

基于 Q 准则的燃烧弹热辐射效果评估研究

安文书, 卢薇, 李红欣, 马士洲, 程万影

(军事科学院防化研究院, 北京 102205)

摘要: 提出利用瞬态火灾热剂量伤害准则评价燃烧弹热辐射毁伤效果的方法; 以 Baker 模型为基础, 估算燃烧弹形成火球的热通量和热剂量, 之后利用混凝土收集靶模拟敌方工事进行验证; 试验中在靶口左-右-下三点采集燃烧弹动态热流密度数据, 利用敌方反应逃离时间(3 s)参数, 通过积分公式计算热剂量值; 试验结果表明: 燃烧弹能够干扰或瘫痪工事内人员行动; 热剂量准则对于评价某型燃烧弹的热辐射效果较为理想, 能够在一定程度上克服定性评价的缺陷。

关键词: 燃烧弹; 热辐射; 热剂量; 效果评估; 燃烧火球

本文引用格式: 安文书, 卢薇, 李红欣, 等. 基于 Q 准则的燃烧弹热辐射效果评估研究[J]. 兵器装备工程学报, 2019, 40(4): 95-97, 136.

Citation format: AN Wenshu, LU Wei, LI Hongxin, et al. Assessment of Damage in Heat Radiation of Incendiary Bomb on Q Criterion[J]. Journal of Ordnance Equipment Engineering, 2019, 40(4): 95-97, 136.

中图分类号: E920.8; TJ53

文献标识码: A

文章编号: 2096-2304(2019)04-0095-03

Assessment of Damage in Heat Radiation of Incendiary Bomb on Q Criterion

AN Wenshu, LU Wei, LI Hongxin, MA Shizhou, CHENG Wanying

(Institute of Chemical Defense, PLA Academy of Military Science, Beijing 102205, China)

Abstract: The method of using the transient fire thermal dose injury criterion to evaluate the damage effect of the thermal radiation of the incendiary bomb was proposed. Based on the Baker model, the heat flux and thermal dose of the fireball were estimated. The concrete collection target was then used to simulate the enemy construction for verification tests. In the test, the dynamic heat flux data of the incendiary bomb was collected at the left-right-lower point of the target port, and the enemy reaction escape time (3 s) parameter was used, and the thermal dose value was calculated by the integral formula. The test results show that the incendiary bomb can interfere and paralyze enemy actions. Through the test, the thermal dose criterion (Q criterion) is suitable for evaluating the heat radiation effect of the incendiary bomb, which can overcome the defects of the combustion bomb evaluation about damage and injury.

Key words: incendiary bomb; heat radiation; thermal dose; damage effect; fireball

燃烧武器主要包括喷火器以及各类燃烧弹药等, 利用燃烧剂对有生目标实施烧伤, 对易燃目标实施引燃、纵火毁伤。随着新质作战力量建设不断增强, 燃烧武器的独特毁伤作用成为打击手段的有益补充。例如使用燃烧武器迫使坑道、洞穴、碉堡里面负隅顽抗的敌人离开工事, 缴械投降。燃烧武

器作为战场上的重要装备, 其作用效果评估是作战效能评估的基础, 有必要深入研究, 拿出真实可信的数据, 促进各类武器的融合互补, 发挥其最大作战效能。

燃烧效应主要以对流、传导、辐射等方式作用于目标, 理论上通常以 Baker 公式估算燃烧火球的热效应。由于燃烧

收稿日期: 2018-12-01; **修回日期:** 2019-01-10

作者简介: 安文书(1981—), 男, 硕士, 助理研究员, 主要从事弹药工程研究。

通讯作者: 卢薇(1974—), 女, 副研究员, 主要从事弹药工程研究, E-mail: luwei102205@sina.com。

剂或燃烧武器对目标的纵火毁伤作用是持续性的,通常采用热通量准则(Q 准则)评价。但当燃烧武器产生的热辐射作用时间较短时,宜采用热剂量准则(Q 准则)更为合理。

1 评估模型及准则介绍

1.1 建立评估模型

设计模拟燃烧弹,在空中点燃燃烧剂,形成飞行的火球(火柱)对抗道、洞穴、碉堡等工事里的敌目标实施纵火毁伤。采用正面 2 m × 2 m,深 4 m 的混凝土收集靶模拟坑道、洞穴、碉堡等工事,用于评价该弹辐射效果,收集靶及热辐射效果评价示意图如图 1。

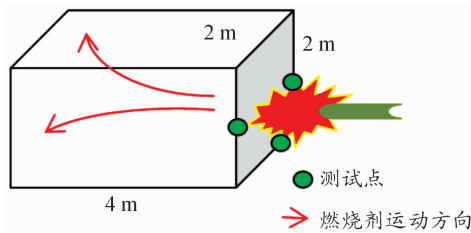


图 1 热辐射效果评价示意图

燃烧弹自收集靶口部作用,分散出燃烧剂形成火球,在惯性作用下,飞入收集靶并在其内部蔓延,对靶部目标实施纵火毁伤,可见燃烧毁伤作用在靶内部是持续性的,而在口部,其辐射作用是瞬时的。该类型弹药的主要目的是迫使敌有生力量逃离隐蔽之处并造成一定的纵火毁伤,同时引燃内部易燃物资,由于口部的毁伤作用是掠过性的,口部热辐射作用最弱,故将试验测试热辐射效果的评估点选在收集靶口部位置。

建立评估模型,该收集靶为模拟坑道洞穴目标,火球自口部飞入时,考虑重力作用,评价测试点位于口部正面左-右-下三点。作用过程中火球飞入工事内,有生目标只能向反向逃生,根据模型空间距离,其反应逃离时间应不超过 3 s。

1.2 选取评估准则

热辐射毁伤准则主要有热通量(q) 准则,热剂量(Q) 准则,热通量-热剂量($q-Q$) 准则,热通量-时间($q-t$) 准则,热剂量-时间($Q-t$) 准则,由于热剂量是热通量的累积,故 $q-Q$, $q-t$, $Q-t$ 是等效的。对于燃烧药剂,评价其热辐射效果,选用热通量准则(q 准则)较为合适。对于该类燃烧弹来说,由于飞行速度、作用方式等因素影响,其火球持续时间短暂,评价其热辐射效果,选用热剂量准则(Q 准则)较为合适。据此,本文中采用上述两种评估准则进行分析。

1.2.1 热通量准则

热通量准则以目标接受的热通量作为衡量目标是否被破坏的参数。当目标接受的热通量等于或大于目标被破坏的临界热通量时,目标被伤害破坏。根据 ISO13506—2 标准,加载于普通服装外表面的热通量达到 84 kW/m² 能够导

致人员烧伤。因此,本文的热通量准则为热通量(q) 数据不小于 84 kW/m²。

1.2.2 热剂量准则

热剂量准则以目标接受的热剂量作为衡量目标是否被破坏的参数。当目标接受的热剂量等于或大于目标被破坏的临界热剂量时,目标被伤害破坏。根据瞬态火灾作用下的热伤害破坏的临界热剂量,如表 1 所示,考虑本文前述的评估模型,假设有生目标的 3 s 逃离时间即热剂量作用时间。

表 1 热剂量准则

热剂量/(kJ · m ⁻²)	破坏伤害程度
65	皮肤疼痛
125	一度烧伤
172	轻伤
250	二度烧伤
375	三度烧伤
392	重伤

2 辐射效果估算

燃烧弹作用后形成火球,本质上为液态燃烧剂气化着火产生,对火球和持续时间研究,在军事及安全评估领域均有应用。模拟弹燃烧剂装填量为 1.6 kg,采用适用可燃物为 10 kg 以下的 Hasegawa 和 Sato 模型:

$$D = 5.25W^{0.314} \quad (1)$$

$$t = 1.07W^{0.181} \quad (2)$$

其中, D 为火球直径(m); t 为持续时间(s); W 为燃烧剂质量(kg)。

根据式(1)和式(2)计算火球直径为 6.08 m,持续时间 1.165 s。上述模型中火球扩散成长数据是在无约束情况下计算得出。而在实际试验测试中,燃烧弹分散后形成火球,在惯性作用下火球并未完全形成,便已经进入收集靶内部,这与采用模型估算火球直径有一定差别。由于燃烧弹作用后并不能立即达到毁伤效果,有生目标会反向逃生,所以火球燃烧持续时间仅做参考。

根据 Baker 模型,不考虑大气损耗,假设:火球成长过程不变;传导及对流过程远小于辐射传热过程;火球密度和体积稳定;单位质量燃烧剂释放能量与燃烧剂种类无关,得出经验式(3)和式(4):

$$q = \left(\frac{G \frac{D^2}{L^2}}{F + \frac{D^2}{L^2}} \right) T^4 \quad (3)$$

$$Q = \left(\frac{D^2}{F + \frac{D^2}{L^2}} \right) (bG) T^{\frac{2}{3}} M^{\frac{1}{3}} \quad (4)$$

其中, q 为热通量(W/m²); Q 为热剂量(J/m²); T 为火球温

度(K); L 为目标至火球中心距离(m); G 为常量 0.958×10^{-7} ; bG 为常量 2.04×10^{-4} ; F 为常量 161.7。

根据上述模型估算燃烧弹形成火球的热通量和热剂量,其中,火球温度(T)为燃烧剂静态测试温度 1 000 °C (1 273 K),目标至火球中心距离(L)为收集靶正面宽度的 1/2,即 1 m。计算结果热通量为 46.88 kW/m²,热剂量为 522 J/m²。

3 辐射效果试验

3.1 试验准备

为了较为准确评估燃烧弹热辐射效果,用热流密度传感器测试热通量值,建立图 1 所示收集靶进行动态射击试验。试验用热流密度传感器置于洞口左、下、右 3 个方向,距中心 1 m,记录传感器产生电压值并转换为热通量值。试验记录时间 10 s,采样率 1 000 Hz,预先记录 3 s,热流密度传感器参数见表 2,试验前传感器通过校准比对,保证试验评价准确性。

表 2 热流密度传感器参数

型号	JCR-200
生产厂家	北京航天计量测试技术研究所
量程/(kW·m ⁻²)	200
灵敏度/(kW·(m ² ·V ⁻¹) ⁻¹)	40
允许误差	±3% ($k=2$)

3.2 试验结果

燃烧剂的静态测试试验中,采用热流密度测试时要求至少 1 个测试点采集的数据满足要求。本文中试验所用的燃烧剂其静态测试热通量均超过 84 kW/m² 的要求。

试验在满足密集度指标基础上进行,共进行两发试验,测试数据如图 2、图 3 所示。

试验中第 1 发弹在收集靶口部作用,形成火球后大部分燃烧剂进入靶内部,测试结果显示热流密度数值快速上升,短时间持续后快速下降。第 2 发弹在收集靶口部偏右侧作用,形成火球后部分燃烧剂没有完全进入收集靶内部,落在口部右侧的燃烧剂持续燃烧,3 s 后仍持续形成数个热通量峰值。

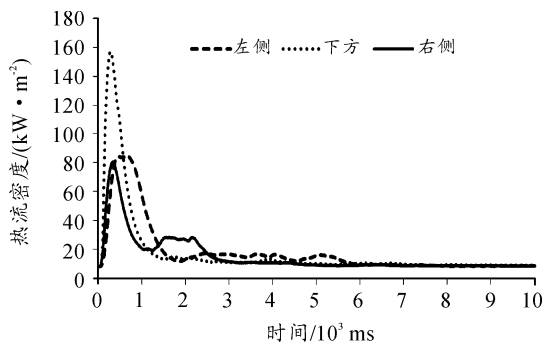


图 2 第 1 发试验数据

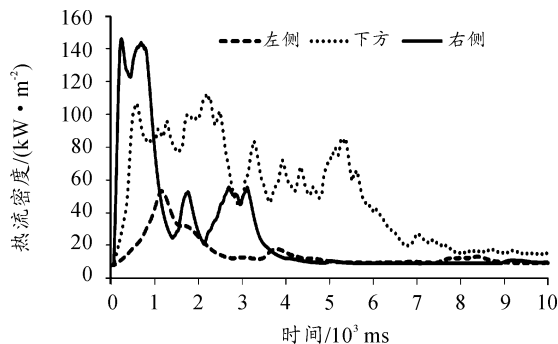


图 3 第 2 发试验数据

由于热剂量是热通量的累积,可以采用梯形积分式(5)计算热剂量值,测试及计算结果见表 3。

$$Q = \int_0^3 q(t) dt \approx \sum_{i=1}^{3000} \frac{q_i + q_{i+1}}{2} \quad (5)$$

式(5)中: Q 为热剂量(J/m²); q 为热通量(W/m²); t 为测试时间(s); i 为测试点。

表 3 测试及计算结果

	序号	左侧	下方	右侧
第 1 发	$q_{\max}/(\text{kW} \cdot \text{m}^{-2})$	84.6	157.1	80.9
	$Q/(\text{kJ} \cdot \text{m}^{-2})$	102.2	106.6	87.5
第 2 发	$q_{\max}/(\text{kW} \cdot \text{m}^{-2})$	53.2	111.9	146.1
	$Q/(\text{kJ} \cdot \text{m}^{-2})$	73.8	237.6	194.8

两发均有两个点热通量值达到热通量准则要求,动态试验效果与静态试验类似,第 1 发下方数据偏大,第 2 发右侧数据偏大。可以看出,热通量大小与测试点距火球中心的距离相关,与燃烧剂质量相关,而测试数据均大于模型估算值,利用热通量无法准确评估毁伤程度,前文所提及的热通量模型不适用燃烧弹瞬态火球毁伤评估测试。

第 1 发火球掠过工事口部,热剂量最小值 87.5 kJ/m²,达到致人疼痛至一度烧伤程度,说明燃烧弹作用后在火球掠过的瞬间能够扰乱敌方行动。第 2 发右侧、下方热剂量分别为 194.8 kJ/m² 和 237.6 kJ/m²,达到致人轻伤至二度烧伤的程度,说明燃烧弹准确作用目标后能够瘫痪敌人行动。

4 结论

热剂量准则(Q 准则)对于评价某型燃烧弹的热辐射效果较为理想。该试验将燃烧武器置于想定战场环境下评估作用效果,评估方法及数据可以作为燃烧武器战场效能评估的基础,能够在一定程度上克服定性评价燃烧破坏伤害效果的缺陷。