

# 强磁场对电磁发射弹药引信的危害及防护

罗会彬<sup>1</sup>, 梅新华<sup>2</sup>

(1. 中国船舶重工集团有限公司第七一〇研究所, 湖北 宜昌 443003;

2. 中国船舶重工集团有限公司鹏力(南京)大气海洋信息系统有限公司, 江苏 南京 210000)

**摘要** 研究了强磁场环境对弹药引信的危害, 探讨了引信对强磁环境的防护方法, 涉及到引信中活动零部件的设计及防护、引信中电路的强磁环境耐受性及防护 2 个方面。基于防护方法实用性的考虑, 提出了采用位置布局与柔性导磁材料屏蔽相结合, 对电磁发射弹药引信进行强磁场防护的方法, 通过仿真和实验室试验, 验证了提出的防护方法可为引信中的活动零部件、电路提供有效防护。

**关键词** 电磁发射; 线圈炮; 强磁场; 引信强磁场防护; 屏蔽

中图分类号 TM153.5 文献标识码 A 文章编号 2096-5753(2021)01-0058-05

DOI 10.19838/j.issn.2096-5753.2021.01.010

## Hazards and Protection to Electromagnetic-launched Ammunition Fuze Under High Magnetic Field Environment

LUO Huibin<sup>1</sup>, MEI Xinhua<sup>2</sup>

(1. No.710 R&D Institute, CSIC, Yichang 443003, China

2. Pride (Nanjing) Atmosphere Ocean Information System Co., Ltd., CSIC, Nanjing 211106, China)

**Abstract** The hazards to ammunition fuze under high magnetic field environment are studied in this paper. Then the protection method of ammunition fuze against high magnetic field environment are discussed, which involves the design and protection of moving parts in the fuze, as well as the tolerance and protection of circuit boards against high magnetic field environment. In consideration of practicality, a protection method that combines position layout with flexible magnetic material shielding is proposed for the protection of electromagnetic-launched ammunition fuze under high magnetic field. At last, the simulation and test results show that the shielding method has an excellent protection performance to the moving parts and circuit boards in ammunition fuze.

**Key words** electromagnetic launch; coilgun; high magnetic field; protection of fuze against high magnetic field; shielding

## 0 引言

电磁炮主要可分为轨道炮和线圈炮 2 种, 其他类型的电磁炮可视作这 2 种炮的变种。关于电磁炮的研究已有近百年的历史<sup>[1]</sup>, 但时至今日仍未出现实用的电磁炮, 究其原因除电磁炮技术本身工程化

应用尚需时日外<sup>[2]</sup>, 另一个原因就是可用于电磁炮发射的弹药技术大大滞后于电磁炮技术本身, 迄今为止电磁炮试验用弹丸均为动能弹丸。

电磁炮弹药技术滞后的原因主要有 4 个方面:

1) 以动能作为毁伤手段的弹药, 认为高速弹丸所产生的动能直接作用到目标上, 所产生的破坏

效果比化学反应的爆炸大得多<sup>[3-5]</sup>, 无需过多研究动能毁伤以外的弹药技术;

2) 弹药中火工品及主装药在强磁环境中的安定性及强磁防护问题;

3) 弹药中活动零部件的设计及防护问题;

4) 弹药中电路的强磁环境耐受性及防护问题。

在电磁炮弹药技术工程化之前, 上述 4 个问题中, 后 3 个问题必须得到彻底解决。本文意在研究强磁场环境对弹药引信的危害, 以及探讨引信对强磁环境的防护方法, 涉及到引信中活动零部件的设计及防护、引信中电路的强磁环境耐受性及防护 2 个方面。

关于弹药中电路的强磁环境耐受性及防护的研究, 胡伟<sup>[6]</sup>等研究了基于轨道炮发射的强磁场对近炸引信电路产生干扰问题, 建立了相应的磁场模型, 理论分析了电磁屏蔽原理, 对屏蔽效能进行了评估, 针对不同的磁场频率, 开展了铁磁材料、铜的屏蔽效果试验验证工作。研究结论是“有效屏蔽电磁发射弹药发射过程中产生的膛内强磁场是可行的”。另外, 胡伟等的论文中指出“近炸引信在印制板水平或垂直方向时, 均可适应最大 1.47 T 的振荡磁场环境, 满足电磁发射弹药近炸引信所处头部处最大磁场强度 0.5 T 环境要求”。但论文中没说明近炸引信是通电状态还是非通电状态。一般而言近炸引信应在出膛后相当远的距离后才开始工作, 应不存在在膛内通电工作的问题。相对于通电状态, 非通电状态的电路, 其对强磁场环境的适应能力要强得多, 具体情况下文分析。吉晓菲等<sup>[7]</sup>同样基于轨道炮, 研究了采用导磁导电材料构成的双屏蔽层屏蔽电磁炮弹药遥测装置的问题, 仿真结果表明所提出的方法屏蔽效果达 28.026 dB, 显然这是一个可观的数据, 但这一结果文中并没给出试验验证结论。王文豪等<sup>[8]</sup>虽没直接研究电磁炮的相关问题, 但所用的电磁驱动式引信过载试验装置实质上可看成是单级线圈炮。参考文献[8]提出: 采用铝钢复合材料制成的引信电磁屏蔽罩, 效果非常理想; 但其在结论中提到是屏蔽磁感应强度为 1.54 T 的试验结果, 且屏蔽结构为铝、钢, 厚度各为 5 mm, 相对于引信而言, 这样的重量和体积显

然难以接受, 且 1.54 T 的场强相对较易屏蔽。当然, 作为引信实验装置, 该法仍有较强的实用性。

从有限的文献分析, 有关弹药中电路的强磁环境耐受性及防护, 现有研究大都集中理论仿真层面, 在实施层面有进一步开展研究的必要, 至于结论是否是基于轨道炮还是线圈炮而得到这一点并不重要, 重要的是找到切实可行的强磁防护方法。

弹药引信中安全保障机构大都含在活动零部件, 引信的安全保障机构是弹药安全性的重要保障, 必须给予足够的重视, 基于此原因, 姚宝珍等<sup>[9]</sup>提出了相应的方法, 该方法是利用弹丸出炮口后的爬行力过载作为安保系统第 2 级保险解除的环境信息。第 1 级保险在膛内启动, 在出炮口后延期解除, 第 2 级为机电结构, 其所用电池由第 1 级保险解除后激活, 因此第 2 级解保无活动部件, 但第 1 级是否存在不得而知, 如果存在, 怎么处理, 这也是本文研究的内容之一。

## 1 危害分析

### 1.1 对活动零部件的危害

强磁场对活动零部件的危害主要是使其误动作, 包括应该动作时不能动作, 不应该动作时却动作 2 种情况。惯性作为常用的解保环境力, 在电磁发射弹药引信中也有应用<sup>[9]</sup>, 若采用机械式惯性保险装置, 则上述 2 种危害将同时存在:

1) 正常情况下惯性保险装置感知发射过载而解保, 但由于磁场作用, 使得在惯性保险件产生的电磁力阻止了惯性保险件运动, 导致解保失效, 或因惯性保险件相关的结构因电磁力而变形, 使惯性保险件运动受阻而导致解保失效;

2) 由于磁场作用, 使得惯性保险件受电磁力的作用而提前运动, 使得解保时序发生错误。同样的机理, 强磁场对弹药引信安全系统中常用的隔爆机构也会产生上述 2 种危害。

### 1.2 对电路的危害

强磁场对弹药引信电路的危害有如下 2 个方面:

1) 电路结构损坏(伤), 金属结构件可能因强磁场的作用产生形变乃至损坏, 图 1 是电路模盒损

坏前后情况对比。在传统的印制电路板布线时常采用大面积敷铜结构来减小干扰,这一措施在强磁场环境下引信电路却存在危害风险,因强磁场作用可能导致大面积敷铜结构剥落。

2) 电路功能丧失, 电路功能丧失包括电路工作状态和非工作状态。

①电路工作状态时的危害, 试验表明通用的电路在数十 mT 级磁感应强度静磁场下可正常工作, 百 mT 级时电路功能丧失, 但这种丧失是可恢复的。即磁感应强度减小到数十 mT 级时, 电路又恢复正常工作, 进一步试验表明, 电路在工作状态, 可耐受约 2 T 磁感应强度的环境, 尽管其功能已完全丧失, 但磁场撤除后, 电路功能性能既可恢复正常。

②电路非工作状态时的危害, 从已有的试验数据分析, 电路在非工作状态时可承受 5 T 磁感应强度的强磁场环境。

上述①、②情况下, 电路在何种强度的磁场环境条件下会永久性损伤, 目前还没有试验数据支撑。



图 1 电路模盒损坏前  
Fig. 1 State of circuit board before test

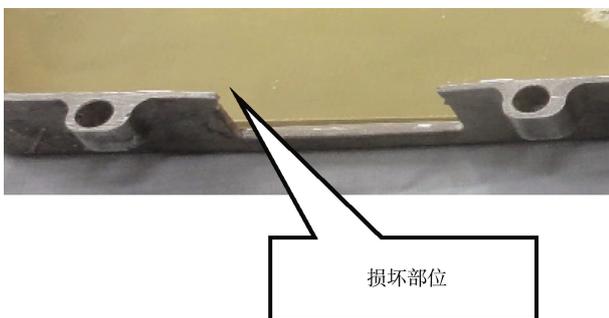


图 2 电路模盒损坏后  
Fig. 2 State of circuit board after test

## 2 防护方法

### 2.1 强磁场分布仿真

本文的研究是基于线圈炮而展开的, 仿真工作的主要内容有: 线圈炮的磁场分布, 常用的屏蔽效果分析。

假设弹药电枢上需要的最大磁感应强度为 15 T, 则线圈炮产生的最大磁感应强度应约为 16 T 静磁场, 线圈炮的磁场分布如图 3 所示。

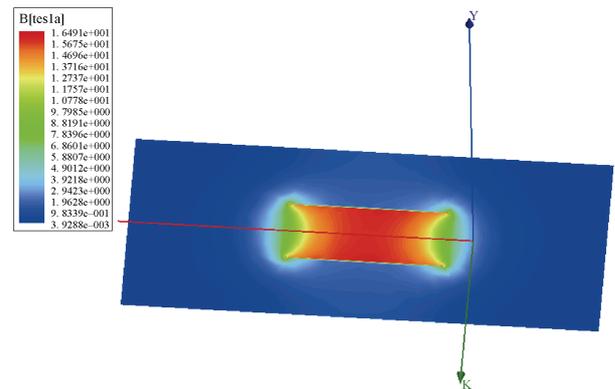


图 3 线圈炮的磁场分布  
Fig.3 Magnetic field distribution in coilgun

从图 3 中可看出, 炮管内的磁感应强度沿炮管轴向衰减较快, 离炮管中心 (具体是线圈中心) 一定距离时磁感应强度已由约 15 T 下降到约 5 T。因此弹药引信强磁场的防护方法之一是将引信布置在尽可能远离电磁炮通电线圈的位置。

### 2.2 磁场屏蔽效果仿真

采用屏蔽减小磁感应强度是常用的方法, 分主动屏蔽和被动屏蔽 2 种, 主动屏蔽需要较强的电能, 在弹药上难以实现, 因此本论文只研究被动屏蔽。针对被动屏蔽问题, 文献[5]进行了较全面的研究, 其分别采用导电、导磁材料设计了单层、多层组合屏蔽体。仿真研究了离弹底不同距离处的强磁场屏蔽效果, 得出: 在离电枢较近时, 导电材料与导磁材料的屏蔽效能较低; 屏蔽体距离电枢越远时, 导电材料的屏蔽效能不变; 导磁材料的屏蔽效能逐渐提高, 距离电枢 100 mm 时屏蔽效能达到

34 dB。但该文没给出磁感应强度的绝对大小。事实上, 磁感应强度越大, 采用铜、硅钢等材料屏蔽的效能越差, 反之屏蔽的效能越好, 但在工程应用上, 将高磁感应强度大幅度降低更有意义。

采用导磁材料硅钢和导电材料铜组成多层屏蔽, 并将其设计成圆柱形屏蔽盒结构进行仿真, 图 3 是屏蔽盒拟放置处 (也是将来引信布置处) 的磁感应强度分布情况。

由图 4 可知, 引信布置处的磁感应强度约在 3.02 ~ 5.36 T 之间。

通过研究表明, 屏蔽盒采用“硅钢-铜-硅钢”3 层结构有较好的屏蔽效果, 仿真结果见图 4。

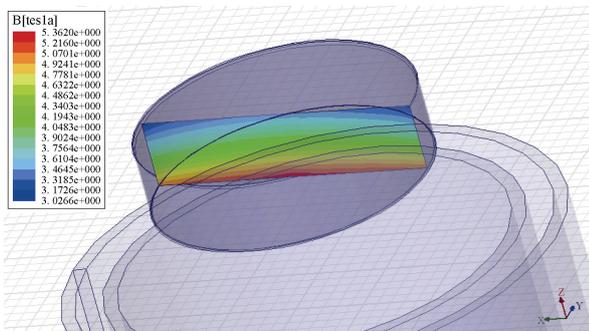


图 4 引信布置处磁场分布

Fig. 4 Magnetic field distribution around location of fuze

由图 5 可看出屏蔽盒内磁感应强度在 0.85 ~ 4.90 T 之间。对比图 3 与图 4 可知, 相同位置最大磁感应强度由 5.36 T 下降到了 4.90 T, 最小磁感应强度由 3.02 T 下降到了 0.85 T。可见屏蔽有减小磁

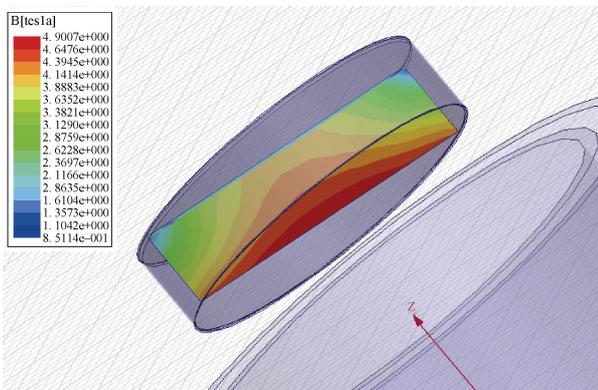


图 5 屏蔽盒内磁场分布

Fig. 5 Magnetic field distribution inside shielding box

感应强度的作用, 因此, 弹药引信防护强磁场的方法之二是屏蔽。

分析上述数据还可发现, 采用文中提出的屏蔽方法, 存在磁感应强度最大值处下降幅度小、最小值处下降幅度大的现象。分析原因是: 结构的屏蔽能力取决于导磁材料的磁饱和强度, 磁感应强度超过导磁材料的磁饱和强度越多, 结构的磁屏蔽效果越差。

### 2.3 磁场屏蔽效果验证

虽然仿真表明采用“硅钢-铜-硅钢”3 层结构有较好的屏蔽效果, 但由于硅钢的工艺性较差, 具体工程实施困难。因此, 在实验室进行屏蔽效果验证试验时, 采用了一种工艺性较好的柔性导磁材料制造屏蔽结构。

屏蔽效果验证装置为由柔性导磁材料制成的双层屏蔽盒, 试验时线圈炮产生 5 T 的磁感应强度, 以模拟引信所在位置的磁场环境。试验结果: 双层屏蔽盒内的最大磁感应强度为 2.15 T, 基本满足电路在腔内加电而不会永久损坏的要求。

### 2.4 小结

总体而言, 电磁发射弹药引信的强磁场防护方法有位置布局与柔性导磁材料屏蔽 2 种, 一般情况是上述 2 种方法的组合。之所以特别强调柔性导磁材料屏蔽, 是因为考虑了方法实施的可行性, 如上述采用导磁硅钢材料设计屏蔽结构, 但由于硅钢材料工艺性差而不可实施。理论上还许多可用于磁屏蔽的材料, 如铁氧体<sup>[10]</sup>、铂镍合金等。铁氧体材料的磁饱和值比硅钢材料高, 理论上铁氧体材料比硅钢材料有更好的屏蔽效果, 但同样存在工艺性差的问题, 且受到冲击时铁氧体材料还容易破损。铂镍合金也有较好的导磁特性, 但这种材料在经受高过载后其导磁特性会发生变化。而电磁发射时高过载也是弹药必须经历的发射环境, 故强磁屏蔽在理论上的可行方法, 结合实际应用环境, 却不具有可实施性。

具体到引信中活动零部件对强磁场的防护, 建议主要采用位置布局的防护方法, 最彻底的方法是引信的零部件, 无论是固定件还是活动件, 均采用非金属材料制造。

关于引信中电路对强磁场的防护,除采用位置布局与柔性导磁材料屏蔽组合防护方法外,还建议禁止在电路印制板上采用大面积敷铜结构,不得已时可采用网格敷铜结构。另外,还应在分析弹药工作时序的基础上,决定电路是否必要在膛内加电(此处仅仅是电路接通电源,而不是电路工作),如近炸引信的电路就完全没必要在膛内加电,特别强调防护的必要性,避免产生额外的工作。

### 3 结束语

本文分析了强磁场环境对电磁发射弹药引信的危害,通过仿真和实验室试验,验证了所提出防护方法的有效性、实用性。采用位置布局与柔性导磁材料屏蔽法,可为引信中的活动零部件、电路提供有效防护。需说明的是,本论文尚未摸清电路耐受磁场强度的极值,防护方法是基于已有的试验结果而提出。因此,本文涉及的内容还有进一步深入研究的必要。

### 参考文献

- [1] 王莹,肖峰. 电炮原理[M]. 北京:国防工业出版社, 1993: 7.
- [2] 邹本贵,曹延杰. 美军电磁线圈炮发展综述[J]. 微电机, 2011, 44(1): 84-89.

- [3] 陶青青,吕庆敖,杨勇. 电磁轨道炮发射器的应用优势及技术难题[J]. 装备环境工程, 2010(10): 169-172.
- [4] 王慧锦,曹延杰,王成学. 美国海军电磁导轨炮发展综述[J]. 舰船科学技术, 2010, 32(2): 138-143.
- [5] 廖桥生,张祥金,李豪杰,等. 轨道炮弹丸所处强磁场环境屏蔽设计与仿真[J]. 火炮发射与控制学报, 2016, 37(2): 67-72.
- [6] 胡伟,胡艳伟,文衍凤. 电磁发射弹药近炸引信强磁场环境适应性技术研究[C]//中国兵工学会第二十一届学术年会论文集. 北京:中国兵工学会, 2019: 604-610.
- [7] 吉晓菲,孙发鱼,白瑞青,等. 电磁炮弹丸遥测装置的电磁防护方法[J]. 探测与控制学报, 2019, 41(2): 57-61.
- [8] 王文豪,毕世华,向红军. 电磁驱动式引信过载试验装置中的电磁防护研究[J]. 兵工学报, 2016, 37(5): 909-915.
- [9] 姚宝珍,李振华,白俊洋. 电磁智能弹药机电引信安保系统工程研究[C]//中国兵工学会第二十一届学术年会论文集. 北京:中国兵工学会, 2019: 611-616.
- [10] 侯炎馨,刘振祥,杨栋. 线圈型电磁发射器的一种屏蔽方案[J]. 四川兵工学报, 2013, 34(4): 56-59.

(责任编辑:张曼莉)