

摩擦焊机液压施力系统压力特性对比分析

王喜锋¹, 杜随更¹, 龚 城², 燕鹏飞²

(1. 西北工业大学 现代设计与集成制造技术教育部重点实验室, 西安 710072;

2. 煤炭科学研究总院 西安分院, 西安 710054)

摘 要: 为分析采用电液比例计算机闭环系统进行摩擦焊接过程控制的必要性及可行性, 对比分析了分别由开关阀和比例溢流阀组成的两种摩擦焊机轴向压力施力系统的静动态特性, 以及长期生产过程中轴向压力波动规律, 重点分析了油温对轴向压力参数的影响。结果表明, 比例阀控制系统轴向压力的静、动态特性均优于开关阀系统; 在长期焊接生产过程中, 比例阀控制系统的轴向压力不受液压系统油温影响, 比开关阀系统稳定, 控制精度高, 重现性好。

关键词: 摩擦焊接; 比例阀; 计算机控制

中图分类号: TG425 **文献标识码:** A **文章编号:** 0253-360X(2006)12-037-05



王喜锋

0 序 言

目前, 国内生产的摩擦焊机液压施力系统都是采用开关型液压控制阀, 虽具有成本低、维修方便的特点, 但满足摩擦焊接过程所用的控制阀数量多, 频繁开关所带来的故障几率高, 且可控性差, 无法进行焊接过程闭环控制, 轴向压力控制精度低, 限制了摩擦焊接在一些高技术产业部门的应用^[1,2]。

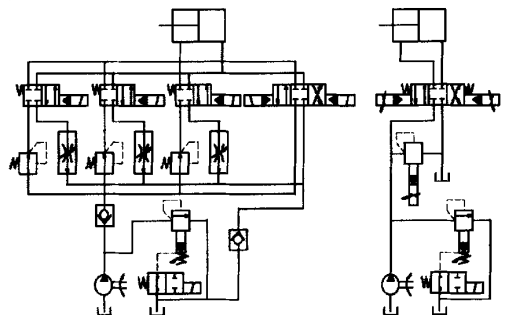
国外摩擦焊接施力系统一般采用电液伺服控制系统^[3-5], 国内也在一些摩擦焊机上进行过电液伺服系统改造^[2]。但在实际生产过程中发现, 电液伺服系统虽然动态响应速度快, 可控性好, 但对工作环境要求高, 特别是油污要求高。

作者首先将比例阀应用于摩擦焊机液压施力系统, 组成摩擦焊接过程电液比例计算机闭环控制系统^[1,6]。该系统轴向压力控制精度高, 参数调节方便, 对介质过滤精度要求低, 可靠性好, 是一种适合于实际生产现场摩擦焊接过程闭环控制的液压系统^[1,6]。

为对比不同控制系统对焊接生产参数重现性和控制精度的影响, 采用摩擦焊接过程计算机测控系统, 检测了分别由开关控制阀和比例控制阀组成的两种摩擦焊机液压施力系统在批量生产过程中的焊接参数。主要对两种系统焊接过程中轴向压力参数进行了对比分析。

1 两种摩擦焊机轴向压力施力系统

图 1a 为典型的由开关阀组成的摩擦焊机轴向压力施力系统原理图。主油缸活塞(带动焊机滑台)的进、退, 两级摩擦压力与顶锻压力的高低由图示 3 个压力控制阀、3 个流量控制阀、4 个方向控制阀共同控制。在摩擦焊接过程中, 这 10 个阀频繁交替动作, 出现故障的概率大。另外, 图 1a 所示的摩擦焊机施力系统只能使轴向压力参数呈阶跃性变化, 无法进行闭环控制, 不能对焊接过程中的干扰因素, 如油温变化、环境温度变化、焊接材质及表面状态的波动等, 进行实时有效调节。且压力、流速等参量由手动调节, 调节不便。图 1b 为采用比例溢流阀和比例方向阀的摩擦焊机施力系统原理图。轴向压力由电



(a) 开关阀

(b) 比例阀

图 1 两种摩擦焊机轴向施力系统原理图

Fig. 1 Principle schemes of hydraulic drive system of friction welding machine

液比例溢流阀控制,滑台进退与速度由电液比例方向阀控制。相对于开关阀系统,控制阀数量大大减少,可控性提高。电液比例阀在滞环、重复精度等主要稳态特性上可与伺服阀相当,而工作频宽又足以满足摩擦焊接系统控制的要求;在介质过滤精度要求和阀内压力损失两方面又接近于开关阀。

2 研究方法

摩擦焊机采用西北工业大学生产的 C450 型连续驱动摩擦焊机。摩擦焊接过程参数测控采用西北

工业大学开发的摩擦焊接过程测控系统,该系统是一个机、电、液一体化系统,可对摩擦焊接过程施力系统轴向压力、主机电流(扭矩)、主轴转速、摩擦变形量(滑台位移)、油温等参数进行检测。系统硬件结构如图 2 所示。

开关阀组成的液压施力系统,由 PLC 完成摩擦焊接过程控制,计算机测控系统只进行焊接过程参数测量,以下简称开关阀(控制)系统。采用比例阀组成的轴向压力施力系统,以工业控制计算机为控制核心,完成摩擦焊接过程压力参数的闭环控制,同时进行焊接过程参数测量,以下简称比例阀(控制)系统。

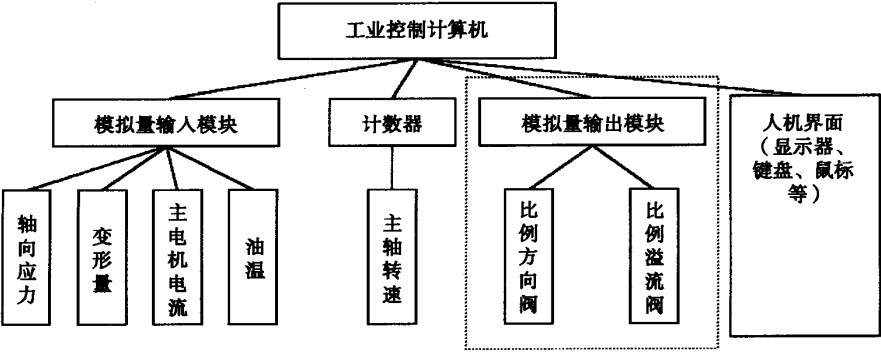


图 2 摩擦焊接计算机控制系统硬件结构
Fig.2 Hardware structure of friction welding computer control system

研究对摩擦焊接过程所有特征参数均进行了测量分析,但由于篇幅所限,文中仅对比分析两种施力系统下轴向压力的相关特性。压力测试点紧靠主油缸。

2.1 轴向压力静态重复特性分析对比

在两种系统下,设定不同的轴向压力,用计算机系统采集系统稳定后的实际压力值,将设定值与采集值进行对比。计算平均相对误差 RD 、标准误差 SD 和变异系数 C_v 。

2.2 轴向压力动态特性分析对比

结果表明,开关阀控制系统的压力误差和离散程度较大,相对误差达 5% ~ 17%。这是由于开关阀控制系统压力设定采用压力表盘读数,会产生读数误差。压力表测试点在液压系统上,与主油缸之间尚有一些液压管路和液压阀,会产生阻尼,导致压力损失。

比例阀控制系统的压力静态重复性好,误差小,控制精度高,离散程度低,相对误差只有 0.02% ~ 0.07%。这是由于比例阀控制系统采用计算机闭环

控制系统,直接根据靠近主油缸的压力传感器提供的压力信号调节比例溢流阀的控制压力,有效消除了人为读数误差,管道、阀压力阻尼及液压油温变化的影响。

在两种系统下,分别施以阶跃信号,分析系统轴向压力时域阶跃响应。

2.3 焊接过程分析对比

分别在开关控制系统下及比例控制系统下,采用整定的焊接参数,长期焊接地质钻杆,对实测的摩擦压力、顶锻压力进行分析对比。重点分析了两个系统下油温连续升高对摩擦压力和顶锻压力的影响。

3 试验结果

3.1 静态特性分析

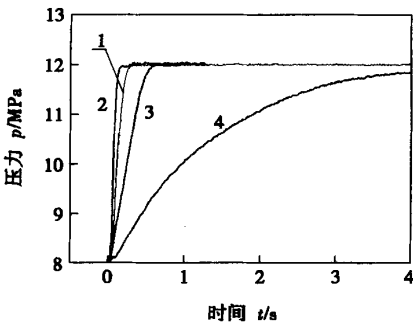
轴向压力设定值分别为 5 MPa、8.5 MPa、9 MPa 和 13 MPa,分别进行 5 次测量。两套系统测试结果见表 1。

表 1 轴向压力静态重复特性
Table 1 Axial pressure static repeated characteristic

系 统	设定值 p_s/MPa		实测值 p/MPa				平均值 \bar{p}/MPa	标准误差 $SD/(10^{-2}\text{MPa})$	相对误差 $RD(\%)$	变异系数 $Cv(\%)$
开关阀 系统	5.0	4.05	4.02	4.22	4.23	4.10	4.12	9.66	17.52	2.34
	8.5	7.65	7.63	7.63	7.54	7.66	7.62	4.76	10.35	0.63
	9.0	8.34	8.31	8.34	8.13	8.18	8.26	9.82	5.69	1.19
	13.0	12.51	12.24	12.22	12.41	12.28	12.33	12.40	5.15	1.01
比例阀 系统	5.0	5.00	5.00	4.99	5.01	5.01	5.00	0.837	0.04	0.17
	8.5	8.50	8.50	8.51	8.51	8.50	8.50	0.548	0.07	0.06
	9.0	8.99	8.99	9.00	9.00	9.01	9.00	0.837	0.00	0.09
	13.0	12.99	12.99	12.99	13.00	13.00	12.99	0.548	0.08	0.04

3.2 动态特性分析

图 3 为测试的系统阶跃响应曲线,比例阀系统中比例方向阀控制电压增大,阀油路开口增大,系统流量增大。开关阀系统测试时,调速阀开口调到最大。两套系统下,均不存在超调现象,属于过阻尼系统。阶跃响应的动态性能指标计算结果见表 2。比例阀系统动态响应速度可调,随方向阀控制电压增大,流量增大,上升时间、延迟时间减小,系统动态响应变快。同样在大流量,开关阀系统延迟明显,约 0.07 s,比例系统约 0.03 s,且上升时间短。



(1. 开关阀系统;2~4. 比例阀系统,对应比例方向阀控制电压分别为 4 V,1.45 V,1 V)

图 3 系统阶跃响应

Fig.3 System step response

表 2 阶跃响应动态性能指标

Table 2 Step response dynamic performance index

系统	方向阀 控制电压 U/V	上升 时间 t_r/s	延迟 时间 t_d/s	时间 常数 t_1/s	时间 常数 t_2/s	阻尼比 ξ	自然 频率 $\omega_n/(\text{rad}\cdot\text{s}^{-1})$
比例阀 系统	1	2.6	0.14	0.028	1.209	3.34	5.44
	1.45	0.62	0.05	0.028	0.281	1.75	11.37
	4	0.19	0.03	0.028	0.017	1.03	45.83
开关阀 系统	—	0.20	0.07	—	—	—	—

3.3 焊接生产过程压力参数分析

采用开关阀系统多日连续焊接 1 626 件产品,采用比例阀系统多日连续焊接 1 743 件产品。对生产过程实测的轴向压力(摩擦压力 p_f 及顶锻压力 p_d)进行统计分析,结果见表 3。统计表明,比例阀系统轴向压力稳定,误差小,重现性好。因此,采用计算机闭环控制系统的摩擦焊接电液比例控制系统可以在生产中大量推广应用。

表 3 长期焊接生产条件下轴向压力对比

Table 3 Comparison of axial pressures on long-period welding production

系统	参数	设定值 p_s/MPa	样品 数量 $N/\text{件}$	平均值 \bar{p}/MPa	相对 误差 $RD(\%)$	标准 误差 $SD/10^{-2}\text{MPa}$	变异 系数 $Cv(\%)$
开关阀	p_f	8.5	1 626	7.49	11.83	6.53	0.87
系统	p_d	13.5	1 626	12.47	7.63	5.77	0.46
比例阀	p_f	7.6	1 743	7.60	0.00	3.39	0.04
系统	p_d	12.6	1 743	12.60	0.00	7.79	0.06

3.4 液压系统油温变化及其对焊接参数的影响

长期连续焊接生产时,油温是影响焊接参数稳定性的关键因素之一。由于摩擦焊机主轴轴承摩擦产热及压力油通过溢流阀等液压阀的做功产热,摩擦焊机液压系统的油温在连续生产时会很快升高,特别是在夏季环境温度高时,油温升高速度更快。C450 型摩擦焊机带有工业冷却系统,但在连续生产时油温仍有升高。采用开关阀系统下半年连续焊接 106 件产品,再采用比例阀系统半天连续焊接 116 件产品,各自对应的油温变化见图 4。开关阀系统下,油温由 30.7 ℃ 升至 50.9 ℃,幅度 20.2 ℃。比例阀系统下油温由 33.5 ℃ 升至 48.5 ℃,变化幅度 15 ℃。生产实践和统计分析表明,开关阀系统下油温上升

速度高于比例阀系统。

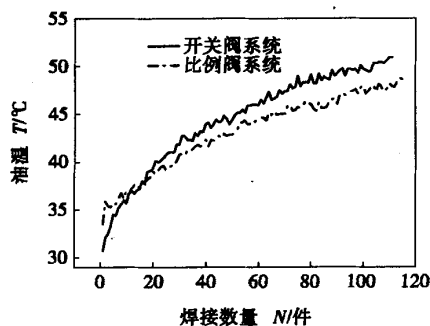


图 4 液压系统油温随焊接数量的变化

Fig.4 Change of hydraulic system oil temperature with welding quantities

液压油温直接影响液压油粘度。温度越高,则粘度越小。因此温度变化较大时,其粘度变化也大,相应的系统泄漏量变化较大,同时管道的流动阻力变化也较大(因为流动阻力与粘度成比例)。因此原来调定的压力参数在温度变化较大时参数变化也大,产生温度漂移,使系统的控制精度相应降低。

油温连续升高时,摩擦压力与油温关系见图 5,顶锻压力与油温关系见图 6。可见,随油温的升高,开关阀系统的轴向压力(摩擦压力及顶锻压力)有降低的趋势,顶锻压力下降更显著。但油温对比例阀系统的轴向压力没有影响。同时可看出,开关阀系统的压力离散程度远高于比例阀系统。

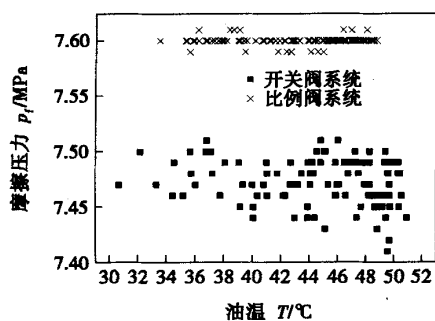


图 5 摩擦压力与液压系统油温关系

Fig.5 Relationship between friction pressure and oil temperature of hydraulic system

4 比例阀系统轴向压力响应时域分析

比例阀系统中比例方向阀控制电压增大,阀油路开口增大,系统流量增大。对图3测试的比例阀

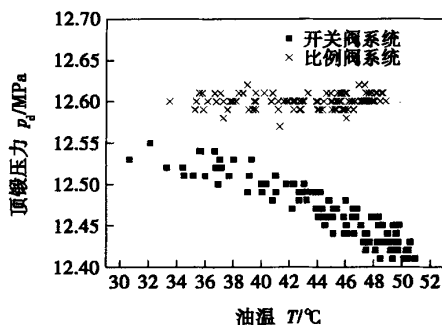


图 6 顶锻压力与液压系统油温关系

Fig.6 Relationship between forge pressure and oil temperature of hydraulic system

系统阶跃响应曲线拟合分析,比例阀控制系统近似为二阶过阻尼系统($\xi > 1$),传递函数 $G(s)$ 为

$$G(s) = \frac{\omega_n^2}{s^2 + 2\xi\omega_n s + \omega_n^2}, \quad (1)$$

式中: s 为拉氏变换复参数; ξ 为阻尼比; ω_n 为自然频率。

比例阀系统的惯性效应主要来自于比例溢流阀本身动作的惯性效应及液压缸容积效应和比例方向阀开口所形成的惯性效应。为了分别讨论这两个惯性效应对系统总体惯性效应的影响,将比例系统可看作是两个惯性环节的串联。引入等效时间常数 t_1, t_2 [7], 即

$$t_1 = 1/\omega_n (\xi - \sqrt{\xi^2 - 1}). \quad (2)$$

$$t_2 = 1/\omega_n (\xi + \sqrt{\xi^2 - 1}). \quad (3)$$

式(1)可转换为

$$G(s) = \frac{\omega_n^2 t_1 t_2}{(t_1 s + 1)(t_2 s + 1)}. \quad (4)$$

其对阶跃信号的时间响应为

$$c(t) = 1 + \frac{e^{-t/t_1}}{t_2/t_1 - 1} + \frac{e^{-t/t_2}}{t_1/t_2 - 1}. \quad (5)$$

假定用 t_1 描述上述第一项惯性效应,用 t_2 描述上述第二项惯性效应。用式(5)关系对图 3 数据进行拟合分析,所得到 t_1, t_2, ξ, ω_n 见表 2。由表 2 数据可看出,随比例方向阀控制电压增大, t_1 基本不变, t_2, ξ 减小, ω_n 变大。这是由于,对相同的比例溢流阀,其惯性效应基本不随比例方向阀开口大小变化而改变,即等效时间常数 t_1 基本稳定。比例方向阀的开口大小主要影响上述第二项惯性效应,比例方向阀开口越小,阻尼越大,所以等效时间常数 t_2 与 ξ 随之增大, ω_n 减小。当 t_2 远大于 t_1 , 比例阀控制系统可近似为时间常数为 t_2 的一阶惯性系统,图 3 中当比例方向阀控制电压为 1 V 时便为此

情况。

5 结 论

(1) 摩擦焊机比例阀控制系统的轴向压力静态平均相对误差、标准误差及变异系数均小于开关阀控制系统。

(2) 摩擦焊机比例阀控制系统近似为二阶过阻尼系统,动态响应速度可调。在比例方向阀流量设定值大的情况下,比例阀系统的动态响应速度比开关阀控制系统快,延迟时间短。

(3) 油温变化对开关阀控制系统影响显著,随油温升高,轴向压力降低。油温对有压力闭环控制的比例阀系统轴向压力没有影响。

(4) 长期焊接生产条件下,比例阀系统轴向压力比开关阀系统稳定,控制精度高,重现性好。采用计算机闭环控制系统的摩擦焊机电液比例控制系统可以在生产中大量推广应用。

参考文献:

- [1] 杜随更,傅 莉,鄢君辉,等. 摩擦焊接过程电液比例计算机闭环控制系统研制[J]. 机械工程学报, 2002, 38(12): 135 - 137.
- [2] 王文彬. 摩擦焊机电液伺服施力系统设计方案探讨与性能分析[J]. 西北工业大学学报, 1993(增刊): 174 - 181.
- [3] Donohue J J. The friction welding advantage[J]. Welding Journal, 2001, 80(5): 30 - 34.
- [4] Draugelates U, Schram A, Kettler C. Welding of magnesium alloys[J]. Magnesium Industry, 2000, 1(3): 41 - 45.
- [5] Bayindir R, Ates H. Comparison of the constructed control methods for a friction-welding machine[J]. Materials and Manufacturing Processes, 2005, 20(2): 131 - 146.
- [6] 杜随更,鄢君辉,傅 莉. 计算机闭环控制系统在摩擦焊接中的应用[J]. 机械科学与技术, 2004, 23(3): 300 - 302.
- [7] 王划一,杨西侠,林家恒,等. 自动控制原理[M]. 北京:国防工业出版社, 2001.

作者简介:王喜锋,男,1978 年出生,硕士。主要从事摩擦焊接控制系统研究工作,发表论文 1 篇。

Email: wxifeng@tom.com