

文章编号:1006-9941(2021)07-0667-13

燃烧毁伤技术研究进展

徐光泽,张 良,张兴高,盖希强,马士洲,杨 林

(军事科学院防化研究院,北京 102205)

摘 要: 燃烧毁伤技术是含能材料与毁伤领域的重要研究方向。主要综述了燃烧毁伤技术的研究进展,从燃烧剂配方设计和应用、燃烧热辐射毁伤理论与技术、燃烧毁伤评估技术三个方面进行论述,指出目前存在燃烧剂燃烧毁伤效能不足、热辐射模型中参数表征过程单一、燃烧毁伤评估方法不全面等问题。认为高密度、高热值燃烧材料、燃烧剂装药构效关系、以火球温度为代表的键模型参数的测试技术、热辐射毁伤模型的修正和优化、毁伤场中多种毁伤元耦合作用下的热辐射毁伤效应的精准评估方法是未来的研究重点。

关键词: 燃烧毁伤;燃烧剂;燃烧热辐射;毁伤评估

中图分类号: TJ45; TJ52

文献标志码: A

DOI: 10.11943/CJEM2020294

1 引言

现代军事科技日新月异,从集束火箭、火炮等^[1]传统燃烧武器到燃料空气弹药-温压弹药、云爆弹药等为代表的典型现代燃烧武器^[2],均可在短时间内造成大规模杀伤^[3]。近年来,已有国外在军事行动中使用的报道,可见燃烧武器在各国的武器装备中仍占据重要地位^[4-6]。燃烧武器在战争中的作用不仅体现在对重要易燃目标的毁伤,而且在近战攻坚、制造火障、战略轰炸等方面也能发挥出独特的效能^[7]。此外,工业安全领域中常见的燃料泄露安全事故造成的燃烧毁伤后果也是当前人们关注的焦点。但近年来国内外有关燃烧毁伤技术的系统梳理未见报道。燃烧剂配方设计存在理论指导不够,依赖经验和试错,燃烧热辐射毁伤理论尚未形成统一认识,燃烧毁伤评估体系尚不完

备。鉴于此,本文对燃烧武器和含能材料所涉及的燃烧毁伤技术进行了总结,主要围绕国内外燃烧剂配方设计和应用、燃烧热辐射毁伤理论与技术和燃烧毁伤评估技术这三个方面展开论述。在此基础上,分析了燃烧毁伤技术新趋势和有待深入系统研究的热点难点问题,为进一步完善燃烧毁伤理论和推动燃烧毁伤技术创新发展提供参考。

2 燃烧剂配方设计和应用研究进展

燃烧毁伤主要是依靠燃烧剂形成纵火粒子或者燃爆火种对典型目标进行热毁伤来完成的,燃烧剂是实现燃烧毁伤效应的能量来源,是燃烧武器实现纵火毁伤的关键核心技术之一。目前,国内外学者主要围绕着燃烧剂配方设计技术、燃烧剂在武器装备上的应用两个方面开展了大量研究工作。

2.1 燃烧剂配方设计

当今国内外常用燃烧剂包括油基燃烧剂、金属燃烧剂、烟火燃烧剂和自燃燃烧剂,常用燃烧剂的性能如表1所示。

燃烧剂配方决定了最终形成的热毁伤元的威力大小。燃烧温度、燃烧热、火焰大小、灼热熔渣量和燃烧速度等是燃烧剂性能的特征参数,燃烧剂的速燃性、自燃性、持久性和多效性对燃烧剂的能量效率有重要影

收稿日期:2020-11-06;修回日期:2021-01-14

网络出版日期:2021-02-08

基金项目:国家自然科学基金项目(No.51404279)、装备预先研究项目(No.30110020502)和装备科研项目(No.JK20182A020296)

作者简介:徐光泽(1993-),男,硕士研究生,主要从事燃烧毁伤评估研究。e-mail:xgzwsry999@163.com

通信联系人:张良(1962-),男,正高级工程师,从事烟火装备论证与设计研究。e-mail:zhangliang6211@hotmail.com

张兴高(1981-),男,副研究员,从事军用功能材料及应用研究。e-mail:xinggaozhang@aliyun.com

引用本文:徐光泽,张良,张兴高,等.燃烧毁伤技术研究进展[J].含能材料,2021,29(7):667-679.

XU Guang-ze,ZHANG Liang,ZHANG Xing-gao,et al. A Review on Burning Damage Technology[J]. Chinese Journal of Energetic Materials(Hanneng Cailiao), 2021,29(7):667-679.

表 1 常用燃烧剂的性能^[8-10]Table 1 Performance of common incendiary agents^[8-10]

incendiary agents	density / g·cm ⁻³	spontaneity (ignition point)/ °C	burning temperature /°C
pyrotechnic combustion agent (red phosphorus)	1.60-1.80	explosion point(460)	1300-1700(flame)
napalm	0.70-0.80	-	900-1100(flame)
triethyl aluminum	0.83	Y	700-1000(flame)
magnesium based alloy	1.78	-	2000(flame)
rare earth alloy	6.30	Y(250)	2250(spark)/1800(flame)
titanium and titanium alloys	4.50	Y(600)	3000(spark)
tungsten zirconium alloy	6.20	Y(600)	3000(spark)
zirconium and zirconium alloys	6.50	Y	3000(spark)
Al	2.70	-	-
Mg	1.74	-	3000(spark)
Zr	6.50	Y(150)	1000(flame)
P	1.83	Y	-
Ce	6.77	Y(150-180)	-
U	18.95	Y(20)	800(flame)
gasoline	0.7-0.8	-	-

Note: Y stands for spontaneous combustion.

响^[11]。燃烧剂配方设计源于实际应用中材料性能的要求。以稀土金属燃烧剂为例,为提高弹药引燃和贯穿目标的能力,应要求燃烧剂在燃烧温度、热值、安定性和发火点等方面具有优越性能^[9,12];制备技术是影响燃烧剂配方设计能否在实际中应用的关键因素,张哈亮等^[13]将高分子树脂与燃烧热值高的活性金属粉末铝、镁、钛、铝等按照一定比例混合,通过聚合反应形成活性金属燃烧剂。综上所述,铝、镁等金属由于自身具有较好的燃烧性能,广泛应用于金属燃烧剂配方中,但针对不敏感弹药的高安全性需求,应加强配方制备方法的研究,提高配方的实用性和安全性。

对燃烧剂配方性能参数的理论分析与计算是预测配方性能的重要方法。国外学者建立了能够预测烟火药燃速的降阶模型和模拟 BKNO_3 与高氯酸铝钾(ZPP)燃烧的模型^[14-15],通过对烟火药剂燃烧过程的热力学计算可预测不同组成配比的燃烧剂燃烧特性^[16],理论分析可确定燃烧剂的化学成分最佳质量配比,并能获得其最高热释放量^[17]。Yagodnikov等^[18]基于燃烧实验计算了二硼化铝在空气中燃烧的热力学参数,结果发现纳米级二硼化铝比微米级二硼化铝燃烧效率提高5%~20%。上述研究主要围绕燃烧剂配方的燃烧性能参数变化规律的预测展开,并没有将理论计算方法应用到配方设计全过程。

燃烧剂配方中组分及配比对燃烧剂性能的影响规

律是当前研究热点之一。吕建军等^[19]研究了弹用燃烧合金粉末性能与海绵铝中铁含量的关系,结果表明铁含量直接影响燃烧合金粉末的形貌、制备难易程度和利用率,铁含量越高,燃烧合金越不易破碎成所需的颗粒;铁含量较低时,燃烧合金容易破碎且颗粒形貌呈海绵状,制备的燃烧合金产品表面光洁、强度高。Adhikary等^[20]评估了直径为50 mm的圆柱形镁/聚四氟乙烯/氟橡胶(MTV)在施加载荷变化时燃烧性能的变化规律;Sergei等^[21]研究了含Al-Mg粉体高能材料的热力学性能,与不添加Al-Mg粉的相比,含Al-Mg粉的燃烧速率可提高约47%,燃烧热提高约23%。Kotter等^[22]研究了含有碳化硼燃料和碘酸盐氧化剂的配方,获得了燃料和氧化剂的粒径变化对配方燃烧速率的影响规律。Pouretedal等^[23]采用非等温热重法和差示扫描量热法研究了 $\text{Mg}/\text{Ba}(\text{NO}_3)_2$ 和 $\text{Mg}/\text{Sr}(\text{NO}_3)_2$ 烟火药组成中燃料与氧化剂质量比对配方燃烧性能的影响,获得了在不同升温速率下的烟火药点火反应动力学参数。Wainwright等^[24]研究了Al/Zr复合粉体的微爆作用机理,发现增加金属颗粒的裸露表面积,可以改善炸药、推进剂、烟火剂的燃烧性能。Whittaker等^[25-26]研究发现 AlB_2 是体积热值较大的一种含能燃料。Arkhipov等^[27]研究了铝、硼、硼铝合金粉末与黏合剂、氧化剂组成药剂的点火和燃烧性能,结果表明含有硼铝合金粉末的药剂燃烧速率较高。Valluri等^[28]

针对金属在燃烧时氟化有大量放热的特点,综述了各种金属/含氟氧化剂复合材料的点火和燃烧反应机理。以上文献虽然对燃烧剂组分配比与燃烧性能之间的关系开展了许多研究,但从多层面揭示组分配比和燃烧剂燃烧机理之间关系的研究较为欠缺。

为提升金属燃烧剂性能,许多学者对金属燃烧剂性能进行了优化。于松涛^[29]对传统镁基合金的组分和比例进行了改进,开发出更适用于对木质弹药箱进行纵火毁伤的新型镁基合金,并在理论上分析了纵火过程。张兴高等^[30]基于对燃烧剂性能参数变化规律的研究得到了燃烧温度高于2200℃的高温燃烧剂配方。对赤磷采取钝化处理及加入黏结剂,可以改善多功能新型赤磷燃烧剂的安定性、吸湿性和摩擦感度^[31]。在战斗部纵火燃烧威力设计中,合金件的粒度、形状和粒度配比等对燃烧功能有着重要影响^[32]。为提高燃烧剂的燃烧热、燃速和火焰温度,可通过加入金属可燃剂B、Mg、Al来改善以双基(DB)推进剂、高氯酸铵(AP)为主要组分的燃烧剂燃烧性能,结果表明加入B粉的燃烧剂对于高沸点物质的引燃效果最佳^[33]。Gibot等^[34]通过化学聚合把导电聚合物聚苯胺引入到铝热剂中成功地降低了铝/锡氧化物含能纳米复合材料的静放电和摩擦灵敏度阈值,为制备钝感和反应性含能材料提供了一种方法。在90~200 W·cm⁻²的热流密度范围内,Korotkikh等^[35]采用二氧化碳激光器测定了含有高氯酸铵、硝酸铵、粘合剂和金属粉的高能混合组分体系点火延迟时间,结果表明,用非晶态硼取代高能混合组分体系中铝粉,点火延迟时间显著缩短。但上述配方设计总体上还是基于传统燃烧剂的改进优化,一定程度上存在着燃烧毁伤效能不足的问题,缺乏燃烧剂新材料及其应用的创新。

2.2 燃烧剂的应用

燃烧剂与燃烧武器相匹配^[11]是其在装备平台上应用的基础,通过将具有高能量密度、冲击不敏感、高燃烧温度和较高的气体产量特点的铝热剂混合物、金属间反应物和金属燃料广泛应用于烟火领域^[36],俄罗斯已经发展了一系列基于燃烧和爆炸效应的杀伤新武器,利用爆炸时产生的火球效应实现温度和压力耦合杀伤目标,而西方在这方面的发展更加注重提高破片侵彻效应^[37]。燃烧剂适配性是确保其在武器装备上成功应用的前提条件,通过将有自燃特性的稀土金属燃烧剂放置在弹壳与炸药之间,取代部分炸药或杀伤破片,可实现弹药穿甲、爆破、杀伤、燃烧复合功能^[9]。装填稀土金属燃烧剂的穿甲弹药对敌方飞机、舰艇和

燃烧系统等目标实施进攻时,除爆炸杀伤效应外,其高温纵火效果可大大提高对这些重要目标的攻击能力^[38]。

燃烧剂有助于提升武器弹药对易燃目标的燃烧毁伤效能。焦武达^[10]利用稀土合金制成的弹丸测定了高速碰撞目标时产生火花的动能极限值,以此说明了装填燃烧剂的弹药对易燃物具有较好的燃烧毁伤效能。在实际应用中,燃烧剂与弹药装药结构的关系决定了其在终点效应中输出的有效能量,构效关系的研究是推动燃烧剂在军事和工业领域应用取得突破的关键。为确定某稀土燃烧剂在不同弹种上的适用性、使用方式和使用条件,黄歌德等^[39]通过测试药剂型稀土燃烧剂的燃烧性能、安全性能和药柱抗压强度等参数,发现该燃烧剂燃烧温度可达1431℃,50 g剂量持续燃烧时间4.5 min,抗压强度大于14 MPa,可与稠化三乙基铝燃烧剂复合装填于各种材质的纵火弹药,分散均匀,点燃率超过90%。Juknelevicius等^[40]将烟火药加工成13 mm的弹丸和5 mm的棒状物,制备出可产生尖锐爆裂声和清晰闪光的蓝色频闪烟火弹。除了应用于弹药武器上,燃烧剂还可用作爆破碎石新能源,与炸药相比,其爆破过程中没有爆破飞石、噪声和振动等危害因素,与静态破碎剂相比,其具有可实时控制且不受温度影响的优点^[41]。有关燃烧剂应用效果与各种复杂环境的最佳匹配问题仍需要系统深入研究,要重视燃烧剂的构效关系研究。当前燃烧剂在毁伤方面的应用主要以传统的典型易燃类目标为打击对象,针对非典型难燃目标毁伤效果尚缺乏系统研究,应加强燃烧剂在新质毁伤领域的应用研究。当前燃烧毁伤存在着效能单一的问题,未来应实现由单纯燃烧毁伤向燃烧、冲击波、破片多功能耦合毁伤方向发展。

3 燃烧热辐射毁伤理论与技术研究

燃烧武器在发挥终点效应时,毁伤元的外观从几何形态上可分为火球或者火柱状。燃烧毁伤场中热传导和热对流作用毁伤目标主要发生于火团内,而火团外部目标主要考虑热辐射毁伤。由于爆炸过程涉及强燃烧反应,本文主要探讨含能材料在爆炸和燃烧过程中的燃烧热辐射毁伤效应。由于热辐射是对燃烧场外目标主要的毁伤因素,而燃烧火球的尺寸、燃烧持续时间、火球温度等特征参数是分析燃烧热辐射毁伤效应的基础,对燃烧火球或者火柱的特征参数的准确测试和分析,是建立可靠的燃烧热辐射毁伤理论的基础,也

是评估燃烧毁伤效果的前提。围绕着燃烧热辐射火球模型和燃烧热辐射柱体理论模型研究是进一步深入研究燃烧毁伤效应的关键,该模型的优化和相关参数的精确测定是国内外主要的研究方向。近年来相关文献主要研究的热毁伤场包括两类——燃料空气弹药、活性材料等物质在爆炸或高速冲击条件下形成的热毁伤场和易燃气体、液体泄露燃烧爆炸形成的热毁伤场,有关燃烧火团的尺寸大小、持续时间、表面温度、热释放速率和热剂量等物理参数在空间的分布以及随时间的变化规律研究较多。

3.1 燃烧热辐射毁伤效应研究现状

燃烧毁伤过程往往伴随着多种不同性质的毁伤元的耦合作用,即涉及多物理场耦合现象。一般地,燃烧毁伤中的毁伤因素主要包括热辐射、冲击波和破片三个类别,相应的毁伤效应包括三个方面——热辐射毁伤效应、冲击波毁伤效应和破片杀伤效应。在燃烧毁伤场中,针对冲击波和破片毁伤效应的研究相对较多,本文不再赘述。而燃烧剂形成的高温毁伤元对目标的杀伤往往起着关键作用,国内外有关燃烧武器的热毁伤场的研究主要是基于爆炸条件下形成的热毁伤场和基于高速冲击条件下形成的热毁伤场两大类,两者之间既有联系又有区别,由高速冲击条件下形成的热毁伤场在一定条件下会发生燃烧转爆燃或爆轰现象,形成类似爆炸造成的热毁伤场。由于爆炸发生时间短,其所形成的热毁伤场从宏观上看表现出以下特点——火球较大,同时存在破片、冲击波和热辐射等多种毁伤元,而依靠高速冲击达到活性材料反应阈值形成的火球对外界环境比较敏感,对油箱等有限密闭空间目标热毁伤效果最好;在非密闭空间的热毁伤效应受目标易燃性等自身特性及目标周围环境因素的影响较大。本节对国内外燃烧热辐射毁伤效应相关文献进行系统梳理,着重分析热辐射毁伤效应的发展特点和趋势。

燃烧热毁伤场的形成一般与高能炸药、烟火药剂和活性材料等含能材料在武器装备上的应用有密切关系。为了更合理地评估炸药的热辐射毁伤效应,国内外学者通过实验、理论分析和数值模拟重点研究燃料空气炸药的热辐射毁伤效应。文献[42-43]根据红外热成像测试数据和火球热辐射动态模型,建立具有时间属性的温压药剂热辐射效应动态计算方法,得到30 kg温压装药的热辐射效应,其辐射热剂量可达TNT的3.6~5.2倍,爆炸火球最大直径可达17.4 m,是原始装药直径的75.65倍,高温毁伤优势明显。魏成龙等^[44]基于试验数据将二次引爆型燃料空气炸药

(DEFAE)和一次引爆型燃料空气炸药(SEFAE)爆轰形成的火球在不低于1000 °C和1500 °C时燃烧持续时间、在不低于2000 °C时爆炸火球尺寸以及火球的平均热毁伤致死半径、同质量药剂在不同温度范围对应的致死半径进行对比,得出DEFAE比SEFAE的热辐射毁伤效应更好的结论。郭学永等^[45]基于Baker火球模型和热毁伤准则,计算并分析了温压药剂和TNT爆炸产生的热辐射效应,发现装填20 kg温压药剂的模拟战斗部比30 kg TNT的爆炸热辐射效应强。王连炬^[46]提出热毁伤当量比的概念,计算得到温压药剂热毁伤当量比约为1.2,指出温压炸药的火球温度比TNT的温度要高很多,大约为2874.9 K,其热毁伤面积要比TNT大20%。曹凤霞^[47]探讨了爆炸产生的热辐射毁伤效应,分析了热辐射毁伤准则及其适用条件,归纳了热辐射对人和木材的毁伤模型。上述文献重点研究了热毁伤效应中火球的终点毁伤状态的特征规律,但对于火球演化过程的机理研究有待深入。总体上还是以TNT等热毁伤效应已知信息较多的物质为基础进行燃烧热辐射毁伤效应论述,针对基准参考物的热辐射毁伤效应尚缺乏系统研究。后燃反应现象是燃料空气弹药热辐射毁伤效应中的研究热点之一,阚金玲等^[48]指出强烈的后燃反应使SEFAE爆轰总能量和爆炸威力较普通炸药有很大的提高。针对温压炸药和云爆剂为代表的高能炸药在爆炸条件下形成的热辐射毁伤效应研究虽取得了丰富的研究成果,但大多侧重于火球直径和温度等易测物理量的唯象分析,热毁伤效应的研究主要是围绕着热辐射毁伤准则开展的,在量化参数的选取上理论依据尚不够完善。有关后燃效应在整个热毁伤场所占的比例和数量尚没有确定,热毁伤效应在燃料空气炸药的有效输出能量中所占的百分比尚不清楚。

在工业安全领域,液体燃料等物质的泄露引起的类爆燃或爆炸现象也具有燃烧热辐射毁伤效应。气云爆炸等事件是热毁伤效应的典型代表,文献[49-50]研究了形成热辐射毁伤效应的物质的质量、距爆炸源距离这些参数对热剂量、热通量的影响,并确定了热辐射影响的安全距离。但并未涉及到多因素耦合条件下对热辐射毁伤效应的影响,研究中只是对不同物质形成的热辐射毁伤效应的常见影响因素进行了分析,存在一定的局限性。此外,Williams等^[51]测量了质量为0.2~36 kg的MTV火炬组分辐射热输出情况,发现大约30%的反应热以辐射形式损失,未压缩的MTV混合物燃烧时其外表面温度约为1800 K,火球的大小和持续时间随着燃料质量的增加而增加,热剂量取决于

火球大小、持续时间和观察者与火球之间的距离。Gordon等^[52]选择阻力模型来研究火球大小的行为,确定了16.9 kg高能炸药的最大火球半径范围为4.3~5.8 m,平均为5.1 m,火球大小在反应后30~50 ms内迅速接近其最大值,在150~200 ms内火球大小相对恒定。上述研究并没有验证所得规律的适用范围和条件,更多地是关注火球自身的变化规律,没有考虑周围环境中与火球发生相互作用的物体的影响,研究结果有待进一步推广。

活性材料被激发时所形成的热毁伤场中呈现出另一种形式的热毁伤效应。由于受到活性材料输出能量阈值的限制,这种热毁伤效应在很大程度上取决于活性材料的质量、形状、作用的目标和初始条件,且易受环境因素影响。一般地,活性材料在爆炸源或者发射药驱动下通过高速冲击碰撞目标,在目标背后或者内部形成燃烧火团,或者形成向四周飞散的燃爆火种来毁伤易燃易爆等对热敏感的目标。黄广炎等^[53]从理论上建立了贫铀合金材料中温升与材料冲击靶板速度关系的数学模型,利用弹道枪实验对比了几种贫铀合金材料的温升燃烧特性;龚柏林等^[54]基于贫铀—钨合金药型罩,开展了聚能弹破甲后效实验,实验结果表明贫铀合金药型罩形成的射流在穿透钢棒后,能形成一个高温、高速且具有一定发散能力的燃烧颗粒束,具有较强的纵火能力,射流穿透的密闭装甲目标内部无明显压力变化,正对射流方向位置在0.2 s内产生了约15 °C的温升,最终靶箱整体温度升高2.5 °C。杜宁等^[55]分析了不同活性材料在爆炸驱动中经历的强加载条件下反应、产生碎片并向四周飞散、撞击钢板及后续反应等阶段形成的爆炸火球、温度场分布等特性,如图1a和图1b分别表示活性材料Al/PTFE和Al/Ni对应的火球演化过程。此外,国外研究人员对高能材料等具有军事应用价值的材料也进行了相关研究。2015年Sorensen^[56]研究了尼龙、铝、钢和外壳包覆有铝/聚四氟乙烯弹丸以2100 m·s⁻¹的速度撞击铝装甲的一系列实验,研究与传统高密度穿甲弹不同的侵彻机理,并对靶后燃烧火团进行了对比分析。Finney^[57]为了检查步枪子弹撞击坚硬表面后点燃有机物的可能性,使用各种常见的试剂盒和子弹材料进行子弹撞击时加热的金属碎片着火问题研究,分析了子弹撞击坚硬表面后点燃有机物的可能性。上述对活性材料在高速冲击条件下燃烧形成的热辐射毁伤效应的研究,主要是从活性材料、撞击目标的材料和靶后燃烧火团三方面进行研究,重点对材料温升、材料激发点火临界条件、

侵彻机理、对目标引燃能力等热点问题开展探讨。研究方法上主要依赖实验,未来应注重数值模拟技术与实验数据的融合,研究综合性能优异的活性材料,针对活性材料能量输出与目标在热毁伤场中响应的机理开展系统研究。

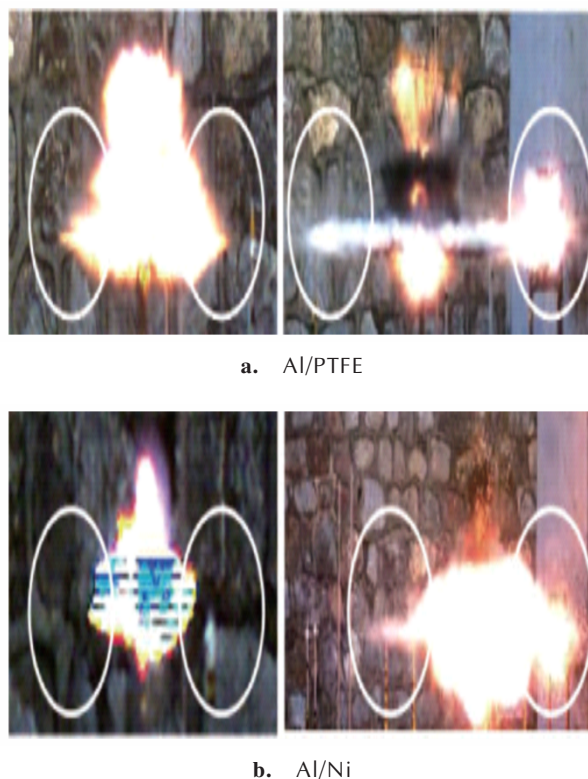


图1 不同材料爆炸驱动下火球成形和演变情况^[55]

Fig.1 Morphology and evolution of the fireballs driven by explosions of different materials^[55]

3.2 火球热辐射毁伤模型研究现状

火球热辐射毁伤模型是对火球生成、发展、到冷却熄灭等动态过程的规律和特征的准确描述^[58]。一般地,火球热辐射毁伤模型主要涉及的特征毁伤参数有燃烧剂的质量、火球直径、火球的温度及持续时间、热毁伤半径、毁伤能量阈值、热剂量和热通量等。根据参数在模型中的实际应用,火球热辐射毁伤理论中的参数主要分为两部分:第一部分为描述或定义火球特性,第二部分用于估计火球的热辐射特性。常见的火球与核爆炸过程形成的火球^[59]有很大差异,本文主要考虑含能材料燃烧或爆炸所形成的多尺度火球的热辐射毁伤效应,在此基础上国内外学者建立了不同物质的火球热辐射毁伤模型,并基于燃烧热辐射毁伤模型探究了热辐射毁伤场的基本规律,为燃烧毁伤评估奠定了基础。对不同类型的火球模型总结见表2^[46,60-62]:

表2 火球模型总结^[46,60-62]Table 2 Summary of fireball models^[46,60-62]

source of fireball	fireball model and classification		model expression	reaction time scale	applicable conditions	main applications
fireball formed by combustion of pure fuel	fireball model of pure fuel	moorhouse & Pritchard	$D = AM^B$ $t = CM^D$	dozens of minutes or even hours	liquid combustion or gas explosion	industrial production and transportation safety
		ILO				
		Roberts				
		TNO				
		Dorofeev S B				
	Bleve					
fireball formed by combustion of energetic materials	fireball model of combustion energetic materials	high		a few seconds	energetic materials	military field
		Hasegawa				
		Sato				
		similarity law model				
a fireball formed by the explosion of an explosive	fireball model of explosives	Rakaczy		subtle or milli-second order of magnitude	energetic materials	military field
-	universal fireball model	Baker	$\frac{q}{T^4} = \frac{G \frac{D^2}{L^2}}{F + \frac{D^2}{L^2}}$ $\frac{Q}{(bG)M^{1/3}T^{2/3}} = \frac{G \frac{D^2}{L^2}}{F + \frac{D^2}{L^2}}$	-	the atmospheric loss is not considered	most of the fields

Note: D is the maximum diameter of the fireball, m; A , B , C and D are constants, and their values depend on the type of fuel; t is duration of fireball combustion, s; T is the temperature of fireball, K; M is fuel mass consumed by fireball, kg; bG , G , F are constants, which the value of bG is 2.04×10^4 , the value of G is 0.958×10^{-7} ; q is the heat flux, $\text{kW} \cdot \text{m}^{-2}$; Q is the heat dose, $\text{kJ} \cdot \text{m}^{-2}$; L is the distance from the target to the center of the fireball, m.

火球热辐射毁伤模型是计算热辐射毁伤场特征参数的理论基础。传统的火球模型种类很多,已经得到了广泛应用,通常情况下火球模型都是在某些假设条件下才成立,因此存在着普适性的问题,修正已有模型是提高火球模型适用范围的重要方法。文献[61,63]在现有的火球动力学模型和 Baker 模型基础上引入了大气传输率,建立了火球优化模型,确定了相应的毁伤范围和目标接受的热能值。文献[64]基于通古斯卡事件建立了爆炸热辐射模型,模拟了燃烧物运动过程对地面目标的热辐射毁伤效果。文献[65]提出了多因素修正方法,建立了可预测周围目标温升的热辐射模型。基于燃烧火团几何特征分析,王艳平等^[60]首次提出发射药燃烧热辐射柱体理论模型,利用燃烧热辐射实验,对比分析球体热辐射模型,验证了柱体理论模型合理性。爆炸火球尺寸和温度是表征爆炸火球热辐射威力的重要参数,文献[66-67]采用数值模拟的方法获得了爆炸火球温度和直径,如图2所示为不同类

型含能材料在爆炸或高速冲击条件下不同时刻对应的多尺度火球的高速摄影图和高速红外热像图,由图2可以较直观地看出火球动态演化过程中不同阶段的形态特征。火球热辐射毁伤理论模型中的参数来源于初始火球、中间发展、火球熄灭这三个不同阶段对应的火球特征状态量,综合国内外文献发现,火球模型中存在参数表征的过程较单一,大多数参数是关注火球初始和终点状态,并没有涉及到火球生成阶段的动态演变过程。

国内外针对火球动态形成过程中的每一个阶段模型开展了大量研究。Makhviladze等^[68]建立了过热液体体积膨胀的数学模型,对安全壳全损和部分容器失效导致燃料短期垂直释放的情况进行了火球动力学、结构和燃烧时间的比较,结果发现安全壳的完全损失导致火球在相对较短的时间内在地面附近燃烧,而燃料垂直释放导致火球在较低的高度以较低的燃烧速度燃烧。Baum等^[69]建立了由质量、动量和能量守恒方

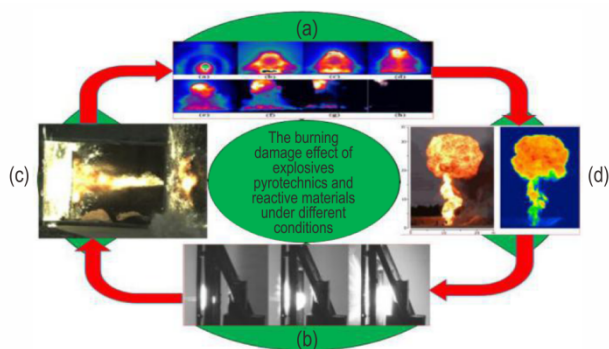


图2 不同类型的含能材料燃烧毁伤效应^[54,72]

Fig.2 Burning damage effects of different types of energetic materials^[54,72]

程等组成的火球初始膨胀的解析模型,将其用于研究火球的初始膨胀,可估算出火球消耗的燃料量。Yang等^[70]比较了不同规模火球的试验,分别分析了TNO模型、CCPS固体火焰模型、罗伯茨点源模型使用条件和各自的优点。Blankenhagel等^[71-72]针对液体有机过氧化物与液态烃燃料形成的火球不同,对质量为16~155 kg的液态有机过氧化物火球进行了表征,并对13个燃料质量为10~168 kg的钢桶进行了测试,提出了二叔丁基过氧化物(DTBP)火球直径、高度、表面发射功率和燃烧时间随燃料质量变化的修正方程,计算并比较了热辐射冲击和安全距离。Stepanov等^[73]基于炸药和燃料-空气混合物爆炸的流体动力学和辐射过程,运用数值模拟方法确定了爆炸和燃烧产物所占区域的热流密度与其温度和几何特性的关系,得到了不同方位靶材在能量释放区附近的热负荷分布,将辐射探测器的热参数与人体热影响标准和可燃材料着火标准进行了比较。Bonilla等^[74]为建立火球抬升机理模型,提出了一种考虑障碍物存在的测定动态火球热辐射的新方法,建立了一套定义各区域边界的方程组,用于计算火球各瞬时位置的配置系数。上述模型虽然考虑到火球在演变过程中每一阶段的特征,并针对每一阶段的特点进行了合理简化,但考虑整个火球动态演变过程的模型相对较少,要关注热辐射模型中关键参数在火球整个演化过程中的变化规律,进一步提升模型的准确性。

王泽博等^[75]提出了一种火炸药爆炸火球直径及温度持续时间的计算方法,确定了裸露皮肤不被烧伤的安全距离。何志光^[76]采用总热焓方法和最小自由能方法分别计算 DEFAE 火球和 SEFAE 火球的温度,用 Baker 方法和 Dorofeev 方法来估算火球的热辐射效应,发现 Dorofeev 方法更适合计算 DEFAE 火球温度。

Dorofeev等^[77]进行了 $10^2\sim 10^5$ kg质量不等的燃料爆炸和爆炸热效应实验,初步确定了燃料的最大火球半径、热效应持续时间和总发射能量与燃料质量的关系。以上研究仅估算了爆炸火球的直径和火球温度持续时间以及热毁伤半径,没有涉及火球动态变化过程和对周围人员及建筑物等典型目标的热辐射毁伤能量阈值的研究,未来应考虑不同质量物质形成火球的尺寸效应对火球周围环境中易燃易爆目标的热辐射毁伤规律。

4 燃烧毁伤评估技术研究

全面而准确地开展燃烧毁伤评估是推动燃烧毁伤技术发展的重要保障,国内外对于毁伤评估技术的研究越来越重视,分为基于单一热毁伤元的燃烧毁伤评估研究和基于多种毁伤元耦合的燃烧毁伤评估研究。燃烧毁伤评估技术涉及两方面:一是含能材料所形成的燃烧火球能量输出特性、对燃烧敏感目标的易损性分析和燃烧火球与目标相互作用过程中目标的响应特性;二是直接运用毁伤评估理论和方法对燃烧毁伤效能进行定性和定量分析。毁伤评估技术呈现出一些新的特点——特征参数准确化,评估方法多元化,评估对象复杂化。能够反映评估对象信息的特征物理量的测试是研究的热点,燃烧毁伤的系统评估是研究的难点。燃烧毁伤评估的深入研究将有助于改进燃烧剂配方设计、装药结构设计和完善燃烧毁伤理论。国内关于武器装备的燃烧毁伤效能评估方面有一定的文献,国外以工业安全等方面为背景的文献较多。

4.1 基于单一热毁伤元的燃烧毁伤评估

在评估燃烧毁伤效果时,为了分析问题的关键因素,学者进行了许多有意义的假设,即主要评估与终点效应相关程度高的热毁伤元的毁伤效果,这样既能充分抓住问题的本质也能实现快速评估。燃烧毁伤评估的基础是毁伤元及燃烧毁伤过程特征参数的获取,国内外许多学者利用红外热成像仪记录引爆型燃料空气炸药爆炸火球和有机过氧化物火球的直径、高度、持续时间、温度分布等温度场数据,选择 Baker 模型、固体火焰模型等不同模型对火球的热毁伤效应进行评估^[44,78]。此外,通过搭建爆炸场热辐射效应特征参数的测试系统,获得不同质量火炸药爆炸时的燃烧热辐射效应数据,揭示火炸药爆炸场热辐射规律及因素,并结合热毁伤准则对高能炸药等不同类型的火炸药的爆炸热毁伤效果进行评估也是一种研究方法^[66]。针对爆

炸过程中测温存在的问题, Wang等^[79]基于几何光学和红外辐射理论, 提出了一种消除测试环境引起辐射能量测量误差的辐射测温温度补偿公式, 分析了距离和气象条件对测量精度影响的原理, 并通过仿真实验验证了理论的正确性。

通过实验手段获取热毁伤特征物理量是燃烧毁伤评估的基础。Lebel等^[80]利用可放置在爆炸装药附近且能够被火球包裹的受保护光纤探针对火球内部的热辐射进行采样, 在5次含太安的炸药爆炸中获得了火球内部温度测量值, 结果发现火球温度在1600~1900 K之间, 在大约20 ms的过程中观察到黑体型辐射, 12 ms后峰值约为1850 K, 火球形成的过程中其内部温度分布相当均匀。利用实验获得火球辐射温度、热流密度等毁伤特征参数变化规律已经成为燃烧毁伤评估研究的重要手段, 但对于火球内部的绝对温度等参数的实验测试技术尚不成熟, 只是局限于表面温度等物理量的测试, 今后应该侧重从火球特征参数相对量的测试转向绝对量测试, 进一步提升燃烧毁伤评估结果的准确性。

热毁伤概率模型和热辐射毁伤准则的研究是当前国内外的燃烧毁伤评估研究热点。赵志宁等^[63]利用引入大气传输率的Baker模型对装药为3 kg的某FAE弹药进行了热毁伤效应评估, 基于热剂量伤害阈值给出了评价结果。秦仕勇等^[81]通过编程计算在不同弹药数目、散布均方差、引燃纵火炬的散布半径条件下燃烧弹对油罐车及弹药箱穿燃及引燃概率, 发现在特定的目标区域和分布下, 散布均方差是影响毁伤效能的主要因素和引燃纵火炬的散布半径设计为40~60 m较佳。此外, 利用Baker模型评估燃烧毁伤效果的常用方法。安文书等^[82]基于Baker模型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, 估算燃烧弹形成火球的热通量和热剂量, 并利用实验验证了热剂量准则对于评价燃烧弹热辐射效果的有效性。Sun等^[83]运用数值模拟的方法计算了邻近堤防地区的液化天然气储罐能够承受的热辐射通量, 确定了其安全距离; 综上所述, 文献中有关热辐射毁伤准则主要涉及热通量(q)和热剂量(Q)这两个表征热辐射毁伤效能的指标, 如图3所示, 当 $q > q_{cr}$ 和 $Q > Q_{cr}$ 成立时, 则可以判定目标处于毁伤区域, 据此来评估目标的毁伤状态。

建立毁伤评估模型是燃烧毁伤评估研究的关键步骤。由于液化石油气(LPG)沸腾液体扩展蒸气爆炸(BLEVE)火球造成的热辐射危害存在不确定性, 王若

菌等^[85]基于Monte-Carlo模拟方法建立了爆炸火球热辐射风险评估模型, 引入实例计算得到了LPG沸腾液体扩展蒸气爆炸火球伤害范围、事故风险概率曲线方程和累计概率曲线方程。基于文献中关于燃烧速率、火焰直径和高度、有风时火焰倾斜度、热辐射和发射功率的各种模型和实验数据, Mudan^[86]建立了大型油气火灾热辐射危害综合模型, 可用于确定人体皮肤暴露在热辐射下的响应模型和数据, 根据皮肤损伤的程度提出了几种皮肤烧伤严重程度的分类。Chen等^[87]通过仿真模拟确定了1,1-二氟乙烷火球在65 m的范围内可形成超过 $37.5 \text{ kW} \cdot \text{m}^{-2}$ 的热辐射, 利用BLEVE火球评估模型预测了氟化工业设施在燃烧热辐射作用下的毁伤效应; Wang等^[88]分析了管道的易损性, 基于建立的液化天然气(LNG)爆炸火球评估模型对天然气运输管道系统的热辐射毁伤特性进行了分析。综上所述, 毁伤评估模型的建立对于准确预测燃烧毁伤效果和评估燃烧热毁伤场中目标的响应特性具有重要意义, 未来应重点加强毁伤评估模型和方法的研究。

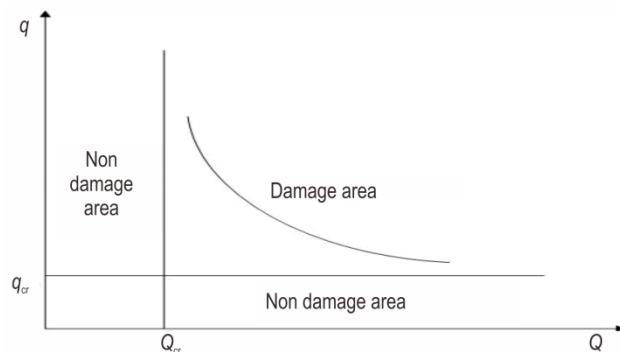


图3 热辐射毁伤对应的热通量-热剂量关系^[84]

Fig.3 Heat flux-heat dose diagram corresponding to thermal radiation damage^[84]

4.2 基于多种毁伤元耦合的燃烧毁伤评估

在形成爆炸燃烧火球的过程中, 不仅仅是单一的热辐射作用, 往往伴随着破片、冲击波等多种毁伤元, 由于燃烧过程的复杂性和爆炸的瞬时性, 有关不同毁伤元在燃烧毁伤过程中发挥的具体作用和作用机理目前研究尚少。从理论上讲燃烧毁伤效果一般都是综合毁伤的结果, 因此有必要将相关因素都考虑在内进行全面评估, 这样得到的模型更接近实际情况。

多种毁伤元存在的条件下, 需要综合运用理论分析、数值计算和实验研究进行毁伤评估研究。王艳平等^[60]由数据拟合分别得到单基发射药热通量、热剂量分别与药量、距离的定量函数关系, 为准确评估单基发射药燃烧热辐射毁伤效应提供了理论基础。王凤

丹^[62]改进了 Baker 模型并选其计算火球热辐射毁伤参数,将热剂量准则作为热毁伤效应判据,基于理论计算和实验数据对燃料空气炸药的爆炸火球进行毁伤评估,结果表明仅以热辐射能量评价生物毁伤效应是不全面的,应综合考虑各种形式的能量。房莹莹^[84]基于目标毁伤理论以及燃料空气炸药(FAE)的单项毁伤效应,建立了燃料空气炸药综合毁伤后果模型和概率模型,并用实验数据进行了验证。刘想炎等^[89]基于云爆弹对人员综合杀伤作用的评判标准,考虑了超压和热辐射作用建立了云爆弹综合毁伤概率评估模型,得到了特定条件下的仿真杀伤概率图像,分析了不同云爆剂含量和爆炸高度下综合杀伤概率曲线,揭示了其对人员综合杀伤效果的影响。仲倩等^[90]分析了冲击波、热辐射、破片及窒息等单项毁伤效应,建立了温压弹综合毁伤效果评估模型,针对温压弹对爆炸场内目标的综合毁伤效果进行了评估,结果表明除破片毁伤外,冲击波毁伤和热辐射毁伤对终点毁伤效能贡献较大。针对单项毁伤效应的毁伤评估方法不够全面,为了解决单一热毁伤元在耦合作用下的效能比例问题,应加强基于燃烧毁伤实验数据挖掘研究,在客观实验数据基础上给出单项毁伤元权重。

5 结论与展望

围绕燃烧毁伤技术,从燃烧剂配方设计和应用、燃烧热辐射毁伤理论与技术、燃烧毁伤评估技术三个方面进行综述。燃烧剂配方设计和应用是关系燃烧毁伤技术在实际中能够广泛应用的前提,有关燃烧剂改性新技术研究是提升燃烧剂燃烧性能和拓展燃烧剂实际应用场景的关键,燃烧剂性能的优化将有助于增强燃烧毁伤中燃烧源的威力。燃烧热辐射毁伤理论与技术研究的重点是火球热辐射毁伤模型。在燃烧毁伤评估方面应重视多毁伤元耦合时的评估技术研究。当前,燃烧毁伤技术的研究已经取得了许多进步。燃烧毁伤技术在未来的发展趋势将呈现以下三个主要特点:

(1)在燃烧剂配方设计和应用研究方面,开展燃烧剂配方的性能优化、燃烧武器装药结构技术、燃烧剂应用效果与各种复杂环境的最佳匹配性、燃烧剂施放技术等研究,未来重点发展高密度高热值的燃烧材料,研究燃烧毁伤元或结构件的增材制造技术,突破燃烧弹药壳体的可燃化、含能化,建立燃烧剂高通量计算平台及智能专家系统,深化燃烧剂装药构效关系研究,建立燃烧毁伤元能量输出与目标响应程度之间的关系,

大幅提高燃烧弹药的综合毁伤效能。

(2)在燃烧热辐射毁伤理论与技术研究方面,重点开展以火球温度为代表的模型参数的测试技术研究,对火球模型特征参数进行修正或者引入新的参量来优化火球热辐射毁伤模型,关注不同能量量级的含能材料有效输出能量形成火球的尺寸效应,即爆燃/爆炸对应的大尺度火球热毁伤效应、稳态燃烧对应的中尺度火球热毁伤效应、以活性破片冲击释能为代表的小尺度火球热毁伤效应。

(3)在燃烧毁伤评估技术研究方面,重点开展对多种毁伤元耦合作用下的燃烧热辐射毁伤效应精准评估方法的研究。传统的热辐射准则还不够全面,基于燃烧毁伤效应的多元化评估方法应逐步建立;重视燃烧毁伤实验数据作为支撑和联系仿真评估技术与评估理论的桥梁纽带作用,注重对燃烧毁伤实验数据的积累和优化,为燃烧毁伤评估提供真实可靠的数据支持;由于毁伤实验成本的限制,未来仿真模拟在燃烧毁伤评估中的应用会成为重要手段。

参考文献:

- [1] 陶白江,孙可,曾丁.现代燃烧武器与烧伤防护[J].中华损伤与修复杂志,2018,13(3):169-171.
TAO Bai-jiang, SUN Ke, ZENG Ding. Modern combustion weapon and burn protection[J]. *Chinese Journal of Injury Repair and Wound Healing*, 2018, 13(3): 169-171.
- [2] 周金琴.燃烧武器一瞥[J].现代兵器,1993(9):30-31.
ZHOU Jin-qin. Several incendiary weapons[J]. *Modern Weaponry*, 1993(9): 30-31.
- [3] 陶白江,张宏.燃烧武器与成批烧伤[J].人民军医,2006,49(10):579-580.
TAO Bai-jiang, ZHANG Hong. Incendiary weapons and mass burns[J]. *People's Military Surgeon*, 2006, 49(10): 579-580.
- [4] Syrians for Truth and Justice. Three Consecutive Attacks with Incendiary Substances on Residential Neighbourhoods of Harasta City in late January 2018[R]. <https://stj-sy.org/en/417/>, 2018:1-9.
- [5] Abramson J. U. S. Incendiary-Weapons Policy Rebuffed. <https://www.armscontrol.org>. 2010:1-4.
- [6] Morley J. Incendiary Weapons: Recent Use and Growing Opposition[J]. *Arms Control Today*, 2015, 45(1):7-7.
- [7] 魏新愿,朱庆岭.国外燃烧武器的发展趋势[J].现代兵器,1991(11):5-6.
WEI Xin-yuan, ZHU Qing-ling. Foreign development trends of incendiary weapons[J]. *Modern Weaponry*, 1991(11): 5-6.
- [8] 曹连忠,王健,侯立群.高效燃烧合金材料制备及产品成形技术研究[J].兵器材料科学与工程,2009,32(3):69-72.
CAO Lian-zhong, WANG Jian, HOU Li-qun, et al. Research on material preparation and product molding of high-efficiency incendiary alloy[J]. *Ordnance Material Science and Engineering*, 2009, 32(3): 69-72.
- [9] 贾会平.稀土金属燃烧剂的研究综述[J].兵工学报,1994(2):70-74.

- JIA Hui-ping. A review of researches on mischmetal incendiary agents[J]. *Acta Armamentarii*, 1994(2): 70-74.
- [10] 焦武达. 稀土在烟火剂与特种弹药中的应用[J]. *兵器材料科学与工程*, 1988(8): 89-92.
- JIAO Wu-da. Application of rare earth in pyrotechnics and special ammunition[J]. *Ordnance Material Science and Engineering*, 1988(8): 89-92.
- [11] 徐云庚. 现有燃烧剂述评[J]. *火工品*, 1994(3): 28-31.
- XU Yun-geng. The discussion of incendiary agents[J]. *Initiators & Pyrotechnics*, 1994(3): 28-31.
- [12] 尹喜凤, 陈宏达, 杜海涛, 等. 稀土合金燃烧剂研究及应用[J]. *火工品*, 2001(4): 1-5, 20.
- YIN Xi-feng, CHEN Hong-da, DU Hai-tao, et al. Study on the incendiary agents of rare-earth alloys[J]. *Initiators & Pyrotechnics*, 2001(4): 1-5, 20.
- [13] 张哈亮, 汤慧萍, 黄瑜, 等. 高分子树脂对活性金属合金燃烧剂性能的影响[J]. *火工品*, 2007(2): 14-16, 21.
- ZHANG Han-liang, TANG Hui-ping, HUANG Yu, et al. Effects of the macromolecule resin on the properties of active metal incendiary[J]. *Initiators & Pyrotechnics*, 2007(2): 14-16, 21.
- [14] Ambekar A, Yoh J J. A reduced order model for prediction of the burning rates of multicomponent pyrotechnic propellants[J]. *Applied Thermal Engineering*, 2018, 130: 492-500.
- [15] Woo J, Cha S W, Kim G, et al. Concept of unburning ratio and combustion modeling of ZPP and BKNO₃ in pyroshock-reduced separation nut[J]. *Propellants, Explosives, Pyrotechnics*, 2020, 45(5): 775-787.
- [16] Tursynbek S, Zarko V E, Glotov O G, et al. Combustion study of gas-generating compositions with carbon powder additives[J]. *Russian Journal of Physical Chemistry B*, 2020, 14(3): 407-412.
- [17] Phanindra K H, Sivapirakasam S P, Soni P, et al. Thermal reaction studies and prediction of stoichiometry of pyrotechnic compositions using DSC and XRD methods[J]. *Thermochimica Acta*, 2019, 675: 100-106.
- [18] Yagodnikov D A, Voronetskii A V, Sarab'ev V I. Ignition and combustion of pyrotechnic compositions based on micro- and nanoparticles of aluminum diboride in air flow in a two-zone combustion chamber[J]. *Combustion, Explosion, and Shock Waves*, 2016, 52(3): 300-306.
- [19] 吕建军, 高平, 王力杰, 等. 铁含量对弹用燃烧合金颗粒制备的影响[J]. *兵器材料科学与工程*, 2015, 38(5): 75-78.
- LV Jian-jun, GAO Ping, WANG Li-jie, et al. Effect of iron content on preparation of incendiary alloy particles used in bomb[J]. *Ordnance Material Science and Engineering*, 2015, 38(5): 75-78.
- [20] Adhikary S, Sekhar H, Thakur D G. Performance evaluation of mechanically pressed Magnesium/Teflon/Viton (MTV) decoy flare pellets[J]. *Sadhana-Academy Proceedings in Engineering Sciences*, 2020, 45(1): 6.
- [21] Sokolov S, Vorozhtsov A, Arkhipov V, et al. The study of HEMs based on the mechanically activated intermetallic Al₁₂Mg₁₇ powder[J]. *Molecules*. 2020, 25(16): 3561. doi: 10.3390/molecules25163561.
- [22] Kotter L N, Groven L J. Boron carbide based biocide compositions: a study of iodate particle size on combustion and iodine output[J]. *Propellants, Explosives, Pyrotechnics*, 2020, 45(3): 509-517.
- [23] Pouredal H R, Mousavi S L. Study of the ratio of fuel to oxidant on the kinetic of ignition reaction of Mg/Ba(NO₃)₂ and Mg/Sr(NO₃)₂ pyrotechnics by non-isothermal TG/DSC technique[J]. *Journal of Thermal Analysis and Calorimetry*, 2018, 132(2): 1307-1315.
- [24] Wainwright E R, Lakshman S V, Leong A F T, et al. Viewing internal bubbling and microexplosions in combusting metal particles via x-ray phase contrast imaging[J]. *Combustion and Flame*, 2019, 199: 194-203.
- [25] Whittaker M L, Sohn H Y, Cutler R A. Oxidation kinetics of aluminum diboride[J]. *Journal of Solid State Chemistry*, 2013, 207: 163-169.
- [26] Whittaker M L, Cutler R A. Effect of synthesis atmosphere, wetting, and compaction on the purity of AlB₂[J]. *Journal of Solid State Chemistry*, 2013, 201: 93-100.
- [27] Arkhipov V A, Zhukov A S, Kuznetsov V T, et al. Ignition and combustion of condensed systems with energy fillers[J]. *Combustion, Explosion, and Shock Waves*, 2018, 54(6): 689-697.
- [28] Valluri S K, Schoenitz M, Dreizin E. Fluorine-containing oxidizers for metal fuels in energetic formulations[J]. *Defence Technology*, 2019, 15(1): 1-22.
- [29] 于松涛. 新型金属燃烧剂技术研究[D]. 南京: 南京理工大学, 2002.
- YU Song-tao. Study on technology of a new type metal incendiary agent[D]. Nanjing: Nanjing University of Science and Technology, 2002.
- [30] 张兴高, 师宏心, 刘庚冉, 等. 高能燃烧剂配方研究[J]. *火工品*, 2012(6): 34-36.
- ZHANG Xing-gao, SHI Hong-xin, LIU Geng-ran, et al. Study on the composition of high energy incendiary[J]. *Initiators & Pyrotechnics*, 2012(6): 34-36.
- [31] 唐金友, 张从金, 樊琨, 等. 某新型燃烧剂的性能研究[J]. *火工品*, 2004(4): 19-22.
- TANG Jin-you, ZHANG Cong-jin, FAN Kun, et al. Study on the property of a new type combustion agent[J]. *Initiators & Pyrotechnics*, 2004(4): 19-22.
- [32] 胡桂梅, 杨兴科, 史永高, 等. 杀爆燃弹纵火用合金件的设计[J]. *火工品*, 2005(4): 21-25.
- HU Gui-mei, YANG Xing-ke, SHI Yong-gao, et al. The analysis of alloying piece for incendiary in a fragmentation explosive incendiary shell[J]. *Initiators & Pyrotechnics*, 2005(4): 21-25.
- [33] 王海朋, 杨洪涛, 朱旭强, 等. DB/AP系燃烧剂的设计与性能研究[J]. *火炸药学报*, 2017, 40(5): 15-18, 23.
- WANG Hai-peng, YANG Hong-tao, ZHU Xu-qiang, et al. Study on the design and performance of double-base propellant/ammonium perchlorate based incendiary agent[J]. *Chinese Journal of Explosives and Propellants*, 2017, 40(5): 15-18, 23.
- [34] Gibot P, Goetz V. SnO₂/polyaniline composites for the desensitization of Al/SnO₂ thermite composites[J]. *Journal of Applied Polymer Science*, 2020, 137(32): 9.
- [35] Korotkikh A G, Arkhipov V A, Slyusarsky K V, et al. Study of ignition of high-energy materials with boron and aluminum and titanium diborides[J]. *Combustion, Explosion and Shock Waves*, 2018, 54(3): 350-356.
- [36] Fischer S H, Grubelich N C. Theoretical energy release of ther-

- mites, intermetallics, and combustible metals [C]//The 24th International Pyrotechnics Seminar, Monterey, CA, 1998.
- [37] Anna E W G. Aspects of thermo-baric weaponry [J]. *Military Technology*, 2004, 6: 125-126, 128-130.
- [38] 贵大勇, 刘吉平, 韩颂青. 稀土金属燃烧剂使用效能探讨[J]. 火工品, 1998(2): 50-53.
GUI Da-yong, LIU Ji-ping, HAN Song-qing. The performance of mischmetal incendiary agents[J]. *Initiators & Pyrotechnics*, 1998(2): 50-53.
- [39] 黄歌德, 汪佩兰, 刘吉儒, 等. 药剂型稀土燃烧剂使用技术研究[J]. 火工品, 2006(2): 25-27.
HUANG Ge-de, WANG Pei-lan, LIU Ji-ru, et al. Study on application of rare-earth incendiary composition [J]. *Initiators & Pyrotechnics*, 2006(2): 25-27.
- [40] Juknelevicius D, Klapötke T M, Ramanavicius A. Blue strobe pyrotechnic composition based on aminoguanidinium nitrate [J]. *Propellants, Explosives, Pyrotechnics*, 2019, 44: 1-7.
- [41] 王为. 一次自制燃烧剂的破坏试验[J]. 西部探矿工程, 1998, 10(1): 50, 53.
WANG Wei. An experiment of destructive of self-made incendiary agent[J]. *West-China Exploration Engineering*, 1998, 10(1): 50, 53.
- [42] 李秀丽, 惠君明, 王伯良. 云爆剂爆炸/冲击波参数研究[J]. 含能材料, 2008, 16(4): 410-414.
LI Xiu-li, HUI Jun-ming, WANG Bo-liang. Blast/shock wave parameters of single-event FAE[J]. *Chinese Journal of Energetic Materials(Hanneng Cailiao)*, 2008, 16(4): 410-414.
- [43] 仲倩, 王伯良, 黄菊, 等. 火球动态模型在温压炸药热毁伤效应评估中的应用[J]. 爆炸与冲击, 2011, 31(5): 528-532.
ZHONG Qian, WANG Bo-liang, HUANG Ju, et al. Application of a dynamic model to thermal damage estimation of thermobaric explosives[J]. *Explosion and Shock Waves*, 2011, 31(5): 528-532.
- [44] 魏成龙, 卫延安, 鲁长波. 燃料空气炸药温度场及热毁伤效应研究[C]//第十六届中国科协年会第九分会场含能材料及绿色民爆产业发展论坛论文集. 南京: 爆破器材编辑部, 2014: 156-161.
WEI Cheng-long, WEI Yan-an, LU Chang-bo. Study on temperature field and thermal damage effect of fuel air explosive [C]// Proceedings of the ninth sub conference of the 16th annual meeting of China Association for science and technology. Nanjing: Editorial Department of Explosive Materials, 2014: 156-161.
- [45] 郭学永, 李斌, 王连炬, 等. 温压药剂的爆炸温度场测量及热辐射效应研究[J]. 弹箭与制导学报, 2008, 28(5): 119-124.
GUO Xue-yong, LI Bin, WANG Lian-ju, et al. Measurement of blast temperature field and study of thermal radiation effect for thermo-baric explosive [J]. *Journal of Projectiles, Rockets, Missiles and Guidance*, 2008, 28(5): 119-124.
- [46] 王连炬. 温压炸药综合毁伤效应分析与评价[D]. 南京: 南京理工大学, 2007.
WANG Lian-ju. Analysis and evaluation of multi-damage powers of the thermo-baric explosive [D]. Nanjing: Nanjing University of Science and Technology, 2007.
- [47] 曹凤霞. 爆炸综合毁伤效应研究[D]. 南京: 南京理工大学, 2008.
CAO Feng-xia. Study on multi-damage effect of explosion [D]. Nanjing: Nanjing University of Science & Technology, 2008.
- [48] 阚金玲, 刘家骢. 一次引爆云爆剂的爆炸特性——后燃反应对爆炸威力的影响[J]. 爆炸与冲击, 2006, 26(5): 404-409.
KAN Jin-ling, LIU Jia-cong. The blast characteristic of SEFAE—Effect of after-burning on blast power [J]. *Explosion and Shock Waves*, 2006, 26(5): 404-409.
- [49] 庞磊, 张奇. 无约束气云爆炸热辐射伤害效应研究[J]. 北京理工大学学报, 2010, 30(10): 1147-1150.
PANG Lei, ZHANG Qi. Study into injury effect of thermal radiation from unconfined vapor cloud explosion [J]. *Transactions of Beijing Institute of Technology*, 2010, 30(10): 1147-1150.
- [50] Wang H Z, Lu C B, An G J, et al. Assessment method of liquid fuel field explosion hazardousness [J]. *Procedia Engineering*, 2014(84): 394-401.
- [51] Williams M R, Dunne J L. Heat flux measurement from bulk magnesium/teflon/viton (MTV) flare composition combustion [J]. *Propellants, Explosives, Pyrotechnics*, 2013, 38: 563-568.
- [52] Gordon J M, Grossa K C, Perrama G P. Fireball and shock wave dynamics in the detonation of aluminized novel munitions [J]. *Combustion, Explosion, and Shock Waves*, 2013, 49(4): 450-462.
- [53] 黄广炎, 冯顺山, 李顺平, 等. 贫铀合金在冲击条件下的燃烧效应研究[C]//第十届全国冲击动力学学术会议论文集. 太原: 中国力学学会爆炸力学专业委员会冲击动力学专业组, 2011: 98.
HUANG Guang-yan, FENG Shun-shan, LI Shun-ping, et al. Study on burning effect of depleted uranium alloy with impact [C]// Proceedings of the 10th National Conference on shock dynamics. Taiyuan: Impact Dynamics Professional Group of the Explosive Mechanics Professional Committee of the Chinese Society of Mechanics, 2011: 98.
- [54] 龚柏林, 初哲, 王长利, 等. 基于贫铀合金药型罩的聚能弹破甲后效实验研究[J]. 高压物理学报, 2018, 32(6): 102-106.
GONG Bai-lin, CHU Zhe, WANG Chang-li, et al. Experimental research on armor penetration aftereffect produced by depleted uranium alloys liner shaped charge [J]. *Chinese Journal of High Pressure Physics*, 2018, 32(6): 102-106.
- [55] 杜宁, 张先锋, 熊玮, 等. 爆炸驱动典型活性材料能量释放特性研究[J]. 爆炸与冲击, 2020, 40(4): 042301(1-10).
DU Ning, ZHANG Xian-feng, XIONG Wei, et al. Energy-release characteristics of typical reactive materials under explosive loading [J]. *Explosion and Shock Waves*, 2020, 40(4): 042301-1-042301-10.
- [56] Sorensen B. High-velocity impact of encased Al/PTFE projectiles on structural aluminum armor [J]. *Procedia Engineering*, 2015 (103): 569-576.
- [57] Finney Mark A, McAllister Sara S, Maynard Trevor B, et al. A study of wildfire ignition by rifle bullets [J]. *Fire Technology*, 2016(52): 931-954.
- [58] Abbasi T, Abbasi S A. The boiling liquid expanding vapour explosion (BLEVE): Mechanism, consequence assessment, management [J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2007 (141): 489-519.
- [59] Davies P A. A guide to the evaluation of condensed phase explosions [J]. *Journal of Hazardous Materials*, 1993(33): 1-33.
- [60] 王艳平, 曾丹, 张同来. 发射药燃烧热辐射传播规律[J]. 爆炸与冲击, 2018, 38(1): 212-216.
WANG Yan-ping, ZENG Dan, ZHANG Tong-lai, et al. Heat radiation propagation law of propellant combustion [J]. *Explosion and Shock Waves*, 2018, 38(1): 212-216.

- [61] Wang K, He Y R, Liu Z Y, et al. Experimental study on optimization models for evaluation of fireball characteristics and thermal hazards induced by LNG vapor cloud explosions based on colorimetric thermometry [J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2019(366): 282–292.
- [62] 王凤丹. 燃料空气炸药热辐射毁伤效应研究[D]. 南京: 南京理工大学, 2010.
WANG Feng-dan. Study on thermal radiation damage effects of fuel air explosive [D]. Nanjing: Nanjing University of Science & Technology, 2010.
- [63] 赵志宁, 王辰. 新型弹药热辐射毁伤效应研究[J]. 军械工程学院学报, 2015, 27(1): 15–18.
ZHAO Zhi-ning, WANG Chen. Research on damage effect of new type ammunition thermal radiation [J]. *Journal of Ordnance Engineering College*, 2015, 27(1): 15–18.
- [64] Johnston C O, Stern E C. A model for thermal radiation from the Tunguska airburst [J]. *Icarus*, 2019(327): 48–59.
- [65] Shi C L, Liu W, Hong W, et al. A modified thermal radiation model with multiple factors for investigating temperature rise around pool fire [J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2019(379): 120801(1–14).
- [66] 吴蒙. 空中爆炸热效应数值模拟与热毁伤测评技术研究[D]. 南京: 南京理工大学, 2013.
WU Meng. Numerical simulation and thermal damage assessment on explosion in air [D]. Nanjing: Nanjing University of Science and Technology, 2013.
- [67] Huang Y, Zhang Q, Yan H, et al. Estimation of the fireball size in an ethyne-air cloud explosion [J]. *Combustion, Explosion, and Shock Waves*, 2018, 54(1): 106–112.
- [68] Makhviladze G M, Yakush S E. Blast waves and fireballs from bursts of vessels with pressure-liquefied hydrocarbons [J]. *Proceedings of the Combustion Institute*, 2002, 29(1): 313–320.
- [69] Baum H R, Rehm R G. A simple model of the World Trade Center fireball dynamics [J]. *Proceedings of the Combustion Institute*, 2005(30): 2247–2254.
- [70] Yang S G, Zhang Y D, Wu H. Comparison and validation of thermal radiation models for hydrocarbon jet fire and fireball [J]. *Applied Mechanics and Materials*, 2012, 204–208: 3503–3512.
- [71] Blankenhagel P, Wehrstedt K-D, Xu S, et al. A new model for organic peroxide fire balls [J]. *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*, 2017(50): 237–242.
- [72] Blankenhagel P, Wehrstedt K-D, Mishra K B, et al. The capability of commercial CFD code to predict organic peroxide fireball characteristics [J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2019, 365: 386–394.
- [73] Stepanov K L, Stanchits L K, Stankevich Yu A. Modeling of explosion thermal radiation [J]. *Journal of Engineering Physics and Thermophysics*, 2011, 84(1): 179–206.
- [74] Bonilla J M, Àgued A, Munoz M A, et al. Thermal radiation model for dynamic fireballs with shadowing [J]. *Process Safety and Environmental Protection*, 2019(128): 372–384.
- [75] 王泽博, 王志利. 一种火炸药爆炸火球计算方法[J]. 安全与环境学报, 2004, 4(增刊): 132–133.
WANG Ze-bo, WANG Zhi-li. A calculation method of explosive fireball for explosion [J]. *Journal of Safety and Environment*, 2004, 4(Suppl.): 132–133.
- [76] 何志光. FAE爆炸火球热辐射效应研究[D]. 南京: 南京理工大学, 2004.
HE Zhi-guang. Study on thermal radiation effect of FAE explosion fireball [D]. Nanjing: Nanjing University of Science and Technology, 2004.
- [77] Dorofeev S B, Sidorov V P, Efimenko A A, et al. Fireballs from deflagration and detonation of heterogeneous fuel-rich clouds [J]. *Fire Safety Journal*, 1995(25): 323–336.
- [78] Blankenhagel P, Wehrstedt K D, Mishra K B, et al. Thermal radiation assessment of fireballs using infrared camera [J]. *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*, 2018, 54: 246–253.
- [79] Wang L Y, Du H M, Xu H. Compensation method for infrared temperature measurement of explosive fireball [J]. *Thermochimica Acta*, 2019(680): 178342(1–7).
- [80] Lebel Luke S, Brousseau P, Erhardt L, et al. Measurements of the temperature inside an explosive fireball [J]. *Journal of Applied Mechanics*, 2013, 80(3): 031702-1–031702-6.
- [81] 秦仕勇, 彭朝辉, 李向东. 某燃烧弹效能评估模型及影响因素分析[J]. 弹箭与制导学报, 2011, 31(3): 135–137.
QIN Shi-yong, PENG Zhao-hui, LI Xiang-dong. An incendiary bomb efficiency evaluation model and the influence factors analysis [J]. *Journal of Projectiles, Rockets, Missiles and Guidance*, 2011, 31(3): 135–137.
- [82] 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.
AN Wen-shu, LU Wei, LI Hong-xin, 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.
- [83] Sun B, Guo K H, Pareek V K. Dynamic simulation of hazard analysis of radiations from LNG pool fire [J]. *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*, 2015, 35: 200–210.
- [84] 房莹莹. 燃料空气炸药综合毁伤评价模型研究[D]. 南京: 南京理工大学, 2010.
FANG Ying-ying. Research on comprehensive damage assessment models of fuel air explosive [D]. Nanjing: Nanjing University of Science and Technology, 2010.
- [85] 王若茵, 蒋军成. LPG沸腾液体扩展蒸气爆炸火球热辐射概率风险评估[J]. 中国安全生产科学技术, 2005, 1(3): 11–14.
WANG Ruo-jun, JIANG Jun-cheng. Fireball heat radiation of LPG BLEVE risk assessment [J]. *Journal of Safety Science and Technology*, 2005, 1(3): 11–14.
- [86] Mudan K S. Thermal radiation hazards from hydrocarbon pool fires [J]. *Prog Energy Combust*, 1984, 10: 59–80.
- [87] Chen M Y, Li H H, Li P. Fireball modeling and thermal hazards analysis of leaked 1,1-difluoroethane in fluorine chemical industry based on FDS [J]. *Journal of Thermal Analysis and Calorimetry*, 2020, <https://doi.org/10.1007/s10973-020-09951-x>.
- [88] Wang K, Liu Z, Qian X, et al. Long-term consequence and vulnerability assessment of thermal radiation hazard from LNG explosive fireball in open space based on full-scale experiment and phast [J]. *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*, 2017(46): 13–22.
- [89] 刘想炎, 黄振贵, 陈秋元, 等. 云爆弹对地面人员综合杀伤的仿真评估研究[J]. 兵器装备工程学报, 2020, 41(8): 103–106, 147.
LIU Xiang-yan, HUANG Zhen-gui, CHEN Qiu-yuan, et al. Simulation evaluation of comprehensive killing effect of FAE

on ground personnel targets [J]. *Journal of Ordnance Equipment Engineering*, 2020, 41(8): 103-106, 147.

[90] 仲倩, 王伯良, 刘大斌, 等. 温压弹药综合毁伤效果评估模型研究[J]. *爆破器材*, 2018, 47(5): 21-26, 34.

ZHONG Qian, WANG Bo-liang, LIU Da-bin, et al. Evaluation model for comprehensive damage effects of thermo-baric bomb[J]. *Explosive Materials*, 2018, 47(5): 21-26, 34.

A Review on Burning Damage Technology

XU Guang-ze, ZHANG Liang, ZHANG Xing-gao, GAI Xi-qiang, MA Shi-zhou, YANG Lin

(*Institute of chemical defense, Academy of Military Sciences, Beijing 102205, China*)

Abstract: Burning damage technology is an important research area in energetic materials and damage. The research in burning damage technology was mainly reviewed and summarized from three aspects: the formulation design and application of incendiary agents, the damage theory and technology of burning thermal radiation, and the burning damage assessment technology. Problems such as insufficient burning damage effectiveness of incendiary agents, single process of parameter characterization in thermal radiation model and incomprehensive burning damage assessment method were pointed out. The future research emphases on burning damage technology include incendiary materials with high densities and high calorific values, the structure-effect relationship of incendiary agent charges, testing technology for key model parameters represented by the fireball temperature, correction and optimization of thermal radiation damage models, and the accurate assessment method of thermal radiation damage effect under the coupling effect of multiple damage elements in the damage field.

Key words: burning damage; incendiary agent; burning heat radiation; damage assessment

CLC number: TJ45; TJ53

Document code: A

DOI: 10.11943/CJEM2020294

(责编: 王艳秀)