

# 我国弹药包装防护设计研究现状

刘正涛<sup>1</sup>, 胡建华<sup>2</sup>, 张报云<sup>3</sup>, 莫非<sup>1</sup>, 吴厦<sup>1</sup>

(1.西南技术工程研究所, 重庆 400039; 2.陆军装备部驻重庆地区军事代表局驻重庆地区第六军事代表室, 重庆 400042; 3.陕西北方动力有限责任公司, 陕西 宝鸡 721300)

**摘要:** **目的** 综述弹药包装防护的现状, 为提升弹药包装技术水平指明方向。**方法** 简述弹药在储存环境、运输/装卸环境中可能受到的危害形式, 综述弹药包装在防振动/冲击、防潮控湿、防静电、防电磁、防殉爆等方面的研究现状和未来的发展方向。**结论** 明确指出弹药包装多功能防护发展对提高弹药使用寿命、使用质量和使用安全性具有重要意义。

**关键词:** 弹药包装; 多功能防护; 研究现状

中图分类号: TB485.3; TJ4 文献标识码: A 文章编号: 1001-3563(2023)17-0291-07

DOI: 10.19554/j.cnki.1001-3563.2023.17.036

## Research Status of Ammunition Packaging Protection Design in China

LIU Zheng-tao<sup>1</sup>, HU Jian-hua<sup>2</sup>, ZHANG Bao-yun<sup>3</sup>, MO Fei<sup>1</sup>, WU Xia<sup>1</sup>

(1. Southwest Institute of Technology and Engineering, Chongqing 400039, China; 2. The 6<sup>th</sup> Military Representative Office of Military Representative Bureau of the Army Armaments Department in Chongqing, Chongqing 400042, China; 3. Shaanxi North Dynamic Co., Ltd., Shaanxi Baoji 721300, China)

**ABSTRACT:** The work aims to clarify the current situation of ammunition packaging protection in China, so as to point out the direction for improving the ammunition packaging technology. The possible hazard forms of ammunition in the storage, transportation, loading and unloading environment were briefly described and the research status and future development direction of ammunition packaging in the aspects of vibration and impact prevention, moisture prevention and humidity control, electrostatic prevention, electromagnetic control, and sympathetic detonation resistance were summarized. Finally, it is clearly pointed out that the development of multi-functional protection of ammunition packaging is of great significance in improving the service life, use quality, and use safety of ammunition.

**KEY WORDS:** ammunition packaging; multi-functional protection; research status

弹药包装作为弹药储存、运输、装卸等过程的载体, 需要为弹药的安全性、使用质量以及使用寿命等提供保障。在弹药寿命预期内为其提供 100% 的防护, 避免因包装防护不到位造成弹药质量下降、寿命缩短, 甚至引发自燃、自爆等事故<sup>[1-2]</sup>。随着高新技术在先进弹药中的应用, 弹药由原来的单一机械构件向光-机-电集成方向发展, 对环境因素的敏感性提高, 如温度、湿度、振动、冲击、霉菌、雷电、静电、雨雪、沙尘、辐射、太阳直射、腐蚀气体等均会对弹药

的质量和带来不利影响, 弹药包装对弹药的防护不再局限于防冲击、防潮、防湿等, 还要求具备防静电、防电磁、防殉爆、防核、防生化等多功能防护能力<sup>[3-4]</sup>。我国对弹药包装防护设计进行了大量研究, 为弹药包装技术水平的提升指明了发展方向。

## 1 弹药包装防护环境分析

弹药防护包装为弹药产品提供密闭、相对湿度保

持在一定范围内的微环境,在弹药储存、流通、使用过程中承担相应的防护任务。最终目的是减少人为因素和自然环境对弹药性能的影响,因此,在不同环境下包装箱的防护任务有所不同。弹药从生产到使用或完成设计使命主要面临的包装防护环境包括储存环境和运输/装卸环境,具体分析如下。

1) 储存环境。弹药储存环境主要包括后方仓库储存和野战弹药仓库储存,后方仓库储存环境需重点关注的是温湿度的控制,避免弹药的元件和火炸药因受潮、腐蚀等问题导致性能劣化或失效;而野外作战的储存环境更为恶劣复杂,除了环境温度、湿度外,还有盐雾、腐蚀性气体、微生物、冲击、振动及电磁辐射等均会对储存中的弹药造成更严重的金属腐蚀、装药受潮、意外发火甚至爆炸等不利后果。因此,需要通过设计科学合理的包装方式和材料,尽量减少外部环境对弹药质量的各种不利影响。

2) 运输/装卸环境。运输和装卸过程中始终伴随着振动和冲击,比如,振动包括汽车的路面振动或车身振动、船舶的波浪振动、飞机的飞行振动等,冲击包括车辆启动或急刹冲击、飞机的着陆冲击、装卸过程中的跌落、碰撞、倾倒等冲击形式,振动和冲击是弹药在运输和装卸过程中最主要的危害因素。弹药的安全性与其引信、弹丸、发射装药、底火、药筒这5大敏感元件的性能可靠性息息相关,任何一个元件出现问题都会导致弹药的安全系统失效,其中,95%的弹药故事与引信有关,而振动与冲击是容易触发引信解脱保险的因素之一。振动对弹药的危害主要有:长时间的振动可能导致弹药中的弹簧疲劳老化,降低弹性,使引信易于解脱保险;有规律的机械运动可能引发共振,在共振状态下系统振动加速度是平均最大加速度的3~4倍,可能导致弹药引信元件的疲劳损坏等,而冲击对弹药的危害更大,冲击产生的瞬时加速度较大,如公路上越过2 cm高的障碍物可产生垂直冲击加速度1.6g~2.5g、铁路紧急制动时的水平冲击加速度可达4g、飞机机轮与地面相撞产生的冲击加速度可达1g~2g,冲击作用很容易超出弹药引信的安全允许范围。因此,在运输和装卸过程中要尽量避免振动和冲击对弹药的影响,尤其是对关重件引信要加以保护,避免发生意外爆炸。

## 2 包装防护方法

### 2.1 防振动/防冲击技术

弹药在装卸、运输、堆码等过程中始终伴随着振动、冲击等危害,包装材料优良的结构强度、减震和缓冲性能对提高弹药安全性具有重要作用<sup>[5]</sup>。国内研究人员针对弹药运输过程中振动可能引发的安全隐患问题,开展了振动模拟试验,弹药采用木箱和塑料包装筒的两级包装方式,并在包装箱内分2层放置,

以贴合实际包装状态。该振动系统采用DCS-2200型电动振动台,额定频率范围为5~3 000 Hz。试验结果表明,下层弹药振动较为激烈,而同层弹药中弹体较引信振动更激烈。此外,对关重件引信来说,在50 Hz以下时阻尼较大,有明显的振动衰减性,说明包装系统对弹药关重件具有一定缓冲作用<sup>[6]</sup>。

包装的材料和结构设计是提升弹药防振动、防冲击性能的重要途径。在弹药包装新材料新技术应用方面,国外军队已大面积采用塑料、玻璃钢、软质封套以及铝塑等复合材料替代传统木质、金属包装材料。美国ARDEC中心设计了一种由泡沫和塑料制成的“茧”式包装箱,可包装68 kg以上的弹药,并通过所有跌落测试;还为迫击炮弹设计了一种玻璃填充的热塑性复合材料包装箱,该包装箱通过了冲击和防爆测试,可用于替代当前的金属包装,缺点是成本较高<sup>[7]</sup>。此外,美军的105 mm炮弹、加拿大的81 mm迫击炮弹等均已采用塑料包装,大口径炮弹、反坦克导弹等采用玻璃钢筒,发射药、引信等包装采用铝塑复合材料达到防潮、防静电的作用<sup>[8]</sup>。国外军队要求弹药包装具有高阻隔性的同时,还要求实现包装材料轻量化。美军已提出了到2025年将所有陆军装备包装材料质量和体积各减少75%的目标<sup>[9]</sup>。我国弹药包装材料发展较为缓慢,外包装仍以木质(约占85%)和金属材料为主,少部分采用了工程塑料、玻璃钢及铝塑复合材料等<sup>[10-12]</sup>。木质和金属材料都能提供足够的包装强度,但在其他方面防护能力较弱,如:木质包装箱不耐腐蚀,防潮性、阻隔有害气体的能力较差,在储存条件恶劣时易发生变形、虫蛀等;金属包装的缺点是质量大且容易锈蚀。因此,木质、金属包装材料已不再适用于现代弹药高质量的包装防护需求,而新发展起来的工程塑料、玻璃钢及铝塑复合材料等既能满足相当的机械强度,又在耐腐蚀、耐高温、防潮、阻燃等方面也表现突出,尤其是工程塑料已逐渐发展为弹药外包装的主流方向。工程塑料包装箱相较于传统的钢质、木质包装箱在结构性能、轻量化、环境适应性、阻燃性、密封性、经济和环保性等方面具有突出的优越性,如弹药塑料包装箱在满装状态下从2 m高度以任意面跌落至水泥地面均未出现变形、开裂现象。因此,工程塑料成为当前最具有应用潜力的弹药外包装材料,具有较好的结构强度,防振动、防冲击性能较好。为了明确工程塑料包装箱的贮存寿命,国内对某弹药包装筒用改性ABS塑料的贮存老化性能进行了评估,在不同温度条件下开展了热氧老化试验。研究表明,该弹药包装筒采用的改性ABS塑料在高温下将发生明显变色,但所有样品在整个试验中均未发生粉化、裂纹、斑点、起泡等老化现象,改性ABS塑料弹药包装筒在25℃环境条件下,贮存寿命预计可达到28.6年<sup>[13]</sup>。国内弹药内包装材料主要采用塑料泡沫(如聚乙烯泡沫)、合

成橡胶等<sup>[14-15]</sup>,均具有较好的缓冲效果,而且制作成本低,但内包装材料的选择不仅需要考虑其减震作用,还要考虑防静电、防潮、阻隔性等多方面的性能要求。

在“外包装+内包装”的整体包装结构和材料设计上,国内基于整体包装解决方案(Complete Packaging Solution, CPS)的弹药包装设计理念,对某中口径弹药进行了从内部防护包装到外部集合包装的整体包装方案设计<sup>[16]</sup>。其中,内包装考虑到防潮、防锈、防腐蚀等防护设计,采用气相缓蚀剂(VCI—Volatile Corrosion Inhibitor)技术制作气相防锈膜、气相防锈纸或气象防锈袋,并加入适量干燥剂进行防潮;中包装设计为封闭木箱加内衬格挡的方案结构,主要以胶合板为主要材质;外包装则基于标准化、系统化以及集装化原则,采用托盘、捆扎、裹包等组合手段,把包装箱组合成可方便装卸、运输、贮存的整体单元,最后通过强度校核和试验全面验证包装箱的各项性能。国内某研究单位在某型弹药包装箱结构设计中<sup>[17]</sup>,采用SMC复合材料作为外包装材料,将外包装设计为矩形、大开盖形式的包装箱结构,通过力学计算与仿真分析等,设计出包装箱的壁厚,并合理布置加强筋、立柱等结构,保证了箱体承重效果;而内包装采用由无纺布、PET、AL、PA、PE等材料组成的复合材料,经焊封制成包装袋。参照GJB 150A—2009《军用装备实验室环境试验方法》<sup>[18]</sup>、GJB 2711—1996《军用运输包装试验方法》<sup>[19]</sup>、GJB 1444A—2019《弹药包装通用规范》<sup>[20]</sup>及GJB 4403—2002《常规兵器弹药包装定型试验规程》<sup>[21]</sup>等相关试验要求对包装箱实物样机进行了振动试验、冲击试验、0.5 m跌落试验及3 m安全跌落试验等,该包装箱通过了各项试验考核,满足设计要求。

## 2.2 防潮控湿技术

潮湿环境极不利于弹药的储存,易使弹药的底火、发射药、引信的药剂等受潮、变质,并造成金属元件锈蚀,造成布、木质件霉烂,最终致使弹药性能急剧下降。采用相同的储存方式,海岛上弹药可储存时间绝大多数不超过陆地上储存时间的1/20<sup>[22]</sup>。因此,对弹药储存环境进行防潮控湿设计是延长弹药使用寿命的重要手段之一。有研究表明,当环境相对湿度达到60%以上,几种常用金属包装材料的腐蚀速率明显加快,其中,腐蚀速率大小为 $Fe > Cu > Al$ ,以电化学腐蚀为主<sup>[23]</sup>。因此,弹药包装储存环境的相对湿度应控制在45%~55%,才能尽可能延长弹药使用寿命。

国内某研究单位<sup>[24]</sup>为满足弹药对防潮、隔热以及防止水渗透等需求,首次提出了“阻隔+干燥+除氧+吸附+指示”并行的弹药包装防潮技术方案。阻隔方面采用了结构为BOPP/BOPA/改性PVA/LLDPE(20/15/5/60)的改性PVA透明复合薄膜作为内包装材

料,并采用了结构为无纺布/BOPA/PET/Al/LLDPE(40/15/12/9/60)的无纺布铝塑不透明复合薄膜作为外包装材料,双重阻隔方式可有效阻隔外部环境中的氧气、水分、腐蚀气体等进入包装内密闭环境中;干燥方面则采用多孔的新型物理吸附干燥剂,可吸收容器内多余的水分,保持相对湿度在一定范围内;除氧方面采用了吸氧能力、吸氧速度和吸氧彻底性较强的铁基除氧剂;吸附方面采用物理吸附(如活性炭或其他矿物类等多孔活性物质)和化学吸附(化学吸附剂)相结合的综合吸附方法,将容器内的腐蚀性气体彻底地吸收或分解;此外,为了准确、及时指示出弹药储存密闭环境内的相对湿度和氧气含量,还设计了综合指示剂,可通过颜色变化来进行判断。研究人员采用该防潮技术方案在某海岛部队对某加榴炮弹和某加农反坦克炮弹分别进行了为期3个月和12个月的实弹封存试验,试验结果满足弹药的防潮防腐设计要求,可用于海岛部队弹药的包装储存。此外,为了高效可靠检测弹药包装箱的密封性,国内还设计出一种弹药包装筒密封性高效自动检测设备。该设备通过对系统误差的修正和真空传感器的标定,使其成为检测真空度的标准数据,解决了系统中涉及密封检测的关键技术。试验结果表明,该系统检测结果准确可靠,提高了炮弹包装筒密封性的整体检测水平<sup>[25]</sup>。

从以上的研究中可以看出,弹药包装的防潮控湿主要集中在包装前产品去湿处理、包装后密封阻隔,以及包装内微环境除湿、吸氧和吸气处理等方面,从根本上解决了弹药长期储存出现的受潮、变质、腐蚀等方面的问题。但需要注意的是,弹药包装环境的相对湿度应控制在一定范围内,过高不行,过低同样会出现问题。有文献表明<sup>[26]</sup>,弹药储存环境相对湿度不可低于30%,否则火药过于干燥,将造成火药燃速增大,进而加大膛压,产生远弹,影响射击精度。此外,发射药过于干燥后会产生裂纹,发射时在膛压作用下药粒容易破碎,使燃面急剧增大,从而进一步增大了炮管膛压,可能影响武器使用寿命、射击精度和射程,甚至威胁到人身安全。因此,包装箱的防潮控湿不仅要降湿,相关研究人员在今后的包装设计中还应考虑防干燥问题。

## 2.3 防静电技术

静电作用对弹药的危害较大,静电放电不仅可能严重干扰弹药中的电子元器件使弹药失效,而且可能导致弹药的电火工品意外着火,甚至引起火灾或爆炸<sup>[27-28]</sup>。弹药包装内静电电荷的产生主要来自接触分离起电、剥离起电、感应起电等3个方面<sup>[29]</sup>。在弹药搬运或运输途中,包装材料与其他物体分离、摩擦时会产生静电;打开弹药密封包装时,包装材料和人体都会产生较高的电压;出现雷电时可在弹药表面产生较高的感应电压。由此说明,弹药的储存、使用

等环境无法避免静电的存在,弹药包装的防静电设计是非常有必要的。

弹药包装防静电的主要途径是将产生的静电电荷快速导出,避免静电电荷积累。当前弹药包装的防静电设计通常采用外涂抗静电材料或直接采用复合型导电高分子材料作为包装材料等方法。其中,外涂抗静电材料是将一些具有高导电性能的粉末(如金、银、铜、镍等金属粉末或石墨粉末)、涂料(如添加了抗静电剂或导电填料等的高分子涂料)、结构型导电高分子材料(如聚乙炔、聚苯胺)等直接刷涂或喷涂在包装箱内、外表面,使其具有较好的防静电效果,这种方法稳定性好、效能持久,是当前最主要的弹药包装防静电方法。此外,国内外研究人员还研制出具有优良防静电性能的包装材料,如在聚乙烯中加入抗静电剂和炭黑可以制成防静电聚乙烯薄膜,该薄膜具有较好的防静电性能,同时具有优良的热焊封性。国外学者还将炭黑、金属粉、金属纤维等加入聚乙烯或聚噻吩塑料中,制成了弹药塑料包装筒,该包装材料具有强度高和抗静电性能优良等特点。为了解决内包装缓冲泡沫材料与弹药之间摩擦产生静电的问题,国内制备出一种新型防静电泡沫塑料<sup>[30]</sup>。以三聚氰胺、甲醛、膨胀石墨和鳞片石墨为原料,经过原位合成和发泡可制备出膨胀石墨复合泡沫和鳞片石墨复合泡沫。当膨胀石墨和鳞片石墨的剂量均为 2.500 g 时,2 种泡沫塑料的表面电阻率分别可达到  $3.37 \times 10^5 \Omega/\text{sq}$  和  $3.65 \times 10^6 \Omega/\text{sq}$ ,具有优异的防静电性能。我国在防静电材料研究方面取得了一定进展,但还需与弹药包装的实际需求相结合,设计合适的防护方案:一是要根据不同弹药的包装材料与结构选择合适的静电防护材料,达到效果最优化,成本最低化;二是要充分考虑内外包装的防静电设计,而不仅只是对某一外层或内层包装进行防静电处理,还须达到外防内输,进一步提高弹药安全性。

## 2.4 防电磁技术

现代战场已经由原始的人员对抗逐渐发展为无人对抗、信息对抗,通信、导航、雷达、高功率微波武器、电磁干扰弹、核电磁脉冲弹等高新技术装备对抗。此外还有自然界的雷电、静电等电磁现象,构成了复杂的现代战场电磁环境<sup>[31]</sup>。与此同时,高技术弹药中微电子技术和电火工品技术应用增多,对电冲量的敏感性大大提高,受到电磁强烈干扰使弹药的安全性和可靠性遇到极大挑战。因此,弹药包装箱的电磁防护性能也越发的重要<sup>[32-33]</sup>。

当前最受青睐的工程塑料包装材料在各方面都表现出优异的性能,但在电磁防护方面明显不足。塑料作为高分子材料,其电阻率一般为  $10^{12} \sim 10^{17} \Omega \cdot \text{m}$ ,极易与其他材料摩擦后产生静电和滞电,并且电磁波可以轻易穿透这类材料。如何提高塑料弹药包装箱的电磁防护性能是当前的关键技术问题。在包装表面

制备电磁屏蔽涂层是当前主要的技术手段,其中非晶态合金镀层电磁屏蔽效果较好<sup>[34-35]</sup>。国外对工程塑料表面制备非晶态合金工艺、电磁屏蔽效能及恶劣环境下的耐候性能等进行了深入研究。俄罗斯采用由针状、碎屑状、薄膜状铝铜非晶态合金纤维与聚乙烯树脂黏结剂制成的多层复合材料来制作轻而柔韧的屏蔽结构物,壁厚为 1~2 mm 的复合材料构件能使 0.01~30 MHz 频率范围内的磁场减弱至少 60 dB<sup>[36]</sup>。国内借鉴国外先进技术经验,也开发出了电磁屏蔽效果较好的包装涂层,将镍-磷非晶态合金通过丝网涂敷、屏蔽膜镀制等方法涂覆在以塑木复合材料制成的包装箱表面,获得电磁屏蔽镀层。该镀层在 300 MHz~3.0 GHz 电磁波频率范围内屏蔽效能均大于 25 dB,远超 GJB 2605A—2021 E 中所要求的电磁屏蔽效能。该工艺成本低、流程简单、电磁防护性能优良,在弹药包装箱的电磁防护方面具有推广应用价值<sup>[37]</sup>。国内还在弹药工程塑料包装箱表面制备了非晶态 Ni-Cu-P 合金镀层,并研究了其电磁屏蔽性能。试验结果表明,该镀层在 5~1.5 kHz 的电磁波频率范围内的电磁屏蔽效能同样均大于 25 dB,该研究成果进一步验证了以镍-磷非晶态合金作为包装箱涂层来提高电磁防护性能的有效性<sup>[38]</sup>。此外,研究人员还对镍-磷非晶态合金镀层进行了高温、低温、湿热交变、日照、雨淋等环境试验,试验前后镀层的电磁屏蔽效能未发生明显变化,说明该镀层具有较强的耐候性和环境适应性,能够满足弹药包装在复杂环境下的电磁防护要求。电磁屏蔽技术在弹药包装中的应用,将有效提高弹药电磁防护能力,在后续电磁屏蔽材料研究基础上,还将充分考虑其与包装材料之间的结合性、环境适应性等方面的问题。

## 2.5 防殉爆技术

当包装箱内某一弹药发生爆炸,引发周围弹药相继爆炸的现象称为殉爆。弹药发生殉爆的危害不言而喻,弹药包装箱是各弹药之间重要的屏障,包装箱的防殉爆性能也是考验其先进性、功能性的重要指标。弹药发生殉爆的主要影响因素有爆炸时产生的冲击波、温度和爆轰产物等<sup>[39-40]</sup>,因此,弹药包装的防殉爆设计与炸药起爆、弹药殉爆试验、爆炸防护、材料制备成型和包装工程等领域相关。如何实现弹药包装箱隔爆、抗爆、泄爆和缓冲减震等是保护弹药安全的关键<sup>[41-43]</sup>。当前包装箱防殉爆技术主要是采用防冲击波和防碎片穿透效果更好的材料作为隔板材料,削弱弹药爆炸后对周围其他弹药的能量传播。美国发现含有聚苯胺的十二烷基苯磺酸与丁二烯-苯乙烯嵌段共聚物的复合材料的电导率与纯聚苯胺的电导率相当,且弹性好,是防殉爆包装的理想材料<sup>[44]</sup>。Mostafa 等<sup>[45]</sup>研究发现,聚氨酯泡沫是一种吸收冲击波能量效果较好的材料,将其用作阻隔材料可使殉爆影响距离缩短

一半以上。石墨烯增强纤维复合材料的防殉爆性能十分优异,具有广阔的应用前景。Silva 等<sup>[46]</sup>将芳纶纤维置于 120 °C 的氧化石墨烯溶液中,热处理后制备出氧化石墨烯增强纤维与普通芳纶纤维相比,冲击波吸能提高了 50%。Vignesh 等<sup>[47]</sup>在凯夫拉纤维层间插入 2.7 mm 厚度的纳米石墨烯后,其最大应力由 9 644 MPa 降至 1 897 MPa,而最大变形量由 0.249 4 m 提高到 1.091 m,抗弹性能显著提升。此外,在材料结构设计上,多层夹心结构通常较单一结构表现出更好的抗爆效果。外军针对大口径炮弹研制出一种三明治复合结构的防护板,该结构由内外 2 层的高强度玻纤增强材料和中间层的石膏和硅胶铸塑复合材料组成,具有多孔超轻、强度高,在吸能和抗碎片冲击方面表现优异,是一种较好的防殉爆材料<sup>[48]</sup>。泡沫铝是一种多孔结构的新型铝合金材料,具有熔点高(1 400 °C 不溶解)、热导率低(纯铝为 1/5 ~ 1/500)、吸能高(490~3 430 kJ/m<sup>3</sup>)、抗电磁干扰等特点,在弹药包装中应用广泛。国内模拟了单层 45 钢板材料和 45 钢板-泡沫铝-45 钢板材料分别作为包装箱隔板材料时的防殉爆效果<sup>[49]</sup>。结果表明,当单层 45 钢板材料厚度在 4 mm 以下时,隔板发生较大变形,并与其他弹药外壳碰撞导致爆炸;隔板厚度增大到 6 mm 后,变形较小,但冲击波能量同样会诱发爆炸;当隔板厚度增大到 16 mm 以上后具有较好的防殉爆效果。隔板采用 45 钢板-泡沫铝-45 钢板时,无论其结构厚度为 3、8、3 mm 还是 4、6、4 mm,隔板变形量均较小,且对冲击波的吸收作用较好,可有效避免发生殉爆。泡沫铝复合结构钢板相较于单一钢板材料的防殉爆性能更好,且质量较轻,能够满足防殉爆包装箱的使用要求。经过几十年的发展,我国已开发出一系列工程塑料、纤维增强复合材料等在阻燃、防弹领域表现突出的新型材料,将其应用在弹药包装防殉爆方面可能会获得不错的效果。

### 3 结语

随着各种高新技术在弹药中的应用,以及更加复杂多变的弹药储存、运输、装卸和使用环境的出现,对弹药包装防护性能提出了更高的要求。大力发展具有高强度和优异阻隔密封性、防潮、防静电、防电磁、防殉爆等多功能复合的弹药包装结构和材料,对推动我国先进弹药的包装技术水平,提高弹药的使用寿命、使用质量和使用安全性具有重要意义。我国弹药包装防护技术未来的发展方向:持续开发绿色、环保、高性能的新型包装材料,如工程塑料、复合材料等;弹药与包装的同步研究与改进,重视包装在弹药储存、使用中的价值;包装从单一防护向多功能综合防护方向发展;超前研究,为适应部队战时需要,模拟战场环境开展一系列弹药包装试验研究,为功能性包装箱的研发提供科学依据。

### 参考文献:

- [1] 吴涛. 现行弹药包装对弹药保障的影响分析[J]. 山东工业技术, 2014(18): 208.  
WU Tao. Analysis of the Influence of Current Ammunition Packaging on Ammunition Support[J]. Shandong Industrial Technology, 2014(18): 208.
- [2] 张卫春, 吴霖, 鲍平鑫. 弹药运输包装试验存在问题及解决措施[J]. 国防交通工程与技术, 2011, 9(5): 61-64.  
ZHANG Wei-chun, WU Ben, BAO Ping-xin. Research into Problems in the Transportability Testing of Ammunition and our Solutions to them[J]. Traffic Engineering and Technology for National Defence, 2011, 9(5): 61-64.
- [3] 杨岩峰, 易胜, 苏振中. 弹药包装可靠性强化试验研究[J]. 价值工程, 2012, 31(27): 281-282.  
YANG Yan-feng, YI Sheng, SU Zhen-zhong. Reliability Enhancement Testing in Ammunition Packaging[J]. Value Engineering, 2012, 31(27): 281-282.
- [4] 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.
- [5] 赵睿. 我军弹药包装现状及托盘集装化储运新趋[J]. 低碳世界, 2016(31): 251-252.  
ZHAO Rui. The Present Situation of Ammunition Packaging in our Army and the New Trend of Pallet Container Storage and Transportation[J]. Low Carbon World, 2016(31): 251-252.
- [6] 李海广, 安振涛, 武红文, 等. 典型弹药系统运输振动特性试验研究[J]. 包装工程, 2017, 38(15): 92-96.  
LI Hai-guang, AN Zhen-tao, WU Hong-wen, et al. Experimental Study on Transportation Vibration Characteristics of Typical Ammunition System[J]. Packaging Engineering, 2017, 38(15): 92-96.
- [7] OGANDO J. Packing the Army's Guns & Ammo[J]. Packaging Digest, 2010, 47(1): 42-43.
- [8] 张凯. 探讨弹药包装现状及发展趋势[J]. 中国设备工程, 2022(20): 233-235.  
ZHANG Kai. Discussion on the Present Situation and Development Trend of Ammunition Packaging[J]. China Plant Engineering, 2022(20): 233-235.
- [9] FARRELL E, DANGELO A. IM Packaging Technology for Bullet Impact Mitigation[J]. Proceedings of 1999 Insensitive Munitions and Energetic Materials, 1999(3): 266-275.
- [10] 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.
- [11] 辛昕, 余贻荣, 杨永伟. 弹药铁路运输包装试验与探

- [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.
- [12] 艾云平, 刘琼, 冯钟林, 等. 浅析湿度对海岛弹药储存的影响[J]. 物流工程与管理, 2013, 35(3): 146-147.  
AI Yun-ping, LIU Qiong, FENG Zhong-lin, et al. Brief Analysis the Influence of Humidity on Ammunition Storage of Island[J]. Logistics Engineering and Management, 2013, 35(3): 146-147.
- [13] 李颖, 肖敏, 杨万均, 等. 某弹药包装筒用改性 ABS 塑料贮存寿命评估研究[J]. 装备环境工程, 2013, 10(3): 5-7.  
LI Ying, XIAO Min, YANG Wan-jun, et al. Storage Life Evaluation of Modified ABS Plastic for Ammunition Packaging[J]. Equipment Environmental Engineering, 2013, 10(3): 5-7.
- [14] 武洪文, 戴祥军, 傅孝忠. 弹药木质包装抗冲击振动防护性能的测试研究[J]. 军械工程学院学报, 2008, 20(6): 50-53.  
WU Hong-wen, DAI Xiang-jun, FU Xiao-zhong. Research on the Testing of Protective Performance of Ammunition Ligneous Packaging in Dynamic Mechanics Circumstance[J]. Journal of Ordnance Engineering College, 2008, 20(6): 50-53.
- [15] GAO De, LU Fu-de, CHEN Si-jia. Drop Impact Analysis of Cushioning System with an Elastic Critical Component of Cantilever Beam Type[J]. Mathematical Problems in Engineering, 2013, 2013(4): 1-5.
- [16] 李志强, 吕博. 基于 CPS 的弹药包装设计[J]. 轻工科技, 2019, 35(3): 90-93.  
LI Zhi-qiang, LYU Bo. Ammunition Packaging Design Based on CPS[J]. Light Industry Science and Technology, 2019, 35(3): 90-93.
- [17] 白焘, 杨昭. 某型弹药防护包装设计与验证[J]. 包装工程, 2016, 37(23): 120-124.  
BAI Dao, YANG Zhao. Design and Verification of Certain Ammunition Protective Packaging[J]. Packaging Engineering, 2016, 37(23): 120-124.
- [18] GJB 150A—2009, 军用装备实验室环境试验方法[S].  
GJB 150A—2009, Environmental Test Methods for Military Equipment Laboratories[S].
- [19] GJB 2711—1996, 军用运输包装试验方法[S].  
GJB 2711—1996, Test Methods for Military Transport Packages[S].
- [20] GJB 1444A—2019, 弹药包装通用规范[S].  
GJB 1444A—2019, General Specification for Ammunition Packaging[S].
- [21] GJB 4403—2002, 常规兵器弹药包装定型试验规程[S].  
GJB 4403—2002, Approval Test Procedure for the Ammunition Package[S].
- [22] 李良春, 王红卫, 关海奎. 海岛自然环境因素对弹药储存可靠性的影响[J]. 装备环境工程, 2003, 24(12): 65-66.  
LI Liang-chun, WANG Hong-wei, GUAN Hai-kui. Influence of Island Natural Environment Factors on Ammunition Storage Reliability[J]. Equipment Environmental Engineering, 2003, 24(12): 65-66.
- [23] 刘勇, 陈海涛, 刘润芳, 等. 弹药金属包装材料的腐蚀与防护综述[J]. 包装工程, 2020, 41(9): 232-237.  
LIU Yong, CHEN Hai-tao, LIU Run-fang, et al. Review of Corrosion and Anti-Corrosion of Ammunition Metal Packaging Materials[J]. Packaging Engineering, 2020, 41(9): 232-237.
- [24] 李良春, 刘仲权, 谢关友. 海岛部队弹药并行防腐蚀包装技术[J]. 腐蚀与防护, 2009, 30(8): 584-585.  
LI Liang-chun, LIU Zhong-quan, XIE Guan-you. Concurrent Anti-Corrosion Packaging Technology of Island Army Ammunition[J]. Corrosion & Protection, 2009, 30(8): 584-585.
- [25] 赵凯, 史慧芳, 刘辉. 弹药包装筒密封性高效自动检测技术[J]. 兵工自动化, 2017, 36(7): 91-93.  
ZHAO Kai, SHI Hui-fang, LIU Hui. High Efficient Automatic Detection Technology of Ammunition Packaging Box Sealing[J]. Ordnance Industry Automation, 2017, 36(7): 91-93.
- [26] 王佳. 弹药性能受温湿度影响研究[J]. 电子世界, 2019(11): 109.  
WANG Jia. Study on the Influence of Temperature and Humidity on Ammunition Performance[J]. Electronics World, 2019(11): 109.
- [27] 刘存礼, 原青云, 王彪. 新型弹药装备静电放电试验研究[J]. 军械工程学院学报, 2014, 26(5): 36-39.  
LIU Cun-li, YUAN Qing-yun, WANG Biao. Research on ESD Testing for New Ammunition Equipment[J]. Journal of Ordnance Engineering College, 2014, 26(5): 36-39.
- [28] 闫建林, 原青云, 孙永卫. 弹药库防静电方法研究[J]. 军械工程学院学报, 2014, 26(3): 40-43.  
YAN Jian-lin, YUAN Qing-yun, SUN Yong-wei. Study on Anti-Electrostatic Methods for Ammunition Depot[J]. Journal of Ordnance Engineering College, 2014, 26(3): 40-43.
- [29] 赵世宜, 陈金旺, 王胜, 等. 弹药运输中的静电危害与防护对策研究[J]. 装备环境工程, 2011, 8(3): 66-69.  
ZHAO Shi-yi, CHEN Jin-wang, WANG Sheng, et al. Research on the Countermeasures for Electrostatic Hazard and Its Prevention in Ammunition Transportation[J]. Equipment Environmental Engineering, 2011, 8(3): 66-69.
- [30] 刘超. 三聚氰胺甲醛复合物泡沫的制备与阻燃防静电性能的研究[D]. 石家庄: 河北师范大学, 2014.  
LIU Chao. Preparation of Melamine-Formaldehyde Composite Foam and Its Flame Retardant and Antistatic

- Properties[D]. Shijiazhuang: Hebei Normal University, 2014.
- [31] 宣兆龙, 傅孝忠, 戴祥军. 弹药包装的物流支持功能研究[J]. 物流技术, 2009, 28(4): 148-150.  
XUAN Zhao-long, FU Xiao-zhong, DAI Xiang-jun. Study on how the Ammunition Package to Support Materials Flow[J]. Logistics Technology, 2009, 28(4): 148-150.
- [32] 韩阳阳, 苏五星, 李建东. 电磁脉冲炸弹的威胁及雷达防护研究[J]. 电子信息对抗技术, 2014, 29(6): 69-74.  
HAN Yang-yang, SU Wu-xing, LI Jian-dong. Threat of Electromagnetic Pulse Bomb and Its Radar Countermeasure[J]. Electronic Information Warfare Technology, 2014, 29(6): 69-74.
- [33] 于雪艳, 陈正涛, 刘鹏, 等. 电磁屏蔽涂料的制备及性能评价[J]. 材料导报(纳米与新材料专辑), 2014(1): 203-207.  
YU Xue-yan, CHEN Zheng-tao, LIU Peng, et al. Preparation and Properties Evaluation of Electromagnetic Shielding Paint[J]. Material Review, 2014(1): 203-207.
- [34] 张小刚, 张贵恩. 新型导电纤维填充型电磁屏蔽塑料[J]. 山西化工, 2014, 34(2): 16-18.  
ZHANG Xiao-gang, ZHANG Gui-en. A New Conductive Fibre Filled Electromagnetic Shielding Plastic[J]. Shanxi Chemical Industry, 2014, 34(2): 16-18.
- [35] 王喜顺, 黄江平. 碳纤维/镍粉/聚丙烯复合材料的电磁屏蔽性能[J]. 塑料, 2015, 44(2): 22-25.  
WANG Xi-shun, HUANG Jiang-ping. Electromagnetic Shielding Properties of CF / Ni / PP Composite[J]. Plastics, 2015, 44(2): 22-25.
- [36] 张勇, 刘刚. 非晶态合金作为弹药包装电磁屏蔽材料可行性研究[J]. 科技风, 2010(15): 266.  
ZHANG Yong, LIU Gang. Feasibility Study on Using Amorphous Alloy as Electromagnetic Shielding Material for Ammunition Packaging[J]. Technology Trend, 2010(15): 266.
- [37] 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.
- [38] 傅孝忠, 张勇, 崔海萍, 等. 化学镀非晶态 Ni-Cu-P 合金镀层作为新型弹药包装材料的耐环境试验研究[J]. 包装工程, 2009, 30(2): 7-8.  
FU Xiao-zhong, ZHANG Yong, CUI Hai-ping, et al. Experimental Study on Environmental Resistance of Electroless Amorphous Ni-Cu-P Alloy Coating as a New Ammunition Packaging Material[J]. Packaging Engineering, 2009, 30(2): 7-8.
- [39] CHEN L, WANG C, FENG C, et al. Study on Random Initiation Phenomenon for Sympathetic Detonation of Explosive[J]. Defence Technology, 2013, 9(4): 224-228.
- [40] WIDLUND T. A New Packaging Design for the HEAT CS Sympathetic Detonation Test[J]. Insensitive Munitions & Energetics Materials Technology Symposium, 2015(5): 18-21.
- [41] 高方方, 杨豪杰, 陈尔余. 弹药防殉爆包装技术研究进展[J]. 包装工程, 2022, 43(13): 151-157.  
GAO Fang-fang, YANG Hao-jie, CHEN Er-yu. Research Progress of Anti-Sympathetic Detonation Packaging of Ammunition[J]. Packaging Engineering, 2022, 43(13): 151-157.
- [42] 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.
- [43] XIAO Y C, XIAO X D, FAN C Y, 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.
- [44] CUDZILO S, NITA M. Synthesis and Explosive Properties of Copper(II) Chlorate(VII) Coordination Polymer with 4-amino-1, 2, 4-triazole Bridging Ligand[J]. Journal of Hazardous Materials, 2010, 177(1/3): 146-149.
- [45] 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): 1-8.
- [46] SILVA A O D, WEBER R P, MONTEIRO S N, 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.
- [47] VIGNESH S, SURENDRAN R, SEKAR T. Ballistic Impact Analysis of Graphene Nanosheets Reinforced Kevlar-29[J]. Materials Today: Proceedings, 2020, 45: 788-793.
- [48] VOORT M M, HOOIJMEIJER P A, MEUKEN B, et al. Mitigation of Ammunition Effects by Application of Alternative Packaging Materials[J]. International Explosive Ordnance Symposium: "Integrating New Technologies for Explosive Ordnance Safety", Canberra, Australia, 2013, 3: 11-14.
- [49] 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 Sichuan Ordnance, 2019, 40(10): 190-194.