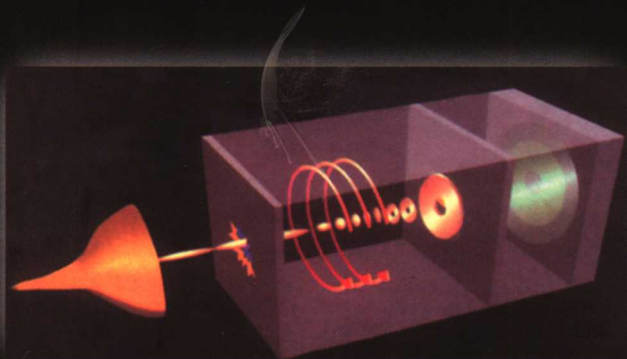




电磁装甲

技术原理及其有限元分析

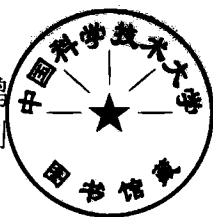
主编 胡金锁

兵器工业出版社

电磁装甲技术原理及其 有限元分析

主 编 胡金锁
副主编 李治源
 郑振忠
 程树康

李小鹏
李志刚



兵器工业出版社

内 容 简 介

本书根据电磁装甲的作用机理对其进行了较为科学的分类,新的分类方法有助于理解电磁装甲的原理和实质。在分类的基础上,我们有选择地对两类典型电磁装甲技术原理进行了深入的探讨。第一次较为全面地提出和分析了被动电磁装甲的电磁力、射流不稳定性、欧姆加热、汽化和电爆炸三种主要的作用机理以及主动电磁装甲弹射机理、机电特性、主要参数确定、典型主动电磁装甲的结构设计及实验研究方法等内容,并进行了原理性的数学推导。采用有限元分析方法对在电磁装甲作用机理和相关参数进行了计算和分析,为将来工程化打下了基础。

图书在版编目(CIP)数据

电磁装甲技术原理及其有限元分析 / 胡金锁主编. — 北京: 兵器工业出版社, 2005.11

ISBN 7-80172-514-X

I. 电... II. 胡... III. ①电磁场—装甲—理论牵引②电磁场—装甲—有限元分析 IV. TJ81

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2005) 第 086852 号

出版发行: 兵器工业出版社

发行电话: 010-68962596, 68962591

邮 编: 100089

社 址: 北京市海淀区车道沟 10 号

经 销: 各地新华书店

印 刷: 泰安市长城印刷有限公司

版 次: 2005 年 11 月第 1 版第 1 次印刷

印 数: 1-550

责任编辑: 王 强

封面设计: 杨 宇

责任校对: 全 静

责任印制: 赵春云

开 本: 850×1168 1/32

印 张: 9.5

字 数: 249 千字

定 价: 40.00 元

(版权所有 翻印必究 印装有误 负责调换)

前 言

本书是一部描述电磁装甲理论和技术的论著。

电磁装甲概念的提出可追溯到 20 世纪,它属于电磁发射领域的一个分支。从学术理论和军事应用两个角度看,世界上对电磁装甲的研究就从来没有停止过。鉴于电磁装甲有多个研究方向,研究的学者又分散在世界各地,各自的研究重点又各有不同,最终形成一片无序的混沌局面,甚至出现相同的结构却有五花八门多种叫法的事情。再加上电磁装甲技术是新概念军事应用技术,很多关键技术我们无法获得,因此开展原理性的探讨并使之系统体系化、理论化就显得尤其重要。这也是我们出版这本书的初衷。

本书根据电磁装甲的作用机理对其进行了较为清晰和科学的分类,新的分类方法有助于理解电磁装甲的原理和实质。在分类的基础上,我们有选择地对两类典型电磁装甲技术进行了深入的探讨。第一次较为全面地提出和分析了被动电磁装甲的电磁力、射流不稳定性、欧姆加热、汽化和电爆炸三种主要的作用机理以及主动电磁装甲弹射机理、机电特性、主要参数确定、典型主动电磁装甲的结构设计及实验研究方法等内容,并进行了原理性的数学推导。采用有限元分析方法对电磁装甲作用机理和相关参数进行了计算和分析,为将来工程化打下基础。

在本书的叙述中,第一部分和第二部分侧重原理理论分析,而第三部分除了描述原理以外,尤其着重探讨了诸如主动电磁装甲关键参数分析、性能分析与评价等内容。它的研究方法同样适

合第二部分的线圈感应式主动电磁装甲,限于篇幅,我们只重点探讨了磁场重接式主动电磁装甲的工程技术问题。撰写此书时,对每一类的电磁装甲技术原理都尽量做到深入浅出,以便各种层次的人都能看懂;同时,有侧重地对其进行定性或定量的理论分析、数学建模、计算机仿真,为专业技术人员的深入研究抛砖引玉。

就本书的框架而言,力图做到各篇之间理论体系完整,能较为全面地反映这一新兴领域的原理与进展,并使之成为有机的一体。同时,三大部分之间又是相互独立、各成体系的,可供专门从事某一种电磁装甲研究的专家学者参考,既照顾到“面”,又满足“点”的要求。

前不久,温家宝总理在国家科学技术奖励大会上的讲话中提到,“当今世界,科学技术是综合国力竞争的决定性因素,自主创新是支撑一个国家崛起的筋骨。我们引进和学习世界上先进的科技成果,但更重要的是要立足自主创新,真正的核心技术是买不来的。只有拥有强大的科技创新能力,拥有自主知识产权,才能提高我国的国际竞争力,才能享受受人尊重的国际地位和尊严。必须把增强自主创新能力作为国家战略,贯彻到现代化建设的各个方面,贯彻到各个产业、行业 and 地区,努力将我国建设成为具有国际影响力的创新型国家。必须加强原始创新、集成创新和引进技术基础上的消化吸收,在关键领域掌握更多的自主知识产权,在科学前沿和战略高技术领域占有一席之地”。从创新和关键技术自主知识产权的角度出发,我们出版这本书就是在这一领域做了“第一个吃螃蟹”的人。我们的出发点是以先进的理论创新促进我军装甲装备的防护技术优势的建立,并将先进的军事技术优势转化成军事技术威胁,从而达到“不战而屈人之兵”的目的。古人曾经说过,“天下虽安,忘战必危”,没有人愿意打仗,但是我们并不惧怕与人兵戎相见,那么,科技创新和进步就是我们底气十足、挺直腰杆讲话的根基。

在撰写本书时，得到了杨作成、张兵志、冯武斌、于志灏、朱宗平等领导的大力支持，并给予了很大的帮助和具体指导；周广恩、田亮、郑萍、杨作宾等同志做了大量而有益的工作；课题组葛天福、徐龙堂、陈庆昌、张明、辛建国等同志的刻苦研究工作成果对此书的完成起到了很大的支撑作用，在此一并表示衷心的感谢！

由于我们学识有限，以及此举是第一次在本领域构建学术专著框架，书中错误必然不少，恳请读者与专家指正。

作 者

2005 年 5 月于北京

目 录

第 1 章 引言	1
1.1 装甲的发展和现状.....	1
1.2 电磁装甲分类及其研究现状.....	3
1.3 主动防护技术产生的背景.....	11
1.4 主动防护硬杀伤系统现状.....	14
1.4.1 俄罗斯的研制情况.....	14
1.4.2 以色列的研制情况.....	17
1.4.3 美国的研制情况.....	18
1.4.4 英国的研究情况.....	20
1.5 主动防护技术与主动电磁装甲的对比.....	21
1.6 研究的宗旨和意义.....	23
1.7 本书主要讨论的内容.....	25

第一部分 被动电磁装甲篇

第 2 章 被动电磁装甲电磁力作用机理	29
2.1 引言.....	29
2.2 作用机理概述.....	29
2.3 力学模型的建立.....	33

2.3.1	基本假设	33
2.3.2	电磁力作用方程	34
2.3.3	电路方程及其解	39
2.4	小结	41
第 3 章	基于欧姆加热原理的被动电磁装甲理论	42
3.1	引言	42
3.2	加热和汽化金属射流过程机理分析	42
3.3	爆炸汽化射流变阻值和电流强度求解	49
3.4	小结	54
第 4 章	金属射流不稳定性分析	55
4.1	引言	55
4.2	射流不稳定性控制方程	55
4.3	小结	71
第 5 章	被动电磁装甲有限元法数值仿真	72
5.1	引言	72
5.2	有限元法简介	72
5.2.1	前置处理	75
5.2.2	解题程序	76
5.2.3	后置处理	76
5.3	有限元法推导穿甲杆节点位移和 转角的表达式	77
5.4	求解实例	93
5.4.1	分解为两元素	94
5.4.2	求元素 1 的刚度矩阵	94
5.4.3	分布力化为集中力与弯矩	95
5.4.4	求出元素 1 节点上的挠度与转角	95
5.4.5	求元素 2 的刚度矩阵	96
5.4.6	元素 2 节点的总受力	96

5.4.7	求出元素2挠度和转角	97
5.4.8	合并两元素	97
5.4.9	加入边界条件	98
5.5	射流汽化分析	108
5.6	射流不稳定性求解与仿真	110
5.7	小结	114
	参考文献	116

第二部分 线圈感应式主动电磁装甲篇

第6章 关于线圈感应式主动电磁装甲射弹拦截器

	的理论	127
6.1	射弹拦截器的发射原理	127
6.1.1	线圈感应式射弹拦截器工作原理	127
6.1.2	磁场重接式射弹拦截器工作原理	129
6.2	工作过程中的基本假设	130
6.3	射弹拦截器的机电模型建立	131
6.3.1	电路方程	131
6.3.2	推力方程	135
6.3.3	运动方程	139
6.4	小结	139

第7章 线圈感应式主动电磁装甲射弹拦截器磁场

	及电磁力计算	141
7.1	发射线圈的磁场	141
7.1.1	参数方程	141
7.1.2	发射线圈磁场等效分析和计算途径	142

7.1.3	具有矩形截面的单匝圆线圈的磁场	144
7.2	单匝圆线圈磁场单积分法	148
7.3	发射线圈磁场计算	152
7.3.1	固定高度和固定电流时的 B_ρ 和 B_z 分布	153
7.3.2	固定电流和不同高度的 B_ρ 、 B_z 分布	155
7.3.3	不同电流和固定高度的 B_ρ 、 B_z 分布	155
7.4	电磁力	156
7.5	电磁力计算	159
7.5.1	拦截板电磁力的径向分布	161
7.5.2	拦截板运动的计算结果	162
7.5.3	电参量对拦截板速度的影响	162
7.5.4	拦截板材料对其速度的影响	163
7.6	小结	164
第 8 章	拦截板动力学的有限元分析	165
8.1	电磁场的有限元法	165
8.1.1	麦克斯韦方程组	165
8.1.2	位函数的微分方程	166
8.1.3	位函数的边界条件	168
8.1.4	位函数的边值问题	169
8.1.5	有限单元法求解	170
8.2	ANSYS 的电磁场分析	174
8.3	2D 瞬态电磁场分析的一般步骤	178
8.3.1	2D 瞬态磁场分析中用到的单元	178
8.3.2	创建 2D 瞬态磁场分析的物理环境	179
8.3.3	建立模型, 划分网格, 赋予特性	182
8.3.4	加边界条件和励磁载荷	183

8.3.5 求解	184
8.3.6 后处理	186
8.4 用 2D 瞬态磁场分析射弹拦截器的 磁场和受力	187
8.5 有限元计算结果分析	190
参考文献	191

第三部分 磁场重接式主动电磁装甲篇

第 9 章 磁场重接式主动电磁装甲的基本原理	201
9.1 磁场重接式主动电磁装甲所采用的技术	201
9.1.1 重接式电磁发射装置的类型及 性能分析	202
9.1.2 电感储能磁场重接式 主动电磁装甲	207
9.1.3 电容储能磁场重接式 主动电磁装甲	209
9.2 磁场重接式主动电磁装甲运动过程的 本质分析	210
9.3 磁场重接式主动电磁装甲的运动方程	211
9.3.1 电感储能磁场重接式主动电磁装甲的 运动方程	211
9.3.2 电容储能磁场重接式主动电磁装甲的 运动方程	213
9.4 线圈内的磁场分析	216
9.5 发射体内的涡流	219

9.5.1	发射体内涡流模型·····	219
9.5.2	发射体的磁场屏蔽作用·····	221
9.6	磁场重接式主动电磁装甲的磁场 有限元分析·····	227
9.7	小结·····	230
第 10 章	磁场重接式主动电磁装甲构成·····	231
10.1	磁场重接式主动电磁装甲的结构·····	231
10.2	充电回路·····	232
10.3	开关·····	234
10.3.1	火花间隙开关的基本原理·····	235
10.3.2	控制电路和触发电路·····	236
10.4	传输线·····	238
10.5	放电回路的参数分析·····	240
10.6	小结·····	245
第 11 章	磁场重接式主动电磁装甲的参数分析·····	246
11.1	线圈参数分析·····	247
11.1.1	线圈选型·····	248
11.1.2	线圈中的电流对系统性能的影响·····	249
11.1.3	线圈匝数对系统性能的影响·····	254
11.1.4	线圈截面积对系统性能的影响·····	258
11.1.5	线圈匝间距对系统性能的影响·····	260
11.2	发射体参数分析·····	262
11.3	线圈与发射体相对参数分析·····	263
11.3.1	线圈和发射体之间距离对系统性能 的影响·····	263
11.3.2	发射体的初始位置对系统性能 的影响·····	267
11.4	小结·····	269

第12章 讨论与展望	271
12.1 阶段性结论.....	271
12.1.1 关于被动电磁装甲部分.....	271
12.1.2 关于线圈感应式主动电磁装甲部分.....	273
12.1.3 关于磁场重接式主动电磁装甲部分.....	275
12.2 关于电磁装甲分类的讨论.....	276
12.3 关于电磁装甲工程化实施阶段的讨论.....	278
参考文献	280

第1章 引言

1.1 装甲的发展和现状

众所周知，反装甲武器是“矛”，起防护作用的装甲是“盾”，装甲与反装甲武器总是在对抗中发展。随着反装甲武器的发展和反装甲弹药穿破甲能力的提高，装甲防护能力也在不断地改进和加强。但是，现在加厚的均质钢装甲已抵御不住新型弹药的攻击，为此各国纷纷为新型坦克研制出了新型装甲，诸如复合装甲、间隔装甲、反应式装甲、贫铀装甲等。由于装甲防护技术的发展与进步，必然促使反装甲技术的不断更新和反装甲种类的不断增多，除陆基的坦克炮、反坦克炮、反坦克导弹、火箭筒、地雷以外，还有空中的武装直升机和反坦克攻击机等，特别应当注意即将应用的电炮（电热和电磁炮）。研制新概念装甲必须时时注意反装甲武器的形式和性能的发展，以用我之良“盾”防敌之“矛”。

坦克装甲车辆的装甲一般是指包围在战车外面的封闭式基础壳体，或在壳体外安装的各类抗击弹药攻击的装甲部件。因此，装甲的主要作战用途是：抵御各类反坦克武器的攻击；防御各种炮弹破片及枪弹；保护车内人员、武器、弹药、燃料、各种装置和设备的安全；坚硬的装甲壳体也可用于冲撞、破坏各种障碍物和军事技术装备等。现在坦克装甲种类繁多，按生产可分为铸造装甲和轧制装甲；按材料可分为钢装甲和铝合金装甲；按结构可

分为单体装甲和复合装甲；根据安装方式分，有挂甲和附加装甲；按作用方式分为主动装甲和被动装甲；还有区别于普通装甲的特种装甲，诸如铀装甲、夹层装甲、间隔装甲、间隙装甲、特形装甲等。

现代装甲可采用各种材料制造，如黑色金属、有色金属、稀土金属、玻璃纤维、陶瓷、增强塑料、各种金属化合物和非金属材料等。迄今为止，现代坦克和装甲车辆的装甲应用最多的、最广泛的材料还是装甲钢。除铝合金装甲外，各种类型的装甲都以装甲钢为主体，或以其为结构框架组成。钢铁是各国坦克装甲车辆普遍采用的装甲材料。装甲钢的化学成分一般都含有镍和铬元素，由于含镍和铬的装甲钢具有优良的抗拉强度和韧性，各国主战坦克的主要装甲一般都由镍铬钢制造，它具有综合抗弹能力强的优良特性。

为对付各种类型的装甲，种类繁多的反装甲武器也应运而生，除核武器外，常规兵器反装甲的办法也是多种多样的。用坦克来反坦克是最有力的手段，各种反坦克的制导武器和反坦克火箭弹药是最常用的反坦克办法，高速的动能穿甲弹、空心装药破甲弹、碎甲弹、乃至大口径的榴弹都是反坦克的有效弹种。各种形式的防坦克地雷和火焰喷射器是反坦克的普通措施，空中武装直升机和反坦克强击机以及轰炸机也是反坦克的锐利武器。目前，坦克已成为各种现代常规兵器的众矢之的，也是电炮发射的初速度大于等于 3km/s 动能弹攻击的目标。反坦克武器不但多，而且威力都很强大和有效。俄罗斯 T—80 主战坦克的 125mm 滑膛炮发射的钨弹芯的尾翼稳定脱壳穿甲弹，可按 60° 法线角度击穿 230mm 厚的轧制钢装甲。美国 M1A1 坦克的 120mm 滑膛炮发射的 M—829E₁ 尾翼稳定脱壳穿甲弹，可击穿水平厚度为 650mm 的钢板。英国在“百人队长”坦克上试验了 140mm 火炮，弹药威力可击穿 1000mm 厚的装甲。美国陆军阿帕奇武装直升机发射的海尔法反坦克导弹，可击穿 1050mm 厚的装甲。俄罗斯 AT—7

(米蒂斯)单兵反坦克导弹,能击穿 850~900mm 厚的装甲。俄罗斯最近研制成功的瞄准线半自动激光制导的 AT-X-14 反坦克导弹,应用串联式空心装药弹头,能穿透 1200mm 用爆炸反应式装甲保护的装甲。可见,单体普通形式的装甲已抵不住现代反装甲武器的进攻,研制新概念装甲—电磁装甲势在必行。

1.2 电磁装甲分类及其研究现状

1973 年, Walker 最先提出电磁装甲概念。电磁装甲可分为被动式和主动式两种。

被动式电磁装甲(原始 Walker 板型,后来又出现诸多种类的被动电磁装甲,分类讨论见本书的第 13 章)主要由两块间隔一定距离的装甲钢板组成,见图 1-1。两板接高压电容器组的两极,当破甲弹爆炸时形成的金属射流或穿甲弹的弹芯穿过外板而接近内板时,空气隙被击穿,短路引发电容器组释放电能,并形成强大的磁场,同时大电流通过射流或弹芯,在强磁场的作用下,由于罗伦兹力和欧姆加热效应,在射流或弹芯中产生不稳定的磁流体动力效应,导致射流或弹芯破碎并大大降低其侵彻能力。

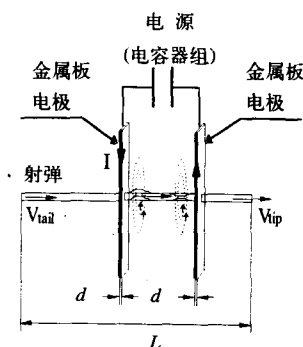


图 1-1 被动电磁装甲原理图

主动电磁装甲是一种新概念主动防护技术,如图 1-2 所示。它同传统的主动防护技术相比,最大的区别在于,它的拦截装置不再使用化学能(如火箭或小型榴弹等),而是使用电能。它由储能电容器、开关、脉冲成型网络、发射线圈和拦截板组成,其工作过程为:(1) 探测系统以足够高的精度及时发现和识别高速来袭的射弹;(2) 控制系统精确计算来袭射弹的弹道并在最佳时机向拦截装置发出触发信号;(3) 触发信号将拦截装置的开关闭合,储能电容器通过开关、脉冲成型网络和发射线圈放电,形成脉冲强磁场,拦截板受到电磁力的作用,被发射出去,与来袭射弹相撞,使来袭射弹被摧毁或者末段弹道性能受到严重影响,从而减小主

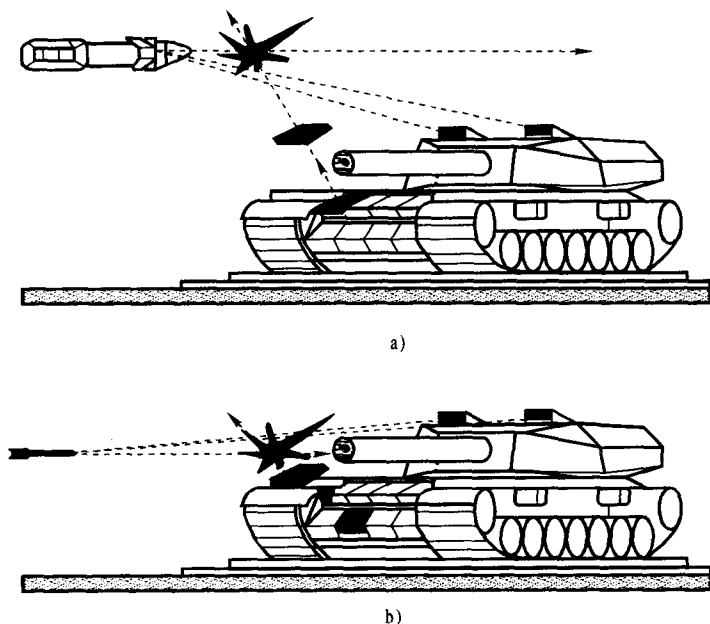


图 1-2 主动电磁装甲的工作过程

a) 主动电磁装甲拦截反坦克导弹

b) 主动电磁装甲拦截动能穿甲弹