

# 扫描电子束能量峰值对表面温度场的影响规律

李新凯<sup>1</sup>, 王荣<sup>1</sup>, 胡露瑶<sup>2</sup>, 任旭隆<sup>1</sup>, 王喜社<sup>1</sup>

(1. 桂林电子科技大学, 广西 桂林 541004; 2. 桂林旅游学院, 广西 桂林 541004)

**摘要:** **目的** 明确扫描电子束环状下束方式下能量分布数学模型以及能量峰值系数对 45 钢表面温度场的影响规律。**方法** 基于高斯热源模型, 引入能量峰值位置参数, 演算扫描电子束环状下束方式下能量分布的数学模型, 利用 COMSOL 软件, 模拟扫描带热循环曲线与温度场。**结果** 针对环状下束方式下电子束热源模型进行修订, 电子束能量分布沿中心线对称分布, 表层能量分布与偏转角度和能量峰值参数相关, 能量峰值参数在 0~1 内, 数值越大  $c$  点第一、二能量峰值及其差值越大, 扫描带纵向点温差越小, 热循环曲线间距越小; 电子束下束与收束阶段, 束斑温度变化较大, 而扫描中期温度较为稳定, 能量峰值参数越大, 45 钢表层高温区域半径越大, 最高温度也有所增加; 45 钢经不同能量峰值系数作用后, 扫描带与亚高温带区域的宽度有所不同。**结论** 能量峰值参数对环状电子束能量分布有较大影响,  $\xi=1$  时束斑在表层能量梯度最小, 有利于大面域电子束表面改性下的能量均匀分布。

**关键词:** 扫描电子束; 能量; 温度场; 热源; 表面改性

**中图分类号:** V261.6 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-3660(2022)07-0306-08

**DOI:** 10.16490/j.cnki.issn.1001-3660.2022.07.030

## The Influence of the Peak Energy of Scanning Electron Beam on the Surface Temperature Field

LI Xin-kai<sup>1</sup>, WANG Rong<sup>1</sup>, HU Lu-yao<sup>2</sup>, REN Xu-long<sup>1</sup>, WANG Xi-she<sup>1</sup>

(1. Guilin University of Electronic Technology, Guangxi Guilin 541004, China;

2. Guilin Tourism University, Guangxi Guilin 541004, China)

**ABSTRACT:** The mathematical model of energy distribution in the circular downward beam mode of scanning electron beams is clearly defined. Obtain the influence law of energy crest factor on the surface temperature field of 45 steel. Based on the Gaussian heat source model, the energy peak position parameter is introduced to calculate the mathematical model of the energy distribution in the scanning electron beam downward beam mode. The COMSOL software was used to simulate the thermal cycle curve and temperature field of the scanning zone. Revised the electron beam heat source model in the ring-shaped

收稿日期: 2021-04-02; 修订日期: 2021-11-20

**Received:** 2021-04-02; **Revised:** 2021-11-20

**基金项目:** 广西自然科学基金项目 (2020GXNSFBA297079, 2022GXNSFAA035585); 国家自然科学基金资助项目 (52165057, 51665009); 桂林市重点研发计划 (20211B032068)

**Fund:** Guangxi Natural Science Foundation Project (2020GXNSFBA297079, 2022GXNSFAA035585); National Natural Science Foundation of China (52165057, 51665009); Guilin City Key Research and Development Plan (20211B032068)

**作者简介:** 李新凯 (1993—), 男, 博士研究生, 主要研究方向为电子束表面改性。

**Biography:** LI Xin-kai (1993-), Male, Ph. D. candidate, Research focus: electron beam surface modification.

**通讯作者:** 王喜社 (1966—), 女, 高级实验师, 主要研究方向为数控加工与工艺优化。

**Corresponding author:** WANG Xi-she (1966-), Female, Senior experimenter, Research focus: CNC machining and process optimization.

**引文格式:** 李新凯, 王荣, 胡露瑶, 等. 扫描电子束能量峰值对表面温度场的影响规律[J]. 表面技术, 2022, 51(7): 306-313.

LI Xin-kai, WANG Rong, HU Lu-yao, et al. The Influence of the Peak Energy of Scanning Electron Beam on the Surface Temperature Field[J]. Surface Technology, 2022, 51(7): 306-313.

downward beam mode. The results show that the electron beam energy distribution was symmetrically distributed along the center line. The surface energy distribution was related to the deflection angle and the energy peak parameter. When the energy peak parameter was within 0 to 1, the value becomes higher and higher, the larger the first and second energy peaks at point  $c$ , the larger the difference between the two. When the parameter was 0, the maximum temperature difference at the sampling point was 1 065 K. The smaller the temperature difference between the longitudinal points of the scanning belt, the smaller the distance between the thermal cycle curves. At the same time, it can be seen from the heat source model that the energy peak has a greater impact on the beam diameter of the ring electron beam, and the maximum ring diameter can be up to 8 mm under the selected basic parameters. When the parameter was 1, the temperature curves of the sampling points are the closest, which indicates that the surface heat distribution under this parameter was uniform. It can be seen from the temperature field simulation diagram that the beam spot temperature varies greatly during the down and converging phases of the electron beam, while the temperature in the middle of the scan was relatively stable, and the temperature difference was basically stable within 20 K. The larger the energy peak parameter, the larger the radius of the high temperature area on the surface of 45 steel, and the maximum temperature will increase accordingly. After 45 steel was subjected to different energy peak coefficients, the width of the scanning zone and the sub-high temperature zone were different. Finally, based on the simulation parameters, the scanning electron beam micro-melting polishing experiment was carried out. It was found that the surface roughness of 45 steel was reduced under this scanning mode, and the surface showed a bright white scanning area relative to the substrate. The scanning area width increased with the increase of the energy peak parameter. This was in full agreement with the simulation results. The surface roughness after scanning electron beam treatment was as low as  $0.36\text{ }\mu\text{m}$  relative to the substrate. In the end, the following conclusion can be drawn that the energy peak parameter has a great influence on the energy distribution of the ring electron beam. When  $\xi = 1$ , the energy gradient of each position on the surface of the scanning area was the smallest, which was beneficial to the uniform energy distribution under the surface modification of the large area electron beam.

**KEY WORDS:** scanning electron beams; energy; temperature field; heat source; surface modification

近年来,电子束以其非接触、可控性强、真空无污染、能量利用率高等优点而广泛应用于材料表面改性领域中<sup>[1-2]</sup>。常见的电子束表面处理技术包括电子束表面合金化、表面淬火、表面非晶态、表面熔凝等,以上电子束技术均是对金属材料表层进行处理,需实现电子束大面域、均匀、稳定下束<sup>[3-4]</sup>。

目前,国内外学者已对强流脉冲电子束与大面域辐照两种电子束表面改性加工方法进行了深入研究,主要考察电子束类型<sup>[5]</sup>及工艺参数<sup>[6]</sup>、电子束能量分布规律<sup>[7]</sup>以及表面改性优化方法<sup>[8]</sup>等方面。研究发现脉冲电子束能量密度较大,适用于处理高熔点、大深宽比金属表面改性,但处理过程中表层金属会发生溅射产生“熔坑”缺陷,同时高能作用下表层经历骤热急冷过程,易造成内应力与组织应力集中,产生结构裂纹缺陷<sup>[9-11]</sup>。大面积电子束辐照是通过电子束散焦的方式实现最大面积为 60 mm 范围的改性,因下束面积大所以更适用于表面微熔处理,然而该方式对电子枪功率要求较高,较难实现电子束能量的均匀分布<sup>[12]</sup>。本团队在此基础上,针对电子束表面微熔处理能量密度均匀且稳定分布的需求,开发了一种新型连续扫描电子束技术(Continuous Scanning Electron Beam Technique Process, CSEBP),通过聚焦线圈与偏转线圈共同作用,实现电子束聚焦的同时以高频率旋转实现环状下束效果<sup>[13-15]</sup>。研究发现环状扫描下束

下电子枪无需高功率即可实现较高能量密度的均匀分布。另外,CSEBP 能量密度分布除了受到电子束束流以及加速电压等电子枪参数影响外,还受到能量分布特征参数影响。因此,有必要对电子束下束过程中能量分布规律进行探索,以指导 CSEBP 在表面改性领域的应用。

本文以 45 钢为电子束表面改性为研究对象,通过数值求解、仿真计算与试验验证相结合的方式探究能量峰值系数对电子束能量分布的影响规律,详细探讨了多种峰值系数下 45 钢表层温度的变化规律,并通过电子束微熔试验进行验证,力图为电子束大面域扫描提供新的方法和理论依据。

## 1 扫描电子束微熔处理数学物理模型的建立

### 1.1 CSEBP 下束方式原理

本课题组自主研发的扫描电子束下束方式如图 1 所示,其中, $v$  为工件移动速度, $r$  为扫描带半径, $l$  为扫描长度,扫描带纵向 5 个均分点为后续热循环曲线仿真取样点。其原理是将编辑好的电子束扫描轨迹及运动方式的控制程序输入信号发生器,用方程  $x^2+y^2=r^2$  来描述圆形的电子束扫描轨迹,其中  $x$ 、 $y$  方

向的分量分别为  $x=r\cos t$ ,  $y=r\sin t$  ( $0 \leq t \leq \pi$ ), 通过所产生的偏转磁场实现电子枪内部束流沿固定角度倾斜与高频旋转, 从而实现环状扫描电子束轨迹。

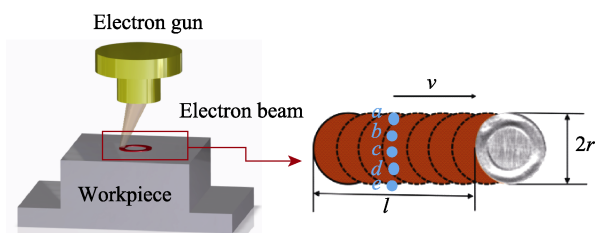


图1 连续扫描电子束 (CSEBP) 示意图  
Fig.1 Schematic diagram of continuous scanning electron beam process (CSEBP)

## 1.2 环状下束电子束能量分布数学模型

环状电子束热源与常用的高斯热源、双椭球热源有较大不同, 其作用形式为高斯热源在环形区域的叠加。为此以高斯热源为基础搭建环状电子束能量密度函数, 如图2和图3所示。

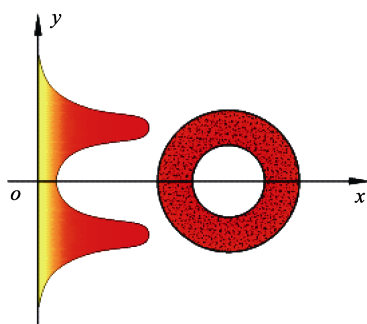


图2 电子束能量密度分布图  
Fig.2 Electron beam energy density distribution

设表面中心  $r$  处的热流密度  $Q(r)$  为:

$$Q(r) = Q_m \exp(-\eta r^2) \quad (1)$$

式中:  $Q$  为任意一点的热流密度 (W);  $Q_m$  为最大热流密度 ( $\text{W}/\text{m}^2$ );  $r$  为任意一点到加热中心的距离 (m);  $\eta$  为热源集中系数。

扫描电子束微熔处理时在扫描面的功率为:

$$Q = \int Q(r) ds = \int_0^\infty Q_m \exp(-\eta r^2) 2\pi r dr = \frac{Q_m \pi}{\eta} \quad (2)$$

由式 (2) 得:

$$Q_m = \frac{\eta Q}{\pi} \quad (3)$$

将式 (3) 代入 (1) 得:

$$Q(r) = \frac{\eta Q}{\pi} \exp(-\eta r^2) \quad (4)$$

通常情况下扫描电子束处理时, 一般取 95% 的有效能量范围<sup>[18]</sup>。

$$0.95Q = \int_0^{r_0} \frac{\eta Q}{\pi} \exp(-\eta r^2) 2\pi r dr \quad (5)$$

由此可得:

$$\eta = \frac{3}{r_0^2} \quad (6)$$

因电子束作用过程中, 束斑内能量峰值可调, 为此引入能量峰值位置参数, 综合以上计算可将扫描电子束能量分布数学模型表征为:

$$Q_{(x,y,z)} = \frac{3Q}{\pi(R_x^2 - r_x^2)} \exp\left(-\frac{3(\sqrt{x^2 + y^2} - r_p)^2}{(R_x - r_x)^2}\right) \quad (7)$$

其中,  $R_x = z \tan \theta + R_0$ ,  $r_x = z \tan \theta$ ,  $r_p = z \tan \theta + \xi R_0$ , 将以上公式代入式 (7) 可得:

$$Q_{(x,y,z)} = \frac{3Q}{\pi(R_0^2 + 2R_0 z \tan \theta)} \exp\left\{-\frac{3\left[\sqrt{x^2 + y^2} - (z \tan \theta + \xi R_0)\right]^2}{R_0^2}\right\} \quad (8)$$

式中:  $R_x$  为电子束下束环外径 (mm);  $R_p$  为电子束能量峰值位置距离  $z$  轴的距离 (mm);  $r_x$  为圆环内径 (mm);  $\theta$  为束流偏转角 ( $^\circ$ );  $\xi$  为能量峰位置系数,  $\xi \in [0, 1]$ ;  $z$  为离焦量 (mm),  $R_0$  为束斑宽度 (mm)。

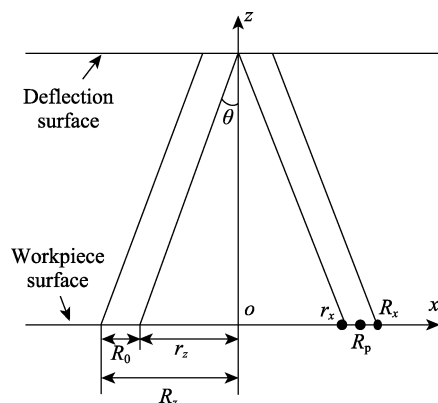


图3 环状下束示意图  
Fig.3 Schematic diagram of loop down beam

## 1.3 能量峰值对电子束热源模型的影响

根据式 (8) 可以看出, 扫描电子束的能量分布与偏转角度和能量峰值系数相关, 针对不同  $\theta$  和  $\xi$  进行计算与数值模拟, 其中电子束工艺参数  $z=230 \text{ mm}$ ,  $R_z=3 \text{ mm}$ ,  $\theta=5^\circ$ , 电子束能量分布如图4所示。

1)  $\theta=0$ ,  $\xi=0$  (即  $R_p=0$ )。扫描中心位于焦点位置, 此时束斑呈圆形且无光区域面积为 0, 该模型为典型高斯热源, 电子束束斑直径为 4 mm, 在电子束能量的集中作用下, 最大热流密度高达可达  $6.8 \times 10^7 \text{ W}/\text{m}^2$ 。

2)  $\theta \neq 0$ ,  $\xi=0$  (即  $R_p=z \tan \theta$ )。电子束能量峰值位于环形束流内径圆周上 (白色虚线标注), 环形电子束束斑区域内呈向外的高斯分布。

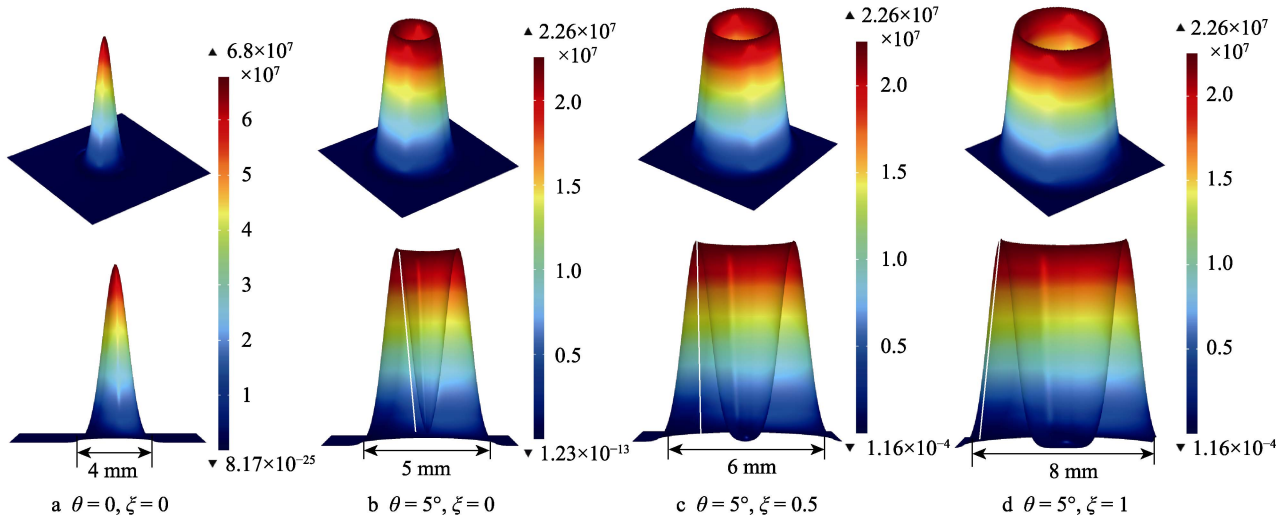


图 4 不同入射角度和能量峰值系数下的电子束能量分布模拟图

Fig.4 Simulation diagram of electron beam energy distribution under different incident angles and peak energy coefficients

3)  $\theta \neq 0$ ,  $\xi = 0.5$  (即  $R_p = \frac{R_0 + z \tan \theta}{2}$ )。电子束能量峰值位于环形束流中心位置 (白色虚线标注), 环形电子束束斑区域内呈高斯能量分布。

4)  $\theta \neq 0$ ,  $\xi = 1$  (即  $R_p = R_0 + z \tan \theta$ )。电子束能量峰值位于环形束流外径圆周上 (白色虚线标注), 环形电子束束斑区域内呈向内的高斯分布, 与 (2) 相反。

上述所建立的电子束热源数学模型中引入能量峰位置系数, 可对环形区域内的电子束能量分布状态作更加详细的定义, 该系数对平衡环形束斑内外侧温度补偿与中心热传导有重要意义。

## 2 建立扫描电子束有限元模型

### 2.1 模型假设

电子束表面处理过程是一个骤热急冷的非稳态过程, 表层的金属的熔融与凝固均在极短时间内完成, 为简化模型、减少运算量, 对模型作出以下假设: 45 钢的热物性参数为温度的函数; 电子束扫描过程

中热传导处于稳态; 样为各向同性的均匀介质; 试样被处理前的温度和所处的工作室温度均为 300 K; 不考虑热对流; 忽略组织相变引起的塑性变形<sup>[19-20]</sup>。

### 2.2 几何建模与网格划分

采用 COMSOL 软件对 45 钢扫描电子束微熔过程进行模拟, 模型尺寸与实际试样尺寸一致, 为 50 mm × 50 mm × 50 mm, 在  $xoy$  工作面选取 50 mm × 8 mm 区域作为电子束加工区域, 并进行网格加密处理, 电子束扫描区域采用六面体的单元类型进行较细的网格划分, 其他区域采用四面体的单元类型进行智能网格划分, 网格划分模型如图 5 所示<sup>[21-22]</sup>。模型内部为均匀介质, 所以将试样中某处定义为微元控制体积  $dx dy dz$ 。

电子束扫描试样表面时, 热传导会通过控制体积的各个面发生。利用泰勒公式展开控制表面的导热速度, 直角坐标系中的热扩散方程为:

$$\rho c_p \frac{\partial T}{\partial t} = k \left( \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} \right) + Q \quad (9)$$

式中:  $\rho$  为密度 ( $\text{kg/m}^3$ );  $c_p$  为定压比热容 ( $\text{J} \cdot \text{kg/K}$ );  $k$  为导热系数 ( $\text{W/(m} \cdot \text{K)}$ )。

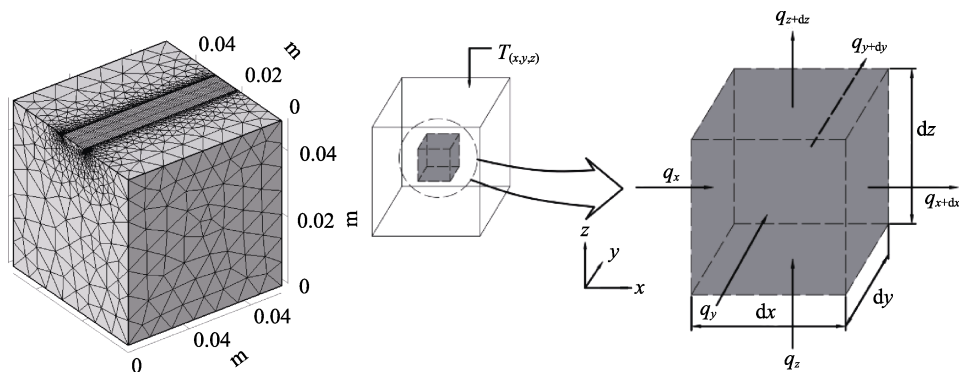


图 5 有限元几何模型建立和网格划分

Fig.5 Finite element geometry model establishment and meshing

## 2.3 电子束热源模型及边界条件

扫描电子束是以高能电子束轰击金属表面产生的高温为热源,并以指定速度平移实现大面积扫描,由上述搭建能量分布数学模型,其移动热源与时间的函数表达式为:

$$Q_{(x,y,z,t)} = \frac{3Q}{\pi(R_0^2 + 2R_0z \tan \theta)} \exp\left(-\frac{3(\sqrt{(x-x_0)^2 + (y-y_0-vt)^2} - (z \tan \theta + \zeta R_0))^2}{R_0^2}\right) \quad (10)$$

其中  $Q = IU$ ,  $I$  为电子束束流 (mA);  $U$  为电子束加速电压 (V)。

扫描电子束微熔处理是在真空环境中进行,真空度为  $10^{-2}$  Pa,故可忽略空气热对流造成的热量损失,而热辐射的传递不需借助任何介质<sup>[23]</sup>。因此可认为基体的导热与表面的热辐射是工件主要散热方式,电子束热源作用区域的传热方程为:

$$Q_{(x,y,z,t)} = \lambda \left( \frac{\partial T}{\partial x} S_x + \frac{\partial T}{\partial y} S_y + \frac{\partial T}{\partial z} S_z \right) \quad (11)$$

式中:  $T$  为材料的温度 (K);  $\lambda$  为材料的导热系数 ( $W/(m \cdot K)$ );  $S_x$ 、 $S_y$ 、 $S_z$  分别为  $x$ 、 $y$ 、 $z$  方向上的余弦。

热辐射满足第三类边界条件,可由斯蒂芬-波尔兹曼方程来计算:

$$E = \varepsilon \sigma (T_0^4 - T_s^4) \quad (12)$$

式中:  $\varepsilon$  为试样表面辐射率 (黑度);  $\sigma$  为斯蒂芬-波尔兹曼常数 ( $W/(m^2 \cdot K^4)$ );  $T_c$  为试样表面温度 (K);  $T_s$  为工作室温度 (K)。

## 3 扫描电子束微熔处理温度场仿真分析

根据前期研究结果<sup>[24-25]</sup>,温度场仿真工艺参数为:  $U=60$  kV,  $I=5$  mA,  $v=3$  mm/s,  $z=230$  mm,  $R_z+R_0/2=2$  mm,  $\theta=5^\circ$ ,  $f=400$  Hz,整个电子束加热时间为 16.7 s。

## 3.1 电子束能量峰值对热循环过程的影响

为明确能量峰值对扫描区域温度变化的影响规律,针对  $\xi=0$ 、0.5、1 等 3 种峰值系数进行研究,采用点探针对电子束扫描带上选取 5 个点,对应坐标为  $(-5,25,0)$ 、 $(-2.5,25,0)$ 、 $(0,25,0)$ 、 $(2.5,25,0)$ 、 $(5,25,0)$ ,如图 1 所示。

由温度变化曲线图 6 可见,3 种峰值系数下的多条热循环曲线均出现“类高斯”分布,其中  $a$  点与  $e$  点、 $b$  点与  $d$  点热循环曲线均出现重合,这是因为环状扫描方式下扫描带沿  $yo$  面对称分布,在高频电子束扫描下的温度变化完全相同;3 种峰值系数下  $c$  点曲线起伏形状类似,出现连续两个波峰,且前一个波峰高度稍低,这是因为环状能量束斑可分为前半环和后半环,在扫描过程中前半环热作用下表层温度迅速上升,随着热源的移动中空部分移至取样点,中空区域无电子束作用表层温度停止上升,同时在热传导与热辐射作用下热量快速减少,曲线出现快速下降的趋势,随着热源的持续移动后半环热源接替作用于取样点,且前半环热量未完全消失,在热聚集效应下后续温度峰值高于之前;3 种峰值系数下  $c$  点曲线第一峰值相差较小,约为 1 450 K,但第二峰值随着  $\xi$  的增加而增加,  $\xi=1$  时有最大值 2 017 K,且双峰差值最大 ( $\Delta t=445$  K),这是因为  $\xi=1$  的能量峰值位于圆环外圆周上,前半环热源移动至  $c$  点即为能量峰值,随后能量逐渐降低直至空心,而第二能量峰值出现在后半环束斑出  $c$  点的节点,相较于  $\xi=0$  的第二峰值出现在后半环束斑进  $c$  点的节点,  $\xi=1$  的双峰值时间跨度更大,这也为热聚集提供了更多的时间,因此双峰值温差最大;  $\xi=0$  的非  $c$  点曲线均呈单能量峰分布,且外沿点峰值小于内部点,这是因为该系数下能量峰值位于内圆周,外侧的取样点仅经历了一次能量阈值,并且越远离内圆周位置的能量越小。  $\xi=0.5$  的  $b$ 、 $d$  点曲线出现微凸的第一峰值,如图 6b 中放大图,因为该系数下能量峰值位于进  $b$ 、 $d$  点所在的束斑中心线附近,此时出现第一微峰值,随着热源的持续移动,次峰值能量持续作用于  $b$ 、 $d$  点,热循环曲线持

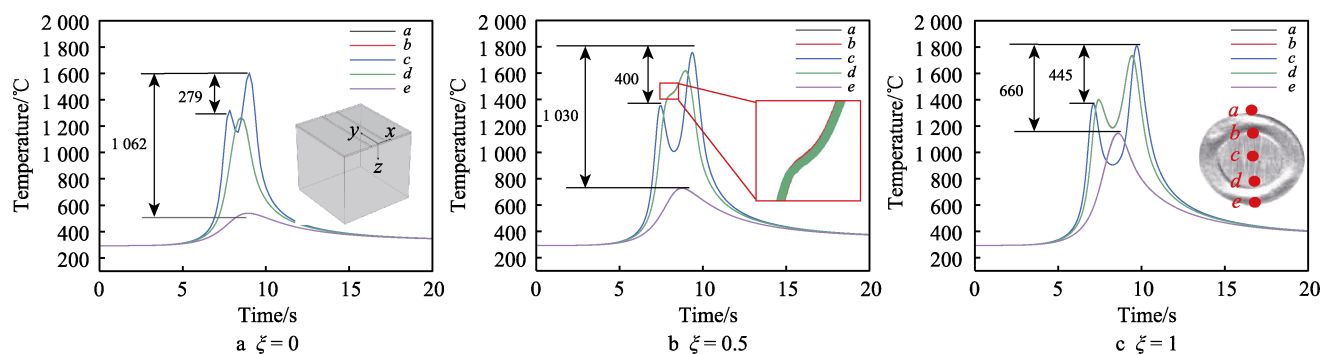


图 6 扫描带上不同点热循环曲线  
Fig.6 Thermal cycle curve at different points on the scanning belt



续升高但升幅低于第一峰值。 $\xi=1$ 的  $b$ 、 $d$  点曲线出现显著的第一峰值, 因为该系数下能量峰值位于外圆周上, 前半环刚抵达  $b$ 、 $d$  点即为能量最大值, 内圆环能量小于外圆环, 所以第一峰值出现后温度又立刻下降, 当后半圆环接替作用于该位置时, 内圆环先抵达, 此刻温度逐渐上升直至后半圆环外圆周实现第二峰值, 并且第二峰值热作用时间长, 因而较第一峰值速率低、温度高, 另外  $a$ 、 $e$  点因处于电子束能量峰值所在的外圆环上, 温度峰值较大, 但该位置处于扫描带边缘, 在基体自冷作用下热量散失较快, 所以峰值虽有增加但不及扫描带内部区域峰值<sup>[26]</sup>。

综合以上分析可知, 当能量峰值位置处于束斑内圆周和中心位置时, 各点温度峰值变化很大, 而  $\xi=1$  的扫描带同一截面上的温度峰值差最小, 温度变化相对平缓最大差值仅为 660 K。因此, 为实现大面域表面改性下的能量均匀分布, 合理控制峰值系数有极大意义, 可能对常用脉冲下束、大面积辐照等方式下电子束表面改性易出现的相裂纹与熔坑缺陷提供新的

解决思路。

### 3.2 电子束能量峰值对温度场的影响

为探究扫描电子束环形下束方式对温度场的影响, 分别取 1、6、11、16 s 时刻的温度分布云图, 如图 7 所示。由分布云图可知, 3 种能量峰值系数下前半环温度均低于后半环, 且后半环高温区域更大, 这与上述热循环曲线中第一峰值低于第二峰值且起伏宽度较小的结果相吻合。电子束扫描周期内, 下束阶段温度相对较低, 且随着  $\xi$  值的增大下束最高温度随之减小, 而收束阶段表层温度大幅提高, 扫描中期温度略微上升, 这是因为下束阶段基体温度为常温, 存在较大温度梯度, 并且下束半径越大, 表层能量越分散, 下束阶段温度越低, 同时下束阶段束斑距基体边界较近, 热传导范围有限, 收束阶段与此规律相同, 而扫描中期电子束作用于基体中部, 基体尺寸较大温度梯度较为稳定, 随着电子束作用时间的增长, 基体温度有所上升, 因此扫描中期表层最大温度略有上升。

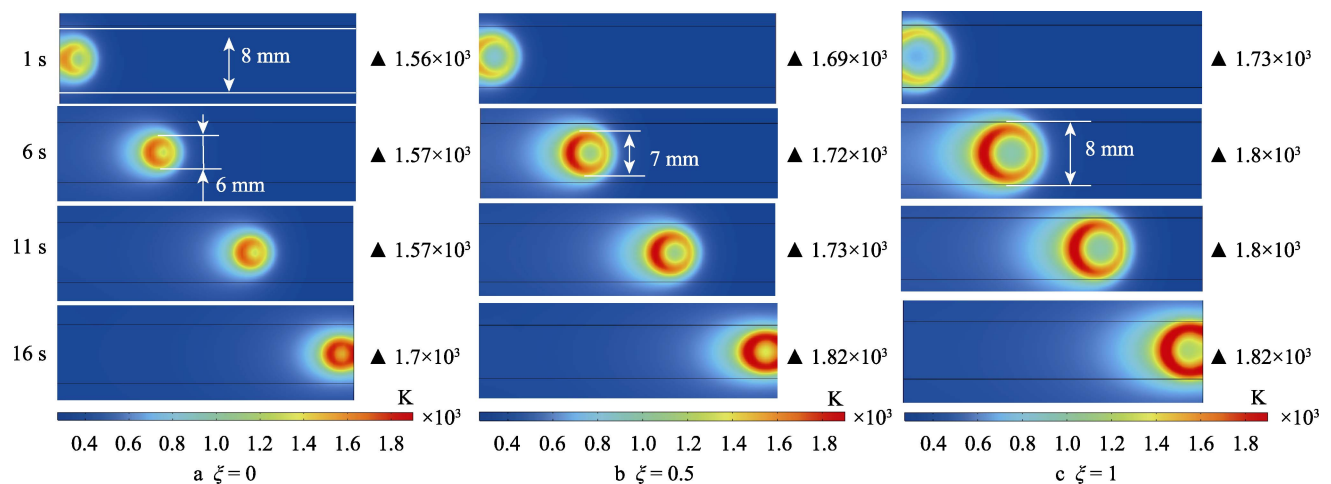


图 7 扫描区温度云图  
Fig.7 Scanning area temperature cloud map

横向对比 3 种能量峰值系数下的温度云图可以发现, 随着系数的增大束斑高温区域直径随之增大,  $\xi=1$  时可达 8 mm, 下束阶段 (1 s) 最高温度随着  $\xi$  值的增加而减小, 这是因为  $\xi$  值越大扫描半径越大, 起始阶段电子束热作用面积较大且基体为常温, 热量未有效堆积, 所以下束阶段扫描半径越大, 最高温度越低。扫描中后期同时刻下表层最高温度随  $\xi$  值的增加而增加, 且束斑尾迹长度不断加长, 因为峰值系数等同于能量峰值圆周直径大小, 当峰值圆周直径较小时, 热影响范围随之减小, 并且峰值圆周上的总能量随之降低, 热传导作用减弱, 束斑热能逐渐衰减, 因此低能量峰值系数热影响范围较小、温度较低、尾迹较短。

## 4 扫描电子束微熔处理试验

试验选用 45 钢作为实验用原材料, 使用铣床将原材料加工成 50 mm×50 mm×50 mm 的立方体, 加工过程中通过控制进刀量、铣削速度、主轴转速等参数恒定, 将试样表面粗糙度控制在 1.9~2.0  $\mu\text{m}$  内, 电子束加工前使用酒精擦拭表面并风干, 去除表面油污。使用 HDZ-6F 型高压数控真空电子束机进行表面处理试验, 实验参数与数值模拟参数一致。采用光学显微镜对熔融层进行观测, 采用 OLS4100 激光显微镜测试处理后表面粗糙度。每个待测面均匀测量 5 次粗糙度, 取其均值作为该面粗糙度值。

图 8 为经电子束不同峰值系数下处理后的表面

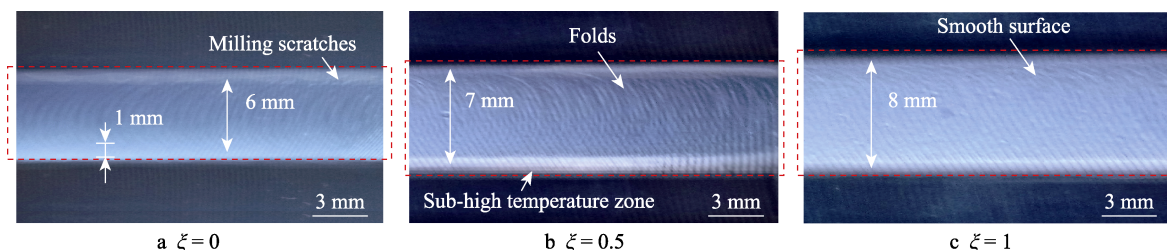


图8 不同峰值系数下的表面形貌  
Fig.8 Surface topography images under different crest factors

形貌图,由此可见,随着峰值系数的增加扫描带宽度随之增加,这与表层温度场仿真结果相同;当 $\xi=0$ 时,表面依然可观测到铣削划痕, $Ra=1.27\text{ }\mu\text{m}$ ,这是因为该参数下扫描中期表层最高温度为 $1\text{ }730\text{ K}$ 略高于45钢熔点温度,因温度较低表层起伏熔融过程中未能及时填补铣削凹坑及已凝固<sup>[27]</sup>。另外,扫描带两侧为亮白色区域且宽度可达 $1\text{ mm}$ ,由温度场仿真结果可知,峰值系数为0,束斑高温区域(高于熔点)直径约为 $4\text{ mm}$ ,扫描带两侧为亚高温区,见图6a中a、c曲线,电子束热作用过程中该区域温度未达45钢熔点,因此该区域在电子束去除表面杂质与高温热影响复合作用下呈亮白色;当 $\xi=0.5$ 时,表面光洁度良好, $Ra=0.57\text{ }\mu\text{m}$ ,扫描带两侧亮白色区域较窄,但局部出现与扫描方向相同的鱼鳞状起伏,如图7b所示。这是因为该参数下表层最高温度约为 $1\text{ }900\text{ K}$ ,表层起伏在电子束作用下发生熔融,熔化金属在重力作用下填补铣削凹坑,但因局部区域内热作用时间较短,熔化金属在基体热传导作用下快速降温,熔池波动未平缓即已凝固,所以形成鱼鳞状起伏;当 $\xi=1$ 时,形成宽度约为 $8\text{ mm}$ 的扫描区域,该区域表面形貌良好,未出现明显形貌缺陷, $Ra=0.36\text{ }\mu\text{m}$ ,并且两侧亮白色宽度值最小,如图7c所示。这是因为环状区域温度较高且分布均衡,环形边侧温度高于中间区域且均高于熔点温度,因此,在电子束束斑直接作用区域均发生固-液-固转变,环形边侧为高热源能量阈值处,在热传导作用下扫描带宽度可达 $8\text{ mm}$ ,与仿真结果相同(图7c)。

## 5 结论

1) 能量峰值系数对扫描电子束热影响范围和表层温度均有较大影响,3种能量峰值系数下扫描带中间区域热循环曲线均呈双峰分布,随着能量峰值系数的增加,双峰最高温度随之增加。当 $\xi=1$ 时,电子束能量峰值位于环形束流外径圆周上,此时扫描区域表层所c点选热循环曲线双峰值较大且第一、第二峰值之间温差的达到最大值 $445\text{ K}$ ,扫描带两侧的a、e点呈单峰分布,且峰值可达 $1\text{ }250\text{ K}$ ,与中部温差较小。环状下束方式下 $\xi=1$ 能量分布更为均匀,适用于大面积扫描。

2) 扫描过程中在能量积累与基体自冷复合作用下,前半环束斑宽度和温度均低于后半环,随着能量峰值系数的增加,扫描环热作用直径和最高温度均随之增大, $\xi=1$ 时,高温区域直径可达 $8\text{ mm}$ ,并且尾部出现半椭圆形尾迹。

3) 随着能量峰值系数的增加45钢表面粗糙度随之减小,并且扫描带宽度随之增加,两侧白色热影响区宽度减小。 $\xi=1$ 时表面铣削划痕完全消失,且无明显形貌缺陷, $Ra=0.36\text{ }\mu\text{m}$ 。

## 参考文献:

- [1] LEE T, BIAN Hua-kang, AOYAGI K, et al. Fabricating 9-12 Cr Ferritic/Martensitic Steels Using Selective Electron Beam Melting[J]. Materials Letters, 2020, 271: 127747.
- [2] GUO Shun, ZHOU Qi, KONG Jian, et al. Effect of Beam Offset on the Characteristics of Copper/304stainless Steel Electron Beam Welding[J]. Vacuum, 2016, 128: 205-212.
- [3] LI Xin-kai, WANG Rong, XIN Zhe, et al. Changes in Surface Roughness and Microstructure of 45 Steel after Irradiation by Electron Beam[J]. Materials Letters, 2021, 296: 129934.
- [4] IVANOV Y F, ZAGULIAEV D V, GLEZER A M, et al. Changes in Surface Structure and Mechanical Characteristics of Al-5 wt%Si Alloy after Irradiation by Electron Beam[J]. Materials Letters, 2020, 275: 128105.
- [5] LU Jian, SUI Xin-meng, YANG Bo-hang, et al. Ultrafast In-Situ Transformation of Graphite into Graphene Nano-sheets by High Current Pulsed Electron Beam Direct Irradiation[J]. Applied Surface Science, 2022, 572: 151498.
- [6] LEI Shuang, LI Xian-feng, DENG Ya-qi, et al. Micro-structure and Mechanical Properties of Electron Beam Freeform Fabricated  $\text{TiB}_2/\text{Al-Cu}$  Composite[J]. Materials Letters, 2020, 277: 128273.
- [7] LI Xin-kai, WANG Rong, WANG Qi-chao, et al. Scanning Electron Beam Polishing and Defect Analysis of 65 Steel[J]. Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section B: Beam Interactions With Materials and Atoms, 2021, 490: 34-38.
- [8] 陈军, 李伟, 贺冬云, 等. 强流脉冲电子束表面改性 FeCrAl 涂层的显微组织及耐高温腐蚀性能研究[J]. 表面技术, 2020, 49(5): 200-206.

- CHEN Jun, LI Wei, HE Dong-yun, et al. Surface Microstructure and High-Temperature Erosion Resistance of FeCrAl Coating after High Current Pulsed Electron Beam Treatment[J]. Surface Technology, 2020, 49(5): 200-206.
- [9] LU Jian, WEI De-qiang, WANG Rong, et al. Surface Polishing and Modification of 3Cr<sub>2</sub>Mo Mold Steel by Electron Beam Irradiation[J]. Vacuum, 2017, 143: 283-287.
- [10] LV Peng, SUN Xiao, CAI Jie, et al. Microstructure and High Temperature Oxidation Resistance of Nickel Based Alloy GH4169 Irradiated by High Current Pulsed Electron Beam[J]. Surface and Coatings Technology, 2017, 309: 401-409.
- [11] HAO Sheng-zhi, WANG Hui-hui, ZHAO Li-min. Surface Modification of 40CrNiMo<sub>7</sub> Steel with High Current Pulsed Electron Beam Treatment[J]. Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section B: Beam Interactions With Materials and Atoms, 2016, 368: 81-85.
- [12] FU Yu-lei, HU Jing, SHEN Xian-feng, et al. Surface Hardening of 30CrMnSiA Steel Using Continuous Electron Beam[J]. Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section B: Beam Interactions With Materials and Atoms, 2017, 410: 207-214.
- [13] WEI De-qiang, WANG Xiao-bing, WANG Rong, et al. Surface Modification of 5CrMnMo Steel with Continuous Scanning Electron Beam Process[J]. Vacuum, 2018, 149: 118-123.
- [14] CUI Hong-yang, WANG Rong, WEI De-qiang, et al. Surface Modification of the Carbon Tool Steel by Continuous Scanning Electron Beam Process[J]. Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section B: Beam Interactions With Materials and Atoms, 2019, 440: 156-162.
- [15] LI Xin-kai, WANG Rong, DONG Yu-jian, et al. Surface Morphology and Grain Size of 45 Steel after Scanning by Electron Beam[J]. Materials Letters, 2021, 297: 129884.
- [16] 李广琪, 王丽芳, 朱刚贤, 等. 扫描方式对中空环形激光熔覆层残余应力及基板变形的影响研究[J]. 表面技术, 2021, 50(3): 158-170.
- LI Guang-qi, WANG Li-fang, ZHU Gang-xian, et al. Influence of Scanning Patterns on Residual Stress of Cladding Layer and Substrate Deformation Produced by Hollow-Ring Laser Cladding[J]. Surface Technology, 2021, 50(3): 158-170.
- [17] 胡兴, 彭昭成, 冯广杰, 等. SUS310S 不锈钢局部真空电子束焊接接头残余应力及变形研究[J]. 机械工程学报, 2020, 56(21): 38-47.
- HU Xing, PENG Zhao-cheng, FENG Guang-jie, et al. Numerical Simulation of Residual Stress and Deformation of SUS310S Stainless Steel Local Vacuum Electron Beam Welded Joint[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2020, 56(21): 38-47.
- [18] 魏德强, 李新凯, 王晓冰. 电子束抛光技术的研究进展[J]. 表面技术, 2016, 45(4): 175-182.
- WEI De-qiang, LI Xin-kai, WANG Xiao-bing. Research Progress of Electron Beam Polishing Technology[J]. Surface Technology, 2016, 45(4): 175-182.
- [19] 郭顺, 罗添元, 彭勇, 等. Ti/Cu 异种金属电子束焊接界面行为[J]. 焊接学报, 2019, 40(8): 26-32, 162.
- GUO Shun, LUO Tian-yuan, PENG Yong, et al. Interface Behavior and Mechanical Properties of Ti/Cu Dissimilar Metals Welding by Electron Beam[J]. Transactions of the China Welding Institution, 2019, 40(8): 26-32, 162.
- [20] 房玉超, 杨子西, 何景山. 电子束点焊熔池的液态金属冲刷效应作用规律[J]. 焊接学报, 2019, 40(6): 137-142, 167.
- FANG Yu-chao, YANG Zi-you, HE Jing-shan. Study on Liquid Metal Flushing Effect during Electron Beam Spot Welding[J]. Transactions of the China Welding Institution, 2019, 40(6): 137-142, 167.
- [21] 赵桐, 唐振云, 刘巧沐, 等. GH4065A 合金电子束焊接工艺及接头组织性能[J]. 材料导报, 2020, 34(22): 22105-22110.
- ZHAO Tong, TANG Zhen-yun, LIU Qiao-mu, et al. Electron Beam Welding Process and Microstructure and Properties of Joint of GH4065A Alloy[J]. Materials Reports, 2020, 34(22): 22105-22110.
- [22] 郭超, 林峰, 葛文君. 电子束选区熔化成形 316L 不锈钢的工艺研究[J]. 机械工程学报, 2014, 50(21): 152-158.
- GUO Chao, LIN Feng, GE Wen-jun. Study on the Fabrication Process of 316L Stainless Steel via Electron Beam Selective Melting[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2014, 50(21): 152-158.
- [23] REISGEN U, OLSCHOK S, KRICHEL T, et al. Determination of the Influence of Welding Parameters on the Efficiency of Electron Beam Welding by Measurement of Backscattered Electrons[J]. Vacuum, 2019, 159: 182-185.
- [24] 李新凯, 王荣, 王启超, 等. 扫描电子束微熔抛光临界功率密度规律及实验研究[J]. 表面技术, 2021, 50(7): 386-393.
- LI Xin-kai, WANG Rong, WANG Qi-chao, et al. Research on Critical Power Density and Experiment of Scanning Electron Beam Micro-Melting Polishing[J]. Surface Technology, 2021, 50(7): 386-393.
- [25] LU Jian, WEI De-qiang, WANG Rong, et al. Surface Polishing and Modification of 3Cr<sub>2</sub>Mo Mold Steel by Electron Beam Irradiation[J]. Vacuum, 2017, 143: 283-287.
- [26] NIU Shao-qiang, YOU Qi-fan, YOU Xiao-gang, et al. Mechanism of Impurities Reduction and Evaporation of Alloying Elements for a Multi-Elements Ni-Based Superalloy during Electron Beam Remelting[J]. Vacuum, 2018, 156: 345-350.
- [27] WANG Rong, YU Jie, WEI De-qiang, et al. Surface Microstructures and Improved Mechanical Property of 40CrMn Steel Induced by Continuous Scanning Electron Beam Process[J]. Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section B: Beam Interactions With Materials and Atoms, 2019, 459: 130-136.