doi: 10.11933/j.issn.1007-9289.20190123002

中碳钢水下湿法激光焊接焊缝成形行为与性能

秦 航,蔡志海,张 平,尤家玉

(陆军装甲兵学院机械产品再制造国家工程研究中心,北京100072)

摘 要:为了探索水下湿法激光焊接的可行性,使用光纤激光器探讨了激光功率、离焦量、水深等因素对 45 钢湿法 焊缝成形性的影响,对比研究了空气中焊接和水下焊接焊缝的组织性能。结果表明,水下湿法激光焊接过程中,在 水中入射激光和工件表面之间形成了一个"激光通道",这个通道能否稳定存在影响着焊接的稳定性。不同的激光功率 对应不同的水深阈值,当水深超过此阈值后,水会对激光产生强烈的屏蔽作用,导致焊接无法进行。激光功率、离焦 量和水深影响湿法焊接焊缝的成形性,激光功率增加有利于形成外观良好的焊缝,适当的负离焦有利于形成具有较 大深宽比的焊缝,水深增加不利于焊缝成形。空气中焊接焊缝中心主要是珠光体+铁素体,而水下焊接的焊缝主要是 马氏体和少量残余奥氏体。水下焊接焊缝硬度高于空气中焊接,拉伸强度达 606 MPa,达到基体拉伸强度的 94.8%, 断后伸长率降低至 3.1%。

关键词:水下焊接;激光焊;焊缝质量;力学性能 中图分类号:TG174.44 文献

文献标志码: A

文章编号:1007-9289(2019)03-0130-08

Forming Behavior and Properties of Medium Carbon Steel by Direct Underwater Laser Beam Welding

QIN Hang, CAI Zhihai, ZHANG Ping, YOU Jiayu

(National Engineering Research Center for Mechanical Product Remanufacturing, Army Academy of Armored Forces, Beijing 100072, China)

Abstract: To discuss the feasibility of direct underwater laser beam welding (ULBW), an optical fiber laser was used to investigate the effects of the laser power, the defocus distance and the depth of water on the underwater wet welding of 45 steel. The microstructure and properties of onshore welding and underwater welding was comparatively studied. Results show that a 'beam channel' is formed in the water between the incident laser beam and the surface of workpiece during the process of direct underwater laser welding. The stability of the welding is upon that of the 'beam channel'. The water depth thresholds vary according to different laser powers. Once the water depth exceeds the certain threshold, a strong hindering effect on the laser induced by the water is formed, which leads to the failure of the welding. The laser power, the defocus distance and the depth of water have significant influence on the quality of the weld bead. The increase of laser power improves the welding quality, and the appropriate negative defocus leads to the higher depth-width ratio welds. However, the increase of water depth has the negative effects. The microstructure of onshore welding is mainly composed of pearlite and ferrite. However, it is martensite and a small amount of residual austenite in underwater welding. The microstructure welding is 606 MPa, which is 94.8% of the substrate, while the percentage elongation after fracture is only 3.1%.

Keywords: underwater welding; laser welding; weld quality; mechanical property

QIN H, CAI Z H, ZHANG P, et al. Forming behavior and properties of medium carbon steel by direct underwater laser beam welding[J]. China Surface Engineering, 2019, 32(3): 130-137.

收稿日期: 2019-01-23; 修回日期: 2019-05-17

通信作者: 蔡志海 (1979—), 男 (汉), 副研究员, 博士; 研究方向: 材料加工工程; E-mail: caizhihai2052@163.com

引用格式:秦航,蔡志海,张平,等.中碳钢水下湿法激光焊接焊缝成形行为与性能[J].中国表面工程,2019,32(3):130-137.

0 引 言

海洋蕴藏着丰富的资源,海洋资源的开发利 用对我国的经济发展和能源安全具有十分重大的 战略意义。海洋油气资源的开发需要建设大量的 海洋工程,而海洋工程的建设与维护都离不开先 进的焊接技术^[1]。水下焊接技术已经成为大型海洋 结构组装、维护的关键所在^[2]。核能作为一种安 全、清洁、经济、高效的绿色能源,是未来能源发 展的一大趋势,对我国建设资源节约型、环境友 好型社会具有重要意义。与其他电能生产相比, 核电厂在运行时要使用大量放射性物质,一旦发 生事故,后果不堪设想。目前,核电设备的组装 主要靠焊接,焊接技术对核电站的建造和运行维 修具有非常重要的作用。对于核电设施在役维修 而言,为了降低核辐射的影响,需要进行水下焊 接维修作业^[3]。

按照焊接时焊件表面的状态可以将水下焊接 分为湿法、干法和局部干法三大类。其中湿法焊 接不需要采用特殊的排水装置,焊接直接在水中 进行,具有设备简单、成本低廉、操作灵活及适 应性强等优点[4-5]。目前水下湿法焊接主要采用手 工焊条电弧焊和药芯焊丝电弧焊。作为一种新型 的水下焊接技术,水下激光焊接 (Underwater laser beam welding, ULBW) 具有焊接速度快、热输入 低、热影响区 (Heat affected zone, HAZ) 小、变形 小的优点,当使用光纤激光器时,光束可以通过 光纤长距离传输至待焊部位,不需要潜水焊工的 介入,易于实现自动化和适应精确位置的焊接^[7]。 水下激光焊接相较于其他湿法焊接技术最突出的 优点在于激光的传输不受水深压力的影响,而只 与传输过程中穿透的水有关,因此能够在深海较 大的环境压力下进行焊接。

激光在水下焊接领域的研究主要集中在局部 干法激光焊接。ZHANG X D^[8]等研究了保护气体 流量、水流速度角度对水帘式局部干法激光焊接 稳定性和质量的影响,指出当干腔稳定时,能够 得到稳定的、表面无缺陷的焊缝。姚杞^[9]对水下 局部干法焊接 AISI 304 不锈钢工艺参数对激光光 束质量的影响机制进行了研究,指出影响光束质 量的主要因素包括气溶胶粒子的散射和折射作用 以及气体密度分布,选择合适的气体流量,可获 得与母材力学性能相当的接头。 水下湿法激光焊接的研究鲜有报导。GUO N^[10] 等研究了水深对焊接质量和过程的影响,发现当 水深小于 3 mm 时,水对焊接的影响很小,当水 深达到 7 mm 以上时,由于水对激光的强烈屏蔽 作用导致焊接无法进行。目前学术界对是否有必 要完全将水排除以形成稳定的局部干腔仍存在争 议,因此开展水下湿法激光焊接的研究能为激光 在水下焊接中的应用提供理论基础和技术指导。 文中以中碳钢为对象,探索了水下湿法激光焊接 可行性,并对其焊缝成形行为及性能进行研究。

1 试验与方法

1.1 材料与方法

试验采用 45 钢作为母材,其尺寸为 80 mm× 100 mm×10 mm,在焊接前使用 38 μm 砂纸打磨, 而后用酒精清洗。焊接时试样直接放置于自来水 中,激光穿过水后辐照到基体表面进行焊接。

试验中使用光纤激光器,激光器最大输出功 率为 6000 W,波长 1070 nm,焦距 330 nm。激 光经直径为 200 μm 的光纤传输至安装在六轴机器 人上的焊接头,自制的水下环境模拟装备放置于 激光焊接头下方可移动的焊接工作台上。

首先进行了水下湿法焊接可行性试验,对水 下湿法焊接的机理进行了探讨。在此基础上探讨 了水下湿法激光焊接工艺对焊缝成形行为的影 响,最后对比研究了水下湿法焊接和空气中焊接 焊缝的组织和性能。

1.2 表征和测试手段

沿垂直于焊缝方向切出金相试样,经打磨、 抛光和 4%的硝酸酒精腐蚀后,用 Olympus GX-51 型光学金相显微镜观察微观结构。

取焊缝纵向中心位置,沿垂直于焊缝方向作显微硬度分布测试,压力100g,加载时间15s。 水平方向步长0.2mm,每点测量3次取平均值。 拉伸试样按GB/T228.1-2010《金属材料拉伸试验 标准》制备,制备时确保焊缝位于拉伸试样中心 位置。室温下,使用WAW-600万能试验机进行 拉伸试验,拉伸速率10mm/min。每种焊缝拉伸 试样各3件,取平均值。采用D8型X射线衍射 仪检测焊缝的相结构,采用Cu靶的Kα射线,衍 射范围20°~100°,衍射速度2°/min。通过Philips Quant200型扫描电子显微镜观察断口形貌。

2 结果与讨论

2.1 水下湿法激光焊接可行性

水下环境的复杂性和特殊性决定了水下湿法 激光焊接极具挑战性。水下散热快,易引起裂 纹、气孔、淬硬组织、残余应力等缺陷;水下压力 大,导致熔池行为、熔滴过渡、气泡逸出与湮灭 等机制与空气中焊接时不同;水与激光作用机制 复杂,导致成形稳定性差、功率损耗大^[11-14]。

为了验证水下湿法激光焊接的可行性,在不同水深下进行了水下湿法焊接试验。具体试验参数为激光功率 3000~6000 W,水深 0~15 mm,焊接速度 5 mm/s,离焦量 0 mm。

图 1 是激光功率 3000 W 时,两种典型水深下 激光焊接时的状态。从图中可以看到,当水深未 达到阈值时,焊接能够正常进行,水面上方有金 属羽辉,并伴随飞溅;当水深超过阈值时,焊接 无法进行。

结果表明,水下湿法激光焊接的水深存在阈 值,当水深小于阈值时,焊接能够正常进行,当



(a) Under the water depth of 3 mm



(b) Under the water depth of 10 mm

图 1 不同水深下的湿法激光焊接过程(ULBW) Fig.1 Process of direct ULBW under various water depths 水深大于阈值时,焊接无法继续。激光功率 3000 W 时,此阈值为 7 mm,随着激光功率增加,水深阈 值有所增大,但并不与功率成比例增加,激光功 率达到 6000 W 时的阈值为 10 mm。

水下湿法焊接可以分为两步:首先是入射激 光与水、金属之间发生复杂的反应,从而形成"激 光通道",然后激光穿过此通道照射到工件表面进 行焊接。此时的焊接过程与在空气中的焊接过程 差别不大。焊接能否进行取决于能否在工件表面 形成一个稳定的"激光通道",其原理如图2所示。 当水深小于阈值时,水的压力较小,金属羽辉和 激光诱导等离子体能够突破水的束缚,扩散到周 围的空气中,因此激光能量损耗小,焊接表面能 量密度足够大,可以形成稳定的"通道",焊接可以 进行,如图2(a)所示。当水深大于阈值时,金属羽 辉及激光诱导等离子体在水压力作用下被束缚在 一个狭小的空间中,对激光产生强烈的屏蔽作用, 导致工件表面达不到深熔焊所需要的能量密度, 工件表面无法形成稳定的"通道",如图2(b)所示。



(a) Welding under the water depth of 3 mm



(b) Welding under the water depth of 10 mm



Fig.2 Schematic diagram of direct ULBW process under different water depths

2.2 水下湿法激光焊接焊缝成形行为

水下湿法焊接的影响因素有很多,除了激光 功率、焊接速度、离焦量等影响因素外,还必须 考虑水深对焊接的影响,文中主要研究了激光功 率、离焦量和水深对焊缝成形性的影响。

图 3 是激光功率对焊缝成形行为的影响。其工 艺参数为激光功率 2000~6000 W,焊接速度 5 mm/s, 离焦量-2 mm,水深 4 mm。从图 3 中可以看到, 激光功率 2000 W 时,焊接无法进行,焊缝不连 续;激光功率较小时(小于 4000 W 时),焊接成形 性差,焊缝表面起伏大,且有明显的缺陷;当功 率增大至 4500 W 时,焊缝表面起伏得到改善,未 见明显焊接缺陷;功率继续增加,焊接成形性进 一步改善;功率达到 6000 W 时,焊缝连续美观,





焊接成形性最好。

稳定的"匙孔"是激光深熔焊接的前提。由于 "匙孔"的存在,激光束可以照射到金属内部,增 加了材料对激光能量的吸收,促使"匙孔"周围的 金属熔化形成熔池^[15]。当激光功率在 4000 W 以 下,辐照到金属表面的能量不足以形成或维持"匙 孔"的稳定存在,因此焊接质量较差。随着激光功 率的增大,"匙孔"稳定存在,材料吸收的激光能 量更多,熔池冷却变缓,有利于形成均匀美观的 焊缝。

图 4 是离焦量对焊缝成形性的影响。其工艺 参数为激光功率 4000 W,焊接速度 5 mm/s,离焦 量-3~+3 mm,水深 4 mm。从图中可以看到,当 离焦量为正时,即激光焦点在基体表面上方时, 焊缝成形欠佳;随着焦点位置的下降,焊缝成形 变好。



图 4 水下湿法激光焊接离焦量对焊缝成形性的影响 Fig.4 Effects of the defocus distance on the formability of direct ULBW

对不同离焦量下的焊缝熔深、熔宽进行了测 量,如图 5 所示。从图中可以看到,熔深、熔宽 大体上呈对称分布,且均呈现随着离焦量的增大 先增加后减少的趋势,在离焦量为-2 mm 时熔深 达到最大的 7545 μm,并具有最大的深宽比。这 与熔池的形成过程有关,当负离焦时,材料内部 的功率比表面还高,有利于形成更强的熔化、气 化,同时深熔焊时形成的"匙孔"具有"侧壁聚焦效 应"使进入"匙孔"的光束部分被侧壁吸收,另一部 分被反射至"匙孔"底部重新聚焦,因此"匙孔"深



图 5 不同离焦量下焊缝熔深、熔宽及深宽比

Fig.5 Penetration depth, weld width and depth-width ratio under various defocus distance

度不断增大,但每反射和聚焦一次,能量就衰减 一部分,直至能量衰减到一定数值,"匙孔"深度 不再增大,最终获得深而窄的焊缝。

图 6 是水深对焊缝成形性的影响。焊接方向 从左至右,焊接时形成了"匙孔","匙孔"被熔池 金属包围,熔化金属在重力和表面张力的作用下 有使"匙孔"弥合的趋势,图中焊缝尾部的小孔就 是因为基体冷却较快熔融金属回填不及时形成 的。可以看到,随着水深的增加,焊缝热影响区 变小,焊缝变窄,焊接成形性变差。



图 6 水下湿法激光焊接水深对焊缝成形性的影响 Fig.6 Effects of the water depths on the formability by direct

ULBW

图 7 是不同水深下焊接时焊缝熔深、熔宽及 深宽比。观察发现,水深小于 3 mm 时,熔深、熔 宽变化都不大,总体趋势是熔宽随着水深的增加 逐渐减小,而熔深随水深增加先增加后减小,当 水深 2 mm 时焊缝有最大熔深,达到 8.2 mm。当 水深 1 mm 时,激光初始点火后,工件被迅速加 热,由于热传导,热影响区等温线位于光束前 方,有效地蒸发了工件表面的水,此时的焊接与 在空气中进行焊接差别不大。水深 2 mm 时熔深 增加而熔宽略有减少,其主要是受焊缝中 O 元素 含量的影响。水深较浅时,水在激光及受热基体 的作用下,气化分解成 H 和 O,而焊缝中 O 元素 的含量增加对熔深有较大影响。当焊缝中的氧的 质量分数达到一定水平时,熔池中正的表面张力 系数占主导地位,在熔池中心引起向内的两个涡 流,方向相反;两股涡流在熔池上表面中心相 遇,改变方向后合在一起,流向熔池中心底部, 形成对该部位的冲击,并将热量传给基体,从而 加速了该部位的熔化,大大增加了熔池深度。



图 7 不同水深下的水下湿法激光焊接的熔深、熔宽及深宽比 Fig.7 Penetration depth, weld width and depth-width ratio by direct ULBW under various water depths

2.3 水下湿法激光焊接焊缝组织性能

采用激光功率 4000 W,焊接速度 5 mm/s,离 焦量-2 mm 的焊接工艺,在 4 mm 水下进行焊 接,得到了无缺陷的焊缝,如图 8 所示。



图 8 水下湿法激光焊接焊缝宏观、微观形貌

Fig.8 Macroscopic and microscopic morphologies by direct ULBW

从焊缝的宏观形貌中可以看到,焊缝表面光 亮,无氧化,焊缝均匀美观,无明显焊接缺陷;从 微观图中可以看到,焊缝中无裂纹、气孔等缺陷。 将上述焊缝与空气中焊接的焊缝进行了对比 研究。图 9 是空气中焊接与水下焊接热影响区金 相组织。从图中可以看到,两种不同环境中焊接 焊缝的热影响区大小差别很大,水下焊接的热 影响区明显小于空气中焊接。45 钢基体呈现典型 的热轧状态组织特征,即珠光体和铁素体循加工 方向呈带状分层分布。热影响区组织在焊接热循 环的作用下转变为网状铁素体+珠光体,如图 9(c) 所示。

图 10 是空气中和水下焊接焊缝中心的金相组 织。空气中焊接时,焊缝冷却速度慢,在焊缝中 心形成了块状铁素体+珠光体的组织,并且从焊缝 中心到焊缝底部,铁素体含量逐渐减少。在水下 焊接时,由于工件周围水的冷却作用,使焊缝在 很短的时间冷却,形成了针状马氏体+残余奥氏体 的组织结构,并且可以明显看到不同晶粒内平行 的马氏体位向是不同的。

图 11 是空气中和水下焊接焊缝 XRD 谱。从 图中可以看到,与空气中焊接相比,水下湿法焊 接焊缝的衍射峰强度有所降低,并且衍射峰向大 角度方向出现偏移。主要原因是水的热导率空气的 20 倍,熔池散热更快,焊缝中熔融金属结晶速 度快,晶粒更加细小。

图 12 是空气中与水下湿法焊接焊缝的显微硬 度分布。空气中焊接焊缝硬度约为 300 HV_{0.1}, HAZ 硬度最大为 543 HV_{0.1},水下焊接焊缝中心硬 度达到 613 HV_{0.1},HAZ 硬度最大为 651 HV_{0.1}。 两种焊缝的最大硬度均出现在 HAZ 处,母材硬度 最低。这是因为在焊接过程中 HAZ 受热发生了相 变,相当于经历了一次淬火过程,因此硬度较 高。与空气中焊接相比,水下焊接焊缝中心处硬 度值也比较高,一方面因为水下焊接焊缝主要由 硬质相马氏体组成,另一方面由于水的存在使焊 缝极速冷却,焊缝中心处晶粒细小均匀。

对空气中和水下焊接的焊缝进行了拉伸实验,并与45钢基体进行了对比,图13为拉伸试样的断裂位置,图14是拉伸强度对比。

从图 13 中可以看到,45 基体拉伸试样颈缩 明显,断后伸长率为 34.4%,而焊接后的拉伸试 样断裂均发生在焊缝处,空气中焊接断后伸长率



(a) Welding in air

(b) Welding under the water depth of 4 mm

(c) HAZ

图 9 空气中焊接及水下 4 mm 湿法激光焊接焊缝热影响区的金相组织 Fig.9 Metallographs of HAZ in air and direct ULBW under the water depth of 4 mm



(a) Welding in air

(b) Welding under the water depth of 4 mm

135

图 10 空气中焊接及水下 4 mm 湿法激光焊接焊缝中心的金相组织 Fig.10 Metallographs of weld center in air and direct ULBW under the water depth of 4 mm





Fig.11 XRD patterns of welding in air and underwater



(c) Welding underwater

图 13 TC4 基体、空气中焊接和水下焊接拉伸试样断裂位置 Fig.13 Fracture position of tensile specimens of TC4 substrate, welding in air and underwater

为 9.3%,水下焊接仅为 3.1%。空气中焊接后抗拉 强度为 681 MPa,略高于基体,水下焊接试样拉 伸强度为 606 MPa,达到基体的 94.8%。

图 15 是拉伸试样断口 SEM。可以看到基体 拉伸试样断口为韧性断裂,断口中有大量的韧



图 12 空气中焊接与水下 4 mm 湿法焊接显微硬度分布

Fig.12 Microhardness distribution of the welding in air and direct ULBW under the water depth of 4 mm



图 14 TC4 基体、空气中焊接和水下焊接抗拉强度对比

Fig.14 Comparison of tensile strength of TC4 substrate, welding in air and underwater

窝,并且有少量的滑移带;而空气中焊接和水下 焊接断口为典型的脆性断裂,在两者的断口中可 观察到大量的解理面,其中空气中焊接试样断口 可见河流状花纹,主要为穿晶断裂,水下焊接断 口起伏大,既有沿晶断裂又有穿晶断裂,为混合 断裂。水下焊缝抗拉强度低的原因在于焊接过程 中形成了淬硬组织。



(a) Substrate

(b) Welding in air

(c) Welding underwater

图 15 TC4 基体、空气中焊接和水下焊接拉伸试样断口形貌

136

3 结 论

(1)水下湿法激光焊接在特定的条件下是可行的。水下焊接能否进行取决于能否在焊接表面形成稳定的"激光通道",对不同的激光功率而言,存在一个极限水深,一旦超过此水深,激光诱导等离子体将对入射激光产生强烈的屏蔽作用,从而导致焊接无法进行。

(2) 在 2000~6000 W 功率范围内,增大功率有 利于获得连续成形、外观良好的焊缝;适当的负 离焦有利于激光能量吸收,形成深宽比大的焊 缝,当离焦量为-2 mm 时,焊缝的深宽比最大; 焊缝成形性随工件表面水深的增加而变差,当水 深超过 6 mm 时,不能形成连续焊缝。

(3) 与空气中焊接相比,水下焊接焊缝组织主要由针状马氏体+残余奥氏体组成,焊缝中心硬度达到 613 HV0.1。水下焊接的拉伸断口为典型的脆性断裂,拉伸强度 606 MPa,达到基体的 94.8%,断后伸长率 3.1%,塑性严重下降。

参考文献

[1] 马云鹤,李志尊,孙立明,等.水下湿法焊接技术研究进展[J].
 热加工工艺, 2018, 47(17): 10-13.
 MA Y H, LI Z Z, SUN L M, et al. Research progress of underwater wet welding technology[J]. Hot Working Techno-

logy, 2018, 47(17): 10-13 (in Chinese).

- [2] WANG J F, SUN Q J, PAN Z C, et al. Effects of welding speed on bubble dynamics and process stability in mechanical constraint-assisted underwater wet welding of steel sheets[J]. Journal of Materials Processing Techology, 2019, 264: 389-401.
- [3] CHEN H, GUO N, SHI X H, et al. Effect of water flow on the arc stability and metal transfer in underwater flux-cored wet welding[J]. Journal of Manufacturing Processes, 2018, 31: 103-115.
- [4] WANG J F, SUN Q J, ZHANG S, et al. Characterization of the underwater welding arc bubble through a visual sensing method[J]. Journal of Materials Processing Technology, 2018, 251: 95-108.
- [5] ŁABANOWSKI J. Development of under-water welding techniques[J]. Welding International, 2011, 25: 933-937.

- [6] ALEKSANDRA S, DARIUSZ F, GRZEGORZ R. Diffusible hydrogen management in underwater wet self-shielded flux cored arc welding[J]. Internationale Journal of Hydrogen Energy, 2017, 42: 24532-24540.
- [7] 邢霄. 304 不锈钢水下激光焊接排水装置设计及焊接工艺研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2017: 1-8.
 XING X. Design on draining water device and its welding procedure research in underwater laser welding of 304 stainless steel[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2017: 1-8 (in Chinese).
- [8] ZHANG X D, ASHIDA E, SUSUMU S, et al. Effect of shielding conditions of local dry cavity on weld quality in underwater Nd: YAG laser welding[J]. Journal of Materials Processing Technology, 2006, 174: 34-41.
- [9] 姚杞. 不锈钢水下激光焊接研究[D]. 天津: 天津大学, 2014: 59-60.

YAO Q. Study on underwater laser welding of stainless steel[D]. Tianjin: Tianjin University, 2014: 59-60 (in Chinese).

- [10] GUO N, XING X, ZHAO H Y, et al. Effect of water depth on weld quality and welding process in underwater fiber laser welding[J]. Materials & Design, 2017, 115: 112-120.
- [11] FENG X R, CUI X F, JIN G, et al. Underwater laser cladding in full wet surroundings for fabrication of nickel aluminum bronze coatings[J]. Surface & Coatings Technology, 2018, 333: 104-114.
- [12] 李春旭.水下湿法焊接接头力学性能研究[D].哈尔滨:哈尔滨工业大学, 2013: 1-9.
 LI C X. The mechanical propertiea of underwater wet welded joints[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2013: 1-9 (in Chinese).
- [13] SHANNON G J, WATSON J, DEANS W F. Investigation into the underwater laser welding of steel[J]. Journal of Laser Applications, 1994, 6: 223-229.
- [14] ROWE M, LIU S. Recent developments in underwater wet welding[J]. Science and Technology of Welding and Joining, 2001, 6(6): 387-396.
- [15] 虞钢,何秀丽,李少霞. 激光先进制造技术及其应用[M]. 北京:国防工业出版社, 2016: 92-96.
 YU G, HE X L, LI S X, et al. Laser manufacturing and its applications[M]. Beijing: National Defense Industry Press, 2016: 92-96 (in Chinese).