

## 搅拌摩擦焊摩擦功率的计算与检测

王希靖, 郭瑞杰, 陈书锦, 阿荣

(兰州理工大学 甘肃省有色金属新材料部省共建重点实验室, 兰州 730050)

**摘要:** 针对搅拌摩擦焊接过程的摩擦加热功率的计算和检测, 通过一定的简化, 在试验的基础上, 运用试验和拟合的方法得到了轻负载功率与转速的关系曲线, 并将其关系置于 MCGS(监视与控制通用系统)软件中, 根据搅拌摩擦焊接过程的能量传递关系, 将可检测的实时轻、重负载功率引入计算过程, 得到了主电机输入功率与焊机输出扭矩的直接关系。同时, 采用 MCGS 监控软件实现了搅拌摩擦焊接过程功率、扭矩、转速等参数的实时检测及计算, 使得搅拌摩擦焊接过程的功率检测及计算同步进行。

**关键词:** 搅拌摩擦焊; 加热功率; 负载; 铝合金; 拟合

中图分类号: TG453 文献标识码: A 文章编号: 0253-360X(2004)04-93-03



王希靖

## 0 序 言

搅拌摩擦焊接是一种优质、高效、节能及洁净的固相连接技术, 近年来已在铝、镁及其合金的连接中得到较深入的研究和一定的推广使用。获得优质焊缝的基本条件是必须保证在摩擦加热界面获得足够的能量输入, 并在摩擦界面上形成较理想的温度分布。很显然利用搅拌摩擦界面的温度对摩擦焊接过程进行监控是最佳的质量控制方法, 但是对搅拌摩擦焊动态过程界面瞬间温度的准确检测尚有困难。因搅拌摩擦焊接是一个包含着热、力及其相互作用的复杂过程, 其机理还在进一步研究, 尤其是热模型, 国内外都在研究之中, 而加热功率则是一个必不可少的参数<sup>[1, 2]</sup>。因此作者的研究也不例外, 在进行搅拌摩擦焊能量传递的数学模型分析时, 首先必须解决的问题是输入功率的计算和实时检测。

## 1 计算方法

在研究中, 搅拌摩擦头通过一定的机械连接元件与主电机相连, 并且是同轴的。因此, 由搅拌摩擦焊接过程的能量传递可知, 与能量最初产生、传递和消耗有关的主要环节有三个, 即主电机、焊机传动系统、摩擦头。主电机既是动力源, 本身又消耗一部分能量; 焊机传动系统在传递能量的同时也使一部分能量损失; 摩擦头通过摩擦几乎消耗了全部的摩擦功率, 并将机械能转换为热能输入到工件上, 因摩擦

界面温度较低(与熔化焊相比), 与空气无热对流和热辐射, 其损耗极小。上述三个环节的能量损耗状况分别为可变损耗和微损耗。焊机在摩擦界面上利用的能量、焊机的传动损耗属于可变损耗, 电机线圈的损耗属于微损耗。

当摩擦焊机主电机在轻负载时(即摩擦头未与工件接触), 其输入功率  $P_0$ <sup>[3]</sup> 为

$$P_0 = P_{h_1} + P_{h_2}, \quad (1)$$

式中:  $P_{h_1}$  为主电机内部损耗的功率;  $P_{h_2}$  为摩擦头未接触工件时焊机传动功率损耗。

当在焊接时, 主电机的输入功率  $P'_0$  为

$$P'_0 = P'_{h_2} + P_{h_1} + P_m, \quad (2)$$

式中:  $P_m$  为摩擦加热功率;  $P'_{h_2}$  为工件接触摩擦焊接时焊机传动功率损耗, 其值主要取决于转速。

实际上, 在正常搅拌摩擦焊接时, 在设定的转速下轻负载和重负载时转速变化不大, 焊机传动系统的能量损耗  $P'_{h_2}$  与轻负载时焊机传动损耗  $P_{h_2}$  相差很小, 而且焊机传动损耗所占总能量消耗的比例又较小。因此可认为

$$P_{h_2} = P'_{h_2}。 \quad (3)$$

虽然主电机内部损耗与电流有关, 但在焊接时与轻负载时的主电机电流变化不大(轻负载为 6.3 A, 重负载为 8.5 A), 可认为内部损耗  $P_{h_1}$  与轻负载时变化不大。所以, 由式(1)~式(3)可得, 摆擦加热功率  $P_m$  为

$$P_m = P'_0 - P_0。 \quad (4)$$

由此可知, 将电机的轻负载功率和重负载功率

检测出来以后就可以算出搅拌摩擦加热功率。同时,可根据重负载功率计算出焊机的输出扭矩  $T^4$  为

$$P' = 2\pi Tn, \quad (5)$$

式中:  $n$  为转速;  $T$  为扭矩。

## 2 摩擦功率检测

根据能量转换和守恒定律,通过对搅拌摩擦焊主电机定子电流、电压信号实时的计算机检测,结合焊接过程能量传输的特点,利用电路模型,可以实现对搅拌摩擦焊输出功率、摩擦加热功率以及摩擦扭矩等能量参数的计算机一体化实时检测,并可以进一步对搅拌摩擦焊能量参数的变化规律进行研究。

### 2.1 检测系统

如图 1 所示,全部计算及检测过程由计算机中的 MCGS 软件完成。MCGS 即“监视与控制通用系统”,是为工业过程控制和实时监测领域服务的通用计算机系统软件,具有功能完善、操作简便、可视性好、可维护性强的突出特点。整个数据实时采集系统由 MCGS 工控组态软件、变频器、PLC(可编程控制器)组成。变频器和 PLC 中的信号,如输出频率信号、扭矩、转速信号(由连接于电机主轴上的光电编码器将转速信号传至 PLC 得到),均可以利用 MCGS 软件读出,据式(4)、(5)计算轻负载和重负载状态下的电机功率。利用 MCGS 软件编程,可以实现与 PLC 通讯<sup>5</sup>,从而控制焊机的前进、后退、上升、下降等动作。

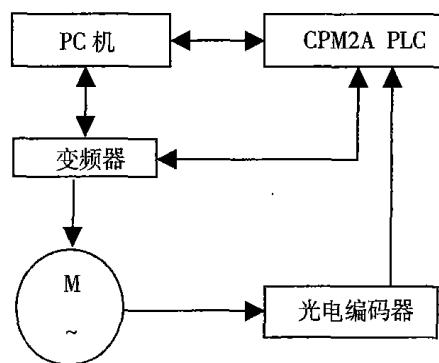


图 1 检测系统示意图

Fig. 1 Sketch of measuring system

功率的检测计算流程如图 2 所示。

### 2.2 轻负载功率的确定

由式(2)~式(4)知,只要检测到主电机在焊接时的输入功率和轻负载功率,就可得到摩擦加热功率,而轻负载功率因变数太多,如果用数值计算的方法则既复杂又不精确。在研究中用试验的方法得

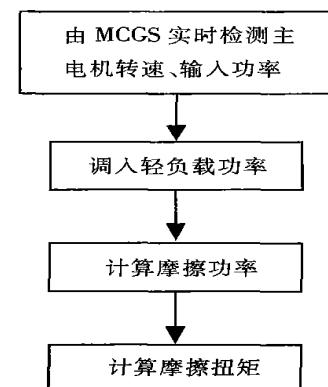


图 2 检测计算流程

Fig. 2 Flow chart of measuring and calculating

到,即在焊接前用 MCGS 控制界面可以将不同转速时焊机的轻负载功率显示出来,图 3 是其中一幅。图中呈梯形形状曲线 1 是转速变化图,曲线 2 是轻负载功率图。轻负载功率在启动和停止时会有尖峰出现,这是因为电机启动时,有较大的启动电流,故启动扭矩较大,从而导致轻负载功率较大。由于研究中将电机设为频率线性下降的减速特性,故停止时也出现尖峰。因此启动和停止时的功率值不能真实反映轻负载功率,只有转速稳定之后的功率值,才代表轻负载功率值。

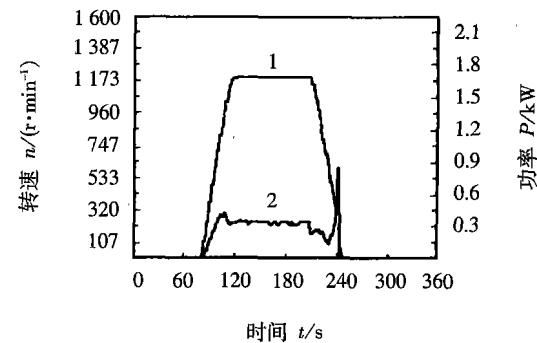


图 3 1200 r/min 时的轻负载功率

Fig. 3 Light load power at 1200 r/min

将在不同转速时的轻负载功率值经拟合后得到的关系为

$$P_0 = 0.2651n + 18.334, \quad (6)$$

式中:  $P_0$  为轻负载功率;  $n$  为转速。

该拟合曲线的相关系数  $R^2 = 0.9336$ , 即可以用式(6)表征轻负载功率与转速的关系。在 600~1440 r/min 范围内轻负载功率与转速的关系如图 4 所示。

因此,据式(6),在搅拌摩擦焊接过程中只要检测到转速值就能得到轻负载功率值。

### 2.3 摩擦功率的实际检测及计算过程

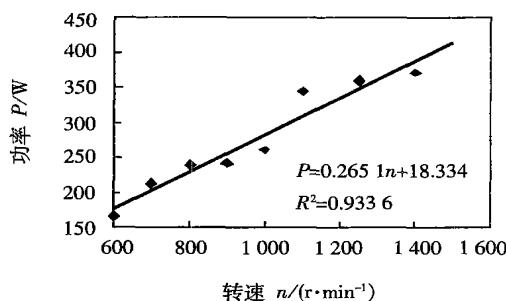


图4 转速与轻负载功率的关系

Fig. 4 Relation of light load to rotation speed

用6 mm厚 LY2 铝合金对接焊时, 焊接速度124 mm/min, 转速1 000 r/min。由MCGS控制及检测软件计算并显示的转速、加热功率和扭矩如图5、6所示。

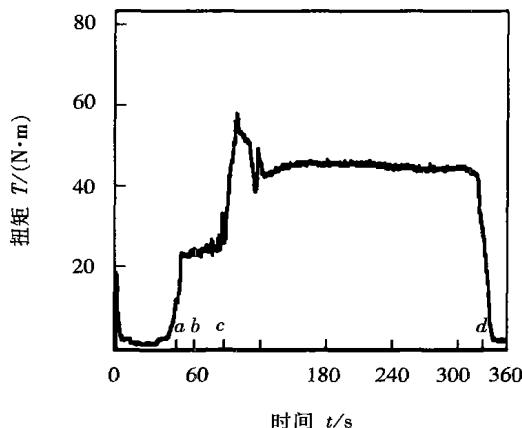


图5 扭矩实时变化图

Fig. 5 Real-time variation of torque

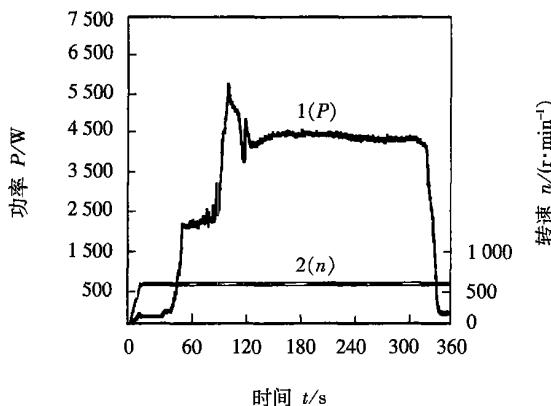


图6 功率与转速实时变化图

Fig. 6 Real-time variation of power and rotation speed

图5为扭矩实时曲线, 由图可见, 0~a区间是焊机启动下压, 此过程中摩擦头并未与工件接触, 所以其数值较小; a~b区间为搅拌针深入工件的过程, 在这个过程中, 扭矩值轻微上升; b~c区间则是摩擦头端部与工件接触, 并开始挤压摩擦, 因此电机输出扭矩急剧上升且变化大, 由于摩擦机理的复杂性, 对于深刻原因暂不分析。这个过程同时也是预

热过程, 由于控制器已经开始调节扭矩, 在一定的预热时间内, 扭矩最终趋于恒定; c~d区间则是正常焊接过程, 工作台开始行走, 在控制器的作用下, 电流被稳定地控制在电流上下阈值之间, 电机输出扭矩恒定。摩擦焊加热功率与输出扭矩有着相似的实时曲线(图5、6), 只是在启动时略有不同, 原因是电机启动时, 有较大启动电流, 所以启动扭矩不等于零, 而转速则是从零开始上升的。图6中曲线1代表功率, 曲线2代表转速。

从上看出, 由研究提出的搅拌摩擦焊加热功率的计算及检测方法得到的功率、扭矩变化过程真实地反映了搅拌摩擦焊接过程的实际情况。以该计算和检测方法为基础, 将为今后深入研究搅拌摩擦焊接接头温度场及热、力耦合过程提供方便。

### 3 结 论

(1) 通过一定的简化, 根据搅拌摩擦焊接过程的能量传递关系, 将可检测的实时轻、重负载功率引入计算过程, 得到了主电机输入功率与焊机输出扭矩的直接关系。

(2) 研究中采用的MCGS监控软件实现了搅拌摩擦焊接过程功率、扭矩、转速等参数的实时检测及计算, 为搅拌摩擦焊接过程中的能量参数的变化规律的研究奠定了基础。

(3) 研究是在试验的基础上, 用轻负载功率的实际检测值拟合了轻负载功率与转速的曲线, 并将其关系置于MCGS软件中, 使得搅拌摩擦焊接过程的功率检测及计算同步进行。

### 参考文献:

- [1] 王希靖. 铝合金搅拌摩擦焊技术应用研究[J]. 有色金属学报, 2002, 12(3): 78~82.
- [2] Jata K V, Mahoney M W, Mishra R S. Friction and stir welding and processing[A]. Symposium sponsored by the shaping and forming committee of the materials processing & manufacturing division of TMS.[C]. TMS. Indianapolis 2001. 35~42.
- [3] 罗键. 连续驱动摩擦焊能量参数的计算机一体化实时检测技术[J]. 西安交通大学学报, 1998, 32(6): 41~44.
- [4] 李发海, 朱东起. 电机学[M]. 北京: 科学出版社, 2001. 77~82.
- [5] 黄立培, 张进学. 变频器应用技术及电动机调速[M]. 北京: 人民邮电出版社, 1998.

**作者简介:** 王希靖, 男, 1956年1月出生, 教授, 中国机械工程学会自动化分会委员。主要从事焊接设备及其自动化、焊接质量控制方面的研究工作。获得部、省级科技进步二等奖1项、三等奖7项, 发表论文60余篇。

Email: wangxj@lut.cn