

电子束熔覆改性技术扫描波形设计

于斌 靳庆臣 刘志栋 何俊 程彬

(兰州空间技术物理研究所,兰州 730000)

文 摘 根据电子束扫描特性,设计电子束熔覆改性试验所用波形,利用该波形进行钛合金表面熔凝和硅化物涂层重熔试验,研究了扫描波形对电子束单道熔覆能量输入均匀性的影响。结果表明,电子束熔覆过程中熔池表面温度场均匀性是扫描波形、电子束束斑品质、扫描频率和工艺参数综合影响的结果,所设计波形可用于电子束熔覆表面改性技术,改性层厚度均匀一致,扫描波形是影响电子束熔覆过程中熔池表面温度场均匀性的关键因素。

关键词 电子束重熔,扫描波形,表面熔凝,能量分布,温度场,熔化深度

Scanning Figure Design of Electron Beam Cladding Modification Technique

Yu Bin Jin Qingchen Liu Zhidong He Jun Cheng Bin

(Lanzhou Institute of Physics, Lanzhou 730000)

Abstract The scanning figure was designed in terms of the electron beam (EB) characteristics. Titanium alloy and silicate coating were fabricated by electron beam irradiation with this figure, the effect of scanning figure on energy input uniformity was studied. The temperature field uniformity of the melting point was synthetically influenced by EB scanning figure, EB quality, EB scanning frequency and EB parameter. This scanning figure was suitable for EB cladding process. EB scanning figure is a pivotal factor affecting the temperature field of the re-melting surface in the process of EB modification.

Key words Electron beam re-melting, Electron beam scanning figure, Surface melting and solidification, Power distribution, Temperature field, Melting depth

0 前言

近年来电子束表面改性技术在涂层熔覆、涂层重熔及表面强化等技术领域已进行了大量的研究并取得了一定的成果和应用。电子束表面改性技术首先要解决能量输入均匀性问题,电子束束斑能量是按高斯分布的,通过电子束直接作用不能满足材料表面热输入均匀的要求,而通过合理设计电子束扫描波形,使电子束按照扫描波形在一定区域进行高频摆动,在此波形范围内产生均匀能量输入,从而达到材料表面热输入的均匀一致性。

国内外关于电子束扫描波形对电子束表面温度场均匀性的研究取得了一定的进展,Rykalin 指出电

子束散焦或聚焦状态下电子束与材料的作用都具有不同的特性,并能对材料产生不同的物理影响和物理化学反应。Bahr 和 Hoffmann 等人开发了一套电子束扫描控制系统(ESCOSYS)指出通过改变扫描波形的曲线轨迹,在波形范围内可以得到不同的能量分布^[1]。Knyazeva 指出扫描模式对电子束表面处理有重要影响,且电子束扫描频率大于 50 Hz 时在波形范围内产生的热输入等同于一个有效热源。不锈钢薄板电子束扫描加热温度场模拟研究表明,当电子束扫描频率高于 50 Hz 时,不锈钢薄板的温度场分布趋于稳定^[2]。电子束钎焊温度场模拟研究表明,电子束扫描频率足够高时,可以认为在一定时间内,电子

收稿日期:2009-08-31

作者简介:于斌,1983 年出生,硕士,主要从事电子束表面改性技术研究。E-mail: betteryb@163.com

束扫描加热忽略移动造成的加热先后,而是按照一定的扫描带进行加热^[3]。扫描线圈的频率特性研究表明,系统对正弦信号的频率至少在 500 Hz 以上时,平面加热才可以认为是面热源,此时所获得温度场的温度起伏较小,当扫描的频率达到 1 kHz 时几乎可以认为没有温度的波动^[4]。电子束冷床熔炼参数对熔池表面温度的研究表明,电子束扫描方式和频率是影响熔池表面温度均匀性非常重要的参数,扫描方式一定时,增加电子束的扫描频率,可以保证熔池表面温度的均匀性^[5]。

扫描线圈较好的频率特性可以满足大面积加热时能够获得较为均匀的温度场,而扫描波形是影响电子束波形范围内能量输入均匀性的关键因素。为使电子束熔覆过程中满足波形范围内的能量输入均匀的要求,本文对电子束扫描波形的设计进行了研究。

1 波形设计

1.1 扫描波形对电子束熔覆工艺的影响

电子束扫描波形直接影响电子束熔覆表面熔池的温度场,从而直接影响熔体的黏度、密度和合金元素的扩散系数,影响重熔层组织结构的均匀性、重熔层表面平整度及熔化不均导致气孔或裂纹的产生。扫描波形对于电子束波形范围内能量输入均匀性是一个关键工艺参数,图 1 为涂层电子束重熔原理示意图。

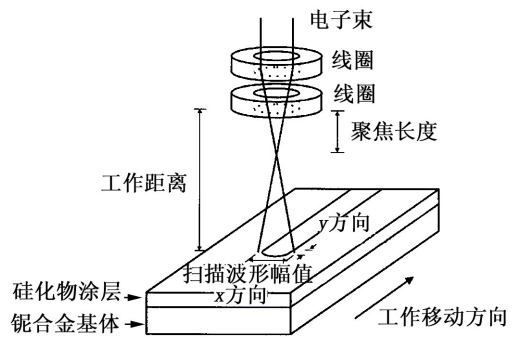


图 1 涂层电子束重熔原理示意图

Fig. 1 Fabrication procedures of coating re-melting by electron beam technique

1.2 电子束扫描

通过电磁场的控制实现电子束的偏转扫描,电子束几乎没有质量和惯性,可以实现非接触偏转和极高的频率摆动。电子束的扫描方式主要是点、线或面扫描。电子束熔覆技术多采用线或面扫描,即通过电子束匀速扫过封闭曲线或构成面区域进行加热,如图 2 所示。

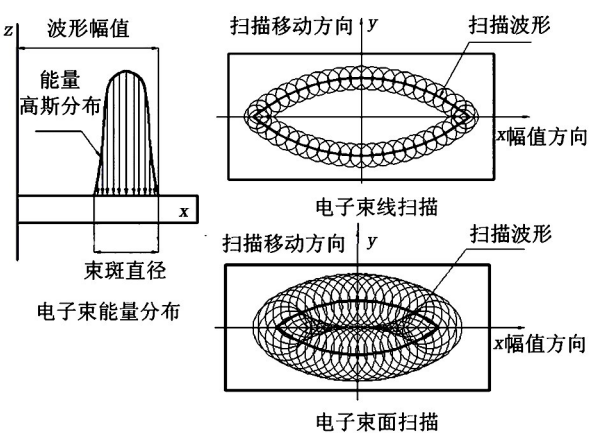


图 2 电子束扫描波形示意图

Fig. 2 Scheme of electron Beam scanning figure

1.3 电子束扫描波形设计

采用连续电子束焊接设备,扫描方式采用连续线扫描或连续面扫描。波形设计包括扫描波形幅值、扫描方式、束斑直径、扫描轨迹。

1.3.1 扫描波形幅值

扫描波形幅值确定主要考虑工件单道熔覆实际宽度和表面熔池温度场均匀性两个因素,幅值如图 3 中 AC 之间距离。研究表明,扫描幅值增加,电子束改性重熔层熔池表面温度起伏降低,有利于提高熔池表面温度场的均匀性,该扫描波形应用于星用发动机推力室钕合金硅化物涂层改性,根据实际工件尺寸及温度场的均匀性考虑本次扫描波形幅值在 8 ~ 11 mm。

1.3.2 扫描方式

电子束扫描方式是束斑直径与扫描波形幅值及波形轨迹形状综合作用的结果,其决定了线或面的扫描方式。研究表明,束斑直径增加,有利于扫描过程中波形范围内温度场均匀性^[6],但应用面扫描进行单道电子束熔覆处理后,硅化物涂层重熔层厚度中间比两侧大,可能由于面扫描时在波形中间束斑叠加较严重,能量输入较多,导致电子束熔化深度增加。通过试验验证,取束斑直径为 2 ~ 4 mm 时,波形范围内能量输入均匀,采用线扫描方式。

1.3.3 扫描轨迹

1.3.3.1 扫描轨迹的表征

电子束扫描轨迹采用二维曲线来描述,在直角坐标系中建立电子束扫描轨迹的参数方程,对其坐标分量函数式进行离散化处理,将连续扫描轨迹用离散数据点来表示^[7]。实际波形设计中,采用多条曲线拟合构成扫描波形。

1.3.3.2 扫描波形范围内能量控制

表 2 电子束扫描波形参数

Tab. 2 Parameter of electron beam scanning figure

电压/kV	电流/mA	熔覆速率/mm · s ⁻¹	频率/Hz
30	9	5	200

电子束的能量密度分布直接影响熔池表面温度场,能量分布取决于电子束束流大小,扫描轨迹形状、尺寸,扫描频率及加热时间等因素^[7]。

1.3.3.3 电子束表面改性扫描波形设计

电子束扫描波形对能量输入均匀性有很大的影响,在实验摸索过程中,通过改变闭合扫描波形的轨迹,扫描波形范围内温度场也随之改变。研究表明在单道熔覆过程中,通过调整波形闭合轨迹中上轨迹和下轨迹的曲线曲率,可以得到较为理想的结果。综上所述,按下要求设计波形:(1)扫描波形左右对称;(2)扫描波形由光滑曲线构成;(3)扫描波形上轨迹和下轨迹曲率相近,即包含的离散化数据点相近;(4)扫描波形中不出现尖锐拐点;(5)扫描波形高频扫描时无畸变现象;(6)保证单道熔覆区间电子束能量输入均匀。

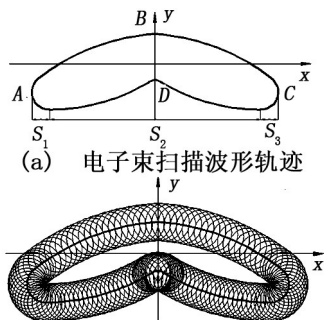
1.4 设计结果

波形参数见表 1,电子束扫描波形见图 3。

表 1 电子束扫描波形参数

Tab. 1 Parameter of electron beam scanning figure

波形幅值/mm	束斑直径/mm	扫描方式	扫描波形轨迹
8 ~ 11	2 ~ 4	线扫描	见图 3



(b) 电子束扫描波形等效热源形状

图 3 扫描波形轨迹

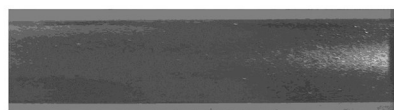
Fig. 3 Electron Beam scanning figure

2 实验

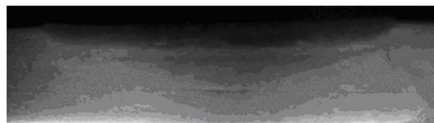
熔覆试样为 Ti-6Al-4V 合金 4 mm 厚热轧板材和钕合金硅化物涂层,采用图 3 波形对钛合金和硅化物涂层进行表面熔凝,钛合金和硅化物涂层表面熔凝试样分别定为“ α ”和“ β ”试样。 α 和 β 试样电子束表面改性实验在法国 TECHMETA 公司生产的 6 kW 电子束焊机上进行,工艺参数见表 2。沿电子束扫描垂直方向切取试样,使用 Kroll 溶液(100 mLH₂O+10 mLHNO₃+5 mLHF)对试样进行腐蚀,采用 OLYMPUS PMG3 光学显微镜(OM)对 α 试样截面宏观熔凝层熔化均匀性进行分析,扫描电镜 SEM 对 β 试样重熔层熔化均匀性进行分析。

3 实验结果

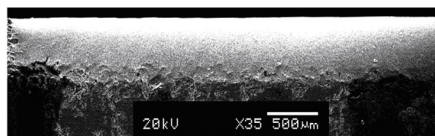
钛合金、硅化物涂层重熔后形貌见图 4。



(a) 钛合金表面熔凝层表面形貌



(b) 钛合金表面熔凝层截面形貌



(c) 硅化物涂层电子束重熔截面形貌

图 4 钛合金、硅化物涂层重熔后形貌

Fig. 4 Morphology of titanium and silicate coating after EB treatment

图 5 和图 6 分别为硅化物涂层电子束重熔表面和截面形貌。

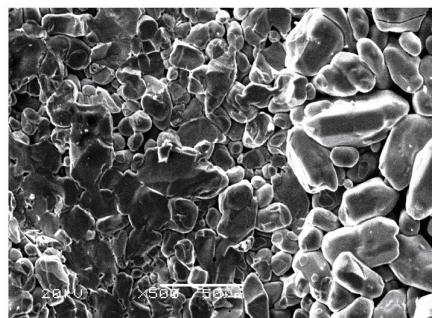


图 5 硅化物涂层电子束重熔表面形貌

Fig. 5 Surface of re-melting silicate coating fabricated by electron-beam irradiation



图 6 硅化物涂层电子束重熔截面形貌

Fig. 6 Cross section of re-melting silicate coating fabricated by electron-beam irradiation

4 分析与讨论

电子束表面熔凝层是电子束快速加热、快速凝固的结果。电子束扫描对试样的加热和冷却相当迅速,冷基体对改性层的自冷却作用,导致熔凝层很薄且热影响区较小。由图 4(a)可知,钛合金表面熔凝层较平坦,没有因能量分布不均导致熔化深度不均而在表面产生沟壑现象。图 4(b)中在扫描波形范围内熔凝层厚度基本一致,电子束表面熔凝钛合金能量输入在波形范围内较均匀。图 4(c)重熔层厚度均匀,电子束在波形范围内熔化深度具有一定的均匀性。

图 5 右侧和左侧分别为原硅化物涂层表面形貌和重熔涂层表面形貌,电子束重熔快速熔化和凝固过程导致涂层表面晶粒粒径降低,电子束重熔增强了硅化物金属陶瓷涂层的烧结作用,涂层表面大晶粒被电子束打碎熔化,凝结为小颗粒并烧结在一起,有助于增强涂层致密度。由于涂层表面凸起颗粒熔化填补孔隙,高频扫描电子束在波形范围内等同于一个等效热源,涂层在电子束加热熔化情况下,经过电子束扫描搅拌涂层表面熔池,使涂层表面熔化金属流向孔隙的倾向增强,从而使涂层更致密,孔隙率降低。表面凸起陶瓷颗粒首先被熔化而凝固为细小颗粒,熔化金属由于重力作用填补颗粒之间的孔隙,使得凸起颗粒消除和凹陷部位生长,有助于表面粗糙度降低;由于电子束的高频扫描,在扫描波形范围内能量输入均匀,表面熔池各区域熔化温度相近,熔池液态金属黏度相近,金属元素扩散均匀,凝固后组织结构均匀,表面平坦;电子束在波形范围内高频扫描相当于对涂层表面熔池的搅拌作用,提高了涂层表面熔池的流动性,液态金属流向凹陷部位的能力增强,有助于提高涂层表面平整度。图 5 中试样重熔涂层和原涂层界限分明,说明电子束能量密度较高,电子束作用下硅化物涂层快速重熔凝固,在波形之外热影响区范围小,有利于控制涂层质量。

图 6 中 A1 和 B1 为的原硅化物涂层截面,A2 和 B2 为重熔涂层。由 A1 和 A2 可以看出,原涂层表面平整度较高,且涂层均匀性较好,厚度基本一致,涂层和基体具有一定的冶金结合。由 A2 和 B2 可以看

出,经过电子束重熔处理,硅化物涂层厚度减薄,涂层和基体的冶金结合增强,电子束重熔增强了涂层和基体的冶金结合,由于涂层受电子束加热而进行二次烧结,增加了涂层的致密度,提高了涂层的抗氧化性能。经过重熔处理后,涂层的表面粗糙度降低,说明电子束波形范围内能量输入具有一定的均匀性,涂层单道重熔后熔覆区域内电子束热输入基本一致,达到了熔化深度均匀性的要求^[8]。

5 结论

(1) 电子束熔覆过程中熔池表面均匀温度场是电子束束流、扫描波形、扫描频率及加热时间综合影响的结果。

(2) 通过合理设计扫描波形,电子束熔覆过程中试样表面温度场较均匀,该扫描波形可用于钛合金硅化物涂层电子束表面改性工艺。

(3) 涂层电子束重熔能量输入均匀性是影响重熔涂层性能和质量的关键因素。

参考文献

- [1] Bahr M, Hoffmann G, Ludwig R, et al. New scan and control system (EXCOSYS) for high power electron beam techniques[J]. Surface and Coatings Technology, 1998 (98): 1211-1220
- [2] 李少青, 芦凤桂, 唐新华, 等. 电子束扫描加热温度场的有限元分析[J]. 航空制造技术, 2006, 48 (5): 79-82
- [3] 黄哲赞, 项明, 梁智. 真空电子束钎焊温度场数值模拟[J]. 宇航材料工艺, 2004, 34(6): 53-57
- [4] 郭光耀, 刘方军, 韩瑞清. 电子束扫描控制系统[J]. 焊接学报, 2003, 24(1): 91-93
- [5] 韩明臣, 周义刚, 赵铁夫. 等. 电子束冷床熔炼参数对熔池表面温度的影响[J]. 稀有金属, 2006, 30(专辑): 55-59
- [6] 梁智, 张毓新, 芦凤桂, 等. 不锈钢毛细管管板接头真空电子束钎焊温度场模拟[J]. 航空制造技术, 2004, 47(9): 62-64
- [7] 李少青, 梁智, 芦凤桂. 等. 扫描电子束钎焊温度场数值分析[J]. 机械工程材料, 2006, 30(1): 26-29
- [8] 何俊, 于斌, 张涛. 等. 预置涂层电子束熔覆改性技术研究[J]. 航天制造技术, 2008, 25(6): 1-5

(编辑 任涛)