

# 水下焊接技术研究和应用的进展

朱加雷<sup>1,2</sup>, 俞建荣<sup>1</sup>, 焦向东<sup>1</sup>, 周灿丰<sup>1</sup>, 蒋力培<sup>1</sup>

(1. 北京石油化工学院, 北京 102600 ; 2. 石油大学(北京), 北京 102200)

**摘要:** 水下焊接由于受水的影响, 其焊接方法与焊接设备都比陆上的复杂很多, 本文综述了各种水下焊接技术研究与应用的最新进展, 介绍了现在的一些新技术在焊接领域的应用现状, 并对水下焊接技术的发展趋势提出了一些看法。

**关键词:** 水下焊接 湿法水下焊接 局部干法水下焊接 干法水下焊接 焊接方法

## 0 前言

海洋工程结构因常年在海上工作, 其工作环境极为恶劣, 除受到结构的工作载荷外, 还要承受风暴、波浪、潮流引起的附加载荷以及海水腐蚀、砂流的磨蚀、地震或寒冷地区冰流的侵袭。此外, 石油天然气的易燃易爆性对结构也存在威胁。而且海洋结构的主要部分在水下, 服役后焊接接头的检查和修补很困难, 费用也高, 一旦发生重大结构损伤或倾覆事故, 将造成生命财产的严重损失。所以对海洋工程结构的设计制造、材料选择以及焊接施工等都有严格的质量要求。而随着海洋石油和天然气工业的发展, 海洋管道工程日益向深海挺进, 我国作为一个发展中的沿海大国, 国民经济要持续发展, 就必须把海洋的开发和保护作为一项长期的战略任务。大量的海底管道施工工程对水下焊接技术提出了新的要求。

水下焊接由于水的存在, 使焊接过程变得更加复杂, 并且会出现各种各样陆地焊接所未遇到的问题, 目前, 世界各国正在应用和研究的水下焊接方法种类繁多, 应用较成熟的是电弧焊。随着水下焊接技术的发展, 除了常用的湿法水下焊接、局部干法水下焊接和干法水下焊接以外, 又出现了一些新的水下焊接方法。但是, 从各国海洋开发的前景来看, 水下焊接的研究远远不能适应形势发展的需要。因此, 加强这方面的研究, 无论是对现在或将来, 都将是一项非常有意义的工作。

### 1.1 湿法水下焊接

湿法焊接中, 水下焊接的基本问题表现最为突出。因此采用这类方法难以得到质量好的焊接接头, 尤其在重要的应用场合, 湿法焊接的质量难以令人满意。但由于湿法水下焊接具有设备简单、成本低廉、操作灵活、适应性强等优点。所以, 近年来各国对这种方法仍在继续进行研究, 特别是涂药焊条和手工电弧焊, 在今后一段时期还会得到进一步的应用。

在焊条方面, 比较先进的有英国Hydroweld公司发展的Hydroweld FS水下焊条, 美国的专利水下焊条 7018' S 焊条, 以及德国Hanover大学基于渣气联合保护对熔滴过渡的影响和保护机理所开发的双层自保护药芯焊条。美国的Stephen Liu等人在焊条药皮中加入锰、钛、硼和稀土元素, 改善了焊接过程中的焊接性能, 细化了焊缝微观组织<sup>[1]</sup>。

水下焊条的发展促进了湿法水下焊接技术的应用。目前, 在国、内外都有采用水下湿法焊条电弧焊技术进行水下焊接施工的范例。

药芯焊丝的出现和发展适应了焊接生产向高效率、低成本、高质量、自动化和智能化方向发展的趋势。英国TWI与乌克兰巴顿研究所成功开发了一套水下湿法药芯焊丝焊接的送丝结构、控制系统及其焊接工艺<sup>[2]</sup>。华南理工大学机电工程系刘桑、钟继光等人开发了一种药芯焊丝微型排水罩水下焊接方法<sup>[3]</sup>, 从实用经济的角度出发, 完全依靠焊接时自身所产生的气体以及水汽化产生的水蒸气排开水而形成稳定的局部无水区域, 使得电弧能在其中稳定的燃烧。微型排水罩的尺寸和结构决定

## 1 水下焊接技术的最新进展

了焊接过程中无水区(局部排水区)的大小和稳定程度。除此之外,他们还通过复合滤光技术和水下 CCD 摄像系统,采集出了药芯焊丝水下焊接电弧区域图像,从而为水下湿法焊接电弧的机理分析及水下焊接过程控制奠定了基础。

由于传统的边缘检测算子如梯度算子、拉普拉斯算子、Sobel 算子等对噪声敏感,梁明等采用了 Bubble 函数过零点检测来提取焊缝图像边缘的小波多尺度方法<sup>[4]</sup>,通过调整尺度参数  $\sigma$  的值,得到焊缝边缘提取效果最好的  $\sigma$  范围是:  $0.4 \leq \sigma \leq 0.6$ ,有效降低了噪声,同时又较好地保持了焊缝边缘细节,在水下药芯焊接焊缝边缘检测中获得较好的效果。

尽管如前所述湿法焊接已经取得了较大的进展,但到目前为止,应该说水深超过 100m 湿法水下焊接仍难得到较好的焊接接头,因此还不能用于焊接重要的海洋工程结构。但是,随着湿法水下焊接技术的发展,很多湿法水下焊接的问题在一定程度上正在克服,如采用设计优良的焊条药皮及防水涂料等,加上严格的焊接工艺管理及认证,现在湿法水下焊接已在北海平台辅助构件的水下修理中得到成功的应用,另外,湿法水下焊接技术也广泛用于海洋条件好的浅水区以及不要求承受高应力构件的焊接。目前,国际上应用湿法水下焊条以及湿法水下焊接技术最广的是墨西哥湾。现在湿法水下焊接中最常用的方法为焊条电弧焊和药芯焊丝电弧焊。在焊接时潜水焊工要使用带防水涂料的焊条和为水下焊接专门设计或改制的焊钳。在质量要求较高的场合,可把焊条放入充气容器,防止焊条使用前吸水。

## 1.2 局部干法水下焊接

局部干法水下焊接的种类很多,包括干箱式焊接、干点式焊接、水帘式干法焊接、钢刷式水下焊接以及局部干法大型气罩法水下 MIG/TIG 焊接等。由于局部干法水下焊接降低了水的有害影响,使焊接接头质量比湿法焊接得到了明显改善。

我国哈尔滨焊接研究所较早的对  $\text{CO}_2$  气体保护

局部排水半自动水下焊接进行研究,研制成功了 LD— $\text{CO}_2$  焊接方法,并开发了配套 NBS-500 型水下半自动焊机,在国内进行了多次成功施焊。华南理工大学水下焊接课题组成功研制出一套采用微型排水罩的水下局部干法药芯焊丝焊接设备和工艺,为进一步发展成适合我国国情的水下焊接方法打下了基础。

水帘式水下焊接法由日本首先提出,通常的水帘式焊接的焊枪结构分为两层,这种方法的焊接接头强度不低于母材,焊接接头面弯和背弯都可达到 180 度。焊枪轻便,较灵活,但可见度问题没有解决。保护气体和烟尘将焊接区的水搅得混浊而紊乱,焊工基本处于盲焊状态。另外,喷嘴离焊件表面的距离和倾斜度要求严格,对焊工的操作技术要求较高,再加上钢板对高压水的反向作用,这种方法在焊接搭接接头和角度接头时效果不好,手工焊十分困难,应向自动化方向发展。最近,日本又成功研制了一种机械化的水帘式水下焊接机构,能很好的对水下较大移动构件进行焊接<sup>[5]</sup>。对于水帘式局部干法水下焊接,Hoffmeister 等建立了基于降低氢吸附量时最小保护气流与热输入和压力之间的关系。Mattias 等在对辐流抽气机原理认识的基础上设计了一种新型排气罩,使得罩内焊接区气压下降,获得了良好的焊缝。

张旭东等人对水下局部干法激光焊接进行了研究,采用填丝热导焊的方法研究了水下激光焊接的基本物理现象,利用气体喷嘴形成局部干燥空间,其保护效果取决于喷嘴结构和气体流量等参数,喷嘴外径大小对保护效果影响显著,良好保护条件下的水下焊缝的力学性能和大气中一致<sup>[6]</sup>。

与干法焊接相比,局部干法无需大型昂贵的排水气室,适应性明显增大。它综合了湿法和干法两者的优点,是一种较先进的水下焊接方法,也是当前水下焊接研究的重点与方向。局部干法水下焊接可直接获得接近下一步的接头质量,同时由于设备简单,成本较低,又具有湿法焊接的灵活性,因此是很有前途的水下焊接方法。

### 1.3 干法水下焊接

干法焊接是用气体将焊接部位周围的水排除，而潜水焊工处于完全干燥或半干燥的条件下进行焊接的方法，进行干法水下焊接时，需要设计和制造复杂的压力舱或工作室。根据压力舱或工作室内部压力的不同，干法水下焊接又可分为高压干法水下焊接和常压干法水下焊接。

#### 1.3.1 高压干法水下焊接

干法水下焊接试验一般都是在高压模拟舱中进行，同时压力舱中还可以进行焊接工艺评定试验。哈尔滨焊接研究所自 20 世纪 80 年代起开始研究干法水下焊接，先在模拟实验舱内进行试验研究工作，然后再到实际现场验证。陈锦鸿、肖志平采用高压干法焊接修复了广州市一过河水管，使我国的水下焊接技术获得了新的发展<sup>[7]</sup>。巴西 CENPES 中心的水下高压焊接舱有环境控制室、气体供应室、气体回收室、高压室、电气控制室和自动焊接机器六个部分组成。可进行高压自动 TIG、MIG、FCAW、SMAW 焊接工艺。德国 GKSS 中心对 600~1100 米水深下药芯焊丝弧焊的短路过渡行为、电源输出功率大小和梯度对熔滴过渡的影响、熔池反应机理、氧吸附的影响因素和保护气体的选择等进行了研究，该研究成果被应用于设计高压焊接舱，取得了令人满意的结果。在过去的七年里，Cranfield 大学焊接工程研究中心已经将自动焊接技术应用于水深 2500m 压力相当于 250Bar 条件下的深水焊接<sup>[8,9]</sup>，这项深水高压焊接研究分三个阶段进行：

阶段一：随着焊接辅助设备的发展、优化和试运行，在焊接过程全为线性焊缝的条件下，演示了压力范围在 0~250Bar 范围内，等离子弧焊和 GMAW 焊的焊接能力。同时也开展了一些位置焊接，建立了焊接机械性能和焊缝微观结构的评价系统。

阶段二：使用轨道焊接设备，针对 C-Mn 管道钢和 13Cr 钢进行了进一步的等离子弧焊和 GMAW 焊接实验，开发了电弧监视技术，以便进行更深层

次的微观结构和机械评估。

阶段三：也就是现阶段，Cranfield 大学正在集中进行热渣焊接和利用高压 GMAW 焊来进行特定管线的维修工作的研究，并将上述第二个阶段的过程进一步优化，以使之应用于更加复杂的操作参数。并对不同场合的位置焊接——平焊、立焊、仰焊以及各种焊缝进行研究，以降低深水焊接难度。此焊接研究组得出的结论是：高压 GMA 焊提供了一种在 400m~2500m 的水深范围内可行的连接方式，能在无人情况下对深水管道和支架进行条状焊缝的修补，并能保证深水管道热渣连接的密封性能。

由于人类饱和潜水的深度极限是 650m，熟练深水焊工难以培训，为了实现深水施焊以及水下焊接自动化，水下自动化轨道焊接系统以及水下焊接机器人迅速发展起来。TIG 焊具有熔化率随压力增加而增加、低氢吸附率、可实现全自动焊、利用磁场和相应的电源能对电弧进行有效控制等特点，最早用于发展水下高压轨道焊系统。轨道式高压 TIG 焊是成熟的、目前流行的海底管道焊接技术。目前水下高压轨道 TIG 焊系统主要有 Aberdeen Subsea Offshore Ltd 的 OTTO 系统、Comex 公司的 THOR-1 系统以及 Norsk Hydro 和 SNITEF 的 IMT 系统。

北京石油化工学院所承担的国家“十五”863 计划项目“水下干式管道维修系统”，目前进展顺利，正在对焊接电源进行适应性改造，并进行了焊接模拟实验，常压下电缆长度 200m 以上仍能正常焊接。高压焊接实验舱正在制造，并将于近期交付使用。水下高压双层管道自动焊机等方面的研究工作也正在开展。

#### 1.3.2 常压干法水下焊接

焊接在密封的压力舱中进行，压力舱内的压力与地面的大气压相等，与压力舱外的环境水压无关。实际上这种焊接方式既不受水深的影 响，也不受水的作用，焊接过程和焊接质量与陆上焊接时一样。常压干法焊接设备造价比高压干法水下焊接还

要昂贵,焊接辅助人员也更多,所以一般只用于深水,焊接重要结构。此方法的最大优点就是可以有效地排除水对焊接过程的影响,其施焊条件完全和陆地焊接时的一样,因此其焊接质量也最有保证。目前常压干法水下焊接技术应用很少,在焊接工艺与焊接冶金方面与陆上焊接也没有什么差别。美国TDS公司正在研制能在600m深水下进行常压干法水下焊接的装置,用于焊接管径900mm,壁厚32mm的管道,干法气室为圆筒状,直径2.4m,长3.66m,两端呈椭圆形。我国目前还没有常压干法水下焊接设备。

## 2 水下焊接技术研究的趋势

(1) 由于每种焊接方法(湿法,局部干法,干法)都有其各自的优点和适应场合,因此,多种水下焊接方法并存的局面会长期存在。

(2) 湿法水下焊接的质量主要受水下焊条、水下药芯焊丝等因素的影响和制约,英、美等国已发展了多种高质量的水下焊条,我们也应该加快开发研制高质量水下焊条、水下药芯焊丝。通常湿法焊接的水深不超过100m,目前的努力方向是,实现200m水深湿法焊接技术的突破。

(3) 基于先进技术,对焊接过程进行监控的研究已经取得某些进展,主要体现在水下干法和局部干法焊接中的自动化和智能化。例如遥测遥控技术已经在水下焊接中取得了初步应用,采用遥控遥测技术,可以实现水下安装检测中的焊接加工,目前已在水下管道安装维护中取得进展<sup>[10]</sup>,最近华南理工大学的廖天发等人采用VC++编程实现了串口通讯(SPC),用于远程控制水下焊接焊前的焊缝对中以及焊接过程中的焊缝跟踪<sup>[11]</sup>。自动化的轨道焊接系统和水下焊接机器人系统,能对焊接过程自动监控,焊接质量好,节省工时,而且还能减轻潜水员的工作强度。但是目前的水下焊接机器人系统还存在许多问题,其灵活性、体积、作业环境、检测和监控技术以及可靠性等还有待于进一步发展和提高,这是目前我们的努力方向。

(4) 模拟技术的出现及发展,为焊接生产朝着“理论—数值模拟—生产”模式的发展创造了条件,使焊接技术正在发生着由经验到科学、由定性到定量的飞跃。目前陆上焊接过程的温度场、流场以及熔池、焊缝应力等的模拟取得了较大进展,焊接电弧的模拟也有一定的研究,但对水下焊接的模拟研究还比较滞后。德国的Hans-Peter Schmidt等人对电流在50-100A范围内,压力0.1-10Mpa,钨极氩保护情况下的水下高压焊接电弧进行了模拟研究,用数学方法解守恒方程得出了温度、速度、压力和电流的分布。其中电弧温度的测量结果与理论分布吻合良好。随着海洋石油和天然气工业的发展以及我国海洋工程向深海的挺进,应当重视和加快针对水下焊接这方面的数值模拟研究。目前我们也正在着手进行高压环境下焊接电弧的数值模拟这方面的研究工作。

(5) 计算机仿真是一项很有用的技术,它在焊接工艺的制定、焊接设备的研制以及控制系统的改进等方面的研究中都有应用<sup>[12]</sup>。Dag. Espedalen等人对高压干法水下焊接进行了仿真技术研究,首先利用SolidEdge建立焊接舱和焊接机器人的3D模型,然后再转化为I-grip运动模型,编制合适的控制程序,整个海底管道维修操作过程就演示出来<sup>[13]</sup>。通过焊接仿真,有助于构思新方案,并能提前发现的问题,这也是我们以后应当研究的一个领域。

### 参考文献:

- 1 Stephen Liu Mark Rowe. Progress in underwater Wetwelding: The Quintessential SMA Consumables, 2003.
- 2 石永华 王国荣等. 水下药芯焊丝焊接的工艺特点与研究进展. 焊接技术. 2000, 29 (2)
- 3 刘桑等. 药芯焊丝水下焊接方法的研究. 南昌大学学报(工科版). 2000, 22 (2)
- 4 梁明等. 采用小波分析的水下药芯焊接焊缝图像边缘检测技术. 电焊机. 2004, (2)
- 5 Yoji Ogawa. Mechanized underwater welding and cutting for VLFS. 2002
- 6 张旭东等. 局部干法水下ND: YAG激光焊接技术. 应用激光. 2002, 22 (3)

- 7 陈锦鸿 肖志平. 水下干式高压焊接在海(河)底管线维修中的应用. 焊接技术. 1998, 27(6)
- 8 S. A. Blackman and N. J. Woodward. Hyperbaric repair and hot-tapping of deepwater pipelines and risers
- 9 Ian M. Richardson . Neil J Woodward . John Billingham. Deepwater welding for installation and repair—A viable technology? 2002
- 10 皮佑国 黄石生. 遥测遥控技术在焊接中的应用. 焊接技术. 1997(1)
- 11 廖天发等. VC++串口通信在水下焊接远程控制中的应用. 焊接技术. 2004, (1)
- 12 杜乃在. 计算机仿真在焊接学科中的应用. 焊接技术. 1999, (1)
- 13 Dag E . Virtual deep-sea unmanned welding [D]. [Master Paper]. Norway: Narvik college, 2001