

奥氏体不锈钢中铁素体测量及应用

林天委

镇海石化建安工程股份有限公司

DOI: 10.12238/ems.v6i11.10001

[摘 要] 本文详细介绍了奥氏体不锈钢中铁素体的作用和测量方法,分析了奥氏体不锈钢中铁素体形成机理,重点阐述了采用组织图和合金元素铬、镍当量法、金相法及仪器测量法控制奥氏体不锈钢焊缝中铁素体含量。

[关键词] δ 铁素体、奥氏体不锈钢、作用、形成机理、含量控制

Measurement and Application of Ferrite in Austenitic Stainless Steel

Lin Tianwei

Zhenhai Petrochemical Construction Engineering Co., Ltd

[Abstract] This article provides a detailed introduction to the role and measurement methods of ferrite in austenitic stainless steel, analyzes the formation mechanism of ferrite in austenitic stainless steel, and focuses on the use of microstructure diagrams, alloy element chromium and nickel equivalent methods, metallographic methods, and instrument measurement methods to control the ferrite content in austenitic stainless steel welds.

[Keywords] delta ferrite, austenitic stainless steel, action, formation mechanism, content control

1 概述

奥氏体不锈钢具有较好的耐蚀性、耐热性、耐低温性及良好的成形性和优异的可焊接性,石化行业很多设备主体材料几乎全部采用奥氏体不锈钢,而一般行业对奥氏体不锈钢的认识水平,还仅涉及其化学成分和力学性能方面。随着科技进步,在、石化、核电站、核反应堆工程用不锈钢、国防军工用特种不锈钢以及大型化工装置中“SHA 级”管道重要配件,都相继对奥氏体不锈钢焊接母材和焊缝中的铁素体含量进行了规定。因此,必须充分掌握奥氏体不锈钢中铁素体的作用及机理。

2 奥氏体不锈钢中铁素体的作用

分析奥氏体不锈钢中铁素体的作用是十分重要的,只有充分的了解和掌握铁素体的有利和不利的作用,才能正确的加以利用或控制。奥氏体不锈钢中铁素体的作用,对压力容器和管道来讲,最重要的是对焊接性能的影响,其次是对材料耐腐蚀性能、力学性能和加工性能的影响。

2.1 铁素体含量

不锈钢承压件大部分采用18-8型和18-12型奥氏体不锈钢。不锈钢按晶体结构分为奥氏体、铁素体和马氏体。奥氏体具有面心立方晶体结构,无磁性。铁素体具有体心立方晶体结构,有磁性。奥氏体不锈钢并不表明它的组织完全是100%的奥氏体。奥氏体不锈钢中通常都会有一定数量的铁素体。

2.2 焊接性能

奥氏体不锈钢在焊接中的主要问题是焊缝和热影响区的热裂纹以及耐蚀性,这类问题也是奥氏体钢工艺焊接性和使用焊接性的指标。

2.2.1 焊缝裂纹防止及铁素体含量控制要求

奥氏体不锈钢焊缝中常常需要形成一定数量 δ 相铁素体(4%~12%),以防止焊缝产生凝固裂纹(热裂纹)。 δ 铁素体是奥氏体不锈钢(含焊缝金属)在一次结晶过程(凝固过程)中生成并保留至常温的铁素体。由于铁素体含碳量很低,性

能与纯铁相似，有良好的塑性和韧性，低的强度和硬度。铁素体的有利作用是对 S、P、Si 和 Nb 等元素溶解度较大，能防止这些元素的偏析和形成低熔点共晶，从而阻止凝固裂纹产生。焊缝中的铁素体可以有效的阻止低熔点共晶生成和减少偏析程度以及二次晶界的错位运动，因而可防止热影响区裂纹和高温低塑性裂纹。总之，焊接中的 δ 铁素体对防止和降低奥氏体焊缝金属的热裂纹和微裂纹作用是肯定的，它显著的改进了焊接性，提高了焊接结构的安全程度。 δ 铁素体在焊缝中具有一定的负作用。对于焊后需要 600℃ 以上热处理的焊件或长期在 600~850℃ 温度下工作的焊件，由于在上述高温下 δ 相铁素体会析出 σ 相， σ 相具有四方结晶构造，且富含 Cr 造成周围 Cr 的贫化，引起焊缝金属的脆化。此时应将焊缝铁素体的含量控制在 3%~8%，或者采用重新固溶处理，将 σ 相铁素体溶解回基体中。

2.2.2 改善焊接接头的耐蚀性

奥氏体钢的焊接结构常常因为腐蚀而损坏甚至报废，最常见的腐蚀类型是晶间腐蚀和应力腐蚀。由于铁素体是以分散并均布成小坑状存在于奥氏体晶粒之间，削弱奥氏体柱状晶和树枝晶的方向性，隔断奥氏体晶界连续网状碳化铬析出，从而防止晶间腐蚀，因此铁素体对提高耐晶间腐蚀的作用有好处。通过试验证明，由于铁素体对应力腐蚀开裂不敏感，因此含有一定量铁素体的奥氏体钢焊缝的耐应力腐蚀性能优于同牌号只含微量铁素体的奥氏体钢焊缝。奥-铁双相不锈钢是最好的例证，因此很多在晶间腐蚀、应力腐蚀强介质环境下服役的材料一般要选用奥-铁双相不锈钢。

2.3 耐腐蚀性能比较

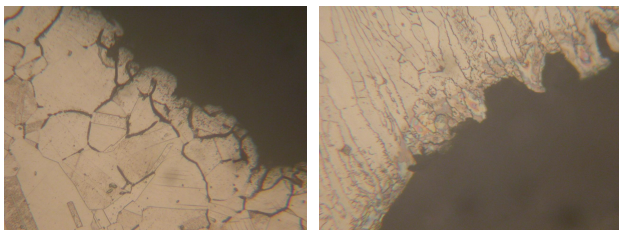


图2 纯奥氏体晶间腐蚀组织形貌 图3 奥-铁双相不锈钢腐蚀形貌

焊接材料（母材和焊材）中的 δ 相铁素体能显著改善焊缝及热影响区抗晶间腐蚀和应力腐蚀。奥氏体不锈钢铸件和锻件或冷拔母材中少量的铁素体（5%~12%），总体上讲有利于改善材料的抗晶间腐蚀和耐应力腐蚀性能。图-1 是纯奥氏体不锈钢出现严重晶间腐蚀的组织图；图-2 是与图 1 在同地方使用，更换成双相不锈钢使用多年后组织图，材料表面受到一些常规腐蚀，但并未引起一点晶间腐蚀。从两组织图可以说明奥氏体中铁素体对抵抗晶间腐蚀的作用还是相当明显

的。如果在奥氏体基础上另一方，对于某些特殊的腐蚀环境，例如在尿素和醋酸等介质中铁素体会发生选择性腐蚀，应对铁素体含量进行限制。

2.4 力学性能和加工性能

奥氏体不锈钢中的铁素体对材料的力学性能有显著影响。铁素体含量增加时强度增加，但延展性和冲击强度减低。利用此特性，可采用调控铁素体的含量来达到所需要的材料力学性能和加工性能。

铁素体含量过高会损害奥氏体不锈钢的可锻性，特别是用于大锻造比的锻件，铸坯限制铁素体的含量是合理而必要的（通常限制在 3%~8%）。

3 铁素体形成机理

所有不同种类的不锈钢都是铬含量在 12% 以上的铁基合金。铁基合金在高温下（大于 800℃）基本晶体结构为面心立方体-奥氏体。当温度下降到常温时，晶体结构变成体心立方体-铁素体（或马氏体）。如果在铁铬合金中加入 7% 以上 Ni 或增加 C、N 或 Mn 等一种或多种奥氏体形成元素，高温下的奥氏体晶体在常温下将处于稳定状态，即常温下的奥氏体。如果加入的奥氏体形成元素的总量（镍当量）不够多，则常温下只能有一部分是奥氏体，另一部分则是铁素体。由此得出，不锈钢的组织结构是由合金元素含量决定的。对于奥氏体不锈钢，合金元素的作用可分成两大类，即铁素体形成元素（称为铬当量元素）和奥氏体形成元素（称为镍当量元素）。两大类元素之间的平衡关系决定了奥氏体中铁素体含量的多少。奥氏体形成元素主要有 Ni、Mn、C 和 N，铁素体形成元素主要有影响 Cr、Mo、Si、Nb 和 Ti。在这条线以下铁素体和马氏体都具有稳定的晶体结构。

4 铁素体含量测量方法

奥氏体不锈钢中 δ 相铁素体含量的测量共有 3 种方法，磁性仪测量法、金相检验法和计算法。

4.1 磁性仪测量法

利用铁素体的磁性特性，奥氏体钢中 δ 相铁素体含量与钢的铁磁性成正比，采用专用的磁性测量仪可直接测量读出铁素体含量。而对于锻轧等变形状态奥氏体不锈钢，例如其锻件、棒材、板材、焊条或焊丝等材料，由于 δ 相铁素体已严重错位，铁磁特性已改变测量值并不是真实值。测量应读取 6 个不同位置的读数，取其平均值。应注意的是国外磁性仪通常是按美国 WRC（焊接研究学会）采用的“铁素体含量级别序数”（FN）校正，得出的铁素体值为铁素体数（FN），与铁素体含量百分比数略有不同。

4.2 金相检验法

利用 δ 相铁素体在奥氏体钢中是以不连续小坑型均匀分布或晶界小块状分布的特点, 在金相显微镜下观测 δ 相铁素体在奥氏体中分布情况和所占面积比例, 并与相关国家或专业标准中的标准金相图比较, 并可检验出 δ 相铁素体含量。

4.3 计算法

铁素体含量算法按照 Cr 和 Ni 当量计算公式, 分别计算出合金元素的铬当量和镍当量值。铬和镍当量值相交坐标值便是铁素体含量值。采用计算法比用磁性仪测量法和金相检验法方便得多, 而且不受仪器设备限制。依据何种组织图评定和相应的铬和镍当量的计算公式, 是采用计算法应掌握的关键。

4.3.1 谢夫尔图

谢夫尔 (Schaeffler) 图适用于所有奥氏体、铁素体或马氏体以及双相和沉淀硬化类不锈钢的铸件、锻件或变形件, 也适用于常规的不锈钢焊后自然状态的焊缝组织评定。谢夫尔图是最早也是应用最广的不锈钢组织图, 谢夫尔图的铬和镍当量计算公式为: 铬当量 = $\%Cr + \%Mo + (1.5 \times \%Si) + (0.5 \times \%Nb)$ 镍当量 = $\%Ni + (30 \times \%C) + (0.5 \times \%Mn)$ 。

从计算公式中可以看出, 谢夫尔图没有考虑奥氏体形成元素 N 作用, 因此估算铁素体含量的精确度为 $\pm 4\%$, 但它广泛作为阀门主体材料 (铸锻件) 铁素体含量的评定图。

4.3.2 德龙图

德龙 (DeLong) 图是在谢夫尔图的基础上改进的, 此图加入了奥氏体形成元素 N 的作用, 更适合于含氮和控氮不锈钢以及气体保护焊的焊接组织评定。德龙图的铬和镍当量计算公式为: 铬当量 = $\%Cr + \%Mo + (1.5 \times \%Si) + (0.5 \times \%Nb)$; 镍当量 = $\%Ni + (30 \times \%C) + (30 \times \%N) + (0.5 \times \%Mn)$ 德龙图进一步改进了曲线精确度, 考虑了 N 的作用, 估算铁素体含量的精确度为 $\pm 2\%$, 采用规定的德龙图, 主要用于焊接材料的 δ 铁素体含量计算。ASME 提供的德龙图不仅给出了 δ 铁素体含量的百分比, 同时还给出了“铁素体含量级别序数” (FN), 简称为“铁素体序数” (FN)。在运用德龙图时, 应注意镍当量中 N 元素的影响。在 ASME 中关于 N 含量有明确的规定, 最好采用实测的含氮量。如果没有实测值时, 可采用下列推荐的含氮量。① 熔化气体保护焊 (GMAW) 的焊缝为 0.08%, 自保护管状焊条熔化极气体保护焊为 0.12%。② 其他方法的焊缝为 0.01%。

4.3.3 WRC-1992 图

不锈钢的组织图还有 WRC (1992) 图 (图 3), 该图已把铁素体序数 (FN) 扩大到 100FN, 主要适用于双相不锈钢 (铁素体与奥氏体各占 50% 左右)。被认为适合于判断 300 系列

奥氏体及双相不锈钢焊缝组织中的铁素体含量。Schaeffler、DeLong、WRC 图是历年来根据焊缝金属的奥氏体形成元素 C、N、Mn、Ni, 以及铁素体形成元素 Cr、Mo、Si、Nb 等对形成铁素体的作用, 计算镍、铬当量, 绘制相应的组织图, 这些图是在不同时期考虑了不同影响绘制的, 各有其同化学元素的特点, 使用时应加以注意。

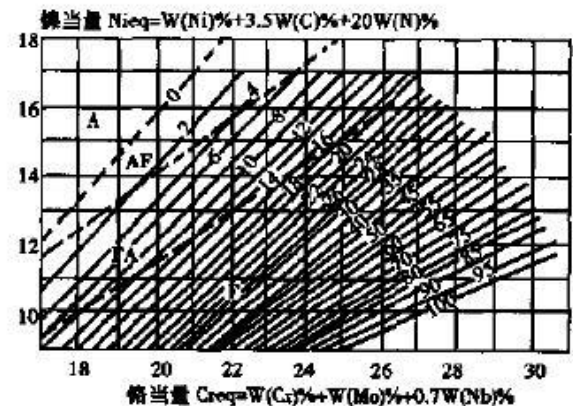


图3 WRC-1992 图

5 结语

奥氏体不锈钢中通常都含有一定数量的铁素体。铁素体的作用具有双重性, 奥氏体不锈钢焊缝中一定数量的铁素体 (5%~15%) 对防止焊接热裂纹, 提高焊缝抗晶间腐蚀和应力腐蚀能力都有十分重要的作用, 同时铸件中一定数量的铁素体含量 (5%~20%) 对防止铸造热裂纹, 提高铸件力学性能也都是有利的。在一些特定的环境, 如高温、超低温以及选择腐蚀环境, 应控制其不利作用。为此, 研究奥氏体不锈钢中铁素体的作用, 掌握铁素体的调控原理、测量和计算方法, 对研制和开发新型不锈钢设备, 特别是设计制造高等级石化设备, 有十分重要的意义。

[参考文献]

- [1]陈德和编著, 不锈钢的性能与组织. 北京, 机械工业出版社, 1977
- [2]王富岗等编著, 不锈钢的组织研究, 北京, 机械工业出版社, 1980
- [3]美)利波尔德, (美)科特基著, 陈剑虹译, 不锈钢焊接冶金学及其焊接性. 北京, 机械工业出版社, 1985,
- [4] (美) 皮克纳 (Peckner, D.), (美) 伯恩斯坦 (Bernstein, I.M.) 主编; 顾守仁等译, 不锈钢手册. — 北京: 机械工业出版社, 1987
- [5]钢铁材料的断裂研究和失效分析会议论文集 / 西德陈尔安兹技术中心编; 李家宝译. — 北京: 机械工业出版社, 1983