

装备防护

弹药金属包装材料的腐蚀与防护综述

刘勇¹, 陈海涛², 刘润芳³, 李忠盛², 张敏², 丛大龙², 何庆兵²

(1. 陆装驻哈尔滨地区航空军事代表室, 哈尔滨 150066; 2. 西南技术工程研究所, 重庆 400039;

3. 北京航天新风机械设备有限责任公司, 北京 100074)

摘要: **目的** 弹药金属包装材料的腐蚀具有非常严重的破坏作用, 不仅缩短了武器弹药的使用寿命, 而且在实弹射击中极易造成炸膛等恶性事故, 因此对弹药金属包装材料的腐蚀机理及其防护技术进行研究至关重要。 **方法** 以弹药金属包装材料腐蚀机理分析为出发点, 结合现有金属防腐技术, 为弹药金属包装材料防腐方法提供合理性建议。 **结果** 当储存的环境相对湿度达到 60% 以后, 几种常用弹药金属包装材料的腐蚀速率明显加快, 且铁的腐蚀速率大于铜的腐蚀速率, 铜的腐蚀速率大于铝的腐蚀速率。 **结论** 弹药金属包装材料腐蚀的原因主要为电化学腐蚀, 而高温热、海洋环境、粗糙的表面状态和高内部应力都会促进腐蚀的加重, 材料技术、表面涂层技术、密封防腐技术和纳米技术等可以有效解决弹药金属包装材料的腐蚀问题。

关键词: 腐蚀; 金属材料; 弹药; 包装技术

中图分类号: TG174 文献标识码: A 文章编号: 1001-3563(2020)09-0232-06

DOI: 10.19554/j.cnki.1001-3563.2020.09.036

Review of Corrosion and Anti-corrosion of Ammunition Metal Packaging Materials

LIU Yong¹, CHEN Hai-tao², LIU Run-fang³, LI Zhong-sheng², ZHANG Min²,
CONG Da-long², HE Qing-bing²

(1. Military Representative Office of the Army Aviation Department in Harbin, Harbin 150066, China;

2. Southwest Technology and Engineering Research Institute, Chongqing 400039, China;

3. Beijing Aerospace Fresh Air Mechanical Equipment Co., Ltd., Beijing 100074, China)

ABSTRACT: The work aims to study the corrosion mechanism and protection technology of ammunition metal packaging materials, as the corrosion of ammunition metal packaging material causes very serious damage, which not only shortens the service life of weapons and equipment, but also causes accidents such as blast. Taking the corrosion mechanism analysis of ammunition metal packaging material as the starting point, reasonable suggestions were provided for the anti-corrosion method of ammunition metal packaging materials in combination with the existing metal anti-corrosion technology. When the ambient humidity for storage was up to 60%, the corrosion rate of several common ammunition metal packaging materials was obviously accelerated, the corrosion rate of iron was greater than that of copper, and the corrosion rate of copper was greater than that of aluminum. The main reason for the corrosion of ammunition metal packaging material is electrochemical corrosion, while the high humidity and heat, marine environment, rough surface state and high internal stress all worsen the corrosion. Material technology, surface coating technology, sealing and anti-corrosion technology and nanotechnology can effectively solve the corrosion problem of ammunition metal packaging materials.

KEY WORDS: corrosion; metallic materials; ammunition; packaging technology

收稿日期: 2019-04-24

作者简介: 刘勇 (1973—), 男, 硕士, 工程师, 主要研究方向为飞行器设计。

弹药是含有火药、炸药或其他装填物,对敌方军事目标或人员进行毁伤的军械物品,作为战争中消耗数量最多的军用战备物资之一,担负着直接杀伤敌人有生目标、压制敌人火力、摧毁敌军坦克、军事设施和战斗堡垒的重要任务,在未来战争中具有不可替代的作用^[1-2]。弹药从生产到使用的整个周期中,储存占了绝大部分时间,弹药的实际储存年限主要取决于包装的质量与可靠性。弹药包装防护实质是人工设计一个小气候环境,来避免环境因素对装药和核心部件等储存质量的影响,还能满足弹药对运输和发射等功能。弹药包装不同于一般的军用包装,对包装材料要求更高,由于金属材料的高强度、高阻隔性及优越的加工使用性能,在弹药包装材料中非常重要。金属包装材料具有强度高、不易变形、抗跌落性优良、阻燃、防水密封性好等优势,可满足恶劣环境下的使用要求。如果弹药金属包装材料防护不好,在储运过程中极易发生腐蚀现象,进而使弹药的储存寿命缩短,造成非常严重的经济损失,增加在实弹射击中发生炸膛等恶性事故的概率,战时贻误战机而造成战场失利,其严重性不言而喻^[3]。

1 弹药金属包装材料腐蚀原理

弹药金属包装材料主要以钢和铝合金为主,还有少量铜及其合金,其腐蚀作用机理可分为化学腐蚀和电化学腐蚀 2 类。直接与腐蚀介质发生化学作用而引起的破坏叫化学腐蚀,化学腐蚀的腐蚀介质主要有气体和液体,如金属材料与空气接触而发生氧化,虽然铝合金等金属包装材料与空气中的氧能够生成致密 Al_2O_3 膜,可以大大减慢铝合金的腐蚀速度,但所形成的氧化膜必须完整,否则难以起到保护作用;金属包装材料与机油等液态物质接触也会造成腐蚀,机油中含有酸性物质,使金属材料表面受到酸性腐蚀;此外,燃油、润滑油等中含有硫的成分,使金属出现硫化现象,也属于化学腐蚀。氧化、硫化和氢腐蚀等化学腐蚀大多在高温条件下进行,所以化学腐蚀对弹药金属包装材料不起主要的破坏作用。

电化学腐蚀是弹药金属包装材料腐蚀的主要原因,电化学腐蚀是金属包装材料与电解质直接接触,通过氧化还原电极反应而产生的腐蚀,电解质主要为水。多种金属材料对弹药进行包装时,由于不同金属包装材料具有不同的电极电位,因此会产生电位差,在有电解质的情况下,就极易产生电化学腐蚀;同种材料在满足一定条件下也可以形成电位差,构成腐蚀电池效应,例如在金属包装材料的裸露部位,长期存储会出现灰尘、油污等物质,潮湿环境下极易吸水受潮,由于不同部位灰尘堆积厚度和受潮湿度分配不均匀,造成金属包装材料局部电位变正,其他部位电位变负,形成电化学腐蚀的微电池结构,进而发生电化

学腐蚀现象^[4]。

不同金属包装材料都有临界腐蚀湿度,临界腐蚀湿度也叫“饱和湿度”,当金属包装材料基体表面达到“饱和湿度”,气态水就会在基体表面凝结出液态水,腐蚀原电池就会形成,腐蚀速度急剧升高。广州电器研究所对几种常用金属材料临界腐蚀湿度进行研究,当相对湿度大于 60% 后,金属包装材料中 Fe 和 Cu 等腐蚀速率明显增加,而 Al 的临界腐蚀相对湿度达到 80% (75%~85%),高于 Fe (60%~70%) 和 Cu (60%) 的临界腐蚀相对湿度^[5]。此外,当空气中有污染或金属表面不洁时,3 种金属的临界腐蚀湿度都会下降,会更快速地腐蚀。

几种常用弹药金属包装材料在大气环境下的腐蚀速率对比见图 1,当金属包装材料达到临界湿度后,铁的腐蚀速率>铜的腐蚀速率>铝的腐蚀速率,钢铁中铸铁、铸钢的耐腐蚀性较差,合金钢、不锈钢等钢铁材料内含较多的铬等合金元素,其耐腐蚀性比铸铁和铸钢强。铜及其合金的电极电位较高,耐腐蚀性优于钢铁类材料;虽然铝及其合金的电极电位比铜和钢铁低,但在大气中很快能生成致密的、有良好保护作用的 Al_2O_3 膜,在大气环境下表现出良好的耐腐蚀性能^[6-8]。

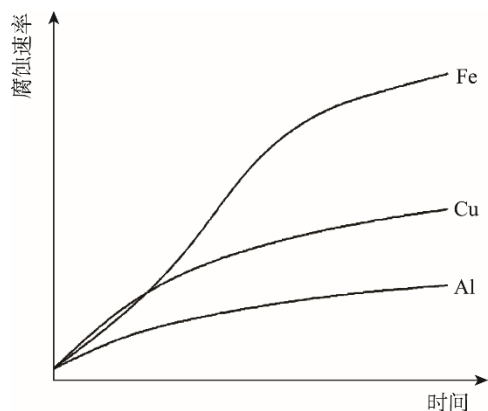


图 1 常用弹药金属包装材料的腐蚀速率
Fig.1 Corrosion rate of common ammunition metal packaging materials

在大气环境下金属包装材料的电化学腐蚀中,盐分的存在不仅会提高电解液的导电性,还会促使金属包装材料表面水气的凝聚,并穿透和破坏金属表面的钝化膜,与金属包装材料的内部发生电化学反应,大大加快了金属包装材料的腐蚀速度,进而改变金属包装材料的强度等性能,降低弹药的储存寿命和安全性。海洋环境下的弹药存储因受储存条件的限制、高热高湿的海洋气候影响、盐雾气氛的腐蚀等因素的影响,相比于内陆环境更易发生腐蚀,且腐蚀速率成倍增长。天津大学王吉会课题组研究了包装用镀锡薄钢板在 NaCl 溶液中的加速腐蚀现象,结果表明镀锡薄钢板在 NaCl 溶液中 10 d 左右即发生非常严重的腐

蚀现象,腐蚀首先发生在局部薄弱部位,30 d 后腐蚀产物逐渐覆盖整个金属表面,腐蚀过程主要表现为 Fe 的腐蚀^[9-10],镀锡钢板在 0.1 mol/L 的 NaCl 溶液中的腐蚀过程,见图 2。

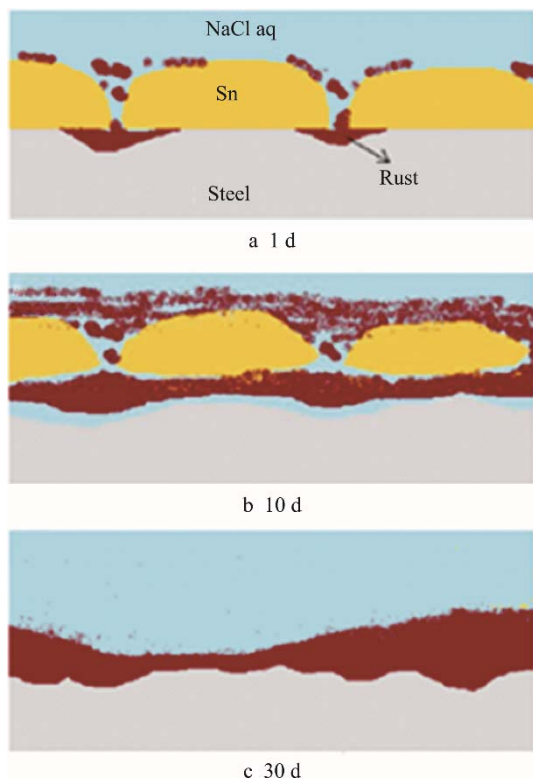


图 2 镀锡钢板在 NaCl 溶液中的腐蚀过程

Fig.2 Corrosion process of tin plate exposed to NaCl solution

金属包装材料表面不同粗糙度状态和机械加工工艺对腐蚀速率都有影响,粗车加工、焊接和毛化等处理后的粗糙表面更易吸水和沉积灰尘,导致金属包装材料的腐蚀速率进一步加快;相反,经打磨、抛光后的金属包装材料表面的腐蚀速率大大降低。此外,弹药金属包装材料经锻造、焊接、高温热处理或拉、压、折弯加工后,引起金属包装材料内部应力增加,促进金属包装材料的快速应力腐蚀,应力腐蚀是由残余或外加应力导致的应变和腐蚀综合作用产生的金属材料破坏现象^[11-12]。

2 弹药金属包装材料防腐措施

随着弹药包装向规范化和集成化的方向发展,金属包装材料已得到大量应用,涌现出了大量新型包装技术和防腐方法。针对不同的弹药包装方案与存储工况,选用合理的防腐技术,可大大减少甚至避免弹药在前沿部队的报废,解决弹药在和平时期的长时间存放问题,同时减少弹药存储库房的改造和维修费用,由此带来的经济效益和在军事上的意义都将十分重大。

2.1 新材料技术

弹药金属包装材料的腐蚀与防护方法成为各国军事科研人员研究的热点,改用更耐腐蚀的材料代替易腐蚀材料和研发新的防腐材料 2 种方法最为常用。我国传统弹药包装材料大量采用了木质包装箱结构,由于木质包装箱包装属于半密封包装,必须采用炮油封存才能满足弹药长时间防腐存储要求。木质包装箱包装无法满足弹药长期存储要求,尤其在南方和沿海地区的高湿热的环境中,木质包装箱极易发生受潮腐烂现象,且射击前炮油的清理极度困难,不能够适应现代战争中的快速反应战备要求。目前,弹药包装技术出现了以钢代木现象,大量采用金属材料进行包装,如某型号碎甲弹、某型号海舰弹等均采用钢质密封包装筒作为内包装,以框架式的钢笼作为外包装;美军 120 mm 坦克弹采用钢质圆筒包装,实现了包装标准化,相对于木箱包装,给一辆 M1A1 坦克进行完全补充供弹时间从 35 min 降到了 13 min。此外,美军 20 mm、25 mm 等弹药系列的新包装采用了钢制矩形容器,解决了包装容器防水和海洋环境下的腐蚀问题,减少了易燃材料的数量^[13]。常温下铝合金防腐性能优于钢质材料,且能够满足弹药轻量化要求,大量包装箱覆盖件和部分对材料力学性能要求不高的结构件,都采用了铝合金代替钢质材料的方案,以达到减轻弹药重量和提高弹药装药量的目的,但是必须防止多种金属包装材料共用而发生的电化学腐蚀现象。

改变金属包装材料的内部组织结构可以提高弹药金属包装材料的耐腐蚀性能,在钢中加入铬、铝、硅等元素,能够把铁从氧化物中还原出来,从而提高钢的抗高温氧化性能;普通碳钢中加入或者进一步增加铬、镍、钼和钛等成分,制成不锈钢等材质,可以大大提高钢质材料的耐腐蚀性,当钢中的铬含量达到 12%~13%时,可以使钢的电极电位发生突变,由负变正,不产生电化学腐蚀作用,但是不锈钢等材料存在加工硬化效应大、成形困难等不足。此外,在普通碳钢中加入铜也可以改变其电极电位,提高弹药金属包装材料的耐腐蚀性,加入钛、铌等成分可以改善钢材的晶间腐蚀特性。

2.2 表面涂层防护技术

表面涂层防护技术是现代高新技术领域和先进制造业的重要前沿技术之一,能够低成本改变金属材料的表面物理、化学性质,提高弹药金属包装材料表面强度和硬度等性能,改善金属基体耐磨损性和耐腐蚀性,延长使用寿命。目前,弹药金属包装材料防腐涂层主要有金属合金涂层、陶瓷涂层以及涂料等。

弹药金属包装用的碳钢材料大量采用了金属合金涂层进行防腐,如镀锡的马口铁、镀锌的白铁皮等,马口铁又称电镀锡薄钢板、镀锡铁,由于镀有锡而成

为一种耐腐蚀、强度高、延展性好的金属包装材料, 5.8 mm、7.62 mm 等枪弹都采用了马口铁皮箱进行内层的密封包装, 可以保证弹药储存过程中的密封和防潮, 保存多年后依然如新。白铁皮即镀锌薄钢板, 经过热浸镀锌而大大提高了耐腐蚀性能, 同时其延展性好, 便于成形, 在民用包装和军用弹药包装等领域得到广泛应用^[14]。

铝合金材料具有很多有优点, 如: 易加工、质量轻、比强度高, 随着新型弹药向轻量化方向发展, 铝合金在弹药包装材料方面已成为仅次于钢铁的第二大金属材料。由于铝合金存在质软、易变形、易拉伤等不足, 因此弹药金属包装材料大多采用了高强铝合金。高强铝合金加入了众多合金元素造成其更易产生晶间腐蚀, 限制了铝合金材料在弹药包装上的应用。铝合金防腐技术众多, 一般与耐磨涂层技术结合使用, 包括化学转化膜、电镀、化学镀、离子注入、激光处理和喷涂等技术, 尤其以化学转化膜中的阳极氧化技术应用最为广泛, 而微弧氧化技术具有非常好的应用前景, 因为该技术制备的 Al_2O_3 陶瓷涂层为基体原位生成, 具有结合力高、耐磨损、防腐性等综合性能, 如某型号弹药的铝合金包装箱、某型号轻型山地炮的炮架等都采用了微弧氧化技术进行表面防护。

防腐涂料的作用是阻止弹药金属包装材料周围环境中的 H_2O , Cl^- , SO_2 等腐蚀性介质渗透到金属基体表面, 从而防止金属基体被腐蚀。同时, 部分涂料中含有特殊功能助剂, 能够防止涂料使用中的过早老化, 同时与金属基体发生化学反应, 在金属基体表面生成致密氧化物陶瓷等物质, 大大提高涂料的密封性和防腐性。防腐涂料分为有机涂料和无机涂料 2 种, 有机涂料是以高分子化合物为主要成膜物质所组成的涂料, 有机涂料由成膜物质、颜料、助剂和溶剂等部分组成, 成膜物质是有机涂料的主要成分, 也称为基料、漆料或漆基。近年来, 国内外开发出了众多具有优异耐腐蚀性和环境稳定性的新型高分子有机涂料。例如, 采用氟树脂作为主要成膜物质制备的新型氟碳防腐涂料, 该涂料具有极高的化学稳定性, 能耐强酸、强碱、盐类等大多数物质的侵蚀, 而且耐候、耐温性优异; 再如, 采用聚苯硫醚树脂作为基料制作新型防腐涂料具有极高的环境与热稳定性、优异的耐腐蚀性、极好的渗透性和结合力。此外, 还有环氧树脂涂料、聚氨酯涂料、丙烯酸涂料、氯化聚醚防腐涂料、聚苯胺防腐涂料、氯化聚丙烯防腐涂料、聚酰亚胺防腐涂料、有机硅树脂防腐涂料等有机防腐涂料, 弹药金属包装材料需根据实际工况开发或选用合适的防腐涂料。无机防腐涂料近年来倍受重视, 无机防腐涂料是以硅溶胶、硅酸盐溶液等为主要成膜物质的涂料, 由无机聚合物和经过分散活化的金属、金属氧化物纳米材料、稀土超微粉体组成无机聚合物涂料,

能与钢表面的铁原子快速反应形成阻挡层, 具有物理、化学双重保护作用; 无机涂料取材于自然界, 来源丰富, 环保和健康, 同时比有机涂料的耐老化性能更好^[15-17]。

达克罗技术是金属材料表面防腐新技术, 在弹药金属包装材料防腐领域具有较大的应用前景, 该技术是把含有片状锌粉、铝粉和六价铬的水系涂料均匀地涂覆在经过预处理的金属表面, 经烘干、烧结而形成的无机涂层, 达克罗涂层的厚度仅为 $3 \sim 9 \mu\text{m}$, 但其防腐效果是传统电镀锌、热镀锌或涂料涂覆的 $5 \sim 10$ 倍, 耐盐雾腐蚀试验 1000 h 以上, 且其渗透性、结合力和耐热性能都很好。传统达克罗技术由于含有毒性强、高致癌的六价铬, 其使用受到限制。近年来国内外相继开发出了多种无铬达克罗技术, 又称“绿色电镀”, 相对于传统达克罗涂层, 无铬达克罗技术是将超细锌鳞片和铝鳞片叠合包裹在特殊粘接剂中的无机涂层, 层层叠加的片状锌、铝等金属粉通过烧结形成复杂氧化物而紧密结合, 从而很好地起到隔离腐蚀介质的作用, 可以有效阻挡 H_2O , Cl^- , SO_2 等腐蚀性介质的侵蚀^[18]。

2.3 其他防腐技术

1) 密封防腐技术包括气相防腐、干燥防腐和真空防腐等, 可以有效解决弹药金属包装箱内壁、炮弹壳体、枪弹弹壳等长时间防腐的问题。气相防腐技术就是在包装容器或封存空间放置气相防锈剂、防锈纸和气相塑料薄膜, 储存过程中不断挥发防锈气体而形成蒸汽压, 充满封存空间, 能有效地抑制包装箱内部金属材料的腐蚀^[19]。氮气是无色、无味和无毒的惰性气体, 其化学性质不活泼, 常温下几乎不会发生任何反应, 非常适合先进高精密武器装备的密封防腐。例如装甲兵工程学院研制的氮封存包装一体化设备, 主要技术参数为: 氮气产量 $\geq 5 \text{ Nm}^3/\text{h}$, 氮气纯度 $\geq 99.5\%$, 氮气露点 $\leq -45^\circ\text{C}$; 试验结果表明: 在充氮包装材料阻隔性优异的前提下, 氮气介质防护的平均腐蚀速率远远低于空气介质, 其平均腐蚀速率低于美国腐蚀工程师协会制定的标准 (NACE RP-0775-91) 中的轻度腐蚀一个数量级。干燥防腐技术是在可靠的密封环境中施加一定的干燥吸附剂, 使密封空间内的相对湿度达到最佳, 密封空间的透湿率和干燥剂需要匹配, 密封空间内的相对湿度既不能大于 60%, 也不能低于 45%, 因为过于干燥, 装药的机械强度就会降低, 而造成药粒破碎使得燃速变大, 将影响其射击精度和射程。真空防腐技术是把密封空间内的空气抽出或吸净, 使密封空间内的空气接近真空状态, 减少氧气、湿度对弹药质量的影响, 从而实现弹药长期防腐, 密封空间内的真空度是衡量真空防腐的关键因子, 要求所采用的密封包装材料一定要达到强度要求。

2) 纳米材料具有小尺寸效应、表面效应、量子尺寸效应、宏观量子隧道效应和介电限域效应等特点,制备的材料具有很高的弹性模量、较高的韧性及高强度等特性,结合新材料技术、表面涂层技术等,给进一步提高金属材料表面防腐涂层的性能创造了条件。例如在耐磨和防腐综合涂料中添加纳米相,在减少空气中的氧和湿气对基体材料浸蚀的基础上,进一步提高了涂层的强度、硬度、刚性、耐磨性和防 H_2O 、 Cl^- 、 SO_2 等的渗透性,且能保持涂料有较高的韧性,纳米级颜料与底漆的强化作用及填充效果,有助于改进涂料与金属基体之间的界面效应和结合力。西南技术工程研究所等单位在传统的电镀 Ni-P 涂层的溶液中加入纳米 SiC 粉体材料,制备出了性能优异的纳米防腐与耐磨复合涂层,该复合涂层相对于传统 Ni-P 涂层更致密且结合力更高,耐磨性能提高的同时,更能满足弹药铝合金包装材料表面防腐的使用需求^[20—22]。7A55 铝合金表面电镀 Ni-P-SiC 复合层的表面微观形貌见图 3,可以看到第 2 相纳米 SiC 粒子镶嵌在 Ni-P 镀层中,SiC 粒子是以若干微小颗粒的聚集状态的分布在镀层中。

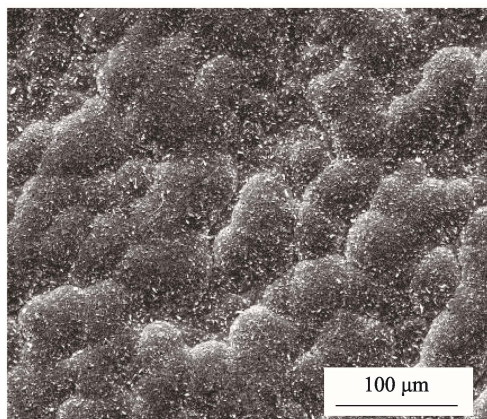


图 3 Ni-P-SiC 复合镀层表面微观形貌
Fig.3 Micromorphology of Ni-P-SiC composite coating surface

3) 复合防腐技术是将多种防腐技术结合,可以优势互补,为未来弹药金属包装材料防腐技术发展的重要趋势。例如在弹药金属包装箱外表面用金属涂层打底的基础上,表面涂覆重防腐涂料,同时开发出包装箱内部防腐与干燥相结合的无机涂料,可以满足中长期弹药包装、存储的使用要求。铝合金采用微弧氧化技术制备多孔结构的 Al_2O_3 陶瓷涂层,再涂覆厚层防腐涂料,既可以封闭陶瓷涂层的孔隙,又可以隔绝腐蚀介质对 Al_2O_3 陶瓷涂层孔隙和铝合金基体的浸蚀,能够满足海洋高湿、高热、多盐环境的防腐要求。美国开发的一种防腐和润滑双功能涂料,涂覆到弹丸上既具有防腐功能,又具有润滑作用,减少了弹丸和炮身身管间的有害摩擦,大大提高了弹道速度和精度。美国休斯公司为海上湿热和多盐雾环境下使用的

AMRAAM(先进的中程空空导弹)提供了系统的防腐技术,根据不同材料有针对性地进行防腐处理,火箭发动机壳体由高强度 D6AC、4130 等钢制成,高强度钢的裂纹抗应力腐蚀临界值低,极易产生灾难性破坏的材料内应力腐蚀,为此休斯公司研制了 SECOA CF-33 和 SermeTel 2241 等涂料,为高强钢壳体提供了极佳的阴极保护;同时采用了阳极氧化和电镀锌层等方法对导弹内部铝合金、钢零件进行防腐,包装箱采用储运和发射一体结构,且进行了密闭处理,内部充填氮气、氦气等惰性气体进行保护,满足了海洋环境下长使用寿命的指标要求^[23]。

3 结语

弹药金属包装材料腐蚀的机理可以分为化学腐蚀和电化学腐蚀 2 类,其中以电化学腐蚀为主,而高温、海洋环境、粗糙的表面状态和高的内部应力都会促进腐蚀的加重。近年来,随着国内外弹药包装向规范化、集成化等方向发展,涌现出了众多的弹药金属包装材料防腐技术,其中材料技术、表面涂层技术、密封防腐技术和纳米技术等可以有效解决弹药金属包装材料的腐蚀问题,未来将会得到大力发展。

参考文献:

- [1] 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—381.
TAN Yan. Research Progress on Ammunition Package Worldwide[J]. Material Review, 2013, 27(S1): 375—381.
- [2] WIDLUND T. A. New Packaging Design for the HEAT CS Sympathetic Detonation Test[J]. Insensitive Munitions & Energetics Materials Technology Symposium, Rome, Italy, 2015, 5: 18—21.
- [3] 高欣宝, 黄春光, 向红军. 包装对弹药装备保障的影响分析及其发展策略[J]. 包装工程, 2013, 34(17): 121—123.
GAO Xin-bao, HUANG Chun-guang, XIANG Hong-jun. Effect and Development Strategy of Packaging on Ammunition Armament Support[J]. Packaging Engineering, 2013, 34(17): 121—123.
- [4] 杨祖彬, 曾莉红. 金属包装材料涂层防腐技术[J]. 表面技术, 2009, 38(4): 66—68.
YANG Zu-bin, ZENG Li-hong. Corrosion Prevention Techniques of Metal Package Coating Materials[J]. Surface Technology, 2009, 38(4): 66—68.
- [5] 李良春, 王红卫, 谭志强. 影响海岛部队弹药储存可靠性的诱因[J]. 包装工程, 2002, 23(6): 68—70.
LI Liang-chun, WANG Hong-wei, TAN Zhi-qiang. Effect on the Reliability of Stored Ammunitions in Island[J]. Packaging Engineering, 2002, 23(6): 68—70.
- [6] 戴祥军. 野战弹药防潮封存技术研究[D]. 石家庄:

- 军械工程学院, 2001: 29—36.
- DAI Xiang-jun. Research on Moisture Protection and Storage of Field Ammunition[D]. Shijiazhuang: Academy of Military Engineering, 2001: 29—36.
- [7] 张忆桥. 地面弹药库温度管理浅析[J]. 山西科技, 2007(5): 41—42.
- ZHANG Yi-qiao. Brief Analysis on the Management of the Temperature and Humidity of Ground Ammunition Depots[J]. Shan Xi Science and Technology, 2007(5): 41—42.
- [8] 罗天园, 吴波, 但渝霞. 弹药环境适应性设计需要考虑的几个问题[J]. 装备环境工程, 2007, 4(1): 63—66.
- LUO Tian-yuan, WU Bo, DAN Yu-xia. Problems Needed to be Considered in Ammunition Environmental Worthiness Design[J]. Equipment Environmental Engineering, 2007, 4(1): 63—66.
- [9] 孙贵之, 张余清, 祁立雷, 等. 野战条件下弹药微环境温湿度控制技术[J]. 装备环境工程, 2005, 2(4): 46—50.
- SUN Gui-zhi, ZHANG Yu-qing, QI Li-lei, et al. Research of the Temperature and Moisture Control Technique for Ammunition in Micro Environment under Field Condition[J]. Equipment Environmental Engineering, 2005, 2(4): 46—50.
- [10] 高云. 镀锡薄钢板/涂层在不同温度和形变下的腐蚀行为研究[D]. 天津: 天津大学, 2015: 50—53.
- GAO Yun. Corrosion Degradation of Tinplate/Coating System under Different Temperature and Deformation[D]. Tianjin: Tianjin University, 2015: 50—53.
- [11] 田润良, 赵世宜, 周继强. 高温高湿地区集装箱内部温湿度环境条件研究[J]. 装备环境工程, 2005, 2(4): 29—30.
- TIAN Run-liang, ZHAO Shi-yi, ZHOU Ji-qiang. Temperature and Humidity Environmental Conditions of Military Dangerous Materials in Container Transportation[J]. Equipment Environmental Engineering, 2005, 2(4): 29—30.
- [12] 刘国孝, 刘国忠, 方晓祖, 等. 常规兵器在热带海岛地区腐蚀问题的探讨[J]. 兵器材料科学与工程, 2016, 39(3): 131—134.
- LIU Guo-xiao, LIU Guo-zhong, FANG Xiao-zu, et al. Corrosion Problems of Conventional Weapons in Tropical Island[J]. Ordnance Material Science and Engineering, 2016, 39(3): 131—134.
- [13] 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.
- [14] 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. The Development of Ammunition Packaging Materials[J]. Packaging and Food Machine, 2009, 27(6): 63—65.
- [15] 郭海祥, 吴怀成, 龚伯伦, 等. 铝合金镀镍磷表面强化[J]. 表面工程技术, 2005, 21(3): 33—36.
- GUO Hai-xiang, WU Huai-cheng, GONG Bai-lun, et al. Aluminum Alloy Plated Nickel-phosphorus Surface Reinforce[J]. Surface Engineering Technology, 2005, 21(3): 33—36.
- [16] 杨海洋, 高志贤, 杨万国, 等. 管道外防腐涂层技术进展[J]. 现代涂料与涂装, 2013, 16(7): 29—30.
- YANG Hai-yang, GAO Zhi-xian, YANG Wan-guo, et al. Progress of Pipeline External Anticorrosion Coatings Technology[J]. Modern Coating and Painting, 2013, 16(7): 29—30.
- [17] 林锐, 刘朝辉, 林壮文, 等. 水性丙烯酸涂料的改性及其功能化应用研究进展[J]. 表面技术, 2017, 46(1): 133—139.
- LIN Rui, LIU Chao-hui, LIN Zhuang-wen, et al. Research Progress of Modification and Functional Application of Waterborne Acrylic Coating[J]. Surface Technology, 2017, 46(1): 133—139.
- [18] 崔廷昌. 无铬达克罗技术的研究及应用进展[J]. 材料保护, 2018, 51(3): 98—101.
- CUI Ting-chang. Application Development of Non-chromium Dacromet Technology[J]. Materials Protection, 2018, 51(3): 98—101.
- [19] 李澄, 黄明珠, 周一扬. 提高铝合金耐蚀性的无机覆盖膜[J]. 材料保护, 2002, 35(5): 7—9.
- LI Cheng, HUANG Ming-zhu, ZHOU Yi-yang. Inorganic Coatings that Improve Corrosion Resistance of Aluminum Alloy[J]. Material Protection, 2002, 35(5): 7—9.
- [20] 王天旭, 蒙继龙, 胡永俊. 铝合金化学镀 Ni-P、Ni-W-P 组织及相转变行为[J]. 热加工工艺, 2006, 35(18): 41—44.
- WANG Tian-xu, MENG Ji-long, HU Yong-jun. Structure and Phase Transformation Behavior of Ni-P and Ni-W-P Electroless Plating Layer on Aluminium Alloy[J]. Hot Working Process, 2006, 35(18): 41—44.
- [21] 张天顺, 张晶秋, 张琦. 铝及铝合金化学镀 Ni-P 合金工艺研究[J]. 电镀与涂饰, 2006, 25(8): 41—43.
- ZHANG Tian-shun, ZHANG Jing-qiu, ZHANG Qi. Study on the Process of Electroless Ni-P Alloy Plating on Aluminium and Aluminium Alloy[J]. Electroplating & Finishing, 2006, 25(8): 41—43.
- [22] 邵光杰, 秦秀娟, 李惠, 等. 电沉积 Ni-P 合金镀层耐蚀性的研究[J]. 电镀与精饰, 2001, 23(3): 5—7.
- SHAO Guang-jie, QIN Xiu-juan, LI Hui, et al. Study on Corrosion Resistance of Electrodeposited Ni-P Alloy Coating[J]. Plating & Finishing, 2001, 23(3): 5—7.
- [23] 靳跃钢, 高海波, 赵耀辉, 等. 美军弹药包装设计试验要求[J]. 包装工程, 2013, 34(1): 137—140.
- JIN Yue-gang, GAO Hai-bo, ZHAO Yao-hui, et al. Design and Test Requirements of US Military Ammunition Packaging[J]. Packaging Engineering, 2013, 34(1): 137—140.