电子束运动轨迹偏转控制技术研究

张永和 王世伟 何 俊

(兰州空间技术物理研究所表面工程技术重点实验室,兰州730000)



摘要:对工件特定位置进行加工处理时,电子束直线运动存在可达性差或不可达的限制, 利用带电粒子在磁场中受到洛伦兹力作用后运动方向发生改变的原理,采用自制的电磁偏转 装置产生特定场强的磁场,对电子束的运动轨迹进行控制使其按照需要偏转一定半径和角 度,作用于工件的特定位置,突破局部位置电子束不可达的限制。研究结果显示,电子束圆 形束斑偏转后会发生畸变演变为椭圆形束斑,对管件内壁进行多道搭接处理可以获得可控的 过渡作用效果,满足使用要求。

关键词:电子束;不可达性;轨迹控制;电磁偏转

Study on the Electron Beam Trajectory Control Technology by Electromagnetic Deflection

Zhang Yonghe Wang Shiwei He Jun

(Science and Technology on Surface Engineering Laboratory, Lanzhou Institute of Physics, Lanzhou 730000)

Abstract: For the special position of workpiece, the electron beam linear motion is inaccessible. According to the principle, motion direction of charged particles will change after the Lorenz force in electromagnetic interaction. To break through the inaccessibility, electromagnetic deflection device was used to generate a certain size and direction of the magnetic field, and electron beam motion trajectory was controlled under a certain radius and angle while working on the specific position of workpiece. The results showed that the circular wave-spot distorted as an elliptic spot after deflection, and the requirement of the inner surface modification can be met by multichannel overlap processing.

Key words: electron beam; inaccessibility; trajectory control; electromagnetic deflection

1 引言

电子束是一种高能、高效、高质量的先进加工技 术,主要用于对位置可达性好的零部件进行焊接、表 面改性和快速制造,在航空航天、医疗器械、国防兵 器、电子仪表等行业获得了广泛应用^[1~5]。随着产品 可靠性和安全性的提高,电子束加工质量与可靠性也 越来越受到科研工作者和产品研制单位的重视^[6~8]。 如对高压气瓶穿透焊背面余高、咬边、未焊透等方面 的控制,需要达到GJB1718A—2005《电子束焊接》 中的I级焊接质量要求。由于受到空间位置的限制,无

作者简介:张永和(1981-),硕士,材料加工工程专业;研究方向:电子束加工及表面改性技术。 收稿日期:2014-07-23

法对焊缝背面进行修饰和处理,往往造成产品的报废 和研制周期的拖延。

电子枪内通常具有一套偏转线圈,根据设备特性,电子束在偏转线圈产生的磁场控制下可以产生一定角度的偏转,通常小于6°,最大偏转角度为14^{d9}。 如此小的偏移量在实际使用过程中受到工作距离、作用位置等条件的限制,几乎没有实际使用意义。

本文从实际使用角度出发,研制了一套电磁偏转 控制装置,对电子束的运动轨迹控制技术进行了探索 和研究,通过理论计算和实际试验验证了该技术的可 行性,扩展了电子束加工应用范围。

2 电子束轨迹控制原理

高速运动的电子在聚焦透镜的作用下汇聚成高 能电子束,对电子束的运动轨迹进行控制实际上就是 对电子运动轨迹的控制。当高速运动的电子沿一定角 度进入磁场时,必然会受到洛伦兹力的作用,并发生 偏转。图1所示为电子垂直入射到长度为 *l* 的均匀磁 场后的运动情况。



图1 垂直入射电子在均匀磁场中的运动

图中磁力线垂直穿出纸面,当电子(束)以速度 v进入磁场时,受到的洛伦兹力 F 可用式(1)表示:

$$F = qvB\sin\theta = qv\frac{\mu_0 NI}{l_0}\sin\theta \tag{1}$$

式中: *q*——电子电荷; *ν*——电子运动速度; *B* ——磁感强度; *θ*——速度*ν*与磁感强度*B*夹角; *N*—— 线圈匝数; *I*——线圈励磁电流; μ₀——真空磁导率; *l*₀——线圈磁路长度。

由于洛伦兹力始终垂直于电荷的运动方向,电子 (束)在将作圆周运动,洛伦兹力 *F* 提供向心力, 即:

$$F = \frac{mv^2}{R} \tag{2}$$

由式(1)和式(2)可得:

$$R = \frac{mvl_0}{q\mu_0 NI\sin\theta}$$
(3)

由前述可知,电子在均匀磁场中的运动轨迹是一 个半径为 R 的圆周运动。当电子的运动速度v(由加 速电压V决定)、线圈结构参数 N、l₀ 固定的情况下, 电子束的偏转半径与励磁电流大小成反比。当电子离 开该磁场区域时,将沿圆周运动切线方向作直线运 动,直至到达目标靶材表面。

因此,在离开电子枪的束流电子路径上增设一套 偏转装置,形成X方向或Y方向偏转磁场,根据式(3) 控制电子束的偏转半径,实现磁场控制下的非接触控 制,从而满足空间受限位置的特殊修饰和处理需要。

3 电子束轨迹控制模拟仿真

麦克斯韦方程、高斯定律和安培环路定律是进行 静磁场计算的基本定律,所有磁路计算和模拟都是以 上述方程和定律为基础开展的。

3.1 计算模型

磁场结构采用如图2所示的带铁轭和极头的双向 二极磁铁结构,利用Opera-3D电磁场有限元计算软件 建立物理模型,在X、Y方向设置偏转线圈,产生二维 平面偏转磁场。装置中间的气隙空间为50×50mm。 电子束从气隙上方垂直进入磁场空间。



图2 电子束偏转装置物理模型

在网格离散化处理过程中,根据研究需要设定了 不同网格划分方式和网格大小。磁路求解过程中,采 用静磁场求解器TOSCA进行磁场求解。由于铁磁材料 的存在,该问题为非线性问题,通过多次非线性迭代 求解,最终达到收敛。

3.2 电子束运动轨迹仿真



图3 电子束在漏磁作用下发生偏转

图3给出了气隙中心磁场强度为2000Gs时,加速

电压为30kV的电子束在该装置作用下的运动路径的 偏转情况。从图中可以看出,电子束在磁场中心位置 的上方,由于漏磁的存在,电子束在未进入工作区域 的气隙中间时就已经发生了偏转现象。由于漏磁场为 非均匀磁场,其大小与磁场结构和励磁参数有很大的 关系,精确确定非常困难,因此,需要对漏磁进行屏 蔽,使电子束尽可能在气隙中心匀强磁场作用下进行 控制和偏转。

为了消除漏场的影响,防止电子束过早偏转,在 磁体气隙上方加入屏蔽管,屏蔽管末端位于气隙磁场 中心,使电子束在磁体中心位置时受到匀强磁场作用 发生偏转。根据电子束加工的确切位置,通过调整励 磁电流和磁屏蔽管在磁场气隙中间的位置,使电子束 离开磁屏蔽管后刚好能够作用在被加工位置,实现常 规方法无法进行修饰和处理部位的加工。

4 电子束轨迹控制试验

4.1 试验设备与材料

实验主要针对环形零件内表面进行修饰和改性 处理,验证电子束在自研磁偏转装置作用下的束斑演 变和轨迹控制情况。

试验焊接设备为LARA52型真空电子束设备,自研双向二极磁铁装置如图4所示,利用配套的控制系统对励磁电流和磁感应强度进行控制。



图4 电磁偏转设备

试验材料选择TC4钛合金,束斑畸变试验用管状 试件内径为Φ10mm,外径为Φ12mm;内壁处理试验 用管状试件内径为Φ40mm,外径为Φ44mm。

4.2 试验参数与结果

采用表1所示的试验规范对管状零件内表面进行 轨迹控制试验。图5给出了利用上述规范在不同励磁 电流作用下的束斑畸变情况。

表1 电子束轨迹控制试验参数规范

加速电压	束流	聚焦电流	束斑波形	束斑直径
/kV	/mA	/mA		/mm
50	20	2700	0	8



图5 电子束束斑畸变试验结果

从图中可以看出,电子束束斑经上述参数作用后 能够完全偏转并作用在管状零件内壁。且不同励磁电 流对束斑波形的影响不同,随着电流的增大,束斑波 形逐渐由圆形畸变为椭圆形,电流进一步增大,畸变 椭圆形长短轴发生变化,且束斑作用位置逐渐上移。

励磁电流为700mA时采用表1规范进行Φ40mm的 管件内壁处理试验,图6给出了内壁处理结果。



图6 管件内壁偏转处理结果

从图中可以看出,在管状零件内壁进行偏转控制 下的多道搭接处理,可以实现电子束无法直接作用位 置的选择处理,拓展电子束的可达性,且搭接处理区 域过度效果可控,能够满足工业应用需要。

5 结束语

a. 利用电磁偏转装置对电子束的运动轨迹进行 控制是可行的,偏转半径可通过调整偏转装置的励磁 电流进行控制;

b. 磁偏转装置的漏磁对电子束轨迹影响很大,需要尽可能加强装置的磁屏蔽效果,利用分布均匀的中 (下转第72页)