

应用技术

## 奥氏体耐热钢的焊接技术与工艺探讨

商福志, 孙健

(重庆机电职业技术学院, 重庆 400036)

**摘要:** 详细分析了奥氏体耐热钢的焊接特点, 以及如何掌握该类耐热钢的核心焊接技术, 合理控制铁素体与奥氏体的比例。介绍了在实际焊接中, 奥氏体耐热钢主要焊接缺陷产生的种类与机理; 在工艺上, 总结了奥氏体耐热钢防止缺陷产生的主要措施。最后, 指出了手工电弧焊的焊接工艺中, 应当注意的关键点和要求坚持的一般焊接规范。

**关键词:** 耐热钢; 焊接技术; 焊接规范

**DOI:** 10.3969/j.issn.1674-6457.2016.04.005

**中图分类号:** TG441.7   **文献标识码:** A   **文章编号:** 1674-6457(2016)04-0087-05

### Welding Technique and Technology of Austenitic-Type Heat-Resisting Steel

SHANG Fu-zhi, SUN Jian

(Chongqing Electromechanical Vocational Institute, Chongqing 400036, China)

**ABSTRACT:** The study analyzed the welding characteristics of austenitic-type heat-resisting steel in details and introduced how to master the key welding technique and control the ratio of ferrite and austenite in austenitic-type heat-resisting steel. It introduced the categories and mechanism of welding defects produced in welding practices, summarized the main precautions to prevent welding defects, and finally pointed out the key points to be paid attention to and the general welding specifications to be followed in manual arc welding.

**KEY WORDS:** heat-resisting steel; welding technique; welding specifications

随着科学技术的不断发展, 近十年来, 高合金耐热钢金属材料在航空航天、水利发电、汽轮机转子和壳体、锅炉的耐热部件、林业机械高温合金锯片等领域, 使用范围和使用量在不断扩大。尤其是奥氏体耐热钢(属于高合金耐热钢), 由于焊接性好, 适用于常规各种焊接方法, 综合性能优良, 又属于非磁性材料等突出特点, 在我国得到了广泛使用。同时, 奥氏体耐热钢又是研究铁素体、马氏体和弥散型耐热钢的基础, 因此, 研究奥氏体耐热钢的焊接技术与工艺具有特殊的意义。

### 1 奥氏体耐热钢的组织与力学性能

奥氏体耐热钢金属材料, 除了具有高合金材料的一般特点以外, 还具有热膨胀系数高、导热率低、合金种类多、具有较高塑性和韧性、合金元素对焊缝性能相互影响较大等特殊性质, 因此不能单凭二元相图或者三元相图来静止地判断化学元素对焊缝组织和力学性能的影响。其焊接性更多地依靠实践和实验结果, 按照不同条件总结其一般焊接特性。总

收稿日期: 2016-05-16

作者简介: 商福志(1949—), 男, 河北保定人, 教授, 主要研究方向为金属材料成形与特种焊接。

通讯作者: 孙健(1968—), 男, 武汉人, 重庆机电职业技术学院工程师, 主要研究方向为金属材料表面处理及检测。

体来讲,奥氏体耐热钢金属材料的焊接性与化学成分和组织有关。

## 1.1 奥氏体耐热钢化学成分对组织的影响

奥氏体耐热钢主加元素是 Cr 和 Ni。微量元素有 Ti, V, Nb, Mo, W, Al, Cu, Mn, Si 等,合金总量约为 20%~45%左右,其中 Cr 含量 $\geq 18\%$ 。合金焊缝组织主要与合金元素含量、冷却速度、合金均匀化程度、母材的稀释程度以及合金元素种类有关。尤其合金元素种类与含量在焊接状态下的影响起到主导作用。

### 1.1.1 第一类元素是形成或稳定奥氏体元素

主元素 Ni, 微量元素包括 Mn, C, N。通常采用镍当量 (NiE) 来定量计算焊缝组织成分。第一类元素属于扩大奥氏体区元素,如图 1 所示。第一类元素使奥氏体区扩大,结果导致  $\alpha/\gamma$  转变温度降低和  $\gamma/\delta$  转变温度升高,使  $\alpha$  区和  $\delta$  区缩小。当 NiE 当量达到极限值时,这种钢就变成从室温到熔化均为奥氏体钢,处于阴影的左侧区域。其中 C, N 对形成或稳定奥氏体的作用是同等 Ni 元素含量的 30 倍。对碳和氮的影响必须给予高度重视。奥氏体型耐热钢采用短弧焊接,就是为了防止长弧与空气接触增加,吸收 N 元素而抑制铁素体的形成。有些奥氏体耐热钢采取措施防止 N 元素氧化,其目的就是为了保证奥氏体组织。

### 1.1.2 第二类元素是形成或稳定铁素体元素

主元素 Cr, 微量元素包括 Si, Al, Ti, V, Nb, Mo, W。通常采用铬当量 (CrE) 通过德龙图来定量计算焊缝组织成分。第二类元素属于缩小奥氏体区元素,如图 1 所示。说明第二类元素使奥氏体区缩小,结果导致  $\alpha/\gamma$  转变温度升高和  $\gamma/\delta$  转变温度降低。当达到极限时,即第二类元素含量较高时(即 CrE 较高时), $\gamma=0$ , $\alpha$  区域与  $\delta$  区域成为连续区域,此时合金成分处于阴影的右侧,即低温或高温均为铁素体。

### 1.1.3 阴影区内的半铁素体转变

图 1 中阴影区内生成半铁素体钢。这里有两种转变情况:①不可转变的  $\delta$  铁素体+可以进行相变的高温奥氏体,高温奥氏体按照不同的冷速分别转变成珠光体、贝氏体及马氏体等杂组织。②不可转变的  $\delta$  铁素体+不发生转变的奥氏体,及形成双向( $\delta$  铁素体+奥氏体)组织。奥氏体型耐热钢多数属于这种情况。奥氏体不发生转的原因是合金元素作用的结果,与冷速和温度关系不大。

上述两种情况中, $\delta$  铁素体不发生转变,主要因

为在焊接冶金条件下,合金元素的偏析, $\delta$  铁素体局部周围的第二类元素富集,在焊缝处于铸态条件下来不及均匀扩散,第二类元素迫使铁素体不发生相变。这说明了合金元素种类、含量及偏析对相变影响的重要性。

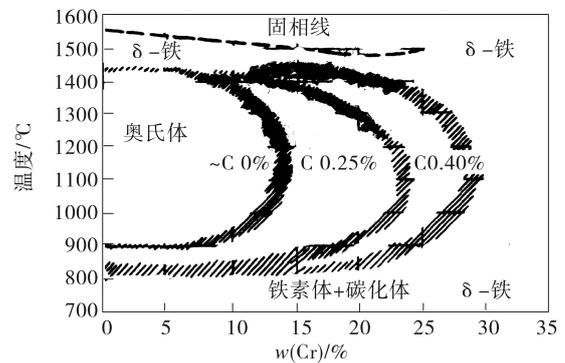


图 1 Fe-Cr 系合金不同含碳量下的状态

Fig.1 State of different carbon contents in Fe-Cr alloy series

## 1.2 奥氏体耐热钢化学成分对力学性能的影响

奥氏体耐热钢通常保证力学性能要求的指标,包括耐蚀性、抗氧化性、热强度、时效硬化、塑性及冲击韧性等。奥氏体耐热钢加入的元素通常有 Cr, Ni, Ti, V, Nb, Mo, W, Al, Cu, Mn, N, Si。合金元素对力学性能的影响见表 1。

## 2 奥氏体耐热钢的主要焊接缺陷、机理及防止措施

奥氏体耐热钢最常见的焊接缺陷有热裂纹、碳化铬可能引起的腐蚀及铁素体含量高时可能出现的  $\sigma$  相脆化。

### 2.1 奥氏体型耐热钢的焊接热裂纹缺陷

#### 2.1.1 热裂纹产生的原因

1) Ni 的含量太高(8%~25%),容易生成低熔点共晶,例如 Ni-S(共晶熔点为 645 °C), Ni-P(共晶熔点为 880 °C),危害极大。要严格控制 S, P 的含量,同时 Nb, B, Si, Sn 也是易生成低熔点晶间层的元素。

2) 单相奥氏体焊缝易形成粗大的柱状晶,晶间偏析严重,容易产生晶间裂纹。

3) 奥氏体耐热钢导热率小,线胀系数大,因此产生的残余应力大,焊接变形大。

表1 奥氏体耐热钢化学成分对力学性能的影响  
Table 1 The influence of chemical contents of Austenitic heat-resisting steel on mechanical performances

	Cr	Ni	Ti	V	Nb	Mo	W	Al	Cu	Mn	Si
耐腐蚀性	强烈	强烈			中等				中等		中等
热强度	中等	中等	中等	微弱	强烈	强烈	强烈			中等	
时效			中等					强烈	中等		中等
抗氧化	强烈	中等	中等	降低				强烈			强烈
塑性			强烈	中等	中等	微弱	微弱	中等			
韧性			强烈	中等	中等	降低	降低				

### 2.1.2 消除热裂的办法

1) 严控 S, P 有害元素, 尽量减少 B, Sn, Nb 等元素的含量。

2) 适当提高  $\delta$  相铁素体的含量(最好控制在 6% 左右), 其机理如下:  $\delta$  相是体心立方晶格,  $\delta$  铁素体在高温下能与 S, P 相溶, 减少 S, P 与 Ni 的作用, 降低热裂的可能性;  $\delta$  相析出细化了粗大的奥氏体晶粒, 减少了热裂;  $\delta$  相析出截断了粗大的奥氏体柱状晶, 破坏了奥氏体连续晶间低熔点薄膜; 使 Cr/Ni=2.3~3.2, 可提高  $\delta$  相铁素体含量, 防止热裂的出现。

如果工件是处于高温下工作的奥氏体耐热钢, 要控制铁素体, 使  $W(F) \leq 5\%$ 。因为铁素体含量增加, 耐热钢的热强度降低, 韧性降低。如果 Ni, Cr 的含量均高于 20% 的耐热钢, 焊条的  $W(Mn)=6\% \sim 8\%$ , 以保证焊缝获得抗裂性高的纯奥氏体组织。

## 2.2 奥氏体型耐热钢接头的晶间腐蚀

晶间腐蚀发生的区域包括: 焊缝、熔合区、HAZ 区(温度区间为 600~1000 °C)。

### 2.2.1 奥氏体型耐热钢晶间腐蚀的原因

焊缝区晶间腐蚀主要是因为 C 扩散很快, Cr 扩散很慢, 在焊缝晶界出现“贫 Cr 层”。

HAZ 区(600~1000 °C), 称为敏化区, 冷却时碳从奥氏体内析出, 与晶界的 Cr 结合, 生成了 Cr<sub>23</sub>C<sub>6</sub> 碳化物, 使晶界 Cr 的含量减少。而奥氏体晶内的 Cr 扩散远比 C 要慢, 在来不及到达晶界时, 晶界变成“贫 Cr 层”。贫 Cr 层的电位低于晶粒内部的电位, 贫 Cr 层的低电位变成阳极, 形成了电化学腐蚀。

### 2.2.2 奥氏体型耐热钢晶间腐蚀防止措施

1) 加入钛、钽、铌和钼稳定化元素, 使 Ti/C  $\geq 7.8$ , Ti 与 C 的结合力大于 Cr, 能够从中把 Cr 置换出来, 减少“贫 Cr 层”产生的可能性。

2) 保证  $\delta$  相铁素体  $\geq 3\% \sim 12\%$ , 使组织变为奥

氏体+铁素体双相组织, 减小晶间腐蚀、应力腐蚀及热裂纹。

3) 降低 C 的含量, 使  $C \leq 0.03\%$ , 从而减少碳化物 Cr<sub>23</sub>C<sub>6</sub> 的生成。

4) 对焊缝进行固溶处理或稳定化处理, 可以防止和消除晶间腐蚀。

## 2.3 奥氏体耐热钢 $\sigma$ 相脆化

$\sigma$  相是铬原子与铁原子形成的金属间化合物 Cr<sub>m</sub>Fe<sub>n</sub>, Cr<sub>m</sub>Fe<sub>n</sub> 硬度大, 脆性大。

### 2.3.1 脆化温度区间

脆化温度在 650~850 °C 区间,  $\sigma$  相主要从铁素体中析出。奥氏体也能析出  $\sigma$  相。如果奥氏体进行加工变形, 则加快  $\sigma$  相的析出。从工艺上, 减小热输入, 加快冷速, 可以减少铁素体的含量, 减少析出  $\sigma$  相。焊后热处理避免在 650~850 °C 区间进行或者长时间停留。要快速通过该区, 防止  $\sigma$  相的析出导致脆化。

### 2.3.2 $\sigma$ 相脆性的防止办法

控制奥氏体耐热钢焊缝中  $\sigma$  相脆性产生的措施:

- ① 严控 Mo, Nb, Si 等促进、加速铁素体生成的元素, 凡是促进 F 体生成的元素, 都能加快  $\sigma$  相的析出;
- ② 提高奥氏体生成元素的含量, 即减少 Cr 含量, 提高 Ni 的含量;
- ③ 采用小的热输入, 焊后避免在 650~850 °C 区间作热处理或长时间停留。前边两项用化学成分的手段来控制铁素体的含量, 从而达到控制  $\sigma$  相的目的。

### 2.3.3 铁素体与奥氏体析出 $\sigma$ 相的机理

铁素体析出  $\sigma$  相的机理。铁素体容易富 Cr, Cr 在铁素体中溶解度小, 铁素体生成后, 大量 Cr 析出并且扩散速度很快, 晶界容易富 Cr 并且与铁结合生成金属间化合物 Cr<sub>m</sub>Fe<sub>n</sub> 相。

奥氏体析出  $\sigma$  相的机理。随着温度的升高, 碳化物溶解到固溶体里, C 比 Cr 扩散快得多, 于是晶

界出现“富Cr区”，Cr与Fe开始作用，生成不稳定间隙化合物 $Cr_mFe_n$ ，即 $\sigma$ 相。

### 3 奥氏体耐热钢中铁素体含量的控制

铁素体含量的控制是奥氏体耐热钢焊接的技术核心。奥氏体耐热钢从液态结晶开始，首先析出的可能是 $\delta$ 铁素体，也可能是奥氏体，主要根据合金元素含量的种类不同而不同。如果铁素体形成元素较多，这些元素的富集并扩散较慢，导致 $\delta$ 铁素体在冷却过程中不发生向 $\gamma$ 相转变，并一直保持到常温。这样，奥氏体耐热钢含有一定量的 $\delta$ 铁素体，有利于防止热裂；但容易产生 $\sigma$ 相脆性，热强性能下降。通过德龙焊缝组织图，选出铁素体含量的最佳值，一般铁素体为5%（图2中的椭圆形区为铁素体最佳含量）。通过德龙焊缝组织图，只是从化学成分上控制了奥氏体耐热钢中的铁素体的含量。此外，铁素体的含量还与稀释率和冷却速度有关。冷速越大，铁素体越少。铁素体含量减少，则高温强度增强，低温韧性好。对高温性能要求高的接头，增加奥氏体形成元素，从液体中首先析出的是奥氏体，结果焊缝为完全奥氏体组织。完全奥氏体耐热钢组织比较稳定，一直保持到常温。这种耐热钢热强度高，韧性好。

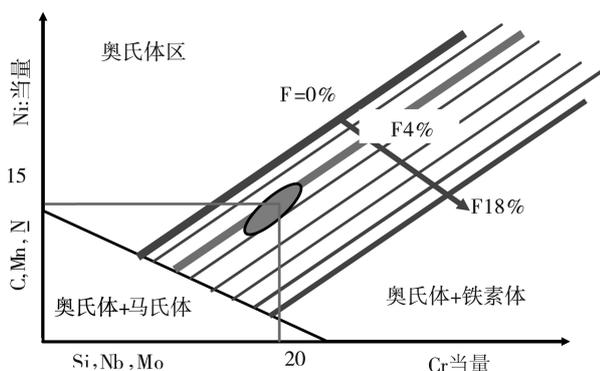


图2 德龙焊缝组织

Fig.2 Microstructure of De-Long weld joint

## 4 奥氏体耐热钢焊接工艺要点

### 4.1 奥氏体耐热钢焊接工艺重点

奥氏体耐热钢要以防止热裂为重点，执行焊缝与母材热强度和化学成分相匹配的原则，同时要认真落实以下注意事项：保护好溶池，使与氧亲和的元素尽量不被氧化减少；处于高温下工作的奥氏体耐热钢焊缝，控制铁素体含量，使 $W(F)\leq 5\%$ ；如果

Ni, Cr的含量均高于20%的耐热钢，焊条的 $W(Mn)=6\% \sim 8\%$ ，以保证焊缝获得抗裂性高的纯奥氏体组织（Mn扩大A体区）。

### 4.2 焊条电弧焊工艺要点（采用窄焊道技术）

奥氏体耐热钢适于很多种焊接方法，但是应用最广的还是焊条电弧焊。企业在多年的生产实践中，总结出了一整套奥氏体耐热钢焊条电弧焊工艺守则和口诀，例如奥氏体耐热钢调整焊接参数的“24字口诀”：低预热、低热输、小电流、窄焊道、多层焊、多道焊、不摆动、快速焊。

奥氏体耐热钢焊接时要做到6点：焊道表面一尘不染；坡口两侧圆角过渡；层间厚度小于3mm；焊道宽度小于4根焊芯直径；坡口角度 $50^\circ$ 较好；最好使用钛钙焊条。

### 4.3 奥氏体耐热钢的热处理（壁厚大于20mm）

奥氏体耐热钢热处理的主要目的是消除应力，提高蠕变强度，消除变形加工中析出的 $\sigma$ 相。具体热处理工艺措施分为3种类型：低温处理（ $500^\circ\text{C}$ 以下），目的是消除残余应力集中。中温处理（ $500\sim 800^\circ\text{C}$ ），目的是消除残余应力，提高蠕变强度，适于低碳、铁素体少的奥氏体耐热钢，因为在 $600\sim 850^\circ\text{C}$ 间有 $\sigma$ 相析出，一般不采用中温处理；高温热处理，超低碳镍铬奥氏体合金钢加热到 $800\sim 850^\circ\text{C}$ ，蠕变强度和塑性提高。

## 5 结语

奥氏体耐热钢与中低合金耐热钢相比，焊接性能较差：在焊接缺陷方面，奥氏体耐热钢比较复杂，各种元素相互影响较大；在焊缝成分和组织的控制方面，利用德龙图进行元素当量计算，技术要求严格；在手工电弧焊焊接参数的选择方面，要防止焊接过热引起的焊缝各种力学性能下降，从而要求焊工的实际操作水平较高。在元素的作用以及焊接缺陷形成的机理方面，目前仍然存在不同观点。总之，奥氏体耐热钢作为一种难度较大的焊接材料之一，具有研究的普遍价值和意义。

### 参考文献：

[1] 王运炎. 金属学及热处理[M]. 北京：机械工业出版社，

1984.  
WANG Yun-yan. Metallurgy and Heat-treatment[M]. Beijing: Mechanical Industry Press, 1984.
- [2] 陆文华. 铸铁及其熔炼[M]. 北京: 机械工业出版社, 1981.  
LU Wen-hua. Casting iron and smelting[M]. Beijing: Mechanical Industry Press, 1981.
- [3] 张连生. 金属材料焊接[M]. 北京: 机械工业出版社, 2004.  
ZHANG Lian-sheng. Welding of Metal Materials[M]. Beijing: Mechanical Industry Press, 2004.
- [4] 唐逸民. 金属基复合材料焊接的研究进展问题及对策[J]. 焊接研究与生产, 1998(1): 5—12.  
TANG Yi-min. Study and Countermeasure of Metal-base Composite Materials Welding[J]. Welding Study and Production, 1998(1): 5—12.
- [5] 邓开豪. 弧焊电源[M]. 北京: 化学工业出版社, 2008.  
DENG Kai-hao. Arc Welding Power Source[M]. Beijing: Chemical Industry Press, 2008.
- [6] 商福志. HT150 低强度灰铸铁同质冷焊工艺初探[J]. 林业机械与木工设备, 2010, 38(10): 55—57.  
SHANG Fu-zhi. First Study of Cold-Welding Technology For Ht150 Lower Strength Casting Forestry Machinery and Woodworking Equipment, 2010, 38(10): 55—57.
- [7] 邓洪军. 焊接结构生产[M]. 第2版. 北京: 机械工业出版社, 2009.  
DENG Hong-jun. Production of Welding Structure[M]. Beijing: Mechanical Industry Press, 2009.
- [8] 徐国建. 16MnDR+1Cr18Ni9 钢埋弧焊接头组织的研究[J]. 焊接, 1997(9): 9-11.  
XU Guo-jian. 16DR+1Cr18Ni9 Steel Study of Submerged Arc Welding Joint Structure[J]. Welding, 1997(9): 9—11.
- [9] 商福志. Cr18 双相不锈钢焊接性能分析与工艺探讨[J]. 林业机械与木工设备, 2011, 39(4): 49—52.  
SHANG Fu-zhi. Weld Ability Analysis and Technology Probe about Cr18-type Double Phase Stainless Steel (Austenite+Ferrite)[J]. Forestry Machinery and Woodworking Equipment, 2011, 39(4): 49—52.
- [10] 马文姝. 金属熔焊原理[M]. 哈尔滨: 哈尔滨工程大学出版社, 2007.  
MA Wen-shu. Principal of Metal-smelting[M]. Harbin: Harbin Engineering Institute Press, 2007.
- [11] 中国焊接学会. 焊接手册[K]. 北京: 机械工业出版社, 2001.  
Chinese Welding Society. Welding Handbook[K]. Beijing: Mechanical Industry Press, 2001.
- [12] GB/T 3375—1994, 焊接名词术语[S].  
GB/T 3375—1994, Welding Nouns and Term[S].
- [13] American Welding Society. Welding Handbook[K]. 9th edition. Miami, 1996.
- [14] KRIVOV G A, CHAYNN. Optimization of Design-Production Solution for Welded Joints in Aircraft Engines[J]. Welding Research Abroad, 1995, 41(6/7): 23—30