



气流对飞秒激光加工炸药装药过程的热安全性影响分析*

伍俊英, 郑富德, 姚雨乐, 刘嘉锡, 陈朗

(北京理工大学爆炸科学与技术国家重点实验室, 北京 100081)

摘要: 由于炸药具有热传导系数小、对温度极其敏感的特点, 在使用多脉冲飞秒激光对其进行持续加工时, 极有可能在炸药内形成热累积, 从而导致点火、燃烧等危险事件的发生。为了降低激光加工材料过程中的热效应, 人们普遍采取在材料加工表面施加气流的方法。为了研究加载气流条件下, 炸药装药在飞秒激光作用下产生的烧蚀产物的运动规律以及炸药装药内部的温度变化, 建立了加载气流条件下飞秒激光加工炸药装药过程的二维流固耦合计算模型, 对在单侧、双侧不同入射角度的亚音速气流作用下, 飞秒激光加工奥克托今 (HMX) 炸药装药的过程进行了数值模拟计算。计算结果表明: 单侧气流会在炸药加工表面形成漩涡流, 导致烧蚀气体产物在炸药表面做旋转运动, 加重了烧蚀产物对炸药的热影响; 双侧气流会在远离炸药加工表面的地方形成较大的漩涡流, 从而使烧蚀气体产物迅速离开炸药加工表面, 有效降低了炸药的温度, 提高了飞秒激光加工炸药装药过程的安全性。

关键词: 飞秒激光; 炸药; 数值模拟; 气流; 热安全性

中图分类号: TG55

文献标志码: A

doi: 10.11884/HPLPB202436.230256

Analysis of thermal safety impact of airflow on the process of femtosecond laser processing explosive charge

Wu Junying, Zheng Fude, Yao Yule, Liu Jiaxi, Chen Lang

(State Key Laboratory of Explosion Science and Technology, Beijing Institute of Technology, Beijing 100081, China)

Abstract: Due to the low thermal conductivity and high sensitivity to temperature of explosive, it is highly possible to form heat accumulation inside the explosive during the continuous processing of multi-pulse femtosecond lasers, leading to dangerous events such as ignition and combustion. To reduce the thermal effects during laser processing of materials, applying airflow is a common choice. To study the motion law of ablation products generated by explosive under the action of femtosecond laser and the temperature changes in explosive under the action of airflow, a two-dimensional fluid-solid coupling calculation model of femtosecond laser processing explosive under the action of airflow is established. Numerical simulation calculations are conducted on the process of processing cyclotetramethylene-tetranitramine (HMX) explosive using femtosecond laser under the action of subsonic airflow with different incidence angles on one or both sides. The calculation results show that a unilateral airflow will form a vortex flow on the surface of the explosive, causing the ablation products to rotate on the surface of the explosive, exacerbating the thermal effect of the ablation products on the explosive; The bilateral airflow will form a large vortex flow far from the surface of the explosive, causing the ablation products to leave the surface of the explosive quickly, effectively reducing the temperature of the explosive and improving the safety in the process of femtosecond laser processing explosive.

Key words: femtosecond laser, explosive, numerical simulation, airflow, thermal safety

飞秒激光加工炸药技术是利用具有超短脉冲宽度和超高峰值功率密度的飞秒激光脉冲聚焦炸药将其烧蚀去除, 以实现炸药部件的精密加工^[1-2]。在使用飞秒激光加工炸药装药的过程中, 由于炸药的热传导系数小, 且对

* 收稿日期: 2023-08-07; 修订日期: 2023-12-08

基金项目: 爆炸科学与技术国家重点实验室开放基金项目 (KFJJ20-04M)

联系方式: 伍俊英, wjy1312@bit.edu.cn.

温度极其敏感,在高重复频率的多脉冲飞秒激光持续加工作用下,极有可能在炸药内形成热累积,使炸药自身的热分解反应加剧,进而导致熔化、点火和燃烧等危险事件的发生。Roos 等人^[3]在研究飞秒激光切割加工炸药试样的过程中,分析了炸药试样运动速度对加工过程安全性的影响,实验发现炸药试样运动速度较慢时,飞秒激光束在炸药同一加工位置的停留时间较长,不利于热量的传导扩散,使得炸药发生了熔化。Roeske 等人^[4]在用飞秒激光切割 B 炸药药柱时,发现激光脉冲击穿空气产生的高温高压等离子体会将热量传递给被加工炸药,在一定条件下,会导致炸药发生熔化或点火。因此,如何减轻飞秒激光加工炸药部件过程中的热效应成为了一个十分重要的研究问题。在激光加工材料的过程中,人们通常采用加载外部气流的方法,对被加工材料进行物理降温处理^[5-8]。美国 Lawrence Livermore 实验室的 Boley 等人^[5,9-11]对激光在切向气流条件下的辐照效应开展了大量的实验研究,证实了加载气流对加工试件有一定的降温作用。由于激光在气流条件下的加热过程极快,依靠实验方法难以获得气流条件下激光加工材料的重要细节。为此,人们主要采用数值模拟的方法,对气流条件下,激光加工材料的过程进行研究。张健、陈敏孙^[12-13]等人对亚音速气流条件下的激光辐照材料过程进行了数值模拟,计算表明亚音速切向气流对加工材料具有明显的冷却作用。胡鹏、赵晓利、李鹏飞等人^[14-16]通过仿真模拟计算,发现在超音速流场中,气流与物体表面之间的强烈摩擦导致了气动生热效应的产生,使得边界层内的气流温度上升,不利于降低被加工试样的温度。然而,以上研究中的加工材料均为非含能材料,有关气流条件下激光加工含能材料方面的研究还未见报道。

基于上述研究,本文建立了加载气流条件下,飞秒激光加工炸药装药过程的二维流固耦合计算模型,对在单侧、双侧不同入射角度的亚音速气流条件下,飞秒激光加工奥克托今(HMX)炸药装药的过程进行了数值模拟,获得了不同亚音速气流条件下,烧蚀产物的扩散运动规律和装药的温度变化情况,分析了不同气流条件对飞秒激光加工炸药装药过程中热效应的影响。

1 数值计算方法

1.1 物理模型

在飞秒激光的辐照下,激光聚焦区域内的炸药瞬间被烧蚀去除,产生由分子、原子、离子等组成的高温烧蚀气体产物从加工表面喷射。烧蚀气体产物在扩散过程中通过热辐射和热传导等方式与周围物质进行热交换。加载气流后,烧蚀气体产物可能被加速带离炸药装药的加工表面,从而减小高温烧蚀产物对炸药装药的热影响,提高加工过程的安全性。图 1 是在加载切向气流的条件下,飞秒激光烧蚀炸药装药过程的物理模型示意图。

1.2 数值计算模型与方法

1.2.1 计算模型

炸药在飞秒激光作用下会被迅速烧蚀形成等离子体,由于等离子体的形成时间(ps~ns)远小于等离子体的扩散时间($\mu\text{s}\sim\text{ms}$)^[17],且本文重点关注的是在加载气流条件下固相炸药中的热效应,因此,本文在计算中忽略了炸药的相变过程,认为在计算的初始时刻,烧蚀区域内的炸药已经发生了相变,并形成烧蚀气体产物,且烧蚀产物还未向空气中膨胀扩散,仍集中在烧蚀区域内。由于飞秒激光的脉冲宽度远小于电子-声子相互作用的时间尺度($10^{-13}\sim 10^{-12}$ s),受激电子中沉积的激光能量还来不及传递给周围晶格,激光脉冲辐照作用过程就已经结束,避免了热量向周围的传递与扩散,因此,认为在计算的初始时刻,非飞秒激光作用区域不受飞秒激光作用的影响。此外,忽略烧蚀气态产物对炸药装药吸收飞秒脉冲激光能量的影响,认为每一束相同参数的飞秒激光对炸药装药的烧蚀深度一致。

基于上述假设,本文建立了加载气流条件下,多脉冲飞秒激光烧蚀炸药装药过程的二维流固耦合计算模型,如图 2 所示。计算模型由固体区域和流体区域两个计算域组成,固体区域为固体炸药装药,炸药装药宽为 2 cm,沿 y 径向方向,厚度为 200 μm ,沿 x 轴向方向。流体区域为烧蚀气体产物和空气,其中,空气域的长为 4 cm,沿 x 轴向方向,宽为 2 cm,沿 y 径向方向,烧蚀产物区域的宽度与烧蚀直径相同,为 50 μm ,沿 y 径向方向。HMX 装药在波长为 810 nm、脉宽为 150 fs、能量为 100 μJ 的单脉冲飞秒激光作用下的烧蚀深度为 0.49 μm ^[18]。飞秒激光沿 x 轴向方

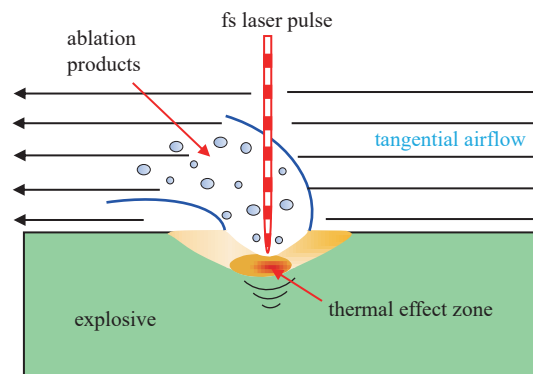


Fig. 1 Schematic diagram of the physical model of the ablation of explosive charge by femtosecond laser under the action of tangential airflow

图 1 切向气流作用下,飞秒激光烧蚀炸药装药过程的物理模型示意图

向烧蚀炸药。

空气域中上边界设为速度入口, 下边界设为压力出口, 通过修改边界条件参数, 可以对气流速度的大小和方向进行定义, 从而实现不同类型气流的加载。在加工过程中, 气流加载速度的大小和方向是两个需要考虑的关键参数。为了避免在加工炸药装药过程中, 炸药装药表面出现气动生热现象, 在计算中, 采用 10 m/s 的亚音速气流, 加载方向分为单侧加载和双侧加载两种, 加载角度分别为 60°、45°、30°和 10°(90°为切向)。固相域和空气域的初始温度为 300 K, 空气域的初始压力为 101 325 Pa。

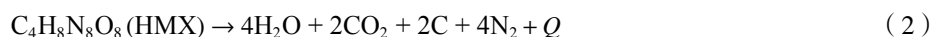
1.2.2 计算方法

在飞秒激光烧蚀区域内, 认为烧蚀区域内炸药释放的化学潜能全部转化为烧蚀气态产物的内能, 因此, 烧蚀气态产物的初始温度由入射飞秒激光的能量和被烧蚀炸药释放的化学潜能共同决定, 其初始温度可由热力学公式(1)计算获得。

$$E_b + E_l = \bar{c}mT \quad (1)$$

式中: E_b 为被烧蚀炸药释放的化学潜能, $E_b = mQ_v$, 其中 m 是气态产物的质量, Q_v 是炸药的爆热; $\bar{c} = \sum c_i w_i$ 为烧蚀气态产物的平均比热容, c_i 为第 i 种物质的比热容, w_i 是第 i 种组分的质量分数; T 是气态产物的初始温度; 与被烧蚀炸药质量一致; E_l 是炸药吸收的飞秒激光能量。将式(1)计算得到的气态产物初始温度代入理想气体状态方程, 即可获得气态产物的初始压力。

本文依据最大放热量规则^[19], 来确定 HMX 炸药的爆热值和化学反应方程式。HMX 炸药的爆热值为 6.1757×10^6 J/kg, 化学反应方程式



炸药在热环境中会发生自热分解反应, 从而释放大热量。炸药的热分解反应速率与温度密切相关, 一般情况下, 反应速率随温度的上升呈指数增加。因此, 在计算过程中, 对于激光辐照区域周围的炸药, 需要考虑其在受热情况下的热分解反应放热。本文采用四步反应动力学模型来描述 HMX 炸药的热分解反应放热过程, 该模型认为炸药的每一步分解反应均遵循阿伦尼乌斯定律, 将每一步的反应热求和即可得到总的反应热源项 S_{HMX} 。HMX 的四步反应历程^[20]为



式中: A 是 β -HMX 晶型; B 是 δ -HMX 晶型; C 是固相中间产物; D 和 E 分别是气体中间产物和气体最终产物; k_i 是第 i 步反应的反应速率系数; i 为反应序号 ($i=1, 2, 3, 4$); E_i 是第 i 步反应的活化能; Z_i 是第 i 步反应的指前因子; R 是气体常数; T 是温度。

在反应开始时, 设炸药装药的初始密度为 ρ_0 , A、B、C、D 和 E 的初始质量分数分别为 1、0、0、0 和 0。经过一定时间 t 后, A、B、C、D 和 E 的质量分数分别为 w_A 、 w_B 、 w_C 、 w_D 和 w_E 。根据链式反应原理, 各组分的质量分数变化速率可以用下面的关系式来表示。

$$\frac{dw_A}{dt} = -k_1 w_A \quad (7)$$

$$\frac{dw_B}{dt} = k_1 w_A - k_2 w_B \quad (8)$$

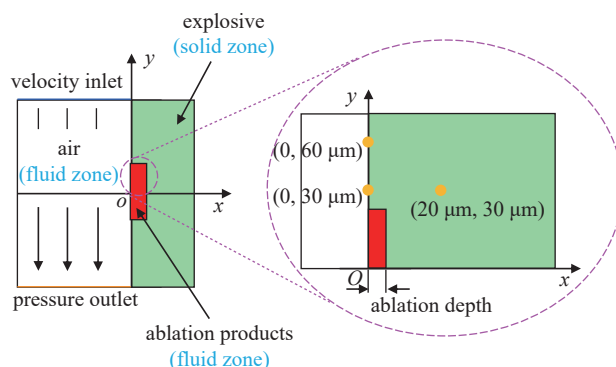


Fig. 2 Schematic diagram of calculation model of the ablation of explosive charge by femtosecond laser under the action of tangential airflow

图2 切向气流作用下, 飞秒激光烧蚀炸药装药的计算模型示意图

$$\frac{dw_C}{dt} = k_2 w_B - k_3 w_C \quad (9)$$

$$\frac{dw_D}{dt} = k_3 w_C - k_4 w_D^2 \quad (10)$$

$$\frac{dw_E}{dt} = k_4 w_D^2 \quad (11)$$

采用四阶龙格-库塔法对式(7)~(11)进行求解,即可得到任意时刻各组分的质量分数,从而得到 HMX 炸药热分解过程中的热量生成速率如下

$$S_{\text{HMX}} = \rho_0 w_A k_1 Q_1 + \rho_0 w_B k_2 Q_2 + \rho_0 w_C k_3 Q_3 + \rho_0 w_D^2 k_4 Q_4 \quad (12)$$

式中: Q_i 是第 i 步反应的反应热。

HMX 炸药的热分解反应动力学参数根据实验确定^[21],其值如表 1 所示。本文选用的飞秒激光的波长为 810 nm,在该波长下, HMX 炸药的物性参数^[21-22]如表 2 所示。

表 1 HMX 的多步热分解反应动力学参数

Table 1 Kinetic parameters of multi-step thermal decomposition reaction of HMX

explosive	reaction step	$E/(\text{kJ}\cdot\text{mol}^{-1})$	Z/s^{-1}	$Q/(\text{kJ}\cdot\text{kg}^{-1})$
HMX	1	204	7.99×10^{20}	-42
	2	221	1.41×10^{21}	-252
	3	186	2.61×10^{16}	559
	4	143	1.60×10^{12}	5620

表 2 HMX 的物性参数

Table 2 Physical properties of HMX

density/ ($\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$)	specific thermal capacity/($\text{J}\cdot\text{kg}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$)	thermal conductivity/ ($\text{W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$)	absorption coefficient/ m^{-1}	reflection coefficient	thermal diffusion coefficient/($\text{m}^2\cdot\text{s}^{-1}$)
1 905	1 050	0.345	1.434×10^6	0.090	1.72×10^{-7}

计算中,在上一束飞秒激光脉冲结束作用后,首先对炸药固体区域中的温度和炸药组分等信息进行保存,然后平移烧蚀区域的位置,平移距离为飞秒激光对炸药的烧蚀深度,同时对烧蚀气体产物和空气域的温度和压力进行初始化,之后再对下一束飞秒激光烧蚀炸药装药的情况进行计算。计算中,飞秒激光的脉宽为 150 fs,单脉冲能量为 100 μJ ,重复频率为 1 kHz,聚焦光斑直径为 50 μm ,脉冲数量为 50 束。

本文采用流体动力学数值模拟计算方法,对多脉冲飞秒激光烧蚀 HMX 炸药装药的过程进行了数值模拟计算。分析了不同类型的气流对炸药装药在飞秒激光作用下产生的烧蚀产物的运动规律,同时,以飞秒激光烧蚀作用区域周围的炸药为重点分析对象,在烧蚀区域周围设置温度监测点,对其温度变化规律进行分析,温度监测点位置分布如图 2 所示(监测点沿 x 轴成轴对称分布,图中只给出了 x 轴上方监测点的位置分布),将计算结果同没有加载气流的情况进行比较,从而讨论并评估加载不同类型气流后,炸药在加工过程中的热安全性。

2 计算结果与讨论

2.1 单侧气流加载情况分析

图 3 分别给出了在不同入射角度的单侧气流作用下,空气域中流场速度的分布。由图 3 可知,由于气流在流经烧蚀孔洞时会形成压力差,不同入射角度的单侧气流均会在炸药表面形成漩涡流,在漩涡流的作用下,烧蚀气体产物在炸药表面做旋转运动,不易向周围扩散,从而持续对炸药产生热影响,增加了炸药发生点火的可能性。由于不同入射角度的气流作用后,炸药表面的漩涡流形态具有较高的一致性,使得炸药表面的温度变化规律是相似的,因此,本节以入射角度为 45° 的单侧气流作用后炸药表面监测点的温度曲线为例进行相关分析,图 4 给出了在入射角度为 45° 的单侧气流作用下,多脉冲飞秒激光作用后, HMX 炸药装药表面监测点处的温度-时间变化曲线。由图 4 可知,相比于无外加气流的情况,在加载入射角度为 45° 的单侧气流后,炸药装药表面监测点处的温度更高,这是由于高温烧蚀气体产物随漩涡流在炸药表面做旋转运动,没有迅速离开炸药表面,从而加重了对炸药的热影响。

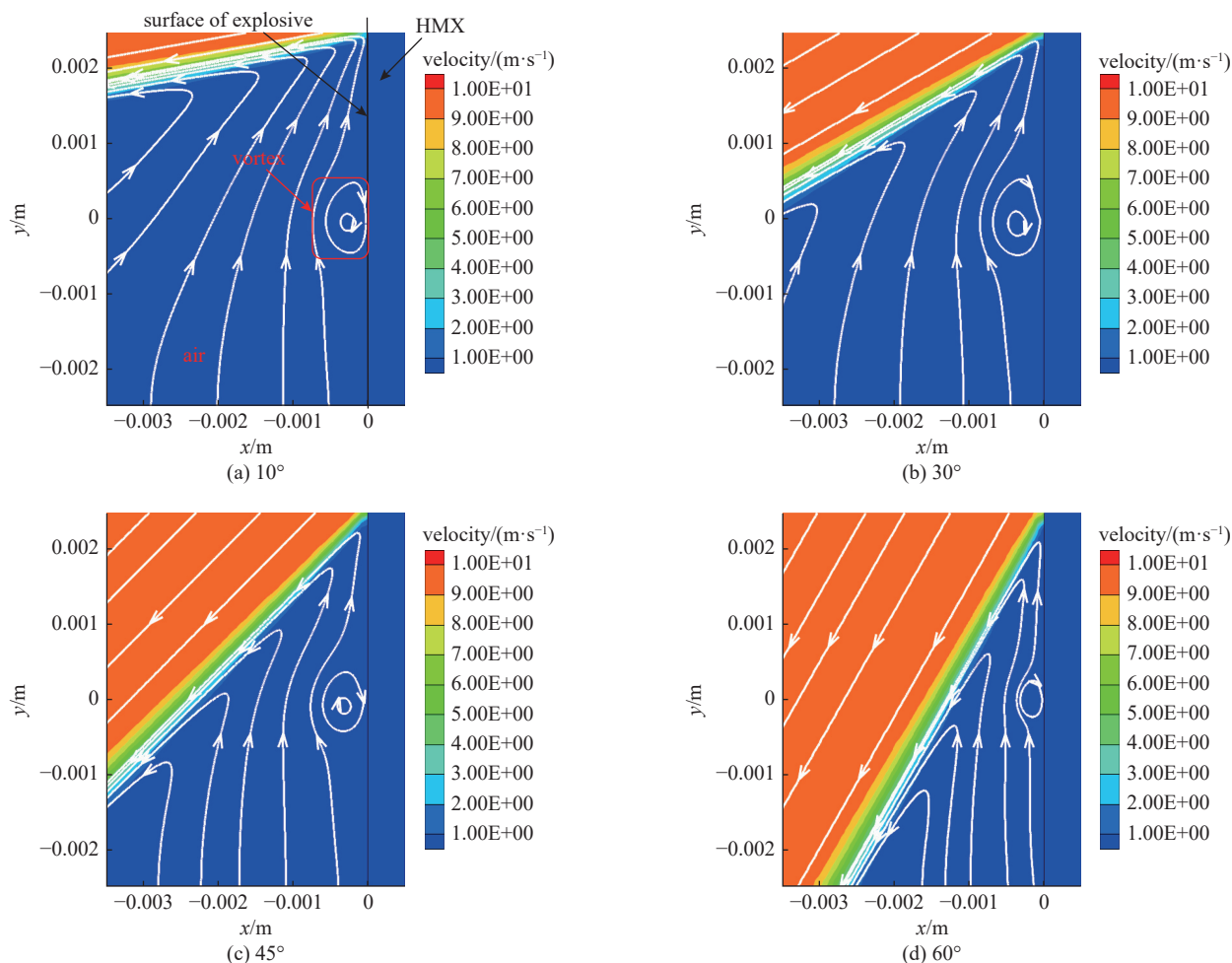


Fig. 3 Velocity distribution of flow field in air under the action of unilateral airflow at different incidence angles

图3 不同入射角度的单侧气流作用下, 空气域中流场速度的分布

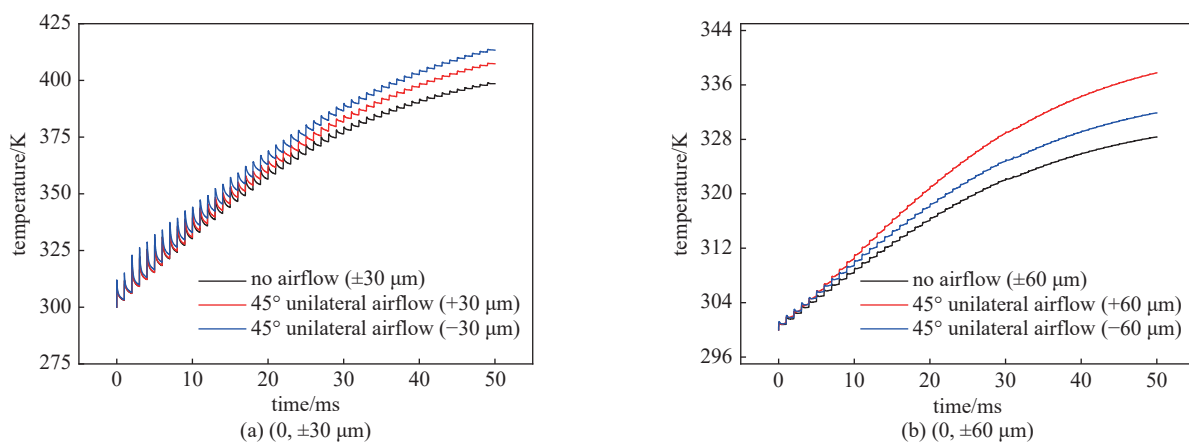


Fig. 4 Temperature-time curves at the monitoring points on the surface of the explosive under the action of 45° unilateral airflow

图4 45°单侧气流作用下, 炸药表面监测点处的温度-时间变化曲线

综上所述, 在飞秒激光加工炸药装药的过程中, 仅加载单侧气流, 不能有效降低被加工炸药的温度, 在工程上应用的可行性较差。

2.2 双侧气流加载情况分析

2.2.1 单脉冲飞秒激光烧蚀炸药装药的情况分析

图5分别给出了在不同入射角度的双侧气流作用下, 空气域中流场速度的分布。由图5可知, 加载不同入射角度的双侧气流后, 双侧气流同样会在炸药表面形成漩涡流, 但该漩涡流的体积明显增大, 且漩涡流离加工炸药表面要远一些。

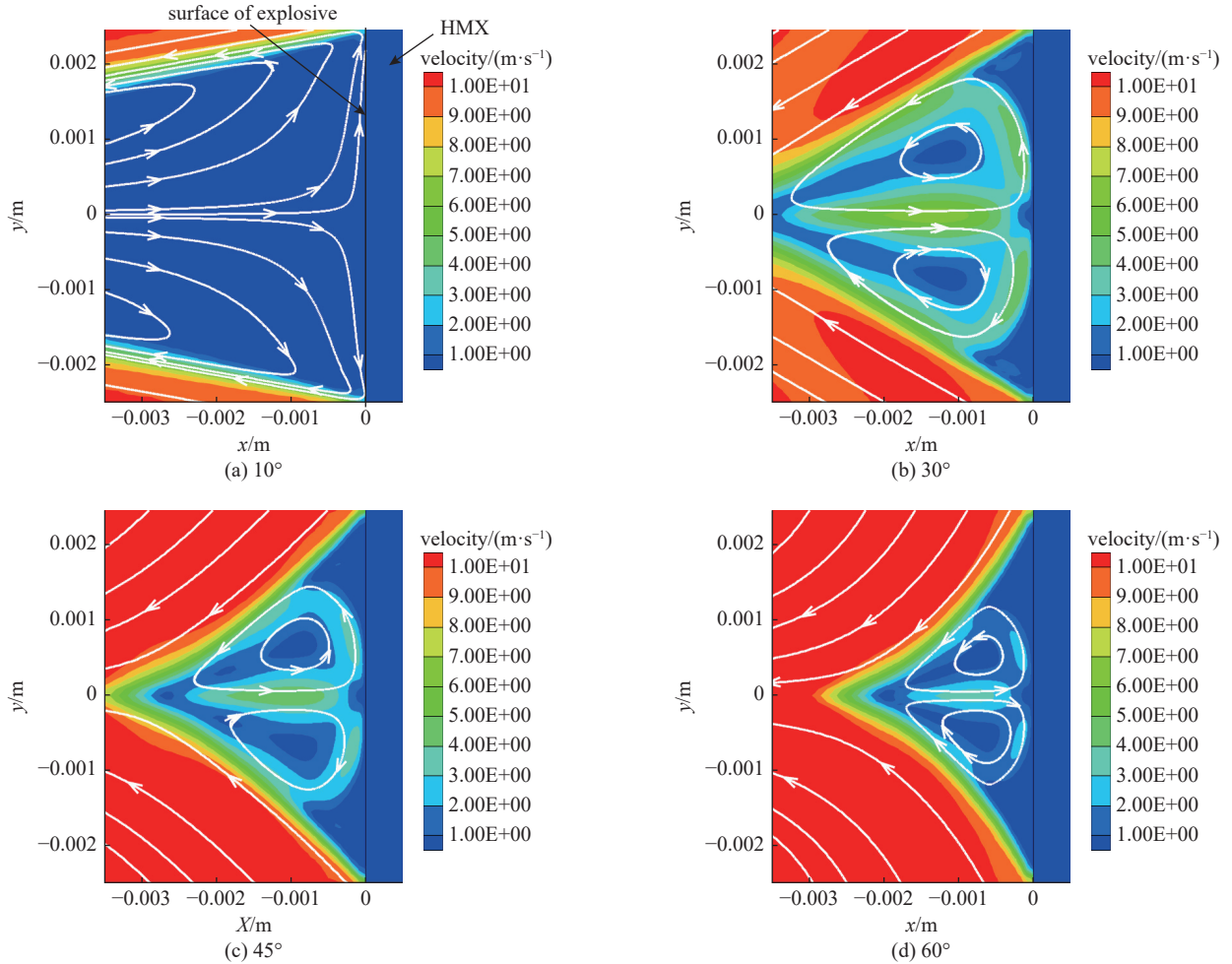


Fig. 5 Velocity distribution of flow field in the air domain under the action of bilateral airflow at different incidence angles

图 5 不同入射角度的双侧气流作用下, 空气中流场速度的分布

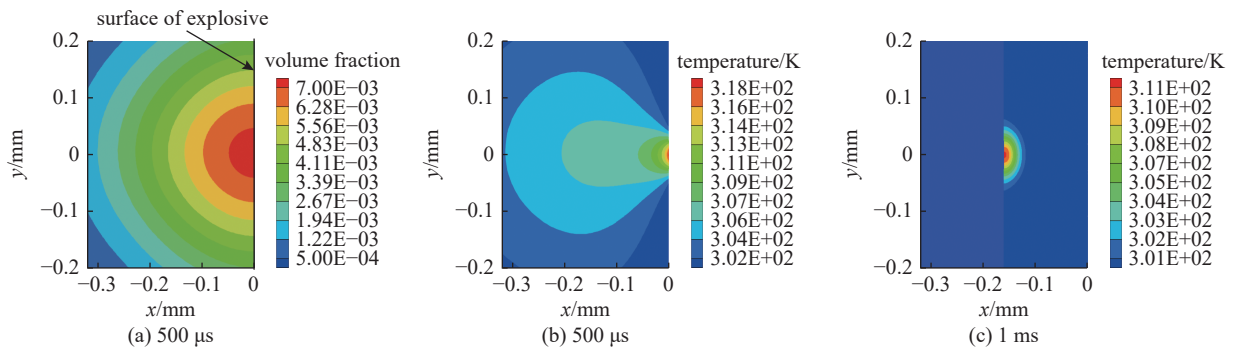


Fig. 6 Distribution of flow field without the action of external airflow

图 6 无外加气流时流场的分布

图 6 是无外加气流时流场的分布, 图 6(a) 是 $500 \mu\text{s}$ 时刻空气域中烧蚀气体产物的分布, 图 6(b) 是 $500 \mu\text{s}$ 时刻空气域中流场的温度分布, 图 6(c) 是 1 ms 时刻炸药中未烧蚀区域的温度分布。图 7 和图 8 分别是在 45° 双侧气流作用下, 空气域中烧蚀气体产物和流场温度的分布。由图 6、7、8 可知, 无外加气流时, 在 $500 \mu\text{s}$ 时刻, 气体产物的体积分数最高值为 0.007 , 流场最高温度为 318 K , 有气流加载时, 虽然气体产物体积分数的最高值为 0.008 , 但炸药表面附近的气体产物明显更少, 且流场最高温度为 308 K , 由此可知, 加载双侧气流可以加速烧蚀气体产物离开炸药装药表面, 从而降低烧蚀产物对炸药的热影响。这是由于在双侧气流作用下, 会形成体积较大的漩涡流, 明显改变了烧蚀气体产物的运动轨迹。一方面, 使烧蚀气体产物能够迅速离开炸药装药表面, 扩散到更远的区域。另一方面, 双侧气流还会增大烧蚀气体产物与周围空气的对流换热量, 有利于进一步降低烧蚀气体产物的温度。

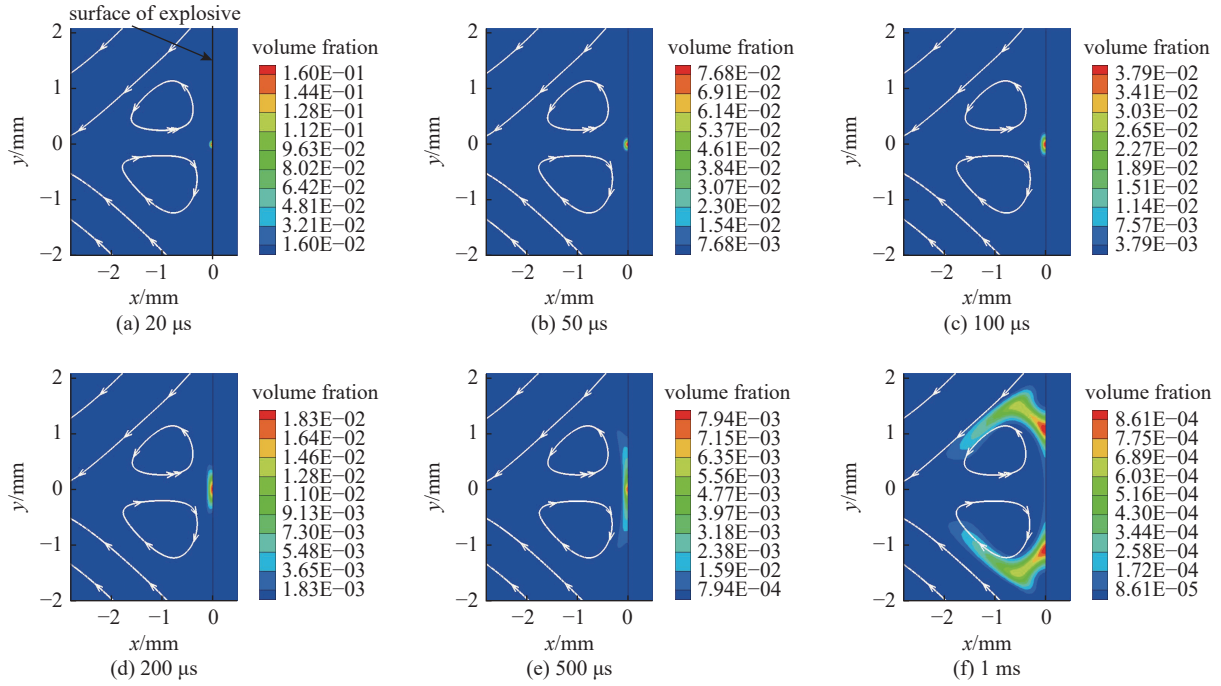


Fig. 7 Distribution of ablative gas products in the air domain under the action of 45° bilateral airflow

图 7 45°双侧气流作用下,空气中烧蚀气体产物的分布

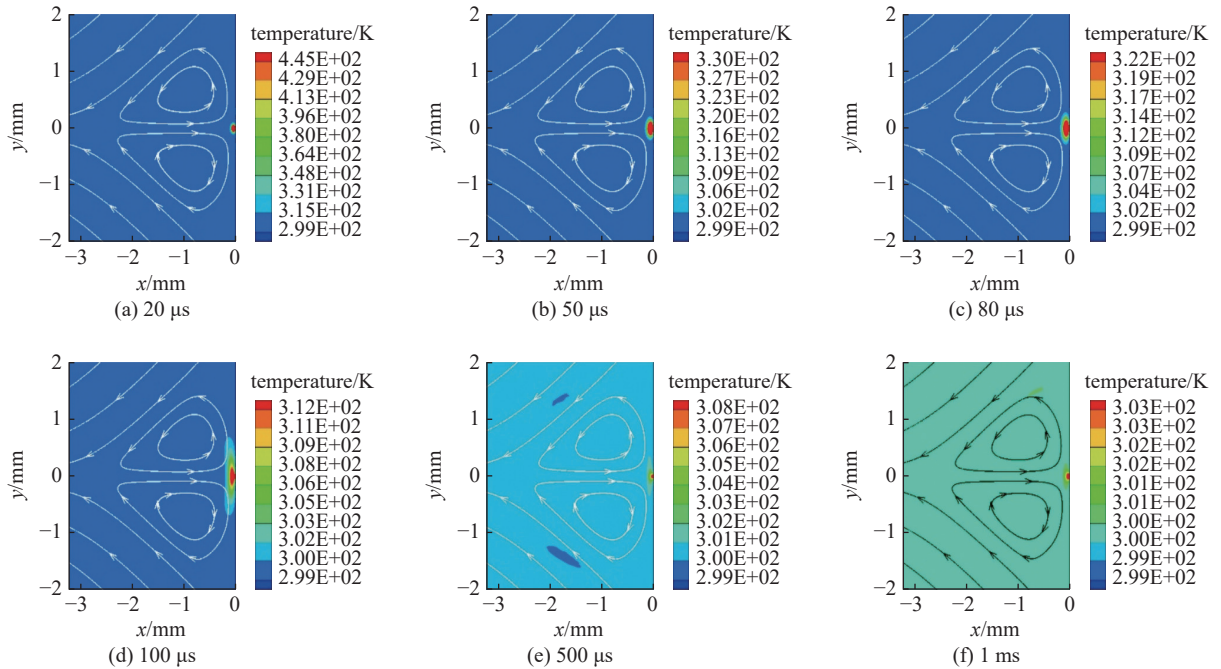


Fig. 8 Temperature distribution of flow field in air under the action of 45° bilateral airflow

图 8 45°双侧气流作用下,空气中流场温度的分布

图 9 是在 45°双侧气流作用下,单脉冲飞秒激光烧蚀作用 HMX 炸药装药后, HMX 炸药装药未烧蚀区域内的温度分布。由图 6、9 可知,在 1 ms 时刻,加载 45°的双侧气流后,未烧蚀区域内炸药的最高温度为 304 K,而无外加气流时,炸药内最高温度为 311 K。由此可知,在加载双侧气流后,炸药内产生热积累效应的区域明显减少,且最高温度值也明显下降。

2.2.2 多脉冲飞秒激光烧蚀炸药装药的情况分析

图 10 给出了不同入射角度的双侧气流作用下,炸药装药表面和内部监测点的温度-时间变化曲线。由图 10 可知,在多脉冲飞秒激光作用下,相比于无外加气流的情况,加载不同入射角度的双侧气流,均能够有效降低被加工炸药的温度。这表明,采用双侧气流的加载方式,有利于提高飞秒激光加工炸药装药过程的安全性。由图 10(b)

可知,入射角度为 60° 的双侧气流降低炸药内部温度的效果最好;由图 10(a)可知,当加工时间小于 30 ms 时,入射角度为 60° 的双侧气流降低炸药加工表面温度的效果最佳,当加工时间大于 30 ms 时,入射角度为 10° 的双侧气流对炸药表面温度的降低效果最好,入射角度为 60° 的双侧气流作用效果次之,但相差不大。综合以上分析可知,入射角度为 60° 的双侧气流对炸药的降温效果最好。

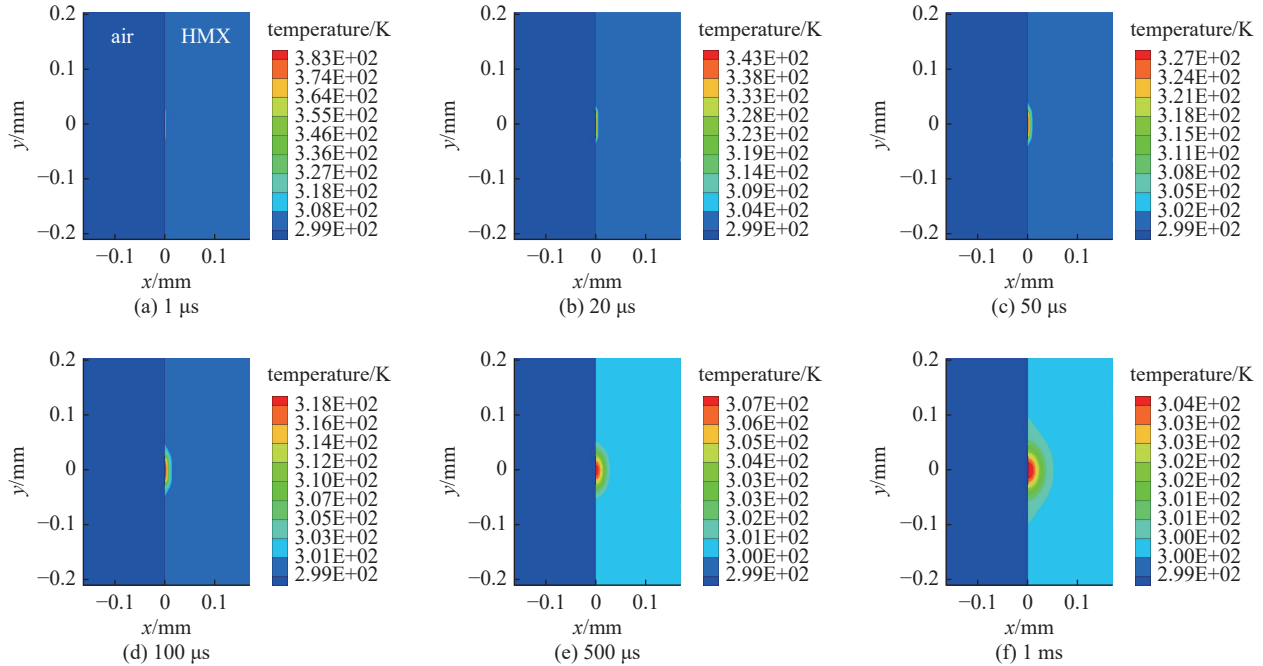


Fig. 9 Temperature distribution in the non-ablated area of HMX under the action of 45° bilateral airflow

图 9 45° 双侧气流作用下, HMX 炸药装药未烧蚀区域内的温度分布

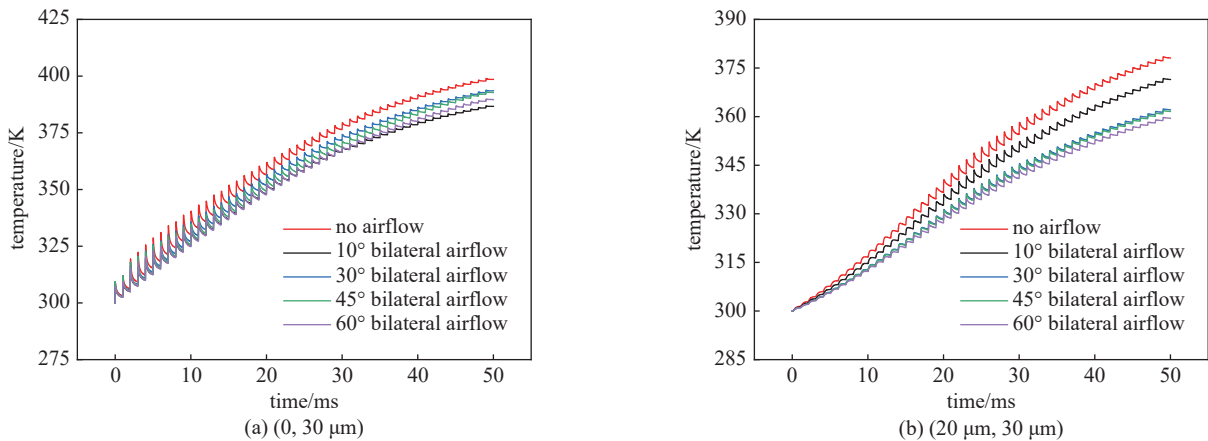


Fig. 10 Temperature-time curves of monitoring points under the action of bilateral airflow at different incidence angles

图 10 不同入射角度的双侧气流作用下, 监测点温度-时间变化的曲线

3 结 论

本文建立了加载气流条件下,多脉冲飞秒激光烧蚀炸药装药过程的二维流固耦合计算模型。以 HMX 炸药为研究对象,对加载不同入射角度的单侧和双侧气流的情况进行了数值模拟计算,结果表明:不同入射角度的单侧气流均会在炸药装药表面形成漩涡流,烧蚀气体产物受漩涡流影响在装药表面附近做旋转运动,不能迅速离开炸药表面,从而加重了高温烧蚀气体产物对剩余未加工炸药的热影响,不利于装药的安全加工;不同入射角度的双侧气流均能使烧蚀气体产物迅速离开炸药装药表面,有效减轻了烧蚀气体产物对剩余未加工炸药的热作用,从而有效降低了炸药装药的温度,因此,该方法在实际的加工过程中具有一定的应用价值,研究范围内,入射角度为 60° 的双侧气流对炸药的降温效果最好。

参考文献:

- [1] 王文亭, 胡冰, 王明伟. 飞秒激光精细加工含能材料[J]. *物理学报*, 2013, 62: 060601. (Wang Wenting, Hu Bing, Wang Mingwei. Femtosecond laser fine machining of energetic materials[J]. *Acta Physica Sinica*, 2013, 62: 060601)
- [2] 李全俊, 王国辉, 雷林, 等. 废旧弹药拆分技术现状与发展[J]. *兵工自动化*, 2018, 37(5): 93-96. (Li Quanjun, Wang Guohui, Lei Lin, et al. Present situation and development of waste ammunition decomposition technology[J]. *Ordnance Industry Automation*, 2018, 37(5): 93-96)
- [3] Roos E V, Benterou J J, Lee R S, et al. Femtosecond laser interaction with energetic materials[C]//Proceedings of SPIE 4760, High-Power Laser Ablation IV. 2002: 415-423.
- [4] Roeske F, Benterou J, Lee R, et al. Cutting and machining energetic materials with a femtosecond laser[J]. *Propellants, Explosives, Pyrotechnics*, 2003, 28(2): 53-57.
- [5] Boley C D, Cutter K P, Fochs S N, et al. Interaction of a high-power laser beam with metal sheets[J]. *Journal of Applied Physics*, 2010, 107: 043106.
- [6] 李君神. 切向气流环境中激光辐照下薄铝板响应初步研究[D]. 长沙: 国防科学技术大学, 2012. (Li Junshen. Preliminary research on the response of thin aluminum plate subjected to laser irradiation and tangential gas flow[D]. Changsha: National University of Defense Technology, 2012)
- [7] 张永强, 陶彦辉, 张黎. 亚声速切向气流对激光辐照 TA15 钛合金热响应的影响[J]. *应用激光*, 2014, 34(1): 32-35. (Zhang Yongqiang, Tao Yanhui, Zhang Li. Effect of subsonic tangential flow on the thermal response of TA15 Ti alloy irradiated by laser[J]. *Applied Laser*, 2014, 34(1): 32-35)
- [8] 蒙文, 张文杰, 李云霞, 等. 切向气流作用下激光辐照对尼龙材料的热烧蚀规律[J]. *光学精密工程*, 2017, 25(2): 351-357. (Meng Wen, Zhang Wenjie, Li Yunxia, et al. Thermal ablation law of laser irradiation on nylon materials under tangential airflow[J]. *Optics and Precision Engineering*, 2017, 25(2): 351-357)
- [9] Yamamoto R, Parker J, Boley C D, et al. Laser-material interaction studies utilizing the solid-state heat capacity laser[R]. Livermore: Lawrence Livermore National Laboratory, 2007.
- [10] Boley C D, Fochs S N, Rubenchik A M. Lethality effects of a high-power solid-state laser[R]. Livermore: Lawrence Livermore National Laboratory, 2007.
- [11] Boley C D, Fochs S N, Rubenchik A M. Large-spot material interactions with a high-power solid-state laser beam[R]. Livermore: Lawrence Livermore National Laboratory, 2008.
- [12] 张健, 黄晨光. 外部流场对激光加热运动目标影响的数值模拟[J]. *强激光与粒子束*, 2007, 19(11): 1817-1821. (Zhang Jian, Huang Chenguang. Numerical simulation of airflow effect on moving body under laser irradiation[J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 2007, 19(11): 1817-1821)
- [13] 陈敏孙, 江厚满, 刘泽金. 切向气流对激光辐照树脂基复合材料的影响[J]. *强激光与粒子束*, 2010, 22(12): 2848-2852. (Chen Minsun, Jiang Houman, Liu Zejin. Effect of tangential airflow on resin composite irradiated by laser[J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 2010, 22(12): 2848-2852)
- [14] 胡鹏, 陈发良. 高速气流中激光加热平板数值模拟与分析[J]. *强激光与粒子束*, 2011, 23(7): 1935-1939. (Hu Peng, Chen Faliang. Numerical simulation of plane target in airflow under laser irradiation[J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 2011, 23(7): 1935-1939)
- [15] 赵晓利, 孙振旭, 安亦然, 等. 高超声速气动热的耦合计算方法研究[J]. *科学技术与工程*, 2010, 10(22): 5450-5455, 5461. (Zhao Xiaoli, Sun Zhenxu, An Yiran, et al. Coupled flow-thermal analysis approach for hypersonic aerodynamic heating[J]. *Science Technology and Engineering*, 2010, 10(22): 5450-5455, 5461)
- [16] 李鹏飞, 吴颂平. 二维圆柱在高超声速气流中的耦合传热计算[J]. *导弹与航天运载技术*, 2010(6): 34-37. (Li Pengfei, Wu Songping. Coupling calculation of heat conduction in 2D column in hypersonic flows[J]. *Missiles and Space Vehicles*, 2010(6): 34-37)
- [17] 刘嘉锡, 伍俊英, 杨利军, 等. 单脉冲飞秒激光烧蚀炸药过程的热效应研究[J]. *强激光与粒子束*, 2020, 32: 071007. (Liu Jiaksi, Wu Junying, Yang Lijun, et al. Analysis of thermal effect on explosives of single-pulse femtosecond laser ablation[J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 2020, 32: 071007)
- [18] 刘嘉锡. 飞秒激光烧蚀炸药过程的热力响应机理和作用规律研究[D]. 北京: 北京理工大学, 2022. (Liu Jiaksi. Thermodynamic mechanism and action law of femtosecond laser ablation of explosive[D]. Beijing: Beijing Institute of Technology, 2022)
- [19] 张金龙, 郭子如, 杜明燃, 等. RDX 的爆炸产物组成和爆热的计算与分析[J]. *煤矿爆破*, 2019, 37(4): 24-27. (Zhang Jinlong, Guo Ziru, Du Mingran, et al. Calculation and analysis of explosive product composition and heat of RDX[J]. *Coal Mine Blasting*, 2019, 37(4): 24-27)
- [20] Tarver C M, Tran T D. Thermal decomposition models for HMX-based plastic bonded explosives[J]. *Combustion and Flame*, 2004, 137(1/2): 50-62.
- [21] 陈朗, 马欣. 炸药热安全性理论与分析方法[M]. 北京: 国防工业出版社, 2015. (Chen Lang, Ma Xin. Theory and analysis method of thermal safety of explosive[M]. Beijing: National Defense Industry Press, 2015)
- [22] 杨利军. 飞秒激光烧蚀炸药的作用机理研究[D]. 北京: 北京理工大学, 2021. (Yang Lijun. Mechanism of femtosecond laser ablation of explosive[D]. Beijing: Beijing Institute of Technology, 2021)