

新型金属材料

——性能与应用

XINXING JINSHU CAILIAO
XINGNENG YU YINGYONG

齐宝森 张琳 刘西华 等编著



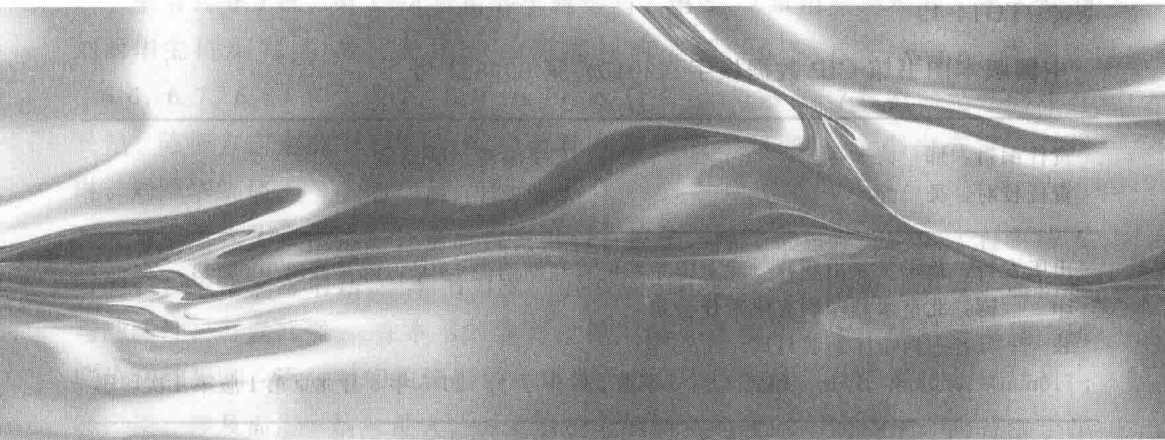
化学工业出版社

本书以材料科学最新研究成果为基础，系统介绍金属材料科学与工程领域的最新进展。全书共分10章，主要内容包括：金属材料的发展概况、金属材料的热处理、金属材料的热处理工艺、金属材料的热处理缺陷、金属材料的热处理应用、金属材料的热处理研究进展等。本书可作为材料科学与工程专业的教材，也可供从事金属材料工作的工程技术人员参考。

新型金属材料 ——性能与应用

XINXING JINSHU CAILIAO
XINGNENG YU YINGYONG

齐宝森 张琳 刘西华 等编著



化学工业出版社

· 北京 ·

元 0.00 份 月 宝

本书系介绍新型金属材料的科普读物，作者将邀请读者一同畅游高性能金属材料世界，领略各类金属材料奇妙的性能及应用。本书集新颖性、知识性和趣味性于一体，虽然呈现的仅仅是新型金属材料这座冰山上的一角，但作者力图用通俗易懂的语言，揭开神奇的高性能金属材料面纱，引领读者步入高性能金属材料的广阔殿堂。

本书适合大学生与科技工作者以及渴望了解新型金属材料知识的读者使用，对高年级本科生及研究生也具有一定的参考价值。

图书在版编目 (CIP) 数据

新型金属材料——性能与应用/齐宝森等编著. —北京:
化学工业出版社, 2015.7
ISBN 978-7-122-23955-6

I. ①新… II. ①齐… III. ①金属材料-普及读物
IV. ①TG14-49

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2015) 第 099831 号

责任编辑：邢 涛
责任校对：吴 静

文字编辑：颜克俭
装帧设计：韩 飞

出版发行：化学工业出版社（北京市东城区青年湖南街 13 号 邮政编码 100011）

印 刷：北京永鑫印刷有限责任公司

装 订：三河市宇新装订厂

710mm×1000mm 1/16 印张 27 $\frac{1}{4}$ 字数 534 千字 2015 年 8 月北京第 1 版第 1 次印刷

购书咨询：010-64518888（传真：010-64519686） 售后服务：010-64518899

网 址：<http://www.cip.com.cn>

凡购买本书，如有缺损质量问题，本社销售中心负责调换。

定 价：98.00 元

版权所有 违者必究

材料是社会技术进步的物质基础与先导,而金属材料具有资源丰富、生产规模大、易于加工、性能多样可靠、价格低廉、使用方便和便于回收等特点,是工业生产和人们日常生活中广泛使用的材料。随着现代科学技术的迅猛发展,新型高性能金属材料的发展亦是日新月异、层出不穷。为了更好地普及高性能金属材料的有关知识,满足广大学生和工程技术人员的需求,作者结合十余年来对“21世纪新型材料”和“新型材料及其应用”课程教学实践的体会,特编写此书与读者共勉。

本书的编写,力求体现高性能金属材料的特点,以新型金属材料的性能和应用为重点,充分反映其先进性、技术性、实用性和广泛性,在内容的编排上,力求新颖、实用而不求面面俱到,在文字叙述上力求通俗易懂而避免过多的理论推导,以适应广大学生、工程技术人员以及求知者的需求。应当说明,新型金属材料种类繁多,本书仅起到抛砖引玉的效果,以达引导学习者更加深入学习高性能金属材料之目的。

全书共分7章,第1~4章由齐宝森编写,第5、7章由张琳编写,第6章由刘西华主持编写。参与第6章编写的还有张帆(6.3、6.4、6.5)、张瑞寒(6.6、6.7、6.8)和孔维明(6.9、6.10、6.11),参与第5、7章资料整理的还有吴艳、陈德方,谨此对他们的辛勤劳动和付出表示感谢!全书由齐宝森、张琳、刘西华统稿。

本书可作为大学生科技素质教育的科普读物,同时也可作为广大工程科技人员的科普进修参考书籍。本书力求内容新颖、信息量大,注重知识性、通俗性与趣味性,可读性强。在本书的编写过程中编著者参阅了大量的科普书籍、研究论文和报刊,谨此对相关资料的作者表示衷心的感谢!由于新型金属材料内容广泛、涉及面广、信息量大,加之新型金属材料与技术不断涌现,同时由于作者水平有限,难免存在疏漏及不当之处,敬请广大读者批评斧正。

编著者

2015年2月

**1 新型工程结构用钢——高强高韧****1**

1.1 超级钢(新一代钢铁材料)概述	2
1.1.1 新一代钢铁材料(超级钢)的概念	2
1.1.2 新一代钢铁材料(超级钢)的主要特征	3
1.1.3 超级钢研发的两个关键——“微合金化”与 “新型 TMCP”	4
1.1.4 新一代钢铁材料(超级钢)在我国的研究	7
1.2 新型工程结构用钢及其发展	10
1.2.1 工程结构用钢的工作条件与性能要求	10
1.2.2 铁素体-珠光体工程结构钢	11
1.2.3 低合金高强度钢的发展——低碳贝氏体钢、 针状铁素体钢、 马氏体钢与双相钢	17
1.3 第三代汽车先进高强度钢的开发	22
1.3.1 汽车轻量化与先进高强度钢的发展	22
1.3.2 第三代汽车钢的概念及其在我国的研究	22
1.3.3 高强度钢的强化机理、分类与发展	23
1.3.4 第3代先进高强度钢的研究进展	26
1.4 现代社会的绿色建筑——抗震耐火钢结构	34
1.4.1 建筑钢结构及其发展	34
1.4.2 抗震耐火钢的性能要求	37
1.4.3 抗震耐火钢中的合金元素作用	38
1.4.4 典型的抗震耐火钢及其应用	39
1.5 西气东输管线钢的发展	40
1.5.1 油气管道工程的发展及面临的挑战	40
1.5.2 管线钢及其性能要求	41

1.5.3	管线钢的类型与组织特点	42
1.5.4	管道工程的发展方向——超高强度管线钢的应用	49

2 新型机械结构用钢——性能“强韧化”

53

2.1	高效节能的微合金非调质钢	53
2.1.1	微合金非调质钢概述	53
2.1.2	微合金非调质钢的特点	57
2.1.3	典型新型非调质钢品种的研发应用实例	64
2.1.4	微合金非调质钢的发展方向	71
2.2	高强韧性齿轮钢	71
2.2.1	表面硬化齿轮钢的服役条件与主要性能要求	71
2.2.2	高强韧性齿轮钢在我国的发展	73
2.2.3	高强韧性齿轮钢应用例解	78
2.2.4	齿轮钢的发展趋势	80
2.3	“特钢之王”——高品质重大装备用轴承钢	82
2.3.1	高品质重大装备轴承的生产与应用现状	83
2.3.2	轴承钢的工作条件与基本性能要求	83
2.3.3	高品质轴承钢的发展与质量控制	84
2.3.4	高品质重大装备轴承钢应用例解	89
2.3.5	高品质轴承钢的发展趋势	92
2.4	耐高温的金属间化合物结构材料	94
2.4.1	金属间化合物概述	94
2.4.2	金属间化合物的结构、分类与特性	96
2.4.3	改善金属间化合物作为高温结构材料的方法	99
2.4.4	典型金属间化合物的性能、应用及发展	100

3 新型工模具用钢——高性能、高精度

104

3.1	高速切削刀具材料的性能与应用	104
3.1.1	高速切削及其特点	104
3.1.2	高速切削刀具材料的性能要求	104

3.1.3	高速切削刀具材料的种类、特点及应用	106
3.1.4	高速切削刀具材料的合理选用	111
3.2	模具材料概论	114
3.2.1	模具与模具材料的发展	114
3.2.2	模具及模具材料的分类	115
3.2.3	模具材料主要的性能要求	116
3.2.4	模具及模具材料的发展趋势	117
3.3	激发模具活力的热处理技术	121
3.3.1	模具钢的预备热处理工艺	121
3.3.2	模具钢的最终热处理工艺	124
3.3.3	模具材料的表面强化技术	128
3.3.4	模具热处理缺陷与原因分析	133
3.3.5	模具钢热处理强韧化例解	136
3.3.6	模具钢生产企业的热处理工艺	137
3.4	新型模具材料面面观	137
3.4.1	新型冷作模具材料	138
3.4.2	新型热作模具钢	143
3.4.3	耐热球墨铸铁模具材料	146
3.4.4	新型塑料模具钢	149

4 特殊性能钢——“高性能化”

157

4.1	超级不锈钢的性能及应用	157
4.1.1	不锈钢概述	157
4.1.2	节能、经济型的现代铁素体不锈钢	158
4.1.3	超级奥氏体不锈钢	161
4.1.4	超级双相（奥氏体-铁素体）不锈钢及其发展	162
4.1.5	超级（现代）马氏体不锈钢	164
4.1.6	沉淀硬化不锈钢	164
4.2	没有最耐热，只有更耐热——火电机组用耐热钢的发展	167
4.2.1	火电机组用耐热钢的发展	167
4.2.2	火电机组用钢的分类与特点	169

601	4.2.3	火电机用钢的服役条件与性能要求	170
114	4.2.4	火电机用钢典型钢号的特点与应用	172
111	4.2.5	先进超超临界机组及所用高温材料的进展	186

5 新型非铁金属合金材料——“轻而强”

190

111	5.1	飞行金属——铝锂合金	190
124	5.1.1	铝锂合金的发展历史	191
131	5.1.2	中国铝锂合金的发展情况	195
131	5.1.3	铝锂合金的性能特点及其应用	196
132	5.1.4	高焊接性能的 1424 合金	200
133	5.1.5	铝锂合金现状及展望	202
133	5.2	年轻有为的多面手——新型钛合金	203
131	5.2.1	钛的基础知识	204
131	5.2.2	钛材料的分类与特性	208
138	5.2.3	钛合金材料的制备方法简介	229
143	5.2.4	钛合金材料展望	230
143	5.3	绿色最轻质金属——镁合金	231
143	5.3.1	镁的晶体结构和物理性能	232
	5.3.2	镁合金发展概况	232
	5.3.3	镁合金的应用	235
	5.3.4	镁合金的展望	247
152	5.4	粉末冶金新材料	247
153	5.4.1	粉末冶金简介	247
158	5.4.2	粉末冶金新材料及其应用	251
161	5.4.3	粉末冶金材料展望	255

6 新型功能金属材料——神奇而多变

257

151	6.1	新型医用金属材料及其生物功能化	257
151	6.1.1	医用金属材料概述	257
151	6.1.2	对医用金属材料性能的基本要求	258

700	6.1.3	开发新型医用金属材料的重要现实意义	259
705	6.1.4	抗菌不锈钢的发展与生物功能化	260
708	6.1.5	生物可降解镁基金属的研究进展	265
900	6.1.6	医用金属钛合金材料的应用及前景展望	266
118	6.2	金属家族中的“变形金刚”——形状记忆合金	268
218	6.2.1	金属真的具有“记忆”功能吗?	268
217	6.2.2	阿波罗登月飞船天线的奥秘所在	269
218	6.2.3	“形状记忆效应”及其机理简介	269
918	6.2.4	形状记忆效应的类型及主要形状记忆合金材料	272
038	6.2.5	多孔形状记忆合金简介	274
100	6.2.6	形状记忆合金的应用	274
222	6.3	“千疮百孔”的多孔金属材料	284
228	6.3.1	多孔金属材料概述	284
718	6.3.2	多孔金属材料的制备方法	285
720	6.3.3	多孔金属材料的应用	286
220	6.4	“博采众长”的梯度功能材料	288
108	6.4.1	梯度功能材料——“博采众长”	288
108	6.4.2	梯度功能材料的发展历史及研究现状	289
108	6.4.3	梯度功能材料的制备工艺	290
108	6.4.4	梯度功能材料广泛的应用前景	291
728	6.5	新能源材料——储氢合金	293
728	6.5.1	前景广阔的氢能	293
728	6.5.2	氢气的储存方式	294
928	6.5.3	储氢合金简介	295
018	6.5.4	储氢合金的分类	296
018	6.5.5	储氢合金的应用	298
118	6.5.6	储氢材料前景展望	301
318	6.6	神奇的纳米合金	301
818	6.6.1	纳米技术与纳米材料概述	301
018	6.6.2	纳米合金的定义及特性	302
028	6.6.3	纳米合金的制备方法	304
028	6.6.4	纳米晶材料的性能与应用	305

6.6.5	纳米金属材料的发展	307
6.7	电阻为零的超导合金	307
6.7.1	超导材料概述	307
6.7.2	超导的发展历史及研究现状	309
6.7.3	超导理论的发展	311
6.7.4	超导材料的广泛应用及发展前景	316
6.8	“小影盘大容量”的巨磁电阻合金	318
6.8.1	巨磁电阻合金概述	318
6.8.2	巨磁电阻合金的发展历史及研究现状	319
6.8.3	巨磁电阻效应的产生机理	320
6.8.4	巨磁电阻材料的分类	321
6.8.5	巨磁电阻材料的应用	325
6.9	改善环境的减震合金	326
6.9.1	减震合金的定义	327
6.9.2	内耗和阻尼	327
6.9.3	典型阻尼减震合金的成分、特点和减震性能	328
6.9.4	阻尼合金的应用	331
6.9.5	阻尼合金的其他类型	332
6.10	刚柔相济的超塑性合金	334
6.10.1	超塑性定义、特点及分类	334
6.10.2	超塑性合金的种类	337
6.10.3	实现超塑性的条件	337
6.10.4	超塑性成形及应用	337
6.11	奇异的新型材料——金属玻璃	339
6.11.1	金属玻璃的定义及简介	340
6.11.2	金属玻璃材料的发展	340
6.11.3	金属玻璃的性能特点	344
6.11.4	金属玻璃材料的应用	346
6.11.5	金属玻璃材料的发展前景	348
6.12	神奇的新型材料——金属橡胶	349
6.12.1	金属橡胶，是橡胶还是金属？	350
6.12.2	金属橡胶材料特殊的性能特点	350

6.12.3	金属橡胶材料制备工艺	352
6.12.4	金属橡胶材料的应用	355
6.12.5	金属橡胶材料的发展前景	359

7 新型金属基复合材料——多功能化

360

7.1	金属基复合材料概述	360
7.1.1	金属基复合材料定义	360
7.1.2	金属基复合材料分类	361
7.2	金属基复合材料的性能特点	363
7.2.1	金属基复合材料的特性	363
7.2.2	金属基复合材料的性能	367
7.3	金属基复合材料的制备工艺	382
7.3.1	概述	382
7.3.2	制造技术分类	383
7.4	新型金属基复合材料的应用与前景展望	398
7.4.1	金属基复合材料的应用	398
7.4.2	金属基复合材料的研究趋势和前景展望	411

参考文献

417

1

新型工程结构用钢 —— 高强高韧

21 世纪对材料和工业技术的评价要素主要是低成本、环境友好、节能节材、便于自动化、可再生等。据此，钢铁材料具有其他材料所不可比拟的优越性（如资源丰富、生产规模大、易于加工、性能多样可靠、价格低廉、使用方便和便于回收等）。在钢铁、玻璃、纸、铝和塑料等主要材料回收率的比较中，钢铁的回收率明显高于其他材料。实际上，全球粗钢产量中有一半左右是以各类废钢为原料生产出来的。钢铁材料作为一种重要结构材料的地位，在可以预见的未来年代里不会发生重大变化，它仍将是全球性的主要基础原材料，并将对全球（尤其是发展中国家）经济发展和文明社会的进步起到基础性的支撑作用。

众所周知，钢铁作为国民经济的物质基础近年来取得迅猛发展。我国钢产量自 2007 年开始位居世界第 1 位，2010 年达 6.3 亿吨，约占全世界钢产量的一半。钢产量的大幅攀升与我国资源短缺的矛盾不断加剧，低成本、高性能的先进钢铁材料成为我国经济和社会发展的迫切需求。一方面，目前生产使用的多数工业用钢的使用性能和技术指标均有待进一步提高，绝大多数工业用钢的洁净度和均匀度不高，组织控制很难达到理想目标。例如，新型高层建筑、深层地下和海洋设施、大跨度重载桥梁、轻型节能汽车、石油开采和长距离油气输送管线、工程机械、船舶舰艇、航空航天设备、高速铁路、水电能源设施等企业用户都对工业用钢的使用性能和技术指标提出了更高的要求，需要钢铁生产企业提供性能高、使用寿命长和成本低的新型工业用钢。另一方面，社会的发展对钢铁的生产、加工、使用和回收等环节提出了节能环保的要求，迫切需要先进的工业用钢。

本章在简要介绍新一代钢铁材料（超级钢）基本概念的基础上，重点简述新型工程结构用钢的特点、发展前景以及工程应用。众所周知，工程结构用钢是指专门用于制造各种工程和建筑结构用的各种金属构件，其广泛应用于国防、化工、石油、电力、车辆、造船等领域，如制造桥梁、船舶、车辆、建筑钢结构及

钢筋材料、油井或矿井架、高压电线塔、起重机械构架、钢轨、压力容器、管道等工程结构件，通常又称为工程用钢。在钢总产量中，工程结构用钢约占 90%。而新型工程结构用钢系指运用新型物理冶金工艺，采用微合金化成分设计并运用新一代 TMCP 技术，通过细晶强化为核心的多种强韧化手段，大幅度提高钢的综合性能的新一代钢铁材料。第三代汽车用钢、高性能建筑用钢、天然气与输油管道用钢、现代桥梁用钢、高速列车用钢……，新型工程结构用钢的应用不断深入，其足迹无处不在，遍地开花。

1.1 超级钢 (新一代钢铁材料) 概述

1.1.1 新一代钢铁材料 (超级钢) 的概念

(1) 何谓“新一代钢铁材料”？

新一代钢铁材料系指具有组成单元超细晶、化学成分（杂质）高洁净度、显微组织高均匀性的组织、成分和结构特征，以及高强度、高韧性的力学性能特征的新一代钢铁材料。即在环境性、资源性和经济性的约束下，采用先进制造技术生产具有高洁净度、高均匀度、超细晶粒特征的钢材，强度和韧度比传统钢材提高，钢材使用寿命增加，满足 21 世纪国家经济和社会发展的需求。新一代钢铁材料，亦称超级钢，或称超细晶粒钢等。

(2) 新一代钢铁材料 (超级钢) 的开发是经济建设和社会发展的需求

1995 年日本发生大地震，当地钢铁建筑毁于一旦，引发日本学界对钢铁材料重要性的思考。为适应未来发展，很多学者提出要开发更坚固的钢铁材料，这就是研发“超级钢”的起源。日本钢铁界和国家金属研究院经过 1995~1996 两年的调研，在日本科技厅支持下，于 1997 年 4 月正式启动了“超级钢材料国家研究计划”，目标是在 10 年内开发出把钢的“实际使用强度提高 1 倍，结构的寿命提高 1 倍，降低总成本，降低对环境的污染度”的超级钢，用于道路、桥梁、高层建筑等基础设施建材的更新换代。此举措被认为是对世界上最重要的工程结构材料——钢铁的再认识，是“第二次铁器时代”来临的前期征兆，吹响了“向钢铁进军”的新号角（表 1-1）。

表 1-1 日本新世纪结构材料（超级钢铁材料）研究课题与目标

两大研究主题	四项研究课题	研究目标
结构材料高强度化的研究	以铁素体为基体的一般焊接结构用钢的高强度化研究	开发 800MPa 级（用于土木、造船等）的一般焊接结构用钢及其焊接工艺
	1500MPa 级超高强度钢的高性能化研究	开发 1500MPa 级（超长大桥、轻型化汽车、新建筑所用）不易发生疲劳破坏与延迟破坏的超强钢；同时开发新的高刚性化技术

续表

两大研究主题	四项研究课题	研究目标
结构材料长寿命化的研究	利用长时间组织稳定化实现铁素体耐热钢的高性能化研究	开发可长时间使用的高 Cr 铁素体耐热火力发电所用的大直径厚壁主蒸汽管
	提高结构用钢在海洋环境下的耐久性的研究	开发海滨地带用的无须防腐层(裸使用)的低合金耐蚀钢与耐海水腐蚀的不锈钢及耐腐蚀涂层

在日本超级钢项目的影下, 1998 韩国启动了“21 世纪高性能结构钢发展”的 10 年国家计划。2001 年欧盟启动了“超级晶粒钢开发”计划。2002 年美国在钢铁研究指南中公布了两个新一代钢铁材料开发项目。

我国钢产量自 1996 年以来一直稳居世界第一, 但在钢铁品种、质量方面与世界先进水平仍有很大差距, 沿用了几十年的钢种体系急需更新换代。1998 年在中国重点基础研究发展规划项目“973 计划”中启动了“新一代钢铁材料的重大基础研究”项目, 并将超级钢思路发展成“超细晶粒钢”。该课题的目标是在生产成本基本不增加的前提下将现有碳素钢、低合金结构钢和合金结构钢的强度目标提高 1 倍, 即分别达到 400MPa、800MPa 和 1500MPa, 并满足韧性和各种使用性能要求。超级钢(新一代钢铁材料)的深入研究和应用开发正成为 21 世纪钢铁材料界的历史使命。到 2001 年后, 全球范围的新一代钢铁结构材料研发工作已蓬勃展开, 陆续取得了阶段性成果和成效(如开发出原型钢、进行中试等)。

我国研究工作的主要目标是在保证有良好塑韧性基础上大幅度提高钢材强度, 其技术思路是以细化钢材的晶粒和组织为核心, 同时提高钢的洁净度, 并改善钢的均匀性。在理论研究基础上, 把钢的强度提高 1 倍。此外还须满足: 生产成本不增加或增加不多; 塑韧性基本不下降以保证符合生产、应用要求。即做到低成本和高性能的统一, 把传统材料改造、提升为低成本高性能的新型材料。其优越性是节约资源、能源, 降低生产成本, 改善废钢的可循环使用性, 利于可持续发展。

近几年, 国内外的新一代钢铁材料项目主要以高强度化与长寿命化为研究主题, 以 800MPa 高强度钢、1500MPa 级超高强度钢、耐热钢和耐蚀钢为研究对象。

1.1.2 新一代钢铁材料(超级钢)的主要特征

新一代钢铁材料的主要特征是: 在充分考虑经济性的条件下, 钢材具有高洁净度、超细晶粒、高均匀度的特征, 强度比常用钢材提高 1 倍, 钢材使用寿命增加 1 倍。

(1) 超细晶

钢只有获得超细晶组织才能使强度翻倍并具有良好的强韧性配合。在众多强化

方式（如固溶强化、第二相强化、位错强化等）中，细晶强化是唯一可使屈服强度 R_{eL} (σ_S) 大幅度提高的同时韧性提高或不降低的强韧化途径。正如 Petch 公式所表达：

$$R_{eL}(\sigma_S) = R_i(\sigma_i) + Kd^{-1/2}; T_K = a - bd^{-1/2}。$$

式中， $R_i(\sigma_i)$ 为 F 晶格摩擦力； K 、 a 、 b 均为常数； d 为晶粒直径； T_K 为韧脆转变温度。超细晶理论和技术是发展超级钢的理论基础和关键技术，晶粒尺寸应在 $0.1 \sim 10\mu\text{m}$ 之间。超细晶是新一代钢铁结构材料的核心。

(2) 高洁净度

洁净度是指钢材允许的杂质含量和夹杂物形态能满足使用要求。由于钢的强度翻番，材料在使用时承受更大应力，使裂纹形成和扩展的敏感性增加。新型材料应具有更高的洁净度，但并非洁净度越高越好，而是达到能满足使用要求所需洁净度，称为“经济洁净度”。钢中 S、P、O、H、N 等杂质元素的总含量应 $< 0.008\%$ ；另外是严格控制钢中夹杂物的数量、成分、尺寸、形态和分布。

(3) 高均匀性

高均匀性系指钢中化学成分、组织和性能的高度均匀。要尽可能地减少钢在凝固过程中的偏析和争取获得全等轴晶粒。钢液凝固过程中，由于传热规律造成顺序凝固，带来低熔点元素的宏观偏析，形成了难以克服的中心偏析。为改善钢的均匀性，在凝固过程中应尽可能阻止柱状晶的发展，目标是在性能要求高的钢的铸坯中争取基本为全等轴晶。在杂质总量不变情况下，提高均匀性相当于提高洁净度。

其中核心技术是超细晶。钢的理论强度可高于 8000MPa ，而现在大量应用的碳素钢的强度仅 200MPa ，低合金钢只有 400MPa ，合金结构钢也只有 800MPa 。因此在已有科研成果基础上，进一步探索提高钢材强度和使用寿命的规律，把钢材强度成倍提高，在技术上是可行的。在钢的化学成分-工艺-组织-性能的关系中，强调了组织的主导地位，即其超细的微观组织表现出优异的综合性能。

生产中常见的标准晶粒度等级为 8 级，其中 1~3 级为粗晶 ($d = 250 \sim 125\mu\text{m}$)，4~6 级为中等晶粒 ($d = 88 \sim 44\mu\text{m}$)，7~8 级为细晶 ($d = 31 \sim 22\mu\text{m}$)。目前还没有一个被广泛接受的标准，对超细晶的尺寸给出确切的定义。有人建议把晶粒尺寸为 $3 \sim 10\mu\text{m}$ 的热轧带钢称为细晶； $1 \sim 3\mu\text{m}$ 称为超细晶粒； $0.1 \sim 1\mu\text{m}$ 称为微细晶粒；而把晶粒尺寸在 $0.1\mu\text{m}$ 以下称为纳米晶粒； $10\mu\text{m}$ 以上即为普通晶粒。

1.1.3 超级钢研发的两个关键——“微合金化”与“新型 TMCP”

(1) 话说微合金化与合金化

① 微合金化与微合金化钢 所谓“微合金化”，即指采用现代冶金生产流程

生产的高技术钢铁产品。它是在普通低碳 C-Mn 钢中添加微量（通常小于 0.1%）的强碳（氮）化物形成元素（如 Nb、V、Ti 及 N 等）进行合金化，通过高纯洁度的冶炼工艺（脱气、脱硫及夹杂物形态控制）炼钢，在加工过程中施以控制轧制-控制冷却等新工艺，通过控制细化钢的晶粒和碳（氮）化物沉淀强化的物理冶金过程，在热轧状态下获得高强、高韧、高可焊接性、良好的成型性能等最佳力学性能配合的工程结构材料。

微合金化钢是采用现代冶金生产出的高技术含量、高附加值的产品，是国民经济建设中用量最大、用途最广的钢铁材料。微合金化钢的强度高、韧性好，可为用户节能节材而降低成本。纵观工业发达国家，发展工业走的就是微合金化钢的道路。在我国，许多企业都把发展微合金化钢作为企业钢材品种结构调整的主要内容和首要工作来抓。微合金化的钢材的研究和开发，已为国内许多钢铁企业带来生机，带来了市场竞争力的提高和更多的经济效益。

我国的钢铁工业要想赶超世界先进水平，只有坚定不移地走微合金化钢的道路。

② 微合金化高强度低合金钢与普通高强度低合金钢的不同

a. 基本概念的不同 普通高强度低合金钢是指在碳素结构钢（ $w_C < 0.2\%$ ）基础上，加入少量合金元素（一般合金元素总量 $w_{Me} < 3\%$ ）而发展起来的、具有较高强度的工程结构用钢。其化学成分特点是低碳，随钢中碳含量增加，钢的强度会增加但塑性降低；其主加合金元素为 Mn，固溶强化、降低相变温度而细化珠光体和铁素体的作用，同时还可增加基体中珠光体数量，使钢的强度增加；辅加合金元素是 Al、V、Ti、Nb 等，起到细化晶粒、弥散强化的作用，其可一种加入，也可两种及以上同时加入。

微合金化高强度低合金钢中，晶粒细化强化仍是最重要的强化方式，微合金碳氮化物的沉淀硬化也是重要的强化方式，Mn 的固溶强化也是普遍采用的强化方式；其成分特点是低碳、高锰并加入微量合金元素 V、Ti、Nb、Zr、Cr、Ni、Mo 及 RE 元素等，常用碳含量为 0.12%~0.14%，甚至降至 0.03%~0.05%，降低碳含量主要是从保证塑性、韧性和可焊性等方面考虑，微量合金元素复合（0.01%~0.1%之间）加入对钢的组织、性能的影响主要表现在：改变钢的相变温度、相变时间，从而影响相变产物的组织和性能；细晶强化；沉淀强化；改变钢中夹杂物的形态、大小、数量和分布；可严格控制 P 的体积分数，从而获得少珠光体钢、无珠光体钢（如针状铁素体）乃至无间隙固溶钢等新型微合金化钢种。

b. 积极引入冶炼新技术，控制夹杂物形态，提高冶金质量 在微合金化高强度低合金钢中，采用的是现代冶金生产流程生产的高技术钢铁产品，通过高纯洁度的冶炼工艺（脱气、脱硫及夹杂物控制等）炼钢，如广泛采用的氧气炼钢使钢中氮量降低，再加上用铝脱氧并固定氮，形成 AlN，对细化钢的晶粒，减少应

变时效,起了良好作用。用铝脱氧,还保证了微合金化元素钛、铌、钒的收得率。

钢中夹杂物最理想的形态是呈球状,最坏的是共晶体的棒状物。往钢中加入钙,可改变硫化物与氧化物的形态,并可降低钢中夹杂物含量。加入 RE 元素可强烈降低氧和硫在钢液中的溶解度,硫化物、氧化物夹杂在凝固前可上浮,因而使钢去硫,并强化了硫化物。

由于炉外冶炼新技术的发展,如钢液真空处理、钢包精练等,能很好地脱气和脱硫,生产高质量的纯净钢。

c. 多元、复合、微合金化必须与新型的控制轧制与控制冷却相结合,才能发挥其强韧化作用。即多元、复合微合金化的成分特点,必须在新型控制轧制、控制冷却状态下才能获得高强度、高韧性、高可焊性、良好的成形性能等最佳力学性能配合的微合金化高强度低合金钢。

(2) 新一代 TMCP 与传统 TMCP 究竟有何不同?

TMCP (Thermal Mechanical Control Processing), 热机械处理工艺即控制轧制和控制冷却技术,其目标是实现晶粒细化和细晶强化。

所谓控制轧制,是对奥氏体硬化状态的控制,即通过变形在奥氏体中积累大量的能量,在轧制过程中获得处于硬化状态的奥氏体,为后续相变过程中实现晶粒细化做准备。硬化的奥氏体内存在大量“缺陷”,例如变形带、位错、孪晶等,它们是相变时铁素体形核的核心。这种“缺陷”越多,则铁素体的形核率越高,得到的铁素体晶粒越细。控制轧制的基本手段是“低温大压下”和添加微合金元素。所谓“低温”是在接近相变点的温度进行变形,由于变形温度低,可抑制奥氏体的再结晶,保持其硬化状态;“大压下”是指施加超出常规的大压下量,这样可增加奥氏体内部储存的变形能,提高硬化奥氏体程度;增加微合金元素,例如 Nb,是为提高奥氏体的再结晶温度,使奥氏体在较高温度即处于未再结晶区,因而可增大奥氏体在未再结晶区的变形量,实现奥氏体的硬化。控制冷却的核心思想,是对处于硬化状态奥氏体相变过程进行控制,以进一步细化铁素体晶粒,甚至通过相变强化得到贝氏体等强化相,进一步改善材料的性能(如图 1-1 所示)。然而,目前控制冷却上存在的主要问题是高冷却速率下材料冷却不均而发生较大残余应力、甚至翘曲的问题;另外,微合金元素的加入甚至合金元素的加入,会大幅度提高材料的碳当量,这又会恶化材料的焊接性能等。从节能环保、低成本、可循环等方面考虑,科技工作者研发了以超快冷技术为核心的新一代 TMCP 技术。

如图 1-2 所示,与传统的低温大压下 TMCP 相比,新一代 TMCP 在高温区进行大压下后,进行快冷,而后控制冷却路径,实现减量化轧制以及性能的多样化控制。新一代 TMCP 的中心思想:在奥氏体区间,趁热打铁,在适于变形的