

控制不锈钢铸件中铁素体含量的方法

江苏万恒铸业集团 (滨海 224500) 陈德苏 刘 军 李 林

耐蚀不锈钢机械配件类、泵阀类、管道连接类、支承类铸件, 主要材质为铬镍不锈钢。根据化学成分的不同, 大致分为 Cr-Ni 系, Cr-Ni-Mo、Cr-Ni-Cu、Cr-Ni-Mo-Cu 系, Cr-Mn-N 系, Cr-Ni-Mn-N 系四个组别, 其金相组织视其 Cr、Ni 含量而定, 可以是奥氏体-铁素体复相钢、双相钢或是单相奥氏体钢。

当金相组织中铁素体含量 (体积分数) $\leq 5\%$ 时, 定义为单相奥氏体不锈钢。当金相组织中铁素体含量为 $5\% \sim 35\%$ 时, 定义为奥氏体-铁素体复相不锈钢 (在奥氏体基体中存在铁素体)。当金相组织中铁素体含量为 $35\% \sim 55\%$ 时, 定义为奥氏体-铁素体双相不锈钢 (奥氏体、铁素体约各占一半)。

在特定工况下, 使用的铬镍不锈钢对铁素体含量有规定要求。由于测定铁素体含量的多种方法误差较大, 很难准确测得铁素体体积含量。在熔炼时, 怎样合理配制炉料, 既要保证化学成分、力学性能, 又要实现铁素体含量达到理想值, 同时要兼顾制造成本, 这为熔炼奥氏体-铁素体不锈钢铸造工艺提出了新课题。

一、试验条件

(1) 熔炼设备 中频感应电炉 + AOD 氩氧脱碳炉, 形成精炼系统。

(2) 热处理设备 罩式全纤维电阻炉, 炉温均衡性达标。

(3) 试验设备 WE-300 型拉力试验机, JB-300B 冲击试验机。

(4) 检测仪器 SPECTRD 型光谱仪, 金相显微镜, DIVERSE MF300F 型铁素体含量检测仪。

二、验证炉料配方

铬镍不锈钢化学成分中铬含量通常高于镍含量, 奥氏体-铁素体体积含量主要取决于 Cr、Ni 两个主要

元素的含量。对于材料标准中有氮含量要求的铬镍不锈钢, 氮含量有较大的影响, 实际上其他元素含量少, 影响不大。调整铬当量与镍当量, 主要通过控制投入炉中合金的 Cr、Ni 元素含量, 稳定其他次要影响元素的含量, 就可以使铬镍不锈钢中铁素体含量控制在理想范围内。

1. Cr-Ni 系列不锈钢

针对 Cr-Ni 系列不锈钢可选用 Hull 等效因子计算得到材料铁素体含量的方法, 适用于熔炼通用奥氏体-铁素体复相不锈钢。

(1) 主要技术要求 ①选用材料为: ASME SA351M 2010 CF3。②标准规定化学成分: $w_C \leq 0.03\%$ 、 $w_{Si} \leq 2.00\%$ 、 $w_{Mn} \leq 1.50\%$ 、 $w_S \leq 0.04\%$ 、 $w_P \leq 0.04\%$ 、 $w_{Cr} = 17\% \sim 21\%$ 、 $w_{Ni} = 8\% \sim 12\%$ 、 $w_{Mo} \leq 0.5\%$, 其他为残留元素。③标准规定力学性能: 抗拉强度 $\sigma_b \geq 485\text{MPa}$, 屈服强度 $\sigma_s \geq 205\text{MPa}$, 伸长率 $\delta \geq 35\%$ 。④用户采购技术规范要求铁素体含量为 $5\% \sim 20\%$ 。

(2) 熔炼方式 ①炉料化学成分内控标准为: $w_C \leq 0.028\%$ 、 $w_{Si} \leq 1.20\%$ 、 $w_{Mn} \leq 1.40\%$ 、 $w_S \leq 0.030\%$ 、 $w_P \leq 0.030\%$ 、 $w_{Cr} = 18.5\% \sim 19\%$ 、 $w_{Ni} = 8.5\% \sim 9\%$ 、 $w_{Mo} \leq 0.1\%$ 。②中频感应电炉粗炼钢液转入 AOD 氩氧脱碳炉精炼。用 SPECTRD 型光谱仪检测控制钢液化学成分, 主要控制 Cr、Ni 含量符合内控标准。

(3) 热处理方式 采用固溶热处理, $(1080 \pm 10)^\circ\text{C}$ 保温入水, 水温 $\leq 40^\circ\text{C}$, 快冷, 冷却时间 $\geq 0.5\text{h}$ 。

(4) 成品理化检测结果 化学成分为: $w_C = 0.028\%$ 、 $w_{Si} = 1.10\%$ 、 $w_{Mn} = 1.31\%$ 、 $w_S = 0.030\%$ 、 $w_P = 0.030\%$ 、 $w_{Cr} = 18.65\%$ 、 $w_{Ni} = 8.55\%$ 、 $w_{Mo} = 0.07\%$ 。

选用 Hull 等效因子计算方法, 根据成品铸件化学成分, 按照下列公式进行计算得到材料的铁素体含量。

$$\text{CrE} = \text{Cr} + 1.21\text{Mo} + 0.48\text{Si} - 4.99$$

$$\text{NiE} = \text{Ni} + 0.11\text{Mn} - 0.0086 \text{ Mn}^2 + 18.4\text{N} + 24.5\text{C} + 2.77$$

$$\text{F} = 100.3 (\text{CrE} / \text{NiE})^2 - 170.72 (\text{CrE} / \text{NiE}) + 74.22$$

经计算, 铁素体含量是 12%, 正好在铁素体含量要求 5% ~ 20% 之间。用 DIVERSE MF300F 型铁素体含量检测仪对该配方铸件试样进行检测, 铁素体含量是 13.5%, 两者相差不大, 均符合要求。力学性能为: 抗拉强度 $\sigma_b = 591\text{MPa}$, 屈服强度 $\sigma_s = 328\text{MPa}$, 伸长率 $\delta = 47\%$ 。试样金相组织中奥氏体与铁素体的分布如图 1 所示。

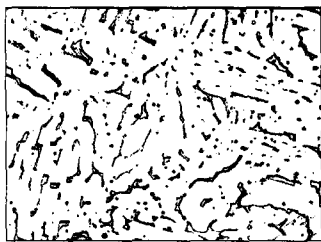


图 1

采用上述内控标准炉料配方进行熔炼, 热处理后的成品铸件, 经理化性能检测验证均符合 ASME SA351M 2010 CF3 标准及客户采购技术规范要求。

2. Cr-Ni-Mo-N 系列不锈钢

针对 Cr-Ni-Mo-N 系列不锈钢可选用 ASTM A800/800M 2006 奥氏体合金铸钢件中铁素体含量的估算曲线, 适用于奥氏体-铁素体复相不锈钢, 特别是含氮奥氏体-铁素体双相不锈钢熔炼时铁素体含量的控制方法。

(1) 主要技术要求 ①选用材料为: ASME SA-351M 2010 CD3MWCuN。②化学成分: $w_C \leq 0.03\%$ 、 $w_{Si} \leq 1.00\%$ 、 $w_{Mn} \leq 1.10\%$ 、 $w_S \leq 0.025\%$ 、 $w_P \leq 0.03\%$ 、 $w_{Cr} = 24\% \sim 26\%$ 、 $w_{Ni} = 6.5\% \sim 8.5\%$ 、 $w_{Mo} = 3\% \sim 4\%$ 、 $w_N = 0.2\% \sim 0.3\%$ 、 $w_{Cu} = 0.5\% \sim 1\%$ 、 $w_W = 0.5\% \sim 1\%$, 其他为残留元素。③力学性能: 抗拉强度 $\sigma_b \geq 700\text{MPa}$, 屈服强度 $\sigma_s \geq 450\text{MPa}$, 伸长率 $\delta \geq 25\%$ 。④用户技术规范要求铁素体含量为 35% ~ 55%

(2) 熔炼方式 ①炉料化学成分内控标准为:

$w_C \leq 0.28\%$ 、 $w_{Si} \leq 0.80\%$ 、 $w_{Mn} \leq 0.80\%$ 、 $w_S \leq 0.020\%$ 、 $w_P \leq 0.025\%$ 、 $w_{Cr} = 24.5\% \sim 25\%$ 、 $w_{Ni} = 6.5\% \sim 7\%$ 、 $w_{Mo} = 3.2\%$ 、 $w_N = 0.25\% \sim 0.3\%$ 、 $w_{Cu} = 0.6\% \sim 0.8\%$ 、 $w_W = 0.5\% \sim 0.6\%$ 。②中频感应电炉粗炼钢液转入 AOD 氩氧脱碳炉精炼。用 SPECTR-D 型光谱仪检测控制钢液化学成分, 主要控制 Cr、Ni、N 的含量符合内控标准。

(3) 热处理方式 采用固溶热处理, $(1100 \pm 10)^\circ\text{C}$ 保温入水, 水温 $\leq 40^\circ\text{C}$, 快冷, 冷却时间 $\geq 15\text{min}$ 。

(4) 成品理化检测结果 化学成分为: $w_C = 0.28\%$ 、 $w_{Si} = 0.80\%$ 、 $w_{Mn} = 0.80\%$ 、 $w_S = 0.015\%$ 、 $w_P = 0.020\%$ 、 $w_{Cr} = 24.5\%$ 、 $w_{Ni} = 7\%$ 、 $w_{Mo} = 3.2\%$ 、 $w_N = 0.28\%$ 、 $w_{Cu} = 0.6\%$ 、 $w_W = 0.6\%$ 。

铁素体含量: 用 ASTM 2007 A800/A800M 奥氏体合金铸钢件中铁素体含量的估算曲线, 根据成品铸件化学成分, 按照下列公式进行计算 CrE/NiE 的值。

$$\text{CrE} = \text{Cr} + 1.5\text{Si} + 1.4\text{Mo} + \text{Nb} - 4.99$$

$$\text{NiE} = \text{Ni} + 30\text{C} + 0.5\text{Mn} + 26 (\text{N} - 0.02\%) + 2.77$$

经计算, CrE/NiE 的值为 1.67, 在 ASTM 2007 A800/A800M 奥氏体合金铸钢件中铁素体含量的估算曲线图上找出对应的铁素体含量约为 44.5%, 符合双相不锈钢的要求。用 DIVERSE MF300F 型铁素体含量检测仪对该配方铸件试样进行检测, 铁素体含量是 46.4%, 两者均符合要求。

力学性能为: 抗拉强度 $\sigma_b = 735\text{MPa}$, 屈服强度 $\sigma_s = 469\text{MPa}$, 伸长率 $\delta = 32\%$ 。

试样金相组织奥氏体与铁素体的分布如图 2 所示。



图 2

通过采用上述内控标准炉料化学成分配方进行熔炼, 热处理后的成品铸件, 经理化性能检测均符合 ASTM A351/A351M—2010 标准中 CD3MWCuN 及客户采购技术规范各项要求, 炉料配方制造成本低, 具有一定的科学性。

3. Cr-Ni-Mo-Cu 系不锈钢

针对 Cr-Ni-Mo-Cu 系不锈钢可选用 RCC - M MC1290 铁素体含量测定中的 Schaeffler 方法得到材料的铁素体含量,适用于核岛级奥氏体-铁素体复相不锈钢熔炼时的控制方法。

(1) 主要技术要求 ①选用材料为 RCC - M M3402 2010, 牌号为 Z3CND19 - 10M。②标准规定化学成分: $w_C \leq 0.04\%$ 、 $w_{Si} \leq 1.50\%$ 、 $w_{Mn} \leq 1.50\%$ 、 $w_S \leq 0.015\%$ 、 $w_P \leq 0.030\%$ 、 $w_{Cr} = 18\% \sim 21\%$ 、 $w_{Ni} = 9\% \sim 12\%$ 、 $w_{Mo} = 2.25\% \sim 2.75\%$ 、 $w_{Cu} \leq 1\%$ 。③标准规定铁素体含量为 12% ~ 25% (理想含量为 15% ~ 20%)。④标准规定力学性能: 抗拉强度 $\sigma_b \geq 480\text{MPa}$, 屈服强度 $\sigma_s \geq 210\text{MPa}$, 伸长率 $\delta_5 \geq 35\%$, 冲击吸收能量 $A_{KV} \geq 80\text{J}$ 。

(2) 熔炼方式 ①炉料化学成分内控标准为: $w_C \leq 0.03\%$ 、 $w_{Si} \leq 1.20\%$ 、 $w_{Mn} \leq 1.40\%$ 、 $w_S \leq 0.015\%$ 、 $w_P \leq 0.030\%$ 、 $w_{Cr} = 18.5\%$ 、 $w_{Ni} = 9.5\%$ 、 $w_{Mo} \leq 2.5\%$ 、 $w_{Cu} \leq 0.6\%$ 。②中频感应电炉粗炼钢液转入 AOD 氩氧脱碳炉精炼。用 SPECTRD 型光谱仪; 检测控制钢液化学成分, 主要控制 Cr、Ni 含量符合内控标准。

(3) 热处理方式 采用固溶热处理, $(1080 \pm 10)^\circ\text{C}$ 保温入水, 水温 $\leq 40^\circ\text{C}$, 快冷, 冷却时间 $\geq 0.5\text{h}$ 。

(4) 成品理化检测结果 化学成分为: $w_C = 0.03\%$ 、 $w_{Si} = 1.20\%$ 、 $w_{Mn} = 1.40\%$ 、 $w_S = 0.015\%$ 、 $w_P = 0.030\%$ 、 $w_{Cr} = 18.5\%$ 、 $w_{Ni} = 9.5\%$ 、 $w_{Mo} = 2.5\%$ 、 $w_{Cu} = 0.6\%$ 。根据成品铸件化学成分, 使用 Schaeffler 方法确定铬、镍当量, 计算得到铁素体含量公式为:

$$\text{CrE} = \text{Cr} + \text{Mo} + 1.5\text{Si} + 0.5\text{Nb} = 18.5\% + 2.5\% + 1.5 \times 1.2\% = 22.8\%$$

$$\text{NiE} = \text{Ni} + 30\text{C} + 0.5\text{Mn} = 9.5\% + 30 \times 0.03\% + 0.5 \times 1.4\% = 11.1\%$$

然后, 使用下列两个方程式, 计算出 SCHAEFFLER 的铁素体含量:

$$R = (\text{GE} - 4.75) / (\text{NiE} + 2.64) = (22.8 - 4.75) / (11.1 + 2.64) \approx 1.31$$

$$\begin{aligned} F &= (149.11R^3 - 550.34R^2 + 701.94R - 297.25) R \\ &= (149.11 \times 1.31^3 - 550.34 \times 1.31^2 + 701.94 \times 1.31 - 297.25) \times 1.31 = 17.1\% \end{aligned}$$

铁素体含量为 17.1%, 正好介于理想含量

15% ~ 20% 之间, 因此确定该炉料配方是可行的。需要注意的是, 此算法只对于铁素体含量在 10% ~ 25% 范围内有效。用 DIVERSE MF300F 型铁素体含量检测仪对该配方铸件试样进行检测, 铁素体含量是 17.7%, 两者均符合要求。

力学性能为: 抗拉强度 $\sigma_b = 548\text{MPa}$, 屈服强度 $\sigma_{0.2} = 344\text{MPa}$, 伸长率 $\delta_5 = 48\%$, 冲击吸收能量 $A_{KV} = 163\text{J}$ 。试样金相组织奥氏体与铁素体的分布比例详见图 3。

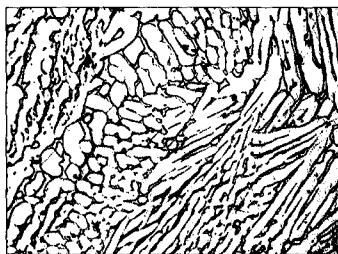


图 3

采用上述内控标准炉料化学成分配方, 进行熔炼、热处理后制造的核岛机械设备 1 级、2 级、3 级奥氏体-铁素体不锈钢铸件, 经理化性能检测均符合 RCC - M M3402 2010 标准中牌号为 Z3CND19 - 10M 的要求, 能有效地控制铁素体含量达到理想的范围, 充分说明该炉料配方能保证核岛级铸件“安全第一、质量第一”的要求。

三、结语

(1) 通过计算方法得到的奥氏体-铁素体不锈钢铸件中的铁素体含量值, 与经先进的铁素体含量检测仪测定的铁素体含量值相比虽然有误差, 但比较接近, 证明相应的计算方法是可行的。

(2) 通过计算方法得到的奥氏体-铁素体不锈钢铸件中的奥氏体、铁素体体积含量比例, 与金相组织中奥氏体和铁素体的分布比例是基本吻合的。

(3) 按奥氏体-铁素体不锈钢铸件铁素体含量规定值, 根据相应的计算方法, 采用合理的炉料配方, 完全可以控制奥氏体-铁素体不锈钢铸件中的铁素体含量, 达到理想值范围。

(4) 在遵循“质量第一”宗旨的同时, 保证化学成分、力学性能的前提下, 贵重金属元素 Cr、Ni、Mo 的加入量接近相应标准的下限, 实现铁素体含量在规定值的中间范围, 以降低生产成本, 可取得较好的效果。MW (20120320)