

实用工程材料焊接技术丛书

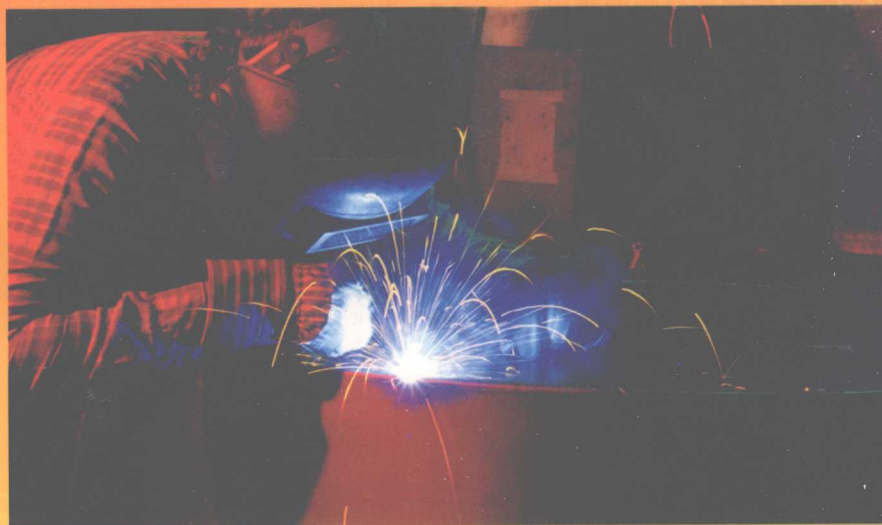
低合金结构 钢焊接技术

上海市焊接学会

组编

上海东升焊接集团有限公司

陈裕川 编著



取材先进
注重应用

内容全新
源于实践



机械工业出版社
CHINA MACHINE PRESS



实用工程材料焊接技术丛书

低合金结构钢焊接技术

上海市焊接学会 组编
上海东升焊接集团有限公司
陈裕川 编著

附录 (1) 附录 (2) 附录 (3) 附录 (4)



机械工业出版社

本书较系统地介绍了焊接结构用低合金结构钢的性能和焊接特点；阐明了低合金结构钢焊接性的计算、试验方法、程序及试验结果的评定准则；较详细地论述了各种低合金钢的焊接材料及其选用原则；全面地说明了各类低合金结构钢的焊接工艺要点，列举了各种低合金结构钢的典型焊接工艺规程；深入分析了低合金结构钢焊接接头中各种常见裂纹的形成机理，并提出了相应的冶金和工艺措施。

本书可供从事低合金结构钢焊接的中、高级焊工、技师阅读，也可供焊接工程技术人员以及焊接专业大专院校师生参考。

图书在版编目 (CIP) 数据

低合金结构钢焊接技术/陈裕川编著. —北京: 机械工业出版社, 2008. 6

(实用工程材料焊接技术丛书)

ISBN 978-7-111-24142-3

I. 低… II. 陈… III. 低合金钢: 结构钢—焊接 IV. TG457.11

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2008) 第 070671 号

机械工业出版社 (北京市百万庄大街 22 号 邮政编码 100037)

责任编辑: 俞逢英 版式设计: 霍永明 责任校对: 李秋荣

封面设计: 马精明 责任印制: 杨 曦

北京机工印刷厂印刷 (兴文装订厂装订)

2008 年 7 月第 1 版第 1 次印刷

184mm × 260mm · 24.25 印张 · 599 千字

0 001—4 000 册

标准书号: ISBN 978-7-111-24142-3

定价: 43.00 元

凡购本书, 如有缺页、倒页、脱页, 由本社发行部调换
销售服务热线电话: (010) 68326294

购书热线电话: (010) 88379639 88379641 88379643

编辑热线电话: (010) 88379083

封面无防伪标均为盗版

编写说明

材料是社会发展和科技进步的物质基础。当今，人们把材料看成是与能源、信息技术相并列的现代文明的三大支柱之一。与此同时，也向材料加工行业提出了更高的要求。

在各种材料的加工技术中，焊接是一门重要的技术。在国民经济和国防建设各部门中使用的许多结构和产品，都是采用焊接技术制造的。焊接的应用已遍及能源、交通、建筑、化工、机械制造、航天、航空、海洋工程等各个领域。特别是在焊接结构日益向高参数、大型化以及微型化发展的今天，人们对焊接技术给予了越来越高的重视。

近 20 年来，我国国民经济持续高速增长，制造业作为我国国民经济主要的支柱产业正在以空前的速度发展。2006 年我国钢铁产量已达 4.2 亿吨，跃居世界之首，其中焊接结构用钢量占有相当大比例。由此推动了我国焊接结构制造向规模化发展。焊接技术也已从一种传统的加工工艺和材料连接方法演变成为当今世界先进的制造技术之一。焊接结构生产的先进性、合理性和经济性对我国制造业的发展和经济效益正在产生越来越大的影响。

材料工业发展很快。据不完全统计，当今世界各国已注册的材料品种已达 25 万种之多，包括各种金属材料、无机非金属材料、有机高分子材料以及复合材料。而且，随着科学技术的进步，各种新型材料正在不断地出现。而焊接技术也发展得很快，出现了很多新的焊接方法、新的焊接材料、新的焊接设备和新的焊接工艺，使得许多原来认为不好焊接的材料变成焊接性良好的材料，对于各种工程材料的焊接，已发展了很多理论，积累了许多成熟的生产经验。鉴于此，我们邀请了一批既有丰富实践经验，又有深厚理论基础的焊接技术人员、资深专家组织编写、出版了这套“实用工程材料焊接技术丛书”。丛书以取材先进、实用为宗旨，并对典型实例进行剖析，使读者举一反三。

丛书编写原则为突出实用性、典型性，密切结合生产实际，对生产有很大的指导作用。突出先进性和“新”字，技术新、工艺新、标准新，尽量结合工程实例叙述，可操作性强。使之对焊接工程技术人员、中级以上焊工、焊接专业大中专院校师生以及有关的专业人员有参考和引用价值，这也是我们打造这套丛书的初衷。

尽管我们在努力为广大焊接工作者营造一套实用性、针对性强的焊接技术生产用书，但由于水平有限，难免有这样或那样的问题，恳请广大读者批评指正。

在本套丛书的编写过程中，得到了许多企事业单位的领导、专家、技术人员的大力支持与帮助，在此谨向为本套丛书的出版付出艰辛劳动的全体人员表示衷心的感谢！

机械工业出版社
技能教育分社

前言

近 20 年来,低合金结构钢作为一种现代结构材料,发展十分迅速,至今方兴未艾。目前,世界各国生产的各类低合金结构钢已占钢材总产量的 60% 以上,而且大部分用于各类发电设备、锅炉、压力容器、管道、工程建筑结构、桥梁、重型机械、工程机械、船舶和车辆等各类重要焊接结构。

在现代焊接结构向大型化、重型化和高参数化发展的今天,广泛应用低合金结构钢可取得不可估量的经济效益,但焊接质量问题,焊接结构的提前失效,甚至灾难性事故亦随之明显地增多。其根本原因在于对低合金结构钢的焊接特点,各种焊接裂纹形成的规律及其防治措施,如何正确和合理地拟定焊接工艺以及焊制质量可靠的焊接接头所必须遵循的规程,尚缺乏全面的了解。在我国,专门系统论述低合金结构钢焊接技术的实用性著作未见出版。本书作者试图填补这一空白,以满足广大焊接工作者的迫切需要。

本书较全面而系统地论述了国内外常用的各类标准低合金结构钢的理化性能及其焊接特点,阐明了低合金结构钢焊接性的计算方法、试验方法、检测程序和试验结果的评定准则,层次分明地叙述了低合金结构钢的焊接工艺及编制原则,并详细地介绍了各种典型低合金结构钢的焊接工艺规程和焊接接头的力学性能数据。较全面地分析了低合金钢焊接接头中常见的各种焊接裂纹的形成机理,并从冶金和工艺两方面提出了切实有效的防止措施,以期对我国全面推广应用低合金结构钢有所贡献。

本书大部分内容系作者 40 余年来从事低合金结构钢焊接试验研究和低合金钢焊接结构生产所积累的资料。希望本书提供的技术理论知识和生产经验对广大焊接工作者解决有关低合金结构钢的实际焊接问题和正确合理地制订各种低合金结构钢的焊接工艺规程有所裨益。

本书承蒙顾曾迪教授审核,提出了许多宝贵的修改意见。在本书出版之际,谨致以衷心的感谢。此外,对为完成本书所涉及的焊接试验研究和各类工程结构的焊接生产曾与作者合作的多位焊接工程师们表示深切的谢意。

王同芬高级工程师承担了本书部分章节的编写工作。陈杰工程师在收集和整理有关技术资料方面做了大量的工作,在此深表感谢。

鉴于低合金结构钢正处于日新月异的发展之中,其焊接技术也在不断地改进和变革,本书的内容难免存在某些不足和错误,敬请广大读者批评指正。

陈裕川

目 录

编写说明 1

前言 1

第1章 低合金结构钢的基本特性 1

1.1 概述 1

1.2 低合金结构钢的分类 1

1.3 合金元素对低合金钢组织和性能的影响 2

1.4 常用低合金结构钢的标准理化性能 5

第2章 低合金结构钢的焊接性 42

2.1 概述 42

2.2 铁碳合金相图 42

2.3 等温转变图（奥氏体等温转变图） 45

2.4 贝氏体和马氏体转变 48

2.5 焊接热循环的特点及其影响 50

2.6 焊接连续冷却转变图 59

2.7 各种合金元素对低合金结构钢焊接性的影响 63

第3章 低合金结构钢的焊接性试验及其试验结果的评定 66

3.1 概述 66

3.2 焊接性计算方法 66

3.3 焊接性直接试验法 68

3.4 焊接性间接试验法 76

第4章 低合金钢用焊接材料 90

4.1 概述 90

4.2 低合金钢焊接材料的分类 90

4.3 低合金钢焊条电弧焊用焊条 90

4.4 低合金钢熔化极气体保护焊用焊丝及保护气体 122

4.4.1 低合金钢熔化极气体保护焊用焊丝 122

4.4.2 低合金钢熔化极气体保护焊用保护气体 145

4.5 低合金钢钨极惰性气体保护焊用焊丝和保护气体 147

4.5.1 商品牌号低合金钢惰性气体保护

焊焊丝的典型性能数据 147

4.5.2 低合金钢钨极惰性气体保护焊用保护气体 151

4.6 低合金钢埋弧焊用焊丝和焊剂 152

4.6.1 低合金钢埋弧焊用焊丝 152

4.6.2 低合金钢埋弧焊用焊剂 156

4.6.3 低合金钢埋弧焊焊丝和焊剂的选配 159

4.7 低合金钢电渣焊用电极材料和焊剂 163

4.7.1 低合金钢电渣焊用电极材料标准 163

4.7.2 低合金钢电渣焊用焊剂 165

4.8 低合金钢焊接材料的选用 166

4.8.1 低合金钢焊接材料的选用原则 167

4.8.2 合金元素对焊缝金属性能的影响 171

4.8.3 常用低合金钢焊接材料的选用表 177

第5章 低合金结构钢的焊接工艺 182

5.1 低合金结构钢接头坡口形状和尺寸的设计 182

5.2 焊前准备的要求及实施方法 186

5.3 适用焊接方法的选定 191

5.3.1 焊条电弧焊 191

5.3.2 熔化极气体保护焊 192

5.3.3 现代先进的 MIG/MAG 焊接方法 193

5.3.4 药芯焊丝电弧焊 204

5.3.5 钨极惰性气体保护焊 208

5.3.6 等离子弧焊 211

5.3.7 埋弧焊 214

5.3.8 电渣焊 219

5.3.9 气电立焊 220

5.4 焊接材料的选定 221

5.5 焊接参数的确定 222

5.5.1 能量参数对焊缝金属性能的影响 222

5.5.2 操作工艺参数对接头性能的影响	227	裂	344
5.5.3 温度参数对接头性能的影响	228	7.3 低合金结构钢焊接冷裂纹的防止方	
5.5.4 焊后热处理参数的影响	239	法	347
5.6 焊后检查	245	7.3.1 防止焊接冷裂纹的冶金措施	347
第6章 常用低合金结构钢的焊接工艺		7.3.2 防止冷裂纹的工艺措施	351
规程及接头的力学性能	247	7.3.3 防止层状撕裂的措施	358
6.1 Q345 低合金高强度钢的焊接工艺规		第8章 低合金结构钢焊接接头中的热裂	
程	247	纹和再热裂纹及其防止措施	360
6.2 Q390 低合金高强度钢的焊接工艺规		8.1 低合金结构钢焊接接头中的热裂纹	360
程	263	8.1.1 低合金结构钢焊接接头中热裂纹	
6.3 Q420 低合金高强度钢的焊接工艺规		的基本形式	360
程	269	8.1.2 低合金结构钢的化学成分对热裂	
6.4 Q460 低合金高强度钢的焊接工艺规		纹倾向的影响	361
程	274	8.2 防止低合金结构钢焊接热裂纹的措施	363
6.5 Q550 调质高强度钢的焊接工艺规程	282	8.2.1 防止焊接热裂纹的冶金措施	364
6.6 15CrMo 低合金耐热钢的焊接工艺规		8.2.2 防止焊接热裂纹的工艺措施	364
程	286	8.2.3 防止接头热裂纹的典型实例	365
6.7 12Cr1MoV 低合金耐热钢的焊接工艺		8.3 低合金结构钢焊接接头中的再热裂	
规程	294	纹	366
6.8 12Cr2Mo 低合金耐热钢的焊接工艺规		8.3.1 焊接接头中再热裂纹的几种形	
程	302	式	366
6.9 3.5Ni 低温钢的焊接工艺规程	310	8.3.2 低合金结构钢焊接接头再热裂	
6.10 常用低合金结构钢焊接接头典型的		纹的形成机理	367
力学性能	316	8.3.3 低合金结构钢焊接接头再热裂	
第7章 低合金结构钢焊接接头中的冷		纹的影响因素	369
裂纹及其防止方法	325	8.4 防止低合金结构钢接头再热裂纹的	
7.1 冷裂纹的形成机理	325	措施	374
7.1.1 淬硬组织对冷裂纹形成的影响	325	8.4.1 钢材合金成分的正确选择	375
7.1.2 扩散氢对冷裂纹形成的影响	329	8.4.2 焊接工艺的改进	376
7.1.3 拘束度对冷裂纹形成的影响	339	8.4.3 优化消除应力处理的工艺参数	377
7.2 焊接冷裂纹的特殊形式——层状撕		8.4.4 防止接头再热裂纹的典型实例	377
		参考文献	380

第1章 低合金结构钢的基本特性

1.1 概述

低合金结构钢是在碳素钢中加入总质量分数不超过 5% 的各种合金元素, 以提高钢的强度、韧性、耐蚀性、耐热性或其他特殊性能的合金钢材。近 20 年来, 低合金结构钢的发展十分迅速, 据有关统计资料表明, 在世界现代工业生产中, 60% 以上的焊接结构采用各种低合金钢制造。目前, 已纳入各国钢材标准的低合金结构钢品种达 300 余种。利用现代先进的冶炼、合金化和热处理技术, 不仅能使低合金结构钢具有比普通碳素结构钢高得多的力学强度, 而且还能使其具有不同类型工程结构所要求的各种特殊性能, 如良好的低温韧性、较高的热强性、抗氢蚀性、耐大气腐蚀性以及优良的加工性和焊接性等。因此, 这些低合金结构钢在船舶、桥梁、锅炉、压力容器、管道、常规和核能动力设备、各种车辆、重型机械、工程机械、运输起重机械、海洋建筑和高层楼房建筑中得到了广泛的应用。特别是在大型和重型焊接结构中, 低合金结构钢目前已成为最主要的结构材料。同时, 进一步改善这类钢的加工性能, 主要是焊接性, 提高其使用可靠性也受到冶金界和焊接工程界的普遍重视。经过多年的试验研究和焊接生产实践, 在以下问题上达成了共识: 即使钢材具有良好的焊接性, 低合金结构钢的 $w(C)$ (碳含量) 均应限制在 0.2% 以下。同时已开发成功了一系列力学性能与焊接性基本统一的新型微合金结构钢。

在低合金结构钢中, 改善钢材性能的另一重要途径是在冶炼过程中采取细晶粒化处理, 由此形成了细晶粒和超细晶粒结构钢系列。

在一些特殊的应用场合, 例如军用装甲车、火箭发动机壳体和飞机起落架等部件, 要求采用抗拉强度高于 1000MPa 的低合金高强度钢。为确保强度性能, 钢中的 $w(C)$ 必须高于 0.3%, 而成为中碳低合金钢。但这些钢的焊接性与低碳低合金钢相比要差得多, 从而必须采取较复杂的焊接工艺。

虽然低合金结构钢已有近百年的发展历史, 但仍有许多未知的领域尚待去探索。本书系实用性技术书籍, 故本章仅介绍已列入我国钢材标准或国际公认的国外标准, 并在焊接结构中已普遍应用的低合金结构钢。

1.2 低合金结构钢的分类

低合金结构钢可按质量等级、强度等级、合金系列、热处理状态、组织构成及用途进行分类。

1. 按质量等级分类

按质量等级可分为普通质量低合金钢、优质合金钢和特级优质低合金钢。

2. 按强度等级分类

在我国钢材国家标准中, 对于低合金结构钢, 基本上按钢的强度等级分类。例如在

GB/T 1591—1994《低合金高强度结构钢》中,以热轧和正火状态供货的低合金高强度钢,按其屈服点分成5类,即Q295、Q345、Q390、Q420和Q460。在GB/T 16270—1996《高强度结构钢热处理和控轧钢板、钢带》标准中,以热处理状态供货的低合金高强度钢,按其屈服点等级共分成6类:Q420、Q460、Q500、Q550、Q620和Q690。

在焊接结构中,应用最普遍的是屈服点在500MPa以下的各种低合金高强度结构钢,简称低合金高强钢。这些钢的标准牌号和钢号的对照见表1-1。

表 1-1 低合金高强度结构钢牌号与钢号的对照表

标准牌号 (GB/T 1591—1994)	钢号 (GB 1591—1988)
Q295 (A、B)	09MnV、09MnNb、09Mn2、12Mn
Q345 (A~E)	12MnV、14MnNb、16Mn、16MnRE、18Nb、09MnCuPTi、10MnSiCu
Q390 (A~E)	15MnV、15MnTi、16MnNb、10MnPNbRE
Q420 (A~E)	15MnVN、14MnVTiRE
Q460 (C、D、E)	—

3. 按合金系列分类

低合金结构钢的合金系列比较复杂,种类繁多,从最简单的C-Mn二元合金系列到多元合金系列,约有30余种之多。其中最常用的合金系列有:C-Mn、C-Mn-Si、C-Mn-V、C-Mn-Ti、C-Mn-Mo、C-Mn-Ni、C-Mn-Ni-Ti、C-Mn-Ni-Cu-V、C-Mn-Cr、C-Mn-Cr-Mo、C-Cr-Mn-Si、C-Cr-Mo-V、C-Mn-Cr-Ni-Mo-V、C-Mn-V-N、C-Mn-Cr-Ni-Zr、C-Mn-Cr-Mo-Zr、C-Mn-Cr-Mo-Ni-V-B、C-Cr-Mo-W-V-Ti-B、C-Cr-Mo-V-Si-Ti-B等。钢材合金化效果的总趋势是合金系中组分越多,钢材的强度越高,综合性能越优。

4. 按热处理状态分类

低合金结构钢按其供货时的热处理状态,可分成热轧、控轧、温度-形变控轧(热-力学工艺控轧)、高温回火、正火和调质钢。调质处理还可分为水调质处理和空气调质处理(正火+回火)两种,通常,室温屈服点低于420MPa的低合金钢中薄板可以热轧或控轧状态供货。屈服点在500MPa以上的低合金钢厚板,应以正火或空气调质状态供货。屈服点在690MPa以上的高强度钢大都是调质钢。

5. 按组织构成分类

低合金结构钢按其碳和合金含量以及热处理状态,有下列几种原始组织及其混合组织:铁素体、珠光体、贝氏体和马氏体。 $w(C)$ 低于0.06%的微合金钢,其基体组织为铁素体加少量珠光体,多元低合金钢通常具有中间级组织,即贝氏体+铁素体或铁素体+贝氏体组织。低合金高强度调质钢的组织大部分是回火马氏体组织。

6. 按钢的用途分类

低合金结构钢按其用途可分成下列几种:普通钢结构用钢、海洋结构用钢、船用钢、锅炉用钢、压力容器用钢、桥梁用钢、耐大气腐蚀钢(耐候钢)、抗氢钢和低温用钢等。

1.3 合金元素对低合金钢组织和性能的影响

各种合金元素对低合金钢组织和性能的影响是一种相当复杂的过程。全面了解其中的规

律性是掌握低合金钢焊接冶金和技术的基础,也是研究、分析和预测各种低合金钢及其焊接接头性能的重要依据。

为便于讨论,我们将普通碳钢看作是简单的铁-碳二元合金,其简化组织相图如图 1-1 所示。

在这一合金系中,若加入其他合金元素,临界转变温度到达最低点时的铁碳浓度将发生变化,临界温度的绝对值,即共晶点 S 的位置亦会变动。某些合金元素促使相变点降低并扩大 γ 区,而另一些合金元素则使 γ 区缩小。各种合金元素对下临界点温度的综合影响可用下列公式来表征:

$$A_1 = 720 + 28\text{Si} - 5\text{Mn} - 10\text{Ni} + 5\text{Cr} + 6\text{Co} + 3\text{Ti} - 3\text{V}$$

由上式可知, Si 、 Cr 、 Co 和 Ti 等合金元素会提高下临界点 A_1 的温度,而 Mn 、 Ni 和 V 等元素则降低 A_1 点温度。在现代低合金钢中,还采用了 Mo 、 Cu 、 W 、 Nb 、 Zr 和 B 等合金元素。

按照合金元素对组织转变影响的特点,可将其分成两组:一组以 Ni 元素为代表,称为 Ni 组元素,其中有 Ni 、 Mn 、 Co 等元素;另一组以 Cr 元素为代表,称为 Cr 组元素,包括 Cr 、 Si 、 P 、 Al 、 Ti 、 V 、 Mo 、 W 等。由这两组合金元素组成的合金,其组织相图分别如图 1-2 和图 1-3 所示。

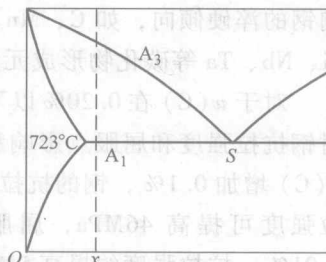


图 1-1 简化铁-碳二元合金的组织相图

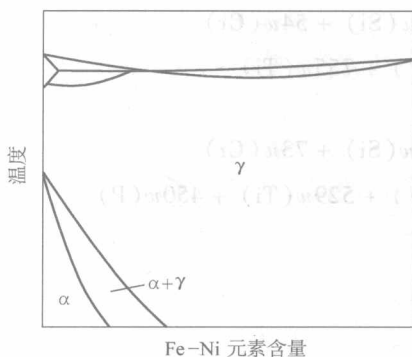


图 1-2 Fe-Ni 组合合金相图

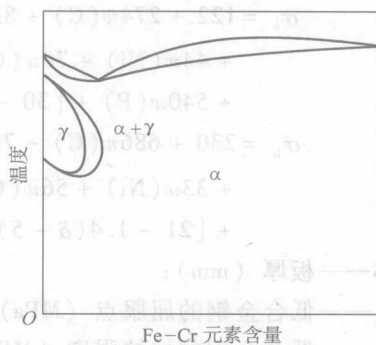


图 1-3 Fe-Cr 组合合金相图

由上列组织相图可见,在 α -Fe 中具有较大溶解度的元素促使 γ 区缩小,而在 γ 晶体中具有较大溶解度的元素则扩大 γ 区。各种合金元素的影响程度不仅取决于它的浓度,而且还取决于同时存在的其他合金元素的性质和含量。

当以 Fe-Ni 组元素(即奥氏体形成元素)组成合金时,形成在一定温度范围内稳定的固溶体,其稳定的温度范围取决于合金元素的性质和浓度。所形成的固溶体与纯铁相比,其抗拉强度和屈服点明显提高,而伸长率、冲击韧度等塑性和韧性指标略有下降。当以 Fe-Cr 组元素(即铁素体形成元素)形成合金时,可获得 α 固溶体。这种合金铁素体与纯铁相比,具有较高的热强性和较低的变形能力。当合金中加入碳化物形成元素时,必然会与钢中的碳形成各种形式的碳化物,碳化物本身是一种高硬度高脆性的组分。在低合金钢中,碳化物作

为组织组分存在时,将促使钢的硬度、抗拉强度和屈服点提高,而伸长率和冲击韧度则降低。碳化物对钢性能的影响程度取决于合金元素的含量、碳化物的弥散度及其形状和分布特性。

此外,还应考虑到各种合金元素在不同程度上改变了钢的奥氏体转变动力学,会直接影响钢的淬硬倾向,如C、Mn、Cr、Mo、V、W、Ni和Si等元素都能提高钢的淬硬倾向,而Ti、Nb、Ta等碳化物形成元素则降低钢的淬硬倾向。

对于 $w(\text{C})$ 在0.20%以下的低合金钢,C、Mn、Si、Cr、Ni、Cu、P、V、Ti等合金元素对钢抗拉强度和屈服点影响程度的定量测定数据综列于图1-4和图1-5。由图示曲线可知, $w(\text{C})$ 增加0.1%,钢的抗拉强度可提高70MPa,屈服点提高28MPa; $w(\text{P})$ 增加0.1%,抗拉强度可提高46MPa,屈服点提高55MPa;在 $w(\text{Ti})$ 达0.06%的钢中, $w(\text{Ti})$ 每增加0.01%,抗拉强度约提高5MPa,屈服点约提高7.5MPa; $w(\text{V})$ 增加0.1%,抗拉强度约提高30MPa,屈服点相应提高35MPa; $w(\text{Mn})$ 和 $w(\text{Si})$ 每增加1%,抗拉强度分别提高90MPa和10MPa,屈服点相应提高82MPa和55MPa。但应当指出,在低合金钢中, $w(\text{Si})$ 超过0.5%时,对钢的缺口冲击韧度会产生不利的影响。钢中的 $w(\text{Cr})$ 每增加1%,抗拉强度和屈服点相应提高10MPa和35MPa,Cr元素还能显著地提高钢的高温强度。 $w(\text{Cu})$ 每增加1%,抗拉强度和屈服点相应提高55MPa和80MPa,同时还改善了钢的抗大气腐蚀性能。在所讨论的合金元素中,镍对提高钢的强度性能作用最小, $w(\text{Ni})$ 每增加1%,则抗拉强度和屈服点相应提高34MPa和45MPa。但镍对改善钢的缺口韧性起着决定性的作用。这些元素对低合金钢和屈服点和抗拉强度的综合影响,可按下列经验公式进行计算:

$$\begin{aligned}\sigma_s &= 122 + 274w(\text{C}) + 82w(\text{Mn}) + 55w(\text{Si}) + 54w(\text{Cr}) \\ &\quad + 44w(\text{Ni}) + 78w(\text{Cu}) + 353w(\text{V}) + 755w(\text{Ti}) \\ &\quad + 540w(\text{P}) + [30 - 2(\delta - 5)] \\ \sigma_b &= 230 + 686w(\text{C}) + 78w(\text{Mn}) + 90w(\text{Si}) + 73w(\text{Cr}) \\ &\quad + 33w(\text{Ni}) + 56w(\text{Cu}) + 314w(\text{V}) + 529w(\text{Ti}) + 450w(\text{P}) \\ &\quad + [21 - 1.4(\delta - 5)]\end{aligned}$$

式中 δ ——板厚 (mm);

σ_s ——低合金钢的屈服点 (MPa);

σ_b ——低合金钢的抗拉强度 (MPa);

$w(X)$ ——表示该元素在钢中的质量分数 (%)。

最后讨论氮的作用。在现代低合金钢中,氮已作为一种合金元素被广泛地采用。按照氮在元素周期表中的位置和其原子半径判断,氮在钢中的作用与碳相似。当它溶解在铁中时,力图扩大 γ 区。氮能与钢中的其他合金元素形成稳定的氮化物,并以弥散的微粒分布,从而细化晶粒,提高钢的屈服点和抗脆断能力。氮的影响程度既决定于其浓度,也决定于钢中的其他合金元素的种类和数量。Cr、Al、Ti和V等合金元素对氮具有较高的亲和力,并能形成较稳定的氮化物。因此,为了充分发挥氮作为合金元素的作用,钢中必须同时加入Al、V和Ti等氮化物形成元素。

综上所述,所有这些合金元素,或者与铁形成固溶体,或者形成碳化物,都产生了延迟奥氏体分解的作用,并由此提高了钢的淬硬倾向。各种元素对钢的力学性能和工艺性能的影响,则取决于它的含量和同时存在的其他合金元素。

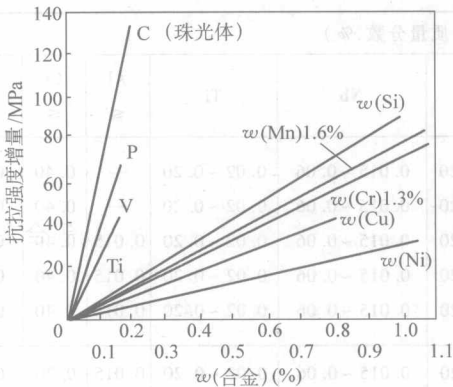


图 1-4 各种合金元素对低合金钢抗拉强度的影响

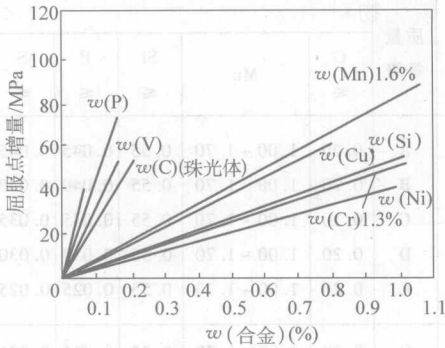


图 1-5 各种合金元素对低合金钢屈服点的影响

1.4 常用低合金结构钢的标准理化性能

本节以钢材用途分类的原则，分别介绍各类低合金结构钢的标准化学成分和力学性能。

1. 普通钢结构用低合金钢

普通钢结构是指工程建筑结构、高层楼房建筑、石油燃气储罐、工程机械和机床构架等。普通钢结构用低合金钢的屈服点通常低于 450MPa。这类低合金钢大多数为低碳锰钢、锰钒钢和锰钛钢。我国生产的低合金结构钢已列入 GB/T 1591—1994《低合金高强度结构钢》国家标准。表 1-2 和表 1-3 分别列出了其标准的化学成分和力学性能。

标准规定，这类低合金高强度钢应以热轧、控轧、正火及正火 + 回火状态交货，Q420、Q460 的 C、D、E 级钢也可以淬火加回火状态交货。需方应在订货合同中注明交货状态。

表 1-2 低合金高强度结构钢的标准化学成分（按 GB/T 1591—1994）

牌号	质量等级	化学成分（质量分数,%）										
		C ≤	Mn	Si ≤	P ≤	S ≤	V	Nb	Ti	Al ≤	Cr ≤	Ni ≤
Q295	A	0.16	0.80~1.50	0.55	0.045	0.045	0.02~0.15	0.015~0.060	0.02~0.20	—	—	—
	B	0.16	0.80~1.50	0.55	0.040	0.040	0.02~0.15	0.015~0.060	0.02~0.20	—	—	—
Q345	A	0.20	1.00~1.60	0.55	0.045	0.045	0.02~0.15	0.015~0.06	0.02~0.20	—	—	—
	B	0.20	1.00~1.60	0.55	0.040	0.040	0.02~0.15	0.015~0.06	0.02~0.20	—	—	—
	C	0.20	1.00~1.60	0.55	0.035	0.035	0.02~0.15	0.015~0.06	0.02~0.20	0.015	—	—
	D	0.18	1.00~1.60	0.55	0.030	0.030	0.02~0.15	0.015~0.06	0.02~0.20	0.015	—	—
	E	0.18	1.00~1.60	0.55	0.025	0.025	0.02~0.15	0.015~0.06	0.02~0.20	0.015	—	—
Q390	A	0.20	1.00~1.60	0.55	0.045	0.045	0.02~0.20	0.015~0.060	0.02~0.20	—	0.30	0.70
	B	0.20	1.00~1.60	0.55	0.040	0.040	0.02~0.20	0.015~0.06	0.02~0.20	—	0.30	0.70
	C	0.20	1.00~1.60	0.55	0.035	0.035	0.02~0.20	0.015~0.06	0.02~0.20	0.015	0.30	0.70
	D	0.20	1.00~1.60	0.55	0.030	0.030	0.02~0.20	0.015~0.06	0.02~0.20	0.015	0.30	0.70
	E	0.20	1.00~1.60	0.55	0.025	0.025	0.02~0.20	0.015~0.06	0.02~0.20	0.015	0.30	0.70

(续)

牌号	质量等级	化学成分（质量分数,%）										
		C ≤	Mn	Si ≤	P ≤	S ≤	V	Nb	Ti	Al ≤	Cr ≤	Ni ≤
Q420	A	0.20	1.00 ~ 1.70	0.55	0.045	0.045	0.02 ~ 0.20	0.015 ~ 0.06	0.02 ~ 0.20	—	0.40	0.70
	B	0.20	1.00 ~ 1.70	0.55	0.040	0.040	0.02 ~ 0.20	0.015 ~ 0.06	0.02 ~ 0.20	—	0.40	0.70
	C	0.20	1.00 ~ 1.70	0.55	0.035	0.035	0.02 ~ 0.20	0.015 ~ 0.06	0.02 ~ 0.20	0.015	0.40	0.70
	D	0.20	1.00 ~ 1.70	0.55	0.030	0.030	0.02 ~ 0.20	0.015 ~ 0.06	0.02 ~ 0.20	0.015	0.40	0.70
	E	0.20	1.00 ~ 1.70	0.55	0.025	0.025	0.02 ~ 0.20	0.015 ~ 0.06	0.02 ~ 0.20	0.015	0.40	0.70
Q460	C	0.20	1.00 ~ 1.70	0.55	0.035	0.035	0.02 ~ 0.20	0.015 ~ 0.06	0.02 ~ 0.20	0.015	0.70	0.70
	D	0.20	1.00 ~ 1.70	0.55	0.030	0.030	0.02 ~ 0.20	0.015 ~ 0.06	0.02 ~ 0.20	0.015	0.70	0.70
	E	0.20	1.00 ~ 1.70	0.55	0.025	0.025	0.02 ~ 0.20	0.015 ~ 0.06	0.02 ~ 0.20	0.015	0.70	0.70

- 注: 1. 表中所列的铝为全铝含量。
2. Q295 钢碳的质量分数容许到 0.18%。
3. Q295 钢如不加 V、Nb、Ti 等元素, 当 $w(C) \leq 0.12\%$ 时, $w(Mn)$ 上限可提高到 1.80%。
4. Q345 钢锰的质量分数上限可提高到 1.70%。
5. 厚度 $\leq 6\text{mm}$ 的钢板、钢带和厚度 $\leq 16\text{mm}$ 的热连轧钢板、钢带的 $w(Mn)$ 下限可降低 0.20%。
6. 在保证力学性能的前提下, 用 Nb 作细化晶粒元素时, Q345、Q390 钢的 Mn 质量分数下限可低于表中的下限质量分数。
7. 除各牌号的 A、B 级钢外, 钢中应至少含有表中所列的一种细化晶粒的元素 (V、Nb、Ti、Al); 如这些元素同时使用, 则至少应有一种元素的质量分数不低于上表规定的最小值。
8. 各牌号钢的 Cr、Ni、Cu 残余元素的质量分数各不大于 0.30%。
9. 为改善钢的性能, Q390、Q420、Q460 级钢可加入少量 Mo。
10. 为改善钢的性能, 各牌号钢可加入 RE 元素, 其加入质量分数范围为 0.02% ~ 0.20%。

表 1-3 低合金高强度结构钢的标准力学性能 (按 GB/T 1591—1994)

牌号	质量等级	不同厚度下的屈服点 σ_s /MPa				抗拉强度 σ_b /MPa	伸长率 δ_5 (%)	冲击吸收功 A_{KV} (纵向) /J				弯曲试验 180°	
		≤ 16	$> 16 \sim 35$	$> 35 \sim 50$	$> 50 \sim 100$			$+ 20^{\circ}\text{C}$	0°C	$- 20^{\circ}\text{C}$	$- 40^{\circ}\text{C}$	≤ 16	$> 16 \sim 100$
Q295	A	295	275	255	235	390 ~ 570	23	—	—	—	$d = 2a$	$d = 3a$	
	B	295	275	255	235	390 ~ 570	23	34	—	—	—	—	
Q345	A	345	325	295	275	470 ~ 630	21	—	—	—	—	—	
	B	345	325	295	275	470 ~ 630	21	34	—	—	—	—	
	C	345	325	295	275	470 ~ 630	22	—	34	—	$d = 2a$	$d = 3a$	
	D	345	325	295	275	470 ~ 630	22	—	—	34	—	—	
	E	345	325	295	275	470 ~ 630	22	—	—	—	27	—	
Q390	A	390	370	350	330	490 ~ 650	19	—	—	—	—	—	
	B	390	370	350	330	490 ~ 650	19	34	—	—	—	—	
	C	390	370	350	330	490 ~ 650	20	—	34	—	$d = 2a$	$d = 3a$	
	D	390	370	350	330	490 ~ 650	20	—	—	34	—	—	
	E	390	370	350	330	490 ~ 650	20	—	—	—	27	—	

(续)

牌号	质量等级	不同厚度下的屈服点 σ_s /MPa				抗拉强度 σ_b /MPa	伸长率 δ_5 (%)	冲击吸收功 A_{KV} (纵向)/J				弯曲试验 180°	
		≤ 16	> 16	> 35	> 50			+20℃	0℃	-20℃	-40℃	≤ 16	$> 16 \sim 100$
			~ 35	~ 50	~ 100								
Q420	A	420	400	380	360	520 ~ 680	18						
	B	420	400	380	360	520 ~ 680	18	34					
	C	420	400	380	360	520 ~ 680	19		34			$d = 2a$	$d = 3a$
	D	420	400	380	360	520 ~ 680	19			34			
	E	420	400	380	360	520 ~ 680	19				27		
Q460	C	460	440	420	400	550 ~ 720	17		34				
	D	460	440	420	400	550 ~ 720	17			34		$d = 2a$	$d = 3a$
	E	460	440	420	400	550 ~ 720	17				27		

- 注：1. 表中所列单值均为最低值。
2. 拉伸和弯曲试验时，钢板、钢带应取横向试样，宽度小于 600mm 的钢带、型钢和钢棒应取纵向试样。
3. 钢板和钢带的伸长率允许比表列规定值降低 1%（绝对值）。
4. Q345 级钢厚度大于 35mm 钢板的伸长率可降低 1%（绝对值）。
5. 边长或直径大于 50 ~ 100mm 的方圆钢，其伸长率可比表列规定值降低 1%。
6. 夏比 V 形缺口冲击试验的冲击吸收功值按一组三个试样的算术平均值计算，允许其中一个试样单值低于表列规定值，但不得低于规定值的 70%。

2. 低合金调质高强度钢

低合金调质高强度钢是指在调质状态下（淬火 + 回火），保证标准规定的力学性能的高强度钢。与普通低合金高强度钢相比，其特点是强度更高，最高抗拉强度可达 1620MPa，其塑性和韧性相对较低。调质高强度钢按含碳量不同，可分低碳调质高强度钢（简称低碳调质钢）和中碳调质高强度钢（简称中碳调质钢）。在各种焊接结构中大多采用低碳调质高强度钢。中碳调质高强度钢因焊接性较差，只有在强度指标是决定因素的结构中才被采用。

GB/T 16270—1996《高强度结构钢热处理和控轧钢板、钢带》标准，规定了屈服点从 420MPa 到 690MPa 的低碳调质高强度钢的技术要求。这些钢的标准化学成分和力学性能分别列于表 1-4 和表 1-5。其中 Q420、Q460、Q500 和 Q550 钢可以淬火 + 回火、正火 + 回火、正火和控轧状态交货。Q620 和 Q690 钢则应以淬火 + 回火或其他热处理状态交货，钢板的最大厚度限制在 100mm 以下。

表 1-4 低碳调质高强度钢的标准化学成分（按 GB/T 16270—1996）

钢号	质量等级	化学成分（质量分数，%）											
		C	Mn	Si	P	S	V	Nb	Ti	Cr	Ni	Mo	B
Q420	C	0.20	1.00 ~ 1.60	0.55	0.035	0.035	0.10	0.06	0.20	0.30	0.70	0.20	—
	D	0.18	1.00 ~ 1.60	0.55	0.030	0.030	0.10	0.06	0.20	0.30	0.70	0.20	—
	E	0.18	1.00 ~ 1.60	0.55	0.025	0.025	0.10	0.06	0.20	0.30	0.70	0.20	—

(续)

钢号	质量等级	化学成分 (质量分数, %)											
		C	Mn	Si	P	S	V	Nb	Ti	Cr	Ni	Mo	B
Q460	C	0.20	1.00 ~ 1.60	0.55	0.035	0.035	0.10	0.06	0.20	0.30	0.70	0.20	—
	D	0.18	1.00 ~ 1.60	0.55	0.030	0.030	0.10	0.06	0.20	0.30	0.70	0.20	—
	E	0.18	1.00 ~ 1.60	0.55	0.025	0.025	0.10	0.06	0.20	0.30	0.70	0.20	—
Q500	D	0.18	1.00 ~ 1.60	0.55	0.030	0.030	0.10	0.06	0.20	0.60	1.00	0.40	0.003
	E	0.18	1.00 ~ 1.60	0.55	0.025	0.025	0.10	0.06	0.20	0.60	1.00	0.40	0.003
Q550	D	0.18	1.00 ~ 1.60	0.55	0.030	0.030	0.10	0.06	0.20	0.60	1.00	0.40	0.003
	E	0.18	1.00 ~ 1.60		0.025	0.025							
Q620	D	0.18	1.00 ~ 1.60	0.55	0.030	0.030	0.10	0.06	0.20	0.80	1.20	0.60	0.003
	E				0.025	0.025							
Q690	D	0.18	1.00 ~ 1.60	0.55	0.030	0.030	0.10	0.06	0.20	1.20	1.50	0.60	0.003
	E				0.025	0.025							

- 注: 1. 对于不进行调质处理的 Q460、Q550 钢, $w(\text{Ni})$ 上限可分别到 1.00%、1.20%。
2. Q500、Q550 的 $w(\text{Mo})$ 上限可到 0.60%。
3. Cu 作为残余元素时, 其 $w(\text{Cu}) \leq 0.30\%$, 作为合金元素时, 其 $w(\text{合金元素})$ 不得大于 1.50%。
4. 所列各元素含量单值为最大值。

表 1-5 低碳调质高强度钢的力学性能 (按 GB/T 16270—1996)

钢号	质量等级	屈服强度 $\sigma_{0.2}/\text{MPa}$		抗拉强度 σ_b/MPa	伸长率 $\delta_5 (\%)$	V 形缺口冲击吸收功/J A_{KV}			冷弯试验 180°
		板厚 $\leq 50\text{mm}$	> 50 $\sim 100\text{mm}$			0℃	- 20℃	- 40℃	
Q420	C	≥ 420	≥ 400	520 ~ 670	≥ 18	≥ 40	≥ 40	≥ 27	$d = 3a$
	D								
	E								
Q460	C	≥ 460	≥ 440	550 ~ 710	≥ 17	≥ 40	≥ 40	≥ 27	$d = 3a$
	D								
	E								
Q500	D	≥ 500	≥ 480	610 ~ 770	≥ 16	—	≥ 40	≥ 27	$d = 3a$
	E								
Q550	D	≥ 550	≥ 530	670 ~ 830	≥ 16	—	≥ 40	≥ 27	$d = 3a$
	E								
Q620	D	≥ 620	≥ 600	720 ~ 890	≥ 15	—	≥ 40	≥ 27	$d = 3a$
	E								
Q690	D	≥ 690	≥ 670	770 ~ 940	≥ 14	—	≥ 40	≥ 27	$d = 3a$
	E								

- 注: 1. 冷弯试验中, d = 弯芯直径 (mm), a = 板厚 (mm)。
2. 夏比 V 形缺口冲击试样为纵向试样, 冲击吸收功按三个试样的算术平均值计算, 允许其中一个试样低于规定值, 但不得低于规定值的 70%。

这类高强度结构钢由于碳的质量分数不超过 0.2%，合金元素总的质量分数小于 3%。因此具有较好的焊接性和低温冲击韧度，适用于大中型重载焊接结构。但在焊接工艺上仍需采取必要的措施，以防止冷裂纹的形成。

在 GB/T 3077—1999《合金结构钢》标准中，对机械部件用低碳、中碳调质高强度钢的化学成分、力学性能、淬火和回火的温度参数以及其他技术要求作出了规定。该标准所列牌号末尾加“A”的钢种，代表高级优质钢。如需方要求订购特级优质钢，则在牌号后面加“B”代表。统一数字代号表示方法为：优质钢尾部数字为“2”；高级优质钢尾部数字为“3”；特级优质钢尾部数字为“6”。这些不同质量等级调质高强度钢的 S、P 含量和残余元素含量应符合表 1-6 的规定。

表 1-6 不同质量等级调质钢的 P、S 和残余元素含量的规定（GB/T 3077—1999）

化学成分（质量分数，%）						
调质钢的质量等级	P	S	Cu	Cr	Ni	Mo
优质钢	≤0.035	≤0.035	≤0.30	≤0.30	≤0.30	≤0.15
高级优质钢	≤0.025	≤0.025	≤0.25	≤0.30	≤0.30	≤0.10
特级优质钢	≤0.025	≤0.015	≤0.25	≤0.30	≤0.30	≤0.10

在焊接结构中常用的这些低碳调质高强度钢和部分中碳调质高强度钢的标准化学成分和力学性能分别列于表 1-7 和表 1-8。

表 1-7 ~ 表 1-8 所列钢材的交货状态通常为热轧或热锻状态，也可热处理状态，如退火、正火或高温回火，但测定力学性能的试样毛坯必须按规定进行调质处理。

表 1-8 所规定的力学性能指标。适用于截面尺寸不大于 80mm 的钢材。尺寸大于 80 ~ 100mm 的钢材，允许其伸长率、断面收缩率和冲击吸收功比规定值分别降低 1%（绝对值）、5%（绝对值）和 5%。对于尺寸在 100 ~ 150mm 之间的钢材，允许其伸长率，断面收缩率及冲击吸收功，可分别降低 2%（绝对值）、10%（绝对值）和 10%。对于尺寸在 150 ~ 250mm 之间的钢材，允许其伸长率、断面收缩率和冲击吸收功分别比规定值降低 3%（绝对值）、15%（绝对值）和 15%。

表 1-8 所列的淬火和回火温度对于该种钢并不是最佳的热处理工艺参数。在实际的焊接生产中，通常应根据所设计的结构部件规定的力学性能指标要求加以调整。例如，当要求较高的塑性和韧性，并容许降低强度性能时，可以提高回火温度或延长回火的保温时间。特别是焊接结构焊后要求消除应力处理时，其调质处理的回火温度，必须高于拟采用的消除应力处理的温度。

3. 锅炉、压力容器用低合金结构钢

锅炉用低合金结构钢基本上都是低合金耐热钢。我国常用的低合金耐热钢已分别列入 GB 5310—1995《高压锅炉用无缝钢管》和 GB 713—1997《锅炉用钢板》等国家标准。这些钢种的标准化学成分和力学性能分别列于表 1-9 和表 1-10。

与普通质量低合金钢相比，锅炉用钢具有较高的高温强度、常温和高温冲击韧度、抗时效性和抗氧化性。因此，这类钢都是以提高钢材高温性能的合金元素，如 Cr、Mo、Mn、V、Nb、W 等为基础的合金系列。这些钢可以热轧、控轧、退火、正火和回火或调质状态供货。对于常温屈服点达 500MPa，或合金元素总质量分数大于 3.5% 的低合金耐热钢厚板，应以热处理状态供货。

表 1-7 低、中碳低合金调质高强度钢的标准化学成分 (按 GB/T 3077—1999)

钢种	序号	统一数字 代号	牌号	化学成分 (质量分数, %)											
				C	Si	Mn	Cr	Mo	Ni	W	B	Al	Ti	V	
Mn	1	A00202	20Mn2	0.17 ~ 0.24	0.17 ~ 0.37	1.40 ~ 1.80	—	—	—	—	—	—	—	—	—
	2	A00302	30Mn2	0.27 ~ 0.34	0.17 ~ 0.37	1.40 ~ 1.80	—	—	—	—	—	—	—	—	—
	3	A00352	35Mn2	0.32 ~ 0.39	0.17 ~ 0.37	1.40 ~ 1.80	—	—	—	—	—	—	—	—	—
MnV	4	A01202	20MnV	0.17 ~ 0.24	0.17 ~ 0.37	1.30 ~ 1.60	—	—	—	—	—	—	—	—	0.07 ~ 0.12
SiMn	5	A10272	27SiMn	0.24 ~ 0.32	1.10 ~ 1.40	1.10 ~ 1.40	—	—	—	—	—	—	—	—	—
	6	A10352	35SiMn	0.32 ~ 0.40	1.10 ~ 1.40	1.10 ~ 1.40	—	—	—	—	—	—	—	—	—
SiMnMoV	7	A14202	20SiMn2MoV	0.17 ~ 0.23	0.90 ~ 1.20	2.20 ~ 2.60	—	0.30 ~ 0.40	—	—	—	—	—	—	0.05 ~ 0.12
	8	A14252	25SiMn2MoV	0.22 ~ 0.28	0.90 ~ 1.20	2.20 ~ 2.60	—	0.30 ~ 0.40	—	—	—	—	—	—	0.05 ~ 0.12
	9	A14372	37SiMn2MoV	0.33 ~ 0.39	0.60 ~ 0.90	1.60 ~ 1.90	—	0.40 ~ 0.50	—	—	—	—	—	—	0.05 ~ 0.12
MnMoB	10	A72202	20MnMoB	0.16 ~ 0.22	0.17 ~ 0.37	0.90 ~ 1.20	—	0.20 ~ 0.30	—	—	—	0.0005 ~ 0.0035	—	—	—
MnVB	11	A73152	15MnVB	0.12 ~ 0.18	0.17 ~ 0.37	1.20 ~ 1.60	—	—	—	—	—	0.0005 ~ 0.0035	—	—	0.07 ~ 0.12
	12	A73202	20MnVB	0.17 ~ 0.23	0.17 ~ 0.37	1.20 ~ 1.60	—	—	—	—	—	0.0005 ~ 0.0035	—	—	0.07 ~ 0.12
MnTiB	13	A74202	20MnTiB	0.17 ~ 0.24	0.17 ~ 0.37	1.30 ~ 1.60	—	—	—	—	—	0.0005 ~ 0.0035	—	0.04 ~ 0.10	—
	14	A74252	25MnTiBRE	0.22 ~ 0.28	0.20 ~ 0.45	1.30 ~ 1.60	—	—	—	—	—	0.0005 ~ 0.0035	—	0.04 ~ 0.10	—
Cr	15	A20152	15Cr	0.12 ~ 0.18	0.17 ~ 0.37	0.40 ~ 0.70	0.70 ~ 1.00	—	—	—	—	—	—	—	—
	16	A20153	15CrA	0.12 ~ 0.17	0.17 ~ 0.37	0.40 ~ 0.70	0.70 ~ 1.00	—	—	—	—	—	—	—	—
	17	A20202	20Cr	0.18 ~ 0.24	0.17 ~ 0.37	0.50 ~ 0.80	0.70 ~ 1.00	—	—	—	—	—	—	—	—
	18	A20302	30Cr	0.27 ~ 0.34	0.17 ~ 0.37	0.50 ~ 0.80	0.80 ~ 1.10	—	—	—	—	—	—	—	—
	19	A20352	35Cr	0.32 ~ 0.39	0.17 ~ 0.37	0.50 ~ 0.80	0.80 ~ 1.10	—	—	—	—	—	—	—	—
	20	A20402	40Cr	0.37 ~ 0.44	0.17 ~ 0.37	0.50 ~ 0.80	0.80 ~ 1.10	—	—	—	—	—	—	—	—