

精确制导航空弹药电磁防护包装研究

段世非¹, 孙德强¹, 谭一², 张毅³, 李国志¹

(1.陕西科技大学 a.中国轻工业功能印刷与运输包装重点实验室 b.中国轻工业纸基功能材料重点实验室 c.轻化工程国家级实验教学示范中心 d.3S 包装新科技研究所, 西安 710021;
2.北京城市学院, 北京 100083; 3.空军勤务学院, 江苏 徐州 221000)

摘要: 目的 研究精确制导弹药包装的防电磁能力, 设计出可行性的包装方案。方法 首先分析我军弹药包装的现状, 并对电磁脉冲炸弹的毁伤机理及防护策略进行探讨。然后依据 Schelkunoff 电磁屏蔽理论, 对各种包装材料和电磁屏蔽材料进行比较。结果 塑木复合材料成本低廉、原料丰富、性能优异、绿色环保; 镍-磷非晶态合金材料导电性好, 工艺简单, 镀层性能优良, 附着力良好。结论 以塑木复合材料作为包装箱材料, 以镍-磷非晶态合金作为包装箱涂层, 是精确制导航空弹药包装一个较为理想的选择。

关键词: 防电磁包装; 航空弹药; 塑木复合材料; 镍-磷非晶态合金

中图分类号: TB485.9 文献标识码: A 文章编号: 1001-3563(2020)15-0070-05

DOI: 10.19554/j.cnki.1001-3563.2020.15.011

Electromagnetic Shielding Packaging of Precision-guided Aviation Ammunition

DUAN Shi-fei¹, SUN De-qiang¹, TAN Yi², ZHANG Yi³, LI Guo-zhi¹

(1a.Key Lab of Functional Printing and Transport Packaging of China National Light Industry b.Key Lab of Paper Based Functional Materials of China National Light Industry c.National Demonstration Center for Experimental Light Chemistry Engineering Education d.3S Research Institute of Novel Packaging Science and Technology, Shaanxi University of Science & Technology Xi'an 710021, China; 2.Beijing City University, Beijing 100083, China; 3.Air Force Logistics College, Xuzhou 221000, China)

ABSTRACT: The work aims to study the electromagnetic shielding capability of precision-guided ammunition packaging to design a feasible packaging scheme. First, the present situation of ammunition packaging in our army was analyzed, and the damage mechanism and protection strategy of electromagnetic pulse bomb were discussed. Then, various packaging materials were compared with the electromagnetic shielding materials based on theory of Schelkunoff electromagnetic shielding. The plastic wood composite materials were featured by low cost, abundant raw materials, excellent properties and environment friendliness. Ni-P amorphous alloy had the merits of high conductivity, simple procedure, excellent properties and better adhesive force in cladding material. It is a more ideal choice for precision-guided aviation ammunition packaging to use the plastic wood composite material as the material of packaging box and the Ni-P amorphous alloy as the coating of packaging box.

KEY WORDS: electromagnetic shielding packaging; aviation ammunition; plastic wood composite materials; Ni-P amorphous alloy

收稿日期: 2019-11-12

作者简介: 段世非 (1995—), 男, 陕西科技大学硕士生, 主攻包装系统设计。

通信作者: 李国志 (1979—), 男, 陕西科技大学副教授, 主要研究方向为包装材料结构与系统设计。

随着科学技术的飞速发展, 现代战争的理念、形态、作战样式已经发生了深刻变化。现代战争必然是在复杂电磁环境下的作战, 在追求制电磁权的同时, 必须同时做好电磁防护工作, 尤其是对于电磁进攻武器的防护。精确制导航空弹药信息化程度高、结构精密复杂、作战费效比高, 已经成为空军作战的主要力量。具有攻击性的电磁脉冲对于大量运用电子元器件的精确制导弹药是一个极大的威胁, 尤其是电磁脉冲炸弹已经投入实战, 非常有必要对其防护问题进行研究。

1 研究现状

现阶段我军精确制导航空弹药包装的特点可以概括为品种多、类别杂、形状结构不同、材料工艺各异^[1-2]。与此同时, 航空弹药包装防护性能差、制造材料单一、保障困难等问题也比较突出。经查阅资料发现, 目前国内对精确制导航空弹药防电磁脉冲包装的研究还比较缺乏。

弹药包装直接关系弹药战术性能的保持, 进而影响武器系统效能的充分发挥。良好的包装不仅能对弹药提供可靠的防护, 而且能够显著提高弹药保障的效率。文中对精确制导弹药防电磁脉冲武器攻击的包装进行研究和探讨, 设计出可行性的电磁防护包装。

2 电磁脉冲炸弹毁伤机理及防护策略

电磁脉冲炸弹是新概念武器, 它将电磁频谱能量集中投射, 对敌方雷达、导弹导引头、无线电通信、导航系统等多类目标实施破坏, 并造成微波同频段的严重干扰。当脉冲功率超过一定值时, 造成系统的电子元器件损坏甚至可对人体造成永久性毁伤, 见图 1。

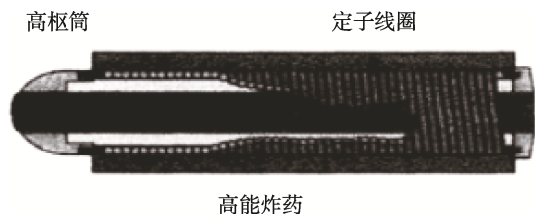


图 1 电磁脉冲炸弹结构
Fig.1 Electromagnetic pulse bomb structure

2.1 毁伤机理

电磁脉冲炸弹可以通过人体和电子设备对电磁辐射的电磁场感应效应及生物效应进行杀伤^[3], 轻则使通信、雷达、导航、敌我识别和计算机网络等系统的微波器件, 小型计算机芯片的性能显著下降或失效, 重则能引起非线性效应, 在瞬间摧毁目标, 引爆炸弹、导弹、核弹等武器, 从而破坏整个武器系统。对于作战人员, 会导致神经紊乱、情绪烦躁不安、记

忆力衰退、行为错误等现象。重则人体出现痉挛或失去知觉, 甚至出现致盲、致聋、心肺功能出现衰竭等严重现象^[4]。

研究表明, 电磁脉冲炸弹的毁伤效果受到炸弹杀伤力、能量耦合方式、爆炸高度、目标防护性能等因素的制约, 可据此对电磁脉冲炸弹的防护策略进行研究。

2.2 电磁脉冲防护策略

针对电磁脉冲的防护, 主要可以从 3 个方面入手: 抑制干扰源、降低耦合效率、防护关键部件。

1) 抑制干扰源。通过电磁脉冲炸弹投放之前摧毁载机这种方法能够确保己方不受电磁脉冲的攻击, 但是这种防护实现难度高, 所以必须对可能承受电磁脉冲攻击的目标进行其他形式的防护。

2) 切断耦合途径。在攻击电子设备时, 只有当爆炸能量被耦合进入目标时, 电磁脉冲炸弹才能造成有效杀伤。在强大的耦合电压下, 一般包封半导体装置无法正常运行。降低耦合效率主要措施有屏蔽防护、孔洞防护、传输线防护、滤波防护、接地处理等方法。

3) 防护关键部件。对于系统中某些关键部件, 有必要进行二次电磁防护, 这样可以提高系统在受到电磁脉冲攻击后继续工作的可靠性^[5]。如用质量轻的编织金属丝包裹线缆、射频电路加装屏蔽腔体、通讯接口加装光耦隔离等。

3 防电磁包装分析

3.1 外包装材料

长期以来, 我军精确制导航空弹药包装大多采用木质包装, 木材具有质量轻、缓冲性较好、易于加工等优点; 其局限性也十分明显, 我国缺乏制造弹药包装的优质木材资源, 木质包装箱具有强度低、易霉腐、易虫蛀、密封性差、防护性能差等缺点, 它已经不适应于新型弹药包装的需求。后来部分弹种用钢质包装箱取代了木质包装箱, 但钢质包装箱也存在重量大、易锈蚀、易滑动、缓冲隔热性能差等制约其发展的劣势。

近年来工程塑料作为一种新型材料, 被应用于弹药包装。塑木复合材料是将废旧塑料和废旧木质纤维混合, 并加入一定比例的特制粘结剂, 经高温高压处理而成^[6], 这种材料既有类似木材硬度高、寿命长的优点, 又具备塑料耐腐蚀、灵活性的特点。木质、钢质、塑木复合材料等 3 种包装箱的部分特性^[7]见表 1。

从表 1 可以看出, 塑木复合材料相比于木质和钢质材料, 其各项性能都比较优越, 但因其为非导体, 因而不能阻碍电磁波干扰, 需要采用优越的电磁导体进行保护。对被保护体进行电磁屏蔽是防护电磁辐射

表 1 3 种包装特性对比
Tab.1 Comparison of three kinds of packaging features

包装箱	强度	结构稳定性	生产成本	吸水性	耐酸碱性	耐环境污染	堆垛稳定性	可回收性
木质	一般	一般	较高	高	差	较差	差	很差
钢质	高	高	高	不吸水	差	差	较差	较差
塑木复合材料	高	高	低	不吸水	好	好	较好	100%回收

最常用、最有效的手段。电磁屏蔽指电磁波的能量被材料表面反射或吸收而使其传播受阻或减少,进而减弱源电磁场的辐射效果^[8],通常用屏蔽效能(SE)表示,其单位为 dB,值越大,屏蔽效能越好,见图 2。

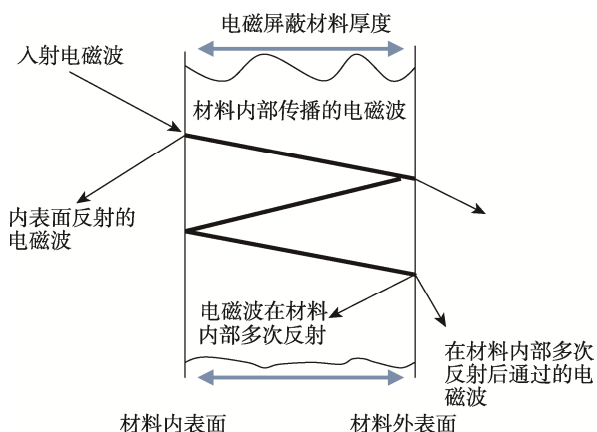


图 2 电磁屏蔽机理

Fig.2 Electromagnetic shielding mechanism

电磁波入射到材料表面时,会发生吸收、反射、内部反射和透射,屏蔽效应是其反射能和内部吸收能的综合。根据 Schelkunoff 电磁屏蔽理论,电磁波入射到物体上的能量损耗可分为反射损耗、吸收损耗和多次反射损耗,总的衰减包括这 3 部分之和,用公式表示为:

$$M_T = E_R + E_A + E_M \quad (1)$$

式中: E_R 为反射损耗; E_A 为吸收损耗; E_M 为多次反射损耗。其中:

$$E_R = 168 - 10 \log \sqrt{\mu_r f / \sigma_r} \quad (2)$$

$$E_A = 1.3t \sqrt{f \cdot \mu_r \cdot \sigma_r} \quad (3)$$

$$E_M = 20 \log \sqrt{1 - e^{-2t/\delta}} \quad (4)$$

式中: μ_r 为材料的相对于真空的磁导率; σ_r 为材料相对于理想铜的电导率; f 为电磁波的频率; t 为屏蔽层厚度; e 为自然常数, $e \approx 2.71828$; δ 为趋肤深度, $\delta = (\pi f \mu \sigma)^{-1/2}$, μ 和 σ 分别为材料的磁导率和电导率。

综合式(2—4)可知,在电磁波频率和材料厚度一定时,材料导电率增加,反射损耗和吸收损耗增加,总的电磁波能量衰减增加;材料磁导率增加,一方面使得吸收损耗增加,另一方面却又能使反射损耗减少,二者叠加总的效果是先减小后增大。

按照 SE 值大小可将电磁屏蔽材料分为以下几类,见表 2。

表 2 电磁波衰减分级标准
Tab.2 The electromagnetic wave attenuation classification standard

SE 值/dB	衰减程度	用途
0	无	
≤ 10	差	
10~30	较差	可用于一般工业或商业用电子产品
30~60	中等	可用于航空航天及军用仪器设备的屏蔽
60~90	良好	
≥ 90	优	适用于高精度、高敏感要求的产品

在弹药包装箱内表面喷涂电磁屏蔽涂料^[9]是实现可靠电磁屏蔽的一种经济有效的处理方式。由于是用于精确制导航空弹药的包装,所以必须选用屏蔽效能 ≥ 60 dB 的材料。下面列举了部分常见电磁屏蔽材料的特点^[10—11],见表 3。

从表 5 可以看出,化学镀镍-磷非晶态合金、超细不锈钢纤维(SSF)、短切石墨镀镍纤维(NCF)这 3 种屏蔽材料的各项性能都比较优越,但 SSF 和 NCF 不适合塑木包装材料包装,因此选择化学镀镍-磷非晶态合金。

4 化学镀镍-磷非晶态合金的电磁屏蔽性能

4.1 理论基础

非晶态合金镀层通常采用液体急冷法、气相沉淀法、溶液电子镀(电镀、化学镀)法等制备。其中,化学镀方法是获得非晶态合金最经济、简单并可实现大面积镀覆的方法^[12—13]。

化学镀是靠溶液中的化学剂使金属离子还原为金属沉淀在包装表面的化学还原过程,需要不断补充还原剂来保持氧化过程的不断进行,以获取所需要的镀层厚度。

由式(4)可以看出, E_M 值始终是负数。 E_M 值随着镀层厚度的减少而减小,电磁辐射的频率增加而增加,因此,通过控制镀层的厚度,提高镀层的导电性能,可以提高包装的屏蔽效率,从而减弱电磁波干扰的影响。

4.2 镀液组成

化学镀镍磷合金所用的溶液见表 4。

表 3 常见电磁屏蔽材料特点
Tab.3 Characteristics of common electromagnetic shielding materials

材料（方法）	优点	缺点
银系导电涂料	导电性好，稳定性好	价格高
碳素系导电涂料	价格低	导电性差
铜系导电涂料	导电性好，价格低	易氧化，导电性不稳定
银铜复合系导电涂料	导电性好	价格较高
熔射金属法	导电性好	附着力差，工艺复杂
阴极溅镀法	导电性好，适用范围广	成本高
贴金属箔	导电性好，附着性好	复杂形状操作困难
还原银	导电性好，设备费低	工艺复杂
导电塑料	成型与屏蔽一体，价格低	导电性较差，强度低
加金属网	成本低，工艺简单	网眼会降低屏蔽效果
化学镀镍-磷非晶态合金	导电性好，工艺简单，镀层性能优良，良好的附着力	无
超细不锈钢纤维（SSF）	成本低，易加工，屏蔽效能高，不易氧化	无
短切石墨镀镍纤维（NCF）	成本低，易加工，屏蔽效能高，不易氧化，屏蔽频率范围宽，可抗 EMP、雷击、脉冲毁伤	无

表 4 镀液组成
Tab.4 Plating solution composition

镀液	$\text{NiSO}_4 \cdot 6\text{H}_2\text{O}/$ ($\text{g} \cdot \text{L}^{-1}$)	$\text{NaH}_2\text{PO}_2 \cdot \text{H}_2\text{O}/$ ($\text{g} \cdot \text{L}^{-1}$)	络合剂/ ($\text{mL} \cdot \text{L}^{-1}$)	添加剂/ ($\text{mL} \cdot \text{L}^{-1}$)	稳定剂/ ($\text{mL} \cdot \text{L}^{-1}$)	pH 值	温度/ $^{\circ}\text{C}$
参数值	25~30	28~35	40~50	1~6	0.5~1.0	4.2~4.8	80~90

注：络合剂为有机羧酸，添加剂为无机盐，稳定剂为重金属盐

4.3 化学镀镍-磷非晶态合金镀层的电磁屏蔽效能

使用射频一体化矢量网络分析仪对镀层进行电磁屏蔽效能的测量，测试的手段是根据我国军用屏蔽效能测量标准 GB-SJ 20524—1995，在频率为 300 Hz~3.0 GHz 范围内得到镀层电磁波屏蔽特性曲线，见图 3。不难看出，在 300 MHz~3.0 GHz 电磁波频率范围

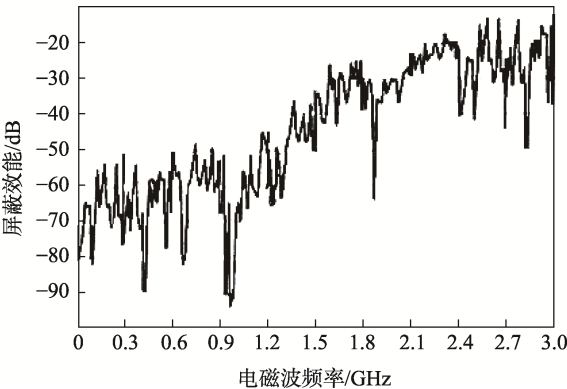


图 3 镀层电磁波屏蔽特性曲线
Fig.3 Electromagnetic wave shielding characteristic curve of coating

内的屏蔽效能都基本大于 25 dB，超出 GJB 2605—1996^[14]中的要求，因此，化学镀镍-磷非晶态合金完全满足弹药包装电磁防护的要求。

5 化学镀镍-磷非晶态合金镀层的其他性能

精确制弹药使用和储存的环境是极其复杂的，因此在保证弹药包装电磁防护的同时，也综合考虑其在现实环境中的其他性能。

- 1) 优异的化学性能。在腐蚀介质中不存在晶间腐蚀，对于特殊环境下引起的点腐蚀也能有效抑制其发展。
- 2) 良好的磁学性能，磁导率好磁感应强度高，矫顽力和损耗较低。
- 3) 可以在金属或非金属上制备非晶态合金镀层，消耗能量低，适合连续作业。
- 4) 结合力高，可达 300~400 MPa，不易出现脱皮的情况。
- 5) 适用温度范围广^[15]，工作温度在-80~800 ℃之间。

6) 耐磨性好, 镀层硬度高。一般硬度可达到 HV500°~1100° (HRC65~70), 且摩擦因数小, 耐磨性明显。

利用塑木复合材料可以制成滑木箱、框架木箱等容装, 镍-磷非晶态合金涂敷镀层可根据不同的使用需求通过丝网涂敷、屏蔽膜镀制等工艺加工于这些木箱容器之上, 以获得所需的电磁屏蔽效能。

6 结语

塑木复合材料因其良好的性能和低廉的成本等优点在弹药包装应用领域发展迅速, 电磁屏蔽材料是镍-磷非晶态合金一个充满潜力的应用领域。文中提出的方案: 以塑木复合材料作为包装箱材料, 以镍-磷非晶态合金作为包装箱涂层来提高包装箱的电磁防护性能。该方案具有成本较低、工艺简单、电磁防护性能优良的优点, 是精确制导航空弹药包装一个较为理想的选择。

参考文献:

- [1] 高廷如, 高欣宝, 付孝忠. 我军弹药包装现状与发展设想[J]. 中国包装, 2000(2): 9—12.
GAO Ting-ru, GAO Xin-bao, FU Xiao-zhong. The Present Condition and Development Ideas for Ammunition Packaging in China Army[J]. China Packaging, 2000(5): 9—12.
- [2] 姚恺, 代华, 高欣宝, 等. 人机工程学在弹药包装设计中的应用[J]. 军械工程学院学报, 2015, 17(2): 7—9.
YAO Kai, DAI Hua, DAO Xin-bao, et al. Application on Safety Ergonomics to Ammunition Packaging Design[J]. Journal of Ordnance Engineering College, 2015, 17(2): 7—9.
- [3] 刘兴堂. 信息化战争与高技术兵器[M]. 北京: 国防工业出版社, 2009: 151—152.
LIU Xing-tang. Information War with High Technology Weapon[M]. Beijing: National Defence Industry Press, 2009: 151—152.
- [4] 潘智勇, 张慧, 吴中伟, 等. 电磁屏蔽织物材料研究进展[J]. 科技导报, 2009, 27(24): 86—91.
PAN Zhi-yong, ZHANG Hui, WU Zhong-wei, et al. Advances of Studies on Electromagnetism Shielding Fabric[J]. Science & Technology Review, 2009, 27(24): 86—91.
- [5] 韩阳阳, 苏五星, 李建东, 等. 电脉冲磁炸弹的威胁及雷达防护研究[J]. 电子信息对抗技术, 2014, 29(6): 70—73.
HAN Yang-yang, SU Wu-xing, LI Jian-dong, et al. Electromagnetic Pulse Bomb Threat and Radar Protection Research[J]. The Technology of Electronic Information Confrontation, 2014, 29(6): 70—73.
- [6] 孙占英, 李大纲, 吴正元, 等. 自然气候条件下木塑复合材料性质的变化[J]. 木材工业, 2006(5): 17—19.
SUN Zhan-ying, LI Da-gang, WU Zheng-yuan, et al. Property Changes of Wood-plastic Composites under Outdoor Weathering[J]. China Wood Industry, 2006(5): 17—19.
- [7] 李忠明, 杨鸣波. 秸秆/聚丙烯复合材料[J]. 塑料工业, 2000, 28(4): 9—11.
LI Zhong-ming, YANG Ming-bo. Composite of Wheat Straw/PP[J]. China Plastics Industry, 2000, 28(4): 9—11.
- [8] 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, 2014, 28(5): 203—206.
YU Xue-yan, CHEN Zheng-tao, LIU Peng, et al. The Preparation of Electromagnetic Shielding Coatings and the Evaluation of the Performance[J]. Material Review, 2014, 28(5): 203—206.
- [9] 刘卫东. 电磁屏蔽原理与电磁屏蔽材料[J]. 消费导刊, 2014(8): 199.
LIU Wei-dong. The Principle of Electromagnetic Shielding and Electromagnetic Shielding Materials[J]. Consumption Tribune, 2014(8): 199.
- [10] 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(8): 256.
ZHANG Yong, LIU Gang. Amorphous Alloy as Ammunition Packaging Feasibility Study on the Electromagnetic Shielding Materials[J]. Technology Wind, 2010(8): 256.
- [11] 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—17.
ZHANG Xiao-gang, ZHANG Gui-en. New Filling Type Electromagnetic Shielding Conductive Fiber Plastic[J]. Shanxi Chemical Industry, 2014, 34(2): 16—17.
- [12] 张勇, 安振涛. 非晶态合金镀层在弹药包装的应用探讨[J]. 包装工程, 2006, 27(5): 85—86.
ZHANG Yong, AN Zhen-tao. Application of Amorphous Alloy Plating in Ammunition Packaging[J]. Packaging Engineering, 2006, 27(5): 85—86.
- [13] 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—23.
WANG Xi-shun, HUANG Jiang-ping. Carbon Fiber-Nickel Powder-electromagnetic Shielding Properties of Polypropylene Composites[J]. Plastic, 2015, 44(2): 22—23.
- [14] 傅效忠, 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. Electroless Amorphous Ni-Cu-P Alloy Coating as the Experimental Study on the New Ammunition Packaging Materials Resistant to Environment[J]. Packaging Engineering, 2009, 30(2): 7—8.
- [15] 姜晓霞, 沈伟. 化学镀理论与实践[M]. 北京: 国防工业出版社, 2000: 203—208.
JIANG Xiao-xia, SHEN Wei. Theory and Practice of Chemical Plating[M]. Beijing: National Defence Industry Press, 2000: 203—208.