

高效节约型建筑用钢

热轧钢筋

苏世怀 孙 维 汪开忠 完卫国 编著



工业出版社
Industrial Press

内 容 提 要

本书系统地介绍了高效节约型建筑用钢中热轧钢筋产品特点和在建筑业中的应用,总结了国内外热轧钢筋的发展历程、生产线的设计、工艺装备特点、取得的经验、关注的重点和发展动向,重点叙述了热轧钢筋生产和设备管理、产品开发和应用方面的经验和采用的新技术,如方坯连铸、控轧控冷、新产品开发和质量控制等。

本书可供与热轧钢筋技术相关的生产、科研、设计、管理和教学人员参考、使用。

图书在版编目(CIP)数据

热轧钢筋/苏世怀等编著. —北京:冶金工业出版社,
2010.9

(高效节约型建筑用钢)

ISBN 978-7-5024-5342-8

I. ①热… II. ①苏… III. ①建筑材料—热轧—钢筋
IV. ①TU511.3

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2010) 第 181856 号

出 版 人 曹胜利

地 址 北京北河沿大街嵩祝院北巷 39 号, 邮编 100009

电 话 (010)64027926 电子信箱 yjchs@cnmip.com.cn

责任编辑 刘小峰 美术编辑 张媛媛 版式设计 葛新霞

责任校对 侯 珺 责任印制 牛晓波

ISBN 978-7-5024-5342-8

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

2010 年 9 月第 1 版, 2010 年 9 月第 1 次印刷

787mm×1092mm 1/16; 20 印张; 485 千字; 309 页

59.00 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(100010) 电话:(010)65289081(兼传真)

(本书如有印装质量问题,本社发行部负责退换)

序 言

高效节约型钢材是建筑用钢的高端产品，为此开展的产品研发与生产技术研究，一可提升我国钢铁产品综合研发能力，实现我国建筑用钢的生产工艺优化与技术升级，进一步推动钢铁工业产品结构调整和升级，加快冶金生产技术进步的步伐；二可显著提高钢铁产品的附加值，通过低成本工艺技术的开发，减少钢材生产过程的资源消耗，降低生产成本。发展高效节约型建筑用钢同时也已成为我国钢铁企业坚持科学发展观，坚持自主创新、环境友好、资源节约的发展理念，在新的形势下转变经济增长方式的重要着力点，对于保持我国国民经济稳定增长、促进我国钢铁工业持续稳定发展和推动建筑业整体进步，具有重要意义。

“高效节约型建筑用钢产品开发及应用研究”项目是国家科技支撑计划项目之一，2007年由国家科技部下达，委托安徽省科技厅负责组织实施，以马钢为主要依托单位，聚集了国内在建筑用钢产品、技术和应用研究方面具有优势的一批科研院所，如中国钢研科技集团、中国建筑科学研究院、中冶集团建筑研究总院、冶金工业信息标准研究院、中机生产力促进中心、同济大学、东北大学、北京科技大学、安徽工业大学等，组成产、学、研相结合的研究开发队伍，按照统筹规划、整体安排、联动实施的原则开展该项目的科技攻关工作。这种产学研联合的技术创新机制，是企业为自主创新主体的技术创新体制，满足了技术产业化的支撑要求。

该项研究主要包括以下三个方面：

(1) 高效节约型建筑用钢低成本生产工艺关键共性技术研究：包括高效节约型建筑用钢低成本冶炼技术、高效节约型建筑用钢夹杂物控制技术、高效节约型建筑用钢控轧控冷及组织控制技术；

(2) 高效节约型建筑用钢品种开发：包括低成本节约型热轧带肋钢筋产品开发，高强度抗震、耐候、耐火H型钢产品开发，钢结构连接件用低成本高强度非调质冷锻钢盘条开发，并形成规格配套的系列产品族；

(3) 制订、修订高效节约型建筑用钢相关产品标准规范，研究关键钢材品种的特性和应用技术体系，并在此基础上提出适合高效节约型建筑用钢的相关标准、设计施工规范，满足现代工程建筑快速发展的需求。

并力求实现:

(1) 创新集成高效节约型多功能建筑用钢低成本生产工艺系统关键技术,形成热轧钢筋、H型钢、高速线材示范生产线;

(2) 开发出适合我国资源状况的节约型 400MPa 级和 500MPa 级钢筋,使我国 400MPa 级钢筋年产量比例显著提高,500MPa 级钢筋大批量应用;

(3) 开发应用 390MPa 级以上耐候、耐火、抗震 H 型钢,开发钢结构连接件用 9.8 级和 10.9 级非调质冷镦钢盘条,逐渐提高我国钢结构用钢比例;

(4) 制订、修订一批高效节约型建筑用钢相关产品标准;

(5) 建立与新型建筑用钢产品标准与设计规范相配套的应用技术支撑体系;

(6) 形成一批我国拥有的“高效节约型建筑用钢”自主知识产权。

希望通过该项目的实施,为国家建立一支高水平的从事高效节约型多功能建筑用钢开发、应用的高素质人才队伍,促进国家及安徽省“高性能建筑用钢工程技术研究中心”等创新基地建设,建成三条以上高效节约型建筑用钢低成本工艺示范生产线,开发形成高效节约型建筑用钢产品族,基本建立高效节约型建筑用钢应用技术支撑体系、配套的标准和使用规范,为我国国民经济的可持续发展做出贡献。

在高效节约型建筑用钢的研究开发中有必要系统总结以往的经验,在学习国内外先进的、成功的经验与做法的基础上不断创新;同时也希望与国内外同行交流,以利共同进步。据此,马钢安排苏世怀总工程师负责组织力量编著《高效节约型建筑用钢》系列书籍,计划在两年内陆续出版。这套书的特点是密切联系钢铁企业生产一线,注重总结生产中实际操作和研发体会,研讨在生产工艺的简约、产品质量的提高和品种结构的优化等方面的具体做法,尽可能地展现我国在高效节约型建筑用钢方面生产与研发的动态与水平,为我国在钢铁大国的基础上快速上升为钢铁强国做出贡献。

顾建国
2009 年 2 月

前 言

建筑业是我国钢材消费量最大的行业，占国内钢材全部消费量的 50% 以上。建筑业的发展对建筑用钢的性能、质量提出了更高的要求，建筑用钢的发展趋势主要表现为：一是提高钢材的使用效率，主要通过提高钢材强度和耐用性来减少钢材使用量，因此，高强度、高韧性、可焊接性、抗震、耐火、耐候性等已成为衡量现代建筑用钢基本性能的主要指标；二是节约使用钢材，在满足建筑结构的大载荷、高楼层和大跨度发展要求的同时，降低建筑成本、节约国家资源。目前，我国建筑业整体进步迫切需要发展高效节约型建筑用钢，以推动建筑业整体水平的进步，满足国民经济发展的新要求。

建筑用热轧带肋钢筋是建筑行业的关键基础材料，近年来，马钢以国家科技支撑计划课题“低成本节约型热轧带肋钢筋产品开发”为依托，联合国内相关科研院所，在高效节约型建筑用热轧钢筋品种和生产技术方面进行了多项开拓性的研究工作，先后生产出低成本 400MPa 级和 500MPa 级余热处理热轧钢筋、细晶粒热轧钢筋、微合金化热轧钢筋、耐蚀热轧钢筋和抗震热轧钢筋等；开发出了适合我国国情的钢筋使用实用技术，促进了我国高强度、功能化钢筋的应用，推动了国内钢筋产品的更新换代，节约了矿石、合金、能源等国家战略性资源，减少了环境污染，满足了我国冶金业、建筑业可持续发展的需要。

多年来，马钢在热轧钢筋生产领域里，坚持创新发展，在开拓市场、生产工艺集成创新、品种开发等方面都取得了显著成绩。在面对进一步自主创新的关键时期，我们有必要系统地对以往的工作加以总结，并广泛收集国内外热轧钢筋的技术进步和产品开发的经验，以求记录热轧钢筋技术的发展历程和取得的经验，以便更好地完成国家科技支撑计划项目“高效节约型建筑用钢产品开发及应用研究”及其成果推广。

在冶金工业出版社支持下，经过“高效节约型建筑用钢产品开发及应用研究”项目组通力合作，在完成该项目中“高效节约型建筑用钢——热轧钢筋

技术调研”的基础上，编著了《高效节约型建筑用钢——热轧钢筋》一书，其中收录了国内外一些同行提供的相关资料，采纳了他们的成书建议，在此一并致谢。

企业出书的特点是注重对生产设备的选择、管理和维护技术的总结，对生产工艺操作、产品研发、产品质量的提高和品种结构的优化等方面的具体作法的分析介绍，较为适合钢铁企业、钢铁设备设计制造部门的技术人员、技工、技师、冶金院校高年级学生、研究生和青年教师学习参考。

书中叙述或有不妥之处，敬请指正和谅解。

于世怀

2010年6月

目 录

1 概述	1
1.1 热轧钢筋及其在建筑领域应用的意义和作用	1
1.2 我国热轧钢筋用钢的发展历程	2
1.3 我国现有热轧钢筋的品种介绍	3
1.3.1 我国热轧钢筋相关产品	3
1.3.2 HRB335 钢筋	5
1.3.3 HRB400 钢筋	6
1.3.4 HRB500 钢筋	7
1.4 热轧带肋钢筋的性能要求	7
1.4.1 钢筋的性能要求	7
1.4.2 震害调查中的钢筋问题与钢筋的抗震性能	9
1.5 热轧钢筋用钢生产技术的发展	10
1.5.1 国外建筑用热轧带肋钢筋的发展趋势	10
1.5.2 我国建筑用热轧带肋钢筋的现状存在的问题	10
1.6 高效节约型建筑用热轧钢筋的开发	12
1.6.1 我国研发高效节约型建筑用热轧钢筋的意义	12
1.6.2 发展高效节约型建筑用热轧钢筋的核心内容	13
1.6.3 高效节约型建筑用热轧钢筋的主要研究内容	13
参考文献	16
2 热轧钢筋生产技术	17
2.1 冶炼设备及工艺	17
2.1.1 转炉	17
2.1.2 电弧炉	32
2.2 炉外精炼	33
2.2.1 钢包吹氩精炼站	33
2.2.2 LF 炉	37
2.3 连铸设备及工艺	38
2.3.1 概况	38
2.3.2 连铸主要设备及参数	38
2.3.3 连铸生产工艺	45
2.3.4 HRB400 连铸生产操作	63
2.3.5 连铸新技术	64
2.4 热轧钢筋生产用坯料技术条件及其热送热装技术	69

2.4.1	坯型选择	69
2.4.2	坯料技术条件	70
2.4.3	坯料的检查和管理	72
2.4.4	热轧钢筋用坯料的热送热装技术	73
2.5	热轧钢筋盘条及棒材生产装备	81
2.5.1	热轧钢筋盘条及棒材生产线概况	81
2.5.2	主要轧制设备	111
2.5.3	导卫装置的发展及导辊材料的研究	146
2.5.4	轧辊和辊环	152
2.6	热轧钢筋生产工艺及孔型设计	155
2.6.1	主要轧钢工序生产操作	155
2.6.2	提高和稳定热轧带肋钢筋负差率的措施	161
2.6.3	控轧控冷工艺	162
2.6.4	热轧带肋钢筋孔型设计	167
2.7	热轧钢筋生产新技术	174
2.7.1	棒材生产新技术	174
2.7.2	线材生产新技术	175
	参考文献	178
3	热轧钢筋产品开发	181
3.1	余热处理热轧钢筋产品开发	181
3.1.1	余热处理热轧钢筋概述	181
3.1.2	热轧钢筋轧后余热处理工艺的基本原理和工艺过程	181
3.1.3	余热处理钢筋生产实践	181
3.1.4	余热处理钢筋的推广应用难点	186
3.2	微合金化热轧钢筋产品开发	187
3.2.1	微合金化热轧钢筋概述	187
3.2.2	微合金化钢筋生产工艺控制要点	188
3.2.3	微合金化热轧钢筋生产实践	194
3.2.4	微合金化热轧钢筋的不足	204
3.3	超细晶粒热轧钢筋产品开发	204
3.3.1	超细晶粒热轧钢筋概述	204
3.3.2	钢的强韧化机理	205
3.3.3	碳素结构钢和低合金结构钢的组织细化	206
3.3.4	超细晶粒钢在热轧钢筋上的应用	208
3.3.5	超细晶粒热轧钢筋生产实践	208
3.3.6	对细晶粒热轧钢筋的评价	210
3.3.7	对新工艺路线的探讨	211
3.4	抗震热轧钢筋产品开发	211

3.4.1 抗震热轧钢筋概述	211
3.4.2 国内外高强度抗震钢的研究概况	216
3.4.3 抗震热轧钢筋产品开发实践	217
3.5 耐腐蚀热轧钢筋产品开发	220
3.5.1 耐腐蚀热轧钢筋概述	220
3.5.2 钢筋的腐蚀机理	220
3.5.3 耐大气腐蚀钢的成分设计原则	221
3.5.4 耐腐蚀钢生产中钢坯、钢材容易产生的表面缺陷	223
3.5.5 国外耐腐蚀低合金钢筋开发现状	224
3.5.6 国内 400MPa 级耐腐蚀热轧带肋钢筋产品开发实践	224
参考文献	230
4 热轧钢筋质量控制	231
4.1 连铸方坯的质量缺陷及其控制	231
4.1.1 洁净度	231
4.1.2 表面缺陷	233
4.1.3 内部缺陷	243
4.1.4 形状缺陷	246
4.2 热轧钢筋典型缺陷及其控制	247
4.2.1 裂纹	247
4.2.2 表面折叠	249
4.2.3 耳子	249
4.2.4 表面凸起及压痕（轧疤）	250
4.2.5 分层	250
4.2.6 划痕	250
4.2.7 结疤（翘皮或鳞层）	250
4.2.8 缩孔	251
4.2.9 麻点或麻面	251
4.2.10 棒材“S”弯	251
4.3 热轧钢筋尺寸检测及控制	252
4.3.1 热轧带肋钢筋尺寸存在的缺陷	252
4.3.2 影响线棒材尺寸精度的主要因素	252
4.3.3 热轧带肋钢筋尺寸的正确测量	252
4.4 热轧带肋钢筋屈服点不明显问题	253
4.4.1 无屈服现象分析	253
4.4.2 屈服点不明显的控制措施	254
4.5 钢筋冷弯和反弯裂纹的研究	255
4.5.1 国内研究现状	255
4.5.2 国外研究现状	256

4.5.3	影响因素分析及防止措施	256
4.6	热轧带肋钢筋表面起泡成因	260
4.6.1	钢筋表面起泡原因	260
4.6.2	起泡消除措施	260
	参考文献	261
5	热轧钢筋的应用	266
5.1	国内热轧钢筋在建筑领域应用概况	266
5.2	HRB400 钢筋应用分析	266
5.2.1	HRB400 钢筋的优点	266
5.2.2	Ⅱ级、新Ⅲ级钢筋在工程应用中比较	267
5.2.3	新Ⅲ级钢筋经济效益评估	268
5.3	HRB500 钢筋应用分析	268
5.4	热轧钢筋的连接方法及相关标准	269
5.4.1	焊接	270
5.4.2	机械连接	275
5.4.3	相关标准对钢筋接头应用的规定	279
5.5	工程建设标准对钢筋在结构设计和使用中的规定	281
5.6	混凝土钢筋的锈蚀及预防措施	282
5.6.1	钢筋锈蚀的危害	283
5.6.2	产生钢筋锈蚀的原因	283
5.6.3	钢筋腐蚀的预防措施	284
	参考文献	285
6	热轧带肋钢筋国内外标准分析	286
6.1	形状、交货状态、规格对比分析	286
6.1.1	横肋基本要求及横肋各尺寸参数对比分析	286
6.1.2	交货状态、规格对比分析	292
6.2	钢种及化学成分对比分析	292
6.3	力学性能对比分析	295
6.3.1	各国标准对力学性能的规定	299
6.3.2	力学性能的对比分析	299
6.3.3	工艺性能对比分析	302
6.3.4	抗震性能	306
6.4	国内外钢筋生产工艺对比分析	306
6.5	连接方法对比分析	307
6.5.1	焊接	307
6.5.2	机械连接	309
	参考文献	309

1 概 述

1.1 热轧钢筋及其在建筑领域应用的意义和作用

热轧带肋钢筋是一种钢筋混凝土用钢，其横截面的基圆为圆形，且表面通常带有两条纵肋和沿长度方向均匀分布的横肋，目前我国国家标准规定横肋的外形为月牙形，并且可以不带纵肋。热轧带肋钢筋在混凝土中主要承受拉、压和弯曲应力，由于表面肋的作用，它和混凝土有较大的黏结能力（握裹力），因而它能更好地和混凝土一起组成复合结构承受外力的作用。热轧带肋钢筋广泛用于各类建筑的钢筋混凝土结构。

一般可按屈服强度特征值对热轧带肋钢筋进行分类，如：我国国家标准《钢筋混凝土用钢第2部分：热轧带肋钢筋》（GB 1499.2—2007）中，按屈服强度特征值把钢筋分为3个等级，即335MPa、400MPa和500MPa级。

按生产工艺不同，可将热轧带肋钢筋分为普通热轧带肋钢筋、超细晶热轧带肋钢筋和余热处理钢筋。

按用途和性能要求不同，可将热轧带肋钢筋分为普通热轧带肋钢筋、抗震热轧带肋钢筋、耐低温热轧带肋钢筋、耐腐蚀热轧带肋钢筋、耐火热轧带肋钢筋等。

现代建筑业的发展，离不开热轧带肋钢筋。热轧带肋钢筋广泛用于各类建筑的钢筋混凝土结构、民用建筑、厂房、核电站、体育场、剧院、广场、公路、桥梁、码头、水利工程、铁路工程等的建设都需要大量的热轧带肋钢筋。

改革开放以来，我国的建筑业取得了显著的技术进步和发展。目前，我国正处于工业化和城镇化快速发展时期，建筑工程建设的投资在逐年增加，建筑业发展十分迅猛，现已成为我国国民经济的支柱产业之一，并在国民经济中发挥着越来越重要的作用。每年新建的城乡建筑总面积已达18~20亿平方米，其中城镇住宅约为6~7亿平方米，城市的公共建筑与工业建筑约为5亿平方米，新建量超过所有发达国家总和，中国是当今世界最大的建筑市场。

建筑业是我国钢材消费量最大的行业，钢材始终是建筑结构的主体材料之一，建筑用钢材需求量较大，对建筑业的发展起着举足轻重的作用。据统计，2006年中国建筑业消费的钢材达2.0148亿吨，约占全部钢材消费量的54.9%；2007年是2.1894亿吨，约占全部钢材消费量的53.1%。建筑用钢的类型包括：混凝土结构用钢，如建筑用钢筋等；钢结构用钢，如H型钢、普通型钢、板材、钢管和涂镀层板等；建筑辅材用钢，如设备、管道、门窗用钢等。

由于我国的基础设施仍然是以混凝土结构为主，所以多年来建筑用钢筋消费量很大。我国混凝土配筋用钢筋品种较多，有：热轧钢筋（带肋、光面），冷轧带肋钢筋，精轧螺旋钢筋，冷拉钢筋，变形钢筋（冷轧扭、冷轧螺旋、扭耳等），热处理钢筋，低碳冷拔丝（在逐步淘汰），普通松弛、低松弛预应力钢丝，钢绞线等。钢筋是混凝土结构中的关键材料，其性能和品质直接影响建筑工程的质量和安全。

热轧带肋钢筋（俗称螺纹钢）是我国建筑用钢中消费量最大的钢材产品，也是我国总钢材消费量中比例最大的钢材产品。2007 年中国热轧带肋钢筋消费量 9198 万吨，约占中国建筑业钢材消费量的 42%，约占中国总钢材消费量的 22.3%。因此，热轧带肋钢筋是我国建筑用钢的重要主导产品。

由于水泥、钢铁都是大量消费资源和高耗能的产品，因此在这些巨大消费背后潜在着风险，那就是：“资源枯竭，能源耗费，环境破坏，难以为继”。由于我国目前生产效率低下，经济发展往往是以数倍于发达国家的资源、耗能和人力为代价获得的，资源短缺，能源危机的端倪已渐显现，不能不引起警惕。开发和采用 400MPa 级高强度级别建筑用钢筋取代 335MPa 级钢筋可节省 12% 以上的消耗量。而在 20 世纪 90 年代，我国建筑业对 HRB335 的需求量仍很大，约占钢筋总需求量的 80% ~ 90% 以上。经过 10 多年的努力，400MPa 热轧带肋钢筋产量已占热轧带肋钢筋产量的近 1/3。目前 HRB400 需求量正呈大幅上升趋势，将逐步取代 HRB335。

1.2 我国热轧钢筋用钢的发展历程^[1]

我国钢筋的发展基本上经历了引进模仿—自主研发—引进技术和设备—吸收创新，性能等级由低强度向高强度发展的过程。

建国初期，国内钢筋几乎全是碳素钢（Q235）Ⅰ级光面钢筋独霸天下。

直到 20 世纪 70 年代初期，原冶金部大规模地进行研制、生产、推广应用低合金钢产品，出现了Ⅱ级钢筋（16Mn）、Ⅲ级钢筋（25MnSi）、Ⅵ级钢筋（45MnSiV、40Si2MnV 和 45Si2MnTi）等。16Mn Ⅱ级钢筋被大量采用是这一时期的最大特点，改变了 Q235 Ⅰ级光面钢筋一统天下的局面，但是应用 16Mn Ⅱ级钢筋的过程中，强度实际水平总是低于标准 20MPa 左右。为满足性能要求，在 20 世纪 70 年代中后期成功研制的 20MnSi Ⅱ级钢筋取代了 16Mn，至今仍在沿用而且是钢筋混凝土用钢筋主导产品。25MnSi（俗称老Ⅲ级钢筋，屈服强度 370MPa）是原苏联的钢号，YB 171—69 将强度级别提高到 400MPa，但是因其性能不稳定、工艺性能和焊接性能差等原因没有得到市场认可。

“六五”期间，国家低合金钢科技攻关，采用微合金化、轧后余热处理等工艺手段研试成功 400MPa 新Ⅲ级钢筋，将我国混凝土用钢筋大大向前推进一步。

紧接着“七五”，又将可焊 400MPa 钢筋应用技术研究纳入低合金钢国家科技攻关，从材料、焊接、各种配筋性能等进行了全面系统的试验研究。

1991 年将 400MPa Ⅲ级钢筋纳入 GB 1499—1991，同时编制了 YB 1070—93 应用技术规程；1998 年又对 GB 1499—1991 标准进行了修订，颁布了 GB 1499—1998 标准；2005 年起又进行了新一轮的修订，除对力学性能要求和化学成分进行合理化和国际化修订外，还适时地将采用控轧控冷等新工艺生产的细晶粒钢纳入国标，这是一个重大变化。2007 年 8 月正式颁布了现行的国家标准 GB 1499.2—2007，并于 2008 年 3 月开始实施。2002 年 4 月 1 日起实施的国家标准《混凝土结构设计规范》（GB 50010—2002），明确将 HRB400 级钢筋作为我国钢筋混凝土结构的主力钢筋，进入了完善Ⅲ级钢筋性能和全面推广应用的时期。但是，这一时期是漫长而艰辛的，多年来，400MPa Ⅲ级钢筋的应用范围和用量总是不去，到目前为止，其用量只占钢筋总用量的 1/3 左右，还没有实现实质性的突破。图 1-1 从成分、工艺技术和生产设备三个角度简单地表示了我国钢筋的发展演变历程^[2]。

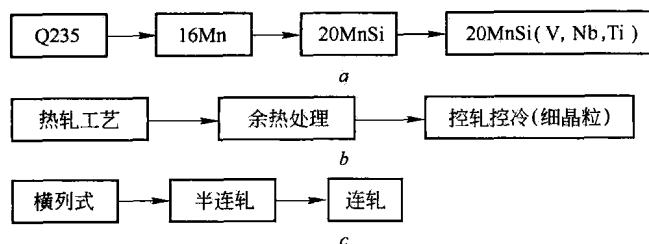


图 1-1 中国热轧钢筋发展历程

a—钢筋成分发展路线；b—工艺技术发展路线；c—生产设备发展情况

我国钢筋的发展走过了半个多世纪的历程，其品种不断扩大，工艺不断优化，质量不断提高，基本满足了我国建筑业快速发展的需要。到 21 世纪初，已发展到可生产热轧微合金带肋钢筋、余热处理带肋钢筋和细晶带肋钢筋。

1.3 我国现有热轧钢筋的品种介绍

1.3.1 我国热轧钢筋相关产品

我国现有 4 个生产工艺有差别的热轧带肋钢筋产品标准：（1）《钢筋混凝土用钢第 2 部分：热轧带肋钢筋》（GB 1499.2—2007）；（2）《钢筋混凝土用余热处理钢筋》（GB 13014—1991）；（3）《预应力混凝土用钢棒》（GB/T 5223.3—2005）；（4）《预应力混凝土用螺纹钢筋》（GB/T 20065—2006）。钢筋的牌号（代号）、化学成分和生产工艺见表 1-1，性能要求见表 1-2。

表 1-1 我国热轧带肋钢筋的化学成分和生产工艺

牌号 (代号)	执行标准	化学成分/%							生产工艺
		C	Si	Mn	P	S	C [Ⓐ] _{eq}	其 他	
HRB335	GB 1499.2— 2007	≤0.25	≤0.80	≤1.60	≤0.045	≤0.045	≤0.52	1. 钢可加入 V、Nb、Ti 等元素； 2. N ≤ 0.012%， 若有足够的固氮元 素，可适当放宽	普通热轧
HRB335F									超细晶控轧控冷
HRB335E									普通热轧
HRB400	GB 1499.2— 2007	≤0.25	≤0.80	≤1.60	≤0.045	≤0.045	≤0.54		普通热轧
HRB400F									超细晶控轧控冷
HRB400E									微合金化
HRB500	GB 1499.2— 2007	≤0.25	≤0.80	≤1.60	≤0.045	≤0.045	≤0.55		微合金化
HRB500F									超细晶控轧控冷
HRB500E									微合金化
KL400	GB 13014— 91	0.17 ~ 0.25	0.40 ~ 0.80	1.20 ~ 1.60	≤0.045	≤0.045	—	转 炉 钢 N ≤ 0.008%，吹氧复合 吹炼 N≤0.012%	淬火 + 自回火
R [Ⓑ]	GB/T 5223.3— 2005				≤0.025	≤0.025	—	Cu ≤0.025%	热轧后调质 热处理
PSB785, PSB830, PSB930, PSB1080	GB/T 20065— 2006	—	—	—	≤0.045	≤0.045			热轧或淬火 + 自回火或热处理

① $C_{eq} = C + Mn/6 + (Cr + V + Mo)/5 + (Cu + Ni)/15$ ；

② 带肋钢棒的代号为 R。

表 1-2 我国热轧带肋钢筋的性能要求

牌号(代号)	力学性能					工艺性能	
	$R_{eL}(R_{p0.2})/\text{MPa}$	R_m/MPa	$A/\%$	$A_{gt}/\%$	R_m/R_{eL}	冷 弯	反 弯
HRB335	≥ 335	≥ 455	$\geq 17^{①}$	≥ 7.5	—	$\phi 6 \sim 25\text{mm}, 180^\circ 3a$	用户有要求时才做。正弯 90° , 反弯 20° , 弯曲芯直径比冷弯的增加 $1a$
HRB335F						$\phi 28 \sim 40\text{mm}, 180^\circ 4a$	
HRB335E	$335 \sim 435.5$	≥ 455	$\geq 17^{①}$	≥ 9	≥ 1.25	$> \phi 40 \sim 50\text{mm}, 180^\circ 5a$	
HRB400	≥ 400	≥ 540	$\geq 16^{①}$	≥ 7.5	—	$\phi 6 \sim 25\text{mm}, 180^\circ 4a$	
HRB400F						$\phi 28 \sim 40\text{mm}, 180^\circ 5a$	
HRB400E	$400 \sim 520$	≥ 540	$\geq 16^{①}$	≥ 9	≥ 1.25	$> \phi 40 \sim 50\text{mm}, 180^\circ 6a$	
HRB500	≥ 500	≥ 630	$\geq 15^{①}$	≥ 7.5	—	$\phi 6 \sim 25\text{mm}, 180^\circ 6a$	
HRB500F						$\phi 28 \sim 40\text{mm}, 180^\circ 7a$	
HRB500E	$500 \sim 650$	≥ 630	$\geq 15^{①}$	≥ 9	≥ 1.25	$> \phi 40 \sim 50\text{mm}, 180^\circ 8a$	
KL400	≥ 440	≥ 600	≥ 14	—	—	$\phi 8 \sim 25\text{mm}, 90^\circ 3a$ $\phi 28 \sim 40\text{mm}, 90^\circ 4a$	—
930 级 R ^②	≥ 930	≥ 1080	25 级:	25 级: ≥ 2.5	—	—	—
1080 级 R ^②	≥ 1080	≥ 1230	≥ 5.0	($A_{200\text{mm}}$)			
1280 级 R ^②	≥ 1280	≥ 1420	35 级:	35 级: ≥ 3.5			
1420 级 R ^②	≥ 1420	≥ 1570	≥ 7.0	($A_{200\text{mm}}$)			
PSB785 ^③	≥ 785	≥ 980	≥ 7	≥ 3.5	—	—	—
PSB830 ^③	≥ 830	≥ 1030	≥ 6	≥ 3.5	—		
PSB930 ^③	≥ 930	≥ 1080	≥ 6	≥ 3.5	—		
PSB1080 ^③	≥ 1080	≥ 230	≥ 6	≥ 3.5	—		

① $\phi 28 \sim 40mm$ 钢筋 A 可降低 1%； $> \phi 40mm$ 钢筋 A 可降低 2%；

② 松弛性能：按普通松弛和低松弛分别对不同初始应力的 1000h 松弛值做了规定；

③ 松弛性能：初始应力 $0.8R_{eL}$ ，1000h 后应力松弛率 $V_r \leq 3\%$ ，在能保证的基础上可进行 10h 松弛试验， $V_r \leq 1.5\%$ 。

HRB335 钢筋是我国目前产量和用量最大的钢筋，占钢筋总产量的 60% 以上，2007 年 HRB400 钢筋的产量已增加至 3430.6 万吨，约占钢筋总产量的 33.1%，推广应用 HRB400 钢筋已是发展趋势。由于设计和施工规范不配套，HRB500 钢筋只有极少量的示范性应用，尚未推广应用，由于同样的原因，后缀带“F”的细晶粒钢筋也基本未应用。我国大部分地区处于地震多发地带，新版国家标准 GB 1499.2—2007《钢筋混凝土用钢 第 2 部分：热轧带肋钢筋》中，规定了适用于抗震结构钢筋的性能，并且规定抗震钢筋的牌号需在已有牌号后加 E。加 E 是钢筋具有抗震性能、具有高质量的标志，国内市场上牌号后加 E 的钢筋必将更受用户的欢迎。

预应力混凝土用钢棒（GB/T 5223.3—2005）中的带肋钢棒一般采用热轧后调质处理的工艺生产，规格范围为 $\phi 6 \sim 16mm$ ，主要用于预应力混凝土轨枕、工业和民用预应力结构，它与预应力钢丝相比，具有与混凝土的黏结性能好、应力松弛率低、施工方便等优点。

精轧螺纹钢筋是一种热轧成带有不连续性的外螺纹的直条钢筋，该钢筋在任意截面处

均可用带有匹配形状的内螺纹的连接器和锚具进行连接或锚固。精轧螺纹钢广泛应用于高速公路、高速铁路的大型桥梁及边坡锚固工程、核电站工程、大型水利工程、工业和民用建筑中的连续梁和大型框架结构等。它具有连接、锚固简便、黏着力强、张拉锚固安全可靠、施工方便等优点，而且节约钢筋，减少构件重量。

1.3.2 HRB335 钢筋

我国早在 20 世纪 70 年代就研制成功并推广应用 HRB335 热轧带肋钢筋（Ⅱ级钢筋），钢种为 20MnSi。1991 年颁布实施的 GB 1499—91 标准取消了 20MnSi 钢筋按直径划分强度级别的规定，而将所有规格的 20MnSi 钢筋屈服强度统一为 335MPa。目前 HRB335 热轧带肋钢筋仍占市场的主导地位，约占钢筋产量和消费量的 2/3 以上。HRB335 热轧带肋钢筋的成分简单，冶炼和轧制工艺要求不高，冷弯工艺、焊接工艺等使用技术成熟，因此，多年来其钢种、生产工艺和使用技术几乎没有变化，应用非常广泛。

生产 HRB335 钢筋时，遇到的常见质量问题有成分不均匀、轧材表面裂纹、屈服点不明显和脆断等。钢水成分的均匀性主要受合金的加入方式、合金的块度、钢包透气砖的安装位置以及吹氩搅拌时间的长短等影响，最终影响到钢筋的质量^[3]。屈服点不明显和脆断是 HRB335 钢筋生产中较为常见的问题，单纯的屈服点不明显并不是严重的质量问题，检测时可用规定非比例延伸强度 $R_{p0.2}$ 代替屈服强度，但当屈服点不明显伴随伸长率降低甚至发生脆断时，就会影响到钢筋的质量。钢筋中残余元素 Cr、Mo 和 Ni 能够提高钢的淬透性，当它们含量较高时，在正常轧制工艺下，钢筋组织中的上贝氏体含量超过 20% 时便会出现屈服不明显的现象^[4]；如轧制温度过低，回复和再结晶不足以消除轧制硬化过程产生的应力，将导致屈服点消失^[5]；异常组织贝氏体、魏氏体及马氏体的大量出现是造成钢筋屈服不明显的主要原因，这主要是不合理的轧制冷却工艺所造成；钢中的 C、N 等间隙元素成分也是造成屈服不明显的另一个原因。因此，要控制好钢水成分、热加工温度以及冷却速度。钢中亚表层的夹杂物是造成钢筋表面纵向裂纹的原因之一^[6]，而夹杂物大小和数量主要取决于钢中的氧含量，故而提高钢水纯净度、均匀性，优化成分、轧制工艺是解决各种问题、提高钢筋各项性能的重要措施。

关于 HRB335 的文献多集中于分析解决实际生产中出现的问题，涉及其成分优化和工艺革新的工作较少。HRB335 钢筋被广泛而持续地使用了 30 多年，设计、建设单位都习惯于使用 HRB335 钢筋，不愿承担使用 HRB400 的风险，尽管 HRB400 性能优良，但推广应用 HRB400 钢筋的道路还是漫长而艰难，故 HRB335 钢筋的统治地位仍要持续若干年。即使 HRB400 钢筋成为主导产品后，HRB335 钢筋仍是建筑行业有益的补充建筑材料，在一些对排筋密度有严格要求的工程中，如地铁、隧道、桥梁等工程，HRB335 钢筋仍然可以应用。所以，仍有必要针对 HRB335 钢筋做一些研究工作，借助新工艺、新技术，优化其成分和生产工艺，可以在保证和提高产品质量性能的同时进一步降低其生产成本。通钢^[7]在 17 架连轧机的设备基础上，控制化学成分中下限，采用在粗轧机组（7 架）进行奥氏体再结晶轧制，而在中轧前后加入水冷装置，降低轧件温度，精轧（6 架）区间保证轧机正常工作情况下采用低温高压下工艺，能显著细化晶粒，获得各方面性能优良的 HRB335 钢筋。福建三钢^[8]通过对 HRB335 钢筋进行力学性能测定和化学成分分析，找出其间的回归关系，在此基础上优化了钢种成分：碳含量平均值提高约 0.015%，同时硅含量和锰含

量分别降低 0.1%，可产生年效益 800 万元。新疆八一钢厂^[9]利用高速线材轧机的控冷工艺优势，优化 HRB335 成分，平均锰含量控制在 1.205%，可生产出合格 HRB335 高线盘条。由此看来，在中国对产量和消费量都很大的钢筋做些进一步的优化研究工作既可行又意义重大。另外，2007 年新版国家标准 GB 1499.2—2007 中对各牌号钢筋的化学成分只规定了上限，这为进一步提高钢筋性能和降低生产成本而开展研究工作提供了一个契机，拓宽了工作的空间。

1.3.3 HRB400 钢筋

目前，中国推广应用屈服强度 400MPa 级的 HRB400 高强度钢筋已是发展趋势，HRB400 钢筋具有以下优点：

- (1) 强度高，性能稳定，并具有优良的工艺性能，适应各种施工工艺。
- (2) 由于 400MPa 钢筋碳当量相对较低，因而具有良好的焊接性能。
- (3) 钢筋实测强屈比 $R_m/R_{eL} \geq 1.25$ ，具有良好的抗震性能，有利于易地震地区建筑物的使用。
- (4) 建筑设计规范中钢筋强度设计值由 II 级钢筋的 310MPa 提高到 III 级钢筋的 360MPa，在一般钢筋混凝土结构工程中，III 级钢筋比 II 级钢筋节约钢材 12% ~ 14%，且提高了建筑物的安全性能，因此不仅具有显著的经济效益，而且具有显著的社会效益，对促进我国建筑业的发展具有重要意义。

近年来，由于国家政策的引导和市场需求的推动作用，及冶金新技术新理论的出现，为国内多数钢厂和科研院所在开展 HRB400 试验研究上创造了条件，HRB400 钢筋的研究和推广应用工作出现了遍地开花的局面。中国各大钢厂多以微合金化的方法生产 HRB400 钢筋，设备采用较先进的半连轧、全连轧生产线。微合金化方法主要采用钒和铌，其质量分数随钢筋规格的变大而提高。加入合金种类主要是 VN、FeV 和 FeNb 合金。由于氮在钢中能够明显促进钒的析出，提高有效钒的数量，采用 VN 微合金化比采用 FeV 可节约 30% 以上的钒。钒微合金化钢筋采用 VN 合金化时钒含量处于 0.03% ~ 0.08% 的水平，而用 FeV 则要高 0.01% ~ 0.03%；比较来看，用铌微合金化时用量有所降低，通常为 0.02% ~ 0.05%。但是，铌微合金化钢易出现连铸坯裂纹和造成屈服点不明显等问题，对轧制工艺有苛刻要求。经过近几年的研究，这些问题通过采取微钛处理、连铸二冷工艺优化和控轧控冷工艺优化等已得到很好地解决。对于通过控轧控冷工艺形成的细晶粒钢筋，目前还基本上处于实验室研究和工业性试生产阶段。王瑞珍等人^[10]用成分为 C 0.18%、Si 0.22%、Mn 0.60% 的低碳碳素钢，在 850℃ 或更低温度以较大的变形量可获得 10 ~ 20 μm 的奥氏体晶粒尺寸，随后加以 20℃/s 或更大的冷却速度冷却时，便可得到 4 ~ 6 μm 或更细小的铁素体，从而明显提高钢筋的力学性能。较低的轧制温度和大变形量对轧机提出了更高的要求，细晶粒钢筋对焊接工艺的要求也非常严格，这都限制了细晶粒钢筋的推广应用。如果轧制设备允许，使用中采用机械连接，则通过控轧控冷生产细晶粒钢筋是一种非常具有成本优势和获得良好性能钢筋的生产工艺。这也是在最近颁布的 GB 1499.2—2007 中将细晶粒钢筋纳入其中的一重要原因，各方应进一步开展工作，加快细晶粒钢筋的工业化生产和推广应用。

1.3.4 HRB500 钢筋

HRB500Ⅳ级钢筋是中国标准 GB 1499.2—2007 中强度等级最高的热轧钢筋，可满足现代建筑对高强度、高安全性的需求。标准规定 HRB500 既要有较高的强度 ($R_{eL} \geq 500\text{MPa}$, $R_m \geq 630\text{MPa}$)，又要保证良好的塑性 ($A_{gt} \geq 7.5\%$)，对于有抗震性要求的钢筋还要求抗震性能 ($R_m/R_{eL} \geq 1.25$ ，而 $R_{eL}^0/R_{eL} \leq 1.30$, $A_{gt} \geq 9\%$)。国内马钢等单位根据国标要求和我国钒资源优势，已成功研制出了 HRB500Ⅳ级钢筋，并获得了国家颁发的生产许可证。

HRB500 钢筋具有良好的经济效益和社会效益，用它取代 HRB335 钢筋可节约用量 28% 以上，取代 HRB400 钢筋可节约 14% 以上的用量。不仅节约了钢材，而且节约了能源，且缓解了电力、运输等相关行业的压力和减少了烟气、粉尘等污染物的排放。然而，在推广应用 HRB500 钢筋的过程中将比推广应用 HRB400 钢筋面临更大的困难：(1) 在混凝土结构设计规范中并没有将 HRB500 纳入规定，也就是说从遵守规范的原则出发，建筑结构中是不设计和使用 HRB500 钢筋的；(2) HRB500Ⅳ级钢筋仍处于研制和试生产阶段，工艺有待进一步完善和优化。对比国外钢筋的发展历程看，使用高强度级别钢筋是建筑业发展的需求和趋势。HRB500 钢筋在中国钢筋混凝土结构中广泛使用只是个时间问题，在这个历程中，有必要为进一步完善标准和规范的制定、建设示范工程等工作而做好技术储备。

1.4 热轧带肋钢筋的性能要求

1.4.1 钢筋的性能要求

钢筋的性能要求包括：

(1) 屈服强度或规定非比例延伸强度。屈服强度或规定非比例延伸强度决定了混凝土结构的承载力及安全度，使用高强钢筋，可节约钢材、提高结构的承载力及安全度。但高应力伸长变形加大影响构件的刚度裂缝。

(2) 延性。延性影响破坏形态——脆断倒塌或以柔克刚。钢筋从承载受力到屈服、强化、极限而被拉断的应力-应变全曲线 (σ - ε 本构关系) 的简化表达如图 1-2 所示。不同钢筋的本构关系差别很大：延性的软钢（实线）和脆性的硬钢（虚线）具有完全不同的形态。

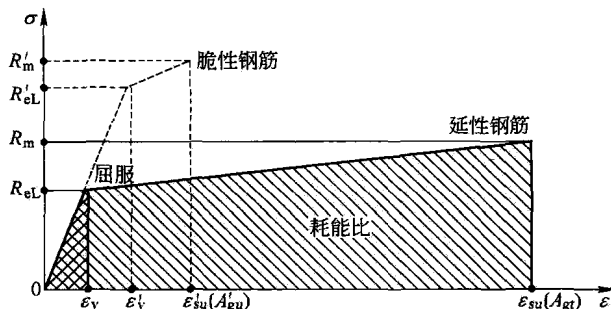


图 1-2 钢筋的应力-应变曲线（本构关系）