

高强度钢手工焊接后过程的 声发射实时监测研究

张 炜 冷建兴 张 伟

(中国船舶科学研究中心 无锡 214082)

2003年1月15日收到

摘要 本文针对实际工艺中使用的高强度钢,重点对手工焊接的冷却过程利用声发射技术进行实时监测。本次试验是和先前在不同型号的钢板在手工焊接过程中所产生的声发射信号进行比较的基础上进行的,主要目的是寻找高强度钢在手工焊接的冷却中所产生的活性裂纹在冷却阶段的声信号特征。

关键词 声发射, 焊接, 冷却期间, 裂纹, 高强度钢

Study on monitoring cracks produced in manual welding of high-strength steel by acoustic emission in the post-process

ZHANG Wei LENG Jiang-Xing ZHANG Wei

(China Ship Scientific Research Center, Wuxi 214082)

Abstract This paper is engaged in research about monitoring cracks produced during manual welding of high-strength steel by AE (acoustic emission) method. The research is based on the previous study on monitoring cracks produced in manual welding of different type steels by AE method. In order to find out the characters of the AE signals generated in high-strength steel, especially the cooling period of the manual welding was monitored by AE method. The analysis of the test data shows that it is possible to use the AE method to monitor the cooling period of high-strength steel. The place where continuous signals are located by the AE system should be rechecked by conventional non-destructive methods.

Key words Acoustic emission, Weld, Cooling period, Crack, High-strength steel

1 引言

材料受外力或内力作用会产生变形或断裂,并以弹性波形式释放出应变能,此现象称为声发射(Acoustic Emission,简称AE)。用仪

器检测、记录、分析声发射信号并利用声发射信号推断声发射源的方法就是声发射技术。利用声发射技术监视焊接质量是其重要应用之一。焊接过程中的电弧燃烧、药皮熔滴和金属材料的受力变形、相变、结晶凝固、位错运动以及

裂纹的产生与扩展等事件都伴随着能量释放,均会在焊件中产生声发射信号^[1,2],因此可以通过分析检测到的声发射信号的特征来监测焊接质量。国内外有不少关于焊接时利用声发射进行监测的方法。但是大多数研究是关于自动焊接时的监测方法^[3,4],缺少对手工焊接过程进行声发射实时监测的观察。针对国内焊接工艺的特定需要,本文对声发射技术在手工焊接过程中的实时监测应用进行了一系列研究。

手工焊接过程中会产生热裂纹,随着焊缝温度的下降,存在于焊缝区域的这些裂纹会继续扩展,并产生声发射信号。在本文所进行的试验研究之前,曾经对三种不同型号的钢板(低碳钢、中碳钢、低合金高强度钢)在手工焊接过程中产生的不同特征声发射信号进行过比较,分析了不同型号钢板在焊接过程中产生活性裂纹的声发射信号的特点。在之前的研究中,焊接过程中裂纹信号与其他焊接时的背景(电弧燃烧、药皮熔滴、焊渣断裂、冷却过程塑性变形等)声发射信号发生的时间段和频率段彼此交错重合,我们目前还没有找到有效的分析处理方法将它们一一区分开来。但是对三种钢板焊后冷却过程中的声发射信号进行分析比较时,发现高强度钢在焊后冷却过程中产生的声发射背景噪声信号(由于发生位错、晶格滑移、塑性变形而产生无序声发射信号)较少,并且在有裂纹出现的情况下,冷却过程中在裂纹位置处出现的声发射信号量明显增多。根据这一发现推断出在焊接过程中产生的热裂纹在焊后冷却的过程中会继续扩展并且发出持续的声发射信号。因此得到以下结论:利用声发射检测系统对低合金高强度钢手工焊接后的冷却过程进行监测,就有可能利用冷却过程中是否有持续的声发射信号来判断焊接过程中及焊后是否有裂纹产生乃至扩展。

本次试验的目的就是在上述试验结果的基础上,重点对高强度钢手工焊接的冷却过程进行声发射实时监测,寻找出现裂纹时声发射信号的特点。同时为了能将试验结果用于实际产

品的焊接工艺过程,本次试验是在与实际产品相同的高强度钢制成的大尺度结构模型上进行的。在试验中,将标准工艺下的声发射监测结果作为声发射信号分析的参照标准,对焊接过程中产生裂纹时采集到的声发射信号进行了分析,以寻找冷却过程中活性裂纹的声发射信号的特点。

2 试验及结果分析

2.1 本文主要工作

利用俄罗斯克雷洛夫研究院(Krylov Shipbuilding Research Institute)研制的MAES声发射检测系统,对不同工艺条件下的手工焊接过程进行实时监测。声发射传感器的型号为AEW,工作频率范围为0.1MHz~1MHz,系统增益为60dB。试验研究对象为带环向加强的圆管形钢结构焊接模型,直径5.9m,模型材料为高强度钢,板厚50mm。重点研究的焊缝长度为2280mm,采用带药皮手工焊接,焊接坡口型式为单U坡口。

整个焊接过程分为三个部分:焊接过程、焊接后保温过程和焊接后冷却过程。本次试验重点监测焊后保温阶段以及保温结束之后冷却过程的声发射信号特性。试验中,首先按照标准工艺过程对焊缝进行手工焊接,重点监测焊缝的焊后保温以及焊后冷却时段,记录试验时检测到的声发射信号作为分析活性裂纹声发射信号的参照标准。第二步对产生裂纹的手工焊接过程中焊缝区域产生的声发射信号进行监测,试验结束后,通过常规探伤方法(X射线、超声波探伤方法)对试验焊缝质量进行检验,记录出现裂纹的大小、位置,并与相应位置处产生的声发射信号情况进行对比,以寻找冷却过程中活性裂纹的声发射信号的特点。由于目前还无法确定信号和声源之间的一一对应关系,所以本次试验的主要目的是分析手工焊接冷却过程中声发射信号集合的总体特征。

2.2 门槛值的选定

为更接近实际工艺情况, 试验场地设在产品生产车间。试验前先对试验场地的环境噪声进行测量, 得到试验场地背景噪声低于 60dB, 为此, 试验时取有效声信号门槛值为 60dB。在冷却过程中采集到的大于 60dB 的声发射信号被认定为非环境噪声的有效声信号。

2.3 声速标定及信号衰减特性测量

声发射信号在不同型号的钢板中传播的速度会有所不同, 并且钢板的厚度、不同的耦合剂会影响声发射信号的衰减, 因此, 为了提高声发射系统对声发射源的定位精度, 试验中需要根据所使用的钢板调整测试系统的部分参数, 如实际声速, 以及由于声信号的衰减确定的传感器之间的最小距离等。因此, 利用 ASTM E976-84 标准所规定的铅笔芯断裂法以 $\phi 0.5\text{mm}2\text{H}$ 铅芯折断信号作为声发射信号源对传感器的响应及定位进行标定。

使用两只声发射传感器进行标定, 以铅笔芯折断为模拟信号源, 根据同一声发射信号到达两只传感器的时间差和两只传感器之间的距离, 测量并计算得到在特定的耦合剂条件下高强度钢板中的声信号传播速度为 $3.23 \times 10^3\text{m/s}$ 。

同样以铅笔芯折断为模拟信号源, 使用一只声发射传感器进行衰减测量, 测得的声发射信号的幅度随声发射信号源与传感器距离的增加而下降, 结果为 11.2dB/m 。

2.4 试验数据分析

(1) 标准工艺 (线性定位法)

焊接前预热, 焊后 200°C 保温 3 个小时, 焊接坡口型式为单 U 坡口, 如图 1 所示。试验过程分为焊接、焊接后保温以及焊后冷却三个阶段进行, 试验结束后, 使用常规超声波探伤方法对试验焊缝质量进行检验, 与试验时记录的声发射信号进行对比。声发射信号的定位采用线性定位法, 传感器布置如图 2 所示, 焊缝长度 2280mm, 传感器间距 1000mm, 焊缝纵向与传感器列轴线平行, 间距 450mm。

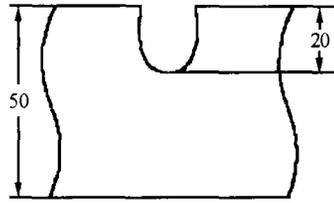


图 1 坡口型式 (单位: mm)

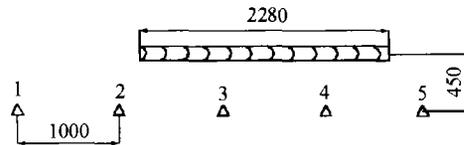


图 2 传感器布置图 (单位: mm)

注: 图中 $\Delta 1, \Delta 2, \Delta 3, \Delta 4, \Delta 5$ 表示五只传感器的位置

焊接后保温时开始采集数据, 标准工艺 (线性定位法) 焊后保温期间以及焊后冷却过程中的声发射信号定位结果如图 3 所示: 图中的时间段: $0 \sim 10800\text{s}$ 为后热保温过程; $10800\text{s} \sim 60000\text{s}$ 为冷却过程。

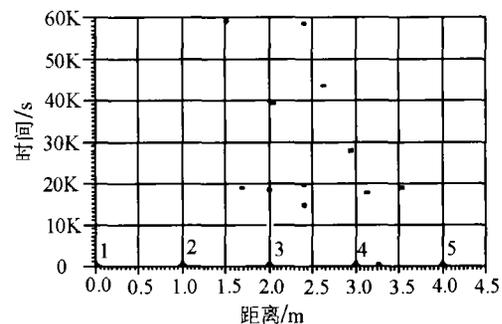


图 3 标准工艺焊后保温期间及焊后冷却过程 (线性定位法)

在本文的声发射信号定位图 3 及后面的图 4, 图 6 中, 横坐标轴与焊缝所在的直线平行, 坐标 $X(\text{m})$ 表示焊缝位置在坐标轴上的投影, $\Delta 1, \Delta 2, \Delta 3, \Delta 4, \Delta 5$ 表示传感器在坐标轴上的投影 (单位: m); 纵坐标表示焊后保温期间或冷却期间, $1\text{k}=1000$, 图中的点表示在相应

的时间和位置检测到的声发射信号。

超声波检查结果：没有发现裂纹。

从标准工艺焊后的保温过程和焊后冷却过程来看，在保温过程中没有检测到声发射信号，而在随后的冷却过程中，检测到少量无序的声发射信号(如图3所示)。参考刘学文、袁祖贻^[5]等关于焊接结构疲劳损伤的实时监测的试验结果，即材料从初始弹塑性变形阶段到微裂纹的形成和扩展阶段，直至宏观裂纹的形成及扩展阶段中，非金属夹杂物的断裂、焊渣的脱落、微裂纹和缺陷局部区域的位错、晶格滑移、塑性变形以及宏观裂纹的形成和扩展等事件均会产生不同频率、不同幅值的声发射信号，可以推断，无裂纹情况下焊接区域及热影响区域的材料在冷却过程中会由于发生位错、晶格滑移、塑性变形等事件而产生无序的声发射信号，而在焊后的保温过程中，由于温度较恒定，因位错、晶格滑移、塑性变形等事件产生的声发射较少，释放的能量也相对较低，因此在焊后的保温过程中，没有接收到超过门槛的声发射信号，这一结论与之前对不同型号钢板手工焊接冷却过程进行的声发射实时监测研究结果相符(即对于正常焊接冷却过程，会由于发生位错、晶格滑移、塑性变形等事件而产生无序的声发射信号，并且对于高强度钢而言，由于上述原因导致的声发射信号较少)。因此，该结果可以作为分析活性裂纹声发射信号的参照标准。

(2) 无预热、无焊后保温过程(非标准工艺、出现较多细小裂纹、使用线性定位法)

焊接前不预热，焊接后不保温，焊接坡口型式为单U坡口，如图1所示。在焊后冷却时段记录试验时检测到的声发射信号并存储为数据文件以供分析。试验结束后，使用常规超声波探伤方法对试验焊缝质量进行检验，以进行对比。声发射信号的定位仍采用线性定位法，传感器布置也如图2所示。

焊接后的冷却过程开始采集数据，非标准工艺(线性定位法)的焊后冷却过程声发射信

号定位结果如图4所示。图中的时间段：0~60000s，为冷却过程。

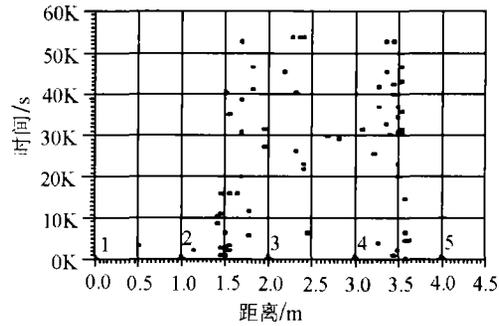


图4 非标准工艺焊接冷却过程(线性定位法)

超声波检查结果如下表，裂纹位置指距离5#传感器的距离：mm。

裂纹位置	450	510	720	790	940
裂纹长度	38	36	38	36	45
裂纹位置	1410	1620	1760	1840	1990
裂纹长度	38	38	36	38	40
裂纹位置	2370	2480	2600	/	/
裂纹长度	38	39	39	/	/

在进行高强度钢制成的大尺度工艺结构模型上的手工焊接声发射实时监测试验前，我们在其他三种型号的钢板(低碳钢、中碳钢、低合金高强度钢)上进行过一系列的声发射焊接过程实时监测试验，得到关于焊接过程声发射信号特征的初步结论：无缺陷的焊缝冷却过程中，对于不同型号的钢板，在冷却过程初期出现的随机声发射信号事件数各不相同，这可能是由于不同材料冷却过程中位错、晶格滑移、塑性变形的情况各不相同。相比之下，低合金高强度钢在该时段产生的声发射信号最少。比较低合金高强度钢在有裂纹与无缺陷(即(1)标准工艺(线性定位法)下获得的试验结果)的不同情况下的冷却过程，可以推断，在焊接过程中产生的热裂纹在焊后冷却的过程中会继续扩展并且发出持续的声发射信号。因此得出结论：利用声发射技术对高强度钢的手工焊接后

的冷却过程进行监测是有益的。

裂纹的形成和扩展与材料的塑性变形有关,一旦裂纹形成,材料局部地区的应力集中得到卸载,产生声发射信号。材料的断裂过程大体上可分为三个阶段:(1)裂纹成核,(2)裂纹扩展,(3)最终断裂。这三个阶段都可以成为强烈的声发射源。在微观裂纹扩展成为宏观裂纹之前需要经过裂纹的慢扩展阶段。理论计算表明,裂纹扩展所需要的能量比裂纹形成需要的能量约大 100 倍到 1000 倍^[6]。裂纹扩展是间断进行的,大多数金属都具有一定的塑性,裂纹向前扩展,将积蓄的能量释放出来,即在裂纹尖端区域卸载。这样,裂纹扩展产生的声发射信号很可能比裂纹形成的声发射信号还大得多。当裂纹扩展到接近临界裂纹长度时,就开始失稳扩展,成为快速断裂。这时产生的声发射信号强度更大^[6]。分析本试验中的声发射信号记录与超声波检查结果,可以得出,在常规检测时发现大量较短裂纹的位置处检测到持续的声发射信号。经过与标准工艺情况下的声发射信号检测结果的比较,在冷却过程中检测到的声发射信号,除了少量是无序的声发射信号外,我们认为图中出现的大量相对较为集中的声发射信号是活性裂纹信号。

(3) 无预热、无焊后保温过程(非标准工艺、出现两条较长裂纹、使用平面定位法)

为得到较长的裂纹,将焊接坡口刨至 40mm 深,焊接前不预热,焊接后不保温。同时将 #2, #4 传感器移至焊缝的另一侧,传感器布置如图 5 所示,这样采用平面定位法。试验结束后,使用常规 X 射线检测方法对试验焊缝质量进行检验。

焊接后的冷却过程开始采集数据,非标准工艺(平面定位法)的焊后冷却过程声发射信号定位结果如图 6 所示。图中的时间段:0~50000s,为冷却过程。

X 射线检查结果:由 #2 传感器往右,1250mm~1410mm 段有一条纵向长裂纹;由 #2 传感器往右,1680mm~1740mm 段有密集

小裂纹。

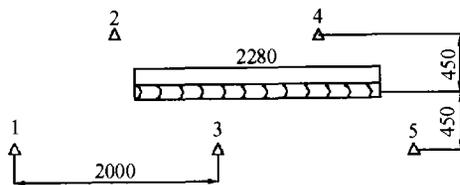


图 5 传感器布置图 (mm)

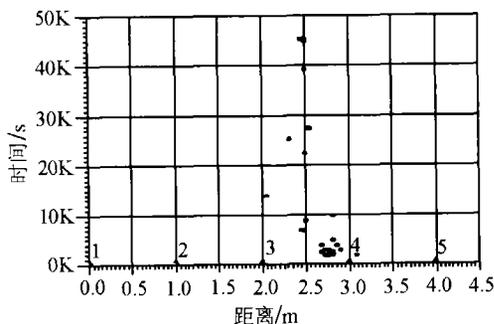


图 6 非标准工艺焊接冷却过程(平面定位法)

比较(2)、(3)两次出现裂纹时的声发射信号检测结果,可以发现,在常规检测时发现大量较短裂纹的位置处有持续的声发射信号(如图 4),但是,这时裂纹的长短与声发射信号的密集程度没有明显的对应关系,例如出现大量短裂纹处检测到较多的声发射信号,而在使用常规检测方法发现较长裂纹的位置仅检测到少量声发射信号(如图 6 所示)。这一现象表明,裂纹的大小与声发射信号的密集程度不相关,同时试验测量结果表明,产生较长裂纹时,在相应位置采集的声发射信号数量并不多,因此在实际检测过程中,不仅应对有持续声发射信号产生的部位建议使用传统无损检测方法复查,而且对于仅有少量声发射信号产生的部位也应关注。

3 试验结论

经过对试验中所得数据的比较与分析,可

以得到以下结论:

(1) 声发射信号强度与裂纹尺寸之间不相关, 仅与单个声发射信号源有关, 在试验中比较大、小尺寸裂纹的声发射信号时, 没有发现两种情况下的声发射信号强度有明显差异。

(2) 声发射无损检测方法可应用于高强度钢手工焊接冷却过程中冷裂纹的监测, 可以对产生声发射信号特别是产生持续声发射信号的部位建议使用常规无损检测方法进行复查。

参 考 文 献

- 1 蒋鹏飞, Wood J. 镇江船舶学院学报, 1991, 5(1): 6~9.
- 2 Kroos J, Gratzke U. *Appl. Phys.*, 1993, 26(6):481.
- 3 蒋鹏飞, Wood J. 电焊机, 1994, (2):4~8.
- 4 Duley W W, Mao Y L. *Appl. Phys.*, 1992, 27(83):1397.
- 5 刘学文等. 北方交通大学学报, 1996, 20(4):399~403.
- 6 彭振明, 马羽宽, 何泽云. 声发射技术及其应用. 北京: 机械工业出版社, 1990. 9~17.

俄罗斯国际无损检测讨论会和展览会见闻

应俄罗斯无损检测学会和欧洲无损检测联合会的邀请, 中国无损检测学会代表团于 2004 年 3 月 15 日起至 24 日访问了俄罗斯。在俄罗斯期间, 参加了俄罗斯无损检测学会主办的国际无损检测讨论会, 参观了同时举办的仪器展览会。在这里举行的欧洲无损检测联合会理事会上, 中国无损检测学会被接纳为欧洲无损检测联合会联席会员 (Associate member)。

在这里举办的讨论会和展览会部分显示出了前苏联在无损检测方面的高水平。除了无损检测之外, 技术诊断、环保和反恐也是重要内容。这里, 作者仅就个人见闻, 就有关声学的部分作一点介绍。

俄罗斯在电磁声方面具有世界先进水平。这里电磁声已成功地应用在工业规模的自动检测中。在板材(中、厚板)、大口径焊接管检测中应用非常成功。特别是在声波斜入射检测中, 解决了换能效率、抗干扰和可靠性问题。在电磁声测厚方面也颇具特色。报告

了一种电磁声测厚仪其换能器尺寸仅 $\phi 12 \times 15$, 测量范围 0.5~50mm, 精度 0.05mm, 可用于曲率半径达 10mm 条件下。

在钢筋混凝土检测方面, 作者看到了一种可进行脉冲反射式探伤、具有 24 阵元换能器的超声探伤仪。作者尚未见到其它国家有这样的脉冲反射式仪器。10 年前作者曾见到它的前身, 现在它变得更小巧、更强大, 说明它的应用效果不错。

在导波应用方面, 会议上有多篇论文。在长、大检测对象方面, 如铁道、油气管道, 它的应用前景光明。

声发射应用也有多篇论文提及。声发射在油气管道监测方面的应用应当引起重视。有论文提到, 可间隔 100M 布置声发射换能器以检测油气管道泄漏。

其它如声和超声泄漏检测、振动诊断专家系统、超声张量检测张力连接等, 都有一些很好的工作。

(中国科学院声学研究所 郭成彬)