

# 强流脉冲电子束诱发温度场及表面熔坑的形成

秦颖<sup>1)</sup> 王晓钢<sup>1)</sup> 董闯<sup>1)</sup> 郝胜智<sup>1)</sup> 刘悦<sup>1)</sup> 邹建新<sup>1)</sup> 吴爱民<sup>1)</sup> 关庆丰<sup>2)</sup>

<sup>1)</sup> 大连理工大学三束材料改性国家重点实验室, 物理系, 大连 116024)

<sup>2)</sup> 吉林大学材料科学与工程学院, 长春 130025)

(2002 年 12 月 23 日收到, 2003 年 3 月 18 日收到修改稿)

在强流脉冲电子束表面改性实验的基础上, 通过数值计算方法对铝和钢的温度场和熔化过程进行模拟, 给出了最先熔化的位置、形成熔孔的最大深度以及表面层下熔化的最大深度. 通过铝和钢的熔化潜热温度补偿的数值模拟结果和实验结果的对比, 揭示了亚表层率先升温及熔化从而通过表层向外喷发的熔坑的形成机制.

关键词: 强流脉冲电子束, 热传导, 数值模拟, 熔孔

PACC: 4180D, 4410, 7920K

## 1. 引言

强脉冲束流轰击固体表面时, 可以在很短时间内在材料表面沉积很高的能量, 形成熔化、汽化、等离子体溅射和应力波、冲击波等物理现象, 从而对材料表面造成特殊的改性作用<sup>[1-3]</sup>, 如形成火山坑状熔坑.

在离子束材料表面改性中, 小的粒子团撞击材料表面能产生从纳米到微米尺寸的熔坑; 单独的快离子撞击而形成的熔坑已经从实验中观察到并且有相关的模拟结果<sup>[4-6]</sup>. 电子束轰击后, 材料表面也会形成熔坑, 但电子的质量和尺寸远比原子小, 其能量不足以在材料表面撞出或烧蚀出熔坑, 其形成机理与离子、粒子团或宏观物体撞击所形成的熔坑机制必然不同. Pogrebnjak<sup>[1]</sup> 等利用卢瑟福背散射 (RBS)、慢正电子束 (SPB) 和正电子寿命的测量以及透射电子显微镜 (TEM) 和扫描电子显微镜 (SEM) 等技术, 对电子束轰击后的铁表面层进行研究, 发现了大量的非平衡空位向表面移动, 空位的密度达到  $10^{-3}$ , 因此在缺陷区域材料的局部密度降低, 并且认为这些低的局部密度区域是熔坑在材料表面形成的根源<sup>[7]</sup>. 但这些缺陷的尺寸比熔坑的尺寸要小几个数量级, 因而我们认为其不是熔坑形成的主要原因.

利用俄罗斯 Nadezhda-2 强流脉冲电子束 (HCPEB) 源, 我们先后进行了大量的实验研究, 如纯铝表面改性<sup>[8]</sup>、对 Ti 离子注入 9Cr18 钢采用强流脉冲电子束进行表面后处理<sup>[9]</sup>、纯铝的电子束表面渗

碳以及对模具钢的表面强化处理等实验研究<sup>[10-12]</sup>. 在实验基础上, 我们对强流脉冲电子束表面改性进行了理论分析和数值模拟. 本文利用强流脉冲电子束轰击铝和钢, 对其表面的熔坑进行 SEM 和 TEM 观察, 在实验的基础上对强流脉冲电子束处理过程的温度场及潜热的温度补偿过程进行数值模拟, 通过实验和数值模拟结果来研究强流脉冲电子束轰击材料表面火山坑状熔坑的形成过程.

## 2. 温度分布的物理模型

入射电子的能量之 90% 都要转化成热能, 使靶极的温度升高. 由热传导理论, 电子束表面处理的热过程可以用含有热源的传热方程和反映与环境相互作用的边界条件来描述.

一维的主导传热方程可以描述为<sup>[13]</sup>

$$\rho c(T) \frac{\partial T(x, t)}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left( k(T) \frac{\partial T(x, t)}{\partial x} \right) + g(x, t) + H. \quad (1)$$

初始条件为

$$T(x, 0) = T_0, \quad (2)$$

边界条件为

$$-k(T) \frac{\partial T(x, t)}{\partial x} \Big|_{x=0, x=l} = 0. \quad (3)$$

(1)~(3) 式中,  $\rho$ ,  $c$ ,  $k$  分别为材料的密度、热容及热导率,  $g(x, t)$  为电子束体内加热单位体积吸收的能量,  $T_0$  为材料的初始温度,  $l$  为工件的厚度,  $H$  为物相变化释放的潜热.

电子束体内加热单位体积吸收的能量  $g(x, t)$  由下式给出<sup>[8,13]</sup>：

$$g(x, t) = \eta_A \frac{U_j}{r} f(x, r) = \eta_A \frac{P(t)}{Sr} f(x, r), \quad (4)$$

式中  $P(t)$  为实测得到的电子束功率,  $S$  为电子束斑的面积,  $x$  是深度坐标,  $r$  是电子射程,  $\eta_A$  是能量吸收系数,  $f(x, r)$  为在垂直入射电子束深度方向上材料吸收的能量分布函数。

一定能量的电子在材料中的射程为<sup>[14]</sup>

$$r \approx 2.1 \cdot 10^{-12} \frac{U^2}{\rho}; \quad 10 \text{ keV} \ll eU \ll 100 \text{ keV}, \quad (5)$$

式中  $U$  是加速电压, 单位为 V;  $\rho$  是材料的密度, 单位为  $\text{g}/\text{cm}^3$ ;  $r$  是电子射程, 单位为 cm。

在电子射程内材料吸收的能量分布是不均匀的, 单位体积吸收能量随深度  $x$  的分布函数<sup>[14]</sup>如下式所示：

$$f(x, r) = 1 - \frac{9}{4} \left( \frac{x}{r} - \frac{1}{3} \right)^2. \quad (6)$$

图 1 中的两条曲线分别是平均能量为 27 keV 的脉冲电子束轰击铝及钢靶后单位体积吸收能量的分布函数, 沉积的能量在最大射程的 1/3 处达到最大值, 然后单调地下降到零。其中铝的射程为  $6 \mu\text{m}$ , 钢的射程为  $2 \mu\text{m}$ 。

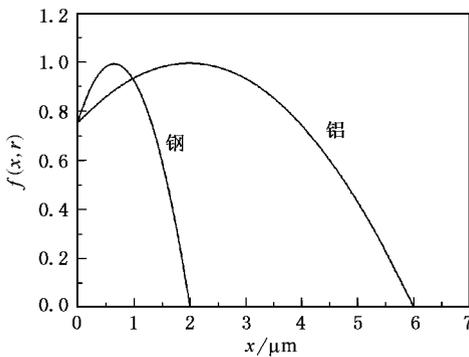


图 1 铝和钢单位体积吸收能量的分布函数 平均能量为 27 keV

在模拟计算中, 材料的热传导系数  $k$  和热容  $c$ , 在不同物相下均采用随温度变化的函数, 将物相变化释放的潜热  $H$  折算成温度的补偿值, 然后再与节点温度分步进行叠加。单位体积的金属在相变阶段由于潜热的吸收或释放而引起的温度补偿值为  $\Delta T = H/c$ 。

令

$$a = k/\rho c, \quad (7)$$

式中  $a$  被称为热扩散率或导温系数, 它是介质的导热系数与其热容量之比。导热系数反映的是介质传导热量的能力, 热容量  $\rho c$  指的是单位体积的介质温度升高一度所需要的热量, 也就是介质储存热量能力的大小。显然,  $a$  值大意味着介质传导热量的能力要强于储存热量的能力, 即热量在传导过程中, 被沿途介质吸收而用于温度升高的量很少, 余下的大部分热量可向介质内部继续以热传导的方式传递, 结果使得各点温度在较短的时间里就会趋于一致。在常温下的铝、碳钢(0.5% C)、铬钢(5% Cr)的导温系数如表 1 所示<sup>[15,16]</sup>。

表 1 材料的导温系数

材料	导温系数/ $\text{m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$
铝	0.00010
碳钢	0.000014
铬钢	0.000010

由常温下的计算结果可以看出, 铝的导温系数约比钢的导温系数高一个数量级, 这可以用来解释上面的数值计算结果。碳钢的导温系数比铬钢的导温系数稍高一些, 这是由于随着合金元素含量的增加, 钢的导热系数降低。下面数值模拟中的导温系数采用的是铬钢的导温系数数值, 这是因为我们实验中所采用的样品大多为含铬量较高的钢。

### 3. 数值模拟结果

图 2、图 3 分别为电子束能量为 28 keV (电子束沉积能量为  $4 \text{ J}/\text{cm}^2$ )、脉冲半高宽度为  $0.8 \mu\text{s}$ , 轰击

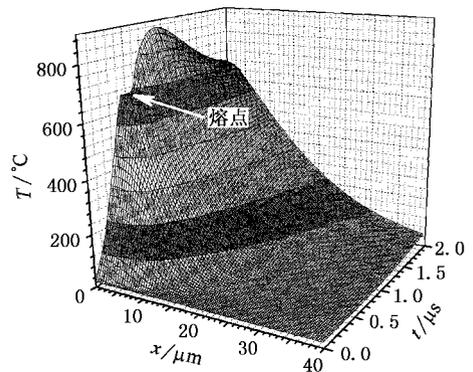


图 2  $0.8 \mu\text{s}$   $4 \text{ J}/\text{cm}^2$  电子束辐照后铝靶的温度分布及其演变

铝靶、钢靶后试样内部深度为 0—40  $\mu\text{m}$ 、时间为 0—2  $\mu\text{s}$  的温度分布全貌图。图 2、图 3 中平台分别为铝和钢的液固两相区，铝的熔点为 660 $^{\circ}\text{C}$ ，钢的熔点为 1537 $^{\circ}\text{C}$ 。通过比较，可以清楚地看到铝的温度影响区远大于钢的，这是由于两种材料的导温系数和电子的射程差异造成的。

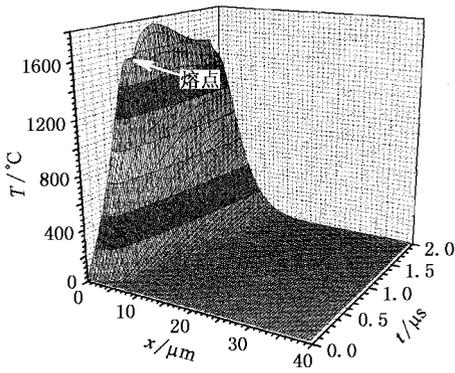


图 3 0.8  $\mu\text{s}$   $4 \text{ J}/\text{cm}^2$  电子束辐照后钢靶的温度分布及其演变

为了看清熔化的细节，更详细地了解熔化的全过程，将温度补偿值 ( $\Delta T$ ) 的数值模拟结果输出，画出熔化和凝固过程温度补偿值随深度和时间分布的等高线图，如图 4、图 5 所示。

由固液相变潜热计算出的纯铝的温度补偿值  $\Delta T$  为 328 $^{\circ}\text{C}$ ，小于 0 $^{\circ}\text{C}$  时熔化没有发生，因此为固相区。在 0 至 328 $^{\circ}\text{C}$  之间，则开始部分熔化，为固液两相区，温度为恒定的熔点。超过 328 $^{\circ}\text{C}$  时，固液相变结束，进入液相区，温度开始上升。

图 4 (b) 为图 4 (a) 的局部放大图，而图 4 (c) 又是图 4 (b) 的局部放大图。由图 4 可以看出，在脉冲作用时间超过 0.45  $\mu\text{s}$  后，表面 0.7  $\mu\text{m}$  附近达到熔点，此时进入熔化潜热储存阶段即温度补偿阶段，带箭头的曲线表示温度补偿最快的位置。由箭头所示，首先超过 328 $^{\circ}\text{C}$  的位置即首先突破熔点 660 $^{\circ}\text{C}$  完成固态到液态转变的位置大约在 1.32  $\mu\text{m}$ ，时间大约为 0.58  $\mu\text{s}$ ，而此时外表面基本上还处于固相区。随后温度迅速升高，当时间超过 0.6  $\mu\text{s}$  时，表面完全熔化。由于熔体膨胀，熔体将从次表层通过表层向外喷射，类似于火山喷发机制。此时的熔化深度为 2.44  $\mu\text{m}$ ，即为熔坑的最大深度。在整个脉冲时间内，表面层下熔化的最大深度约为 4.46  $\mu\text{m}$ ，如图 4 (a) 所示。

钢的温度补偿值  $\Delta T$  为 348 $^{\circ}\text{C}$ 。由图 5 可以看出，脉冲作用时间超过 0.6  $\mu\text{s}$  后，表面 0.15  $\mu\text{m}$  附近达到熔点，首先超过 348 $^{\circ}\text{C}$  的位置即首先突破熔点 1537 $^{\circ}\text{C}$ 。完成固态到液态转变的位置大约在 0.22  $\mu\text{m}$ ，时间大约为 0.67  $\mu\text{s}$ ，当时间超过 0.72  $\mu\text{s}$  时，表

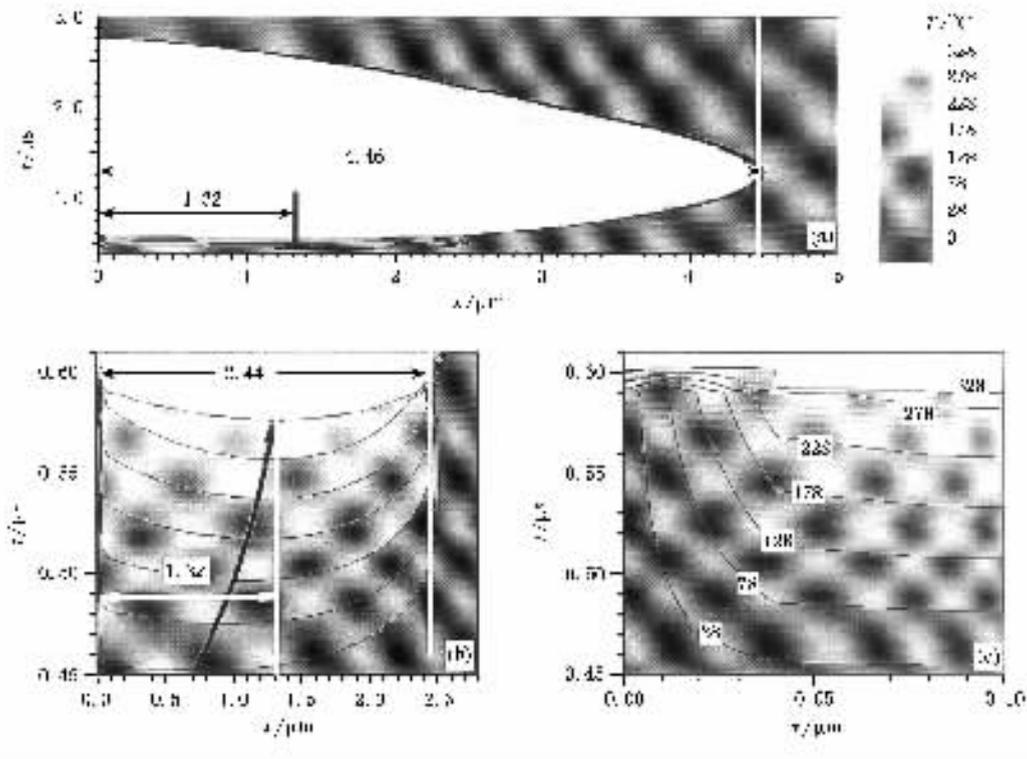


图 4 铝的熔化和凝固过程潜热补偿温度随深度和时间分布的等高线图

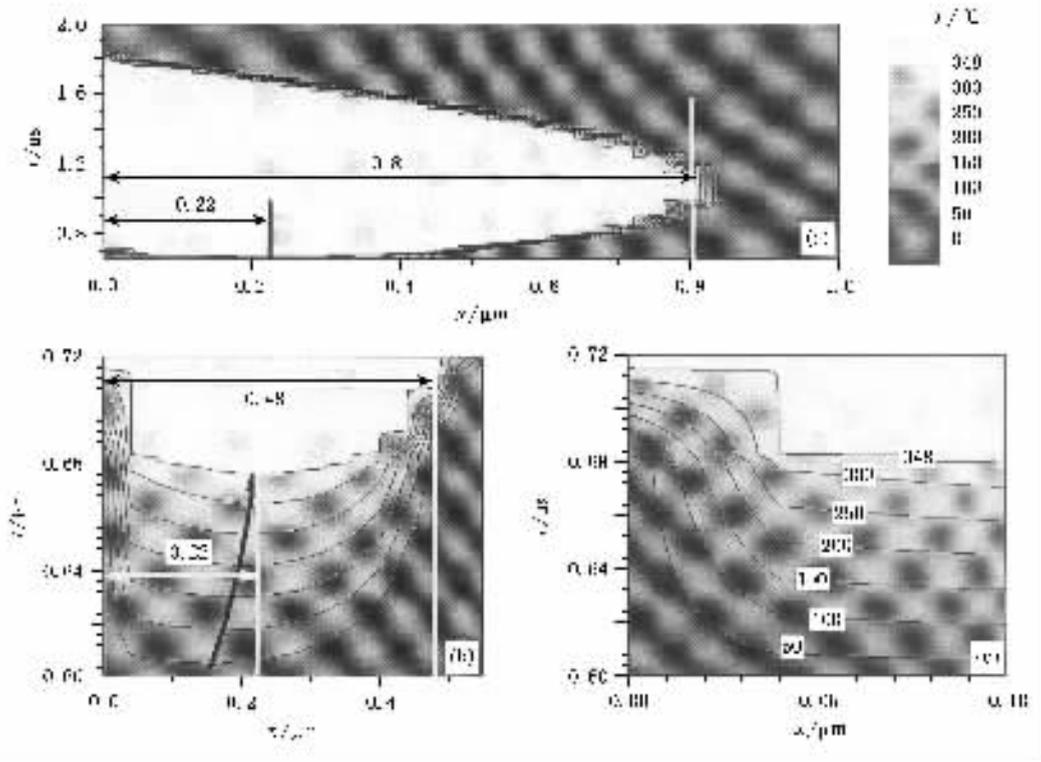


图5 钢的熔化和凝固过程潜热补偿温度随深度和时间分布的等高线图

面完全熔化,熔坑的最大深度为  $0.48 \mu\text{m}$ . 在整个脉冲时间内,表面层下熔化的最大深度约为  $0.8 \mu\text{m}$ ,如图 5(a)所示.

将上面的计算结果列成表格(表 2),从表 2 可以清楚地看到,在相同的电子束轰击条件下,铝最先熔化的位置、形成熔坑的最大深度以及表面层下熔化的最大深度均比钢深,这也是由于两种材料的导热系数和电子的射程不同造成的. 以上的数值模拟结果可以用来解释实验中观察到的表面熔坑的产生过程.

表 2 数值计算结果

	铝	钢
首先进入熔点的位置/ $\mu\text{m}$	0.7	0.15
首先完全熔化的位置/ $\mu\text{m}$	1.32	0.22
熔孔的最大深度/ $\mu\text{m}$	2.44	0.48
熔化的最大深度/ $\mu\text{m}$	4.46	0.8

一维的热传导方程是在假定电子束截面分布均匀并且材料的结构和物性也均匀的情况下给出的. 由于实际电子束的截面功率密度分布并不完全均匀<sup>[2,17]</sup>,材料的结构和物性也不可能完全均匀<sup>[2]</sup>,导致亚表层不同位置的能量吸收并不完全一致,因而会出现局部位置首先熔化,在材料表面形成火山坑

状熔坑. 通过一维温度场的计算,可以大致了解材料近表面层纵向的温度分布情况,估计形成火山坑状熔坑的大致深度. 而熔坑的形状、密度和横向尺寸只能通过实验来观察.

## 4. 实验结果

在相同的电子束轰击条件下,对不同材料,其表面形成的熔坑的形状、密度和尺寸是不同的. 图 6、图 7 分别是电子束能量为  $28 \text{ keV}$ ,脉冲半高宽度为  $0.8 \mu\text{s}$  轰击单晶铝 5 次和 T8 钢 10 次后的 SEM 照片. 如果用熔体从次表层通过表层向外喷射来解释表面熔坑的产生过程,图 6 的箭头所示喷发更激烈,应为深层次的喷发,这与前面的数值计算结果相符合. 图 7 中箭头所示为多次轰击新形成的熔坑,由于材料内部的缺陷(原来的和轰击后新形成的)使得材料横截面上的温度分布并不均匀,正是由于亚表层首先熔化和缺陷的辅助作用,使得电子束轰击后材料表面形成大量类似于火山坑的熔坑. 我们的实验观察发现,对于同种材料,随着轰击次数的增加熔坑的数量也会增多.

为了更进一步证明熔坑形成机制,我们试图测出熔坑的深度. 图 8、图 9 分别是铝、1Cr18Ni9Ti 钢

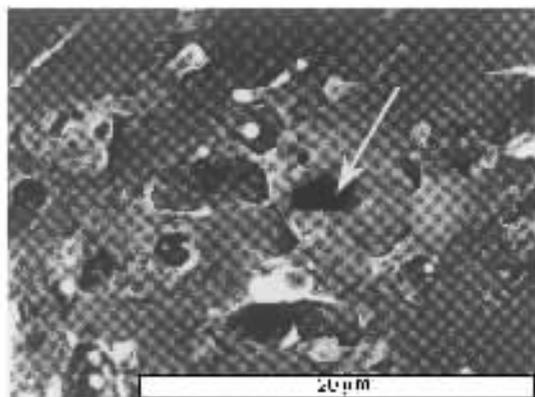


图 6 单晶铝 5 次轰击后表面火山坑状的熔坑

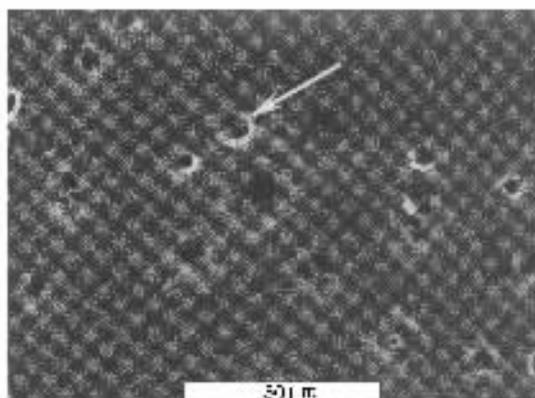


图 7 T8 钢 10 次轰击后表面火山坑状的熔坑

时的状态,因而在材料表面形成了类似于火山坑的熔坑.

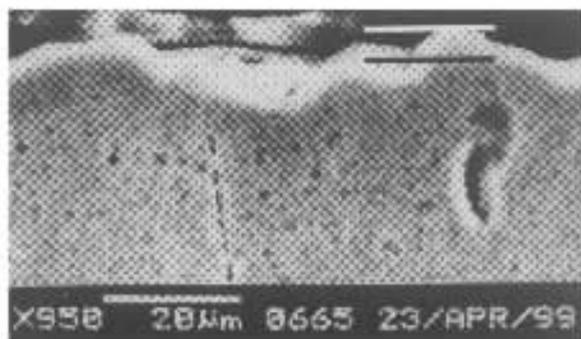


图 8 纯铝 5 次轰击后试样截面的 SEM 典型形貌

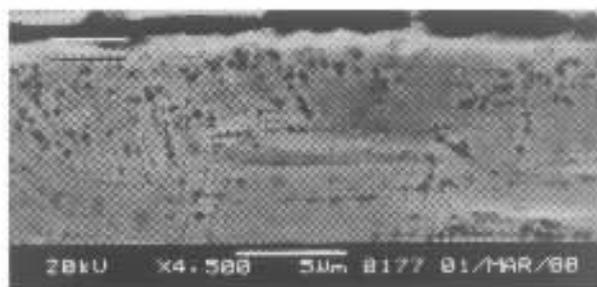


图 9 1Cr18Ni9Ti 4 次轰击后试样截面的 SEM 典型形貌

的截面 SEM 图.由图中白亮的熔化层上表面的凸凹不平,可以估计出熔坑的深度和熔化层的深度.从图 8 中画出的两条平行线之间,可以看出铝的熔坑深度大约为  $3 \mu\text{m}$ ,熔化层的深度大约为  $5 \mu\text{m}$ .而从图 9 中画出的两条平行线之间,可以看出钢的熔坑深度大约为  $0.5 \mu\text{m}$ ,熔化层的深度大约为  $1 \mu\text{m}$ .比较图 8、图 9 可以看出,铝的熔化深度远大于钢的熔化深度,这与前面的计算结果相符.这进一步证明了电子束轰击后试样表层首先开始熔化,内部的熔化使得体积迅速膨胀,因此导致材料表面产生类似于火山似的喷发,随后表面从内向外经历速率为  $10^8\text{—}10^9 \text{ K/s}$  的冷却过程,冷却速率之快,使得表面尚未恢复原态时就已固化.故记录下材料表面熔融

## 5. 结 论

通过强流脉冲电子束表面改性过程中温度场的数值模拟结果,分析了在相同的电子束轰击条件下,铝和钢表面的温度场与其导热系数和电子的射程有关.利用固液相变潜热的温度补偿过程,给出铝和钢最先熔化的位置分别为  $1.32$  和  $0.22 \mu\text{m}$ ,形成熔坑的最大深度分别为  $2.44$  和  $0.48 \mu\text{m}$  以及表面层下熔化的最大深度分别为  $4.46$  和  $0.8 \mu\text{m}$ ,这与实验结果十分相符:铝的熔坑深度大约为  $3 \mu\text{m}$ ,钢的熔坑深度大约为  $0.5 \mu\text{m}$ ,且铝的喷发比钢更为激烈,从而解释了表面火山坑状熔坑的形成机制.



- [ 1 ] Pogrebnjak A D *et al* 1998 *Nucl. Instr. Meth. B* **145** 373
- [ 2 ] Pogrebnjak A D *et al* 2000 *Surf. Coat. Technol.* **125** 49
- [ 3 ] Zheng R L, Chen H, Liu J 2002 *Acta Phys. Sin.* **51** 554 ( in Chinese ) [ 郑瑞伦、陈洪、刘俊 2002 物理学报 **51** 554 ]
- [ 4 ] Shulov V A *et al* 1999 *Nucl. Instr. Meth. B* **148** 154
- [ 5 ] Wood B P *et al* 1998 *Surf. Coat. Technol.* **108** – **109** 171
- [ 6 ] Ralf A, Herbert M 2000 *Nucl. Instr. Meth. B* **164** – **165** 697
- [ 7 ] Pogrebnjak A D *et al* 1998 *Phys. Lett. A* **241** 357
- [ 8 ] Hao S Z *et al* 2000 *J. Korean Vac. Sci.* **9** 172
- [ 9 ] Liu Z M *et al* 2000 *Nucl. Techniq.* **23** 447 ( in Chinese ) [ 刘振民等 2000 核技术 **23** 447 ]
- [ 10 ] Hao S Z *et al* 2001 *Current Applied Phys.* **1** 203
- [ 11 ] Dong C *et al* 2003 *Surf. Coat. Technol.* **163** – **164** 620
- [ 12 ] Wu A M *et al* 2002 *Nucl. Techniq.* **25** 608 ( in Chinese ) [ 吴爱民等 2002 核技术 **25** 608 ]
- [ 13 ] Proskurovsky D L 1998 *J. Vac. Sci. Technol. A* **16** 2480
- [ 14 ] Siegfried S *et al* 1982 *Electron Beam Technology* ( New York, Chichester, Brisbane, Toronto, Singapore : John Wiley & Sons ) p29
- [ 15 ] Metals Research Association of China 1987 *Handbook of Physical Properties of Metallic Materials* ( Beijing : Metallurgical Industry Press ) Vol. 1 p 263 ( in Chinese ) [ 中国金属学会 1987 金属材料物理性能手册 ( 第一册 ) 北京 冶金工业出版社 第 263 页 ]
- [ 16 ] Zhu G J 1989 *Engineering Heat and Mass Transfer* ( Beijing : Aviation Industry Press ) p571 ( in Chinese ) [ 朱谷君 1989 工程传热传质学 ( 北京 航空工业出版社 ) 第 571 页 ]
- [ 17 ] Xie G F, Wang D W, Ying C T 2002 *Acta Phys. Sin.* **51** 584 ( in Chinese ) [ 谢国锋、王德武、应纯同 2002 物理学报 **51** 584 ]

## Temperature field and formation of crater on the surface induced by high current pulsed electron beam bombardment

Qin Ying<sup>1)</sup> Wang Xiao-Gang<sup>1)</sup> Dong Chuang<sup>1)</sup> Hao Sheng-Zhi<sup>1)</sup> Liu Yue<sup>1)</sup>  
Zou Jian-Xin<sup>1)</sup> Wu Ai-Min<sup>1)</sup> Guan Qing-Feng<sup>2)</sup>

<sup>1)</sup> State Key Laboratory for Materials Modification by Laser, Ion and Electron Beams, Department of Physics, Dalian University of Technology, Dalian 116024, China

<sup>2)</sup> Department of Materials Science and Engineering, Jilin University, Changchun 130025, China

( Received 23 December 2002 ; revised manuscript received 18 March 2003 )

### Abstract

The present paper aims at revealing the formation mechanism of craters on the surface of metals produced by the bombardment of a high-current pulsed electron beam. Based on experimental investigations and a physical model, the temperature field and melting process are simulated for Al and two kinds of steels. The starting melting positions, largest crater depths, and melting layer thicknesses are obtained, which agree satisfactorily with experimentally observed values. It is confirmed that temperature rises faster at a sublayer instead of on the extreme surface due to the maximum energy deposition located at about 1/3 of the total penetration depth of the beam. Such a special sublayer heating and melting mode causes eruptions of the sublayer liquid through the outer surface and produces the typical surface crater morphology.

**Keywords** : high current pulsed electron beams ( HCPEB ), heat conduction, numerical simulation, crater

**PACC** : 4180D, 4410, 7920K