

 焊接施工工艺与操作系列丛书

HANJIESHIGONGGONGYIYU  
CAOZUOXILIECONGSHU

# 不锈钢与 特殊用途钢的焊接

BUXIUGANGYUTESHUYONGTUGANGDE  
HANJIE

杨海明 主 编  
杭明峰 副主编



 辽宁科学技术出版社

焊接施工工艺与操作系列丛书

# 不锈钢与特殊用途钢的焊接

杨海明 主 编

杭明峰 副主编

辽宁科学技术出版社

沈 阳

ISBN 7-5381-4450-2  
定价：48.00元

沈阳分社：400-024-0000  
沈阳分社：400-024-0000

## 图书在版编目 (CIP) 数据

不锈钢与特殊用途钢的焊接/杨海明主编. —沈阳: 辽宁科学技术出版社, 2013.5

(焊接施工工艺与操作系列丛书)

ISBN 978-7-5381-8005-3

I. ①不… II. ①杨… III. ①钢—焊接 IV. ①TG457.11

中国版本图书馆CIP数据核字(2013)第065057号

---

出版发行: 辽宁科学技术出版社

(地址: 沈阳市和平区十一纬路29号 邮编: 110003)

印刷者: 沈阳百江印刷有限公司

经销者: 各地新华书店

幅面尺寸: 140mm × 203mm

印 张: 8

字 数: 240千字

印 数: 1~4000

出版时间: 2013年5月第1版

印刷时间: 2013年5月第1次印刷

责任编辑: 高 鹏

封面设计: 杜 江

版式设计: 于 浪

责任校对: 栗 勇

---

书 号: ISBN 978-7-5381-8005-3

定 价: 19.80元

联系电话: 024-23284062

邮购热线: 024-23284502

E-mail: lnkj1107@126.com

http://www.lnkj.com.cn

本社法律顾问: 陈光律师

咨询电话: 13940289230

# 前 言

随着现代工业和科学技术的快速发展,焊接技术在国民经济发展和现代制造业中起着愈来愈重要的作用,它广泛应用于汽车、机械工程、船舶、航空航天、石油化工、重型机械、锅炉、压力容器等领域。要掌握各种金属材料的焊接技能,就必须要了解各种金属材料的性能,掌握其相应的焊接工艺和必要的操作要领。借鉴成熟的经验,遵循合理的工艺和采用良好的操作手段进行施工生产,是控制焊接质量的必要条件。

为此,我们编写了《焊接施工工艺与操作系列丛书》,包括《碳素钢与低合金钢的焊接》《不锈钢与特殊用途钢的焊接》《有色金属的焊接》《铸铁与堆焊材料的焊接》和《异种金属的焊接》,希望能对焊接技术技能人才专业技能水平的提高提供一定的帮助。

本丛书根据焊接生产施工实际情况,结合作者多年从事生产和教学的经验,介绍了常用金属材料的焊接施工工艺与操作技法。内容以注重生产实用性、实用技术为主,理论知识为辅,特别注重了各项技能技巧的编写。本册介绍了各类不锈钢与特殊用途钢的种类、牌号、用途、焊接性、焊接材料、焊接方法和相应工艺、操作要领,以及各类不锈钢与特殊用途钢的焊接缺陷防止措施、实际工程的应用等。力求做到通俗、易读、紧贴实际应用,适合生产一线工人和技术人员以及职业院校师生等读者群使用参考。

本书由江苏省常州技师学院杨海明主编,杭明峰副主编,徐鸿、勾容、茅健、季炼平、曾鹏参编。

本书引用了大量的参考文献,在此向所引用文献的作者表示感谢。由于编者水平有限,书中误漏之处在所难免,恳请读者批评指正。

编 者

# 目 录

第1章 不锈钢与特殊用途钢的材料及焊接性 .....	1
1.1 不锈钢的材料 .....	1
1.2 不锈钢的焊接性 .....	6
1.3 耐热钢的材料 .....	9
1.4 耐热钢的焊接性 .....	20
1.5 低温钢的材料 .....	24
1.6 低温钢的焊接性 .....	31
第2章 不锈钢与特殊用途钢的焊接材料 .....	37
2.1 不锈钢的焊接材料 .....	37
2.2 耐热钢的焊接材料 .....	43
2.3 低温钢的焊接材料 .....	50
第3章 不锈钢与特殊用途钢焊接工艺 .....	55
3.1 铬镍奥氏体不锈钢焊条电弧焊工艺 .....	55
3.2 铬镍奥氏体不锈钢钨极氩弧焊工艺 .....	59
3.3 铬镍奥氏体不锈钢熔化极氩弧焊工艺 .....	63
3.4 铬镍奥氏体不锈钢等离子弧焊接与切割工艺 .....	67
3.5 铬镍奥氏体不锈钢激光焊与电子束焊工艺 .....	79
3.6 铬镍奥氏体不锈钢电阻焊工艺 .....	86
3.7 铬镍奥氏体不锈钢埋弧自动焊工艺 .....	91
3.8 铁素体不锈钢与马氏体不锈钢的焊接工艺 .....	94
3.9 双相不锈钢的焊接工艺 .....	97
3.10 不锈钢钎焊工艺 .....	103

3.11 不锈复合钢板的焊接工艺 .....	106
3.12 耐热钢的焊接工艺 .....	111
3.13 低温钢的焊接工艺 .....	115
<b>第4章 不锈钢与特殊用途钢的焊接操作 .....</b>	<b>122</b>
4.1 铬镍奥氏体不锈钢的焊条电弧焊操作 .....	122
4.2 铬镍奥氏体不锈钢的钨极氩弧焊操作 .....	128
4.3 铬镍奥氏体不锈钢的熔化极氩弧焊操作 .....	136
4.4 铬镍奥氏体不锈钢的等离子弧焊接与切割操作 .....	140
4.5 铬镍奥氏体不锈钢的埋弧自动焊操作 .....	147
4.6 铁素体不锈钢的焊接操作 .....	151
4.7 不锈复合钢板的焊接操作 .....	151
4.8 珠光体耐热钢的焊接操作 .....	154
4.9 奥氏体耐热钢及马氏体耐热钢的焊接操作 .....	160
4.10 低温钢的焊接操作 .....	167
<b>第5章 不锈钢与特殊用途钢焊接实例 .....</b>	<b>169</b>
5.1 奥氏体不锈钢焊接实例 .....	169
5.2 铁素体不锈钢焊接实例 .....	180
5.3 马氏体不锈钢焊接实例 .....	186
5.4 沉淀硬化不锈钢焊接实例 .....	190
5.5 不锈复合钢板焊接实例 .....	192
5.6 珠光体耐热钢焊接实例 .....	202
5.7 铁素体耐热钢、马氏体耐热钢和奥氏体耐热钢的 焊接实例 .....	209
5.8 低温钢焊接实例 .....	212
<b>第6章 不锈钢与特殊用途钢焊接的质量控制 .....</b>	<b>218</b>
6.1 焊接质量体系的运行 .....	218

---

6.2 焊接质量控制的实施 .....	221
6.3 不锈钢与特殊用途钢焊接结构失效分析 .....	233
6.4 控制焊接残余应力的措施 .....	237
参考文献 .....	244

# 第1章

## 不锈钢与特殊用途钢的材料及焊接性

### 1.1 不锈钢的材料

#### 1.1.1 不锈钢概述

不锈钢的定义是在钢中加入一定含量（质量分数应高于12%）铬元素，使钢处于钝化状态，表现为具有不锈特性的钢。此时，钢的表面能迅速形成致密的 $\text{Cr}_2\text{O}_3$ 氧化膜，使钢的电极电位和在氧化性介质中的耐蚀性发生突变性提高。在非氧化性介质（ $\text{HCl}$ 、 $\text{H}_2\text{SO}_4$ ）中，铬的作用不明显，除了铬外，不锈钢中还必须加入能使钢钝化的Ni、Mo等其他元素。

通常说的不锈钢实际是不锈钢和耐酸钢的总称，不锈钢一般泛指在大气、水等弱腐蚀介质中耐蚀的钢。耐酸钢则是指在酸、碱、盐等强腐蚀介质中耐蚀的钢。两者化学成分上的共同特点是铬的质量分数均在12%以上，但由于合金化的差异，不锈钢并不一定耐酸，而耐酸钢一般具有良好的不锈性能。按照习惯叫法，将不锈钢和耐酸钢简称为不锈钢。

#### 1.1.2 不锈钢的种类、化学成分及其用途

不锈钢按照组织类型，可分为五类，即奥氏体不锈钢、铁素体不锈钢、马氏体不锈钢、双相不锈钢和沉淀硬化不锈钢。

不锈钢的重要特性之一是耐蚀性，然而不锈钢的不锈性都是相对的、有条件的，受到诸多因素的影响，包括介质的种类、浓度、纯净度、流动状态，使用环境的温度、压力等，目前还没有对任何腐蚀环境都具有耐蚀性的不锈钢。因此选用不锈钢时应根据具体的使用条件加以合理选择，才能获得良好的使用效果。

奥氏体不锈钢在各种类型不锈钢中应用最为广泛，品种也最多。由于奥氏体不锈钢的铬、镍含量较高，因此在氧化性、中性以及弱还原性介质中均具有良好的耐蚀性。奥氏体不锈钢的塑



性、韧性优良，冷热加工性能俱佳，焊接性优于其他类型不锈钢，因而广泛应用于建筑装饰、食品工业、医疗器械、纺织印染设备以及石油、化工、原子能等工业领域。

铁素体不锈钢的应用比较广泛，其中Cr13和Cr17型铁素体不锈钢主要用于腐蚀环境不十分苛刻的场合，例如室内装饰、厨房设备、家电产品、家用电器等。超低碳高铬含钼铁素体不锈钢因对氯化物应力腐蚀不敏感，同时具有良好的耐点蚀、缝隙腐蚀性能，因而广泛用于热交换设备、耐海水设备、有机酸及制碱设备等。

马氏体不锈钢应用较为广泛的是Cr13型马氏体不锈钢。为获得或改善某些性能，添加镍、钼等合金元素，形成一些新的马氏体不锈钢，例如0Cr13Ni4Mo、0Cr16Ni5Mo等。马氏体不锈钢主要用于硬度、强度要求较高，耐腐蚀性要求不太高的场合，如量具、刀具、餐具、弹簧、轴承、汽轮机叶片、水轮机转轮、泵、阀等。

双相不锈钢是金相组织由奥氏体和铁素体两相组成的不锈钢，而且各相都占有较大的比例。双相不锈钢具有奥氏体不锈钢和铁素体不锈钢的一些特性，韧性良好、强度较高、耐氯化物应力腐蚀。适于制作海水处理设备、冷凝器、热交换器等，在石油、化工领域应用广泛。

沉淀硬化不锈钢是在不锈钢中单独或复合添加硬化元素，通过适当热处理获得高强度、高韧性并具有良好耐腐蚀性的一类不锈钢。通常作为耐磨、耐蚀、高强度结构件，如轴、齿轮、叶片等转动部件和螺栓、销子、垫圈、弹簧、阀、泵等零部件以及高强度压力容器、化工处理设备。

### 1.1.3 不锈钢的组织特点

不锈钢的组织有以下几种组织类型。

#### (1) 奥氏体不锈钢。

奥氏体不锈钢有Fe-Cr-Ni、Fe-Cr-Ni-Mo、Fe-Cr-Ni-Mn等系列。为改善某些性能，满足特殊用途要求，在一些钢中单独或

复合添加了N、Nb、Cu、Si等合金元素。奥氏体不锈钢通常在室温下为奥氏体组织，也有一些奥氏体不锈钢室温下的组织为奥氏体加少量铁素体，这种少量铁素体有助于防止焊接热裂纹的产生。奥氏体不锈钢不能用热处理方法强化，但由于这类钢具有显著的冷加工硬化性，可通过冷变形方法提高强度。经冷变形产生的加工硬化，可采用固溶处理使之软化。

#### (2) 铁素体不锈钢。

近年来，铁素体不锈钢逐渐向高纯度发展，使铁素体不锈钢的脆化倾向和焊接性得到明显改善。该类钢在固溶状态下为铁素体组织。当钢中铬的质量分数超过16%时，仍存在加热脆化倾向。在400~600℃温度区间停留易出现475℃脆化，在650~850℃温度区间停留易引起 $\delta$ 相析出而导致脆化，加热至900℃以上易造成晶粒粗化，使塑性、韧性降低。这类钢还有脆性转变特性，其脆性转变温度与钢中碳、氮含量，热处理时的冷却速度以及截面尺寸有关，碳、氮含量越低，截面尺寸越小，脆性转变温度越低。475℃脆化和 $\delta$ 相析出引起脆化，可通过热处理方法予以消除。采用516℃以上短时加热后空冷，可消除475℃脆化，加热到900℃以上急冷可消除 $\delta$ 相脆化。

#### (3) 马氏体不锈钢。

马氏体不锈钢铬的质量分数范围为12%~18%，碳的质量分数范围为0.1%~1.0%，也有一些碳含量更低的马氏体不锈钢，如0Cr13Ni5Mo等。马氏体不锈钢加热时可形成奥氏体，一般在油或空气中冷却即可得到马氏体组织。碳含量较低的马氏体不锈钢淬火状态的组织为板条马氏体加少量铁素体，如1Cr13、1Cr17Ni2、0Cr16Ni5Mo等。当碳的质量分数超过0.3%时，正常淬火温度加热时碳化物不能完全固溶，淬火后的组织为马氏体+碳化物。

#### (4) 铁素体-奥氏体双相不锈钢。

铁素体-奥氏体双相不锈钢室温下的组织为铁素体+奥氏体，通常铁素体的体积分数不高于50%。双相不锈钢与奥氏体不锈钢

相比,具有较低的热裂倾向,而与铁素体不锈钢相比,则具有较低的加热脆化倾向,其焊接热影响区铁素体的粗化程度也较低。但这类钢仍然存在铁素体不锈钢的各种加热脆性倾向。

#### (5) 沉淀硬化不锈钢。

沉淀硬化不锈钢包括马氏体沉淀硬化不锈钢、半奥氏体沉淀硬化不锈钢和奥氏体沉淀硬化不锈钢。马氏体沉淀硬化不锈钢固溶处理后,空冷至室温即可得到马氏体加少量铁素体和残留奥氏体或马氏体加少量残留奥氏体。再通过不同的时效温度,可得到不同的强化效果。半奥氏体沉淀硬化不锈钢固溶处理后,冷却至室温得到的是不稳定的奥氏体组织。经 $700\sim 800^{\circ}\text{C}$ 加热调整处理,析出碳化铬,使 $m_s$ 点升高至室温以上,冷却后即转变为马氏体。再在 $400\sim 500^{\circ}\text{C}$ 时效,达到进一步强化。这类钢也可在固溶处理后直接冷却至 $m_s$ 与 $m_f$ 之间,得到部分马氏体组织。再经时效处理,亦可达到强化效果。奥氏体沉淀硬化不锈钢的铬、镍或锰含量较高,无论采用何种热处理,室温下均为奥氏体组织。经时效处理,在奥氏体基体上析出沉淀硬化相,从而获得更高的强度。由于这类钢中含有较多硬化元素,比普通奥氏体不锈钢的焊接性差。

### 1.1.4 不锈钢的物理性能和力学性能

#### (1) 不锈钢的物理性能。

奥氏体不锈钢比电阻可达碳钢的5倍,线胀系数比碳钢大约50%,而马氏体不锈钢和铁素体不锈钢的线胀系数大体上和碳钢相同。奥氏体不锈钢的导热系数为碳钢的1/2左右。奥氏体不锈钢通常是非磁性的。铬当量和镍当量较低的奥氏体不锈钢在冷加工变形量较大的情况下,会产生诱导马氏体,从而产生磁性。用热处理方法可消除这种马氏体和磁性。

#### (2) 不锈钢的力学性能。

马氏体不锈钢在退火状态下,硬度最低,可淬火硬化,正常使用时的回火状态的硬度又稍有所下降。铁素体钢的特点是常温冲击韧性低。当在高温长时间加热时,力学性能进一步恶化,可

能导致475℃脆化、 $\delta$ 脆性或晶粒粗大等。奥氏体不锈钢常温具有低的屈强比(40%~50%)，而伸长率、断面收缩率和冲击吸收功均很高，并具有高的冷加工硬化性。某些奥氏体不锈钢经高温加热后，会产生 $\delta$ 相和晶界析出碳化铬引起的脆化现象。在低温下，铁素体和马氏体不锈钢的夏比冲击吸收功均很低，而奥氏体不锈钢则有良好的低温韧性。对含有百分之几铁素体的奥氏体不锈钢，则应注意低温下塑性和韧性降低的问题。

### 1.1.5 不锈钢的耐腐蚀性能

金属受介质的化学或电化学作用而破坏的现象称为腐蚀。不锈钢的主要腐蚀形式有均匀腐蚀(表面腐蚀)和局部腐蚀，局部腐蚀包括晶间腐蚀、点腐蚀、缝隙腐蚀和应力腐蚀等。据统计，在不锈钢腐蚀破坏事故中，由均匀腐蚀引起的仅占10%，而由局部腐蚀引起的则高达90%以上，由此可见，局部腐蚀是相当严重的腐蚀。

#### (1) 均匀腐蚀。

铬不锈钢在氧化性介质中容易先在表面形成富铬氧化膜。该膜将阻止金属的离子化而产生钝化作用，提高了金属的耐均匀腐蚀性能。铬不锈钢或铬镍不锈钢因铬的钝化作用而对氧化性酸、大气均有较好的耐均匀腐蚀性能。但单纯依靠铬钝化的铬不锈钢在非氧化性酸，如稀硫酸和醋酸中耐均匀腐蚀性能相对较低。高铬镍的奥氏体不锈钢，由于高镍或添加钼、铜之类元素，具有较高的耐还原性酸腐蚀的性能。该类钢又有耐酸钢之称。

沉淀硬化型不锈钢由于高铬，也有较好的耐均匀腐蚀性能。但由于强化处理，按碳化铬析出或时效的情况不同，耐蚀性能也有相应的损失或降低。

#### (2) 局部腐蚀。

①晶间腐蚀。在腐蚀介质的作用下，起源于金属表面沿晶界深入金属内部的腐蚀称为晶间腐蚀。它是一种局部腐蚀。晶间腐蚀导致晶粒间的结合力丧失，材料强度几乎消失，是一种很值得重视的危险的腐蚀现象。导致奥氏体不锈钢晶间腐蚀的原因很

多，主要有碳化铬析出引起的晶间腐蚀、 $\delta$ 相析出引起的晶间腐蚀、晶界吸附引起的晶间腐蚀和稳定化元素高温溶解引起的晶间腐蚀等。

②点蚀及缝隙腐蚀。点蚀的形成主要是由于材料表面钝化膜的局部破坏所引起的。降低碳含量，增加铬和钼以及镍的含量等都能提高抗点蚀能力。所以现有超低碳高铬镍含钼奥氏体不锈钢和超高纯度含钼高铬铁素体不锈钢均有较高的耐点蚀性能。

缝隙腐蚀是金属构件缝隙处发生的斑点状或溃疡形宏观蚀坑。适当增加铬、钼含量可以改善耐缝隙腐蚀的能力。实际上只有采用钛、高钼镍合金和铜合金等才能有效地防止缝隙腐蚀的发生。

③应力腐蚀断裂 (SCC)。应力腐蚀是指在静拉伸应力与电化学介质共同作用下，因阳极溶解过程引起的断裂。在一定静拉伸应力和在一定温度条件下的特定电化学介质的共同作用下，现有不锈钢均有产生应力腐蚀的可能性。

## 1.2 不锈钢的焊接性

### 1.2.1 奥氏体不锈钢的焊接特点

奥氏体不锈钢具有良好的焊接性。

#### (1) 热裂纹。

焊接奥氏体不锈钢时，主要是其枝晶方向性强，线膨胀系数大，焊缝冷却时收缩应力大，容易出现热裂纹，并且变形倾向大。

生产中防止热裂纹的措施有：采用焊缝金属为奥氏体-铁素体双相组织的焊条焊接奥氏体不锈钢；采用低氢焊条促使焊缝金属晶粒细化，减小焊缝中有害杂质，提高焊缝的抗裂性；采取尽量快的焊速，等待焊层冷却后再焊下一道，以减小焊缝过热；焊接结束或中断时，收弧要慢，填满弧坑，防止弧坑裂纹；选用较小的焊接电流。

#### (2) 晶间腐蚀。

当焊缝及热影响区在  $450 \sim 850^{\circ}\text{C}$  温度范围保持一段时间后，

可能在晶界会析出铬的碳化物，发生晶间腐蚀倾向。在焊接过程中，母材和焊缝金属的局部区域在此危险温度区间内停留时，会给焊接接头造成晶间腐蚀。有时焊后进行热处理也会造成晶间腐蚀。

生产中避免晶间腐蚀的措施有：采取尽可能快的焊接速度；焊条不横向摆动；多焊道时，等前一焊道冷却到 $60^{\circ}\text{C}$ 左右时再焊下一道；与腐蚀介质接触的焊缝最后焊接；尽量减少焊接接头在危险温度范围内停留的时间。

### 1.2.2 铁素体不锈钢的焊接特点

①铁素体型不锈钢在加热和冷却过程中不发生相变，不会产生淬火硬化现象。

②被加热到 $950^{\circ}\text{C}$ 以上的部分（焊缝及热影响区）晶粒长大倾向严重，且不能用焊后热处理的方法使粗大晶粒细化，接头韧性降低，增加冷裂倾向。

③焊缝及热影响区如在 $400\sim 600^{\circ}\text{C}$ 温度范围停留，容易出现“ $475^{\circ}\text{C}$ 脆性”。在 $650\sim 850^{\circ}\text{C}$ 温度区间停留，则易引起 $\delta$ 相析出脆化。

④焊接时应注意在上述两个温度区间的加热和冷却速度。 $600^{\circ}\text{C}$ 以上短时加热后空冷可消除 $475^{\circ}\text{C}$ 脆化；加热至 $930\sim 980^{\circ}\text{C}$ 急冷，可消除 $\delta$ 相析出脆化。

⑤焊前预热可防止裂纹产生。

### 1.2.3 马氏体不锈钢的焊接特点

①马氏体型不锈钢具有强烈的淬硬倾向，焊接时热影响区容易产生粗大的马氏体组织，母材含碳量越高，淬硬倾向越大。

②焊后残余应力较大，极易产生冷裂纹。焊接接头中氢的含量增加会加重冷裂纹倾向。

③马氏体型不锈钢会产生较大的过热倾向，焊接接头中受热超过 $1150^{\circ}\text{C}$ 的区域，晶粒长大显著，过快或过慢的冷却都可能引起接头脆化。另外，马氏体型不锈钢与铁素体型不锈钢一样也有 $475^{\circ}\text{C}$ 时的脆性，焊前预热和焊后热处理都必须注意。

### 1.2.4 双相不锈钢的焊接特点

双相不锈钢具有良好的焊接性，尽管其凝固结晶为单相铁素体，但在一般的拘束条件下，焊缝金属的热裂纹敏感性很小，当双相组织的比例适当时，其冷裂纹敏感性也较低。但应注意，双相不锈钢中毕竟具有较高的铁素体，当拘束度较大及焊缝金属含氢量较高时，还存在焊接氢致裂纹的危险。因此，在焊接材料选择与焊接过程中应控制氢的来源。

### 1.2.5 沉淀硬化不锈钢的焊接特点

沉淀硬化马氏体不锈钢具有良好的焊接性，进行同材质等强度焊接时，在拘束度不大的情况下，一般不需要焊前预热或后热，焊后热处理采用与母材相同的低温回火时效将可获得等强度的焊接接头。当不要求等强度的焊接接头时，通常采用奥氏体类的焊接材料焊接，焊前不预热、不后热，焊接接头中不会产生裂纹，在热影响区，虽然形成马氏体组织，但由于碳含量低，没有强烈的淬硬倾向，在拘束度不大的情况下，不会产生焊接冷裂纹。值得注意的是，如果母材中强化元素偏析严重，如铸件的质量较差，将恶化焊接热影响区的焊接性与塑韧性。

析出硬化半奥氏体不锈钢具有良好的焊接性，当焊缝与母材成分相同时，即要求同材质焊接时，在焊接热循环的作用下，将可能出现如下问题。

①焊缝及近缝区铁素体含量过高将可能引起接头的脆化。

②焊接接头的强度难以与母材相匹配。

当不要求同材质等强度焊接时，可采用常用的奥氏体型焊接材料，焊缝及热影响区均没有明显的裂纹敏感性。

析出硬化奥氏体不锈钢 A-286 钢虽然有较多的时效强化合金元素，但其焊接性与半奥氏体析出强化不锈钢的焊接性相比，采用通常的熔焊工艺时，裂纹敏感性小，焊前不需要预热或后热。焊后按照母材时效处理的工艺进行焊后热处理即可获得接近等强度的焊接接头。对于 17-10P 钢，尽管严格控制了 S 的含量，但由于 P 的质量分数高达 0.30%，高温时磷化物在晶界的富集不可避

免，由此造成近缝区具有很大的热裂敏感性与脆性，致使熔化焊工艺难以采用，一些特种焊工艺，如闪光焊及摩擦焊工艺比较适合该钢的焊接。

## 1.3 耐热钢的材料

### 1.3.1 耐热钢的种类

碳素结构钢的强度性能随着工作温度的提高而急剧下降，其极限的工作温度为350℃。在更高的温度下必须采取含有一定合金元素的合金钢，这些合金钢统称为耐热钢。它们按照合金的成分及其质量分数，具有比普通碳素钢高得多的高温短时强度和持久强度。

耐热钢按其合金成分的质量分数可分为低合金、中合金和高合金耐热钢。合金元素总质量分数在5%以下的合金钢统称低合金耐热钢，其合金系列有：C-Mo、C-Cr-Mo、C-Cr-Mo-V-Nb、C-Mn-V、C-Cr-Mo-V、C-Mn-Mo-V、C-Mn-Ni-Mo和C-Cr-Mo-V-Ti-B等。对焊接结构用低合金耐热钢，为改善其焊接性，碳的质量分数控制在0.20%以下，某些合金成分较高的低合金耐热钢，标准规定的碳质量分数不高于0.15%。

这些低合金耐热钢通常以退火状态或正火+回火状态供货。合金总质量分数在2.5%以下的低合金耐热钢在供货状态下具有珠光体+铁素体组织，故也称珠光体耐热钢。合金总质量分数为3%~5%的低合金耐热钢，在供货状态下具有贝氏体+铁素体组织，亦称其为贝氏体耐热钢。合金总质量分数为6%~12%的合金钢系列通称中合金耐热钢。目前，用于焊接结构的中合金耐热钢的合金系列有：C-Cr-Mo、C-Cr-Mo-V、C-Cr-Mo-Nb、C-Cr-Mo-V-Nb、C-Cr-Mo-W-V-Nb等。这些中合金钢必须以退火状态或正火+回火状态供货，某些钢也可以调质状态供货。合金总质量分数在10%以下的耐热钢，在退火状态下具有铁素体+合金碳化物的组织。在正火+回火状态下，这些合金钢的组织为铁素体+贝氏体。当钢的合金总质量分数超过10%时，其供货



状态下的组织为马氏体，属于马氏体级耐热钢。

合金总质量分数高于13%的合金钢称为高合金耐热钢，按其供货状态下的组织可分为马氏体、铁素体和奥氏体三种。应用最广泛的高合金耐热钢为铬镍奥氏体耐热钢，其合金系列有：Cr-Ni、Cr-Ni-Ti、Cr-Ni-Mo、Cr-Ni-Nb、Cr-Ni-Nb-N、Cr-Ni-Mo-Nb、Cr-Ni-Mo-V-Nb、Cr-Ni-Si、Cr-Ni-Ce-Nb、Cr-Ni-Cu-Nb-V、Cr-Ni-Mo-Nb-Ti、Cr-Ni-Cu-W-Nb-N等。

### 1.3.2 耐热钢的应用范围

在常规核电站、核动力装置、石油精炼设备、加氢裂化装置、合成化工容器、煤化工装置、宇航器械以及其他高温加工设备中，保证高温高压设备长期工作的可靠性和经济性具有头等重要的意义，为此应综合考虑下列因素。

- ①常温和高温短时强度。
- ②高温持久强度和蠕变强度。
- ③耐蚀性、抗氢能力和抗氧化性。
- ④抗脆断能力。
- ⑤可加工性，包括冷、热成形性能，热切割性和焊接性。
- ⑥经济性。

### 1.3.3 低合金耐热钢的化学成分、力学性能和热处理状态

目前，在动力工程、石油化工和其他工业部门应用的低合金耐热钢已有20余种。其中最常用的是Cr-Mo型、Mn-Mo型耐热钢和Cr-Mo基多元合金耐热钢，如俄罗斯钢种12X2M $\phi$ CP和我国自行研制的12Cr2MoWVTiB等。

在普通碳钢中加入各种合金元素，可提高钢的高温强度，其中以Mo、V、Ti等元素的作用最为强烈。

当在钢中再加入其他合金元素，可明显提高钢的组织稳定性，如在钼钢中加入1.0%（质量分数）以上的铬和微量的铌、钨和硼等碳化物形成元素，可进一步提高钢的蠕变强度和钢的组织稳定性。

表1-1列出了已纳入国标的10余种国产低合金耐热钢的化学