

飞秒激光精细加工含能材料*

王文亭 胡冰 王明伟†

(南开大学现代光学研究所, 光学信息技术科学教育部重点实验室, 天津 300071)

(2012年8月28日收到; 2012年11月12日收到修改稿)

介绍了飞秒激光脉冲特点及其与物质相互作用机理, 论述了飞秒激光微加工含能材料技术特点及优势, 综述了飞秒激光加工含能材料技术及发展. 讨论了飞秒激光加工含能材料技术进一步发展所需的实验与理论研究工作以及相应的研究方案和关键技术.

关键词: 飞秒激光微加工, 含能材料, 冲击温度, 冲击压强

PACS: 06.60.Jn, 06.60.Vz, 05.45.Tp

DOI: 10.7498/aps.62.060601

1 引言

飞秒激光脉宽可短至 2.8 fs^[1] (1 fs = 10⁻¹⁵ s), 峰值功率高达拍瓦量级^[2] (1 PW = 10¹⁵ W), 聚焦功率密度高达 10²²—10²⁵ W/cm² 量级. 飞秒激光可以将其能量全部、快速、准确地集中在限定的作用区域, 实现对玻璃^[3]、陶瓷^[4]、半导体^[5]、塑料^[6]、聚合物^[7]、树脂^[8]、金属^[9] 等材料的微纳尺寸加工, 具有其他激光加工无法比拟的优势: 1) 耗能低, 无热熔区, “冷加工”; 2) 可加工的材料广泛, 从金属到非金属再到生物细胞组织, 甚至是细胞内的线粒体^[10]; 3) 高精度、高质量、高空间分辨率, 加工区域可小于焦斑尺寸, 突破衍射极限^[7]; 4) 对环境没有特殊要求, 无污染.

飞秒激光微加工包括飞秒激光去除材料和飞秒激光改性材料. 飞秒激光去除材料的物理机制是: 飞秒激光聚焦后烧蚀靶材产生高温高压等离子体^[11], 等离子体形成的时间小于将入射脉冲能量传输到周边材料的时间, 故不会引起热扩散效应^[12]; 利用微加工区域的多光子非线性吸收和电离可对任何材料实现无热传递的微细加工; 此外, 飞秒激光作用区域很小, 产生的等离子体冲击压力

也会很小, 其对被加工物质剩余部分造成的影响可以忽略^[13]. 飞秒激光材料改性的机理是: 物质局部吸收飞秒激光后折射率发生变化, 利用双光子聚合和光化学反应等机理实现精细加工. 在飞秒激光去除材料方面, 飞秒激光可以无热冲击、无剩余材料损伤地加工任何材料^[14].

随着军事技术飞速发展, 一方面导弹的贮备越来越趋于小型化, 另一方面许多导弹 (包括常规导弹和核导弹) 按计划退役, 需要进行拆解和处理. 这些导弹的推进剂、烈性炸药、烟火剂和推进剂等含能材料 (energetic material, EM) 是造成环境污染和安全事故的巨大隐患. 目前, 采用高压水射流技术拆除废旧 EM, 是处理废旧 EM 最高效、经济和环保的方法, 在世界各国得到广泛应用. 然而, 由于 EM 自身的特殊性, 水射流的高能束射流对 EM 的冲击, 可能会使 EM 发生爆炸; 另外, 高压水射流技术成本高、操作空间大、噪声污染严重、多人操作存在安全隐患, 经常有人员伤亡事故^[15-17]. 因此, 研究新型 EM 切割和加工技术具有重要科学意义和实用价值.

飞秒激光脉冲的特性决定了其可以精细加工 EM, 实现无热传递和低冲击压强的安全绿色“冷”加工. 飞秒激光加工含能材料技术既可以满足军事

* 强场激光物理国家重点实验室开放基金 (中国科学院上海光学精密机械研究所)、国家自然科学基金 (批准号: 11174158, 61137001) 和天津市自然科学基金重点项目 (批准号: 12JCZDJC20200) 资助的课题.

† 通讯作者. E-mail: wangmingwei@nankai.edu.cn

领域中弹药拆解,也可以满足小型武器精密制造的迫切需要.

2 国外研究现状

国外只有美国开展了飞秒激光与含能材料相互作用的研究,其他国家未见报道^[18]. 美国劳伦兹·利弗莫尔国家实验室 (Lawrence Livermore National Laboratory, LLNL) 的 Roeske 等和 Roos 等于 2002 年率先对飞秒激光加工含能材料做了实验研究,得出一些探索性的实验结果,证实飞秒激光加工含能材料是可行的^[19-21]. LLNL 的实验系统由飞秒激光器、控制系统、加工系统和切割罐组成^[19],其中飞秒激光器为中心波长为 810 nm 的掺钛蓝宝石激光器,脉冲宽度为 150 fs,脉冲重复率为 3.5 kHz,单脉冲能量为 1 mJ/pulse,平均输出功率为 3.5 W,光束直径为 12 mm;控制系统为电脑和步进电机;加工系统为四维线性移动平台和聚焦系统;切割罐可用于 9.6 g 烈性炸药的切割,罐内放置 4 个 CCD 相机和一个光谱仪.其中,切割罐可以防止炸药爆燃和过滤有害气体;CCD 相机和光谱仪用于测量切割过程中产生的光学喷射物. LLNL 对烈性炸药、推进剂和雷管等含能材料进行了加工实验研究.

2.1 飞秒激光加工烈性炸药

LLNL 选用的烈性炸药包括 LX-14, LX-17 和 Comp B. LX-14 是由 95% 的环四甲撑四硝胺和 5% 的埃斯坦聚氨基甲酸酯弹性纤维组成,环四甲撑四硝胺的熔点为 270 °C, LX-17, Comp B 的熔点为 80 °C.

首先利用能量密度为 1—4 J/cm² 激光脉冲在烈性炸药上切割 6—12 mm 深的槽,实验结果如图 1 所示. 三种材料的光学图片显示烈性炸药的晶体结构和形状没有改变,并且没有空洞. 实验结果表明切割后的烈性炸药和标准炸药的晶体尺寸、黏合剂以及材料密度几乎一致.

其次,利用能量密度为 2 J/cm² 的激光脉冲,切割速率为 4 mm/min,脉冲个数为 1000. 实验结果如图 2 所示, Comp B 和 LX-14 有明显的融化. 利用能量密度为 2 J/cm² 的激光脉冲,切割速率为

40 mm/min 并且激光脉冲个数为 10000. 实验结果如图 3 所示, LX-14 没有融化.

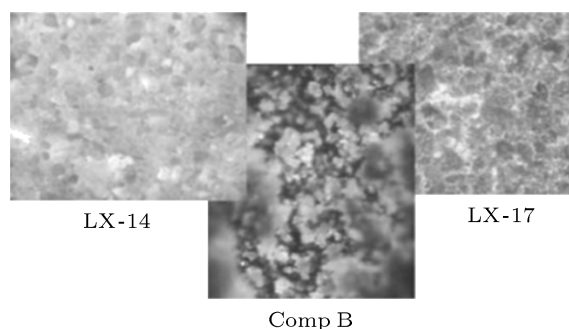
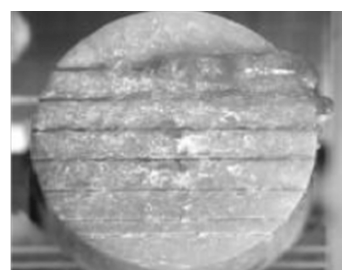
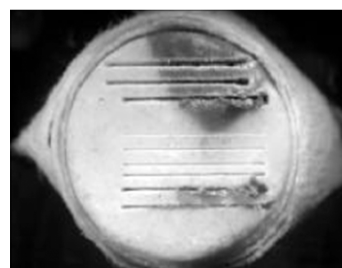


图 1 飞秒激光切割烈性炸药的切面图

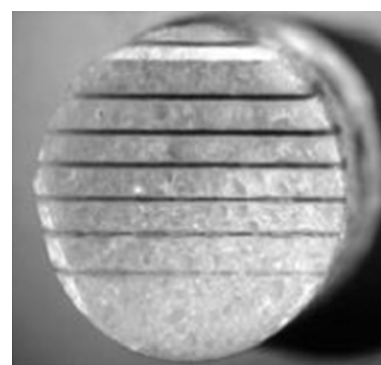


Comp B



LX-14

图 2 飞秒激光切割 Comp B 和 LX-14 的表面图像

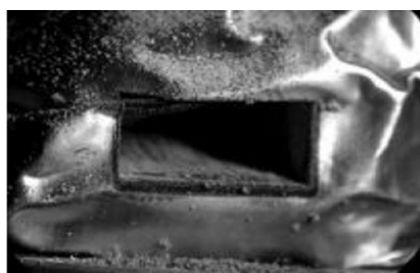


无融化 LX-14

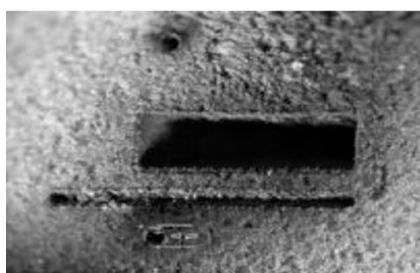
图 3 切割 LX-14

2.2 飞秒激光加工推进剂

LLNL 选用的推进剂主要包括复合烟火药材料 PS-1 和双基烟火药材料 HPT-45, PS-1 由铝燃料和铵高氯酸盐氧化剂组成, 而 HPT-45 是硝化纤维-硝化甘油基材料. 利用激光能量密度为 $1\text{--}4\text{ J/cm}^2$, 在推进剂 PS-1 上进行无爆燃打孔, 刻槽和画线; 然后在 PS-1 上包裹三倍厚度的铝膜, 激光能够无爆燃地透过铝膜切割. 对 HPT-45 进行同样的实验, 可以得到同样的实验结果, 如图 4 所示^[20].



铝膜包裹的推进剂



对推进剂打孔、刻线和刻槽

图 4 飞秒激光切割 PS-1



图 5 利用飞秒激光切割的半球型雷管 (a) 雷管侧面图; (b) 雷管俯视图

2.3 飞秒激光加工雷管

LLNL 选用的雷管的主要成分为季戊四醇四硝酸酯和 PBX-9407. 利用能量密度为 $1\text{--}4\text{ J/cm}^2$ 飞秒激光切割半球形雷管, 得到 0.75 mm 到 4.0 mm

的 5 个不同高度的半球形雷管, 其中半球型雷管的直径为 0.5 英寸 , 季戊四醇四硝酸酯和 PBX-9407 的切割表面均没有改变属性, 如图 5 所示.

3 国内研究现状

LLNL 飞秒激光加工含能材料的研究引起了国内学者的关注, 并有相关文献报道. 2004 年, 杨建军^[22]介绍了飞秒激光加工含能材料的“冷”加工特性. 2005 年, 陈明华等^[23]在介绍飞秒激光加工含能材料的基础上, 阐述了飞秒激光在加工过程中基本不会发生热量的传递和化学反应. 2006 年, 陈明华等^[24]分析了飞秒激光切割发射药的热传递过程, 建立了飞秒激光切割发射药的传热模型, 利用计算程序 ANSYS 计算了药剂内部的温度分布以及烧蚀放出的热量, 在切割过程中受激光作用的表面温度可达 $2500\text{ }^\circ\text{C}$ 以上, 作用深度小于 $1\text{ }\mu\text{m}$. 2006 年, 高飞^[13]利用飞秒激光加工含能材料替代物, 利用钛宝石飞秒激光在含能材料替代物上刻槽和打孔, 其中飞秒激光的脉宽为 50 fs , 中心波长为 800 nm , 脉冲重复率为 1 kHz , 最大单脉冲能量为 2 mJ , 聚焦透镜焦距为 40 cm , 切割速度为 $0.1\text{--}2\text{ mm/s}$, 得到 $150\text{--}300\text{ }\mu\text{m}$ 的切割线度和 $85\text{--}130\text{ }\mu\text{m}$ 的打孔直径. 实验结果是: 低激光峰值功率和低加工速率时热影响范围较大, 切割质量差; 高激光峰值功率和高加工速率时热影响范围较小, 切割质量较好. 2007 年, 陈明华等^[25]对飞秒激光加工 Mg/PTFE 药剂烧蚀过程的可行性和安全性进行了分析, 建立了相互作用的传热模型, 确定了在切割过程中受激光作用表面的温度可达 $3000\text{ }^\circ\text{C}$, 单个激光脉冲的作用深度小于 $5.0 \times 10^{-7}\text{ m}$, 药剂反应放出的热量对剩余材料没有影响. 2009 年, 彭亚晶等^[26]从理论上分析了皮秒和纳秒单脉冲激光与纳米金属颗粒复合含能材料相互作用的热动力学过程, 推导了分散在介质中的纳米金属颗粒吸收脉冲激光能量的瞬时功率并且对热点热量传播过程进行了数值模拟.

4 国内外研究现状分析

LLNL 首次利用飞秒激光加工含能材料, 实现了飞秒激光切割含能材料、拆解废旧炸药、制造特征尺寸炸药样品, 并且取得该技术领域的发明专利.

利^[18]. LLNL 的实验结果证明了激光精细加工炸药是可行的, 但只给出了对几种具体含能材料安全加工的激光参数, 没有给出相应的理论分析和系统化的加工参数.

国内少数科研单位开展了长脉冲激光与含能材料相互作用的理论分析和数值分析研究, 以及激光点火实验研究. 在激光点火中主要研究点火感度和点火延迟期随激光功率密度和材料组分的变化关系, 同时观测了不同激光功率密度和不同材料组分情况下的烧蚀和等离子体化现象^[27-31]. 在飞秒激光与含能材料的相互作用及其应用研究方面, 虽然有几篇期刊或学位论文介绍了国外飞秒激光加工炸药的情况, 但基本上都是综述性的简单介绍、尝试性的一点数据分析或含能材料替代品的初步微加工演示实验. 目前, 国内还没有飞秒激光加工含能材料以及小型武器的深入研究报道. 因此, 真正利用飞秒激光加工含能材料尤其是烈性炸药的研究在国内还是一项空白.

5 讨论

飞秒激光加工含能材料的核心问题是实现无爆燃“冷”加工. 国外科学家在加工含能材料实验中, 主要考虑的起爆条件是“热量”和“压强”两方面. 含能材料热传导性差, 容易聚集热量, 从而引起含能材料反应(甚至起爆)和融化. 压强可引起含能材料破裂(甚至起爆). 热量主要来源于加工过程中能量的转换和摩擦, 压强主要来源于加工过程产生的等离子体冲击波^[32]和脉冲的光压效应. 因此, 安全加工含能材料必须结合含能材料的特征参数研究如何产生最小的冲击压强^[33]和冲击温度^[34].

飞秒激光安全加工含能材料, 迫切需要建立飞秒激光与含能材料相互作用的理论模型, 改变以前局限于实验摸索确定加工方案的局面, 掌握飞秒激光安全加工含能材料的规律. 为此, 可以借助时间分辨飞秒激光泵浦探测技术^[35]和飞秒激光数字全息术记录和提取飞秒激光加工炸药动态过程的瞬态信息^[36], 修正飞秒激光与炸药作用过程中的Fokker-Plank^[37]模型. 通过数值计算和实验研究,

给出与安全加工炸药的临界冲击压强和临界冲击温度相对应的飞秒激光安全加工炸药的临界光学参数(包括飞秒激光的脉冲宽度、重复频率, 峰值功率以及聚焦光学系统的数值孔径、焦距以及加工速度等), 建立安全加工所要求的飞秒激光能流密度与含能材料特征参数的一一对应关系.

LLNL 的研究结果表明, 飞秒激光加工含能材料既可以在空气中(标准大气压 STP)进行, 也可以在真空罐中进行, 或者是在可控压强环境中进行. 加工环境不同, 飞秒激光加工含能材料的安全加工参数也相应不同. 在标准大气压情况下加工, 需要特别考虑超高功率密度的激光脉冲对样品表面和样品附近空气的电离. 因为空气被强激光脉冲击穿(电离)后产生等离子体, 等离子体将一方面会使聚焦光斑变形(散焦和歪曲)、降低加工精度和效率, 另一方面也会加热样品周围的空气, 空气的热量会传递给样品, 导致样品的融化甚至爆燃. 在真空环境下加工, 可以避免空气中加工的弊端, 从而提高安全性. 在实际应用中, 加工样品不可能都放在真空罐中, 一方面加工的费用大幅提高, 另一方面也不方便, 飞秒激光加工含能材料在空气中进行更具有实际意义.

鉴于国内爆炸科学与技术领域对 A(RHT-901)炸药、B 炸药(JOB-9003)、C 炸药(JO-9159)^[17]等烈性炸药进行安全绿色加工异常重视, 有必要尽快开展对此类炸药进行飞秒激光加工的实验与理论研究, 在验证飞秒激光加工单质炸药安全的基础上, 分析混合炸药的安全加工参数, 实现包含烈性炸药、引信、金属等材料的小型武器的安全精密加工, 获得飞秒激光对爆炸品、火工品、危险品、甚至小型武器进行绿色安全精密加工的关键技术. 此项研究将会发展飞秒激光与物质相互作用的理论, 掌握具有自主知识产权的烈性炸药及小型武器的飞秒激光精细冷加工技术, 填补国内空白, 为我国军工科技事业做贡献.

感谢南开大学现代光学研究所张楠讲师、杨建军教授以及朱晓农教授的支持和有益讨论.

- [1] Yamane K, Kito T, Morita R, Yamashita M 2004 *CLEO* Washington D C May 16–21, 2004 p1045
- [2] Perry M D, Pennington D, Stuart B C, Tietbohl G, Britten J A, Brown C, Herman S, Golick B, Kartz M, Miller J, Powell H T, Vergino M, Yanovsky V 1999 *Opt. Lett.* **24** 160
- [3] Minoshima K, Kowalevicz A M, Hartl I, Ippen E P, Fujimoto J G 2002 *Opt. Lett.* **10** 645
- [4] Perrie W, Rushton A, Gill M, Gill P, O'Neill W 2005 *Appl. Phys. Sci.* **248** 213
- [5] Sundaram S K, Mazur E 2002 *Nature Mater.* **1** 217
- [6] Gattass R R, Mazur E 2008 *Nature Photon.* **2** 219
- [7] Kawata S, Sun H B, Tanaka T, Takada K 2001 *Nature* **412** 677
- [8] Kawata S, Sun H B 2003 *Appl. Surf. Sci.* **208** 153
- [9] Kirkwood S E, Vanpopta A C, Tsui Y Y, Fedosejevs R 2005 *Appl. Phys. A* **81** 729
- [10] Shen N, Datta D, Schaffer C B, Leduc P, Ingber D E, Mazur E 2005 *Memb. Cytop. Bod.* **2** 17
- [11] Wu Z H, Zhang N, Wang M W, Zhu X N 2011 *Chin. Opt. Lett.* **9** 12
- [12] Dachraoui H, Husinsky W, Betz G 2006 *Appl. Phys. A* **83** 333
- [13] Gao F 2006 *M. S. Dissertation* (Wuhan: Huazhong University of Science and Technology) (in Chinese) [高飞 2006 硕士学位论文 (武汉: 华中科技大学)]
- [14] Perry M D, Stuart B C, Banks P S, Feit M D, Yanovsky V, Rubenchik A M 1999 *J. Appl. Phys.* **85** 6803
- [15] He Y H, Li H J, Zhang Q M 2005 *Chin. J. High Pressure Phys.* **19** 169 (in Chinese) [何远航, 李海军, 张庆明 2005 高压物理学报 **19** 169]
- [16] Fu S W, Zhao X B, Chen J G 2006 *J. Solid Rocket Technol.* **29** 292 (in Chinese) [付生旺, 赵孝彬, 陈教国 2006 固体火箭技术 **29** 292]
- [17] Zhong S L, Li Z Q, Bai H, Huang J H 2006 *Theor. Explor.* **3** 44 (in Chinese) [钟树良, 李振泉, 柏平, 黄交虎 2006 理论与探索 **3** 44]
- [18] Welle E J, Niceville N M, Alexander S T, Albuquerque N M, Jeremy A P U. S. Patent 7 767 931 B1 [2010-08-03]
- [19] Roos E, Benterou J, Lee R, Roeske F, Stuart B 2002 *SPIE* **4760** 415
- [20] Roeske F, Benterou J, Lee R, Roos E 2003 *Propellants, Explosive, Pyrotechnics* **28** 53
- [21] Roeske F, Jr Banks R E, Armstrong J P, Feit M D, Lee R S, Perry M D, Stuart B C 1998 UCRL-JC-128373 Rev. 1 [the 1998 Life Cycles of Energetic Materials]
- [22] Yang J J 2004 *Laser & Optoelectronics Progress* **41** 42 (in Chinese) [杨建军 2004 激光与光电子学进展 **41** 42]
- [23] Chen M H, Lu B, Li C G, Liu H T 2005 *Initiat. Explosive Dev.* **5** 42 (in Chinese) [陈明华, 卢斌, 李成国, 刘海涛 2005 火工品 **5** 42]
- [24] Chen M H, Gao M, Zhang G A, Wang H J, Wang X 2006 *Electro-Optic Technol. Appl.* **21** 4 (in Chinese) [陈明华, 高敏, 张国安, 汪海军, 王宪 2006 光电子技术应用 **21** 4]
- [25] Chen M H, Lu B, Li D Y, Zhan Z B 2007 *Laser & Infrared* **3** 214 (in Chinese) [陈明华, 卢斌, 李东阳, 战志波 2007 激光与红外 **3** 214]
- [26] Peng Y J, Liu Y Q, Wang Y H, Zhang S P, Yang Y Q 2009 *Acta Phys. Sin.* **58** 655 (in Chinese) [彭亚晶, 刘玉强, 王英惠, 张淑平, 杨延强 2009 物理学报 **58** 655]
- [27] Zhang H Q, Yan N, Hua G 2001 *Initiat. Explosive Dev.* **2** 49 (in Chinese) [张慧卿, 严楠, 华光 2001 火工品 **2** 49]
- [28] Zhang X B, Yuan Y X, Ren R H 2002 *Acta Armament Aarii* **23** 23 (in Chinese) [张小兵, 袁亚雄, 任如海 2002 兵工学报 **23** 23]
- [29] Xiang S B, Xiang X, Feng C G 2002 *Laser & Infrared* **32** 233 (in Chinese) [项仕标, 项瑛, 冯长根 2002 激光与红外 **32** 233]
- [30] Zhu S C, Lu J C, Sun T J, Cui W D 2000 *Initiat. Explosive Dev.* **4** 19 (in Chinese) [朱升成, 鲁建存, 孙同举, 崔卫东 2002 火工品 **4** 19]
- [31] Yuan Q, Hu D X, Zhang X, Zhao J P, Hu S D, Huang W H, Wei X F 2011 *Acta Phys. Sin.* **60** 015202 (in Chinese) [袁强, 胡东霞, 张鑫, 赵军普, 胡思得, 黄文会, 魏晓峰 2011 物理学报 **60** 015202]
- [32] Xin J T, Gu Y Q, Li P, Luo X, Jiang B B, Tan F, Han D, Wu Y Z, Zhao Z Q, Su J Q, Zhang B H 2012 *Acta Phys. Sin.* **61** 236201 (in Chinese) [辛建婷, 谷渝秋, 李平, 罗炫, 蒋柏斌, 谭放, 韩丹, 巫殿忠, 赵宗清, 粟敬钦, 张保汉 2012 物理学报 **61** 236201]
- [33] Huang X Q, Fu S Z, Shu H, Ye J J, Wu J, Xie Z Y, Fang Z H, Jia G, Luo P Q, Long T, He J H, Gu Y, Wang S J 2010 *Acta Phys. Sin.* **59** 6394 (in Chinese) [黄秀光, 傅思祖, 舒桦, 叶君健, 吴江, 谢志勇, 方智恒, 贾果, 罗平庆, 龙滔, 何钜华, 顾援, 王世绩 2010 物理学报 **59** 6394]
- [34] Liu X, Zhou X M, Li J, Li J B, Cao X X 2010 *Acta Phys. Sin.* **59** 5626 (in Chinese) [刘勋, 周显明, 李俊, 李加波, 操秀霞 2010 物理学报 **59** 5626]
- [35] Zhang N, Zhu X N, Yang J J, Wang X L, Wang M W 2007 *Phys. Rev. Lett.* **99** 167602
- [36] Hu H F, Wang X L, Guo W G, Zhai H C, Wang P 2011 *Acta Phys. Sin.* **60** 017901 (in Chinese) [胡浩丰, 王晓雷, 郭文刚, 翟宏琛, 王攀 2011 物理学报 **60** 017901]
- [37] Stuart B C, Feit M D, Herman S, Rubenchik A M, Shore B W, Perry M D 1996 *Phys. Rev. B* **53** 1749

Femtosecond laser fine machining of energetic materials*

Wang Wen-Ting Hu Bing Wang Ming-Wei†

(*Institute of Modern Optics, Key Laboratory of Optic Information Science and Technology, Ministry of Education of China, Nankai University, Tianjin 300071, China*)

(Received 28 August 2012; revised manuscript received 12 November 2012)

Abstract

In this article, the characteristics of femtosecond laser pulses and the interaction mechanism between them and materials are described, and the characteristics and advantages of femtosecond laser micromachining of energetic materials are discussed. The technology and development of the femtosecond laser machining of energetic materials are reviewed. The experimental and theoretical research of femtosecond laser machining of energetic materials and the corresponding research scheme and key techniques for further development are discussed.

Keywords: femtosecond laser micromachining, energetic material, shock temperature, shock pressure

PACS: 06.60.Jn, 06.60.Vz, 05.45.Tp

DOI: 10.7498/aps.62.060601

* Project supported by the Open Fund of the State Key Laboratory of High Field Laser Physics, China (Shanghai Institute of Optics and Fine Mechanics), the National Natural Science Foundation of China (Grant Nos. 11174158, 61137001) and the Tianjin Natural Science Foundation, China (Grant No. 12JCZDJC20200).

† Corresponding author. E-mail: wangmingwei@nankai.edu.cn