingjun, ZHU Liguang. Observation and analysis on surface defects of cold rolled plate products caused by oxide type inclusions [J]. Foundry

Technology, 2016(1):62-66.

[5] 黄淑萍,何克准,胡海辉,等. 2A12铝合金扁铸锭缺陷分析及工艺优化[J]. 轻合金加工技术,2019(1):20-23,40.

HUANG Shuping, HE Kezhun, HU Haihui. et al. Defect analysis of 2A12 aluminum alloy flat ingot and process optimization [J]. Light Alloy Fabrication Technology, 2019(1):20-23,40.

朴启霞,栗雪,卞恒才. 钢中夹杂缺陷的探伤检验及分析[J]. 黑龙江冶金,2014(4):7-8.

PIAO Qixia, LI Xue, BIAN Hengcai. The Analysis and Inspection of Inclusion Defect In Steel [J]. Heilongjiang Yejin, 2014(4):7-8.

[6] 霍庆利,罗建华,张晶. 铝合金厚板氧化夹杂缺陷超声波检测当量值的研究[J]. 有色金属加工,2013,42(2)11-13,46.

[7] Huo Qingli, Luo Jianhua, Zhang Jing. Study on equivalent value of ultrasonic detection of oxidation inclusion defects in aluminum alloy thick plates [J]. Nonferrous Metal Processing, 2013,42(2):11-13,46.

[8] 张强金属构件中夹杂缺陷超声检测方法研究[D]. 北京:北京工业大学,2016.

ZHANG Qiang. Study on ultrasonic testing method of inclusion defects in metal components [D]. Beijing: Beijing University of Technology, 2016

[9] 边慧宇. Q345R钢板中夹杂物超声波检测实践[J]. 江西冶金,2020,40(2):55-58.

Bian Huiyu. Practice of ultrasonic detection of inclusions in Q345R steel plate [J]. Jiangxi Metallurgy, 2020,40(2):55-58.

[10] 王飞,周军,黄云. 航天铝合金锻件缺陷检测与成因[J]. 无损检测,2014(3):36-38,54.

Wang Fei, Zhou Jun, Huang Yun. Defect detection and causes of aerospace aluminum alloy forgings [J]. Nondestructive Testing, 2014(3):36-38,54.