

烧蚀对强脉冲离子束在高分子材料中 能量沉积的影响*

张世健¹⁾²⁾³⁾⁴⁾ 喻晓¹⁾²⁾³⁾ 钟昊玟¹⁾²⁾³⁾ 梁国营¹⁾²⁾³⁾ 许莫非¹⁾²⁾³⁾
张楠¹⁾²⁾³⁾ 任建慧¹⁾²⁾³⁾ 匡仕成¹⁾²⁾³⁾ 颜莎⁵⁾
Gennady Efimovich Remnev¹⁾⁴⁾ 乐小云^{1)2)3)†}

1) (北京航空航天大学物理学院, 北京 100191)

2) (北京航空航天大学, 大数据精准医疗高精尖创新中心, 北京 100191)

3) (北京航空航天大学, 先进核能材料与物理北京市重点实验室, 北京 100191)

4) (托木斯克理工大学, 托木斯克 634050, 俄罗斯)

5) (北京大学重离子物理研究所, 北京 100871)

(2020年2月12日收到; 2020年3月23日收到修改稿)

高能量密度纳秒量级强脉冲离子束辐照材料表面的烧蚀产物和束流的相互作用, 可能对束流在靶中的能量沉积产生影响, 进而影响烧蚀情况下的束流分析和相关应用的优化. 本文采用红外成像方法对横截面能量密度 $1.5\text{--}1.8\text{ J/cm}^2$ 的强脉冲离子束在 304 不锈钢和高分子材料上的能量沉积进行了测量分析. 结果表明在材料上, 在超过一定能量密度后, 束流引发材料表面烧蚀产物的屏蔽效应使得大部分束流能量不能沉积在靶上. 采用有限元方法对束流引发的温度场分布进行了计算, 验证了高分子材料的低热导率以及低分解温度使其在脉冲辐照早期即开始热解, 烧蚀产物对后续束流能量的进一步沉积产生屏蔽. 此类效应在金属上存在的可能性和对束流诊断等应用的影响, 亦进行了讨论.

关键词: 强脉冲离子束, 烧蚀, 能量沉积, 屏蔽

PACS: 52.59.-f, 79.20.Rf, 61.41.+e

DOI: 10.7498/aps.69.20200212

1 引言

强脉冲离子束 (intense pulsed ion beam, IPIB) 源于 20 世纪 60 年代对惯性约束核聚变 (inertial confinement fusion, ICF) 点火技术的研究^[1]. 当 IPIB 作用于材料表面时, 能够在材料表面微米尺度深度内形成极高的功率密度沉积, 导致材料表面温度剧烈地上升和下降, 伴随产生快速熔化、汽化、重凝. 在这个过程中, 材料表面的硬度和

韧性等参数能够得到显著提高^[2,3]. IPIB 的这种特性使其在材料处理及表面改性方面获得应用并展现出良好的发展前景^[4,5].

当 IPIB 能量密度较高时, 靶表面在剧烈的辐照热效应下会产生烧蚀等离子体并对外扩散^[6,7]. 利用 IPIB 产生的烧蚀等离子体可以以较高的沉积速率进行薄膜制备^[8,9]. 在一定反应气体条件下, 利用 IPIB 产生的烧蚀等离子体可以制备纳米粉末^[10,11]. 在束流辐照过程中, 烧蚀产物可能与束流发生相互作用从而对束流的能量沉积产生影响. 尤其是束流

* 国家自然科学基金 (批准号: 11175012) 资助的课题.

† 通信作者. E-mail: xyle@buaa.edu.cn

中的离子可能被烧蚀产物阻止,使其能量耗散在烧蚀产物中而不能充分沉积在靶上,即烧蚀产物可以对离子在靶上的能量沉积产生屏蔽.这对较高能量密度下束流的诊断和在烧蚀条件下束流辐照效应的分析,都会产生影响.以往的研究对 IPIB 烧蚀效应的探索主要集中在对烧蚀质量损失和烧蚀产物的研究上^[12-14],在这些研究中,辐照材料主要为金属,烧蚀效应相对较弱,烧蚀产物密度较低,对束流的屏蔽效应并不明显.而在采用 IPIB 对高分子材料进行的改性研究中,由于靶材导热率和分解温度均较低,在较弱的束流辐照下靶材表面即可能产生烧蚀,并和束流相互作用对其能量沉积产生影响.故在有较为稠密烧蚀产物的情况下,研究辐照过程中烧蚀产物和束的相互作用对于认识辐照参数、理解辐照机制具有重要的意义.

本文选用具有较低的热导率以及较低的分解温度的高分子材料聚碳酸酯 (polycarbonate, PC)、聚氯乙烯 (Polyvinyl chloride, PVC)、聚甲基丙烯酸甲酯 (polymethyl methacrylate, PMMA) 作为靶材,选用 304 不锈钢作为对比材料研究了较为稠密的烧蚀产物对 IPIB 在靶上能量沉积的影响.为了对于烧蚀的程度进行预测,采用蒙特卡罗和有限元方法对辐照产生的温度场分布进行了计算,并结合实验数据进行了分析.

2 实验

IPIB 辐照实验在北京航空航天大学物理学院 BIPPAB-450 强脉冲粒子加速器上进行.该加速器加速电压最高达 450 kV,最大束流密度 150 A/cm²,束流横截面能量密度达 1.8 J/cm²,脉冲长度(半高宽)约 80 ns. IPIB 通过磁绝缘二极管产生,离子成分为 70% 的 H⁺和 30% 的 Cⁿ⁺,为了提高束流密度,采用 15 cm 的圆锥型铜束流器辅助束流聚焦.

烧蚀实验选用尺寸分别为 150 mm × 150 mm × 0.125 mm, 150 mm × 150 mm × 0.15 mm, 150 mm × 150 mm × 0.25 mm 和 150 mm × 150 mm × 0.1 mm 的 PC, PVC, PMMA 和 304 不锈钢作为靶材.靶材垂直于束流的传输方向放置于聚束铜罩的出口. IPIB 在靶材上形成的热斑通过机械臂控制的 FLUKE Ti25 红外相机在脉冲发射后 0.1 s 内获得,并由此计算束流沉积于靶上的横截面能量密度分布^[15].

3 模拟

为了计算 IPIB 辐照材料产生的热场分布,采用傅里叶传热方程描述 IPIB 辐照材料引发的热场分布:

$$\rho(T)C(T)\frac{\partial T}{\partial t} = \lambda(T)\nabla^2 T + P, \quad (1)$$

其中 $\rho(T)$, $C(T)$, $\lambda(T)$ 分别代表材料的密度,比热容和热导率; P 为热源,即 IPIB 在材料中产生的功率密度分布^[16].

$$P(x, y, z, t) = U(x, y) \cdot d(z) \cdot g(t), \quad (2)$$

其中 $U(x, y)$ 为离子束横截面能量密度分布,可通过红外成像或量热器获得; $d(z)$ 为将离子阻止本领 $dE/dz(z)$ 深度归一化的离子能损分布函数,表征 IPIB 能量沉积沿深度的概率密度分布; $g(t)$ 为时间归一化的 IPIB 功率演化函数,表征 IPIB 能量沉积随时间的概率密度分布.

初始条件为

$$T(z, 0) = T_0, \quad (3)$$

其中 T_0 为靶的初始温度,取环境温度 298 K.

对于边界条件,取斯特藩-玻尔兹曼边界条件

$$j = \varepsilon\sigma(T^4 - T_0^4), \quad (4)$$

其中 j 为辐射功率密度通量, ε 为材料辐射系数, σ 为斯特藩-玻尔兹曼常数, T 为靶表面的温度, T_0 为环境温度.

4 结果与讨论

离子束二极管采用几何聚焦,同时采用锥形聚束器对束流横向分布进行约束以提高束流密度^[17].

图 1 为 IPIB 辐照前后 304 不锈钢和高分子材料背面温度分布图.束流在不锈钢上产生的热斑近似圆形,而且束流辐照区域和未辐照区域存在较为清晰的边界,如图 1(b) 所示.根据不锈钢上的热斑,束流中心区域能量密度最高,但对于高分子材料,如图 1(c)—图 1(e) 所示,束斑中心区域存在较为明显的低温区域,即在束流能量较高的位置,沉积的能量密度反而较低.

图 2 为 IPIB 在 304 不锈钢和高分子材料上束流中心部位横截面能量密度分布.根据温度变化的范围可知, IPIB 在不锈钢和高分子材料上产生的能量沉积区域是近似的,但是当能量密度超过一定

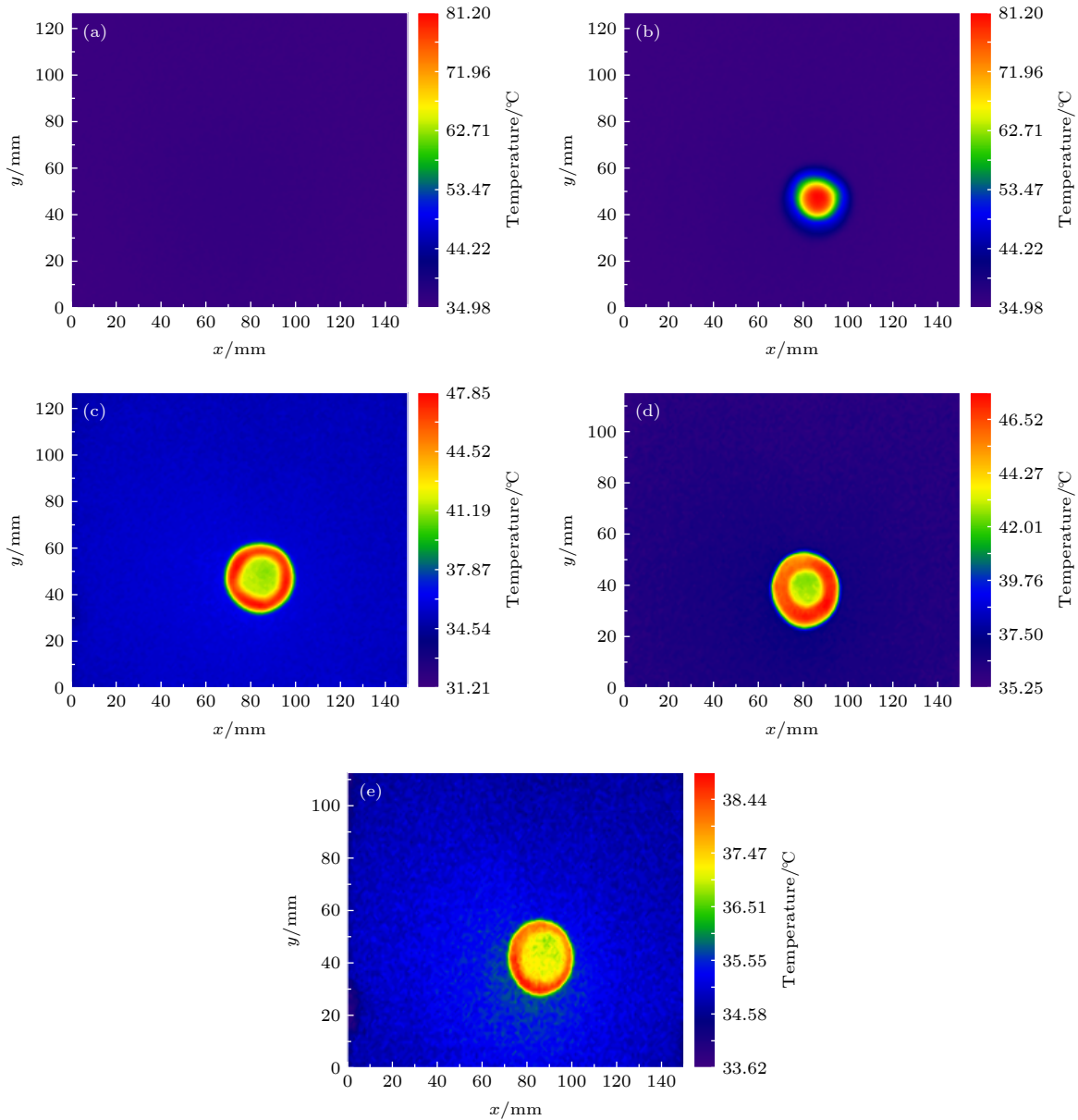


图 1 IPIB 辐照前后靶背面温度分布图 (a) 辐照前 304 不锈钢; (b) 辐照后 304 不锈钢; (c) 辐照后 PC; (d) 辐照后 PVC; (e) 辐照后 PMMA

Fig. 1. Distribution of temperature on rear face before and after IPIB irradiation: (a) 304 stainless steel, before irradiation; (b) 304 stainless steel, after irradiation; (c) PC, after irradiation; (d) PVC, after irradiation; (e) PMMA, after irradiation.

阈值之后, 在 高分子材料上, 沉积能量密度会产生明显的下降, 且随着束流能量密度的提高, 沉积能量的下降更为显著. 如图 2(b) 所示, 当能量密度大于 0.28 J/cm^2 时, IPIB 沉积在 PC 上的能量密度开始明显降低, 直到束流焦点位置, 能量沉积降低至 0.16 J/cm^2 . 对于 PVC 和 PMMC, 束流密度在不超过 0.2 J/cm^2 时会引发类似效应, 如图 2(c)—图 2(d) 所示.

为了更准确地分析出现这种现象的原因, 使用有限元方法对 IPIB 辐照材料产生的热场分布

进行分析. 图 3 为 IPIB 辐照 304 不锈钢和 PC 产生的功率密度, 由于离子射程的差异, 能量密度为 1 J/cm^2 的 IPIB 辐照与 304 不锈钢和 PC 表面产生的最大功率密度分别为 1.7×10^{17} 和 $6.6 \times 10^{16} \text{ W/m}^3$. 以现有参数对 PC 进行热场模拟, 如图 4(a) 所示, 在能量密度为 1 J/cm^2 的 IPIB 辐照下, 其表面数微米深度内在脉冲前期约 100 ns 时已达到热解温度 (约 580 K)^[18–20], 这意味着在束流能量沉积的初期, 材料表面区域会发生剧烈的烧蚀, 表面数微米深度范围内都会由于烧蚀而脱离材

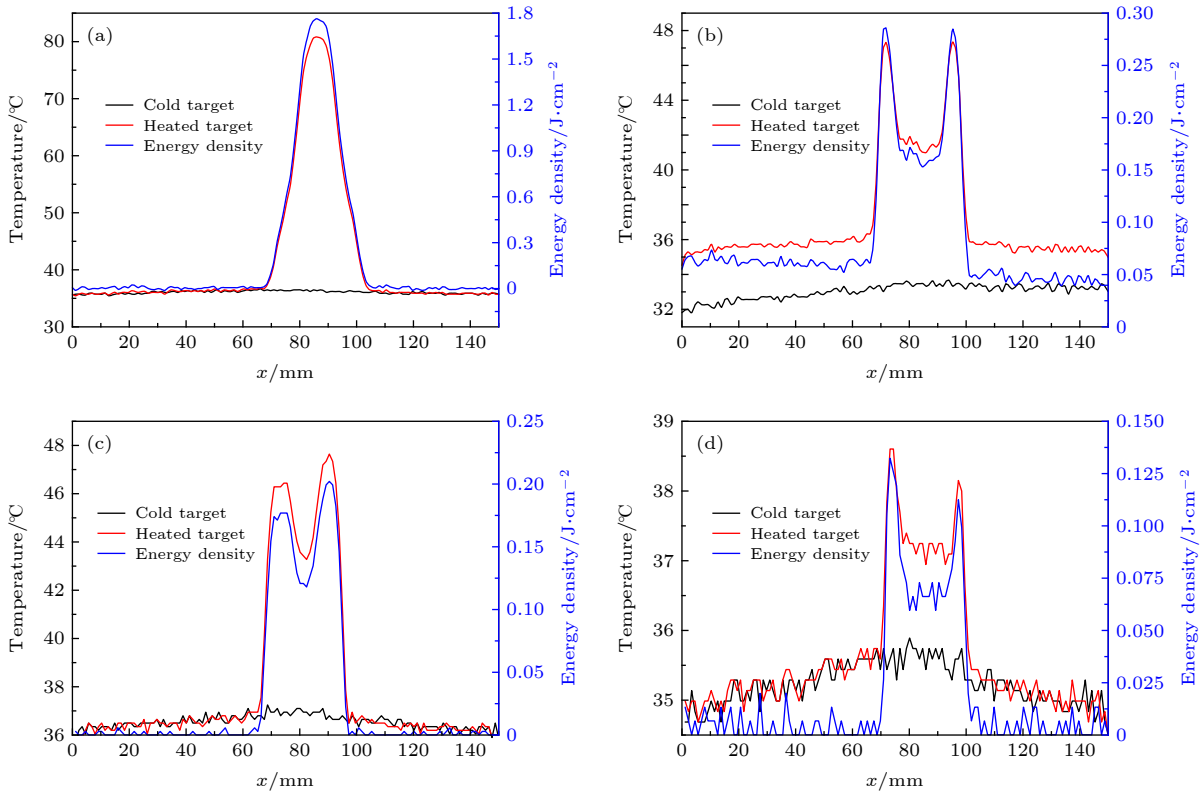


图 2 沿 x 方向能量密度分布图 (a) 304 不锈钢; (b) PC; (c) PVC; (d) PMMA

Fig. 2. Distribution of energy density along x direction: (a) 304 stainless steel; (b) PC; (c) PVC; (d) PMMA.

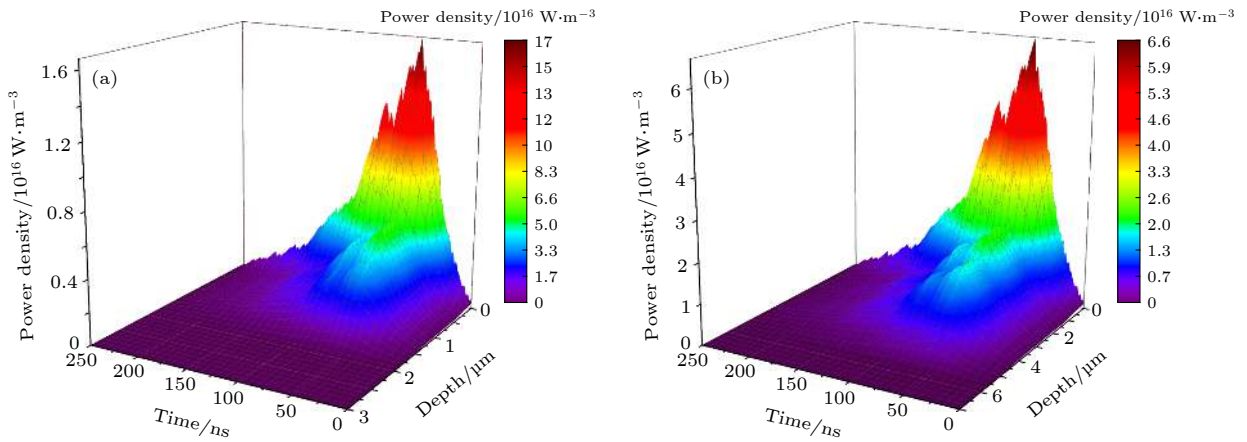


图 3 能量密度为 1 J/cm^2 的 IPIB 产生的功率密度 (a) 304 不锈钢; (b) PC

Fig. 3. IPIB power density distribution with cross-sectional energy density 1 J/cm^2 in (a) 304 stainless steel; (b) PC.

料表面,使得烧蚀产物足够稠密,可以屏蔽束流中后续的离子,从而对束流的能量沉积产生显著影响.对于更高能量密度的 IPIB,材料发生烧蚀的时间更早,程度也更强烈,产生的对能量的屏蔽效应也更明显,因此在能量密度更高的辐照中心区域沉积在材料上的能量反而更少,如图 2(b)—图 2(d) 所示.由于 PC 的热导率很低,束流辐照会产生急速的温度上升,且在表面达到最高温度之后,温度

降低的速率很小,会有利于烧蚀的产生.对于该能量密度的 IPIB 产生的温度场,如图 4(b) 所示,在 304 不锈钢上最高的温度约为 1800 K,由于该温度显著低于沸点,可以认为没有剧烈的烧蚀产生,不会发生能量屏蔽现象,如图 2(a) 所示.由于 304 不锈钢的热导率较高,在达到温度峰值之后,热场向靶内部扩展,并使近表面区域温度降低的速率显著高于 PC,进一步降低了烧蚀发生的可能性.

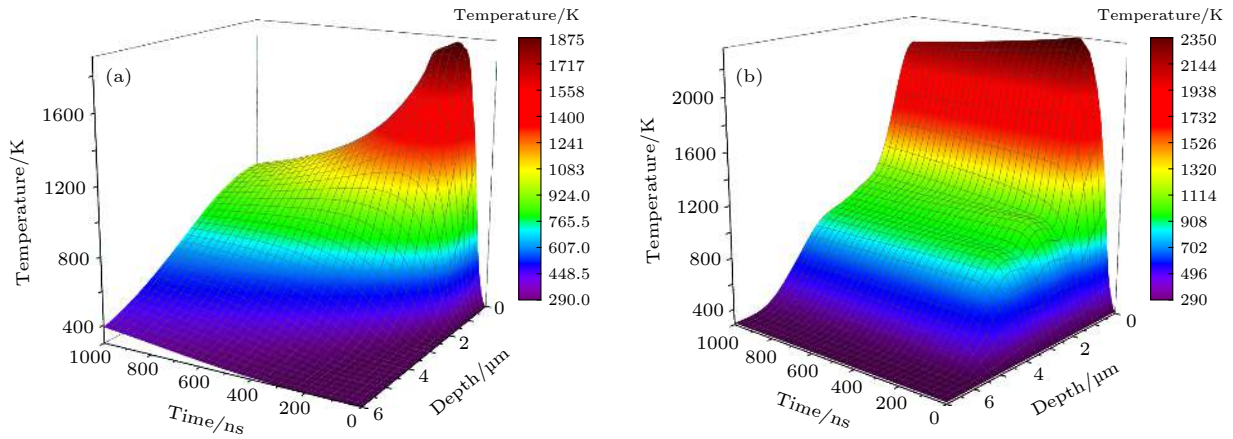
图4 1 J/cm²的IPIB作用下的热场变化 (a) 304 不锈钢; (b) PC

Fig. 4. Thermal field distribution after irradiation of IPIB with cross-sectional energy density of 1 J/cm² in (a) 304 stainless steel; (b) PC.

5 结 论

为了研究烧蚀过程对 IPIB 能量沉积的影响, 使用高分子材料和 304 不锈钢作为靶材, 通过红外成像系统测量 IPIB 在靶上的能量密度沉积分布, 对存在烧蚀情况下束流的能量沉积进行了实验和理论上的分析. 研究表明, 高分子材料的低热导率使其在接受 IPIB 辐照时在近表面区域快速升温, 较低的分解温度使其在 IPIB 脉冲的初级阶段发生较为剧烈的烧蚀, 烧蚀产物会在高分子材料的表面形成一个屏障对束流中的后续离子产生阻止作用. 当束流能量密度提高时, 由于烧蚀更加剧烈, 束流能量的屏蔽效应更加显著. 在束流能量密度较高时, 在金属等材料表面也有可能产生类似的效应. 这种烧蚀屏蔽效应的存在, 使得束流能量较强, 足以在辐照初期形成稠密烧蚀产物影响能量沉积的情况下的束流能量沉积的分析存在困难, 基于量热原理的方法可能会产生较大的误差, 分析烧蚀过程相关参数或分析束流的等离子体参数可能是束流参数表征的重要补充.

参考文献

- [1] Humphries S J 1980 *Nucl. Fusion* **20** 1549
- [2] Le X Y, Zhao W J, Yan S, Han B X 2001 *Curr. Appl. Phys.* **1** 219
- [3] Shulov V A, Nochovnaya N A, Remnev G E, Pellerin F, Monge-Cadet P 1998 *Surf. Coat. Technol.* **99** 74
- [4] Remnev G E, Isakov I F, Opekounov M S, Matvienko V M, Ryzhkov V A, Struts V K, Grushin I I, Zakoutayev A N, Potyomkin A V, Tarbokov V A, Pushkaryov A N, Kutuzov V L, Ovsyannikov M Y 1999 *Surf. Coat. Technol.* **114** 206
- [5] Zhao W J, Remnev G E, Yan S, Opekounov M S, Le X Y, Matvienko V M, Han B X, Xue J M, Wang Y G 2000 *Rev. Sci. Instrum.* **71** 1045
- [6] Tan C 2006 *Ph.D. Dissertation (Dalian: Dalian University of Technology)* (in Chinese) [谭畅 2006 博士学位论文 (大连: 大连理工大学)]
- [7] Gong Y, Liu J Y, Wang X G, Liu Y, Ma T C, Wu D 2007 *Acta Phys. Sin.* **56** 333 (in Chinese) [宫野, 刘金远, 王晓钢, 刘悦, 马腾才, 吴迪 2007 物理学报 **56** 333]
- [8] Yatsui K, Grigoriu C, Masugata K, Jiang W, Sonogawa T 1997 *Jpn. J. Appl. Phys.* **36** 4928
- [9] Mei X X, Xu J, Ma T C 2002 *Acta Phys. Sin.* **51** 1875 (in Chinese) [梅显秀, 徐军, 马腾才 2002 物理学报 **51** 1875]
- [10] Yatsui K, Grigoriu C, Kubo H, Masugata K, Shimotori Y 1995 *Appl. Phys. Lett.* **67** 1214
- [11] Nakagawa Y, Grigoriu C, Masugata K, Jiang W, Yatsui K 1998 *J. Mater. Sci.* **33** 529
- [12] Zhang J, Zhong H W, Shen J, Liang G Y, Cui X J, Zhang X F, Zhang G L, Yan S, Yu X, Le X Y 2017 *Acta Phys. Sin.* **66** 055202 (in Chinese) [张洁, 钟昊玟, 沈杰, 梁国营, 崔晓军, 张小富, 张高龙, 颜莎, 喻晓, 乐小云 2017 物理学报 **66** 055202]
- [13] Zhang J, Yu X, Zhong H W, Wei B B, Qu M, Shen J, Zhang Y Y, Yan S, Zhang G L, Zhang X F, Le X Y 2015 *Nucl. Instrum. Methods Phys. Res., Sect. B* **365** 210
- [14] Zhang J, Zhong H W, Ye Z A, Shen J, Liang G Y, Cui X J, Yu X, Zhang X F, Zhang G L, Yan S, Remnev G E, Le X Y 2017 *Laser Part. Beams* **35** 108
- [15] Yu X, Shen J, Qu M, Liu W B, Zhong H W, Zhang J, Zhang Y Y, Yan S, Zhang G L, Zhang X F, Le X Y 2015 *Vacuum* **113** 36
- [16] Yu X, Shen J, Zhong H W, Qu M, Zhang J, Zhang G L, Zhang X F, Yan S, Le X Y 2015 *Acta Phys. Sin.* **64** 216102 (in Chinese) [喻晓, 沈杰, 钟昊玟, 屈苗, 张洁, 张高龙, 张小富, 颜莎, 乐小云 2015 物理学报 **64** 216102]
- [17] Yu X, Zhang S J, Stepanov A V, Shamanin V I, Zhong H W, Liang G Y, Xu M F, Zhang N, Kuang S C, Ren J H, Shang X Y, Yan S, Remnev G E, Le X Y 2020 *Surf. Coat. Technol.* **384** 125351
- [18] Zhang X L, Zhang Q, Fu Q, Zhou N 2008 *China Plastic Industry* **36** 1 (in Chinese) [张新兰, 张琴, 傅强, 周楠 2008 塑料工业 **36** 1]
- [19] Xie F, Su Z L, Wen Y F 2014 *China Plastic Industry* **42** 55 (in Chinese) [谢飞, 苏正良, 文彦飞 2014 塑料工业 **42** 55]
- [20] Wang G, Shan Y 2005 *Application Examples of Mold Analysis by Moldflow* (Beijing: Tsinghua University Press) p32 (in Chinese) [王刚, 单岩 2005 Moldflow 模具分析应用实例 (北京: 清华大学出版社) 第32页]

Influence of ablation on energy deposition in polymer material under irradiation of intense pulsed ion beam*

Zhang Shi-Jian¹⁾²⁾³⁾⁴⁾ Yu Xiao¹⁾²⁾³⁾ Zhong Hao-Wen¹⁾²⁾³⁾
 Liang Guo-Ying¹⁾²⁾³⁾ Xu Mo-Fei¹⁾²⁾³⁾ Zhang Nan¹⁾²⁾³⁾
 Ren Jian-Hui¹⁾²⁾³⁾ Kuang Shi-Cheng¹⁾²⁾³⁾ Yan Sha⁵⁾
 Gennady Efimovich Remnev¹⁾⁴⁾ Le Xiao-Yun^{1)2)3)†}

1) (*School of Physics, Beihang University, Beijing 100191, China*)

2) (*Beijing Advanced Innovation Center for Big Data-based Precision Medicine, Beihang University, Beijing 100191, China*)

3) (*Beijing Key Laboratory of Advanced Nuclear Energy Materials and Physics, Beihang University, Beijing 100191, China*)

4) (*National Research Tomsk Polytechnic University, Tomsk 634050, Russia*)

5) (*Institute of Heavy Ion Physics, Peking University, Beijing 100871, China*)

(Received 12 February 2020; revised manuscript received 23 March 2020)

Abstract

Short-pulse length and high-power density, intense pulsed ion beam (IPIB) has been widely studied in material processing during past decades. Ablation effect plays a great role in the interaction between IPIB and material and may affect the energy deposition of IPIB, thus further influencing the beam application and diagnostics. Therefore, the investigation of ablation effect on energy deposition of IPIB in the irradiated material is of great significance for its applications and diagnostic techniques. In this work, experiments on the IPIB irradiation are carried out on the BIPPAB-450 accelerator at Beihang University. Its maximum accelerating voltage is 450 kV, peak current density is 150 A/cm², energy density is 1.5–1.8 J/cm² and pulse duration (FWHM) is 80 ns. Polymer materials which have low thermal conductivity, low decomposition temperature and thus yield to ablation under low beam density, such as polycarbonate (PC), polyvinyl chloride (PVC) and polymethyl methacrylate (PMMA), are chosen in the present research. The 304 stainless steel is used for calorimetric beam diagnostics and comparative analysis. Energy deposition in polymer material and 304 stainless steel are obtained by high infrared imaging diagnostics. It is revealed that the distributions of energy deposition in these two kinds of materials differ from each other obviously. The highest energy density deposited in the 304 stainless steel appears in the center of the irradiated area where focused is the beam with a higher energy density. However, the central energy density in polymer material turns out to be lower than the surrounding area, indicating that a large portion of the ion beam is prevented from reaching the target. Meanwhile, the simulation based on the finite element method is carried out for the thermal field distribution and evolution under the IPIB irradiation. The simulation result indicates that the strong ablation can be generated on the target surface since the highest temperature caused by IPIB irradiation is much higher than its decomposition temperature. According to the results of experiments and simulation, the polymer material can start to be ablated at the initial stage of IPIB irradiation which will consume partial energy and the products of ablation may act as shielding to block the energy deposition in the same pulse.

Keywords: intense pulsed ion beam, ablation, energy deposition, shielding

PACS: 52.59.-f, 79.20.Rf, 61.41.+e

DOI: 10.7498/aps.69.20200212

* Project supported by the National Natural Science Foundation of China (Grant No. 11175012).

† Corresponding author. E-mail: xyle@buaa.edu.cn