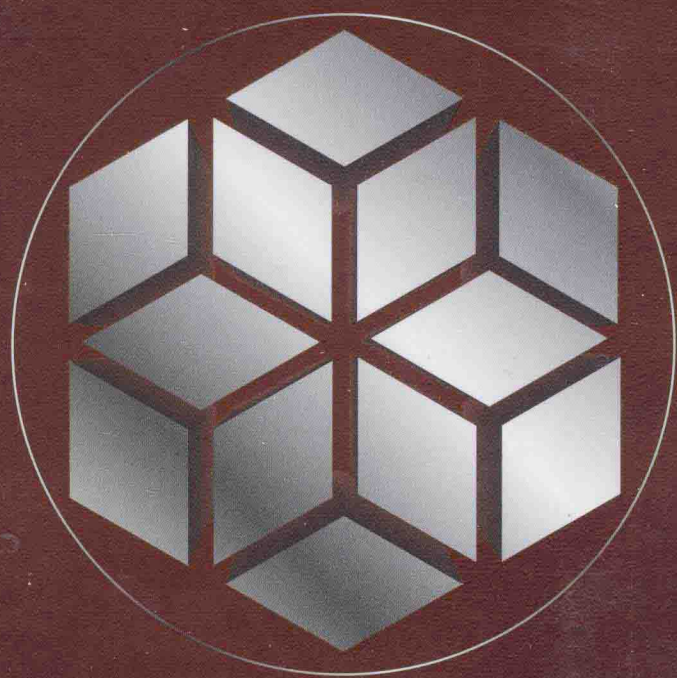


DIHEJINGANG HANJIETEXING JI
HANJIECAILIAO



低合金钢焊接特性 及焊接材料

尹士科 王移山 著



化学工业出版社

低合金钢焊接特性 及焊接材料

尹士科 王移山 著



化学工业出版社

· 北京 ·

图书在版编目 (CIP) 数据

低合金钢焊接特性及焊接材料/尹士科, 王移山著.
北京: 化学工业出版社, 2014.1
ISBN 978-7-122-18703-1

I. ①低… II. ①尹…②王… III. ①低合金钢-焊接-研究②低合金钢-焊接材料-研究 IV. ①TG457.11
中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2013) 第 245802 号

责任编辑: 周 红
责任校对: 宋 玮

文字编辑: 项 激
装帧设计: 王晓宇

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
787mm×1092mm 1/16 印张 15 字数 377 千字 2014 年 2 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: 78.00 元

版权所有 违者必究

低合金钢包括高强度钢、铬-钼耐热钢、低温钢和耐蚀钢等，广泛用于各种钢结构、建筑结构、工程机械、锅炉及压力容器、车辆、船舶、桥梁和海洋工程等领域，在国民经济中具有极为重要的作用。低合金钢的焊接是建造这些工程结构的主要工艺方法和关键环节，在产品制造过程中必须特别重视焊接质量，许多工程结构的破坏，包括一些重大的灾难性事故都是由于焊接出现问题造成的。

低合金钢的焊接应重点关注两大方面的问题，一是焊接接头的韧性，防止接头的任一区域产生脆化，特别是过热区；二是焊接裂纹，防止在焊缝或热影响区中出现裂纹，特别是冷裂纹。高洁净度冶炼技术、先进的轧制技术、冷却技术和热处理技术等现代冶金技术极大地提高了钢材的韧性，与之相比较，焊缝金属的韧性通常处于劣势，因为焊缝是铸造组织，还有焊缝中的杂质元素含量远高于钢材。就焊缝金属的抗裂性而言，由于焊接过程中总要产生扩散氢，因而裂纹往往在焊缝中产生。为了弥补焊缝金属在韧性上的不足，要在研发焊接材料上多下功夫：需要探索有效的韧化途径，如钛-硼复合韧化等；为了降低扩散氢含量，应尽可能采用超低氢型焊接材料，或者在施工上采取措施，减少氢带来的危害。

关于焊接接头的抗断裂性能，这是学术界和技术人员都关心的大问题，它不能仅靠几个冲击吸收功数值就轻易作出结论。在评定抗断裂性能方面，目前国内外采用的试验方法有：冲击试验（含示波冲击）、CTOD 实验、动态撕裂试验、落锤试验、爆炸试验等。有些国家则采用几种试验方法综合评定，如采用落锤试验和冲击试验方法相结合，也有的采用爆炸试验和动态撕裂试验相结合。在设计上，为防止焊接结构发生脆性破坏，通常有两个设计准则，一是防止裂纹产生准则，即启裂控制；二是止裂性能准则，即扩展控制。前者要求，结构薄弱部位的材料应具有一定的抗裂纹产生能力；后者则要求，一旦裂纹产生，材料应具备阻止裂纹扩展的能力。

关于焊接冷裂纹问题，在焊接产品结构尺寸和钢材材质确定之后，影响焊接冷裂纹的三个要素中只有扩散氢是可以调控的因素了。焊缝中的纵向裂纹既与拘束应力大小有关系，也与扩散氢含量的多少有关系；焊缝中的横向裂纹则与扩散氢的关系更大，即使结构拘束应力不大，只要有相应数量的扩散氢（超过了材质的临界氢浓度），就会产生横向裂纹。所以人们把解决冷裂纹问题的出路放在对扩散氢的研究上是情理之中的。除了采取措施降低焊接材料中的扩散氢含量外，还需要对氢的扩散、逸出行为、氢在焊缝中的分布、氢的临界浓度等进行深入研究，以寻求更为有效的降氢途径。在选择抗裂纹性能的试验方法上，可以直接选择国内外采用的标准方法，也可以自行创建专用的方法。为了有针对性地解决施工上的实际问题，首先要摸清结构上出现的裂纹情况，如裂纹走向、数量多少、分布位置等，以此确定试验件的结构尺寸（特别是板厚）、接头形式（对接或角

接)和拘束度(纵向裂纹要求拘束度大些)等。另外,为了评价焊缝纵向裂纹敏感性,宜采用单道施焊,并在可能的条件下设置应力集中部位;而要评价焊缝的横向裂纹敏感性,则应尽可能采用多道施焊,以使扩散氢有一个累积增高的过程。还要选择相应的施焊条件,如环境温度、湿度,预热及道间温度等。

《低合金钢焊接特性及焊接材料》一书,较全面地介绍了低合金钢的冶金特性、低合金钢及其配套焊接材料的成分和性能要求、低合金钢用焊接材料产品、低合金钢的焊接特性以及与低合金钢焊接相关的基础性研究成果。内容较为丰富翔实,包含了作者多年来从事科研工作的技术数据,是一本理论性和实用性兼备的通用图书。本序中涉及的技术内容在该书的相关章节均有介绍,读起来颇有新意和启发,在此向焊接界的朋友们加以推荐。

本书作者是我的同事,是我院科技人员中的骨干力量,先后承担过多项国家重点攻关项目,获得了多个奖项,为国民经济建设和国防现代化做出了重大贡献。他们在科研工作中还针对某些理论方面的工作进行了深入探索,写出了有水平的学术论文和专著,受到了读者的欢迎。这本新书的出版,将会使我们有更新的启示,受益也会更大些,特向作者致意并表示祝贺。

中国钢研科技集团公司副总经理
钢铁研究总院副院长
中国机械工程学会焊接学会副理事长
金属焊接性与焊接材料分会主任委员
博士生导师



教授

2013年8月

低合金钢是在碳素钢中加入不同成分或不同数量的各种合金元素，以提高钢的强度、韧性、耐腐蚀性、耐热性、焊接性及其他特殊性能要求的合金钢材。近 20 年来，低合金钢的发展十分迅速，有关统计资料表明，在全世界的现代工业生产中，60% 以上的焊接结构是采用各种低合金钢制造的。目前，已纳入各国钢材标准的低合金钢品种达 300 余种。通过利用现代化的冶炼、轧制、合金化和热处理等技术，不仅能使低合金钢具有比普通碳素钢高得多的强度，而且还具有满足不同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、耐氢蚀性、耐大气腐蚀性以及优良的加工性和焊接性能等。因此，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、海洋工程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，低合金钢已成为最主要的结构材料。经过多年的研究，又开发了力学性能优良、焊接性能更具优势的新型微合金钢系列，细晶粒和超细晶粒高强度钢系列。

在大力发展低合金钢的同时，也开展了焊接材料的研发工作，并在低合金钢焊接热影响区及焊接接头的断裂特性和抗裂性能等方面，进行了系统的试验和研究工作，本书主要涉及这些方面的内容。在焊材方面，重点放在了提高焊缝韧性上，介绍了系列的韧化途径，如针状铁素体韧化、钛-硼复合韧化等。在断裂特性和抗裂性能等方面，对相关钢种进行了焊接热模拟试验，以选定最佳的热输入范围；为了对焊接接头的抗断裂性能进行研究，采用示波冲击试验、动态撕裂试验等方法进行检测和安全性评定；在抗裂性能方面，除了定性的方法外，还采用了定量的试验方法，以探求更科学的焊接施工参数。针对与焊接施工相关的问题，如扩散氢的逸出行为、焊接气孔的成因等，还进行了理论性探讨。另外，为了便于读者查找最新的技术标准，书中摘要列入我国标准或国际标准中的钢材牌号，它们的化学成分及力学性能等技术要求，同样也列入了各类焊接材料的技术标准，包括 ISO 最新颁布的标准。

几十年来，作者从事的科研工作大部分是国家重点工程，有“六五”、“七五”和“八五”期间的攻关项目，如高效铁粉焊条的研究、HQ-60 钢的埋弧焊接、HQ-100 钢用焊条及焊接性研究、耐盐卤腐蚀用钢的焊接材料研究等。更早期的项目有原一机部和原水电部提出的水电站用 690MPa 级高强度钢及其焊接材料，原化工部提出的 -90℃ 低温用钢及其焊接材料等。在完成国家重大科研工程的过程中，积累了大量的试验数据，也碰到了不少难题，再针对实际问

题进行深入探索，边实践边总结，既增强了感性认识也加深了理性认识，使科研工作得以顺利完成。书中的很多内容，就是在这个科研过程中取得的技术数据的汇集，是20世纪后半期相关科研工作的写照，并为后续的科研工作向纵深发展打下了基础。应予指出的是，书中有创新性的内容大多是在重大科研项目所取得成果的基础上总结出来的。书的内容虽然不够系统，但针对性强，是在解决工程上的问题中得到的，对其他工程应用有参考作用。如书中介绍的焊材产品，大多已应用在实际结构上；书中介绍的焊接裂纹试验方法和试验结果，已经在相关产品的制造中得到了验证，为用户所认可。若把书的前后内容联系起来看，它较为系统地介绍了低合金钢的选材、焊接材料的选用或开发新产品的技术思路、焊接热影响区或焊接接头的抗动载性能、焊接接头的抗裂纹性能等，最后是焊接施工参数的选择，直到模拟产品的制造，从技术上看使读者有一个完整的概念。

中国钢研科技集团公司副总经理、钢铁研究总院副院长、中国机械工程学会焊接学会副理事长、博士生导师田志凌教授为本书撰序，作者深受鼓舞，特致敬意。

在本书的编写过程中，得到了邹增大、张永权、吴树雄、李勇、李春范、何少卿、王国亮、杨才福、彭云、何长红、马成勇、潘川、李箕福、魏真明、喻萍、刘奇凡、李亚琳、裴新军、阿荣、李凤辉、王勇、卢军华、吴智武、刘宝英、刘英杰、邱启文、于秀立、魏巧贞、赵国胜、刘霆、邱忆南等的大力支持，提供了相关技术资料，有的参加了撰写论文，有的是科研课题或开发产品的合作者，在此致以衷心的感谢。

对书中所引用的文献作者及出版部门一并表示感谢。限于编者水平，书中定有不妥之处，敬请读者批评指正。

著者
2013年8月

第一章 低合金钢的成分与性能	1
第一节 低合金钢概述	2
一、低合金钢的分类及特征	2
1. 高强度钢	2
2. 铬-钼耐热钢	7
3. 低温钢	11
4. 耐蚀钢	12
二、钢铁冶金技术的现代化	14
1. 炼钢技术	14
2. 轧钢技术	15
3. 热处理技术	15
4. 微合金化技术	16
第二节 国产低合金钢的成分与性能要求	16
一、采用推荐标准的高强度钢和专业用钢的成分与性能要求	16
1. 低合金高强度结构钢 (GB/T 1591—2008)	16
2. 高强度结构钢用调质钢板 (BG/T 16270—2009)	20
3. 高耐候结构钢 (GB/T 4171—2008)	22
4. 石油天然气输送管线用宽厚钢板 (GB/T 21237—2007)	23
5. 建筑结构用钢板 (GB/T 19879—2005)	24
6. 低焊接裂纹敏感性高强度钢板 (YB/T 4137—2005)	26
二、采用强制标准的专业用钢的成分与性能要求	26
1. 船舶及海洋工程用结构钢 (GB 712—2011)	26
2. 桥梁用结构钢 (GB 714—2008)	29
3. 锅炉和压力容器用钢板 (GB 713—2008)	30
4. 低温压力容器用低合金钢钢板 (GB 3531—2008)	31
5. 压力容器用调质高强度钢板 (GB 19189—2011)	32
6. 焊接气瓶用钢板和钢带 (GB 6653—2008)	33
第三节 国外低合金钢的成分与性能	33
一、民用低合金高强度钢	33
1. 日本开发的系列高强度结构钢	33
2. 欧洲及美国开发的高强度管线用钢	35
二、潜艇用低合金高强度高韧性钢	36
1. 美国的潜艇用低合金高强度高韧性钢	36
2. 日本的潜艇用低合金高强度钢	36
第二章 低合金钢用焊接材料的成分与性能	37
第一节 对焊接材料的熔敷金属成分和性能要求	37
一、电弧焊焊条	39
1. 非合金钢和细晶粒钢焊条 (GB/T 5117—2012)	39
2. 热强钢焊条 (GB/T 5118—2012)	44
3. 高强度钢焊条 (ISO 18275-B—2005)	46
二、气体保护焊用实心焊丝和保护气体	48
1. 非合金钢和细晶粒钢用气保焊焊丝 (ISO 14341-B—2002)	48
2. 非合金钢和细晶粒钢 TIG 焊接用填充丝和焊丝 (ISO 636-B—2004)	49

3. 高强度钢气保护焊用焊丝和填充丝 (ISO 16834-B—2006)	50	3. 在贝氏体-马氏体焊缝中钛、硼对组织和相变的影响	80
4. 保护气体的分类	51	三、含氧量对低合金钢焊缝组织和韧性的影响	82
三、气体保护焊和自保护焊用药芯焊丝	53	1. 含氧量对焊缝相变温度和组织的影 响	82
1. 非合金钢和细晶粒钢气体保护焊和自保护焊用药芯焊丝 (ISO 17632-B—2004)	53	2. 含氧量对低、中强度焊缝韧性的影响	82
2. 热强钢用气体保护焊药芯焊丝 (ISO 17634-B—2004)	54	3. 含氧量对高强度焊缝韧性的影响	84
3. 高强钢气体保护焊和自保护焊用药芯焊丝 (ISO 18276-B—2005)	56	4. 含氧量对电渣焊焊缝韧性的影响	87
四、埋弧焊接用焊丝和焊剂	57	四、焊接规范参数的影响	88
1. 非合金钢和细晶粒钢埋弧焊接用焊丝和焊丝-焊剂组合 (ISO 14171-B—2002)	57	1. 冷却速度的计算及其对焊缝力学性能的影响	88
2. 热强钢埋弧焊接用实心焊丝、药芯焊丝和焊丝-焊剂组合 (ISO 24598-B—2007)	59	2. 焊接规范参数对屈服强度 590MPa 级焊缝金属性能的影响	90
3. 高强钢埋弧焊接用实心焊丝、药芯焊丝和焊丝-焊剂组合 (ISO 26304-B—2008)	61	3. 焊接规范参数对屈服强度 785MPa 级焊条的焊缝金属性能影响	91
4. 埋弧焊用焊剂 (ISO 14174—2004)	64	五、焊后热处理对焊缝金属力学性能的影响	92
第二节 影响焊缝金属力学性能的因素	65	1. 焊后热处理对屈服强度 690MPa 级焊缝金属性能的影响	92
一、化学成分对焊缝组织和性能的影响	66	2. 焊后热处理对屈服强度 785MPa 级焊缝金属性能的影响	96
1. 低碳低合金焊缝组织类别及其形貌特征	66	第三节 焊接材料产品性能简介	99
2. 合金成分对焊缝金属组织的影响	70	一、国内研发的焊条	99
3. 合金成分对焊缝金属性能的影响	73	1. 高效率铁粉焊条	99
二、微量元素硼和钛对焊缝韧性的影响	74	2. 低合金高强度钢焊条	103
1. 硼对焊缝组织和韧性的影响	74	3. -90℃低温钢用焊条	105
2. 钛对焊缝组织和韧性的影响	78	4. 低合金耐蚀钢用焊条	108
		二、国内研发的埋弧焊用焊剂和实心焊丝	111
		1. 785MPa 级高强度钢用熔炼焊剂	111
		2. 590MPa 级高强度钢用烧结焊剂	115
		3. 黏结焊剂的降氢途径探索	117
		4. 低合金钢埋弧焊接用实心焊丝	119

三、国内研发的气体保护焊用实心 焊丝和药芯焊丝	121	韧性焊接材料	128
1. 气体保护焊用实心焊丝	121	3. 曼彻特公司生产的铬-钼耐 热钢用焊接材料	129
2. 气体保护焊用药芯焊丝	123	4. 国外知名公司生产的结构 钢用气保护药芯焊丝	129
四、国外使用的焊接材料产品	126	5. 日本神钢生产的低温钢用 药芯焊丝	136
1. 美国的潜艇钢用高强度高 韧性焊接材料	126		
2. 日本的潜艇钢用高强度高 韧性焊接材料	126		
第三章 有关低合金钢及其焊接方面的基础性研究	141		
第一节 低合金钢中硼化物析 出行为	141	影响	155
一、硼化物的析出特性	141	3. 厚板焊接时控气参数对熔敷金属 含氮量的影响	156
1. 快速冷却过程中硼化物 的析出	142	二、含氮量对气孔及焊缝性能的 影响	160
2. 恒温过程中硼化物的析出	143	1. 保护气体中加入的氮量与熔敷 金属中含氮量的关系	161
3. 硼化物的析出特性模式	144	2. 熔敷金属含氮量与力学性能的 关系	161
二、钢中 MnS 对 BN 析出行为的 影响	144	第四节 焊条电弧焊的气孔成因 分析	163
1. 奥氏体化温度对 BN 分布状态 的影响	145	一、焊缝中气孔的分布及形貌	163
2. 850℃ 保温时 BN 的再析出和 分布状态	146	二、焊缝中气孔的形成与水分及扩散 氢的关系	165
第二节 低合金钢焊缝中扩散氢的逸 出及残余氢量	148	三、焊缝中气孔的成因分析	165
一、扩散氢的逸出行为	148	第五节 电弧焊的熔滴过渡及其对焊接 施工的影响	167
1. 常温下扩散氢的逸出	148	一、电弧焊接的熔滴过渡形态 分类	167
2. 高温下扩散氢的逸出	150	1. 颗粒过渡	169
二、残余氢的释放及影响因素	151	2. 喷射过渡	170
1. 组织和硬度对残余氢量的 影响	151	3. 短路过渡	172
2. 焊缝含氧量对残余氢量的 影响	151	4. 渣保护过渡及其他	172
3. 扩散氢含量对残余氢量的 影响	152	二、药芯焊丝焊接的熔滴过渡形态	173
第三节 气体保护焊的保护效果 研究	152	1. 熔渣型药芯焊丝的熔滴过渡 形态	173
一、施工条件及控气参数对保护效果 的影响	153	2. 金属粉型药芯焊丝的熔滴过渡 形态	173
1. 风速对气体保护焊接时保护 效果的影响	153	三、熔滴过渡形态对飞溅和发尘量的 影响	174
2. 保护气体流量对含氮量的 影响	153	1. 熔滴过渡形态对飞溅的影响	174
		2. 熔滴过渡形态对发尘量的 影响	174

影响	175		
第四章 低合金钢的焊接特性	177		
第一节 焊接热影响区的韧性与静载断裂特性	177	3. 动态撕裂试验 (又称 DT 试验) ...	198
一、模拟焊接热影响区的组织与韧性	177	4. 落锤试验 (简称 NDT 试验) ...	199
1. 10Ni5CrMoV 钢模拟热影响区的组织与韧性	177	5. 落锤撕裂试验 (简称 DWTT 试验)	200
2. Cr4-Al 系耐蚀钢模拟热影响区的组织与韧性	182	6. 爆炸试验	200
3. HQ100 钢模拟热影响区与实际热影响区的韧性比较	184	7. 模拟结构破坏试验	202
二、焊接热影响区的静载断裂特性 ...	185	三、焊接接头的强度匹配和韧性评定	203
1. 10Ni5CrMoV 钢的静载断裂特性	186	1. 焊接接头的强度匹配	203
2. HQ100 钢的临界断裂应力	190	2. 关于焊缝的韧性评定	205
3. Cr4-Al 钢的临界断裂应力	190	第三节 低合金钢的焊接裂纹及试验方法	207
第二节 焊接接头的抗动载性能及试验方法	191	一、低合金钢焊接裂纹简述	207
一、低合金钢焊接接头的抗动载性能	191	1. 纵向裂纹的位置和扩展途径 ...	207
1. 脆性和延性断裂的裂纹产生与扩展	192	2. 横向裂纹的分布及断口形貌 ...	209
2. 脆性和延性断裂的断口特征及形貌	192	3. 扩散氢在焊缝厚度上的分布及临界含氢量	212
二、焊接接头的抗动载性能试验方法	194	二、焊接裂纹试验方法及其应用	214
1. 示波冲击试验	195	1. 焊接裂纹试验方法	214
2. 宽板拉伸试验	197	2. 几种高强度钢的焊接裂纹试验结果	217
		三、低合金钢焊接裂纹的预防措施	222
		1. 焊接材料的再烘干与保管	222
		2. 高强度钢的焊接施工参数	225
		3. 铬-钼耐热钢的焊接施工参数	226
参考文献	229		

低合金钢的成分与性能

本文中所指的低合金钢包括低合金高强度钢、低合金耐热钢、低合金低温钢和低合金耐蚀钢，主要是按照应用领域划分的。标准中的低合金钢则是从化学成分范围方面加以限定，通常分为非合金钢、低合金钢和合金钢。ISO、EN、JIS 和 GB 标准中关于钢分类的合金元素含量界限值列于表 1-1。对于合金钢的分类又有两种，一种是分成两挡，即低合金钢和合金钢，如表 1-1 所列；另一种是分成三挡，即低合金钢、中合金钢和高合金钢，如捷克标准中规定：当合金元素中限含量之和不大于 5% 时为低合金钢；当合金元素中限含量之和大于 5% 而小于 10% 时为中合金钢；当合金元素中限含量之和大于 10% 时为高合金钢。依照表 1-1 中的规定，本书中所涉及的大多数钢号已超出低合金钢的限定范围，进入了合金钢之列。但参照习惯叫法，称低合金钢更易为广大读者所接受，也与其他文献相互衔接，特此说明。

表 1-1 关于钢分类的元素规定含量界限值 (摘自 GB/T 13004—91) %

元素	非合金钢 (各元素含量均为最大值)				低合金钢 (单个值为含量最大值)			合金钢 (各元素含量均为最小值)			
	ISO 国际	EN 欧洲	JIS 日本	GB 中国	ISO 国际	EN 欧洲	GB 中国	ISO 国际	EN 欧洲	JIS 日本	GB 中国
Al	0.10	0.10	0.30	0.10			—	0.10	0.10	0.30	0.10
B	0.0008	0.0008	0.0008	0.0005			—	0.0008	0.0008	0.0008	0.0005
Cr	0.30	0.30	0.30	0.30	0.50	0.50	0.30~0.50	0.30	0.30	0.30	0.50
Cu	0.40	0.40	0.40	0.10	0.50	0.50	0.10~0.50	0.40	0.40	0.40	0.50
Mn	1.65	1.60	1.65	1.00	1.80	0.80	1.00~1.40	1.65	1.60	1.65	1.40
Mo	0.08	0.08	0.08	0.05	0.10	0.10	0.05~0.10	0.08	0.08	0.08	0.10
Ni	0.30	0.30	0.30	0.30	0.50	0.50	0.30~0.50	0.30	0.30	0.30	0.50
Nb	0.06	0.05	0.06	0.02	0.08	0.06	0.02~0.06	0.06	0.05	0.06	0.06
Si	0.50	0.50	0.60	0.50			0.50~0.90	0.50	0.50	0.60	0.90
Ti	0.05	0.05	0.05	0.05	0.12	0.12	0.05~0.13	0.05	0.05	0.05	0.13
W	0.10	0.10	0.30	0.10			—	0.10	0.10	0.30	0.10
V	0.10	0.10	0.10	0.04	0.12	0.12	0.04~0.12	0.10	0.10	0.10	0.12
Zr	0.05	0.05	0.05	0.05	0.12	0.12	0.05~0.12	0.05	0.05	0.05	0.12

上列国家标准中还规定了合金元素含量的确定方法，即当标准、技术条件或订货单中对钢的化学成分规定最低值或范围时，应采用最低值作为规定含量；当标准、技术条件或订货

单中对钢的化学成分规定最高值时，则以最高值的 0.7 倍作为规定含量。就表中所列出的任一元素，当某一钢种中该元素的最低含量或最高含量的 0.7 倍处在表中所列的非合金钢、低合金钢或合金钢相应的界限值范围内时，则属于非合金钢、低合金钢或合金钢。

关于细晶粒钢和微合金钢：细化晶粒既可以提高钢的强度，又可改善钢的塑性和韧性。所以，近几十年来细晶粒钢得到了很大发展和广泛应用。细化晶粒的方法很多，最常用的是冷、热加工细化，热处理细化，形变热处理细化以及微合金细化等。微合金钢是在非合金钢或低合金钢中加入能形成碳化物或氮化物的微量合金元素（Nb、V、Ti）的钢。这些微量元素的含量一般不超过 0.2%。微合金化元素的加入起到了细化晶粒的作用，有提高强度和改善韧性的作用。这类钢通常在热轧或控轧控冷状态下使用。这类钢的性能改善不仅依赖于添加的微量元素，更主要的是借助于热形变导入的物理冶金因素的变化。在同样强度情况下，微合金钢的碳当量更低，焊接性更优良。

关于耐热钢和热强钢：按照耐热钢的主要特性分类，可分为抗氧化钢（也称为高温不起皮钢）和热强钢两类。抗氧化钢一般要求高温下具有较好的化学稳定性，但承受的载荷较低。热强钢则要求有较高的高温强度和良好的组织稳定性兼有一定的抗氧化性。它具有较高的持久和蠕变强度、足够的韧性、良好的可加工性和焊接性。主要用于制造高温下承受较高应力的零件和部件。抗氧化钢主要是奥氏体和铁素体耐热钢，热强钢主要是马氏体和珠光体耐热钢。近几年有资料报导，含（9%~12%）Cr-（0.5%~1.0%）Mo 的 T91、T92、T122 型火力发电锅炉用热强钢归类于高铬铁素体钢。

关于抗蠕变钢和蠕变性能：蠕变是金属材料在规定温度及恒定应力（拉伸、压缩、弯曲、扭转等）作用下，随着时间的增加而缓慢地产生塑性变形的现象。由于蠕变变形随温度和应力的增加而急剧增加，所以，金属的蠕变严重地影响着高温设备的使用寿命。抗蠕变钢是指蠕变抗力或蠕变断裂抗力好的钢种。蠕变抗力的指标是蠕变强度，也称蠕变极限，它表示金属抗蠕变变形能力的大小。在蠕变条件下，在规定的时间内，产生规定的蠕变变形量的应力值，即为蠕变强度。对于某些长期在高温下运行，且只允许产生一定变形量的构件，它的许用应力就是将蠕变强度除以相应的安全系数后得出的。蠕变断裂抗力是在蠕变条件下，蠕变变形逐渐增加，最终导致断裂，也称蠕变破断。蠕变断裂抗力的判据是持久强度，也称持久极限。它指的是，在恒定温度和恒定应力作用下，达到某规定时间发生断裂的应力值。对于某些在高温下长期运行中不考虑变形量，只考虑使用寿命的构件，它的许用应力就是将持久强度除以相应的安全系数后得到的。持久试验和蠕变试验基本相同，只是持久试验中所采用的载荷比蠕变试验中的载荷大。

第一节 低合金钢概述

一、低合金钢的分类及特征

1. 高强度钢

(1) 低合金高强度钢

低合金高强度钢曾称为普通低合金钢或低合金结构钢，这类钢种的生产和使用在我国得到了迅速发展。为了使这类钢的技术标准与国际接轨，在我国修订和制定标准时参照采用了 ISO 4950 和 ISO 4951 高屈服强度钢标准，改名为低合金高强度结构钢。新标准中将钢的牌号改由三部分组成，即钢的屈服点汉语拼音字母（Q）、屈服点数值和质量等级（A、B、C、

D、E)，例如：Q345B，345 表示屈服点数值为 345MPa，B 表示 +20℃ 冲击吸收功 A_{KV} 为 34J。在原来的 GB/T 1591—1988《低合金高强度结构钢》标准中，低合金高强钢的牌号是用化学元素符号来表示，例如：09Mn2，09 表示碳的平均质量分数为 0.09%，Mn2 表示锰的平均质量分数约为 2%。由于 GB/T 1591—1988 标准中表示的低合金高强钢牌号能直观反映含碳量和合金元素及其含量，在目前的设计图样和工艺文件中，有的仍采用 1988 年标准中的低合金高强钢牌号，故在此列出低合金高强钢新旧标准中的牌号对照，见表 1-2。

表 1-2 低合金高强钢新旧标准中的牌号对照

项 目	GB/T 1591—1994		GB/T 1591—1988	
牌 号	Q295		09MnV 09MnNb 09Mn2 12Mn	
	Q345		12MnV 14MnNb 16Mn 16MnR 18Nb	
	Q390		15MnV 15MnTi 16MnNb	
	Q420		15MnVN 14MnVTiRE	
	Q460			
冲击吸收功	A	无冲击吸收功要求	12MnV, 14MnNb, 16Mn, 16MnRE, 18Nb 等	+20℃ 冲击吸收功 $A_{KV} \geq 34J$
	B	+20℃ 冲击吸收功 $A_{KV} \geq 34J$		
	C	0℃ 冲击吸收功 $A_{KV} \geq 34J$		
	D	-20℃ 冲击吸收功 $A_{KV} \geq 34J$		
	E	-40℃ 冲击吸收功 $A_{KV} \geq 34J$		

低合金高强度钢中除了含有 Mn、Si 等主要合金元素外，还有的添加元素 V、Ti、Nb、Al、RE、N 等，其中 V、Ti、Nb、Al 为细化晶粒元素，主要作用是在钢中形成微细的碳化物和氮化物，在金属相变时沿奥氏体晶界析出，形成细小弥散相，阻止晶粒长大，有效地防止钢的过热，改善钢的强度，提高钢的韧性和抗层状撕裂性。这类钢适用于较重要的钢结构，如压力容器、电站设备、海洋结构、工程机械、船舶、桥梁、管道和建筑结构等。为满足上列产品的使用要求，对钢中硫和磷的上限、碳及碳当量的上限、最高硬度值以及夏比冲击吸收功的下限均有严格规定。

① 低合金高强度钢的分类 常采样的方法有以下几种。

- a. 按成分分类，有单元素钢、多元素钢、微量合金元素钢等。
- b. 按强度等级分类，有 Q295、Q345、Q390、Q420、Q460 等。
- c. 按热处理分类，有非调质钢（包括热轧、控轧、正火）和调质钢等。
- d. 按金相组织分类，有珠光体-铁素体钢、贝氏体钢、低碳马氏体钢等。
- e. 按用途分类，有采用推荐标准（GB/T）的高强度钢和专业用钢，如耐大气腐蚀、耐海水腐蚀钢、石油天然气输送管线用钢、建筑结构钢等；也有采用强制标准（GB）的专业用钢，如船舶及海洋工程用结构钢、桥梁用结构钢、锅炉和压力容器用钢等。

② 低合金高强度钢的热处理类型 主要有三种，即热轧、正火和调质热处理。

a. 热轧类钢的合金系统有 C-Mn 系、C-Mn-Si 系等，主要依靠 Mn、Si 的固溶强化作用来提高强度，还可以加入微量的 V、Nb 或 Ti，利用其碳化物和氮化物的沉淀析出和细化晶粒，进一步提高钢的强度，改善塑性和韧性。其组织为细晶粒的铁素体和珠光体，这类钢的屈服强度多在 400MPa 以下。

b. 正火类钢可以充分发挥沉淀强化的效果，通过正火处理使沉淀相从固溶体中以细小质点析出，弥散分布于晶界和晶内，并细化晶粒，有效地提高强度，且具有良好的塑性和韧性。正火钢中加入的合金元素有 Mn、Si、Ni、Mo、Cr、V、Nb、Ti 等，大部分正火钢的组织为细晶粒的铁素体和珠光体；含钼的钢经正火处理后，其组织为上贝氏体和少量铁素

体，为改善这类钢的塑性和韧性，要求正火后再进行回火处理。正火类钢的屈服强度为420~540MPa。

c. 调质钢通常指的是低碳调质钢，它的合金化设计原则与热轧钢和正火钢不同，其强度不直接取决于合金元素的含量，而取决于组织，即通过淬火来获得高强度的马氏体组织，再经过回火处理改善其塑性和韧性。加入的合金元素有Cr、Ni、Mo、Cu、V、Nb、Ti、B等，目的是保证淬透性，有的元素（如Mo）还可提高钢的抗回火性能。在这类钢中，镍是非常重要的合金元素，它能提高钢的韧性，降低钢的脆性转变温度。铬能显著提高淬透性，铬、镍一起加入时可获得良好的综合力学性能，发展成了高强度高韧性钢系列，如HY80、HY100、HY130钢等。随着强度和韧性的提高，镍的含量应不断增加，可高达5%~10%；但铬的含量则以1.6%为上限，继续增加对淬透性已不起作用，反而使钢的韧性下降。为了提高钢材的抗冷裂纹能力和改善低温韧性，降低含碳量是很有效的措施，为弥补强度上的损失，可加入多种微量元素，特别是像硼那样对淬透性影响强烈的元素，并已发展成了含碳量很低（ $\leq 0.09\%$ ）的调质钢，即低焊接裂纹敏感性高强度钢（简称CF钢）。调质钢的合金系统是比较复杂的，加入了多种合金元素，但加入量一般不高。其组织属于低碳回火马氏体，也称板条马氏体。钢的屈服强度在490~1080MPa之间，但Q420和Q460的C、D、E级钢也可采用调质处理，以满足低温韧性要求。

20世纪50年代初至80年代期间，美国、英国、德国、日本等先后开发出性能优异的低碳调质高强钢，用于重要焊接结构，取得了显著的经济效益。20世纪50年代初，美国首先研制出淬火+回火处理的抗拉强度800MPa的焊接结构用低碳调质高强钢，即著名的T-1钢，并在此基础上开发了A517标准中的一系列低碳调质高强钢，主要用于压力容器、桥梁及工程机械等。美国T-1钢及压力淬火设备的研制成功，开辟了高强度钢的生产新途径，促进了各国焊接结构用低碳调质高强钢的发展。美国海军先后研制出HY100钢和HY130钢。

日本在T-1基础上开发出了HT和WEL-TEN系列钢以及比美国HY80钢强度稍高的NS63高强钢，不久又研制出化学成分近似于HY130钢的NS80和NS90高强度钢。20世纪70年代以后，新日本制铁公司开发出的WEL-TEN系列钢，其抗拉强度已从600MPa发展到目前的1000MPa（如WEL-TEN100钢），该钢种冲击韧性高、焊接性好，现场施工条件下采用超低氢低强度焊材时可以不预热焊。

③ 低合金高强度钢的焊接特点 这类钢易于产生的焊接问题主要是焊接裂纹和热影响区脆化，对于抗拉强度大于800MPa级的调质钢，还存在一个软化区问题。为防止冷裂纹，要采取相应的预热和后热措施，选用低氢和超低氢型焊接材料；抗拉强度在800MPa级以上的钢种，还可以考虑选择低强匹配的焊材等。为减少热影响区脆化，主要是限制焊接热输入，多道焊时降低道间温度也有作用，根据钢种、板厚和性能要求等，通过工艺评定试验，选定合适的施焊参数。热影响区中的软化区也通过限制热输入来减小软化区宽度和软化程度。

(2) 微合金控轧控冷高强度钢^[1]

20世纪60年代以前是低合金高强度钢的发展阶段，20世纪70年代起以微合金化和控制轧制技术为基础，相辅相成，开发了微合金钢。微合金钢与普通低合金高强度钢的最主要区别，在于微合金元素的存在将明显改变其轧制热变形行为，通过控制微合金钢的轧制及轧后冷却过程，使微合金元素的作用充分发挥，可使钢材的性能显著提高，进而发展成新型的高强度高韧性钢。它是20世纪世界钢铁业的重大技术进展之一。

① 微合金控轧控冷钢的特点 微合金钢是在低碳钢或低合金高强钢中加入能形成碳化

物或氮化物的微量合金元素（如 Nb、V、Ti），且这些微合金元素的含量（质量分数）一般低于 0.2%。微合金元素的加入可以细化钢的晶粒，提高钢的强度并获得较好的韧性。但钢的良好性能不仅依靠添加微合金元素，更主要是通过控轧和控冷工艺的热变形导入的物理冶金因素的变化。因此，在和一般热轧钢强度相同的情况下，这种钢的碳当量低，焊接性优良。

这类钢的组织以针状铁素体为主，其晶粒尺寸在 10~20 μm 之间，先共析铁素体和渗碳体都很少。该钢多用微量 Ti 处理，Ti 含量为 0.01%~0.02%，由于钢中形成的 TiN 颗粒溶解温度很高（约 1000 $^{\circ}\text{C}$ 以上），所以在焊接热影响区邻近焊缝的高温区域内 TiN 颗粒很难溶解，因而阻止了奥氏体晶粒长大，使该区域的韧性下降不多，所以这种钢适宜于大热输入焊接。这类钢按控轧控冷工艺又可分为两种。

a. 微合金控轧钢（TMCP）。在微合金钢热轧过程中，通过对金属加热温度、轧制温度、变形量、变形速率、终轧温度和轧后冷却工艺等诸参数的合理控制，使轧件的塑性变形与固态相变相结合，以获得良好的组织，提高钢材的强韧性，使其成为具有优异综合性能的钢。通常可分为奥氏体再结晶区（ $\geq 950^{\circ}\text{C}$ ）、奥氏体未再结晶区（ $950\sim A_{r3}$ 点）和奥氏体与铁素体两相区（ A_{r3} 以下终轧）三种不同的控轧温度下生产的几种微合金钢。

b. 微合金控轧控冷钢（TMCP+ A_c ）在轧制过程中，通过冷却装置，在轧制线上对热轧后轧件的温度和冷却速度进行控制，即利用轧件轧后的余热进行在线热处理生产的钢。这种钢具有更好的性能，特别是强度；又可省去再加热、淬火等热处理工艺。用较少的合金含量可生产出强度和韧性更高、焊接性更好的钢。在控制冷却中，主要控制轧件的轧制开始和终了温度、冷却速度和冷却的均匀程度。

② 微合金控轧控冷钢的焊接特性 这种钢碳当量低，含碳量一般在 0.04%~0.16% 之间，S、P 和其他杂含量也很低，所以焊接性和一般热轧结构钢相比有很大的改善。例如对预热和后热的要求低，冷裂纹、热裂纹和层状撕裂等焊接裂纹发生的可能性较低，可使用的焊接热输入范围宽，可以进行单层大热输入焊接等。通常这类钢应用在要求比较高的焊接结构中，如车辆、桥梁、船舶和采油平台、锅炉与压力容器、油气管线、建筑结构等。由于这类钢在成分和热轧工艺上的特点，根据国外在焊接方面的经验，仍有以下潜在的问题需要注意。

a. 冷裂纹的危险性。由于这类钢的成分比较纯净，含 C 量和 S、P 等杂质比较低，因此缺少可能形成氢陷阱的杂质，使焊接时可以容纳氢的体积减少；另一方面，由于可以形成晶核的杂质减少，使得奥氏体不易发生转变，亦即增加了淬硬性，这些都可增加冷裂纹的危险性。

b. 热影响区中局部脆化区对韧性的影响。借助于在成分和热轧工艺上的优势，使其韧性得到了很大的改善。但是这类钢在焊接条件下，有可能在热影响区中会形成局部脆化区；作为多层焊接接头的局部脆化区有 4 个部位是关键部位，即粗晶热影响区、临界温度区间热影响区、临界温度区间粗晶热影响区、亚临界温度区粗晶热影响区。

c. 软化。这类钢的部分高强度是在热轧工艺中采用加速冷却将能量储存在位错组织中而获得的，这一能量在高温下可以释放。这样就会导致在焊接条件下产生的在临界温度区间和亚临界温度区间的加热区，甚至在缓慢冷却的粗晶区的加热区域，形成硬度比母材金属低的区域，即软化区。软化使接头的强度降低。例如，在埋弧焊的条件下，板厚为 40mm 的焊接接头中会发现强度下降 25% 的软化区。

③ 微合金控轧控冷钢的应用 微合金钢属于钢铁材料中使用量最大的工程结构钢，广

泛用于石油和天然气管线，采油平台、桥梁、大型建筑物的建设，船舶、车辆、容器及机械、化工、轻工等设备的制造。在建筑领域使用的微合金钢有微合金化钢筋钢、微合金化高强度钢板、微合金化耐火钢、微合金化 H 型钢和其他高性能建筑用钢。在石油和天然气输送管线方面，我国目前大量使用的 X52~X70 级钢，主要采用 Nb-V 复合微合金化。欧洲的 X80 级钢则采用 Nb-Ti 微合金化。在桥梁结构上采用的微合金钢有 12MnVq、14MnNbq、15MnVq、15MnVNq 等，绝大多数的桥梁用钢均为微合金钢。汽车用微合金钢中，用量最大的是汽车框架和汽车壳体，也是采用含 Nb 和（或）V 的微合金钢。在民用船舶建造上，也已广泛采用微合金钢，微合金元素以钛为主。今后微合金钢将成为低合金高强度钢的主体，得到更加广泛的应用。

（3）超细晶高强度钢^[2]

通常晶粒尺寸在 $100\mu\text{m}$ 以下就称为细晶粒钢，即传统的细晶粒钢。随着冶金技术和生产工艺的不断进步，晶粒的尺寸不断缩小，甚至达到了微米、亚微米级。

① 超细晶高强度钢的分类 按照钢的发展进程和晶粒尺寸大小，可分为以下两类。

a. TMCP 钢。即控轧后立即加速冷却所制造的钢，简称为 TMCP (thermo-mechanical control process) 钢。利用 TMCP 工艺在实验室中，晶粒尺寸可达到几个微米，但在实际工业生产中，所得钢的晶粒尺寸小于 $50\mu\text{m}$ ，最小可达 $10\mu\text{m}$ 。这种钢满足了石油和天然气工业的需求，这种钢具有高的强度和好的韧性，低的碳当量为其提供了优良的焊接适应性。

b. 新一代钢铁材料。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，使钢材具有高洁净度、超细晶粒、高均匀度等特征，其强度比常用钢材提高一倍，钢材使用寿命增加一倍。高洁净度是指 S、P、O、N、H 元素的总含量小于 80×10^{-6} ，这样不但可提高钢材原有的性能，有时还可以赋予钢新的性能；超细组织即晶粒尺寸在 $0.1 \sim 10\mu\text{m}$ 之间，细化晶粒是不降低韧性甚至提高韧性的方法；高均匀度指的是成分、组织和性能很均匀，是唯一能提高强度且波动范围很小的手段。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，即超细的微观组织表现出了优异的综合性能。

② 超细晶高强度钢的生产工艺方法和强韧化特点 利用生产工艺技术是获得超细晶粒的主要手段，是超细晶高强度钢具有优良强韧综合性能的决定因素。超细晶高强度钢与同等强度的传统钢相比，其化学成分的主要特点是碳含量低，这有利于提高其焊接性，因此其强化手段不是通过增加碳含量和合金元素含量，而是通过晶粒细化、相变强化、析出强化等相结合的方法来达到提高强韧化的目的。晶粒细化（包括变形细化和相变细化）是唯一能够同时提高钢强度和韧性的方法，因而成为超细晶高强度钢最佳的强化机制。利用第二相粒子析出的沉淀强化是超细晶粒钢采用的另一种强化机制，高温时在奥氏体内形成的粒子虽然对控制晶粒长大有效，但不会造成强化，强化是低温时在奥氏体或铁素体内形成的，位错与亚结构强化都是有效的强化方式。

③ 超细晶高强度钢的焊接性 在焊接性方面存在以下两个主要问题。

a. 由于超细晶粒，在焊接热作用下，晶粒长大的驱动力很大，必然导致 HAZ 晶粒严重粗化，晶粒粗大将导致韧性下降，影响整个接头性能与母材的匹配。

b. HAZ 的软化，超细晶高强度钢主要是在形变条件下获取细晶的，不能通过热处理手段来恢复。焊后 HAZ 出现软化，尤其当高热输入时，就更加明显。不过这种局部软化对接头整体强度的影响是受其他因素控制的，如局部软化区的宽度、板厚和焊缝强度匹配等，采用高匹配是防止或减小 HAZ 软化的有效措施之一。为获得与母材相当性能的焊接接头，要进行焊接材料、焊接方法及焊接工艺等的合理选择。