

线性摩擦焊摩擦功率的检测与分析

Detection and Analysis of Friction Power During Linear Friction Welding

摩擦焊接陕西省重点实验室 马铁军 汤化伟 李文亚 张 勇

[摘要] 针对自制的 XMH-160 型线性摩擦焊机, 论述了通过采集线电压和线电流的方法来检测线性摩擦焊驱动电机输入功率和焊接界面摩擦功率的原理。以研华 PCI-1710HGU 型数据采集卡为核心, LabVIEW 为开发软件分别设计了检测系统的硬件、软件。以 TA2 纯钛为实验材料进行了线性摩擦焊工艺试验, 对焊接过程的摩擦功率曲线进行了采集与分析, 并结合曲线变化特点探讨了线性摩擦焊接头的形成过程。

关键词: 线性摩擦焊 摩擦功率 LabVIEW 数据采集卡 TA2 纯钛

[ABSTRACT] By monitoring line voltage and current of the driving motor of homemade XMH-160 linear friction welding machine, the input power of the driving motor and the friction power of the welding interface are detected. The detection system consists of hardware, based on PCI-1710HGU data acquisition card of Advantech company, and software, based on LabVIEW. The experiment of TA2 pure titanium is carried out. By analyzing the evolution characteristics of the friction power, the formation mechanism of welding joint is discussed.

Keywords: Linear friction welding Friction power LabVIEW Data acquisition card TA2 pure titanium

线性摩擦焊(LFW)是两焊件在轴向压力的作用下通过直线往复摩擦加热界面完成焊接的一种新型连接工艺^[1]。它可以实现非轴对称复杂截面的摩擦焊接, 因而扩展了摩擦焊的应用范围。由于其一系列技术优势, 目前已成为航空发动机整体叶盘焊接制造与维修的一项关键技术, 并在国外几大航空发动机制造厂家得到成功应用^[2]。线性摩擦焊技术能够解决很多传统焊接方法难焊或无法焊接的问题, 还可用于贵金属复杂零件的预成形, 因此在工业制造领域有着广阔的应用前景。

在摩擦焊研究领域, 人们一直致力于摩擦功率曲线的研究。摩擦功率曲线, 能够体现摩擦焊工艺过程不同阶段界面金属物理形态的变化历程, 因而可反映出摩擦焊接头焊接质量的好坏。所谓功率峰值控制法, 就是利用摩擦功率曲线来对焊接过程进行监控的。旋转摩擦焊可利用扭矩传感器来检测摩擦功率曲线^[3], 但对于线

性摩擦焊是无法使用扭矩传感器来测定摩擦功率曲线的。因此, 本文采用检测线性摩擦焊机驱动电机线电压和线电流的方法来进行驱动电机输入功率及焊接界面摩擦功率的研究。

1 检测原理及方法

1.1 检测原理

本研究是针对西北工业大学摩擦焊接实验室自制的 XMH-160 型线性摩擦焊机进行的。焊机的外形如图 1 所示。该焊机能够实现焊接振幅和振动频率的无级调节。焊机的结构及工作原理如图 2 所示。焊机主要由变频器、驱动电机、偏心轴、传动及回位机构、振



图1 XMH-160型线性摩擦焊机

Fig.1 XMH-160 linear friction welding machine

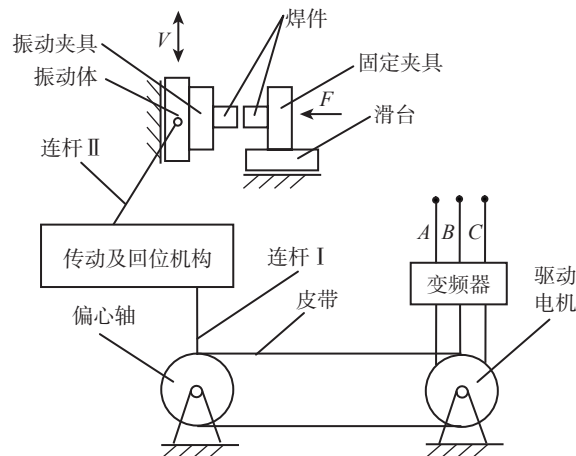


图2 XMH-160型线性摩擦焊机工作原理示意图

Fig.2 Working principle of XMH-160 linear friction welding machine

动体、夹具等组成。焊接时驱动电机通过皮带带动偏心轴高速旋转,偏心轴再通过连杆 I 将其偏心旋转运动传递给传动及回位机构,传动及回位机构将旋转运动变成线性往复运动,并通过连杆 II 带动振动体、振动夹具及焊件作上下往复振动。变频器的型号为富凌 DZB100B 型通用变频器,驱动电机选用 37kW 的三相交流异步电机。

焊机振动频率的无级调节是通过变频器改变三相网路电压频率,从而改变驱动电机的转速来实现的。由于是采用机械式激励方式产生焊机振动系统所需的线性往复运动,线性摩擦焊过程中的能量转换是由电能经驱动电机转化成机械能并最终在焊接界面转化成热能加热焊接区。因此,通过检测驱动电机的输入功率变化曲线,再根据焊机的能量传递特点,便可计算得到焊接过程中的焊接界面摩擦功率曲线。

焊机驱动电机的输入功率检测可以通过实时采集焊接过程驱动电机线电压和线电流的变化来实现。XMH-160 焊机的驱动电机采用三角形接法,故其输入功率 P 可采用公式(1)进行计算^[4]:

$$P = \sqrt{3} \times U_l \times I_l \quad (1)$$

式中: U_l 为驱动电机线电压; I_l 为驱动电机线电流。

1.2 检测方法

1.2.1 检测系统硬件

检测系统硬件主要包括霍尔电压传感器、霍尔电流传感器、LC 滤波器、数据采集卡、接线端子板、电缆及计算机。检测系统硬件如图 3 所示。

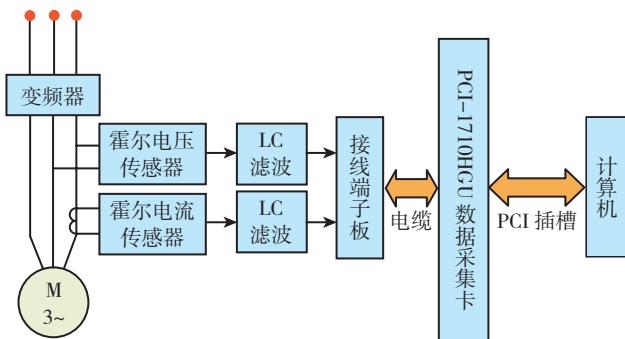


图3 检测系统硬件框图

Fig.3 Hardware diagram of detection system

驱动电机的实际线电压和线电流为交流,通过磁补偿型霍尔传感器将其有效值转化成 0~10V 直流电压进行采集。由于焊接过程中的电磁干扰会对信号采集产生一定的影响,因此,必须将霍尔传感器输出的信号进行滤波处理,才能准确采集到转化后的直流电压信号。无源低通 LC 型滤波电路利用并联电容和串联电感能有效的衰减输入信号中的干扰信号,达到理想滤波效果。

经过滤波后的直流电压信号为模拟信号,需要经过数据采集卡转化为数字信号再传递给计算机。本文选用的数据采集卡为研华 PCI-1710HG-U 型高性能 PCI 总线数据采集卡,采用单端接入方式通过其 12 位 A/D 转换器接收并转换模拟量信号。数据采集卡与计算机通过 PCI 总线插槽直接相连,与 ADAM-3968 型端子板则采用两端针型接口的 68 芯 SCSI-II 电缆相连接。这样,滤波后的直流电压信号通过接线端子板对应接口实现与数据采集卡的 2 路模拟量输入通道相连。

硬件系统主要实现将驱动电机实际的交流线电压和线电流信号,转化成对应的直流电压信号,再经滤波和模数转化后传递给计算机。计算机还需要经过软件系统实现数据采集并通过计算获取线电压和线电流的实际有效值。

1.2.2 检测系统软件

根据设计需求,采用 LabVIEW 作为检测系统的界面开发软件。检测系统软件部分由 2 个子模块组成:数据采集模块和数据存储模块。由于采用了多线程技术,数据采集模块和数据存储模块独立运行,不同模块之间的数据传输利用局部变量完成。

(1) 数据采集模块。由于 LabVIEW 不支持非 NI 公司的数据采集卡,因此通常采用调用动态链接库方式(CLF 方式)驱动非 NI 数据采集卡^[5]。研华 PCI-1710HG-U 型数据采集卡提供了 DLL 库函数的驱动程序,用户可以根据实际需求直接调用有关函数。

数据采集模块的采集流程为使用 DeviceOpen.vi 加载设备,利用 MAIConfig.vi 配置采样通道数及各通道的增益等参数,使用 MAIVoltageIn.vi 和 While 循环将采集到的数据每隔 100ms 读出一次。经运算后得到实际数值并进行移动平均值算法滤波(连续 4 个数据取平均值)。数据采集完成后,利用 DeviceClose.vi 关闭加载的设备。

(2) 数据存储模块。数据存储模块主要由 2 个 While 循环结构和 1 个条件结构组成。外层 While 循环用来检测“开始采集”按钮是否按下。“开始采集”按钮一旦按下,条件结构值为真,系统会在指定目录下创建一个以时间命名的 XLS 文件,内层 While 循环每隔 100ms 读取一次线电压和线电流的数值并通过 While 循环结构的自动索引功能全部保存起来。“开始采集”按钮弹起后通过 Write to Spreadsheet File 函数将保存的所有数据按指定格式写入 XLS 文件。

2 检测结果与分析

2.1 驱动电机线电压和线电流

采用 XMH-160 型线性摩擦焊机对 TA2 纯钛进行

焊接试验。试件的尺寸为 $22\text{mm} \times 11\text{mm} \times 45\text{mm}$ (长 \times 宽 \times 高), 焊接面积为 $22 \times 11\text{mm}^2$, 摩擦方向沿长度方向。焊接规范参数如表 1 所示。由试件焊后外观(图 4)可知, 试件焊合率 100%, 飞边在振动方向上被均匀挤出, 说明此组焊接参数比较合理, 但要获得 TA2 纯钛的最佳工艺参数还要对焊接过程进行深入分析。

表1 焊接规范参数

摩擦压力 /MPa	顶锻压力 /MPa	摩擦时间 /s	振幅 /mm	频率 /Hz
30	80	5	3	35

注: 摩擦时间为控制系统输入参数并非指焊件实际摩擦时间。



图4 TA2 纯钛试件焊后外观

Fig.4 Appearance of TA2 pure titanium after welding

图 5 为线性摩擦焊过程中驱动电机线电压和线电流随时间的变化曲线。因为在硬件和软件上分别采用了 LC 滤波、移动平均值算法滤波, 采集到的线电压和线电流信号相当平稳, 能够真实反映实际值, 为后续计算分析提供了可靠保障。由于焊机的调速系统中使用的变频器采用 $U/f=C$ (其中 U 、 f 分别为变频器输出电压和输出频率, C 为常数) 的控制方式, 因此, 驱动电机线电压的变化过程与变频器的设置有关。驱动电机启动过程中会产生一个很高的瞬时起动电流, 随后变化平稳。在恒频率的焊接过程中, 若电压保持不变, 则电流变化在一定程度上能够定性的反映驱动电机输入功

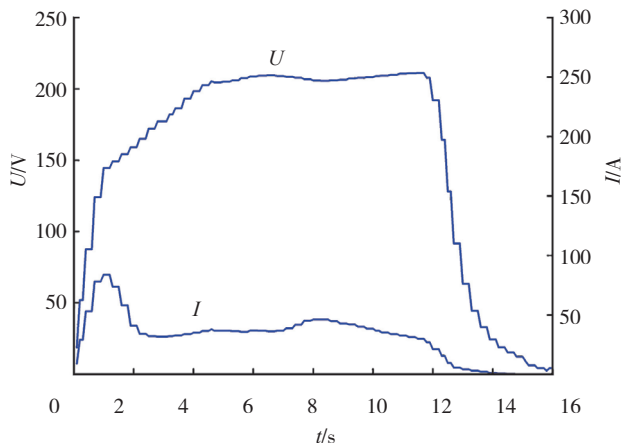


图5 驱动电机线电压和线电流变化曲线

Fig.5 Line voltage and current curves of driving motor

率的变化趋势, 但若要深入研究线性摩擦焊过程中驱动电机的能量变化过程, 还需要分析驱动电机输入功率。

2.2 驱动电机输入功率

线性摩擦焊过程中驱动电机输入功率随时间的变化曲线如图 6 所示。

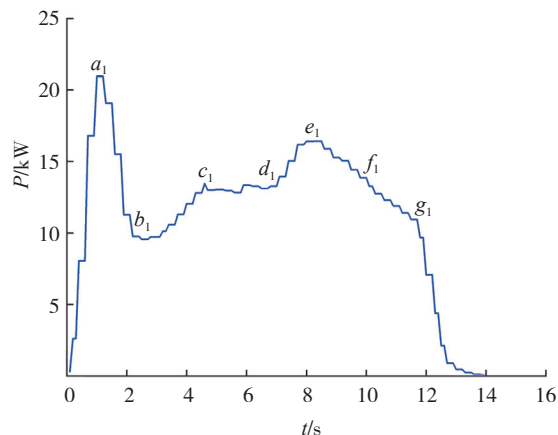


图6 电机输入功率变化曲线

Fig.6 Input power curve of driving motor

由图 6 可知, 驱动电机启动过程中, 随着线电压和线电流的同时升高输入功率急剧增大到 a_1 点随后迅速降低至 b_1 点。线电流到达 b_1 点后保持不变, 线电压继续升高, 导致电机输入功率继续增大到 c_1 点, 此后电机进入稳定工作状态(该过程两焊件并未接触摩擦)。电机稳定工作状态输入功率约 13kW, 这是由于电机具有一定负载(带动偏心轴、振动体、振动夹具和焊件运动)并且电机本身也会消耗一部分能量。随着焊件表面在 d_1 点开始接触, 焊件表面摩擦阻力不断增大, 驱动电机输入功率逐渐升高到达峰值 e_1 点(约 16kW)。此时, 焊件表面达到粘塑性状态摩擦阻力减小, 驱动电机输入功率缓慢下降。由于焊机控制程序设定从电机启动 5s 后开始计时摩擦时间(5s), 因此在 10s 处(f_1 点)焊机开始回位对中, 随着振幅逐渐降低为 0, 驱动电机输入功率也降低到 g_1 点。在 g_1 点处, 驱动电机输入功率主要用于偏心轴转动及电机自身消耗约 10kW。焊接过程中的实际摩擦时间就是从焊件表面刚刚接触摩擦的 d_1 点开始, 到振幅为 0 时的 g_1 点结束的总共约 4s。当回位对中后(g_1 点), 变频器控制驱动电机以减速制动方式停转, 输入功率陡降为 0。

在线性摩擦焊过程中, 焊接所需能量全部由驱动电机提供, 根据能量守恒和转换定律, 利用驱动电机在空载和加载时输入功率的不同, 再考虑焊机在焊接过程中能量的传递和损失, 即可计算获得焊件摩擦界面的摩擦功率。

2.3 摩擦功率

在 XMH-160 型线性摩擦焊机焊接过程中,与能量产生、传递和消耗有关的主要环节有 3 个: 驱动电机、焊机传动系统、焊件摩擦界面。驱动电机在提供焊接过程中所需能量的同时,其本身也消耗一部分能量; 焊机传动系统在传递能量的过程中也使一部分能量损失; 焊件摩擦界面通过摩擦几乎消耗了全部传递到界面上的能量,损耗很小。

当驱动电机在空载(即两焊件表面未接触)运行时,驱动电机的输入功率 P_0 为:

$$P_0 = P_a + P_b \quad (2)$$

式中: P_a 为空载时焊机传动系统损耗的功率; P_b 为空载时驱动电机内部损耗的功率。

当驱动电机在加载(即两焊件表面相互摩擦)运行时,驱动电机的输入功率 P'_0 为:

$$P'_0 = P'_a + P'_b + P_c \quad (3)$$

式中: P'_a 为加载时焊机传动系统损耗的功率; P'_b 为加载时驱动电机内部损耗的功率; P_c 为焊接界面摩擦功率。

焊机传动系统的损耗,主要受振动频率的影响。在实际的焊接过程中,驱动电机转速由变频器设定,空载和加载时变化不大,并且焊机传动损耗所占总能量消耗比例较小。因此可认为:

$$P_a = P'_a \quad (4)$$

驱动电机的内部损耗与电流大小有关,由线电流变化曲线可知,在空载和加载时驱动电机电流变化不大。因此可认为:

$$P_b = P'_b \quad (5)$$

由式(2)~(5)可知,摩擦功率 P_c 为:

$$P_c = P'_0 - P_0 \quad (6)$$

因此,将驱动电机在空载和加载时的输入功率曲线通过计算便可得到实际焊接过程的摩擦功率曲线(图 7)。

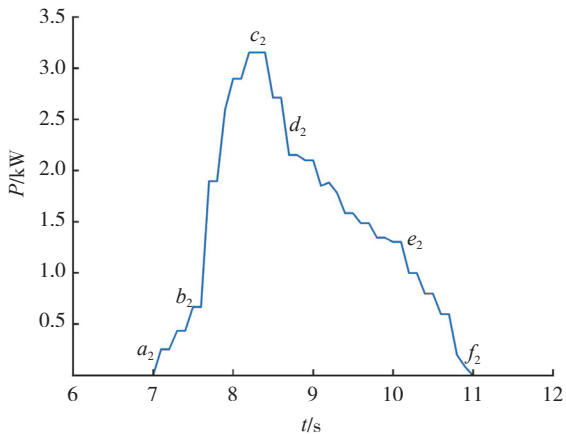


图7 摩擦功率变化曲线
Fig.7 Friction power curve

Vairis 和 Frost^[6-8],将线性摩擦焊过程分为 4 个阶段。通过摩擦功率曲线能够对这 4 个阶段有更为深入的理解。

(1) 初始阶段($a_2 \sim b_2$)。焊件在轴向压力的作用下于 a_2 点相互接触,由于焊接表面不平,在表面凸起的部分首先开始摩擦。随着焊接表面摩擦压力的增加,摩擦功率显著增大到 b_2 点。

(2) 过渡阶段($b_2 \sim c_2 \sim d_2$)。由于在初始阶段产生了足够的摩擦热量使焊接界面温度升高,金属的强度有所下降,而塑性和韧性却有很大提高;同时,焊件表面接触面积也在增大。这些因素促使摩擦功率迅速增加并到达功率峰值 c_2 点。当焊件摩擦表面的温度进一步升高时,金属的塑性增强,而强度和韧性都显著下降,摩擦功率也迅速降低到 d_2 点。过渡阶段是摩擦加热过程的一个主要阶段。功率峰值控制法就是在摩擦功率到达峰值时,延时一段时间,从而获得良好的接头质量。

(3) 稳定阶段($d_2 \sim e_2$)。此阶段从 d_2 点起,到焊机开始回位对中的 e_2 点止。在此过程中,焊接界面温度依然维持在较高水平,金属强度极低,塑性很大,摩擦功率趋于稳定。焊接界面的高温塑性状态金属相互焊合后,又被振动力矩剪断,如此周而复始,大量热塑性金属被挤出形成飞边。稳定阶段也是摩擦加热过程的一个主要阶段。

(4) 制动阶段($e_2 \sim f_2$)。当焊接界面温度和变形均达到合适值后,回位对中机构在 e_2 点开始工作,使两焊件逐渐对中,然后施加顶锻力,结束焊接。此阶段焊接振幅不断减小,导致摩擦产热减少,摩擦功率也逐渐减小到零。

从上可知,摩擦功率曲线的变化特征能够反映出线性摩擦焊过程在不同阶段的内在变化规律。因此,利用本文提出的线性摩擦焊功率曲线检测方法进一步获得其随工艺参数的变化规律,可为焊接工艺参数的选取、焊接过程及接头质量控制提供有效途径。

3 结束语

(1) 本文设计的摩擦功率曲线检测系统,其硬件、软件结构与功能是合理可行的。

(2) 检测到的摩擦功率曲线能够反映线性摩擦焊过程的工艺特征,其对深入研究线性摩擦焊机理及焊接工艺具有重要的理论意义和工程应用价值。

参考文献

[1] Nicholas E D.Linear friction welding joins noncircular sections. Advanced Materials & Processes,1991(2): 47.

(下转第 99 页)

600h 后,该轴承的使用可靠度。

(1) $[M]_{ZC} = (S_c - S_b) / 2 = \{ [0.023 - (-0.023)] + [(-0.030) - (0.076)] \} / 2 = 46 \mu\text{m}$, 因为轴承内外圈与滚动体构成了双摩擦副,所以 $[M] = \frac{1}{2} [M]_{ZC} = 23 \mu\text{m}$ 。

(2) $\delta = 0.2 [M] = 0.2 \times 23 \mu\text{m} = 4.6 \mu\text{m}$ (扩增因子取 0.2)。

$$\begin{aligned} (3) M(\mu, \sigma) &= M_0(\mu_0, \sigma_0) + M_v(\mu_v, \sigma_v) t \\ &= S \left(0.02t, \sqrt{0.8 + (0.006t)^2} \right) \mu\text{m} \\ &= S(12, 3.7094) \mu\text{m} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} (4) \beta_1 &= \frac{[M] - \delta - \mu}{\sigma} = \frac{23 - 4.6 - 12}{3.7094} = 1.7253 \\ \beta_2 &= \frac{[M] + \delta - \mu}{\sigma} = \frac{23 + 4.6 - 12}{3.7094} = 4.2055 \end{aligned}$$

根据式(12),

$$\begin{aligned} R &= \frac{1}{\beta_2 - \beta_1} \{ [\beta_2 \Phi(\beta_2) - \beta_1 \Phi(\beta_1)] \\ &+ \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \left[\exp\left(-\frac{\beta_2^2}{2}\right) - \exp\left(-\frac{\beta_1^2}{2}\right) \right] \} \end{aligned}$$

≈ 0.869 , 涡喷发动机工作 600h 后,轴承的可靠度是 86.9% 左右。

4 总结

本文主要分析了喷气发动机的涡轮转子的一些工作信息,使用环境复杂,难以用传统常规的可靠性理论分析计算可靠度。基于模糊可靠性设计理论计算的模糊可靠度要较常规可靠度更接近实际情况。这种分析计算方法可以克服常规可靠度分析计算中的不足^[8],使涡轮转子的可靠性分析与计算更为合理。本文仅讨论了涡轮转子基于时间的磨损的模糊可靠性问题,没有深入研究涡轮转子其他因素下的可靠性问题,例如实际工作中涡轮转子所具有的急剧温升变化对其结构影响的可靠性分析与计算。但文中的方法在分析其它带有模糊信息时的可靠性计算中,具有普遍适用性。

参考文献

- [1] 陶春虎,钟培道,王仁智,等.航空发动机转动部件的失效与预防.北京:国防工业出版社,1999.
- [2] 宋保维,王晓娟.系统可靠性设计与分析.西安:西北工业大学出版社,2008.
- [3] 赵鸣,刘朝英.轴颈磨损寿命的模糊可靠性计算.吉林建筑工程学院学报,2008,25(1):78-80.
- [4] 刘凤冕,王明强,何登峰,等.轴类零件的模糊可靠性设计研究.机电工程,2005,22(1):36-39.
- [5] 董玉革,王爱因,吴成龙,等.传统可靠性理论在模糊可靠性计算中的应用.农业机械学报,2007,38(2):142-145.
- [6] Ahmed H, Ferhat L, Moulod G. A new engineering method for fuzzy reliability analysis of surge control. Engineering and Applied

Sciences, 2009, 2(4): 676-682.

- [7] Guang H L, Tao T L, Li H Z. The fuzzy reliability robust design based on Matlab. Advanced Materials Research, 2012, 479: 995-1003.
- [8] Jiang Q M, Chen C H. A numerical algorithm of fuzzy reliability. Reliability Engineering & System Safety, 2003(80): 299-307.

(责编 小城)

(上接第 90 页)

应力下(800MPa 以上),母材及焊接接头的疲劳性能相近,随着载荷的下降,母材与焊接接头的疲劳性能相差越来越大,在低应力下(676MPa),焊接接头的循环次数能达到母材的 70%。

(4)母材与焊接接头断裂具有相似的形貌特征,主要以韧性断裂为主,疲劳扩展源区多发生在预腐蚀造成的蚀坑处,预腐蚀疲劳裂纹扩展源是多个,从扩展源向各个方向有明显的射线图案,可以很清楚地看见大量微坑覆盖断面。韧窝的形成是由于塑性变形使夹杂物界面上首先形成裂纹,并不断扩大,最后夹杂物之间的基体金属产生“内缩颈”,当缩颈达到一定程度后被撕裂或剪切断裂,使空洞连接,从而形成了所看到的韧窝断口形貌。

参考文献

- [1] 蒋祖国.飞机结构腐蚀疲劳.北京:航空工业出版社,1992.
- [2] 穆志韬.飞机结构的腐蚀修理及防护控制技术.飞机制造工程,1995,12(5):212-214.
- [3] 刘建华,尚海波,陶斌武,等.0Cr18Ni5 和 AF1410 高强度钢的腐蚀行为研究.材料工程,2004(8):29.
- [4] 吴冰,左从进,李晋炜,等.电子束焊 GH4169 合金高温裂纹尖端张开位移试验.焊接学报,2005,26(11):109.
- [5] Malarvizhi S, Raghukandan K, Viswanathan N. Investigations on the influence of post weld heat treatment on fatigue crack growth behaviour of electron beam welded AA2219 alloy. Int J Fatigue, 2008, 30(9):1543.

(责编 小城)

(上接第 94 页)

- [2] 陈光.一种整体叶盘的加工方法—线性摩擦焊.航空工程,1999(4):14-15.
- [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.西安交通大学学报,1998,32(6):43-46.
- [4] 王益全.电机测试技术.北京:科学出版社,2004.
- [5] 李威宣,黄建新.基于 LabVIEW 平台的通用数据采集卡的驱动方法及数据采集.电子质量,2005(7):13-16.
- [6] Vairis A, Frost M. Modeling the linear friction welding of titanium blocks. Materials Science and Engineering, 2000, A292: 8-17.
- [7] Vairis A, Frost M. High frequency linear friction welding of a titanium alloy. Wear, 1998, 217: 117-131.
- [8] Vairis A, Frost M. On the extrusion stage of linear friction welding of Ti-6Al-4V. Materials Science and Engineering, 1999, A271: 477-484.

(责编 三丰)