

应用技术

可调压力激光焊接工艺地面模拟装置的研制

李权洪¹, 庞盛永¹, 黄安国¹, 梁吕捷¹, 郭嘉琪¹, 韦朋余²

(1. 华中科技大学 材料成形与模具技术国家重点实验室, 武汉 430000;

2. 中国船舶科学研究中心, 江苏 无锡 214082)

摘要: **目的** 针对普通激光焊接实验装置无法用于非常压极端环境下激光焊接工艺的难点, 研发设计一种可用于模拟环境压力变化的激光焊接地面模拟装置, 使得在地面上模拟深海高压环境激光焊接和太空负压环境激光空间制造过程成为可能。**方法** 针对非常压极端环境下激光焊接实验成本高以及危险性大等问题, 并综合考虑高压、低真空, 以及水下高盐度、低温度和微生物等环境特点, 对模拟装置的压力调节集成系统、激光入射孔以及可移动运动平台 3 个主要方面进行设计。自主设计研发一套具备从负压到高压压力范围可调的激光焊接地面模拟装置, 并对模拟装置进行实验和性能验证。**结果** 研制装置压力测试的结果表明, 该装置能够开展 5.2 Pa (真空环境) 至 13.13 MPa (深海环境) 压力范围条件下的激光焊接实验, 为深海高压激光焊接过程以及空间负压激光制造过程提供实验基础。基于该模拟装置进行了不同压力环境下的激光焊接实验, 结果表明, 大气环境中随着压力的增大, 焊缝熔深逐渐增大, 而熔宽呈减小趋势; 水下环境中随着焊接速度的增大, 焊缝熔深和熔宽均逐渐减小。**结论** 实验结果与现有研究结果相近, 可调压力激光焊接地面模拟装置的可行性和有效性得到了验证。该装置能够为未来深海高压和外太空负压激光焊接实验进一步研究提供设备支撑, 具有良好的应用前景。

关键词: 变压调节; 水下环境; 激光焊接; 局部干法; 模拟装置

DOI: 10.3969/j.issn.1674-6457.2020.04.019

中图分类号: TG439.4 **文献标识码:** A **文章编号:** 1674-6457(2020)04-0152-08

Development of Pressure-adjustable Ground Simulation Device for Laser Welding Process

LI Quan-hong¹, PANG Sheng-yong¹, HUANG An-guo¹, LIANG Lv-jie¹, GUO Jia-qi¹, WEI Peng-yu²

(1. State Key Laboratory of Materials Processing and Die & Mould Technology, Huazhong University of Science and Technology, Wuhan 430000, China; 2. Chinese Ship Scientific Research Center, Wuxi 214082, China)

ABSTRACT: Since the ordinary laser welding experimental device cannot be used to study the laser welding process under extreme pressure and extreme environmental conditions, for this reason, the paper aims to develop and design a laser welding ground simulation device that can be used to simulate changes in environmental pressure, so that the deep sea environment for laser welding and space negative pressure environment for laser space manufacturing can be simulated on the ground. Aiming at the problems of high-cost and high-risk of laser welding experiments under extreme pressure extreme environmental conditions, and through comprehensively considering the environmental characteristics of high pressure, low vacuum, and high salinity, low temperature and microorganisms under water, the simulation device was designed from three main aspects: pressure adjustment

收稿日期: 2020-01-01

基金项目: 国防科工局项目 (KJSP2016040103)

作者简介: 李权洪 (1995—), 男, 硕士生, 主要研究方向为水下激光焊接。

通讯作者: 庞盛永 (1982—), 男, 博士, 副教授, 博士生导师, 主要研究方向为材料成形模拟、材料激光加工、焊接工艺与装备; 韦朋余 (1982—), 男, 高级工程师, 主要研究方向为船舶与海洋工程。

integrated system, laser entrance hole and movable motion platform. A set of laser welding ground simulation device with adjustable pressure range from negative pressure to high pressure was independently developed and designed, and the experiments and performance of the simulation device was verified. Through the pressure experiments of the developed device, the results showed that the device was able to simulate the environment of pressure between 5.2 Pa (the space environment) and 13.13 MPa (the deep sea environment), laying a foundation for experiment of deep sea high pressure laser welding and space negative pressure laser space manufacturing. The results showed that, the weld penetration increased and the weld width decreased with the increase of pressure in the atmospheric environment; the weld penetration and width decreased with the increase of welding speed in the underwater environment. The test result is close to the current research result. The feasibility and effectiveness of the adjustable pressure laser welding ground simulation device are verified. The device is able to provide equipment support for further research of welding process in the deep-sea and the space in the future, and has a good application prospect.

KEY WORDS: variable pressure regulation; underwater environment; laser welding; local dry method; simulation device

随着人们向深海领域 (≥ 300 m) 和外太空领域不断探索, 恶劣的服役环境导致对深海与航天空间大型装备焊接制造和维护技术的要求越来越严苛。深海环境具有通透性差、压力变化大以及水文特性复杂等特点, 太空环境具有高真空、微重力以及超低温等特点, 这种复杂的极端非常压环境使得传统的焊接和修复技术面临愈加严峻的挑战^[1-3]。当前, 光纤激光能够通过光纤, 将高能量密度的激光热源进行长距离、低损耗和高精度的柔性传输, 具备可达性好的同时还具有能量集中、热影响区极窄以及应力变形小等优点, 被认为是未来深海和外太空等极端非常压环境下最具有潜力的焊接修复和制造技术。

目前, 由于严重缺乏深海高压和外太空真空环境下激光焊接制造过程及机理的认识, 这直接影响现役装备的维保及其服役寿命, 焊接工作者迫切需要开展该环境下的基础性焊接实验研究工作, 准确捕捉和描述非常压条件下激光焊接现象及其物理过程和机制, 指导实际的焊接制造工作。深海高压和外太空真空环境的焊接基础实验面临着高风险、高成本、长周期甚至很多情况下难以开展的现实难题, 为此, 焊接工作者不断研究以及开发了多种设备和技术, 以期深入探究非常压环境下的激光焊接过程。20 世纪 90 年代中期, 德国、日本以及美国等科学家们首先致力于水下局部干法焊接的研究, 研制了水下激光排水设备^[4-8]。2004 年以后逐渐开发了水下激光焊接/修复技术^[9], 并成功应用于美国南卡罗来纳州罗宾逊核电站的水下激光修复^[10], 以及核电设备中经常出现的应力腐蚀裂纹、疲劳裂纹等缺陷的水下激光修复^[11-12]。在国内, 2002 年清华大学张旭东等^[13-16]开展了水下局部干燥激光焊接设备及工艺等相关工作, 获得了良好的水下激光焊接效果。之后, 北京石油化工学院的朱加雷^[17]、南昌大学的陈海军^[18]等利用实验与模拟相结合的方法, 设计了不同排水装置。上述工作主要集中于水下激光焊接排水装置及工艺技术的研发, 对环境压力变化的研究涉及较少。在环境压力变化研究方

面, Katayama 等^[19]发现当环境压力从大气压下降到真空时, 熔池的状态会变得更加平静; Boerner 等^[20]研究表明, 随着环境压力的降低, 焊缝熔透深度会增加 10% 以上; Fabbro 等^[21]发现当蒸发表面温度低于或接近沸点时, 环境压力会减小焊接蒸发速率。

上述研究表明, 无论是处于深海较大的高压环境, 还是处于外太空间较低的真空环境, 压力变化对激光焊接过程的影响十分显著, 是激光焊接过程中需要重点考虑的影响因素^[22-23]。目前对水深在 1000 m 以上的深海高压及外太空间真空环境激光焊接的研究, 由于基础性焊接实验的现实难题, 而尚未广泛展开。当前, 在地面上建立一套集负压和高压于一体的模拟装置, 开展从真空到高压压力变化过程的激光焊接实验研究, 被普遍认为是揭示不同压力环境下激光焊接物理过程和机理的重要手段和装备^[24-27]。文中自主研发设计了可调压力激光焊接地面模拟实验装置, 开展模拟装置的耐压性能及压力调节集成测试, 实现从真空负压到深海高压的压力调节集成控制。基于该装置, 研究不同真空环境以及水下环境的焊缝形貌成形规律, 为不同压力环境特点的激光焊接研究提供了重要的思路和手段。

1 可调压力地面模拟装置的研制

由于直接进行深海高压环境激光焊接和太空负压环境激光空间制造实验的成本高、难度大, 文中通过设计一种从真空负压到深海高压压力范围可调的激光焊接地面模拟装置, 以此满足在地面上可以模拟不同高压 (≥ 3 MPa)、低真空 (≤ 10 Pa) 的压力环境, 以及高盐度 (≥ 35 psu)、低温度 (≤ 20 °C) 的水下环境。文中所研发设计的模拟装置包括对模拟装置压力调节集成系统的设计、激光入射孔的设计以及可移动运动平台的设计, 具有能够实现负压到高压的可自主调节功能, 并可以在陆上模拟深海高压环境和空间真空环境。

1.1 可调压力容器设计

为了能够真实模拟深海高压环境以及空间真空环境的激光焊接过程,从环境压力调节集成控制、耐高压以及耐腐蚀 3 个方面对可调压力激光焊接模拟装置进行设计。

装置内部环境气压的稳定可控是地面模拟装置成功模拟不同环境压力的关键,通过对进出气体的气路设计,对装置内部环境压力进行调节,实现装置内部压力的动态平衡。首先设计一套从负压到高压的压力调节集成控制系统,该系统主要分为进气区和排气区两大部分。进气区的保护气气瓶和高压气瓶与模拟装置之间分别通过两组进气管连接,两组进气管对称分布在上端盖一侧,使进入的气体更均匀,并在保护气气瓶上装有气体流量计和针型阀,以此来进一步有效控制模拟装置内的气体流量,并通过截止阀等压力控制阀,形成单向导通的气路,可避免水汽的逆流。

排气区包括安装在两组排气管上的排气阀、截止阀,以及内置的具有排水功能的排水罩。排气阀和截止阀保证了容器内部压力能够得到有效控制,使容器内部始终处于动态稳定的压力环境,并根据所需的压力环境进行自主调节。另外,在截止阀一侧可连接真空泵,可在关闭其他阀门的情况下形成密闭真空环境,用于进行真空激光焊接实验。此外,焊接保护气体可以通过进气管进入模拟装置内部的排水罩中,在待焊件上方形成一个局部干燥稳定的焊接空间,在压力增大后也能使水面更加稳定,避免水对激光焊接过程的影响,从而获得质量较高的焊缝,并通过置于高压容器上的温度计和盐度计,可实时监测模拟有水环境特点时装置内部的水温变化 ($\leq 20^{\circ}\text{C}$) 以及盐度变化 ($\geq 35\text{ psu}$)。整个地面模拟装置压力调节系统如图 1 所示。

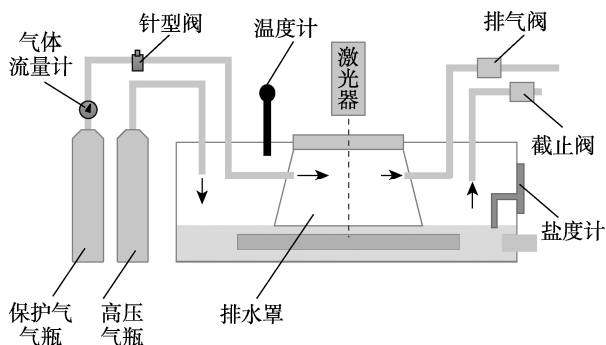


图 1 可调压力物理模拟装置结构示意图

Fig.1 Schematic diagram of adjustable pressure physical simulation device

为了在地面上能够模拟 3 MPa 以上的深海高压环境,可调压力模拟装置的结构和密封方式是耐压性能的关键。在模拟实验过程中,模拟装置有时需要盛装不同盐度的水以模拟不同环境下的海水环境特点。

由于海水的盐度较高,模拟装置需要具有良好的耐腐蚀性和耐高压性,因此,选用强度高且耐腐蚀性好的 304 不锈钢作为可调压力模拟装置的制造材料,并且对材料进行镀镍处理,进一步提高耐腐蚀性。为了使装置内部受力均匀,以进一步承受较高的环境压力,模拟装置的整体结构将采用圆柱筒结构,该结构内壁受力均匀,可以承受较高的压力。根据 GB 150.3—2011 中给出的内压圆筒壁厚设计标准,对可调压力模拟装置的壁厚进行计算,因此,模拟装置筒体的壁厚 δ 可表示为:

$$\delta = \frac{p_c D}{2[\sigma]\phi - p_c} \quad (1)$$

式中: p_c 为筒体的理论设计压力; D 为筒体内径; $[\sigma]$ 为钢板在设计温度下的许用应力; ϕ 为焊接接头系数,取 0.8。

地面模拟装置设计耐压为 3 MPa 以上,外径为 140 mm,因此壁厚约 $\geq 8.11\text{ mm}$,为了保证高压容器的安全性,设计壁厚为 10 mm。高压容器整体外观结构及尺寸设计如图 2 所示。

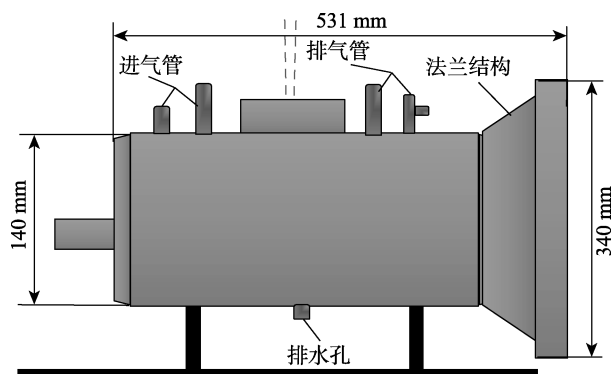


图 2 压力容器外观结构及尺寸的设计示意图

Fig.2 Design diagram of the appearance structure and size of the pressure vessel

良好的密封性可以保证容器内部高压环境的稳定性。法兰结构受力均匀,并且可以通过螺栓进行预紧,是压力容器常用的结构。根据《压力容器法兰》的设计标准,法兰结构设计公称直径 $\leq 800\text{ mm}$,为了便于法兰结构的人工开启和操作,取法兰结构外径为 340 mm,并与圆柱筒结构通过焊接方式进行连接。整个压力集成可调的模拟装置能够模拟不同高压、低真空等非常压环境,也能模拟水、盐度以及其他生物特点的焊接实验环境,为深海高压激光焊接过程以及空间负压激光制造过程提供了强有力的实验基础。

1.2 激光入射孔设计

在模拟水下环境激光焊接过程中,由于水的存在,激光会与母材等发生剧烈的相互作用,过程中所产生的金属蒸气以及水蒸气等高温气体极易进入到激光头内部造成污染,会严重影响激光器的使用,且

焊接过程中的金属飞溅等极易对激光头内的光学器件造成损毁,并且激光头在焊接移动过程中容易与其他结构发生干涉,因此,激光头与模拟装置之间的相对位置关系是整体装置设计的关键,同时应尽可能保证激光头在极端非常压环境中能够灵活、便捷的操作,文中采用光纤激光焊接系统置于可调压力容器外的方式进行焊接实验。

激光焊接系统置于模拟装置上方,需要在模拟装置的上方设计激光入射孔,使得光纤激光能够通过可调压力容器上方开设的入射孔进入到装置内部,并且入射激光与入射孔的中心应该始终保持同一中轴线上。同时在装置内部放置可移动平台,实现激光与成形基板之间的相对运动。此外,可调压力容器需要保持良好的密封性,入射孔采用锥形环和 O 型圈相配合的密封方式,并通过螺栓将上盖板与下端盖进行连接。激光外置焊接方式如图 3 所示。

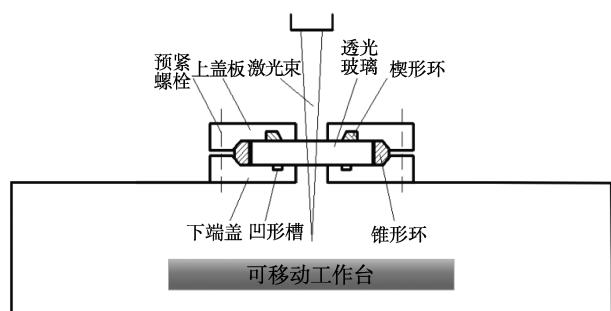


图 3 激光外置焊接方式示意图

Fig.3 Schematic diagram of laser external welding

在实验过程中,激光需要经过可调压力容器上方的入射孔进入装置内部,入射孔中透射玻璃的选择对激光焊接过程有着很大的影响。激光波长为 1060 nm,透光性不良的玻璃容易导致激光束无法进入到装置内部,并且在焊接过程中容易出现激光烧蚀玻璃的现象,因此,激光所透射的玻璃应满足透明、耐高温、强透光等条件。石英玻璃对激光的透射率可达 99% 以上,可透激光波长为 1030~1080 nm,能够满足激光焊接透射要求。此外,石英玻璃密度高 (22.21 g/cm^3),可承受 50 MPa 以上的压力,具有较强的耐压强度,并且石英玻璃的化学稳定性好,高温高压下水侵蚀小,具有良好的耐腐蚀性,因此,选用石英材质的玻璃作为激光焊接过程中的透射玻璃(厚度为 10 mm,直径为 60 mm)。

1.3 运动平台设计

在焊接实验过程中,内置的光纤激光器在移动过程中极易与可调压力容器结构发生干涉。为了避免干涉的产生,文中采用光纤激光器固定,工作台移动的方式进行焊接实验。该种方式有效提高了焊接效率,降低了实验成本,对于不同材料、不同结构的焊接实验具有较好的通用性,并且可移动运动平台在水环境

下进行激光焊接的过程中,工作台的运动会带动装置内部的水,使水发生波动,进一步真实模拟水下环境水流流动特点。

运动平台由可移动工作台、移动导轨和动力驱动装置组成,如图 4 所示,其中焊接工作台位于可调压力容器内部的移动导轨上,伺服电动机动力装置位于可调压力容器外部。伺服电机与可移动工作台通过直线推杆进行连接。当动力装置驱动连接推杆时,可调压力容器内部的可移动工作台在导轨上做直线运动。为了在焊接过程中精确控制可移动工作台的移动速度,从而得到所需的焊接速度,利用编码器脉冲控制伺服电机进行精准的运转。电动驱动丝杆滑台的方式需在丝杆与电机之间配置联轴器,采用滚珠丝杆传动的方式可以很好地减少密封处的移动,避免出现漏气现象。

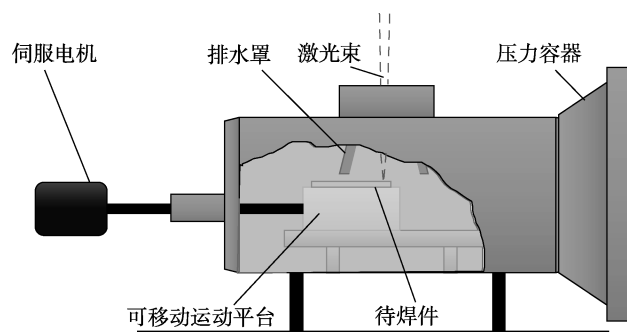


图 4 激光焊接可移动运动工作台

Fig.4 Movable motion table of laser welding

2 结果与分析

2.1 可调压力激光焊接装置的耐压性能测试

根据上述设计,对可调压力激光焊接装置进行实物加工、安装,如图 5 所示,并对装置的耐压性能和压力调节性能进行验证,进一步证明压力容器的安全性、可靠性。压力是深海高压环境激光焊接和空间真空环境激光制造最主要的影响因素,为了验证模拟装置的设计可靠性,在江苏派斯特压力容器有限公司通过负压测试以及水压耐高压测试对自主研制的实验装置进行第三方验证。

耐压测试测试结果如图 5a 和 5b 所示,其中,图 5a 为设计耐压实验曲线,图 5b 为实际压力实验曲线。从图 5a 可以看出,设计要求在 10.5 MPa 的高压环境时需满足无泄漏状态,并在 13.13 MPa 时应能够维持该压力 30 min 以上,最后降压时能够在 10.5 MPa 的压力下继续保持足够时长,以验证整个装置在升压和降压压力调节过程中的密封性以及稳定性。从图 5b 实际压力测试结果可以看出,实际测试升压和降压过程的时长均能满足所要求,因此,所研制的可调压力激光焊接模拟装置可实现压力变化调节功能,并且最大能够承受 13.13 MPa,即可实现深水环境 1000 m

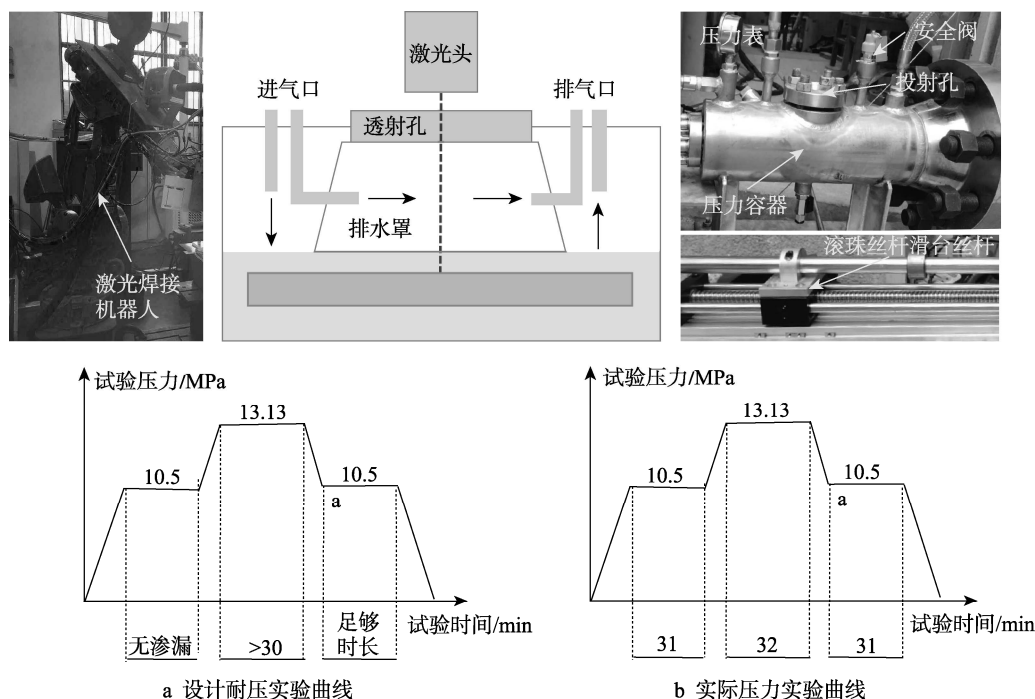


图5 水下激光焊接地面模拟装置系统示意图

Fig.5 Schematic diagram of underwater laser welding ground simulation device system

的水下激光焊接,具有良好的耐压性能。另外,在进行负压测试时,将真空泵与排气阀进行连接,并关闭其他所有气压阀的阀门,通过电阻规对装置内部压力值进行实时观测。结果表明,模拟装置的极限压力值为 5.2 Pa,满足空间制造所需的负压焊接条件。

装置性能测试结果表明,文中自主研发设计的可调压力激光焊接工艺地面模拟装置可实现从负压到高压范围内的环境压力调节,满足深海高压环境激光焊接和空间真空环境激光制造所需压力条件。

2.2 变压环境激光焊接实验

采用 IPG 公司的 YLR-4000 光纤激光器,对尺寸为 100 mm×150 mm×10 mm 的 ANSI 304 不锈钢进行可调压力环境下的激光焊接实验。在离焦量为 0 mm,激光焊接功率为 3 kW,焊接速度为 1.5 m/min 的焊接条件不变下,通过改变模拟装置的内部压力参数,以获得不同压力环境下的激光焊接过程。基于此,文中

进行了 4 组在不同环境压力参数下的激光焊接实验,环境压力分别为 40 000, 4000, 400, 40 Pa。焊接结束后,将试件制备成金相试样,采用 Kroll 试剂进行腐蚀,其配比为 3~9 mL HCl+1~3 mL HNO₃,腐蚀时间为 6~10 s,然后进行清洗、烘干,并在金相显微镜下测量焊缝的尺寸。

不同压力环境下的激光焊接实验焊缝形貌如图 6 所示。由图 6 可知,当环境压力较大时,此时焊缝的熔深相对较浅,焊缝整体形状呈 V 形。随着环境压力降低至 40 Pa 时,焊缝表面逐渐变得均匀,焊缝形状由 V 形向 I 形过渡,熔区逐渐变窄。不同压力环境下 304 不锈钢激光焊接的焊缝熔宽和熔深变化曲线如图 7 所示。结果表明,激光焊接会随着环境压力的降低,焊缝深度逐渐增大,当压力从 40 000 Pa 降至 40 Pa 时,焊缝熔深从 3.15 mm 增大到 5.1 mm,最高增幅可达 37%。相比之下,熔宽则呈下降趋势,从 1.8 mm 下降到 1.5 mm,减幅为 16.7%。

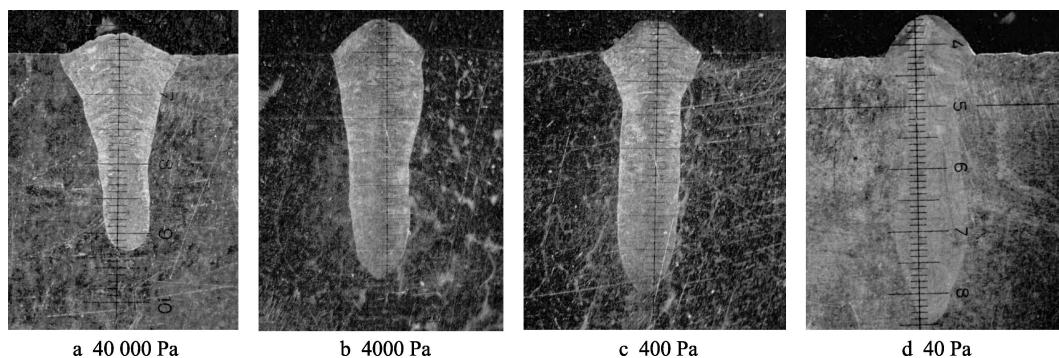


图6 不同压力环境下激光焊接焊缝形貌

Fig.6 Welding seam morphology of laser welding under different pressures

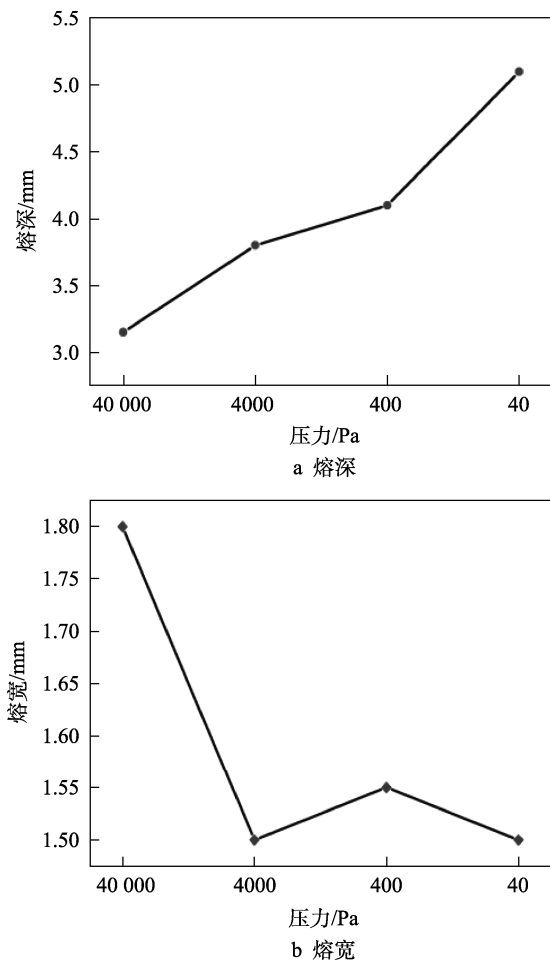


图 7 不同压力环境下焊缝熔深和熔宽对比

Fig.7 Comparison chart of weld penetration and width under different pressures

从实验结果可以看出,当环境压力发生变化时,焊缝熔深也会随之发生显著变化。小孔熔深的变化是

由于环境压力的改变导致小孔壁面温度发生改变而引起的。当小孔内温度逐渐上升,反冲压力逐渐增大,会使得小孔深度有所增加,因此,由于所处压力环境的不同,焊缝形貌也会有所不同。在 Himi 等^[28]研究中也发现过类似报道。

2.3 水下环境激光焊接实验

采用 IPG 公司的 YLR-4000 光纤激光器,对尺寸为 100 mm×150 mm×10 mm 的“海洋金属”TC4 钛合金进行局部干法水下环境激光焊接实验。保持离焦距为 0 mm,激光焊接功率为 3 kW,环境压力为 0.1 MPa,环境水温为 20 ℃,保护气体 (N_2) 流量为 80 L/min 不变,文中设计了水环境中 5 组不同焊接速度的激光焊接实验,焊接速度分别为 1, 1.5, 2, 2.5, 3 m/min,通过改变激光焊接过程中的焊接速度,以探究不同水下环境中激光焊接速度对钛合金焊缝成形的影响规律,并与地面环境焊接速度为 1 m/min 的激光焊接过程进行对比,探究水的存在对激光焊接过程的影响。焊接结束后,将试件制备成金相试样,腐蚀试剂的配比为 90 mL H_2O +6 mL HNO_3 +2 mL HF,腐蚀时间为 15~20 s,然后进行清洗、烘干,并在金相显微镜下测量焊缝尺寸。

水下环境不同焊接速度的激光焊接焊缝形貌如图 8 所示。在相同的焊接速度参数下,陆上环境焊缝形貌(见图 8a)与水下环境焊缝形貌(见图 8b)几近相似。水下环境焊缝形貌成“T”字形状,上半部分较宽,下半部分狭长而笔直,并且可以观察到随着焊接速度的增大,水下环境整个焊缝形貌横截面积在逐渐减小。水下环境不同焊接速度 TC4 钛合金激光焊接的焊缝熔宽和熔深变化曲线如图 9 所示。结果表

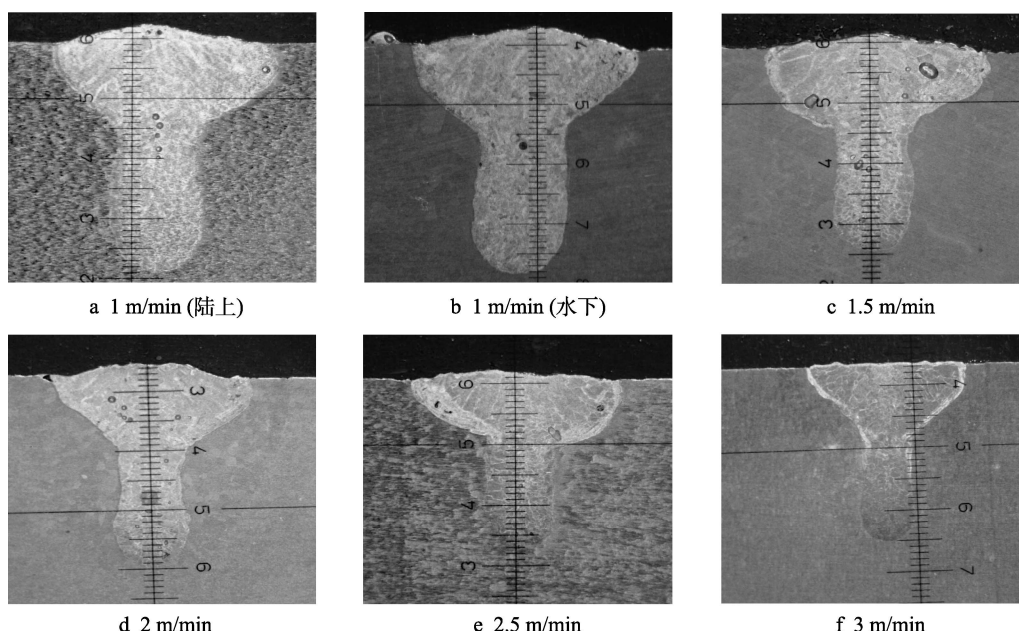


图 8 大气及水下环境激光焊接焊缝形貌

Fig.8 Morphology of laser welding seam in atmospheric and underwater environment

明,水下环境激光焊接的焊缝熔深和熔宽均随着焊接速度的增大而逐渐减小。当焊接速度从 1.0 m/min 增加到 3.0 m/min 时,熔深从 4.1 mm 减小到 2.8 mm。熔宽从 3.6 mm 减小到 2.8 mm,最大减幅分别达 31.7% 和 22.22%。

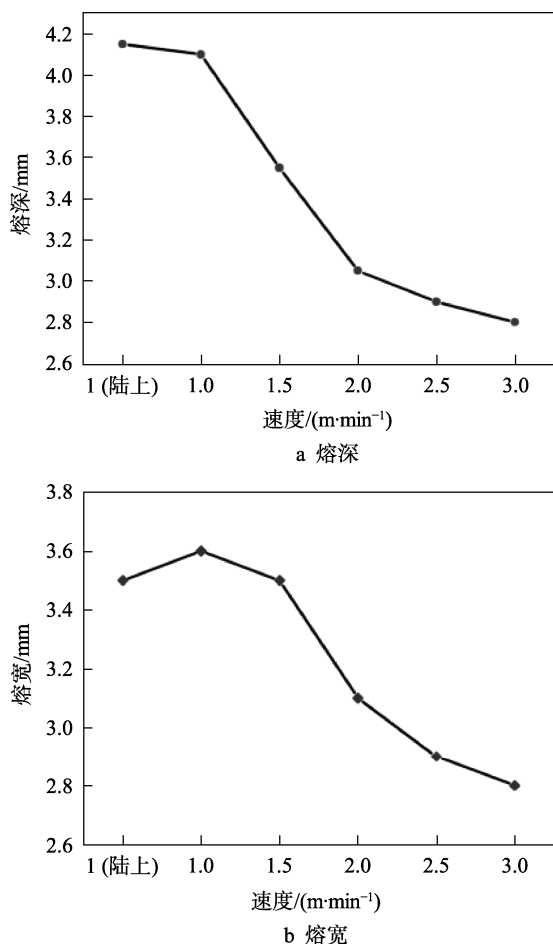


图9 水下环境不同焊接速度的焊缝熔深和熔宽对比

Fig.9 Comparison of weld penetration and width at different welding speeds in underwater environment

从实验结果可以看出,TC4 钛合金激光焊接水下焊缝与陆上焊缝的焊缝形貌差别不大,证明自主研发设计的模拟装置能够在地面上模拟水下环境,并且能够成功地进行水下激光焊接过程。随着焊接速度的增加,焊接小孔的横截面面积不断减小。这是因为较快的焊接速度使激光能量的传递和吸收位置由熔池下部逐渐转移到了熔池上部,导致激光能量吸收率减小,金属熔化量和熔池金属蒸发量也在逐渐减少。此外,随着焊接速度的增大,焊缝熔深和熔宽均呈下降趋势。这是因为水下环境激光焊接过程中激光束在母材上的移动速度加快,导致激光焊接能量减小,激光与母材的作用时间减少,熔池小孔中壁面的蒸发温度有所降低,反冲压力逐渐变小,使得熔深和熔宽进一步减小。在姚杞等^[29]研究中也发现过类似报道。

3 结语

1) 设计研发了一套从真空负压到深海高压压力范围可调的激光焊接地面模拟装置,该模拟装置包括压力调节控制系统、激光光路系统和可移动运动平台,能够模拟不同高压、低真空等非常压环境,以及模拟水、盐度以及其他生物特点的激光焊接实验环境,为未来深海高压和外太空负压激光焊接实验提供了强有力的设备支撑。

2) 验证了研发设计的模拟装置可实现负压到高压的可自主调节功能,可以在陆上模拟深海高压环境激光焊接和空间真空环境激光制造过程。结果表明,模拟装置能够承受 13.13 MPa 的压力,可以在地面模拟水深 1000 m (10 MPa) 以上的高压环境,负压极限压力值可达 5.2 Pa,满足空间负压激光焊接条件。证明了可调压力激光焊接地面模拟装置在陆上模拟非常压环境的可行性和有效性。

3) 利用自主研发设计的模拟装置进行了不同环境压力条件下的激光焊接实验。在激光焊接功率为 3 W,焊接速度为 1.5 m/min 的焊接条件不变下,随环境压力从 40 000 Pa 减小到 40 Pa,焊缝熔深从 3.15 mm 增大到 5.1 mm,而熔宽则呈减小趋势,从 1.8 mm 减小到 1.5 mm。

4) 利用研发设计的模拟装置在水下环境进行不同焊接速度的激光焊接实验。在激光焊接功率为 3 W,环境压力为 0.1 MPa,环境水温为 20 °C,保护气体(N₂)流量为 80 L/min 的条件不变下,水下环境激光焊接随着焊接速度从 1.0 m/min 增加到 3.0 m/min 时,熔深和熔宽均成下降趋势。熔深从 4.1 mm 减小到 2.8 mm,熔宽从 3.6 mm 减小到 2.8 mm。

参考文献:

- [1] 吴磊,宋红伟.水下焊接技术的现状及发展趋势[J].管道技术与设备,2012(2): 37—39.
WU Lei, SONG Hong-wei. Current Status and Development Trend of Underwater Welding Technology[J]. Pipeline Technology and Equipment, 2012(2): 37—39.
- [2] DOCCHIO F, REGONDI P, CAPON M, et al. Study of the Temporal and Spatial Dynamics of Plasmas Induced in Liquids by Nanosecond Nd:YAG Laser Pulses 1: Analysis of the Plasma Starting Times[J]. Applied Optics, 1988, 27(17): 3661—8.
- [3] 俞建荣,张奕林,蒋力培.水下焊接技术及其进展[J].焊接技术,2001(4): 2—4.
YU Jian-rong, ZHANG Yi-lin, JIANG Li-pei. Underwater Welding Technology and Its Progress[J]. Welding Technology, 2001(4): 2—4.
- [4] ZHU Jia-lei, JIAO Xiang-dong, ZHOU Can-feng, et al. Applications of Underwater Laser Peening in Nuclear Power Plant Maintenance[J]. Energy Procedia, 2012(16):

- 153—158.
- [5] HABENICHT I, SANTOS J, SZELAGOWSKI P, et al. Development of a Nozzle for Underwater Laser Beam Welds[J]. *Process of Offshore Mechanics and Arctic Engineering III*, 1996: 141—149.
 - [6] JONES M. Underwater Laser Welding Nozzle: US, US6060686 A[P]. 2000.
 - [7] YAMASHITA Y, KAWANO T, MANN K. Underwater Laser Welding by 4 kW CW YAG Laser[J]. *Journal of Nuclear Science & Technology*, 2001, 38(10): 891—895.
 - [8] MORITA I, OWAKI K, YAMAOKA H, et al. Study of Underwater Laser Welding Repair Technology[J]. *Welding in the World*, 2006, 50(7): 37—43.
 - [9] MAKIHARA Y, MIWA Y, HIROSE N, et al. The Application of the Welding Technique at Fillet Groove by the YAG-Laser Repair-Welding Robot for Underwater Environment[J]. *International Conference on Nuclear Engineering*, 2004: 149—155.
 - [10] BROOKS R. Underwater Laser-Beam Welding Set for U.S. Debut[J]. *Welding Design and Fabrication (Online)*, 2012, 4: 24.
 - [11] FUKUDA T, SUMIYA R, KONO W, et al. Temper-bead Weld by Underwater Laser Beam Welding[J]. *International Conference on Nuclear Engineering*, 2009, 1: 313—318.
 - [12] NEWTON B. Ambient Temperature Temper Bead Welding Using the Underwater Laser Beam Welding Process[J]. *Pressure Vessels and Piping Division*, 2010, 1: 1031—1036.
 - [13] ZHANG Xun-dong, CHEN Wu-zhu, ASHIDA E, et al. Relationship Between Weld Quality and Optical Emissions in Underwater Nd: YAG Laser Welding[J]. *Optics and Lasers in Engineering*, 2004, 41(5): 717—730.
 - [14] 张旭东, 陈武柱, 芦田荣次, 等. 局部干法水下 Nd:YAG 激光焊接技术[J]. *应用激光*, 2002(3): 309—312.
ZHANG Xu-dong, CHEN Wu-zhu, ASHIDA E, et al. Local Dry Underwater Nd: YAG Laser Welding Technology[J]. *Journal of Laser Applications*, 2002(3): 309—312.
 - [15] ZHANG Xu-dong, CHEN Wu-zhu, ASHIDA E, et al. Laser Material Interaction and Process Sensing in Underwater Nd: Yttrium Aluminum Garnet Laser Welding[J]. *Journal of Laser Applications*, 2003, 15(4): 279.
 - [16] 张旭东, 陈武柱, 芦田荣次, 等. 光学传感器对水下 Nd:YAG 深熔激光焊接过程检测的研究[J]. *应用激光*, 2002(2): 177—180.
ZHANG Xu-dong, CHEN Wu-zhu, ASHIDA E, et al. Process Sensing of Underwater Nd:YAG Laser Keyhole Welding with Optical Sensor[J]. *Journal of Laser Applications*, 2002(2): 177—180.
 - [17] 朱加雷. 核电厂检修局部干法自动水下焊接技术研究[D]. 北京: 北京化工大学, 2010.
ZHU Jia-lei. Research on Partial Dry Automatic Underwater Welding Technology for Nuclear Power Plant Maintenance[D]. Beijing: Beijing University of Chemical Technology, 2010.
 - [18] 陈海军. 气幕式旋转电弧传感器结构设计及其焊接电弧特性研究[D]. 南昌: 南昌大学, 2011.
CHEN Hai-jun. Air Curtain Rotary Arc Sensor Structure Design and Welding Arc Characteristics Research[D]. Nanchang: Nanchang University, 2011.
 - [19] KATAYAMA S, KOBAYASHI Y, MIZUTANI M, et al. Effect of Vacuum on Penetration and Defects in Laser Welding[J]. *Journal of Laser Applications*, 2001, 13(5): 186—192.
 - [20] BOERNER C, DILGER K, ROMINGER V, et al. Influence of Ambient Pressure on Spattering and Weld Seam Quality in Laser Beam Welding with Solid-state Laser[C]// In: *Proceedings of the 30th International Congress on Applications of Lasers and Electro-optics*. Orlando, FL, United States: Laser Institute of America, 2011: 621—629.
 - [21] FABBRO R, HIRANO K, PANG Sheng-yong. Analysis of the Physical Processes Occurring during Deep Penetration Laser Welding under Reduced Pressure[J]. *Journal of Laser Applications*, 2016, 28(2): 022427.
 - [22] PANG Sheng-yong, CHEN Xin, ZHOU Jian-xin, et al. 3D Transient Multiphase Model for Keyhole, Vapor Plume, and Weld Pool Dynamics in Laser Welding Including the Ambient Pressure Effect[J]. *Optics & Lasers in Engineering*, 2015, 74: 47—58.
 - [23] PANG Sheng-yong, HIRANO K, FABBRO R, et al. Explanation of Penetration Depth Variation during Laser Welding under Variable Ambient Pressure[J]. *Journal of Laser Application*, 2015, 27(2): 002007.
 - [24] YAMASHITA Y, KAWANO T, MANN K, et al. Underwater Laser Welding by 4 kW CW YAG Laser[J]. *Journal of Nuclear Science & Technology*, 2001, 38(10): 891—895.
 - [25] YAMASHITA, YOSHIHIRO. Newly Undertaken Inspections and Repairs for Aged Nuclear Power Generators[J]. *Journal of Nuclear Science & Technology*, 2001, 38(10): 887—890.
 - [26] 陈英, 许威, 马洪伟, 等. 水下焊接技术研究现状和发展趋势[J]. *焊管*, 2014(5): 29—34.
CHEN Ying, XU Wei, MA Hong-wei, et al. Research Status and Development Trend of Underwater Welding Technology[J]. *Welded Pipe*, 2014(5): 29—34.
 - [27] ZHU Jia-lei, JIAO Xiang-dong, ZHOU Can-feng, et al. Applications of Underwater Laser Peening in Nuclear Power Plant Maintenance[J]. *Energy Procedia*, 2012(16): 153—158.
 - [28] HIMI F, KAWAHITO, MIZUTANI M, et al. Full Penetration Characteristics of Underwater Laser Welding on Stainless Steel Using High Power and a Brightness Laser[J]. *Quarterly Journal of the Japan Welding Society*, 2018, 36(1): 122—128.
 - [29] 姚杞, 罗震, 李洋, 等. 不锈钢水下激光焊接焊缝成形与力学性能[J]. *上海交通大学学报(自然版)*, 2015, 49(3): 333—336.
YAO Qi, LUO Zhen, LI Yang, et al. Welding Seam Formation and Mechanical Properties of Stainless Steel Underwater Laser Welding[J]. *Journal of Shanghai Jiaotong University (Natural Edition)*, 2015, 49(3): 333—336.