

高强钢的焊接

李亚江 等著



冶金工业出版社
Metallurgical Industry Press

1

45

高强钢的焊接

李亚江 等著

北 京
冶金工业出版社
2010

内 容 提 要

本书针对工程结构用量最大的低合金高强钢的焊接性特点、焊接材料和焊接工艺特点等进行了阐述,突出介绍了高强钢在工程领域(如工程机械、锅炉及压力容器、建筑、桥梁、石油化工等)中的焊接应用。本书力求突出实用性等特点,给出相关焊接技术数据及一些典型工程结构产品的焊接应用实例,可供焊接生产借鉴和参考。本书内容涉及的是高强钢焊接中经常遇到的问题,书中选用了一些新工艺和成功的经验,其中的数据选自最新的技术资料,反映了当前焊接技术的应用现状。

本书供从事与焊接技术相关工作的工程技术人员使用,也可供高等院校师生、科研和企事业单位的科研人员参考。

图书在版编目(CIP)数据

高强钢的焊接 / 李亚江等著. — 北京:冶金工业出版社,2010.1

ISBN 978-7-5024-5112-7

I. ①高… II. ①李… III. ①高强度钢—焊接
IV. ①TG457.11

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2009)第 226641 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

责任编辑 张爱平 美术编辑 张媛媛 版式设计 张 青

责任校对 卿文春 责任印制 牛晓波

ISBN 978-7-5024-5112-7

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 1 月第 1 版,2010 年 1 月第 1 次印刷

169mm×239mm;18.25 印张;353 千字;281 页;1-2000 册

49.00 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)

前 言

高强度钢的焊接应用,在工业生产和国防建设的各个领域取得了十分显著的经济和社会效益。这类钢的主要特点是强度高,韧性、塑性也较好,在压力容器、工程机械、桥梁、舰船、各种车辆以及其他钢结构制造中得到了广泛的应用。

本书针对工程结构中用量最大的低合金高强钢的焊接性特点、焊接材料和焊接工艺特点等进行了阐述,突出了高强钢在工程领域(如工程机械、锅炉及压力容器、建筑、桥梁、石油化工等)中的焊接应用,力求突出新颖性、先进性和实用性等特色。本书内容涉及的是高强钢焊接中经常遇到的问题,注重工程实践和应用实例的阐述,特别是选用了一些生产中有代表性的新工艺和成功的应用实例。书中给出的相关焊接技术数据及典型工程结构产品的焊接实例,可以指导现场焊接生产。本书为读者掌握高强钢的焊接工艺和工程应用提供必要的基础和现场成功的经验。

书中所提供的数据选自最新的技术资料,反映了当前低合金高强钢焊接的应用现状。本书供从事与焊接技术相关的工程技术人员、培训和管理人员使用,也可供高等院校师生、科研和企事业单位的科研人员参考。

参加本书编写的人员还有:王娟、刘鹏、马海军、张永兰、夏春智、蒋庆磊、沈孝芹、黄万群、张永喜、刘强、张蕾、吴娜等。

本书在写作过程中参阅了部分国内外文献,在此特向文献的作者表示诚挚的谢意。书中存在的疏漏之处,恳请广大读者批评指正。

作 者

2009年9月5日

目 录

1 概述	1
1.1 高强度钢的分类及性能	1
1.1.1 高强度钢的分类	1
1.1.2 低合金高强钢的基本性能	3
1.2 高强钢的用途及发展	12
1.2.1 提高低合金高强钢性能的途径	12
1.2.2 低合金高强钢的用途	13
1.2.3 低合金钢的发展	16
2 热轧、正火及控轧钢的焊接	19
2.1 热轧、正火及控轧钢的分类及性能	19
2.1.1 低合金结构钢的分类及特点	19
2.1.2 热轧及正火钢的成分和性能	21
2.1.3 微合金控轧钢的成分和性能	29
2.1.4 低合金耐候结构钢	34
2.2 热轧、正火及控轧钢的焊接性特点	36
2.2.1 冷裂纹及影响因素	36
2.2.2 热裂纹和再热裂纹	40
2.2.3 热影响区脆化和软化	41
2.2.4 层状撕裂	42
2.3 热轧、正火及控轧钢焊接工艺	45
2.3.1 焊接材料及工艺要点	45
2.3.2 焊接工艺参数	58
2.3.3 焊接新工艺示例	62
2.3.4 焊前预热及焊后处理	66
2.3.5 典型钢种的焊接	68
3 低碳调质钢的焊接	75
3.1 低碳调质钢的分类及性能	75

3.1.1	低碳调质钢的分类	75
3.1.2	低碳调质钢的成分和性能	77
3.2	低碳调质钢的焊接性特点	85
3.2.1	高强度焊缝的强韧性匹配	86
3.2.2	焊接冷裂纹	91
3.2.3	热裂纹和再热裂纹	93
3.2.4	热影响区性能变化	93
3.3	低碳调质钢的焊接工艺特点	97
3.3.1	焊接方法和焊接材料	97
3.3.2	焊接参数的选择	103
3.3.3	焊前预热和焊后热处理	105
3.3.4	几种低碳调质钢的焊接	106
4	中碳调质钢的焊接	122
4.1	中碳调质钢的分类和性能	122
4.1.1	中碳调质钢的分类	122
4.1.2	中碳调质钢的成分及性能	123
4.2	中碳调质钢的焊接性特点	125
4.2.1	淬硬性和冷裂纹倾向	125
4.2.2	焊缝中的热裂纹	126
4.2.3	热影响区脆化和软化	126
4.3	中碳调质钢焊接工艺特点	129
4.3.1	焊接方法和焊接材料	129
4.3.2	两种典型的焊接工艺方案	133
4.3.3	焊接工艺参数	134
4.3.4	焊前预热和焊后热处理	135
5	低合金耐热钢的焊接	137
5.1	低合金耐热钢的分类及性能	137
5.1.1	低合金耐热钢的合金系	137
5.1.2	珠光体耐热钢的成分及性能	138
5.1.3	铁素体耐热钢的成分及性能	144
5.2	低合金耐热钢的焊接性分析	148
5.2.1	热影响区硬化及冷裂纹	148
5.2.2	再热裂纹(SR 裂纹)	149

5.2.3 回火脆性	151
5.3 低合金耐热钢的焊接工艺要点	152
5.3.1 焊接方法和焊接材料	152
5.3.2 焊前预热和焊后热处理	160
5.3.3 珠光体耐热钢的焊接要点	161
5.3.4 新型铁素体耐热钢的焊接要点	164
6 低温钢的焊接	168
6.1 低温钢的分类、成分及组织性能	168
6.1.1 低温钢的分类	168
6.1.2 低温钢的化学成分及组织	170
6.1.3 低温钢的力学性能	172
6.2 低温钢的焊接性分析	174
6.2.1 无 Ni 低温钢的焊接性特点	174
6.2.2 含 Ni 低温钢的焊接性特点	175
6.2.3 奥氏体低温钢的焊接特点	176
6.3 低温钢的焊接工艺特点	176
6.3.1 焊接方法及焊材选用	176
6.3.2 低温钢的焊条电弧焊	178
6.3.3 低温钢的埋弧焊	180
6.3.4 低温钢的氩弧焊	182
7 异种高强钢的焊接	187
7.1 异种高强钢的焊接组合	187
7.1.1 异种高强钢的类别划分	187
7.1.2 异种钢焊接构件的组合特点	188
7.1.3 异种钢焊接结构的应用	189
7.2 异种钢的焊接性分析	190
7.2.1 焊缝成分的稀释(熔合比)	190
7.2.2 熔合过渡区的形成	194
7.2.3 接头区应力状态	198
7.3 异种钢的焊接工艺特点	199
7.3.1 异种高强钢的焊接特点	199
7.3.2 焊接方法和焊接材料	200
7.3.3 异种低合金钢焊接的工艺要点	204

7.4 异种高强钢的焊接实例	207
7.4.1 异种低碳调质钢的焊接	207
7.4.2 珠光体-奥氏体异种钢的焊接	214
7.4.3 不锈钢复合钢的焊接	217
8 高强钢的焊接应用	223
8.1 建筑、桥梁	223
8.1.1 奥运主体育场钢结构柱脚的焊接	223
8.1.2 大型高炉和热风炉的焊接	227
8.1.3 钢桥主梁的焊接	232
8.2 船舶和车辆制造	236
8.2.1 船体结构的焊接	236
8.2.2 汽车滚装船的焊接	242
8.2.3 典型平台结构的焊接	245
8.2.4 车辆转向架构架的焊接	248
8.2.5 NX70 型共用车底架的焊接	251
8.3 工程机械	253
8.3.1 起重机结构件的焊接	253
8.3.2 挖掘机铲斗的焊接	256
8.3.3 煤矿液压支架结构件的焊接	258
8.4 化工压力容器	260
8.4.1 厚壁加氢反应器的焊接	260
8.4.2 液化天然气储罐的焊接	263
8.4.3 $15 \times 10^4 \text{m}^3$ 原油罐的焊接	265
8.5 电力建设	267
8.5.1 锅炉筒体、集箱的焊接	267
8.5.2 锅炉管子、膜式水冷壁的焊接	270
8.5.3 汽轮机转子的焊接	271
8.5.4 水轮机蜗壳的焊接	273
8.5.5 管线高强钢的焊接	277
参考文献	280

1 概 述

所谓高强钢是指那些在强度和韧性方面结合很好的钢种。低合金高强钢中合金元素的总含量一般不超过 5%，不仅提高钢的强度并保证其具有一定的塑性和韧性。这类钢的主要特点是强度高，韧性、塑性也较好，在钢结构制造中得到了广泛的应用，在国民经济和国防建设中发挥着重要的作用。

1.1 高强度钢的分类及性能

高强度钢综合性能优异，经济效益显著，是焊接结构中用量最大的一类工程材料。高强度钢结构的应用范围非常广泛，为了减轻钢结构自身的重量，所使用的钢材不断向高强度发展。例如，为了满足桥梁跨距不断增大而又保持部件截面积不致过大；为防止船舶的大型化造成的钢材重量与最大排水量比值的上升，采用高强钢是必然选择并日益受到重视，因此得以广泛应用。

1.1.1 高强度钢的分类

一般的，钢中的合金元素总含量小于或等于 5% 时，称为低合金钢，合金元素总含量在 5% ~ 10% 范围称为中合金钢，合金元素总含量超过 10% 的称为高合金钢。

低合金结构钢可按质量等级、强度等级、热处理状态、组织及用途等进行分类（见表 1-1）。一般说来，低合金高强钢通常是指抗拉强度 500 ~ 1200 MPa 范围（或屈服强度大于 350 MPa）并考虑焊接性而生产制造的钢材，抗拉强度在 1200 MPa 以上的称为超高强钢。

表 1-1 低合金结构钢的分类

分类依据	分类等级	特 征
按质量等级	普通低合金钢 优质低合金钢 特级优质低合金钢	钢号末尾不加“A、B”字母 钢号末尾加“A” 钢号末尾加“B”
按强度等级	Q295 (A、B) Q345 (A、B、C、D、E) Q390 (A、B、C、D、E) Q420 (A、B、C、D、E) Q460 (C、D、E)	屈服强度 $\sigma_s \geq 295$ MPa 屈服强度 $\sigma_s \geq 345$ MPa 屈服强度 $\sigma_s \geq 390$ MPa 屈服强度 $\sigma_s \geq 420$ MPa 屈服强度 $\sigma_s \geq 460$ MPa

续表 1-1

分类依据	分类等级	特 征
按热处理状态	非热处理强化钢 热处理强化钢(淬火+回火)	热轧钢、正火钢、控轧钢 低(中)碳调质钢
按组织构成	铁素体钢/珠光体钢 回火马氏体钢 贝氏体钢	—
按用途划分	锅炉(或压力容器)用低合金钢 工程机械用低合金钢 船舶(或海洋工程)用低合金钢 桥梁(或建筑)用低合金钢,等等	—

低合金高强钢可以分为非调质钢和经过淬火+回火的调质钢(QT)。非调质钢又可分为热轧钢、正火钢和控轧钢等。一般非调质钢是指常温抗拉强度在 600 MPa 以下的钢材,调质钢则为抗拉强度 600 MPa 以上的钢材。根据调质、非调质钢强度级别的差别,这两类钢材的焊接性、焊接工艺和接头性能有很大的不同。

焊接高强度钢品种繁多,在工程机械、桥梁、锅炉及压力容器、造船、海洋工程、车辆制造、建筑、油气输送管线等领域广泛应用。一般说来,焊接高强度钢基本上可分为以下几类:

(1) 传统的 C-Mn 系列高强度钢,钢中的锰含量(质量分数)一般为 0.8% ~ 1.6%,基本上采用低碳结构钢的生产流程和工艺规范,高温加热和高温轧制,轧后无控冷和无热处理是其生产的特点。

(2) 正火+回火或淬火+回火处理的较高强度级别的钢种系列(屈服强度为 400 ~ 800 MPa),钢中主要添加元素是 Cr、Ni、Mo 和 V、Nb、B 等,组织强化是这类钢的主要强化机制。

(3) 在传统 C-Mn 钢的基础上,通过降低碳含量,采用 Nb、V、Ti 独立或复合微合金化,并通过轧后正火方式生产的一类低合金焊接高强度钢。

(4) 通过采用 TMCP(控轧控冷)技术开发的一类微合金化控轧钢。

低合金结构钢按其供货时的热处理状态,可分为热轧钢、控轧钢、正火钢、TMCP(控轧控冷)钢、调质(淬火+回火)钢。调质处理还可分为水调质处理(淬火+回火)和空气调质处理(正火+回火)两种。通常,室温抗拉强度低于 530 MPa 的低合金钢中薄板可以热轧(或控轧)状态供货;抗拉强度 530 MPa 以上的低合金钢厚板,应以正火(或空气调质)状态供货;抗拉强度 690 MPa 以上的高强度钢大都是经调质处理(淬火+回火)的。

按钢的屈服强度级别及热处理状态,低合金高强钢分为:热轧及正火钢、控轧钢、低碳调质钢、中碳调质钢。把钢锭加热到 1300℃ 左右,经热轧成板材,然后空冷后即成为热轧钢;钢板冷却后,再加热到 900℃ 附近,然后在大气中冷却称为正

火钢。此外,900℃附近加热后放入淬火设备中水淬,然后在600℃左右回火处理,称为调质钢。近年来,采用控制钢板温度条件下轧制而得到高强度高韧性钢的工艺已达到实用化阶段,这种方法称为控轧。

在低合金钢的制造过程中,为了综合保持强度、韧性和焊接性,可用添加的合金元素进行调整。

(1) 热轧、正火钢及控轧钢 热轧及正火钢的屈服强度为294~490 MPa,在热轧或正火状态下使用,属于非热处理强化钢,应用十分广泛。这类钢也包括近年来发展起来的微合金控轧钢、TMCP钢等。

(2) 低碳调质钢 低碳调质钢的屈服强度为490~980 MPa,在调质状态下供货使用,属于热处理强化钢。它既有高的强度,又有较好的塑性和韧性,可以直接在调质状态下焊接,焊后不需要调质处理。这类钢主要用于大型工程机械、压力容器及潜艇制造等。

(3) 中碳调质钢 中碳调质钢的屈服强度一般在880~1176 MPa,钢中碳含量较高(0.25%~0.5%),常用于强度要求很高的产品或部件,如火箭发动机壳体、飞机起落架等。

(4) 珠光体耐热钢 以Cr、Mo为基础的低、中合金钢,随着工作温度的提高,还可加入V、W、Nb、B等合金元素,具有较好的高温强度和高温抗氧化性,主要用于工作温度500~600℃的高温设备,如热力设备和化工设备等。

(5) 低温钢 用于各种低温装置(-40~-196℃)和严寒地区的工程结构,在性能上对低温韧性有很高要求,一般在正火状态下使用。

1.1.2 低合金高强钢的基本性能

1.1.2.1 化学成分

A 合金元素

在钢中加入适当化学元素改变基体性能的方法称为合金化,为了合金化的目的而特定在钢中加入含量在一定范围的化学元素称为合金元素。

低合金钢中常用的合金元素有Si、Mn、Cr、Ni、Mo、W、V、Ti、Nb、Zr、Al、Co、Cu、B、RE等。P、S、N在某些情况下也可以起合金元素的作用。不同的国家所使用的合金元素与各国的资源条件有很大关系。美国的结构钢中多含Ni元素,苏联多含Cr元素,德国多含Cr、Mn元素,日本则多含Cr、Mn、Mo等元素。我国是矿物资源丰富的国家,富产Mn、Si、Mo、W、V、B、RE等元素。钢中合金元素的含量各不相同,有的高达百分之几十,如Ni、Cr、Mn等;有的低至万分之几,如微量元素B等。

各种合金元素的作用如下:

锰(Mn)有很好的脱氧能力,能清除钢中的FeO,还能与S形成MnS,消除S的有害作用。这些反应产物大部分进入炉渣而被除去,小部分残留于钢中成为非金

属夹杂物。因此 Mn 能改善钢的品质,降低钢的脆性,提高钢的热加工性能。Mn 除了形成 MnO 和 MnS 作为杂质存在于钢中以外,在室温下 Mn 能溶于铁素体中,对钢有一定的强化作用。

硅(Si)脱氧能力比 Mn 强,是主要的脱氧剂,能消除 FeO 夹杂对钢的不良影响。Si 能与 FeO 作用而形成 SiO_2 , 然后进入炉渣而被排除。Si 除了形成 SiO_2 作为杂质存在于钢中以外,在室温下 Si 大部分溶于铁素体中,因此 Si 对钢有强化作用。

碳(C)是最能提高钢材强度的元素,但易于引起焊接淬硬及焊接裂纹,所以在保证强度的条件下,碳的加入量越少越好。低合金高强钢加入的元素有 Si、Mn、Cu、Ni、Cr、Mo、V、Nb、B 等,杂质元素 P、S 的含量要限制在较低的程度。

低合金钢的合金元素的总含量不超过 5%,已列入我国或世界主要工业国(如美国、日本和德国等)钢铁材料低合金钢的标准。各种合金元素对低合金钢组织和性能的影响是很复杂的,全面了解其中的规律性是研究、分析和预测各种低合金钢及其焊接接头性能的依据。某些元素促使相变点降低并扩大 γ 区,而另一些元素则缩小 γ 区。各种元素对下临界点温度 A_1 ($^{\circ}\text{C}$) 的综合影响可用下述公式表示:

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

由上述公式可见, Si、Cr、Co 和 Ti 等元素能提高下临界点 A_1 的温度,而 Mn、Ni 和 V 则降低 A_1 点温度。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的影响可将其分成两组,一组以 Ni 元素为代表,称为 Ni 组元素(Ni、Mn、Co);另一组以 Cr 元素为代表,称为 Cr 组元素(Cr、Si、P、Al、Ti、V、Mo、W)。在 α -Fe 中具有较大溶解度的元素促使 γ 区缩小,而在 γ -Fe 中具有较大溶解度的元素则扩大 γ 区。各种合金元素对钢的力学性能和工艺性能的影响不仅取决于它的含量,而且还取决于同时存在的其他合金元素的性质和含量。

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,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。

各种合金元素对钢的抗拉强度和屈服强度影响的定量测定数据如图 1-1 所示。合金元素对低合金钢抗拉强度(MPa)和屈服强度(MPa)的综合影响,可按下列经验公式进行计算:

$$\sigma_s = 122 + 274w(\text{C}) + 82w(\text{Mn}) + 55w(\text{Si}) + 54w(\text{Cr}) + 44w(\text{Ni}) + 78w(\text{Cu}) + 353w(\text{V}) + 755w(\text{Ti}) + 540w(\text{P}) + [30 - 2(h - 5)]$$

$$\sigma_b = 230 + 686w(\text{C}) + 78w(\text{Mn}) + 90w(\text{Si}) + 73w(\text{Cr}) + 33w(\text{Ni}) + 56w(\text{Cu}) + 314w(\text{V}) + 529w(\text{Ti}) + 450w(\text{P}) + [21 - 1.4(h - 5)]$$

式中 h ——板厚,mm。

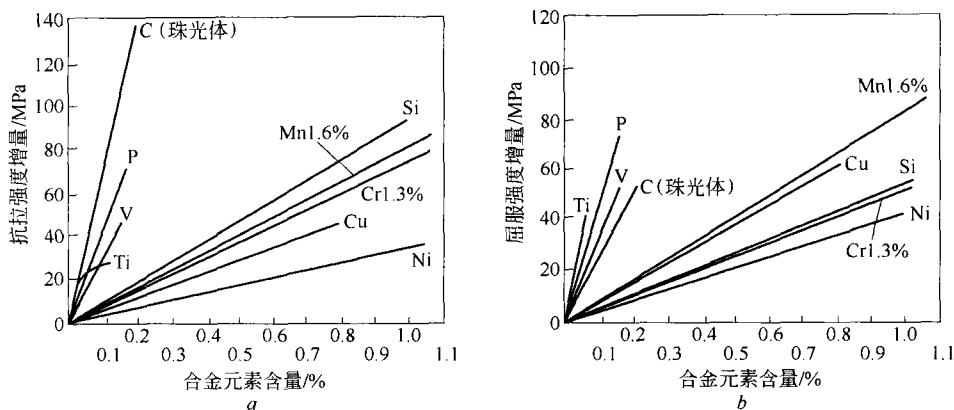


图 1-1 各种合金元素对钢材强度性能的影响

a—对抗拉强度的影响;b—对屈服强度的影响

低合金钢中,氮也是一种合金元素。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,扩大 γ 区。当它溶解在铁中时,氮能与钢中的其他合金元素形成稳定的氮化物,这些氮化物往往以弥散的微粒分布,从而细化晶粒,提高钢的屈服点和抗脆断能力。氮的作用既取决于其含量,也受在钢中存在的其他合金元素的种类和数量的影响。Cr、Al、Ti 和 V 等合金元素对氮具有较高的亲和力,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。

所有这些合金元素或与 Fe 形成固溶体或形成碳化物,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。

热轧及正火条件下,合金元素对塑性和韧性的影响与其强化作用相反,即强化效果越大,塑性和韧性的降低越多,当钢中合金元素的含量超出一定范围后会出现韧性的大幅度下降。因此,抗拉强度大于 600 MPa 的高强度钢一般都需要进行调质处理。我国低碳调质高强度钢的抗拉强度一般为 600 ~ 1300 MPa。

低碳调质钢除碳含量低外,还添加一些合金元素,如 Mn、Cr、Ni、Mo、V、Nb、B、Cu 等,主要是为了提高钢的淬透性和马氏体的回火稳定性。这些元素可以推迟珠光体和贝氏体的转变,使产生马氏体转变的临界冷却速率降低,具有良好的焊接性。

B 杂质及含量控制

钢中含有一些杂质,如 S、P、N、H、O 等对钢的性能影响很大。通过控制钢中的杂质总含量 $w(O + S + P + N + H)$,可以大幅度提高钢的性能。

硫(S)在钢中几乎不能溶解,而与铁形成化合物,在钢中以 FeS 形式存在,FeS

与 Fe 形成熔点较低的共晶体(熔点为 985°C)。当钢在 1200°C 左右进行热加工时,分布于晶界的低熔点共晶将因熔化而导致开裂,这种现象称为热脆性。为了消除 S 的有害作用,须增加钢中的 Mn 含量。Mn 与 S 可优先形成呈粒状分布于晶内和高熔点的 MnS(熔点为 1620°C),比钢材热加工温度高,可避免热脆性的发生。S 还有改善钢材切削加工性能的有利作用。轧钢时, MnS 沿轧制方向伸长,在切削时 MnS 夹杂起断屑作用,大大提高了钢的切削性能。

磷(P)比其他元素具有更强的固溶强化能力,室温时 P 在 $\alpha\text{-Fe}$ 中的溶解度略小于 0.1%。一般情况下,钢中的 P 能全部溶于铁素体中,使钢的强度、硬度提高,塑性、韧性则显著降低,尤其是低温时更为严重,这种现象称为冷脆性。P 在结晶过程中有严重的偏析倾向,在局部发生冷脆,并使钢材在热轧后出现带状组织。而且 P 在 $\gamma\text{-Fe}$ 及 $\alpha\text{-Fe}$ 中的扩散率很小,很难用热处理方法消除 P 的偏析。P 也具有断屑性,在易切削钢中,把 P 含量提高到 0.08% ~ 0.15%,使铁素体适当脆化,可以提高钢的切削加工性。

氮(N)在奥氏体中的溶解度较大,在铁素体中的溶解度很小,且随着温度的下降而减小。在 590°C 时溶解度为 0.1%,室温时降至 0.001% 以下。当钢材由高温较快冷却时,过剩的 N 由于来不及析出便过饱和地溶于铁素体中。随后在 $200 \sim 250^{\circ}\text{C}$ 加热,将发生氮化物 Fe_4N 析出,使钢的强度、硬度上升,塑性、韧性大大降低,这种现象称为时效脆性(蓝脆)。

在钢液中加入 Al、Ti 进行脱 N 处理,使 N 固定在 AlN 及 TiN 中,可以消除钢的时效脆性。钢中含氮易于形成气泡和疏松。用不同方法焊接低碳钢时焊缝的氮含量见表 1-2。

表 1-2 用不同方法焊接低碳钢时焊缝的氮含量

焊 接 方 法		焊缝氮含量 /%	焊 接 方 法		焊缝氮含量 /%
焊条电弧焊	光焊丝电弧焊	0.08 ~ 0.228	埋弧自动焊		0.002 ~ 0.007
	纤维素焊条	0.013	CO_2 气体保护焊		0.008 ~ 0.015
	钛型焊条	0.015	氧-乙炔气焊		0.015 ~ 0.020
	钛铁矿型焊条	0.014	熔化极氩弧焊		0.0068
	低氢型焊条	0.010	药芯焊丝明弧焊		0.015 ~ 0.040
	—	—	实芯焊丝自保护焊		< 0.12

氢(H)是钢中有害的元素,钢中含氢将使钢材变脆,称为氢脆。氢促使产生焊接冷裂纹,氢还会使钢中出现白点等缺陷,这种现象在合金钢中尤为严重。焊接时氢主要来源于焊接材料中的水分、电弧周围空气中的水蒸气、母材坡口表面的铁锈、油污等。

各种方法焊接碳钢时冷至室温气相的成分见表 1-3。焊接碳钢时熔敷金属

中的氢含量见表 1-4。

表 1-3 各种方法焊接碳钢时冷至室温气相的成分

焊接方法	焊条和 焊剂类型	气相成分(体积分数)/%					备 注
		CO	CO ₂	H ₂	H ₂ O	N ₂	
焊条 电弧焊	钛钙型	50.7	5.9	37.7	5.7	—	焊条在 110℃ 烘干 2 h
	钛铁矿型	48.1	4.8	36.6	10.5	—	
	纤维素型	42.3	2.9	41.2	12.6	—	
	钛 型	46.7	5.3	35.5	13.5	—	
	低氢型	79.8	16.9	1.8	1.50	—	
	氧化铁型	55.6	7.3	24.0	13.1	—	
埋弧 自动焊	HJ330	86.2	—	9.3	—	4.5	焊剂为 玻璃状
	HJ431	89~93	—	7~9	—	<1.5	
气焊	$\varphi(\text{O}_2)/\varphi(\text{C}_2\text{H}_2) = 1.1 \sim 1.2$ (中性焰)	60~66	有	34~40	有	—	—

表 1-4 焊接碳钢时熔敷金属中的氢含量

焊接方法		扩散氢 /mL · (100 g) ⁻¹	残余氢 /mL · (100 g) ⁻¹	总氢量 /mL · (100 g) ⁻¹	备 注
焊条 电弧焊	纤维素型	35.8	6.3	42.1	—
	钛 型	39.1	7.1	46.2	
	钛铁矿型	30.1	6.7	36.8	
	氧化铁型	32.3	6.5	38.8	
	低氢型	4.2	2.6	6.8	
埋弧自动焊		4.40	1~1.5	5.90	在 40~50℃ 停留 48~ 72 h 测定扩散氢;真空加 热测定残余氢
CO ₂ 气体保护焊		0.04	1~1.5	1.54	
氧-乙炔气焊		5.00	1~1.5	6.50	

氧(O)在钢中部分溶入铁素体,另一部分以金属氧化物夹杂形式存在。氧以金属氧化物形式存在于非金属夹杂物中时,对钢的性能有不良的影响。氧含量增加会使钢的强度、塑性降低。氧化物夹杂对钢的力学性能(尤其是疲劳强度)有严重的影响,钢中的 FeO 与其他夹杂物形成低熔点的复合化合物聚集在晶界上时,会造成钢的热脆性。

焊缝金属和钢中所含的氧几乎全部以氧化物(FeO、SiO₂、MnO、Al₂O₃等)和硅酸盐夹杂物的形式存在。焊缝氧含量一般是指总氧含量,既包括溶解的氧,也包括非金属夹杂物中的氧。焊接低合金钢时,尽管母材和焊丝的氧含量很低,但由于金属与气相和熔渣作用的结果,焊缝金属的氧含量是增加的。采用不同方法焊接时

焊缝中的氧含量见表 1-5。

表 1-5 采用各种方法焊接时焊缝中的氧含量

材料及焊接方法	平均氧含量 /%	材料及焊接方法	平均氧含量 /%
低碳镇静钢	0.003 ~ 0.008	纤维素型焊条	0.090
低碳沸腾钢	0.010 ~ 0.020	氧化铁型焊条	0.122
H08 焊丝	0.01 ~ 0.02	铁粉型焊条	0.093
H08 光焊丝焊接	0.15 ~ 0.30	埋弧自动焊	0.03 ~ 0.05
低氢型焊条	0.02 ~ 0.03	电渣焊	0.01 ~ 0.02
钛铁矿型焊条	0.101	气 焊	0.045 ~ 0.050
钛钙型焊条	0.05 ~ 0.07	CO ₂ 气体保护焊	0.02 ~ 0.07
钛型焊条	0.065	氩弧焊	0.0017

1.1.2.2 力学性能

低合金钢的强度越高,屈服强度与抗拉强度之差也越小。抗拉强度与屈服强度之比称为屈强比(σ_b/σ_s)。钢材的强度越高,屈强比增大。低碳钢的屈强比约为 0.7 左右,控轧钢板的屈强比约为 0.70 ~ 0.85,800 MPa 级高强钢的屈强比约为 0.95。

低合金高强钢的低温拉伸性能如图 1-2a 所示。温度下降时,钢材的抗拉强度升高,但韧性下降。一般 -100℃ 以上时钢材强度变化较小,温度再低时,抗拉强度和屈服强度急剧升高,韧性急剧下降,当在液氮温度(-196℃)附近时,伸长率很小。低合金高强钢的使用温度多在 -50℃ 以上,在此温度范围内高强钢的强度性能变化不大。

低合金高强钢高温拉伸性能的变化如图 1-2b 所示。200℃ 以前强度缓慢下降,温度进一步升高时,强度开始上升,300℃ 附近达到最大值,350℃ 以上逐渐下降。钢材高温时的强度性能仍保持室温强度的顺序,基本上不发生倒位现象。

缺口韧性是用于表示材料抵抗脆性破坏的一项指标。脆性破坏是在低应力条件下(一般是在屈服强度以下)发生的,多为瞬时破断,是高强钢焊接结构安全方面最值得注意的破坏现象。

目前世界各国多采用 Charpy(译为却贝或夏比)冲击吸收功作为缺口韧性的评价方法。Charpy 冲击试验规定采用 10 mm × 10 mm × 55 mm 的长方形试样,在试样中央开有深度 2 mm 的 V 形缺口。逐渐改变试验温度做冲击试验,用试样破断时所需的能量(称为吸收功)及断口形貌(塑性断口和脆性断口)来评价钢材缺口韧性。

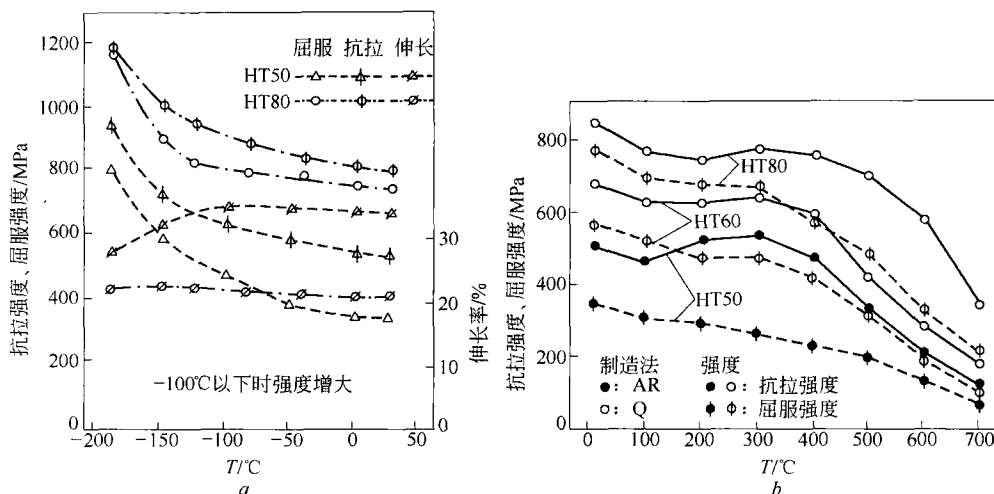


图 1-2 低合金高强度钢的低温和高温拉伸性能

a—低温拉伸性能; b—高温拉伸性能

吸收功可以反映出某一温度范围韧性急剧变化的转变现象。当吸收功变小时,由塑性断口转变为脆性断口。塑性断口和脆性断口的面积相等时的温度称为塑脆转变温度(用 vT_{rs} 表示)。脆性断口率为零时的吸收功称为“上平台能”,上平台能一半时的温度称为塑脆转变温度。强度越高,钢材的塑脆转变温度越低。根据大量的脆性破坏事故案例调查的结果,许多国家建议采用冲击功 27J 或 48J 时的温度作为缺口冲击试验的特性值。

高强度钢具有较高的强度和良好的塑韧性,采用不同的合金成分和热处理工艺,可以获得具有不同综合性能的低合金高强度钢。

钢的强度级别不同,加入的合金元素及其含量也不同,成分设计既要满足使用性能要求又要考虑其经济性。抗拉强度 σ_b 600 MPa 级的钢主要为 Si-Mn 系和在 Si-Mn 基础上加少量 Cr、Mo、Ti、V 这两类;700 MPa 级的钢主要为 Si-Mn-Cr-Ni-Mo 系,合金元素加入量较 600 MPa 级的钢多些,另外还加入少量的 V;800 MPa 级的钢主要为 Si-Mn-Cr-Ni-Mo-Cu-V 系,并加入一定量的 B;1000 MPa 级的钢合金系列与 800 MPa 级的钢基本相同,但合金元素加入量较高,尤其是为了保证韧性加入较多的 Ni。

高强钢在工程结构中日益广泛的应用促进了世界各国研发工作的不断深入。冶金生产技术的进步,如铁水预处理、炉外精炼、真空脱气、连续铸造等技术的发展,尤其是计算机自动控制技术在冶炼、控温、轧制和热处理等方面的应用,为焊接结构用高强钢的发展提供了重要的技术保证。

1.1.2.3 显微组织

近年来,控轧后用水或水、气喷淋,提高钢板冷却速度的技术已经进入实用化