

焊接技术人员培训手册

促進學術交流
發展焊接技術

暨機械工程學會
焊接分會四十周年

呂角祥
二〇〇三年六月

第一部分 焊接工艺评定的使用管理&焊接工艺规程的编制

- 一、焊接工艺评定的有关概念
- 二、焊接工艺评定及使用管理程序
- 三、焊接工艺评定变素及其评定规则
- 四、如何阅读焊接工艺评定报告
- 五、如何编制焊接工艺规程

一、焊接工艺评定的有关概念

- 1、焊接工艺评定的定义和目的
- 2、消除焊接工艺评定认识上误区：
- 3、“焊接性能”与“焊接性”4、“焊接性能试验”与“焊接工艺评定”5、“焊缝”与“焊接接头”6、“焊接工艺评定”与“焊工技能考试”7、焊接工艺评定的基本条件
- 8、常用焊接工艺评定标准：

JB4708—2000 《钢制压力容器焊接工艺评定》

GB50236—98 《现场设备、工业管道焊接工程施工及验收规范》第4章

劳部发 1996[276]号 《蒸汽锅炉安全监察规程》附录 I

JGJ81-2000 《建筑钢结构焊接技术规程》第5章

GB128-90 《立式圆筒形钢制焊接油罐施工及验收规范》附录一

ASME 第 IX 卷 《焊接与钎焊》

二、焊接工艺评定及使用管理程序

1、焊接工艺评定程序

- (1) 焊接工艺评定立项
- (2) 焊接工艺评定委托
- (3) 编制焊接工艺指导书 (WPI) 并批准
- (4) 评定试板的焊接
- (5) 评定试板的检验

焊接工艺评定失败，重新修改焊接工艺指导书，重复进行上述程序。

- (6) 编写焊接工艺评定报告 (PQR) 并批准

2、焊接工艺评定文件的使用与管理

- (1) 焊接工艺评定文件的受控登记。
- (2) 焊接工艺评定的有效版本及换版转换。
- (3) 每季度编制焊接工艺评定文件的有效版本目录。
- (4) 保证现场工程和产品的焊接工艺评定的覆盖率为 100%。
- (5) 焊接工艺评定文件作为公司的一项焊接技术储备，属于公司重要技术机密文件，应妥善保管。

三、焊接工艺评定变素及其评定规则

1、焊接工艺评定的主要变素：

- 试件形式
- 母材类别
- 焊接方法
- 焊接工艺因素
- 焊后热处理种类及参数
- 母材厚度
- 焊缝熔敷金属厚度

四、如何阅读焊接工艺评定报告

1、如何认识焊接工艺评定报告的作用

- (1) 焊接工艺评定报告的合法性：
- (2) 焊接工艺评定报告的有效性：
- (3) 焊接工艺评定报告及焊接工艺规程的局限性：
- (4) 焊接工艺评定报告是一种必须由企业焊接责任工程师和总工程师签字的重要质保文件，也是技术监督部门和用户代表审核施工企业质保能力的主要依据之一。

2、焊接工艺评定报告与焊接工艺规程的关系

3、阅读焊接工艺评定报告的方法

五、如何编制焊接工艺规程

1、焊接工艺规程的作用 2、焊接工艺规程的基本要求

3、焊接工艺规程的编写应遵循的原则

3、焊接工艺规程的填写说明

第二部分 由焊接材料所想到的.....

- 一、工程焊接相关标准、资料简介
- 二、焊条型号与牌号的识别
- 三、焊条的保管与使用
- 四、焊条的选用
- 五、氩弧焊丝的选用
- 六、镍基合金的焊材选用

一、工程焊接常用相关标准简介

(一) 工程焊接常用标准

GB50236-98 《现场设备、工业管道焊接工程施工及验收规范》

JB4708-2000 《钢制压力容器焊接工艺评定》

JB/T4809-2000 《钢制压力容器焊接规程》

JGJ81-2002 《建筑钢结构焊接技术规程》

SH3085-1997 《石油化工管式加热炉碳钢和铬钼钢炉管焊接技术条件》

SH/T3523-1999 《石油化工铬镍奥氏体钢、铁镍合金和镍合金管道焊接规程》

SH3524-92 《石油化工钢制塔类容器现场组焊施工工艺标准》

SH3525-92 《石油化工低温钢焊接规程》

SH3526-92 《石油化工异种钢焊接规程》

SH/T3527-1999 《石油化工不锈钢复合钢焊接规程》

SHJ520-91 《石油化工工程铬钼耐热钢管道焊接技术规程》

SY/T4103-1995 《钢质管道焊接及验收》

SY/T4071-93 《管道下向焊接工艺规程》

HGJ222-92 《铝及铝合金焊接技术规程》

HGJ223-92 《铜及铜合金焊接及钎焊技术规程》

(二) 工程焊接常用焊接材料标准

JB3223-1996 《焊接材料质量管理规程》

JB/T4747-2002 《压力容器用钢焊条订货技术条件》

- GB/T5117-1995《碳钢焊条》
GB/T5118-1995《低合金钢焊条》
GB/T983-1995《不锈钢焊条》
GB/T14957-94《熔化焊用钢丝》
GB/T14958-94《气体保护焊用钢丝》
GB/T8110-1995《气体保护电弧焊用碳钢、低合金钢焊丝》
GB/T10045-88《碳钢药芯焊丝》
GB/T4242-84《焊接用不锈钢丝》
GB/T13814—92《镍及镍合金焊条》
GB/T9460—1988《铜及铜合金焊丝》 GB/T15620-1995《镍及镍合金焊丝》
GB/T3623-1998《钛及钛合金丝》
GB4842-1995《纯氩》
GB6052《工业液体的二氧化碳》

（三）推荐实用的焊接参考书

焊选手册：推荐《焊选手册》（中国机械工程学会焊接学会编）

焊接材料使用手册：推荐《电焊条选用指南》（吴树雄编著）

焊材制造厂提供的《焊接材料样本》

二、焊条型号与牌号的识别

（一）焊条药皮的作用与类型

1、焊条药皮的基本功能：

（1）保护电弧与熔池。药皮比焊芯熔化慢，形成一个套筒，保护金属熔滴顺利地向熔池过渡；同时药皮放出气体和形成熔渣，保护电弧及熔池免受空气的有害作用。熔渣覆盖于熔敷金属表面，也降低了焊缝金属的冷却速度，有利于改善接头性能。

（2）冶金处理。通过冶金反应直到脱氧、脱硫、脱磷等去除杂质作用，同时还对焊缝金属起合金化作用。

（3）赋予焊条良好的焊接工艺性能。使电弧容易引燃，燃烧稳定，减少飞溅，增大熔深，保证焊缝成形等。

（4）满足某些专用焊条的特殊功能。如铁粉焊条药皮内含较多的铁粉，增加了焊条的熔敷系数，提高了焊接生产率。

2、焊条药皮的类型：

| 序号 | 药皮类型 | 对应牌号 | 对应型号 | 焊接电源 |
|----|-------|------|-----------|-------|
| 1 | 特殊型 | ×××0 | E×× 00 | |
| 2 | 钛 型 | ×××1 | E×× 13 | 直流或交流 |
| 3 | 钛 钙 型 | ×××2 | E×× 03 | 直流或交流 |
| 4 | 钛铁矿型 | ×××3 | E×× 01 | 直流或交流 |
| 5 | 氧化铁型 | ×××4 | E×× 20 | 直流或交流 |
| 6 | 纤维素型 | ×××5 | E×× 10、11 | 直流或交流 |
| 7 | 低氢钾型 | ×××6 | E×× 16 | 直流或交流 |
| 8 | 低氢钠型 | ×××7 | E×× 15 | 直流 |
| 9 | 石 墨 型 | ×××8 | E×× 13 | 直流或交流 |
| 10 | 盐 基 型 | ×××9 | E×× 13 | 直流 |

3、酸性焊条与碱性焊条：

●药皮在焊接时熔化形成熔渣。焊后熔渣为酸性的焊条称为酸性焊条，反之为碱性焊条。

●酸性焊条的缺点：酸性焊条的熔渣组成物以酸性氧化物为主，对焊缝金属有较强的氧化性，致使焊缝金属中合金元素的烧损量较大。同时焊缝金属中氢和氧的含量较高，焊缝金属的力学性能，特别是塑性和韧性较低。

●酸性焊条的优点：对铁锈、油污及水分引起的气孔敏感性小。酸性焊条用交流或直流电源均可焊接。

●碱性焊条的优点：碱性焊条的熔渣组成物以碱性氧化物为主，对焊缝金属的氧化性很小，冶金处理效果好。碱性焊条焊接时，药皮分解出 CO₂ 作保护气体，保护气体中氢含量很低，因此用碱性焊条焊成的焊缝金属含氢量低，综合力学性能好，特别是塑性、韧性较高。

●碱性焊条的缺点：对气孔的敏感性较大。

(二) 焊条统一编号的意义

焊条通常用型号和牌号来反映其主要性能特点及类别。

◇焊条型号是以焊条国家标准为依据、反映焊条主要特性的一种表示方法。

◇焊条牌号是根据焊条的主要用途及性能特点，对焊条产品的具体命名。由焊条厂家

制定。

◇我国焊条行业采用统一牌号：属于同一药皮类型、符合相同焊条型号、性能相似的产品统一命名为一个牌号。如 J422、J507。

★注意：不管是焊条厂自定的牌号，还是全国焊接材料行业统一牌号，都必须在产品样本或标签、质量证明书上注明该产品是“符合国标”、“相当国标”或不加标注（即与国标不符），以便用户结合产品性能要求，对照标准去选用。

★每种焊条产品只有一个牌号，但多种牌号焊条可同时对应一个型号。如：牌号 J507RH 和 J507R，型号均为 E5015-G。

焊条分类对照

| 按牌号 | 按型号 |
|-----------|--------|
| 结构钢焊条 | 碳钢 |
| 低温钢焊条 | 低合金钢焊条 |
| 钼及铬钼耐热钢焊条 | |
| 铬不锈钢焊条 | 不锈钢焊条 |
| 铬镍奥氏体不锈钢 | |

（三）焊条牌号的表示方法

◆通常用一个汉语拼音字母（或汉字）与三位数字表示。如 A302（奥 302）、W607（温 607）

◆有的焊条牌号在三位数字后面加注后缀字母和/或数字。如 J507RH、A022Mo、J422Fe16

第一位字母：表示焊条种类；

前两位数字：表示熔敷金属强度或合金类型；

第三位数字：表示药皮类型及电流种类；

数字后面的字母和数字：附加合金元素或焊条特性（具有特殊性能和用途）。

■如：G——高韧性焊条； R——压力容器用焊条；

Fe——高效铁粉焊条； X——向下立焊用焊条；

H——超低氢焊条； RH——高韧性超低氢焊条；

(四) 焊条型号的表示方法

1、碳钢焊条：

●根据 GB/T5117-1995《碳钢焊条》标准规定，碳钢焊条型号按熔敷金属的力学性能、药皮类型、焊接位置和焊接电流种类划分。

●碳钢焊条型号的编制方法：

首位字母“E”表示焊条；

前两位数字表示熔敷金属抗拉强度的最小值，单位为 kgf/mm^2 ；

第三位数字表示焊条的焊接位置：“0”和“1”表示焊条适用于全位置焊接；“2”表示焊条适用于平焊及平角焊；“4”表示焊条适用于向下立焊。

第三位和第四位数字组合时表示焊接电流种类及药皮类型。

在第四位数字后面附加字母或数字：“R”表示耐吸潮焊条，“M”表示对吸潮和力学性能有特殊规定的焊条，“-1”表示冲击性能有特殊规定的焊条。

■举例：

E4303：43 kgf/mm^2 ；全位置；钛钙型；交直流两用。

E5015：50 kgf/mm^2 ；全位置；低氢钠型；直流反接。

E5018-1：50 kgf/mm^2 ；全位置；铁粉低氢型；交流或直流反接；-46℃低温冲击保证值。

2、低合金钢焊条：

●根据 GB/T5118-1995《低合金钢焊条》标准规定，低合金钢焊条型号按熔敷金属的力学性能、化学成分、药皮类型、焊接位置和焊接电流种类划分。

●低合金钢焊条型号的编制方法：

首位字母“E”表示焊条；

前两位数字表示熔敷金属抗拉强度的最小值 (kgf/mm^2)；

第三位数字表示焊条的焊接位置：“0”和“1”表示焊条适用于全位置焊接；“2”表示焊条适用于平焊及平角焊。

第三位和第四位数字组合时表示焊接电流种类及药皮类型；

后缀字母为熔敷金属的化学成分分类代号，并以短划“-”与前面分开。若还具有附加化学成分时，附加化学成分直接用元素符号表示，并以短划“-”与前面后缀字母分开。

■如：E5515-B2-V (R317)

对于 E50XX-X、E55XX-X、E60XX-X 型低氢焊条的熔敷金属化学成分分类后缀字母或附加化学成分后面加字母“R”时，表示耐吸潮焊条。 ■ 举例：

(1) E5015-G (J507RH、J507R 等) : 50kgf/mm² (490 MPa); 低氢钠型; 高韧性 (低温冲击保证值); 直流反接; 全位置焊接。

(2) E6015-G (J607RH): 60kgf/mm² (610 MPa); 低氢钠型; 超低氢高韧性; (-40℃低温冲击保证值); 直流反接; 全位置焊接。

(3) E5515-C1 (W707Ni): 低氢钠型; 含 2.5Ni; 55kgf/mm² (540 MPa); 高韧性 (-70℃冲击保证值); 直流反接; 全位置焊接。

(4) E5515-C2 (W907Ni): 低氢钠型; 含 3.5Ni; 55kgf/mm² (540 MPa); 高韧性 (-90℃冲击保证值); 直流反接; 全位置焊接。

(5) E5515-B1 (R207): 低氢钠型; 0.5Cr-0.5Mo; 540 MPa, 常温冲击保证值; 直流反接; 全位置焊接。

(6) E5515-B2 (R307): 低氢钠型; 1Cr-0.5Mo; 540 MPa, 常温冲击保证值; 直流反接; 全位置焊接。

(7) E5515-B2-V (R317): 低氢钠型; 1Cr-0.5Mo-V; 540 MPa, 常温冲击保证值; 直流反接; 全位置焊接。

(8) E6015-B3 (R407): 低氢钠型; 2.5Cr-1Mo; 590 MPa, 常温冲击保证值; 直流反接; 全位置焊接。

3、不锈钢焊条：

●根据 GB/T983-1995《不锈钢焊条》标准规定，不锈钢焊条型号按熔敷金属的化学成分、药皮类型、焊接位置和焊接电流种类划分。

●不锈钢焊条型号的编制方法：

首位字母“E”表示焊条；

“E”后面的数字表示熔敷金属化学成分分类代号，如有特殊要求的化学成分，该化学成分用元素符号表示，放在数字的后面；

短线“-”后面的两数字表示药皮类型、焊接位置及焊接电流种类。“15”表示碱性、钛型或钛钙型药皮，全位置焊接，交流或直流反接；“16”表示碱性药皮、全位置焊接、直流反接；“17”是“16”的变型。

★不锈钢焊条型号与美国、日本等工业发达国家的 stainless steel electrode 型号相同。

■ 举例：

(1) E308L-16 (A002): 钛钙型; 超低碳 ($C \leq 0.04\%$); 公称成分 00-19Cr-10Ni; 交流或直流反接 (尽可能采用直流电源); 全位置焊接。

(2) E308-15 (A107): 碱性; 低碳 ($C \leq 0.08\%$); 公称成分 0-19Cr-10Ni ; 直流反接; 全位置焊接。

(3) E316L-16 (A022): 钛钙型; 超低碳 ($C \leq 0.04\%$); 公称成分 00-18Cr-12Ni-2Mo; 交流或直流反接 (尽可能采用直流电源); 全位置焊接。

(4) E316-15 (A207): 碱性; 低碳 ($C \leq 0.08\%$); 熔敷金属公称成分 0-18Cr-12Ni-2Mo; 直流反接; 全位置焊接。

(5) E347-15 (A137): 碱性; 低碳 ($C \leq 0.08\%$); 含 Nb 稳定剂; 公称成分 0-19Cr-10Ni-Nb ; 直流反接; 全位置焊接。

(6) E309-15 (A307): 碱性; 含 $C \leq 0.15\%$; 公称成分 1-23Cr-13Ni; 直流反接; 全位置焊接。

(7) E310-16 (A402): 钛钙型; 含 $C = 0.08-0.20\%$; 纯奥氏体组织, 公称成分 2-26Cr-21Ni; 交流或直流反接 (尽量采用直流电源); 全位置焊接。

(注: L 表示碳含量较低 ($C \leq 0.04\%$); H 表示碳含量较高 ($C > 0.15\%$))

◆特殊情况:

E5MoV-15 (R507): 低氢钠型; 5Cr-0.5Mo-V; 520 MPa

E9Mo-15 (R707): 低氢钠型; 9Cr-1Mo, 590 MPa

按牌号: 属于珠光体耐热钢(低合金钢)焊条。按型号: 属于不锈钢焊条。GB/T983-1995 提出: 将放入下次修订的 GB/T5118 标准中。

(五) 国内外牌号、型号对比 (举例)

| 焊条类别 | 国内牌号 | 国标型号 | AWS 型号 |
|----------|--------|----------|------------|
| 碳钢焊条 | J422 | E4303 | |
| | J506 | E5016 | E7016 |
| 低合金结构钢焊条 | J506R | E5016-G | E7016-G |
| | J506RH | E5016-G | E7016-G |
| | J607 | E6015-D1 | E9015-D1 |
| 低温钢焊条 | W707Ni | E5515-C1 | E8015-C1 |
| 珠光体耐热钢焊条 | R407 | E6015-B3 | E9015-B3 |
| 铬不锈钢焊条 | G207 | E410-15 | E410-15 |
| 铬镍奥氏体 | A042 | E319Mo | E309MoL-16 |

| | | | |
|--------|--------|----------|-----------|
| 不锈钢焊条 | A022Mo | E317L-16 | E317L-16 |
| 镍基合金焊条 | Ni307B | | ENiCrFe-3 |

第三部分、焊条的保管与使用

（一）焊条的工艺性能

1、焊条的使用性能：

（1）焊条的工艺性能——通常指焊条的操作性能：焊条是否容易地进行焊接作业。

（2）焊条的焊接性能——被焊件是否得到充分的连接（有无焊接缺陷），以及焊接接头是否满足使用要求（接头的力学性能和耐热、耐蚀等特殊性能）。

（3）焊条的效率——焊接施工中能否使焊接效率提高，人工和材料等费用降低。

2、焊条的工艺性能：

（1）焊条的稳弧性：电弧在焊接过程中保持稳定、不易晃动和熄灭的特性。焊条的偏心与受潮对稳弧性也有影响。

（2）对各种焊接位置的适用性：焊条对各种空间位置操作的适用性如何，是焊条的一个重要工艺性能。各种牌号的焊条适用的焊接位置一般在焊条说明书中有规定。

（3）焊缝的成形性能：指焊缝的几何形状和焊缝的表面质量。

（4）脱渣性：其好坏对焊工的劳动条件、焊接生产率和焊缝质量等都有直接影响。氧化性强的熔渣脱渣性较差。如 J422 比 J426 的脱渣性就好。

（5）焊缝的熔深：在焊条因素中，药皮的组成和厚度是影响焊缝熔深的主要因素。厚药皮焊条的熔深比薄药皮大。厚钢板对接焊时采用熔深较大的焊条可以不开坡口或开小坡口，使生产效率提高。

（6）焊条的熔敷系数：焊接过程中，焊条在单位时间内通过单位焊接电流熔敷到焊件上的金属量称为熔敷系数（ α ）。焊条熔敷系数的大小标志着焊接过程中生产率的高低。

（7）焊接飞溅的大小：飞溅大不仅会增加焊后清理的时间，也浪费了焊条。焊条的飞溅程度主要与焊条药皮类型有关。焊条药皮受潮，飞溅也增大。当然也与焊机的性能、极性等因素有关。

3、影响焊接工艺操作性能的因素：

（1）焊条的工艺性能

（2）焊工技能

- (3) 电焊机特性
- (4) 使用的焊接工具（如焊枪）
- (5) 母材的材质
- (6) 板厚
- (7) 接头形式和尺寸
- (8) 焊接工艺参数（如电流、电压、焊速等）
- (9) 焊接位置
- (10) 其他焊接条件（如焊接环境、保护气体等）

◆因此，要准确地评定焊条的工艺性能，应固定焊工、电焊机、其他焊接工具、试验材料、焊接条件等上述因素，以排除这些因素的影响。

4、评定焊条工艺性能的方法：

可通过观察下列项目来判断：

- (1) 电弧的发生：开始引弧的难易；再引弧性（断弧后重新引弧的难易）。
- (2) 电弧的状态：稳弧性，包括持续性（有否断弧、喘息等）和集中性；吹力大小。
- (3) 熔融状态：套筒形状；药皮熔化的均匀性。
- (4) 熔渣：流动性；清除的难易程度；覆盖的均匀性。
- (5) 飞溅：发生的状态（飞溅的大小及数量）；清除的难易程度。
- (6) 焊缝外观：焊波的粗细；成形（焊缝余高）。
- (7) 气体和烟尘的发生状态：发生量及烟尘成分。

（二）焊条使用前的检验

——以评定焊条的质量和使用性能。一般按以下步骤进行：

1、焊条的进厂验收：

一般情况下应进行质量证明书核对、包装检查和焊条外观检验。

(1) 核对焊条质量证明书。焊条质量证明书的内容除说明该批焊条质量符合相应焊条标准规定外，还应包括：

- (a) 焊条型号、牌号、规格（直径和长度）；
- (b) 批号、数量及生产日期；
- (c) 熔敷金属化学成份检验结果；
- (d) 熔敷金属或对接接头各项性能检验结果；
- (e) 生产厂名称与地址；
- (f) 生产厂技术检验部门与检验人员签章。

(2) 检查焊条的包装：包装是否完好，有无破损、受潮现象；检查包装上的标记内容是否齐全，是否清晰可辨；其型号、牌号、规格、生产批号、检验号、制造厂与商标等是否与质量证明书相一致。

(3) 检查焊条的外观质量：是否受污染，在储运过程中是否有可能影响焊接质量的缺陷产生；识别标记是否清晰、牢固，与产品实物是否相符。

2、进行实际操作试焊：

通过试焊以评定焊条的工艺性能。

3、必要的化学成分和力学性能等复验：

应根据有关标准或供货协议的要求进行复验。如球罐使用的焊条要进行扩散氢测定。

(三) 焊条的保管

1、焊条保管的基本原则：

(1) 焊条的保管要特别注意环境湿度。空气中相对湿度和温度越高，水蒸汽分压也就越高，则药皮越容易吸湿。当空气中水蒸汽分压 $\leq 5\text{mmHg}$ 时，药皮吸湿量很小，但一般建议空气中的相对湿度低于60%，并离开地面和墙壁一定的距离（约20cm）。温度以10-25℃为宜。

(2) 分清焊条型号（牌号）、规格，不能错用。

(3) 焊条运输、堆放过程中应注意不要损伤药皮，堆放不要太高。对药皮强度较差的焊条（如高强度焊条、不锈钢焊条、堆焊焊条、铸铁焊条等）更要当心。

2、焊条受潮后的明显特征：

●焊条受潮后，药皮的颜色发深，焊条相碰没有清脆的金属声。

●有的焊条表面长期受潮甚至反碱出现“白花”。

●有些焊条表面虽然没有特殊的变化，但焊接时电弧强，飞溅增多。

3、受潮焊条对焊接工艺性能的影响：

(1) 电弧强烈，燃烧不稳定；

(2) 飞溅多，颗粒大；

(3) 熔深大，容易产生咬边；

(4) 熔渣覆盖不均匀，焊波粗糙，造成压坑；

(5) 熔渣清除困难，低氢型焊条的熔渣表面气孔多。

4、受潮焊条对焊接质量的影响：

(1) 产生焊接裂纹和气孔。焊条受潮吸收的水份在焊接电弧热的作用下，变成气体，分解出氢，致使形成焊接裂纹和气孔。碱性焊条尤甚。焊条包装时用聚乙烯塑料袋封口，也不能保证长期的彻底防潮。

(2) 力学性能各项指标偏低。

5、现场检查焊条受潮情况的简易方法：

- (1) 检查焊条的包装情况，包装破损，焊条吸潮肯定严重。
- (2) 检查焊条的制造日期，制造后长期存放的焊条表面容易出现白霉状的斑痕。
- (3) 将几根焊条放在手中滚动，吸潮后的焊条失去了清脆的金属声。
- (4) 取一根焊条微弯 10-15 度，如果弯曲时发出明显的脆裂声音，则说明焊条比较干燥。
- (5) 取一根焊条竖着落地，观察其弹跳力，干燥的焊条弹跳力较好，回弹较高。
- (6) 将焊条接入焊接回路中短路数秒种，如果药皮表面有水蒸汽出现，则是不干燥的焊条。
- (7) 取一根焊条直接进行试焊，若是受潮的焊条，在焊接过程中会有药皮爆裂或药皮成块脱落现象，并产生较多的水汽。
- (8) 观察焊芯端部表面，看是否有锈迹。
- (9) 取一束焊条，用肉眼检查：如果药皮表面有黑斑存在，则表明焊条内部的焊芯已锈蚀。也可敲掉药皮，直接检查焊芯是否锈蚀。
- (10) 在焊接操作过程中检查，受潮焊条的工艺性能会出现下列变化：
 - 同一电流值时，电弧吹力变大，熔深增加；
 - 飞溅数量增多，颗粒变大；
 - 对酸性焊条，熔渣覆盖不良，且焊缝成形变差；
 - 对低氢型焊条，熔渣的内面（指与焊缝接触的一面）出现许多小孔。

6、焊接材料有效期限的确定：

★JB3223-96《焊接材料质量管理规程》规定：

自生产日期算起按下述方法确定：

- (1) 焊材质量证明书或说明书推荐的期限；
- (2) 酸性焊材及防潮包装密封良好的低氢型焊材为两年；
- (3) 石墨型焊材及其他焊材为一年。

☆超过上述规定有效期限的焊条、焊剂及药芯焊丝，应按规定复验合格后才能发放使用。

（四）焊条的使用

1、焊条烘烤注意事项：

(1) 焊条吸潮，如果焊芯不生锈和药皮不变质，焊条重新烘干后可确保原来的性能而不影响使用。

(2) 烘烤温度应遵照焊条说明书的规定。

▲烘烤温度低了达不到除去水份的目的；

▲烘烤过高，容易引起粘结剂的分解造成药皮开裂，焊接时产生脱落现象，而且药皮内的合金元素会氧化，影响合金的过渡。

焊条推荐烘烤规范

| | | |
|---------------------|-------|------------------|
| 铬不锈钢和 铬镍奥氏体不锈钢焊条 | 酸性焊条 | 烘烤 150℃/1 小时 |
| | 碱性焊条 | 烘烤 250℃/1 小时 |
| 其他类别焊条 | 酸性焊条 | 烘烤 150℃/1 小时 |
| | 碱性焊条 | 烘烤 350-400℃/1 小时 |
| | 纤维素焊条 | 烘烤 80℃/1.5-2 小时 |

(3) 焊条在烘箱中叠起层数：一般以直径 4mm 的不超过 3 层；直径 3.2mm 的不超过 5 层，且堆放不应超过隔层高度的 2/3，避免烘烤时受热不均和潮气不易排出。

▲焊条叠起太厚易造成烘烤温度不均匀，不能烘透或局部过热而使药皮脱落。

(4) 焊条烘烤速度控制：应缓慢升温，然后保温和缓慢冷却。推荐焊条进箱温度为 100℃ 以下，升降温速度不宜超过 150℃/小时。

▲不可将焊条突然放入高温箱内，或者突然从高温箱内取出，这样也会引起药皮开裂、剥落。

(5) 烘干后的焊条应及时放入 100—150℃ 恒温箱内恒温保存。

(6) 重新烘干次数一般不超过 2 次，超过 2 次应征求焊条制造厂的意见。

▲烘烤次数过多易造成药皮脱落。

2、焊条使用注意事项：

(1) 焊条放在保温筒内随用随取。同一保温筒内严禁混装不同牌号焊条。

(2) 在 4 小时内回收的焊条应堆放在恒温箱内指定的位置，不得混淆。

(3) 超过 4 小时或低于规定温度的焊条回收后应重新进行烘烤。

第四部分、焊条的选用

★为什么要重视对焊接材料的正确选择？

●正确选择焊材是保证焊接质量的最重要、也是最基本的条件。

●工程所采用的焊接材料一般要求在设计文件中作出规定。

GB50236-98 第 2.0.2 条规定：设计文件应标明母材、焊接材料、焊缝系数及焊缝坡口的形式，并对焊接方法、焊前预热、焊后热处理及焊接检验提出要求。

●作为施工单位的工程技术人员要求掌握焊材选择的基本知识，目的是：

(1) 在审图时核对设计对焊材选择的正确性；

(2) 当设计无规定或现场条件满足不了设计规定时，为自选焊材提供方便。

★特别注意：施工单位自选的焊材最终仍应报请设计同意。

★特别提醒：焊条选择是否合理，不完全由焊接工艺评定所决定。

(一) 选择焊条的基本要点

1、考虑焊件材料的物理性能、力学性能和化学成分：

(1) 按等强度的原则，选择满足接头力学性能要求的焊条。

■举例：Q235，按等强度的原则应选用 J42×焊条，而不应选用 J50 ×焊条。

◆特殊情况：根据母材的焊接性，选用不等强度（高强度匹配或低强度匹配）、而韧性好的焊条，但需通过改变焊缝结构形式，以满足设计强度和刚度的要求。

(2) 使熔敷金属的合金成分符合或接近母材。

■举例：15CrMo 必须选用 R307 焊条（1Cr-0.5Mo），而不能选用 R207 焊条（0.5Cr-0.5Mo）。

(3) 当母材化学成分中碳或硫、磷等有害杂质较高时，应选择抗裂性和抗气孔能力较强的焊条。如低氢型焊条等。

★注意：焊接构件对力学性能和化学成分的要求并不是均衡的：

▼有的焊件可能偏重于强度、韧性等方面的要求，而对化学成分不一定要求与母材一致。如选用结构钢焊条时，首先应侧重考虑焊缝金属与母材间的等强度，或焊缝金属的高韧性；

▼有的焊件又可能偏重于化学成分方面的要求，如对于耐热钢、不锈钢焊条的选择，通常侧重于考虑焊缝金属与母材化学成分的一致；

▼有的也可能对两者都有严格的要求。如异种钢焊条的选择。

因此在选择焊条时应分清主次，综合考虑。

2、考虑焊件的工作条件和使用性能：

(1) 焊件在承受动载荷和冲击载荷情况下，除了要求保证抗拉强度、屈服强度外，对

冲击韧性、塑性均有较高的要求。此时应选用低氢型、钛钙型或氧化铁型焊条。

■举例：16Mn 钢用于非重要结构时可选用 J502、J503 等酸性焊条；而当用于重要结构时，则应选用 J506、J507 等碱性焊条。

(2) 焊件在腐蚀介质中工作时，必须分清介质种类、浓度、工作温度以及腐蚀类型（一般腐蚀、晶间腐蚀、应力腐蚀等），从而选择合适的不锈钢焊条。

■举例：焊接 1Cr18Ni9 不锈钢时，为了满足焊缝与母材金属成分相同的要求，对于在腐蚀要求不高的条件下工作的焊件，可选用 A102、A107 焊条；而对于工作温度低于 300℃ 而耐腐蚀要求较高的焊件，则应选用 A132、A137 或 A002 焊条。

(3) 焊件在受磨损条件下工作时，须区分是一般磨损还是冲击磨损，是金属间磨损还是磨料磨损，是在常温下磨损还是在高温下磨损等。还应考虑是否在腐蚀介质中工作，以选择合适的堆焊焊条。

(4) 处在低温或高温下工作的焊件，应选择能保证低温或高温力学性能的焊条。

■举例：

▲12CrMo 在 400℃ 下工作，焊接应选 R207，而不能选 J507。

▲16MnDR 在 -40℃ 下工作，焊接应选 J507RH（-40℃），而不能用 J507、J507Mo、J507H 等焊条（-30℃）。

3、考虑焊件的复杂程度和结构特点、焊接接头型式等：

(1) 形状复杂或大厚度的焊件，由于其焊缝金属在冷却收缩时产生的内应力大，容易产生裂纹。因此，必须采用抗裂性好的焊条，如低氢型焊条、和高韧性焊条焊条。

(2) 对于某些坡口较小的接头，或对根部焊透控制严格的接头，应选用具有较大熔深或熔透能力的焊条。

■举例：

长输管线用钢 X42 焊接，为保证根部焊透又不至于有过大的焊瘤，常采用纤维素型焊条 E6010 进行向下立焊操作。

(3) 因受条件限制而使某些焊接部位难以清理干净时，就应考虑选用氧化性强，容易脱渣，对铁锈、氧化皮和油污反应不敏感的酸性焊条，以免产生气孔等缺陷。

4、考虑焊缝的空间位置：

有的焊条只适用于某一位置的焊接，其它位置焊接时效果较差，有的焊条则是各种位置均能焊接的全位置焊条，选用时要考虑焊接位置的特点：

(1) 对于仰焊、立焊缝较多的焊件，应选用钛钙型、钛型、低氢型或钛铁矿型的全位置焊条。

(2) 焊接部位所处的位置不能翻转时，必须选择能进行全位置焊接的焊条。

5、考虑施焊工作条件：

(1) 没有直流焊机的场合，应选用交直流两用的焊条。

(2) 某些钢材（如珠光体耐热钢）需进行焊后消除应力热处理，但受设备条件限制或本身结构限制而不能进行时，应选用与母材金属化学成分不同的焊条（如奥氏体不锈钢焊条），可以免进行焊后热处理。

(3) 应根据施工现场条件，如野外操作、焊接工作环境等来合理选用焊条。

6、考虑改善焊接操作环境和保证工人身体健康：

(1) 尽量选用发尘量小、产生有害气体少的焊条。

(2) 在酸性焊条和碱性焊条都可以满足的地方，鉴于碱性焊条对操作技术及施工准备要求高，故应尽量采用酸性焊条。

(3) 对于在密闭容器内或通风不良场所焊接时，应尽量采用低尘低毒焊条或酸性焊条。

7、考虑焊接的经济性：

(1) 在保证使用性能的前提下，尽量选用价格低廉的焊条。根据我国的矿藏资源，应大力推广钛铁矿型焊条（ $\times\times\times 3$ 型）。

(2) 对性能有不同要求的主次焊缝，可采用不同焊条，不要片面追求焊条的全面性能。

(3) 根据结构的工作条件，合理选用焊条的合金系统。如对在常温下工作，用于一般腐蚀条件的不锈钢，就不必选用含铌的不锈钢焊条。

8、考虑焊接效率：

(1) 对焊接工作量大的结构，有条件时应尽量采用高效率焊条，如铁粉焊条、高效率不锈钢焊条、重力焊条、底层焊条、立向下焊条之类的专用焊条。

(2) 水平位置焊接时采用铁粉焊条，垂直位置焊接时采用下向焊条等，均可大大提高生产率和降低成本。

9、考虑焊条的工艺性能：

焊条工艺性能的好坏是焊条使用的前提。工艺性能不好的焊条会产生各种焊接缺陷。

(1) 对于同一牌号（型号）的焊条，不同的生产厂家，其工艺性能差别很大，需要我们在采购时认真分析。

(2) 采购不同厂家同一牌号的焊条时，还应考虑焊工的习惯问题和对该焊条工艺性能的适用性。

（二）碳素钢的焊条选用

1、对碳素钢的认识：

●碳钢的主要分类方法:

(1) 按含碳量分类: 低碳钢: $C \leq 0.30\%$ (有的国家称为软钢); 中碳钢: $C = 0.30-0.60\%$; 高碳钢: $C > 0.60\%$ 。

(2) 按冶炼方法分: 平炉钢; 转炉钢; 电炉钢。

(3) 按钢的脱氧程度的不同分: 沸腾钢; 半镇静钢; 镇静钢。

(4) 按用途分: 结构钢; 工具钢。

(5) 根据钢中有害杂质 S、P 的含量分:

普通碳素钢: $S \leq 0.050\%$, $P \leq 0.045\%$;

优质碳素钢: $S \leq 0.035\%$, $P \leq 0.035\%$;

高级优质碳素钢: $S \leq 0.030\%$, $P \leq 0.035\%$ 。

★注意: 经常需要焊接的钢是各种碳素结构钢, 包括普通碳素结构钢 (如 Q235)、优质碳素结构钢 (20 钢)、专门用途碳素结构钢等。

☆高碳钢实际上不用于制造焊接结构。

●与焊接关系密切的专门用途碳素结构钢:

(1) 船体用碳素钢 (GB712-88):

▲A、B、D、E: $C \leq 0.18-0.22\%$; 屈服强度 235MPa。

(2) 焊接气瓶用碳素钢 (GB6653-94):

▲HP245、HP265、HP295: $C \leq 0.16-0.20\%$; 屈服强度 245-295MPa。

(3) 压力容器用碳素钢 (GB6654-1996):

▲20R: $C \leq 0.20\%$; 屈服强度 225-245MPa。

(4) 锅炉用碳素钢 (GB713-1997)

▲20g: $C \leq 0.21\%$; 屈服强度 225-245MPa。

(5) 桥梁用碳素结构钢 (YB/T10-81)

▲16q: $C = 0.12-0.20\%$; 屈服强度 225MPa。

(6) 石油天然气管道用螺旋缝埋弧焊碳素钢 (GB9711-88)

▲S205、S240、S290: $C \leq 0.17-0.22\%$; 屈服强度 205-290MPa

(7) 铁道钢轨用碳素钢 (GB2585-81):

▲U、71、U74、U71Cu: $C = 0.64-0.80\%$; 抗拉强度 ≥ 785 MPa。

(8) 核压力容器用碳素结构钢

▲20HR: $C \leq 0.20\%$; 屈服强度 235MPa。

(9) 汽车制造用碳素结构钢 (GB3275-91)

▲08Al: $C = 0.05-0.12\%$; 抗拉强度 315-440MPa

15Al: C=0.12-0.17%; 抗拉强度 345-490MPa

2、低碳钢的焊接特点:

- (1) 焊接性能优良, 一般不会因焊接而引起淬硬组织。
- (2) 冶炼方法落后或非正规小型钢厂生产, 造成碳钢含 N、O 高, 焊接裂纹倾向大。
- (3) 母材成分不合格 (如 C、S 过高) 时, 焊接裂纹倾向大。
- (4) 焊条质量不好时造成焊缝中 C、S 偏高, 焊接裂纹倾向大。
- (5) 厚度大、刚性大的结构件在低温条件下焊接可能出现裂纹。

3、低碳钢在低温环境下的焊接措施:

- (1) 焊前预热, 焊时保持道间温度
- (2) 采用低氢或超低氢型焊条
- (3) 整条焊缝连续焊完, 尽量避免中断
- (4) 不在坡口以外的母材上打弧
- (5) 弯板、矫正和装配时尽可能不在低温下进行
- (6) 尽可能改善严寒下劳动生产条件

4、低碳钢的焊条选用要点:

(1) 按照等强度匹配的原则, 通常选用 E43 × × 系列的焊条。有时也可选用 E50 × × 系列焊条代用, 但不应作为首选, 否则违背了等强的原则。

(2) 一般结构选用酸性焊条或碱性焊条。

(3) 焊接动载荷、复杂和厚板结构和重要受压容器, 以及低温下焊接时, 应选用碱性、低氢型焊条, 如 E4316 (J426)、E4315 (J427)。

☆各国根据自己的资源及使用习惯, 选用的药皮类型均有所不同。在我国, 钛钙型焊条 (如 J422) 的消耗量最大, 要占全部焊条产量的 80%以上。

低碳钢在低温条件下的焊接预热温度

| 壁厚mm | 在各种气温下的预热温度 |
|------------------|--------------------------------|
| 低碳钢管道、容器低温环境下焊接时 | |
| ≤16 | 不低于-30℃时不预热; 低于-30℃时预热100-150℃ |
| 17-30 | 不低于-20℃时不预热; 低于-20℃时预热100-150℃ |
| 31-40 | 不低于-10℃时不预热; 低于-10℃时预热100-150℃ |
| 41-50 | 不低于0℃时不预热; 低于0℃时预热100-150℃ |
| 低碳钢梁、柱、桁架结构低温焊接时 | |

| | |
|-------|-------------------------------|
| ≤30 | 不低于-30℃时不预热；低于-30℃时预热100-150℃ |
| 31-51 | 不低于-10℃时不预热；低于-10℃时预热100-150℃ |
| 51-70 | 不低于0℃时不预热；低于0℃时预热100-150℃ |

5、中碳钢的焊接特点：

(1) 随着含 C 量的增加，焊接性逐渐变差，焊接接头的硬化倾向、裂纹倾向和气孔敏感性均增大，杂质 S 控制不严时裂纹倾向更加明显。

(2) 若对已经热处理（正火或调质）的中碳钢部件进行焊接，裂纹倾向较大。且热处理后的焊接会使母材热影响区软化。

6、中碳钢的焊接工艺要点：

- (1) 正确选择焊接材料。
- (2) 大多数情况下，需要焊前预热和保持一定的层间温度。
- (3) 焊后立即进行消除应力热处理，热处理温度一般为 600-650℃。
- (4) 不能立即进行热处理的，则应立即后热。
- (5) 对已经热处理的中碳钢部件进行焊接，应采取防裂纹的措施。

7、中碳钢的焊条选用要点：

(1) 在要求焊缝与母材等强度的情况下，应选用相应强度等级而塑性、韧性较高的低氢或超低氢焊条。

■举例：35 钢选用 J506、J507；45 钢选用 J556、J557；55 钢选用 J606、J607 焊条。

(2) 个别情况下也可采用钛铁矿型或钛钙型焊条，但一定要有严格的工艺措施配合，如控制预热温度和尽量减少母材熔深以减少焊缝含 C 量。

(3) 在仅要求实现完整连接而不要求强度，或不要求焊缝与母材等强度的场合，或者焊件结构复杂对采取防裂纹措施有困难时，可采用强度等级较母材低一档的焊条。但须满足设计要求的各项力学性能指标。

■举例：

35 钢选用 J422、J423、J426、J427；

45 钢选用 J422、J423、J426、J427 、J506、J507；

55 钢选用 J422、J423、J426、J427 、J506、J507 焊条。

(4) 特殊情况也可采用铬镍奥氏体不锈钢焊条，此时可不预热或适当降低预热温度。理由是奥氏体焊缝金属塑性好、溶解氢的能力强。如 A102、A107、A302、A307、A402、A407 等焊条均可采用。

(5) 有时也可在中、高碳钢的坡口表面堆焊一层含碳量很低 ($C \leq 0.03\%$)、强度低、

塑性好的纯铁过渡层，然后再用与母材强度相匹配的焊条填满坡口，能有效地防止焊接裂纹。

■ 举例：

45 钢与低碳钢 Q235 的焊接：

方案一：先在 45 钢坡口面预热 300℃，然后用 J427 或 J507 焊条进行焊接，焊后进行 650℃ 后热并缓冷。

方案二：在无预热情况下，先用 A302 或 A307 焊条在 45 钢及 Q235 钢的坡口面上堆焊两层隔离层，然后再用 A302 或 A307 焊条进行对接焊。

（二）低合金结构钢的焊条选用

1、对低合金结构钢的认识：

● 低合金钢按其使用性能分为三类：

▲ 低合金结构钢（也称强度型低合金钢）

▲ 低合金低温钢（也称低温型低合金钢）

▲ 低合金耐热钢（也称耐热型低合金钢）

● 低合金结构钢的合金总含量小于 5%。

● 低合金结构钢一般按其屈服强度分级。常用的低合金结构钢的屈服强度在 300-600MPa 范围内。

▲ 屈服强度为 300-450MPa 的低合金结构钢，以热轧或正火状态使用。如 16MnR（屈服强度下限 285MPa）

▲ 屈服强度大于 450MPa 的低合金高强度结构钢，以调质状态使用。如 07MnNiCrMoVDR（屈服强度下限 490MPa）

2、低合金结构钢的焊接特点：

（1）热影响区的淬硬倾向（硬化）：

● 强度等级和含碳量低的钢，热影响区淬硬倾向小；

屈服强度 450MPa 以上的低合金高强钢，热影响区可能出现硬而脆的马氏体组织，冲击韧性下降，冷裂敏感性增大，可焊性变差。

● 防止硬化的措施：

采用适中的线能量配合以适当的预热，以获得适当小的焊接冷却速度。因为线能量增大可使硬化倾向降低，但易使晶粒长大。

（2）焊接接头的冷裂纹倾向：

● 产生冷裂纹的三要素：

▲ 热影响区或焊缝金属的淬硬倾向（组织硬化）

▲焊接接头的拉应力存在（拘束度大）

▲焊缝金属内的高含氢量（扩散氢的影响）

●焊接冷裂纹的控制措施：

▲控制组织硬化：

◇预热；◇通过较大线能量降低接头冷却速度；◇冬季和厚板多道焊时采取缓冷等措施。

▲限制扩散氢：

◇焊件坡口表面清理；采用低氢或超低氢焊材，并防止吸潮；

◇预热或“紧急”后热以减少扩散氢；

◇采用奥氏体焊条来固溶氢，限制氢的扩散，但带来其它问题（如热裂纹、熔合区冷裂纹、不经济等），非特殊情况不采用。

▲控制拘束应力：

◇通过结构设计减少刚度或拘束度；

◇预热；

◇采取合理焊接顺序，使焊缝有收缩余地；

◇坡口设计以减少焊缝金属填充量；

◇焊后消除应力热处理

（3）焊缝金属的热裂纹倾向

●产生热裂纹的两要素：

▲焊缝中 S、P 杂质偏析，易形成低熔点共晶体偏析于晶界处。

▲焊接接头的内应力存在

☆在低合金结构钢及其常用的配套焊接材料中，由于能增大热裂倾向的元素含量较少，故产生热裂纹的敏感性不大。

●焊缝热裂纹的控制措施：

▲控制焊缝成分：关键是选择适用的焊接材料，控制 C、S、P 含量。C 含量最好小于 0.12%。

▲调整焊接工艺：

◇限制过热：降低线能量，并采用小的焊接电流和小的焊接速度。因为熔池过热易促使热裂。

★注意：不能通过提高焊接速度来降低线能量。因为焊接速度增大会改变熔池形状，影响到偏析。

◇控制成形系数（焊缝宽度与焊缝厚度之比）：

焊缝系数影响枝晶成长方向及其会合面的偏析情况。焊缝系数小，则使偏析集中于焊缝中心，形成焊缝中心薄弱面，热裂倾向大。

一般希望避免出现焊缝系数小于 1 的情况，即焊缝实际厚度不要超过焊缝宽度。

◇减小熔合比：通过开大坡口，或减小熔深，或采取隔离层堆焊法，采用镍基合金焊材等，来减小熔合比，防止母材向焊缝转移某些有害杂质。

◇降低拘束度。如合理布置焊缝，合理安排施焊顺序等。

◇其它：如控制装配间隙、改善接头设计、改进装配质量等。

3、低合金结构钢的焊条选择要点：

总体原则：一般根据母材的化学成分、力学性能、接头的裂纹敏感性、焊后是否热处理、焊件的使用条件（耐蚀、耐高温、耐低温等）、结构形式及受力情况、焊接施工条件等因素进行综合考虑。必要时还应通过焊接性试验最终确定。

(1) 首先考虑等强度原则。要求焊缝的强度等于或略高于母材金属的强度，而不希望焊缝强度太高。

★经验证明，如果焊缝强度超过母材过多且塑性差时，可能造成冷弯角小，甚至出现横向裂纹。

★JB/T4709 规定：碳素钢、低合金钢的焊缝金属应保证力学性能，且其抗拉强度不应超过母材标准规定的上限值加 30MPa。

(2) 应考虑化学成分的要求。一般情况选用焊条熔敷金属的 S、P 含量应与母材一致。

★压力容器焊接的焊接材料熔敷金属硫、磷含量应符合 JB/T4747-2002《压力容器用钢焊条订货技术条件》的规定。

★压力容器制造和现场组焊时，应注意所采购的焊条其质量证明书标注的 S、P 量是否符合 JB/T4747-2002 的规定。

(3) 满足所要求的常温或低温冲击韧性指标要求。对于有冲击韧性要求的焊件，一般情况选用的焊条其焊缝金属冲击值应不低于相应母材标准规定下限值。

★用于压力容器焊接的焊条应符合 JB/T4747-2002《压力容器用钢焊条订货技术条件》的规定。

(4) 对于一些在腐蚀介质中工作的低合金钢，则主要根据焊缝金属耐腐蚀性能来选择焊条。

■举例：10MoWVNb 抗氢钢应采用 J507MoW 焊条，而不能用 J507。

(5) 对于同一强度等级的酸性焊条和碱性焊条的选用，主要取决于焊接件的结构形状（简单或复杂）、钢板厚度、工作条件（静载荷或动载荷）和钢材的抗裂性能等方面。

●对于重要结构及要求抗裂性好、塑性好、冲击韧性好、低温性能好的焊接结构，应

选用碱性焊条（低氢型或超低氢型）。

☆低氢型焊条的含氢量标准是 5-10mL/100g；超低氢型焊条为≤5mL/100g。

●对于非重要结构或坡口表面有油、锈、氧化皮等脏物而又很难清理时，在结构性能要求允许的前提下，可选用酸性焊条。

(6) 在某些特殊情况下，例如钢材冷裂纹倾向较大、结构刚性大、板材较厚和接头冷却速度较快时，为防止裂纹，以及考虑母材金属成分的过渡，有效的办法是选用强度级别比母材金属略低、塑性和韧性高、抗裂性好的焊条。

（三）低温钢的焊条选用

1、对低温钢的认识：

●用于制造-20~-253℃低温下工作的焊接结构的专用钢材，称为低温钢。

●低温钢的分类：根据化学成分和组织特点，分为三大类：

▲低合金铁素体型低温钢：含合金元素总量不超过 5%。组织为铁素体加少量珠光体，在-40~-110℃范围内使用。

■举例：低合金低温钢 16MnDR（-40℃）、低温碳钢 ASTM A333Gr6（-45℃）、3.5Ni 钢 ASTM A333Gr3（-100℃）等。

▲中合金低碳马氏体型低温钢：合金元素含量大于 5-10%。组织与热处理方法有关：淬火后的组织为低碳马氏体；正火后的组织为低碳马氏体、铁素体及少量奥氏体；回火后的组织为含镍铁素体和少量富碳奥氏体。

☆典型钢种有 9Ni 钢：回火后的组织使 9Ni 钢在-196℃低温下仍具有优良的低温韧性。

▲高合金奥氏体型低温钢：合金元素总含量大于 10%，组织为奥氏体，在-196~-269℃的低温下仍保持相当高的韧性。

■举例：1Cr18Ni9Ti 等。

2、低温钢结构发生脆性断裂的必要条件：

(1) 必须具备由外载荷及残余内应力引起的一定应力水平；

(2) 由结构、材料、制造缺陷引起的缺口效应，其中由焊接而引起的缺陷（几何的或冶金）往往是脆断的裂源。

(3) 设备和管道的工作温度低于材料的脆性转变温度

3、低合金低温钢的焊接特点：

(1) 不含镍低温钢：由于其含碳量低、其他合金元素也不高，淬硬和冷裂倾向小，具有良好的焊接性。一般可不采用预热，但应避免在低温下施焊。

(2) 含镍低温钢：由于添加了镍，增大了钢的淬硬性，但不显著，冷裂倾向不大。当板厚较大或拘束较大时，应采用适当预热。

◇虽然镍可能增大热裂倾向，但是严格控制钢及焊接材料中的 C、S、P 含量，以及采用合理的焊接工艺，增大焊缝成形系数，可以避免热裂纹。

★特别提醒：低温下使用的焊接结构易于发生脆性断裂。所以保证焊缝和粗晶区的低温韧性是低温钢焊接时的技术关键。

■举例：9Ni钢的焊接特点

(1) 焊接接头的低温韧性问题（包括焊缝金属、熔合区和粗晶区）。

(2) 焊接热裂纹问题，尤其表现为弧坑裂纹。

(3) 焊接冷裂纹问题：低氢条件下一般不会产生冷裂纹。但高氢下也有一定冷裂敏感性。

(4) 焊接时电弧的磁偏吹问题：9Ni 钢系铁磁性钢，焊接时易发生电弧的磁偏吹，造成夹渣、未熔合等焊接缺陷的产生。

◆焊接磁偏吹的消除及控制措施：

◇采用永久磁铁平衡法来消除焊接磁偏吹的影响。在坡口焊缝的背侧移动永久磁铁，并用特斯拉计监测，可以保证焊缝内的剩磁接近于零。

◇采用交流焊接电源，由于电流方向的高频率变换（每秒 100 次），磁场不会造成电弧偏吹。

◇避免使用大电流的碳弧气刨清根，而改用砂轮打磨。

4、低温钢焊接接头的低温韧性保证措施：

(1) 从结构设计上充分考虑焊透，避免结构不良而引起的人为缺陷。

(2) 正确选择焊材，保证焊缝足够的冲击韧性水平。

(3) 正确制定焊接工艺，控制焊接线能量：采取小电流、快焊速、控制多层焊的层间温度等措施。

(4) 避免工艺缺陷：防止焊接接头产生各种应力集中源。

●采用锤击工件等强制手段进行组装会增加残余应力，易导致发生低应力脆性断裂破坏。所以规定低温钢在组装过程中不允许采用锤击等强制手段进行组装。

●因为缺口效应往往是脆断的裂源，所以不允许在受压元件上刻划或敲打材料标记和焊工钢印等导致产生缺口效应的划痕。

●焊件表面的电弧擦伤是应力集中源，所以规定焊接时不得在焊件表面引弧、收弧和试验电流，严禁有电弧擦伤。

●对低温钢焊接实行表面退火焊道，对改善焊接接头的韧性有相当有利的作用。这种表面退火焊道通常可以用钨极氩弧焊不填焊丝表面重熔来实现。

◇为了消除表面层的柱状组织，也可以最后多焊一层退火焊道，再把退火焊道加工掉。

(5) 焊后消除应力热处理可以降低低温钢焊接产品的脆断危险性。

5、低合金低温钢的焊条选用要点:

低温钢焊接的主要矛盾是保证接头的低温韧性要求,防止接头在使用过程中产生脆性断裂,其强度通常均能满足要求。故应按以下原则选用与母材的使用温度相适应的焊条:

(1) 当低温钢结构的使用条件在 -45°C 以上时,可选用低温韧性好的 Ti-B 系或高韧性普通低合金钢焊条。如 W507、J507RH。

(2) 使用条件在 -60°C 以下的低温钢,一般均采用含镍的低温钢焊条。如 W607、W707Ni 等。

(3) 在 -100°C 左右使用的低温钢,通常均使用含 3.5Ni 或更高含镍量并含一定量钼的低温钢焊条。如 W907Ni。

(4) 对于 9Ni 钢的焊接,常用的焊接材料有三种,即:含 Ni 约 60%以上的 Inconel 型、含 Ni 约 40%的 Fe-Ni 基型、含 Ni13%-Cr16%的奥氏体不锈钢改进型。如: ENiCrFe-2、ENiCrFe-4、ENiCrMo-6 等焊条。

★JB/T4709-2000 规定:用于焊接低温钢的镍钢焊条的焊缝金属夏比 V 型缺口冲击吸收功在相应低温时应不小于 34J。

★低温钢焊条药皮一般均采用低氢型。

(四) 铬钼珠光体耐热钢的焊条选用

1、对耐热钢的认识:

在高温下能够保持化学稳定性(耐腐蚀、不起皮)叫做热稳定性;在高温下具有足够的强度叫做热强性。具有热稳定性和热强性的钢称为耐热钢。

●耐热钢的分类:

(1) 低合金耐热钢:

合金元素总含量 5%以下。供货状态为退火、或正火+回火。组织主要为珠光体+铁素体,所以也称珠光体耐热钢。以 Cr、Mo 为主要元素的珠光体耐热钢称为铬钼珠光体耐热钢。

■如: 12CrMo、15CrMo、12Cr1MoV 等。

(2) 中合金耐热钢:

合金元素总含量 6-12%,以 Cr 为主,含 Mo0.5-1%。供货状态主要为退火、或正火+回火。也有以调质状态供货。退火状态下的组织为铁素体+碳化物;正火+回火状态下的组织为铁素体+贝氏体。合金元素总含量大于 10%以上的耐热钢组织为马氏体。

■如: 5Cr-0.5Mo、7Cr-0.5Mo、9Cr-1Mo-V 等。

(3) 高合金耐热钢:

合金元素总含量大于 13%，以 Cr 或 Cr-Ni 为主。组织为马氏体、铁素体和奥氏体三种。

■如 0Cr13Al（铁素体）、1Cr13（马氏体）、1Cr18Ni9Ti（奥氏体）。

●耐热钢的高温性能：

（1）抗蠕变性能。

蠕变：金属在一定温度和一定应力作用下随着时间的增加，慢慢发生塑性变形的现象
碳钢工作温度超过 300-350℃，合金钢的工作温度高于 400℃，都会发生蠕变。

（2）高温持久强度：金属材料在高温、长期应力作用下抵抗断裂的能力。

（3）蠕变脆性（钢的持久塑性）：在温度、应力和时间三者联合作用下所产生的脆性倾向。

（4）高温抗氧化能力。

2、对耐热钢焊接接头性能的基本要求：

（1）接头的等强度和等塑性：不仅要有与母材基本相等的常温和高温短时强度，而且更重要的应具有与母材相当的高温持久强度，同时还应具有与母材相近的塑性变形能力。

（2）接头的抗氢性和抗氧化性：具有与母材基本相同的抗氢性和抗高温氧化性。为此要求焊缝金属的合金成分应与母材基本相同。

（3）接头的组织稳定性：要求接头各区的组织不应产生明显的变化及由此引起的脆变或软化。

（4）接头的抗脆断性：焊接接头应能承受 1.5 倍工作压力的压力试验，和高温高压设备投运或检修后的冷启动过程。

（5）低合金耐热钢接头的物理均一性：低合金耐热钢焊接接头具有与母材基本相同的物理性能，防止接头材料的热膨胀系数和导热率的差别造成过大的热应力，对接头的提前失效产生不利影响。

★奥氏体耐热钢与奥氏体不锈钢具有基本相同的焊接特点，其焊条选用原则将在后面的奥氏体不锈钢一章中一并介绍。

3、铬钼珠光体耐热钢的焊接特点：

●铬钼珠光体耐热钢的基本合金元素是 Cr 和 Mo，有的还含有 V、W、Si、Ti、B 等。

●焊接时存在的主要问题是：

（1）热影响区的脆化（淬硬性）：在冷却速度较大的情况下，接近熔合线的粗晶区容易形成淬硬的马氏体组织。主要合金元素 Cr 和 Mo 能显著地提高钢的淬硬性。

▲虽然多层焊的接头性能比单层焊好得多，但紧靠熔合线的热影响区仍是最薄弱的环节。

★防止措施：

◇通过预热尽可能提高焊接加热速度；

◇ 适中的焊接线能量。

(2) 焊缝和热影响区的软化：冷却速度过慢，使接头在 AC1 附近的停留时间增长，而出现“软化区”，冲击韧性下降，引起断裂。

★防止措施：

◇尽量减小焊接线能量； ◇控制预热温度不宜过高。

(3) 冷裂纹：一般发生在热影响区的粗晶区内。当焊缝强度和氢含量较高时也会发生在焊缝内。

★防止措施：同低合金结构钢。

(4) 回火脆性：铬钼钢及其焊接接头在 370-565℃温度区间长期运行过程中发生渐进的脆变现象。以 2.25Cr-1Mo 钢为典型。

★防止措施：

◇降低焊缝金属中的 O、Si 和 P 含量；

◇控制线能量（43kJ/cm 以下）。

(5) 再热裂纹：在焊接之后再次处于高温（如焊后热处理）下产生的裂纹。容易发生在钼钢、铬钼钢及铬钼钒钢等珠光体耐热钢的焊接接头上（多数在粗晶区，少数在焊缝金属中）。

▲再热裂纹的主要影响因素：

◇化学成分：Cr、Mo、V 是碳化物的形成元素，会有析出强化作用，增加钢的再热裂纹敏感性。

◇焊接残余应力：再热裂纹发生在高焊接残余应力的部位。焊接接头中的咬边、根部未焊透等处是产生再热裂纹的裂源。

◇焊后热处理条件：加热温度是该钢种的再热裂纹最敏感温度，此时保温时间越长越不利。加热速度较慢时容易发生再热裂纹。

★再热裂纹的防止措施：

◇合理设计接头形式，降低接头的拘束度。

◇正确选用焊接材料：

①采用强度较低的焊缝金属，以提高其塑性变形能力，可减轻近缝区塑性应变集中程度；

②也可仅在焊缝表层用低强度高塑性焊条盖面。

★注意：上述两点都必须服从设计强度允许的范围。

◇控制焊接工艺：

①堆焊隔离层； ☆控制适宜的线能量；

- ②适当预热和提高层间温度；
- ③采用回火焊道（焊趾覆层或 TIG 重熔）有助于细化晶粒，减小应力集中；
- ④调整施焊方式减少焊接应力（焊接顺序、分段退焊等）；
- ⑤焊后对焊缝的加强高和焊趾部位打磨呈圆滑过渡，减小应力集中程度；
- ⑥有条件时可采用热输入量小、热影响区窄、焊缝金属含氢量低的焊接方法（如窄间隙焊、熔化极气体保护焊等）。

◇正确选择热处理工艺：

- ①采用低温焊后热处理及高加热速度（如 CrMoV 钢可提高 500-720℃ 区间最终回火的加热速度为 400-460 °C /h）；
- ②尽量缩短在敏感温度区间的保温时间；
- ③采用中间分段消除应力热处理（如 CrMoV 钢 480-500 °C×1h）；
- ④完全正火处理；
- ⑤锤击焊缝表层。

4、铬钼珠光体耐热钢的焊条选用要点：

☆从合金元素过渡方式看，绝大多数低合金耐热钢焊条的主要合金成分都是由药皮来过渡的。

（1）一般可按钢种和构件的工作温度来选用，以保证接头的高温性能。通常选用熔敷金属化学成分和力学性能与母材相同或接近的焊条。

★JB/T4709-2000 规定：低合金耐热钢的焊缝金属除应保证力学性能、抗拉强度不应超过母材标准规定的上限值加 30MPa 外，还应保证化学成分。

（2）如焊件焊后需经退火、正火或热成形，则应选用合金成分和强度级别较高的焊条。

（3）对于有冲击韧性要求的焊件，一般情况选用的焊条其焊缝金属常温冲击值应不低于相应母材标准规定下限值；

★压力容器焊接的铬钼钢焊条应符合 JB/T4747-2002 《压力容器用钢焊条订货技术条件》的规定。

（4）不论从提高焊接接头的抗裂纹能力，还是从满足力学性能考虑，都要求采用碱性低氢型焊条。只有在一些小直径薄壁管及一些管道经氩弧焊打底后作盖面焊时才可选用其他类型焊条（如 R302、R310 等）。

（5）考虑到防止热裂纹，通常将焊材中的碳含量控制在低于母材的碳含量。

▲焊缝金属的含碳量一般应不大于 0.14%。对于 1.25Cr-0.5Mo 钢和 2.25Cr-1Mo 钢，焊缝金属的最佳碳含量为 0.10% 左右。

▲碳含量过低的铬钼钢焊缝经长时间的焊后热处理会促使铁素体形成，导致韧性下降，

故应谨慎使用碳含量过低的焊材。

(6) 对于不便于进行高温预热或焊后热处理的场合（尤其是现场补焊），可采用奥氏体焊条或镍基合金焊条。

▲一般情况下选用 Cr25Ni13 型焊条，如 A307、A312 等；

（五）奥氏体不锈钢的焊条选用

1、对不锈钢的认识：

不锈钢是指主加元素 Cr 高于 12%，能使钢处于钝化状态、又具有不锈钢特性的钢。不锈钢实际是不锈钢（耐大气、水等弱腐蚀介质）和耐酸钢（耐酸、碱、盐等强腐蚀介质）的总称。不锈钢并不一定耐酸，而耐酸钢一般具有良好的不锈性能。

●不锈钢的分类

◆不锈钢根据其显微组织分为铁素体型、马氏体型、奥氏体型、奥氏体+铁素体型和沉淀硬化型不锈钢。

◆不锈钢根据主要合金元素大致分为高铬型不锈钢和高铬镍型不锈钢。

◆高铬型不锈钢包括马氏体型不锈钢和铁素体不锈钢两大类。

◆高铬镍型不锈钢则包括奥氏体、奥氏体+铁素体型和沉淀硬化型不锈钢。

▼马氏体不锈钢：常见的以 Cr13 不锈钢为代表，在常温下具有马氏体组织，如 1Cr13、2Cr13、3Cr13、1Cr17Ni2、9Cr18MoV。

▼铁素体不锈钢：常见的以 Cr13、Cr17 为代表，在常温下具有铁素体组织，如 0Cr13、0Cr13Al、1Cr17、1Cr17Ti、1Cr25Ti。

▼奥氏体不锈钢：大致分为：

◇Cr18-Ni8 型，如 0Cr18Ni9、0Cr17Ni12Mo2 等；

◇Cr25-Ni13 型，如 0Cr23Ni13；

◇Cr25-Ni20 型，如 0Cr25Ni20 ；

◇Cr25-Ni35 型，如 4Cr25Ni35（国外铸造不锈钢） ；

◇超级奥氏体型，如 254SMo（20Cr-18Ni-6Mo）。

☆ Cr18Ni9 不锈钢是基本的铬镍奥氏体不锈钢。

★注意：

不锈钢的不锈性和耐蚀性是相对的和有条件的，目前还没有对任何腐蚀环境都具有耐蚀性的不锈钢，所以不锈钢的选用应根据具体的使用条件加以合理考虑。技术人员在进行材料代用时应注意。

●奥氏体不锈钢的组织特点：

◆通常在常温下的组织为纯奥氏体，也有一些为奥氏体+少量铁素体，这种少量铁素体有助于防止热裂纹。

◆不能用热处理方法强化。但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、奥氏体不锈钢的焊接特点：

(1) 热裂纹。

★防止措施：

◇尽量使焊缝金属呈双相组织，铁素体的含量控制在 3-5% 以下。因为铁素体能大量溶解有害的 S、P 杂质。

◇尽量选用碱性药皮的优质焊条，以限制焊缝金属中 S、P、C 等的含量。

(2) 晶间腐蚀：根据贫铬理论，焊缝和热影响区在加热到 450-850℃ 敏化温度区时在晶界上析出碳化铬，造成贫铬的晶界，不足以抵抗腐蚀的程度。

★防止措施：

◇采用低碳或超低碳的焊材，如 A002 等；采用含钛、铌等稳定化元素的焊条，如 A137、A132 等。

◇由焊丝或焊条向焊缝熔入一定量的铁素体形成元素，使焊缝金属成为奥氏体+铁素体的双相组织，（铁素体一般控制在 4-12%）。

◇减少焊接熔池过热，选用较小的焊接电流和较快的焊接速度，加快冷却速度。

◇焊后稳定化退火处理（对耐晶间腐蚀性能要求很高的焊件而言）：850 °C/2-3h，空冷。

(3) 应力腐蚀开裂：

●应力腐蚀开裂——焊接接头在特定腐蚀环境下受拉伸应力作用时所产生的延迟开裂现象。

●奥氏体不锈钢焊接接头的应力腐蚀开裂是焊接接头比较严重的失效形式，表现为无塑性变形的脆性破坏。

●应力腐蚀开裂的宏观特征：裂纹从表面开始向内部扩展，点蚀往往是裂纹的根源。断口上常附有各种腐蚀产物及氧化现象。

●影晌应力腐蚀开裂的三要素：化学成分、拉应力、工作介质。

▲化学成分：不同的材料本身对于应力腐蚀敏感性有所不同。

▲工作介质：主要是介质的浓度和温度的影响：

① 对于碳钢及低合金钢的应力腐蚀开裂：

◇H₂S 介质的存在：H₂S 的浓度达到饱和状态；H₂S 水溶液的温度在室温附近开裂倾向最大。

◇NaOH 介质的存在：在超过 5% NaOH 的几乎全部浓度范围内都可产生碱脆，而以 30% NaOH 附近最为危险。碱脆的临界温度约为沸点，碱脆的最低温度约为 60℃。

② 对于奥氏体不锈钢的应力腐蚀开裂：

◇氯化物介质的存在：几乎只要有 Cl^- 存在，即可发生应力腐蚀开裂；温度升高，应力腐蚀开裂加速，在 Cl^- 浓度少的稀溶液中，存在一个 SCC 敏感温度范围，一般在 150-300℃。

◇NaOH 介质的存在： OH^- 的浓度高于 0.1% 即发生 SCC，40-42% 的 NaOH 是最危险的浓度；最低发生应力腐蚀开裂的温度是 115℃ 左右（对于 40-42% 的 NaOH）。

◇高温高压水介质的存在：其中溶解的氧（O）浓度对不锈钢应力腐蚀开裂倾向影响很大，且存在一敏感温度范围 150-300℃，在 300℃ 附近最易产生应力腐蚀开裂。

▲接头拉应力：拉应力的存在是 SCC 的先决条件。压应力不会引起 SCC。据调查，造成 SCC 的应力主要是残余应力，约占 80%，其中由焊接引起的残余应力约占 30%。

★应力腐蚀开裂防止措施：

◇合理设计：①耐蚀材料的合理选择，实用上选用高 Cr、Ni 且含高 Mo 的奥氏体不锈钢是合理的，双相不锈钢具有最好的抗 SCC 性能，超级奥氏体不锈钢显示明显的耐应力腐蚀能力；

②最大限度地减少应力集中和减少高应力区。

◇合理制定成形加工和组装工艺，尽可能减小冷作变形度，避免强制组装，防止组装过程中造成各种伤痕（各种组装伤痕及电弧灼痕都会成为 SCC 的裂源，易造成腐蚀坑）。

◇合理选择焊材：焊缝与母材应有良好的匹配，不产生任何不良组织，如晶粒粗化及硬脆马氏体等；

◇采取合适的焊接工艺：保证焊缝成形良好，不产生任何应力集中或点蚀的缺陷，如咬边等；采取合理的焊接顺序，降低焊接残余应力水平；

◇消除应力处理：焊后热处理，如焊后完全退火或退火；在难以实施热处理时采用焊后锤击或喷丸等。

◇生产管理措施：介质中杂质的控制，如液氨介质中的 O_2 、 N_2 、 H_2O 等；液化石油气中的 H_2S ；氯化物溶液中的 O_2 、 Fe^{3+} 、 Cr^{6+} 等；防蚀处理：如涂层、衬里或阴极保护等；添加缓蚀剂。

（4）焊缝金属的低温脆化：

对于奥氏体不锈钢焊接接头，在低温使用时，焊缝金属的塑韧性是关键问题。此时，焊缝组织中的铁素体的存在总是恶化低温韧性。

★由此可知，除了单相奥氏体钢，其他各类不锈钢均不适用于低温条件。

★防止措施：通过选用纯奥氏体焊材和调整焊接工艺获得单一的奥氏体焊缝。

(5) 焊接接头的 σ 相脆化:

●焊件在经受一定时间的高温加热后会在焊缝中析出一种脆性的 σ 相,导致整个接头脆化,塑性和韧性显著下降。

σ 相的析出温度范围 650-850℃。在高温加热过程中, σ 相主要由铁素体转变而成。加热时间越长, σ 相析出越多。

★防止措施:

◇限制焊缝金属中的铁素体含量(小于 15%);采用超合金化焊接材料,即高镍焊材。

◇采用小规范,以减小焊缝金属在高温下的停留时间;

◇对已析出的 σ 相在条件允许时进行固溶处理,使 σ 相溶入奥氏体。

3、奥氏体不锈钢的焊条选用要点:

●不锈钢主要用于耐腐蚀,但也用作耐热钢和低温钢。因此,在焊接不锈钢时,焊条的性能必须与不锈钢的用途相符。不锈钢焊条必须根据母材和工作条件(包括工作温度和接触介质等)来选用。

(1) 一般来说,焊条的选用可参照母材的材质,选用与母材成分相同或相近的焊条。如: A102 对应 0Cr19Ni9; A137 对应 1Cr18Ni9Ti。

(2) 由于碳含量对不锈钢的抗腐蚀性能有很大的影响,因此,一般选用熔敷金属含碳量不高于母材的不锈钢焊条。如 316L 必须选用 A022 焊条。

(3) 奥氏体不锈钢的焊缝金属应保证力学性能。可通过工艺评定验证 (4) 对于在高温工作的耐热不锈钢(奥氏体耐热钢),所选用的焊条主要应能满足焊缝金属的抗热裂性能和焊接接头的高温性能。

◆对 $Cr/Ni \geq 1$ 的奥氏体耐热钢,如 1Cr18Ni9Ti 等,一般均采用奥氏体-铁素体不锈钢焊条,以焊缝金属中含 2-5%铁素体为宜。铁素体含量过低时,焊缝金属抗裂性差;若过高,则在高温长期使用或热处理时易形成 σ 脆化相,造成裂纹。如 A002、A102、A137。

在某些特殊的应用场合,可能要求采用全奥氏体的焊缝金属时,可采用比如 A402、A407 焊条等。

◆对 $Cr/Ni < 1$ 的稳定型奥氏体耐热钢,如 Cr16Ni25Mo6 等,一般应在保证焊缝金属具有与母材化学成分大致相近的同时,增加焊缝金属中 Mo、W、Mn 等元素的含量,使得在保证焊缝金属热强性的同时,提高焊缝的抗裂性。如采用 A502、A507。

(5) 对于在各种腐蚀介质中工作的耐蚀不锈钢,则应按介质和工作温度来选择焊条,并保证其耐腐蚀性能(做焊接接头的腐蚀性能试验)。

◆对于工作温度在 300℃以上、有较强腐蚀性的介质,须采用含有 Ti 或 Nb 稳定化元素或超低碳不锈钢焊条。如 A137 或 A002 等。

◆对于含有稀硫酸或盐酸的介质，常选用含 Mo 或含 Mo 和 Cu 的不锈钢焊条如：A032、A052 等。

◆对于在常温下工作，腐蚀性弱或仅为避免锈蚀污染的设备，方可采用不含 Ti 或 Nb 的不锈钢焊条。

◆为保证焊缝金属的耐应力腐蚀能力，采用超合金化的焊材，即焊缝金属中的耐蚀合金元素（Cr、Mo、Ni 等）含量高于母材。如采用 00Cr18Ni12Mo2 类型的焊接材料（如 A022）焊接 00Cr19Ni10 焊件。

(6)对于在低温条件下工作的奥氏体不锈钢，应保证焊接接头在使用温度的低温冲击韧性，故采用纯奥氏体焊条。如 A402、A407。

(7)也可选用镍基合金焊条。如采用 Mo 达 9%的镍基焊材焊接 Mo6 型超级奥氏体不锈钢。

(8)焊条药皮类型的选择：

◆ 由于双相奥氏体钢焊缝金属本身含有一定量的铁素体，具有良好的塑性和韧性，从焊缝金属抗裂性角度进行比较，碱性药皮与钛钙型药皮焊条的差别不像碳钢焊条那样显著。因此在实际应用中，从焊接工艺性能方面着眼较多，大都采用药皮类型代号为 17 或 16 的焊条（如 A102A、A102、A132 等）。

◆只有在结构刚性很大或焊缝金属抗裂性较差（如某些马氏体铬不锈钢、纯奥氏体组织的铬镍不锈钢等）时，才考虑选用药皮代号为 15 的碱性药皮不锈钢焊条（如 A107、A407 等）。

4、铁素体-奥氏体双相不锈钢的焊接：

(1)对国内外双相不锈钢的认识：

●用途：主要用于耐强腐蚀性介质（如氯离子含量较高）的石油化工、海水与废水处理及设备、管道等场合。

●组织和性能特点：

◇含有较高的铬（18-28%）和较低的镍（4-10%），室温下的组织为奥氏体+铁素体，通常铁素体含量不低于 50%。

◇屈服强度可达 400-550MPa，是普通不锈钢的 2 倍

◇同时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，耐氯化物应力腐蚀优于普通不锈钢。

◇具有良好的焊接性能：与奥氏体不锈钢相比，具有较低的热裂倾向；与铁素体不锈钢相比，具有较低的加热脆化倾向。

●双相不锈钢的类型：

双相不锈钢的品种很多，最常用的有 3 种，即：

◇超低碳的 18Cr-5Ni-3Mo 型（也称 Cr18 型、1805 型）：

如已列入国家标准 GB4237《双相不锈钢热轧钢板》的 00Cr18Ni5Mo3Si2 (1805); 美国 ASTM S31500 (18Cr-5Ni-3Mo-N, 抗拉强度下限 630MPa)

◇23Cr-4Ni-Mo 型 (也称 Cr23 无 Mo 型、2305 型):

如: 美国 ASTM S32304 (23Cr-4Ni-Mo-Cu-N, 抗拉强度下限 600MPa)

◇22Cr-5Ni-3Mo 型 (也称 Cr22 型、2205 型):

如: 美国 ASTM S31803 (22Cr-5Ni-3Mo-N, 抗拉强度下限 620MPa)

◇25Cr-7Ni-4Mo 型 (也称 Cr25 型、2507 型): 分普通和超级两种类型。

■如: 已列入国家标准 GB4237-92《双相不锈钢热轧钢板》和 GB13296-91 的普通双相不锈钢有 0Cr26Ni5Mo2; 美国 ASTM S31260 (普通型, 25Cr-6Ni-3Mo-Cu-N-W, 抗拉强度下限 690MPa)、ASTM S32750 (超级型, 25Cr-7Ni-4Mo-N, 抗拉强度下限 800MPa)。

(2) 双相不锈钢的焊接特点:

◇具有良好的焊接性, 热裂纹敏感性较小, 当双相组织的比例适当时冷裂纹敏感性也较低。但在拘束度较大及焊缝金属含氢量较高时, 由于双相组织中的铁素体作用, 仍存在氢致裂纹的危险。

◇双相钢在 300-500℃ 范围内存在时间较长时, 发生“475℃脆性”, 所以双相钢的使用温度常低于 250℃。

★各种类型双相钢的具体焊条选用:

☆Cr18 型双相钢: 选用 Cr22-Ni9-Mo3 型超低碳焊材 (如 AWS A5.4 E2209 和 ER2209 牌号); 也可选用含 Mo 的奥氏体型不锈钢焊材, 如 A022Si (E316L-16)、A042 (E309MoL-16)。

☆Cr23 无 Mo 型双相钢: 选用 Cr22-Ni9-Mo3 型超低碳焊材 (如 AWS A5.4 E2209 和 ER2209 牌号); 也可选用奥氏体型不锈钢焊材, 如 A062 (E309L-16)。

☆Cr22 型: 选用 Cr22-Ni9-Mo3 型超低碳焊材 (如 AWS A5.4 E2209 和 ER2209 牌号); 也可选用含 Mo 的奥氏体型不锈钢焊材, 如 A042 (E309MoL-16)。

☆Cr25 型: 选用 Cr25-Ni5-Mo3 或 Cr25-Ni5-Mo4 型超低碳焊材, (如 AWS A5.4 E2553 和 ER2553 牌号); 也可选用不含 Nb 的高 Mo 镍基焊材, 如无 Nb 的 NiCrMo-3 型焊材。

●预热: 不需要。层间温度不高于 100℃。

●焊接线能量: Cr18 型双相钢不大于 15kJ/cm; Cr23 无 Mo 型和 Cr22 型双相钢为 10-25kJ/cm; Cr25 型双相钢为 10-15kJ/cm。

●焊后热处理: 不需要。

(3) 双相不锈钢的焊接工艺要点:

●焊接方法:

钨极氩弧焊、手工电弧焊、熔化极钨极气体保护焊、埋弧焊均可。

●焊接材料:

◇为防止 σ 相和保证焊缝金属正常的奥氏体/铁素体相比比例,焊接双相钢也同样要采用“超合金化”焊材,即高镍焊材。

◇为防止碳化物析出,焊缝金属的含碳量应控制在超低碳(0.03%)的水平。

◇当对焊缝金属的耐腐蚀性能有特殊要求时,还应采用超级双相钢成分的碱性焊条。

5、超级奥氏体不锈钢的焊接:

目前在国外广泛开发应用的新钢种,用于抗氯离子等强腐蚀的环境。我公司将在烟台万华 MDI 项目和宁波台塑 NAE 项目上接触到。

★国外最典型的超级奥氏体不锈钢是 ASTM S31254 (254SMo),公称成分 20Cr-18Ni-6Mo,强度比 316L 高约 50%。

(1)组织和性能特点:

◇化学成分介于普通奥氏体不锈钢与镍基合金之间,含有较高的 Mo、N、Cu 等合金化元素,以提高奥氏体组织的稳定性、耐腐蚀性,特别是提高抗 Cl⁻的应力腐蚀开裂性能

◇钢的组织为纯奥氏体组织。

◇冷加工硬化倾向较大,冷成形后有较大的反弹。所以加工时要有一定的成形留量。冷成形后不需热处理。

◇长时间热成形加热易导致严重的起皮现象。热成形后一般需要固溶处理。

(2)焊接特点:同其它奥氏体不锈钢相同。

(3)焊接工艺要点:

●焊接方法:优选钨极氩弧焊,其次手工电弧焊。

●焊接材料:采用镍基焊材,如焊丝 ASTM A5.14 ERNiCrMo-3;焊条 ASTM A5.11 ENiCrMo-12。

●预热:不需要,层间温度不高于 100℃。

●焊接线能量:控制。

●焊后热处理:一般不需要。如果采用自熔焊(即不填丝 TIG 焊)时,要进行固溶处理和淬火,以保证耐蚀性。建议尽量不采用自熔焊工艺。

(六)异种钢的焊条选用

1、异种钢焊接的主要问题:

●焊接接头的化学不均匀性及由此引起的组织和力学性能的不均匀性

●界面组织的不稳定性

●应力变形的复杂性

2、获得优质异种钢焊接接头的焊接工艺要点：

- 避免淬火钢的复合结构近缝区产生裂纹；
- 保证焊缝金属中没有热裂纹；
- 保证不使高合金钢有显著的稀释；
- 保证焊接接头与基本金属有较近的膨胀系数。

3、异种钢焊接材料选择的基本原则：

- 所选择的焊接材料必须能够保证异种钢焊接接头设计所需要的性能，如力学性能、耐热、耐蚀性能等；
- 所选择的焊材必须在有关稀释率、熔化温度和焊接件其他物理性能要求等方面能保证焊接性需要；
- 在焊接接头中不产生裂纹等缺陷的前提下，当不可能兼顾焊缝金属的强度和塑性时，应优先选用塑性好的填充金属；
- 焊接材料应经济、易得，并具有良好的焊接工艺性能。

4、碳钢与低合金结构钢或异种低合金结构钢焊接时的焊条选用：

(1) 选用的焊条应能保证焊缝金属及接头的强度高于强度较低一侧的钢材，而焊缝的塑性及冲击韧性不低于强度较高而塑性、韧性较低一侧的钢材。即强度、塑性和韧性都不应低于被焊材料的最低值。

(2) 一般选用低氢型焊条，以保证焊缝金属的抗裂性能和塑性。

(3) 要求焊丝中的碳含量低些，而锰的含量高些，希望锰/硅的比值提高，以减少热裂纹产生。

★JB/T4709-2000 规定：不同强度钢号的碳素钢、低合金钢之间的焊缝金属应保证力学性能，且其抗拉强度不应超过强度较高母材标准规定的上限值。

5、碳钢、低合金结构钢与珠光体耐热钢焊接时的焊条选用：

(1) 通常这类异种接头的使用温度不很高，一般选用与合金含量较低一侧的母材相匹配的焊材，并保证焊接接头的常温力学性能，接头强度不低于两种母材标准规定值的较低者。

(2) 可选用碳钢焊条，也可选用耐热钢焊材。但焊接工艺应遵循珠光体耐热钢的要求。如 A3 或 16Mn 与 15CrMo 焊接时，可采用 J507 或 R207 焊条。

(3) 结构刚性大、焊后不进行热处理的场合，可采用 A307 焊条，但这类异种钢接头的最高工作温度不得超过 350℃。

5、异种珠光体耐热钢焊接时的焊条选用：

(1) 在同工作温度下，应满足强度较低一侧钢材的要求，又要考虑使焊缝合金元素的含量不低于合金元素较少的一侧母材，但焊缝的热强性应等于或高于母材金属。一般情况下均

选用低氢型焊条。

(2) 在某些情况下, 为防止焊接时、焊后热处理时或使用过程中碳的迁移, 保证接头的高温性能, 应选用介于两种母材金属之间的焊条。

■举例:

12Cr1MoV 与 10CrMo910 管道焊接, 当选用 R307、R407、R317、J507 时, 焊接接头的室温力学性能均能满足(焊接工艺评定结果)。但按高温持久强度要求, 选用 R407、R317 焊条可以满足使用要求; 而用 R307、J507 则不能满足要求。

(3) 若产品不允许或施工现场无法进行焊前预热和焊后热处理时, 可选用奥氏体焊材。但对于高温状态下的珠光体异种接头, 要慎用奥氏体焊材。

(4) 若该类异种钢接头在使用温度下可能产生扩散层时, 则最好在坡口面堆焊隔离层, 隔离层金属应含有 Cr、V、Ti 等强烈碳化物形成元素。

6、珠光体钢与奥氏体不锈钢焊接时的焊条选用:

☆通常把碳钢、低合金结构钢、珠光体耐热钢统称为珠光体钢。

●焊接特点:

珠光体钢与奥氏体钢接头的熔合线两侧出现碳和碳化物形成元素的浓度差, 它处于 350-400℃ 温度下长期工作时, 或在焊后热处理过程中, 往往会在熔合线区域出现碳元素的扩散:

◇在珠光体钢母材金属边缘形成脱碳层, 脱碳层晶粒甚粗大, 导致软化。

◇在奥氏体钢母材金属一侧形成增碳层, 增碳层中的碳元素以铬的碳化物形态析出, 并导致硬化。

★实践证明, 脱碳层是接头中的薄弱环节, 对高温持久强度的影响较大, 约降低 10-20%。

●奥氏体不锈钢与珠光体钢焊接材料的选择要考虑的因素:

(1) 克服珠光体钢对焊缝的释碳作用。

■举例:

比较 J507、A132、A302、A402 四种焊条焊接时的焊缝组织:

用 J507 施焊, 组织为马氏体, 不允许采用;

用 A132 施焊, 焊缝基本上也是马氏体组织, 而且越靠近碳钢侧, 马氏体数量越多, 是脆性破坏的起始区域, 也不适用;

用含镍大于 12% 的 A302、A402 施焊时, 组织基本上是奥氏体或全部为奥氏体, 可用。

(2) 抑制熔合区中碳的扩散。提高焊材的奥氏体形成元素, 是抑制熔合区中碳扩散最有效的手段。随着工作温度的提高, 要阻止碳扩散, 必须提高镍含量:

◇350℃以下：焊缝金属的镍含量可以不超过 10%；

◇350-450℃：镍含量应为 10-19%；

◇450-550℃：镍含量应为 19-31%；

◇550℃以上：镍含量应为 31%以上。

(3) 改变焊接接头的应力分布。

◇国外常用与珠光体钢线膨胀系数相接近的 Cr15Ni70 镍基焊材来焊接该类异种钢，使得高温应力集中在奥氏体不锈钢一侧的熔合区，减轻了珠光体钢一侧熔合区的压力，对接头比较有利。

◇在坡口面堆焊隔离层也有效。但用于堆焊的焊条合金成分应高于焊缝金属。如：在珠光体钢一侧坡口上堆焊两层 A302 或 A307 焊条，然后与奥氏体不锈钢焊接。

(4) 提高焊缝金属的抗裂纹能力：在不影响使用性能的前提下，最好使焊缝金属中含有一定数量的铁素体组织。

★试验表明，A302、A307 焊条的抗裂性能比单相的 A402、A407 焊条优越。

★综上所述，此类异种钢焊接所选用的焊条只有 A302、A307 或 A402、A407 适宜，不仅能克服珠光体钢对焊缝的稀释，对抑制熔合区中碳扩散和改变焊接接头应力分布也有利。但 A402、A407 的热裂纹倾向较大，生产上比较少用。

★JB4709-2000 规定：奥氏体高合金钢与碳素钢或低合金钢之间的焊缝金属应保证抗裂性能和力学性能。宜采用铬镍含量较奥氏体高合金钢母材高的焊接材料。

■工程应用实例：

(1) 12CrMo、15CrMo 珠光体钢与 1Cr18Ni9Ti 奥氏体钢焊接时，若选用 A307、A407 焊条，则即使稀释率达 25-30%，焊缝金属中也不致出现马氏体组织。

(2) 结构刚性大、板厚超过 20mm 的珠光体钢与奥氏体钢的焊接接头，在焊后热处理过程中或周期性的加热、冷却运行条件下，将产生很大的热应力，导致珠光体钢一侧的熔合线出现热疲劳裂纹。为消减热应力，采用热膨胀系数与珠光体耐热钢相接近的含镍量高的 A507 或 Ni307 焊条。

(3) 运行温度高于 400-500℃的异种钢结构焊接时，在珠光体钢（如 15Cr1MoV）坡口上采用含 V、Nb、Ti、W 等碳化物形成元素的珠光体耐热钢焊条（如 R317、R337）堆焊一层厚约 5-6mm 的过渡层，以限制珠光体钢中的碳向奥氏体焊缝扩散。然后再用相应的奥氏体钢焊条（如 A307）焊接对接接头。

(4) 为提高高温下运行的珠光体与奥氏体钢管焊接接头的高温持久强度，可在异种钢管间加一段含 V、Nb、Ti 等强碳化物形成元素的珠光体钢中间过渡管段（如 12Cr1MoV）。先用铬钼钢焊条（如 R317）焊接珠光体钢与中间过渡管段的连接焊缝，焊后在 700-760℃下进行

退火处理，再用奥氏体钢焊条（如 A307）焊接奥氏体钢管与中间过渡管段的焊缝。

（5）用 A407 焊成的 12Cr2Mo1 与 1Cr18Ni9Ti 异种钢接头，在 600℃ 长期试验时，由于碳的强烈扩散，使熔合线附近的性能降低。但若用含铌的 12Cr2Mo1 焊条 R337 在珠光体钢一侧堆焊一层过渡层，则碳的扩散能力显著减弱，高温持久强度提高，试样断裂位置移至珠光体母材金属一侧。

（6）珠光体耐热钢管与奥氏体钢过热器管的焊接结构，采用镍基合金焊条及加衬环的方法进行焊接，可消除熔合线区域的应力突变，提高接头的工作能力。

7、奥氏体不锈钢与铁素体低温钢焊接时的焊条选用：

☆此类异种钢焊接接头的主要问题是：碳的迁移和合金元素的扩散。

■资料介绍：对于中强度低温钢如 06MnNb、3.5Ni 等与奥氏体不锈钢焊接时，不论用 A402、A302、A102 或 A202 焊条，都不可避免在熔合线产生马氏体组织。而用超低碳的 A022 焊条焊接 06MnNb 与 1Cr18Ni9Ti 时是可行的。

（1）选择含碳量不同的不同牌号焊条时，应选用含镍量较高的焊条，对控制碳的迁移和提高低温冲击韧性都有利。

（2）选择含镍量不同的不同牌号焊条时，应选用含碳量较低的铬镍奥氏体焊条，可以控制焊缝中的碳迁移和改善力学性能。

（3）当不同钢号的低温钢焊接时，应选择与低温韧性较高的钢材相匹配的焊条。

（4）考虑到母材对焊缝的稀释作用，可对焊缝金属的化学成分进行适当的调整。

8、奥氏体不锈钢之间焊接时的焊条选用：

☆此类异种奥氏体钢的焊接，主要是防止焊接接头内产生热裂纹、晶间腐蚀及 σ 相脆化等问题。

（1）根据合金含量较低一侧母材或介于两者之间选用焊条。

（2）选用奥氏体-铁素体的双相组织焊条，使焊缝金属含 3-5% 的铁素体，以提高接头的抗裂性能及抗腐蚀性能。

（3）控制焊缝金属的含碳量。

■举例：1Cr18Ni9Ti 与 0Cr18Ni12Mo2Ti 焊接选用 A132、A137、A202、A207、A212 均可。

（七）复合钢板（管）的焊条选用

1、对复合钢板（管）的认识：

●复合钢板（管）：以不锈钢、镍基合金、铜基合金或钛板等高性能合金为复层，以低碳钢或低合金钢等珠光体钢为基层，进行复合成型（轧制、爆炸或钎焊）。

- 基层主要满足强度和刚度的要求；复层满足耐蚀、耐磨等特殊性能要求。

- 我们在工程中常遇见的是不锈钢复合钢板或复合钢管。其中又以奥氏体不锈钢和铁素体不锈钢为复层的复合钢板为多见。

2、不锈钢复合钢板（管）的焊接特点：

- 不锈钢复合钢的焊缝可分为复层、基层和过渡层三部分。

- 不锈钢复合钢的焊接性能主要取决于不锈钢的物理性能、化学成分、接头形式及填充材料种类，所以需要解决下列问题：

- (1) 焊缝金属的稀释作用增大了热裂纹倾向；

- (2) 熔合区可能出现马氏体组织导致硬度和脆性增加；

- (3) 基层和复层含铬量的较大差异促使碳的迁移而形成增碳层和脱碳层，加剧熔合的脆化或另一侧热影响区软化。

2、复合钢的焊条选用原则：

- ★JB4709-2000 规定：

- ☆不锈钢复合钢基层的焊缝金属应保证力学性能，且其抗拉强度不应超过母材标准规定的上限值加 30MPa；

- ☆复层的焊缝金属应保证耐腐蚀性能，当有力学性能要求时还应保证力学性能。

- ☆复层焊缝与基层焊缝以及复层焊缝与基层钢板的交界处宜采用过渡焊缝。

- 基于上述原则的焊条选用要点：

- ◇基层焊缝：选用与基层珠光体钢单独焊接时相同的焊条。

- ◇复层焊缝：原则上使用与单独焊接不锈钢时相同的焊条。

- ◇过渡层焊缝：要求其 Cr、Ni 含量高于复层焊缝的含量，以减少碳钢的稀释和补充焊接过程中合金元素的烧损。

- (1) 常根据复合钢材质的不同分别选用 25Cr-13Ni 、 25Cr-20Ni 型焊条。如 A302、A307、A402、A407 等焊条。

- (2) 对复层含钼的不锈钢复合钢，过渡层应采用 25Cr-13Ni-Mo 型焊条，如 A312、A042。

- (3) 对于塑性要求不高、抗腐蚀性能一般的不锈钢复合钢，过渡层焊缝也可选用焊接复层时的焊条。

- 焊条选用焊接时应注意的事项：

- ◇一般应采用先焊基层焊缝、然后焊过渡层焊缝、最后焊复层焊缝的焊接顺序施焊；但复合管是特例。

- ◇不得用珠光体钢焊材在复层母材、过渡层焊缝和复层焊缝上施焊；

◇过渡层焊缝应同时熔合基层焊缝、基层母材和复层母材，且应盖满基层焊缝和基层母材。

◇过渡层焊缝在整个复合钢板中的厚度：在复层侧，超出基层和复层交界面约 0.5-1.5mm；在基层侧，超出基层和复层交界面约 1.5-2.5mm。

◇定位焊缝只允许焊在基层母材上。

★特例：

(1) 对于复合管，或者由于施工条件限制一定要先焊复层的复合板，可采取以下方法：

(2) 为避免稀释、碳迁移，基层和过渡层均按过渡层焊缝要求选用焊条，如 A307、A407 等，基层焊条不变。

(3) 为保证过渡层焊缝塑性好、抗裂性能高，过渡层选用含碳量极低的纯铁焊条，基层和复层焊条不变。

■举例：

□0Cr13+Q235 焊接：基层 J422 或 J427；过渡层 A302、A307、A402 或 A407；复层 A132、A137、A302 或 A307。

□0Cr18Ni9+16MnR：基层 J502 或 J507；过渡层 A302 或 A307；复层 A102 或 A107。

□00Cr17Ni12Mo2+20R：基层 J422 或 J427；过渡层 A042 或 A312；复层 A022。

第五部分、氩弧焊丝的选用

1、氩弧焊丝选用的基本原则：

(1) 应满足接头的化学成分、力学性能和其它特殊性能要求。

(2) 焊接工艺性能要好，具有抗裂、防止气孔的能力。

(3) 焊丝含有害杂质 S、P 等要少。

(4) 焊丝应清洁、光滑、干燥、无油渍、污物和锈蚀。

★前述的焊条选用原则基本适合于焊丝。

2、常用氩弧焊用焊丝对照表

| 母材 | 焊丝牌号 (型号) | 焊丝标准号 |
|--|----------------------|-----------|
| 碳钢和抗拉强度 490MPa 以下的低合金结构钢如 Q235、20、16MnR、15MnVR 等 | H08Mn2SiA (ER49-1) | GB/T8110 |
| | ER50-2 | GB/T8110 |
| | H10MnSi | GB/T14958 |
| | TIG-J50 | |
| | TIG-LD | |

| | | |
|----------------------|---------------------|-----------|
| | TGS-50 (日本) | |
| C-0.5Mo 钢 | TIG-R10 | |
| 0.5Cr-0.5Mo 耐热钢 | H08CrMoA | GB/T14957 |
| | ER55-B2Mn(ER80S-G) | GB/T8110 |
| 1Cr-0.5Mo 耐热钢 | H13CrMoA | GB/T14957 |
| | TIG-R30 | |
| | ER55-B2Mn(ER80S-B2) | GB/T8110 |
| 1Cr-0.5Mo-V 耐热钢 | H08CrMoVA | GB/T14957 |
| | TIG-R31 | |
| 2.25Cr-1Mo | TIG-R40 | |
| | ER62-B3(ER90S-B3) | GB/T8110 |
| Cr18Ni9 类钢 | H0Cr21Ni10 | YB/T5091 |
| | H00Cr21Ni10 | YB/T5091 |
| Cr18Ni9Ti 类钢 | H0Cr21Ni10Ti | YB/T5091 |
| Cr17Ni12Mo2 类钢 | H0Cr19Ni12Mo2 | YB/T5091 |
| | H00Cr19Ni12Mo2 | YB/T5091 |
| Cr19Ni13Mo3 类钢 | H0Cr20Ni14Mo3 | YB/T5091 |
| 珠光体钢与奥氏体不锈钢 异种钢焊接 | H1Cr24Ni13 | YB/T5091 |
| | H1Cr26Ni21 | YB/T5091 |

第六部分、镍基合金的焊材选用

1、镍基合金的分类与牌号（七类）：

◆工业纯镍（P41）：含镍 99.5%。如 Ni200、 Ni201。

◆Ni-Cu 合金（P42）：

如：Monel 400（蒙乃尔，Ni66Cu32）等。

◆Ni-Cr 合金（P43）：

如：0Cr30Ni70

Corronel230（柯罗镍，Cr35Ni65）

Inconel671（因康镍，Cr50Ni50）

◆Ni-Cr-Fe 合金 (P43) :

如: Inconel600 (因康镍, Cr76Ni15Fe8)

Inconel625 (Cr61Ni21Mo9Fe3)

◆Ni-Mo 合金 (P44) :

如: Hastelloy A (哈斯特洛依 A, Ni60Mo19Fe20)

Hastelloy B (0Ni65Cr28Fe5V)

Hastelloy B-2 (00Ni70Mo28)

◆Ni-Cr-Mo 合金 (P44) :

如: Hastelloy C (Ni60Cr16Mo16W4)

Hastelloy C-276 (000Ni60Cr16Mo16W4)

Hastelloy C-4 (000Ni60Cr16Mo16Ti) 。

◆Ni-Fe-Cr 合金 (P45):

如: Incoloy 800 (因康洛依, Ni32Fe46Cr21)

Incoloy 825 (Ni42Fe30Cr21)

2、镍基合金的焊接特点:

镍基合金的焊接有奥氏体不锈钢焊接相类似的问题:

(1) 焊接热裂纹

(2) 气孔: 与低碳钢、低合金钢比较, 气孔倾向更大, 特别对不干净的坡口及焊丝。

(3) 耐腐蚀性能: 大多数镍基耐蚀合金焊后对耐蚀性能没有多大影响。但对于 Ni-Cr、Ni-Mo、Ni-Cr-Mo 系的一些合金的热影响区附近会发生贫铬现象, 导致在某些介质中的晶间腐蚀、应力腐蚀性能下降。

(4) 工艺特性: 液态焊缝金属的流动性差; 焊缝金属熔深浅。

3、焊接工艺要点:

(1) 正确选择焊材

(2) 接头型式: 采用大坡口角度和小纯边的接头型式

(3) 坡口附近及焊丝的清理: 特点重要, 以防止热裂纹和气孔。

(4) 焊前预热: 一般不需要焊前预热, 层间温度应控制在 100 °C 以下。但当母材温度低于 15°C 时, 应加热至 15-20 °C, 以免湿气冷凝。

(5) 焊接工艺:

◇限制热输入, 采用小线量和保持电弧电压的稳定, 并采用短弧不摆动或小摆动的操作方法。

◇对于小直径管道焊接过程中宜采取强制冷却措施减少焊缝的高温停留时间, 增加焊

缝的冷却速度。

◇焊后焊缝表面熔渣和飞溅物的及时清理，以防止熔渣中的 S 等杂质对焊缝造成脆化或腐蚀性能下降。

(6) 焊后热处理：一般不推荐焊后热处理。但有时为保证使用中不发生晶间腐蚀或应力腐蚀需要热处理。

4、焊条分类与型号：

★GB/T13814-92《镍及镍合金焊条》标准等效采用美国 ANSI/AWS A5.11-89《镍及镍合金药皮焊条规程》：（五种） ◆工业纯镍焊条： ENi-0、 ENi-1

◆Ni-Cu 系焊条： ENiCu-7

◆Ni-Cr-Fe 系焊条： ENiCrFe-0 至 ENiCrFe-4

◆Ni-Mo 系焊条： ENiMo-1、 ENiMo-3 、 ENiMo-7

◆Ni-Cr-Mo 系焊条： ENiCrMo-0 至 ENiCrMo-9

★药皮类型：钛钙型（03）、碱性（15、16）

5、焊丝分类与型号：

★按 GB/T15620-1995《镍及镍合金焊丝》规定：

◆工业纯镍焊丝：

◆Ni-Cu 系焊丝： ERNiCu-7

◆Ni-Cr 系焊丝： ERNiCr-3

◆Ni-Cr-Fe 系焊丝： ERNiCrFe-5、 ERNiCrFe-6

◆Ni-Fe-Cr 系焊丝： ERNiFeCr-1、 ERNiFeCr-2

◆Ni-Mo 系焊丝： ERNiMo-1 、 ERNiMo-2 、 ERNiMo-3 、 ERNiMo-7

◆Ni-Cr-Mo 系焊丝： ERNiCrMo-1 至 ERNiCrMo-4、 ERNiCrMo-7 至 ERNiCrMo-9

6、镍基合金的焊材选用原则：

(1) 同种镍材焊接时的焊材选用：

◇应选用和母材合金系列相同的焊接材料

◇若无耐腐蚀性能要求，也可选用与母材合金系统不同的焊接材料，但应保证接头具备设计要求的性能。

■举例：

Monel 400： 焊条 ENiCu-7 ； 焊丝 ERNiCu-7

Inconel600： 焊条 ENiCrFe-1； 焊丝 ERNiCrFe-5

Incoloy 800H： 焊条 ENiCrFe-2； 焊丝 ERNiCr-3

Hastelloy C-276: 焊条 ENiCrMo-4 ; 焊丝 ERNiCrMo-4

(2) 异种镍材及镍材与奥氏体不锈钢之间的焊接, 应考虑下列因素:

- ◇焊缝的强度(包括高温持久强度), 耐腐蚀性满足设计;
- ◇选用线膨胀系数与母材相近的焊接材料。
- ◇考虑焊材对焊接裂纹、气孔的敏感性。

■举例:

- ◇奥氏体不锈钢与 Monel 400 焊接: 焊条 ENiCu-7 ; 焊丝 ERNiCu-7。
- ◇Monel 400 与 Inconel600 焊接: 焊条 ENiCrFe-3; 焊丝 ERNiCr-3。
- ◇Incoloy 800H 与 Hastelloy C-276 焊接: 焊条 ENiMo-3; 焊丝 ERNiMo-3 。