



华夏英才基金学术文库



先进钢铁材料技术丛书

钢铁材料中的第二相

雍岐龙 著

SECONDARY
PHASES IN
STEELS



冶金工业出版社

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

先进钢铁材料技术丛书

钢铁材料中的第二相

雍岐龙 著

北 京

冶 金 工 业 出 版 社

2006

内 容 提 要

本书是先进钢铁材料技术丛书中的一本, 主要技术内容包括: 第二相在钢中的固溶理论及平衡固溶度或固溶度积公式的测试和热力学理论推导方法; 第二相与基体之间半共格界面比界面能的理论计算方法, 界面能的主要影响因素; 第二相的形状与比界面能各向异性程度的关系; 第二相沉淀析出动力学曲线的测试与理论计算方法; 第二相的 Ostwald 熟化理论。

本书可供钢铁材料研究、生产单位的专业技术人员及高等院校相关专业的师生阅读。

图书在版编目(CIP)数据

钢铁材料中的第二相/雍岐龙著. —北京: 冶金工业出版社,
2006. 7

(先进钢铁材料技术丛书)

ISBN 7-5024-4000-3

I. 钢… II. 雍… III. ①钢—金属材料—物理性能—研究
②铁—金属材料—物理性能—研究 IV. TG14

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2006) 第 051244 号

出版人 曹胜利 (北京沙滩嵩祝院北巷 39 号, 邮编 100009)

策划编辑 张 卫

责任编辑 郭冬艳 美术编辑 李 心

责任校对 侯 璐 李文彦 责任印制 丁小晶

北京兴华印刷厂印刷; 冶金工业出版社发行; 各地新华书店经销

2006 年 7 月第 1 版, 2006 年 7 月第 1 次印刷

169mm×239mm B5; 33.25 印张; 664 千字; 509 页; 1-3000 册

75.00 元

冶金工业出版社发行部 电话: (010)64044283 传真: (010)64027893

冶金书店 地址: 北京东四西大街 46 号(100711) 电话: (010)65289081

(本社图书如有印装质量问题, 本社发行部负责退换)

鸣 谢

感谢先进钢铁材料技术国家工程研究中心对《先进钢铁材料技术丛书》出版工作的大力支持！

《先进钢铁材料技术丛书》

编辑委员会

主 编：翁宇庆

编 审：刘嘉禾 杨树森

编 委：（按姓氏笔画为序）

干 勇	才鸿年	马绍弥	王立新	王全礼
王国栋	王洪发	王新华	兰德年	田志凌
刘 俭	刘 浏	刘万山	刘 苏	刘春明
刘嘉禾	朱 静	江来珠	许珞萍	李 成
李文秀	李世俊	苏 杰	杨树森	陈思联
陈蕴博	林慧国	柯 俊	赵 沛	赵克文
郭爱民	高惠菊	翁宇庆	董 瀚	

序 言

钢铁材料具有资源丰富、生产规模大、品种规格多、性能稳定且多样化等特点，并易于加工、价格低廉。钢铁材料既方便使用，又便于回收，是人类从铁器时代就开始使用、目前亦为工业生产和人民生活最广泛使用的材料。在可以预见的未来，还没有哪一种材料能够全面取代钢铁材料的作用。钢铁材料是人类社会进步的重要物质基础。

我国经济和社会持续不断地发展，钢产量持续快速增长，自1996年以来，粗钢产量连续十年保持世界首位。但是，金属矿产资源、能源、交通运输和环境等方面却难以支撑不断增长且数量庞大的钢材生产和使用的需求。在技术进步和各种材料的竞争条件下，人们提出了钢铁材料合理生产和创新发展的问題。那么，中国需要什么样的钢铁材料呢？

进入二十一世纪，一方面，国民经济各个部门都需要高性能、高精度和低成本的先进钢铁材料，如高层建筑、海洋设施、大跨度重载桥梁、高速铁路、轻型节能汽车、石油开采和长距离油气输送管线、大型储存容器、工程机械、精密仪器、大型民用船舶、军用舰艇、航空航天和国防装备等都需要专业用途的先进钢铁材料；另一方面，社会的发展对钢铁的生产、加工、使用和回收等环节又提出了节约能源、节省金属矿产资源、保护环境等要求。因此，从科学发展观来看，我们现在和未来的经济建设和社会发展迫切需要的先进钢铁材料应该是采用先进技术生产的高技术含量的钢铁材料，是具有高性能、高精度、低成本、绿色化为特征的钢铁材料，如高

强度、高韧性、长寿命的高性能化；高形状尺寸精度和高表面质量的高精度化；低合金含量和优化工艺流程的低成本化；易于回收和再利用的绿色化。

近年来，在国家发改委、国防科工委和国家科技部的大力支持下，国内的科研院所、高校和企业的研发人员承担了国家工程研究中心、重点工程配套材料、国家支撑计划、国家“973”规划、国家“863”计划等国家重要科技项目工作，开展了先进钢铁材料的研发，在基础理论、工艺技术、产品应用等方面都取得了很好的成绩。为了促进钢铁材料发展，满足市场需要，先进钢铁材料技术国家工程研究中心、中国金属学会特殊钢分会和冶金工业出版社共同发起，并由先进钢铁材料技术国家工程研究中心和中国金属学会特殊钢分会负责组织编写了《先进钢铁材料技术丛书》。先进钢铁材料技术国家工程研究中心专家委员会专家和中国金属学会特殊钢分会的专业人员组成本套丛书的编辑委员会。本套丛书的编写与出版具有时代意义。丛书编委会将组织国内钢铁冶金和材料领域的知名学者分别撰写，努力反映先进钢铁材料的科研、生产和应用的最新进展。期望本套丛书能够在推动先进钢铁材料的研究、生产和应用等方面发挥积极作用。本套丛书的出版可以为钢铁材料生产和使用部门的技术人员提供先进钢铁材料生产和使用的技术基础，也可为相关大专院校师生提供教学参考。我们组织编写《先进钢铁材料丛书》尚属首次。本套丛书将分册撰写，陆续出版。书中存在的疏漏和不中之处，欢迎读者批评指正。

《先进钢铁材料技术丛书》编委会

前 言

现代钢铁材料工业在 20 世纪中叶高速发展,成为各国工业化的重要标志。世界钢产量在 20 世纪 80~90 年代一直徘徊在 7~8 亿 t,有关分析报告预测认为已基本达到发展顶峰,今后将基本保持平稳且逐渐下降。然而,90 年代开始至今,各国相继实施了超级钢研究计划或新一代钢铁材料研究计划,使应用最为广泛的钢铁材料的性能普遍成倍提高,从而带动钢铁工业跃上一个新的台阶,2005 年世界钢产量约为 11 亿 t(其中我国为 3.52 亿 t),且这一发展趋势仍将持续多年,而钢铁材料作为最主要的结构材料使用至少还会持续数百年。因此,提高钢材性能与质量的深入研究具有相当重要的科学意义和实际工业生产应用价值,对钢铁工业的持续发展将起到重要的推动作用。

在 20 世纪 90 年代各国相继实施的超级钢研究计划或新一代钢铁材料研究计划中,主要通过晶粒细化方法来提高钢材的强度和韧性,而微合金元素及微合金碳氮化物被广泛地应用于调节形变奥氏体的再结晶行为和阻止晶粒长大,从而间接地起到晶粒细化的作用。然而,当钢材基体的晶粒尺寸细化到 $1\mu\text{m}$ 左右时,继续细化晶粒的工艺技术难度明显增大,导致其生产成本明显提高,而细化晶粒造成的钢材屈服强度增大的幅度要大于抗拉强度增大的幅度,从而导致钢材屈强比明显增大甚至将接近于 1,而难以实际应用。因此,为进一步提高钢材强度,就必然要寻求其他的强化方式。

第二相强化在除晶粒细化强化之外的其他强化方式中,脆性矢量相对较小;第二相强化对钢材抗拉强度的提升与其对屈服强度的作用大致相当,因而对钢材屈强比影响不大;有效控制第二相的尺寸使之达到纳米数量级之后可以在其体积分数很小的情况下获得相当显著的第二相强化效果,因而其原料成本及工艺成本也较低;第二相强化对提高材料的表面硬度和耐

磨性具有十分重要的作用；此外，微细的第二相在钢铁材料的晶粒细化工艺中具有相当重要的有利影响（阻止再结晶以及阻止再结晶晶粒长大）；最后，大颗粒第二相（夹杂物）的尺寸、形状和分布的控制和改性对提高钢材的冶金质量、塑性、冷成形性、局部应力集中程度、疲劳寿命等均具有非常重要的作用。因此，有关第二相强化及第二相控制技术的深入研究和生产应用必将成为钢铁材料进一步发展的重要研究领域。

第二相的研究和生产应用历史非常久远，可以说是伴随着金属材料的发展而发展。20 世纪 50 年代前后，就发现可以在钢中获得数纳米尺寸的第二相颗粒；著名的 Orowan 强化机制也在此期间提出并在此后不断完善，由此认识到体积分数很小的第二相颗粒只要控制其尺寸在数纳米的水平，也可以获得相当强烈的强化效果；第二相的 Ostwald 熟化理论源于溶液中沉淀相尺寸变化的研究，在 20 世纪 60 ~ 70 年代广泛应用于固溶体中的第二相，相关理论在随后也获得深入研究和不断完善，对控制第二相的尺寸与分布具有非常重要的作用；微合金碳氮化物在奥氏体特别是形变奥氏体中的应变诱导析出过程及其与形变奥氏体的再结晶过程的相互作用是微合金钢控制轧制和控制冷却工艺技术的基础，极大地推动和促进了微合金钢的发展；微合金碳氮化物在铁基体中的固溶度积公式、第二相阻止晶粒长大理论、硫化物控制改性理论，则在微合金钢的发展历程中起到了非常关键的作用；不同种类的第二相竞争性地结合并固定钢中非金属元素的理论与技术在 20 世纪 70 年代以后得到迅速发展，不同种类第二相竞争性地固定晶界偏聚的碳氮原子，从而提高不锈钢的抗晶间腐蚀性能，甚至可以追溯到 20 世纪 30 年代，有效控制并固定钢中有害的非金属溶质含量以及使钢中夹杂物改性对提高钢材塑韧性具有相当大的作用，有效固定碳氮原子则直接促成无间隙原子钢（IF 钢）的开发，而针状铁素体钢、超低碳贝氏体钢及无碳贝氏体钢的发展也均与第二相的竞争性形成有关；至于第二相特别是大颗粒第二相的控制对提高钢材疲劳寿命的作用方面的研究在近年来也受到越来越广泛的重视，成为高疲劳寿命钢最为关注的研究方向。

尽管第二相在钢铁材料中的作用受到了普遍的重视，但钢铁材料中第二相的控制理论体系一直未能完整地形成。第二相沉淀析出过程的动力学曲线已有大量的试验结果，但其理论计算方法及计算精度问题一直没有解

决,这主要是由于其定量计算过程中需要解决包括平衡固溶量、界面能、形变储能、形核长大方式等诸多尚未完全清楚的问题,国际上著名的研究者曾经认为第二相最快析出温度的计算精度达到 100°C 以内是相当困难的。

为此,我们在对钢铁材料中微合金碳氮化物的沉淀析出行为进行了20余年深入研究工作的基础上,将相关的理论完善与提升,从而建立了钢中常见第二相控制的系统理论体系,目前这一理论体系不仅在微合金碳氮化物的沉淀析出行为的理论计算中得到了与试验观测结果相吻合的数据,使得最快沉淀析出温度的计算精度达到 20°C 左右,从而对微合金钢的发展起到了相当重要的推动作用,同时在硫化锰夹杂物的控制理论方面也取得了重要进展,在电工钢和低碳低合金钢中获得成功应用。由于国际上目前尚未看到有关第二相系统控制理论方面的专著,故我们将相关的理论基础及计算方法进行整理,形成一较为完整的理论体系,这就是本书的主要内容。本书的主要理论均基于金属学的基本原理,但在很多基础理论方面均进行了具有一定创新性的工作或对原有理论进行了修正,具有重要的科学意义;相关的理论及理论计算方法可以成功地应用于新一代钢铁材料的研制开发及生产实际,具有重要的理论指导意义。

本书第1章主要介绍钢铁材料发展过程中第二相研究的意义以及第二相在钢中的作用及其控制要求,第2章给出了钢中常见第二相的基础数据可供相关研究者参阅。第3章重点介绍第二相在钢中的固溶理论及平衡固溶度或固溶度积公式的测试和热力学理论推导方法;同时给出了大量被广泛采用的各种第二相在铁基体中的固溶度或固溶度积公式;对相互固溶的多元第二相如微合金碳氮化物,则给出了三元第二相化学组成式系数的理论计算方法,以及随着沉淀温度和化学成分的变化规律;同时介绍了由平衡固溶度或固溶度积公式进行第二相沉淀析出相变自由能的理论计算方法。第4章则根据第二相与铁基体的位向关系和错配位错理论得到第二相与基体之间半共格界面比界面能的理论计算方法,界面能的主要影响因素,第二相的形状与比界面能各向异性程度的关系,同时给出了钢中主要第二相与不同铁基体(奥氏体和铁素体)之间半共格界面比界面能的理论计算结果。第5章是本书最重要的部分,主要讨论相关研究工作及生产实际中最为关心的第二相沉淀析出动力学曲线的测试与理论计算方法,在对固态相

变动力学相关理论及相变过程中涉及到的各种能量的理论计算或估算方法进行分析评述后,重点介绍了不同化学成分的钢中碳氮化铌、碳氮化钒、硫化锰在奥氏体和铁素体中沉淀析出时的临界核心尺寸、临界形核功、形核率-温度反C曲线与最大形核率温度、相变量-温度-时间即相变PTT曲线与最快沉淀析出温度的理论计算结果,分析了化学成分、形变储能等的影响规律,该理论计算方法和相关计算结果可以应用于相关的研究工作和工业生产。第6章则考虑第二相的Ostwald熟化过程即通常所说的聚集长大过程,深入介绍了第二相的Ostwald熟化理论,提出了不同条件下第二相的Ostwald熟化过程的普适微分方程并给出了其解析解,由此不仅可以得到第二相颗粒尺寸的变化规律,同时还可以得到其稳态尺寸分布函数;在此基础上,对钢中常见第二相颗粒尺寸在不同温度下的熟化速率进行了理论计算,由此可以掌握不同类型第二相尺寸的可能控制范围及采取相应的控制工艺措施。

《微合金钢——物理与力学冶金》一书出版以来,受到各方面广泛的重视,并一直被作为钢铁材料研究与生产的重要参考书,很多研究者及生产技术人员希望再版。但考虑到十多年来微合金钢的迅速发展以及相关问题的深入并非该书的再版所能解决,同时钢中其他第二相特别是硫化锰、渗碳体等的控制也越来越受到重视,需要大量的篇幅来介绍这些方面的研究进展。另外,关于微合金钢中超细基体晶粒组织的获得和控制已有专著(如翁宇庆主编的《超细晶钢》)进行了更为全面深入的介绍。因此,将微合金碳氮化物控制沉淀析出及控制其Ostwald熟化过程方面的内容再加上近期研究的硫化锰、渗碳体等第二相的控制内容,就形成了本书的主要内容。同一理论体系要容纳钢中所有第二相,并能使各种第二相的沉淀析出过程及Ostwald熟化过程的理论分析与计算结果、实际试验测试结果及生产实际结果良好地吻合,具有相当大的难度,也是对该理论体系的严峻考验,而该理论体系应该说是可以广泛应用于钢中各种第二相且取得令人满意的结果,这也是促使我们撰写该书的重要动力。该书主要试验研究结果及数据均选自国际知名的专著、文献,而主要的理论分析与计算方法则是我们在本专业公认的基础理论上发展或创立的自主研究成果,可供钢铁材料的研究、生产单位的专业技术人员及高等院校相关专业的师生参阅。但

该书中很多理论分析推导及由此得到的结论不完全成熟完善或不太严谨,也衷心希望得到各方面有识之士的批评和指正。

本书研究和写作过程中得到了钢铁研究总院特别是结构材料研究所、先进钢铁材料技术国家工程研究中心的大力支持鼓励及提供相应的工作条件和经费资助,还得到昆明理工大学的支持鼓励和帮助;本书的整个理论体系的建立与逐步完善则得到国家自然科学基金委员会近 20 年的连续立项资助(项目号 0588002、59461001、59961002、50441032);同时也是国家重点基础研究发展计划(973 计划)课题“提高钢铁质量和使用寿命的冶金学基础研究”(项目号 2004CB6191)的一个子课题研究内容。钢铁研究总院院长干勇院士、中国金属学会理事长翁宇庆教授、钢铁研究总院董瀚教授、刘正东教授、昆明理工大学校长周荣教授对本书的编写十分关心,且在很多理论观点上提出了有益的意见和建议。本书还得到了王国栋院士、马鸣图教授、冯涤教授、董企铭教授、李树杰教授、李箭教授、李维育高工的支持,与陈其安教授、白埃民教授、孙新军博士等进行了有益的讨论,而各大钢厂的朋友均给予了帮助,在此表示衷心的感谢。

常用符号

- A ——界面面积
 A^* ——临界核心的表面积
 A_i ——不同位置形核时的临界形核功与均匀形核功的比值
 A_k ——冲击功
 A_M ——元素 M 的原子量
 $\bar{A}_{Fe}$ ——铁基体的平均原子量
 a ——点阵常数
 a_c ——临界裂纹尺寸
 a_i ——反应组元 i 的活度
 b ——位错柏格斯矢量绝对值
 $[C]$ ——处于固溶态的 C 元素的质量百分数
 C_g ——晶体缺陷区域的溶质偏聚浓度
 C_{gr} ——晶界溶质浓度
 C_i^g ——第 i 个杂质元素在晶界的平衡偏聚浓度
 C_i^0 ——第 i 个杂质元素在基体中的平衡浓度
 C_N ——溶质在新相中的浓度
 C_0 ——平均溶质原子浓度, 溶质在基体内的平衡浓度
 C_p ——控制性元素在第二相中的平衡浓度
 $C_{p,m}$ ——摩尔定压热容
 C'_r ——尺寸为 r 的第二相颗粒与基体界面处 B 溶质在基体中的实际浓度
 c ——旋转轴两极间的尺寸
 $c^\ominus$ ——标准浓度
 c_i ——溶质 i 在溶液中的浓度
 D ——位错间距, 有效晶粒尺寸, 扩散系数
 D_d ——沿位错管道的扩散系数
 D_g ——沿晶界的扩散系数
 D_0 ——扩散系数常数
 d ——颗粒空间尺寸, 第二相的直径, 位错滑移面间距
 d^* ——临界核心尺寸
 d_c ——临界转换尺寸
 d_s ——层错宽度即扩展位错宽度
 E ——正弹性模量
 E_B ——基面上总的界面能
 E_C ——单位长度刃位错线的错排能
 E_E ——总的弹性应变能
 E_S ——层错能, 侧面上总的界面能
 E_T ——总的界面能
 e ——下标代表椭球体, 共格应变变量
 $erfc$ ——误差函数
 $F^\ominus$ ——纯 B 组元在标准状态下的摩尔自由能
 F_p ——钉扎力
 F_1 ——层错宽度和第二相尺寸的函数
 f ——第二相的体积分数
 f_i ——溶质 i 的活度系数

- G ——切变弹性模量
 $G_{\text{T}}^{\ominus}$ ——摩尔吉布斯自由能
 ΔG ——第二相与基体的模量差, 自由能变化
 ΔG^* ——均匀形核的临界形核功
 $\Delta G^{\ominus}$ ——标准自由能
 ΔG_{EV} ——单位体积弹性应变能
 ΔG_{I} ——摩尔晶格畸变能差值
 ΔG_{M} ——摩尔相变自由能
 ΔG_{Mg} ——晶体缺陷处沉淀析出第二相的摩尔相变自由能
 ΔG_{s} ——摩尔形变储能
 ΔG_{SV} ——单位体积形变储能
 ΔG_{V} ——相变体积自由能
 ΔG_{a} ——单个原子的相变自由能
 ΔG_{i} ——第 i 个杂质元素在基体中发生晶界偏聚的自由能
 ΔG_{j} ——第 j 个合金元素在基体中发生晶界偏聚的自由能
 g ——自由落体加速度
 $H_{\text{T}}^{\ominus}$ ——摩尔焓
 $H_{298}^{\ominus}$ ——标准摩尔焓
 ΔH_{tr} ——摩尔相变热焓
 h ——旋转面厚度, 晶界偏聚区厚度
 h_{M} —— M 元素在合金溶体中的活度
 I ——均匀形核率, 亚晶尺寸
 J_{IC} ——断裂韧度 J 积分的指标
 K ——强度系数 (或形变硬化系数), 等温压缩系数, 体积弹性模量
 $K^{\ominus}$ ——标准状态下化学反应的平衡常数
 $K(\alpha)$ ——偏位错应力乘以分开距离
 K_{IC} ——断裂韧度指标
 k ——波尔兹曼常数, 过饱和度函数, 钢材成分中相关元素质量比与理想化学配比的倍数
 l ——颗粒平面间距
 $\bar{l}$ ——随机分布的颗粒与其最近邻的平均边对边距离
 $\bar{M}$ ——Schmid 位向因子
 $[M]$ ——处于固溶态的 M 元素的质量百分数
 m ——强化方式的脆化矢量, 第二相在 Ostwald 熟化过程中的平均尺寸熟化速率 (或粗化速率)
 N_{A} ——阿伏加德罗常数, 第二相颗粒的平均平面交截数目
 n ——位错塞积数目, 形变强化指数 (或称加工硬化速率), 错配位错数目, 相变动力学方程的时间指数
 n_{v} ——单位体积中的形核位置数目
 P ——压力, 弹性应力, 溶质在晶界上的偏聚因子
 Q ——扩散激活能
 Q_{g} ——沿晶界的扩散激活能
 q ——第二相周围的平均应力集中系数
 R ——摩尔气体常数
 $\bar{r}$ ——第二相颗粒平均尺寸
 r' ——颗粒的特征半径
 r^* ——颗粒的平衡浓度半径
 S ——析出相半厚度, 晶粒表面积
 S_{C} ——材料的断裂强度
 $S_{\text{T}}^{\ominus}$ ——摩尔熵
 $S_{298}^{\ominus}$ ——标准摩尔熵
 T ——相变温度, 位错线张力

- TS ——理论断裂强度
 T_C ——韧脆转变温度
 T_m ——熔点
 T_{tr} ——相变温度
 U_T ——静力韧度
 ΔU ——偏聚自由能
 u ——新相晶核的长大速度
 V ——体积
 V_P ——第二相的摩尔体积
 ν ——泊松比, 控制性原子振动频率常数
 ν_i ——组元 M 的计量系数
 w_M ——质量百分浓度
 X ——单位体积内已转变的新相体积所占分数
 X_M ——平衡固溶度限
 x_i ——摩尔浓度
 YS ——理论屈服强度
 YS_D ——位错强化增量
 YS_G ——细晶强化强度增量
 Z ——系统中单位体积内第二相颗粒的总数
 α ——溶质在晶界的富集系数
 α_M ——溶质元素 M 在晶体缺陷处的富集系数
 γ ——表面能
 γ_{AP} ——反相畴界面能
 γ_P ——形成单位面积微裂纹所消耗的塑性功
 γ_S ——材料的比表面能
 $\gamma_\alpha(\infty)$ ——无限大颗粒在浓度 $C_{\alpha 0}$ 时 B 在 α 基体中的活度系数
 $\gamma_\alpha(r)$ ——颗粒尺寸为 r 时在浓度 $C_{\alpha r}$ 时 B 在 α 基体中的活度系数
 $\gamma_i^\ominus$ ——亨利定律常数
 δ ——弹性晶格畸变即错配度, 伸长率
 δ_C ——裂纹尖端张开位移 (COD) 的指标
 ε ——真应变
 η, κ ——第二相的形状系数
 θ ——双凸透镜片球冠与母相晶界的接触角, 晶体中小角度晶界的位向差
 λ ——等压膨胀系数, 速率常数
 μ ——化学势
 $\Delta\mu$ ——化学自由能增量 (摩尔化学自由能)
 ξ ——位错半宽度
 ρ ——位错密度
 $\Delta\rho$ ——再结晶前后基体中的位错密度差
 σ ——第二相与基体之间的比界面能
 σ_B ——比晶界面能
 σ_{CO} ——共格界面比界面能
 $\bar{\sigma}$ ——平均比界面能
 τ ——理论切变强度
 τ_0 ——孕育期
 τ_P ——位错运动的点阵阻力, 即 P-N 力
 ϕ ——正应力方向与滑移面法向的夹角
 Φ'_T ——摩尔吉布斯自由能函数
 φ ——系统中所有第二相的体积分数
 ψ ——断面收缩率
 ω ——理想化学配比

冶金工业出版社部分图书推荐

书 名	作 者	定价(元)
耐火材料与钢铁的反应及 对钢质量的影响	李 楠 著	22.00
金属材料学	吴承建 等编著	32.00
金属材料工程专业实验教程	那顺桑 主编	22.00
金属基复合材料及其浸渗制备 的理论与实践	王 玲 等编著	45.00
型钢生产知识问答	沈茂盛 等编著	29.00
金属学原理	余永宁 编	56.00
金属半固态成形理论与技术	管仁国 等编著	29.00
型钢孔型设计(第2版)	赵松筠 等编著	29.00
钢铁生产工艺装备新技术	周建男 编著	39.00
铁合金冶金学	李春德 主编	28.00
转炉炼钢问答	王雅贞 等编著	29.00
轻金属冶金学	杨重愚 主编	39.80
连续铸钢 500 问	中国冶金报 编	28.00
炼钢学(上册)	张承武 主编	45.00
炼钢学(下册)	张承武 主编	41.00
冶金物理化学教程	郭汉杰 编著	30.00
实用高炉炼铁技术	由文泉 主编	29.00
现代材料表面技术科学	戴达煌 等编著	99.00
材料加工新技术与新工艺	谢建新 等编著	26.00
冷轧带钢生产问答	赵家骏 等	45.00
现代铸铁学	郝石坚 著	38.00
轧钢生产新技术 600 问	梁爱生 等编著	62.00
高精度轧制技术	黄庆学 等著	40.00
新材料概论	谭 毅 李敬锋 主编	89.00

目 录

1 概述	1
1.1 钢铁结构材料的发展	1
1.2 钢铁材料的各种显微缺陷强化方式	4
1.2.1 位错运动的点阵阻力	5
1.2.2 固溶强化	6
1.2.3 位错强化	9
1.2.4 细晶强化	11
1.2.5 第二相强化	15
1.2.6 各种强化方式强化效果的叠加	17
1.3 钢铁材料的各种显微缺陷强化方式对塑韧性的影响 及脆化矢量	19
1.3.1 钢铁材料的塑性及其影响因素	19
1.3.2 钢铁材料的韧性及其影响因素	21
1.3.3 钢铁材料中各种显微缺陷强化方式的脆化矢量	25
1.4 钢铁材料的显微缺陷强化方式与钢铁材料的抗拉强度	27
1.4.1 钢铁材料抗拉强度的意义	27
1.4.2 钢铁材料抗拉强度的微观控制机制	29
1.4.3 基体组织对钢铁材料抗拉强度和屈强比的影响	33
1.4.4 各种显微缺陷对钢铁材料抗拉强度和屈强比的影响	35
1.5 钢铁材料中第二相的作用及意义	39
1.5.1 第二相的定义和分类	39
1.5.2 第二相强化理论	42
1.5.3 第二相控制基体晶粒尺寸的理论	49
1.5.4 第二相调节形变基体再结晶行为的理论	52
1.5.5 第二相的控制理论	53
1.5.6 第二相研究对钢铁材料的意义	55
参考文献	58