

中频直流焊机在轴向柱塞马达柱塞精密焊接中的工艺适配性研究

褚文辉

(青岛力克川液压股份有限公司, 山东 青岛 266000)

摘要 轴向柱塞马达柱塞(由柱塞体与球头焊接成型)的焊接质量直接影响液压系统的密封性能与使用寿命,传统工频交流电阻焊难以满足其精密焊接的工艺需求。本文针对柱塞与球头的精密对焊工艺,系统分析了中频直流焊机的技术优势与工艺适配性。通过对焊接电流、焊接时间及电极压力三项核心参数的正交试验优化,确定了最佳工艺参数组合,并对焊接接头进行了拉伸强度、金相组织及气密性检测。结果表明,中频直流焊机在柱塞精密焊接中具有热输入均匀、飞溅小、焊接变形可控等显著优势,优化后的焊接接头拉伸强度达862 MPa,气密性试验合格率100%,满足产品技术要求。研究成果为轴向柱塞马达柱塞组件的批量化精密焊接生产提供了工艺依据。

关键词 中频直流焊机; 轴向柱塞马达; 精密焊接; 工艺参数优化; 电阻焊

中图分类号: TG439

文献标志码: A

DOI: 10.3969/j.issn.2097-3365.2026.13.006

0 引言

轴向柱塞马达是液压传动系统中将液压能转换为机械能的核心执行元件,广泛应用于工程机械、矿山设备及冶金装备等领域。柱塞组件由柱塞体与球头两部分焊接而成,其焊接接头须同时满足高强度和高气密性要求,焊接质量直接决定马达的容积效率和使用寿命^[1]。

传统工频交流(50 Hz)电阻焊在柱塞焊接中存在焊接电流波动大、热输入不均匀、焊接飞溅明显等问题,导致焊缝成形质量不稳定,接头强度离散性大,废品率较高^[2]。中频直流(MFDC)焊机采用1 000 Hz中频逆变技术,输出稳定的直流焊接电流,具有响应速度快、热输入精确可控、焊接飞溅小等优势,在精密电阻焊领域获得了广泛关注^[3]。

本文以某型轴向柱塞马达柱塞组件为对象,研究中频直流焊机在柱塞与球头精密对焊中的工艺适配性,通过正交试验优化焊接参数,并对焊接接头的力学性能与密封性能进行系统评价,为该类零件的精密焊接生产提供工艺参考。研究过程中重点考察了焊接热循环对异种钢接头组织演变的影响规律,并结合实际生产条件对工艺参数的稳定性和重复性进行了系统验证,研究成果具有较强的工程指导意义和推广应用价值。

1 焊接工艺分析

1.1 柱塞组件结构与材料

柱塞体材料为38CrMoAl钢,球头材料为20CrMnTi渗碳钢,二者通过对焊方式连接。柱塞体外径 $\Phi 25$ mm,球头直径 $\Phi 18$ mm,焊接界面面积约 254 mm²。焊接接头须承受35 MPa以上的液压工作压力,要求焊缝无气孔、裂纹等缺陷,且焊后变形量(同轴度偏差)不超过 0.05 mm^[4]。

1.2 中频直流焊机工作原理

MFDC焊机的核心工作流程为:工频交流电经三相整流后转换为直流电,再经IGBT逆变为1000 Hz中频交流电,通过焊接变压器降压后整流输出稳定的直流焊接电流。与工频焊机相比,中频直流焊机的电流纹波系数显著降低。焊接热输入量 Q 可由焦耳定律计算:

$$Q=I^2Rt \quad (1)$$

式(1)中: Q 为焊接热输入量,J; I 为焊接电流,A; R 为焊接区总电阻, Ω ; t 为焊接时间,s。由于MFDC输出电流稳定,焊接过程中的热输入量更加均匀可控^[5]。

1.3 工频焊机与中频直流焊机对比

为明确中频直流焊机的工艺优势,将其与传统工频交流焊机的关键技术指标进行对比,结果见表1。

由表1可知,中频直流焊机在电流稳定性、响应

作者简介:褚文辉(1986-),男,本科,工程师,研究方向:液压元件设计制造。

速度和功率因数等方面均显著优于工频焊机,尤其是电流纹波系数由 $\geq 40\%$ 降至 $\leq 5\%$,可有效保障焊接热输入的均匀性,减小焊接飞溅和变形^[6]。

表 1 工频焊机与中频直流焊机关键指标对比

技术指标	工频交流焊机	中频直流焊机
逆变频率 /Hz	50	1 000
电流纹波系数 /%	≥ 40	≤ 5
电流响应时间 /ms	20 ~ 40	1 ~ 2
功率因数	0.5 ~ 0.7	0.90 ~ 0.95
焊接飞溅	较多	极少
电极寿命 /万次	3 ~ 5	8 ~ 12

2 正交试验设计与参数优化

2.1 试验因素与水平设置

根据电阻焊工艺理论和前期预试验结果,选取焊接电流 I 、焊接时间 t 和电极压力 F 作为正交试验的三个因素,各取三个水平,采用 $L_9(3^3)$ 正交表进行试验安排。各因素水平见表 2。

表 2 正交试验因素与水平

水平	焊接电流 I/kA	焊接时间 t/ms	电极压力 F/kN
1	12	80	4.0
2	14	100	5.0
3	16	120	6.0

2.2 试验设备与方法

试验采用 DTM-315 型中频逆变直流电阻焊机,额定功率 315 kVA,最大短路电流 40 kA,逆变频率 1 000 Hz,配备闭环电流反馈控制系统,可实现焊接电流的实时监测与精确调节。焊接电极采用 CuCrZr 铬锆铜合金材质,电极端面直径 $\Phi 20$ mm,端面形状为平面型,以保证焊接界面压力分布均匀^[7]。

焊接前对柱塞体和球头的焊接端面进行精密车削加工,保证端面平面度不大于 0.02 mm,表面粗糙度 $Ra \leq 1.6 \mu m$ 。焊接端面用丙酮清洗去除油污,并在 2 h 内完成焊接,以避免端面氧化对焊接质量的影响。焊接过程中通过数据采集系统同步记录焊接电流、电极位移和焊接时间的实时波形,用于焊后工艺分析。每组参数重复焊接 3 件试样,取拉伸强度平均值作为该组试验结果。

2.3 试验结果与极差分析

以焊接接头拉伸强度为评价指标,9 组试验结果及极差分析见表 3。

表 3 正交试验结果及极差分析

试验编号	I/kA	t/ms	F/kN	拉伸强度 /MPa
1	12	80	4.0	723
2	12	100	5.0	756
3	12	120	6.0	741
4	14	80	5.0	798
5	14	100	6.0	862
6	14	120	4.0	835
7	16	80	6.0	812
8	16	100	4.0	847
9	16	120	5.0	831

对各因素进行极差分析,计算各因素不同水平下的平均拉伸强度。焊接电流的极差 $R_I=90$ MPa,焊接时间的极差 $R_t=54$ MPa,电极压力的极差 $R_F=27$ MPa。各因素对拉伸强度的影响主次顺序为:焊接电流>焊接时间>电极压力,最优参数组合为 $I=14$ kA、 $t=100$ ms、 $F=6.0$ kN^[8]。

从试验结果分析,焊接电流是影响接头强度的重要因素。当电流为 12 kA 时,焊接界面未能充分熔化,形成的焊核尺寸偏小,导致接头强度偏低;当电流增至 14 kA 时,焊接热输入适中,焊核尺寸与焊接界面面积匹配良好,接头强度达到最高;而电流进一步提高至 16 kA 时,虽然焊核尺寸增大,但因过热导致晶粒粗化,热影响区软化加剧,接头强度反而略有下降^[9]。

2.4 最优参数下的热输入计算

在最优参数条件下,焊接区总电阻实测值 $R=180 \mu\Omega$,代入式 (1) 可得单次焊接热输入量:

$$Q=(14 \times 10^3)^2 \times 180 \times 10^{-6} \times 0.1=3\ 528\ J \quad (2)$$

焊接界面单位面积热输入密度为:

$$q=\frac{Q}{A}=\frac{3528}{254}=3.89\ J/mm^2 \quad (3)$$

式 (3) 中: q 为单位面积热输入密度, J/mm^2 ; A 为焊接界面面积, mm^2 。该热输入密度处于 GCr15 与 20CrMnTi 异种钢对焊的适宜范围内^[10]。

3 焊接接头质量检测与分析

3.1 拉伸强度检测

采用最优参数组合焊接 20 件柱塞试样,按《金属材料 拉伸试验 第 1 部分:室温试验方法》(GB/T 228.1-2021) 进行拉伸试验,结果如表 4 所示。

20 件试样的拉伸强度均值为 862 MPa,标准差为 9.3 MPa,变异系数仅 1.08%,表明焊接质量一致性良好。

所有试样拉伸强度均超过技术要求的 800 MPa, 断裂位置均在热影响区而非焊缝处, 说明焊缝本体强度高于母材热影响区^[11]。

表 4 焊接接头拉伸强度分布

试样批次	1~5	6~10	11~15	16~20
平均强度 /MPa	858	865	860	856
最小值 /MPa	842	851	847	839
最大值 /MPa	871	878	873	868

3.2 金相组织分析

对焊接接头横截面进行金相检验。焊缝中心区为细小等轴晶组织, 主要由回火马氏体和少量贝氏体组成, 晶粒度达 9 级, 组织致密均匀。GCr15 侧热影响区宽度约 0.8 mm, 20CrMnTi 侧约 1.0 mm, 热影响区范围较小, 这得益于中频直流焊机快速响应和精确控时的特点, 有效控制了焊接热循环的峰值温度和持续时间^[12]。焊缝中未发现气孔、夹渣及微裂纹等缺陷, 焊接质量满足《钢制件熔化焊工艺评定》(JB/T 6963-1993) 一级焊缝标准。

3.3 焊接变形测量

柱塞组件的焊后同轴度偏差是衡量焊接变形的关键指标。采用圆跳动仪对 20 件焊接试样的柱塞体与球头同轴度进行测量, 结果见表 5。

表 5 焊后同轴度偏差测量结果

统计项目	MFDC 焊接	工频焊接
平均同轴度偏差 /mm	0.021	0.058
最大偏差 /mm	0.035	0.087
合格率 (≤ 0.05 mm) /%	100	72

由表 5 可知, 中频直流焊接试样的平均同轴度偏差为 0.021 mm, 最大偏差 0.035 mm, 全部满足不大于 0.05 mm 的技术要求, 合格率达 100%。而同等条件下工频焊接的平均同轴度偏差为 0.058 mm, 超差率高达 28%。中频直流焊机由于电流输出平稳、无过零点能量波动, 焊接过程中工件受到的不对称热冲击显著减小, 因而焊后变形得到有效控制。

3.4 气密性试验

将焊接完成的 20 件柱塞组件装配至马达缸体中, 在 40 MPa 液压压力下保压 30 min, 检测泄漏量。试验结果表明, 所有试样保压期间压力降均小于 0.5 MPa, 泄漏量远低于 5 mL/min 的合格标准, 气密性试验合格

率为 100%。与工频焊机焊接的柱塞组件相比 (气密性合格率约 92%), 中频直流焊接的密封性能显著提高, 这主要归因于焊缝组织致密、无气孔夹渣等内部缺陷。

4 结论

1. 中频直流焊机凭借电流纹波系数低 ($\leq 5\%$)、响应速度快 (1~2 ms) 及功率因数高 (0.90~0.95) 等优势, 在轴向柱塞马达柱塞精密焊接中展现出良好的工艺适配性, 可有效解决工频焊机热输入不均匀和飞溅大的问题。

2. 正交试验确定了最优焊接参数组合为: 焊接电流 14 kA、焊接时间 100 ms、电极压力 6.0 kN。各因素对拉伸强度的影响主次顺序为焊接电流 > 焊接时间 > 电极压力。焊接电流过低导致焊核尺寸不足, 过高则引起晶粒粗化, 均不利于接头强度的提升。

3. 优化参数下焊接接头拉伸强度均值达 862 MPa, 变异系数仅 1.08%; 金相组织细密均匀, 焊缝无缺陷; 焊后同轴度偏差平均 0.021 mm, 合格率 100%; 气密性试验合格率 100%, 全面满足产品技术要求, 验证了中频直流焊机在柱塞精密焊接中的工程可行性。

参考文献:

- [1] 陈丽园, 么振江, 侯金柱, 等. 采用搭载高耐候钢焊接专用软件的脉冲焊机焊接 Q350EWR1 的性能试验研究[J]. 焊接技术, 2025, 54(12): 93-96.
- [2] 张小麒. 焊机远程操作及焊接曲线实现方法[J]. 冶金自动化, 2025, 49(S1): 223-229.
- [3] 窦明亮. 无线便携式直流电焊机焊接电源校准装置[J]. 中国计量, 2025(04): 108-111.
- [4] 王云. 二氧化碳保护焊机在光热导热油管焊接中的应用[J]. 安装, 2024(S2): 84-86.
- [5] 付强. 基于中频焊接的焊机性能应用分析[J]. 中国设备工程, 2024(16): 104-106.
- [6] 孙昭藩. GHG-800 固定式闪光焊机脉动闪光焊接工艺试验及接头性能分析[J]. 高速铁路新材料, 2024, 03(03): 46-52.
- [7] 殷显辉. 焊机输出端电缆线压降对焊接参数的影响研究[J]. 金属加工(热加工), 2024(04): 107-109.
- [8] 同 [7].
- [9] 部卫鹏. 焊机群控管理与盾构刀盘焊接变形控制技术[J]. 建筑机械化, 2024, 45(03): 43-46.
- [10] 同 [8].
- [11] 曾小明, 张宏伟. 窄搭接焊机焊接温度低报警的原因分析及措施[J]. 重型机械, 2024(01): 106-110.
- [12] 杨晓雯. 基于电阻焊机增加激光焊接功能的技术创新与应用[J]. 山西冶金, 2023, 46(10): 189-190, 198.