

合金钢设计

The Design of Alloy Steels

赵振业 编著

国防工业出版社

图书在版编目(CIP)数据

合金钢设计/赵振业编著. -北京:国防工业出版社,
1999.9

ISBN 7-118-02098-2

I.合… II.赵… III.合金钢-设计 IV.TG142.33

中国版本图书馆 CIP 数据核字(1999)第 06953 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 100044)

河北三河市腾飞胶印厂印刷

新华书店经售

*

开本 850×1168 1/32 印张 11 $\frac{1}{4}$ 302 千字
1999 年 9 月第 1 版 1999 年 9 月北京第 1 次印刷
印数:1—1500 册 定价:21.00 元

(本书如有印装错误,我社负责调换)

致 读 者

本书由国防科技图书出版基金资助出版。

国防科技图书出版工作是国防科技事业的一个重要方面。优秀的国防科技图书既是国防科技成果的一部分,又是国防科技水平的重要标志。为了促进国防科技事业的发展,加强社会主义物质文明和精神文明建设,培养优秀科技人才,确保国防科技优秀图书的出版,国防科工委于1988年初决定每年拨出专款,设立国防科技图书出版基金,成立评审委员会,扶持、审定出版国防科技优秀图书。

国防科技图书出版基金资助的对象是:

1. 学术水平高,内容有创见,在学科上居领先地位的基础科学理论图书;在工程技术理论方面有突破的应用科学专著。
2. 学术思想新颖,内容具体、实用,对国防科技发展具有较大推动作用的专著;密切结合科技现代化和国防现代化需要的高新技术内容的专著。
3. 有重要发展前景和有重大开拓使用价值,密切结合科技现代化和国防现代化需要的新工艺、新材料内容的科技图书。
4. 填补目前我国科技领域空白的薄弱学科和边缘学科的科技图书。
5. 特别有价值的科技论文集、译著等。

国防科技图书出版基金评审委员会在国防科工委的领导下开展工作,负责掌握出版基金的使用方向,评审受理的图书选题,决定资助的图书选题和资助金额,以及决定中断或取消资助等。经评审给予资助的图书,由国防工业出版社列选出版。

国防科技事业已经取得了举世瞩目的成就。国防科技图书承

担着记载和弘扬这些成就,积累和传播科技知识的使命。在改革开放的新形势下,国防科工委率先设立出版基金,扶持出版科技图书,这是一项具有深远意义的创举。此举势必促使国防科技图书的出版随着国防科技事业的发展更加兴旺。

设立出版基金是一件新生事物,是对出版工作的一项改革。因而,评审工作需要不断地摸索、认真地总结和及时地改进,这样,才能使有限的基金发挥出巨大的效能。评审工作更需要国防科技工业战线广大科技工作者、专家、教授,以及社会各界朋友的热情支持。

让我们携起手来,为祖国昌盛、科技腾飞、出版繁荣而共同奋斗!

国防科技图书出版基金
评审委员会

国防科技图书出版基金 第三届评审委员会组成人员

名誉主任委员	怀国模			
主任委员	黄宁			
副主任委员	殷鹤龄	高景德	陈芳允	曾铎
秘书长	崔士义			
委员	于景元	王小谟	尤子平	冯允成
(以姓氏笔划为序)	刘仁	朱森元	朵英贤	宋家树
	杨星豪	吴有生	何庆芝	何国伟
	何新贵	张立同	张汝果	张均武
	张涵信	陈火旺	范学虹	柯有安
	侯正明	莫悟生	崔尔杰	

前 言

材料科学理论和实验技术的研究和发展、冶金技术的进步,尤其是机械制造业和军事工业发展的需求把钢的设计推上了高强度、高韧性的轨道。这一进程表现在从本世纪 40 年代至今的研究和应用方面,工程师们可以随心所欲地选用具有所需性能的材料。高强度钢一直是机械产品关键承力构件的首选材料,但是,在代表高新技术和新型材料应用先驱的航空、航天、兵器等工业领域中,出现了高强度钢的性能与高比强、高比韧、高比刚等要求不相协调的局面,因此设计师们不得不求助于诸如钛合金、复合材料等一些新型材料。这一趋向的结果,一是制件的成本扶摇直上,二是高强度钢的用量急剧减少。例如,一架先进战斗机上,钢的用量只占飞机结构重量的 10% 甚至更少。与此同时,钢与其它先进材料相比,高的绝对强度和稳定性、半个多世纪积累的使用经验和低廉的价格而被寄予发展厚望。

幸好,理论分析计算得到铁的拉伸强度、晶须的实测强度以及采用现代强化手段得到的钢的拉伸强度数据都提示钢的巨大发展潜力和可能性。另外,40 多年来,从对金属材料中位错组态的认识、相变机理及其它强韧化本质的认识深化、高纯冶金技术新成就、隧道扫描电子显微镜的问世乃至计算机在合金设计中的应用等等,不仅为钢开辟了一个崭新的发展平台,而且激励着研究者们投入新一代钢的设计并使之参与新一轮先进材料的竞争。

本书内容包容了 40 年代末以来,合金钢基础理论的研究成就与合金设计、物理冶金技术的发展。作者有幸置身于新中国自行设计新型高强度钢和研究应用技术的 40 年,并使优良钢种获得应用,至今仍致力于新一代钢的探索研究。书中融入作者的研究成

果和经验教训。因而,以本书奉献同行和读者们,其目的全在于:论述半个多世纪来合金钢研究、发展成就,借鉴已有的合金设计和应用经验,阐明理论基础,提示开发潜力,介绍先进设计,推动新一代超高强度、超高韧性钢的开拓。书中虽然不可能面面俱到地阐述金属材料科学的基础理论,却致力于明确必不可少的基础理论,提示青年科研工作者注重基础理论这一自身建设的特别重要地位和作用;书中不可能全面涉及几十个领域中高强度钢的设计发展,却致力于让青年科研工作者掌握主要高强度钢领域中的设计成果,借鉴前人在设计发展中的思路和源于应用的道路;书中也不可能提供全面的合金新设计技术,却致力于指明新设计技术的研究成果和进程,提示青年科研工作者面对新一代钢的变革局面去创新、进取,直至达到开拓设计出异乎寻常的新钢种的目标。本书共列有绪论,第一章金属物理学基础,第二章钢的强韧化理论,第三章高强度低碳贝氏体钢设计,第四章低合金超高强度钢设计,第五章二次硬化型超高强度钢设计,第六章高合金超高强度钢设计,第七章 12%Cr 型马氏体热强不锈钢设计,第八章马氏体沉淀硬化不锈钢设计,第九章控制相变高强度不锈钢设计和第十章合金设计技术发展。本书可供高等学校师生、专业研究生、材料研究人员及机械、冶金等工程设计和技术人员使用。

作者已完成的专业研究工作都是在国家下达的研究课题内取得的,所得研究成果是与同事们共同进行的。借此机会向他们表示感谢。

限于本人的技术能力,书中的差错在所难免,欢迎广大读者指正。

目 录

绪论	1
第一章 金属物理学基础	10
第一节 晶体结构学	10
第二节 能带理论概要	20
第三节 位错理论基础	35
第二章 钢的强韧化理论	57
第一节 纯铁的理论强度与力学行为	57
第二节 位错强化	65
第三节 固溶强化	72
第四节 细晶粒强化	84
第五节 第二相质点沉淀强化	88
第六节 相变强化	92
第三章 高强度低碳贝氏体钢设计	95
第一节 贝氏体组织结构和性质	96
第二节 合金元素的作用	104
第三节 高强度低碳贝氏体钢的设计发展	109
第四章 低合金超高强度钢设计	117
第一节 低合金超高强度钢中的合金元素	119
第二节 低合金超高强度钢的热处理	127
第三节 低合金超高强度钢设计发展	135
第五章 二次硬化型超高强度钢设计	155
第一节 二次硬化钢物理冶金学	155
第二节 二次硬化型超高强度钢设计发展	172
第六章 高合金超高强度钢设计	185

第一节	物理冶金学	185
第二节	合金设计与发展	197
第七章	12%Cr型马氏体热强不锈钢设计	212
第一节	钢的组织与控制	214
第二节	合金元素在钢中的作用	222
第三节	钢的热处理	234
第四节	钢的设计	238
第八章	马氏体沉淀硬化不锈钢设计	250
第一节	分类	250
第二节	马氏体沉淀硬化不锈钢物理冶金学	253
第三节	钢的热处理	261
第四节	合金设计	265
第九章	控制相变高强度不锈钢设计	284
第一节	物理冶金学	284
第二节	关于热处理状态	294
第三节	合金设计	303
第四节	相变诱发塑性(TRIP)钢	311
第十章	合金设计技术发展	321
第一节	合金设计技术现状	321
第二节	合金力学性能预测	325
第三节	合金的计算设计	338
	参考文献	352

Contents

Introduction	1
Chapter 1 Fundament of metal physics	10
Section 1 The Crystallogoly	10
Section 2 Essentials of energy band theory	20
Section 3 Rudiment of dislocation theory	35
Chapter 2 Strengthen-toughening mechanisms in steels	57
Section 1 Theoretic strength and mechanical behavior of iron	57
Section 2 Dislocation strengthening	65
Section 3 Solid solution strengthening	72
Section 4 Fine-Grain strengthening	84
Section 5 Second-phase particles precipitation strengthening	88
Section 6 Transformation strengthening	92
Chapter 3 The design of Low-Carbon High- strength Bainitic steels	95
Section 1 The structure and property of Bainite	96
Section 2 The role of alloying elements	104
Section 3 The design development in Low-Carbon High- strength Bainitic steels	109
Chapter 4 The design of Ultra-high strength Low-alloy structural steels	117
Section 1 The elements in ultra-High strength low-alloy structural steels	119

Section 2	The heat treatment in ultra-High strength low-alloy structural steels	127
Section 3	The design development in ultra-High strength low-alloy structural steels	135
Chapter 5	Secondary hardening ultra-High strength structural steels	155
Section 1	The physical metallurgy in secondary hardening steels	155
Section 2	The design development in secondary hardening ultra-High strength steels	172
Chapter 6	The design of High-alloy ultra-High strength steels	185
Section 1	The physical metallurgy	185
Section 2	The design and development in alloys	197
Chapter 7	The design of 12%Cr thermoresistent martensitic stainless steels	212
Section 1	The structure and control in steels	214
Section 2	The role of alloying elements in steels	222
Section 3	The heat treatment in steels	234
Section 4	The design of steels	238
Chapter 8	The design of Precipitation hardening martensitic stainless steels	250
Section 1	Classification	250
Section 2	The physical metallurgy in precipitation hardening martensitic stainless steels	253
Section 3	The heat treatment in steels	261
Section 4	The design of alloys	265
Chapter 9	The design of Controlled transformation High-strength stainless steels	284
Section 1	The physical metallurgy	284

Section 2	On heat treatment conditions	294
Section 3	The design of alloys	303
Section 4	The transformation-induced plasticity (TRIP) steels	311
Chapter 10	The development of design techniques of alloys	321
Section 1	The status of design techniques of alloys	321
Section 2	The prediction of mechanical properties of alloys	325
Section 3	The calculative design of alloys	338
Referances	352

绪 论

在钢的发展历史上,人们长期追求的目标是提高钢的强度、塑性和韧性,以满足使用需求。随着社会生产力的发展,各使用领域的技术进步,还要求改进钢的质量,发挥其性能潜力和设计新型钢种,“合金钢设计”便是讨论如何设计强韧化合金钢。众所周知,新钢种设计有赖于对钢的成分、组织和性能关系规律的认识,为此又必须了解和研究合金强韧化理论及其物理本质。第二次世界大战结束后的半个世纪中,人们在组织-性能关系研究,特别是由成分、组织预测性能研究方面取得很大进展,现在已经摆脱那种经验试探、调配、加减冶金法,发展了数量冶金学,并可从金属物理学、量子力学、热力学等基础理论入手建立合金设计模型,用计算机仿真设计新钢种,这不仅大大缩短了合金研制进程,而且基础扎实,为创造高性能合金带来机遇。

一、合金设计的基本原则

合金设计的最根本原则是满足使用需要,而这种需要不是单项强度性能,而是包括强度、韧性等主要性能和相关性能。设计出满足主要性能要求的合金是困难的,但满足有些相关性能可能比满足主要性能更困难,如焊接性能、成形性能,机械加工性能、经济性等。因此,了解和认识所设计钢种将要制造的构件的功能及其使用环境等是十分重要的。

高强度钢作为主承力构件广泛应用于各类机械行业中,包括轴、齿轮、螺栓、支撑件、壳体以及飞机起落架、火箭壳体、战车装甲、炮身等,服役条件十分苛刻,失效的机制也各不相同。长期使用经验和统计结果表明:轴类零件服役中的受力状况包括交变扭

转应力-传递扭矩、拉-压应力,还有冲击、磨损及振动应力等,其失效机制包括疲劳、过载和冲击断裂、磨损等;齿轮类零件承受交变弯曲、冲击应力,还有磨损和振动应力等,其失效机制包括接触疲劳、疲劳和磨损等;螺栓零件属于带缺口件,在高应力集中下工作,主要承受弯曲、剪切、冲击和疲劳,还有蠕变、松弛等应力,其失效机制包括拉断、疲劳等;至于起落架零件更是受力复杂,包括拉、压、弯、扭、冲击、腐蚀等各种应力,其失效机制包括疲劳、低应力脆断等;壳体零件是在多向应力下服役,对材料还有特殊性能要求。不仅如此,随科学技术进步,这些零件要求的材料性能越来越高,因而合金设计中必须有针对性的达到它们的要求。

合金设计中必须遵循以下基本原则:

①了解和认识合金制造零件的功能,这种功能决定了合金的性能指标。

②容易制造成品或半成品,这不仅与合金的性能指标相关,还与生产成本相关。

③成品零件的表面特性,包括光洁、美观以及在一定环境中的化学、物理性能降低等。

为满足这些功能和环境需求,合金应是既达到使用要求的性能又保持最高性能不改变。为满足如此众多的功能要求,单一性能和单一评价试验都不能适应。因此,由单一性能推导相关性能,由简单试验推导较复杂的评价试验以建立组织和性能间定量关系的预测研究和公式的建立,成为人们注意的焦点。

二、合金设计的基础与发展

合金设计有赖于相关科学和技术的发展,几十年来相关学科和领域的进步不仅成为合金设计的扎实基础,而且使合金设计成为包括化学、物理、力学、数学等多学科的结合。作为合金设计发展的体现如图1中所示,钢的强化已接近晶须的强度。促进这一发展的主要因素之一是一个支柱性的概念——合金成分与组织、加工与合成、性能和使用性能四位一体,即四因素的正四面体认

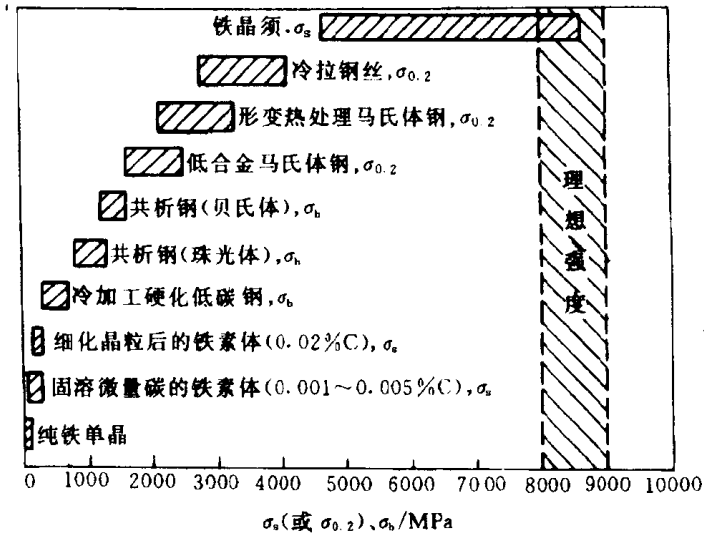


图 1 纯铁和钢的强度与理想强度的比较

识。合金设计的发展有赖于几个支柱性领域的进步,主要包括:

1. 基础理论与发展

钢的强韧化理论已得到相当好的发展,本书将讨论这一问题。现在显微组织细化已把组织-性能关系扩展到纳米尺寸量级,沉淀相的粒子可阻碍位错运动而提高合金强度,尺寸大于 1nm 的沉淀粒子可阻止位错的运动,并为弥散强化和韧化提供了机遇;但尺寸小于 20nm 的粒子与孔洞形核亚临界尺寸相当并可能因之导致切变集中而断裂。迄今为止,尚未发现细化的母相晶粒尺寸与提高强度和韧性趋势的极限,而且这一思路还被引入超高强度 M 体的断裂韧性研究中。尽管至今还不能有位错的有关机理定量计算合金的性能,但已用来阐明强化现象的物理本质和模型,并从位错的行为出发考虑合金设计的思路。又比如相变诱发塑性 (TRIP) 机理正广泛地应用于合金设计并获得高强度和韧性的钢种。

物理金属学的发展使合金的强化进入原子-电子结构的深层,尽管这一进展尚未在钢的设计中提供实例,但可以预期将对一

些现象作出物理本质的解释,比如 Ni 提高低合金钢韧性是早已发现并被采用的现象,但其物理本质尚不得而知;Si 是发展低合金超高强度钢的支柱元素,从组织到性能都显示出一系列与 Si 相关的现象,但还不能确定其物理本质等。好在从量子力学、能带理论出发建立模型,借助于计算机设计合金的工作已经开始。本书中提示了有关金属物理学基础中的有关内容。

基础理论中还包括由其建立的钢的强化方法,包括普通淬火 + 回火、形变 + 淬火 + 回火等方法,而且采用多种强化理论的集合,如图 2 中所示的所谓特殊形变热处理(STMT)加冷变形方法,使 10Ni-18Co-12Mo-1Ti 钢的拉伸强度 σ_b 达到 4295MPa,跨近晶须强度的边缘。

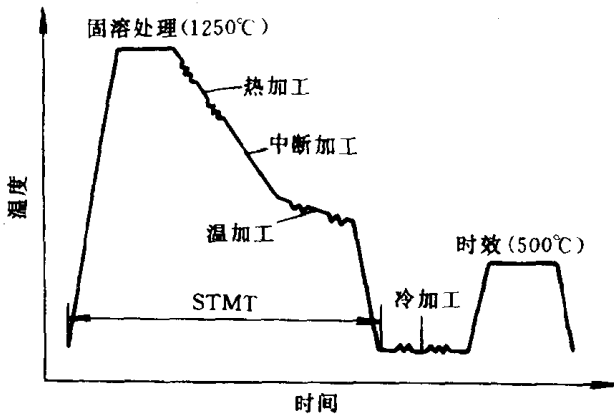


图 2 STMT 及 STMT + 冷加工图解

2. 超纯冶金技术

冶金技术水平是钢设计发展的又一重要支柱。冶金技术包括钢的熔炼、成形和性能控制等。钢的精炼技术发展、显著降低钢中杂质和有害元素使钢的可用强度不断提高,图 3 表示双真空熔炼改用等离子熔炼 + 真空自耗熔炼 18Ni M 时效钢中的硫含量由 0.003% 降低到 0.0006% 水平后,拉伸强度 2100MPa 下的断面收缩率由 40% ~ 50% 升高到 60%,应力集中系数 $K_t = 3.5$ 时拉伸强度由 2600MPa 升高到 3000MPa。低硫含量时超高强度钢的冲

击韧性与硫化物夹杂含量呈线性关系。

不仅如此,10Ni-8Co-2Cr-1Mo 钢的两炉号材料的硫含量分别为 0.002% 和 0.001%, 后者采用 Ti 处理, 使 MnS 夹杂变为

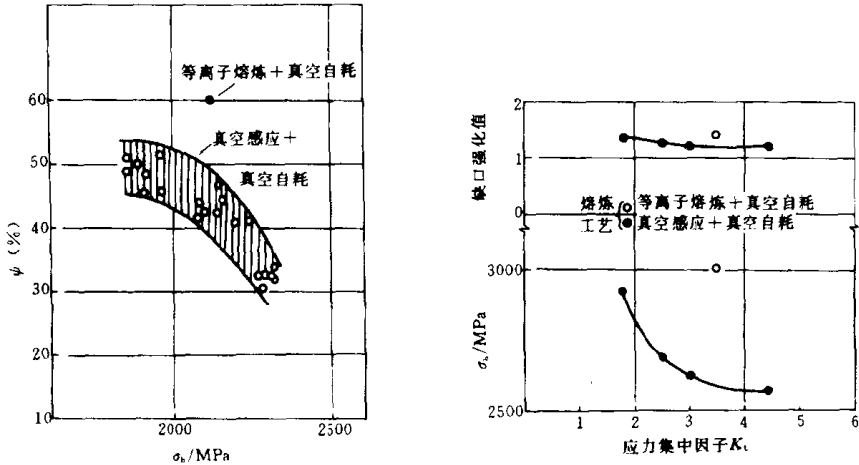


图 3 硫含量对力学性能的影响

Ti_2CS , 仅夹杂物形态改变, 使钢的强度相同而冲击韧性 (A_{KV}) 值由 174J 升高至 267J, 断裂韧性 K_{IC} 值由 $254MPa \sqrt{m}$ 升高至 $474MPa \sqrt{m}$ 。AF1410 钢的拉伸强度为 1600 ~ 1700MPa, 其材料标准中规定 S、P 含量分别不高于 0.005% 和 0.008%, 而 Aermet100 钢的强度为 2000MPa, S、P 含量分别不高于 0.002% 和 0.003%。这些数据说明钢的纯洁度对高强度钢的韧性产生重大影响, 而且当前精炼技术达到的高纯洁度为高性能钢的设计奠定了基础。

3. 分析技术

仅就显微镜的发展给合金设计带来的革命性变化, 便可见到分析技术作为合金设计支柱性基础重要性之一斑。众所周知, 人类冶炼金属、只通过各种途径了解合金工艺过程、特性及使用性能的千年历史, 直到有了金相显微镜之后才形成了当今的冶金科学。显微组织与宏观力学关系的认识, 为成分-组织-性能半定量或定