

扫描电子束微熔抛光临界功率密度规律 及实验研究

李新凯, 王荣, 王启超, 董玉健

(桂林电子科技大学, 广西 桂林 541004)

摘要:目的 明确扫描电子束改善 45 钢表面粗糙度工艺方法以及电子束抛光工艺参数的内在联系。方法 以热轧空冷 45 钢为研究对象, 通过设定可编程数字信号发生器的参数, 实现扫描电子束环状下束的方式, 对 45 钢试样进行微熔抛光处理, 搭建 45 钢表面微熔状态下电子束功率与熔化所需功率密度的临界平衡关系, 并采用数值模拟的方法, 研究不同工艺参数下试样温度场的变化规律。结果 45 钢微熔状态下, 电子束束流与工件移动速度呈非线性关系。当电子束束流为 9.36 mA, 工件移动速度为 11 mm/s 时, 45 钢表面原始铣削划痕完全消失, 且光洁度良好, 表面粗糙度由 2.0 μm 降至 0.43 μm , 降低幅度约为 78.5%。部分参数下, 表面会出现熔坑、褶皱现象。这是因为单个扫描周期过长, 能量积累, 导致表层过度熔融。4#试样经电子束处理后, 铣削划痕仍旧可见, 这是因为单个扫描周期仅为 3.6 s, 表层能量流失过快, 导致熔融不全的现象。结论 扫描电子束处理 45 钢表面, 可显著降低试样表面粗糙度。通过调节工艺参数, 可控制电子能量密度和散热速率, 减少熔坑、褶皱的出现。

关键词: 扫描电子束; 抛光; 45 钢; 粗糙度; 工艺参数; 熔坑

中图分类号: TG175.1 文献标识码: A 文章编号: 1001-3660(2021)07-0386-08

DOI: 10.16490/j.cnki.issn.1001-3660.2021.07.041

Research on Critical Power Density and Experiment of Scanning Electron Beam Micro-melting Polishing

LI Xin-kai, WANG Rong, WANG Qi-chao, DONG Yu-jian

(Guilin University of Electronic Technology, Guilin 541004, China)

ABSTRACT: The purpose of the paper is to clarify the technological method of improving the surface roughness of 45 steel by scanning electron beam and the internal relation of technological parameters of electron beam polishing. Hot rolled air-

收稿日期: 2020-07-24; 修订日期: 2020-11-12

Received: 2020-07-24; Revised: 2020-11-12

基金项目: 广西高校中青年教师基础能力提升项目 (2020KY05026); 广西自然科学基金项目 (2017GXNSFDA198007, 2020JJB160001); 桂林电子科技大学研究生教育创新计划资助项目 (2021YCXB02, 2021YCX019)

Fund: Supported by the Basic Ability Improvement Project of Young and Middle-aged Teachers in Guangxi Universities (2020KY05026), Guangxi Natural Science Foundation Project (2017GXNSFDA198007, 2020JJB160001), Innovation Project of GUET Graduate Education (2021YCXB02, 2021YCX019)

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: 王荣 (1965—), 女, 博士, 教授, 主要研究方向为新材料新工艺。

Corresponding author: WANG Rong (1965—), Female, Doctor, Professor, Research focus: new materials and new technology.

引文格式: 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.

cooled 45 steel is taken as the research object. By setting the parameters of programmable digital signal generator, the micro-melting polishing treatment is carried out on 45 steel samples, and the critical equilibrium relationship between the electron beam power and the power density required for melting is established. Numerical simulation is used to study the variation law of temperature field of samples under different process parameters. There is a nonlinear relationship between electron beam and workpiece moving speed in micro-melting state of 45 steel. When the electron beam current is 9.36 mA and the workpiece moving speed is 11 mm/s, the original milling scratches on the surface of 45 steel disappear completely, and the surface roughness decreases from 2.0 μm to 0.43 μm , with a decrease range of about 78.5%. Under some parameters, molten pits and wrinkles will appear on the surface, which is because the single scanning period is too long and energy accumulation leads to excessive melting of the surface. Milling scratches of 4# sample are still visible after electron beam treatment, because the single scanning period is only 3.6 s, and the surface energy loss is too fast, resulting in insufficient melting. Conclusion Scanning electron beam treatment on the surface of 45 steel can significantly reduce the surface roughness of the sample. By adjusting the process parameters to control the electron energy density and heat dissipation rate, the probability of molten pits and wrinkles can be reduced.

KEY WORDS: scanning electron beams, polishing, 45 steel, roughness, technological parameter, pit

电子束表面抛光处理技术是一种具有加工效率高、抛光速度可控、真空加工无污染等优点的绿色表面处理技术,其加工原理为,电子束照射在金属表面,金属表面薄层快速熔化^[1-2],液态金属在表面张力和重力的复合作用下,自发流向低洼处,填补表面凹坑^[3],起到“自抛光”效果。金属零部件经电子束抛光处理时,表面温度快速升降温,使表层硬度、耐磨性得以极大提升^[4]。

目前电子束加工方法主要有三种:第一种方式是集中聚焦下束移动工件的方法^[5]。该方法以电子束束流集中聚焦下束为主,束流聚焦为斑点,移动工件进行加热^[6],热源加热面积小,能量密度相对较大,熔池的深宽比也较大^[7],形成窄而深的熔池,强化的不只是表面,对金属组织表面和深层都有很大的影响。第二种方式是采用脉冲电子束对金属材料进行表面重熔处理^[8]。该方法的不足是,能量密度大,在表面的熔化层容易产生“火山坑”,由于能量密度高,产生的热量集中,冷却时的速度较快,造成内应力和组织应力较大,容易在组织中出现相结构裂纹,影响表面强化层的性能与质量^[9-10]。第三种方式是采用大面积电子束辅照(照射)^[11-12]的方法对材料表面进行抛光和表面强化处理。该方法通过调整参量密度,可实现直径 60 mm 范围内的电子束照射,此方法采用散焦下束的方式来实现大面积照射,要求电子枪功率大,因此很难实现均匀下束^[13-14]。

为此,团队开发了一种新型连续扫描电子束技术(Continuous scanning electron beam technique process,简称:CSEBP),适用于大面积表面微熔处理。本文以 45 钢为研究对象,通过推导微熔状态下 45 钢表面热平衡关系,获得电子束抛光工艺参数,并进行了验证实验。针对试样表面不同形貌特征,研究了温度场的变化规律,发现了 45 钢扫描电子束微熔抛光工艺的特点。

1 实验

1.1 实验方法

采用 CSEBP 技术对表面进行微熔处理。通过自主研发的电子束设备阴极发射出大量高速自由电子,电子在聚束极作用下进行一次汇聚成束,但在空间电荷及真空室压力等影响下,部分电子有所发散,产生电子云(图 1 黄色竖椭圆状),在聚焦线圈二次聚焦作用下,形成稳定且细小的电子束束流。电子束束流经由 X、Y 两对绕组组成的偏转线圈,形成具有一定偏转角度的束流,轰击试样表面。为实现 CSEBP 下束方式,在电子束设备上外接可编程数字信号发生器。该发生器可根据编程产生不同的波形信号,从而控制偏转电源的输出电流,达到不同下束方式的效果。实验前,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 $x^2+y^2=4$ 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 $x=2\cos t$, $y=2\sin t$ ($0 \leq t \leq \pi$),两路分量通过采集、放大,以指定刷新频率输出给附加偏转线圈中的 X、Y 绕组,在偏转线圈内孔与电子加速方向垂直的平面内产生大小、方向呈一定规律变化的磁场,高速运行的电子在此磁场作用下,形成扫描电子束轨迹呈半径 $r_0=2$ mm 的圆形,通过工件的移动实现大面积的扫描,并且扫描环的大小可调,扫描频率、电子束束流、加速电压等参数可控。CSEBP 扫描方式及抛光原理如图 1 所示,其中, $r_0=2$ mm, $d=1$ mm, $Q_{(r)}$ 为高斯热源下的热流密度(W/m^2), q' 为 45 钢表面熔融所需临界功率密度(W/m^2)。前期研究^[15-16]发现,CSEBP 下束过程中,试样表面温度快速提升,经热传导和热辐射后,温度会急速下降,试样表面出现熔融层、热影响层以及基体三大区域,能在降低表面粗糙度的同

时,有效提升表面力学性能。CSEBP 技术可以实现电子束能量密度在大面域内均匀分布的目的,能有效解决前述三种传统下束方式存在的深宽比过大、相结

构裂纹、缩孔等共性技术难题。但该技术因能量密度分散而多适用于浅表面改性处理,如抛光、熔覆、沉积等。

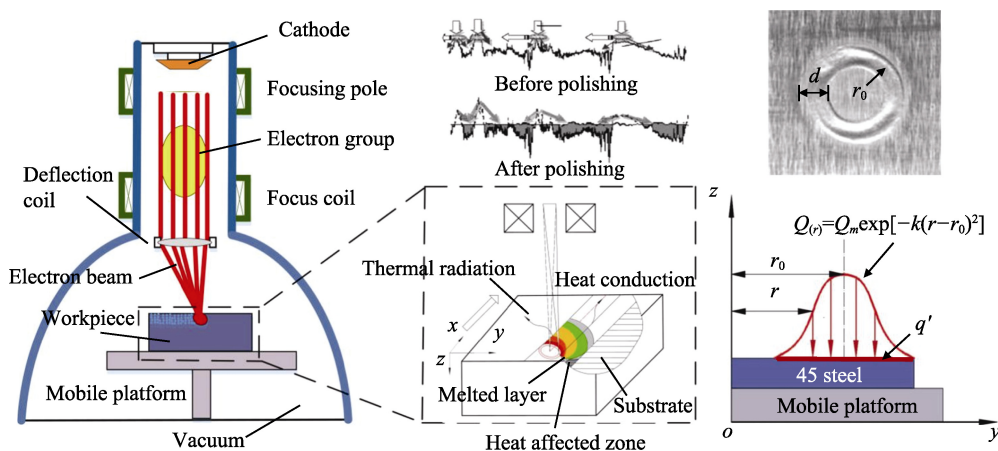


图1 连续扫描电子束(CSEBP)示意图

Fig.1 Schematic diagram of continuous scanning electron beam process (CSEBP)

采用 OLS4100 激光显微镜观测处理后表面轮廓分布以及测量试样表面粗糙度。每个待测面均匀测量 5 次,取其均值作为该面粗糙度 Ra 值。

1.2 实验材料与设备

实验选用热轧空冷状态下的 45 钢作为实验原材料。实验前,先用数控铣床将所购原材料加工成 $50\text{ mm} \times 50\text{ mm} \times 50\text{ mm}$ 的正方体试块,通过保持铣削刀具和恒定参数,控制 Ra 值在 $1.9 \sim 2.0\text{ }\mu\text{m}$,以排除试样原始粗糙度对实验结果的影响。电子束扫描前,使用无水乙醇擦拭试样表面并风干,以排除材料表面附着物对抛光效果的影响。

实验用电子束机的主要性能参数为:加速电压 60 kV ,电子束束流 $0 \sim 120\text{ mA}$,扫描频率 $0 \sim 3000\text{ Hz}$,聚焦电流 $0 \sim 1000\text{ mA}$ 。本研究所采用的扫描频率为 200 Hz 。

2 理论分析

扫描电子束抛光处理效果受电子束功率影响显著,当电子束功率过大,试样表面易产生过度熔融现象,但电子束功率过小,试样未达到熔点,也无法实现自抛光效果。经分析,当电子束功率与金属材料熔化所需功率达到平衡状态时,表面处于微熔状态,对实验参数的选取具有较高指导意义。

2.1 试样熔融临界功率密度的确定

为研究扫描过程中温度场的变化规律,建立一维数学物理模型,且采用如下假设^[17]:电子束束流均匀且垂直下束于工件表面;试样尺寸远大于电子束扫描尺寸及热作用深度;试样材质均匀,热物性参数为温度与组织成分的相关函数;不考虑基体在熔化过程中

内部的对流情况,只考虑工件轴向的热传导。根据以上假设,可建立一维非稳态方程。

能量密度方程:

$$\frac{\partial q}{\partial t} = \alpha \frac{\partial^2 q}{\partial x^2} \quad (1)$$

初始条件:

$$q(x, t < 0) = 0 \quad (2)$$

边界条件:

$$q(x = 0, t \geq 0) = q_0 \quad (3)$$

$$q(x \rightarrow +\infty, \forall t) = 0 \quad (4)$$

由公式(1)~(4)可得:

$$q = q_0 \left[1 - \operatorname{erf} \left(\frac{x}{\sqrt{4\alpha t}} \right) \right] \quad (5)$$

应用傅里叶定律 $q = -\lambda \frac{dT}{dx}$, 可将一维瞬态温度场描述为^[18]:

$$T_h(x, t) = \frac{q_0}{\lambda} \left[\sqrt{\frac{4\alpha t}{\pi}} \exp \left(-\frac{x^2}{4\alpha t} \right) - x \operatorname{erf} \left(\frac{x}{2\sqrt{\alpha t}} \right) \right] + \theta_0 \quad (6)$$

式中: q 为功率密度 (W/cm^2); α 为热扩散率 (m^2/s); t 为时间 (s); h 和 x 为距表层的深度 (μm); q_0 为初始时刻的功率密度 (W/cm^2); λ 为热导率 ($\text{W}/(\text{m} \cdot \text{K})$); θ_0 为基材初始温度 ($^\circ\text{C}$), 本文中设为常温 $25\text{ }^\circ\text{C}$ 。

电子束在扫描过程中有穿行效应,加工过程中的最高温度出现在亚表层^[19],电子射程仅与电子的能量和靶材密度有关,如式(7)所示。

$$R = \frac{CU^2}{\rho} \quad (7)$$

式中: R 为电子射程 (m); C 为常数 (m^2/s), $C = 9.8 \times 10^{-11}\text{ kg}/\text{m}^2\text{V}^2$; U 为电子束加速电压 (V);

ρ 为靶材密度 ($\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$)。

本文采用加速电压为 60 kV, 最高温度处于表层下 45 μm 处 (即 $R = 45 \mu\text{m}$), 厚度值较小, 可将表层看作工件最高温度处, 令 $x = 0$, 可得到工件表面微熔的临界功率密度为:

$$q' = \frac{0.886\lambda(\theta_m - \theta_0)}{\sqrt{\alpha t}} \quad (8)$$

2.2 扫描电子束热源模型的建立

电子束扫描频率可达 500 Hz, 因频率较高, 可将电子束热源近似看作高斯分布, 其表达式为^[20]:

$$Q_{(r)} = Q_m \exp[-k(r - r_0)^2] \quad (9)$$

式中: r 为扫描轨迹圆的圆心距离; r_0 为电子束扫描半径; $Q_{(r)}$ 为距轨迹圆的圆心为 r 的点热流密度; Q_m 为电子束斑中心最大比热流; k 为能量集中系数, 取 $k = \frac{12}{d^2}$ (d 为束斑直径)。

热流分布曲线下所覆盖的全部热能为 W , 由积分运算可得:

$$W = \int_F Q_{(r)} dF = \int_F Q_m \exp(-kr^2) dF = 2\pi r_0 q_m \int_{-\infty}^{+\infty} Q_m \exp(-kr^2) dr = 2\pi r_0 Q_m \sqrt{\frac{\pi}{k}} \quad (10)$$

热流曲线下热能与电流和电压相关, 可得:

$$W = \eta IU \quad (11)$$

式中: η 为热效率, 通常取 90%^[21]。

由式(10)和(11)可算得电子束斑中心最大热流密度为:

$$Q_m = \frac{W}{2\pi r_0 \sqrt{\frac{\pi}{k}}} = \frac{\eta IU}{\pi r_0 d \sqrt{\pi}} \quad (12)$$

2.3 试样临界状态热平衡的计算

若要使试样表面达到微熔状态, 电子束束斑中心的最大热流密度 (Q_m) 须达到试样表面临界功率密度 (q'), 可得等式:

$$\frac{\eta IU}{\pi r_0 d \sqrt{\pi}} = \frac{0.886\lambda(\theta_m - \theta_0)}{\sqrt{\alpha t}} \quad (13)$$

式中: 试样熔点 θ_m 取 1500 $^{\circ}\text{C}$; θ_0 取常温 25 $^{\circ}\text{C}$; 导热率 λ 取 52 $\text{W}/(\text{m} \cdot \text{K})$; t 为一个扫描周期的时间 (s), $t = d/v$ ($d = 1 \text{ mm}$); 热效率 η 取 90%; 电子束加速电压 U 为 60 kV; 扫描半径 r_0 为 2 mm; I 为束流 (A)。

由此可得, 在 CSEBP 方式下, 45 钢表面处于熔融临界状态时, 工艺参数有如(14)式的函数关系, 其中移动速度的标准单位为 m/s 。

$$\frac{\sqrt{v}}{I} = 11.2 \quad (14)$$

3 实验与分析

3.1 CSEBP 实验参数

电子束抛光过程中, 试样表面处于微熔状态, 电子束功率密度与试样表面熔融所需能量密度达到平衡状态。试样熔化所需能量密度仅与热物性参数相关, 但电子束功率密度与多项参数相关, 如加速电压、聚焦电流、扫描频率、移动速度等, 故实验参数选取较为复杂, 而电子束实验机加速电压为出厂定值, 实际应用中, 扫描频率不常改变, 所以式(14)可简化实验参数选取范围。

为探究上述理论模型的准确性, 搭建电子束抛光验证实验。根据电子束机的工件移动速度最大值 15 mm/s, 选取移速分别为 3、7、11、15 mm/s 的四组试验参数, 并将参数代入式(14), 得到对应电子束的束流参数, 如表 1 所示。

表 1 电子束抛光工艺参数

Test number	Moving speed/(mm·s ⁻¹)	Electron beam/mA
1#	3.00	4.89
2#	7.00	7.47
3#	11.00	9.36
4#	15.00	10.94

3.2 表面粗糙度

图 2a 为经电子束处理前后的表面粗糙度变化曲线与对应的表面形貌图, 四种参数下, 表面粗糙度分别为 1.26、0.67、0.43、0.83 μm 。图 2b 为电子束处理后边界区域的表面形貌, 1#和 2#试样表面粗糙度虽有不同程度的降低, 但局部出现了少量熔坑。根据前期研究结果^[22]发现, 熔坑是电子束抛光后的典型缺陷, 其形成机制可概括为: 材料的亚表面首先熔化, 部分温差较大的熔滴会冲破材料的表层喷发出来。由熔坑区域的 EDS (图 3) 分析结果可看出, 熔坑区域的碳元素含量约为 50%, 氧含量上升 1 个数量级, 因此熔坑区域主要为碳氧化合物的杂质, 根据热物性参数可知, 碳氧化合物的传热性能低于钢基体, 因工件移动速度较慢, 表层及亚表层碳化物区域有较长的能量堆积时间, 当局部区域温度高于周围产生的温差时, 在静态应力作用下, 该区域更易发生喷发现象。喷发所产生的熔坑尺寸较大 (直径约 50 μm), 在抛光期间内, 未能及时填补而直接凝固, 从而形成熔坑缺陷。3#试样表面形貌较为平整、光滑, 铣削划痕完全消熔, 该参数下, 熔融金属较充分地流向铣削划痕低洼处, 使表面形貌得到极大改善。4#试样表面虽能观测到熔融痕迹, 但铣削划痕仍然清晰可见, 说明该参数下电子束功率密度不足, 熔化金属未流至低洼处已发生凝固。

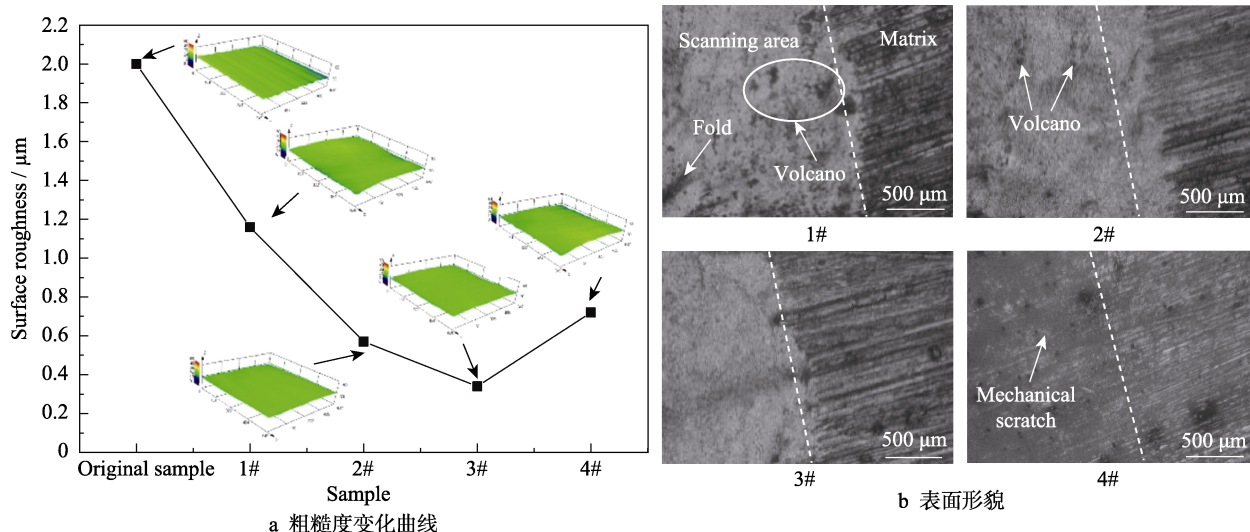


图2 电子束处理后表面形貌分布图

Fig.2 Distribution of surface morphology after treatment: a) change curve; b) surface topography

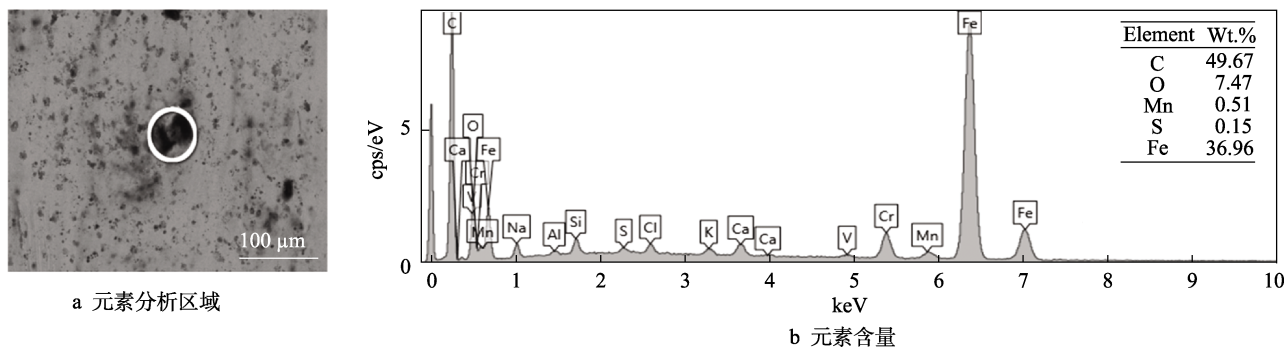


图3 熔坑区域 EDS 分析

Fig.3 EDS analysis of molten pit area: a) element analysis area; b) element content

综合上述结果可知, 电子束抛光过程极为复杂, 熔坑缺陷是该方向亟待解决的问题, 多次扫描很有可能成为消除缺陷较好的方法, 因为多次扫描在起到提纯 (去除试样表面杂质) 效果的同时, 还能为填补凹坑提供充足时间。

3.3 仿真分析

采用 COMSOL 软件对 45 钢扫描电子束微熔抛光过程进行模拟, 模型尺寸与实际试样尺寸一致, 为 $50\text{ mm} \times 50\text{ mm} \times 50\text{ mm}$, 在 xoy 工作面选取 $50\text{ mm} \times 8\text{ mm}$ 的区域作为电子束加工区域, 并进行网格加密处理, 网格划分模型如图 4 所示^[23-24]。电子束抛光过程中, 最大温度梯度可达 $10^5\text{ }^\circ\text{C/s}$ 。为精确获得 45 钢电子束扫描过程中温度场的变化规律, 采用 JMatPro 计算获得 1、10、 10^2 、 10^3 、 10^4 、 $10^5\text{ }^\circ\text{C/s}$ 六个梯度下, 45 钢导热系数、比热容与温度相关的函数, 因极高温度梯度下热物性模型趋于一致, 所以 $10^4\text{ }^\circ\text{C/s}$ 和 $10^5\text{ }^\circ\text{C/s}$ 两个梯度下对应的曲线几乎重合, 如图 5 所示。

建立扫描电子束微熔抛光的热源模型, $q(x, y, t)$ 为扫描电子束热源模型, 满足公式(15):

$$\begin{cases} q(x, y, t) = \frac{\eta a I U}{\pi r_0^2} \times \exp \left[\frac{-a[(x-x_0)^2 + (y-y_0)^2]}{r_0^2} \right] \\ x_0(t) = 0.025 \\ y_0(t) = vt \end{cases} \quad (15)$$

扫描电子束微熔抛光处理在真空环境中进行, 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^[25], 因此可认为热辐射为工件的主要散热方式, 满足第三类边界条件。热辐射量由斯蒂芬-波尔兹曼方程^[26]来计算:

$$E_b = \varepsilon \sigma (\theta_c^4 - \theta_s^4) \quad (16)$$

式中: ε 为试样表面辐射率 (黑度); σ 为斯蒂芬-波尔兹曼常数 ($\text{W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K}^4)$); θ_c 为试样表面温度 (K); θ_s 为工作室温度 (K)。

在扫描电子束模型上选取不同时间节点的表层温度场, 如图 6 所示。可以发现, 由 1#试样到 4#试样的表层最高温度在不断提升, 4#试样最高温度可达 $2.31 \times 10^3\text{ K}$, 并且热源形状由圆形向带有尾端的彗星状转变。这是因为随着电子束束流的增加, 电子束功

率密度同比例增加，高能量密度热源随着工件移动，尾端热量未能立刻散失，出现彗星状。1#试样单个扫描周期（从下束到表层温度低于熔点）约需 17.3 s，随着工件移动速度的增加，扫描周期不断减小，4#试样扫描周期降至 3.6 s。

经上述分析，对图 6 观察可发现，电子束扫描过程中有两个明显特征：一是随着束流的移动，红色亮斑（高温区域）立即消失；二是除收束端表面温度变化较大外，随着扫描时间的延续，中间区域表面温度有所增加，但增幅不显著^[27]。出现第 1 种现象，说明电子束处理区受高温热影响范围极小，这主要是束斑有效加热直径小，表面热流密度特别大，束流一直在移动使抛光过程中的加热时间短等因素引起的。根据

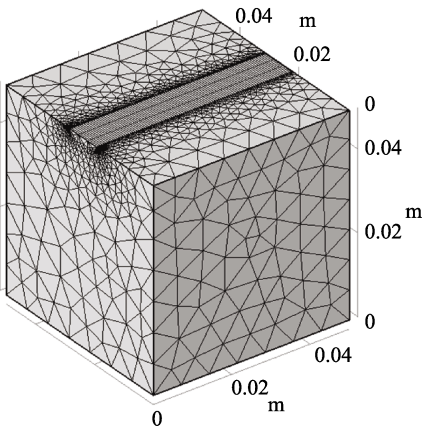


图 4 有限元几何模型建立和网格划分
Fig.4 Establishment of finite element geometric

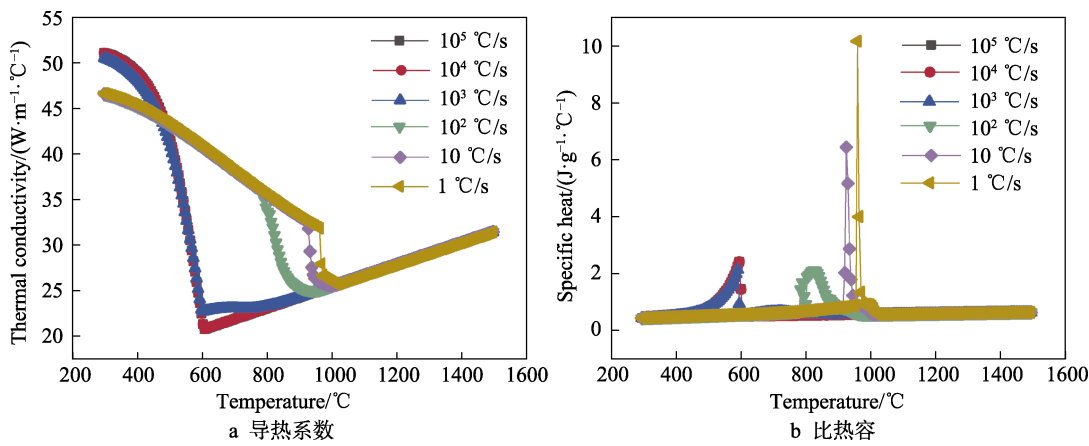


图 5 材料热物性参数
Fig.5 Thermal properties of material: a) hermal conductivity; b) specific heat

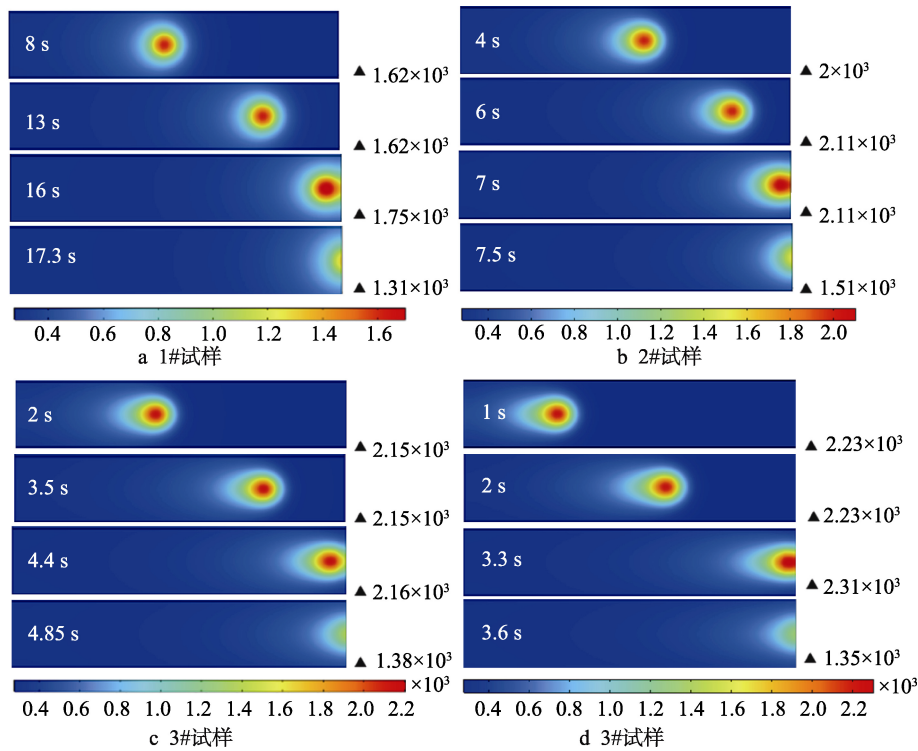


图 6 不同工艺参数下温度场仿真结果
Fig.6 simulation results of temperature field under different process parameters: a) 1#sample; b) 2#sample; c) 3#sample; d) 4#sample

电子束热源模型呈高斯分布 $Q_{(r)} = Q_m \exp[-k(r-r_0)^2]$ 可知, 能量在束流中心处集中。以 4#试样为例分析, 表面热流密度最高可达 2.23×10^3 K, 束流中心点全部加热时间在 1 s 以内, 这一结果可从 1 s 时的温度场得到证明(表面温度增加了 2230 K, 而整个变化过程不足 1 s)。表面能量的突然聚集, 基体材料无法在加热的同时通过热传导将这些热量散开, 因此温升极快, 且高温热影响范围小。但随着束流的移动, 加热区的温度能通过基体的自身导热和能量的吸收能力(比热容)迅速地将热量传递, 因此在模拟温度场结果中, 只可见一个深红色亮斑沿扫描方向移动。出现第 2 种现象说明, 束流快速加热和快速冷却的特点使热影响范围小。此外, 因材料导热性能好, 能及时将表面热量向基体传递, 使连续扫描过程中能量积累少, 因而对后面扫描区域有一定的影响, 但没有起到决定性的作用。这种表面热量的传入效率与基体材料对热量的吸收和传导量之间保持一个平衡, 为表面温度稳定提供了可能, 否则会出现随着扫描时间的增加, 基体表面最高温度会显著增加的现象。

根据仿真结果可分析图 2 表面形貌变化原因。1#试样表面出现了较多的褶皱和熔坑, 由图 6a 可见, 电子束扫描阶段最高温度多维持在 1.62×10^3 K, 略高于 45 钢熔点温度, 但 1#试样单个扫描周期长达 17.3 s, 较长的电子束下束时间使 45 钢表层长时间处于熔点以上, 从而造成碳化物温度急剧升高, 引起喷发现象^[24]。2#和 3#试样的表面粗糙度较为接近, 且表面形貌较为光滑, 仅 2#试样出现少量熔坑, 根据图 6b、c 可知, 两组热源的最高温度和扫描周期较为接近, 热源温度和工件移动速度相对适中, 较为适合电子束抛光处理。4#试样表面存在明显的原始铣削划痕, 由图 6d 可知, 虽然 4#试样的热源温度较高, 但工件移动速度较快, 单个扫描周期内产生的能量快速向基体传导, 造成能量流失过快, 热量无法集中, 从而出现熔融不完整的现象^[25]。

综合实验结果与温度场结果可得, 电子束抛光过程中的热源中心能量密度极大, 基体散热极快。电子束功率密度达到试样熔融所需能量仅是基本条件, 扫描时间的长短决定了周期内电子束对试样表面做功的大小。因此, 在后期研究过程中, 电子束抛光应充分考虑扫描时间对抛光效果的影响。

4 结论

本文采用一种新型连续扫描的电子束技术对 45 钢表面进行微熔抛光实验、温度场数学建模及仿真研究, 针对不同工艺参数下的试样表面粗糙度进行深入研究, 主要得到以下结论:

1) 根据所搭建的电子束数学物理模型, 求在该电子束机新型下束方式下, 工件表面微熔状态

电子束束流与工件移动速度之间存在的函数关系($\sqrt{v}/I=11.2$)。

2) 当电子束束流为 9.36 mA, 工件移动速度为 11 mm/s 时, 45 钢可得到较好的表面形貌, 表面粗糙度由 $2.0 \mu\text{m}$ 降至 $0.43 \mu\text{m}$, 降低幅度约为 78.5%。

3) 随着工件移动速度的增加, 单个扫描周期减小, 1#试样出现熔坑褶皱。这是因为扫描周期过长, 能量积累, 导致过度熔融。4#试样仍存在铣削划痕, 是因为扫描周期过短, 能量流失过快。

4) 多次扫描以及耦合扫描时间与电子束功率密度之间的关系, 极有可能成为电子束抛光未来研究的热点。

参考文献:

- [1] GUO Shun, ZHOU Qi, KONG Jian, et al. Effect of beam offset on the characteristics of copper/304 stainless steel electron beam welding[J]. Vacuum, 2016, 128: 205-212.
- [2] SUN Zhong-ji, TAN Xi-peng, TOR S B, et al. Selective laser melting of stainless steel 316L with low porosity and high build rates[J]. Materials & design, 2016, 104: 197-204.
- [3] WANG Zhu-qing, PALMER T A, BEESE A M. Effect of processing parameters on microstructure and tensile properties of austenitic stainless steel 304L made by directed energy deposition additive manufacturing[J]. Acta materialia, 2016, 110: 226-235.
- [4] WANG Xin, WEI Xi-cheng, HONG Xiao-lu, et al. Formation of sliding friction-induced deformation layer with nanocrystalline structure in T10 steel against 20CrMnTi steel[J]. Applied surface science, 2013, 280: 381-387.
- [5] 何艳兵, 黄忠宝, 黎子浩, 等. C24S 铝锂合金电子束焊工艺研究[J]. 焊接技术, 2020, 49(6): 44-48.
HE Yan-bing, HUANG Zhong-bao, LI Zi-hao, et al. Study on electron beam welding technology of C24S Al-Li alloy[J]. Welding technology, 2020, 49(6): 44-48.
- [6] 张占伟, 王生鹏, 宋雨键, 等. 3A21 铝合金电子束焊工艺及接头组织与性能研究[J]. 热加工工艺, 2020, 49(13): 15-18.
ZHANG Zhan-wei, WANG Sheng-peng, SONG Yu-jian, et al. Research on electron beam welding process, microstructure and properties of 3A21 aluminum alloy welded joint[J]. Hot working technology, 2020, 49(13): 15-18.
- [7] IM S Y, JUN S Y, LEE J W, et al. Unidirectional columnar microstructure and its effect on the enhanced creep resistance of selective electron beam melted Inconel 718[J]. Journal of alloys and compounds, 2020, 817: 153320.
- [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 treat-

- ment[J]. Surface technology, 2020, 49(5): 200-206.
- [9] 刘迪, 高潘, 蔡杰, 等. GH80A 经强流脉冲电子束改性后的高温氧化行为研究[J]. 表面技术, 2018, 47(11): 157-165.
LIU Di, GAO Pan, CAI Jie, et al. High temperature oxidation behavior of nickel-based superalloy GH80A treated by high-current pulsed electron beam[J]. Surface technology, 2018, 47(11): 157-165.
- [10] 高波, 高超, 何吉东, 等. 强流脉冲电子束作用下纯钛的微观组织结构变化及其性能研究[J]. 表面技术, 2017, 46(7): 156-160.
GAO Bo, GAO Chao, HE Ji-dong, et al. Microstructure variation and properties of pure titanium induced by high-current pulsed electron beam[J]. Surface technology, 2017, 46(7): 156-160.
- [11] MURRAY J W, KINNELL P K, CANNON A H, et al. Surface finishing of intricate metal mould structures by large-area electron beam irradiation[J]. Precision engineering, 2013, 37(2): 443-450.
- [12] SHINONAGA T, OKADA A, LIU Hao, et al. Magnetic fixtures for enhancement of smoothing effect by electron beam melting[J]. Journal of materials processing technology, 2018, 254: 229-237.
- [13] SHINONAGA T, KIMURA Y, SAKAI T, et al. Influence of material property on thickness of modified layer generated by large-area electron beam[J]. Procedia CIRP, 2018, 68: 178-183.
- [14] 胡建军, 邹毅, 侯天凤. 大面积低能电子束对齿轮表面改性的应用分析[J]. 重庆理工大学学报(自然科学), 2014, 28(7): 35-38.
HU Jian-jun, ZOU Yi, HOU Tian-feng. Application analysis of gear surface modification with large area low energy electron beam[J]. Journal of Chongqing University of Technology (natural science), 2014, 28(7): 35-38.
- [15] 王荣, 王优, 崔月, 等. 45 钢表面电子束微熔抛光的性能和组织分析[J]. 焊接学报, 2019, 40(5): 113-119.
WANG Rong, WANG You, CUI Yue, et al. Properties and microstructure of 45 steel surface processed by electron beam micro melting polishing[J]. Transactions of the China Welding Institution, 2019, 40(5): 113-119.
- [16] 魏德强, 刘科, 王荣. 45 钢电子束扫描相变硬化组织和硬度的研究[J]. 机械工程学报, 2012, 48(2): 127-132.
WEI De-qiang, LIU Ke, WANG Rong. Research on the microstructure and hardness of transformation hardening of 45 steel during electron beam scanning[J]. Journal of mechanical engineering, 2012, 48(2): 127-132.
- [17] 薛展仁, 韦寿祺, 李翌. 多相绕组电子束偏转扫描装置仿真分析[J]. 真空科学与技术学报, 2020, 40(5): 465-470.
XUE Zhan-ren, WEI Shou-qi, LI Zhao. Impact of multi-phase coil-winding on magnetic field distribution for electron beam 3D printing technology: A simulation study[J]. Chinese journal of vacuum science and technology, 2020, 40(5): 465-470.
- [18] 刘振飞, 吴杰峰, 刘志宏, 等. 复合热源模型在电子束焊接仿真中的应用[J]. 焊接技术, 2018, 47(7): 11-14.
LIU Zhen-fei, WU Jie-feng, LIU Zhi-hong, et al. Application research on electron beam welding simulation based on composite heat source model[J]. Welding technology, 2018, 47(7): 11-14.
- [19] 王松. 40Cr 电子束表面处理及钛合金化工艺研究[D]. 重庆: 重庆理工大学, 2014.
WANG Song. Process research of surface treatment and Ti alloying on 40Cr steel by HCPEB[D]. Chongqing: Chongqing University of Technology, 2014.
- [20] 魏德强, 赵运庆, 王荣, 等. 球墨铸铁电子束扫描表面淬火温度场仿真与实验验证[J]. 材料热处理学报, 2013(9): 189-194.
WEI De-qiang, ZHAO Yun-qing, WANG Rong, et al. Temperature field simulation and experimental research of electron beam surface quenching for ductile iron[J]. Transactions of materials and heat treatment, 2013(9): 189-194.
- [21] 向巧, 苏雷, 翟建楠, 等. 某型航空发动机液压作动筒电子束焊接仿真分析[J]. 焊接技术, 2015, 44(5): 20-23.
XIANG Qiao, SU Lei, ZHAI Jian-nan, et al. Simulation analysis of an aeroengine hydraulic actuator electron beam welding[J]. Welding technology, 2015, 44(5): 20-23.
- [22] 孙永兴, 李绍伟, 张凌燕, 等. 强流脉冲电子束作用下 TC4 表面 Cu 合金化及性能的研究[J]. 表面技术, 2019, 48(12): 271-280.
SUN Yong-xing, LI Shao-wei, ZHANG Ling-yan, et al. Alloying and property of Cu on TC4 induced by high current pulsed electron beam[J]. Surface technology, 2019, 48(12): 271-280.
- [23] WANG Cheng-duo, QIU Hai, KIMURA Y, et al. Morphology, crystallography, and crack paths of tempered lath martensite in a medium-carbon low-alloy steel[J]. Materials science and engineering: A, 2016, 669: 48-57.
- [24] ZHANG Cong-lin, LV Peng, XIA Hai-di, et al. The microstructure and properties of nanostructured Cr-Al alloying layer fabricated by high-current pulsed electron beam[J]. Vacuum, 2019, 167: 263-270.
- [25] 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.
- [26] LNCLUPELLE F P. 传热和传质基本原理[M]. 葛新石, 叶宏, 译. 北京: 化学工业出版社, 2007.
LNCLUPELLE F P. Basic principles of heat and mass transfer[M]. GE Xin-shi, YE Hong, Translated. Beijing: Chemical Industry Press, 2007.
- [27] 陈彬斌, 庞盛永, 周建新, 等. TC4 钛合金扫描电子束焊接温度场数值模拟[J]. 焊接学报, 2013, 34(7): 33-37.
CHEN Bin-bin, PANG Sheng-yong, ZHOU Jian-xin, et al. Numerical simulation of temperature field during scanning electron beam welding of TC4 titanium alloy[J]. Transactions of the China Welding Institution, 2013, 34(7): 33-37.