

文章编号:1006-9941(2024)12-1298-16

## 铝粉对温压炸药典型爆炸毁伤元的影响研究进展

刘威,王靖岩,韩志伟

(南京理工大学安全科学与工程学院, 江苏 南京 210094)

**摘要:** 温压炸药中铝粉含量与粒径直接影响爆炸能量输出结构,特别是对温压炸药特有的“后燃效应”产生重大影响,进而对“温压效应”的形成起到至关重要的作用。研究介绍了铝粉含量与粒径对温压炸药的爆炸能量、压力效应、热毁伤效应和窒息效应的影响作用,分析了铝粉对后燃反应的影响机理,指出了温压炸药中添加铝粉的最佳含量与粒径范围。展望了未来的研究方向:应重点关注铝粉能量释放过程的反应动力学机制,开发与之适配的测试方法,深入解析温压炸药的爆炸能量释放过程,为其配方设计和能量输出结构的精准调控提供依据。

**关键词:** 铝粉;温压炸药;爆炸能量;压力效应;热毁伤效应;窒息效应

**中图分类号:** TJ55;TQ564

**文献标志码:** A

**DOI:** 10.11943/CJEM2024143

### 0 引言

传统的炸药配方主要以三硝基甲苯(TNT),环三亚甲基三硝胺(RDX),环四亚甲基四硝胺(HMX)等单质炸药或几种单质炸药的混合物为主。随着武器系统的发展,传统炸药配方的能量逐渐不能满足武器现代化的需求<sup>[1]</sup>。高活性金属燃料则表现出巨大的发展潜力,应用于混合炸药时能显著提升武器装备毁伤效能,因此金属化混合炸药成为火炸药领域的重要发展方向<sup>[2-4]</sup>。温压炸药作为一种典型的负氧平衡金属化混合炸药,优势在于其独特的“温压效应”<sup>[5-6]</sup>。以高能炸药的爆轰反应实现对金属粒子的活化与抛撒,利用氧化性物质的助燃作用促进金属粒子与氧的可控氧化还原反应,以“后燃反应”形成长时间的温度与压力的耦合作用,实现高效毁伤<sup>[7-10]</sup>。温压炸药的爆炸作用过程共分为3个阶段,分别为:爆轰反应阶段、无氧燃烧阶段以及有氧燃烧阶段,其中后燃反应阶段的能量通常可达到爆轰能量的3倍左右<sup>[11-13]</sup>。温压炸药的能

量输出结构与传统高能炸药不同,传统高能炸药的绝大部分能量在其爆轰波波阵面处释放,作用时间较短,作为主要毁伤元的冲击波能量、爆炸火球参数等衰减较快。而由于温压炸药存在无氧燃烧阶段及有氧燃烧阶段,在高速炸药爆轰过程结束后仍存在较多潜能,能量释放过程较缓慢,持续时间相对较长。

尽管铝粉应用于金属化炸药的历史已有一百余年,但是由于铝粉综合性能优良、来源广泛,其作为金属化混合炸药的关键基础材料,目前仍无可替代<sup>[14-16]</sup>。根据温压炸药的释能与毁伤特点,铝粉在无氧燃烧以及有氧燃烧阶段的有效释能并形成温压效应,是温压炸药能量输出调控的关键,也是衡量温压炸药性能优劣的一个核心指标。研究表明,铝粉的形状、粒径、表面结构和应用环境等因素都会对温压炸药的爆炸能量、超压和冲量及毁伤效应形成较大影响<sup>[17-24]</sup>。本研究总结并分析了国内外相关研究中铝粉对温压炸药典型爆炸毁伤元的影响研究进展,重点分析了铝粉含量和粒径对温压炸药爆炸能量和压力效应的影响效果和机理,综述了铝粉对温压炸药能量释放的调控作用;对铝粉在温压炸药中的燃烧模型、爆炸历程和释能特性进行了梳理,归纳整理了铝粉对温压炸药热毁伤效应和窒息毁伤效应影响的相关研究进展;总结了铝粉对典型毁伤效应的增强效果和机理,以期对温压炸药的配方设计和能量调控提供支持。

收稿日期:2024-06-06;修回日期:2024-06-25

网络出版日期:2024-11-11

作者简介:刘威(1999-),男,硕士研究生,主要从事复合含能材料制备及其应用技术研究。e-mail:liuweizbxdx@163.com

通信联系人:韩志伟(1984-),男,副教授,主要从事爆炸理论及其应用技术研究。e-mail:hanzhiwei@njjust.edu.cn

引用本文:刘威,王靖岩,韩志伟.铝粉对温压炸药典型爆炸毁伤元的影响研究进展[J].含能材料,2024,32(12):1298-1313.

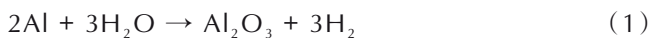
LIU Wei, WANG Jing-yan, HAN Zhi-wei. Research Progress on the Influence of Aluminum Powder on the Typical Blast Damage Elements of Thermobaric Explosives[J]. Chinese Journal of Energetic Materials (Hanneng Cailiao), 2024, 32(12):1298-1313.

## 1 铝粉对温压炸药爆炸能量影响

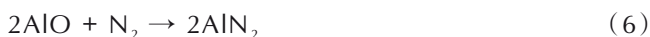
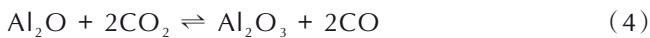
在温压炸药爆炸作用的三个阶段中,铝粉会直接参与无氧燃烧阶段及有氧燃烧阶段的反应,在炸药爆轰所营造的高温、高压、强对流环境下快速释放能量<sup>[25-27]</sup>,并对温压炸药的爆轰性能和后燃效应形成决定性影响。大量的研究表明,铝粉的含量、粒径等性能会决定温压炸药后燃效应的持续时间和强度,并对温压炸药的爆炸能量产生较大影响<sup>[28-31]</sup>。

### 1.1 铝粉含量的影响

在温压炸药爆轰过程中形成的高温高压爆轰产物发生膨胀,铝粉向外抛撒。随后铝粉与其他爆轰产物发生无氧燃烧反应,当空气卷入后,铝粉又与氧气发生有氧燃烧反应,在后两个阶段中由于铝粉的参与,能够实现温压炸药爆炸能量的增强。在无氧燃烧阶段,铝粉会与温压炸药的爆轰产物发生化学反应并释放能量,主要有 $H_2O$ 、 $CO$ 、 $CO_2$ 、 $NO$ ,其中以 $H_2O$ 、 $CO$ 、 $CO_2$ 占比最大,反应方程如下<sup>[32-33]</sup>:



除了上述反应,在此过程中还存在着一些附加反应,附加反应方程如下<sup>[34]</sup>:



为了对温压炸药无氧燃烧阶段进行深入研究,研究人员在无氧气氛环境下进行了铝粉含量对温压炸药爆炸能量影响的研究。李世伟<sup>[28]</sup>等设计了不同铝粉含量的温压炸药配方,并在爆热弹中的真空环境下测试了爆热。当铝粉含量由10%上升至30%时,爆热值由 $5855 \text{ kJ}\cdot\text{kg}^{-1}$ 上升至 $7691 \text{ kJ}\cdot\text{kg}^{-1}$ 。研究结果如图1所示。谢馨远<sup>[29]</sup>测试了铝粉含量分别为10%、15%、20%、38%的HMX基温压炸药在氮气气氛下的爆炸能量,结果表明随着铝粉含量增多,炸药爆炸能量持续增大,在铝粉含量为38%时达到最大值 $7380 \text{ kJ}\cdot\text{kg}^{-1}$ 。

而在有氧燃烧阶段,铝粉主要与外界氧气发生燃烧反应,在此过程中释放大量的能量,主要的反应方程如式(7)所示:



李媛媛等<sup>[30]</sup>对比了不同铝粉含量的HMX基温压炸药在空气条件下的爆热,研究表明含有30%铝粉的

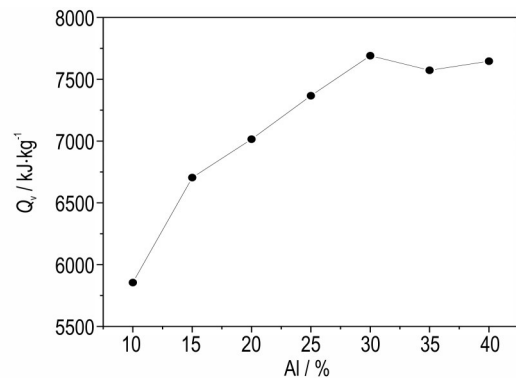


图1 炸药爆热随铝粉含量变化曲线<sup>[28]</sup>

Fig. 1 Variation curve of detonation heat with aluminum powder content<sup>[28]</sup>

配方爆热最高,可达 $7650 \text{ kJ}\cdot\text{kg}^{-1}$ 。段晓瑜<sup>[31]</sup>使用EXPLO5对不同铝粉含量的RDX基炸药爆炸能量进行了计算且得到了相同的趋势,当铝粉含量在30%时可以达到最大值。上述的实验和模拟研究表明,在温压炸药爆轰的无氧燃烧和有氧燃烧阶段,铝粉分别与爆轰产物 $CO_2$ 和 $H_2O$ 以及空气中的 $O_2$ 发生“二次反应”并放出能量。温压炸药的爆炸能量会随着一定范围内铝粉含量的增大而增加,在铝粉含量达到30%~40%之间时达到极值。

然而,研究者们也发现温压炸药的爆炸能量并不总是随着铝粉含量的增多呈现递增的趋势。王红星等<sup>[35]</sup>制备了不同铝粉含量的HMX基炸药配方,并通过量热计法测试了这些炸药配方的爆炸能量。同时,他们利用盖斯定律计算了理论爆热,并将计算值与实测值做了比较,其结果如图2所示。无论是计算值还是实测值,该炸药体系的爆炸能量均在铝粉含量达到30%时达到最大值,约为 $7000 \text{ kJ}\cdot\text{kg}^{-1}$ ,但随着铝粉含量持续增大,爆炸能量不断下降。

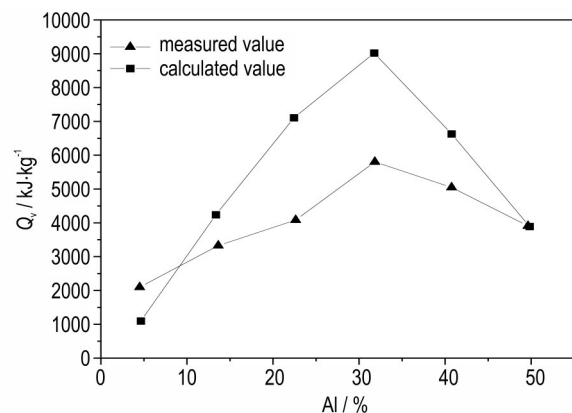


图2 HMX体系爆炸能量随铝粉含量变化曲线<sup>[35]</sup>

Fig. 2 Variation curves of explosion energy of HMX system with aluminum powder content<sup>[35]</sup>

田少康<sup>[36]</sup>根据温压炸药爆轰参数计算模型给出了不同铝粉含量的HMX基温压炸药配方的爆炸能量数据,结果如表1所示。研究表明,温压炸药的爆炸能量会随着铝粉含量增大呈现先增加后减少的趋势,这与其他研究者的结论相似<sup>[35]</sup>。

表1 不同铝粉含量HMX基温压炸药配方的爆炸能量<sup>[35]</sup>

Table 1 Explosion energy of HMX-based thermobaric explosive formulations with different aluminum powder contents<sup>[35]</sup>

HMX / %	Al / %	content of other components / %	explosion energy / J·g <sup>-1</sup>
77.5	10	12.5	6869.6
72.5	15	12.5	7150.9
67.5	20	12.5	7432.4
62.5	25	12.5	7734.6
57.5	30	12.5	7956.8
52.5	35	12.5	8255.7
47.5	40	12.5	7835.9
42.5	45	12.5	7562.3
37.5	50	12.5	6792.1
32.5	55	12.5	6022.0

温压炸药的爆炸能量随着铝粉含量增加而升高主要是因为当铝粉含量低于35%时其反应完成度较高。当铝粉含量持续增加时,爆炸能量降低的现象则由多种因素综合导致。首先,温压炸药是负氧平衡炸药,过量的铝粉极有可能因为没有足量氧化剂而反应不完全,导致爆炸能量下降。其次,在温压炸药爆轰过程中,铝粉极有可能不发生反应或很少发生反应,并吸收爆轰产生的能量,这也会导致爆炸能量的下降。一部分研究者们对这种现象进行了研究并形成了三种理论。其中,美国学者Cook M A<sup>[37]</sup>于1957年提出了二次反应理论,他认为含铝炸药的爆炸过程由两次反应组成,第一次为炸药的爆轰过程,铝粉在炸药的爆轰反应区内不会发生反应,即使少部分铝粉提前反应,那也相当有限且不完全。大部分的铝粉是在爆轰反应之后的产物膨胀区才能被点燃,发生第二次反应。这相当于稀释了炸药中可爆轰组分的浓度,所以爆炸能量会相应降低。第二种理论为化学热稀释理论<sup>[38]</sup>。该理论认为铝粒子在炸药爆轰过程中已经开始发生化学反应,反应后的产物主要是Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>、AlO、Al<sub>2</sub>O以及少量的AlN、Al<sub>4</sub>C<sub>3</sub>等铝的化合物,这些化合物极其不稳定,如Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>在蒸发温度下分解为AlO及Al<sub>2</sub>O,而AlO又极易容易转变为气态Al<sub>2</sub>O,物质受热分解或发生相态转化会消耗炸药爆轰能量,降低其爆炸能量。第三种理

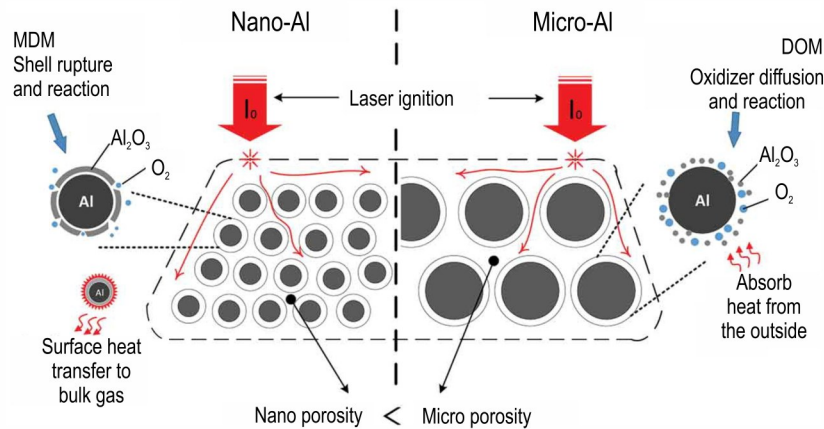
论是惰性热吸收理论<sup>[14]</sup>。该理论认为铝粉不发生反应,还会以吸热和体积压缩的形式消耗部分爆轰产生的热量,这导致了爆轰过程中爆炸能量的衰减。

铝粉作为温压炸药后燃阶段的主要反应物,在一定范围内提高其含量能够有效延长后燃效应的持续时间,提升温压炸药的爆炸总能量。当铝粉含量小于40%时,少量参与爆轰反应的铝粉反应完成度较高,可以较好弥补铝粉对高能炸药的稀释作用,表现为温压炸药的爆炸能量随着铝粉含量的升高而增加。而当铝粉超过40%时,温压炸药的负氧更为严重,绝大多数铝粉呈化学惰性,呈现出对高能炸药的稀释作用,导致炸药爆炸能量的下降。根据上述研究结果,当铝粉含量达到30%~40%时,温压炸药的爆炸能量通常达到最大值,而当铝粉含量继续增加时则呈下降趋势。

## 1.2 铝粉粒径的影响

随着颗粒纳米化技术的不断发展,纳米级铝粉成为提高铝粉反应度的有效途径。由于铝粉的尺寸效应和表面界面效应,小粒径铝粉的表面与内部有着截然不同的键态和电子态<sup>[39]</sup>,导致小粒径铝粉具有更高的反应性<sup>[40]</sup>。Jin等<sup>[41]</sup>研究了纳米铝粉和微米铝粉的点火燃烧性能差异,建立了如图3所示的燃烧模型。结果表明,铝粉的点火特性取决于粒径、氧化壳层厚度和孔隙率,而纳米铝粉的粒径和孔隙率明显小于微米铝,热量的穿透深度较小,使纳米铝的升温速率和反应速率均比微米铝高,燃烧时间也更短。这也就意味着在温压炸药的后燃反应阶段,添加粒径更小的铝粉有利于增强后燃阶段的放热量<sup>[42]</sup>。研究发现铝粉的粒径会影响其燃烧模式,进而影响其燃烧速率。铝粉的燃烧主要有两种控制模式,分别是扩散控制和动力学控制<sup>[43]</sup>。扩散控制指铝粉与氧化剂之间的反应过程受到扩散的限制,这意味着铝核在反应过程中不会迅速成为反应中心,需要通过扩散来移动到反应位置,该过程主要与铝粉、氧化剂等反应物的扩散系数相关。动力学控制指燃烧反应速率受到铝粉浓度、环境温度、压力等动力学因素的控制,其反应速率与温度的关系主要遵从阿伦尼乌斯公式。

一般认为,微米级铝粉的点火遵循扩散控制机制。当环境温度升高时,其氧化壳层晶型会发生改变,密度和孔隙率等性质也会发生改变<sup>[44]</sup>,此时铝粉、氧化剂扩散的速率就会发生变化,氧化剂与铝发生反应放出大量热量并将铝颗粒点燃。而纳米级铝粉点火主要遵循化学动力学控制机制,纳米铝粉的壳核比相较于微米级铝粉更大,当环境温度达到铝核的熔点而未

图3 纳米铝粉和微米铝粉的点火燃烧模型<sup>[41]</sup>Fig.3 Ignition and combustion model for nano-Al and micro-Al<sup>[41]</sup>

达到  $\text{Al}_2\text{O}_3$  壳层的熔点时,熔融的铝核将会对壳层产生较大的拉伸应力,这会使得铝液滴内部与壳体之间产生较大的压力差,液态铝核会分散成无数的纳米尺度液滴簇发生飞溅并将铝颗粒点燃<sup>[45]</sup>,其点火方式相较于扩散控制的微米级铝粉更加剧烈。Huang 等<sup>[46]</sup>研究了铝颗粒在燃烧过程中的反应途径及其中间产物。结果表明,随着铝粉粒径的减小,火焰传播速度增加,燃烧控制模式由扩散控制转变为反应动力学控制。Haidzar 等<sup>[47]</sup>在研究中提到,对于直径大于  $100\ \mu\text{m}$  的颗粒,点火温度接近  $2350\ \text{K}$ ;对于直径为  $1\sim 100\ \mu\text{m}$  的颗粒,可在  $1300\sim 2300\ \text{K}$  的范围内点燃;而对于纳米铝粉,可在  $900\ \text{K}$  点燃。Li 等<sup>[48]</sup>的研究表明当铝粉粒径小于  $10\ \mu\text{m}$  时,燃烧机制将从扩散控制模式转变为动力学控制模式,而粒径在  $10\ \mu\text{m}$  左右的铝颗粒燃烧受到混合机制控制,即气相反应和表面反应同时存在<sup>[49]</sup>。王兴龙等<sup>[16]</sup>根据铝粉在温压炸药开放空间爆炸反应过程中的动态反应模型对铝粉的反应度及后燃反应热进行了计算,计算结果显示铝粉粒径越小,其完全反应所需要的时间就越短,铝粉粒径从  $30\ \mu\text{m}$  到  $3\ \mu\text{m}$ ,其完全反应时间所缩短了  $46\ \text{ms}$ 。

铝粉在后燃阶段的反应过程主要是铝粉被爆轰产物加热,达到点火温度随后进入空气中发生有氧燃烧反应。在此过程中有研究人员认为铝粉被加热所达到的温度主要由加热时间和加热效率决定<sup>[50]</sup>。大颗粒铝粉受到的气相作用力较小,这就使得大颗粒铝粉需要更长的时间加热到点火温度,也就意味着其点火延滞期更长。考虑到爆轰产物的膨胀时间极短,所以大颗粒铝粉通常反应度偏低。不同粒度的铝粉在后燃阶段对爆炸能量的贡献形成了差异,这表明可以通过金属粉纳米化和颗粒级配来调控温压炸药的输出结

构。同等条件下小粒径铝粉的反应完全度往往要高于大粒径铝粉,Stiel<sup>[51]</sup>和 Baker<sup>[52]</sup>等的研究对此结论提供了较好的支撑,他们发现铝粉尺寸大于  $50\ \mu\text{m}$  时,爆炸产物的膨胀体积达到初始体积的 12 倍时铝粉才会开始反应;而在铝粉尺寸小于  $10\ \mu\text{m}$  时可以在 7 倍产物膨胀体积内充分反应。Kicinski 等<sup>[53]</sup>将平均粒径为  $5\ \mu\text{m}$  和  $75\sim 90\ \mu\text{m}$  的铝粉添加进 RDX 基温压炸药,添加量为 30%,作为对照还添加了与铝粉具有相似物理性质的惰性物质  $\text{LiF}$  ( $5\ \mu\text{m}$ ) 和  $\text{Al}_2\text{O}_3$  ( $75\ \mu\text{m}$ )。在氮气、氩气、空气和氧气/氩气混合的四种气体环境下,分别测试了炸药柱的爆炸能量,研究结果如表 2 所示。

表 2 不同铝粉粒径 RDX 基温压炸药在各种气氛下的爆炸能量<sup>[53]</sup>  
Table 2 Explosion energy of RDX-based thermobaric explosives with aluminum powder of different particle sizes in various atmospheres<sup>[53]</sup>

Gaseous filler	explosion energy / $\text{J}\cdot\text{g}^{-1}$			
	RDX/Al ( $90\ \mu\text{m}$ )	RDX/Al ( $5\ \mu\text{m}$ )	RDX/LiF	RDX/ $\text{Al}_2\text{O}_3$
Nitrogen	7050	7302	3863	3848
Argon	7067	7230	3877	3819
Air	16634	16965	7747	7290
Oxygen:Ar=(20:80)	16905	17025	7953	7756

随着研究的深入,人们发现铝粉的粒径并非越小越好<sup>[54-55]</sup>。由于小粒径铝粉的比表面积更大,更易被空气氧化。部分研究者们将不同形状和粒径铝粉进行颗粒级配,通过不同粒度铝粉反应动力学机制之间的协同作用提高温压炸药的爆炸性能。

王淑萍等<sup>[56]</sup>研究了微米级铝粉 ( $5\ \mu\text{m}$ ), 纳米级铝粉 ( $150\ \text{nm}$ ) 和两种铝粉级配对 RDX 基炸药的真空爆轰影响,试验结果如表 3 所示。

表3 不同铝粉含量和粒径RDX基温压炸药的爆热<sup>[56]</sup>Table 3 Detonation heat of RDX-based thermobaric explosives with aluminum powder of different contents and particle sizes<sup>[56]</sup>

Al/%	detonation heat / J·g <sup>-1</sup>		
	micron aluminum powder	nano aluminum powder	grain gradation aluminum powder ( $m_{\text{micron}}:m_{\text{nano}}$ )
20	6933	6624	6835(15:5)
25	7192	6889	7149(12.5:12.5)
30	7451	6932	8016(20:10)
35	7924	7522	8386(30:5)
40	7865	7615	8196(30:10)

Note:  $m_{\text{micron}}:m_{\text{nano}}$  represents the mass ratio of micron aluminum powder to nano aluminum powder.

试验结果表明添加5 μm 粒径铝粉能够有效提升爆炸能量,并且当铝粉添加量大于30%时,对铝粉进行一定比例的级配有利于铝粉整体的氧化速率和氧化程度,进而提高整个炸药体系的能量。

铝粉粒径作为影响其点火燃烧机制的核心因素,极大程度地影响温压炸药的爆炸能量。当活性铝含量接近时,铝粉粒径越小越有利于温压炸药的能量释放。然而,由于粒径较小的铝粉比表面积更大,更易被氧化,通常活性铝含量会随铝粉粒度减小而降低。因此,对铝粉进行粒度级配成为平衡反应活性与粒径关系的有效手段。对铝粉进行粒度级配,小颗粒铝粉率先在铝粉云团中被点燃并放出热量,释放的热量对大颗粒铝粉进行加热,促进铝粉云团进一步反应放热,能够有效提高后燃反应的强度和持续时间。

## 2 铝粉对温压炸药压力效应的影响

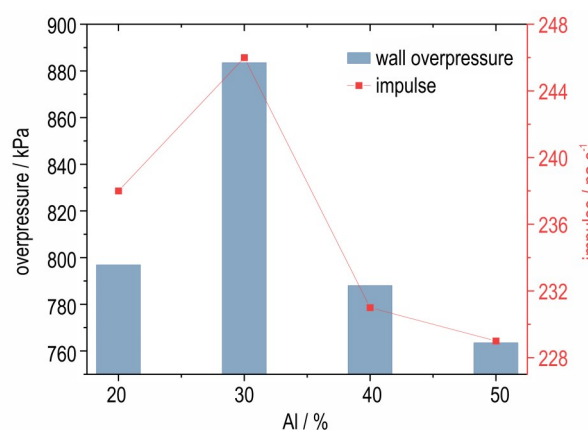
温压炸药产生的压力效应主要来源于爆轰产生的空气冲击波。压力效应主要包括:冲击波超压、准静态压力、冲量等。冲击波超压是一个非常重要的压力效应参数,可以反映炸药的毁伤能力,是一种动态压力;准静态压力指的是当炸药爆轰及后燃相关的化学反应完成后,空间内部的气体在冲击波压缩和被动加热双重作用下发生升温膨胀,形成可维持一段时间的高压,该压力振荡下降并趋于平稳,这段时间的压力就是准静态压力,可表征总能量的集聚<sup>[57]</sup>。冲量是指爆轰过程中,由冲击波引起的总的动量变化,在温压炸药中冲量可以用来评估冲击波的冲击力量和动能传递;正压作用时间段内冲击波会作用于某个位置造成持续正

压,也是评估温压炸药能量释放的一个重要参数<sup>[58]</sup>。温压炸药在爆轰的过程中,由于后燃效应存在,放热量增大,空间内的空气吸热膨胀导致其准静压升高,对冲击波的传播起到了补充作用,所以产生的压力效应具有持续时间长,衰减缓慢等特点。

### 2.1 铝粉含量的影响

温压炸药爆炸产生的压力效应受到铝粉燃烧强度和持续时间的影响。当铝粉含量在一定范围内升高时,温压炸药的后燃效应会相应增强,导致其冲击波作用加强。具体表现为准静压、超压和冲量增强,正压作用时间延长。在有限空间内,温压炸药产生的冲击波会在空间壁面发生复杂的反射现象<sup>[59-61]</sup>,反射冲击波会向密闭空间的几何中心汇聚,在汇聚点压力会远高于冲击波汇聚之前;在有限空间内反射的冲击波会增强铝粉与空气的混合程度,维持爆轰产物温度,有利于铝粉充分反应。

为了研究不同铝粉含量温压炸药配方在密闭空间的压力特性,李席<sup>[62]</sup>、王明焯<sup>[63]</sup>等将不同铝粉含量配方的温压炸药置于密闭爆炸罐中央引爆,并测量了爆炸冲击波的壁面超压及冲量,其研究结果如图4、表4所示。

图4 爆炸场超压和冲量随铝粉质量分数的变化<sup>[62]</sup>Fig. 4 Variation of blast overpressure and impulse with Al mass fraction<sup>[62]</sup>表4 不同铝粉含量的HMX基温压炸药内爆试验冲击波参数<sup>[63]</sup>Table 4 Implosion shock wave parameters of HMX-based thermobaric explosives with different aluminum contents<sup>[63]</sup>

Al/%	overpressure / kPa	impulse / Pa·s <sup>-1</sup>	shockwave duration / ms
20	2446	3252.0	94.6
25	2615	3517.3	108.4
30	2854	3805.1	130.7
35	2653	3574.4	112.1
40	2360	3102.7	90.4

两者的研究同时指出,当铝粉的质量分数增加至30%时,壁面超压及冲量均达到最大值。壁面超压大约可提升10%~17%,而冲量最大约可提升17%左右。当铝粉含量继续增大时,壁面超压、冲量均出现了不同程度的降低。

封雪松等<sup>[64]</sup>采用20%~40%铝粉含量的HMX基温压炸药(W1-W5)进行了空爆试验,试验所用药柱均为装药量为1 kg的压装药。使用自由场传感器测量了不同铝粉含量配方的超压、正压作用时间和冲量随爆心距离的变化趋势,试验布置如图5所示,试验结果如表5所示。

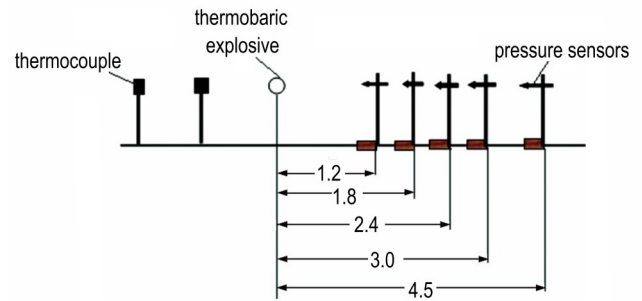


图5 空中爆炸试验布置图<sup>[64]</sup>(单位:m)

Fig.5 Diagram of air blast test<sup>[64]</sup>(unit:m)

表5 HMX基温压炸药空爆试验冲击波超压和冲量<sup>[64]</sup>

Table 5 Air blast shock wave overpressure and impulse of HMX-based thermobaric explosives<sup>[64]</sup>

distance / m	W-1		W-2		W-3		W-4		W-5	
	overpressure / MPa	impulse / MPa	overpressure / MPa	impulse / MPa	overpressure / MPa	impulse / MPa	overpressure / MPa	impulse / MPa	overpressure / MPa	impulse / MPa
1.2	1.230	240	0.960	198	1.180	216	1.060	208	1.020	193
1.8	0.250	99	0.320	111	0.330	119	0.280	112	0.310	115
2.4	0.170	82	0.130	83	0.150	89	0.170	88	0.150	87
3.0	0.092	77	0.087	78	0.084	77	0.091	79	0.083	73
4.5	0.046	69	0.044	71	0.051	73	0.046	70	0.044	64

Note: W1 represents an aluminum powder content of 20%, W2 represents an aluminum powder content of 25%, W3 represents an aluminum powder content of 30%, W4 represents an aluminum powder content of 35%, and W5 represents an aluminum powder content of 40%.

以上测试数据表明,当铝粉质量分数较低时在近爆心处超压较高,但是衰减很快;当铝粉含量达到30%~35%时各测点的超压和冲量均达到较高水平;当铝粉质量分数大于40%时超压和冲量均呈现明显下降趋势。使用全氧化法对铝粉的最优添加量进行理论计算,全氧化法认为炸药中含有的氧元素全部用来将铝粉氧化成 $Al_2O_3$ ,并由此算出获得最大燃烧热效应的理论加入量。假设HMX基温压炸药总体为100 g,其中包含5 g的粘结剂,反应方程式如式(8):



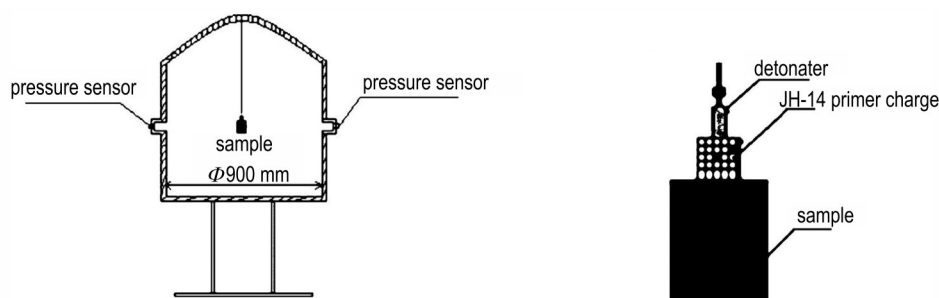
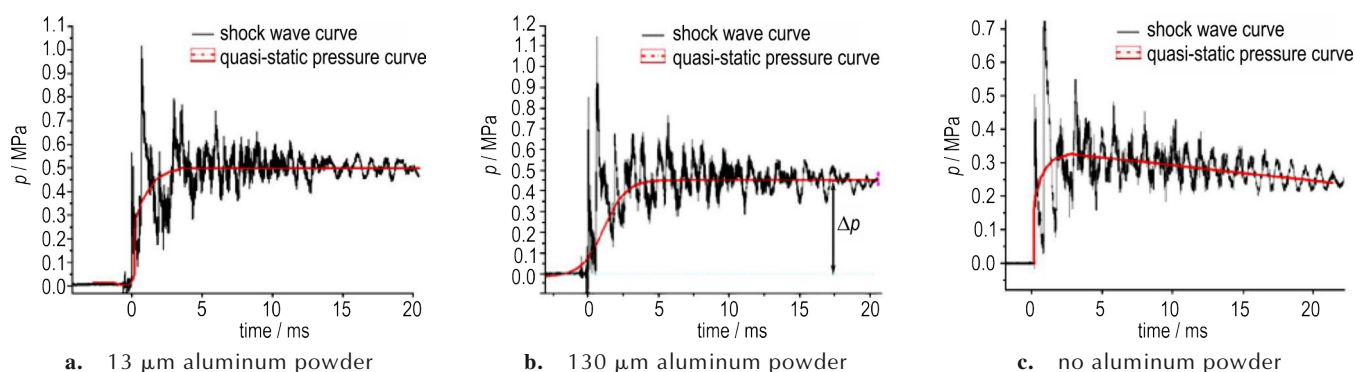
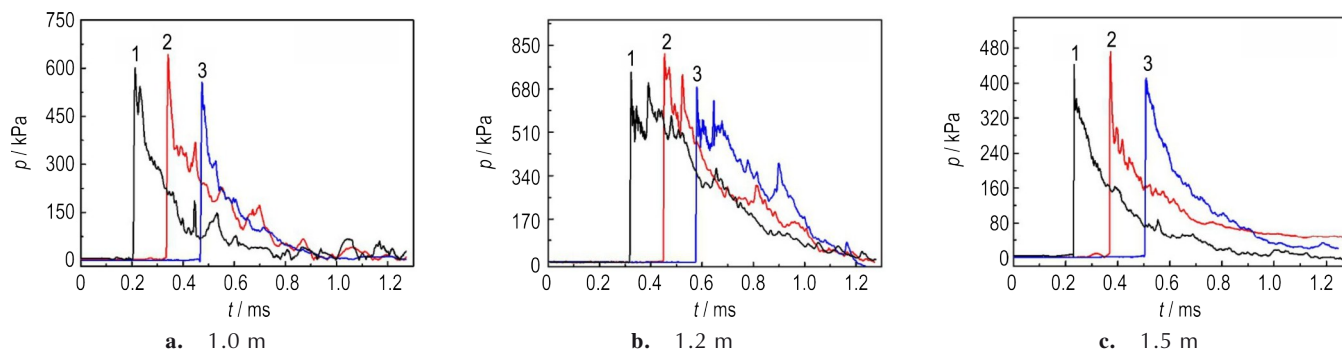
根据式(8),计算加入铝粉的最优质量分数为32.7%,其配方质量比为HMX/Al/粘结剂=62.3/32.7/5.0。

上述研究表明冲击波超压和冲量的整体趋势都随着铝粉含量的增加呈现先增加后减小的特点,当铝粉含量为30%左右时,超压、准静态压力和冲量达到最大值。在冲击波形成初期,铝粉未参与反应,冲击波主要由温压炸药配方中的高能炸药爆轰产生。当后燃反应开始时,铝粉燃烧释放的能量开始支持冲击波的传播。所以在一定范围内提高铝粉含量,铝粉的放热量增大,温压炸药释放的总能量更大,准静压和超压随之增大,冲击波衰减趋缓,冲量和正压作用时间得到延长。

## 2.2 铝粉粒径的影响

铝粉物性参数对温压炸药压力效应存在较大影响,大量的研究表明铝粉粒径对于铝粉自身点火燃烧性能有着重要的影响,进而影响温压炸药爆炸产生的准静态压力、超压、冲量等参数影响较为显著<sup>[65-67]</sup>。一般认为,粒径较小的铝粉更有利于温压炸药的释放。但粒径不可无限制减小,当铝粉粒径过小时又会阻碍温压炸药的释放。

金朋刚等<sup>[65]</sup>研究了添加13  $\mu m$ 和130  $\mu m$ 铝粉和无添加铝粉对HMX基温压炸药准静态压力的影响,试验装置图及药柱装配图如图6所示,研究结果如图7所示。根据研究结果,添加了铝粉的炸药配方准静态压力持续时间较长,衰减较慢。对比准静态压力曲线可以看到添加了13  $\mu m$ 铝粉的炸药爆炸产生的准静态压力比添加130  $\mu m$ 配方的准静态压力提升了14%。王明焯等<sup>[63]</sup>做了类似的研究,他们研究了40 nm, 3  $\mu m$ , 35  $\mu m$ 铝粉对温压炸药冲击波超压和冲量的影响。研究结果显示当铝粉粒径由35  $\mu m$ 减小到3  $\mu m$ 时超压在距离爆心各个距离处都是最大,与其他配方炸药相比超压和冲量提升了6%~20%,而当粒径持续减少至40 nm时,超压又有所降低,如图8所示。

图6 试验用密闭装置及样品装配示意图<sup>[65]</sup>Fig.6 Sketches of enclosed device and sample assembly for experiment<sup>[65]</sup>图7 13 μm(a), 130 μm(b) 铝粉和无添加铝粉(c)的炸药准静态压力-时间曲线<sup>[65]</sup>Fig.7 Quasi-static pressure-time curves of explosives with aluminum powder of 13 μm(a), 130 μm(b) and without aluminum powder (c)<sup>[65]</sup>图8 不同粒径铝粉炸药配方在距离爆心1.0 m(a), 1.2 m(b), 1.5 m(c)处的超压曲线<sup>[63]</sup>Fig.8 Overpressure curves of explosives with various particle sizes of aluminum powder at 1.0 m(a), 1.2 m(b) and 1.5 m(c) from the bursting center<sup>[63]</sup>

除了上述的实验研究,也有研究人员使用数值模拟的方法对此进行了研究。数值模拟计算的方法成本较低,能够更为清晰地解析铝粉在温压炸药爆炸过程中的反应历程,但其精确度依赖于模型的准确性。李根<sup>[50]</sup>建立了如图9所示的研究模型,通过气固两相反应流模拟的方法研究了铝粉粒径对温压炸药冲击波传播特性的影响,结果如图10所示。模拟结果显示在距离爆心40 cm处颗粒直径为4.3 μm的铝粉反应度更高,超压峰值也最高,而70 μm的铝粉反应度最低,超压峰值也最低,这与上文中的其他研究人员的实验结

论相符<sup>[63]</sup>。

对铝粉进行颗粒级配能够有效提高温压炸药释放的爆炸能量。对于压力效应而言,颗粒级配的提升效果也十分显著。韩早<sup>[33]</sup>研究了添加7 μm、45 μm以及二者级配这三种不同粒径铝粉的RDX基温压炸药的冲击波参数,结果表明,小粒径铝粉在近场处的超压值更高,而大粒径铝粉在远场处的超压值更高。但是,无论在近场还是远场颗粒级配铝粉的超压值都有一定提升,研究结果如表6所示。

综合以上研究结果,不难看出当铝粉粒径减小到

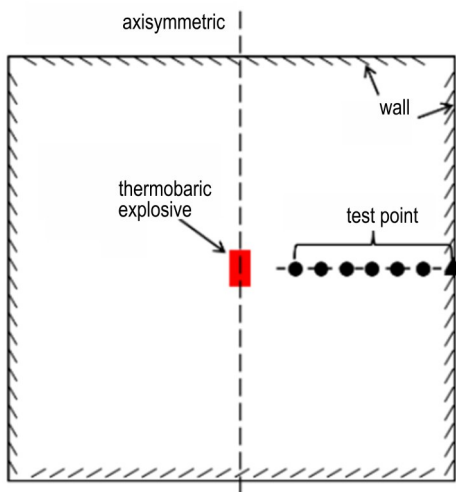


图9 温压炸药有限空间爆炸问题研究模型<sup>[50]</sup>

Fig.9 Modeling of the enclosed space explosion problem for thermobaric explosives<sup>[50]</sup>

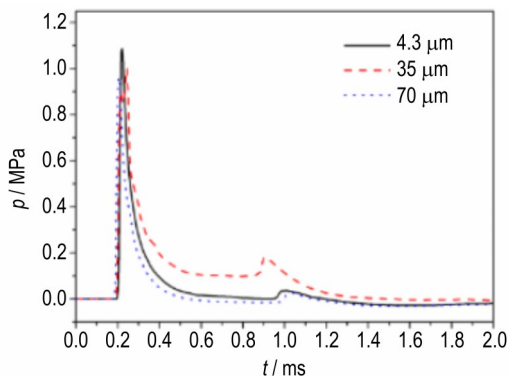


图10 距离爆心40 cm处铝粉颗粒直径对冲击波的影响<sup>[50]</sup>

Fig.10 Influence of aluminum powder particle diameter on the shock wave at 40 cm from the bursting center<sup>[50]</sup>

表6 不同粒径铝粉炸药配方爆炸超压分布<sup>[33]</sup>

Table 6 Overpressure distribution of explosive formulations with various particle sizes of aluminum powder<sup>[33]</sup>

granularity / $\mu\text{m}$	overpressure / kPa			
	4 m	5 m	7 m	9 m
45	92.69	59.64	34.22	21.68
7	98.09	61.29	32.80	21.24
45:7(75:25)	105.4	60.37	35.55	23.11

5  $\mu\text{m}$ 左右时其各项压力效应参数均能达到极值。粒径为5  $\mu\text{m}$ 左右可以使铝粉更容易参与到温压炸药的后燃反应阶段中去,其反应度往往更高,对冲击波的传播起到支持作用,减缓冲击波的衰减速率。具体表现为准静压峰值、超压峰值和冲量增大,正压作用时间延长。而当铝粉粒径过大时,铝粉从被加热到被点燃所需时间较长,有可能出现部分大粒径铝粉难以活化的

情况。所以对铝粉进行颗粒级配,使铝粉实现逐级燃烧,是增强温压炸药压力效应的有效途径。

### 3 铝粉对温压炸药毁伤效应的影响

对于温压炸药的毁伤效应而言,冲击波和热毁伤是温压炸药的基本毁伤方式,而窒息效应属于非基本毁伤方式<sup>[68]</sup>。冲击波会冲击压缩哺乳动物肺部和耳膜等组织器官,同时在打击舰船、建筑等密闭空间目标时使结构发生变形、剪切、撕裂,破坏建筑物门窗、墙体甚至房屋倒塌,进而产生进一步毁伤<sup>[69-71]</sup>。基于温压炸药的“温压效应”,其爆炸产生的火球能够沿着廊道传播并进入破片无法到达的位置,造成热毁伤效应和窒息毁伤效应<sup>[72-75]</sup>。

#### 3.1 热毁伤效应

温压炸药在爆炸过程中将铝粉抛撒至周边空气中,与氧气混合后发生二次燃烧。在此过程中火球体积逐渐膨胀使高温场扩散,形成超高温并持续数十毫秒,尤其是在密闭、半密闭空间内使用温压炸药可极大提升其热毁伤效应<sup>[76-77]</sup>。目前研究人员对于热毁伤效应的研究主要关注火球直径,持续时间,温度以及温度场分布<sup>[78-81]</sup>。

Xu等<sup>[82]</sup>制备了B炸药,不含铝粉的压装RDX基炸药和添加了30%铝粉的RDX基温压炸药三种配方,比较了这三种炸药爆炸之后的火球大小及持续时间,结果如图11所示。温压炸药爆炸形成的火球平均直径约为7.13 m,大于B炸药的6.15 m和压装RDX基炸药的6.09 m,温压炸药的火球持续时间最长,而没有添加铝粉的压装RDX基炸药的火球持续时间最短。同时不难看出温压炸药爆炸的火球亮度最高,整体呈亮白色,且其火焰边缘有颗粒状物质,研究人员推测此物质为铝粉。遗憾的是此研究并未对火球温度和持续时间进行量化评价,无法更准确地评估铝粉对温压炸药热毁伤的影响程度。

纪玉国<sup>[83]</sup>等人开展了RDX基温压炸药(铝粉含量30%)坑道口内爆炸试验,并与TNT坑道口内爆炸试验结果进行了对比,实验布置如图12所示。使用红外相机和高速相机对火球温度分布、尺寸的演化过程进行了研究,实验结果如图13所示。

在温压炸药爆炸火球中,白色火焰为高烈度燃烧状态,代表其温度已经超过了1800  $^{\circ}\text{C}$ ,而TNT并没有产生代表高烈度燃烧效应的明亮光信号。研究人员认为TNT在爆轰之后产生了大量碳粉,而碳粉的活性远



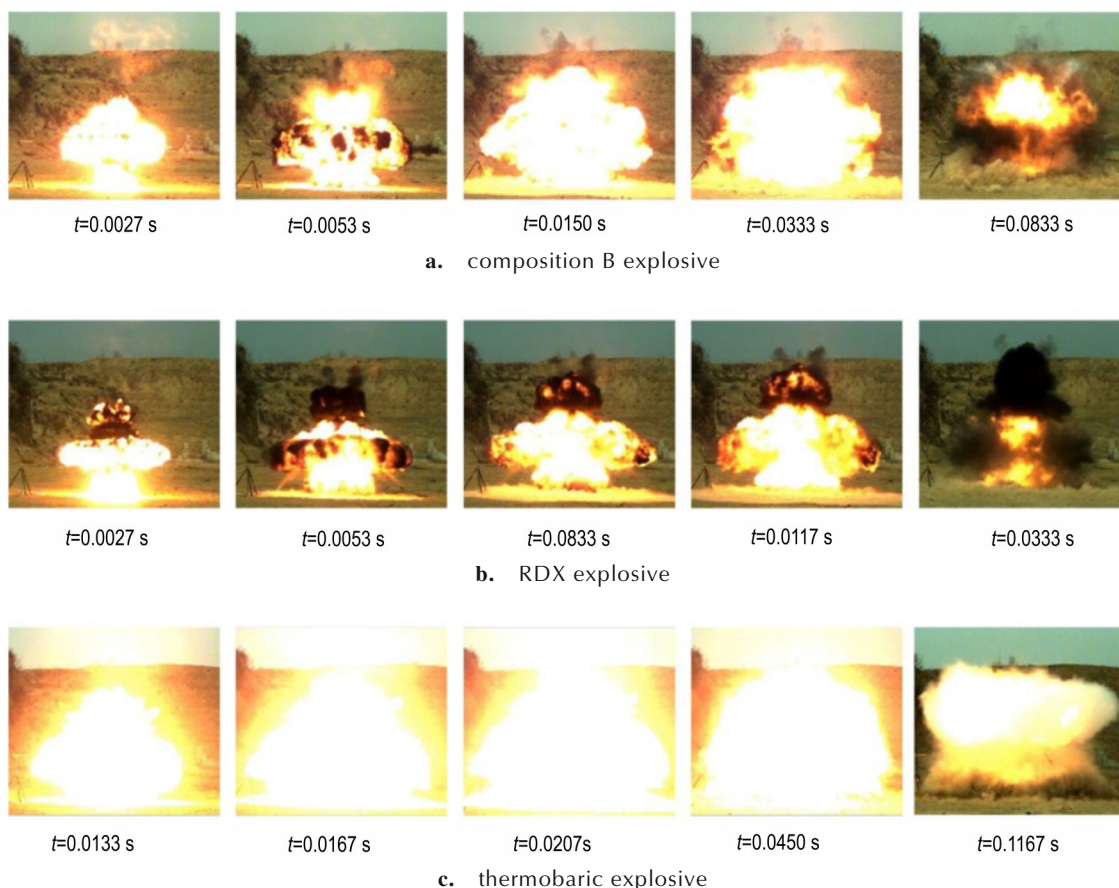


图 11 三种炸药的典型火球形状<sup>[82]</sup>

Fig.11 Typical fireball shapes for three explosives<sup>[82]</sup>

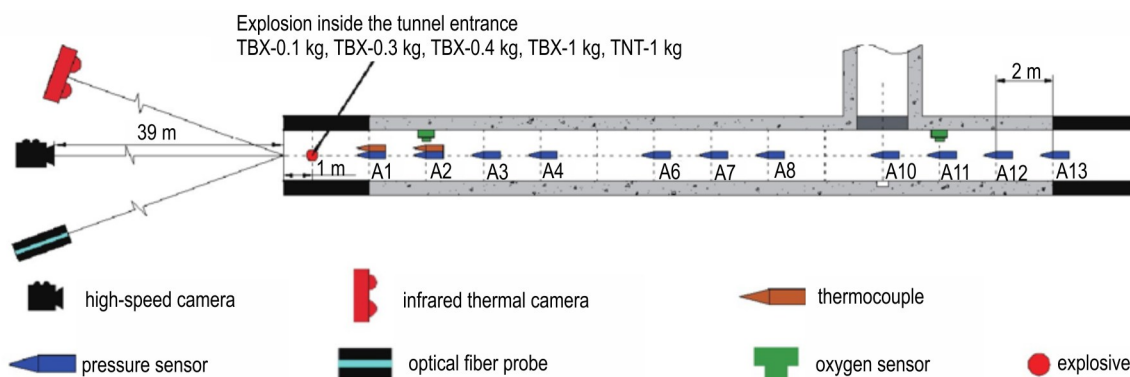


图 12 坑道内爆炸试验布置图<sup>[83]</sup>

Fig.12 Layout of the experiment in the tunnel<sup>[83]</sup>

低于铝粉,所以铝粉对温压炸药爆炸产生的火球温度产生了积极的影响。对比二者火球的温度数据,温压炸药在 1000 °C 以上的持续时间约为 30.05 ms,是 TNT 的 3.87 倍;在 500 °C 以上的持续时间是 TNT 的 3.41 倍。二者对比结果表明铝粉的存在使温压炸药产生了烈度更高的后燃效应。蒋欣利等<sup>[84]</sup>对 RDX 基温压炸药(铝粉含量为 35%)和 LiF 替代铝粉的炸药进

行了爆炸温度场变化规律研究。试验在内部空间尺寸为 3.4 m×2.4 m×2.2 m 的长方体钢筋混凝土建筑中进行,在距离爆心 0.8,1.0,1.2,1.4,1.6 m 处安装了温度传感器,对火球温度进行测量,试验布置如图 14 所示,两种炸药的爆炸火球温度峰值随距离变化的结果如图 15 所示。其中 TBX-1 药量为 15 g, TBX-2 药量为 30 g, LiF 配方同理。

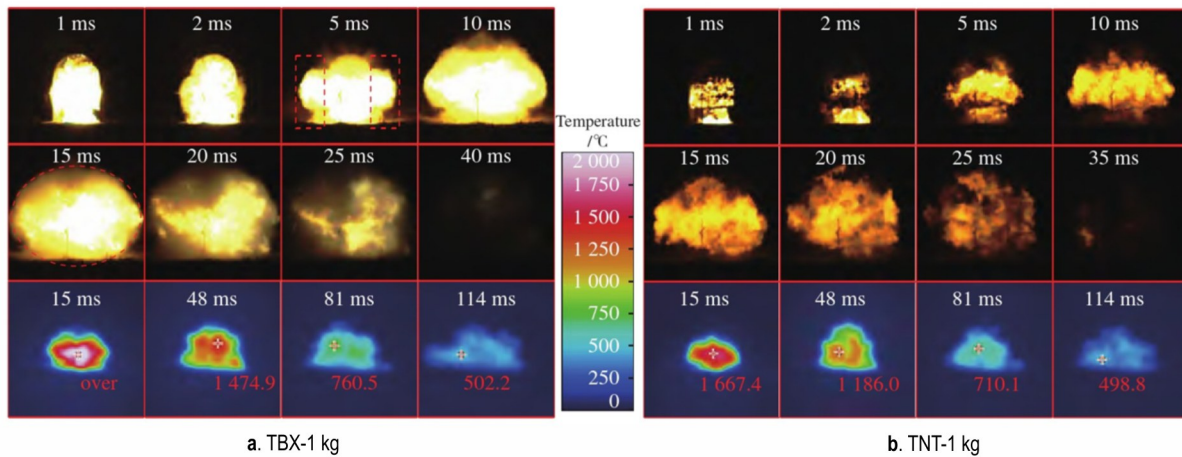


图 13 不同时刻高速相机拍摄火球辐射亮度(黑色背景)和红外相机拍摄火球温度(蓝色背景)<sup>[83]</sup>

Fig. 13 Fireball radiation brightness captured by high-speed camera (black background) and fireball temperature captured by infrared thermal camera (blue background) at different times<sup>[83]</sup>

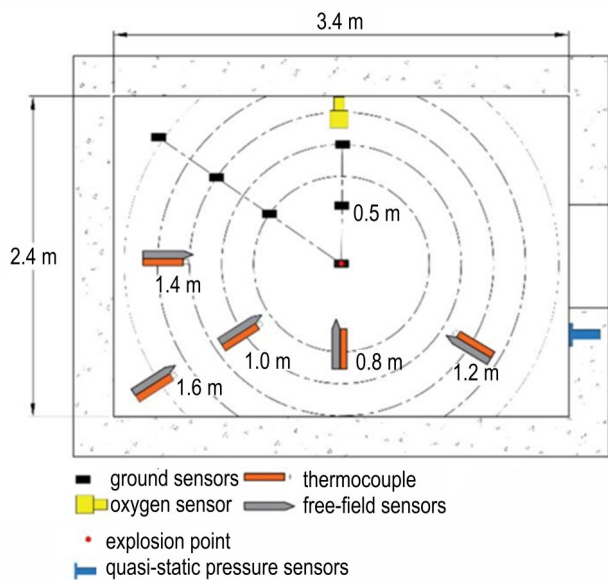


图 14 试验布置示意图<sup>[84]</sup>

Fig. 14 Schematic diagram of test arrangement<sup>[84]</sup>

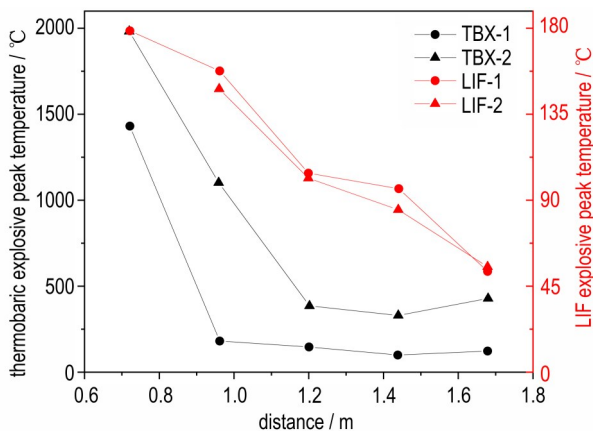


图 15 爆炸火球温度峰值对比<sup>[84]</sup>

Fig. 15 Comparison of peak temperature of explosion fireball<sup>[84]</sup>

研究结果显示在相同装药量的情况下,无论是在近场处还是在远场处,添加了铝粉的温压炸药爆炸火球温度峰值都远大于添加LiF的炸药配方,后燃效应的存在使得温度峰值提升了6.4~8.9倍。值得注意的是温压炸药配方在1.4 m及1.4 m以外均出现了温度回升,而添加LiF的炸药配方未出现此现象。分析认为此现象的原因是铝粉在复杂流场中会运动到房间边角处,同时火球也会扩散至相同位置,铝粉再次被置于燃烧环境中进行燃烧释能。

上述研究表明,由于铝粉后燃效应的存在,在高温环境条件下能够迅速燃烧并放出大量热量,这也就使得温压炸药爆炸产生的火球相较于普通单质炸药具有温度更高,火球半径更大,持续时间更长的特点,在温压炸药爆炸威力评估中,研究者们均肯定了铝粉对温压炸药爆炸热毁伤效应的作用。在温压炸药实际应用的场所诸如坑道、建筑等密闭约束空间条件下,火球会在扩张过程中与壁面约束相互作用,使未反应铝粉的燃烧环境得到加强,从而提高铝粉的反应完成度,这使得炸药在靠近边角区的位置仍能够形成一定热毁伤能力。

### 3.2 窒息效应

窒息效应是温压炸药的毁伤方式之一。这种毁伤方式常常作用于复杂多室结构,依赖于温压炸药爆炸第三阶段铝粉与空气中氧气的反应,造成局部缺氧或真空状态<sup>[85]</sup>。而由于有限空间缺少外部氧气的补充,因此其窒息效应会大大增强。同时,温压炸药在爆炸时还会生成大量CO、NO等有毒气体,会对生物造成窒息和毒气的双重伤害<sup>[86]</sup>。铝粉作为后燃反应阶段

消耗氧气的主要成分,后燃反应阶段的反应强度和持续时间也与窒息毁伤效应紧密相关。

胡岚等<sup>[87]</sup>对温压炸药爆炸过程中的 $O_2$ 浓度进行了测试,同时根据氧浓度曲线建立了缺氧窒息效应量化计算方法。以氧浓度值20%为缺氧效应的标志值,当温压炸药爆炸以后环境氧气浓度低于标志值时,则认为形成缺氧窒息效应。郑朝民等<sup>[88]</sup>在以上

研究的基础上通过对理论耗氧量、绝对耗氧量的计算比较了含30%铝粉的温压炸药和含有20%铝粉的PBX炸药的窒息毁伤效应。对爆炸所消耗的气体空间体积做了两种假设,分别为以爆心为球心的球形假设(spherical hypothesis)和破坏内墙后所贯通房间的体积的外围假设(peripheral hypothesis),如表7所示。

表7 PBX和温压炸药能量释放效率评估<sup>[87-88]</sup>

Table 7 The evaluation of energy releasing efficiency of PBX and thermobaric explosive<sup>[87-88]</sup>

samples	$Q_{TOC} / L \cdot kg^{-1}$	$Q_{EOC} / L \cdot kg^{-1}$		$\eta / \%$		$\bar{\eta} / \%$
		spherical hypothesis	peripheral hypothesis	spherical hypothesis	peripheral hypothesis	
PBX	319.89	216.89	192.25	60.1	67.8	64.0
Thermobaric explosive	436.34	321.15	311.10	73.6	71.3	72.5

Note:  $Q_{TOC}$  is theoretical oxygen consumption,  $Q_{EOC}$  is experimental absolute oxygen consumption,  $\eta$  is energy release efficiency calculated from oxygen consumption,  $\bar{\eta}$  is average energy release rate obtained from both assumption methods.

由表7可知,铝粉含量更高的温压炸药的窒息毁伤效应高于PBX炸药,在球形假设条件下温压炸药的绝对耗氧量为PBX的1.61倍,而在外围假设条件下,温压炸药的绝对耗氧量为PBX的1.48倍,在相同条件下温压炸药的单位质量耗氧量是PBX的1.55倍。

纪玉国等<sup>[83]</sup>在坑道口内对添加了30%铝粉的不同装药量的RDX基温压炸药和TNT炸药的耗氧量进行了对比测试,试验条件及传感器布置如图12所示;使用氧化锆电化学氧气传感器(简称氧传感器)对氧浓度进行测量。测试结果如图16所示。TBX-0.5 kg和TBX-1 kg爆炸后氧气浓度下降比较明显,TBX-1 kg爆炸后零氧状态持续了6.57 s,在36.25 s后恢复至18.1%。对比温压炸药TBX-1 kg和TNT-1 kg的耗氧量可以更明显看出温压炸药的耗氧优势,TNT的最低

氧浓度为15%,而温压炸药达到7%,氧消耗量为TNT的2.33倍。对于不同装药量的温压炸药耗氧能力而言,装药量越大铝粉的含量越大,铝粉消耗的氧气量也就越多,生成的气体产物更多,窒息效应越显著。

以上工作未将铝粉作为单一变量进行系统性研究,蒋欣利等<sup>[84]</sup>使用相同含量、相同类型装药但是将铝粉替换为相似物理性质的LiF,制备炸药试样在长方体建筑模型中进行了氧浓度变化试验,试验布置如图14所示,氧浓度测试采用氧化锆电化学氧传感器,放置在侧面墙中心。与文献[87]不同的是,此研究中将氧气浓度低于18%视为窒息毁伤效应的标志值,研究结果如图17所示。

比较相同装药量温压炸药和LiF炸药的氧浓度曲线,温压炸药爆炸后氧气浓度最低达到17.32%和

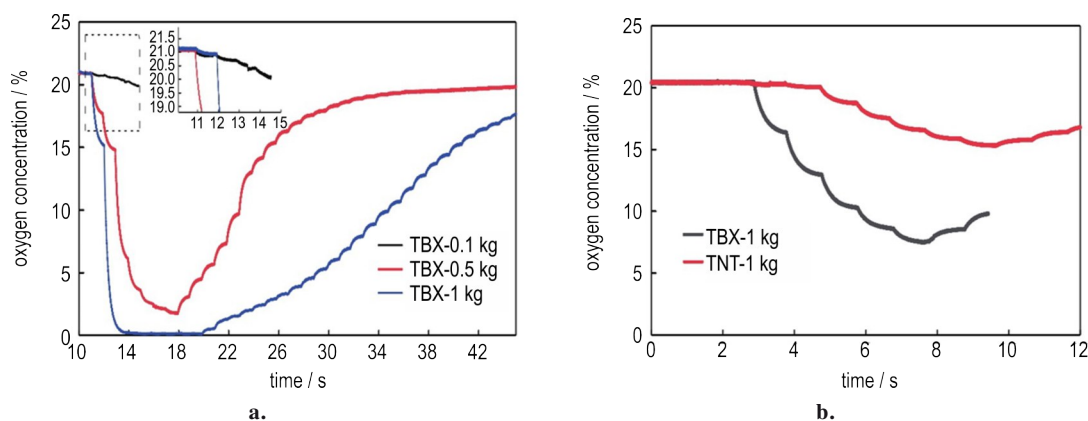


图16 (a)温压炸药坑道口A2截面氧浓度测试结果,(b)温压炸药与TNT坑道内A11截面氧浓度测试结果<sup>[83]</sup>

Fig.16 (a)Oxygen concentration of thermobaric explosive at section A2 near tunnel opening, (b)Oxygen concentration of thermobaric and TNT at section A11 in tunnel<sup>[83]</sup>

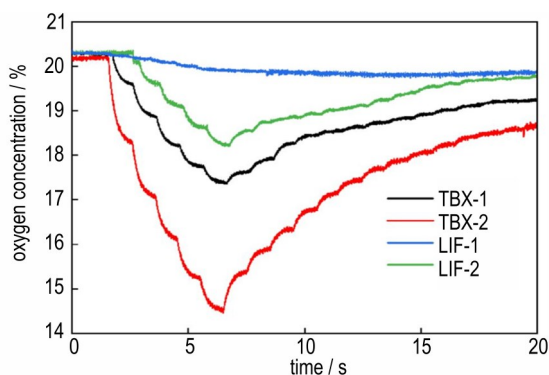


图 17 温压炸药与 LIF 炸药氧浓度变化曲线<sup>[84]</sup>

Fig.17 Variation curves of oxygen concentrations of thermo-baric explosive and LIF explosive<sup>[84]</sup>

14.45%，达到最低氧浓度的时间分别为 4.81 s 和 5.14 s，窒息毁伤效应（氧浓度低于 18%）的持续时间分别为 4.13 s 和 12.45 s，而 LiF 炸药爆炸的最低氧浓度分别为 19.73% 和 18.21%。对比而言，铝粉参与的后燃效应对氧气消耗的贡献更大，氧气消耗量分别增加了 2.41% 和 3.76%，是添加 LiF 炸药氧气消耗量的 2.3~2.8 倍，这与文献[83]研究结论相似。值得注意的是在此研究条件下，氧气消耗量并未达到文献[86]中的较低水平，原因可能是此试验条件下的长方体建筑并未完全密封，消耗掉的氧气由外界快速回填。

在后燃反应阶段，铝粉与氧气快速反应，造成局部缺氧或真空状态，在破片到达不了的密闭空间与热毁伤效应形成协同作用，以达到对生物杀伤的目的。综合以上研究，温压炸药中铝粉添加量为 30% 左右时耗氧量将是无铝粉炸药的 2.3 倍以上，同时在小型密闭空间中窒息毁伤持续时间也能达到 5 s 以上，毫无疑问铝粉在提升温压炸药窒息毁伤作用效果上是极为明显的。

#### 4 总结与展望

综合以上研究，铝粉对于温压炸药的爆炸能量、压力效应、热毁伤效应和窒息毁伤效应都有着重要影响，相关研究成果的总结与展望如下：

(1) 铝粉的反应速率和反应完成度决定了铝粉在“后燃反应”阶段的放热量，进而对温压炸药配方的能量输出结构产生影响。温压炸药爆炸能量随着铝粉含量的增多呈现先增加后减小的趋势，在铝粉含量为 30%~40% 时达到极值。除了铝粉含量外，铝粉粒径也是影响温压炸药爆炸能量的重要因素。研究表明，铝粉粒径为 5  $\mu\text{m}$  左右时，温压炸药的能量水平相对

较高。此外，将微纳米铝粉进行合理的颗粒级配也有助于进一步优化温压炸药的能量水平。

(2) 不同含量和粒径的铝粉对于冲击波的增强效果与爆炸能量类似，超压、准静态压力和冲量都随着铝粉含量的增多呈现先升高后降低的趋势，在铝粉含量为 30%~40% 时达到极值，而铝粉粒径则在 5  $\mu\text{m}$  左右时对冲击波的维持效果最好，对铝粉进行颗粒级配也有利于支持冲击波的传播。冲击波在有限空间中会发生反射汇聚，增强铝粉与空气的混合程度，提高铝粉的反应速率和反应完成度。

(3) 铝粉对于温压炸药爆炸产生的火球温度，火球持续时间和火球直径均有着增强作用，而密闭空间中温度场的测试结果表明，铝粉在密闭空间的边角处仍能保持反应状态，使温压炸药在远离爆心的位置仍能够保持热毁伤能力。

(4) 当铝粉含量为 30% 左右时，温压炸药的耗氧量约为同质量装药无铝粉炸药的 2.3 倍以上，能够保持较长时间的缺氧或真空状态，对生物造成窒息毁伤效果。

不可否认的是，目前关于铝粉对温压炸药爆炸能量、压力效应、热毁伤效应和窒息效应的影响效果和影响机理的研究仍然不够深入。为了更加明确铝粉对温压炸药的能量调控机理，在今后的研究中应重点关注以下几个方面：

(1) 重点关注铝粉在爆轰环境的反应动力学机制，建立铝粉在高温、高压、强对流环境中的燃烧模型及方程，通过燃烧方程建立铝粉粒径、环境温度、环境压力等变量与铝粉燃烧时间、燃烧速率的联系。

(2) 目前的测试手段受环境因素影响很大，在近爆点处采集数据存在一定难度。所以需要开发新型测试方法以对温压炸药的爆炸过程进行多尺度解析。

(3) 目前铝粉对温压炸药热效应和窒息毁伤效应影响的研究仅停留在有无铝粉这一变量，且研究手段较为单一。未来可采用数值模拟与试验相结合的方式，深入研究不同含量和粒径铝粉对温压炸药毁伤效果的影响效果和机理。

#### 参考文献：

- [1] 王靖岩, 王义智, 韩志伟. 铝-氟聚合物反应性物质制备及研究进展[J]. 含能材料, 2021, 29(1): 78-86.  
WANG Jing-yan, WANG Yi-zhi, HAN Zhi-wei. Preparation and research progress of aluminum-fluoropolymer reactive materials[J]. *Chinese Journal of Energetic Materials (Hanneng Cailiao)*, 2021, 29(1): 78-86.
- [2] 杭思羽. 铝粉/聚四氟乙烯复合材料制备及其性能研究[D]. 南

- 京:南京理工大学,2020.
- HANG Si-yu. Study on the Preparation and performance of aluminum/PTFE composite materials[D]. Nanjing: Nanjing University of Science and Technology, 2020.
- [3] 朴忠杰,张爱娥,罗宇,等. 铝粉粒度对奥克托今空爆温压炸药能量释放的影响[J]. 兵工学报, 2019, 40(6): 1190-1197.
- PIAO Zhong-jie, ZHANG Ai-e, LUO Yu, et al. Influence of aluminum powder on energy release of HMX-based air-blast thermobaric explosives[J]. *Acta Armamentarii*, 2019, 40(6): 1190-1197.
- [4] 刘勇,白海军,甘巧玉,等. 含能铝粉表面改性技术研究进展[J]. 含能材料, 2020, 28(10): 1017-1025.
- LIU Yong, BAI Hai-jun, GAN Qiao-yu, et al. Surface modification technologies of energetic aluminum powders: a Review [J]. *Chinese Journal of Energetic Materials(Hanneng Cailiao)*, 2020, 28(10): 1017-1025.
- [5] WANG Chuan-bin, QIN Mer, YI Zhuo-ran, et al. Oxidation mechanism of core-shell structured Al@PVDF powders synthesized by solvent/non-solvent method [J]. *Materials (Basel)*, 2022, 15 (9): 3036.
- [6] 徐爽,汪越,武卓,等. 铝粉含量对GAP钝感推进剂性能的影响[J]. 含能材料, 2021, 29(10): 928-936.
- XU Shuang, WANG Yue, WU Zhuo, et al. Influence of aluminum powder contents on insensitive GAP propellants [J]. *Chinese Journal of Energetic Materials(Hanneng Cailiao)*, 2021, 29(10): 928-936.
- [7] XIAO F,GAO W,LI J,et al.Effect of the aluminum particle size, solid content, and aluminum/oxygen ratio on the underwater explosion performance of aluminum-based explosives[J]. *Combustion Explosion and Shock Waves*,2020,56(5):576-584.
- [8] 吴威涛,高光发,韩志伟,等. 温压炸药爆炸冲击波传播规律及其后燃效应的理论与数值研究[J]. 南京理工大学学报, 2023, 47(4): 468-485.
- WU Wei-tao, GAO Guang-fa, HAN Zhi-wei, et al. Theoretical and numerical study on the propagation law of shock wave and post-combustion effect of thermobaric explosive [J]. *Journal of Nanjing University of Science and Technology*, 2023: 468-485.
- [9] 孙晓乐,刘平,彭继武,等. CL-20基压装型抗过载温压炸药制备工艺[J]. 兵工自动化, 2020, 39(3): 87-89.
- SUN Xiao-le, LIU Ping, PENG Ji-wu, et al. Preparation process of CL-20 base press-fit type overload temperature and pressure explosive [J]. *Ordnance Industry Automation*, 2020, 39(3): 87-89.
- [10] 毕伟程. 温压炸药爆炸及后燃效应的两相流模拟[D]. 长沙:国防科学技术大学, 2018.
- BI Wei-cheng. Two-Phase flow simulation of after-burning effect of thermobaric explosive[D]. Changsha: National University of Defense Technology, 2018.
- [11] 陈皓,李文彬,宋平,等. 典型复合温压炸药爆炸特性试验研究[J]. 哈尔滨工程大学学报, 2023, 44(10): 1841-1848.
- Chen Hao, LI Wen-bin, SONG Ping, et al. Test research on the detonation characteristics of typical composite thermobaric explosives [J]. *Journal of Harbin Engineering University*, 2023, 44(10): 1841-1848.
- [12] 杨慕天. 温压炸药爆炸热力学模型及爆轰参数计算[D]. 北京:北京理工大学, 2016.
- YANG Mu-tian. Explosion thermodynamic model and calculation of detonation parameters of thermobaric explosives [D]. Beijing: Beijing Institute of Technology, 2016.
- [13] 王晓峰,冯晓军. 温压炸药设计原则探讨[J]. 含能材料, 2016, 24(5): 418-420.
- WANG Xiao-feng, FENG Xiao-jun. Discussion on the design principle for thermobaric explosives [J]. *Chinese Journal of Energetic Materials(Hanneng Cailiao)*, 2016, 24(5): 418-420.
- [14] 刘正,聂建新,徐星,等. 密闭空间内六硝基六氮杂异伍兹烷基复合炸药能量释放特性[J]. 兵工学报, 2022, 43(3): 503-512.
- LIU Zheng, NIE Jian-xin, XU Xing, et al. Energy release characteristics of CL-20-based composite explosives in confined space [J]. *Acta Armamentarii*, 2022, 43(3): 503-512.
- [15] 徐其鹏,苏健军,李芝绒,等. 温压炸药爆炸性能实验与数值模拟[J]. 火工品, 2019 (05): 38-41.
- XU Qi-peng, SU Jian-jun, LI Zhi-rong, et al. Experimental and numerical simulation of explosion properties of thermobaric explosive [J]. *Initiators & Pyrotechnics*, 2019 (5): 38-41.
- [16] 许珂,李秀地,毛怀源,等. 坑道内温压炸药冲击波传播特性的试验研究[J]. 爆破, 2018, 35(3): 42-48.
- XU Ke, LI XIU-di, MAO Huai-yuan, et al. Experimental study on blast wave characteristic of thermobaric explosive inside tunnel [J]. *Blasting*, 2018, 35(3): 42-48.
- [17] 王明烨,韩志伟,李席,等. 铝粉粒径对温压炸药爆炸性能及热安定性的影响[J]. 高压物理学报, 2018, 32(3): 107-114.
- WANG Ming-ye, HAN Zhi-wei, LI Xi, et al. Influence of aluminum particle size on explosion performance and thermal stability of thermobaric explosive [J]. *Chinese Journal of High Pressure Physics*, 2018, 32(3): 107-114.
- [18] 初庆钊,付小龙,郑学明,等. HTPB/Al/AP/RDX推进剂初始燃烧的分子模拟[J]. 火炸药学报, 2024, 47(3): 254-261.
- CHU Qing-zhao, FU Xiao-long, ZHENG Xue-ming, et al. Molecular simulations of HTPB/Al/AP/RDX propellants combustion [J]. *Chinese Journal of Explosives & Propellants*, 2024, 47 (3): 254-261.
- [19] 万晓智. 新型含铝炸药爆轰特性及其在土壤中爆炸效应研究[D]. 合肥:中国科学技术大学, 2015.
- WAN Xiao-zhi. Detonation characteristics and explosion effects in soil of new aluminized explosives [D]. Hefei: University of Science and Technology of China, 2015.
- [20] 苗朝阳,李秀地,杨森,等. 温压弹爆炸效应与防护技术研究现状[J]. 兵器装备工程学报, 2016, 37(4): 155-159.
- MIAO Chao-yang, LI Xiu-di, YANG Sen, et al. Research status of explosion effect and protection technology of thermobaric bomb [J]. *Journal of Ordnance Equipment Engineering*, 2016, 37(4): 155-159.
- [21] 卢勇,王伯良,何中其,等. 温压炸药爆热输出的实验研究[J]. 含能材料, 2014, 22(5): 684-687.
- LU Yong, WANG Bo-liang, HE Zhong-qi, et al. Experimental research on energy output of thermobaric explosive [J]. *Chinese Journal of Energetic Materials(Hanneng Cailiao)*, 2014, 22(5): 684-687.
- [22] 李凤生,刘杰. 微纳米含能材料研究进展[J]. 含能材料, 2018, 26(12): 1061-1073.
- LI Feng-sheng, LIU Jie. Advances in micro-nano energetic materials [J]. *Chinese Journal of Energetic Materials (Hanneng Cailiao)*, 2018, 26(12): 1061-1073.
- [23] 王苏炜,肖磊,胡玉冰,等. 纳米单质含能材料制备及其应用现状[J]. 火炸药学报, 2021, 44(6): 705-734.
- WANG Su-wei, XIAO L, HU Yu-bing, et al. A review on the preparation and application of nano-energetic materials [J]. *Chinese Journal of Explosives & Propellants*, 2021, 44(6): 705-734.

- [24] 郭惠丽, 张为鹏, 黄亚峰, 等. 纳米铝粉在炸药中的应用研究进展及趋势[J]. 爆破, 2024, 41(1): 159-171.  
GUO Hui-li, ZHANG Wei-peng, HUANG Ya-feng, et al. Research progress and trend of application of nano-aluminum powder in explosives[J]. *Blasting*, 2024, 41(1): 159-171.
- [25] YANG K, CHEN L, LU J, et al. Reaction mechanism of aluminum nanoparticles in explosives under high temperature and high pressure by shock loading[J]. *Physical Chemistry Chemical Physics*, 2022, 24(23): 14552-14565.
- [26] NIU Jian-xin, KAN Run-zhe, JIAO Qing-jie, et al. Studies on aluminum powder combustion in detonation environment[J]. *Chinese Physics B*, 2022, 31(4): e202200351.
- [27] WANG Tian-yi, ZHOU Zheng-qing, PENG Jian-ping, et al. Influence of particle size on the breaking of aluminum particle shells[J]. *Chinese Physics B*, 2022, 31(7): 454-460.
- [28] 李世伟, 王正宏, 吴成成, 等. 铝粉含量对RDX基含铝炸药爆热性能的影响[J]. 爆破器材, 2022, 51(4): 29-32.  
LI Shi-wei, WANG Zheng-hong, WU Cheng-cheng, et al. Effect of aluminum content on detonation heat of RDX-based aluminized explosives[J]. *Explosive Materials*, 2022, 51(4): 29-32.
- [29] 谢馨远. 含铝炸药能量释放规律研究[D]. 绵阳: 中国工程物理研究院, 2018.  
XIE Xin-yuan. Study on the energy release pattern of aluminum-containing explosives[D]. Mianyang: China Academy of Engineering Physics, 2018.
- [30] 李媛媛, 王晓峰, 牛余雷, 等. 铝粉在不同爆炸环境中的反应率[J]. 科学技术与工程, 2020, 20(7): 2700-2704.  
LI Yuan-yuan, WANG Xiao-feng, NIU Yu-lei, et al. Reaction rate of Al powder in different explosion atmosphere [J]. *Sci Technol Eng*, 2020, 20(7): 2700-2704.
- [31] 段晓瑜. 含铝炸药空气中爆炸冲击波特性研究[D]. 北京: 北京理工大学, 2017.  
DUAN Xiao-yu. Study on the properties of shock wave from aluminized explosives blast in air[D]. Beijing: Beijing Institute of Technology, 2017.
- [32] 李星翰. 高能炸药冲击起爆“热点”模型和含铝炸药爆轰性能研究[D]. 绵阳: 中国工程物理研究院, 2018.  
LI Xing-han. Study on the “hot spot” model of impact detonation of high-energy explosives and the detonation performance of aluminum-containing explosives [D]. Mianyang: China Academy of Engineering Physics, 2018.
- [33] 韩早. 温压炸药能量参数计算与释能规律研究[D]. 南京: 南京理工大学, 2016.  
HAN Zao. The calculation of thermal parameters and the characterization of energy release in thermobaric explosions [D]. Nanjing: Nanjing University of Science and Technology, 2016.
- [34] 王兴龙. 温压炸药爆炸释能及铝粉反应完全性研究[D]. 南京: 南京理工大学, 2015.  
WANG Xing-long. Research on the regularity of thermobaric explosive energy release and the completeness of aluminum reaction [D]. Nanjing: Nanjing University of Science and Technology, 2015.
- [35] 王红星, 王浩, 蒋芳芳, 等. 铝粉含量对温压炸药性能的影响[J]. 火工品, 2013 (6): 32-35.  
WANG Hong-xing, WANG Hao, JIANG Fang-fang, et al. Effect of aluminum content on the performance of thermobaric explosive[J]. *Initiators & Pyrotechnics*, 2013 (6): 32-35.
- [36] 田少康. 温压炸药铝粉释能规律研究[D]. 南京: 南京理工大学, 2017.  
TIAN Shao-kang. Research on the regularity of thermobaric explosives with aluminum energy release [D]. Nanjing: Nanjing University of Science and Technology, 2017.
- [37] COOK M A, FILLER A S, KEYES R T, et al. Aluminized explosives [J]. *The Journal of Physical Chemistry*, 1957, 61 (2): 189-196.
- [38] 胡樱馨. 纳米铝粉对奥克托今粉尘爆炸性能的影响研究[D]. 太原: 中北大学, 2016.  
HU Ying-xin. Influence of nano-aluminum powders on HMX's explosive performance [D]. Taiyuan: North University of China, 2016.
- [39] FANG C, LI S. Experimental research of the effects of superfine aluminum powders on the combustion characteristics of NEPE propellants [J]. *Propellants, Explosives, Pyrotechnics*, 2002, 27(1): 34-38.
- [40] OVERDEEP K R, RIDGE C J, XIN Y, et al. Oxidation of aluminum particles from 1 to 10 nm in diameter: The transition from clusters to nanoparticles [J]. *Journal of Physical Chemistry C*, 2019, 123(38): 23721-23731.
- [41] JIN X, LI S, YANG Y, et al. Comparison on laser ignition and combustion characteristics of nano- and micron-sized aluminum [J]. *Combustion Science and Technology*, 2021, 193 (2): 341-353.
- [42] 王苏炜, 肖磊, 胡玉冰, 等. 纳米单质含能材料制备及其应用现状[J]. 火炸药学报, 2021, 44(6): 705-734.  
WANG Su-wei, XIAO Lei, HU Yu-bing, et al. A Review on the preparation and application of nano-energetic materials [J]. *Chinese Journal of Explosives & Propellants*, 2021, 44 (6): 705-734.
- [43] LI Qing-zhao, ZHANG Gui-yun, ZHENG Yuan-nan, et al. Investigation on the correlations between thermal behaviors and explosion severity of aluminum dust/air mixtures [J]. *Powder Technology*, 2019, 355: 582-592.
- [44] ROZENBAND V, AFANAS' EVA L, LEBEDEVA V, et al. Activation of ignition of aluminum and its mixtures with oxides by chromium chloride [J]. *Combustion, Explosion and Shock Waves*, 1990, 26(5): 506-508.
- [45] 吴星亮. 含复合储氢材料混合炸药能量输出特性及影响机理研究[D]. 南京: 南京理工大学, 2022.  
WU Xing-liang. Research on energy output characteristics and influence mechanism of mixed explosives containing composite hydrogen storage material [D]. Nanjing: Nanjing University of Science and Technology, 2022.
- [46] HUANG Y, RISHA G A, YANG V, et al. Effect of particle size on combustion of aluminum particle dust in air [J]. *Combustion and Flame*, 2009, 156(1): 5-13.
- [47] NURDIANSYAH H, A M, RIDHA F. Aluminum combustion under different condition: A review [J]. *Journal of Energy Mechanical Material and Manufacturing Engineering*, 2020, 5 (2): 1-8.
- [48] LI Qing-zhao, Wang K, ZHENG Yuan-nan, et al. Explosion severity of micro-sized aluminum dust and its flame propagation properties in 20 L spherical vessel [J]. *Powder Technology*, 2016, 301: 1299-1308.
- [49] 于小哲. 氢气/铝粉混合体系爆炸特性及火焰传播机理研究[D]. 大连: 大连理工大学, 2020.  
YU Xiao-zhe. Explosion characteristics and flame propagation mechanism of hydrogen/aluminum dust hybrid mixtures [D]. Dalian: Dalian University of Technology, 2020.

- [50] 李根. 温压炸药后燃反应实验和数值模拟研究[D]. 长沙: 国防科技大学, 2021.  
LI Gen. Experimental and numerical researches on the after-burning of thermobaric explosives [D]. Changsha: National University of Defense Technology, 2021.
- [51] STIEL L I, BAKER E L, CAPELLOS C. Jaguar analyses of experimental detonation values for aluminized explosives [C]//13th Conference of the American-Physical-Society-Topical-Group on Shock Compression of Condensed Matter. 2003: 891-894.
- [52] BAKER E L, STIEL L, BALAS W, et al. Combined effects aluminized explosives modeling and development [J]. *International Journal of Energetic Materials and Chemical Propulsion*, 2015, 14(4): 283-93.
- [53] KICINSKI W, TRZCINSKI W A. Calorimetry studies of explosion heat of non-dial explosives [J]. *Journal of Thermal Analysis and Calorimetry*, 2009, 96(2): 623-630.
- [54] 冯晓军, 王晓峰, 李媛媛, 等. 铝粉粒度和爆炸环境对含铝炸药爆热的影响 [J]. 火炸药学报, 2013, 36(6): 24-27.  
FENG Xiao-jun, WANG Xiao-feng, LI Yuan-yuan, et al. Effect of aluminum particle size and explosion atmosphere on the energy of explosion of aluminized explosive [J]. *Chinese Journal of Explosives & Propellants*, 2013, 36(6): 24-27.
- [55] JIANG Fan, WANG Xiao-feng, HUANG Ya-feng, et al. Effect of particle gradation of aluminum on the explosion field pressure and temperature of RDX-based explosives in vacuum and air atmosphere [J]. *Defence Technology*, 2019, 15(6): 844-852.
- [56] 王淑萍, 封雪松, 姚李娜, 等. 纳米铝粉对黑索今基炸药爆热的影响 [J]. 火工品, 2014(01): 21-24.  
WANG Shu-ping, FENG Xiao-song, YAO Li-na, et al. The influence of nanometer aluminum on the explosion heat of RDX-based explosive [J]. *Initiators & Pyrotechnics*, 2014(1): 21-24.
- [57] FELDGUN V R, KARINSKI Y S, EDRI I, et al. Prediction of quasi-static pressure in confined and partially confined explosions and its application to blast response simulation of flexible structures [J]. *International Journal of Impact Engineering*, 2016, 90: 46-60.
- [58] JIANG Ning, YAO Wen-jin, LI Wen-bin, et al. Dynamic multi-projectile attack and killing effects of detonation warheads [J]. *Shock and Vibration*, 2022(1): 1701416.
- [59] 陈坤, 肖伟, 韩志伟, 等. 铝粉粒径对 HMX 基温压炸药在密闭空间爆炸参数的影响 [J]. 火炸药学报, 2020, 43(3): 298-302.  
CHEN Kun, XIAO Wei, HAN Zhi-wei, et al. Effect of aluminum particle size on the explosion parameters of HMX-based thermobaric explosives in confined space [J]. *Chinese Journal of Explosives & Propellants*, 2020, 43(3): 298-302.
- [60] TAKAYAMA K, BEN-DOR G. State-of-the-art in research on mach reflection of shock waves [J]. *Sadhana*, 1993, 18(3-4): 695-710.
- [61] IVANOV M S, VANDROMME D, FOMIN V M, et al. Transition between regular and mach reflection of shock waves: new numerical and experimental results [J]. *Shock Waves*, 2001, 11(3): 199-207.
- [62] 李席, 王伯良, 韩早, 等. 温压炸药密闭空间能量输出特性研究 [C]//中国科学技术协会, 云南省人民政府. 第十六届中国科协年会——分9 含能材料及绿色民爆产业发展论坛论文集. 南京理工大学化工学院, 2014:6.
- [63] 王明焯. 有限空间内温压炸药释能规律研究[D]. 南京: 南京理工大学, 2018.  
WANG Ming-ye. Research on the characterization of energy release of thermobaric explosives in confined space [D]. Nanjing: Nanjing University of Science and Technology, 2018.
- [64] 封雪松, 冯晓军, 赵娟, 等. 铝粉含量和粒度对 HMX 基炸药空爆性能的影响 [J]. 爆破器材, 2018, 47(4): 10-15.  
FENG Xue-song, FENG Xiao-jun, ZHAO Juan, et al. Effect of content and particle size of aluminum powder on the air blast property of HMX-based explosive [J]. *Explosive Materials*, 2018, 47(4): 10-15.
- [65] 金朋刚, 郭炜, 王建灵, 等. 不同粒度铝粉在 HMX 基炸药中的能量释放特性 [J]. 含能材料, 2015, 23(10): 989-993.  
JIN Peng-gang, GUO W, WANG Jian-ling, et al. Energy releasing characteristics of aluminum powder in HMX-based explosives [J]. *Chinese Journal of Energetic Materials (Hanneng Cailiao)*, 2015, 23(10): 989-993.
- [66] 任新联, 王辉, 徐司雨, 等. 铝粉粒度对 RDX 基含铝炸药水中爆炸近场特性的影响 [J]. 爆破器材, 2015(6): 29-33.  
REN Xin-lian, WANG Hui, XU Si-yu, et al. The effect of aluminum particle size on the characteristic of RDX based aluminized explosives underwater close-filed explosion [J]. *Explosive Materials*, 2015(6): 29-33.
- [67] ZHOU Zheng-qing, CHEN Jian-guo, YUAN Hong-yong, et al. Effects of aluminum particle size on the detonation pressure of TNT/Al [J]. *Propellants Explosives Pyrotechnics*, 2017, 42(12): 1401-1409.
- [68] 王伯良, 李亚宁, 韩志伟. 温压炸药发展趋势的几点思考 [J]. 火炸药学报, 2023, 46(11): 935-936.  
WANG Bo-liang, LI Ya-ning, HAN Zhi-wei. Some thoughts on the development trend of thermobaric explosives [J]. *Chinese Journal of Explosives & Propellants*, 2023, 46(11): 935-936.
- [69] 张学瑞, 周涛. 密闭空间中复合装药的能量释放特性 [J]. 爆炸与冲击, 2024, 44(6): 41-49.  
ZHANG Xue-rui, ZHOU Tao. Energy release characteristics of composite charge in confined space [J]. *Explosion And Shock Waves*, 2024, 44(6): 41-49.
- [70] 吕振哲, 闫群, 刘瀚. 排爆服对冲击波和破片联合毁伤效应的防护性能试验研究 [J]. 中国安全防范技术与应用, 2024(01): 37-44.  
LV Zhen-zhe, YAN Qun, LIU Han. Experimental study on the protective performance of detonation suit against the combined destructive effects of shock wave and fragmentation [J]. *China Security Protection Technology and Application*, 2024(01): 37-44.
- [71] 胡亚峰, 张海林, 陈战旗, 等. 杀爆战斗部破碎形态及破片飞散特性数值模拟研究 [J]. 兵器装备工程学报, 2024, 45(5): 72-78.  
HU Ya-feng, ZHANG Hai-lin, CHEN Zhan-qi, et al. Numerical simulation research on warhead fragmentation shape and fragments scattering characteristics [J]. *Journal of Ordnance Equipment Engineering*, 2024, 45(5): 72-78.
- [72] 马旭静, 孙鹏, 张骏虎, 等. 温压炸药爆炸瞬态高温测试技术研究 [J]. 计算机测量与控制, 2024, 32(3): 204-210+217.  
MA Xu-jing, SUN Peng, ZHANG Jun-hu, et al. Research on transient high temperature testing technology for explosion of thermostatic explosives [J]. *Computer Measurement & Control*, 2024, 32(3): 204-210+217.
- [73] 李越, 李兵仓. 云爆弹/温压弹的杀伤因素及杀伤特点的研究进展 [J]. 创伤外科杂志, 2022, 24(1): 18-22.  
LI Yue, LI Bing-cang. Research progress on killing factors and

- wound characteristics for human body of FAE/TB[J]. *Journal of Traumatic Surgery*, 2022, 24(1): 18–22.
- [74] 王闯, 李亚宁, 李建, 等. 装药量对温压炸药爆炸毁伤威力的影响[J]. *爆破器材*, 2023, 52(4): 37–43.
- WANG Chuang, LI Ya-ning, LI Jian, et al. The influence of charge quantity on the explosion damage power of thermobaric explosives[J]. *Explosive Materials*, 2023, 52(4): 37–43.
- [75] 高旭东, 郭敏, 孙韬, 等. 炮射温压弹对人员目标的毁伤效能研究[J]. *弹箭与制导学报*, 2011, 31(3): 123–125.
- GAO Xu-dong, GUO Min, SUN Tao, et al. The damage efficiency research on cannon thermobaric ammunition to personnel target [J]. *Journal of Projectiles, Rockets, Missiles and Guidance*, 2011, 31(3): 123–125.
- [76] 范彩玲. 温压弹爆炸热毁伤效应研究[D]. 太原: 中北大学, 2022.
- FAN Cai-ling. Research on thermal damage effect of thermobaric Bomb explosive[D]. Taiyuan: North University of China, 2022.
- [77] 李秀地, 方浩, 耿振刚, 等. 温压炸药冲击波在L形坑道内的传播规律与衰减优化研究[J]. *防护工程*, 2017, 39(3): 33–38.
- LI Xiu-di, FANG Hao, GENG Zhen-gang, et al. Propagation and attenuation of airblast from thermobaric explosive inside L-shaped tunnel[J]. *Protective Engineering*, 2017, 39(3): 33–38.
- [78] 阚金玲, 刘家聪, 曾秀琳, 等. 温压炸药爆炸火球的特征[J]. *火炸药学报*, 2007 (02): 55–58.
- KAN Jin-ling, LIU Jia-cong, ZENG Xiu-lin, et al. Fireball characteristics of a thermal-baric explosive[J]. *Chinese Journal of Explosives & Propellants*, 2007, 30(2): 55–58.
- [79] JIAO X, XU Y, ZHOU T, et al. Enhancement of explosive effect of thermobaric explosive by metal reactive material[J]. *Propellants Explosives Pyrotechnics*, 2023, 48(8): e202200351.
- [80] ZHAO Yun-fei, LI Ya-ning, Han Zhi-wei, et al. Effects of main components on energy output characteristics of thermobaric explosive — A case study of typical formulations[J]. *Defence Technology*, 2024, 38: 205–216.
- [81] 闫潇敏, 苏健军, 李芝绒, 等. 坑道内温压炸药的爆炸热效应研究[J]. *火工品*, 2015 (01): 22–25.
- YAN Xiao-min, SU Jian-jun, LI Zhi-rong, et al. Experimental study on explosive thermal effect of thermal-baric explosives in tunnel[J]. *Initiators & Pyrotechnics*, 2015 (01): 22–25.
- [82] XU Wen-long, WANG Cheng, YUAN Jian-ming, et al. Investigation on energy output structure of explosives near-ground explosion[J]. *Defence Technology*, 2020, 16(2): 290–298.
- [83] 纪玉国, 张国凯, 李干, 等. 坑道内爆炸条件下温压炸药的爆炸特性及其影响因素[J]. *爆炸与冲击*, 2024, 44(3): 118–132.
- Ji Yu-guo, ZHANG Guo-kai, LI Gan, et al. Explosion characteristics of thermobaric explosive (TBX) detonated inside a tunnel and the related influential factors [J]. *Explosion and Shock Waves*, 2024, 44(3): 118–132.
- [84] 蒋欣利, 张国凯, 何勇, 等. 密闭建筑温压炸药内爆炸后燃效应[J]. *兵工学报*, 2024, 45(8): 2520–2530.
- Jiang Xin-li, ZHANG Guo-kai, HE Yong, et al. Afterburning effect of thermobaric explosives in confined space[J]. *Acta Armamentarii*, 2024, 45(8): 2520–2530.
- [85] KLAPÖETKE T M, CUDZILO S, TRZCINSKI W A, et al. Performance of TKX-50 in thermobaric explosives[J]. *Propellants Explosives Pyrotechnics*, 2023, 48(6): e202300010.
- [86] 邓金榜. 四种温压炸药综合毁伤效应研究[D]. 南京: 南京理工大学, 2013.
- DENG Jin-bang. Study of the damage effects of four thermobaric explosives[D]. Nanjing: Nanjing University of Science and Technology, 2016.
- [87] 胡岚, 刘红妮, 任春燕, 等. 某温压弹爆轰气体靶场测试技术[J]. *含能材料*, 2010, 18(2): 196–199.
- HU Lan, LIU Hong-ni, REN Chun-yan, et al. Target determination technology on detonation gaseous products of a thermo-baric Warhead[J]. *Chinese Journal of Energetic Materials (Hanneng Cailiao)*, 2010, 18(2): 196–199.
- [88] 郑朝民, 严蕊, 刘志伟, 等. 温压炸药耗氧效应的实验研究[J]. *火炸药学报*, 2014, 37(5): 33–36.
- ZHENG Chao-min, YAN Rui, LIU Zhi-wei, et al. Experimental study on oxygen consumption effect of thermobaric explosives[J]. *Chinese Journal of Explosives & Propellants*, 2014, 37(5): 33–36.

## Research Progress on the Influence of Aluminum Powder on the Typical Blast Damage Elements of Thermobaric Explosives

LIU Wei, WANG Jing-yan, HAN Zhi-wei

(School of Safety Science and Engineering, Nanjing University of Science and Technology, Nanjing 210094, China)

**Abstract:** The content and particle size of aluminum powder in thermobaric explosives (TBXs) directly influence the energy output structure of explosions, significantly affecting the characteristic “post-combustion effect” of TBXs, which is crucial to the formation of the “thermobaric effect.” This paper discusses the influence of aluminum powder content and particle size on the explosive energy, pressure effect, thermal damage effect, and asphyxiation effect of TBXs. It also analyzes the mechanism by which aluminum influences the post-combustion reaction, identifying the optimal content and particle size range for aluminum addition in TBXs. Looking ahead, future research should focus on the reaction kinetics of energy release from aluminum powder, develop corresponding testing methods, and thoroughly analyze the energy release process of TBXs, providing a foundation for the precise control of formulation design and energy output structure.

**Key words:** aluminum powder; thermobaric explosive; explosion energy; pressure effect; thermal damage effect; asphyxiation effect

**CLC number:** TJ55; TQ564

**Document code:** A

**DOI:** 10.11943/CJEM2024143

(责编: 高毅)