

文章编号:1000-582X(2008)12-1351-04

脉冲电子束照射下材料表面熔化深度的数值解析

许洪斌¹, 胡建军¹, 陈元芳¹, 李登波²

(1. 重庆工学院 材料学院, 重庆 400050; 2. 重庆铁马工业集团有限公司, 重庆 400050)

摘要:根据温度场热传导基本方程, 建立用于脉冲电子束加工的有限元模型, 提出一种脉冲电子束对材料表面熔化深度进行数值解析的方法。采用均匀体热源的热加载方式, 对电子束熔化材料表面后的温度场进行数值解析, 分析不同加速电压、电子束能量密度以及能量均匀性对材料熔化深度的影响, 归纳了能量均匀度 0.9~1.0、能量密度 2~17 J/cm²、加速电压 25~50 kV 情况下材料表面熔化深度曲线, 得到了表面熔化层深的变化规律, 为电子束对模具表面精密光整加工提供了理论依据。

关键词:脉冲电子束; 数值解析; 温度场; 有限元法

中图分类号: TB302; TB383; TN146

文献标志码: A

Numerical analysis of material surface thaw depth under pulsed electron beam irradiation

XU Hong-bin¹, HU Jian-jun¹, CHEN Yuan-fang¹, LI Deng-bo²

(1. Department of Materials, Chongqing Institute of Technology, Chongqing 400050, P. R. China;

2. Chongqing Tiema Industries Corporation, Chongqing 400050, P. R. China)

Abstract: We developed a finite element method model. An equality heat source was used to thaw metal with an electron beam in numerical analysis. The temperature field was obtained after the metal thawed with electron beam by numerical analysis. The influence of the material thaw depth was analyzed at differing voltages, energy densities, and energy evenness. A thaw depth diagram was obtained where energy evenness is from 0.9 to 1.0, energy density is from 2 J/cm² to 17 J/cm², and voltage is from 25 kV to 50 kV. The change rule of material thaw depth was derived which provides a theoretical reference for fine mould machining with electron beams.

Key words: pulsed electron beam; numerical analysis; temperature field; finite element method

电子束的发展经历了很多年, 随着电子束技术的日渐成熟, 它在社会生产中的应用越来越广泛, 并发挥着巨大的作用。俄罗斯、日本、美国和德国 50 年前就开始对电子束进行研究, 并试制了一些电子束加工装置, 经过 50 年的发展, 目前全世界已有几千台设备在核工业、航空宇航工业、精密加工业及重型机械等工业部门应用。把电能通过聚焦用于穿

孔、焊接、表面改性、熔炼、镀膜、物理气相沉淀、雕刻、铣切、切割以及电子束曝光等, 其中以电子束焊接、打孔、电子束曝光、物理气相沉淀、电子束烟气脱硫等工业上的应用最为广泛。电子束表面改性处理包括金属材料的表面淬火、表面合金化、表面清洗及熔理、薄板退火, 以及半导体材料的退火和掺杂等。目前, 电子束表面非晶态处理和冲击淬火等先进处

收稿日期: 2008-07-03

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(50775229); 重庆市科技攻关项目(CSTC, 2005AA3012-1); 重庆市重点自然科学基金资助项目(CSTC, 2008BA3014); 重庆市教委应用基础项目(KJ070614)

作者简介: 许洪斌(1967-), 男, 重庆工学院教授, 博士, 主要从事机械传动、模具技术研究, (E-mail) kbe@cqit.edu.cn.
欢迎访问重庆大学期刊网 <http://qks.cqu.edu.cn>

理工艺的研究已在世界各国广泛展开,电子束的热影响范围在很薄的表层,材料基体相对很大,可以产生 $10^8 \sim 10^9 \text{ }^\circ\text{C/s}$ 左右的冷却速度,使得材料还没形成晶体就迅速冷却,并在材料表面及表层形成一定的应力,得到独特的改性效果,这种改性特点较适合模具表面抛光。由于材料表面的瞬间熔化与瞬间冷却,模具表面不易变形,可以在模具磨损后进行修型;同时表层形成了非晶化保护膜,表面及深层的晶粒得到细化,甚至得到纳米晶,这对提高材料的抗腐蚀性、耐磨性和表层硬度,增加模具的使用寿命,合理利用资源及实际工业生产有重大意义^[1-3]。

由于强流脉冲电子束材料改性过程中的温度场在时间、空间上均呈现非线性变化,同时材料的热物理性能随温度变化,再加上物相的变化,很难用数学的方法求导热微分方程的解析解,数值模拟是解决这一问题的有效方法。数值模拟可以更直观地表明强流脉冲电子束在材料改性过程中温度场的整个变化历程。笔者在前人研究成果的基础上,提出电子束对金属材料表面熔化层进行深入数值模拟研究的方法,模拟时考虑了体热源、材料相变和热源的均匀度等因素,模拟了能量均匀度 $0.9 \sim 1.0$ 、能量密度 $2 \sim 17 \text{ J/cm}^2$ 、加速电压 $25 \sim 50 \text{ kV}$ 不同条件下材料表面熔化深度,为脉冲电子束对材料表面改性的研究提供定量的分析^[4-5]。

1 温度场中热传导基本方程的偏微分形式

由能量守恒定律和热传导的基本公式——傅里叶热传导公式,同时考虑热源和相变等因素,可以导出热传导过程的偏微分方程为^[6-7]

$$\rho c(T) \frac{\partial T}{\partial t} = k(T) \left(\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} \right) + Lv(x, y, z, t) + H, \quad (1)$$

式中: ρ, c, k 分别为材料的密度、热容及导热率, $Lv(x, y, z, t)$ 为体热源; H 为材料相变潜热。柱状电子束的温度场是轴对称的,可以将温度场的偏微分方程写成轴对称^[8-9]形式:

$$\rho c(T) \frac{\partial T}{\partial t} = k(T) \frac{1}{R} \frac{\partial T}{\partial R} + \frac{\partial}{\partial R} \left(k(T) \frac{\partial T}{\partial R} \right) + \frac{\partial}{\partial Z} \left(k(T) \frac{\partial T}{\partial Z} \right) + Lv(R, Z, t) + H. \quad (2)$$

初始条件, $T(R, z, 0) = T_0 = 20 \text{ }^\circ\text{C}$;

$$\text{边界条件, } -k(T) \left. \frac{\partial T(R, z, t)}{\partial z} \right|_{z=0, z=R_i} = 0,$$

$$-k(T) \left. \frac{\partial T(R, z, t)}{\partial R} \right|_{R=R_i} = 0.$$

2 有限元模型的建立

这里不考虑材料改性过程中的微观变形,只计算在此过程中温度的传导,利用 Ansys 中 Solid70 模型可以满足本论文研究需要。电子束可以在极短时间内(大约 $10^{-6} \sim 10^{-8} \text{ s}$)将能量完全沉积在材料内,使得材料在瞬间($10^{-5} \sim 10^{-6} \text{ s}$)升温熔化,热源采用分步加载,时间步长为 10^{-7} s ,加载时间 $4 \times 10^{-6} \text{ s}$ 。由实验^[10-11]得出用电子束照射材料表面,材料的熔化深度在 $5 \sim 10 \text{ } \mu\text{m}$ 左右,热影响深度范围 $20 \sim 30 \text{ } \mu\text{m}$,因此数值分析模型取圆柱直径 $60 \text{ } \mu\text{m}$ 、高度 $30 \text{ } \mu\text{m}$ 来做研究对象,采用沿加载中心到边缘逐步增大的网格划分方式,加载区域的网格最密,最小网格单元为 $0.5 \text{ } \mu\text{m} \times 0.5 \text{ } \mu\text{m} \times 0.5 \text{ } \mu\text{m}$,边缘最大单元格为 $2 \text{ } \mu\text{m} \times 2 \text{ } \mu\text{m} \times 2 \text{ } \mu\text{m}$,模型如图 1 所示。

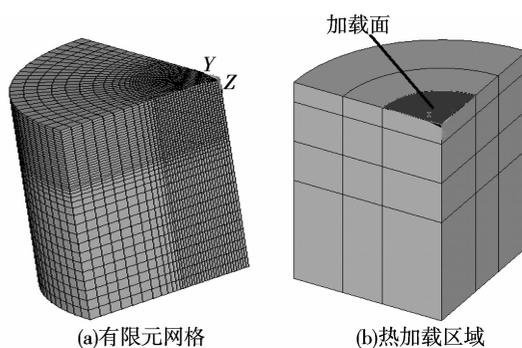


图 1 有限元模型

3 数值模拟中的假设条件和参量设定

3.1 数值模拟中的假设条件

对电子束材料表面改性的有限元数值模拟是建立在一定的假设条件上,是对真实解的逼近,为此做了以下几点假设^[12-13]:

- 1) 电子束截面形状为圆形,数值模拟中加载面上功率均匀分布;
- 2) 工件为三维有限的圆柱体,初始温度均匀恒定;
- 3) 材料各向同性,且热物理性能为温度的函数;
- 4) 不考虑表面蒸发现象。

3.2 热源参量的设定和相变的处理

已知加载表面热流密度函数,本次模拟中采用的体热源如式(3),通过对 Solid70 模型指定加载面进行加载;边界条件为第二类边界条件,假设其它边界绝热(加工是在真空中进行,真空度为 $10^{-1} \sim 10^{-3} \text{ Pa}$),室温恒定。对电子束熔化材料表面的数值模拟中主要是施加均匀的体热源,脉冲电子枪

(Nadezhda-2,俄罗斯生产)的脉冲宽度一般为 3~4 μs(此处取 4 μs),频率为 0.1~0.2 Hz。

$$Lv(x, y, z, t) = \gamma \eta \frac{P(t)}{s \cdot H_z(t)} f(H_z, z, t), \quad (3)$$

式中: γ 为能量均匀系数, 0.90 ≤ γ ≤ 1; s 为电子束斑面积; η 为材料对能量的吸收率,不同材料 η 可取不同的值^[4],一般钢为 0.95,铝为 0.8、铜为 0.7; H_z(t) 为电子束入射深度; f(H_z, z, t) 为单位体积吸收的能量随深度的分布函数^[5],在电子射程内材料吸收的能量分布是不均匀的。

相变潜热的处理有 3 种典型的方法,Ansys8.0 分析软件对潜热的处理主要是将潜热转化为热焓,热焓是密度与比热的乘积对温度的积分,其计算公式为

$$H = \begin{cases} \int_{T_0}^T \rho \cdot C(T) dT, & T < T_m; \\ \int_{T_0}^{T_m} \rho \cdot C(T) dT + f_i \rho L_m, & T = T_m; \\ \int_{T_0}^{T_V} \rho \cdot C(T) dT + \rho L_m, & T_m < T < T_V; \\ \int_{T_0}^{T_V} \rho \cdot C(T) dT + f_i \rho L_m + f_v \rho L_v, & T = T_V. \end{cases} \quad (4)$$

4 有限元模拟与分析

以塑料模具钢 Cr12MoV 为研究对象,其热物理参量均从相关参考书查得,在模拟电子束表面熔化过程中主要考虑 3 个因素的影响:加速电压、能量密度和能量均匀度系数,相同的加速电压通过调节工件与电子枪的距离(靶距)可以得到不同的能量密度,能量密度影响材料的熔化深度,这就使得电子束可以满足不同的加工需求。

4.1 材料不同深度位置的热循环曲线

图 2 为脉冲宽度为 4 μs、加速电压为 27 kV、能量密度为 4 J/cm² 及能量均匀度系数为 1 时的材料表层不同深度位置的热循环曲线。图 2 中横坐标为时间轴,纵坐标为温度轴,曲线为材料表层不同深度位置的热循环曲线,曲线上的数值为材料表层的深度值,当表层深度为 h 的温度值 T_h ≥ T_{c0} 时(T_{c0} 为熔点),则深度为 h 的位置已经熔化。从图 2 中可以看出,材料表面在 1.3 μs 左右开始熔化,4 μs 时电子束脉冲结束,表面温度达到峰值,在一个脉冲照射结束时表面温度开始骤降,降温速率为 10⁸~10⁹ °C/s,材料表层熔化深度可达 3 μm 左右^[14]。材料的升温 and 降温都是在极短时间内完成,对于因温度过高引起的材料气化蒸发,忽略其具体影响。

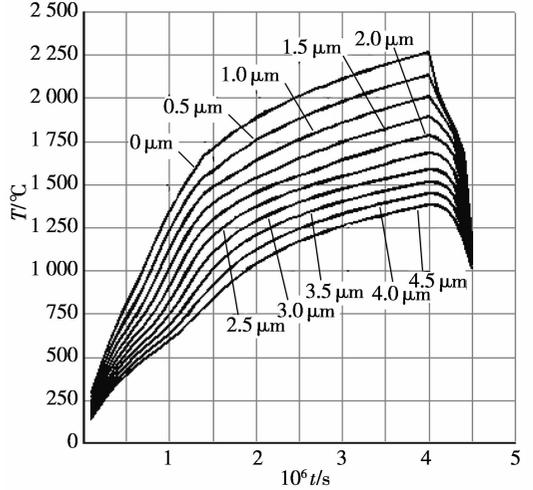


图 2 材料表层不同深度位置的热循环曲线

4.2 加速电压对材料熔化深度的影响

图 3 为加速电压为 25~50 kV、能量密度为 2~17 J/cm² 和能量均匀度系数为 1 时,材料表层熔化深度的曲线。在相同条件下,材料表层熔化深度随加速电压升高而加深,50 kV 加速电压下的最大熔化深度为 14 μm 左右,加速电压从 25~50 kV 变化时,由于受到实际加工过程中的不同因素的影响,材料的熔化层深曲线呈现带状分布,宽度为 2~3 μm。

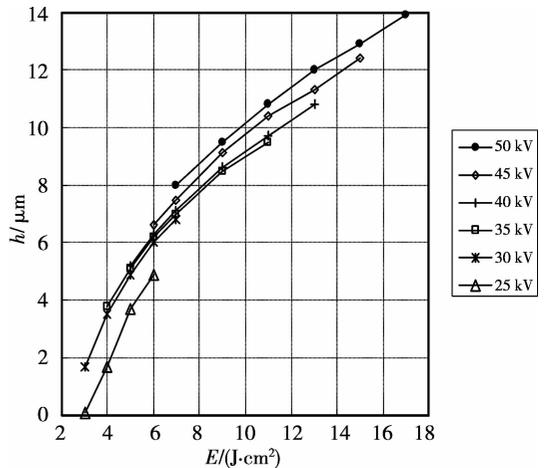


图 3 加速电压和能量密度对材料表层熔化深度的影响

4.3 能量密度对熔化深度的影响

电子束的能量密度对材料熔化深度影响最大,同样条件下,能量密度越大熔化深度越大,熔化深度与能量密度呈线性单调增函数关系,不同加速电压下的材料熔化深度曲线随能量密度增加基本平行。能量密度在 2~7 J/cm² 时,材料表层熔化深度随能

量密度增加迅速从 $0 \mu\text{m}$ 增加到 $8 \mu\text{m}$, $7 \sim 17 \text{ J/cm}^2$ 时材料表层熔化深度随能量密度增加迅速从 $8 \mu\text{m}$ 增加到 $14 \mu\text{m}$, 在 50 kV 加速电压、 17 J/cm^2 能量密度下, 材料熔化层深度最大可以达到 $14 \mu\text{m}$, 使材料熔化的最小能量密度为 2 J/cm^2 左右。

4.4 能量均匀度系数对熔化深度的影响

在模拟过程中假设电子束能量均匀, 但实际的电子束能量不是均匀的, 均匀度为 95% 左右^[6]。取加速电压为 50 kV , 能量密度为 $7 \sim 17 \text{ J/cm}^2$, 均匀度为 $0.9 \sim 1.0$ 进行研究, 如图 4。图 4 表明均匀度对熔化深度的影响在 $1 \mu\text{m}$ 左右。加速电压 $25 \sim 50 \text{ kV}$ 的数据分析结果均表明: 材料表面瞬间熔化层深随均匀度增加呈线形增加, 最大层深差值约 $1 \mu\text{m}$ 。

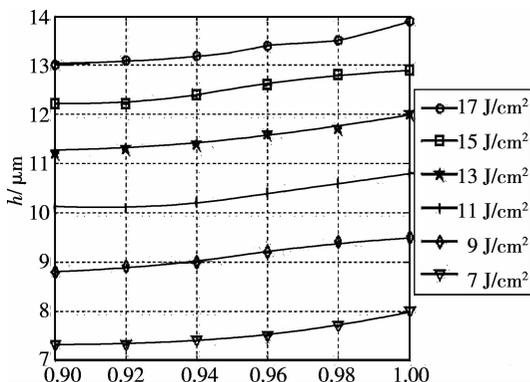


图 4 能量均匀度系数对熔化深度的影响

5 结论与展望

通过数值模拟仿真可以得出以下结论: 加速电压、电子束照射的能量密度以及能量均匀性都会影响材料的熔化深度。

1) 不同的加速电压影响材料的熔化深度, 加速电压从 $25 \sim 50 \text{ kV}$ 变化时, 材料的熔化深度范围在 $2 \sim 3 \mu\text{m}$ 。

2) 电子束的能量密度对材料熔化深度影响最大。相同条件下, 能量密度越大熔化深度越大, 熔化深度与能量密度基本呈线性增函数关系, 在加速电压为 50 kV 和能量密度为 17 J/cm^2 情况下, 材料熔化层深度可以达到 $14 \mu\text{m}$ 。

3) 材料表面的熔化深度随能量呈线性增加, 最大层深差值约 $1 \mu\text{m}$ 。

本研究实验装置正在调试阶段, 分析数据还需要实验验证, 然后作进一步的分析。

参考文献:

[1] 刘志坚, 韩丽君, 江兴流, 等. 45 号钢脉冲电子束熔凝

处理及微结构研究[J]. 航空材料学报, 2005, 25(5): 20-24.

LIU ZHI-JIAN, HAN LI-JUN, JIANG XIN-LIU, et al. Study on microstructures of pulsed electron beam remelted carbon steel 45[J]. Journal of Aeronautical Materials, 2005, 25(5): 20-24.

[2] BONORA L, ANDREI M, EIEZER A, et al. Corrosion behaviour of stressed magnesium alloys[J]. Corrosion Science, 2002, 44(4): 72-97.

[3] GUO X W, DING W J, LU C. Influence of ultrasonic power on the structure and composition of anodizing coatings formed on Mg alloys[J]. Surface and Coatings Technology, 2004, 183(2/3): 359-368.

[4] 张可敏, 邹建新, 杨大智. 316 L 不锈钢强流脉冲电子束表面钛合金化及其耐腐蚀性[J]. 材料热处理学报, 2006, 27(5): 108-110.

ZHANG KE-MIN, ZOU JIAN-XIN, YANG DA-ZHI. Enhancing corrosion resistance of AISI 316L steel surface alloyed with Ti by high current pulsed electron beam [J]. Transactions of Materials and Heat Treatment, 2006, 27(5): 108-110.

[5] NOBUTO Y, HIROSHI N, ARI I. Characteristics of ion beam magnesium oxide films[J]. Thin Solid Film, 2004(447/448): 377-382.

[6] 宇野義幸, 冈田晃, 数下法康, 等. 大面积脉冲电子束对模具的精整与表面改性[J]. 制造技术与机床, 2004(5): 27-31.

YUYE Y X, GUANGTIAN H, SHUXIA F K, et al. Finishing and surface modification of the moulds with large scale pulse electron-beam [J]. Manufacturing Technology & Machine Tool, 2004(5): 27-31.

[7] FRANK H, RENATE W, JANA S. Characteristics of PVD-coatings on AZ31hp magnesium alloys[J]. Surface and Coatings Technology, 2003, 162(2/3): 26-68.

[8] ROTSHEIN V P, IVANOV Y F, PROSKUROVSKY D I, et al. Microstructure of the near surface layers of austenitic stainless steels irradiated with a low-energy, high-current electron beam[J]. Surface and Coatings Technology, 2004(180/181): 382-386.

[8] 李维, 黄保海, 毕仲波. 热应力理论分析及应用[M]. 北京: 中国电力出版社, 2004.

[9] 秦颖. 强流脉冲电子束材料改性机制及数值模拟[D]. 大连: 大连理工大学, 2004.

[10] 中国金属学会. 金属材料物理性能手册[M]. 北京: 冶金工业出版社, 1987: 263-265.

[11] SIEGFRIED S, ULRICH H, SIEGFRIED P, et al. Electron beam technology for short testing of multichip substrates[J]. Electron Beam Technology, 1986(2): 29-42.

2003, 95(1/3):90-96.

- [6] 王中长,刘天模,余龙,等. 高纯纳米 $ZnSnO_3$ 气敏材料的制备及气敏性能[J]. 硅酸盐学报, 2004, 32(12): 1555-1559.

WANG ZHONG-CHANG, LIU TIAN-MO, YU LONG, et al. Preparation and properties of ultra-purity and nanosized $ZnSnO_3$ gas sensitive material[J]. Journal of the Chinese Ceramic Society, 2004, 32(12):1555-1559.

- [7] 王中长,刘天模,利佳,等. 掺杂 $ZnSnO_3$ 气敏特性及实用性研究[J]. 材料科学与工程学报, 2005, 23(1): 56-59.

WANG ZHONG-CHANG, LIU TIAN-MO, LI JIA, et al. Study of gas sensitive properties and practical application of $ZnSnO_3$ by additives [J]. Journal of Materials Science and Engineering, 2005, 23(1): 56-59.

- [8] 徐甲强,高巧欢,王培义,等. 氧化锌/偏锡酸锌复合氧化物的制备与光催化性能[J]. 硅酸盐学报, 2007, 35(6):741-745.

XU JIA-QIANG, GAO QIAO-HUAN, WANG PEI-YI, et al. Preparation and photo catalytic activities of zinc oxide/coupled with zinc stannate composite [J]. Journal of the Chinese Ceramic Society, 2007, 35(6): 741-745.

- [9] 徐甲强,贾晓华,娄向东,等. Zn_2SnO_4 气敏材料的水热合成及其掺杂改性[J]. 传感技术学报, 2005, 18(4): 693-696.

XU JIA-QIANG, JIA XIAO-HUA, LOU XIANG-DONG, et al. Hydrothermal preparation of Zn_2SnO_4 gas sensing materials and its properties modification by doping metal oxide[J]. Chinese Journal of Sensors and Actuators, 2005, 18(4):693-696.

- [10] LU Z G, TANG Y G. Two-step synthesis and ethanol sensing properties of $Zn_2SnO_4-SnO_2$ nanocomposites[J]. Materials Chemistry and Physics, 2005, 92(1):5-9.

- [11] MITSUBAYASHI K, MATSUNAGA H, NISHIO G, et al. Bioelectronics sniffers for ethanol and acetaldehyde in breath air after drinking[J]. Biosensors and Bioelectronics, 2005, 20(8):1573-1579.

- [12] YU J H, CHOI G M. Current-voltage characteristics and selective CO detection of Zn_2SnO_4 and $ZnO/Zn_2SnO_4, SnO_2/Zn_2SnO_4$ layered-type sensors [J]. Sensors and Actuators B, 2001, 72(2):141-148.

- [13] WILLIAM G, COLES G S V. The gas sensing potential of nanocrystalline tin dioxide produced by a laser ablation technique[J]. MRS Bulletin, 1999, 24(6):25-29.

- [14] 李树堂. 晶体 X 射线衍射学基础[M]. 北京:冶金工业出版社, 1990.

- [15] AYGUN S, CANN D. Hydrogen sensitivity of doped CuO/ZnO heterocontact sensors [J]. Sensors and Actuators B, 2005, 106(2):837-842.

- [16] CERDA B J, MANZANO B J, ARBIOL J, et al. Micro machined twin gas sensor for CO and O_2 quantification based on catalytically modified nano- SnO_2 [J]. Sensors and Actuators B, 2006, 114(2):881-892.

- [17] KATSUKI A, FUKUI K. H_2 selective gas sensor based on SnO_2 [J]. Sensors and Actuators, 1998(52): 30-37.

- [18] SANGALETTI L, DEPERO L E, SBERVEGLIERI G, et al. Growth of WO_3 crystals from W-Ti-O thin films [J]. Journal of Crystal Growth, 1999, 199(2): 1240-1244.

(编辑 张 苹)

(上接第 1354 页)

- [12] HAO S Z, GAO B, WU A M, et al. Surface treatment of materials with high current pulsed electron beam [C]//The 5th Pacific Rim International Conference on Advanced Materials and Processing, November 2-5, 2004, Beijing, China. Switzerland: Trans Tech Publications Ltd, 2005:3959-3962.

- [13] 吴爱民. 模具钢电子束表面改性及应用基础研究[D]. 大

连:大连理工大学, 2003.

- [14] ZOU J, QIN Y, DONG C, et al. Numerical simulation of the thermal-mechanical process of high current pulse electron beam treatment[J]. Journal of Vacuum Science and Technology, 2004, 22(3):545-552.

(编辑 张 苹)