

# 水下湿法药芯焊丝焊接气泡动态演变与其声脉冲分析

李志刚<sup>1</sup>, 祝林<sup>1</sup>, 黄卫<sup>1</sup>, 徐翔<sup>1</sup>, 叶建雄<sup>2</sup>

(1. 华东交通大学, 载运工具与装备教育部重点实验室, 南昌, 330013; 2. 南昌工程学院, 南昌, 330099)

**摘要:** 水下湿法药芯焊丝焊接(FCAW)以操作适用性好等优点在海洋设施维修中占有重要地位, 焊接区域周围动态变化的气泡生长会影响焊接电弧的稳定性。文中通过搭建水下湿法焊接试验平台, 进行了湿法药芯焊丝焊接试验, 利用传感器对焊接过程中的电弧电流电压信号, 气泡声信号以及气泡高速图像进行了同步采集; 研究了气泡声信号与气泡高速图像的对照关系, 并对气泡声信号与电弧电流电压信号进行同步分析, 获得了不同电弧燃烧状态下的气泡演变行为, 以气泡声信号的变化来反映气泡演变对水下湿法焊接电弧燃烧的稳定状态的影响。结果表明, 气泡声信号可以清晰地反映焊接电弧燃烧的各种状态, 能对不同气泡演变模式进行分类, 并可从中分析其与电弧燃烧特性的对应关系。

**创新点:** (1) 同步聚集了水下焊接中电弧电流电压信号、气泡声信号以及气泡高速图像, 研究了三者之间的对照关系。

(2) 通过不同电弧燃烧状态下的气泡演变行为, 分析了焊接条件改变情况下, 用气泡声信号反映气泡演变状态的可行性。

**关键词:** 水下湿法焊接; 气泡声信号; 电弧特性; 同步采集

**中图分类号:** TG 456.5      **文献标识码:** A      **doi:** 10.12073/j.hjxb.20200517001

## 0 序言

海洋活动如海上能源开发项目、船舶建造和海底管道和桥梁建造, 包含大量钢结构的施工。这些钢结构建造和维护及其安全可靠性与水下焊接技术密切相关。从军事角度来说, 对船舶的紧急维修也具有重要的应用价值<sup>[1]</sup>。其中水下湿法焊接以其操作性好、低成本、适用性强等优点受到广泛关注和运用, 但由于没有排开的环境, 焊接过程中, 水的压缩和冷却作用会导致电弧燃烧不稳定, 较快的冷却速度和高的氢含量会降低焊接金属的力学性能<sup>[2]</sup>。

水下湿法焊接过程中, 电弧燃烧、熔滴过渡和高温熔池行为是在气泡中进行的, 因此电弧气泡的稳定存在是水下湿法焊接的关键<sup>[3]</sup>。国内外越来越多的学者致力于研究水下湿焊过程中气泡的动态演变与焊接电弧性能之间的关系。文献[4]中提到湿法焊接的热损失主要是由于熔池附近的气泡搅动作用增加了熔池表面与水环境之间的热传递。文

献[5]分析了电弧气泡对熔滴过渡和飞溅的影响, 发现电弧气泡会产生阻力阻碍熔滴过渡。文献[6]研究了电弧气泡对电弧焊接稳定性的影响, 发现电弧气泡的动态行为会对电流和电压波形产生影响。文献[7]认为研究熔滴过渡和电弧行为与气泡生长的相互作用机制对于水下气泡焊接技术的发展非常重要。文献[8]使用高速相机方法结合相应的焊接电流和电弧电压波形分析了各种气泡的产生方式, 研究了气泡产生方式对焊缝外观的影响, 发现在水下湿法药芯焊接过程中, 焊接参数显著影响电弧气泡的动态行为。

从上述文献可以看出, 目前国内外研究人员主要采用了高速摄像机对水下湿法焊接中的气泡动态演变过程进行试验分析, 这种试验手段的不足在于不易对焊接过程中气泡演变与电弧特性之间的实时相关性进行判断。因此, 文中开展了水下湿法焊接试验, 结合气泡声信号对水下电弧燃烧阶段中焊接电弧特性与气泡演变的相关性进行了分析。

## 1 试验过程及参数设定

水下湿法焊接试验系统如图1所示, 整体分为

焊接系统及信号采集系统。水下焊接电流一般为200~300 A,试验选用的是Panasonic的YD-500KR焊机,最大焊接电压是60 V,最大焊接电流是500 A。焊丝选用的是直径1.2 mm的CHT71T-GS自保护药芯焊丝。采用的母材为Q235低碳钢板。

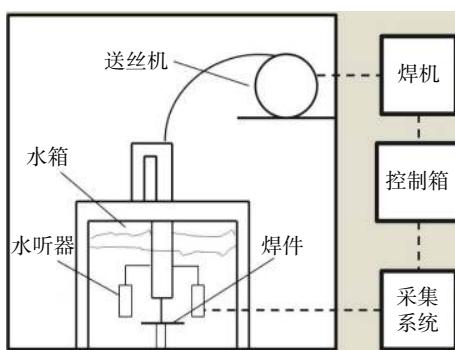


图1 水下湿法焊接试验系统  
Fig. 1 Underwater wet welding test system

试验在没有特殊说明下,所采用的都是标准的焊接电参数,即焊接速度6 mm/s,送丝速度90 mm/s;其中常压(0.3 m水深)水下湿法焊接电压为32 V,焊接电流为280 A。

试验使用的DYW-35-G型柱形水声换能器为压电型,把声波信号或能量转换成电信号进行分析。测量最大量程(灵敏度)为500 m,频率为35 kHz±1.75 kHz。防护等级为IP68。为了保证测得试验参数的可靠性,在焊枪头两侧对称放置两个水听器,焊枪头及水听器完全浸没在水中避免不同方向上的气泡声脉冲差异,保证测得数据的可靠性。将水听器和焊接枪头固定在一起平行放置,如图2所示。保持与气泡爆破处固定的距离参数,避免在焊接时水听器对电弧的燃烧产生影响及保证在进行对比试验的准确性。

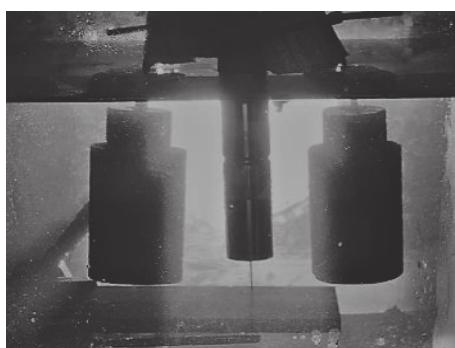


图2 水听器示意图  
Fig. 2 Schematic diagram of hydrophone

利用高速图像记录处理系统采集水下湿法焊接的图像,通过Phision系列的ViMVI-D312-160-

CL 130万像素的高速摄像机、SILICON SOFTWARE的microEnable IV-ASPoCL图像采集卡和大功率镝灯背景光相互配套形成图像采集系统,高速图像记录处理系统如图3所示。由此组建的气泡图像及声信号的同步采集系统,可以对焊接过程中的气泡图像及其声信号进行对比分析。



图3 高速图像采集系统图  
Fig. 3 High-speed image acquisition system diagram

## 2 气泡演变与其声信号的同步分析

焊接过程中的气泡演变可以分为3个阶段:起弧气泡生长阶段、气泡不稳定生长阶段、气泡稳定生长阶段,这种动态的气泡生长过程就会造成气泡脉冲声信号的变化。通过对比同一阶段下的气泡声信号与气泡高速摄像,分析两者之间的同步性,来判断水下湿法焊接在不同焊接状态下动态生长的气泡在其声信号上的反映。

### 2.1 起弧气泡生长阶段

在此阶段开始时,药芯焊丝直接暴露在水环境中。一旦焊丝与母材接触,焊接电流立即产生大量电阻热,焊接区域产生足够高温,使得周围水汽化和离子化形成气泡,焊丝熔化分解也产生气体。由此形成的焊接区域周围气泡将电弧与周围的水隔离,保护电弧的起弧燃烧。这个阶段电弧是非常不稳定的,可以结合此阶段拍摄的气泡图像与气泡声信号进行分析,如图4所示,图中圆圈是背景镝灯光。

一旦焊丝接触母材,焊接电流迅速增大加剧了药芯的分解。从图4可以看出气泡的体积急剧增长。而从声信号的整体变化也可以明显看出气泡脉冲声压是呈上升趋势的。在时间点a时,从拍摄图像可以看出焊丝接触母材,电弧开始燃烧,气泡随之产生,同时气泡声信号也开始出现。从时间点b~d的图像可以看到气泡在迭代生长,产生的气泡开始从母材表面脱离,随后产生新的气泡,期间气泡越来越大;同样从声信号时间点b~d可以看到,声

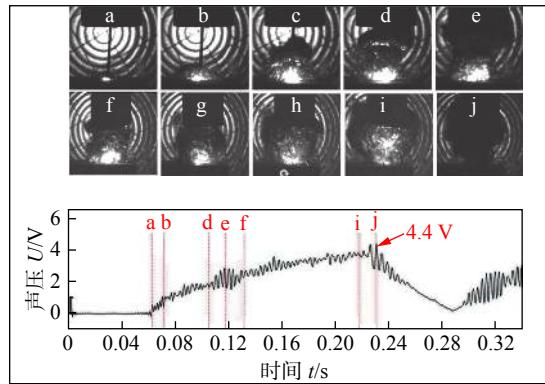


图 4 起弧气泡生长阶段的图像及其声信号

Fig. 4 Image and sound signal of the arcing bubble growth stage

压信号在逐步上升。到达时间点 e 时, 上浮的气泡发生破裂, 由于气泡破裂会在水中产生较大的脉冲, 此时可以在声信号的时间点 e 观察到一次“振铃”信号, 这与拍摄的气泡图像相对应的。

之后气泡爆破并没有导致整体声压的下降, 这是因为在其后生长的新气泡在保证电弧燃烧的同时自身也在不断生长, 时间点 f~i 期间气泡迅速变大, 同时声压信号也是逐渐升高。直至时间点 f 时气泡发生破裂, 产生“振铃”信号, 且没有新的过渡气泡产生。此时电弧没有了气泡的保护熄灭了, 同时声压信号也迅速下降到 0 V。至此一个引弧阶段结束, 可以发现从电弧开始燃烧产生气泡, 到最后气泡破裂, 拍摄的气泡图像与气泡脉冲产生的声信号都存在着很好的对应关系。

## 2.2 气泡不稳定生长阶段

在起弧阶段电弧燃烧起来后, 由于水下湿法焊接的特殊特征, 焊接电弧燃烧和熔滴过渡过程以及焊池行为都是在焊接区域周围的动态演变的气泡中进行。气泡的扰动是影响焊接电弧和熔滴过渡稳定性的重要因素。上述这些问题都是与气泡动态演变密切相关, 会反过来影响气泡的生长过程。于是在起弧阶段电弧燃烧后, 由于上述原因, 会出现不稳定燃烧阶段, 在这个阶段下电弧的燃烧有时还是会出现断弧现象。在起弧灭弧后 0.3 s 左右电弧再次点燃, 如图 5 中 a 点所示, 从气泡拍摄图像可以看出相比起弧阶段, 此阶段气泡的生长明显稳定很多, 气泡呈现出了稳定的动态演变过程。如图 f 所示在上一个气泡脱离板材时, 下一个新的气泡迭代产生, 在这种气泡生长脱离再生长的过程中, 电弧会在气泡中持续稳定燃烧。

从图 5 的气泡生长过程可以发现, 该阶段气泡

生长相比引弧更稳定, 从声信号中也可以发现在时间点 a 后的气泡生长阶段, 声压变化相比起引弧变化更加剧烈。根据 Wang 等人<sup>[9]</sup>的研究, 在起弧阶段较多的电弧热量传递到了周围的水环境中。这就使得焊接区域的温度骤降, 气体的电离受到限制并最终限制了电弧的稳定燃烧。而在该阶段下由于水的温度上升, 以及熔滴过渡上的变化, 使得电弧更加容易燃烧, 促进了气泡的稳定生长。

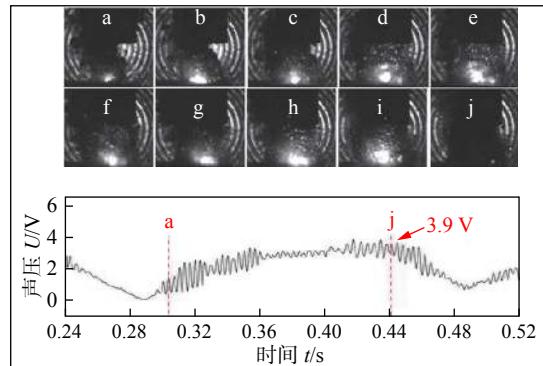


图 5 气泡不稳定生长段的图像及其声信号

Fig. 5 Image and acoustic signal of the unstable growth segment of a bubble

由于水下环境的复杂性, 第 2 次引弧在时间点 j 时同样也发生了断弧, 此时气泡图像显示气泡破裂, 声信号中也显示声压在时间点 j 后迅速下降。通过观察声信号发现在不稳定阶段虽然同样发生了气泡破裂导致灭弧的现象, 但是声压整体信号相比较起弧阶段明显趋于平稳, 可以判断这是因为气泡生长更加趋向稳定, 表现出了气泡的迭代生长, 而不是如引弧阶段出现单个气泡的剧烈生长。

从 2 次引弧的断弧时间点 j 的对比可以发现, 起弧阶段断弧时的气泡大于不稳定阶段, 如图 4 和图 5 标注所示, 第 1 次爆破产生的声压信号为 4.4 V, 第 2 次爆破产生的声压信号为 3.9 V, 这符合气泡图像的对比, 说明了气泡声信号与气泡图像动态变化的对应性。

## 2.3 气泡稳定生长阶段

电弧稳定燃烧阶段下, 气泡的生长过程不再会产生爆破导致灭弧的现象。根据文献 [10] 的研究, 较大的稳定气泡可以有效地改善电弧稳定性和焊缝形成。Guo 等人<sup>[11]</sup>进一步得出结论, 气泡提供的保护作用随着气泡尺寸的增加而增加。所以气泡需要足够的气体生长到一定的尺寸才能保护电弧持续燃烧。Wang 等人<sup>[9]</sup>的研究也表明气泡在典型的动态演变状态下电弧最为稳定。这种演变模式下,

电弧在2个气泡的组合作用下可以实现更好的保护,如图6所示,在时间点a时,第一个气泡已生成并保护电弧燃烧,到时间点b时,第一个气泡上浮,同时生成第2个气泡继续保护电弧燃烧。

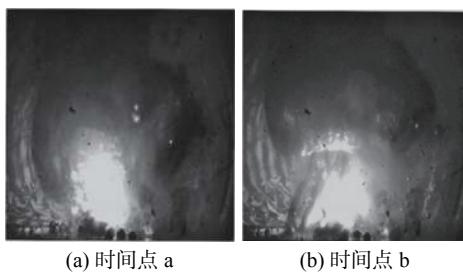


图6 2个气泡迭代生长组合保护下的电弧燃烧

Fig. 6 Two bubbles grow iteratively in combination under the protection of arc combustion. (a) time a; (b) time b

由于先生长的气泡继续在水上浮,新形成的气泡能够完全覆盖电弧燃烧区域,所以焊接电弧仍然可以保持稳定燃烧。在这种气泡生长上浮再生长的状态下,由于气泡演变的冲击性小,气泡会平稳地浮动并且不会观察到灭弧。焊接电流和电弧电压波形及气泡声信号波形都稳定波动,如图7所示,反映了该演变过程中良好的电弧稳定性。

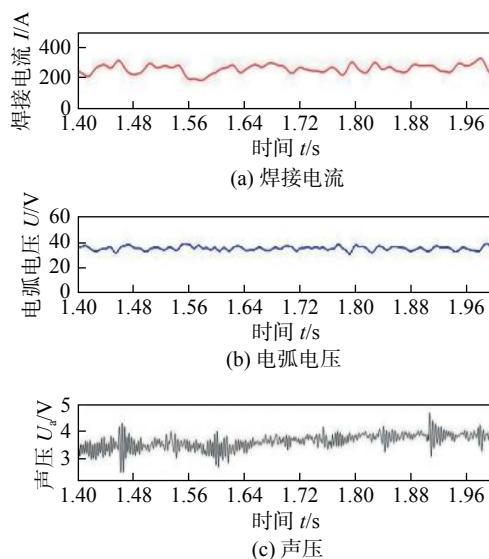


图7 气泡稳定生长阶段的电弧电信号及气泡声信号

Fig. 7 Electric arc signal and the sound signal of the bubble in the stable growth stage. (a) welding current; (b) arc voltage; (c) sound pressure

在这种气泡生长上浮再生长的状态下,气泡会平稳地浮动不会观察到灭弧,如图8所示,反映了该演变过程中良好的电弧稳定性。在时间点a~j都没有发生灭弧,此时电弧的生长过程处于一种动态平衡下,不断地有新气泡接替上浮的旧气泡保

护电弧燃烧。在时间点a时,上浮的旧气泡已经破裂,从时间点a~e可以看出此时气泡1在向上浮动,且在时间点b时候新的气泡2产生,随后随着气泡1的浮动一起向上生长但是并没有脱离母材,最后在时间点e的时候气泡1破裂,此时气泡2依然没脱离母材。

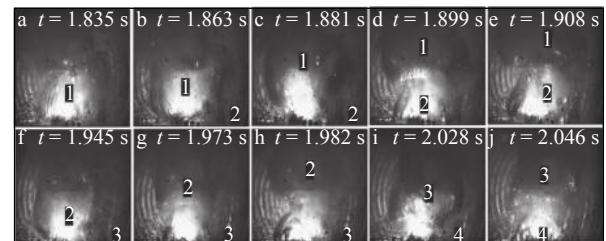


图8 气泡稳定生长阶段的图像

Fig. 8 Image of the stable stage of bubble growth

在时间点f可以看到,气泡2脱离母材的同时气泡3生长出现,重复上述气泡生长到上浮破裂再生长的过程,直到时间点j所示气泡3破裂,气泡4继续生长。气泡爆破时间分别为时间点a, e, h, j。气泡演变情况与Wang等人<sup>[9]</sup>的高速图像拍摄得到研究结果是一致的。

通过上述分析,可以确定,在稳定燃烧阶段气泡的动态演变中,气泡的生长破裂是周期迭代性的,且在这种演变状态下,气泡的声压信号也是处于整体平稳波动状态下的,如图9所示。

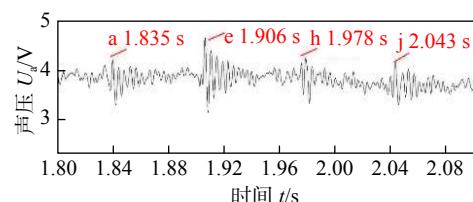


图9 气泡稳定生长阶段的气泡声压信号

Fig. 9 Bubble sound pressure signal in the stable growth stage of the bubble

与气泡拍摄图像对比发现,在气泡爆破时间点a, e, h, j,气泡声信号也出现了“振铃”信号;计算每次气泡爆破之间的间隔周期,在气泡图像中各个爆破时间的间隔时间分别是73, 74, 64 ms,平均间隔时间为70.3 ms。在气泡声信号中,各个爆破时间的间隔时间分别是71, 71, 65 ms,平均间隔时间为69 ms。可以看出,经过图像判断和声信号判断得到的气泡爆破间隔时间基本是一致的。

图10为气泡稳定生长阶段的气泡大小对比,可见,气泡在爆破点e破裂的气泡1的大小明显比

在爆破点 h, j 破裂的气泡 2、气泡 3 大很多, 而这同样在图 9 中气泡声信号中有很好的反映, 爆破点 e 时的声压信号同样明显高于爆破点 h, j。由此可以判断, 在电弧燃烧稳定阶段, 气泡的周期迭代生长的动态演变方式, 可以在气泡声信号中有很好的体现。

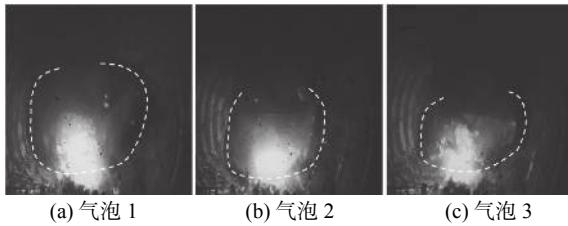


图 10 气泡稳定生长阶段的气泡大小对比

Fig. 10 Comparison of bubble size at the stage of stable bubble growth. (a) bubble 1; (b) bubble 2; (c) bubble 3

### 3 电弧电压对气泡演变形式的影响

在稳定燃烧阶段, 气泡的生长依然存在差异, 气泡的大小有时会出现明显变化。导致这种变化的因素很多, 如生成大气泡时的电弧燃烧更剧烈、气泡滞留母材的时间更长有更多的时间生长变大等。所以更大的电弧电压, 会使得电弧燃烧更加剧烈, 这肯定会使得气泡有更多的气体生长变大。在其它焊接参数不变的情况下, 气泡的最大直径也随着电弧电压的增加而增加。

由此在其它焊接参数不变的情况下, 通过将电压从 32 V 提高到 36 V 进行同等水环境下的焊接试验, 分析气泡在不稳定阶段和稳定阶段时的性质。在不稳定阶段中, 截取了一个气泡爆破的过程, 结果如图 11 所示。

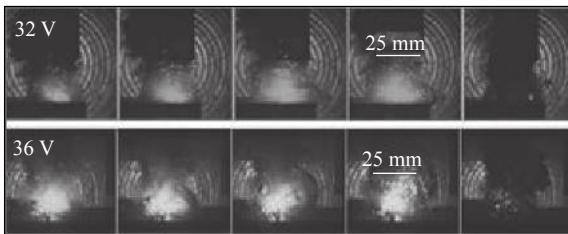


图 11 不同电弧电压下的不稳定阶段气泡破裂过程  
Fig. 11 Process of bubble bursting in the unstable stage at different arc voltages

对比 32 V 与 36 V 的气泡生长发现, 气泡的最大直径明显随着电弧电压的增加而增加。以图中 25 mm 的焊嘴口当作参考对象, 可以判断在 36 V

电弧电压下的爆破前的气泡明显大于 32 V 电压下的气泡大小, 而且这种气泡大小的差异是在焊接过程中普遍存在的。对相应的气泡声信号进行分析, 分别截取在 32 V 和 36 V 焊接电压下产生气泡爆破导致灭弧的阶段进行对比, 结果如图 12 所示。由图 12 可以看出在 32 V 电压下不稳定燃烧阶段, 气泡在破裂前声压信号趋向平稳, 没有呈现持续上升的趋势; 而在 36 V 电压下, 气泡声压信号明显处于持续上升状态, 最后气泡爆破导致灭弧; 且在气泡爆破时 36 V 电压下产生的声压信号明显高于 32 V 下的, 反映了此时气泡更大, 这与气泡图像的大小是一致的。

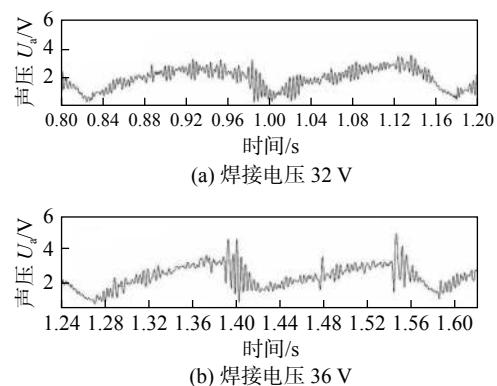


图 12 不同电弧电压下的不稳定阶段气泡声信号  
Fig. 12 Bubble acoustic signals at different arc voltages in unstable phases. (a) welding voltage 32 V; (b) welding voltage 36 V

由此分析得出, 在 36 V 电压下, 由于较大的气泡内维持的较大压力必然会给焊接电弧带来更大的冲击, 在气泡爆破的瞬间电弧难以抵抗这种大冲击, 导致灭弧。这种现象可以从声信号的整体变化趋势及爆破时产生的“振铃”信号中很好地反映出来。

在稳定燃烧阶段, 36 V 电压下同样会出现周期迭代的稳定状态。图 13 为 32 V 和 36 V 电压下气泡周期生长的图像, 可以明显看出在 36 V 电压下, 气泡爆破前的最大直径大于 32 V 电压下的直径, 这与前人研究是一致的。

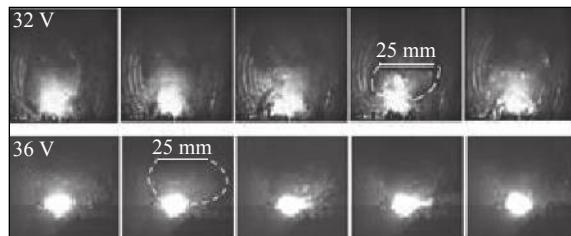


图 13 不同电弧电压下的稳定阶段气泡图像  
Fig. 13 Bubble image of steady stage at different arc voltages

同时也对比了该阶段不同电压下的气泡声信号,如图14所示。可以发现在36 V电压下的整体声压信号维持在4.5 V左右,32 V维持在4 V左右,反映了在更高电压下,电弧燃烧更剧烈,气泡有更充足的气体用于生长,通过观察爆破产生的“振铃”信号也可以发现,高电压下气泡爆破产生的声脉冲明显更加陡峭。

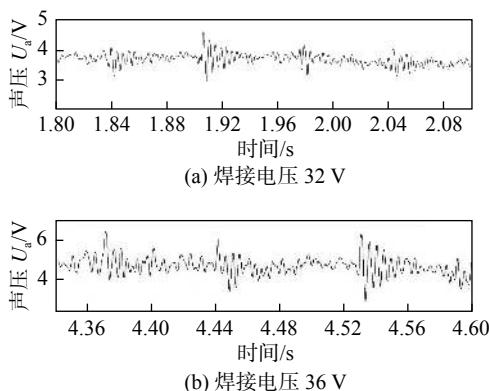


图14 不同电弧电压下的稳定阶段气泡声信号

Fig. 14 Bubble acoustic signals at different arc voltages at steady stages. (a) welding voltage 32 V; (b) welding voltage 36 V

## 4 结论

(1) 通过分析电弧燃烧不同阶段下的气泡动态演变图像及其声信号,发现气泡脉冲声信号可以准确反映不同阶段下的气泡演变情况,与气泡图像有着很好的对应关系。

(2) 验证了用气泡声信号的动态变化反映气泡演变状态的可行性。并且在改变焊接电压的情况下,声信号也能找到与气泡的对应变化关系,为研究水下复杂环境下的湿法焊接提供了一种新的思路。

## 参考文献

- [1] 韩凤起,李志尊,孙立明,等.水下湿法手工自蔓延焊接技术[J].  
焊接学报,2019,40(7): 149–155.  
Han Fengqi, Li Zhizun, Sun Liming, et al. Research on underwa-

ter wet manual SHS welding[J]. Transactions of the China Welding Institution, 2019, 40(7): 149–155.

- [2] Li H L, Liu D, Tang D Y, et al. Microstructure and mechanical properties of E36 steel joint welded by underwater wet welding[J]. China Welding, 2016, 25(1): 30–35.
- [3] Chen H, Guo N, Feng J C, et al. Investigation of arc bubble affecting the arc stability and improvement of weld appearances using bubble constraint device in underwater wet welding[J]. Materials Science Forum, 2019, 4901: 215–221.
- [4] 王建峰,孙清洁,张顺,等.基于电弧气泡调控的水下湿法焊接稳定性研究[J].机械工程学报,2018,54(14): 50–57.  
Wang Jianfeng, Sun Qingjie, Zhang Shun, et al. Investigation on underwater wet welding process stability based on the arc bubble control[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2018, 54(14): 50–57.
- [5] Yang Q Y, Han Y F, Jia C B, et al. Impeding effect of bubbles on metal transfer in underwater wet FCAW[J]. Journal of Manufacturing Processes, 2019, 45: 682–689.
- [6] Oliveira F R, Soares W R, Bracarense A Q. Study correlating the bubble phenomenon and electrical signals in underwater wet welding with covered electrodes[J]. Welding International, 2015, 29(5): 363–371.
- [7] Zhao B, Chen J, Jia C B, et al. Numerical analysis of molten pool behavior during underwater wet FCAW process[J]. Journal of Manufacturing Processes, 2018, 32: 538–552.
- [8] Kobernik N V, Mikheev R S, Linnik A A, et al. Effect of the conditions of machine hidden arc welding with an additional hot additive (flux-cored electrode) on the formation of a joint weld[J]. Russian Metallurgy (Metally), 2018(13): 1249–1254.
- [9] Wang L L, Xie F X, Feng Y L, et al. Innovative methodology and database for underwater robot repair welding: A technical note[J]. ISIJ International, 2017, 57(1): 203–205.
- [10] Muktepavel V, Murzin V, Karpov V, et al. Research on welding and processing behavior of electrodes and features of their application in “wet” underwater arc welding[J]. Materials Science Forum, 2019, 4726: 913–920.
- [11] Guo N, Du Y P, Feng J C, et al. Study of underwater wet welding stability using an X-ray transmission method[J]. Journal of Materials Processing Technology, 2015, 225: 133–138.

**第一作者:**李志刚,博士,副教授;主要从事焊接机器人及焊接自动化方面的研究;Email: gordon7456@163.com.

(编辑: 杨柳青)