

# 钎焊型铜铝过渡线夹结合面的 超声波检测及仿真

王亦民,王中亚

(安徽省电力科学研究院,合肥 230601)

**摘要:**分析了钎焊结合面的超声波检测原理,提出了一种适用于现场检测的钎焊型铜铝过渡线夹超声波检测技术。结合超声波仿真技术,确定了较佳的检测技术参数和方法。可以对三种典型结合状况作出明确判断,能准确测量缺陷面积,误差较小。经试验证实,结果准确有效,检测效率较高,可以在电网金属监督工作中推广应用。

**关键词:**钎焊;铜铝过渡线夹;超声波检测;仿真

中图分类号: TG115.28

文献标志码: A

文章编号: 1000-6656(2013)06-0011-03

## The Ultrasonic Testing and Simulation for Brazed Joint of Copper and Aluminum Middle-Sized Device Clamps

WANG Yi-Min, WANG Zhong-Ya

(Anhui Electric Power Research Institute, Hefei 230601, China)

**Abstract:** The principle of ultrasonic detection of brazed joint is analysed, the ultrasonic testing technology for brazed joint of copper and aluminum middle-sized device clamps for field testing is presented in this paper. Supported by ultrasonic simulation technology, the better test parameters are given. The method can detect three typical area and measure the flaw area accurately. The test proved that the result is accurate and the technology is fast and efficient which can be applied in power grid metal metal supervision.

**Keywords:** Brazing; Copper and aluminum middle-sized device clamp; Ultrasonic testing; Simulation

钎焊型铜铝过渡线夹是电网变电设备中大量使用的一种电力金具。鉴于近年来已多次出现钎焊型铜铝过渡线夹断裂失效导致的电网设备故障,此类线夹的质量检测变得尤为重要。运行过程中钎焊线夹的使用质量除了受环境温度、湿度、线夹表面状态、负荷情况等外在因素的影响,主要与钎焊结合面的粘合率有关。国内学者采用超声 C 扫描技术进行钎焊焊接质量的检测<sup>[1-2]</sup>。

笔者结合先进的超声波仿真技术,提出了一种快速有效的适用于现场检测的钎焊型铜铝过渡线夹超声波检测技术。

### 1 钎焊结合面的超声波检测原理

钎焊特别适用于铜铝异种材料的焊接<sup>[3]</sup>。铜铝异种金属在钎焊过程中除了会出现脆性相,溶蚀,腐蚀等缺陷,还会产生钎缝不连续,称为脱粘类缺陷。脱粘类缺陷主要分为完全空气脱粘缺陷和机械贴合缺陷,产生此类缺陷的主要原因是,工件在清洗时没有清洗干净表面,选用钎料的流动性和润湿性太差,或者是钎焊温度过低,装配的钎缝间隙选用不合适。因此,根据钎缝的焊接质量,钎焊结合面(又称钎缝区)可分为三种不同的区域:① 焊接完好区:钎料完全填充、铜铝结合良好的区域。② 完全空气脱粘区:钎料稀少甚至没有、中间存在空气层的脱焊区域。③ 不完全焊接区:钎料部分填充铜铝间隙、中间没有空气的区域。超声波在这些区域的传播特性

收稿日期:2012-06-18

作者简介:王亦民(1958—),男,工程师,本科,主要从事超声检测工艺及仿真技术的研究。

是不同的,根据超声波在钎缝区的回波信号特点,即可进行钎焊结合面的超声波检测,该方法具有理论上的可行性。

## 2 钎焊结合面的超声波检测仿真

超声仿真技术是超声波检测技术研究的一个重要分支,它在检测结果分析、性能验证、检测工艺设计和优化、虚拟检测等领域都有重要的应用<sup>[4]</sup>。笔者利用超声仿真技术对钎焊型铜铝过渡线夹的超声检测过程进行模拟,对如何进行探头选择和检测信号分析做一个初步的探讨。

超声仿真软件选用目前世界上最先进的超声检测仿真平台 CIVA,参数设置如下:铜板厚 0.5 mm,铝板厚 8 mm,钎焊结合面尺寸为 80 mm × 100 mm,在钎缝处设置两处 1 mm × 1 mm 矩形缺陷,此处忽略钎缝厚度,并不影响计算结果。一般的铜铝过渡线夹结构形式如图 1。

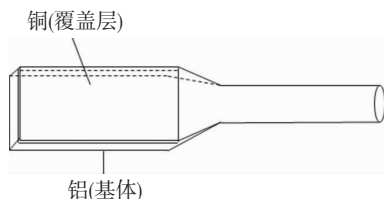


图 1 钎焊型铜铝过渡线夹

与常规超声波检测不同,钎焊结合面为铜铝异质界面且铜片和铝板均较薄,因此其超声波检测具有特殊性,选择合适的探头是首要的一步。仿真过程选用 5, 10, 15 MHz 频率的  $\phi 4$  mm 单晶直探头,在仿真工件表面进行栅格扫查,仿真计算结果如下:

图 2 为使用三个不同频率探头检测的仿真计算 C 扫和 B 扫图,可以看出,探头频率越高,缺陷图像越清晰易辨,分辨力越高。5 MHz 探头扫查得到的缺陷信号与底波信号难以分辨,见图 2(a), (d); 10 MHz 探头扫查得到的缺陷信号与底波信号可以分辨,但分辨力较低,见图 2(b), (e); 15 MHz 探头扫查得到的缺陷信号与底波信号可以清晰地分辨出来,分辨力最高,见图 2(c), (f)。图 3 为三个探头的底波信号幅值比较图,通过比较可以看出,探头频率越高,衰减越大,底波信号幅值越小。

通过对仿真结果进行分析,低频探头基本不能用于检测厚度较小的铜铝过渡线夹,探头频率应不低于 10 MHz,同时考虑到信号衰减因素,频率亦不能太高,探头频率选择 15 MHz 为宜。为了保持较高的检测精度,便于缺陷定量,探头尺寸不宜过大,以不大于  $\phi 5$  mm 为宜。

图 4 是对钎焊结合面完全空气脱粘区检测信号的模拟,当探头置于铜侧扫查时,界面回波呈林状;当探头置于铝侧扫查时,在一次底波声程范围内仅有一次界面回波,这是由于铝板厚度远大于铜片的原因,符合实际检测情况,由于此处是仿真缺陷设置,实际检测底波会很弱甚至消失。

## 3 钎焊结合面的超声波检测

笔者对钎焊型铜铝过渡线夹标样进行测试,仪器选用汉威 HS616e 型数字式超声波探伤仪,探头选用 15 MHz  $\phi 4$  mm 高频窄脉冲直探头。钎焊结合面的超声波检测信号特点分析如下:

(1) 焊接完好区:波形显示如图 5 所示,此时超

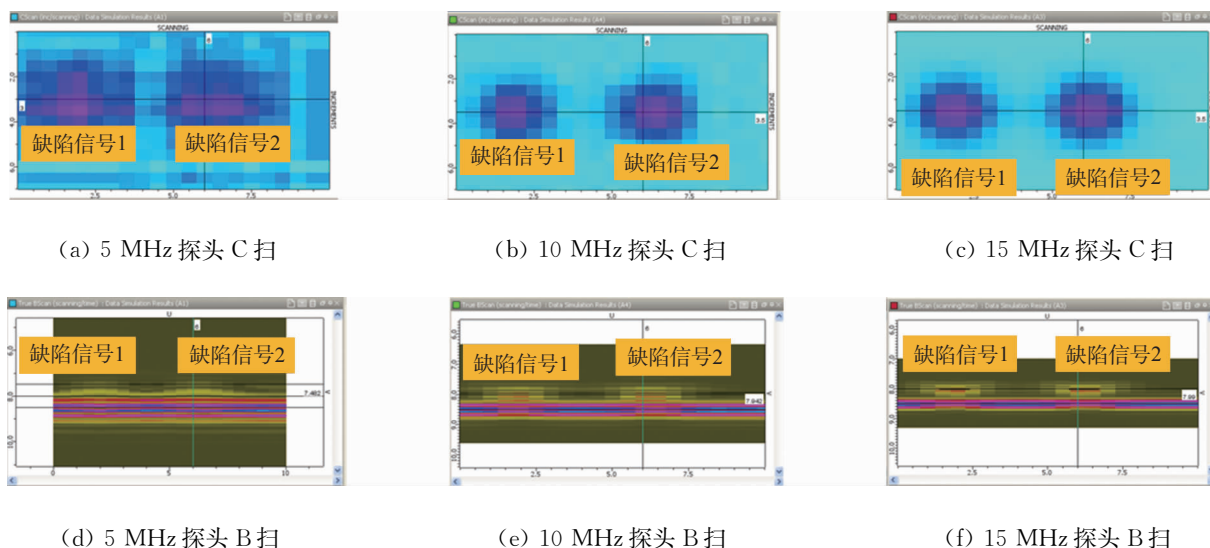


图 2 三个不同频率探头的 C 扫和 B 扫计算结果

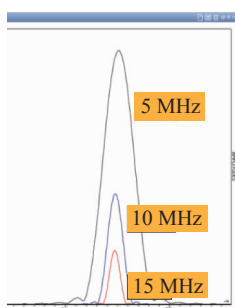
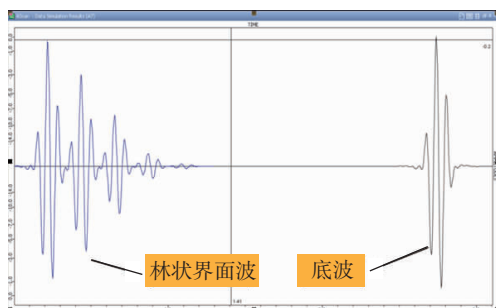
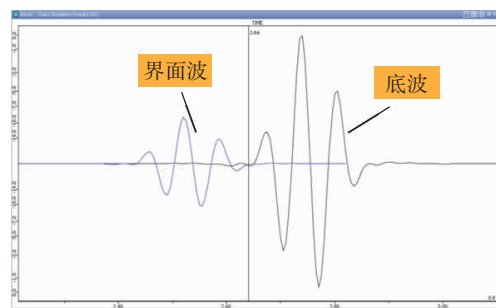


图3 三个探头的  
底波信号幅值比较



(a) 探头置于铜侧扫查



(b) 探头置于铝侧扫查

图4 钎焊结合面完全空气脱粘区检测信号的仿真

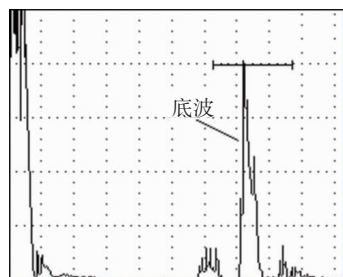
声波直接穿透钎缝,仅有底面回波信号,波形尖锐,不存在铜铝界面回波信号。实际检测中,可以将底波波高调到满屏幕的80%,作为参考灵敏度。

(2) 完全空气脱粘区:波形显示如图6所示,此时超声波无法穿透钎缝,在钎缝处发生反射产生铜铝界面回波信号,底波完全消失。

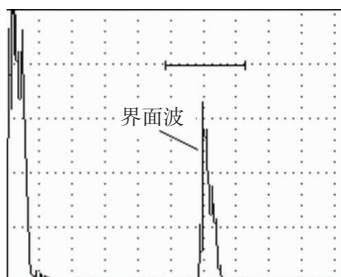
由于铝板较厚,铜板较薄,二者厚度比一般大于20:1,因此从铝侧和铜侧表面检测时的界面回波波形有所不同。从铝侧表面检测时,在一次底波声程范围内仅有一次界面回波,如图6(a)所示;从铜侧表面检测时,在一次底波之前会出现多次界面反射,界面回波呈林状,波高递减,如图6(b)所示。

(3) 不完全焊接区:波形显示如图7所示,此时超声波部分穿透钎缝,不仅存在钎缝处的铜铝界面回波信号,而且也存在底面回波。其中,当从铜侧表面检测时,界面回波呈林状,与完全空气脱粘区相比,林状波不规则且较弱。

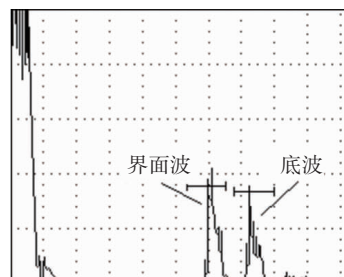
按照 GB/T 2314—2008《电力金具通用技术条件》规定,钎焊工艺制造的铜铝过渡金具及冷轧的铜铝过渡复合片铜与铝表面的复合面积应不小于总接触面的75%,即粘合率不小于75%。由于完全空气脱粘区和不完全焊接区铜铝未粘接好,粘合强度不够,均视为未粘合区。实际检测过程中,只需根据波形特点判断出未粘合区域并加以测量,即可计算出



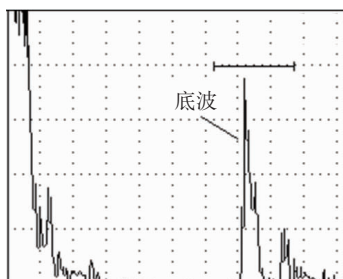
(a) 从铝侧表面检测



(a) 从铝侧表面检测

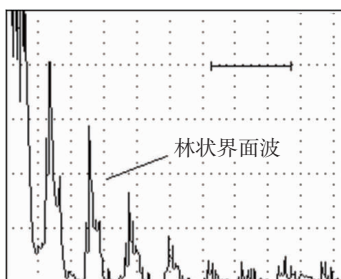


(a) 从铝侧表面检测



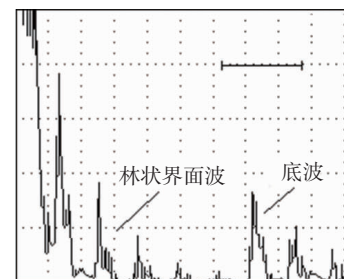
(b) 从铜侧表面检测

图5 焊接完好区不同  
侧面检测时的波形显示图



(b) 从铜侧表面检测

图6 完全空气脱粘区不同  
侧面检测时的波形显示图



(b) 从铜侧表面检测

图7 不完全焊接区不同  
侧面检测时的波形显示图

(下转第28页)



之间这种相关性就不是很明显了。这也说明了磁化材料时,在磁化方向的磁畴的移动受到应力的影响<sup>[4-5]</sup>。

由应力测量的试验情况可以看出,试样抛光前后应力状况相差巨大。利用 X 射线法测量试样表面的应力值为压应力,BN 法测量的应力值则是拉应力,而对试样表面电解抛光后再利用 X 射线法测量应力值则为拉应力,且数值大小和 BN 所测值相近。说明试样表面有薄薄一层表面压应力,X 射线法测得的应力值正是这层压应力。而表面打磨压应力对 MBN 信号的影响并不大,MBN 法测得应力值为试样基体的应力,即试样表面一定深度范围内应力状况综合体现。可看出 BN 应力测量的深度大于 X 射线法,BN 方法能够全面评价零件表层的应力情况,而 X 射线法只局限于表面,且对经过机械加工特别是磨削后的零件的应力状况分析是不可靠的。

#### 4 结论

通过试验确立了不同磁化方向下应力与 BN 值间的关系,绘制了可进行插值标定的曲线,并进行了两种方法的应力测量。得出两点结论如下:

(1) 当磁化方向与应力方向平行时,BN 信号值随着拉应力的增加而增加,随着压应力的增加而减小。当磁化方向垂直于应力方向时,BN 信号值随着拉应力增加而减小,随着压应力增加而增加,但增加幅度不大。



(上接第 13 页)

钎焊型铜铝过渡线夹结合面的粘合率。若线夹钎缝结合面的粘合率未达到 75%,即可判断产品不合格。需要提出的是,未粘合区和焊接完好区的回波信号区分明显,选择的检测探头晶片尺寸很小,易于围出未粘合区,大大降低了未粘合区面积的手动测量误差,并不影响结果判定。经试验证实,采用此方法检测铜铝过渡线夹钎焊结合面,结果准确有效。

另外,通过对钎焊型铜铝过渡线夹结合面的超声检测回波信号进行分析,实际检测过程中建议从铜侧表面进行检测,界面回波呈林状,信号易于识别,便于区分测量焊接完好区和未粘合区,能大大提高检测效率。

#### 4 结论

通过对钎焊结合面的超声波检测进行模拟仿真

(2) BN 法可测量零件表面和内部一定深度范围内的应力值,能够综合评价零件应力集中情况,而 X 射线法只能测量表面残余应力情况,测量深度较小。因此 BN 法可对零件的制造过程中产生的残余应力集中情况进行评价,操作方便快捷,而且其测量的深度和抗干扰能力也均较 X 射线应力分析法具有优势。

#### 参考文献:

- [1] AUGUSTYNIAK, MACIAKOWSKI B, PIOTROWSKI P, et al. Assessment with mechanical barkhausen effect of residual stress in grain oriented polycrystalline 3% Si-Fe sheet[J]. Magnetics, IEEE Transactions on, 2012, 48(4): 1405—1408.
- [2] 尹何迟, 颜焕元, 陈立功, 等. 磁巴克豪森效应在残余应力无损检测中的研究现状及发展方向[J]. 无损检测, 2008, 30(1): 34—36.
- [3] 秦锋英, 张建国, 王泓, 等. 高 Co-Ni 超高强度钢残余应力的巴克豪森信号表征[J]. 金属热处理, 2008(6): 77—79.
- [4] 朱克兵, 王泓, 张越. 巴克豪森信号与 300M 钢表层应力的响应特性[J]. 无损检测, 2006, 28(5): 252—255.
- [5] STEFANITA C G, CLAPHAM L, ATHERTON D L. Subtle changes in magnetic Barkhausen noise before the macroscopic elastic limit[J]. Journal of Materials Science, 2000, 35(11): 2675—2681.

和试验研究,提出了一种钎焊型铜铝过渡线夹结合面的超声波检测技术,此方法可以有效地检测计算线夹钎焊结合面的粘合率,并以此判断产品是否合格。经试验及现场检测证实,该技术检测结果准确可靠,检测效率较高,适用于现场检测,可以在以后的电网金属监督工作中得以推广应用。

#### 参考文献:

- [1] 常谦, 张亮亮, 潘希德, 等. JTUIS-IV 型钎焊电触头超声检测系统[J]. 无损检测, 2008, 30(9): 646—648.
- [2] 王传杰, 曹宗杰, 王裕文. 电触头钎焊质量超声成像无损检测研究与评价[J]. 低压电器, 2006(10): 51—53.
- [3] 闫飞, 徐道荣. 铜铝异种金属钎焊问题及其对策[J]. 电焊机, 2009, 39(7): 62—65.
- [4] 单洪彬, 李明, 陈怀东, 等. 国外超声检测仿真软件的研究进展[J]. 无损检测, 2008, 30(7): 446—450.