

文章编号:1006-396X(2008)01-0066-04

高压空气环境钨极氩弧焊接电弧静特性

周灿丰¹, 焦向东¹, 薛龙¹, 陈家庆¹, 王中辉¹, 吕涛¹, 房晓明²

(1. 北京石油化工学院海洋工程连接技术研究中心, 北京 102617; 2. 海洋石油工程股份有限公司, 天津 300452)

摘要: 针对高压空气环境的特殊性, 研制了高压焊接试验舱和钨极氩弧自动焊机。在 0.1~0.7 MPa 空气环境中, 考察了电弧静特性, 并提出了电弧电压与空气环境压力、电弧长度、焊接电流三者之间的数学模型。根据电弧静特性及其数学模型, 设定钨极氩弧自动焊机及其焊接电源主要参数, 在 0.1~0.7 MPa 空气环境中, 进行了典型位置 16Mn 钢板的焊接, 采用自由成型工艺形成的全部接头, 符合美国焊接学会 AWS D3.6M:1999 中 A 类接头的要求。

关键词: 高压空气环境; 钨极氩弧焊接; 电弧静特性; 自由成型**中图分类号:** TG455.5 **文献标识码:** A

Arc Static Characteristics of Gas Tungsten Arc Welding Under High Air Ambient Pressure

ZHOU Can-feng¹, JIAO Xiang-dong¹, XUE Long¹, CHEN Jia-qing¹,WANG Zhong-hui¹, LÜ Tao¹, FANG Xiao-ming²(1. *Research Centre of Offshore Engineering Joining Technology, Beijing Institute of Petrochemical Technology, Beijing 102617, P. R. China*; 2. *Offshore Oil Engineering Co., Ltd., Tianjin 300452, P. R. China*)*Received 13 April 2007; revised 25 October 2007; accepted 10 November 2007*

Abstract: The hyperbaric welding test chamber and the automatic GTAW machine were developed for high air ambient pressures. The arc static characteristics curves were tested under 0.1~0.7 MPa air ambient pressures, and the mathematical model of GTAW between arc voltage and parameters such as air ambient pressure, arc length, and current, was created. Based on arc static characteristics and the arc voltage mathematical model, main parameters of the automatic GTAW machine and the welding power were set, then typical position free-forming joints of 16Mn steel plate under 0.1~0.7 MPa were manufactured, which were classified as class A in AWS D3.6M:1999.

Key words: High air ambient pressure; Gas tungsten arc welding(GTAW); Arc static characteristics; Free forming

Corresponding author. Tel.: +86-10-81293719; fax: +86-10-81293719; e-mail: canfeng@bipt.edu.cn

海底管道是海上油气田开发、生产与油气外输的主要生产设施, 目前我国铺设的海底管道总长度已超过 2 000 km, 进入 20 世纪 90 年代后, 随着运行年限的增加及其它各种原因, 相继出现海底管道损坏事故。水下焊接广泛应用于海底油气输送管道等水下结构物维修。国家“十五”863 重大项目“水下干式管道维修系统”的目的是打破国外公司的技

术垄断, 形成 50 m 水深(0.6 MPa)海底管道维修能力。该项目的总体技术方案设计, 与英国 Aberdeen Subsea Offshore Ltd. 的轨道式氩弧焊接作业系统 OTTO^[1]、法国 Comex 公司的氩弧高压焊接轨道式机器人系统 THOR-1^[2]、挪威 STATOIL 公司的管道维修铺设系统 PRS^[3]等相比, 同样是采用轨道式钨极氩弧焊接(GTAW)自动焊接, 但是受限于饱和潜水系统费用的昂贵以及我国在该技术领域的基础比较薄弱, 该项目主要采用常规空气潜水, 并且水下干式舱内加压排水也是采用空气而不是氦气、氦氧混合气体或者氮气。空气作为舱内气体, 带来突出的安全问题以及将熔池与空气中氮气、氧气隔离的困难, 并且高压空气环境下的电弧物理特征,

收稿日期: 2007-04-15**作者简介:** 周灿丰(1970-), 男, 湖南湘潭市, 副教授, 工学博士。**基金项目:** 国家 863 高科技资助项目(2002AA602012); 国家自然科学基金项目(40776054)。

钢的焊接性等都没有相关的研究文献报道。文献[5-7]虽然对高压 GTAW 焊接电弧、熔池、钨极烧损、外磁场影响、焊接工艺、焊接质量等开展了研究,但均是采用氩气、氩氧混合气体或者氮气作为舱内加压气体。

气体压力与类型对于焊接电弧有重要影响,从而直接关系到接头质量。本文设计建造了高压焊接试验舱、研制了钨极氩弧自动焊机,对高压空气环境下的电弧静特性进行了实验研究、建立了相应的数学模型,将其应用于典型位置的 16Mn 平板单面焊双面成型,形成的接头达到了美国焊接学会 AWS D3.6M:1999 中 A 类接头即相当于陆上接头的要求。

1 高压焊接试验装置

高压焊接试验装置如图 1 所示,主要由高压气体储罐、高压焊接试验舱、钨极氩弧自动焊机、摄像系统和中央控制台等组成。高压焊接试验舱设计压力 1.5 MPa,相当于 150 m 水深,容器内径 1.6 m,能够满足我国绝大多数海底管道高压焊接试验的需要,其快开舱门启闭通过左右直线移动液压缸实现、卡箍锁紧松开通过旋转液压缸实现。文献[8]进行的 0.1~0.7 MPa 气体爆炸实验表明,压缩空气虽然不爆炸,但是显著助燃,为此,高压焊接试验舱内线缆采取了套加蛇皮管、缠绕石棉布等措施,保证焊接实验过程的安全。此外,为了在高压焊接试验舱中进行焊接试验,还解决了一系列关键技术问题,详见文献[9]。

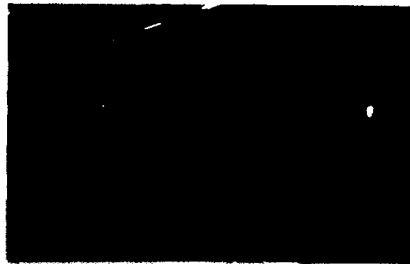


Fig. 1 The hyperbaric welding test facility

图 1 高压焊接试验装置

与陆上焊接相比,应用于高压焊接的钨极氩弧自动焊机,其焊接电源需要足够高的输出电压才能维持相同的弧长,其原因,一方面是电场强度随环境压力增加而增加,另一方面是海底管道维修时,存在与脐带长度成比例的压降损失^[10]。同时,按照海底管道焊接维修的要求,焊接电源必须采用接触引弧保证潜水员与焊机控制系统安全。此外,水下干式舱是有人作业环境,根据有关规范要求其供电电源低于 36 V,为此,焊机头等的所有电机均采用 DC24 V 供电。

钨极氩弧自动焊机的车体采用一体化模型铸铝结构如图 2 所示。除横向摆动电机为 DC24 V 高速步进电机之外,行走电机、钨极高度调整电机,均为电机-减速器-编码器三位一体的 DC24 V 直流伺服电机,其控制原理如图 3 所示。自动焊机控制器只需要向驱动模块输出调速 0~10 V 给定电压、方向 0~5 V 高低电平,直流电机自身即完成速度控制与检测。电机控制模块接受光码盘的反馈信号,与给定信号进行运算、放大之后输出给电机。减速器的减速比则是根据焊接工艺需要,具体计算、选择确定的。电机控制模块采用的是 PID 算法,PID 参数整定由调试 PC 及其专用调试软件设定,试验结果根据软件设计的响应曲线来判断,PID 参数整定结果存入电机控制模块,调试 PC 即可撤离。

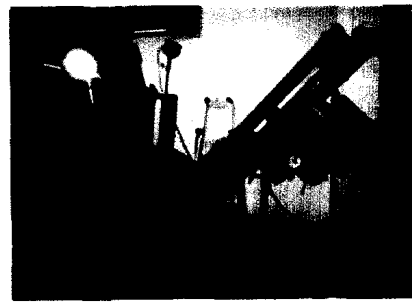


Fig. 2 The automatic GTAW machine

图 2 钨极氩弧自动焊机

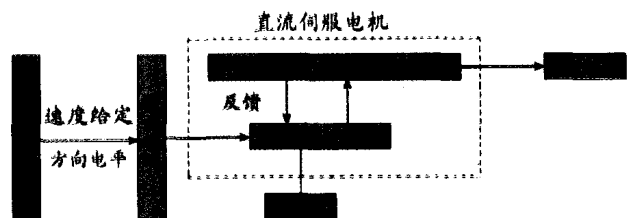


Fig. 3 DC servomotor control

图 3 直流伺服电机控制

2 GTAW 电弧静特性实验

在弧柱区,由于弧柱温度很高,带电粒子主要依靠热电离而产生,热电离与气体温度、气体压力、气体电离能等因素满足公式(1)所示的 Saha 公式。

$$\frac{x^2}{1-x^2} p = 3.16 \times 10^{-7} T^{2.5} \exp\left(-\frac{eU_i}{kT}\right) \quad (1)$$

式中: x —气体的电离度,%;

p —气体压力,Pa;

T —气体温度,K;

e —电子的电量,C;

k —玻耳兹曼常数, 1.38×10^{-23} J/K;

U_i —气体的电离电压,V。

气体电离度的高低表征了气体导电的难易程度,反应在电弧特性上就是弧柱的电场强度的高低。当其它条件一定时,气体压力越高,电离度就越低。

单位长度单位时间内电弧产生的热量等于 IE , 在相同电流 I 的情况下, 弧柱电场强度 E 必然增加。对于 3~6 mm 的系列弧长, 在高压焊接试验舱中测定了 0.1~0.7 MPa 不同空气压力下的 GTAW 电弧电压与电弧静特性曲线, 其中, 5.5 mm 的静特性曲线如图 4 所示。

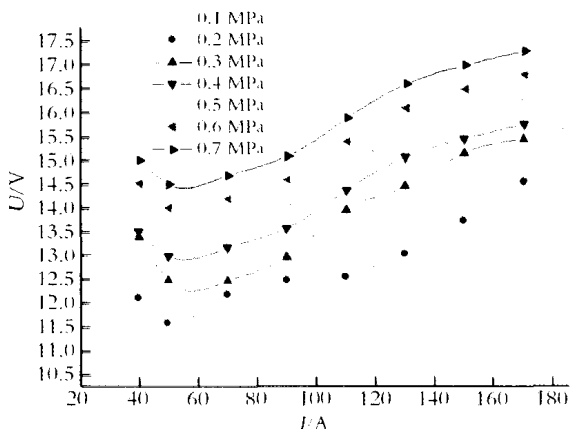


Fig. 4 Static characteristic curves of GTAW arc under high air ambient pressure

图 4 高压空气环境氩弧的静特性曲线

分析高压空气环境下氩弧的静特性曲线, 可以获得以下结果。

(1) 各种压力的空气环境下 GTAW 电弧电压值略高于同样压力的氩气环境下氩弧值。

空气的主要成分是氮气, 氮气导热系数大, 散热快, 对电弧的冷却作用强。

(2) 空气环境下氩弧静特性类似于其它气体保护焊, 在电流较大时 (大于 50 A) 为上升特性曲线。

(3) 空气环境下氩弧静特性随空气压力增加而向上平移, 其平移量约为 5~10 V/MPa。

(4) 由于高压空气环境下的氩弧电压与氮气环境及氩气环境下的氩弧电压相差不大, 大约 1 V, 高压空气环境下的氩弧对焊接电源空载电压的要求与氮气环境及氩气环境下的氩弧相同。

3 GTAW 电弧静特性数学模型

GTAW 数值模拟多数是在常压之下进行的。个别文献, 例如文献 [11] 的弧压数学模型 (公式 2), 但该模型局限于特定的磁场干扰条件, 并且是以氩气为加压气体。

$$U_{arc} = E_0 \sqrt{p/10} \cdot \sqrt{l_0^2 + (\alpha B)^2} + U_0 \quad (2)$$

式中, U_0 —阴阳极电压, V;

E_0 —电弧弧柱区的电场强度, V/m;

p —环境压力, MPa;

l_0 —电极间距, m;

B —外部磁场, T;

$\alpha \cdot B$ —电弧弧柱区由于外部磁场的干涉引起的电弧长度的增加, α [m/T]: 经验参

数取 0.7。

实际上, 影响 GTAW 数学模型的因素很多, 理论模型难以建立, 针对具体的实际应用, 有时也无必要。

本文实验基础之上, 通过数据处理建立了经验模型。试验时, 电流取 40, 50, 70, 90, 110, 130, 150, 170 A, 电弧长度取 3.4, 4.5, 5.5, 6 mm, 空气环境压力取 0.1, 0.2, 0.3, 0.4, 0.5, 0.6, 0.7 MPa, 分别测量不同电流、电弧长度、空气环境压力下的电弧电压值。

对所有数据进行分析得出, 在 L, I 一定的情况下, U 与 p 是近似线性关系; 在 p, I 一定的情况下, U 与 L 是近似线性关系; 在 p, L 一定的情况, U 与 I 是近似线性关系。既然 U 与 p, L, I 都是近似线性关系, 就可以利用多元线性回归的方法对试验数据进行多元线性回归, 这样就得到公式 (3) 所示的高压空气环境下电弧电压的数学模型:

$$U = 5.3445 + 9.84167p + 0.6333L + 0.01972I \quad (3)$$

该数学模型建立了电弧电压与空气环境压力、电弧长度、焊接电流三者之间的关系。该数学模型可用于计算高压空气环境中的氩弧电压, 其适用范围为: 空气环境压力 0.1~0.7 MPa, 焊接电流 40~170 A, 电弧长度 3~6 mm。

4 GTAW 电弧静特性的应用

为了保证油气输送畅通, 海底管道维修焊接不允许采用背面衬垫, 而必须是围绕管道的全位置自由成形。按照模拟管道全位置焊接的需要, 平板实验选择如图 5 所示 8 个代表性位置, 每个位置进行 0.1, 0.3, 0.5, 0.7 MPa 压力级别的焊接试验。平板焊接位置规定: 位置 E 为焊接起点, 逆时针、整圈, 即 E→D→C→B→A→H→G→F。

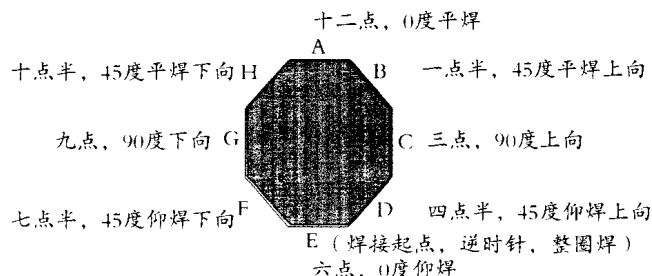


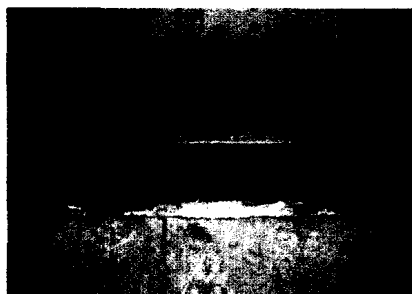
Fig. 5 Welding test design

图 5 焊接试验设计

试验板材单块尺寸 510 mm×100 mm, 厚度 10 mm, 材料为石油以及石油化工广泛采用的 16Mn¹², 60° V 型坡口, 未留钝边。钨极为直径 $\phi 3.2$ mm 钽钨极, 焊丝直径 $\phi 0.8$ mm、型号为 AWS5.18 ER70S-6。数控脉冲氩弧焊接电源 WSM-400 为直流正接。

采用静特性实验数据以及电弧电压数学模型, 设定了钨极氩弧自动焊机及其焊接电源主要参数, 进行了全部 32 种工况的平板焊接, 均采用单面焊接双面自由成型工艺, 所形成的试件按照美国焊接学会 AWS D3.6M: 1999 进行了拉伸、冲击、弯曲和维氏硬度试验(HV10), 均达到了 A 类接头的要求, 其

中图 6 为 0.7 MPa 压力即 0.6 MPa 表压之下试件位置 D 的正面和背面焊缝。该试件的抗拉强度 590 MPa, -10°C 冲击功的 3 次试验数值均大于标准要求的 27 J、分别为 100, 40, 96 J, 180° 弯曲没有裂纹, 焊缝 WM 和热影响区 HAZ 硬度与母材 BM 硬度相当, 不存在淬硬问题。



(a) 正面焊缝



(b) 背面焊缝

Fig. 6 Welding seam in position D

图 6 焊接试件位置 D 焊缝

参 考 文 献

- [1] Lyons R S. Underwater orbital GTAW welding[J]. Metal construction, 1985, 17(8): 504-507.
- [2] Dos Santos J F. Diverless pipeline welding beyond 600msw[C]// Proceedings of 11th international conference on offshore mechanics and arctic engineering (OMA92). Canada; Calgary, 1992: 153-163.
- [3] Davis M. Trolling the depths with a new system[J]. Welding & metal fabrication, 1996, 64(8): 20-22.
- [4] John Nixon. Underwater repair technology[M]. Cambridge: woodhead publishing Ltd., 2000.
- [5] Allum C J. Characteristics and structure of high pressure (1-42bars) gas tungsten arcs[D]. Cranfield, Bedfordshire, England; Cranfield institute of technology, 1982.
- [6] Yoji Ogawa. Effect of ambient pressure on arc-electrode behavior[C]// Proceedings of the 14th international offshore and polar engineering conference (ISOPE). France; Toulon, 2004: 171-177.
- [7] Cross C E. Nitrogen control in hyperbaric welding of duplex stainless steel[J]. Welding research abroad, 1998, 44(3): 23-30.
- [8] 周灿丰. 以空气为舱内加压气体的钨极氩弧焊接[J]. 焊接学报, 2007, 28(2): 5-8.
- [9] 周灿丰. TIG 焊机应用于高压焊接试验舱的关键技术[J]. 焊接技术, 2005, 34(5): 14-16.
- [10] 周灿丰. 高压 TIG 焊接技术及其应用研究[J]. 焊接技术, 2004, 33(5): 34-35.
- [11] Gunter S. Experimental and theoretical investigation of high-pressure arcs—part II: the magnetically deflected arc[J]. IEEE transactions on plasma science, 1996, 24(4): 1239-1248.
- [12] 王岩. 逆焊接处理对不同材料抗应力腐蚀性能的影响[J]. 辽宁石油化工大学学报, 2007, 27(3): 32-34.

(Ed.: WYX, Z)

(上接第 37 页)

- [2] Ramachdran V S, Yoshihiko. 混凝土化学外加剂—国际研究最新进展[C]. 北京: 中国建筑材料科学研究院, 2000: 14-15.
- [3] 李崇智, 冯乃谦, 李永德, 等. 高性能减水剂的研究现状与展望[J]. 混凝土与水泥制品, 2001(2): 3-6.
- [4] Sakai E, Yamada, Ohta A. Molecular structure and dispersion-adsorption mechanisms of comb-type superplasticizers used in Japan[J]. Journal of advanced concrete technology, 2003, 1(1): 16-25.
- [5] Yoshioka K, Tazawa E, Kawai K, et al. Adsorption characteristics of superplasticizers on cement component minerals[J]. Cement and concrete research, 2002, 32(10): 1507-1513.
- [6] Ohta A, Uomoto T. Study on the dispersing mechanisms of poly-carboxylate-based dispersant[J]. Cement science and concrete technology, 1998, 49(10): 137-143.
- [7] Kato H, Yoshioka K. Influence of sulfate ion on the fluidity of cement paste containing poly-carboxylic type superplasticizer[J]. Cement science and concrete technology, 1998, 52(10): 144-151.
- [8] 葛兆明. 混凝土外加剂[M]. 北京: 化学工业出版社, 2005: 20.
- [9] 潘祖仁. 高分子化学[M]. 北京: 化学工业出版社, 2002: 18.

(Ed.: YYL, Z)