

引用格式: 杨飞宇, 张杰, 孙玉波, 等. 柴油机机身堆焊修复技术研究[J]. 热加工工艺, 2024, 53(23): 32-38.

DOI: 10.14158/j.cnki.1001-3814.20241989
<http://www.rjggy.net> rjggy@vip.163.com

柴油机机身堆焊修复技术研究

杨飞宇¹, 张杰², 孙玉波², 陆龙²

(1. 海军装备部, 陕西 兴平 713105; 2. 陕西柴油机重工有限公司, 陕西 兴平 713105)

摘要:针对船用柴油机机身受撞击变形需修复的情况,开展堆焊焊补方案制定和试验研究。对柴油机拆解清洗后,检测了机身尺寸。对钨极氩弧焊、脉冲冷焊和激光焊接三种工艺进行了对比分析,并对脉冲冷焊和激光焊接进行对比试验,最终确定采用激光焊接方法对变形缸孔及加工基准主轴轴承座孔进行堆焊。通过焊接特殊过程确认,确定了合理的工艺参数。采用机器人手臂+激光焊接的组合方式,通过工装定位,以数控程序控制焊缝轨迹及间距,使堆焊层焊缝均匀连续。焊后采用超声时效强化等方法,消除焊接应力,得到合格的堆焊层焊缝,机身焊接变形小,未影响已加工尺寸,实现了机身焊接修复工作。该方法为机加工零件高精度修复提供了指导依据。

关键词:激光焊接; 主轴轴承座孔; 堆焊; 焊接机器人

中图分类号: TG456.7; TG455

文献标识码: A

文章编号: 1001-3814(2024)23-0032-07

Study on Welding Repair Technology for Diesel Engine Body

YANG Feiyu¹, ZHANG Jie², SUN Yubo², LU Long²

(1. Naval Equipment Department, Xingping 713105, China; 2. Shaanxi Diesel Heavy Industry Co., Ltd., Xingping 713105, China)

Abstract: For the situation that the deformation of a marine diesel engine body due to impact needs to be repaired, the overwelding and repair scheme was formulated and the test research was carried out. After disassembly and cleaning of the diesel engine, the dimensions of the engine body were detected. Three processes of tungsten inert gas welding, pulse cold welding and laser welding were compared and analyzed, and the comparative experiments between the pulse cold welding and laser welding were conducted. Finally, it was determined to use laser welding method to weld the deformed cylinder hole and the machining reference main bearing seat hole. The reasonable process parameters were determined through welding special process validation. The overlay weld was uniform and continuous by using a combination of robot arm and laser welding, fixture positioning and controlling the trajectory and spacing of the weld seam with numerical control program. After welding, ultrasonic aging strengthening and other methods were used to eliminate welding stress to obtain qualified weld seams. The welding deformation of the machine body is small, which does not affect the processed dimensions and achieve the welding repair of the body. The method provides guidance for high-precision repair of machined parts.

Key words: laser welding; main bearing seat hole; surfacing; welding robot

近年来,随着高功率 CO₂ 激光以及光纤传输技术的完善,激光焊接作为一种高质量、高精度、低变形、高效率、高速度的焊接方法,被广泛应用于航空航天、电子机械、汽车、船舶等制造领域^[1-3]。在船舶行业中的海洋平台、潜艇的结构件也有许多激光焊接的应用^[4]。研究表明,采用激光焊接可以提高焊接强度和耐高温性能^[5]。国内对激光焊接的研究主要集

中在深熔激光焊接模拟、激光-电弧复合热源的应用,激光堆焊、超级钢激光焊接、水下激光焊接、宽板激光拼焊等^[6],对精密零部件焊接修复工作的报道较少。在精密零部件焊接修复工作中,引入激光焊接技术,是保证产品质量,降低制造成本,实现低能耗、绿色制造的一种发展方向。

某型中速大马力柴油机机身为焊接结构,在使用多年后,出现连杆断裂的故障,机身支承板发生撞击变形,致使柴油机中安装的曲轴、凸轮轴、缸盖等部件无法正常工作。待柴油机拆解后,对机身相关尺寸检测后,发现机身仅局部部位受损,而机身整体稳

收稿日期: 2024-05-07

作者简介: 杨飞宇(1993-),男,助理工程师,主要从事机械加工、质量监督管理等; E-mail: 805260864@qq.com

定性良好。因此,对机身开展修复,确定可行性方案。

1 机身受损及修复方案制定

对柴油机拆解后,检测发现:主轴承孔形位公差超差,同轴度不能满足装机需求,主轴承孔需要修复,以达到图纸公差要求。考虑机身三大孔系是以主轴承孔为基准,同时确保修复时已加工区域形位公差变化尽量少,决定以机身第1档和第9档的主轴承孔为基准,如图1所示。逐档对主轴承孔用千分表测量,各档测量部位如图2所示,记录数据见表1。在超差部位,根据超差数值制定焊补方法和焊补区域,表1中标记▲是确认的焊接区域(焊补区域可延伸50mm)。



图1 主轴承孔检测超差

Fig.1 Main bearing holes exceeding the tolerance

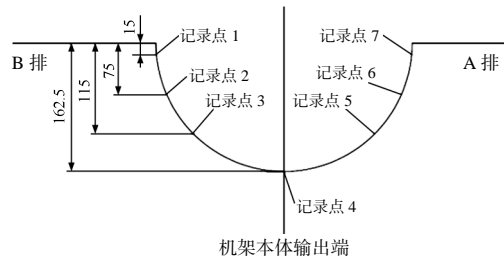


图2 测点示意图

Fig.2 Schematic diagram of measuring points

2 主轴承孔焊补方案

2.1 基体材料焊接性及工况环境分析

机身轴承孔处安装轴承以及曲轴,再对轴承座

表1 机身检测结果(mm)

Tab.1 Machine detection results (mm)

测量位置(机架)	1号测点	2号测点	3号测点	4号测点	5号测点	6号测点	7号测点
第1档输出端	0	0	0	0	0	0	0
第1档自由端	+0.02	+0.02	+0.01	-0.01	-0.01	-0.01	-0.01
第2档输出端	+0.04▲	+0.02▲	0▲	-0.03▲	-0.03▲	-0.03▲	-0.04▲
第2档自由端	+0.04▲	+0.01▲	-0.01▲	-0.04▲	-0.05▲	-0.04▲	-0.04▲
第3档输出端	-0.02▲	-0.04▲	-0.05▲	-0.08▲	-0.06▲	-0.05▲	-0.03▲
第3档自由端	-0.04▲	-0.06▲	-0.07▲	-0.09▲	-0.08▲	-0.04▲	+0.02▲
第4档输出端	-0.14▲	-0.08▲	-0.05▲	-0.12▲	+0.04	+0.09▲	+0.14▲
第4档自由端	-0.14▲	-0.07▲	-0.05▲	-0.10▲	+0.04▲	+0.07▲	+0.14▲
第5档输出端	-0.16▲	-0.12▲	-0.05▲	-0.09▲	+0.06▲	+0.13▲	+0.17▲
第5档自由端	-0.17▲	-0.13▲	-0.06▲	-0.08▲	+0.07▲	+0.14▲	+0.17▲
第6档输出端	-0.14▲	-0.11▲	-0.04▲	-0.05▲	+0.05▲	+0.11▲	+0.14▲
第6档自由端	-0.14▲	-0.09▲	-0.07▲	-0.05▲	+0.05▲	+0.10▲	+0.14▲
第7档输出端	-0.10▲	-0.08▲	-0.06▲	-0.04▲	+0.06▲	+0.09▲	+0.10▲
第7档自由端	-0.10▲	-0.08▲	-0.07▲	-0.03▲	+0.06▲	+0.07▲	+0.10▲
第8档输出端	-0.05▲	-0.03▲	-0.01▲	-0.01▲	+0.02▲	+0.03▲	+0.06▲
第8档自由端	-0.04▲	-0.02▲	0▲	0▲	+0.01▲	+0.02▲	+0.05▲
第9档输出端	0	-0.03	0	+0.02	+0.02	0	0
第9档自由端	+0.01	-0.03	-0.01	+0.02	+0.01	+0.01	-0.02

用螺栓紧固在机身拱门处,机身工作状态为正立放置,受重力作用,该区域受力最大处为安装式轴承座及螺栓、机身拱门本体螺纹孔处。待修复的主轴承孔主要考虑其尺寸符合图纸要求;对于加工余量不足的修复,由于其结构为半圆形,且处于开放式的空间,采用堆焊焊补方法对待加工表面实现增材修复,

是快速有效的方法。由于主轴承座为机加工表面,为避免焊补时热输入量大导致加工面变形,影响后续加工,因此,焊接方法选择时,必须首先考虑堆焊焊补后的变形量尽量小。

堆焊方法选择前,首先对机体材料开展分析。待焊接机身采用GB/T712中B级船用钢板(成分见表

2), 为一般强度船体结构用钢。以碳当量为衡量依据, 其计算公式为 $C_{eq} = C + Mn/6 + (Cr + Mo + V)/5 + (Ni + Cu)/15$, 根据化学成分计算该材料碳当量 $C_{eq} = 0.423\%$, 焊接工艺性尚好。焊前预热后, 该基体材料可进行堆焊。

表 2 B 级船用钢的化学成分(质量分数, %)
Tab.2 Chemical composition of B class shipbuilding steel (wt%)

牌号	C	Mn	Si	Ni	Cr	Cu	P	S
BZ25	0.21	0.8	≤0.35	≤0.3	≤0.3	≤0.35	≤0.035	≤0.035

在焊接材料中, 当碳当量 $C_{eq} > 0.4\%$ 时, 碳当量较大, 钢板具有淬硬倾向, 具有一定的冷裂纹倾向。并且由于板厚较大、堆焊层浅、焊接应力集中较大, 需采取预热、控制层温、后热处理等措施。

根据焊接接头机械性能等强或高于母材强度的要求^[7], 材料力学性能如下: 抗拉强度 ≥ 235 MPa、屈服强度为 400~500 MPa、伸长率 $\geq 2\%$ 、0℃ V 型缺口冲击功 ≥ 27 J, 由此决定焊接材料的选择。

由于长期使用的机身各位置尺寸均已加工, 堆焊修复需考虑焊接区及热影响区对周边结构产生的热变形。考虑堆焊基体为圆弧形表面, 与轴承座有垂直度要求, 堆焊层还需要加工至图纸尺寸要求, 堆焊时形成的焊缝熔深需控制在 0.5~1 mm, 防止加工至图纸尺寸, 导致堆焊层与基体层结合量少, 结合强度低。堆焊时焊接过程是持续的热输入, 在控制焊接顺序的情况下, 也会使修复处热影响区发生翘曲变形及热应力集中。

当半轴承孔堆焊区域在 511 mm×150 mm, 堆焊高度在 2 mm 左右时, 在焊接参数受控的前提下, 垂直度变形要尽量小, 避免与曲轴的曲拐发生干涉, 考虑在堆焊修复之后还要进行机械加工, 堆焊层厚度必须满足机加工余量的要求。堆焊形成的局部热应力必须消除, 鉴于机身其余尺寸都加工到位, 采用超声波去应力方法进行热应力消除^[8]。

2.2 堆焊焊补方法对比

基于上述原因, 必须选择热变形影响最小的焊接方法。在熔化焊的多种焊接方法中, 热变形影响由大到小排列为钨极氩弧焊、脉冲冷焊^[9]、激光焊。

钨极氩弧焊是采用纯度 $\geq 99.7\%$ 的氩气为保护气体, 通过钨极尖端与工件之间电弧放电产生高温, 熔化工件及焊材形成熔池, 放电电弧在焊接区域稳定移动, 使熔池连续不断形成并凝固, 得到连续的焊

缝。该方法多为手工操作, 对人员技能要求高, 操作过程中钨极尖端与熔池过近, 易接触形成夹钨缺陷, 热变形高于脉冲冷焊、激光焊。在以往结构件的焊补中, 该方法最小的热变形值大于 0.5 mm, 不满足机身焊补后变形小的要求, 在机身修复中存在较大风险, 因此, 该焊接方法被淘汰。

脉冲冷焊是以超短时间放电, 使电极材料与基体接触部位被加热到 8000~10000℃, 等离子化的熔融金属以冶金的方式过渡到工件表面; 由于与基体之间产生合金化作用, 向工件内部扩散, 熔渗, 形成扩散层, 得到高强度的结合。冷焊方法热输入低, 其原理是放电时间与下一次放电的间隔时间相比极短, 焊接过程有足够的相对停止时间, 热量通过母材金属扩散, 因此冷焊部位不会产生热量的聚集^[10]。而瞬时熔化导致焊材瞬间产生金属熔融, 过渡到母材金属的接触部位; 同时由于等离子电弧的高温作用, 表面深层处形成强扩散层, 使焊接材料具有高结合性, 不易脱落。该方法的优点在于焊接热影响区小, 冷焊机补焊后的工件不产生热裂纹、无色差、无硬点, 焊接强度高, 可进行后期机械加工。冷焊的缺点主要有两点: 一是其为高频脉冲连续点焊, 效率不高, 不适合大面积的修补; 二是焊后密封性差, 不能承受压力冲击。

激光焊接是利用大功率相干单色光子流聚焦而成的激光束为热源进行焊接; 通过激光辐射加热待加工表面, 表面热量通过热传导向内部扩散, 通过控制激光脉冲的宽度、能量、峰功率和重复频率等激光参数, 使工件熔化, 形成狭小的熔池。由于激光具有方向性好、相干性好、单色性好、光脉冲窄的优点, 激光焊接亦具有能量密度高、变形小、热影响区窄、焊接速度高的特点; 同时激光的产生方式和光特性, 决定了其无电极污染和受损影响、不受磁场影响的优点。但是其缺点也是明显的, 一是焊接位置必须非常精确, 保证其在激光束的聚焦范围内; 二是焊件使用夹具时, 必须保证焊件最终位置与激光束将冲击的位置对准; 三是最大可焊厚度受到限制, 厚度超过 19 mm 的工件不适合激光焊接; 四是采用中能量和高能量激光束焊接时, 需要采取等离子控制器将熔池周围的离子化气体驱除, 以保证焊道显现出来。

由于脉冲冷焊和激光焊接方法都具有焊接变形小的特点, 机身堆焊修复时要考虑大面积堆焊导致的结构件本体的变形及焊缝的质量控制。脉冲冷

焊的低效率是一个负面影响；而对于焊补厚度为 2 mm 的大面积机加工表面堆焊，激光焊接完全可以满足要求。而热变形量则是此次机身修复须更重视的考量数值。

2.3 焊补修复变形量差异

焊补方法不能导致机身拱门构件出现垂直度超差,使拱门上已加工的螺纹孔垂直度亦超差,出现安装困难及受力差异性。因此对上述两种焊接方法,采用对比方法,以堆焊试验实际验证的方式确定适合

的焊接方案。

主轴承孔本体材料为 GB/T712 中的 BZ25 钢板,具有抗层状撕裂的性能,厚度为 150mm。它是一种低碳、高强度钢板,焊接性优良,是制造高性能船体结构的重要材料。根据焊缝等强原则,为与其性能相匹配,选用 $\phi 1.2\text{mm}$ 的 E501T-1 焊丝,其化学成分及力学性能见表 3。从成分对比中可得出,焊材与母材同属于低碳钢,焊材力学性能高于母材,焊接性能良好。无堆焊过渡层,直接进行堆焊。

表 3 焊丝 E501T-1 的化学成分(质量分数,%)和力学性能
Tab.3 Chemical composition(wt%) and mechanical properties of welding wire E501T-1

性能	C	Mn	Si	P	S	σ_b/MPa	σ_s/MPa	伸长率(%)	-20℃ V 型冲击功/J
规范要求	≤ 0.18	≤ 1.75	≤ 0.9	≤ 0.03	≤ 0.03	≥ 480	≥ 400	≥ 22	≥ 27
实测	0.065	1.34	0.39	0.008	0.017	550	465	26	107、125、98

焊接材料的化学成分与力学性能均满足规范要求,而通用性的工艺要求如焊前准备、焊补材料、同批次的堆焊试验母材;焊接过程控制:所在的焊接环境一致,温度控制在 5℃ 以上;平焊位、单面多道焊、自动送丝、堆焊表面清洁度要求,预热及层间温度控制,采用磁力温度感应探头进行实时监测;焊后检测设备:三坐标、硬度计、金相显微镜、无损检测设备,亦要求状态一致,均在法定机构校验合格并在有效期内。

为研究两种堆焊方法的差异,开展对比试验,拟从每道焊接热输入值和焊道尺寸控制技术两方面开展。脉冲冷焊选用 G280 型号设备,设置焊接电流 180~190 A、电压 24 V、保护气体流量 12 L/min、直流反接、点焊时间 0.2 s、脉冲放电间隔时间 0.4 s,以控制熔池成形及移动的速度,实现焊接热输入值可控。

采用激光焊接时,对扫描宽度、脉冲频率、热输入量、保护气体流量等工艺参数进行测试。激光焊接调试工艺参数见表 4。

表 4 激光焊接调试工艺参数
Tab.4 Laser welding debugging process parameters

调试次数	扫描宽度/mm	脉冲频率/Hz	焊接速度/(mm·s ⁻¹)	热输入量/(kJ·cm ⁻¹)	气体流量/(L·min ⁻¹)
1	5	2000	3~5	0.598	15
2	5	2200	3~5	0.789	15
3	5	2400	2~4	0.905	15
4	5	2600	1~3	1.236	15

对表 4 分析可知,当激光焊接速度小、脉冲频率高时,焊道热输入量明显增加。在要求焊接变形小的机身修复中,选用第 1 组工艺参数,修复后的机身热

变形会最小。在同样材质规格的轴承盖上,分别采用脉冲冷焊和激光焊进行半圆结合面及半圆弧面上堆焊同样厚度的熔覆层,堆焊效果见图 3。

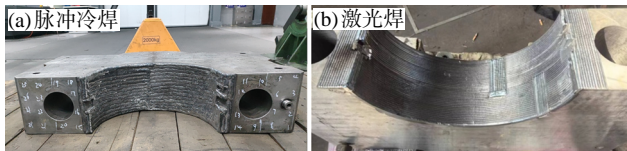


图 3 轴承盖堆焊层对比
Fig.3 Comparison of surfacing layers on the bearing cap

采用三坐标测量仪器测量堆焊后轴承座两侧各 14 点的标记部位,获得差异最大的数值,与试验前的测量数据进行比对,确定零件热影响区同一部位处的堆焊热变形量最大值。脉冲冷焊和激光焊接堆焊前后轴承座平面度的变化值分别为 0.245、0.077 mm,激光焊接的变形量更小。

对焊缝熔合区及焊缝硬度进行检测,要求不得存在裂纹及未熔合的缺陷。通过宏观检查,熔合线区域熔合良好,采用的焊接方法及工艺参数均满足机身焊补的要求,确认该修复方案可行。试验方法依据 GB/T2654—2008《焊接接头硬度试验方法》、GB/T26955—2011《金属材料焊缝破坏性试验焊缝宏观和微观检验》执行。表 5 为激光堆焊检测结果,图 4

表 5 激光堆焊检测结果
Tab.5 Test result of laser surfacing weld

检测项目	宏观检查、硬度		
技术要求	宏观检查:焊缝成形良好,焊缝完全焊透,无裂纹和未熔合缺陷;硬度: $\leq 350\text{HV5}$		
检查结果	宏观检查	堆焊部位结构形态完整,结合良好,未见焊接缺陷。	
	硬度	测量点 1	291.1, 296.6, 138.5
		测量点 2	291.6, 294.8, 137.1

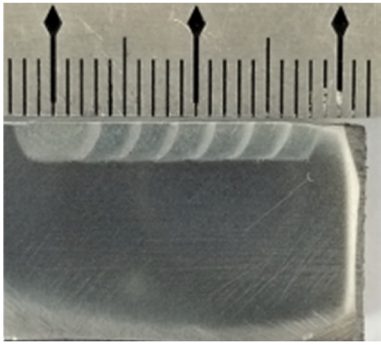


图4 堆焊层宏观检测试样
Fig.4 Macroscopic inspection sample of welding layer

为堆焊焊缝宏观金相检测试样。

通过对脉冲冷焊、激光焊等两种焊接方法的对比试验,根据焊接变形最小原则,选择激光焊接方法为控制变形的办法。同时考虑试验中的轴承座是无拘束状态,受热影响,变形程度大;而实际待焊补的机架拱门与整个机身焊接整体,拱门上的轴承孔受拘束力作用,仅能在厚度 150mm 方向发生受热形变,堆焊修复时的变形程度小于试验时轴承座的变形尺寸。因此,选择激光焊接,更能有效地保证变形量最小。

2.4 激光焊接气孔分析及解决方法

确定激光焊补为主轴承座的焊接方案,考虑堆焊面积大,要求焊接过程中焊枪稳定性、一致性高,在实际焊接修复中采用机器人手臂+激光焊的组合方式(图5),通过数控程序控制焊缝轨迹及间距,使堆焊焊缝均匀连续,质量得到保证。

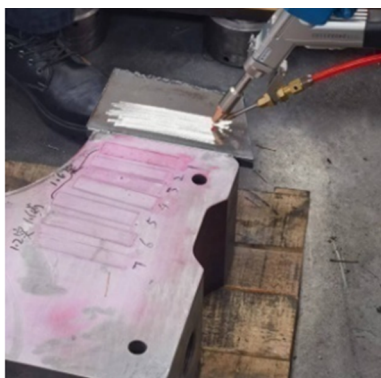


图5 机器人+激光焊堆焊工艺现场
Fig.5 Robot+laser welding surfacing process site

采用机器人手臂+激光焊的修复方案,控制焊接变形量小于 0.077mm 的前提下,使用机器人焊接时,由于焊枪运行方式变化,再进行工艺参数调试。首次焊接试验,打磨堆焊层后,出现较为密集的气孔缺陷,如图6所示。

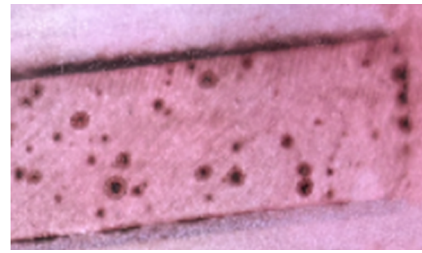


图6 堆焊焊缝区的气孔缺陷
Fig.6 Pores defect in the weld area of the overlay welding

此缺陷在焊接修复前,需要消除,分析气孔产生的原因如下:

- (1) 母材表面存在油污、锈蚀等,焊接高温时形成气体,在熔池凝固前未逸出形成;
- (2) 焊材未烘干,导致其表面水分残存,在高温时气化,进入熔池未来得及逸出;
- (3) 保护气体失效,周围空气中的水分进入熔池,高温反应生成气体,进入熔池未能逸出。

针对上述气孔可能的成因,加强对母材表面清除油、锈、污物的工作,确保无杂质异物进入焊缝区域,焊丝按规范烘干,但气孔仍然出现。基于激光能量决定着金属的熔化和蒸发,对激光焊接过程的稳定性具有重要影响^[4],调整保护气体开始时间及关闭时间,待气体充分保护焊接区域后才实施焊接;同时考虑激光焊接熔池小、凝固快的特点,气体尚未从熔池中逸出即被凝固在熔池中,保持焊枪角度、保护气体流量等参数不变,调整扫描宽度(1.5、2.0、2.5、3.0、3.5 mm),从而减小焊接速度及激光功率输出,进行测试。通过对激光焊接工艺参数的微调优化,确定采用焊缝宽度 3.5mm 的工艺参数,焊接的试板无气孔缺陷,达到焊补的质量要求(图7),确认该修复方案可行。



图7 堆焊焊缝区气孔检测结果
Fig.7 Test result of porosity in the weld seam area of the surfacing welding

2.5 机身主轴承孔堆焊修复

该机身已使用多年,主轴承孔处超差尺寸的修

复,采取局部堆焊后再进行机加工的方法,以保证多档主轴承孔中心一致,再加工受损缸孔中心,保证其垂直度精度。根据表 1 数据制定机身主轴承孔修复方法及堆焊范围(图 8),在第 2~8 档主轴承孔位置进行堆焊。堆焊用焊接方法为焊接机器人配合 OBX-LWM2000 激光焊机,堆焊完成后进行着色检查,再对堆焊层进行振动时效以消除焊接应力。

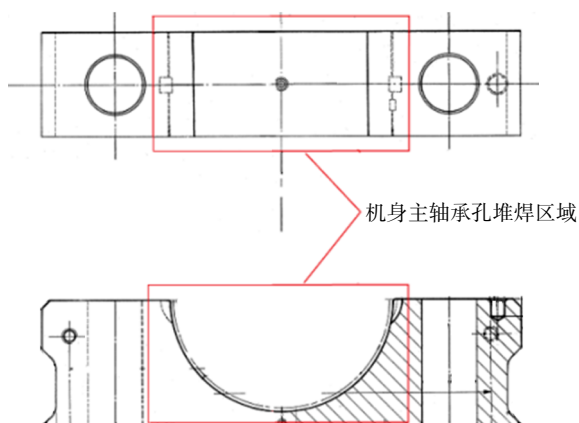


图 8 机身待堆焊焊补区域

Fig.8 To be welded and repaired area of the body

在机身上进行堆焊之前,从人、机、料、法、环、测等几方面开展必要的准备工作,主要有以下几方面:

(1) 制作工装板,使其与机身底板牢固连接,机器人手臂牢固放置于工装板上,稳定焊接设备,保证焊补过程中焊接轨迹的稳定性。

(2) 清除待堆焊部位基体及边缘的铁锈、油脂、油漆、水分。

(3) 堆焊区域焊前预热,磁性温控探头放置位置距离预热区域 10mm,检测温度,温度要求 150~200℃。

(4) 焊接材料选择与主轴承孔材料强度相同或略高于的焊材,选定为 $\phi 1.2\text{mm}$ 的 E501T-1 实芯焊丝。

(5) 设定激光焊机的焊接功率为 850W,焊接速度为 3~5 mm/s,气体流量为 15 L/min,可根据监控温度进行实时调整,温控仪探头距离焊接区域 10 mm。

堆焊结束后,对焊缝进行后热处理,堆焊层局部热保温缓冷处理。清理焊缝后,对焊缝进行了着色探伤检测,结构显示堆焊层无裂纹、未熔合等缺陷,如图 9 所示。

依据 GB/T31310—2014《金属材料残余应力测定钻孔应变法》、GB/T33163—2016《金属材料残余



图 9 着色检测结果

Fig.9 Color detection results

应力超声冲击处理法》测量情况,采用振动时效方式消除焊接热应力,在堆焊层表面以超声波产生高频震荡,消除应力。超声波时效强化处理设备参数为频率 20 kHz、振幅 100 μm 、额定功率 3000 W、时长 10 min。超声波时效强化处理时,对试件的激光熔覆面进行全面覆盖处理,采用 75 μm 的振幅。采用钻孔应变计式残余应力检测方法对时效强化表面进行应力检测,超声波时效强化处理前后测量结果分别见表 6、7。

表 6 超声波时效强化处理前应力测试结果
Tab.6 Stress test results before ultrasonic aging reinforcement treatment

位置	$\varepsilon_1/10^{-6}$	$\varepsilon_2/10^{-6}$	$\varepsilon_3/10^{-6}$	σ_1/MPa	σ_2/MPa	$\theta/(\circ)$
2 档点	-204.84	-251.11	-437.78	726.23	538.67	-31.08
5 档点	-206.04	-273.41	-445.82	731.81	551.31	-23.66
8 档点	-351.40	-392.37	-133.99	605.30	350.17	-54.01

表 7 超声波时效强化处理后应力测试结果
Tab.7 Stress test results after ultrasonic aging reinforcement treatment

位置	$\varepsilon_1/10^{-6}$	$\varepsilon_2/10^{-6}$	$\varepsilon_3/10^{-6}$	σ_1/MPa	σ_2/MPa	$\theta/(\circ)$
2 档点	58.26	77.29	72.86	-119.54	-138.58	58.09
5 档点	110.90	99.14	134.48	-223.35	-259.67	-63.40
8 档点	30.19	25.54	60.94	-72.28	-107.10	-52.48

从检测前后数值对比可知,激光熔覆层超声冲击处理后,原来的拉应力均转化为对结构变形和疲劳破坏有利的双向压应力状态,对防止熔覆层的开裂及变形、提高熔覆层的疲劳强度和疲劳寿命有积极作用,表明超声冲击处理工艺效果良好。

堆焊修复后的机身,经焊缝检查合格后,转入机加工进行主轴承孔的加工,经加工后检测数据合格,满足机身焊接-机加工修复的要求。

3 结论

(1) 已加工零件的堆焊,采用激光焊接方法,可使零件堆焊后变形量小,而且对非堆焊部位形状尺寸影响小。

(2) 激光焊熔深比大,堆焊层焊缝结合力强,进行无损探伤检测及金相检验,焊缝完全焊透、无裂纹、未熔合等缺陷。

(3) 柴油机机架尺寸精度高,采用激光堆焊方法,获得合格的堆焊层焊缝,使尺寸缺失处获得堆焊修复,总结了一套精密零部件堆焊修补的新方法。

参考文献:

[1] 马磊,付朝强. 激光焊接技术的应用研究进展[J]. 模具制造, 2023,23(11):157-159.
[2] 张文毓. 激光焊接技术的研究现状与应用[J]. 新技术新工艺,2009(1):48-49.

(上接第 25 页)

[9] Campagnoli M R, Galati M, Saboori A. On the processability of copper components via powder-based additive manufacturing processes: potentials, challenges and feasible solutions [J]. Journal of Manufacturing Processes, 2021, 72: 320-337.
[10] Marefat F, De Pauw J, Kapil A, et al. Design strategies for bi-metallic additive manufacturing in the context of wire and arc directed energy deposition [J]. Materials & Design, 2022, 215: 110496.
[11] Gao M Y, Li S C, Guan W M, et al. Excellent thermal shock resistance of NiCrAlY coatings on copper substrate via laser cladding [J]. Journal of Materials Science & Technology, 2022, 130(1): 93-102.
[12] Guan W M, Yuan J, Wang Y F, et al. Inhomogeneous ablation behaviors and failure mechanism of copper cathode in air [J]. Science China Technological Sciences, 2020, 63(11): 2384-2394.

(上接第 31 页)

[16] 梁国栋,王存喜,田兴达,等. TiAl 合金表面 Al-Y 涂层摩擦磨损性能研究[J]. 热加工工艺,2023,52(10):81-84.
[17] 刘桐,蔡小叶,程宗辉,等. Cr 和 W 对 TiAl-Nb 合金微观组织与力学性能的影响[J]. 热加工工艺,2023,52(6):40-44.
[18] Zeng K, Schmid-Fetzer R, Huneau B, et al. The ternary system Al-Ni-Ti part II: thermodynamic assessment and experimental investigation of polythermal phase equilibria [J]. Intermetallics, 1999, 7(12): 1347-1359.
[19] 李婷婷,彭超群,王日初,等. Fe-Al, Ti-Al 和 Ni-Al 系金属间化合物多孔材料的研究进展[J]. 中国有色金属学报, 2011, 21(4): 784-795.
[20] Cacciamani G, Riani P, Valenza F. Equilibrium between MB₂ (M=Ti, Zr, Hf) UHTC and Ni: a thermodynamic database for the

[3] 张义. 激光焊接技术的发展与展望探讨[J]. 科学技术创新, 2019(22):180-181.
[4] 朱海红,唐霞辉,朱国富. 激光焊接技术在粉末冶金材料中的应用[J]. 粉末冶金技术,2000(2):117-121.
[5] 郭泽亮. 激光焊接技术在舰船建造中的应用[J]. 舰船科学技术, 2005, 27(4): 81-84.
[6] 李永兵,马运五,楼铭,等. 轻量化薄壁结构点连接技术研究进展[J]. 机械工程学报,2020,56(6):125-146.
[7] 陈祝年. 焊接工程师手册 [M]. 北京:机械工业出版社, 2007.
[8] 刘红胜,罗永传. 新型 U 肋与顶板双面焊接残余应力的超声冲击调控方法研究[J]. 钢结构, 2021, 36(10): 25-33.
[9] 陈兴东,郭洋. 特种焊接技术在核电汽轮机部件修复机再制造方面的应用[J]. 电焊机,2020,50(3):53-59.
[10] 李方义,李振,王黎明,等. 内燃机增材再制造修复技术综述[J]. 中国机械工程,2019,30(9):1119-1127.
[11] 张迪,赵琳,刘奥博,等. 激光能量对激光焊接接头熔化形状、气孔和微观组织的影响及其调控方法[J]. 中国激光,2021,48(15):204-217. [1]

[13] Okamoto H. Cu-Zr (copper-zirconium) [J]. Journal of Phase Equilibria and Diffusion, 2012, 33(5): 417-418.
[14] Michaelsen C, Gente C, Bormann R. The thermodynamics of amorphous phases in immiscible systems: the example of sputter-deposited Nb-Cu alloys [J]. Journal of Applied Physics, 1997, 81(9): 6024-6030.
[15] Okamoto H. Nb-Zr (niobium-zirconium) [J]. Journal of Phase Equilibria, 1992, 13(5): 577-577.
[16] 武姜汝,冯校飞,韩日宏,等. 激光熔覆硬质相增强的镍基合金涂层性能的研究进展[J]. 热加工工艺,2022,51(14):18-22.
[17] 王世清,史冰园,金峰. TC4 钛合金激光熔覆高熵合金的温度场数值模拟[J]. 热加工工艺,2023,52(8):121-124.
[18] Guan W M, Lv H, Yuan J, et al. Sustainable and homogeneous arc ablation behavior of zirconium cathodes improved by in situ formation of zirconium oxides [J]. Journal of Physics D: Applied Physics, 2021, 54(24): 245205. [1]

B-Hf-Ni-Ti-Zr system [J]. Calphad, 2011, 35(4): 601-619.
[21] 李力,王一轩,罗芬,等. 钎焊时间对 TiH₂-65Ni+TiB₂ 钎料钎焊连接 TiAl 合金接头的影响[J]. 机械工程学报,2024,60(8): 176-185.
[22] Lee S J, Wu S K. Infrared joining strength and interfacial microstructures of Ti-48Al-2Nb-2Cr intermetallics using Ti-15Cu-15Ni foil [J]. Intermetallics, 1999, 7(1): 11-21.
[24] 蔡小强,王东坡,王颖,等. TiB₂-TiC-SiC 复合陶瓷接触反应钎焊接头界面组织及力学性能 [J]. 航空学报,2022,43(2):58-68.
[24] Zhao K, Liu Y, Huang L, et al. Diffusion bonding of Ti-45Al-7Nb-0.3W alloy by spark plasma sintering [J]. Journal of Materials Processing Technology, 2016, 230: 272-279. [1]