



普通高等教育“十三五”规划教材

PUTONG GAODENG JIAOYU “13·5” GUIHUA JIAOCAI

金属材料学

颜国君 编



冶金工业出版社
www.cnmp.com.cn



更 覽 容 內

普通高等教育“十三五”规划教材

金属材料学

颜国君 编

北京
冶金工业出版社

2019

内 容 提 要

本书以钢的合金化原理和各类型钢的合金化及其组织与性能介绍为重点,兼顾常用有色金属及其合金化与性能,并简要地介绍了一些常用的金属功能材料。全书内容分为三大部分:第一部分是钢的合金化理论和各类工业用钢与铸铁;第二部分是常用的有色金属及其合金;第三部分是一些常用的金属功能材料。每章后均附有大量习题与思考题,可供学生及时巩固所学内容。

本书可作为金属材料类专业学生的教材或参考书,亦可供相关行业的工程技术人员参考。

图书在版编目(CIP)数据

金属材料学/颜国君编. —北京:冶金工业出版社, 2019. 3

普通高等教育“十三五”规划教材

ISBN 978-7-5024-8047-9

I. ①金… II. ①颜… III. ①金属材料—高等学校—教材

IV. ①TG14

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2019) 第 042431 号

出 版 人 谭学余

地 址 北京市东城区嵩祝院北巷 39 号 邮编 100009 电话 (010)64027926

网 址 www.cnmp.com.cn 电子信箱 yjchs@cnmp.com.cn

责任编辑 高 娜 美术编辑 吕欣童 版式设计 禹 蕊

责任校对 卿文春 责任印制 牛晓波

ISBN 978-7-5024-8047-9

冶金工业出版社出版发行; 各地新华书店经销; 三河市双峰印刷装订有限公司印刷

2019 年 3 月第 1 版, 2019 年 3 月第 1 次印刷

787mm×1092mm 1/16; 17.25 印张; 418 千字; 263 页

45.00 元

冶金工业出版社 投稿电话 (010)64027932 投稿信箱 tougao@cnmp.com.cn

冶金工业出版社营销中心 电话 (010)64044283 传真 (010)64027893

冶金工业出版社天猫旗舰店 yjgycbs.tmall.com

(本书如有印装质量问题, 本社营销中心负责退换)

前 言

金属材料学是研究金属材料的成分、组织与性能之间关系的一门学科，对金属材料的生产、使用 and 开发具有重要的指导意义。传统的金属材料历史悠久，其技术相对成熟，理论体系也比较完整。近几十年以来，随着科技的飞速发展和现代科技在材料学科中的应用，材料的制备手段和材料检测技术不断进步，为材料科学的快速发展提供了有力的保障。同时，科技的发展，也对材料的工作环境和性能提出了越来越苛刻的要求，不断地推动材料学科向前发展。因此，近年来，一些新型金属材料，如高熵合金、金属基复合材料、新型金属功能材料等不断出现，并在现代工业中得到广泛应用，极大地发展和丰富了金属材料的内涵。另外，在材料的生产和使用过程中，如何更好地减少资源和能源消耗及污染物的排放，使得人与自然环境和谐相处，也是近年来在材料科学发展中极为关注的问题。为了适应材料科学的发展，提升学生的专业素质，作者依据金属材料类专业人才培养的目标与要求，在借鉴已有的金属材料学教材的基础上，结合自身在本课程教学中的体会和经验，编写了本书。

本书的编写以基本理论知识（合金化理论）为基础，以解决问题的思路和方法（从零件的服役条件出发，分析其失效形式和性能要求，根据性能要求，选择和确定材料的成分、组织和工艺路线，以获得满足所需性能要求的材料）为主线，围绕金属的合金化理论，介绍各类金属材料的成分、加工工艺、组织、性能及应用，并尽可能地体现材料科学的发展思想和金属材料学内容具有的综合性、实践性和经验性的特点。同时，注意培养学生把理论知识应用到实际中去分析问题和解决问题的能力。全书内容分为三大部分：第一部分是关于钢的合金化理论和各类工业用钢与铸铁；第二部分是常用有色金属及其合金；第三部分是一些常用的金属功能材料。

在本书的编写过程中，西安理工大学材料学院谷臣清教授、赵康教授和汤玉斐教授对本书的组织与编写给予了许多非常有益的指导与建议，西安理工大

学材料系在人力和物力上给予了大量的支持，西安理工大学材料学院实验中心的徐雷博士为本书提供了部分金相图片，硕士研究生王黎昱和阎长明做了大量的文字校对工作，作者在此一并表示感谢！

由于作者水平有限且编写时间仓促，书中不足之处在所难免，希望广大同行与读者不吝批评与指正，以便今后不断补充、修改与完善。

作者

2018年12月

目 录

绪论	1
第一章 钢中的合金元素及其对 Fe-C 相图的影响	4
第一节 基本定义	4
第二节 钢中合金元素的分类及其对 Fe-C 相图的影响	5
一、合金元素的分类	5
二、合金元素对 Fe-C 相图的影响	5
第三节 合金钢的分类与编号	8
一、合金钢的分类	8
二、合金钢的编号方法	9
本章小结	12
习题与思考题	12
第二章 合金钢中的相组成	13
第一节 铁基固溶体	13
一、置换式固溶体	14
二、间隙固溶体	14
第二节 碳化物与氮化物	15
一、碳化物(氮化物)形成的一般规律	15
二、钢中常见的碳化物(氮化物)	17
第三节 金属间化合物	18
第四节 非金属相	18
第五节 合金元素在钢中的分布与偏聚	19
一、合金元素在钢中的分布	19
二、合金元素在晶界的偏聚	19
本章小结	20
习题与思考题	21
第三章 合金钢中的相变	22
第一节 合金元素对钢中相变基本因素的影响	22
一、合金元素对 α -Fe 与 γ -Fe 自由能的影响	22
二、合金元素对钢中扩散的影响	23

第二节 合金元素对加热过程中的相变——奥氏体形成的影响	23
一、对奥氏体形成的影响	23
二、碳(氮)化物在奥氏体中的溶解规律	24
三、合金元素对奥氏体成分均匀化和奥氏体晶粒长大的影响	25
第三节 合金元素对过冷奥氏体分解的影响	25
一、合金元素对过冷奥氏体稳定性的影响	26
二、合金元素对珠光体转变的影响	27
三、合金元素对贝氏体转变的影响	27
四、合金元素对马氏体转变的影响	28
第四节 合金元素对淬火钢回火转变的影响	28
一、合金元素对马氏体分解的影响	28
二、特殊碳化物的析出与长大	30
三、残余奥氏体的分解	30
四、 α 相的回复与再结晶	31
五、弥散强化	31
六、回火脆性	32
七、回火稳定性	33
本章小结	33
习题与思考题	34
第四章 合金元素对钢性能的影响	35
第一节 合金元素对钢的强韧化影响	35
一、钢的强化形式及其机理	35
二、钢的强化途径和合金元素的作用	38
三、合金化和强韧化在提高钢力学性能上综合运用举例	39
第二节 合金元素对钢工艺性能的影响	40
一、合金元素对钢热处理工艺性能的影响	40
二、合金元素对钢的成型加工性能的影响	44
本章小结	46
习题与思考题	46
第五章 钢的微合金化和钢合金化的新方向	48
第一节 钢的微合金化	48
一、常用的微合金化元素	48
二、微合金化元素在钢中的作用	48
三、钢的微合金化	49
第二节 钢合金化的新方向	50
一、生态合金化	51
二、多元高熵合金化	53

本章小结	53
习题与思考题	53
第六章 工程构件用钢	54
第一节 工程构件用钢基本的性能要求	54
第二节 工程构件用钢的合金化	55
一、合金元素对钢力学性能的影响	55
二、合金元素对焊接性能的影响	57
三、合金元素对钢耐大气腐蚀性的影响	57
第三节 低合金高强度钢	58
第四节 微合金化低合金高强度钢	63
一、成分控制	63
二、控制轧制与控制冷却	64
三、微合金化元素的作用	65
第五节 其他低合金高强度钢	65
一、针状铁素体型微合金化钢	65
二、低碳贝氏体钢和马氏体钢	66
三、双相钢	67
四、建筑用抗震耐候钢	68
第六节 低合金高强度钢的发展趋势	69
本章小结	70
习题与思考题	71
第七章 机器零件用钢	72
第一节 典型机器零件用钢的服役条件、失效方式和对钢的性能要求	72
第二节 成分和热处理对性能的保证	73
一、机器零件用钢的合金化	74
二、机器零件用钢含碳量的选择和回火温度的确定	74
第三节 调质钢、弹簧钢和滚动轴承钢	77
一、调质钢	77
二、弹簧钢	81
三、滚动轴承钢	84
第四节 低碳马氏体型结构钢	86
一、低碳马氏体钢的性能特点与成分	86
二、低碳马氏体钢的应用	87
第五节 渗碳钢和氮化钢	88
一、渗碳钢	88
二、氮化钢	91
第六节 超高强度钢	93

一、低合金超高强度钢	94
二、二次硬化型中合金超高强度钢	94
三、马氏体时效型高合金超高强度钢	95
四、沉淀硬化型超高强度不锈钢	96
第七节 特殊用途的结构钢	98
一、高锰耐磨钢	98
二、易切削钢	99
第八节 机械制造中零件材料的选择	100
一、材料选择的基本原则	100
二、选择材料的基本思路与方法	102
三、典型零件钢材选择的实例	103
本章小结	105
习题与思考题	105
第八章 工模具钢	108
第一节 工模具钢的成分与性能特点	108
一、工模具钢的化学成分特点	108
二、工模具钢热处理的特点	109
第二节 刀具用钢	109
一、碳素工具钢	110
二、低合金工具钢	111
三、高速钢	113
第三节 冷作模具钢	126
一、碳素工具钢和低合金工具钢	127
二、高铬和中铬模具钢	127
第四节 热作模具钢	132
一、热锤锻模具钢	133
二、热挤压模具钢	134
三、压铸模具钢	136
四、塑料模具钢	136
五、量具用钢	137
本章小结	138
习题与思考题	139
第九章 不锈钢	141
第一节 概论	141
一、不锈钢的工作条件及其性能要求	141
二、金属腐蚀的类型	142
三、金属腐蚀时的极化与钝化	143

851 四、不锈钢的分类	145
第二节 合金元素对钢耐蚀性能的影响	145
一、提高钢耐蚀性的途径	145
二、合金元素对 Fe 的极化和电极电位的影响	145
三、合金元素对不锈钢组织的影响	146
四、不锈钢中各元素的作用	147
五、腐蚀介质对钢耐蚀性的影响	148
第三节 铁素体不锈钢	149
一、铁素体不锈钢的钢种及其成分	149
二、铁素体不锈钢的脆性	150
三、铁素体不锈钢的热加工和热处理	150
第四节 马氏体不锈钢	151
一、马氏体不锈钢的成分与组织	151
二、马氏体不锈钢的热处理	152
三、14Cr17Ni2 钢	153
第五节 奥氏体不锈钢	154
一、奥氏体不锈钢的成分特点	154
二、奥氏体不锈钢的晶间腐蚀与应力腐蚀	155
三、奥氏体不锈钢的热处理	157
四、Cr-Mn 及 Cr-Ni-Mn 型不锈钢	158
第六节 奥氏体-铁素体双相钢	159
本章小结	160
习题与思考题	160
第十章 耐热钢及耐热合金	162
第一节 概述	162
一、耐热钢的高温性能要求	162
二、钢的抗氧化性能	162
三、钢的热强性能	165
四、提高热强性的途径	166
第二节 抗氧化钢	168
一、铁素体型抗氧化钢	168
二、奥氏体型抗氧化钢	169
第三节 热强钢	169
一、珠光体型热强钢	169
二、马氏体型热强钢	172
三、奥氏体型热强钢	174
第四节 镍基高温合金	175
本章小结	178

VIII	习题与思考题	178
第十一章	铸铁	180
第一节	概述	180
一、	铸铁中 C 的存在形式及石墨的形态	180
二、	铸铁的分类	180
三、	铸铁牌号的表示方法	181
第二节	铸铁的石墨化及其控制	182
一、	Fe-Fe ₃ C 和 Fe-G 双重状态图	182
二、	铸铁石墨化过程的热力学和动力学条件	182
三、	铸铁的石墨化过程	184
四、	影响铸铁石墨化的因素	184
五、	石墨的形成和生长机理	186
第三节	灰铸铁	188
一、	灰铸铁的化学成分与组织	189
二、	灰铸铁的孕育处理	189
三、	灰铸铁的性能和应用	190
第四节	球墨铸铁	191
一、	球墨铸铁的化学成分与组织	192
二、	球墨铸铁的球化处理	192
三、	球墨铸铁的性能与应用	193
四、	球墨铸铁的热处理	193
第五节	蠕墨铸铁	196
一、	蠕墨铸铁的化学成分与组织	197
二、	蠕墨铸铁的性能与应用	197
第六节	可锻铸铁	198
一、	可锻铸铁的化学成分与组织	198
二、	可锻铸铁的性能与应用	199
第七节	铸铁的合金化及特殊性能铸铁	199
一、	耐热合金铸铁	199
二、	耐磨铸铁	200
三、	耐蚀铸铁	202
本章小结		203
习题与思考题		203
第十二章	有色金属及其合金	205
第一节	铝及其合金	205
一、	概述	205
二、	铝合金的分类	206

三、铝合金的热处理时效强化	207
四、铝合金的细化组织强化	210
五、变形铝合金	211
六、铸造铝合金	214
第二节 铜及其合金	216
一、概述	216
二、黄铜	217
三、青铜	220
四、白铜	223
第三节 钛及其合金	224
一、纯钛的一些基本性质	224
二、钛合金的分类与钛的合金化	225
三、钛合金的热处理	227
四、常用钛合金	229
第四节 镁及其合金	231
一、镁和镁合金的基本特性	231
二、镁的合金化	232
三、镁合金的热处理	232
四、镁合金的分类和工业用镁合金简介	233
第五节 其他有色金属及其合金	234
一、锌合金	234
二、滑动轴承合金	236
本章小结	238
习题与思考题	239
第十三章 金属功能材料	241
第一节 磁性合金	241
一、软磁合金	242
二、硬磁合金	244
第二节 电性合金	246
一、电阻合金	246
二、热电偶合金	248
三、电触头材料	249
第三节 形状记忆合金	250
一、形状记忆效应及形状记忆效应的分类	250
二、形状记忆效应产生原理	251
三、形状记忆合金的伪弹性	252
四、形状记忆合金的种类	252
第四节 储氢合金	253

一、对储氢合金的性能要求	253
二、金属的储氢原理	253
三、常用的储氢合金	254
四、储氢合金的应用	255
第五节 其他金属功能材料	255
一、超导材料	255
二、热膨胀合金	256
三、弹性合金	257
四、减振合金	258
五、磁阻合金或磁阻抗合金	258
六、生物医学金属材料	259
本章小结	260
习题与思考题	262
参考文献	263

绪论

一、材料的发展历程与人类文明

世界由物质组成，而对人类有用的物质之一就是材料。在人类的发展历程中，人类的生产与生活活动都离不开物质，因此，材料是人类生产和生活活动以及人类文明进步的物质基础和技术先导，历来是生产力的标志，被看成是人类文明进步的里程碑。在人类历史发展过程中，随人类对物质的感知和认识的不断加深，对物质的利用不断进步，人类对材料的使用才得以不断发展，同时，“新材料”的发现和使用伴随着人类的文明进程。在旧石器时代，人类利用天然材料，如树枝与树叶、鸟兽的羽毛、石头与泥土及动物的皮毛与骨头等，作为生产和生活工具；随着人类经验的积累和对物质认知的不断增加，人类开始对天然材料进行简单的加工，这样人类社会就步入新石器时代。在新石器时代，由于火对器物加工的引入，人类用天然的矿土烧制陶器和砖瓦，学会制陶。而陶器的出现，标志着石器时代的结束。同时，由于火的引入，对天然矿物孔雀石进行煅烧出现了铜，标志着人类进入青铜器时代。人类利用青铜制造农具，促进了农业发展，同时，用青铜制造兵器，人类的军事活动则进入冷兵器时代。随着人类对煅烧、冶炼和加工的不断认知和经验的累积，当冶炼出铁时，人类社会已经由青铜器时代进入到铁器时代。铁器的出现又把人类文明向前推进了一大步。至今，钢铁产量仍是衡量一个国家工业化水平和国防实力的标志之一。进入 20 世纪初，随着物理学和化学等科学的发展以及各种检测技术的出现和不断进步，人类一方面从化学角度研究材料的化学组成、化学键合方式及材料的合成方法等；另一方面从物理角度研究材料的组成、结构及性能之间的关系。这一时期，各种具有不同性能的新材料不断涌现。这一阶段的杰出代表材料有超导材料、半导体材料、光纤材料等。由于这些材料的出现，极大地推动着人类社会向前发展，人类社会步入了信息时代。20 世纪 50 年代，高性能的陶瓷材料出现，同时实现与金属材料的复合，则预示着人类社会进入了复合材料时代。这一时期的代表性材料则有金属陶瓷、玻璃钢、铝塑薄膜和功能梯度材料等。这时，人类已经可以利用新的物理、化学方法，根据实际需要设计独特性能的材料。近十年来，随着智能材料的出现和发展，推动和带动了诸如航空航天、国防军事、生物医药、建筑建设等多方面的技术进步。但智能材料距离实用阶段还有一定的距离，目前研制成功的智能材料还只是一种智能结构。

如上所述，在一定的历史时期，材料的发展水平决定了历史的进程。而在近代，材料更是社会文明和国民经济发展的三大支柱之一，是高新技术发展的突破口，支撑了整个高新技术产业的发展，新材料的开发被誉为“发明之母”。因为高强度合金、高温合金、新能源材料及各种非金属材料的出现，才使得航空、航海、汽车工业得以出现和发展；有了光纤，才使得今天的光纤通信成为可能；有半导体材料的工业化生产，才有今天高速发展的计算机技术和信息技术；国防现代化的关键是武器装备现代化，无论是常规武器还是核

武器,都需要性能优异的新型材料。如今,材料已经成为高新技术的物质基础与技术先导,是国民经济建设和国防建设的基础,关系到国民经济实力的增长和人类生活质量的提高。世界各国竞相在高新技术领域的竞争,其实很大程度上就是在新材料水平上的较量,因此,21 世纪科技发展的主要方向之一就是新材料的研制和应用。

二、工程材料的分类

工程上使用的各种材料称为工程材料。工程材料按其属性可分为两大类:金属材料和非金属材料。金属材料可以进一步细分为钢铁材料(黑色金属材料)和有色金属及其合金;而非金属材料常包含无机非金属材料 and 有机高分子材料两大类。从应用的角度分,工程材料可分为结构材料和功能材料。其中结构材料是指以力学性能为主要使用性能并兼有一定的物理和化学性能的材料;而功能材料是指具有特异的物理或化学性质的材料,如超导材料、半导体材料、储能材料、光学材料等。在机械工程领域,在大多数工况下,材料均要承受载荷,因此,对材料的力学性能一般会提出要求,所以主要使用的是结构材料。

工程领域使用的结构材料主要有三大类:金属材料、陶瓷材料和高分子材料。陶瓷材料具有高硬度、高强度和某些特殊的物理性能,在工程领域得到了广泛的应用,具有良好的发展和应用前景;高分子材料正在以前所未有的速度发展,其产量和性能不断提高,而且高分子材料可以人工合成、原料充足,故具有十分广阔的应用前景。

陶瓷材料和高分子材料虽然发展迅速,但是还不能全面取代传统金属材料。目前,金属材料仍然是所有材料中用量最大的材料。21 世纪,金属材料在结构材料中仍将占据主导地位,这在以实现工业化作为历史任务的我国更是如此。例如,2016 年初我国的钢产量达 8.08 亿吨,十种常用的有色金属(铝、铜、锌、铅、镍、锡、铋和钨)的合计产量达 8300 万吨,已连续多年雄踞世界首位,且远超其他国家的产量。但与此同时,我国金属材料的发展水平还与国外先进发达国家存在极大的差距。如我国的钢铁产业是大而不强:生产的依然主要是高能耗、低附加值产品;而高附加值的产品依然依赖进口。每年国内无法完成生产、需要进口的钢产量仍达 1000 万吨以上。因此正确地选择金属材料、合理使用金属材料、提高已有的金属材料的性能和利用率已成为我国广大材料科技工作者亟须解决的问题。

金属材料学是研究金属材料的成分、组织结构、加工工艺与性能之间关系的一门技术科学,对金属材料的生产、使用和发展有着重要的指导作用。因此,全面了解和掌握金属材料学的基础知识是材料科技工作者的职责所在。

三、本课程的主要内容、课程要求与目标

“金属材料学”是金属材料工程等材料类专业的核心课程,是一门专业技术课,属于应用科学基础范畴,是学生走上工作岗位后应用知识最多、最直接的课程。它以凝聚态物理、物理化学和金属学为理论基础,结合冶金、机械和化工等知识,探讨金属材料成分、结构和性能之间的内在规律,并根据具体构件的使用要求,力求能用经济合理的方法制备出符合使用要求所需性能的材料。因此课程具有综合性、实践性和经验性等特点。

课程内容包括五方面:钢的合金化基础、合金钢、铸铁、有色金属和新型金属材料等。其中金属材料的合金化是课程的核心。在学习本课程的过程中,要求学生始终牢

牢把握以下几点：(1) 掌握金属的合金化理论，以及合金元素在金属中的作用。对钢而言，具体包括合金元素加入后对钢的相图、相组成、相变以及工艺性能和力学性能的影响规律；(2) 如何根据零件的服役条件、失效形式、性能要求，正确地选择材料（合金化）和合理地制定工艺，以获得所需的成分与组织，从而满足零件的性能要求；(3) 掌握各类铸铁的性能特点和获得方法，掌握改善铸铁性能的方法与途径；(4) 掌握各类有色金属的成分、组织和加工工艺与性能的关系；(5) 金属功能材料的成分与性能特点。

通过本课程的学习，达到以下目的：在掌握金属合金化基本理论和基本知识的基础上，具备分析材料成分、加工方法、组织结构与性能之间关系的能力，并能结合零件的具体服役条件，分析其性能要求，然后根据性能要求，具备对工程构件进行合理选材和制定构件的加工工艺路线的初步能力。

第一章 钢中的合金元素及其对 Fe-C 相图的影响

第一节 基本定义

C 含量小于 2.11% 的 Fe-C 合金被称为碳素钢。碳素钢在力学性能与工艺性能方面可以满足许多机械工程的使用要求。但是,在很多情况下,碳素钢因其淬透性低、回火抗力差、屈强比低、耐蚀性差、耐磨性能不佳和高温强度低等不足,无法满足许多零件在使用条件下的性能要求。为此,需要在碳钢中特别添加一些化学元素,以保证钢获得所要求的组织结构、物理化学性能、工艺性能和力学性能。

在碳钢中添加合金元素,用以保证碳钢获得一定的生产和加工工艺以及所要求的组织结构与性能,称为钢的合金化;相应的,这些特别添加到钢中,用以保证钢获得所需的组织结构、物理-化学性能、工艺性能和力学性能的化学元素称为钢的合金元素;对应得到的钢称为合金钢。根据需要,钢中加入的合金元素的含量可多可少:多的可达 30%,如 Cr、Ni;少的可到 0.001%,如 B;一般的加入量是 1%~2%,如 Mn、Si 等。

钢中常用的合金元素有 B、N、Al、Si、Ti、V、Cr、Mn、Co、Ni、Cu、Zr、Nb、Mo、W 和稀土元素等。不同国家常用的合金元素与各自的资源有关。例如,在我国, Si、Mn、Mo、W、V、稀土(Re)和 B 等是富有元素,而 Cr、Ni 的资源比较少。因此,如何在合金钢中节约 Cr、Ni 等资源,并根据我国的资源特点建立符合我国国情的合金钢系统,则是一个重要的问题。

在碳钢中除了 Fe、C 元素,在合金钢中除了 Fe、C 和加入的合金元素之外,一般还存在多种其他元素,但是它们的含量都比较低。在钢中,这些除了 Fe、C 和合金元素之外的其他元素,被称为钢中的杂质元素。杂质元素是由冶炼时所用的原料以及冶炼方法和工艺操作等带入钢中的化学元素。视为钢中杂质的元素含量一般限制在下列范围(所用百分比为质量百分比,在本书中,除非特别说明,百分数均采用质量分数,下同): $w(\text{Mn}) \leq 0.5\%$, $w(\text{Si}) \leq 0.4\%$, $w(\text{Ni}) \leq 0.3\%$, $w(\text{Cr}) \leq 0.3\%$, $w(\text{Cu}) \leq 0.3\%$, $w(\text{Mo}) \leq 0.1\%$, $w(\text{W}) \leq 0.2\%$, $w(\text{P}) \leq 0.025\% \sim 0.040\%$, $w(\text{S}) \leq 0.015\% \sim 0.050\%$ 。

由以上关于钢中常见的合金元素和杂质元素种类可见:同一种元素,在钢中既视为杂质元素,也可能作为特别添加的合金元素。例如,钢中的元素 P,视为杂质元素时,使钢塑性下降、产生冷脆和焊接性能变差;但是在炮弹钢中,又是作为合金元素特别添加进去,增加炮弹爆炸时碎片数量,提升炮弹的杀伤力。当元素作为合金元素特别添加到钢中时,决定钢的组织与性能;而视为杂质时,则影响钢的质量。

按照钢中合金元素总含量的不同,合金钢分为高合金钢、中合金钢和低合金钢。当钢中合金元素总含量小于或等于 5% 时,称为低合金钢;合金元素总含量在 5%~10% 时,称