

专题综述

海洋工程深水焊接新技术

北京石油化工学院光机电北京市重点实验室 (102617)

海洋石油工程股份有限公司 (天津市 300452)

中国搅拌摩擦焊中心 (北京市 100024)

周灿丰 焦向东 陈家庆

薛龙 吕涛

房晓明

栾国红

摘要 在描述海洋工程深水焊接的意义与困难的基础之上,系统介绍了应用于深水的高压 TIG 焊接、高压 MIG 焊接和摩擦叠焊,对以空气为加压气体的高压 TIG 焊接、外加纵向磁场强化高压脉冲 MIG 焊接熔滴过渡的技术方案与实验系统设计、水下摩擦叠焊实验装置方案设计等做了研究工作。

关键词: 海洋工程 深水焊接 高压 TIG 焊接 高压 MIG 焊接 摩擦叠焊

NEW DEEPWATER WELDING TECHNOLOGIES APPLIED IN OFFSHORE ENGINEERING

Beijing Institute of Petrochemical Technology

Offshore Oil Engineering Co., Ltd

China FSW Center

Zhou Canfeng, Jiao Xiangdong, Chen Jiaqing

Xue Long, Lü Tao

Fang Xiaoming

Luan Guohong

Abstract The significance and difficulty of deepwater welding applied in offshore engineering were described as well as several new technologies such as hyperbaric TIG welding, hyperbaric MIG welding and friction stitch welding were introduced. Hyperbaric TIG welding when air was used as the gas-pressurized, the technology scheme and experimental design of hyperbaric MIG welding when the droplet transfer was intensified by the applied magnetic field, and the scheme design of experimental assembly about the underwater friction stitch welding were studied.

Key words: offshore engineering, deepwater welding, hyperbaric TIG welding, hyperbaric MIG welding, friction stitch welding

1 海洋工程深水焊接的意义与问题

当前,在国内科学与技术长期规划的战略研究中,石油天然气部分的研究受到了国家的高度重视,提出了“调整东部,发展西部,加快海上”的总方针。现在海上石油资源开发已经基本上形成了一个高速高效的发展势态并成为新的经济增长点。国内海洋石油工业的发展方向与世界海洋石油发展的趋势相同,即都是走

向深水。海洋石油的一般概念,300 m 以下叫浅水,300 ~ 1 500 m 之间的范围叫深水,超过 1 500 m 就叫超深水,当然,这只是当今世界开发海上油田能力的反应。国内南海的深水区域拥有丰富的油气资源,中国海洋石油总公司已经向世界公开招标的、面积相当于渤海的深水区域的水深是 600 ~ 2 000 m。为了实现深水战略目标,成立了深水工程重点实验室,为走向深水提供技术支持^[1]。海洋平台和海底管道等各种海洋结构物

的陆上预制、海上安装与水下修复的基本手段是连接技术。因为水深、结构形式、重要性差异显著,正在使用或者拟将使用的海洋工程连接方法,尤其是水下连接方法相当丰富,如图 1 所示,针对某个具体的工程,连接方法的选择往往取决于技术与经济的平衡。

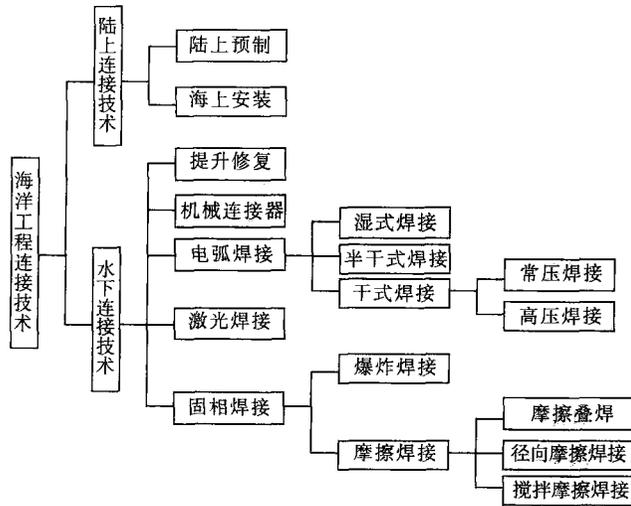


图 1 海洋工程连接技术分类

机械连接器结构简单、价格相对便宜,应用于水下不受水深影响,但是,有时可能会损害海洋结构性能,造成海洋结构接受认证机构设计评估时的担心;提升修复和围堰焊接只能应用于某些具备相应作业条件的特殊场合,而且通常只能应用于很浅的水域^[2];水下焊条湿式焊接与局部排水半干式焊接,一般只用于几米至几十米水深非重要结构物修复,实际应用水深通常不超过 40 m。

干式高压 TIG 焊接接头质量能够符合美国焊接学会 AWS D3. 6M: 1999 等标准的要求,是目前海底管道等重要结构物水下修复普遍采用的焊接方法。挪威 STATOIL 公司的 PRS 系统于 1994 年进行了 334 m 水深的管道焊接获得成功, - 30 冲击功达到 300 J,焊缝显微硬度低于 245 HV^[3]。但是,研究表明,随着环境压力增加,TIG 焊电弧稳定性降低,高压 TIG 焊的工作深度极限大约是 500 m。

对于 500 m 甚至 1 000 m 以深海洋结构物的水下修复,高压 MIG 焊接与摩擦叠焊 (Friction Stitch Welding) 是最具备应用前景的两种方法。高压 MIG 焊接存在的主要问题是压力环境之下熔滴过渡受阻问题,以英国 Cranfield University 为代表的研究单位采用将弧

长控制在很短的方案对于工程应用而言局限性很大; 20 世纪 90 年代末期以来摩擦叠焊在欧洲得到了很大发展,该技术应用于海洋平台、海底管道修复,要求大刚度并联机器人的支持。实施深水焊接的另一个困难是人类饱和潜水极限深度 (650 m) 的限制,需要开发无潜水员辅助的全自动作业系统。

2 高压 TIG 焊接研究与应用

干式高压焊接的焊接舱底部开口,舱内海水由水面供应的高压气体排出,舱内气压与舱外水压基本平衡,密封比较容易实现而且舱体重量较轻,焊接在高压气氛之中进行。TIG 焊接因为电弧稳定性好、成形好、易于控制、特别适合于封底焊等特点,是高压环境首选的、研究最为充分的焊接方法。现有的海底管道高压焊接修复作业系统一般均采用轨道式高压 TIG 焊接,如 Aberdeen Subsea Offshore Ltd 的 OTIO 系统^[4]、Comex 公司的 THOR - 1 系统^[5]、STATOIL 公司的 PRS 系统,该类系统技术研发重点是提高作业的自动化水平,例如,Comex 公司新一代的 THOR - 2 系统在实时控制、焊接机头和焊接轨道的安装、专家系统和焊接速度等方面取得了重要进展。

“十五”863 计划重大专项“渤海大油田勘探开发关键技术”设置了由海洋石油工程股份有限公司牵头的“水下干式管道维修系统”课题,北京石油化学学院水下焊接研究组承担了其中的“水下干式高压焊接”子课题,于 2004 年设计建造了目前国内唯一的高压焊接试验装置^[6],如图 2 所示,该装置设计压力为 1.5 MPa。2005 年采用自主研制的高压 TIG 焊接试验样机完成了平板高压焊接试验,在 2006 年计划进行海底管道高压

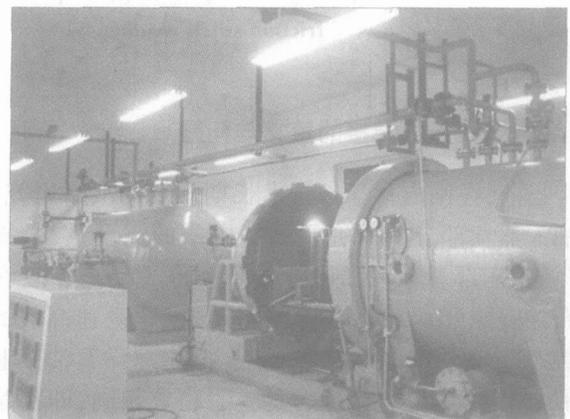


图 2 高压焊接试验装置

焊接修复海上试验^[7]。试件材料 16Mn, 60° V形坡口, 试验舱加压气体为压缩空气而不是国外其他研究单位通常采用的 Ar 或者 He/O₂ 混合气体, 焊接保护气体为 Ar, 试验获得的 8 个位置、4 个压力级别总计 32 种工况的焊件力学性能试验全部达到 AWS D3. 6M: 1999 中 A 类接头要求。图 3 所示为 0.6 MPa 压力、仰焊位置试件, 其抗拉强度 588 MPa, -10° 冲击功 118 J, 焊缝的显微硬度低于 187 HV。

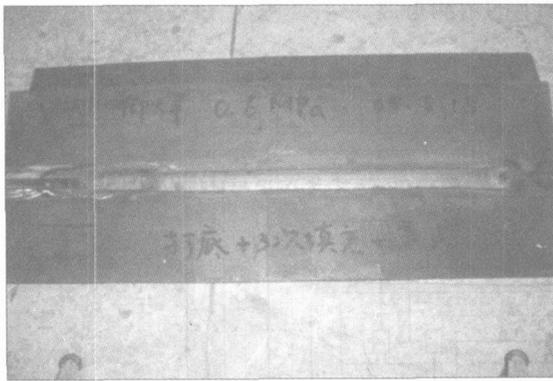


图 3 0.6 MPa 压力、仰焊位置试件

3 高压 MIG 焊接研究的现状与技术改进途径

MIG 焊具备低氢、高熔敷率、非常适合自动化等优点, 从 20 世纪末以来, 随着焊接电源控制技术的发展成

为最具备深水应用前景的电弧焊接方法。Cranfield University 的研究人员利用高压焊接试验装置 HypeWeld 250, 采用连续送丝、脉冲电流工艺, 实现了 25 MPa 压力即相当于 2 500 m 水深的 MIG 焊接, 并且对焊接电弧、熔滴过渡、焊接熔池等进行了深入地研究^[8]。

高压 MIG 焊接熔滴过渡研究表明 (图 4), 当压力大于常压之后, 弧柱因为热量损失增加而收缩, 同时弧根也收缩, 导致电极端头电子发射区域迁移到熔滴表面, 弧柱与熔滴、熔池之间的电流密度差增加, 促使反向等离子流强度增加, 该反向等离子流阻碍熔滴过渡, 实际上, 当压力增加至 1.2 MPa 时, 正常的射流过渡不可避免地转变成旋转过渡, 造成飞溅和焊接过程的不稳定^[9] (图 4a)。为此, Cranfield University 的策略一是采用控制性能非常优良的恒压 - 恒流混杂脉冲 MIG 焊接电源, 二是将弧长控制在很小的长度, 典型的平均值 1 mm, 实现了 2 500 m 水深条件之下的 MIG 焊接, 但是, 焊接过程只是大致稳定, 而且因为弧长非常短, 实际的熔滴过渡过程是短路过渡和射流过渡的混合过渡, 所以焊接过程的稳定性不够理想, 而且对于实际作业而言, 如此精确的弧长以及控制的实现也是比较困难的。

显然, 高压环境下反向等离子流对于等离子流的阻碍是 MIG 焊接熔滴过渡的首要问题, Cranfield University 将弧长控制在如此小的长度是一种被动适应策

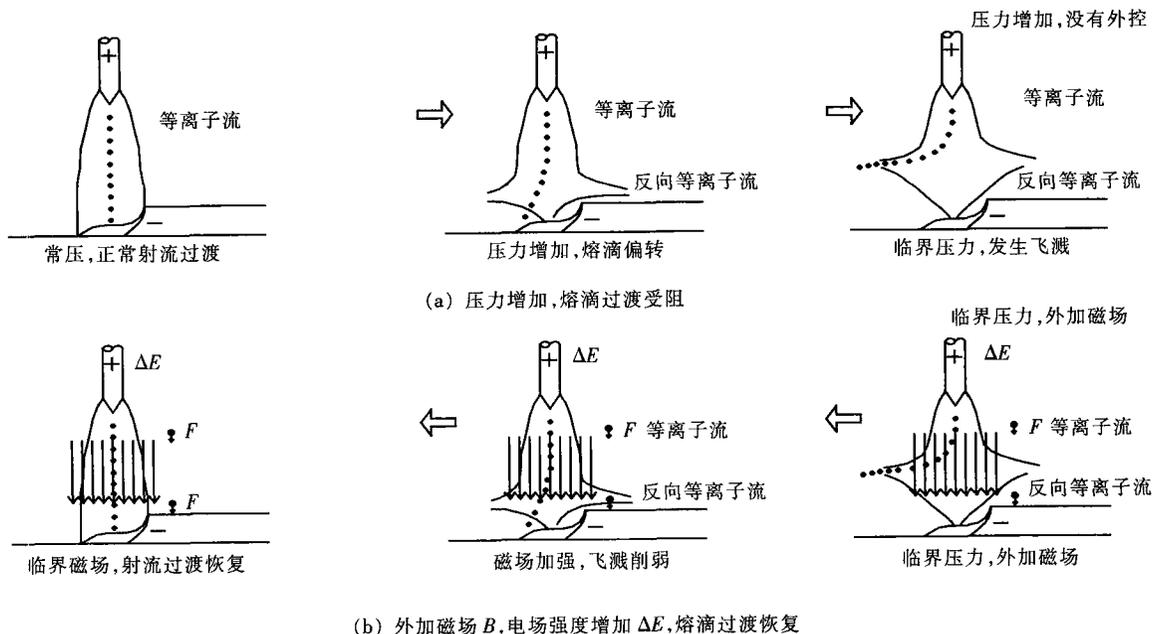


图 4 熔滴过渡阻碍作用及其磁控消除原理

略,实际上可以考虑引入外加因素来加强等离子流、抑制反向等离子流,将受到阻碍的金属熔滴过渡恢复成为正常的射流过渡,从而显著降低高压环境之下对 MIG 焊接电源性能、焊接参数控制的要求。外加纵向磁场作用下弧柱电场强度和能量密度的增加,以及电弧挺度和拘束作用的加强等能够抑制 CO₂ 焊接的飞溅^[10],而对于高压 MIG 焊接,北京石油化工学院水下焊接研究组提出可以采用外加纵向磁场促进熔滴过渡,其原理如图 4b 所示:外加纵向磁场将促使弧柱电场强度增加,增加的电场强度将加强等离子流、抑制反

向等离子流,从而通过调节磁场强度,可以实现高压环境之下的熔滴正常过渡。此外,外加纵向磁场对熔池的搅拌作用还能够极大地改善焊接质量。

高压脉冲 MIG 焊熔滴过渡纵向磁场控制试验系统如图 5 所示。电磁线圈安装在焊枪上,通过微压传感器测量等离子流与反向等离子流的差值,并通过安装在承压套筒之内的高速摄像机拍摄熔滴过渡照片。纵向磁场、高速摄像均与电流信号同步,只在峰值电流作用期间磁场才起作用,通过调节磁场强度实现高压作用之下的熔滴过渡。

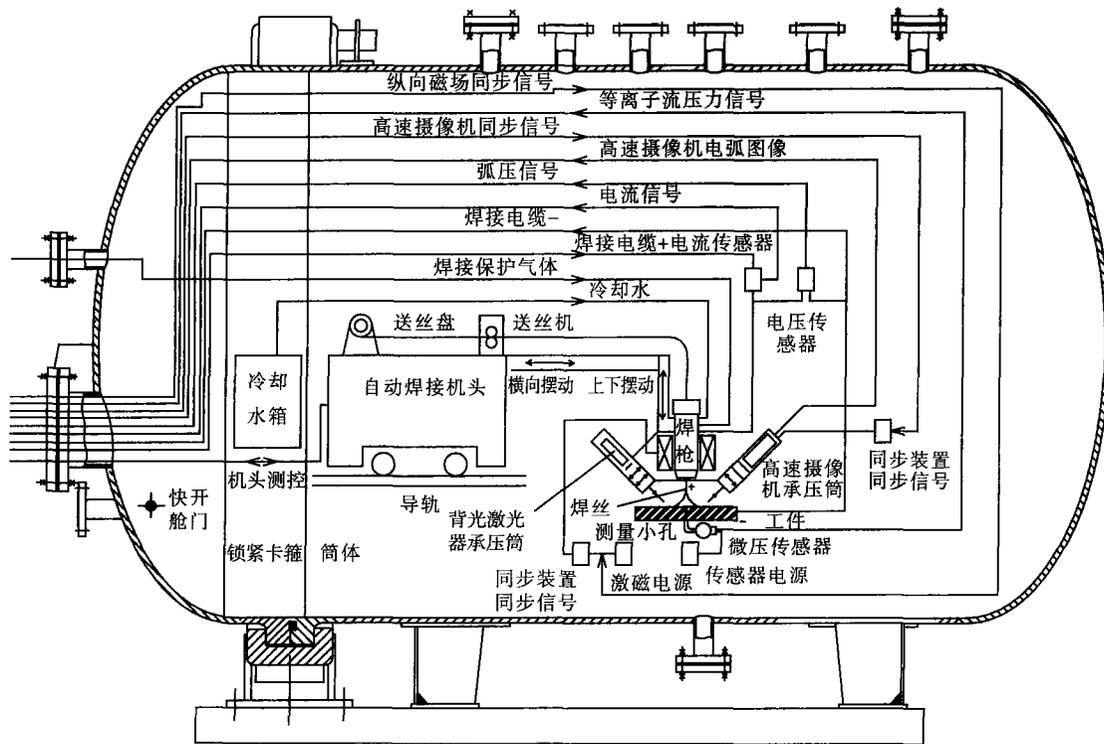


图 5 高压脉冲 MIG 焊熔滴过渡纵向磁场控制试验系统

4 深水结构物的摩擦叠焊修复

“摩擦叠焊”是北京石油化工学院水下焊接研究组对 Friction Stitch Welding 的中文命名,该技术是 TWI 于 1992 年发明的、以海洋平台和海底管道修复为主要目的的一种固相焊接方法,其原理如图 6 所示。将一系列螺柱塞入一系列相应的预钻焊孔之中,从而叠合搭接、“缝合”(Stitch)形成完整焊缝进行裂纹修复,其基本单元过程称为 FHPP (Friction Hydro Pillar Processing)^[11]。因为摩擦叠焊是将一系列螺柱塞入预钻焊孔旋转焊接、顺次重复缝合成为完整焊缝,所以可以适应很大的厚度,这种方法对于壁厚较大的海洋平台和海

底管道的修复具有非常突出的技术优势,是其他摩擦焊接新技术,例如搅拌摩擦焊接 (Friction Stir Welding) 难以比拟的。

近 10 年来,摩擦叠焊成为水下修复研究的重点,以下是最能反映摩擦叠焊国外研究现状的两个项目。

(1) 1997 年 6 月至 2000 年 5 月,欧盟 Brit e - Euram ROBHAZ 水下机器人焊接修复系统项目,旨在研制开发一套基于电动机器人和摩擦叠焊摩擦主轴头的无人操作钢结构水下裂纹修复系统,见图 7。项目参加单位包括德国 GKSS 研究中心、英国国家高压焊研究中心 (NHC)、英国 Circle Technical Services 公司、英国 Stolt Offshore Ltd、瑞典 NEOS Robotics 等 7 家单位,其

中 GKSS牵头制定焊接参数,NHC提供相关水下技术, Circle Technical Services提供摩擦焊接设备,NEOS Robotics提供摩擦主轴头操作机器人^[12]。

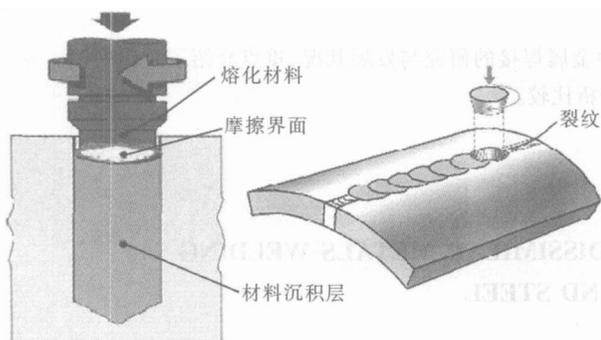


图 6 摩擦叠焊单元过程与完整焊缝形成

与电弧焊接不同,摩擦叠焊是一种在机械力和摩擦热作用下的固相连接方法,主轴头承受的载荷通常达到几吨,所以,要求机器人有很大的刚度,而传统的机器人是串联结构、刚度不能满足要求。此时,20世纪制造技术的另一项重要发明并联机器人发挥了重要作用,其中瑞典 Neos Robotics的 Tricept并联机器人是使用最为广泛的,例如 GKSS承担的该项目使用了 Tricept t600并联机器人。

图 7所示的无人钢结构裂纹三维模型之中,水下遥控机器人 ROV携带 Tricept t600并联机器人,后者安装了摩擦主轴头进行裂纹修复。



图 7 欧盟水下修复项目 Brite-Euram ROBHAZ

(2) 1998年 12月至 2001年 8月,欧盟 THERM IE Stitchpipe深水油气管道修复用的摩擦叠焊系统样机项目,由 Stolt Offshore Ltd、NHC和 GKSS联合开发,GKSS承担焊接工艺参数的评估工作,Stolt Offshore Ltd负责研制焊头及其配套机械设备并将其结合到 MATIS框架上,见图 8^[13]。

北京石油化工学院水下焊接研究组与中国搅拌摩擦焊中心合作设计的水下摩擦叠焊实验装置方案如图 9所示,该装置主要由摩擦主轴头、工装、液压系统、电控系统组成,能够完成钢结构件钻孔、摩擦叠焊,摩擦主轴头与工装可以适应水下环境焊接。摩擦主轴头轴向力 >2 t,最大转速为 4 700 r/min,最大扭矩 50 N·m;工件材料为合金钢,厚度为 15~25 mm,采用的螺柱直径为 10~20 mm,可以实现 500 mm×300 mm 钢板对接,也可以实现长度为 250 mm 的 2段钢管的环缝对接。电控系统人机界面能够显示和控制焊接压力、旋转速度和插入速度等工艺参数。

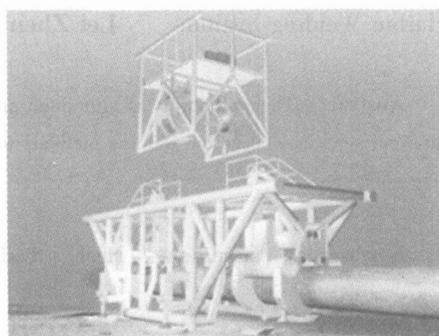


图 8 欧盟水下修复项目 THERM IE Stitchpipe

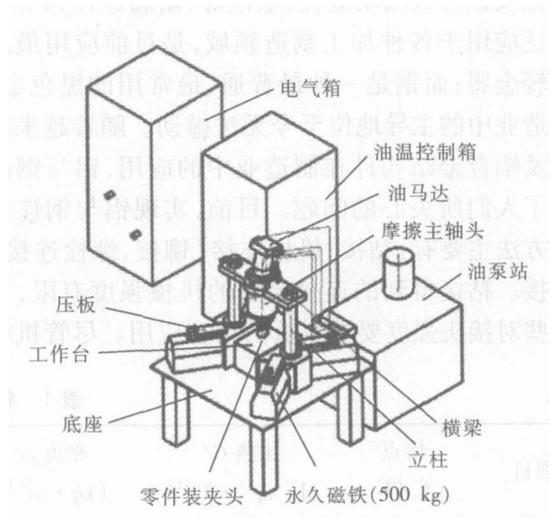


图 9 水下摩擦叠焊试验装置设计方案

5 结 论

(1) 高压 TIG焊接是 500 m 以浅水下结构物修复的可靠方法,轨道式 TIG自动焊接可以形成符合相关规范要求的接头,发展方向是无潜水员式全自动焊接作业系统。 [下转第 28 页]

焊接温度在 720 以上时,接头连接强度随焊接温度的提高并不明显,并且焊接温度越高,基体组织显著粗化,焊接变形增大。

(3) 在金属零件快速成形制造中,应该用未镀金属薄板先成形,然后在金属薄板表面制备化学镀层,再整体扩散焊接成金属零件,可以减小金属薄板整体扩散焊接后的尺寸变化,提高成形精度。

参 考 文 献

[1] 闫旭日, 颜永年, 张人信. 分层实体制造中层间应力和翘曲变形的研究 [J]. 机械工程学报, 2003, 39(5): 36 - 40

[2] 周 强, 伍太宾. LOM 技术的比较优势及其应用前景 [J]. 金属成形工艺, 2004, 22(2): 5 - 8

[3] Obikawa T, Yoshino M, Shinozuka J. Sheet steel lamination for rapid manufacturing [J]. Journal of Materials Processing Technology, 1999, 89 - 90: 171 - 176

[4] 山崎久男. 积层金型の大物自動車部 件への适用 [J]. 型技术, 2000, 15(7): 36 - 45

[5] Yi Shuping, Liu Fei, Zhang Jin, et al Study of the key technologies of LOM for functional metal parts [J]. Journal of Materials Processing Technology, 2004, 150: 171 - 176

[6] 边秋海, 张玉斌, 郑鸿飞, 等. 基于数控机床分层快速成型金属零件的关键技术研究 [J]. 太原师范学院学报, 2003, 3(1): 31 - 33

[7] 孙荣禄, 李慕勤, 张九海, 等. 中间过渡金属对钛合金与不锈钢扩散焊接头强度的影响 [J]. 焊接学报, 1996, 17(4): 212 - 218

[8] 于治水, 吴铭方, 王凤江, 等. 瞬态液相扩散焊接 CuAl-Be 合金和 1Cr18Ni9Ti 不锈钢 [J]. 焊接学报, 2000, 21(3): 32 - 36

[9] 张 杰, 周友龙, 刘兴秋, 等. 焊前处理方式对 LF6 铝合金扩散焊的影响 [J]. 材料科学与工艺, 1995, 3(4): 108 - 111

[10] 崔 崑. 钢铁材料及有色金属材料 [M]. 北京: 机械工业出版社, 1986. 423. (收稿日期 2006 02 25)

作者简介: 彭成章, 1965 年出生, 博士, 副教授, 主要从事材料成形及表面处理研究。

[上接第 15 页]

(2) 高压 MIG 焊接能够适应 1 000 m 以浅水下修复的需要, 但是, 为了将其应用于工程之中, 需要采取外加纵向磁场强化熔滴过渡, 以获取更加稳定的焊接过程、降低焊接参数控制要求。

(3) 摩擦叠焊可以适应不同水深和不同结构物的修复, 是未来水下焊接的主导和领先技术, 需要开展焊接机理和机器人焊接等研究工作。

参 考 文 献

[1] 秦 萍. 中国海洋石油将走向深水——访海洋石油工程专家曾恒一 [J]. 中国船检, 2004(6): 64 - 67.

[2] John Nixon Underwater repair technology [M]. Cambridge: Woodhead Publishing Ltd, 2000.

[3] Michael Davis Trolling the depths with a new system [J]. Welding & Metal Fabrication, 1996, 64(8): 20 - 22

[4] Scott R Lyons Underwater orbital TIG welding [J]. Metal Construction, 1985, 17(8): 504 - 507.

[5] Dos Santos J F. Diverless pipeline welding beyond 600m sw [C]. Proceedings of 11th International Conference on Offshore Mechanics and Arctic Engineering (OMAE92) Calgary, 1992

[6] 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(5): 14 - 16

[7] 周灿丰. 高压 TIG 焊接技术及其应用研究 [J]. 焊接技

术, 2004(5): 34 - 35.

[8] Hart P. The effects of pressure on electrical performance and weld bead geometry in high pressure GMA welding [J]. Welding Research Abroad, 2000, 49(3): 29 - 37.

[9] Nixon J H. Open arc pulsed current GMAW-application to hyperbaric operations [C]. The American Society for Metals International Welding Congress, Toronto, 1985.

[10] 江淑园. 外加磁场对 CO₂ 焊飞溅的控制机理 [J]. 焊接学报, 2004, 25(3): 65 - 67.

[11] Thomas W M. Friction forming [P]. International Patent No WO 93/04813, London

[12] Blakemore G R. Back to the future—Underwater repair by friction welding [C]. Underwater Intervention 2000, Houston, 2000.

[13] Gibson D E. Engineering applications of friction stitch welding [C]. Proceedings of 20th International Conference on Offshore Mechanics and Arctic Engineering, Rio de Janeiro, 2001, OMAE2001/MAT - 3161: 139 - 143.

(收稿日期 2006 03 02)

作者简介: 周灿丰, 1970 年出生, 教授, 工学博士, 主要研究方向为水下焊接、摩擦焊接。