

〈制导与对抗〉

地面机动目标的红外诱饵欺骗技术研究

李石川¹, 张同来¹, 李黎华², 崔玉玲³, 苏如意¹, 汤润泽¹, 周遵宁¹

(1.北京理工大学 爆炸科学与技术国家重点实验室, 北京 100081;

2.昆明北方红外技术股份有限公司, 昆明 650217; 3.73921 部队, 南京 210016)

摘要: 针对地面机动目标的红外特性及作战环境, 分析了红外诱饵的欺骗作用机理, 探讨了现有技术中面源诱饵难以形成、红外辐射持续时间短、长波辐射较弱等制约地面车载诱饵发展的3个主要问题, 提出了相应的解决方案。

关键词: 光电对抗; 红外诱饵弹; 坦克; 面源红外辐射

中图分类号: TN21 文献标识码: A 文章编号: 1001-8891(2013)-11-0727-05

Research of Infrared Decoy Deception Technology of Land-based Maneuvering Targets

LI Shi-chuan¹, ZHANG Tong-lai¹, LI Li-hua², CUI Yu-ling³, SU Ru-yi¹, TANG Run-ze¹, ZHOU Zun-ning¹

(1. State Key Laboratory of Explosion Science and Technology, Beijing Institute of Technology, Beijing 100081, China;

2. Kunming North Infrared Technology Co., LTD, Kunming 650217, China; 3. 73921 Army Units, Nanjing 210016, China)

Abstract: Based on the infrared characteristics of land-based maneuvering targets and the battlefield environment, the infrared decoy deception mechanism is analyzed. Three main problems have been proposed in the article. The decoy agent can not form a large obstacle area. The infrared radiation can not last for a long time and the long-wave radiation is not strong enough. Combining with the existing infrared decoy technology at home and abroad, the article finally proposes the idea of decoy ammunition agent design scheme.

Key words: electro-optical countermeasure, infrared decoy projectile, tank, infrared radiation

0 引言

现代战场上大量应用的各种光电制导反坦克导弹、末制导炮弹、末敏弹和制导炸弹对战场地面机动目标, 如坦克、装甲等形成了全方位、多角度的精确打击, 为此提高地面机动目标的战场生存能力已是世界各国关注的焦点。红外诱饵弹是当前世界上最常用的红外对抗手段, 诞生几十年来, 在战争中发挥了重要作用^[1-3]。但是新型红外制导技术识别假目标和抗干扰能力不断提高, 特别是随着红外成像制导技术和光谱识别技术的应用, 传统点源型红外诱饵的干扰效能被大大降低^[4-6]。车载主动防护系统是近年发展起来的新概念防护手段, 而面源红外

诱饵是主动防护系统对抗红外制导武器的重要手段之一^[7-8]。本文针对陆基作战的特定环境和车体辐射特性, 探讨了目前红外诱饵欺骗干扰弹存在的辐射持续时间短、长波段辐射强度弱以及难以形成面源等的瓶颈问题。重点分析了诱饵剂爆炸微粒大小与干扰面积和干扰持续时间的关系, 并提出了解决或改进这些瓶颈问题的想法思路。

1 坦克目标红外辐射特性分析

地面机动目标的典型代表就是军用主战坦克, 坦克装甲外表面的红外辐射由自身辐射和反射辐射两部分组成, 其中反射辐射受地域、季节等因素影响较大, 理论研究中主要考虑坦克自身辐射的影

收稿日期: 2013-06-25; 修订日期: 2013-08-21。

作者简介: 李石川(1989-), 湖北荆州人, 在读研究生, 研究方向为光电对抗无源干扰技术, E-mail: lsc881127@163.com。

通讯作者: 周遵宁(1969-), 山东莱阳人, 副研究员, 研究方向为光电对抗无源干扰技术, E-mail: zzn@bit.edu.cn。

基金项目: 爆炸科学与技术国家重点实验室科研专项基金项目。

响^[9-11]。根据文献报道, 坦克行驶时动力舱温度约80℃~90℃, 其他装甲表面温度约30℃~40℃^[12-13], 由公式(1)可计算出近红外和远红外波段范围内的辐射出射度^[14]:

$$M_{\lambda_1 \sim \lambda_2} = \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} \frac{c_1}{\lambda^5} \frac{1}{e^{\frac{c_2}{\lambda T}} - 1} d\lambda \quad (1)$$

式中: c_1 为第一辐射常数, $3.7415 \times 10^8 \text{ W} \cdot \mu\text{m}^4/\text{m}^2$; c_2 为第二辐射常数, $1.43879 \times 10^4 \text{ m} \cdot \text{K}$; λ 为波长, μm ; T 为温度, K 。

辐射亮度计算式为:

$$L = \varepsilon \frac{M_{\lambda_1 \sim \lambda_2}}{\pi} + \frac{M_{\text{rad}}}{\pi} \quad (2)$$

式中: ε 为材料表面发射率; M_{rad} 为反射辐射值。表1 为坦克装甲不同部位的中远红外辐射亮度对比表。

由动力舱红外辐射数据可知, 坦克装甲在远红外波段的辐射值是近红外波段辐射强度的30~50倍, 为了模拟目标的红外辐射特性, 红外诱饵需与目标有相似的光谱分布的同时, 其有效辐射强度通常为被保护目标的5~7倍或更大, 车载红外诱饵燃烧时在3~5 μm的光谱辐射亮度应在6~9 $\text{W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{sr}^{-1}$, 而在8~12 μm的光谱辐射亮度应在

230~320 $\text{W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{sr}^{-1}$ 左右。

2 地面机动目标诱饵欺骗作用机理分析

红外面源诱饵弹在空中一定高度通过爆炸方式形成持续发射红外辐射的粒子云团, 以模拟被保护目标的红外特征, 使红外成像制导设备被欺骗, 偏离原有弹道, 起到对目标的保护作用。其模拟目标的红外特征包括目标的辐射光谱特性, 与背景的辐射对比度, 辐射能量和辐射面积等。一般红外诱饵的辐射波段主要覆盖1~3 μm, 3~5 μm 和8~14 μm 三个主要的大气窗口^[15]。

国内外广泛应用的聚四氟乙烯镁(MTV)诱饵剂成分为少量氟橡胶包覆的PTFE与镁粉或镁铝合金粉的混合物, 有些还会添加少量碳纤维以提高红外辐射强度^[16-17]。车载诱饵弹形成红外诱饵的过程为弹内扩爆药将弹体破碎, 同时点燃飞散的红外诱饵剂碎片, 诱饵剂碎片在空中燃烧并释放微小的高温粒子, 形成持续的红外辐射。氧化剂(PTFE)与燃料(Mg)均匀混合颗粒的燃烧是粒状扩散燃烧, 属于层状燃烧, 燃烧过程分如下几个步骤, 如图1所示。混合物吸收热量; PTFE气化分解, 生成C₂F₄等, Mg外层熔化、气化; 熔化、气化的镁与PTFE

表1 坦克部位中、远红外辐射亮度对比表

Table 1 The 3~5 μm and 8~12 μm IR radiant intensity of tank

甲板部位	光谱辐射亮度/(W·m ⁻² ·sr ⁻¹)		L_{8-12}/L_{3-5}
	3~5 μm	8~12 μm	
上装甲板	0.705	34.961	49.59
后装甲板	0.879	40.707	46.31
进气百叶窗	0.583	33.159	56.88
排气百叶窗	1.33	46.745	35.15

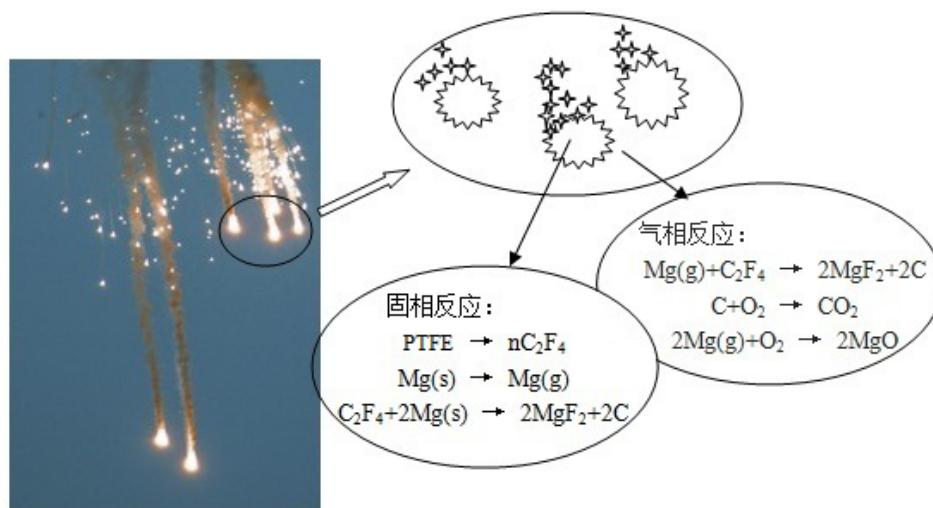


图1 诱饵弹气、固相反应示意图

Fig.1 The reactions in gas and solid phases of burning decoy

的分解产物 C_2F_4 反应生成 MgF_2 ; 镁与氟化镁颗粒被推向气相区, 其中镁在气相区继续燃烧 (PTFE 充足条件下), 接着进行下一层燃烧; 如果氧化剂不足, 则镁与空气中的氧气反应。

3 地面机动目标红外诱饵面临的困难和挑战

现有的车载诱饵弹设计方案, 产生的诱饵呈多点式分布, 在空中停留的时间短, 仅在 $3\sim 5\text{ }\mu\text{m}$ 波段有强辐射效果, 在 $8\sim 12\text{ }\mu\text{m}$ 远红外波段的辐射强度不高, 而且诱饵在空气中冷却很快, 持续红外辐射的时间短, 极大地影响了红外诱饵的诱骗干扰效果。

3.1 传统诱饵留空时间短, 难以形成面源

当前的地面机动目标采用的诱饵弹结构一般都是圆柱形对称结构, 在中心轴位置设置爆管, 用于抛散中心爆管周围的红外诱饵剂。为了达到一定的分散面积和足够的留空时间, 必须对爆炸分散形成的诱饵颗粒粒径范围严格控制。当中心爆管爆炸后, 诱饵剂会在爆炸作用下点燃并分散开。诱饵剂爆炸分散分为加速阶段、减速阶段和湍流阶段, 分散的径向范围和分散粒度范围主要由前 2 个阶段决定^[18]。

中心爆管爆炸后, 爆轰气态产物开始膨胀, 初始阶段可视为等熵绝热膨胀。假定中心爆管装药的密度 $\rho=1.72\text{ g/cm}^3$, 装药半径 $r_0=9\text{ mm}$, 爆速 $D=8300\text{ m/s}$, 采用爆生气体分段等熵膨胀的方法估算初始爆生气体的膨胀半径 r_1 , 当气体产物压力 P 等于外界环境大气压力 P_0 时, 膨胀半径 r_1 约为装药半径 r_0 的 36 倍, 即 $r_1=0.324\text{ m}$, 此时加速阶段结束。随后诱饵颗粒在外界作用下作减速运动, 其运动状况决定了抛散距离。以单个诱饵颗粒为例, 其密度、直径和水平速度分别为 ρ_p 、 d_p 、 u_{ph} , 空气密度、运动速度和动力粘性系数分别 ρ_c 、 u_c 、 μ 。在水平方向上, 颗粒运动简化为单一球形颗粒二相流一维运动。燃料颗粒的受力主要有惯性力 F_1 , 阻力 F_2 , 广义浮力 F_3 , 重力 G , 附加质量力 F_4 , 其表达式分别为:

$$\text{惯性力 } F_1 = \frac{1}{6}\pi d_p^3 \rho_p \frac{du_p}{dt}, \quad t \text{ 表示时间;}$$

$$\text{阻力 } F_2 = -\frac{1}{8}\pi C_D d_p^2 \rho_c |u_c - u_p| (u_c - u_p), \quad C_D \text{ 为阻}$$

力系数, 当雷诺数 Re 不大时, $C_D = \frac{24}{Re} f(Re)$,

$$Re \equiv \frac{\rho_c d_p |u_c - u_p|}{\mu};$$

广义浮力 $F_3 = \frac{1}{6}\pi d_p^3 \frac{dp}{dy}$, 压强梯度 dp/dy 由空气重力引起, y 轴垂直向上, 则 $-\frac{dp}{dy} = \rho_c g$;

重力 $G = -\frac{1}{6}\pi d_p^3 \rho_p g_y$, g_y 是重力加速度沿颗粒运动方向的分力;

$$\text{附加质量力: } F_4 = \frac{1}{12}\pi d_p^3 \rho_c \left(\frac{du_p}{dt} - \frac{du_c}{dt} \right)$$

由上述分析, 作用在颗粒上的力平衡方程为:

$$\frac{du_p}{dt} = -\frac{1}{\rho_p} \frac{dp}{dy} + g_y + \frac{1}{2} \frac{\rho_c}{\rho_p} \frac{d}{dt} (u_c - u_p) + \frac{(u_c - u_p)}{\rho_p d_p^2 / [18\mu f(Re)]} \quad (3)$$

不考虑颗粒对空气反作用力, 并忽略空气流动, 则可解得:

$$u_p = u_{p0} \exp\left(-\frac{t}{\tau_v}\right) \quad (4)$$

式中: u_{p0} 为诱饵颗粒加速段结束时最大速度。

$u_p(0) = u_{p0}$, 解之得:

$$x = \tau_v (u_{p0} - u_p) = u_{p0} \tau_v \left(1 - \exp\left(-\frac{t}{\tau_v}\right)\right) \quad (5)$$

式中: x 即 t 时刻诱饵颗粒的水平抛散距离。 u_p 呈负指数速率衰减, 其衰减快慢取决于 τ_v :

$$\tau_v = \frac{\rho_p d_p^2}{18\mu} / f(Re)$$

对于图 1 中所示 MTV 诱饵颗粒而言, 颗粒密度 ρ_p 约为 1.6 g/cm^3 , 空气动力粘性系数取 20°C 时的 $1.5 \times 10^{-5}\text{ m}^2/\text{s}$, $f(Re)$ 简化为 Stokes 阻力, $f(Re)=1$, 则可知 $\tau_v=6 \times 10^3 d_p^2$ 。

由图 2 可知, 粒径越大的颗粒在水平方向运动得越远, 形成的干扰面积越大, 1 mm 直径的粒子只能被抛散到 1.2 m 左右, 而 3 mm 直径的粒子却能被抛到 12 m 远处。

诱饵颗粒的留空时间也主要由粒径的大小决定, 垂直方向的粒子运动情况主要考虑空气阻力和重力的影响。

$$\frac{du_{py}}{dt} = g - \frac{18\mu}{\rho_p d_p^2} u_{py} \quad (6)$$

初始条件 $t=0$, $u_{py}=0$, 则:

$$u_{py} = \frac{g - \exp(-18\mu t / \rho_p d_p^2)}{18\mu t / \rho_p d_p^2} - c \quad (7)$$

式中: c 为常数。

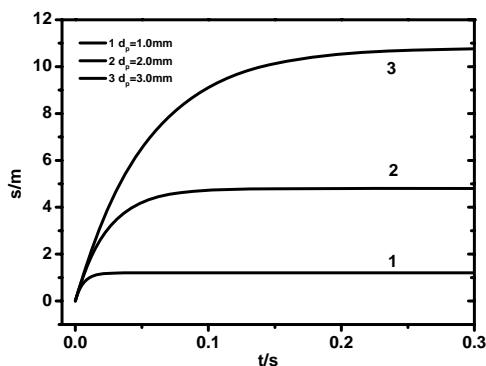


图2 诱饵颗粒抛散距离随时间变化的规律

Fig.2 The change of horizontal distance of different size decoy particles after release

由图3可知,粒径越大的粒子在空气中下落的速度越快。以5 m落高为例,0.5 mm的粒子需5 s,1.0 mm的粒子需3.5 s,2.0 mm的粒子为3.24 s,而3.0 mm的粒子为3.2 s。随着粒径的进一步增加,空气阻力对粒子下落速度的影响减弱,逐渐接近自由落体运动。根据计算结果,单纯依靠调整诱饵颗粒粒径,无法解决干扰面积和干扰持续时间的矛盾。

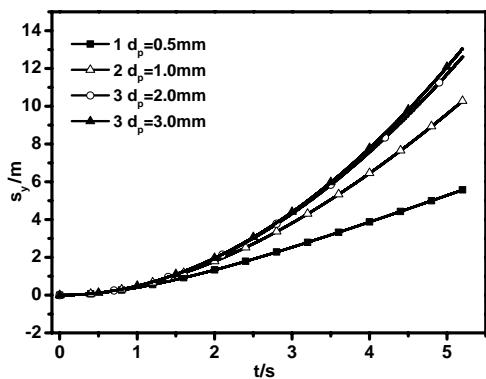


图3 不同粒径的诱饵微粒在竖直方向的落高与时间的关系

Fig.3 The change of vertical height of different size decoy particles after release

3.2 面源诱饵红外辐射持续较长时间

当前红外诱饵烟云主要是通过烟火燃烧反应形

成的,其辐射性能依靠反应温度和反应产物。而由于大气的扩散和对流作用的影响,辐射烟云的温度很快会降低至环境温度,因此单靠提高温度来实现长时间的红外辐射在应用上是很难实现的,这是对地面机动目标采用烟幕诱饵的提出的重大技术挑战。图4是诱饵辐射烟云在5 s时的长波红外辐射图,此时的辐射强度已低于100 W/sr,无法形成有效欺骗。



图4 释放后5 s时诱饵红外图

Fig.4 Infrared image of decoy released after 5 s

3.3 长波辐射强度不足,无法形成有效干扰

表2为根据式1计算出的黑体辐射亮度数据,在不考虑辐射率 ε 的情况下,400 K黑体在3~5 μm 和8~12 μm 的光谱辐射亮度约为表1中所示的坦克的真实亮度数据的5~10倍,根据实验经验,此时诱饵的干扰效果最佳。但实际爆炸分散形成的诱饵颗粒并非黑体,其辐射率 $\varepsilon<1$,且在3~5 μm 和8~12 μm 波段的辐射率也不尽相同。由表2数据可看出,温度低于600 K时,远红外波段的光谱辐射亮度高于中红外波段的辐射亮度,因此为了模拟地面机动目标的红外特征,诱饵颗粒的温度应尽量低于600 K。

目前国内的红外诱饵弹药主要来源于传统的闪光弹、可见光曳光弹及照明弹,这些弹药燃烧时温度都远高于600 K,导致了红外诱饵在可见光和中

表2 黑体辐射亮度数据 Table 2 IR radiation intensity of blackbody

温度/K	光谱辐射亮度 $L/(\text{W}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{sr}^{-1})$		$L_{8\sim12}/L_{3\sim5}$
	3~5 μm	8~12 μm	
300	5.881	123.76	21.04
400	94.62	433.01	4.576
500	535.85	942.88	1.760
600	1767.43	1615.90	0.9142
700	4238.43	2412.25	0.5691
1000	21721.68	5266.08	0.2424

红外波段的辐射较强,但是在8~12 μm远红外波段的能量则远低于前者,严重影响了诱饵的干扰效果。

4 发展对策

面向未来战争的车载红外诱饵要能够逼真地模拟坦克、装甲车等地面车辆的红外辐射,必须适当地选择其组分,使红外诱饵弹在红外波段的辐射频谱与车辆的相似,并且强度要大于地面车辆的数倍。传统的采用MTV药剂的红外诱饵弹,若不加以改进,无法满足地面机动目标的光电对抗要求。

针对陆基红外诱饵炸点低、装药量少、远红外辐射强度不高等客观因素,适合陆基车载的红外诱饵弹用诱饵剂应具有如下特点:

1) 爆炸分散形成的诱饵颗粒能够形成疏松多孔的絮状结构,以在空中悬浮更长时间。这就要求在药剂组分中添加快速产气和快速膨胀组分,该组分在爆炸前为高密度形态,经过爆炸分散和快速燃烧后,会形成在空中悬浮的絮状物质。膨胀石墨是一种很有参考价值的物质,但是由于其在混药和压药过程中发热严重,容易引发安全事故,而且膨胀石墨膨胀时吸热量大,药剂有熄燃的危险,使用时应慎重。另外如何提高这种产生絮状物质的组分在药剂中的含量也是一个需要解决的问题。

2) 为了使悬浮诱饵颗粒可以在空气中进一步缓慢氧化或者燃烧,实现持续的红外输出。技术上应采用吸附或包覆手段,将最佳配比的缓慢燃烧药剂包覆在诱饵颗粒表面或吸附到多孔材料内部。这种缓慢氧化药剂的燃烧组分和氧化组分的混合程度应尽可能的达到微米级,保证在爆炸分散过程中不会从颗粒表面脱落或是在存储过程中解吸,使药剂的燃烧温度尽可能均一,影响欺骗干扰效果。

3) 为了实现地面车辆红外信号的逼真模拟,诱饵颗粒载体及缓慢氧化药剂材料应选择在远红外波段具有较强的表面发射率的特殊光谱材料,如:碳纤维,二氧化硅粉,陶瓷粉,石墨等。

5 结束语

地面机动目标红外诱饵在设计时应充分考虑自身的红外特征及作战环境等条件,不能照搬现有的机载、舰载等传统的诱饵弹技术。为了有效地对抗红外反坦克导弹、末敏弹等光电制导武器,改进目前红外诱饵弹材料及药剂配方或开发新材料、新配方,控制红外诱饵药剂的分散状态和燃烧状态,使红外诱饵弹的频谱特性近似于地面目标的频谱特

性,使红外诱饵弹的散布面积达到地面目标的真实面积,以达到增强红外诱饵弹干扰效能的目的。

参考文献:

- [1] 罗海波,史泽林. 红外成像制导技术发展现状与展望[J]. 红外与激光工程, 2009, 38(4): 565-573.
- [2] 吴涛,陈磊. 成像式红外诱饵弹技术的发展[J]. 舰船电子工程, 2010, 30(5): 31-35.
- [3] Sippel T R, Son S F, Groven L J. Altering reactivity of aluminum with selective inclusion of polytetrafluoroethylene through mechanical activation[J]. Propellants, Explosives, Pyrotechnics, 2013, 38(2): 286-295.
- [4] 周遵宁,张同来,乔小晶,等. 强辐射对抗红外制导导弹机理探讨[C]//第九届全国光电技术学术交流会论文集, 2010: 442-445.
- [5] 吴刚,武春风,刘建华,等. 激光调制气溶胶红外诱饵对成像制导导弹的干扰分析[J]. 光学技术, 2005, 31(6): 901-903.
- [6] Sippel T R, Son S F, Groven L J. Modifying aluminum reactivity with poly(carbon monofluoride) via mechanical activation[J]. Propellants, Explosives, Pyrotechnics. 2013, 38(3): 321-326.
- [7] 王继光,王敏帅,臧寿洪. 国内外红外诱饵弹的发展和试验方法研究[J]. 红外, 2011, 32(10): 17-20.
- [8] 赵晓凡. 坦克装甲车辆主动防御系统研究[J]. 车辆与动力技术, 2002(3): 53-57.
- [9] 蒋国涛,邢伯阳,李黎华,等. 高原山地光电对抗中的烟幕技术[J]. 红外技术, 2011, 33(11): 663-665.
- [10] 毕小平,黄小辉. 坦克动力舱体红外辐射特性模拟[J]. 激光与红外, 2009, 39(5): 499-502.
- [11] 韩玉阁,李强,宣益民. 装甲车辆热特征试验研究[J]. 弹道学报, 2002, 14(1): 63-68.
- [12] 罗来科,韩玉阁,章桂芳,等. 坦克车辆红外特性测试与分析[J]. 车辆与动力技术, 2005(4): 7-11.
- [13] 郑坤鹏,毕小平,黄小辉,等. 坦克排烟的红外辐射计算及热图像仿真[J]. 激光与红外, 2010, 40(6): 613-616.
- [14] 朱寿远,魏德孟,姚军田. 主战坦克与地物背景红外辐射特性研究[J]. 红外技术, 2000, 22(5): 45-50.
- [15] 黄小辉,毕小平. 坦克动力舱装甲板红外辐射温度计算分析[J]. 光电工程, 2009, 36(7): 89-93.
- [16] 张昊越,蔚红建. 浅谈增强红外诱饵弹的干扰效能[J]. 飞航导弹, 2012(8): 30-32.
- [17] Koch E-C, Hahma A, Weiser V, et.al. Metal-Fluorocarbon Pyrolants. XIII: High Performance Infrared Decoy Flare Compositions Based on MgB₂ and Mg₂Si and Polytetrafluoroethylene/Viton®[J]. Propellants, Explosives, Pyrotechnics, 2012, 37(4): 432-438.
- [18] Zhang S, Badiola C, Schoenitz M, et.al. Oxidation, ignition, and combustion of Al-I₂ composite powders[J]. Combustion and Flame, 2012, 159(5): 1980-1986.
- [19] 罗艾民,张奇,李建平,等. 爆炸驱动作用下固体燃料分散过程的计算分析[J]. 北京理工大学学报, 2005, 25(2): 103-107.