

铝青铜铸件无损检测试验研究

桑劲鹏, 高立, 万升云, 章文显

(中车戚墅堰机车车辆工艺研究所有限公司, 江苏常州 213011)

摘要: 依据试验探讨了铝青铜材料的超声检测、射线检测和渗透检测效果。经粗略测算, ZCuAl10Fe3的声衰减系数至少达到0.165 dB/mm, 实际检测信噪比较低, 仅能通过底波大幅度降低发现大范围的体积型缺陷, 夹砂、夹渣、气孔等难以检出。采用射线照相检测可以检出铝青铜铸件中的气孔、夹砂、夹渣及疏松, 相对灵敏度较高。采用渗透检测可以检出铝青铜铸件表面的疏松、气孔等非线性状显示, 不存在EN 1371-1、EN 1982中所述某些铜合金铸件不易评定的问题。本文通过试验研究为开展铝青铜制品的无损检测提供了技术参照。

关键词: 铝青铜铸件; 声衰减; 射线检测; 渗透检测

铝青铜具有良好的铸造性能、力学性能和耐蚀性, 因而应用较为广泛^[1-5]。无损检测是保障铝青铜制品质量的重要手段, 夏建国^[6]对铝青铜棒材进行了超声检测研究, 在棒材圆心部位检出缺陷。然而, 有关铝青铜铸件的无损检测研究相对较少, 缺乏有效的铝青铜铸件无损检测技术研究基础。

本文尝试采用渗透检测、射线检测和超声检测等方法对铝青铜铸件进行试验研究。然而, 根据理论和标准输入, 渗透检测和超声检测对于铜合金铸件均存在不同程度的局限性。EN 1371-1: 2011《铸造 液体渗透检测 第1部分: 砂铸、重力压铸和低压铸件》适用范围中说明, 该标准不适用于Cu-Sn合金和Cu-Sn-Pb合金的渗透检测。EN 1982—2017《铜及铜合金 锭和铸件》中附录B.7中说明, 由于难以评定, 渗透检测不适用于压铸件, 也不推荐用于表H.1、附录J、附录K、附录L的合金(部分Cu-Zn-Si合金、Cu-Sn合金、Cu-Sn-Zn-Pb合金和Cu-Sn-Pb合金)。铸造铜合金声衰减系数较高, 如表1所示^[7]。

表1 各种金属和非金属材料的近似衰减系数和有效探测深度

Table 1 Approximate attenuation coefficients and useful depths of the inspection for various metallic and nonmetallic materials

衰减系数/(dB·mm ⁻¹)	有效检测深度/m	被检材料类型
低: 0.001~0.01	1~10	铸造金属: 铝 ⁽¹⁾ , 锰 ⁽¹⁾ 。锻造金属: 钢, 铝, 锰, 镍, 钛, 钨, 钼
中: 0.01~0.1	0.1~1	铸造金属 ⁽²⁾ : 钢 ⁽³⁾ , 高强度铸铁, 铝 ⁽⁴⁾ , 锰 ⁽⁴⁾ 。锻造金属 ⁽²⁾ : 铜, 铅, 锌。非金属: 烧结碳化物 ⁽²⁾ , 某些塑料 ⁽⁵⁾ , 某些橡胶 ⁽⁵⁾
高: >0.1	0~0.1 ⁽⁶⁾	铸造金属 ⁽²⁾ : 钢 ⁽⁴⁾ , 低强度铸铁, 铜, 锌。非金属 ⁽⁵⁾ : 多孔陶瓷, 填充塑料, 某些橡胶

注: 室温下使用2 MHz纵波。(1)纯金属或微合金;(2)主要是散射衰减;(3)纯碳或微合金;(4)高合金;(5)主要是吸收衰减;(6)过度衰减会妨碍检测。

本文研究的铝青铜铸件如图1所示, 其化学成分如表2所示, 包含Al、Fe等合金元素。由此可见, 该牌号铝青铜并非EN 1371-1和EN 1982所述的难以渗透检测的铜合金类型(部分Cu-Zn-Si合金、Cu-Sn合金、Cu-Sn-Zn-Pb合金和Cu-Sn-Pb合金)。但

作者简介:

桑劲鹏(1985-), 男, 硕士, 高级工程师, 主要研究方向为轨道交通装备检测技术研究。E-mail: 15996232796@163.com

中图分类号: TG115.28

文献标识码: A

文章编号: 1001-4977(2023)

06-0757-05

收稿日期:

2022-09-28 收到初稿,

2022-11-06 收到修订稿。



图1 铝青铜铸件

Fig. 1 Aluminium bronze casting

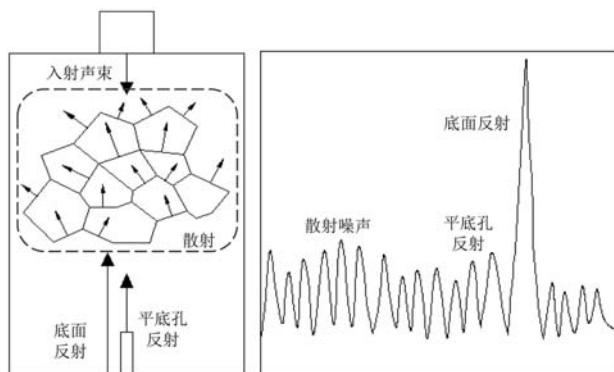
表2 铝青铜铸件化学成分

Table 2 Chemical composition of the aluminium bronze casting

 $w_B / \%$

材料牌号	主要元素			杂质元素					
	Al	Fe	Cu	Ni	Si	Sn	Zn	Pb	Mn
ZCuAl10Fe3	8.5~11.0	2.0~4.0	其余	≤ 3.0	≤ 0.20	≤ 0.30	≤ 0.40	≤ 0.20	≤ 1.00

噪声^[8] (图2), 入射声束在经过粗大晶粒时, 在晶界处有较强烈的散射^[9]。本文参照EN 12680-1: 2003《铸造 超声检验 第1部分: 一般用途铸钢件》的规定, 采用被检材料制作了对比试样, 包含 $\Phi 3$ mm平底孔。如图2所示, 经超声检测, 平底孔反射信号与背景噪声无法区分, 因此超声可探性不佳。



(a) 声束散射及反射

(b) 显示

图2 超声可探性测试示意图

Fig. 2 Testing diagram of the ultrasonic testability

为深入表征超声检测实际情况, 采用不同规格超声波探头进行综合试验, 结果如表3所示。表3中增益为无缺陷区域第一次底面回波80% FSH时的仪器增益值, 信噪比为无缺陷区域第一次底面回波幅度与背景噪声的分贝差。由此可见, 频率2.5 MHz、晶片直径20 mm的纵波单晶直探头的检测效果最佳, 其余规格纵波单晶、双晶直探头的实际检测信噪比和灵敏度较低。

选择检测效果最佳的频率2.5 MHz、晶片直径20 mm的纵波单晶直探头进行实际检测, 采用多次回波计算

是, 能否通过渗透检测有效检出和评定缺陷, 还需要根据渗透检测试验的结果判定。

1 超声检测试验

铸件由于晶粒粗大、组织不致密等原因, 其超声检测存在信噪比低、声能衰减剧烈等问题, 因此在检测前需要评价“超声可探性”。“超声可探性”体现了反射体回波与噪声的相对关系, 并反映超声能量是否充足。对于铸件, 噪声来源主要为散射引起的材料

表3 不同规格超声波探头检测结果

Table 3 Testing results for different types of the ultrasonic probe

频率/MHz	晶片直径/mm	是否双晶	增益/dB	信噪比/dB
2.5	14	否	45	10~12
2.5	20	否	36	> 16
5	14	否	55	8~9
5	20	否	48	10~14
2.5	20	FG20	-	< 6
2.5	20	FG30	-	< 6
5	20	FG20	-	< 6
5	20	FG30	-	< 6

法确定被检材料声衰减系数。衰减系数的计算如公式(1) - (2)。

$$V_{\text{总min}} = 20 \lg \frac{H_{1\text{st}}}{H_{2\text{rd max}}} \quad (1)$$

式中: $V_{\text{总min}}$ 为最小总衰减量, dB; $H_{1\text{st}}$ 为无缺陷处第一次底面回波幅度, %; $H_{2\text{rd max}}$ 为第二次底面回波附近最高波幅, %。

将 $H_{1\text{st}}=92\%$ 、 $H_{2\text{rd max}}=6\%$ 代入公式(1), 可得 $V_{\text{总min}}=23.7$ dB。第二次底面回波附近最高波幅可能为材料噪声或第二次底面回波, 若前者高于后者, 则计算得出的声衰减系数远小于实际值, 若前者等于或低于后者, 则计算得出的声衰减系数基本等于实际值。显然, 计算得出最低声衰减系数对进一步确定超声检测效果有直接意义。

$$\alpha = \frac{V_{\text{材质}}}{\Delta S} \geq \frac{V_{\text{总min}} - V_{\text{扩散}}}{\Delta S} \quad (2)$$

式中: α 为被检材料的声衰减系数, mm; $V_{\text{扩散}}$ 为扩散

衰减量, mm; ΔS 为两次底面回波距离差, mm。

将 $V_{\text{总min}}=23.7 \text{ dB}$ 、 $V_{\text{扩散}}=6 \text{ dB}$ (由超声波扩散规律得到, 无材质衰减的前提下, 声程增加1倍, 扩散衰减 $6 \text{ dB}^{[9]}$)、 $\Delta S=107 \text{ mm}$ 代入公式(2), 可得 $\alpha \geq 0.165 \text{ dB/mm}$ 。该衰减系数与表1数据吻合, 证实该铸铜材料为高声衰减材料。

采用2.5 MHz、晶片直径20 mm的纵波单晶直探头对被检材料进行检测时, 由于背景噪声较高且 $\Phi 3 \text{ mm}$ 平底孔回波较低, 因此主要通过观察底面回波幅度确定检测情况。如图3所示, 超声检测过程中一些区域(如图3中位置2、位置3)呈现底面回波幅度明显降低($>12 \text{ dB}$)的状态, 且没有超过背景噪声的缺陷回波。典型情况(排除耦合不良等因素)为: 无大范围缺陷的部位呈现较高的底面回波; 靠近大范围缺陷时, 底面回波开始降低; 位于大范围缺陷处, 底面回波显著降低或消失。

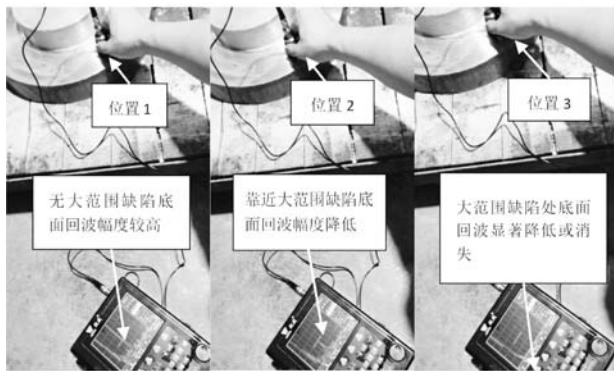


图3 超声检测典型信号
Fig. 3 Typical signal of the ultrasonic testing

2 射线检测试验

对被检材料进行射线照相检测, 检测参数及相关信息如表4所示。

表4 射线检测参数
Table 4 Parameters of the radiographic testing

检测参数	数据
焦点尺寸/mm	5.5
管电压/kV	270
管电流/mA	15
曝光时间/min	3
焦距/mm	700
像质计	W (6~12) -CU
像质指数	W10、W11
黑度	2.0、2.1
像质计位置	源侧
增感屏	铅箔: 前屏0.03 mm, 后屏0.1 mm

采用公式(3)^[10]计算相对灵敏度。

$$K = \frac{d}{T} \times 100\% \quad (3)$$

式中: K 为丝型像质计的射线照相相对灵敏度, mm; T 为被检工件的穿透厚度, mm; d 为射线照相底片上可辨认到的最细线的直径, mm。

分别将 $d=0.40 \text{ mm}$ 、 $d=0.32 \text{ mm}$ 、 $T=53.5 \text{ mm}$ 代入公式(3), 可得 K 分别为0.75%和0.6%, 均体现了较高的相对灵敏度。

射线照相底片如图4所示, 分别在被检材料的不同区域发现气孔、夹砂、夹渣、疏松等缺陷。采用ASTM

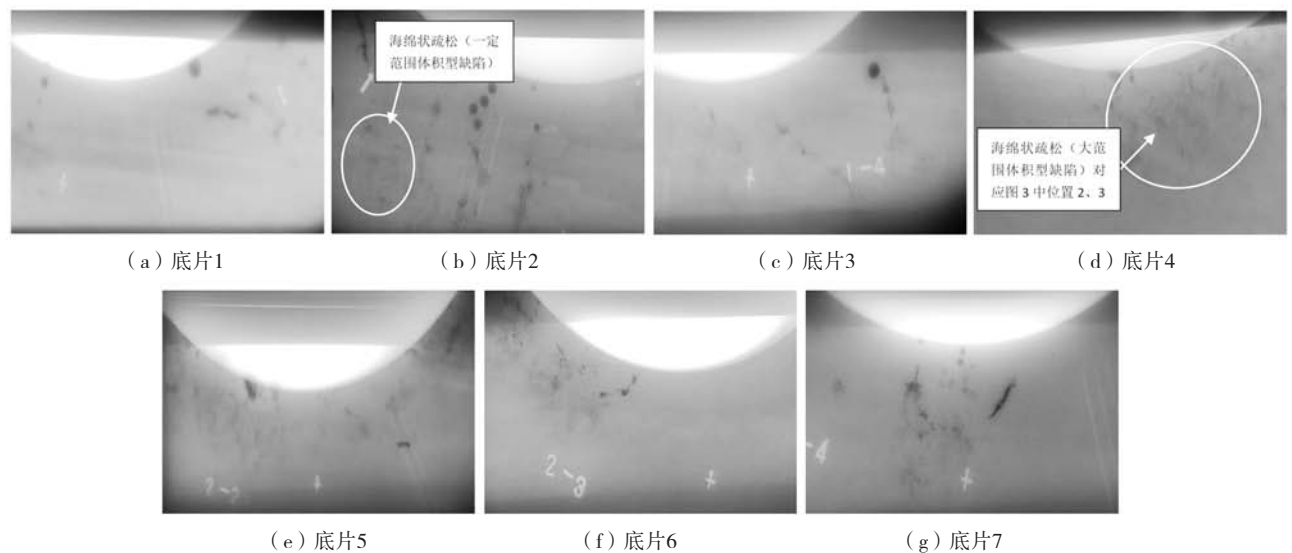


图4 射线照相底片
Fig. 4 Radiographs

E 272—2019《高强度铜基和镍铜合金铸件射线底片》对缺陷进行评定，缺陷类型和评级如表5所示。

表5 射线照相缺陷及评级结果
Table 5 Defects characterizing and grading of the radiographic testing

图示	缺陷类型及评级
图4 (1)	气孔A _G 3级、夹渣B _b 1级、线状疏松Ca2级
图4 (2)	气孔A _G 3级、海绵状疏松Cc3级
图4 (3)	气孔A _G 1级、线状疏松Ca2级
图4 (4)	海绵状疏松Cc3级
图4 (5)	夹砂Ba _G 3级、夹渣B _b 1级
图4 (6)	夹渣B _b 2级
图4 (7)	气孔A _G 1级、线状疏松Ca2级

3 渗透检测试验

对被检材料进行渗透检测，检测参数及相关信息如表6所示。

渗透检测显示如图5所示，被检材料表面存在较多非线状显示SP（气孔、疏松类非线状显示），显示清晰易辨，定量及定性不存在争议。根据EN 1371-1评为SP5级（最大非线性显示长度为18 mm）。



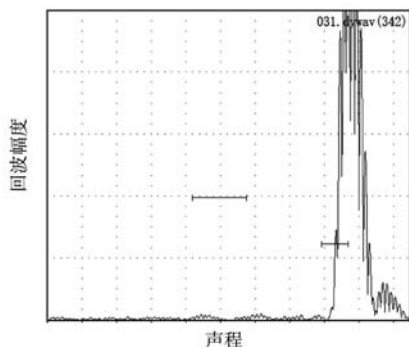
(a) 缺陷显示区域一



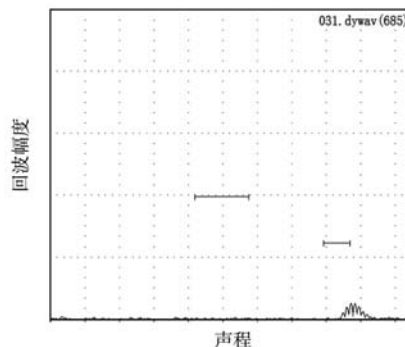
(b) 缺陷显示区域二

图5 渗透检测显示结果

Fig. 5 Indications results of the penetrant testing



(a) 完好截面的底面回波



(b) 可能存在大范围缺陷的底面回波

图6 铸件超声检测的典型底面回波

Fig. 6 Typical back-wall echo for the ultrasonic testing of the castings

表6 渗透检测参数
Table 6 Parameters of the penetrant testing

检测系统	灵敏度	综合性能	环境温度/℃	渗透时 间/min	显像时 间/min
II Ce ⁽¹⁾	高	2型参考试块 ⁽²⁾ 5点清晰显示	20	15	12

注：（1）符合ISO 3452-1：2021《无损检测 渗透检测 第1部分 总则》的规定；（2）符合ISO 3452-3：2013《无损检测 渗透检测 第3部分 参考试块》的规定。

4 试验情况分析

结合射线检测、渗透检测结果进行分析，引起超声检测第一次底面回波大幅度降低的缺陷为大范围的体积型缺陷。图3中位置3的超声波信号与图4d中的海绵状疏松相对应，属于大范围体积型缺陷的典型信号和射线影像。由于该类缺陷往往有一定的范围和自身高度，因此在声束经过时会引起声能的大幅降低，进而导致底面回波显著降低。如图6所示，该状态与EN 12680-1：2003中所述底面回波降低超过12 dB的情况一致（和EN 12680-1：2003中图B.2列举的以海绵状疏松为典型缺陷的底波降低示意图吻合）。完好截面的底面回波幅度很高，而海绵状疏松这类范围大，但属于单体小的体积型缺陷，虽然会使得底面回波会大幅度

降低或消失,却没有明显的缺陷回波(或信号淹没在材质噪声中)。在这种情况下,可以通过底面回波降低6 dB的方法对缺陷延伸范围进行测量,但由于没有明显的缺陷回波,因此难以采用端点6 dB法或其他基于缺陷回波幅度的测量方法对其延伸范围进行评定。

气孔、夹砂、夹渣之类的局部缺陷,由于范围和体积有限,因此声能的降低量有限,不会引起底面回波的显著下降。由于铝青铜声衰减系数较高,气孔、夹渣等缺陷的反射回波被较高幅度的背景噪声淹没,不易显现和识别,从而造成缺陷漏检,影响产品质量。

综上,铝青铜铸件射线照相检测效果良好,通过射线底片的分析评定,可以清楚地实现缺陷的定量和定性,从而真实反映被检截面的质量。渗透检测过程中,不存在渗透剂去除困难、显示评定困难的问题,说明铝青铜制品适宜渗透检测,这样也避免了无法透

透检测、选择涡流检测的问题。通常,涡流检测对于非线性状显示的检测存在一定局限性,且不易确定验收方案。

5 结论

(1) 铝青铜铸件声衰减较大,信噪比较低,不能满足超声可探性的要求。超声检测过程中,只能通过底面回波的大幅度降低发现大范围的体积型缺陷,因而不宜采用超声检测。

(2) 射线检测可以检出气孔、夹砂、夹渣、疏松等缺陷,相对灵敏度较高。通过ASTM E272图谱可以明确缺陷类型和级别,因而宜采用射线检测。

(3) 渗透检测对铝青铜的表面缺陷有良好的检测效果,显示易于识别和评价,不存在不易评定的问题。

参考文献:

- [1] 徐建林,陈超,路阳,等.铸造铝青铜显微组织的计算机辅助分析[J].铸造,2004,53(10):819-822.
- [2] ANONYMOUS. Basic of design engineering: bronze and copper-alloy bearings [J]. Machine Des, 1995, 27(15): 126-127.
- [3] 许诺,王立昕,高瑜,等.铝青铜合金的研究与发展[J].铸造工程,2021(2):11-14.
- [4] 王智平,金玉花,路阳,等.高铝青铜Cu14AlX摩擦磨损特性的研究[J].铸造,2003,52(3):185-189.
- [5] 袁庆龙,管红艳,张宝庆.铝青铜合金研究进展[J].材料导报,2011(3):127-132.
- [6] 夏建国,张素珍,关会群.铝青铜的超声波检测[J].黑龙江电力,2006(1):40-41.
- [7] ASM handbook committee. ASM handbook, volume 17 [M]. ASM international Press, 1992.
- [8] 林莉,李喜孟.超声波频谱分析技术及其应用[M].北京:机械工业出版社,2009.
- [9] 万升云.超声波检测技术及应用[M].北京:机械工业出版社,2017.
- [10] 强天鹏.射线检测[M].北京:中国劳动社会保障出版社,2007.

Experimental Study on Non-Destructive Testing of Aluminum Bronze Castings

SANG Jin-peng, GAO Li, WAN Sheng-yun, ZHANG Wen-xian
(CRRRC Qishuyan Research Institute Co., Ltd., Changzhou 213011, Jiangsu, China)

Abstract:

The effects of ultrasonic testing, radiographic testing and penetrant testing on aluminum bronze materials were discussed with experiments in this paper. According to rough calculation, the acoustic attenuation coefficient of ZCuAl10Fe3 reached at least 0.165 dB/mm, the actual signal-noise-ratio was relatively low, and only the wide range of volumetric defects was detected with the remarkable attenuation of back wall echo amplitude. Sand inclusion, dross inclusion, porosity and other types of indications were difficult to detect. The porosity, sand inclusion, dross inclusion and shrinkage of aluminum bronze castings were detected by radiographic testing with relatively high sensitivity. Penetrant testing was used to detect the surface non-linear indications of aluminum bronze castings, such as shrinkage, porosity, etc, there is no difficulty in evaluating certain types of the copper alloy castings as described in EN 1371-1 and EN 1982. Technical reference can be provided for non-destructive testing of the aluminum bronze products through experimental study in this paper.

Key words:

aluminum bronze castings; acoustic attenuation; radiographic testing; penetrant testing