

水下湿法手工自蔓延焊接技术

韩凤起¹, 李志尊², 孙立明², 马云鹤², 申超²

(1. 石家庄铁道大学, 石家庄 050043; 2. 陆军工程大学(石家庄校区), 石家庄 050003)

摘 要: 基于自蔓延高温合成技术 (SHS 技术) 和湿法电弧焊原理, 研究了一种用于水下金属结构应急维修的新型焊接方法—水下湿法手工自蔓延焊接技术. 通过焊条结构设计、焊药设计等, 研制了水下燃烧型焊条, 进行了焊接试验, 对接头组织和性能进行了分析. 结果表明, 该技术可在无电、无气、无其它设备的条件下实现水下金属构件的湿法焊接, 单面焊双面成形, 接头抗拉强度达 267 MPa, 冲击吸收能量 13.8 J; SEM 和 EDS 分析表明, 焊缝金属为以 α -Cu 固溶体为基体、有大量块状富铁第二相析出的高铁铜合金, 熔合区的成分和组织与焊缝第二相基本相同, 焊缝合金与熔融母材交互结晶, 形成了梯度熔焊连接; 拉伸断裂发生在焊缝或熔合区, 断口有大量韧窝, 属韧性断裂.

关键词: 手工自蔓延焊接; 水下湿法焊接; 应急维修; 燃烧型焊条; 组织与性能

中图分类号: TG 456.5 **文献标识码:** A **doi:** 10.12073/j.hjxb.2019400198

0 序 言

水下焊接是海洋工程结构建造、安装、维修的关键技术, 也是舰船装备平时海上维修和战时应急抢修不可缺少的重要技术之一^[1-2]. 海军舰船船体和附体在战争或航行时出现折断、裂缝、磨损超差、凹坑、穿孔、小面积破损等损伤时, 均需采用焊接的方法加以修复. 水下焊接根据焊接环境分为干法焊接、局部干法焊接和湿法焊接. 干法焊接设备复杂昂贵, 准备周期长, 局部干法焊接也需要排水设施, 均不能满足战场抢修机动灵活性的需要^[3-4]. 湿法焊接具有设备简单、成本低廉、适应性强的特点, 但是目前常用的湿法焊接方法是焊条电弧焊和药芯焊丝电弧焊, 离不开大功率电源, 设备沉重, 且操作工艺要求严格, 也很难满足应急维修的需要^[5-7]. 因此发展先进高效的水下应急焊接技术, 对舰船战时应急抢修、迅速恢复武器装备的持续作战效能, 平时海上维修、减少进坞维修次数、延长生命周期均有重大意义.

手工自蔓延焊接是近年立足战场及野外抢修提出的一种新型应急焊接方法^[8], 将能发生自蔓延高温合成反应 (SHS 反应) 的焊药制成圆柱形燃烧型焊条, 用火柴点燃焊条引发 SHS 反应, 利用反应

生成的热量和金属产物实现母材的焊接, 操作方法类似手工电弧焊. 该技术无需外界能源和设备, 携带方便、操作简单、使用灵活, 是武器装备战场抢修和野外工程机械、车辆、铁路桥梁等应急维修的理想焊接手段. 国内军械工程学院对手工自蔓延焊接的燃烧机理、接头组织和性能、添加剂的影响、焊接工艺等方面进行了较深入的研究^[9-13], 并将该技术推广应用到武器装备的应急维修; 清华大学袁轩一^[14]采用自蔓延反应造渣实现了金属与氧化铝的迅速分离, 并通过加入 Al/NiO 提高了焊缝强度; 装甲兵工程学院刘宏伟等人^[15]通过增大焊条直径等方法, 实现了中厚度钢板的无电焊接. 以上研究均立足于陆地焊接, 在水下焊接方面, 尹玉军等人^[16]以 SHS 反应放热为焊接热源, 利用石墨坩埚+矩管的复合焊块隔绝水环境, 实现了水下自蔓延焊接, 接头强度 135 MPa, 但该方法属于局部干法焊接. 对于利用燃烧型焊条直接在水中燃烧实现焊接的水下湿法自蔓延焊接, 国内外文献未见相关报道.

文中基于 SHS 技术和湿法电弧焊原理, 提出湿法手工自蔓延焊接的原理, 通过设计焊条结构、优化焊药成分, 研制水下专用燃烧型焊条, 并进行焊接试验, 研究水环境对焊条燃烧和焊接的影响, 分析焊接接头的组织和性能, 为研究携带方便、操作简单、灵活高效的水下应急无电焊接方法提供技术支持.

1 湿法手工自蔓延焊接原理及焊条的设计

1.1 水下湿法手工自蔓延焊接的原理及特点

水下湿法手工自蔓延焊接是燃烧型焊条直接在水中燃烧,利用 SHS 反应的放热和金属产物提供焊接热量和填缝金属,利用焊药成分的物理化学反应达到渣液分离、自保护和接头强化的目的,焊接过程包括以下四部分:一是焊药发生燃烧合成反应放出热量,作为焊接热源,将受焊母材局部加热至熔化;二是水在焊接高温下分解产生的气体和焊药燃烧产生的气体及其吹力将受焊部位的水局部排开,形成小型气室,防止水侵入焊接区域;三是焊药燃烧合成反应生成金属产物,与熔融的母材金属一起形成熔池,而焊药中的造渣剂与反应的非金属产物形成性质适宜的熔渣,与金属熔池分离,熔池凝固结晶形成完整的焊接接头;四是利用焊药产生的适当气体保护熔池和焊缝,减轻或消除水介质对焊接接头的不良影响,实现自保护湿法手工自蔓延焊接。

该技术采用手工电弧焊的操作方式,不需要电、气等外加能源和其它设备工具,工艺简单,携带方便,使用灵活,单兵即可操作,可有效提高舰员级维修保障能力。但是由于燃烧型焊条直接在水中燃烧焊接,水环境将对焊条燃烧过程和焊接质量产生极大的不利影响。与陆地手工自蔓延焊接相比,水下湿法手工自蔓延焊接存在以下问题。

(1) 焊接热量小。水的导热率远远大于空气的导热率,反应产生的热量迅速散失,致使焊接热量明显减少,将对母材熔化、熔池形成、渣液分离、金属铺展等产生不利影响。

(2) 焊条引燃困难。陆地上用火柴点燃焊条即可焊接,水下焊接无法用这种方式引燃焊条发生反应。

(3) 熔池和焊接接头冷却速度快。由于水的高导热率,对熔池、焊缝和热影响区均有急冷作用,严重影响焊接质量。

(4) 焊接缺陷多。由于焊接热量低、冷却速度快,气体、非金属夹杂无法充分从金属熔池中分离,接头中夹杂、气孔、裂纹等缺陷明显多于陆地焊接。

(5) 焊接可见度低。焊条由多种粉末状焊药构成,焊接过程中未完全反应的焊药、反应生成的烟

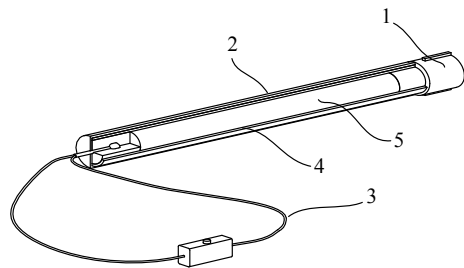
尘、水气化产生的气泡等,使湿法手工自蔓延焊接的能见度比湿法电弧焊更低,基本属于盲焊。

燃烧型焊条是湿法手工自蔓延焊接的唯一焊接材料,欲解决以上问题,实现湿法手工自蔓延焊接,燃烧型焊条的研制是关键。首先,要能够提供足够焊接热量;其次,要能发生多种物理化学反应,满足排水、造渣、造气、强化等一系列性能需求;另外,要满足方便操作、刚度足够、防水防潮等要求。

1.2 水下湿法燃烧型焊条的设计

1.2.1 湿法燃烧型焊条的结构

水下湿法燃烧型焊条的结构如图 1 所示。焊条由药柱、外壳、防水层、堵头和引燃装置构成。焊条采用纸制外壳,有聚集能量、减少飞溅和成形药柱的作用。为适应水下焊接的特殊性,使焊条在使用和储存中防潮防湿,保证性质稳定,外壳外加装防水层。堵头是焊接时夹持焊条的部位,也可与专用套管相配合,方便焊接操作。引燃装置用来引燃焊条,为了能够在水中安全、可靠、方便的引燃焊条,水下燃烧型焊条采用电火花点燃方式引燃。药柱是燃烧型焊条的核心部分,由粉末状焊药与粘接剂混合均匀,加压成形。



1. 堵头 2. 防水层 3. 引燃装置 4. 外壳 5. 药柱

图 1 水下湿法燃烧型焊条的结构

Fig. 1 Structure of the combustion welding rod for underwater wet welding

1.2.2 湿法燃烧型焊条的焊药

焊药是燃烧型焊条自维持燃烧反应实现焊接的关键,在水下湿法焊接中,对其要求一是能发生燃烧合成反应,产生水下焊接所需热量和填缝金属,二是实现在焊接过程中非金属产物和气体能够与金属熔池顺利分离,减少夹杂、气孔等焊接缺陷,形成有一定强度的焊缝金属,三是减轻水环境对燃烧和焊接的不利影响,保证焊接质量。针对水下焊接的需求,焊药主要由以下几部分构成:①高热剂。能发生 SHS 反应,提供焊接所需热量。选用燃烧热大、绝热燃烧温度高的铝热剂 ($\text{CuO} + \text{Al}$) 和 ($\text{Fe}_2\text{O}_3 +$

Al) 作为高热剂,且增加 (CuO+Al) 的含量,以提高反应体系热量,保证足够的焊接热;②造渣剂. 与反应生成的 Al_2O_3 形成低熔点、低密度、粘度适宜的焊接渣系,实现焊渣与焊缝合金的有效分离,形成纯净的金属接头;③合金剂. 过渡有益的合金元素,保证焊缝金属获得必要的化学成分及性能;④造气剂. 在燃烧过程中生成气体,形成局部气室,并借助气流吹力阻碍水进入焊接区域,保护燃烧弧和熔池;⑤其它添加剂. 用以调控反应或产物,缓解燃烧,提高焊接可控性,或保证反应进行完全,得到预期的产物和热量等.

通过热力学计算和大量试验,在优化高热剂和造气剂的基础上,调整其它添加剂成分和配比,确定了较理想的焊药组成,如表1所示.

表1 水下燃烧型焊条焊药组成 (质量分数, %)
Table 1 Component of the welding powder for the combustion welding rod

高热剂	造渣剂	合金剂	造气剂	其它
55	12	10	8	15

2 试验方法

2.1 焊接试验

按表1所示称取各组分,在三维混料机中混合均匀,压力成形于带堵头的外壳中,安装引燃装置,涂覆防水层,室温晾干,制成 $\phi 15 \text{ mm} \times 150 \text{ mm}$ 的水下湿法燃烧型焊条.

以 $70 \text{ mm} \times 35 \text{ mm} \times 5 \text{ mm}$ 的 Q235 钢板为焊接试板,不开坡口,对接平焊,试板间不留间隙,不需清理氧化皮和锈蚀. 采用手工电弧焊的运条方法,在 0.3 m 水浴中进行湿法手工自蔓延焊接,观察并用相机记录焊条燃烧和焊接过程,对焊接效果和焊接接头进行宏观分析.

2.2 接头组织分析与性能测试

金相试样取自焊接接头横截面的中部,经研磨、抛光后,分别用 4% 的硝酸酒精溶液和三氯化铁盐酸水溶液浸蚀母材热影响区和焊缝,酒精清理烘干后利用 OLYMPUS 光学显微镜和 HITACHI S-4800 扫描电镜观察接头微观组织,并利用 OXFORD INCA Energy 350 能谱仪分析接头成分及元素分布.

根据国家标准 GB/T228.1—2010《金属材料拉伸试验 第1部分:室温试验方法》、GB/T229—

2007《金属材料 夏比摆锤冲击试验方法》进行力学性能测试,拉伸试验和冲击试验分别在 DNS100 电子万能试验机和 JB-30B 型冲击试验机上进行,冲击试样尺寸为 $55 \text{ mm} \times 10 \text{ mm} \times 5 \text{ mm}$,夏比 V 形缺口位于焊缝中心. 利用扫描电镜观察拉伸断口形貌.

3 试验结果与分析

3.1 焊条的燃烧

所设计的电火花引燃装置能够可靠的在水中引燃燃烧型焊条,且焊条一经引燃,能够在水中稳定的自维持燃烧反应,这为水下湿法手工自蔓延焊接奠定了能量基础. 但是,通过燃烧弧和熔池的亮度和形态以及焊接结果可以看出,焊条在水中燃烧产生的焊接热量及燃烧弧和熔池达到的温度明显低于在空气中燃烧. 图2为相同配方的燃烧型焊条在水下和空气中焊接的燃烧弧形态,水下手工自蔓延焊接熔池和燃烧弧亮度明显比空气中暗,说明其温度低、热量小. 而且由于水对燃烧弧的压力作用,水中焊接燃烧弧明显被压缩,呈暗红色(中间稍亮区域为熔融产物).



(a) 水中燃烧



(b) 空气中燃烧

图2 燃烧型焊条在水下和空气中焊接的燃烧弧形态
Fig. 2 Combustion arc for welding underwater and in gas

焊接热量不足、熔池温度低是由水的导热率大造成的。20℃时水的导热系数是0.599 W/(m·℃),为空气的20多倍,水下焊接时焊药燃烧反应产生的热量迅速散失,一方面通过燃烧弧和水的接触直接散失,一方面通过焊接试板扩散到水中,用于焊接的热量急剧减少,使燃烧弧和熔池的温度明显降低,且大的导热率造成熔池在水中快速冷却,均对焊接过程和焊接质量产生严重影响。

在水下焊接时,由于水对光的吸收、反射和折射等作用,且由于焊接时燃烧弧周围产生大量气泡和烟尘,使水下焊接的可见度非常低,对以化学反应来提供焊接热量的湿法手工自蔓延焊接尤为显著,因为焊药为多种粉末的混合物,在焊接时未参加反应的原料粉末、反应中间产物、反应生成的包括焊渣在内的多种成分极易弥散在水中,使水下湿

法手工自蔓延焊接的可见度比水下电弧焊更差,基本处于盲焊状态,增加了水下焊接的难度。

3.2 焊接接头宏观成形

图3为用陆地燃烧型焊条进行水下湿法手工自蔓延焊接所得的试件,由于焊接热量不足,试板焊接部位不能充分熔化,金属熔池不连续,无法形成完整焊缝(图3a)。或由于熔池温度低,且大导热率使熔池迅速冷却,导致熔池在液态存留的时间短,以氧化铝为主的高熔点非金属产物在与金属液分离之前即已凝固,与金属混杂在一起,不能实现有效焊接(图3b)。即使形成金属焊缝(图3c),由于水的急冷作用,非金属产物和气体来不及或不能充分的从熔池中有效分离或析出,也会出现渣液分离不彻底、焊道成形不均匀、焊缝不连续,大量夹渣、气孔、裂纹等缺陷,严重影响焊接质量。



图3 水下手工自蔓延焊接试件

Fig. 3 Photograph of specimen welded by underwater wet manual SHS welding

针对湿法手工自蔓延焊接存在的问题,以增大焊接热量、提高熔池温度、减轻水的影响、促进渣液分离为原则,优化设计焊药高热剂、造渣剂、造气剂等各组元种类及配比,并进行大量试验研究。试验发现,焊药经优化设计后,焊条燃烧产生较大的焊接热量,在0.3 m水深条件下,对5 mm厚Q235钢板进行对接平焊,可实现有效焊接,并达到单面焊双面成形的效果。

图4为优化设计的燃烧型焊条湿法焊接得到的焊接接头宏观形貌,试板焊接部位被熔化,与反应生成的金属产物形成焊缝,焊渣和焊缝金属分离比较完全,得到较纯净的金属接头。由图4a可见焊接接头完整,焊道成形良好,宽度比较均匀,表面无

明显夹渣、裂纹等缺陷。图4b为焊缝背面宏观形貌,试板沿焊缝长度被焊透,背面焊道成形也较好,达到了单面焊双面成形的效果。但与常规湿法焊接方法相比,存在焊道表面有凹坑或凹沟、与母材润湿性较差、焊缝一端冗余较多的问题,这是由于水对熔池存在压力、焊缝成分与母材相差较多及手工自蔓延焊接熔池流动性强造成的。

3.3 焊接接头微观组织与性能

图5为Q235钢湿法手工自蔓延焊接接头的整体微观组织形貌,可发现母材局部被熔化,与反应生成的金属产物经扩散、冷却、结晶,形成焊缝合金。焊缝金属组织比较均匀、致密,弥散分布有少量非金属夹杂。同时可见焊缝合金的组织结构明显不



(a) 焊缝正面



(b) 焊缝背面

图 4 优化配方后水下焊接接头宏观形貌

Fig. 4 Macrography of the welded joint after the optimizing design of the welding powder

同于母材, 这是由于高热剂燃烧合成反应生成较多金属铜, 使焊缝金属化学成分为铜基合金, 与母材不同, 但焊缝与母材相接界面比较平直, 结合情况良好.

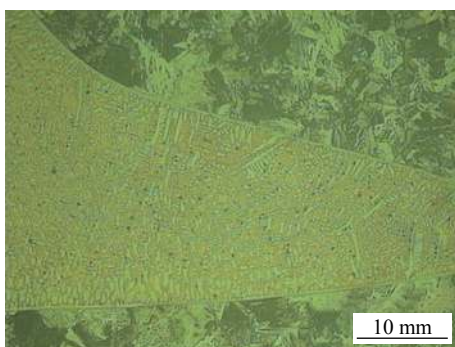


图 5 焊接接头整体微观组织形貌

Fig. 5 Micrography of the whole welded joint

图 6 为焊接接头的微观组织 SEM 形貌, 可明显观察到焊接接头的三个区域: 从左上向右下分别为母材热影响区、熔合区和焊缝金属, 焊缝和热影响区微观组织相差悬殊, 中间有一层明显的熔合区. 结合图 7 所示的能谱线扫描图像, 可以发现焊缝合金的化学成分明显不同于母材, 为 Cu-Fe-Ni-Mn-Cr 多元合金, 以 Cu 和 Fe 为主, 其中 Cu 来源

于高热剂 (CuO + Al), Fe 来源于熔化的母材和高热剂 (Fe₂O₃ + Al). 由扫描谱线可以看到, 焊缝合金的基体组织 Cu 含量高 Fe 含量低, 为 α -Cu 固溶体; 而块状第二相正好相反, Fe 含量高 Cu 含量低. 这是由于焊药高热剂中 (CuO + Al) 占较大比例, 反应生成大量的金属 Cu, 与 (Fe₂O₃ + Al) 生成的金属 Fe 及母材局部熔化产生的熔融 Fe 形成液态熔池, 但是由 Fe-Cu 二元相图可知, Fe 在固态 Cu 中的溶解度极低, 而焊缝合金中的 Fe 含量远高于其在 Cu 固溶体中的溶解度, 因此随熔池温度降低, Fe 大量从 Cu 基固溶体中析出, 形成富 Fe 第二相, 因此焊缝金属是高铁的铜基多元合金.

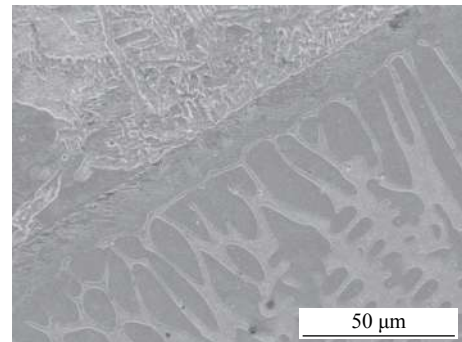
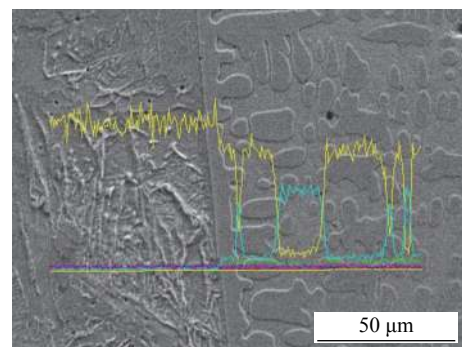
图 6 焊缝与母材接合区域的微观组织形貌
Fig. 6 Microstructure of the welded joint

图 7 焊接接头能谱线扫描图像

Fig. 7 EDS line scanning pattern of the welded joint

由图 6 和图 7 还可看到, 熔合区的化学成分和微观组织与焊缝第二相基本相同, 也为富铁相, 说明被焊母材局部发生了熔化, 但在水下焊接快速冷却的条件下, 元素来不及充分扩散, 富铁的熔融金属首先在母材的半熔晶体提供的有利结晶表面进行结晶, 由此生长的晶粒向熔池内部不断长大, 使焊缝合金与熔融母材通过交互结晶接合到一起, 由母材向焊缝, 在成分和结构上形成了逐渐过渡的梯度熔焊连接.

由能谱线扫描图像可以发现在母材热影响区中有较低含量的 Cu, 其它元素 (Ni、Mn 等) 的含量也低于焊缝, 说明焊缝和母材之间发生了元素的扩散, 但质点在固体中的扩散明显低于在熔体中的扩散。

拉伸和冲击试验结果表明, 焊接接头的抗拉强度达到 267 MPa, 室温冲击吸收能量 13.8 J, 满足应急维修对焊接接头力学性能的基本要求。拉伸断裂发生在焊缝或熔合区, 一方面是由于焊缝为铜基金属, 本身强度较低, 另一方面焊缝与母材的化学成分不同, 组织结构不同, 为异种材料的连接, 其结合界面是薄弱区域。图 8 为拉伸断口的微观形貌, 断口有大量韧窝, 且大韧窝内部分布着一些小韧窝, 是典型的韧性断裂微观形貌。部分韧窝底部存在非金属夹杂粒子, 说明在水下焊接快速冷却的特殊热循环条件下, 非金属产物来不及完全从金属熔池中分离, 形成夹杂, 这也是制约接头强度的因素之一。

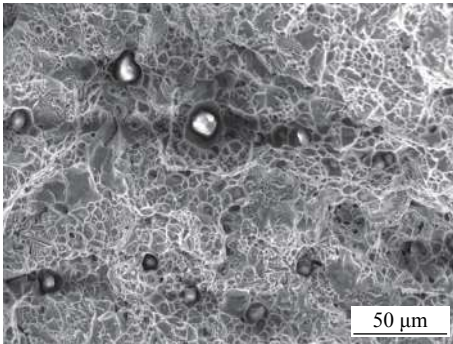


图 8 焊接接头断口形貌

Fig. 8 Fracture morphology of the welded joint

4 结 论

(1) 基于自蔓延高温合成技术和湿法电弧焊原理, 提出了水下湿法手工自蔓延焊接技术原理, 分析了其特点。

(2) 通过焊条结构设计、焊药优化设计等, 研制了水下专用燃烧型焊条, 实现了湿法手工自蔓延焊接。

(3) 研究表明, 该技术可在无电、无气、无其它设备的条件下实现金属构件的水下湿法焊接, 携带方便, 操作简单, 可单兵使用, 接头抗拉强度达到 267 MPa, 冲击吸收能量 13.8 J, 满足应急维修的要求, 可用于舰船装备损伤构件的水下抢修。

(4) SEM 和 EDS 分析表明, 焊缝金属为以 α -

Cu 固溶体为基体、有大量块状富铁第二相析出的高铁铜合金, 熔合区的化学成分和微观组织与焊缝合金第二相基本相同, 焊缝合金与熔融母材通过交互结晶接合到一起, 在成分和结构上形成了逐渐过渡的梯度熔焊连接; 拉伸断裂发生在焊缝或熔合区, 断口有大量韧窝, 是典型的韧性断裂。

参考文献:

- [1] 续明, 陈勇, 刘丰, 等. 水下焊接技术在海洋工程中的应用和发展 [J]. 中国造船, 2013, 54(Special 1): 190 - 193.
Xu Ming, Chen Yong, Liu Feng, *et al.* Research and application of underwater welding technology in offshore engineering [J]. Ship Building of China, 2013, 54(Special 1): 190 - 193.
- [2] 吕建伟, 余鹏, 魏军. 舰船装备战时抢修理论与技术应用研究 [J]. 海军工程大学学报 (综合版), 2010, 7(3): 54 - 57.
Lü Jianwei, Yu Peng, Wei Jun. On theory of naval ship rush-repair during wartime and its technology application [J]. Journal of Naval University of Engineering, 2010, 7(3): 54 - 57.
- [3] 张洪涛, 钟诗胜, 冯吉才. 水下焊接技术现状及发展 [J]. 焊接, 2011(10): 18 - 22.
Zhang Hongtao, Zhong Shisheng, Feng Jicai. Overview of underwater welding technology [J]. Welding & Joining, 2011(10): 18 - 22.
- [4] 周利, 刘一搏, 郭宁, 等. 水下焊接技术的研究发展现状 [J]. 电焊机, 2012, 42(11): 6 - 10.
Zhou Li, Liu Yibo, Guo Ning, *et al.* Development status of underwater welding technology [J]. Electric Welding Machine, 2012, 42(11): 6 - 10.
- [5] 石永华, 郑泽培, 黄晋. 水下湿法药芯焊丝焊接电弧稳定性 [J]. 焊接学报, 2012, 33(10): 49 - 53.
Shi Yonghua, Zheng Zepei, Huang Jin. Arc stability of underwater wet flux-cored arc welding [J]. Transactions of the China Welding Institution, 2012, 33(10): 49 - 53.
- [6] Han Yanfei, Guo Ning, Wang Fang, *et al.* Effects of process parameters on the depth-to-width ratio of flux-cored wire underwater wet welding [J]. China Welding, 2013, 22(1): 35 - 40.
- [7] 郭宁, 王美荣, 郭伟, 等. 水下湿法自保护药芯焊丝 [J]. 焊接学报, 2014, 35(5): 13 - 17.
Guo Ning, Wang Meirong, Guo Wei, *et al.* Flux-cored wire for underwater wet welding [J]. Transactions of the China Welding Institution, 2014, 35(5): 13 - 17.
- [8] 辛文彤, 李志尊, 李宝峰, 等. 一种野外快速焊接技术 [J]. 焊接, 2005(1): 19 - 21.
Xin Wentong, Li Zhizun, Li Baofeng, *et al.* Study on quick welding technology under field operations circumstances [J]. Welding & Joining, 2005(1): 19 - 21.
- [9] 李志尊, 辛文彤, 武斌, 等. 高热剂对低碳钢手工自蔓延焊接

- 的影响 [J]. *焊接学报*, 2007, 28(2): 79 – 81.
- Li Zhizun, Xin Wentong, Wu Bin, *et al.* Effect of thermit composition on manual SHS welding for low carbon steel[J]. *Transactions of the China Welding Institution*, 2007, 28(2): 79 – 81.
- [10] 李志尊, 辛文彤, 胡仁喜, 等. 焊条成形工艺对手工自蔓延焊接的影响 [J]. *焊接学报*, 2010, 31(12): 81 – 84.
- Li Zhizun, Xin Wentong, Hu Renxi, *et al.* Effects of forming process of combustion welding rod on the manual SHS welding[J]. *Transactions of the China Welding Institution*, 2010, 31(12): 81 – 84.
- [11] 辛文彤, 马世宁, 李志尊, 等. Fe 基手工自蔓延焊接的接头组织和性能 [J]. *焊接学报*, 2009, 30(10): 73 – 76.
- Xin Wentong, Ma Shining, Li Zhizun, *et al.* Structure and property of Fe-base manual SHS welding joint[J]. *Transactions of the China Welding Institution*, 2009, 30(10): 73 – 76.
- [12] 辛文彤, 马世宁, 李志尊, 等. 焊后热处理对手工自蔓延焊接接头组织性能的影响 [J]. *焊接学报*, 2009, 30(6): 83 – 86.
- Xin Wentong, Ma Shining, Li Zhizun, *et al.* Effect of post-weld heat treatment on microstructure and mechanical property of manual SHS welding[J]. *Transactions of the China Welding Institution*, 2009, 30(6): 83 – 86.
- [13] 吴永胜. 野战应急抢修脉冲燃烧型焊条设计及立焊研究 [D]. 石家庄: 军械工程学院, 2014.
- [14] 袁轩一. 一种新型热剂焊接方法及其应用研究 [D]. 北京: 清华大学, 2011.
- [15] 刘宏伟, 马世宁, 刘吉延, 等. 无电焊接中厚度钢板焊接接头的组织结构与性能研究 [J]. *装甲兵工程学院学报*, 2010, 24(2): 74 – 78.
- Liu Hongwei, Ma Shining, Liu Jiyan, *et al.* Research on structure and performances of non-electric weld joints for medium-thickness steel plates[J]. *Journal of Academy of Armored Force Engineering*, 2010, 24(2): 74 – 78.
- [16] 尹玉军, 潘传增, 苏 珊. 水下自蔓延焊接技术 [J]. *焊接学报*, 2014, 35(10): 21 – 24.
- Yin Yujun, Pan Chuanzeng, Su Shan. Research on rapid underwater welding based on SHS[J]. *Transactions of the China Welding Institution*, 2014, 35(10): 21 – 24.
-
- 第一作者简介:** 韩凤起, 男, 1973 年出生, 博士, 副教授. 主要从事特种焊接及机械制造方面的科研和教学工作. 发表论文 50 余篇. Email: hfqlzz@163.com
- 通信作者简介:** 李志尊, 女, 副教授. Email: jxxylyzz@163.com