

兵器材料与应用

主编 陶绍虎 赵 晖 孙兴龙



 北京理工大学出版社
BEIJING INSTITUTE OF TECHNOLOGY PRESS

普通高等院校“新工科”建设特色系列教材

兵器材料与应用

主编 © 陶绍虎 赵 晖 孙兴龙



 北京理工大学出版社
BEIJING INSTITUTE OF TECHNOLOGY PRESS

内 容 简 介

本书针对性地介绍了现代兵器所应用的多种材料,内容涉及国内外先进兵器用的金属材料、非金属材料、复合材料、功能材料、高分子材料、弹箭材料等诸多优质材料,着重对这些材料的制备工艺、理化测试和性能、应用前景等方面的基础理论知识和科研成果作了详细的梳理。本书既反映了国内外最新兵器材料的研究成果,也融入了诸多兵器材料的应用实例,具有很强的理论指导性和应用性。本书通用性强、适应范围广,可作为高等院校兵器材料相关专业本科生、研究生的教材,也可供其他专业对兵器材料感兴趣的老师和学生、材料制备的工程技术人员以及从事兵器材料基础理论和技术研究的工作人员阅读和参考。

版权专有 侵权必究

图书在版编目(CIP)数据

兵器材料与应用 / 陶绍虎, 赵晖, 孙兴龙主编. --
北京: 北京理工大学出版社, 2022. 8 (2023. 2 重印)
ISBN 978-7-5763-1659-9

I. ①兵… II. ①陶… ②赵… ③孙… III. ①武器工业-材料 IV. ①TJ04

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2022) 第 159154 号

出版发行 / 北京理工大学出版社有限责任公司

社 址 / 北京市海淀区中关村南大街 5 号

邮 编 / 100081

电 话 / (010) 68914775 (总编室)

(010) 82562903 (教材售后服务热线)

(010) 68944723 (其他图书服务热线)

网 址 / <http://www.bitpress.com.cn>

经 销 / 全国各地新华书店

印 刷 /

开 本 / 787 毫米×1092 毫米 1/16

印 张 / 14

彩 插 / 1

字 数 / 338 千字

版 次 / 2022 年 8 月第 1 版 2023 年 2 月第 2 次印刷

定 价 / 42.00 元

责任编辑 / 王梦春

文案编辑 / 闫小惠

责任校对 / 刘亚男

责任印制 / 李志强

图书出现印装质量问题,请拨打售后服务热线,本社负责调换

前言

兵器材料和其他基础材料一样，其技术进步和创新应该建立在牢固而正确的理论基础之上。近些年来，世界的兵器材料有非常大的进步和创新，衍生了诸多新型的材料，并在先进的兵器上得以应用，取得了较好的效果。

本书的整体构建符合新工科人才培养理念与需求，系统地梳理了新工科专业知识逻辑体系，科学设计了新工科通专融合的课程体系；本书从学生主体认知特点出发，构建节点化、关联化的教材知识结构体系，并对内容进行了分层设计，重在知识的获得和理解，符合学生的认知特点，把握概念教学逐步到位。同时，教材中有机地融入“课程思政”有关要求，深化课程思政与思政课程协同育人效应，吸纳了相关领域理论知识与实践成果，凸显前沿性、交叉性与综合性的教材内容。

本书是一本阐述兵器材料与应用的书籍，力求为学习材料相关专业的学生提供一本基础教材，同时为其他学科的读者提供一本深入浅出的参考书，使其具有一定的科普性。本书主要介绍了国内外兵器工业用金属材料、非金属材料、复合材料、高分子材料及其材料制备工艺、理化测试等方面的基础知识和科研成果。本书共计5章内容，第1章是兵器材料的进步，着重介绍了兵器材料的蓬勃发展、战略地位和产业布局及竞争优势；第2章是兵器用金属材料，主要介绍了铝合金、镁合金、钛合金、钨合金、稀土材料、超高强度钢、高温合金和金属基复合材料的性能与应用；第3章是兵器用非金属材料，主要介绍了碳/碳复合材料、陶瓷基复合材料和聚合物基复合材料的性能与应用；第4章是功能材料，主要介绍了超导材料、纳米功能材料、阻尼材料和隐身材料的性能与应用；第5章是弹箭材料，主要介绍了穿破甲弹和火炸药材料的性能与应用。希望广大老师和学生喜欢这本教材，并从中受益。

本书在章节体系和内容组织方面得到了张罡教授的指点和帮助，特此致谢。本书由陶绍虎副教授完成第1、2章的编写工作，孙兴龙讲师完成第3、4章的编写工作，赵晖教授主要完成第5章的编写工作，全书由陶绍虎副教授统稿。本书得到了沈阳理工大学引进高层次人才科研支持计划资金的资助，书稿完成后，编写团队花费了大量的时间对文字和图表进行了校对，借此机会，向付出了艰辛劳动的全体编写人员致以崇高的敬意，同时也感谢北京理工大学出版社对本书的出版工作所给予的支持和辛勤劳作。

由于时间仓促，书中难免存在不当之处，敬请读者给予批评和指正。

第 1 章 兵器材料的进步	(1)
1.1 兵器材料发展史	(1)
1.1.1 兵器材料的分类	(1)
1.1.2 全球兵器发展现状及兵器材料技术的研究重点.....	(13)
1.1.3 兵器材料发展中存在的问题.....	(17)
1.2 兵器材料的蓬勃发展.....	(18)
1.2.1 新材料琳琅满目	(18)
1.2.2 政策引导推动.....	(24)
1.2.3 市场空间把握.....	(27)
1.3 兵器材料的战略地位.....	(28)
1.3.1 兵器材料发展的战略需求.....	(28)
1.3.2 强国发展战略重点.....	(28)
1.3.3 发展与方向.....	(30)
1.4 兵器材料与产业.....	(31)
1.4.1 重点兵器材料与产业的联系.....	(31)
1.4.2 国内外兵器产业发展布局.....	(38)
1.4.3 我国兵器产业发展态势及新材料发展需求.....	(39)
参考文献	(40)
第 2 章 开放组合的优性能材料——金属材料	(42)
2.1 铝合金.....	(42)
2.1.1 铝合金的特性.....	(42)
2.1.2 铝合金结构材料.....	(43)
2.1.3 铝合金在兵器工业中的应用.....	(44)
2.2 镁合金.....	(49)
2.2.1 镁合金的特性.....	(49)
2.2.2 镁合金的分类及特点.....	(51)

2.2.3	镁合金的制备方法	(53)
2.2.4	镁合金在兵器及装备中的应用	(54)
2.2.5	镁合金在兵器装备中的应用前景	(57)
2.3	钛合金	(58)
2.3.1	钛合金的优势	(58)
2.3.2	钛合金的发展及竞争格局	(59)
2.3.3	兵器装备钛合金构建的低成本制造	(61)
2.3.4	钛合金在兵器工业中的应用	(66)
2.4	钨合金	(71)
2.4.1	钨合金的发展史及性能用途	(71)
2.4.2	钨合金的制备技术	(74)
2.4.3	钨合金在兵器工业中的应用	(76)
2.5	稀土材料	(81)
2.5.1	稀土材料的分类	(81)
2.5.2	稀土的重要性	(84)
2.5.3	稀土之战	(86)
2.5.4	稀土材料在兵器工业中的应用	(87)
2.5.5	稀土材料的发展前景	(92)
2.6	超高强度钢	(92)
2.6.1	超高强度钢的含义与分类	(92)
2.6.2	超高强度钢的热处理工艺	(95)
2.6.3	超高强度钢的强韧机理	(96)
2.6.4	超高强度钢在兵器工业中的应用	(99)
2.6.5	超高强度钢的未来发展方向及特性	(101)
2.7	高温合金	(102)
2.7.1	高温合金的概念和特点	(102)
2.7.2	高温合金的分类	(102)
2.7.3	国内外高温合金的发展现状	(105)
2.7.4	高温合金在兵器工业中的应用	(106)
2.8	金属基复合材料	(108)
2.8.1	金属基复合材料的分类与性能	(108)
2.8.2	金属基复合材料的制备工艺	(110)
2.8.3	金属基复合材料在兵器工业中的应用	(112)
	参考文献	(115)
第3章 先进战略材料和兵器关键材料——非金属材料		(118)
3.1	碳/碳复合材料	(118)
3.1.1	碳/碳复合材料的战略意义及发展概况	(118)
3.1.2	碳/碳复合材料的制备工艺	(119)

3.1.3 碳/碳复合材料的组织结构与性能特点	(123)
3.1.4 碳/碳复合材料在兵器工业中的应用	(127)
3.2 陶瓷基复合材料	(130)
3.2.1 陶瓷基复合材料的发展概况	(130)
3.2.2 陶瓷基复合材料的分类及性能特点	(130)
3.2.3 陶瓷基复合材料的制备工艺	(132)
3.2.4 陶瓷基复合材料在兵器工业中的应用	(137)
3.3 聚合物基复合材料	(139)
3.3.1 聚合物基复合材料的发展概况	(139)
3.3.2 聚合物基复合材料的分类及性能特点	(140)
3.3.3 聚合物基复合材料的制备工艺	(142)
3.3.4 聚合物基复合材料在兵器工业中的应用	(147)
参考文献	(150)
第4章 特殊材料——功能材料	(152)
4.1 超导材料	(152)
4.1.1 超导材料的发展概况	(152)
4.1.2 超导现象、超导理论和超导性质	(154)
4.1.3 低温超导材料的制备	(160)
4.1.4 超导材料在兵器工业中的应用	(164)
4.2 纳米功能材料	(165)
4.2.1 纳米功能材料概述	(165)
4.2.2 纳米材料的特殊效应	(165)
4.2.3 纳米功能材料的制备	(168)
4.2.4 纳米功能材料在兵器工业中的应用	(171)
4.3 阻尼材料	(174)
4.3.1 阻尼概述	(174)
4.3.2 阻尼的概念和度量	(175)
4.3.3 阻尼材料的分类	(178)
4.3.4 阻尼材料的特性	(183)
4.3.5 阻尼材料在兵器工业中的应用	(185)
4.4 隐身材料	(186)
4.4.1 战场威胁与任务	(186)
4.4.2 隐身技术概述	(188)
4.4.3 隐身材料的分类及其原理	(189)
4.4.4 隐身材料在兵器工业中的应用	(196)
参考文献	(200)
第5章 弹箭材料	(201)
5.1 穿甲弹	(201)

5.1.1	穿甲弹的原理及分类	(201)
5.1.2	弹芯材料——钨	(205)
5.1.3	弹芯材料——贫铀	(206)
5.1.4	钨合金和贫铀之争	(206)
5.1.5	穿甲弹弹芯材料的未来思考	(209)
5.2	破甲弹	(210)
5.2.1	破甲弹的原理及简介	(210)
5.2.2	破甲弹常用材料	(214)
5.3	火炸药	(217)
5.3.1	火炸药的有关概念	(218)
5.3.2	火炸药的基本特征	(218)
5.3.3	火炸药的基本要求	(219)
5.3.4	火炸药的分类	(220)
5.3.5	火炸药常见材料	(221)
	参考文献	(222)

第 1 章

兵器材料的进步



1.1 兵器材料发展史

中国有着极为悠久的历史文化遗产，而古代文明的发展总是伴随着接连不断的战争，中国古代的军事文化也是世界文化的重要组成部分，而兵器作为现代史学家研究古代军事文化的载体，在其中起着重要的作用。兵器作为战争中最重要存在之一，它的制造材料也紧随时代的发展，但总体来说可分为冷兵器时代和热兵器时代，其中冷兵器时代主要包括石器时代、青铜器时代和铁器时代，每个时代发展转变的时间也各不相同。

1.1.1 兵器材料的分类

自古以来，工欲善其事，必先利其器。强悍的战士要配备强有力的武器才能在战斗中占据上风，好的武器可以让战士如虎添翼，而若要利其器就得有好材料，这也就是石斧、石刀最终被金属兵器所代替的原因。

1. 冷兵器时代

冷兵器是一种作战效率极高的武器，在热兵器未出现之前，决定着战场的优劣之势。作为士兵仅能依赖的作战武器，冷兵器的打造要得到极高的保障，这样士兵在战场上就不会因为兵器脆弱而丢掉性命。

冷兵器的材料挑选和制作工艺都有着极大的不同，不同的兵器有着不同的锻造方法，它们的制造结合了人们的智慧，既具威力又极具特色。

1) 石器时代

石器时代又分为旧石器时代和新石器时代。旧石器时代距今 300 万—1 万年，以使用打制石器为主要标志。石器时代的最后一个阶段，以使用磨制石器为标志。在新石器时代晚期人们已经在使用研磨得很精细的石斧石刀，还有各式各样有着尖锐箭头的弓箭和标枪，但那时这些也只是作为狩猎或者帮助生产的工具。人类的原始时代末期，随着生产力的发展和文明的逐渐进步，人们开始有了私有财产，与此同时也出现了为争夺财产和奴隶而发生的争斗。这些有着杀伤力的工具开始作为武器使用，渐渐地从日常工具中脱离出

来，成为帮助人们战斗的兵器。

石制兵器包含石斧、石镰、石戈等，当时的兵器制造分为石头的粗砸和细磨两个阶段，石制兵器从原始社会到夏朝中后期一直占据着重要的地位，这些兵器也逐渐发展，从最初的粗制滥造到后来变得精细锋利。到了石制兵器时代的后期，为应付各种不同的战争环境，人们逐渐创造出模仿动物角、爪等部位所制造的兵器，这些兵器有更大的杀伤力。古代的生产力普遍低下，石制兵器在青铜兵器出现后的很长一段时间里也被频繁使用。石制兵器变化如图 1.1 所示。

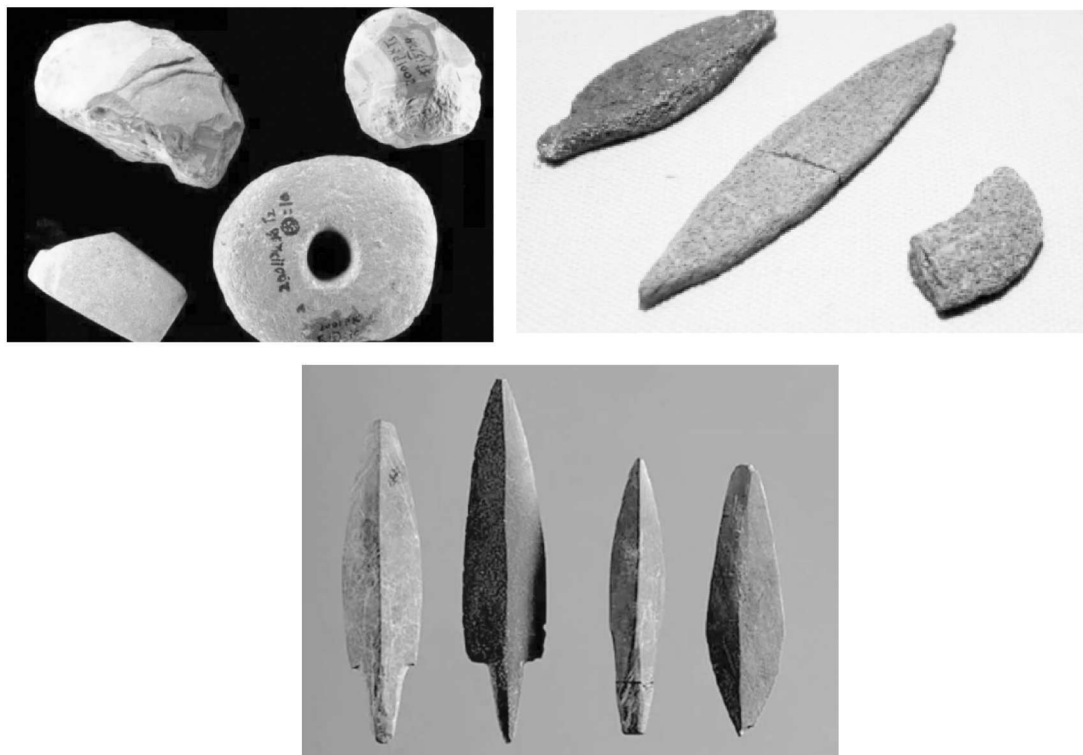


图 1.1 石制兵器变化

2) 青铜器时代

铜是人类发现最早的金属之一，它的发现可以追溯到公元前 5000—4000 年，在新石器时代晚期，人类最先使用的金属是红铜，所谓红铜，就是指天然铜。在石器作为主要工具的时代，人们在拣取石器材料时，偶尔会遇到天然铜。人们有了长期用火的丰富经验，为铜的冶炼提供了必要的条件，在公元前 5000 年的中东遗迹中就有铜打制成的最早的铜器。

公元前 4000 年左右，铜的铸造技术已普及；公元前 3000 年左右，铸造技术传到印度，后来经印度传到中国；公元前 1600 年左右的殷商时期，青铜（铜与锡或者铅的合金）制造业已很发达。虽然中国的青铜历史不如国外那么早，但这并不代表中国古代的青铜发展就逊于国外。1975 年，甘肃东乡林家马家窑文化遗址（约公元前 3000 年）出土一件青铜刀，这是目前在中国发现的最早的青铜器，是中国进入青铜器时代的最有效证明。纯铜质地较软，加入铅或锡后制成的青铜具有熔点低、硬度大、可塑性强、耐腐蚀、色泽光亮等特点。

国外早在公元前 3000 年就已制造出青铜，最早的青铜器出现于 6000 年前的古巴比伦两河流域。苏美尔文明时期雕有狮子形象的大型铜刀是早期青铜器的代表，《荷马史诗》中提到希腊火神赫斐斯塔司把铜、锡、银、金投入熔炉，炼成了英雄阿基里斯所持的盾。图 1.2 和图 1.3 分别是代表古代青铜技艺的越王勾践剑和公元 400 年的凯尔特匕首。



图 1.2 代表古代青铜技艺的越王勾践剑



图 1.3 公元 400 年的凯尔特匕首

较之于石头，青铜可塑性极强，可以按照人类的要求被制成各种形状，包括青铜刀、剑等，而石制兵器则无法做到，因此青铜兵器逐渐取代了石制兵器，登上了人类历史的舞台。但是铜也有不足之处，即在地壳中的储量比铁少，这也是铜最终被铁取代的原因。

3) 铁器时代

铁是地壳中分布最为广泛的材料之一，那为什么人类最早发现的是金、银、铜等而不是铁呢？首先是因为天然单质状态的铁在地球上是不找到的，铁往往以铁矿石的形式出现，而且容易氧化生锈，同时熔点(1 535 ℃)比铜(1 083 ℃)高，这使铁比铜难以熔炼。

地球上的铁以磁铁矿、赤铁矿、褐铁矿和菱铁矿为主要表现形式。铁矿石常用高炉以焦炭为燃料，以铁矿石和石灰石为原料炼得，炼出来的铁分为 3 种，即生铁、熟铁和钢，主要区别在于碳含量的多少。含碳量在 2.11% 以上的铁是生铁，含碳量少于 0.02% 的铁是熟铁，含碳量介于 0.02%~2.11% 的铁就是钢，3 种铁因为碳含量的不同，所具有的特性也不尽相同。生铁坚硬，但质脆，钢具有弹性，熟铁易于机械加工，却又比钢柔软。

在中国，从战国时期到东汉初年，铁器的使用开始普遍起来，铁成为我国最主要的金属。铁的化合物四氧化三铁就是磁铁矿，为早期制作司南的材料。

图 1.4 和图 1.5 分别为古印度的坎查剑和古埃及的各类刀剑，图 1.6 展示的是铁器时代的典型兵器。



图 1.4 古印度的坎查剑



图 1.5 古埃及的各类刀剑

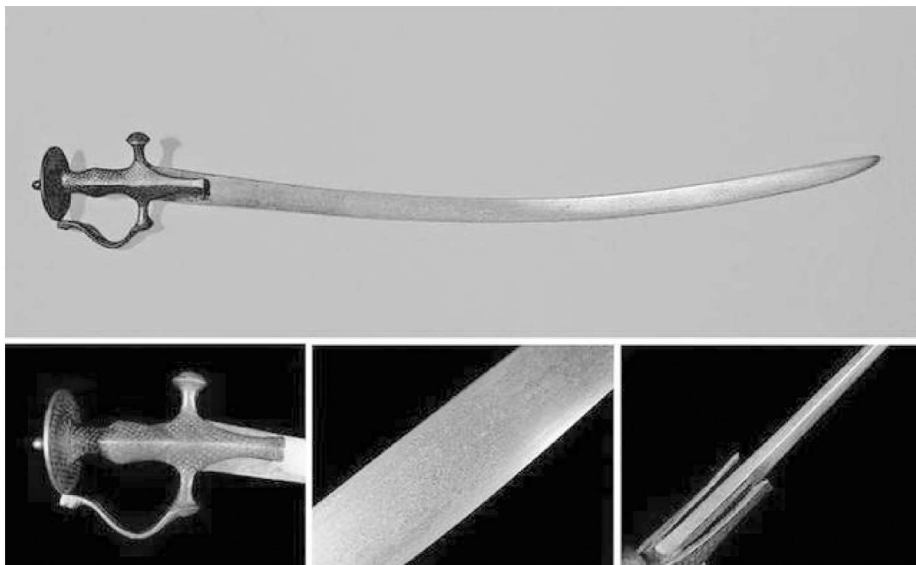


图 1.6 铁器时代的典型兵器

2. 热兵器时代

所有依靠火药或类似化学反应提供能量，以起到伤害作用的兵器(如火药推动子弹)；或者直接利用火、化学、激光等携带的能量伤人的兵器(如火焰喷射器)，都是热兵器。

热兵器可分为如下 7 类。

1) 步枪、手枪等单兵武器

单兵武器，顾名思义就是单纯步兵就能使用的武器，这里的使用包含运载、瞄准、开火 3 个方面。单兵武器必须在质量、体积、后坐力方面可以由一名或多名士兵承受。图 1.7 列出了部分单兵武器。



图 1.7 单兵武器

2) 火炮

火炮，发明于中国，是指利用机械能、化学能(火药)、电磁能等能量抛射弹丸，射程超过单兵武器射程，由炮身和炮架两大部分组成，口径不小于 20 mm 的身管射击武器。图 1.8 为中国 PLZ-05 自行火炮。



图 1.8 中国 PLZ-05 自行火炮

3) 坦克

坦克是现代陆上作战的主要武器之一，具有直射火力、越野能力和装甲防护力的履带式装甲战斗车辆，是陆地武器中重要性唯一高于轮式装甲车的存在，主要用来与对方坦克或其他装甲车辆作战，也可以压制、消灭反坦克武器，摧毁工事，歼灭敌方陆上力量。

坦克一般装备数挺防空(高射)或同轴(并列)机枪和一门中口径或大口径火炮(有些现代坦克的火炮甚至可以发射反坦克/防空导弹)，是凭火力进行作战的经典体现。坦克大多

使用旋转式炮塔，但也有少数使用固定式主炮。坦克主要由武器系统、瞄准系统、动力系统、通信系统、装甲式车体等系统组成。图 1.9 为中国 96B 坦克。



图 1.9 中国 96B 坦克

4) 装甲车

装甲车是具有装甲防护的各种履带或轮式军用车辆，是装有装甲的军用或警用车辆的统称。坦克也是履带式装甲车辆的一种，但是在习惯上通常因作战用途另外独立分类，而装甲车辆多半是指防护力与火力较坦克弱的车种。图 1.10 为 ZBL-09 装甲车。



图 1.10 ZBL-09 装甲车

5) 火箭炮

火箭炮是一种发射火箭弹的多发联装发射装置，它发射的火箭弹依靠自身发动机的推力飞行。火箭炮发射速度快、火力猛烈、突袭性好、机动能力强，可在极短的时间里发射大量火箭弹。图 1.11 为中国 273 mm 1983 式多管火箭炮。



图 1.11 中国 273 mm 1983 式多管火箭炮

6) 化学武器

化学武器(图 1.12)通过爆炸的方式(如炸弹、核武器、炮弹或导弹)释放有毒化学品(或称化学战剂),通过窒息、神经损伤、血中毒和起水疱等令人恐怖的反应杀伤人类。



图 1.12 化学武器

7) 核武器

核武器是利用能自持进行的原子核裂变或聚变反应瞬时释放的巨大能量,产生爆炸作用,并具有大规模毁伤破坏效应的武器。图 1.13 为中国 DF-5B 核导弹。



图 1.13 中国 DF-5B 核导弹

热兵器所用材料，按其用途可分为结构材料和功能材料两大类，主要应用于航空航天、兵器和舰船工业。

1) 结构材料

(1) 铝合金

铝合金一直是军事工业中应用最广泛的金属结构材料。铝合金具有密度低、强度高、加工性能好等特点，作为结构材料，因其加工性能优良，可制成各种截面的型材、管材、高筋板材等，以充分发挥材料的潜力，提高构件刚度和强度。所以，铝合金是武器轻量化首选的轻质结构材料。图 1.14 为军用铝合金装甲板。



图 1.14 军用铝合金装甲板

(2) 镁合金

镁合金作为最轻的工程金属材料，具有比重轻、比强度及比刚度高、阻尼性及导热性好、电磁屏蔽能力强以及减振性好等一系列独特的性质，极大地满足了航空航天、现代武器装备等军工领域的需求。

镁合金在军工装备上有诸多应用，如坦克座椅骨架、车长镜、炮长镜、变速箱箱体、

发动机机滤座、进出水管、空气分配器座、机油泵壳体、水泵壳体、机油热交换器、机油滤清器壳体、气门室罩、呼吸器等车辆零部件，战术防空导弹的支座舱段与副翼蒙皮、壁板、加强框、舵板、隔框等弹箭零部件，歼击机、轰炸机、直升机、运输机、机载雷达、地空导弹、运载火箭、人造卫星等飞船飞行器构件。图 1.15 为镁合金在航空领域的应用。



图 1.15 镁合金在航空领域的应用

(3) 钛合金

钛合金具有较高的抗拉强度(441~1 470 MPa)，较低的密度(4.5 g/cm^3)，优良的抗腐蚀性能，在 $300\sim 550\text{ }^\circ\text{C}$ 温度下有一定的高温持久强度和很好的低温冲击韧性，是一种理想的轻质结构材料。钛合金具有超塑性的功能特点，采用超塑成形-扩散连接技术，可以以很少的能量消耗和材料消耗将合金制成形状复杂和尺寸精密的制品。图 1.16 为德国 DSR-1 狙击步枪，在此枪的设计中使用了大量的钛合金。



图 1.16 德国 DSR-1 狙击步枪

在过去相当长的时间里，钛合金由于制造成本昂贵，应用受到了极大的限制。近年来，世界各国正在积极开发低成本的钛合金，在降低成本的同时，还要提高钛合金的性