

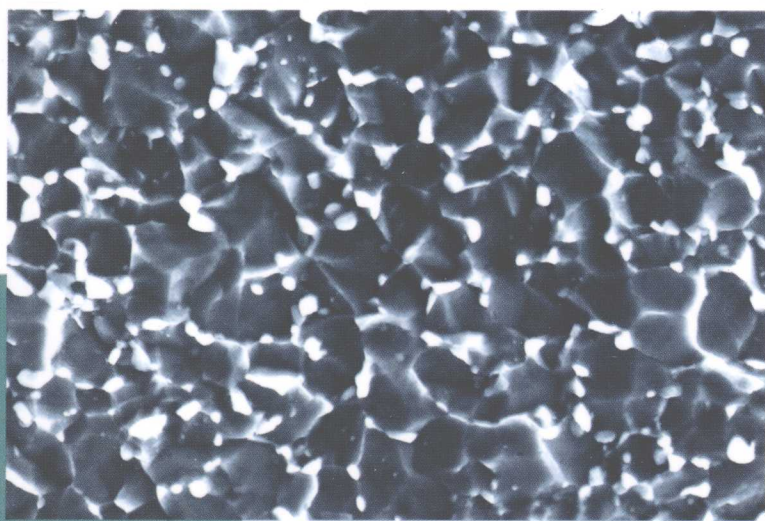


特殊钢 丛书

Special Steel Book Series

高强度紧固件用钢

惠卫军 翁宇庆 董瀚 编著



冶金工业出版社
Metallurgical Industry Press

特 殊 钢 丛 书

高强度紧固件用钢

惠卫军 翁宇庆 董 瀚 编著

北 京

冶金工业出版社

2009

内 容 简 介

本书在简要介绍高强度紧固件及其用钢的概况和冶金生产工艺的基础上,重点从钢种特点、设计、性能及其应用和发展趋势等方面介绍了耐延迟断裂高强度螺栓钢、高强度螺栓用硼钢、高强度螺栓用冷作强化非调质钢、高强度螺栓用热轧双相冷锻钢等,此外还介绍了在线软化处理高强度螺栓钢的技术及其工业应用。

本书可供从事钢铁材料研究、生产的科技人员和材料应用的工程技术人员阅读,也可供大专院校相关专业师生参考。

图书在版编目(CIP)数据

高强度紧固件用钢 / 惠卫军, 翁宇庆, 董瀚编著. —北京:
冶金工业出版社, 2009.8

(特殊钢丛书)

ISBN 978-7-5024-5012-0

I. 高… II. ①惠… ②翁… ③董… III. 高强度钢
IV. TG142.7

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2009) 第 142825 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 postmaster@cnmip.com.cn

策划编辑 杨传福 张 卫

责任编辑 张爱平 美术编辑 李 新 版式设计 张 青

责任校对 王贺兰 责任印制 牛晓波

ISBN 978-7-5024-5012-0

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

2009 年 8 月第 1 版, 2009 年 8 月第 1 次印刷

169mm×239mm; 20.5 印张; 385 千字; 313 页; 1-2000 册

65.00 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

(本书如有印装质量问题, 本社发行部负责退换)

《特殊钢丛书》

编辑委员会

主 编 徐匡迪

编 审 刘嘉禾 杨树森

编 委 （按姓氏笔画为序）

马绍弥 王一德 王洪发 王剑志 兰德年

刘正东 刘 宇 刘 苏 刘振清 孙开明

李士琦 李正邦 李依依 李国忠 李鹤林

张晓刚 陈 列 陈国良 陈思联 林慧国

洪及鄙 钱 刚 殷国茂 董学东 董 瀚

谢 蔚

《特殊钢丛书》序言

特殊钢是众多工业领域必不可少的关键材料，是钢铁材料中的高技术含量产品，在国民经济中占有极其重要的地位。特殊钢材占钢材总量比重、特殊钢产品结构、特殊钢质量水平和特殊钢应用等指标是反映一个国家钢铁工业发展水平的重要标志。近年来，在我国社会和经济快速健康发展的带动下，我国特殊钢工业生产和产品市场发展迅速，特殊钢生产装备和工艺技术不断提高，特殊钢产量和产品质量持续提高，基本满足了国内市场的需求。

目前，中国经济已进入重工业加速发展的工业化中期阶段，我国特殊钢工业既面临空前的发展机遇，又受到严峻的挑战。在机遇方面，随着固定资产投资和汽车、能源、化工、装备制造和武器装备等主导产业的高速增长，全社会对特殊钢产品的需求将在相当长时间内保持在较高水平上。在挑战方面，随着工业结构的提升、产品高级化，特殊钢工业面临着用户对产品品种、质量、交货时间、技术服务等更高要求的挑战，同时还在资源、能源、交通运输短缺等方面需应对日趋激烈的国内外竞争的挑战。为了迎接这些挑战，抓住难得发展机遇，特殊钢企业应注重提高企业核心竞争力以及在资源、环境方面的可持续发展。它们主要表现在特殊钢产品的质量提高、成本降低、资源节约型新产品研发等方面。伴随着市场需求增长、化学冶金学和物理金属学发展、冶金生产工艺优化与技术进步，特殊钢工业也必将日新月异。

从 20 世纪 70 年代世界第一次石油危机以来，工业化国家的特殊钢生产、产品开发和工艺技术持续进步，已基本满足世界市场需求、资源节约和环境保护等要求。近年来，在国家的大力支持下，我国科研院所、高校和企业的研发人员承担了多项国家科技项目工作，在特殊钢的基础理论、工艺技术、产品应用等方面也取得了显著成绩，特别是近 20 年来各特钢企业的装备更新和技

术改造促进了特殊钢行业进步。为了反映特殊钢技术方面的进展,中国金属学会特殊钢分会、先进钢铁材料技术国家工程研究中心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新的《特殊钢丛书》,它是已有的由中国金属学会特殊钢分会组织编写《特殊钢丛书》的继续。由国内学识渊博的学者和生产经验丰富的专家组成编辑委员会,指导丛书的选题、编写和出版工作。丛书编委会将组织特殊钢领域的学者和专家撰写人们关注的特殊钢各领域的技术进展情况。我们相信本套丛书能够在推动特殊钢的研究、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特殊钢生产和使用的技术基础,也可对相关大专院校师生提供教学参考。本套丛书将分卷撰写,陆续出版。丛书中可能会存在一些疏漏和不足之处,欢迎广大读者批评指正。

《特殊钢丛书》编委会主编

中国工程院院长

徐匡迪

2008年夏

前言

紧固件的使用已有两千多年的历史。在三大基础零部件中，紧固件的应用量最大，应用面最广，其应用在我们的日常生活中随处可见。在各工业部门的全部生产过程中，约有 60% 的工时是消耗在装配和紧固上。

与被连接的各种结构件相比，紧固件往往很小，历史上因紧固件质量问题所造成的损失许多是灾难性的，其重要性不言而喻。如航空史上罕见的 1985 年发生的 520 人丧生的客机失事惨案便是由于一架波音 747 客机尾翼上的 850 个紧固件中有一部分存在严重的质量问题，造成尾翼破坏而导致飞机坠毁。大量血的教训和巨大的物资损失促使人们开始重视紧固件这种随处可见又随处可用，且一向被忽视的通用零件。为此，美国政府 1990 年由当时的总统乔治·布什签署了《紧固件质量保证法》。这表明，小小的紧固件必须引起人们足够的重视，也使设计师们必须认识到：许多机械的紧固问题同样是设计的关键之一。

在《紧固件机械性能——螺栓、螺钉和螺柱》(GB/T 3098.1—2000) 中，螺栓、螺钉和螺柱等的性能等级共分为 10 个级别，其中 8.8 级及其以上为高强度紧固件。高强度紧固件的应用和发展对现代机械的紧凑小型化、轻量化、高性能化及提高结构工程的连接强度起着重要的作用。高强度紧固件的承载能力、使用寿命比中、低强度紧固件高得多。高强度紧固件通常采用中碳钢或中碳合金钢来制造，成品紧固件需进行淬火和回火处理，也可选用其他钢种来制造。随着现代汽车、机械、建筑、轻工等各个生产部门的发展，对制造各类紧固件（如螺栓、螺钉、螺母等）使用的材料提出了更高设计应力和轻量化的要求，这其中最有效的措施便是紧固件用钢的高强度化。然而，延迟断裂是紧固件用钢高强度化时必须首先克服的难题。在 20 世纪末，日本、韩国和我国分别投入巨资重点实施的“超级钢计划”、“高性能结构钢计划”和“新一代钢铁材料的重大基础研究”中，1500 MPa 级

耐延迟断裂高强度结构（螺栓）钢的研究均是其中的一个重要课题。这足以表明国际上对此问题的重视程度。

钢铁研究总院自 1997 年起负责承担了“973”项目“新一代钢铁材料的重大基础研究”中的 1500 MPa 级合金结构钢课题（G1998061503），重点从纯净度、晶粒细化、微观组织和控制氢陷阱等方面对高强度钢的延迟断裂行为进行了大量的基础研究。我们通过大量实验探索，发现通过合理地控制钢的晶粒尺寸、强化晶界和控制氢陷阱能够在钢的强度显著提高、同时具有良好塑性和韧性的基础上，明显地改善高强度钢的耐延迟断裂性能。在理论研究的基础上，提出了解决高强度钢延迟断裂问题的创新性思路，并成功地设计出 1300~1600 MPa 级的新一代耐延迟断裂高强度结构钢 ADF 系列及其制造技术，建立中国自己的耐延迟断裂高强度结构钢系列，填补了国内空白，获得了 6 项国家发明专利。随后在负责承担的国家“十五”科技攻关计划课题“新一代高强度螺栓钢研究与开发”（2002BA314B08）中，重点对 ADF 系列钢的冶金生产和应用技术进行了大量的研究工作。独特的设计思路使得 ADF 系列钢满足现行的冶金、螺栓生产工艺流程。其冶金生产工艺成熟，质量稳定。采用 ADF 系列钢开发的多种高强度螺栓首先于 2003 年在南京依维柯汽车公司投入工业化批量生产应用，累计装车近 10 万辆，使用性能良好；近年来在雷诺大功率发动机、五十铃汽车发动机等方面也得到应用。在某军工重点型号上，ADF 钢制的多种 13.9 级螺栓已正式定型和批量应用。

除紧固件用钢的高强度化外，进一步提高其经济性也是一个十分重要的发展方向。对此，国内外先后开发了中低碳硼钢、冷作强化非调质钢、双相钢等钢种，用来制造各种高强度紧固件。钢铁研究总院自 20 世纪 80 年代起，便紧跟国际上的发展趋势，在国家科技攻关计划（编号 75-28-01-07）的支持下，在国内开展了冷作强化非调质钢的研发工作，先后开发了 LF20Mn2V、18Mn2V 等钢种，用来制造 U 形螺栓等。近年来，我们在国家“863”计划（编号 2005AA001110）的支持下，与马鞍山钢铁股份公司合作，采用微合金化与低温热机械轧制相结合的技术路线，成功地开发出具有超细铁素体+退化珠光体组织的新型冷作强化非调质钢 MFT8，用来制造 8.8 级高强度紧固件。该钢种既

解决了传统非调质钢线材塑性和冷加工性较差的难题，又具有良好的经济性。目前，在国家科技支撑计划（编号 2007BAE30B04）的支持下，正在与马鞍山钢铁股份公司合作，开展新型贝氏体型冷作强化非调质钢线材的研发。

紧固件主要靠冷锻成形，采用传统工艺生产的冷锻钢线材需在冷锻前进行耗时耗能的球化退火处理。因此，紧固件生产厂家多年来一直迫切要求冶金企业开发可省略球化退火的在线软化的冷锻钢线材。我们与马钢合作，在国家“863”计划课题（2003AA331030）的支持下，在钢铁研究总院等单位在低碳钢控轧控冷技术基础研究过程中提出的形变诱导铁素体相变（DIFT）理论的基础上，创造性地将该理论应用到中碳钢，系统地研究了中碳钢的形变诱导相变规律，提出了低温热机械轧制在线球化碳化物的模型和技术路线；并结合化学成分优化，在国际上率先成功地开发出 8.8 级在线软化免退火的高性能中碳冷锻钢盘条新产品 35K-M 和简化软化退火处理的中碳合金钢 SCM435。该项成果已稳定地应用于生产，已批量生产出在线软化处理的高性能低成本冷锻钢热轧盘条 20 多万 t，经济和社会效益显著，项目获得了 2007 年安徽省科学技术一等奖。该项目所开发的技术原理可推广到轴承钢、齿轮钢、其他合结钢等要求软化退火的钢类，具有广阔的应用前景。

本书正是在上述主要研发工作的支撑下，结合国内外高强度紧固件用钢的研究开发情况，将我们近 20 年来的研发工作进行了较系统的归纳总结，这是本书的核心和重点；同时还对其他一些较重要的钢类进行了归纳介绍。本书共 8 章，前 3 章为高强度紧固件用钢一般特征、冶金生产及其性能特征的总体介绍，随后 4 章则按钢类进行了介绍，最后一章介绍了高强度紧固件用钢的软化处理技术。第 1 章介绍了高强度紧固件及其用钢的发展概况；第 2 章简要介绍了高强度紧固件用钢的冶炼、轧制等冶金生产技术；第 3 章则在归纳总结了高强度螺栓受力特征及其性能要求的基础上，重点分析了冷锻性能、疲劳性能及延迟断裂性能的特点、主要影响因素和实验评估方法等；第 4 章从断裂力学、微合金化理论、晶界强化理论综合应用和分析的基础上，归纳出高强度螺栓钢的抗延迟断裂关键技术，并开发出新的耐延迟断裂高强

度螺栓钢系列;第5章首先从硼钢的淬透性、晶粒尺寸控制、冷加工性、常规力学性能、延迟断裂性能、疲劳性能等方面介绍了硼钢性能特征,随后介绍中低碳硼钢成分的设计原则及其应用情况;第6章介绍了冷作强化非调质钢冷变形的主要影响因素、冷变形对微观组织和性能的影响及其冷变形后螺栓的时效处理过程中的组织和性能变化,介绍了铁素体+珠光体型和贝氏体型冷作强化非调质钢的成分设计、国内外开发钢种的性能特征及其工业应用情况;第7章介绍了热轧双相冷锻钢的成分设计、力学性能及其主要影响因素、国内外开发的钢种及其工业应用;第8章介绍了碳化物的球化机制及其主要影响因素、碳化物的常规球化退火工艺及加速球化退火处理的技术及中碳钢的在线软化退火处理技术。

目前国际上还未见关于高强度紧固件用钢方面的专著。本书力求在归纳、总结我们多年来高强度结构钢研发工作的基础上,把常用的高强度紧固件用钢的基本情况、当前进展及发展趋势做一个较全面的分析,但由于编者的水平有限,本书的论述肯定有不少不足与值得商榷之处,衷心希望读者批评和指正。

本书中的研究工作和写作过程得到了钢铁研究总院、先进钢铁材料技术国家工程研究中心特别是作者所在合金结构钢研究室研发团队的大力支持鼓励及提供相应的工作条件和经费支持。特别感谢陈思联、时捷、王毛球等的支持与参与。本书中的工业生产和应用研究工作得到了东北特钢集团、马鞍山钢铁股份公司、第一汽车集团、东风汽车有限公司、南京依维柯汽车公司和泉州威兰汽车零部件有限公司等的大力支持和紧密合作,特别要感谢赵秀明、滕力宏、高惠菊、张宇、苏世怀、孙维、于同仁、朱云明、熊云奇、卢海波、庄雄辉、邱建喜等的热情支持和密切合作。在本书的写作过程中,与雍岐龙教授等进行了有益的讨论。本书还得到了各钢厂和紧固件制造行业朋友的帮助,在此一并表示衷心的感谢。

作 者

2009年5月

目 录

1 绪论	1
1.1 高强度紧固件及其用钢概况	1
1.2 高强度紧固件的发展概况	3
1.3 国内外生产需求情况	4
参考文献	5
2 高强度紧固件用钢的冶金生产	6
2.1 高强度紧固件用钢的冶炼和浇铸技术	6
2.2 高强度紧固件用钢的轧制技术	8
2.2.1 精密轧制	8
2.2.2 无表面缺陷轧制	9
2.2.3 控制轧制和控制冷却	11
参考文献	12
3 高强度螺栓及其用钢的性能特征	13
3.1 高强度螺栓的受力特征及其性能要求	13
3.2 冷墩性能	13
3.2.1 冷墩性能的评价方法	14
3.2.2 冷墩性能的主要影响因素	21
3.3 疲劳性能	28
3.3.1 螺栓疲劳断裂的特点	28
3.3.2 螺栓疲劳性能试验方法	30
3.3.3 影响螺栓疲劳性能的主要因素	30
3.4 耐延迟断裂性能	32
3.4.1 延迟断裂的概念与特征	33
3.4.2 氢与高强度钢的延迟断裂行为	36
3.4.3 延迟断裂的主要影响因素	40
3.4.4 高强度钢的延迟断裂机理	45
3.4.5 延迟断裂敏感性的评价方法	48

参考文献	56
4 耐延迟断裂高强度螺栓钢	63
4.1 概述	63
4.2 改善高强度钢耐延迟断裂性能的关键技术	64
4.2.1 组织细化	64
4.2.2 微合金化处理	79
4.2.3 晶界强化	97
4.2.4 合金元素钼的应用	109
4.3 耐延迟断裂高强度螺栓钢的开发	119
4.3.1 耐延迟断裂高强度螺栓钢开发时通常采取的措施	119
4.3.2 耐延迟断裂高强度螺栓钢的国内外开发概况	119
4.3.3 ADF 系耐延迟断裂高强度螺栓钢的开发及其性能特征	121
参考文献	143
5 高强度螺栓用硼钢	153
5.1 概述	153
5.2 硼钢的性能特征	153
5.2.1 硼钢的淬透性	153
5.2.2 硼钢的晶粒尺寸控制	156
5.2.3 硼钢的冷加工性	159
5.2.4 硼钢的常规力学性能	161
5.2.5 硼钢的耐延迟断裂性能	163
5.2.6 硼钢的疲劳性能	168
5.3 高强度螺栓用硼钢的设计及其应用	170
参考文献	175
6 高强度螺栓用冷作强化非调质钢	177
6.1 概述	177
6.2 冷作强化非调质钢的设计	179
6.2.1 设计原则	179
6.2.2 热轧线材的强度和塑韧性控制	180
6.2.3 7T 级、8.8 级和 9.8 级螺栓用冷作强化非调质钢的设计	188
6.2.4 10.9 级螺栓用冷作强化非调质钢的设计	194
6.3 冷作强化非调质钢的冷变形	197

6.3.1 冷变形性的主要影响因素	197
6.3.2 冷变形对微观组织结构的影响	199
6.3.3 冷变形对性能的影响	205
6.4 冷作强化非调质钢制螺栓的时效处理	218
6.4.1 微观组织的变化	218
6.4.2 力学性能的变化	219
6.4.3 时效处理温度的选择	222
6.5 冷作强化非调质钢的性能特征及其工业应用	223
6.5.1 7T 级、8.8 级和 9.8 级螺栓用冷作强化非调质钢	224
6.5.2 10.9 级和 12.9 级螺栓用冷作强化非调质钢	225
6.5.3 冷作强化非调质钢制螺栓的应用性能	226
6.5.4 冷作强化非调质钢制造高强度螺栓的经济性分析	232
参考文献	234
7 高强度螺栓用热轧双相冷锻钢	237
7.1 概述	237
7.2 双相钢的组织特征及生产方法	238
7.3 热轧双相冷锻钢的成分设计	239
7.3.1 热轧双相冷锻钢的碳含量	239
7.3.2 热轧双相冷锻钢的合金化	241
7.4 双相钢的力学性能及其主要影响因素	246
7.4.1 双相钢强韧性的特点	246
7.4.2 马氏体含量的影响	247
7.4.3 马氏体碳含量的影响	248
7.4.4 马氏体形态及分布的影响	250
7.4.5 铁素体状态的影响	251
7.4.6 回火的影响	252
7.4.7 冷拔变形和时效的影响	255
7.4.8 包辛格效应	257
7.5 热轧双相冷锻钢的开发及其应用	257
参考文献	262
8 高强度螺栓钢的软化退火处理	264
8.1 概述	264
8.2 碳化物球化的机制	264

8.2.1 片层状珠光体球化理论	265
8.2.2 碳化物颗粒的球化长大理论	267
8.3 影响碳化物球化的主要因素	269
8.3.1 化学成分的影响	269
8.3.2 原始组织的影响	269
8.3.3 加热温度与保温时间的影响	270
8.3.4 冷却速度的影响	271
8.3.5 残留碳化物的影响	271
8.4 碳化物球化退火工艺	272
8.4.1 常规球化退火工艺	272
8.4.2 加速球化退火处理技术	274
8.5 在线软化处理技术	288
8.5.1 在线软化处理技术的基本考虑	288
8.5.2 在线软化处理技术的前期探索	289
8.5.3 在线软化处理技术的实验室研究	293
8.5.4 在线软化处理技术的工业应用	306
参考文献	307
名词术语	311

1 绪 论

1.1 高强度紧固件及其用钢概况

紧固件或称标准件、标准紧固件，是一种用途极为广泛的机械基础零部件，其主要作用是连接和紧固。紧固件通常包括：螺栓、螺柱、螺母、螺钉、垫圈、销、自攻螺钉、挡圈、铆钉、组合件等十几个类别，有标准的、非标准的多种形式。由于紧固件规格、几何形状、材料的不同，紧固件的总数已达 50 多万种。

人类自开始制造工具的时候起，就面临连接问题。紧固件的使用已有两千多年的历史。20 世纪以来，生产力迅猛发展，紧固件的生产和使用发展到一个新的水平，从而为紧固件的通用化、标准化和专业化奠定了物质基础。紧固件和连接技术的研究，已经成为专门的学科；紧固件的生产已经形成专门的行业，成为机械工业中的一个重要组成部分。

紧固件是一种非常重要而又量大面广的基础件，其应用随处可见。据统计，约有 70% 的被连接件和组合装置是由紧固件连接的，而在各工业部门的全部生产过程中，约有 60% 的工时是消耗在装配和紧固上。如一部汽车所使用的紧固件有 2000 多个（占汽车成本的 3%~4% 左右），一架洛克霍德 C5A 运输机需用 226 万多个紧固件，一辆坦克需用 7000 多个紧固件^[1]。

紧固件虽小，但其重要性却不言而喻。若紧固件质量不合格，所造成的损失往往是灾难性的，如在 20 世纪 80 年代初期，美国通用汽车公司由于安装在轿车底部控制架上的两个 12.9 级螺栓发生了延迟断裂，前后发生了 27 次交通事故，最终在 640 万辆轿车上不得不用 10.9 级螺栓更换了这两种螺栓，为此耗资 7000 多万美元。1985 年 8 月日本航空公司一架波音 747 客机由于飞机尾翼上 850 个螺栓中有一部分存在质量问题，造成尾翼破坏而失事，造成航空史上罕见的 520 人丧生的惨案。对此，当时全世界 74 家航空公司对共 608 架飞机的 35.3 万个螺栓进行了更换，其工作量和经济损失十分惊人。鉴于质量低劣的紧固件所造成的巨大损失，美国政府 1990 年特意颁布了《紧固件质量保证法》^[1]。

按 GB/T 3098.1—2000《紧固件机械性能——螺栓、螺钉和螺柱》的规定，螺栓、螺钉和螺柱等的性能等级分为 3.6、4.6、4.8、5.6、5.8、6.8、

8.8、9.8、10.9、12.9 共 10 个级别，其中 6.8 级以下为常用紧固件，8.8 级以上为高强度紧固件（习惯上多称为高强度螺栓）。上述性能等级中的第一部分数字（“.” 前）表示公称抗拉强度 R_m 的 1/100，第二部分数字（“.” 后）表示公称屈服强度 R_{eL} 或 $R_{p0.2}$ 与 R_m 比值（屈服比）的 10 倍，这两部分数字的乘积为公称屈服强度 R_{eL} 或 $R_{p0.2}$ 的 1/10。各性能等级的最小屈服强度和最小抗拉强度应等于或大于其公称值。

紧固件用钢按紧固件成品生产工艺路线又可分为非热处理型、调质型、非调质型及表面硬化型。6.8 级以下的紧固件多选用非热处理型中碳和低碳钢制造，成品紧固件无需淬火回火处理。高强度紧固件用钢通常为调质型中碳钢或中碳合金钢制造，成品紧固件需进行淬火回火处理，也可选用非调质钢、硼钢、F-M 双相钢或低碳马氏体钢^[2]。表面硬化型钢为低碳钢和低合金钢（ML18A、ML20Cr 等），主要用于制造自攻螺钉和紧固螺钉，成品螺钉需经渗碳、渗氮等表面硬化处理^[3]。表 1-1 为各级别紧固件通常可选用的钢类，表 1-2 为 GB/T 3098.1—2000《紧固件机械性能——螺栓、螺钉和螺柱》中规定的各高强度等级紧固件适用的材料。

表 1-1 不同级别紧固件通常选用的钢类

级 别	3.6	4.6	5.6	4.8	5.8	6.8	8.8	9.8	10.9	12.9
低碳钢	○	○	○	○	○					
中碳钢			○	○	○	○	○			
硼 钢						○	○	○	○	
非调质钢						○	○	○	○	
低合金钢							○	○	○	○
合金钢									○	○

表 1-2 GB/T 3098.1—2000 规定的各高强度等级紧固件适用的材料

强度区分	材料和热处理	化学成分（质量分数）/%					回火 温度/℃ 最小
		C		P	S	B	
		最小	最大	最大	最大	最大	
8.8 ^②	低碳合金钢（如硼或锰或铬），淬 火并回火或中碳钢，淬火并回火	0.15 ^②	0.35	0.035	0.035	0.003	425
		0.25	0.55	0.035	0.035		
9.8	低碳合金钢（如硼或锰或铬），淬 火并回火或中碳钢，淬火并回火	0.15 ^②	0.35	0.035	0.035	0.003	425
		0.25	0.55	0.035	0.035		
10.9 ^{③,④}	低碳合金钢（如硼或锰或铬），淬 火并回火	0.15 ^②	0.35	0.035	0.035	0.003	340

续表 1-2

强度区分	材料和热处理	化学成分（质量分数）/%					回火 温度/℃ 最小
		C		P	S	B	
		最小	最大	最大	最大	最大	
10.9 ^⑤	中碳钢，淬火并回火或低、中碳合金钢（如硼或锰或铬），淬火并回火或合金钢，淬火并回火 ^⑥	0.25	0.55	0.035	0.035	0.003	425
		0.20 ^⑦	0.55	0.035	0.035		
		0.20	0.55	0.035	0.035		
12.9 ^{⑤,⑥,⑦}	合金钢，淬火并回火 ^⑥	0.28	0.50	0.035	0.035	0.003	380

- ① 为保证良好的淬透性，螺钉直径超过 20 mm 的紧固件，需采用对 10.9 级规定的钢；
- ② 碳含量低于 0.25%（桶样分析）的低碳硼合金钢的锰最低含量：8.8 级为 0.6%；9.8、10.9 和 10.9 级为 0.7%；
- ③ 该成品应在性能等级代号下增加一横线标志；
- ④ 用于该性能等级的材料应具有良好的淬透性，以保证紧固件螺纹截面的芯部在淬火后、回火前获得约 90% 的马氏体组织；
- ⑤ 合金钢至少应含有以下元素中的一种元素，其最小含量为： $w(\text{Cr})$ 为 0.30%； $w(\text{Ni})$ 为 0.30%； $w(\text{Mo})$ 为 0.20%； $w(\text{V})$ 为 0.10%；
- ⑥ 考虑承受抗拉应力，12.9 级的表面不允许有金相组织能测出的白色磷聚集层；
- ⑦ 该化学成分和回火温度尚在调查研究中。

1.2 高强度紧固件的发展概况^[1,4]

高强度化是材料研究和开发的永恒主题。高强度螺栓连接是继铆接、焊接之后发展起来的一种新型连接形式，它具有承载能力高、受力性好、耐疲劳、不松动、较安全及施工简便、可拆换等优点。以下以钢结构、桥梁等用高强度紧固件为例，简要介绍其发展概况。

美国在世界上最早使用高强度螺栓。早在 1938 年，美国就在桥梁维修中首次使用了高强度螺栓。1947 年美国成立了“铆钉连接和螺栓连接委员会”，1951 年该委员会制定了《高强度螺栓连接施工规范》，后来在 1954 年又做了修改，至 1960 年形成了《结构连接用 ASTM A325 螺栓标准》。在 1962 年修订标准时，对抗拉强度 80 kg（784 MPa）级的 A325 和 100 kg（980 MPa）级的 A490 螺栓做了规定。1964 年，除 A325 螺栓外，用高强度钢制造的 90～110 kg（882～1078 MPa）级螺栓也被纳入 ASTM A490 标准。

1953 年联邦德国开始高强度螺栓的研究。1956 年制定了高强度螺栓连接的计算、施工、装配暂行标准，该标准将螺栓分为 80 kg 级和 100 kg 级两种。联邦德国曾用过 1200 MPa 级螺栓，但在 1974 年修改标准时，规定只使用 1000 MPa 级螺栓，其原因是强度过高所引起的螺栓的延迟断裂问题没有得到解决。1976 年编制出版了《钢结构中高强度螺栓使用规程》。

日本于 1954 年开始研究高强度螺栓，制定了《摩擦型连接用高强度六角螺栓、六角螺母、平垫圈连接副标准》；1964 年制定了高强度螺栓的 JIS 标