

新材料新工艺新技术丛书



装甲防护材料技术

ZHUANGJIA FANGHU CAILIAO JISHU

主编 曾 毅 赵宝荣

执行主编 张玉龙 李 萍

副主编 李恒春 郑 威 杨守平 潘士兵 徐勤福



国防工业出版社

National Defense Industry Press

新材料新工艺新技术丛书

装甲防护材料技术

主 编 曾 毅 赵宝荣
执行主编 张玉龙 李 萍
副 主 编 李恒春 郑 威 杨守平 潘士兵 徐勤福

國防工業出版社

· 北京 ·

图书在版编目(CIP)数据

装甲防护材料技术 / 曾毅, 赵宝荣主编. —北京:
国防工业出版社, 2014. 1

(新材料新工艺新技术丛书)

ISBN 978 - 7 - 118 - 08584 - 6

I. ①装... II. ①曾...②赵... III. ①防护—
装甲材料 IV. ①TJ81

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2012)第 287842 号

※

国防工业出版社出版发行

(北京市海淀区紫竹院南路 23 号 邮政编码 100048)

涿中印刷厂印刷

新华书店经售

*

开本 787 × 1092 1/16 印张 23 1/4 字数 565 千字

2014 年 1 月第 1 版第 1 次印刷 印数 1—2000 册 定价 78.00 元

(本书如有印装错误, 我社负责调换)

国防书店: (010)88540777

发行邮购: (010)88540776

发行传真: (010)88540755

发行业务: (010)88540717



本书编委会

主 编	曾 毅	赵宝荣			
执行主编	张玉龙	李 萍			
副 主 编	李恒春	郑 威	杨守平	潘士兵	徐勤福
编 委	(排名不分先后)				
	马 源	孔令美	孔祥海	王四清	王有轩
	王国义	王敏芳	王 超	石 磊	厉 宁
	刘乃环	刘向平	刘宝玉	刘朝辉	许劲松
	朱洪立	孙英富	孙德强	闫惠兰	任 滨
	陈跃如	汪业福	杜仕国	李冰川	李旭东
	李迎春	李宏伟	李 丽	李树虎	李恒春
	李 萍	李桂变	李桂群	杨兴娟	杨 耘
	杨振强	杨晓冬	张文栓	张玉龙	张用兵
	张冬梅	张宝东	张福军	张德琪	张 蕾
	邵鸿飞	邵颖惠	吴建全	周 力	周敏华
	官周国	郑 威	段金栋	郝英华	姚春臣
	宫 平	赵宝荣	赵媛媛	郭 毅	姜 萍
	徐勤福	唐 华	高 岩	陶文斌	盖敏慧
	窦 鹏	黄晓霞	黄 晖	崔 英	崔紫方
	曹根顺	曹 勇	曾 毅	普朝光	路香兰
	潘士兵	穆卫军	薛维宝	戴均平	

前 言

装甲防护材料是指那些能够抵御弹丸及其碎片进攻,防止其损伤,可有效地吸收或分散弹丸射流能量,并能有效地防止受保护物体或人员免受损伤,或者将受损伤程度降至最低的一类材料体系。用这些材料构成的装置通常称为装甲。主要用于坦克装甲车辆、自行火炮、武装直升机、军用飞机、军舰、军事设施和人体防护等领域。装甲防护是提高武器装甲战场生存力最主要的手段之一,也是世界发展研究的重点和热点课题。经过长期的研究与实践,已形成以装甲钢、铝合金、钛合金、防弹陶瓷和防弹纤维/树脂基复合材料以及防弹玻璃透明装甲材料为主体的装甲防护材料体系。随着高新技术在装甲防护领域中的应用,又出现了像反应性装甲、电磁装甲、电热装甲、智能装甲等新一代装甲体系,并快速推动了装甲防护材料技术的发展,呈现出极其光明的发展前景。

为了普及装甲防护材料的基础知识,推广并宣传装甲防护材料技术的研究与应用成果,中国兵工学会科技出版工作委员会、非金属专业委员会和山东兵工学会组织编写了《装甲防护材料技术》一书,全书共8章,较为详细地介绍了金属装甲材料(装甲钢、铝合金和钛合金)、陶瓷装甲材料、功能梯度装甲材料、防弹纤维/树脂基复合材料、复合装甲材料与装置、单兵防护材料与装置及透明装甲材料与装置的基础知识、国内外发展现状、材料研究、装甲的研制及其弹道试验等内容。本书是材料研究、制品设计、生产加工、管理销售、教学人员和武器装备设计、研制人员等必读必备之书,也是广大军事爱好者良好的阅读、参考资料,也可作为教材使用。

本书突出实用性、先进性、可操作性,理论叙述从简,侧重于以实用数据和实例说明问题,结构严谨而清晰、语言简练、信息量大,数据可靠,图表文并茂。若本书出版发行能对我国的装甲防护领域研究与应用有一定的指导与推动作用,作者将感到十分欣慰。

由于水平有限,文中不妥之处在所难免,敬请读者批评指正。

作 者

内 容 简 介

本书重点介绍了金属装甲材料(装甲钢、铝合金和钛合金)、陶瓷装甲材料、功能梯度装甲材料、防弹纤维/树脂基复合材料、复合装甲材料与装置、单兵防护材料与装置及透明装甲材料与装置的基础知识、国内外发展现状、材料研究、装甲的研制及其弹道试验等内容。

本书是材料研究、制品设计、生产加工、管理销售、教学人员和武器装备设计、研制人员等必读必备之书,也是广大军事爱好者良好的阅读、参考资料,也可作为教材使用。

目 录

第 1 章 概述	1
1.1 简介	1
1.1.1 基本概念与范畴	1
1.1.2 历史背景	1
1.1.3 军事需求与发展	1
1.1.4 功能与应用	2
1.2 装甲防护材料的类型与特点	2
1.2.1 钢材	2
1.2.2 铝合金	3
1.2.3 钛合金	3
1.2.4 陶瓷	3
1.2.5 防弹纤维及其树脂基复合材料	4
1.2.6 装甲模型设计	5
1.2.7 发展前景	6
1.3 装甲的类型与特点	6
1.3.1 复合装甲	6
1.3.2 爆炸反应装甲	7
1.3.3 新概念装甲	8
第 2 章 金属装甲防护材料	9
2.1 装甲钢防护材料	9
2.1.1 简介	9
2.1.2 装甲钢的生产	12
2.1.3 装甲钢的研究	15
2.2 铝合金装甲防护材料	28
2.2.1 铝及其合金	28
2.2.2 铝合金装甲材料	46
2.2.3 铝合金装甲材料的研究	53
2.2.4 泡沫铝装甲防护材料	60
2.3 钛及其合金装甲防护材料	63
2.3.1 钛及其合金	63
2.3.2 装甲用钛及其合金	69
2.3.3 钛及其合金装甲材料的研究	70

第3章 陶瓷装甲防护材料	75
3.1 简介	75
3.1.1 陶瓷在坦克装甲防护中的作用和机理	75
3.1.2 适用于装甲的陶瓷材料及其防护性能	75
3.1.3 陶瓷在坦克装甲上的应用及存在的问题	76
3.2 陶瓷装甲材料的品种与性能	77
3.2.1 Al_2O_3 陶瓷装甲材料	77
3.2.2 碳化硅装甲材料	86
3.2.3 碳化硼装甲材料	92
3.2.4 膨化钛装甲材料	95
3.3 陶瓷装甲材料的弹道性能与适用性	102
3.3.1 陶瓷装甲的弹道性能	102
3.3.2 适用的装甲类型	104
3.4 陶瓷装甲材料抗弹性能的评价方法	106
3.4.1 简介	106
3.4.2 抗弹性能的评定指标	106
3.4.3 弹靶撞击过程的划分	107
3.4.4 抗弹机理的研究方法	107
3.4.5 耗能机制	109
3.4.6 影响抗弹性能的主要因素	109
第4章 功能梯度装甲防护材料	111
4.1 功能梯度材料	111
4.1.1 简介	111
4.1.2 功能梯度复合材料的制备技术	111
4.2 功能梯度装甲防护材料的制备技术	130
4.2.1 简介	130
4.2.2 陶瓷、金属在复合装甲中的应用形式及相应特点	134
4.2.3 SiC/Al 功能梯度装甲材料	138
4.2.4 氯化锆增韧 AD95 抗弹陶瓷抗侵彻性能	141
第5章 防弹纤维/树脂基复合材料	144
5.1 简介	144
5.1.1 防弹纤维/树脂基复合材料的基础知识	144
5.1.2 纤维复合材料装甲	145
5.1.3 陶瓷(面板)/复合材料(背板)复合装甲	146
5.1.4 防弹纤维/树脂基复合材料的弹道性能研究	147
5.2 防弹玻璃纤维及其树脂基复合材料	153
5.2.1 玻璃纤维	153
5.2.2 高强玻璃纤维装甲复合材料的防弹机理	156

5.2.3	高强玻璃纤维防弹复合材料的研制	158
5.2.4	高强玻璃纤维复合防弹板的应用	159
5.2.5	美国 AGY 公司的高强度玻璃纤维及其应用	160
5.2.6	美国 Norplex - Micarta 公司的玻璃纤维及其应用	162
5.2.7	美国 Polystrand 公司的玻璃纤维	163
5.2.8	防弹用 Shield Strand™ 玻璃纤维	163
5.3	防弹芳纶纤维及其树脂基复合材料	164
5.3.1	芳纶纤维	164
5.3.2	芳纶纤维防弹复合材料	177
5.3.3	芳纶纤维复合材料的弹道性能研究	182
5.4	超拉伸聚乙烯纤维及其树脂基复合材料	185
5.4.1	超拉伸聚乙烯纤维	185
5.4.2	超拉伸 PE 纤维增强树脂基复合材料	191
5.4.3	性能	192
5.4.4	应用	193
5.5	新型防弹纤维及其复合材料	195
5.5.1	玄武岩纤维及其复合材料	195
5.5.2	聚苯并双噁唑纤维(PBO)	204
5.5.3	M5 纤维	207
5.5.4	超级蛋白纤维——蜘蛛丝	212
第 6 章	复合装甲材料与装甲结构	215
6.1	简介	215
6.1.1	基本概念与范畴	215
6.1.2	复合装甲的基本形式与特点	215
6.2	金属/非金属复合装甲的研究	227
6.2.1	装甲钢/陶瓷复合装甲侵彻性能研究	227
6.2.2	装甲钢/芳纶复合材料复合装甲抗爆震研究	228
6.2.3	陶瓷/钢复合装甲不同结构形式的抗弹性能研究	230
6.2.4	铝合金/纤维复合材料装甲弹道试验	232
6.2.5	陶瓷/铝合金复合装甲倾角效应研究	234
6.3	陶瓷复合装甲的研究	236
6.3.1	陶瓷/背板复合装甲	236
6.3.2	金属封装陶瓷复合装甲	238
6.3.3	武装直升机用陶瓷复合材料装甲	244
6.3.4	军机用陶瓷/纤维复合材料装甲	246
6.3.5	舰船用陶瓷复合装甲	248
6.4	防弹纤维复合材料装甲的研究	251
6.4.1	轻型装甲用防弹纤维复合材料	251
6.4.2	防弹纤维复合材料最佳树脂含量与抗弹机理的研究	255

6.4.3	防弹纤维性能的研究	257
6.4.4	混杂纤维复合材料及其弹道性能研究	261
第7章	单兵防护材料与装甲防护装置	266
7.1	研究与发展现状	266
7.1.1	简介	266
7.1.2	国外单兵防弹装备的发展状况	267
7.1.3	国内单兵防弹装备的发展状况	268
7.1.4	单兵防弹装备的发展方向	270
7.2	单兵防护材料	271
7.2.1	防弹纤维	271
7.2.2	单兵防护用纤维复合材料	278
7.3	防弹头盔	283
7.3.1	防弹头盔装备的研制现状	283
7.3.2	防弹头盔所用纤维织物的最佳形式——MBWK 织物	287
7.3.3	防弹头盔的研制	290
7.3.4	警用头盔与面罩	293
7.4	防弹衣	295
7.4.1	防弹衣的构成	295
7.4.2	防弹衣的作用	295
7.4.3	防弹衣的发展	295
7.4.4	防弹板(层)	296
7.4.5	防弹衣材料的发展	297
7.4.6	防弹衣用织物	297
7.4.7	新型防弹衣的研制	300
第8章	透明装甲材料与装甲防护装置	302
8.1	透明装甲材料	302
8.1.1	性能设计	302
8.1.2	应用形式与特点	302
8.1.3	透明装甲材料及其特点	304
8.1.4	防弹玻璃	309
8.2	透明装甲的研究	335
8.2.1	防弹玻璃	335
8.2.2	轻型复合防弹玻璃	341
8.2.3	运钞车用防弹装甲	343
8.3	透明装甲用高性能光学胶黏剂	344
8.3.1	聚氨酯丙烯酸光学胶黏剂	344
8.3.2	环氧树脂光学胶黏剂	350
参考文献		360

第1章 概述

1.1 简介

1.1.1 基本概念与范畴

装甲防护材料是指那些能够抵御弹丸及其碎片进攻、损伤,可有效地吸收或分散弹丸射流能量,并有效地保护防御物体或人员免受伤害,或减小受伤程度的一类材料体系。主要有装甲钢、铝合金、抗弹陶瓷(或称结构陶瓷)、防弹纤维及其树脂基复合材料。用上述材料,采用适当的组合形式,制成的防护产品称为装甲;而用于制备装甲的制造技术、测试技术和设计技术等称为装甲防护材料技术。

1.1.2 历史背景

从第一次世界大战开始,装甲的重要性就开始受到各国的关注。装甲防护装备由金属装甲材料向非金属材料过渡,又由单纯合成材料向合成材料与金属装甲板陶瓷护片等复合系统发展。

世界上第一件防弹衣诞生在英国,据称该防弹衣由纯钢制成,重达 10kg,看上去就像欧洲中世纪武士的铠甲。它只能抵挡低速流弹和碎弹片对士兵的伤害。最早出现的防弹织物用真丝织造。厚实的真丝服装一度曾是防弹衣的主要组成部分,但真丝在战壕中变质较快,这一缺陷加上防弹能力有限和真丝的高额成本,使真丝防弹衣在第一次世界大战中未能普及。第二次世界大战时,尼龙 66 作为防弹织物材料是防止炮火轰炸的碎片而不是用来防弹。此后随着各国对军事能力的注重,装甲防护材料也不断发展。

1.1.3 军事需求与发展

随着各国对军事装备的重视,坦克装甲、人体防护的装备也不断发展。目前各国采用的复合装甲、间隙复合装甲、模块式复合装甲屏蔽和附加式复合装甲等种类繁多,所用材料为树脂基复合材料、陶瓷材料及装甲钢三种。复合装甲技术使现代坦克破防能力提高了 2 倍~3 倍,防穿甲能力提高了 1.1 倍~2 倍。装甲板由厚重型发展到薄柔型。

厚板硬型装甲主要应用高强度、高工艺性能(可焊接性)、高韧性装甲钢,结合各种不同密度和物理、力学性能的材料,是钢—陶瓷—树脂基纤维增强复合材料—橡胶或工程塑料—间隙的系统复合体。厚板装甲多使用于坦克装甲上,能够抗击高速度、高能量的冲击。

薄板软型装甲板采用树脂基复合材料技术。增强纤维由早期的尼龙纤维、碳纤维、玻璃纤维,到当今性能较好的芳纶纤维和超高相对分子质量聚乙烯纤维。树脂基体一般采用热固性树脂中的环氧树脂和酚醛树脂。例如,美国以玻璃纤维布和毡增强环氧树脂为基体,其中加入钢筋条和 PVC 泡沫塑料制成复合装甲,应用在轻型坦克和装甲输送装备的可防二次中弹效应

装甲上。

1.1.4 功能与应用

装甲的主要功能是防止弹丸及其弹片对受保护物体和人员的攻击而造成的损伤。在不同程度上避免或减轻其损伤程度。

装甲主要用于坦克装甲车辆、武装直升机、军舰和人体防护等领域。

1.2 装甲防护材料的类型与特点

装甲材料一般分为两种类型：分解能量型和吸收能量型。分解能量型材料通常强度较高，如高硬度钢和陶瓷。在多层装甲结构中应用分解能量型材料的目的是使侵彻弹丸破碎或快速分解其能量。换句话说，其可使动能弹在撞击装甲后形成碎片，并且碎片的运动方向发生改变，偏离装甲。吸收能量型材料则可以吸收弹丸动能，并将它转变为另一种形式的能量，如热能。上述分类是从理论上划分的，实际上大多数装甲系统都被设计成既能分解又能吸收弹丸能量，材料的选择则取决于设计师期望达到的防护程度。

1.2.1 钢材

钢的性能优异，经过适当的调质和热处理后，可以具有分解或吸收能量的性能。从第二次世界大战开始，钢通常以机械轧制均质装甲（RHA）的形式应用于军用车辆。轧制的装甲通常经过二次热处理（ $820^{\circ}\text{C} \sim 860^{\circ}\text{C}$ ），并在油或水中淬火以提高硬度，然后再经过回火处理（保持 $460^{\circ}\text{C} \sim 650^{\circ}\text{C}$ 加热数小时）以增加韧性，最后得到的产品才能称为均质装甲。选择不同的回火温度可以获得不同的力学性能和防护性能，一般较低的回火温度用于处理较薄、硬度较高的装甲，较高的回火温度用于处理较厚、硬度较低的装甲。

采用不同的处理方法可以使同一块装甲的不同层面具备不同的性能。目前通常采用表面淬火法，使韧性较好的装甲衬层可以抑制装甲的裂纹扩展，硬度较高的防护层可以使侵彻弹丸碎裂分解。过去采用的方法有火焰淬火处理。第二次世界大战期间，德国“虎王”坦克的装甲就采用这种工艺。这种工艺是将装甲表面加热到很高的温度，然后快速冷却（淬火）形成高硬度、脆性大的表层，离表层越远的层面硬度越小，韧性越高。

使一块装甲具有两种不同硬度的有效方法则是将两块不同的装甲轧制连接成一块。经过这种技术处理的装甲称为哈德菲尔德双重装甲（HAD），在第二次世界大战前就已采用，这种技术不断发展，现已演进为双硬度装甲（DHA）。双硬度装甲技术在美国仍是当前装甲板的主要生产技术之一，生产时将两块镍合金钢板辊压接合在一起，经过热处理后，轧制装甲一面含碳量高、硬度大，布氏硬度值达到 $580\text{HB} \sim 710\text{HB}$ ，而另一面硬度较低，布氏硬度值为 $450\text{HB} \sim 530\text{HB}$ ，能保持较好的韧性。

双硬度装甲在防护穿甲弹时的性能远好于高硬度装甲。不过，尽管双硬度装甲具有明显的优势，但因其生产工艺复杂、成本高，并没有受到太多青睐。

高硬度装甲是对布氏硬度值超过 430HB 的均质钢装甲的通称，其生产过程类似于轧制均质装甲，只是回火温度较低。较薄的高硬度装甲可用于防御铅/铍弹头， 3mm 厚的可以防御手枪弹， 8mm 厚的可以防御高速步枪弹，如初速为 920m/s 的 $5.56\text{mm} \times 45\text{mm}$ SS109弹。为了防

御钢心穿甲弹,则厚度须达到 12mm~13mm。瑞士莫瓦格公司的皮兰哈轮式装甲车族就采用了高硬度钢装甲,可以防御 7.62mm 步枪弹。其他安装高硬度装甲的车辆包括凯迪拉克·盖奇公司生产的“黄貂鱼”轻型坦克和 LAV 300 轮式装甲车族。

最近几年,常见一些轻质的附加式装甲系统与多孔高硬度钢装甲板组合在一起应用。多孔装甲的优点是质量轻,同样厚度时,它比均质装甲要轻得多。装甲板上钻孔使侵彻弹丸产生不对称负载,从而导致弹心在侵彻装甲板时产生弯曲负载,造成弹心断裂或至少造成侵彻过程中的不稳定。多孔装甲系统主要用于装甲人员输送车和步兵战车的顶装甲,如拉斐尔公司生产的 TOGA 附加被动装甲,20 世纪 80 年代,以色列入侵黎巴嫩时已将其应用于以军的 M113 装甲车上。多孔装甲在防御采用低疲劳拉伸率($<3\%$)弹心的穿甲弹时非常有效,如 B32 14.5mm、APM 2 7.62mm 穿甲弹等。

1.2.2 铝合金

目前,应用较多的是 7039 铝—锌—镁合金,其在防御穿甲弹方面比过去的 5083 铝合金更有效。7039 铝合金的强度比 5083 铝合金高,极限抗拉强度(UTS)达到 420MPa,而 5083 铝合金仅为 280MPa。与轧制均质钢装甲相比,7039 铝合金防御穿甲弹的性能更出色,尤其是在 7.62mm 和 14.5mm 穿甲弹垂直射入时,而且铝合金装甲在防御 14.5mm 穿甲弹方面的优势要比防御 7.62mm 穿甲弹时更明显。

尽管铝合金在装甲战车上得到广泛应用,但它还有很多缺点,最突出的就是:铝合金在受到攻击而产生抗拉应力时,常发生应力腐蚀断裂;在加工、组装或焊接过程中产生的残余应力均有可能引起铝合金疲劳。

另外,铝合金的抗裂强度比钢低,容易碎裂,而且熔点也比钢低,温度升高时很容易变软,变成碎粒后很有可能会燃烧。

1.2.3 钛合金

钛合金性能毋庸置疑,但高成本大大限制了它的使用——钛合金装甲的成本是具备同样防护性能钢装甲的 10 倍~20 倍。

虽然价格上处于劣势,但钛合金的强度可以与轧制均质钢装甲媲美,但密度只是钢的 60%,因此,遭受同样的打击,相同质量的钛合金的防护效能比轧制均质钢装甲高 30%~40%。

但是,钛合金也有其自身缺陷,即在一定的应力条件下,如弹丸的一小部分动能作用在装甲板上形成剪切应力时,钛合金比钢更容易产生绝热剪切(绝热剪切现象自 20 世纪 40 年代提出,是在冲击载荷作用下金属材料中经常出现的一种重要破坏模式)而断裂。不过当钛合金受到撞击或小、中、大口径穿甲弹打击时,还不致发生剪切破坏。

1.2.4 陶瓷

陶瓷在弹道防护方面可以发挥重要作用。20 世纪 60 年代,加利福尼亚大学的威尔金斯教授验证了陶瓷的特性,指出其高硬度和低密度特性将使陶瓷成为制造装甲系统的理想材料。事实上,人类从第一次世界大战开始就认识到陶瓷在装甲防护方面的重要性,当时在金属表面涂了一层较薄的硬质搪瓷层以增强金属的防护性能。然而由于技术问题,这项研究直到 1962 年第一种硬质表层合成装甲问世才得以继续进行。从那以后,人们开始进行大量的研究以验

证陶瓷装甲的最佳性能、结构和用途。

陶瓷由细小的粉末在一定的温度和压力条件下烧结而成,在烧结过程中往往加入少量其他元素,最后的产物是一个多晶材料,结构非常牢固。所有的陶瓷材料都具有较高的强度,如装甲陶瓷的维氏硬度值为 1500HV ~ 3500HV。用于制造装甲的陶瓷材料一般密度都较小,比钢的 1/2 还要小,如碳化硼陶瓷的密度仅为 $2.5\text{g}/\text{cm}^3$ (大约是钢密度的 1/3),同样的防护面积,重量就可减轻不少。

与陶瓷防弹背心一样,陶瓷装甲板常与合成材料衬里组合使用,以达到令人满意的防护级别。陶瓷是易碎材料,其断裂韧度值较低,所以只能与其他装甲材料组合使用,并且不能承受任何疲劳或结构负荷(不像钢、铝合金、钛合金和合成材料)。易碎也意味着陶瓷不能抗多重打击,因此,它通常只是装甲系统中的一部分,常被包在夹层中使用。当然,陶瓷的易碎性也不全是缺点,其受到撞击时碎裂意味着弹丸能量在更大的面积上传递消耗,因此,弹丸击穿下一个防护层将会非常困难。事实表明,较厚的陶瓷装甲板在对抗成型装药金属射流时非常有效。

作为最硬、密度最小的陶瓷材料之一,碳化硼在 20 世纪 60 年代就被用于制造防弹背心。但碳化硼的价格非常昂贵,影响其应用的广泛性,而且,碳化硼在防御高速钨心穿甲弹时表现不佳。为了增强陶瓷的抗多重打击能力,人们设计出了合金陶瓷装甲,将陶瓷微粒黏合在金属基质中。但这种方法是以损失金属材料的强度为代价的,因此,其防御穿甲弹的能力也大打折扣。其他增强陶瓷装甲性能的方法正在试验之中,包括改良陶瓷装甲结构,为的是采用单一材料结构以最大限度利用陶瓷(硬度和耐压强度)和金属(延展性和韧性)的优点。这种材料通常由陶瓷表层和金属含量较高的烧结层组成,然而,高昂的生产成本掩盖了其性能上的些许优势。

陶瓷材料仍是当今各国致力研究的装甲材料,随着技术的突破、生产成本的降低,相信其将显示出良好的应用前景。

1.2.5 防弹纤维及其树脂基复合材料

纤维增强树脂基复合材料是目前发展较快的装甲材料。增强纤维由早期的尼龙纤维、碳纤维、玻璃纤维,到现今性能较好的芳纶纤维和超高相对分子质量聚乙烯纤维。

1. 芳纶

美国杜邦公司在 20 世纪 50 年代开始研发芳纶,60 年代正式投入市场。这种比同质量钢丝还强 5 倍的纤维命名为芳纶。到 1974 年,杜邦已生产 Nomex、Kevlar、Kevlar29 和 Kevlar 49。20 世纪 80 年代以后,荷兰 AKZO 公司、日本帝人公司、俄罗斯和中国也相继生产出芳纶。

芳纶聚合物大分子的主链由芳香族和酰胺键直接键合在芳香环上,结构式如图 1-1 所示。

近几年,Kevlar 纤维又有新的发展,如超高强 Kevlar 129 的拉伸强度比 Kevlar 29 提高了 20%,且更具韧性(表 1-1)。

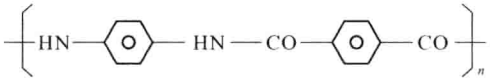


图 1-1 对位芳纶的结构式

表 1-1 芳纶和 UHMPE 纤维的性能

类 型	牌 号	生产厂家	拉伸强度 /MPa	弹性模量 /GPa	伸长率/%
芳纶纤维	Kevlar 29	美国	3700	34	4.4
	Kevlar 49	美国	3620 ~ 3700	125 ~ 127	2.5
	Kevlar 149	美国	2833	163	1.3
	Twaron	荷兰	3000	125	2.3
	1414	中国	3000	1000	2.7
超拉伸 聚乙烯纤维	Spectra 900	美国 Alied 公司	2590	117	2.7
	Spectra 1000	美国 Alied 公司	3000	172	2.7
	Dyneema	荷兰 DSM 公司	3400	87	3.5

Kevlar 在美国军用装备中应用较早,如美国 M1A1 上的主装甲采用 Kevlar 复合材料制成,可防穿甲弹和破甲弹。日本 90 式坦克的多层复合装甲采用了冷轧含钛高强度钢的两层结构,中间使用了含有芳纶的蜂窝状陶瓷夹层,并在内侧罩有轻金属,为日本独特的复合装甲结构。

2. 超高模量聚乙烯纤维

1979 年,荷兰 DSM 公司生产的 Dyneema 纤维是世界上第一种超高相对分子质量聚乙烯纤维(UHMPE)。其突出的优点是密度低,为 $0.96\text{g}/\text{cm}^3 \sim 0.97\text{g}/\text{cm}^3$ 。这种高性能纤维目前在国外的抗冲击防护材料中得到广泛应用。

Honeywell 公司报道了其最新 Spectra Shield II 防弹复合材料,在硬型装甲和软型装甲上都有运用 HMPE 纤维(高模量聚乙烯纤维)。防弹能力在原有技术上提升 20%,在保持原有防护能力下质量可减少 10% ~ 20%。DSM 使用了 UHMPE 纤维(超高模量聚乙烯纤维)和纱线制成 HB51 用于人体防护,HB26 用于车体防护。据 DSM 称,H51 相比于美军原有的防护装甲性能提高了 20%,质量却并未增加。

3. 聚苯双噁唑纤维

聚苯双噁唑(PBO)纤维是道化学公司和东洋纺织公司合作,在 20 世纪 90 年代开始研究,于 1995 年开始生产的高性能纤维。其力学性能是对位芳酰胺纤维的 2 倍,比强度和比模量超过钢丝。PBO 的合成方法是将 4,6 - 二氨基间苯二酚与对苯二甲酸在多磷酸溶液中进行缩聚。PBO 纤维没有熔点,即使在高温下也不熔融。由于 PBO 纤维的优良性能,PBO 纤维被广泛应用于防护材料中,除了抗冲击防护外,安全手套等也可使用 PBO 纤维。

1.2.6 装甲模型设计

1. 设计原理

目前,装甲板普遍运用的是复合材料,复合材料重要的设计内容就是各种原料、工艺、配方的设计。目前广泛使用的是纤维增强树脂基复合材料,它不仅减少了厚度和质量,还具有优异的防弹性能,而且它也可复合其他防弹性能好的材料,如钢板、陶瓷等。

2. 设计实例

设计复合材料时,首先选择纤维种类和与其搭配的树脂类。高性能纤维——芳纶、超高模

量聚乙烯纤维、聚苯双噁唑纤维,都可作为选择对象。例如,纤维基布可采用 Kevlar 纤维。芳纶抗冲击性能远高于尼龙纤维和玻璃纤维,密度低于玻璃纤维而高于尼龙纤维。芳纶纤维是一种性能优异的增强材料,具有高强度、高模量、良好的抗冲击性、极好的耐热性、耐化学腐蚀、耐疲劳性、尺寸稳定性和优异的电绝缘性能等,因此芳纶纤维复合材料广泛地应用于航空航天、军事、机械等领域。芳纶耐温阻燃性能优异,目前芳纶及其织物价格较高,性能比聚乙烯纤维稍低。

利用芳纶作为增强体,树脂基选择改性酚醛树脂。酚醛树脂与其他热固性树脂比较,其固化温度较高,固化树脂的力学性能、耐腐蚀性可与不饱和聚酯相当,但不及环氧树脂。因此选用环氧改性酚醛树脂,它具有环氧树脂优异的黏结性,改善了酚醛树脂的脆性和黏结性差的缺点;同时具有酚醛树脂的优良的耐热性,改善了环氧树脂耐热性差的特点。

复合材料的结构设计可变化选择,但应尽量达到装甲的防弹要求,与传统的相比质量减小。图 1-2 所示的模型是在纤维增强体树脂基复合材料间粘贴钢板或陶瓷片,也可再填充泡沫塑料以达到缓冲子弹动能的作用。通过各种软硬件组合不仅可减轻装甲的质量,又能达到能量分配消耗的功能。

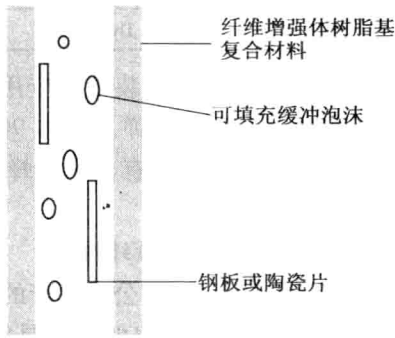


图 1-2 模型设计示意图

1.2.7 发展前景

美国的 Natick 研究中心对装甲防护材料进行着大量的研究。研究中心与纤维、陶瓷生产公司合作,致力于

生产更轻、更高性能材料。新材料更有利于战士的运动,提供更好的舒适性。Natick 研究中心与英国剑桥大学合作制造的一种长碳纳米管,比钢强度高出 100 倍,质量却极小,与传统的防护材料相比具有更高的吸湿性和更好的阻燃性。

美国北卡罗莱纳州立大学将研发的聚萘二甲酸乙二醇酯(PEN)纤维应用于硬型和软型装甲。PEN 纤维具有优良的力学性能及化学稳定性等,用这种纤维制成的非织造布比机织物更轻,且有更高的防护性能。

由于各国对装甲装备的更多重视,装甲技术不断发展。人体防护材料也向轻薄、舒适方向发展。在伊拉克战争中,美国军队使用的防护服更多是防止爆炸后的碎片,不仅可以保护身躯部分,还可以保护士兵的手臂和腿。

现在设计的装甲复合板,不仅可应用于特种对象防护服,也可用于车体的抗冲击防护。随着复合材料技术的发展,防护材料也将不断发展为复合、轻薄、高性能类材料。

1.3 装甲的类型与特点

1.3.1 复合装甲

1. “乔巴姆”装甲

1976 年 6 月 22 日,英国正式公布研制成功“乔巴姆”装甲。它是一种有多层结构的复合装甲,外层和内层是又硬又韧的优质合金钢装甲,中间一层则是厚厚的、块状陶瓷装甲,起主要

的抗弹作用。“乔巴姆”的这种“三明治”式的结构,远远大于三层等重量钢装甲的抗弹能力,对付破甲弹的能力是原来轧制均质装甲的3倍。那么,“乔巴姆”为什么有如此高的抗弹性能呢?原因有两方面:一方面,用作装甲夹层的陶瓷材料,如氧化铝、氧化锆等,不仅硬度高、耐高温、抗热冲击性好,而且在高温冲击下的强度要比钢铁高出10多倍,可以有效抵御破甲弹金属射流的冲击;另一方面,陶瓷材料易于产生裂纹,但裂纹的产生不会影响其强度。因为裂纹的传播速度只有几百米每秒,远远低于破甲弹金属射流7000m/s以上的极高速度。由于受内外两层钢板的约束,以及中间粘贴剂的固化作用,冲击形成的陶瓷粉末没有“逃出的通道”,只能和金属射流“对着干”,起到抵消金属射流的作用。两方面综合作用的结果,使陶瓷材料成为对抗破甲弹和导弹的高手。

2. 贫铀装甲

在1991年的海湾战争中,装有贫铀装甲的美国M1A1主战坦克表现出色,使得贫铀装甲名声大噪。

贫铀装甲又称铀装甲,是一种以铀合金为主体的复合装甲。它有三大“奥妙”。一是成分特殊。贫铀装甲的主体是铀—钛合金或碳化铀一类的材料,是在纯金属铀中加入某些合金元素而制成的。它克服了金属铀不适于直接制造装甲的弱点,并大大提高了它的力学性能。二是工艺精巧。贫铀装甲不是用烧结方法制成的,而是用拉制方法制成的单晶体。它几乎没有晶格体缺陷,强度和硬度相当高。三是结构合理。贫铀装甲采用网状结构,克服了铀本身极易氧化的弱点,且网状结构的铀合金在复合装甲中起骨架作用,它既可以防止使坦克增重过多,又可以在网格之间加入防止铀合金氧化的材料,取得更好的材料匹配性能。此外,蜂窝状结构中还可以加入吸能材料,靠“软硬兼施”的手段来吸收穿甲弹的动能。所以说,贫铀装甲既能对付穿甲弹,也能对付破甲弹,是复合装甲中的“后起之秀”。但到目前为止只有美国拥有这项技术。

3. 间隙装甲

间隙装甲也称间隔式装甲,即两层钢装甲之间留有一定的距离,隔一层空气制成的装甲。那么,难道说空气也能当装甲吗?一点不错。当破甲弹命中前装甲后,形成强大的金属射流,空气层能使射流拉伸变细,冲到后面的装甲板时就没劲了。而在动能弹命中的情况下,倾斜的装甲布置和不同抗弹介质的变化,能够使弹芯发生倾斜、偏转,威力大打折扣。当然,这是从理论上讲的道理。事实上,间隙装甲的效能比起陶瓷复合装甲来还是要略逊一筹。此外,坦克的紧凑性,也不允许采用大间隔的间隙装甲。

1.3.2 爆炸反应装甲

爆炸反应装甲是在平行面板和背板的两块钢板中间夹一层炸药而制成的。这种炸药是一种钝感炸药,有一定的引爆条件。用它制成的爆炸反应装甲只能由破甲弹、导弹一类的弹药引爆,而对23mm口径以下的小型弹、炮弹破片、电弧焊、气焊等不敏感。

爆炸反应装甲的防护作用主要是靠和破甲弹“对着干”来实现的。当破甲弹爆炸金属射流的头部达到一定的速度和温度时,中间层的炸药就会爆炸,引爆炸药后产生的爆轰波使爆炸反应装甲的面板和背板沿一定的角度向外飞出,从而分散和干扰了射流的能量,使破甲威力大为降低。