

弹药防殉爆包装技术研究进展

高方方，杨豪杰，陈尔余

(武警士官学校，杭州 310000)

摘要：目的 研究防殉爆相关领域内性能优异的复合材料，以求推动防殉爆包装技术的发展，更好地满足未来战争的需求。**方法** 从对比国内外弹药包装的研究进展出发，着重介绍防殉爆包装技术原理及应用实例，并介绍相关领域内性能优异的复合材料，为弹药防殉爆包装提供参考。**结果** 防殉爆包装的主要原理包括隔爆、泄爆、抗震和缓冲等，因此需要加强对防殉爆包装材料的阻燃性能、包装设计和抗冲击性等方面的研究。**结论** 阻燃防爆材料和防弹抗爆材料的性能均十分优异，尤其是由聚合物制成的复合材料和由石墨烯增强的纤维复合材料，它将在弹药防殉爆包装领域具有十分广阔的应用前景。

关键词：弹药包装；防殉爆技术；复合材料

中图分类号：TB484 文献标识码：A 文章编号：1001-3563(2022)13-0151-07

DOI：10.19554/j.cnki.1001-3563.2022.13.019

Research Progress of Anti-sympathetic Detonation Packaging of Ammunition

GAO Fang-fang, YANG Hao-jie, CHEN Er-yu

(NCO, Academy of PAP, Hangzhou 310000, China)

ABSTRACT: The work aims to study composite materials with excellent performance in fields related to anti-sympathetic detonation, in order to promote the development of anti-sympathetic detonation packaging technology, and better meet the needs of future wars. From the comparison of the research progress of ammunition packaging at home and abroad, the principle and application examples of anti-sympathetic detonation packaging technology were introduced emphatically, and the composite materials with excellent performance in related fields were presented to provide references for anti-sympathetic detonation packaging. Main principles of anti-sympathetic detonation packaging included explosion prevention, explosion venting, shock resistance and cushioning, etc. Therefore, it was necessary to strengthen the research on the flame retardancy, packaging design and impact resistance of anti-sympathetic detonation packaging materials. Both flame-retardant explosion-proof materials and bullet-proof explosion-proof materials have excellent performance, especially composite materials made of polymers and fiber composite materials reinforced by graphene, which are believed to have very broad application prospects in the field of anti-sympathetic detonation packaging.

KEY WORDS: ammunition packaging; anti-sympathetic detonation technology; composite materials

军用物资包装是指用于军事目的并符合要求的物资包装，其特点主要：需满足部队快速反应的要求，需满足在恶劣环境中的储存和使用要求^[1]。弹药作为消耗最多的军用物资之一，担负着摧毁军事目标和歼灭敌方有生力量的任务，在战争中发挥着不可替代的作用。在生产到使用的整个周期中，弹药大部分时间

都处于储存状态中，弹药包装作为弹药的防护体，其可靠性直接决定了弹药的安全性^[2]，因此，弹药包装的作用至关重要，不仅要强度高、密封性好，而且应便于运输和使用等。另外，随着作战环境越来越复杂，对弹药包装的要求亦越来越高，包装还应具备防电磁、防生化和防殉爆等功能^[3-5]。

近年来,我国的弹药包装研究领域主要集中在结构优化、集装设计和防护设计等3个方面。在防护设计方面,弹药的防殉爆设计逐渐引起了大家的重视^[6]。其实早在20世纪,国外就开展了防殉爆设计相关试验^[7-8],然而,我国的弹药包装技术(尤其防殉爆领域)发展较为落后,且缺乏系统研究^[9]。经过近几十年的发展,我国弹药包装防护方法、包装用材也有很大的改变和发展,当前弹药包装多选用工程塑料、纤维增强复合材料等。这些聚合物和纤维等复合材料^[10-11]在阻燃和防弹领域性能表现十分优异,将这些复合材料应用于弹药包装,必将有助于提高弹药包装的防殉爆性能,因此,文中从对比国内外弹药包装研究进展出发,着重介绍防殉爆包装技术原理和应用实例,并介绍近年来有关防殉爆设计相关材料的研究进展,以求推动弹药防殉爆包装技术的进步和发展。

1 国内外弹药包装研究进展

我军的弹药包装历经木箱包装、铁皮包装、集装笼式包装和工程塑料包装等发展阶段。在弹药包装的材料使用上,相较于金属包装,工程塑料具有质量轻、强度高和环境适应性强等特点,但其透湿性、透氧性和防滑性仍需进一步地改善,以满足在运输和储存方面的要求^[12]。有关研究单位研发制成的工程塑料弹药包装箱有:PVC塑料弹药包装箱、聚乙烯塑料弹药包装筒和聚丙烯塑料弹药包装筒等^[13-15]。随着包装要求的提高,玻璃钢材料被研究者们用来制作弹药包装箱,如采用玻璃钢材料设计的新型航空炸弹密封包装箱^[16]。除此以外,研究者们还设计出了一些具有特殊功能的弹药包装箱。如利用导电布等复合材料制成的电磁屏蔽包装箱^[17],以及利用塑木复合材料制成的环保型包装^[18]等。我军在弹药包装的研究发展中也存在着一些问题,如:某些弹药包装需具有防静电要求,而目前的包装技术还无法满足;我军在弹药包装的通用化、系列化、标准化的起步较晚,未形成完善的标准体系。

相较于国内,国外更早地意识到了弹药包装的重要性,因此,国外的研发系统更为完整且全面,尤其是美国。国外的弹药包装材料经历了从木箱、金属箱到非金属箱的发展,从20世纪80年代开始,国外就已经开始对工程塑料包装箱进行研究,到1999年工程塑料使用比例也逐渐升高至65%左右^[19]。国外军队在新型弹药包装材料的研究上不断进行探索:通过采用铝塑复合膜内包装、涂覆防水涂料来提高防水、防潮性能^[20];在弹药筒材料上采用聚酰胺(环氧)玻璃纤维增强塑料来提高抗冲击性、抗老化性和高低温适应性^[21];在封存炮弹的可剥性塑料中添加增塑剂、缓蚀剂、矿物油等提高其防锈效果^[22]。国外军队在弹药包装的设计技术上,研制了由筒体和弹性材料密封环组成弹药塑料筒,能够对弹药起到保护效果;

研制了棉布袋散装火药的塑料筒,具有优良的强度和抗静电性能。在弹药包装的包装实验方面,美军已形成了一整套规范化、系统化的军用包装标准体系和弹药包装试验体系,并且这些标准都有大量支持性文件。随着高新技术武器的发展,美军将会在智能型包装、抗电磁包装、防辐射包装和防殉爆包装等方面进一步发展。结合国内外弹药包装的发展趋势,防殉爆包装必将是未来弹药包装领域内的一个重要研究方向。

2 防殉爆技术

殉爆是指某处的炸药爆炸引起一定范围内的另一处炸药爆炸的现象。影响殉爆的主要因素有爆炸时产生的冲击波、介质、爆轰产物、温度、时间和感度等^[23]。在通常情况下,一般采用数值模拟分析^[24]和殉爆试验来评估弹药的殉爆危险性^[25-26]。

包装箱内的弹药一般较为密集,若主发弹药在包装箱内,考虑到距离近、空间小和冲击波压强大等因素^[27-28],实现其他弹药的防殉爆保护比较困难,因此,在相邻弹药之间设置有效的阻隔介质,避免或者减弱对其他弹药的冲击作用,才有可能实现防殉爆的目的。为了应对主发弹药爆炸产生的冲击波、爆轰产物(破片)和高温^[29],阻隔介质理应具备3个方面的功能:吸收冲击波能量、防破片打击和隔热。经常用作阻隔介质的材料有木材、泡沫、金属及复合材料等^[30-31]。另外,在包装上设计一些泄压通道,当主发弹药在包装箱内部发生爆炸时,使爆炸能量沿泄压通道迅速排出,亦可降低其他弹药发生殉爆的概率,如某型号火箭弹防殉爆包装箱(见图1)^[32]。

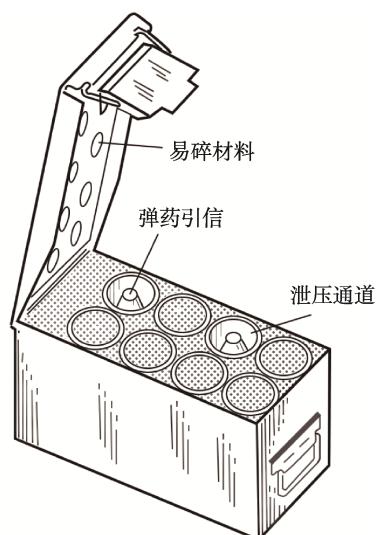


图1 某型号火箭弹防殉爆包装箱
Fig.1 Anti-sympathetic detonation packaging container for a certain type of rocket

若主发弹药处于包装箱外部,则要求包装箱应具

有良好的抗爆能力, 即应能抵御爆炸产生的冲击波的破坏和应能抵御破片(或子弹)的穿透^[33]。另外, 为了防止弹药受到跌落或者撞击而发生殉爆, 包装箱还应采用高吸能的减震材料, 用以吸收受到冲击的能量。例如某空运型钝感弹药防殉爆包装箱(见图 2)^[34], 该包装箱由钢制外壳和蜂窝状吸能材料组成, 具有良好的抗爆和减震效果。

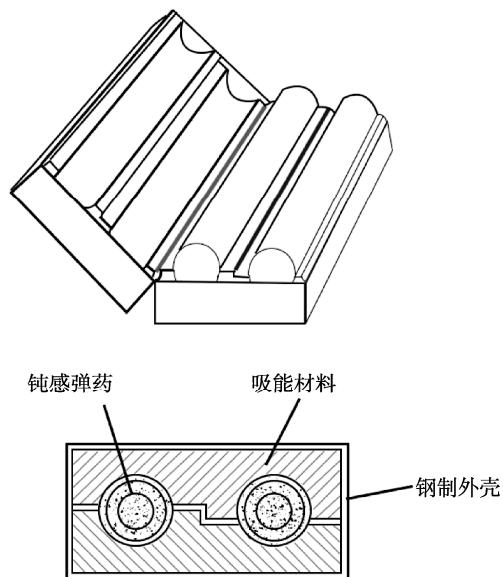


图 2 某空运型钝感弹药防殉爆包装箱

Fig.2 Anti-sympathetic detonation packaging container for a certain air transport type insensitive ammunition

3 防殉爆包装材料

针对以上所述的隔爆和抗爆的原理, 在弹药的防殉爆包装材料大致可以分为 2 类: 阻燃防冲击抗爆材料和防击穿抗爆材料。

3.1 阻燃防冲击抗爆材料

目前, 在弹药包装领域使用的材料主要有: 金属、塑料、玻璃钢及复合材料等, 由这些材料组成的包装可以保障弹药基本的安全, 但由于这些包装在设计之初大多没有考虑防殉爆的需求, 所以不具备防殉爆功能。弹药爆炸会产生冲击波、爆轰产物和高温, 所以在设计具备防殉爆功能的弹药包装箱时必需用到阻燃防爆材料。阻燃防爆材料能快速传递热量, 阻止火焰传播, 从而防止殉爆事故, 其基本原理^[35]是用蜂窝结构的多孔材料填充包装箱, 将包装箱分成狭窄的腔体, 该多孔材料具有熄灭火焰和衰减冲击波的作用, 因此它可以抑制火焰的快速蔓延和能量的瞬时释放, 从而达到防殉爆的目的。阻燃隔热材料主要分为金属和非金属 2 类。

蜂窝结构的金属铝以其高比强度、高比刚度和良好的吸能能力被广泛应用于防爆领域^[36-37]。宋洪

锁等^[38]发明一种阻燃防爆弹药箱(见图 3), 该弹药箱由轻质抗冲击滚塑外壳和发泡铝防爆内壳组成, 并且内外壳之间加装多层隔热层, 从而使弹药箱具有良好的隔热、防爆和防破片能力。发泡铝是一种在铝合金基体(或铝)中均匀分布大量孔洞的新型多功能材料, 其导热率仅为纯铝的 1/5~1/500, 并且吸能能力高达 490~3 430 kJ/m³, 在 1 400 °C 的条件下也不发生熔解, 同时可降低 80%以上的高频电磁波干扰, 是一种优秀的弹药包装材料。Li 等^[39]基于生物学灵感, 使用铝材料设计了一种新型的防爆仿生层状蜂窝结构, 主要由牺牲层和承载层组成。数值模拟和实验结果吻合, 结果表明, 在爆炸载荷作用下, 牺牲层呈层状交错排列, 可以吸收大量能量, 表现出良好的综合性能, 具有承受多重爆炸载荷的能力。Nie 等^[40]通过理论分析和实验研究得出结论, 泡沫陶瓷既可以抑制火焰的蔓延, 又能明显衰减冲击波, 该材料将成为新一代防爆手段。

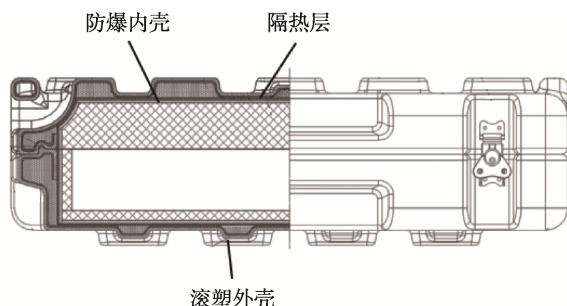


图 3 阻燃防爆弹药箱

Fig.3 Flame-retardant explosion-proof ammunition packaging container

虽然金属材料的性能十分良好, 但出于轻量化的考量, 一些研究人员对非金属材料展开了研究。邢志祥等^[41]研究了由聚丙烯制成的新型多孔材料的阻燃抑爆性能, 其性能优于传统的金属材料。鲁长波等^[42]对自制非金属材料的防爆性能进行了研究, 结果表明, 相对于金属防爆材料, 非金属防爆材料可有效吸收大量的冲击动能, 在阻拦冲击波、爆炸破片和火焰方面表现更佳, 防爆性能更好。肖芸芸等^[43]以正硅酸乙酯和苯并噁唑单体为原料制备聚苯并噁唑-二氧化硅气凝胶, 该复合材料具有轻质和热导率低的特点, 它在隔热阻燃领域具有广阔的应用前景。Mostafa 等^[10]研究表明, 使用聚氨酯泡沫作阻隔介质, 可有效减弱冲击波能量, 使殉爆安全距离缩短 50%以上。一些研究人员为了实现多用途的目的, 在一种弹药包装箱上同时使用了金属和非金属阻燃防爆材料。宜晨虹等^[44]发明了一种多用途弹药包装箱, 该包装箱包括支撑骨架和箱体壁 2 部分, 支撑骨架由高强度铝合金制成, 而箱体壁则由玻璃钢耐磨层、硅酸铝隔热层、泡沫铝缓冲层、碳化硼陶瓷抗侵彻层、聚氯乙烯支撑层、复合材料温控层和聚氨酯泡沫层等组成。在爆炸冲击

波和破片共同破坏下,该弹药箱可实现对弹药的有效防护,并且具有可空投、可控温和可充当掩体等多种功能。

3.2 防击穿抗爆材料

通常情况下,弹药外包装使用较高强度的金属材料来进行防护。近年来,研究者们已经对聚合物涂层在遭受爆炸破坏或穿透时的性能表现进行了一系列研究,结果表明聚合物涂层提高了金属材料的防弹性能和防爆性能^[45-48]。Dai 等^[49]采用涂有聚脲的薄钢板来研究其防爆效果,实验中,涂覆聚脲后薄钢板的最大形变量由 113.5 mm 降低为 66.6 mm,形变减少了 41.3%。结果表明,无论是涂在钢板的正面还是背面,聚脲都可以为钢基材提供显著的防爆保护,聚脲层厚度的增加有助于减少爆破试验时钢板的变形程度。随着技术的进步,研究者们采用数值模拟的方法对复合材料的防殉爆性能进行评估。Liu 等^[50]通过理论分析和数值模拟得到复合结构材料阻隔炸药殉爆的反应参数,并且考虑了从侧面钢壳反射的后续冲击波的影响。结果显示,材料的种类、厚度和材料的排列顺序都会对结果产生影响。Gour 等^[51]用有限元模拟的方法研究了以 4340 钢为背衬材料和钛合金、石墨作为缓冲层的碳化硅陶瓷的抗弹性能,结果发现,背衬材料和缓冲层可以增加界面停留时间和降低陶瓷上的峰值压力来提高防弹性能。Pyka 等^[52]采用模拟方法对聚丙烯复合材料的防弹性能进行研究,其模型模拟结果与实测结果较吻合。此外,出于轻量化的考量,复合材料中开始使用天然纤维或者合成纤维。Luz 等^[11]对超高分子量聚乙烯复合材料和天然纤维(从菠萝叶中提取)增强的环氧树脂复合材料的防弹性能进行了比较。结果表明,两者的防弹性能相当,都达到了国际三级保护标准。天然纤维具有低成本、低密度和高能量吸收等优点,基于天然纤维的复合材料在防护领域具有广阔的发展前景。Filho 等^[53]评估了用天然棕榈树纤维增强的环氧树脂基复合材料的抗弹性能,结果表明,体积分数为 50% 的复合材料性能表现最佳。与合成纤维相比,这些复合材料质量小,生产成本低,并且更加环保。

近年来,具有优异物理性能的石墨烯材料引起了研究者的广泛关注,一些研究者开始将该材料用于增强复合材料的防弹性能。Costa 等^[54]研究了氧化石墨烯涂层、天然纤维和环氧树脂基体制成的复合材料的防弹性能。结果表明,由于氧化石墨烯涂层的存在,该复合材料具有更高的耐热性,界面剪切强度提高了 50% 以上,并且它与基体的黏附性较好,测试实验结束后的完整性较好。Vignesh 等^[55]将石墨烯纳米粒子作为层压材料插入凯夫拉-29 纤维层之间,并对该复合材料进行动态弹道冲击分析。结果显示,在凯夫拉纤维层之间插入 2.7 mm 厚度的纳米石墨烯,其等效应力从 8 825 MPa 降低为 4 264 MPa,总应变从 0.249 4 m

提高到 1.091 m,最大主应力从 9 644 MPa 降低为 1 897 MPa,防弹性能显著提高。Silva 等^[56]使用氧化石墨烯溶液在 120 ℃下对芳纶纤维进行热处理,增强其防弹性能。实验结果表明,氧化石墨烯复合后增加了纤维表面的摩擦力,子弹穿过芳纶纤维时,会受到更大的阻力,从而有效提高了材料的防弹性能,且与未增强的芳纶纤维相比,增强之后的芳纶纤维的能量吸收量提高了 50%。此外,也有研究者用陶瓷^[57]、聚氨酯泡沫^[58]等制成多层复合材料,探究复合材料对防弹性能的影响。

4 结语

防殉爆包装是一种防止弹药殉爆的可靠手段,然而国内对于弹药防殉爆包装技术的研究才刚刚起步。若想实现防殉爆的目的,应在隔爆、泄爆、抗震及缓冲等 4 个方面进行研究。文中着重从隔爆和抗爆两方面入手,总结弹药包装及相关领域内大量阻燃防爆材料和防弹抗爆材料的防殉爆性能,它们的性能均十分优异,尤其是由聚合物制成的复合材料和由石墨烯增强的纤维复合材料,相信这 2 种材料在弹药防殉爆包装领域具有十分广阔的应用前景。

参考文献:

- [1] 孙明亮,雷坤.炮弹塑料包装应用探讨[J].包装工程,2003,24(6): 107-109.
SUN Ming-liang, LEI Kun. Exploration on the Plastic Packaging Application of Ammunitions[J]. Packaging Engineering, 2003, 24(6): 107-109.
- [2] XIE Kuang sheng, LIU Dong, LIU De jun. The Review of Non-Lethal Weapons and Equipment with High and New Materials[J]. Applied Mechanics and Materials, 2014, 3634(687/688/689/690/691): 4206-4209.
- [3] 吴键.军用隐身包装箱设计构想[J].包装工程,2008,29(7): 88-90.
WU Jian. Conception of Stealthy Packaging Box Design for Munitions[J]. Packaging Engineering, 2008, 29(7): 88-90.
- [4] 李家良,赵耀辉,李月平,等.关于战术导弹防护包装设计与试验要求的探讨[J].包装工程,2011,32(23): 95-100.
LI Jia-liang, ZHAO Yao-hui, LI Yue-ping, et al. On Design and Test Requirements for Tactical Missile Protective Packaging[J]. Packaging Engineering, 2011, 32(23): 95-100.
- [5] 李秉旗,宋瑞华,杨健,等.常规弹药包装设计程序及要求[J].包装工程,2011,32(23): 38-39.
LI Bing-qi, SONG Rui-hua, YANG Jian, et al. Procedure and Requirements of Packaging Design for Com-

- mon Ammunition[J]. Packaging Engineering, 2011, 32(23): 38-39.
- [6] 姚恺, 李天鹏, 刘淑真, 等. 我国弹药包装设计热点问题分析及发展研究[J]. 包装工程, 2020, 41(9): 238-242.
YAO Kai, LI Tian-peng, LIU Shu-zhen, et al. Hot Issues Analysis and Development Study of Ammunition Package Design in China[J]. Packaging Engineering, 2020, 41(9): 238-242.
- [7] HELD M. Shaped Charge Jet Initiation on Explosive Charges Equipped with Barriers Made up of Various Materials[J]. Propellants, Explosives, Pyrotechnics, 1994, 19(6): 290-294.
- [8] 谭艳. 国内外弹药包装材料的研究进展[J]. 材料导报, 2013, 27(S1): 375-377.
TAN Yan. Research Progress on Ammunition Package Worldwide[J]. Materials Review, 2013, 27(S1): 375-377.
- [9] CUMMING A. Energetic Materials and the Environment[J]. Propellants, Explosives, Pyrotechnics, 2017, 42(1): 5-6.
- [10] MOSTAFA H E, MEKKY W F, EI-DAKHAKHNI W W. Sympathetic Detonation Wave Attenuation Using Polyurethane Foam[J]. Journal of Materials in Civil Engineering, 2014, 26(8): 04014046.
- [11] LUZ F, FILHO F, OLIVEIRA M S, et al. Composites with Natural Fibers and Conventional Materials Applied in a Hard Armor: A Comparison[J]. Polymers, 2020, 12(9): 1920.
- [12] 李秉旗, 李中麟. 大口径炮弹包装现状与发展趋势[J]. 包装工程, 2009, 30(9): 48-49.
LI Bing-qi, LI Zhong-lin. Present Situation and Development Trend of Large-Calibre Projectile Packaging[J]. Packaging Engineering, 2009, 30(9): 48-49.
- [13] 王秋雨, 王连义, 孙家利, 等. 中大口径弹药包装全寿命标准化应用研究[J]. 包装工程, 2011, 32(23): 83-85.
WANG Qiu-yu, WANG Lian-yi, SUN Jia-li, et al. Application Research of Total Life Standardization of Middle and Large Caliber Ammunition Packaging[J]. Packaging Engineering, 2011, 32(23): 83-85.
- [14] 辛昕, 余贻荣, 杨永伟. 弹药铁路运输包装试验刍探[J]. 军事交通学院学报, 2012, 14(7): 57-60.
XIN Xin, YU Yi-rong, YANG Yong-wei. Railway Transportation Test on Ammunition Pack[J]. Journal of Military Transportation University, 2012, 14(7): 57-60.
- [15] 王波, 易建政, 邱立雷, 等. 弹药包装高阻隔防潮封套材料透湿性研究[J]. 包装工程, 2010, 31(13): 47-51.
WANG Bo, YI Jian-zheng, QI Li-lei, et al. Vapor Transmission Study of High Barrier Moistureproof En-
- velop Materials[J]. Packaging Engineering, 2010, 31(13): 47-51.
- [16] 贾连颖, 谷彦军, 周健, 等. 复合材料在航空炸弹密封包装箱中的应用[J]. 国防技术基础, 2004(6): 16-18.
JIA Lian-ying, GU Yan-jun, ZHOU Jian, et al. Application of Composite Materials in Airbomb Sealed Packing Box[J]. Technology Foundation of National Defence, 2004(6): 16-18.
- [17] 王春齐, 曾竟成, 张长安. 电磁屏蔽复合材料包装箱的研究[J]. 纤维复合材料, 2006, 23(2): 28-30.
WANG Chun-qi, ZENG Jing-cheng, ZHANG Chang-gan. Study of Composite Package of Electromagnetic Interference Shielding[J]. Fiber Composites, 2006, 23(2): 28-30.
- [18] 段世非, 孙德强, 谭一, 等. 精确制导航空弹药电磁防护包装研究[J]. 包装工程, 2020, 41(15): 70-74.
DUAN Shi-fei, SUN De-qiang, TAN Yi, et al. Electromagnetic Shielding Packaging of Precision-Guided Aviation Ammunition[J]. Packaging Engineering, 2020, 41(15): 70-74.
- [19] 张勇, 刘刚. 弹药包装材料的发展[J]. 包装与食品机械, 2009, 27(6): 63-65.
ZHANG Yong, LIU Gang. Development of Ammo Packaging Material[J]. Packaging and Food Machinery, 2009, 27(6): 63-65.
- [20] 肖冰, 黄晓霞, 彭天秀. 国外弹药包装的现状与发展趋势研究[J]. 包装工程, 2005, 26(5): 220-222.
XIAO Bing, HUANG Xiao-xia, PENG Tian-xiu. Research on the Present Situation and Development Trend of Ammunition Packaging Abroad[J]. Packaging Engineering, 2005, 26(5): 220-222.
- [21] 易胜, 杨岩峰, 陈愚. 外军弹药包装发展研究[J]. 包装工程, 2012, 33(1): 129-133.
YI Sheng, YANG Yan-feng, CHEN Yu. Study of Foreign Military Ammunition Packaging Development[J]. Packaging Engineering, 2012, 33(1): 129-133.
- [22] 蔡建, 陈一农, 陈翰林, 等. 塑料在兵器包装上的应用[J]. 包装工程, 2003, 24(5): 95-97.
CAI Jian, CHEN Yi-nong, CHEN Han-lin, et al. Application of Plastics in Weapon Packaging[J]. Packaging Engineering, 2003, 24(5): 95-97.
- [23] CHEN Lang, WANG Chen, FENG Chang-gen, et al. Study on Random Initiation Phenomenon for Sympathetic Detonation of Explosive[J]. Defence Technology, 2013, 9(4): 224-228.
- [24] NAKAYAMA Y, ABE T, WAKABAYASHI K. A Study of Sympathetic Detonation of 155 mm Munitions from Blast Wave Output[J]. Science and Technology of Energetic Materials, 2003, 64(1): 32-38.
- [25] KIM B, KIM M, SUN T, et al. Simulating Sympathetic

- Detonation Using the Hydrodynamic Models and Constitutive Equations[J]. Journal of Mechanical Science and Technology, 2016, 30(12): 5491-5502.
- [26] XIAO You-cai, XIAO Xiang-dong, FAN Chen-yang, et al. Study of the Sympathetic Detonation Reaction Behavior of a Fuze Explosive Train under the Impact of Blast Fragments[J]. Journal of Mechanical Science and Technology, 2021, 35: 2575-2584.
- [27] WIDLUND T. A New Packaging Design for the HEAT CS Sympathetic Detonation Test[J]. In: Insensitive Munitions & Energetics Materials Technology Symposium, Rome, Italy, 2015, 5: 18-21.
- [28] AL-SHEHAB N, DOREMUS S, MIERS K, et al. Modeling and Experimental Fragment Impact Testing of the XM25[J]. Procedia Engineering, 2017, 204: 292-299.
- [29] 彭斐. 工兵用弹药战时储存防爆研究[D]. 东营: 中国石油大学(华东), 2013: 16-24.
PENG Fei. Sapper Ammunition Storage and Explosion-Proof of Research in Wartime[D]. Dongying: China University of Petroleum (Huadong), 2013: 16-24.
- [30] 马海洋, 龙源, 刘好全, 等. 非金属复合材料抗爆性能研究[J]. 兵工学报, 2012, 33(9): 1081-1087.
MA Hai-yang, LONG Yuan, LIU Hao-quan, et al. Research on Anti-Explosion Capability of Nonmetallic Composite Material[J]. Acta Armamentarii, 2012, 33(9): 1081-1087.
- [31] 田斌, 李如江, 赵家骏, 等. 钢板与泡沫铝复合板弹药包装箱的对比研究[J]. 兵器装备工程学报, 2019, 40(10): 190-194.
TIAN Bin, LI Ru-jiang, ZHAO Jia-jun, et al. Comparative Study of Steel Plate and Foam Aluminum Composite Plate Ammunition Packaging Box[J]. Journal of Ordnance Equipment Engineering, 2019, 40(10): 190-194.
- [32] KARLSSON P, WIDLUND T, RÅDMAN M. Container for Packaging and Storing Ammunition Units, a Unit Cargo Comprising such Containers and a Method for Packaging and Storing such Containers: US, 9874427[P]. 2018-01-23.
- [33] MIERS K T, AL-SHEHAB N M, PRILLAMAN D L. Fragment Impact Modeling and Experimental Results for Inert Munitions Compliance of a 120 mm Warhead[J]. Procedia Engineering, 2017, 204: 223-230.
- [34] GRABENKORT R W, QUINN R M. Safety Packaging Improvements: US, 5332399[P]. 1994-07-26.
- [35] ZHOU C, MU X, ZHANG Y, et al. Review on the Research Methods of the Barrier and Explosion-Proof Properties of Porous Materials[C]// 2018 International Symposium On Mechanics, Structures And Materials Science (MSMS 2018), American Institute of Physics Conference Series, 2018: 1-8.
- [36] WANG Zong-qian, ZHOU Yun-bo, WANG Xian-hui, et al. Multi-Objective Optimization Design of a Multi-Layer Honeycomb Sandwich Structure under Blast Loading[J]. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part D: Journal of Automobile Engineering, 2017, 231(10): 1449-1458.
- [37] LI S, LI X, WANG Z, et al. Finite Element Analysis of Sandwich Panels with Stepwise Graded Aluminum Honeycomb Cores under Blast Loading Part a Applied Science and Manufacturing[J]. Composites Part A: Applied Science and Manufacturing, 2016, 80: 1-12.
- [38] 宋洪锁, 李彦平, 冯强, 等. 一种阻燃防爆弹药箱: 中国, 108426491A[P]. 2018-08-21.
SONG Hong-suo, LI Yan-ping, FENG Qiang, et al. Flame-Retardant and Explosion-Proof Ammunition Box: China, 108426491A[P]. 2018-08-21.
- [39] LI Ji, SHI Shao-qing, LUO Wei-ming, et al. Study on Explosion-Resistance of Biomimetic Layered Honeycomb Structure[J]. Advances in Civil Engineering, 2020(17): 1-15.
- [40] NIE Bai sheng, ZHANG Ru ming, HE Xue qiu, et al. Potential Applications of Foam Ceramics in Gas Explosion Prevention[J]. Advanced Materials Research, 2011, 1333(284/285/286): 1330-1334.
- [41] 邢志祥, 杜贞, 欧红香, 等. 新型多孔非金属材料阻火抑爆性能研究[J]. 中国安全科学学报, 2015, 25(7): 74-79.
XING Zhi-xiang, DU Zhen, OU Hong-xiang, et al. Study on Fire Resistance-Explosion Proof Performance of Novel Porous Non-Metallic Material[J]. China Safety Science Journal, 2015, 25(7): 74-79.
- [42] 鲁长波, 朱祥东, 王浩喆, 等. 非金属阻隔防爆材料防爆性能综合评价研究[J]. 中国安全生产科学技术, 2014, 10(12): 125-130.
LU Chang-bo, ZHU Xiang-dong, WANG Hao-zhe, et al. Comprehensive Evaluation on Explosion Proof Performance of Non-Metallic Barrier and Explosion Proof Material[J]. Journal of Safety Science and Technology, 2014, 10(12): 125-130.
- [43] 肖芸芸, 李良军, 冯军宗, 等. 纤维增强聚苯并噁唑-SiO₂气凝胶复合材料阻燃隔热性能[J]. 南京工业大学学报(自然科学版), 2020, 42(4): 452-460.
XIAO Yun-yun, LI Liang-jun, FENG Jun-zong, et al. Flame Retardant and Thermal Insulation Properties of Polybenzoxazine-Silicon Aerogels Composites with Reinforced Fiber[J]. Journal of Nanjing Tech University (Natural Science Edition), 2020, 42(4): 452-460.
- [44] 宜晨虹, 王为民. 一种多用途弹药包装箱: 中国, 211601755U[P]. 2020-09-29.

- YI Chen-hong, WANG Wei-min. A Kind of Multiple-Purpose Ammunition Packaging Box: China, 211601755U[P]. 2020-09-29.
- [45] SRINIVASAN A T, ARUN S, KUNIGAL S. Blast Resistance of Polyurea Based Layered Composite Materials[J]. *Composite Structures*, 2007, 84(3): 271-281.
- [46] ROLAND C, FRAGIADAKIS D, GAMACHE R. Elastomer-Steel Laminate Armor[J]. *Composite Structures*, 2009, 92(5): 1059-1064.
- [47] RAMAN S N, NGO T, MENDIS P, et al. Elastomeric Polymers for Retrofitting of Reinforced Concrete Structures Against the Explosive Effects of Blast[J]. *Advances in Materials Science and Engineering*, 2012(754142): 1-8.
- [48] GAMACHE R, GILLER C, MONTELLA G, et al. Elastomer-Metal Laminate Armor[J]. *Materials & Design*, 2016, 111: 362-368.
- [49] DAI Li-hui, WU Cheng, AN Feng-jiang, et al. Experimental Investigation of Polyurea-Coated Steel Plates at Underwater Explosive Loading[J]. *Advances in Materials Science and Engineering*, 2018, 2018: 1-7.
- [50] LIU J, DONG Y, AN X, et al. Reaction Degree of Composition B Explosive with Multi-Layered Compound Structure Protection Subjected to Detonation Loading[J]. *Defence Technology*, 2021, 17(2): 315-326.
- [51] GOVIND G, SRIDHAR I, LIANG G W, et al. Equivalent Protection Factor of Bi-Layer Ceramic Metal Structures[J]. *Defence Technology*, 2022, 18(3): 384-400.
- [52] PYKA D, PACH J, JAMROZIAK K. Numerical Model-
ing of Ballistic Resistance of Thermoplastic Laminate under 9 mm×19 mm Parabellum Ammunition[J]. *Engineering Mechanics*, 2019(25): 307-310.
- [53] FILHO F G, OLIVEIRA M, PEREIRA A. Ballistic Behavior of Epoxy Matrix Composites Reinforced with Piassava Fiber Against High Energy Ammunition[J]. *Journal of Materials Research and Technology*, 2019, 9(2): 1734-1741.
- [54] COSTA U O, NASCIMENTO L F C, GARCIA J M, et al. Effect of Graphene Oxide Coating on Natural Fiber Composite for Multilayered Ballistic Armor[J]. *Polymers (Basel)*, 2019, 11(8): 1-15.
- [55] VIGNESH S, SURENDRAN R, SEKAR T. Ballistic Impact Analysis of Graphene Nanosheets Reinforced Kevlar-29[J]. *Materials Today: Proceedings*, 2020, 45: 788-793.
- [56] DA SILVA A, WEBER R, MONTEIRO S, et al. Effect of Graphene Oxide Coating on the Ballistic Performance of Aramid Fabric[J]. *Journal of Materials Research and Technology*, 2020, 9(2): 2267-2278.
- [57] FEJDYŚ M, KOŚLA K, KUCHARSKA-JASTRZĄBEK A, et al. Influence of Ceramic Properties on the Ballistic Performance of the Hybrid Ceramic-Multi-Layered UHMWPE Composite Armour[J]. *Journal of the Australian Ceramic Society*, 2020, 57(1): 1-13.
- [58] ELSHENAWY T, SEOUD M, ABDO G. Ballistic Protection of Military Shelters from Mortar Fragmentation and Blast Effects Using a Multi-Layer Structure[J]. *Defence Science Journal*, 2019, 69(6): 531-626.

责任编辑: 曾钰婵