

高压水下焊接设备与技术的发展

王中辉, 蒋力培, 焦向东, 周灿丰, 陈家庆
(北京石油化工学院 机械工程系, 北京 102617)

摘要:介绍了国内外高压干法水下焊接模拟实验装置和高压干法水下焊接维修作业装备系统的发展现状,重点论述了高压下对焊接电弧行为的研究情况,包括环境压力对焊接电弧形态、稳定性、电弧电压特性、电弧电流密度、电弧温度场等的影响及变化规律。指出了高压干法水下焊接技术的发展方向及我国研究高压干法水下焊接技术的必要性。

关键词:高压干法水下焊接;装备;电弧

中图分类号: TG456.5 **文献标识码:** C **文章编号:** 1001-2303(2005)10-0009-03

Technology and equipment development of hyperbaric welding

WANG Zhong-hui, JIANG Li-pei, JIAO Xiang-dong, ZHOU Can-feng, CHEN Jia-qing

(Department of Mechanical Engineering, Beijing Institute of Petro-chemical Technology, Beijing 102617, China)

Abstract: It introduces the hyperbaric welding simulation experiment device and hyperbaric welding repair equipment system at home and abroad, especially for arc performance (geometry, stability, voltage, current density and temperature) under high pressure. Eventually, it points out the further development trend of hyperbaric welding and the necessity of research the domestic hyperbaric welding technology.

Key words: hyperbaric welding; equipment; arc

序言

随着人类对海洋的开发,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。因此,发展水下焊接技术已刻不容缓。目前,世界各国正在应用和研究的水下焊接方法种类繁多,可以说,陆上生产应用的焊接技术几乎都在水下尝试过,但比较成熟、应用较多的还是几种电弧焊。水下焊接一般依据焊接所处的环境大体上分为 3 类:湿法水下焊接、干法水下焊接和局部干法水下焊接。不采取特殊的排水措施,焊件的接缝在水中焊接的方法称为湿法水下焊接;潜水焊工和工件直接处于水中,采用特殊构造的排水罩罩住待焊部位,用空气或保护气体将罩内的水排开,形成一个局部气相空间而进行焊接的方法,称为局部干法水下焊接;用气体将焊接部位周围的水排开,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称为干法水下焊接,

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压力不同,干法水下焊接又分为高压干法水下焊接和常压干法水下焊接。随着海底焊接工程的增多、海底工程深度的加大和对焊接质量要求的提高,高压干法水下焊接以其焊接质量高、接头性能好等优点越来越受到重视。许多国家加大了对高压干法水下焊接技术的研究与应用。在此介绍与高压干法水下焊接装备、技术相关的研究与应用情况,并对高压干法水下焊接技术的进一步发展提出了一些见解。

1 焊接模拟实验装置

进行高压干法水下焊接实验一般都需要建造复杂的模拟实验装置,同时,装置中还可进行焊接工艺评定试验。目前,致力于海洋开发的国家或大公司都建有高压模拟实验装置。

巴西 CENPES 中心的水下高压焊接舱由环境控制室、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 6 部分组成。最大模拟压力 5 MPa,最高环境温度 60 °C,内部湿度 30%~100%,环境气体为 He、Ar、N₂ 或压缩空气。焊接舱空间 1.2 m³。主要开展的研究工作有:焊接方法的选择;焊

收稿日期: 2005-03-13

基金项目: 国家十五 863 重大计划资助项目(2002AA602012-3);
北京市自然科学基金暨北京市教育委员会科技发展计划重点资助项目(Z200410017008)

作者简介: 王中辉(1968—),男,山东泰安人,副教授,主要从事高压干法水下焊接技术的研究工作。

接参数优化;焊接过程自动控制;环境、接头坡口、热循环、保护气体及冶金因素对焊接性的作用等。

挪威 SINTEF 建立在挪威科技大学的舱内无人高压干法水下焊接模拟实验装置名为 Simweld。整套装置由压力舱、气体控制单元、舱内焊接头、电源、顶部控制计算机、底部控制计算机、步进电机和焊枪控制箱 7 大部分组成。压力舱为一端开口,另一端封闭的厚壁圆柱筒,开口端为球形封头。焊接系统基于 TIG 轨道焊机,焊丝从焊接熔池前方送进,采用脉冲焊接电流以改善焊接过程中对焊接熔池的控制情况。

英国 Cranfield 大学海洋工程中心在原有 1 000~1 100 m 水深舱内无人高压干法水下焊接模拟实验装置的基础上,于 1990 年初又研制了一套能模拟 2 500 m 水深的舱内无人高压干法水下焊接模拟实验装置 Hyperweld250 Simulator^[1]。该系统主要由压力舱、气体压力和流量控制系统、内部操作系统、焊接电源、控制和数据分析系统 5 大部分组成。压力舱尺寸为 φ 1.1 m \times 1.2 m,为一端封闭,另一端开口的铸造厚壁圆柱筒状结构,开口端用管塞进行封闭,整个厚壁圆柱筒安放在滚轮支架上,在液压作用下来回移动,管塞外端固定安装在支撑架上,全部穿舱件安装在管塞中心部分与舱内相通。气体压力和流量控制系统分别针对纯氦气、纯氩气和混合气体使用了 3 个独立的气体存储系统,分别存储 2 MPa、6 MPa 和 20 MPa 3 种气体压力,最后通过一个气体压力为 35 MPa 的缓冲储气瓶向压力舱供气。为了能同时进行平板和管状构件的焊接,Hyperweld250 Simulator 以机械框架的形式来构建焊接系统,该机械框架能安装在一个圆形或直线轨道上,框架上带有其自身运动所需的驱动电机、焊枪及其摆动机构、送丝机构以及焊接熔池观察系统。

哈尔滨焊接研究所从 20 世纪 80 年代开始研究高压干法水下焊接技术,先后研制了 HSC-1 和 HSC-2 两套高压干法水下焊接模拟实验装置。HSC-1 的容积为 1 m³,最大工作压力 1.6 MPa,可进行熔化极气体保护焊;HSC-2 的容积为 0.055 m³,最大工作压力 3 MPa,介质为氩气、氦气或混合气体,可进行 TIG 焊和 MMA 焊接试验。20 世纪 90 年代以后,研究就处于停顿状态,可以说,国内目前在高压干法水下焊接技术的研究仍然处于探索阶段,还缺乏适合我国的水下焊接作业标准和规范^[1]。

2 焊接作业维修装备系统

在水下管道维修作业中,国外多采用高压轨道

TIG 焊系统进行,较为知名的作业装备系统有 PRS 系统和 OOTO 系统。

PRS 系统由挪威 Statoil 公司组织开发,该系统主要有调整框架、高压焊接舱、海底能量供给和通信单元、地面控制部分组成。设计目标是能从事 1 000 m 水深的焊接,采用全自动的轨道 TIG 焊机,焊接参数预先设定,焊接全过程由计算机控制完成,在管道焊接接头上安放 2 套送丝机构和 2 架监控相机,这样可实现管道两面同时对称焊接,焊接方向从上向下,以减少管道的焊接变形。这正是该系统的创新点。焊缝质量主要取决于焊前装配、预热、消磁和保护气体流量。在水深 334 m 成功地进行了管道焊接,焊缝-30℃冲击功达到 300 J,焊缝的显微硬度低于 245 HV^[2]。该系统迄今为止已经成功完成 20 多处水下管道维修任务。

英国的 OOTO 系统主要由焊接舱和轨道 TIG 焊机组成,另外还包括电气控制室、供应室和监控室,整个系统采用光纤传导和计算机进行监控。经过陆上和水下模拟焊接的系列实验,制定了可行的焊接工艺,取得了较为满意的焊接质量,并对各种缺陷的出现采取了相应的预防和解决措施。实验表明,135 m 水深的焊缝-10℃冲击功达到 180 J,断裂强度达到 550 MPa^[3]。该套系统曾在海底连续工作过 4 周,累计完成了 18 处焊缝,焊接程序和质量获得了挪威劳氏船级社的认证。

陈锦鸿等人采用高压干法水下焊接技术修复了广州市一过河水管,水管直径为 630 mm,壁厚 8 mm,焊接舱设计尺寸为 2 m \times 2 m \times 2.5 m,排水用空压机为 6 m³ 国产空压机,采用 AX4-300-1 直流焊机,水深 15 m。水管的成功维修标志着我国的水下焊接技术获得了新的发展^[4]。

3 高压干法水下焊接技术的研究成果

高压干法水下焊接技术的研究包括焊接工艺、焊接方法、焊接设备等多方面的研究,其中最主要的就是对焊接电弧的研究。对高压气氛中电弧特性的研究是了解高压干法水下焊接过程特点,开发相应的焊接材料和获得良好焊接接头的关键。在此主要介绍这方面的研究情况。

气体压力的升高使电弧的形状发生了变化。高莹波等人对不同气压下的 Ar 弧和 He 弧形态进行研究^[5]。结果表明,随着气体压力的升高,电弧逐渐收缩,由常压下的钟状变为高压下的柱状。电弧的亮度也随气压的升高而增强,尤其是氦弧,这种现象更为

明显。这种变化在 0.1~0.6 MPa 之间变化较为显著。

Suga Y 在模拟压力舱中对 GTAW 焊接电弧进行了观测^[6]。电弧在钨阴极和铜阳极间燃烧,Ar 环境中弧长 3 mm,He 环境中弧长 2 mm,焊接电流 100 A。结果表明,在 0.1 MPa 的环境压力下,电弧的亮度低,弧柱直径大,阴极斑点均匀分布在电极尖端较宽的范围。在 1 MPa 的环境压力下,弧柱直径减小,亮度增加,阴极斑点向电极尖端集中。因而在高压焊接环境下,由于阴极斑点电流密度的增加使电极尖端强烈加热,从而导致电极尖端冲蚀磨损的加剧。

电弧电压是弧柱能量平衡的标志,钨极惰性气体保护焊(GTAW)焊接电弧的稳定性可由电压信号的噪声反映出来。随着环境压力的增加,电压信号噪声水平明显增大。主要原因可能与弧柱气流从稳流向湍流的转变有关。因保护气体流速的不同,稳流向湍流的转变发生在环境压力为 0.3~0.5 MPa 的条件下。GTAW 湍流电弧引起弧柱等离子状态的随机改变,导致工件表面阳极斑点不规则的运动,使焊缝成形恶化。尽管如此,在较大的环境压力变化范围内,GTAW 仍有足够的电弧稳定性。目前 GTAW 通常可用的水深范围在 360 m 以内。

哈尔滨焊接研究所在试验舱中对 TIG 焊的电弧稳定性进行了研究。为了定量描述电弧稳定性,定义单位时间内电弧长度的变化量为电弧燃烧不稳定性 \bar{S} ,记为

$$\bar{S} = \frac{\sum_{i=1}^n |\Delta l_{ai}|}{t_a} = f \cdot \frac{\Delta U_a}{E}, \quad (1)$$

式中 f 为电弧电压波动频率,即单位时间内电弧电压的波动次数; ΔU_a 为电弧电压平均波动幅值; E 为弧柱的电场强度。

通过焊接过程中记录的 $U_a(t)$ 曲线,计算得出 \bar{S} 。结果表明:高压下的电弧稳定性较常压下的差;在高压下,氩弧的稳定性比氦弧差。

J.H.Nixon 的著作《Underwater repair technology》中给出了描述电弧电压和环境压力近似的关系式^[7]

$$U_{ARC} = 9 + El\sqrt{TOP}, \quad (2)$$

式中 P 为环境的绝对压力(单位:MPa); U 为电弧电压(单位:V); l 为电弧长度(单位:m); E 为 1 个大气压时的电场强度(单位:V/m),在 Ar 和 He 气体条件下分别约为 800 V/m 和 1 800 V/m。

弧压除了与压力有关外,还与气体种类有关。对于混合气体,电场强度与气体成分成比例。例如, $\varphi(\text{Ar})=75\%$ 和 $\varphi(\text{He})=25\%$ 混合气体的电场强度是

$$E=0.75 \times 800 \text{ V/m} + 0.25 \times 1\ 800 \text{ V/m} = 1\ 050 \text{ V/m}。 \quad (3)$$

Suga Y 研究表明,环境压力对电弧电流密度也有重要影响^[6]。采用 GTAW 焊接方法,试验研究了 Cu 阳极表面的电流密度分布。测量采用表面探针法,测量结果显示:不论是 Ar 弧还是 He 弧,对于 100 A 的焊接电流,在 0.1 MPa 的环境压力下,电流密度的径向分布均较为平缓。但随着环境压力的增加,电弧中心的电流密度显著增加,这是由于在高压下电弧受热收缩作用造成的。从上述电流密度分布的测量可以看出,随着环境压力的增加,电弧中心的最大电流密度增加,所以高压电弧中心的温度也将提高,电弧也更明亮。

H. P. Schmidt 等人对高压环境下的电弧进行了理论和实验的研究^[8],建立了专门的实验装置,在不同压力下对氩弧温度进行了测量,同时,基于电磁场理论建立了电弧二维数学模型,计算出电弧的温度场,研究结果表明:随着环境压力的增加,电弧温度下降。压力从 0.1 MPa 升到 1.0 MPa 时,温度下降明显;当压力从 1.0 MPa 升到 10 MPa 时,温度下降不太明显。

对于 GTAW 焊,焊接效率从陆地常压下的 90% 下降到 60 m 水深的 70%,而 80 m 水深焊接效率又恢复为 75%,之后基本保持不变。对于恒定的工作电流,弧压随水深增加的速度比焊接效率下降速度快。

4 高压干法水下焊接技术发展趋势

目前的高压干法水下焊接通过采用自动化和智能化的技术,实现了焊接过程的自动监控,焊接质量好,效率高,但仍然需要潜水焊工,焊接设备的安装、维护和检测都需要潜水员的辅助,因而在实际使用的焊接系统还不能超过 650 m,而且对潜水焊工的专业和技术要求很高。所以,随着海洋工程向深海的挺进,必须发展智能化的无人焊接机器人。焊接智能控制系统的反馈传感检测技术正在研究之中。由于高压干法水下焊接环境的复杂性和不确定性,如何采用多信息融合技术最终达到对焊接过程的智能监控将成为焊接领域的新课题。焊接电弧直接影响焊缝成形和接头质量,研究电弧行为非常重要,但目前有关高压电弧的研究理论上只是初步的,还不十分完整,因此,要系统地研究高压环境下电弧的物理特征,环境参数特别是压力对电弧行为的影响,包括压力对电弧引燃性能的影响、压力对电弧电压和电弧形状的影响、压力对电弧温度和熔敷效率的影响、压力对电弧稳定性的影响