

GH3625合金环形光斑激光焊接工艺研究

陈雄姿^{1, 3}, 彭和思², 肖乐^{1, 3}, 吴自强², 方民朴², 梅颢骞¹, 谢辉鹏¹, 覃业文², 姚春臣^{1, 4}

1. 湖南顶立科技股份有限公司 湖南长沙 410137

2. 长沙天辰激光科技有限公司 湖南长沙 410100

3. 南昌大学物理与材料学院 江西南昌 330031

4. 江南工业集团有限公司 湖南湘潭 411207

摘要: 为解决高温合金焊件的气孔问题, 使用环形光斑焊接设备对厚度4mm的GH3625固溶强化型高温合金板进行环形光斑和激光摆动焊接工艺试验, 使焊接试板达到了Ⅰ级焊缝质量要求。通过焊接工艺评定后, 将其用于高温合金焊件的焊接。工艺试验结果和生产应用效果表明: 高温合金的激光深熔焊容易产生气孔; 环形光斑焊接是解决激光深熔焊气孔问题的有效途径之一; 同时采用环形光斑和激光摆动焊接的效果更佳。

关键词: 高温合金; 激光深熔焊; 气孔; 环形光斑焊接; 激光摆动焊接

Study on ring laser beam welding technology of GH3625 alloy

CHEN Xiongzi^{1, 3}, PENG Hesi², XIAO Le^{1, 3}, WU Ziqiang², FANG Minpu², MEI Haoqian¹, XIE Huipeng¹,
QIN Yewen², YAO Chunchen^{1, 4}

1. Hunan Dingli Technology Co., Ltd., Changsha 410137, Hunan, China

2. Changsha Tianchen Laser Technology Co., Ltd., Changsha 410100, Hunan, China

3. School of Materials Science and Engineering, Nanchang University, Nanchang 330031, Jiangxi, China

4. Jiangnan Industrial Group Co., Ltd., Xiangtan 411207, Hunan, China

Abstract: In order to solve the porosity problem of superalloy welds, ring laser beam welding equipment was used to perform ring laser beam welding and laser swing welding process tests on GH3625 solid solution strengthened superalloy plate with thickness of 4mm, which made the welding test plate meet the quality requirements of Class I weld. After the welding process evaluation, it is used for the welding of superalloy weldparts. The results of process test and production application show that: the laser deep penetration welding of superalloy is easy to produce porosity; Ring laser beam welding is one of the effective ways to solve the problem of porosity in laser deep penetration welding. The effect of ring laser beam welding and laser swing welding is better.

Keywords: superalloy; laser deep penetration welding; porosity; ring laser beam welding; laser swing welding

1 序言

固溶强化型的镍基高温合金, 具有良好的高温

强度和塑性, 在航空航天、能源和化工等领域的应用已越来越广。一种要求耐高温和耐腐蚀的工件采

第一作者: 陈雄姿, 硕士, 研究方向为高温合金焊接, E-mail: 395691546@qq.com。

通信作者: 姚春臣, 研究员级高级工程师, 长期从事材料及热加工、航天工程等专业技术研究工作, E-mail: yaocc112@163.com。

用了牌号为GH3625、板厚为4mm的固溶强化型高温合金。该工件需要采用激光深熔焊进行焊接。由于激光深熔焊时,熔池中有1个由高密度激光束产生的匙孔^[1],匙孔内部压力的失衡和形状的失稳容易导致焊缝中出现气孔^[2],所以激光深熔焊容易出现焊缝内部存在气孔的情况。国内外许多专家、学者和工程技术人员对激光深熔焊气孔问题进行了研究和技术攻关。

广东工业大学钟世杰^[3]研究了中厚板低碳钢激光深熔焊工艺及气孔形成机理;曹浩等^[4]研究了激光摆动焊接参数对高强度钢气孔率和焊缝成形的影响;西南交通大学何双^[5]研究了氦-氩混合保护气对A7N01铝合金激光-MIG复合焊接特性的影响等。特种材料焊接工艺研究团队CHEN等^[6]也曾对厚度为2mm和3mm的高温合金板件进行过激光深熔焊试验,并采用了光束摆动的激光焊及经优选配比的氦-氩混合保护气等工艺措施,有效减少了气孔的产生,使焊缝达到了I级焊缝^[7]的质量要求。对于厚度4mm的工件,除了功率相应增大和换用较大功率的激光焊机以外,焊接方法和主要工艺参数都沿用了过去2mm和3mm厚度高温合金激光深熔焊的成功经验。厚度4mm的试板焊接后,虽然外观质量很好,但在X射线检测对接焊缝内部质量时,却又因内部气孔较多,达不到I级焊缝的质量要求。在焊接工艺和设备方面采用改进措施后,试验结果仍不理想,因此需要寻找新的解决方法。经调研得知,芬兰相干激光公司开发的环形激光合束器和传输光纤,实现中心光束和环形光束协调输出,稳定了焊接过程,有效解决了镀锌钢、铝合金的激光焊质量问题^[8];广州中国科学院工业技术研究所李庆等^[9]采用环形光斑光纤激光焊消除锂离子电池铝壳焊缝内部的工艺性气孔,使焊缝内部气孔率降低到1%以内;长沙理工大学张明军等^[10]研究了中心激光束和环形激光束功率组合对AZ31B镁合金对接接头焊缝宏观成形、纤维组织和力学性能的影响,认为环形激光束的加入可以改善镁合金激光焊接头的性能;济源职业技术学院赵海发等^[11]采用纯环形光斑激光进行正交试验,提高了PA66塑料焊缝强度,焊缝的熔深均匀一致,内部无气孔产生;激光摆动焊接、多波长复合激光焊和环形光斑激光焊是光束空间调制激光焊的主要形式,是目前国内外研究较多

的焊接技术^[12]。于是,为了探讨环形光斑激光焊接高温合金的效果,解决高温合金激光深熔焊气孔问题,对厚度4mm的GH3624合金板进行了中心光束和环形光束协调输出并摆动的环形光斑复合光纤激光焊工艺试验。

2 试验材料及前期焊接试验情况

2.1 材料化学成分及焊接试板准备

GB/T 14992—2005《高温合金和金属间化合物高温材料的分类和牌号》^[13]规定的GH3625高温合金的化学成分见表1。

表1 GH3625高温合金化学成分(质量分数)(%)

C	Cr	Ni	Co	Mo	Al	Ti
≤0.10	20.00~23.00	余量	≤1.00	8.00~10.00	≤0.40	≤0.40
Fe	Nb	Si	Mn	P	S	Cu
≤5.00	3.15~4.15	≤0.50	≤0.50	≤0.015	≤0.015	≤0.070

焊接试验用厚4mm的高温合金板,其外观、尺寸及热处理状态均符合GB/T 14996—2010《高温合金冷轧板》^[14]的要求,取样分析化学成分结果符合表1的要求。

然后,将GH3625高温合金板材加工成长约200mm、宽约100mm的焊接试板10余件。

2.2 前期传统方式的焊接试验

(1) 6000W机器人激光焊机的焊接试验 厚4mm高温合金板的焊接试验在6000W机器人激光焊机上进行。参照之前焊接厚2mm和3mm高温合金试板达到I级焊缝质量要求的经验,采用了单激光束摆动的焊接工艺。

先用厚度4mm的不锈钢试片试焊,调整工艺参数,待焊缝外观成形良好之后,再用GH3625高温合金试板试焊。先在单一试板A的平面上进行非对接的激光深熔焊试验,调整工艺参数,待焊缝成形良好之后,再先后对试板C与D、G与L进行对接焊。除了试板A上最初2条焊缝未焊透以外,其余焊缝及对接焊缝成形良好,没有表面气孔、裂纹等缺陷。然后对试板A上的4条焊缝以及对接板上的焊缝全部进行X射线检测。4mm板首次焊接试验的焊接参数及X射线检测结果见表2。

从表2可见,试板A上的2条已焊透焊缝均为I级焊缝,而焊接参数与试板A-4号焊缝完全一样的

表2 4mm板首次焊接试验的焊接参数及X射线检测结果

试板及焊缝编号	激光功率/W	X射线检测评级	备注
试板A-1	1900	Ⅲ	未焊透
试板A-2	2300	Ⅲ	未焊透
试板A-3	3000	I	—
试板A-4	3500	I	—
C-D对接板	3500	Ⅲ	—
G-L对接板	3500	Ⅲ	—

注：焊接速度为1000mm/min；摆动方式为连续圆形；摆动频率为200Hz。

C-D对接板、G-L对接板对接焊缝的X射线检测评级却均为Ⅲ级，不合格，且对接焊缝被评为Ⅲ级的原因是焊缝内部气孔超标。

对Ⅲ级焊缝试板截取加工拉伸试样进行摸底试验，结果其中1件试样的室温抗拉强度仅为730MPa，低于技术要求，不合格。其试样断裂于焊缝区，断口上可见较多、较大的气孔（见图1）。由此可见，气孔是降低焊接接头强度的重要因素。



图1 试样断口上的气孔

由于单一试板上成形良好的焊缝可达到I级，而对接焊缝却均是Ⅲ级，所以考虑有可能是对接焊缝的对接面存在问题。于是，对后续待焊的对接试板对接面及其附近表面都重新进行了抛磨。经酒精超声波清洗后，重新进行焊接。焊接前，用丙酮清洗并晾干。重新焊接6块试板，但3条对接焊缝经X射线检测评级仍然均为Ⅲ级。

（2）2000W激光焊试验平台的试验 由于之前采用长沙天辰激光的2000W激光焊试验平台，选用合适的光束摆动工艺参数焊接厚2mm和3mm的高温合金对接板，均能达到I级焊缝的要求。因此，决定用2000W激光焊试验平台试焊厚度为4mm的高温合金。该平台包括3轴精密焊接平台、创鑫2000型激

光器、激志机电3000水冷机及汉威双摆激光头。

焊接时，为了克服该焊机焊接4mm厚高温合金功率不足的问题，降低了焊接速度，使其能够焊透。焊后X射线检测结果为：在试板上熔焊的8条焊缝中，I级焊缝有2条，Ⅱ级焊缝有1条，其余5条为Ⅲ级焊缝；对接焊缝均为Ⅲ级，效果仍然不好。

这也说明高温合金板的厚度越厚，所需的激光功率（或热输入）越大，其防止或减少气孔产生、达到I级焊缝质量要求的难度也越大。因此需要采用新的焊接技术和设备。

3 环形光斑激光焊接试验

3.1 焊接设备

焊接设备为长沙天辰激光科技有限公司的环形光斑焊接设备，如图2所示。其中，环形光斑激光器为试用的创鑫MFMC-2000/2000M环形光斑激光器。该设备可以分别调节中心光束和环形光束的功率，并可以进行光束的摆动焊接。



图2 环形光斑激光焊设备

3.2 试焊调整焊接参数

先用不锈钢试片进行试焊，然后再用GH3625高温合金试板试焊。

GH3625试板均经过酒精超声波清洗。在同一块GH3625高温合金试板上先后试焊了5条焊缝，其焊接参数及焊接效果见表3。

将单一试板上5条焊缝的部分切下，并将这5条焊缝用金相切割机横向切断（见图3），检查焊缝的横截面。结果为横截面上均无气孔。图4所示为其中1条焊缝的横截面。

图5所示为上述环形光斑激光焊接的5条焊缝截

表3 GH3625高温合金试板初次试焊焊接参数及效果

焊接顺序	内部功率/W	外环功率/W	摆动情况	焊接效果
1	2000	1000	未摆动	全焊透， 焊缝偏宽
2	2000	1000	未摆动	
3	1600	1000	摆动	尾段未焊透
4	1800	1000	摆动	尾段刚焊透
5	1900	1000	摆动	全焊透， 成形良好

注：焊接速度为1000mm/min；摆动方式为连续圆形；摆动频率为150Hz。



图3 被切断的焊缝

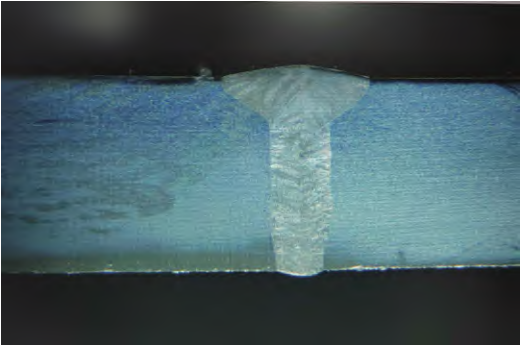


图4 焊缝截面（7×）

面与传统方式单光束激光焊接的8条焊缝截面的对比。其中，上层5条环形光斑激光焊接的焊缝横截面均无气孔，而下层传统方式单光束摆动激光焊接的部分焊缝截面上可见有明显的气孔。



图5 两种焊接方法的焊缝截面对比

3.3 焊接对接试板

经检查环形光斑激光焊接的焊缝横截面没有气孔之后，又再次试焊。先在单一的GH3625高温合金

试板上焊接了3条非对接熔焊焊缝，然后再焊接对接试板（见图6）。其焊接参数及X射线检测结果见表4。从表4可见，环形光斑激光焊机在单一试板上进行的熔焊焊缝和2块试板对接焊的焊缝均达到了Ⅰ级质量要求。

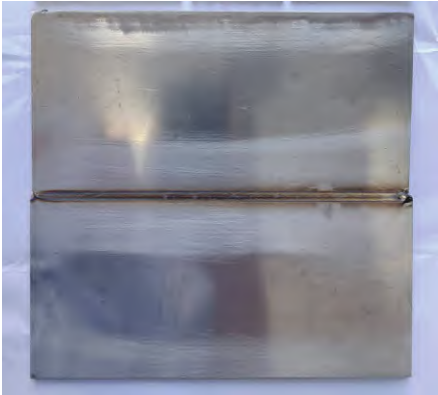


图6 对接焊试板

表4 GH3625高温合金板环形光斑激光焊接参数及X射线检测结果

序号	试板或焊缝编号	内部功率 /W	外部功率 /W	X射线检测 评级
1	试板-1	1900	1000	Ⅰ
2	试板-2	1900	1000	Ⅰ
3	试板-3	2000	1000	Ⅰ
4	K-H对接板	2000	1000	Ⅰ

注：焊接速度为1000mm/min；光束摆动方式为连续圆形；摆动频率为150Hz。

4 环形光斑激光焊的生产应用

在焊接试板达到Ⅰ级焊缝质量要求后，对其取样检测焊接接头的室温及高温强度，检测结果全部合格（见表5）。

表5 试样拉伸试验结果

试样号	试验温度 /℃	抗拉强度 /MPa	屈服强度 /MPa	伸长率 (%)
4-4S1	23	830	470	36.5
4-4S2	23	828	497	42.5
4-4G1	800	497	298	—
4-4G2	800	557	363	—

经工艺评审和验证试验之后,这种中心光束和环形光束协调输出并摆动的环形复合光斑激光焊工艺及设备均已应用于高温合金工件的焊接,完成了工作任务。

5 讨论

(1) 高温合金的激光深熔焊易产生气孔 激光深熔焊均有焊缝深宽比较大、焊接热影响区较小、焊接变形较小及生产效率高等优点,其应用范围已经越来越广泛。但由于焊接时熔池中有一个由高密度激光束产生的匙孔,而匙孔的运动不稳定,因此容易导致焊缝内部存在气孔。当气孔较大、较多时,必然会影响焊接强度。低碳钢、高强钢、不锈钢及铝合金等金属材料的深熔焊都有发现焊接气孔并如何解决气孔问题的报道^[15, 16]。在前期试验中,高温合金激光深熔焊也存在严重的焊接气孔问题,并因气孔较多、较大而导致焊缝质量不能达到 I 级焊缝的要求,而且也导致其焊接强度不合格。因此,必须采取有效措施,严防产生对焊接强度有明显影响的较大、较密集气孔,确保焊接质量。

(2) 板厚增加增大了焊接质量控制难度 之前在进行2mm和3mm厚高温合金的激光深熔焊试验时,起初因气孔问题,试板焊缝评级为Ⅲ级和Ⅳ级,均不合格。后采取激光光束摆动焊接等措施,优选工艺参数,最终使单一的试板熔焊焊缝和试板对接焊缝都达到了 I 级焊缝的质量要求,解决了焊接气孔问题。

但在厚4mm工件的焊接试验中,沿用了过去2mm和3mm厚高温合金焊接的经验,除了激光功率相应增大和换用较大功率的激光焊机以外,采用了与过去类似的激光光束摆动方式及参数,尽管有部分单一试板熔焊焊缝可达 I 级焊缝要求,但对接焊缝全部因气孔超标而未能达到 I 级焊缝的质量要求。这表明4mm厚高温合金的激光功率比2mm和3mm厚度的大,减少气孔的难度也比2mm和3mm厚的大,需要进一步改进焊接工艺方法,提高焊接质量。

(3) 中心及环形复合光斑焊接是解决激光深熔焊气孔问题的有效途径之一 中心及环形复合光斑常被简称为环形光斑。焊接时,其中的环形光束有利于增强匙孔的稳定性,减少熔池中气泡的产生;

而且环形光束的前半环部分位于中心光束运动的前方,先接触工件的待焊处,可以起到预热的作用,而环形光束的后半环部分位于中心光束的后方,对待凝固的熔池后部起缓冷的作用,从而可以延长焊缝液态熔池的存在时间,有利于使熔池内已经产生的气泡上浮逸出。因而环形光斑激光焊可以显著减少焊缝内部的气孔,提高激光深熔焊的焊接质量。环形光斑激光焊在镀锌钢板、铝合金、镁合金及塑料等多种材料的激光深熔焊中,取得了减少气孔、飞溅,以及提高焊接质量的效果。因此,环形光斑焊接是解决激光深熔焊气孔问题的有效途径之一。

激光摆动焊也有利于提高熔池中匙孔的稳定性,减少或抑制气孔产生^[4]。在本项厚4mm高温合金的焊接中,同时应用了环形光斑和激光摆动焊接,使焊缝质量达到 I 级,取得了很好的应用效果,表明同时应用环形光斑和激光摆动焊接的效果更佳。

6 结束语

1) 高温合金的激光深熔焊容易产生气孔,气孔较多、较大时会降低焊接强度,因此应采取有效措施,严防产生对焊接强度有明显影响的较大、较密集气孔,确保焊接质量。

2) 环形光斑焊接可以减少焊缝内气孔的产生,提高焊接质量,是解决激光深熔焊气孔问题的有效途径之一。

3) 激光摆动焊接也有减少气孔产生、提高焊接质量的作用,同时采用环形光斑和激光摆动焊接的效果更佳。

参考文献:

- [1] 陈彦宾. 现代激光焊接技术[M]. 北京: 科学出版社, 2005.
- [2] 汪健坤, 李强, 黄磊, 等. 激光焊接技术最新研究进展及应用现状[J]. 金属加工(热加工), 2020(3): 4-10.
- [3] 钟世杰. 中厚板低碳钢激光深熔焊接工艺及气孔形成机理研究[D]. 广州: 广东工业大学, 2021.
- [4] 曹浩, 雷振, 黄瑞生, 等. 激光摆动焊接工艺参数对高强钢气孔率和焊缝成形的影响[J]. 焊接, 2019(4): 39-43, 67.
- [5] 何双. 氦-氩混合保护气对A7N01铝合金激光-MIG复合焊接特性的影响[D]. 成都: 西南交通大学, 2018.

(下转第73页)

知,试样正面、背面经腐蚀后均无点蚀坑。由表4可知,点蚀试验后,试样的质量损失最大为 $2.2\text{g}/\text{m}^2$,未超过标准要求值 $4\text{g}/\text{m}^2$,试验结果符合标准要求,表明该焊接接头具有良好的耐点蚀性能。

5 结束语

通过对海洋工程项目跨接管用UNS S32750超级双相不锈钢焊接性的分析研究,制定了GTAW焊接工艺。针对试件焊接接头的无损检测、力学性能、宏观金相组织、微观金相组织、铁素体相比例及点蚀性能进行了试验分析。结果表明,针对项目中涉及的规格尺寸的跨接管,选用直径 2.0mm 的ER2594氩弧焊丝,在焊缝正面保护气体流量为 $8\sim 12\text{L}/\text{min}$,焊缝背面保护气体流量为 $10\sim 15\text{L}/\text{min}$,电弧电压为 $12\sim 13\text{V}$,焊接电流为 $65\sim 80\text{A}$,焊接速度为 $65\sim 70\text{mm}/\text{min}$,焊接热输入控制在 $0.67\sim 1.08\text{kJ}/\text{mm}$ 内,以及最大层间温度为 150°C 时,能够有效控制焊接接头铁素体相和奥氏体相两相组织的比例与焊接接头的各项性能,符合DNV-OS-F101—2013要求,可以为产品焊接提供科学依据。

该焊接工艺成功应用于海上石油平台水下井口项目脐带缆终端与注水树连接用跨接管的现场焊接施工,项目开展过程中未发现任何质量问题,各项试验指标均符合设计及标准要求。

参考文献:

- [1] 宋立新,李美艳,王永兴.一种双相不锈钢焊接接头的组织及腐蚀性能[J].焊管,2014,37(4):26-29.
- [2] 李伟,栗卓新,李国栋,等.国内外双相不锈钢焊接的研究进展[J].焊接,2007(1):11-15,61.
- [3] 陈建俊,王平,杨社教.超级双相不锈钢的焊接[J].压力容器,2003,20(11):29-32,45.
- [4] 李长春,连琰.水下生产系统在海洋石油开发中的应用[J].海洋工程,1995,13(4):25-30.
- [5] 葛华,王杰.UNS S32750超级双相不锈钢焊接工艺研究[J].金属加工(热加工),2024(6):96-100.
- [6] 杜兴吉,夏正文,王坤.深海脐带缆内套钢管全位置脉冲TIG对接焊研究[J].焊管,2014,37(11):19-22.
- [7] 张彬彬,张树才,吴敬玺,等.Ni含量对特超级双相不锈钢S32707组织与性能的影响研究[J].冶金工程,2018,5(2):39-46.
- [8] 牛虎理,刘剑,何亚章,等.脐带缆内套超级双相不锈钢S32750焊接工艺研究[J].石油工程建设,2023,49(2):49-52.
- [6] CHEN X Z, PENG H S, YAO C C, et al. Study on the effects of helium-argon gas mixture on the laser welding performance of high temperature alloys[J]. Research and Application of Materials Science, 2023, 5 (2) : 21-24.
- [7] 全国锅炉压力容器标准化技术委员会.承压设备无损检测 第2部分:射线检测:NB/T 47013.2—2015[S].北京:新华出版社,2015.
- [8] JARNO K. 适合挑战性应用的创新型光纤激光技术[J].金属加工(热加工),2018(3):25-26.
- [9] 李庆,张春杰,黄展鹏,等.锂离子动力电池铝壳激光焊分析[J].焊接技术,2020,49(2):44-47.
- [10] 张明军,吴乐峰,毛聪,等.AZ31B镁合金可调环形光斑光纤激光焊接试验研究[J].中国激光,2022,49(22):53-60.
- [11] 赵海发,李小伟.环形光斑激光塑料焊接工艺研究[J].精密成形工程,2021,13(3):188-192.
- [12] 张云,吴乐峰,申晓龙,等.光束调制激光焊接技术研究现状[J].机电工程技术,2023,52(3):45-51.
- [13] 全国钢标准化技术委员会.高温合金和金属间化合物高温材料的分类和牌号:GB/T 14992—2005[S].北京:中国标准出版社,2005.
- [14] 全国钢标准化技术委员会.高温合金冷轧板:GB/T 14996—2010[S].北京:中国标准出版社,2011.
- [15] 钟世杰.中厚板低碳钢激光深熔焊接工艺及气孔形成机理研究[D].广州:广东工业大学,2021.
- [16] 雷正龙,李颖,陈彦宾,等.双光束激光填丝焊接工艺对铝合金焊接气孔率的影响[J].焊接学报,2013,34(2):40-44.

MW 20240907

MW 20241107

(下转第68页)