

## 旋转模塑技术在箱式后勤装备研制上的应用

匡小平, 于战果, 廖荣民

(军事交通学院, 天津 300161)

**摘要:** 通过对比分析与计算,发现滚塑箱具有成本、质量、性能等方面的优势,能够满足箱式后勤装备的战术技术指标和野战条件下设备的包装防护、集装承载和携行运输的需要,提出了将旋转模塑技术广泛应用于箱式后勤装备的研制。研究了适宜箱式后勤装备制造所用原材料——共混改性聚乙烯,并介绍了旋转模塑技术及其制造工艺。

**关键词:** 箱式后勤装备; 聚乙烯; 共混改性; 旋转模塑

**中图分类号:** 文献标识码: A 文章编号: 1001-3563(2011)23-0054-06

## Application of Rotational Modeling Technology in Development of Box Logistic Equipment

KUANG Xiao-ping, YU Zhan-guo, LIAO Rong-min

(Academy of Military Transportation, Tianjin 300161, China)

**Abstract:** Through comparison and analysis, it was found that has advantages in aspects of cost, mass and capability; it can meet the technique indicators of box logistic equipment and satisfy protective packaging, containerizing loading and carried transportation of facilities for field use. Rotational modeling technology was put forward for manufacturing of box logistic equipment. The modified polyethylene resin with blending and modification for manufacturing of box logistic equipment was studied; rotational modeling technology and its processes were introduced.

**Key words:** box logistic equipment; polyethylene; blending and modification; rotational modeling

箱式后勤装备是指主要用于野战条件下战术部(分)队保障设备的包装防护、集装承载和携行运输,具有一定防护能力,并且适于人工及机械装卸搬运的采用箱式结构的一类后勤装备。长期以来,我军箱式后勤装备普遍存在着研制执行标准不统一、尺寸规格差别较大、选用材料多样化、集装集成程度不够、通用模块化水平不高等问题。随着我国综合国力的提高,后勤装备建设得到了飞速发展。现代高技术战争是战术范围内的战略行为,由大集团、大纵深转变到精确打击,重点强调装备的快速反应能力,变过去的散件堆放、单件请领方式为携行、伴随方式,以解决散装设备和器材的快速保障问题;变过去散件简易包装运输方式为集成装箱携行方式,以解

决部队快速机动问题。基于以上变化,小型、轻便、可分解组合的后勤装备和器材的携行包装方式及手段,必须做出相应调整,小型、轻便可分解组合的后勤装备采用箱式结构也是后勤各专业和军兵种后勤的客观要求,这也是全面做好后勤军事斗争准备的一项重要内容。

旋转模塑是一种成型中空塑料制品的工艺方法,也称旋转成型或滚塑。箱式后勤装备通用箱体采用滚塑加工工艺一次成型,再辅以定型、安装、内饰等工艺处理后,能够保证箱体的密封性及整体性,而且旋转成型的箱体角部较厚,具有更优异的抗冲击性能,能够满足野战条件下战术部(分)队保障设备的包装防护、集装承载和携行运输的需要,并且还能根据需

收稿日期: 2011-07-08

作者简介: 匡小平(1975—),女,湖南邵阳人,军事交通学院讲师,主要从事车辆装备器材管理。

求进行功能扩展。

## 1 各种材质箱体的对比分析

### 1.1 基础指标、战技指标和经济性指标对比分析

无论是我国包装行业还是军品箱式装备,一般箱体常用材质有实木板、人造板、滚塑板、瓦楞纸板、金属等<sup>[1]</sup>

#### 1.1.1 实木箱

实木箱是实木板钉制而成的箱。

优点:坚固刚强、工艺简单、可回收利用,在我国出口包装中广泛应用。

缺点:一是缓冲性差,必须内填缓冲材料才能保证内装器材不受损坏;二是密封性差,由于木条间缝隙的存在,为了防雨必须在内部应用塑料袋或油毡;三是耐腐蚀性差,不耐油,存放时对防潮、防湿、防霉条件要求非常苛刻;四是不便于内部机具设备的安装固定;五是资源紧张,且所需木材要经过 100℃ 高温下 3~5 d 蒸汽烘干处理,使木材中水分小于 8% 才能完全杀死包括虫卵在内的各种有害生物,成本高、难度大。

#### 1.1.2 人造板箱

人造板是以木材或其他非木材植物为原料,经一定机械加工分离成各种单元材料后,施加或不施加胶粘剂和其他添加剂胶合而成的板材或模压制品。主要包括胶合板、刨花(碎料)板和纤维板等 3 大类。

优点:一是人造板箱在抗压、承重性上仅次于实木箱;二是板材面积大,结构性好,操作工艺简单,因此密封性和临时防水性好;三是免熏蒸,满足含水率小于 8% 的要求;四是表面光滑,易于印文字。

缺点:胶层易老化,不耐油,长期承载能力差,使用期限比实木箱短。成本比实木板、塑料板便宜,但比瓦楞纸、蜂窝纸高,并且不便于内部机具设备的安装固定。

#### 1.1.3 瓦楞纸板箱

瓦楞纸板是由瓦楞纸芯和面纸粘合而成的。瓦楞纸板按其面纸和芯纸的总层数可分为单瓦楞、双瓦楞和多瓦楞等形式,层数越多、板越厚,强度越高。

优点:质轻,缓冲性能好,价格便宜、资源丰富,便

于回收利用和废弃处理,同时表面非常光滑平整,易于印刷文字。

缺点:一是抗戳穿能力比木板、人造板、滚塑板都差;二是瓦楞纸板抗折弯能力各向不同,横向抗弯折强度是纵向的 29 倍,堆码时底层瓦楞纸板箱容易膨胀变形;三是只能装载不太重的货物,国家标准要求 5 层瓦楞纸板箱载重不得超过 55 kg,7 层瓦楞纸板箱载重超过 70 kg 时要加内衬硬板,所以箱体大小受到限制;四是防潮性差,怕雨淋。

#### 1.1.4 滚塑箱

滚塑箱是用滚塑模铸而成的,除具有高拉伸强度和冲击韧性外,还具有较好的耐高、低温性能和阻燃特性,可以用来代替金属用于机械零部件和工程上的一种塑料。

优点:容易成形,表面特性较好,易于清洗,可重复使用,特别适用于仪器仪表检测类设备的包装和存放,在铸塑夹筋或内部架设金属框架的情况下,其刚度和强度将得到显著的提高。

缺点:长时间受力易发生蠕变、不易再生。

#### 1.1.5 金属箱

目前国内通常用于设备、器材、弹药包装及承载的金属箱体材质是铁(钢)和铝。

优点:强度高,坚固耐用,承载能力大,抗戳穿能力好;表面油漆涂覆或静电喷塑处理,美观、抗氧化,无须维护,使用寿命长;表面经过环保处理,卫生免疫、周转、存放和回收均不污染环境;配合叉车、升降机、吊车等设备可进行高效作业。制造成本与木质箱、滚塑箱相当。

缺点:密度大,保温性差。

通过查找相关文献资料和与相关专业人员的交流,以及咨询相关专家,得出各种材质箱体的性能指标对比结果见表 1。

## 1.2 金属材料与滚塑箱体性能和参数对比

金属材料箱体是我军目前广泛使用的设备承载和防护包装箱,滚塑箱是新兴的制造工艺,因此,有必要将其与滚塑箱体性能对比分析。选取了 1 000 mm × 600 mm × 800 mm 这一尺寸进行了主要参数(包括体积、质量和荷重比)的计算。

金属材料与滚塑箱体性能参数对比见表 2。

表 1 不同材质箱体各项性能指标对比

Tab. 1 Comparison of different material box in performance indicators

| 序号 | 项目    | 木质箱  | 钢质箱 | 铝质箱 | 铝塑板箱 | 注塑、吹塑 | 玻璃钢箱 | 滚塑箱 |
|----|-------|------|-----|-----|------|-------|------|-----|
| 1  | 重量    | 一般   | 很重  | 较重  | 较轻   | 轻     | 重    | 轻   |
| 2  | 手感    | 较好   | 较差  | 差   | 较差   | 较好    | 一般   | 好   |
| 3  | 强度刚度  | 差    | 高   | 较高  | 一般   | 差     | 较差   | 较高  |
| 4  | 承重能力  | 差    | 大   | 一般  | 差    | 一般    | 一般   | 大   |
| 5  | 耐用性   | 差    | 一般  | 一般  | 差    | 一般    | 差    | 高   |
| 6  | 抗冲击性  | 差    | 较差  | 差   | 差    | 一般    | 一般   | 很好  |
| 7  | 抗戳穿能力 | 差    | 高   | 一般  | 较差   | 差     | 一般   | 高   |
| 8  | 耐腐蚀性  | 差    | 差   | 差   | 差    | 好     | 好    | 好   |
| 9  | 抗老化性能 | 一般   | 好   | 好   | 较好   | 差     | 较好   | 较好  |
| 10 | 密封性能  | 差    | 一般  | 一般  | 差    | 好     | 差    | 好   |
| 11 | 阻燃性能  | 差    | 很好  | 很好  | 较好   | 较差    | 好    | 好   |
| 12 | 隔热性能  | 差    | 很差  | 较差  | 较差   | 一般    | 较好   | 好   |
| 13 | 环境适应性 | 差    | 一般  | 一般  | 差    | 差     | 差    | 好   |
| 14 | 野战适用性 | 差    | 一般  | 一般  | 差    | 一般    | 一般   | 很好  |
| 15 | 材料来源  | 木材   | 矿石  | 矿石  | 复合   | 化工    | 化工   | 化工  |
| 16 | 材料回收  | 不可   | 可回收 | 可回收 | 部分回收 | 部分回收  | 不可   | 可回收 |
| 17 | 使用维护  | 难维护  | 费用高 | 费用高 | 难维护  | 免维护   | 免维护  | 免维护 |
| 18 | 循环使用  | 有限重复 | 能   | 能   | 有限重复 | 有限重复  | 有限重复 | 能   |
| 19 | 环保性   | 一般   | 较差  | 较差  | 一般   | 一般    | 差    | 好   |
| 20 | 运输经济性 | 差    | 差   | 一般  | 好    | 好     | 一般   | 好   |
| 21 | 寿命成本  | 一般   | 高   | 低   | 一般   | 一般    | 一般   | 低   |
| 22 | 使用成本  | 较高   | 高   | 高   | 低    | 低     | 很高   | 一般  |
| 23 | 综合性价比 | 差    | 差   | 一般  | 一般   | 一般    | 差    | 高   |

注:文中提到的滚塑箱的原材料为共混改性聚乙烯。

表 2 金属材料与滚塑箱体参数对比

Tab. 2 Comparison of metal and rotational modeling box parameters

| 项目                       | 钢板箱                 | 铝板箱                 | 滚塑箱                  |
|--------------------------|---------------------|---------------------|----------------------|
| 外尺寸/mm                   | 1000×600×800        | 1000×600×800        | 1000×600×800         |
| 内尺寸/mm                   | 940×540×750         | 940×540×750         | 926×526×730          |
| 单箱净质量/kg                 | 38.756              | 13.416              | 17.17                |
| 外体积/m <sup>3</sup>       | 0.48                | 0.48                | 0.48                 |
| 内体积/m <sup>3</sup>       | 0.38                | 0.38                | 0.356                |
| 密度/(kg·m <sup>-3</sup> ) | 7.8×10 <sup>3</sup> | 2.7×10 <sup>3</sup> | 0.93×10 <sup>3</sup> |
| 限定最大总质量/kg               | 100                 | 100                 | 100                  |
| 荷重比                      | 0.612               | 0.866               | 0.828                |

### 1.3 分析结论

由分析结果可知,滚塑箱具有成本、质量、性能等方面的优势,军事经济效益明显,满足箱式后勤装备的战术技术性能指标,满足野战条件下战术部分保障设备的包装防护、集装承载和携行运输的需要,符

合日益突出的多样化军事行动对装备防护包装的要求。提出将旋转模塑技术广泛应用于箱式后勤装备通用箱体的生产制造,以解决我军箱式后勤装备选材多样化的问题。

## 2 滚塑原材料与箱式后勤装备滚塑专用料

### 2.1 滚塑原材料

旋转模塑原料主要有聚乙烯、聚氯乙烯、尼龙、聚丙烯、聚苯乙烯、聚碳酸酯、ABS 和聚甲醛等<sup>[2]</sup>。其中,聚乙烯(PE)是最主要的旋转模塑原料,目前仍占据世界旋转模塑原料总用量的 90%左右<sup>[3]</sup>,国内旋转模塑原料中 PE 占到了 99%<sup>[4]</sup>。PE 为线性聚合物,相对分子质量从一万到几百万不等,通常按照密度分为低密度聚乙烯(LDPE)、线性低密度聚乙烯(LLDPE)和高密度聚乙烯(HDPE)。它们的密度分别为 0.910~0.930 g/cm<sup>3</sup>,0.930~0.940 g/cm<sup>3</sup> 和 0.940~0.960 g/cm<sup>3</sup>。

## 2.2 共混改性

不同密度聚乙烯(LDPE, LLDPE, HDPE)在结构和分子质量等方面的差异使得它们的热性能、力学性能等也有明显的差异,对它们进行共混改性之后能够提高综合性能。国内研究最多的是 LLDPE 与 HDPE 的共混改性。共混改性可以采取 2 种工艺:将 LLDPE 粒料和 HDPE 粒料分别研磨后高速混合;将 LLDPE 粒料和 HDPE 粒料掺和后经挤出机造粒后再研磨。由于前一种工艺分散效果较差,使得制品的性能较差,而后一种工艺共混料制品性能十分优异,因此,在做配比分析时常采用后一种工艺。

早在 1996 年,邱桂学等人就对 LLDPE 与 HDPE 的共混改性进行了研究<sup>[5]</sup>,藏群传等人也研制了聚乙烯共混改性滚塑专用料<sup>[6]</sup>。随后,田丰等人也先后研究了聚乙烯共混改性滚塑专用料<sup>[7]</sup>,刘圣军等人曾将 2 种通用的 LLDPE 分别与 1 种 HDPE 按不同质量配比进行共混改性,获得了 2 种适宜国内旋转模塑工业的共混改性专用树脂<sup>[8]</sup>。这些研究都充分证明,在合理的配比情况下,共混料的综合性能有所提高,超过任何单独一种 LLDPE 或 HDPE。

## 2.3 箱式后勤装备滚塑专用料

箱式后勤装备通用箱体制造所用共混改性聚乙烯材料,即为线性低密度聚乙烯(LLDPE)和高密度聚乙烯(HDPE)的复混料,密度在  $0.935 \sim 0.940 \text{ g/cm}^3$  之间,该材料除具有一般聚烯烃树脂的性能外,其抗张强度、抗撕裂强度、耐环境应力、耐高低温等方面的性能更为优越。相比于其他材料,该材料柔韧性强,重量适中,耐环境性强,化学稳定性好,绝缘性能好,抗冲击性较好,吸水性和防火、阻燃、抗老化性能优良。具有成本、质量、性能等方面的优势,该工艺生产的产品永不变形、不褪色,使用寿命可达 20 年,且材料能够循环利用,环保性能好。经过配比分析,其性能指标能够达到表 3 中的要求,是目前滚塑箱体原材料的最佳选择。

表 3 性能指标

Tab.3 Performance indicators

| 项目   | 指标          |
|--|-------------|
| 熔融指数/ $(\text{g} \cdot (10 \text{ min})^{-1})$ | 3~7         |
| 密度/ $(\text{g} \cdot \text{cm}^{-3})$          | 0.935~0.940 |
| 脆度/ $^{\circ}\text{C}$                         | <-80        |
| 拉伸(屈服)强度/MPa                                   | $\geq 27$   |
| 冲击强度/ $(\text{kJ} \cdot \text{m}^{-2})$        | $\geq 8$    |
| 弯曲模量/MPa                                       | $\geq 700$  |
| 邵氏硬度/HD  | $\geq 42$   |
| 抗环境开裂性/Hrs                                     | >200        |

## 3 旋转模塑技术及工艺

### 3.1 旋转模塑技术

旋转模塑是一种成型中空塑料制品的工艺方法,也称旋转成型或滚塑,它是将定量的粉状原材料装入冷态的模具中,由滚塑机带动模具绕 2 根互相垂直的转轴进行缓慢地公转和自转,同时用外加热源加热模具,从而使原材料熔融并借助自身的重力均匀地涂布于整个模具内腔表面,最后经冷却脱模后得到制品的方法。具有设备和模具投资少、适合于大中型或形状复杂塑料制品的生产、产品几乎无应力等优点<sup>[9]</sup>。随着滚塑成型工艺的不断发展,滚塑制品的种类不断增加,应用范围也不断扩大。滚塑成型工艺在化工、机械、电子、轻工和军工等行业有广泛应用,如摩托车、汽车等车辆燃油箱、储物箱、大中型中空容器、汽车零部件、耐腐蚀容器内胆等,近年来也逐渐用于各种民用或军用产品包装箱、运输箱等制品的生产<sup>[10]</sup>。

旋转模塑技术在箱式后勤装备上的应用主要是通用箱体的制造上,采用滚塑加工工艺,一次成型,保证箱体的密封性及整体性,该工艺生产的箱体角部较厚,比表面厚 15%~20%,具有更优异的抗冲击性能。

### 3.2 旋转模塑设备与模具

#### 3.2.1 旋转模塑设备

旋转模塑设备的基本要求是使模具同时绕 2 个互相垂直的轴旋转,在旋转的同时还能被加热和冷却,一般由转臂、热箱和冷箱 3 部分组成<sup>[11]</sup>,见图 1。

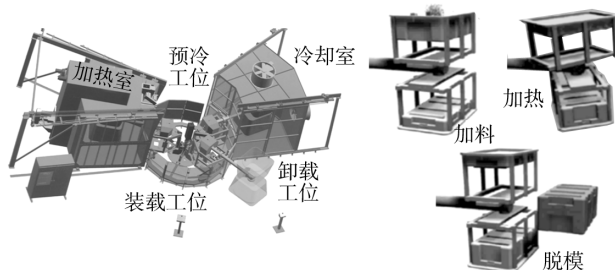


图 1 旋转模塑设备

Fig.1 Rotational modeling equipment

#### 3.2.2 旋转模塑模具

与注塑、中空吹塑等塑料成型模具相比,滚塑用模具结构简单、体积大、质量轻,因而制作容易,价格低廉<sup>[12]</sup>,而且使用寿命也较长。制品平直部分大于

400 mm 时,模具应考虑加强筋或相应结构的设计。旋转模塑模具的制造材料范围较广,制造方法有铸造、薄板焊接和电铸成型 3 种<sup>[11]</sup>。包括铸铝模具、金属板焊接模具、电铸模具、机加工模具、符合模具等,旋转模塑模具技术经过多年的发展取得了很大的成就,并且出现了一些新的发展方向,如模具 CAD/CAE/CAM 技术的应用、基于 RPM 快速制模技术和符合模具技术等<sup>[13]</sup>。

箱式后勤装备的模具材质为模具专用钢,硬度高,具有较高的耐磨性。模具表面可根据用户的特殊需要制作成各种类型的皮纹,为数控高级铣床加工成型。每台模具使用次数可达 5 000 次,整个模具制造过程在本公司独立完成,不受外界因素影响。生产过程中要严格控制模具的精度,要求每台模具生产 100 个产品,要利用数控三坐标检测仪来检测模具的精度,将模具表面精度控制在 0.005 mm 内。

### 3.3 旋转模塑工艺过程

箱式后勤装备通用箱体以共混改性聚乙烯为主要原料,采用滚塑加工工艺一次成型,再辅以定型、安装、内饰等工艺处理后,能够保证箱体的密封性及整体性,而且旋转成型的箱体角部较厚,具有更优异的抗冲击性能,能够满足野战条件下战术部分队保障设备的包装防护、集装承载和携行运输的需要,并且还能根据需求进行功能扩展,见图 2—3。



图 2 存储防护包装箱

Fig. 2 Protective storage box

其制造工艺过程通常由加料、加热、冷却、脱模和后处理等几个基本工序组成,见图 4。加料前要进行造粒和磨粉,造粒要均匀,粉末颗粒要均匀。在加热过程中,模具一边被加热,一边绕互相垂直的双轴旋转,并将热量传递给模具内的物料。模具内的物料在



图 3 功能扩展箱

Fig. 3 Functional extension box

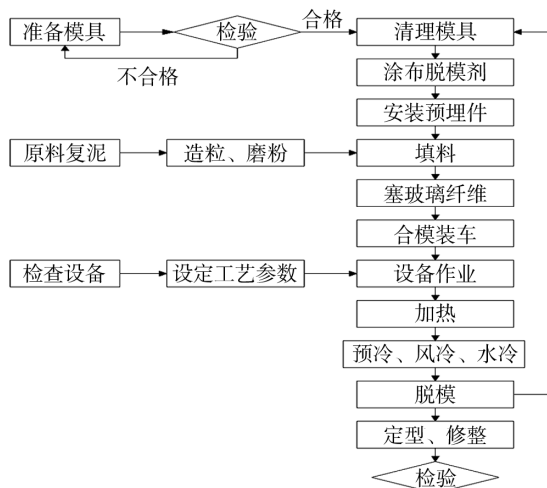


图 4 旋转模塑工艺流程

Fig. 4 Rotational modeling process

翻动过程中受到彼此之间的摩擦和模具内表面的拖曳,使物料池中的物料向模壁上方向运动,直到此作用力不足以克服物料所受到重力作用时,物料才越过物料池顶部到达对面模壁。

当模具加热完成进入冷却阶段时,模具内的熔体开始固化并形成。当达到脱模温度时,脱出制品,制品经过后处理成为产品。后处理过程可能包括切削、钻孔、修整外观、定型、装配等。模具经过清理、涂布脱模剂后装料进入下一个周期。

## 4 结语

滚塑箱具有成本、质量、性能等方面的优势,能够满足箱式后勤装备的战术技术性能指标和野战条件下战术部分队保障设备的包装防护、集装承载和携行运输的需要,且成本低,军事经济效益明显,符合多样

化军事行动对装备防护包装的要求,能够广泛应用于箱式后勤装备的生产制造。目前,滚塑箱体已应用于野炊箱组、野战医疗箱组、淋浴箱组等箱式后勤装备的研制。随着箱式后勤装备统型的进一步实施,除部分箱式装备因特殊需求须采用金属箱体外,预计滚塑箱体的比例将占到80%以上。统型后的箱式后勤装备在外观和结构上将更加统一、整齐、美观。另外,旋转模塑技术不仅能够用于箱式后勤装备,而且对其它箱式装备及武器、弹药等的防护包装也提供了较好的参考。

#### 参考文献:

- [1] 李冬. 现代包装材料与技术应用[M]. 广州:广东科技出版社,2008.
- [2] CRAWFORD R J. A New Era for Rotational Moulding [J]. *Plastics, Rubber and Composites Processing and Applications*, 1991, 15(2): 71-73.
- [3] 王欣,魏若奇. 滚塑加工现状与发展趋势[J]. *中国塑料*, 1997, 11(4): 17-25.
- [4] 王剑,刘春阳,黄玉强. 交联聚乙烯滚塑技术[J]. *中国塑料*, 2000, 14(1): 52-55.
- [5] 邱桂学,姜爱民,许淑贞,等. 用于大型滚塑成型的LLDPE/HDPE共混料[J]. *青岛化工学院学报*, 1996, 17(1): 51-55.
- [6] 藏群传,靳凤林,高岩,等. 聚乙烯滚塑专用料的研制[J]. *中国塑料*, 1999, 13(12): 16-20.
- [7] 田丰,成国祥,刘圣军,等. 旋转模塑防水包装箱专用树脂的研究及应用[J]. *中国塑料*, 2004, 18(11): 67-70.
- [8] 刘圣军,田丰,杨荆泉,等. 共混改性聚乙烯滚塑专用树脂的研制[J]. *塑料*, 2002, 31(6): 22-24.
- [9] 王政,杨荆泉,陈世谦. 塑料旋转模塑制造技术[M]. 北京:化学工业出版社,2003.
- [10] 陈枫. 聚乙烯滚塑专用料的现状及发展[J]. *现代塑料加工应用*, 2009, 21(1): 60-63.
- [11] 蔡红,张恒,陈东明,等. 复合材料的旋转模塑成型研究[J]. *材料导报*, 2005, 19(11): 231-233.
- [12] 孔繁兴,王爱阳. 滚塑成型技术及发展趋势[J]. *塑料科技*, 2005(2): 57-59.
- [13] 宋本超,张军,张恒,等. 旋转模塑模具的研究进展[J]. *塑料科技*, 2006, 34(6): 76-79.

(上接第48页)

引信、火工品及军民用精密电子产品等的内包装与武器装备的野外封装及防护,在高温潮湿等地区可大幅提高武器装备的贮存期。

### 3 结论

针对各种弹药、引信、火工品、军用精密电子产品等军品对多功能包装的要求,对军品包装高分子材料的设计原理与性能进行了探讨,制备了多种形式的军品包装材料,可以有效地解决各种军品包装在储存运输过程中受到的电磁波、累积静电、冲击、振动等引起的问题。试验制备的多种形式的军品包装材料在电磁性能试验、阻燃性能试验、温度试验和多种力学性能试验中,总体性能达到了先进水平,各项技术指标满足了多功能复合军品包装材料在复杂环境下的使用要求。形成了一套完整的武器装备电磁屏蔽内、外层和缓冲减震防护系统,可在武器装备的电磁防护包装系统中推广应用。

#### 参考文献:

- [1] 韩景平,王渝珠. 防电磁包装材料[J]. *中国包装*, 1994(4): 58-59.
- [2] 蔡建,陈一农. 塑料在兵器包装上的应用[J]. *包装工程*, 2003, 24(5): 95-97.
- [3] 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.
- [4] 王会云,欧忠文. 军用包装概述[J]. *包装工程*, 1998, 19(5): 30-33.
- [5] ANTHONY Bedford. 材料力学[M]. 北京:清华大学出版社,2005.
- [6] CHANDRA R, SINGH S P, GUPTA K. Damping Studies in Fiberreinforced Composites - a Review[J]. *Composite Structures*, 1999(46): 41-51.
- [7] FINEGAN I C, GIBSON R F. Recent Research on Enhancement of Damping in Polymer Composites[J]. *Composite Structures*, 1999(44): 89-98.
- [8] 刘顺华,刘军民,董星龙. 电磁波屏蔽及吸波材料[M]. 北京:化学工业出版社,2006.