

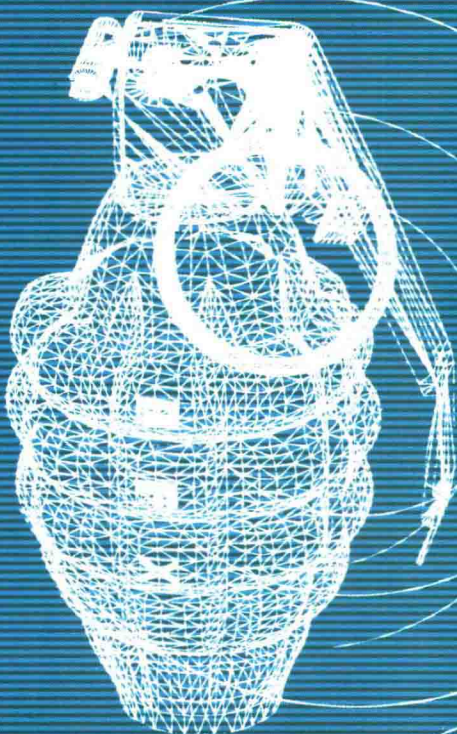
兵器科学与技术



国防科工委「十五」规划  
教材

# 弹药制造工艺学

● 主编 陈国光 副主编 董素荣



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

北京航空航天大学出版社

哈尔滨工业大学出版社

西北工业大学出版社

哈尔滨工程大学出版社



国防科工委“十五”规划教材·兵器科学与技术

# 弹药制造工艺学

主 编 陈国光

副主编 董素荣

**北京理工大学出版社**

北京航空航天大学出版社 西北工业大学出版社

哈尔滨工业大学出版社 哈尔滨工程大学出版社

## 内容简介

本书是按照国防科工委重点教材建设计划而编写的。书中以弹药制造工艺技术为主线,系统介绍了弹药机械制造工艺和含能材料装药工艺的基本知识。全书共分16章,主要内容包括:制造弹箭零件用的材料及毛坯种类的选择;弹箭零件机械加工工艺规程的编制;制造弹箭零件常用的加工方法——热冲压、冷挤压、冷冲压、强力旋压、铸造、弹箭零件的机械加工及热处理和表面处理的方法;含能材料装药的基本知识及常用的装填方法;火箭弹的装配与验收;检验与验收;现代制造技术。

本书可作为高等院校国防特色学科的本科生、研究生教材,也可供教学和科研工作者参考。

## 图书在版编目(CIP)数据

弹药制造工艺学/陈国光主编. —北京:北京理工大学出版社,  
(2010.2重印)

国防科工委“十五”规划教材  
ISBN 978-7-5640-0299-2

I. 弹… II. 陈… III. 弹药-生产工艺-高等学校-  
教材 IV. TJ410.5

中国版本图书馆CIP数据核字(2004)第070124号

## 弹药制造工艺学

陈国光 主编

责任编辑 任世宏

责任校对 张宏

北京理工大学出版社出版发行

北京市海淀区中关村南大街5号(100081)

电话:010-68914775(办公室) 68944990(发行部)

<http://www.bitpress.com.cn>

北京圣瑞伦印刷厂印制 各地新华书店经销

开本:787×960 1/16

印张:32.75 字数:664千字

2010年2月第1版第2次印刷

ISBN 978-7-5640-0299-2 定价:65.00元

# 总 序

国防科技工业是国家战略性产业,是国防现代化的重要工业和技术基础,也是国民经济发展和科学技术现代化的重要推动力量。半个多世纪以来,在党中央、国务院的正确领导和亲切关怀下,国防科技工业广大干部职工在知识的传承、科技的攀登与时代的洗礼中,取得了举世瞩目的辉煌成就。研制、生产了大量武器装备,满足了我军由单一陆军,发展成为包括空军、海军、第二炮兵和其他技术兵种在内的合成军队的需要,特别是在尖端技术方面,成功地掌握了原子弹、氢弹、洲际导弹、人造卫星和核潜艇技术,使我军拥有了一批克敌制胜的高技术武器装备,使我国成为世界上少数几个独立掌握核技术和外层空间技术的国家之一。国防科技工业沿着独立自主、自力更生的发展道路,建立了专业门类基本齐全,科研、试验、生产手段基本配套的国防科技工业体系,奠定了进行国防现代化建设最重要的物质基础;掌握了大量新技术、新工艺,研制了许多新设备、新材料,以“两弹一星”、“神舟”号载人航天为代表的国防尖端技术,大大提高了国家的科技水平和竞争力,使中国在世界高科技领域占有了一席之地。十一届三中全会以来,伴随着改革开放的伟大实践,国防科技工业适时地实行战略转移,大量军工技术转向民用,为发展国民经济做出了重要贡献。

国防科技工业是知识密集型产业,国防科技工业发展中的一切问题归根到底都是人才问题。50多年来,国防科技工业培养和造就了一支以“两弹一星”元勋为代表的优秀的科技人才队伍,他们具有强烈的爱国主义思想和艰苦奋斗、无私奉献的精神,勇挑重担,敢于攻关,为攀登国防科技高峰进行了创造性劳动,成为推动我国科技进步的重要力量。面向新世纪的机遇与挑战,高等院校在培养国防科技人才,生产和传播国防科技新知识、新思想,攻克国防基础科研和高技术研究难题当中,具有不可替代的作用。国防科工委高度重视,积极探索,锐意改革,大力推进国防科技教育特别是高等教育事业的发展。

高等院校国防特色专业教材及专著是国防科技人才培养当中重要的知识载体和教学工具,但受种种客观因素的影响,现有的教材与专著整体上已落后于当



今国防科技的发展水平,不适应国防现代化的形势要求,对国防科技高层次人才的培养造成了相当不利的影 响。为尽快改变这种状况,建立起质量上乘、品种齐全、特点突出、适应当代国防科技发展的国防特色专业教材体系,国防科工委全额资助编写、出版 200 种国防特色专业重点教材和专著。为保证教材及专著的质量,在广泛动员全国相关专业领域的专家学者竞投编著工作的基础上,以陈懋章、王泽山、陈一坚院士为代表的 100 多位专家、学者,对经各单位精选的近 550 种教材和专著进行了严格的评审,评选出近 200 种教材和学术专著,覆盖航空宇航科学与技术、控制科学与工程、仪器科学与工程、信息与通信技术、电子科学与技术、力学、材料科学与工程、机械工程、电气工程、兵器科学与技术、船舶与海洋工程、动力机械及工程热物理、光学工程、化学工程与技术、核科学与技术等学科领域。一批长期从事国防特色学科教学和科研工作的两院院士、资深专家和一线教师成为编著者,他们分别来自清华大学、北京航空航天大学、北京理工大学、华北工学院、沈阳航空工业学院、哈尔滨工业大学、哈尔滨工程大学、上海交通大学、南京航空航天大学、南京理工大学、苏州大学、华东船舶工业学院、东华理工学院、电子科技大学、西南交通大学、西北工业大学、西安交通大学等,具有较为广泛的代表性。在全面振兴国防科技工业的伟大事业中,国防特色专业重点教材和专著的出版,将为国防科技创新人才的培养起到积极的促进作用。

党的十六大提出,进入 21 世纪,我国进入了全面建设小康社会、加快推进社会主义现代化的新的发展阶段。全面建设小康社会的宏伟目标,对国防科技工业发展提出了新的更高的要求。推动经济与社会发展,提升国防实力,需要造就宏大的人才队伍,而教育是奠基的柱石。全面振兴国防科技工业必须始终把发展作为第一要务,落实科教兴国和人才强国战略,推动国防科技工业走新型工业化道路,加快国防科技工业科技创新步伐。国防科技工业为有志青年展示才华,实现志向,提供了缤纷的舞台,希望广大青年学子刻苦学习科学文化知识,树立正确的世界观、人生观、价值观,努力担当起振兴国防科技工业、振兴中华的历史重任,创造出无愧于祖国和人民的业绩。祖国的未来无限美好,国防科技工业的明天将再创辉煌。

张华祝



# 前 言

现代战争正向着信息化、数字化与智能化的方向发展,因此在现代武器系统的设计中,已广泛采用了各种新材料、新技术以及新的制造加工方法。与此相适应的弹药制造工艺也发生了重大的变化。例如在弹箭零件的制造工艺中大量采用了强力旋压技术、数控技术以及 CAD/CAM 集成技术。随着新型炸药和新型推进剂的应用,在装药技术、装药方法上也发生了很大变化,逐渐向着自动化的方向发展。先进的弹药制造技术是武器系统实现其战术技术性能的重要保证。因此,为适应这种新的发展变化的趋势以及知识更新的需要,迫切需要编写出一本新的弹药制造工艺学教材,较为系统全面地介绍新的工艺技术与工艺方法,以满足教学与科研的需要。

本书是按照国防科工委重点教材建设计划而编写的。书中以弹药制造工艺技术为主线,系统介绍了弹药机械制造工艺和含能材料装药工艺的基本知识。

本书的编写宗旨是使学生能够系统地掌握基本的弹药制造工艺知识,并具备必要的弹药设计研究和在产品管理工作中解决与工艺有关的实际问题的能力,从而为从事弹药科研和生产管理工作奠定扎实的基础。

在本书的编写中,作者根据多年来从事产品设计与技术管理的经验并结合现代新工艺、新技术的应用,力图为读者提供一本较系统的弹药制造工艺学教科书,供教学和科研工作者参考。

全书共分 16 章。其主要内容为:第一章到第八章介绍一些主要零件所用的金属材料、非金属材料、高密度材料、工程塑料及复合材料在现代武器设计中的应用;机械加工工艺规程的编制;介绍了一些常用的机械加工方法,如热冲压、冷挤压、冷冲压、铸造等在弹箭零件制造中的应用。其中,第六章重点介绍了军工企业在弹药设计中制造关键零件采用的强力旋压技术;第八章重点介绍了数控机床在弹箭零件加工中的应用以及典型零件的加工示例。第九章、第十章介绍了弹箭零件的热处理以及表面处理的基本知识。第十一章到第十三章重点介绍了弹丸、战斗部与火箭发动机装药的基本知识以及常用的装药方法。第十四章重点介绍了火箭弹装配与验收的全过程。第十五章重点介绍了弹药检验与验收的基本知识



与技术要求。第十六章介绍了现代制造技术,包括先进的 CAD/CAM 集成技术、柔性制造系统、快速成型技术等。

本书可作为高等院校国防特色学科的本科生、研究生教材,也可供教学和科研工作者参考。

本书第三、四、五、六、十五章由陈国光编写,第九、十一、十二、十三、十四章由董素荣编写,第一、二、七、八、十、十六章由周海英编写。全书由陈国光和董素荣统稿。

周兰庭教授和陈惠武教授认真审阅了文稿,并提出了宝贵的意见,作者对两位专家的指导表示深深的谢意。在本书的编写过程中,引用和参考了许多文献资料,在此谨向参考文献的作者表示感谢,同时本书的编写还得到了华北工学院的大力支持,王芳、王勇、唐宏、李鑫欣等同志绘制了本书的插图,在此对他们表示衷心的感谢。

由于作者水平所限,书中错误和不妥之处,敬请读者批评指正。

作者

# 目 录

<b>第一章 制造弹箭零件用的材料及毛坯种类的选择</b> .....	1
1.1 制造弹箭零件的黑色金属材料 .....	1
1.2 制造弹箭零件的有色金属材料 .....	8
1.3 制造弹箭零件的高密度材料 .....	10
1.4 制造弹箭零件的工程塑料及模压成型 .....	13
1.5 复合材料 .....	27
1.6 投产前钢材的检验 .....	30
1.7 弹箭零件的毛坯种类及其选择 .....	32
<b>第二章 弹箭零件机械加工工艺流程的编制</b> .....	37
2.1 总工艺设计 .....	37
2.2 机械加工工艺过程与工艺流程 .....	40
2.3 编制工艺流程的设计原则、程序与要求 .....	43
2.4 工艺流程的内容与格式 .....	46
2.5 加工余量与工序尺寸的确定 .....	49
2.6 定位基准的选择 .....	55
2.7 弹箭零件机械加工工艺流程和工序安排 .....	57
<b>第三章 弹体毛坯热冲压</b> .....	62
3.1 概述 .....	62
3.2 金属压力加工成型的基础知识 .....	63
3.3 坯料尺寸及下料方法 .....	71
3.4 坯料的加热 .....	75
3.5 弹体毛坯的冲孔 .....	81
3.6 弹体毛坯的拔伸 .....	86
3.7 热冲压毛坯形状及尺寸的确定 .....	89
3.8 弹体毛坯的收口 .....	92
3.9 弹体毛坯热冲压的其他方法 .....	97
<b>第四章 弹体毛坯冷挤压</b> .....	101
4.1 冷挤压成型的一般原理 .....	101
4.2 冷挤压用钢材及挤压件性能 .....	118
4.3 冷挤压坯料的制备 .....	124
4.4 弹体毛坯的冷挤压 .....	127





<b>第五章 弹箭零件的冷冲压</b> .....	135
5.1 概述 .....	135
5.2 冲裁类零件的冷冲压 .....	136
5.3 弯曲类零件的冷冲压 .....	140
5.4 圆筒件的不变薄拉伸 .....	144
5.5 拉伸类零件的冷冲压 .....	151
<b>第六章 弹箭零件的强力旋压</b> .....	157
6.1 概述 .....	157
6.2 火箭弹战斗部本体与燃烧室的强力旋压 .....	159
6.3 药型罩的强力旋压 .....	164
6.4 强力旋压时的变形及应力分析 .....	170
6.5 旋压工艺和工艺参数的确定 .....	173
6.6 错距旋压的应用 .....	176
<b>第七章 弹箭零件的铸造</b> .....	183
7.1 砂型铸造 .....	183
7.2 熔模精密铸造 .....	193
7.3 陶瓷型铸造 .....	198
7.4 压力铸造 .....	202
7.5 电铸工艺 .....	210
7.6 快速铸造技术 .....	211
7.7 铸造 FMS 技术 .....	218
<b>第八章 弹箭零件的机械加工</b> .....	223
8.1 弹体的机械加工 .....	223
8.2 燃烧室的机械加工 .....	227
8.3 喷管的机械加工 .....	231
8.4 数控机床的应用 .....	238
<b>第九章 弹箭零件的热处理</b> .....	249
9.1 弹箭零件的热处理 .....	249
9.2 铝合金的热处理 .....	255
9.3 典型零件在热处理过程中出现的质量问题及解决方法 .....	258
<b>第十章 火箭弹的表面处理</b> .....	260
10.1 表面腐蚀种类及防腐方法 .....	260
10.2 防腐处理前零件表面的清理 .....	262
10.3 钢质零件的氧化和磷化处理 .....	266
10.4 电化学处理 .....	270
10.5 涂敷耐热涂层 .....	279
10.6 涂油和涂漆 .....	282



10.7	提高防腐性能的主要途径 .....	284
<b>第十一章</b>	<b>弹丸与火箭战斗部装药 .....</b>	<b>286</b>
11.1	装填物的特性简介 .....	286
11.2	弹药装药方法的分类 .....	299
11.3	弹药装药方法的选择原则及对装药的技术要求 .....	304
11.4	弹药装药质量的检验与验收 .....	307
<b>第十二章</b>	<b>弹丸与火箭战斗部装药的常用方法 .....</b>	<b>310</b>
12.1	注装法 .....	310
12.2	压装法 .....	331
12.3	螺旋装药法 .....	346
12.4	塑态装药法 .....	355
12.5	振动装药法 .....	361
12.6	弹药装药工艺方法的改进与展望 .....	367
<b>第十三章</b>	<b>火箭发动机装药 .....</b>	<b>370</b>
13.1	推进剂的特性简介 .....	371
13.2	推进剂装填方式的分类与选择原则 .....	393
13.3	发动机装药的技术要求与装药质量的检验与验收 .....	427
<b>第十四章</b>	<b>火箭弹的装配与验收 .....</b>	<b>436</b>
14.1	火箭弹装配的主要技术要求 .....	436
14.2	部件装配 .....	440
14.3	总体装配中部件的配套原则及总装 .....	442
14.4	包装、编批与交验 .....	445
14.5	装配中常见的质量问题 .....	447
<b>第十五章</b>	<b>检验与验收 .....</b>	<b>454</b>
15.1	概述 .....	454
15.2	外观尺寸及理化性能检验 .....	454
15.3	靶场试验 .....	455
<b>第十六章</b>	<b>现代制造技术 .....</b>	<b>471</b>
16.1	特种加工方法 .....	471
16.2	CAD/CAM 集成 .....	478
16.3	成组技术 .....	491
16.4	柔性制造系统(FMS) .....	495
16.5	快速成型技术(RPT) .....	499
16.6	制造技术的发展 .....	509
<b>参考文献</b>	.....	512

# 第一章 制造弹箭零件用的材料及毛坯种类的选择

制造炮弹和火箭弹零件用的材料在零件图中已予以规定。其确定依据首先是产品对零件性能的要求；其次是考虑制造工艺对材料的要求，即材料的工艺性。不同的工艺方法对所用材料有不同的要求，例如，用热冲压方法制造弹体时，应采用性能符合要求的高碳钢；用冷挤压方法制造弹体时应采用塑性良好的深冲钢，并通过变形强化达到产品的性能要求，例如，对锥度很小的风帽而言，目前都用冷冲压方法制造，而适合于冷冲压加工的材料必须是塑性好、变形抗力低的材料；再如某些结构形状较复杂的零件有时只能用压力铸造的方法制造，而压力铸造本身对材料也有一定的要求，例如熔点不宜过高等。

此外，选用材料时还应结合我国的资源情况，尽量选用有广泛来源的材料，对战时大量需要的炮弹和火箭弹来讲，这一点是非常重要的。

不同的炮弹和火箭弹，对其零件的性能要求各不相同，所用材料相当广泛，本章重点介绍一些主要零件所用的金属材料，对于非金属材料则仅作简单介绍。

## 1.1 制造弹箭零件的黑色金属材料

### 1.1.1 碳素结构钢

这类钢材在弹箭生产中应用的最为广泛。按照它们的用途和性能可分为：炮弹用碳素钢、优质碳素结构钢、深冲钢和普通碳素结构钢等。

#### 1. 炮弹用碳素钢(简称炮弹钢)

这是专门供制造炮弹零件用的热轧碳素钢。主要用于榴弹和一些特种弹以及杀伤爆破火箭弹战斗部的弹体，也用于制造头螺、底螺等。这些零件对所用材料的基本要求是应有一定的强度和塑性。例如大部分榴弹和特种弹的弹体对材料的要求一般为：屈服点在 314~588 MPa，断面收缩率在 15%以上，采用炮弹钢就可以满足这些要求。

根据加工方法的不同，炮弹钢可分为热压力加工用钢和机械加工用钢两类。

热压力加工用钢先经热冲压方法制造毛坯，后经机械加工制成零件，零件的机械性能取决于钢材的化学成分、热压力加工的规范以及必要的热处理。所以这类钢材进厂时，只检验其化学成分。

机械加工用钢则不经过毛坯制造而直接进行机械加工得到成品。因此，其机械性能必须



达到所要求的数值,并在钢材进厂时进行检验。

在制造榴弹或火箭弹弹体时,用得最多的是 D60 钢、58SiMn 钢、60Si<sub>2</sub>Mn 钢等。这类钢的屈服极限分别为 363 MPa、650 MPa 和 750 MPa 左右,断面收缩率不小于 30%。长期的使用经验证明,对现有弹体结构和所用炸药而言,这种钢具有必要的强度、满意的爆炸破片,同时具有良好的热压力加工性能和切削性能。

### 2. 优质碳素结构钢

在火箭生产中还大量使用优质碳素结构钢。这类钢中的高碳钢经调质处理后,有较好的综合机械性能,可用于承受负荷较大的零件,如 107 mm 火箭弹的中间底,经淬火和低温回火后有较高的硬度,故某些弹的防滑帽即用 55 或 60 钢制造。在高碳钢中 65、70 钢用得较少。

中碳钢的强度不及高碳钢,但韧性较好,一般经调质或正火后使用。主要用于制作承受负荷较大而又要求有较高韧性的零件。如为保证与燃烧室相连接的喷管螺纹的强度,在不使用合金钢时,喷管常以 45 号钢在调质状态下使用。其他很多中等受力的重要零件也经常采用中碳钢制造,如航空炮弹弹体、曳光管、曳光管螺帽等。

在优质碳素结构钢中,低碳钢也得到了广泛的应用。低的含碳量使它具有良好的塑性和较低的变形抗力,适合于冷压力加工。常用 08、10、15 等钢种制作冲裁件、弯曲件、拉伸件以及其他成型零件。如 130 mm 火箭弹的药包夹、一些炮弹或火箭弹的风帽、弹体、支持架、尾翼架等,此外,低碳钢的良好焊接性能使得有可能用焊接结构来代替一些铆接或螺纹连接结构,例如不少火箭弹的尾翼片与整流罩的连接、一些爆破火箭弹战斗部壳体与传爆管及螺纹环的连接等。

从品种上看,优质碳素结构钢常用的有热轧和冷拉钢材以及薄钢板。在火箭生产中使用的热轧钢材主要是热轧圆钢、圆角方钢和钢管。冷拉钢材的尺寸精度较高、表面粗糙度较低,便于在自动机床上直接进行机械加工,适用于一些小口径弹体和一些尺寸不大的零件。薄钢板的厚度一般在 4 mm 以下,按其冷变形性能可分为三级:ZF——拉延最复杂,HF——拉延较复杂,F——拉延复杂。其变形性能从 ZF 到 F 依次递减。

### 3. 深冲钢

随着冷冲压(如钢质风帽、药筒等零件的拉伸)和冷挤压工艺的发展,对原材料的变形性能提出了更高的要求。表 1-1 为深冲压用冷轧薄钢板和钢带的化学成分和机械性能。

表 1-1 深冲压用冷轧薄钢板和钢带(GB/T5213-2001,GB/T228-2002)

钢种	化学成分/%						屈服极限/MPa		A/%
	w(C)	w(Mn)	w(Si)	w(P)	w(S)	w(Als) (酸溶铝)	R <sub>m</sub>	R <sub>e</sub>	
SC1	≤0.080	≤0.40	≤0.03	≤0.02	≤0.025	0.02~0.07	270~350	210~240	≥34~38
SC2	≤0.010	≤0.03	≤0.03	≤0.02	≤0.020	0.03~0.08	270~330	180	≥40
SC3	≤0.008	≤0.03	≤0.03	≤0.02	≤0.020	0.03~0.08	270~350	180	≥38

注:表中 R<sub>m</sub> 为抗拉强度;R<sub>e</sub> 为屈服强度;A 为断后伸长率。



从表 1-1 中可以看出,深冲钢属于低碳钢的范畴,但它和优质碳素结构钢中的低碳钢又有不同之处:

(1) 平均含碳量相同的钢号,深冲钢较优质碳素结构钢的含碳量的波动范围要小。碳是强化钢的主要元素,故其含量波动范围小可有效地稳定钢的工艺性能和机械性能。

(2) 锰、硫、磷的允许含量及其波动范围也较优质碳素结构钢小。其目的是减小硫、磷的有害作用和降低锰对低碳钢的强化作用。

深冲钢中含硅量也较优质碳素结构钢低,其主要原因是硅能使钢在冷压力加工中产生强烈的硬化现象,降低其含量可增加钢的塑性和降低变形抗力。

(3) 在深冲钢中加入了少量的铝,其作用是抑制钢的应变时效,以提高钢在低温下的韧性。

此外,由于深冲钢在冶炼过程中还注意了对气体和非金属夹杂物的控制,因而使其有比较一致的纵、横向机械性能。

因为深冲钢具有上述适合于冷压力加工的特点,所以在弹箭生产中得到了日益广泛的应用,如某些冷挤压弹体、深度较大的传爆管及一些弹的尾杆等。

#### 4. 普通碳素钢

对于一些性能要求不太高的零件可选用普通碳素结构钢。

### 1.1.2 合金钢

在弹箭生产中,合金钢主要是用于制造各种类型的穿甲弹弹体和火箭发动机中的重要零件(如燃烧室和喷管)。这两类零件的要求不同,所用的材料也不同。

#### 1. 制造穿甲弹主要零件所用的合金钢

普通穿甲弹的作用是碰击目标时利用其动能将目标穿透,然后利用弹丸中少量炸药的爆炸作用对内部进行破坏。因此,穿甲弹的主要零件(弹体和被帽)首先要有足够高的强度和硬度;同时,为保证弹丸与目标碰击时弹体不致破碎,尤其是药室部分不致破裂,还要求所用材料有足够的韧性。为此,需采用合金钢,并经必要的热处理。这类钢主要用来制造穿甲弹和半穿甲弹的弹体、被帽或其他要求高强度的炮弹主要零件。这些钢在我国的具体应用情况见表 1-2。

表 1-2 穿甲弹体所用材料

弹 种	所用材料牌号
23 mm 2 型穿甲燃烧航空炮弹体	35CrMnSiA
30 mm 1 型穿甲航空炮弹弹体	35CrMnSiA
海双 30 mm 舰炮用杀伤爆破燃烧弹弹体	35CrMnSiA
海双 30 mm 舰炮用穿甲爆破弹弹体	35CrMnSiA
37 mm 1 型穿甲燃烧曳光穿甲弹弹体	35CrMnSiA



续表

弹 种	所用材料牌号
37 mm 55 式高射机关炮用曳光穿甲弹弹体	35CrMnSiA
57 mm 59 式高射机关炮用曳光穿甲弹弹体	60Cr2MoA 或 35CrMnSiA
57 mm 55 式反坦克炮用被帽曳光穿甲弹弹体	60Cr2MoA
57 mm 55 式反坦克炮用钝头曳光穿甲弹弹体	35CrMnSiA
85 mm 56 式加农炮用被帽曳光穿甲弹弹体	60Cr2Ni2MoA
100 mm 44 式加农炮用被帽曳光穿甲弹弹体	60Cr2Ni2MoA 或 60SiMn2MoVA
100 mm 滑膛脱壳穿甲弹弹体	35CrMnSiA
双 130 mm 海岸炮(130/58)用半穿甲弹弹体	35Cr3NiMoA
单 130 mm 海岸炮(130/58)用半穿甲弹弹体	35Cr3NiMoA

从表 1-2 可知,穿甲弹所用的合金钢主要有铬钢、铬钼钢、铬镍钼钢以及铬锰硅钢。钢中合金元素铬、镍、钼均能显著地改善钢的性能。这些元素的主要作用是:

(1) 铬 钢中加入少量铬可增加钢的淬透性,铬还能提高钢的回火稳定性,对回火时消除应力和提高钢的韧性有利。不过,在碳钢中单独加入铬,对调质后的机械性能虽有改善,但其作用不显著,只有在加入铬的同时再加入其他元素如锰、钼、镍等,才能显示出较好的性能。

(2) 镍 镍也是稳定过冷奥氏体的主要合金元素,它的加入能增加钢的淬透性。但是在钢中同时加入铬和镍要比单独加入铬或镍对淬透性影响的总和大得多。镍对钢的机械性能影响有两个最突出的优点,一是镍在提高钢的强度的同时不降低钢的塑性和韧性,适量时还会有所提高;二是镍能降低钢的低温脆性的转变温度,因此,含镍的钢,其低温韧性较好。

铬镍结构钢虽然有较好的综合机械性能,有高的淬透性和低温冲击韧性等优点,但铬镍钢对第二类回火脆性很敏感,当在 450~550 °C 回火时快冷和慢冷的冲击韧性可相差 6~8 倍之多,所以铬镍钢在高温回火时应快冷。铬镍钢的另一缺点是在锻件中有时会形成白点,故在热加工后应采取缓冷措施。

(3) 钼 它在钢中的作用是提高淬透性、传热性和防止回火脆性等。要特别指出的是钼有降低回火脆性的倾向(但若钼作为单一的合金元素存在时,它也增加钢的回火脆性)。铬镍钢中加入钼后,可使其有很高的冲击韧性和淬透性。

综上所述,将铬、镍和钼同时加入钢中可使钢具有良好的综合机械性能和工艺性能。其中 35Cr3NiMoA 钢主要用于大口径穿甲弹或半穿甲弹弹体。这种钢用于制造 152 mm 半穿甲弹弹体即使在油中淬火,也可完全淬透,使整个截面获得很高的强度和硬度。60Cr2Ni2MoA 和 60Cr2MoA 钢经淬火后可获得高硬度,调质后又具有较高的强度和韧性,因而被用于制造 85 mm 和 100 mm 被帽穿甲弹弹体。

炮弹用合金钢中的 35CrMnSiA 钢是比较成熟的少铬无镍高强度钢。其淬透性较好,强度较高,但其有显著的回火脆性倾向,韧性较低,故需正确地选择回火温度。它常用于中小口



径的穿甲弹弹体、被帽和一些强度要求较高的弹丸零件。

用铬镍钼钢制造穿甲弹弹体,需消耗大量的铬和镍,而目前我国铬和镍尚比较稀缺,因此,我国在多年前就开始研制不含镍铬的炮弹用合金钢。其中比较成熟的有硅-锰-钼-钒系列钢,如 60SiMn2MoVA 钢,该钢的化学成分见表 1-3。

表 1-3 60SiMn2MoVA 钢的化学成分

%

$w(C)$	$w(Mn)$	$w(Si)$	$w(Mo)$	$w(V)$	$w(S)$	$w(P)$	$w(Cu)$
0.55~0.61	1.5~1.8	0.6~0.8	0.45~0.55	0.1~0.2	$\leq 0.035$	$\leq 0.035$	$\leq 0.025$

钢中钒的主要作用是细化奥氏体晶粒,消除锰钢的过热倾向,钼的加入则为消除硅-锰系钢固有的第二类回火脆性倾向并提高钢的淬透性和回火稳定性。

60SiMn2MoVA 钢由于含碳量较高以及合金元素的综合作用,具有高的淬透性、高硬度、高强度的同时兼有足够的韧性,因而能满足穿甲弹弹体的要求。

此钢种的不足之处是退火后硬度不易下降,切削性能不如铬镍钼钢,其塑性和韧性也较 60Cr2Ni2MoA 钢稍差,疏松等级也不易控制。

## 2. 制造火箭发动机所用的合金钢

火箭发动机中的关键零件是燃烧室和喷管。燃烧室工作时要承受较高的燃气压力的作用,因而要求材料有较高的机械性能,但因其壁厚较薄,因而对所用材料的淬透性要求不像穿甲弹那样高。为了减小燃烧室的壁厚从而减轻火箭弹被动段的质量,燃烧室所用的材料应有较高的强度。在压力上升阶段,燃烧室所承受的载荷有较大的冲击性(对装药燃烧时间短而又要求提供大推力冲量的燃烧室来说尤为如此),因此,所用材料又应有较高的冲击韧性。此外,对装药燃烧时间长而隔热条件又较差的燃烧室而言,尚要求所用材料在较高的温度下应有足够的机械性能。由此可见,正确地选用燃烧室的材料是很重要的。表 1-4 是几种火箭弹燃烧室所用的材料牌号及产品对材料性能的要求。

表 1-4 不同弹种的燃烧室对材料的机械性能要求

弹 种	材 料	强度指标/MPa	塑性指标/%
107 mm 火箭弹	40Mn2	$R_e \geq 637$	$Z \geq 35$
130 mm 火箭弹	40Mn2	$R_p \geq 588$	$Z \geq 45$
180 mm 火箭弹	45MnB	$R_m \geq 1029$ $R_p \geq 686$	$Z > 45$ $A \geq 10$
40 mm 火箭增程破甲弹	30CrMnSiA	$R_m \geq 1078$	$A \geq 9$
62 mm 反坦克破甲弹	30CrMnSiA	$R_m \geq 1078$	$A \geq 9$
“57-1”火箭弹	30CrMnSiA	$R_m \geq 1078$	$A \geq 9$
122 mm 火箭弹	14MnNi	$R_m \geq 784$	$A \geq 2.5$



续表

弹种	材料	强度指标/MPa	塑性指标/%
122 mm I 型火箭弹	40Cr	$R_m \geq 670$	$A \geq 15$
“红鹰-5”	28Cr3SiNiMoWVA	$R_m \geq 1372 \sim 1421$	$A \geq 6$
苏 M-14	40Cr	$R_p > 686$	$Z \geq 30$

注:表中 Z 为断面收缩率;  $R_p$  为规定非比例延伸强度。

下面对表中所列 30CrMnSi、40Mn2、45MnB、14MnNi 和 28Cr3SiNiMoWVA 钢加以简单说明。

(1) 30CrMnSi 属于铬-锰-硅调质结构钢,经调质处理或等温淬火处理后有较好的综合机械性能。此钢具有一定的冷变形性能及较好的焊接性能,故可用于强力旋压和焊接组合结构的零件。对于尺寸较小的实心零件或壁厚不大的管件,用 30CrMnSi 钢制造时,可通过等温淬火处理来获得更好的综合机械性能,而且还可以大大减小热处理过程中的变形和开裂。

(2) 40Mn2 强度较好的调质钢。经调质处理后有较高的强度和较好的冲击韧性。但由于锰增加了钢的过热敏感性和回火脆性倾向,所以这种钢的淬火和高温回火工艺应严格控制。107 mm 火箭弹和 130 mm 火箭弹的燃烧室均采用 40Mn2 钢制造。

(3) 45MnB 从表 1-4 可知,这种钢的含硼量仅为 0.001%~0.005%,但这样微量的硼却能明显提高低、中碳钢的淬透性,因而用于制造壁厚较大的燃烧室时,经调质处理后也能有较好的综合机械性能。硼是我国的富有元素,所以硼钢属于推荐用钢。但硼钢经高温回火后,其冲击韧性不如不含硼而其他成分相同的钢种,且锰硼钢也有一定的回火脆性倾向。此外,因硼的含量甚微,致使冶炼及热处理都较其他常用结构钢困难。

(4) 14MnNi 系低碳低合金钢,其含碳量相当于 15 号钢的平均含碳量。低的含碳量使其有较好的塑性和低的变形抗力,因而有非常良好的冷压力加工工艺性,很适合于用冷拔伸和强力旋压等方法制造精化毛坯。由于锰可增加钢对冷加工硬化的敏感性,故其主要作用是通过压力加工的方法来提高钢的机械性能。由于镍基本上不与碳及其他元素形成化合物,从而在冷变形过程中,不会因形成过多的带状组织而使钢的性能有过多的降低,这正好符合燃烧室对切向强度要求较高的条件。目前除 122 mm 火箭弹前、后燃烧室均采用此钢外,其他弹种也开始注意对它的选用。

(5) 28Cr3SiNiMoWVA 钢 一种综合性能良好的超高强度钢。此钢的强度极限比其他常用结构钢所能达到的强度极限要高得多,故能有效地减小燃烧室的壁厚,从而减轻其质量。由于 28Cr3SiNiMoWVA 钢中含有较多的 Cr、Mo、W、V 等碳化物形成元素,这些元素在回火过程中以合金碳化物形式析出,产生弥散强化效应,因而使其具有较高的抗高温回火性,不仅在常温下而且在高温下也有较高的强度。例如,它在常规热处理条件(淬火加高温回火)下的常温强度极限值为 1 470 MPa 以上,在 500 ℃时为 1 005 MPa;而 30CrMnSiA 钢在上述条件





下的强度极限则分别为 1 078 MPa 和 676 MPa。这种钢可通过不同的回火温度得到 1 372~1 764 MPa 的强度极限。由于这种钢的含碳量较低,所以它在具有很高强度的同时仍有良好的焊接性能和冷压力加工性能,因而不仅可降低燃烧室的质量,而且可采用工艺简单、结构紧凑的焊接组合件,并能采用强力旋压等先进的少、无切屑工艺。所以它是目前制造火箭发动机的一种比较满意的材料。但是,这种钢在冶炼设备和冶炼工艺的要求上均相当严格。

### 1.1.3 铸铁

铸铁在我国的弹箭生产中主要用于制造迫击炮弹弹体。常用的铸铁有刚性铸铁和稀土球墨铸铁。

#### 1. 刚性铸铁

刚性铸铁是一种优质低碳灰口铸铁。所用原材料是优质原生铁和废钢。加入废钢的目的是降低原生铁的碳、硅量,以获得珠光体基体,并使游离石墨呈细片状,从而提高刚性铸铁的力学性能。

铸铁的化学成分对其机械性能有直接影响。不同产品对机械性能的要求也不同。刚性铸铁的强度低,脆性大,弹体爆破后有效破片数较少。有的迫击炮弹爆破后有效破片仅占弹体质量的 20% 左右,所以杀伤威力不大,其优点是可以利用废钢,材料来源丰富。铸铁在弹箭零件中的应用举例见表 1-5。

表 1-5 铸铁在弹箭零件中的应用举例

材 料	应用举例
稀土球铁	60 mm 迫弹弹体,82 mm 迫弹弹体,100 mm 迫弹弹体,120 mm 迫弹弹体等
刚性铸铁	60 mm 迫弹弹体,82 mm 迫弹弹体,160 mm 迫弹弹体等

#### 2. 球墨铸铁(以下简称球铁)

球铁是利用球化剂(一般用镁、稀土元素或稀土镁合金,我国主要是用后两者)对铁水进行炉前处理,以得到在铸态呈球状或团状的游离石墨和致密的金属基体,从而使铸铁有较高的强度和一定的延伸率。由于其组织和性能较刚性铸铁优良,所以球铁弹体的有效破片数较刚性铸铁弹体的有效破片数有显著提高。目前我国已用稀土或稀土镁球铁替代刚性铸铁铸造 60, 82, 100 及 120 mm 等口径的迫弹弹体,并且试验研究了球铁在榴弹弹体上的应用。

球铁的炉前处理包括球化处理和孕育处理。球化处理是在已经熔化并具有一定温度的铁水中加入适量的球化剂使石墨呈球形析出;孕育处理则是在球化处理后的铁水中加入强烈促进石墨化的物质——孕育剂,以防止产生白口组织,从而确保得到球状石墨。

球墨铸铁的基体组织有:铁素体、珠光体以及铁素体加珠光体三类。以铁素体为基体的球铁有高的塑性;以珠光体为基体的球铁有较高的强度;以铁素体加珠光体为基体的球铁则有适