

超纯奥氏体不锈钢 005Cr25Ni20 冶炼工艺研究

郭淑娟¹ 韩涛²

(1 辽宁石油化工大学职业技术学院, 抚顺 113001; 2 抚顺特钢技术中心, 抚顺 113001)

摘要 005Cr25Ni20 钢(% :24 ~ 26Cr, 19 ~ 22Ni)要求 C、P、S、Si 等杂质元素含量低-(%): ≤0.010C、≤0.010S、≤0.010P、≤0.15Si, 因此采用 3 t 真空感应炉 + 真空自耗重熔炉冶炼工艺。通过采用优质纯铁(% :0.009C、0.035Si、0.001 2S、0.004 5P)、高纯铬铁(% :0.010 ~ 0.021C、0.11 ~ 0.13Si、0.002 5 ~ 0.005 0S、0.001 5 ~ 0.005 0P) 和 Ni 板(Ni ≥ 99%), 真空感应炉熔炼时加 Al、金属 Ca、Ni-Mg 脱氧, 全程计算机控制真空自耗重熔速度, 该钢成品化学成分为(%): 0.005 ~ 0.007C、0.33 ~ 0.34Mn、0.03 ~ 0.04Si、0.001 ~ 0.002S、0.004 ~ 0.005P、24.34 ~ 24.62Cr、21.20 ~ 21.25Ni, 达到技术要求, 钢中氧含量为 $(12 \sim 22) \times 10^{-6}$, 低于电渣重熔钢的氧含量- $(30 \sim 80) \times 10^{-6}$ 。

关键词 超纯奥氏体不锈钢 005Cr25Ni20 真空感应炉 真空自耗重熔炉 冶炼工艺

A Study on Smelting Process of Ultra-pure Austenite Stainless Steel 005Cr25Ni20

Guo Shujuan¹ and Han Tao²

(1 College of Professional Technology, Liaoning University of Petroleum and Chemical Technology, Fushun 113001; 2 Technology Center, Fushun Special Steel Co, Fushun 113001)

Abstract As the requirement for included element C, P, S and Si content in ultra-pure austenite steel 005Cr25Ni20 (% :24 ~ 26Cr, 19 ~ 22Ni) are very low i. e. (%): ≤0.010C, ≤0.010S, ≤0.010P and ≤0.15Si, the steel is smelted by 3 t vacuum induction furnace + vacuum consumption remelting furnace steelmaking process. With using quality pure iron (% :0.009C, 0.035Si, 0.001 2S, 0.004 5P), high pure chromium iron (% :0.010 ~ 0.021C, 0.11 ~ 0.13Si, 0.002 5 ~ 0.005 0S, 0.001 5 ~ 0.005 0P) and Ni-plate (Ni ≥ 99%), adding Al, metal Ca, Ni-Mg for deoxidation during vacuum induction smelting, and whole process computer control vacuum consumption remelting speed, the chemical composition of finished products of steel is (%): 0.005 ~ 0.007C, 0.33 ~ 0.34Mn, 0.03 ~ 0.04Si, 0.001 ~ 0.002S, 0.004 ~ 0.005P, 24.34 ~ 24.62Cr, 21.20 ~ 21.25Ni to meet the technical requirement, and the oxygen content in steel- $(12 \sim 22) \times 10^{-6}$ is lower than that in steel by ESR process- $(30 \sim 80) \times 10^{-6}$.

Material Index Ultra-pure Austenite Stainless Steel 005Cr25Ni20, Vacuum Induction Furnace, Vacuum Consumption Remelting Furnace, Smelting Process

005Cr25Ni20 系超纯奥氏体不锈钢, 钢中 24% ~ 26% Cr、19% ~ 21% Ni, 杂质元素要求极低, C、S、P ≤ 0.005%、Si ≤ 0.10%, 故该钢具有良好的耐腐蚀性^[1], 主要用于核燃料后处理设备耐蚀部件。该材料在钢厂首次生产时出现过化学成分尤其是 C、Si、P 等达不到技术指标的问题, 致使用户使用时出现力学性能不合及耐腐蚀能力下降等问题。此次研究, 采用双真空冶炼工艺路线, 并从原材料准备、各冶炼环节上均采取了一定的工艺措施, 从而保证了高合金比、超纯不锈钢的冶炼成功。

1 试验钢技术要求

005Cr25Ni20 不锈钢冶炼后成分要求达到控制标准, 同时要求钢中杂质元素及气体含量尽量低, 钢锭内部及表面质量优良, 化学成分指标如表 1 所示(其它如气体含量无具体要求)。

2 双真空冶炼工艺研究

由于该材料试制成功经验较少, 各工艺均需要摸索, 为确保各种成分及质量达到理想要求, 特选取双真空冶炼工艺进行实验研究, 工艺路线为真空感应炉冶炼电极棒 Φ250 mm, 真空自耗重熔 Φ305 mm 钢锭。

2.1 冶炼用原材料的准备

2.1.1 精钢材的生产

表 1 005Cr25Ni20 奥氏体不锈钢的化学成分/%

Table 1 Chemical composition of austenite stainless steel 005Cr25Ni20

项目	C	Mn	Si	S	P	Cr	Ni
标准	≤ 0.01	≤ 0.50	≤ 0.15	≤ 0.01	≤ 0.01	24.0 ~ 26.0	19.0 ~ 22.0
内控标准	≤ 0.005	≤ 0.50	≤ 0.10	≤ 0.005	≤ 0.005	24.0 ~ 26.0	20.0 ~ 22.0
以往水平	0.004 ~ 0.010	0.28 ~ 0.40	0.08 ~ 0.13	0.003 2 ~ 0.004 3	0.005 ~ 0.009	24.5 ~ 24.8	20.42 ~ 21.30

005Cr25Ni20 钢冶炼时由于 C、S、P \leq 0.005%，Si \leq 0.10% 要求严格，故应先制备超纯精钢材，以保证原材料 C、S、P、Si 满足配料要求；一般精钢材除 C、S、P 配料满足不了要求外，最主要是 Si \leq 0.10% 很难达到。如果精钢材中含 0.05% Si，带入钢中的 Si 含量为 0.027 5%，同时钢中因含 25% 的 Cr，而金属铬中的 Si 也很难控制太低，所以要想获得较低的 Si 含量，精钢材的 Si 控制至关重要。所以要求精钢材的成分应控制在以下水平（%）： \leq 0.01C、 \leq 0.005S、 \leq 0.005P、 \leq 0.05Si、 \leq 0.05Mn。

精钢材的冶炼，采用 EF + VHD + VOD + (VHD) 工艺冶炼：

(1) 电弧炉容量为 30 t，采用氧化法，目的降低 P、Si 含量，使得电弧炉 P 控制在 0.001% 以下，Mg-Cr 包出钢；

(2) 入 VHD 加热，目的是去 S，使 S \leq 0.001 5%，吊出倒 Mg-Cr 包加热；

(3) 入 VOD 去 C、Si，进行缓吹及二次峰操作，真空脱气 \geq 5 min，保证成分 C、S、P、Si 达到控制要求；

(4) 入 VHD 加热 $T\geq$ 1 650 $^{\circ}$ C，吊出浇注。实际精钢材成分较为理想，具体成分（%）为：0.009C、0.023Mn、0.035Si、0.001 2 S、0.004 5 P、0.02Ni、0.076Cr、0.026Al。

2.1.2 铁合金准备

该钢 Cr 的配入选用高纯金属铬，要求（%） \leq 0.01C、 \leq 0.13Si、 \leq 0.005S、 \leq 0.005P、 \leq 0.05Al，以便满足配料要求。实际铬铁成分（%）为：0.01~0.021C、0.11~0.13Si、0.002 5~0.005S、0.001 5~0.005P、0.005~0.006Al。而 Ni 的配入选用 Ni 板，纯度为 99% 以上，Ni 配料成分为 21%。

2.2 3 t 真空感应炉冶炼工艺

电极棒采用从德国进口的 IS700V11 真空感应炉进行冶炼，炉子最大容量 3 t，最大功率 1 800 kVA，熔化速度 1 500 kg/h，极限真空度 0.1 Pa，冶炼频率 150 Hz，搅拌频率 50 Hz，坩埚直径 760 mm，浇注 Φ 250 mm 电极棒，具体操作要点如下：

2.2.1 熔化期

熔化期任务是使炉料融化并初步达到合金化，同时去除钢液中的气体为高真空精炼做准备。适当采用富氧法去碳^[2]，因配料 C 为 0.009%，利用精钢材表面不打磨带氧去碳，使之生成 CO 气体，同时提高冶炼温度，从而达到去碳的目的。

为防止架桥，并避免瞬时放出大量气体，应采取

分批加料的办法。采用 3 kPa 低压充氩，使在测温、取全熔样时，加料室和熔炼室的真空度相近似，从而简化了加料室的抽空操作程序，也不会影响钢液中气体的去除。炉料全熔后进行测温、取全熔样分析化学成分，为精炼期合金化调整化学成分作依据。

2.2.2 精炼期

在高真空和适当温度下进行精炼，并达到合金化。全熔后，开动全部真空泵进行抽气，并控制好钢液的温度（1 550~1 580 $^{\circ}$ C），在调整化学成分后，以 50 Hz 进行 10~20 min 搅拌，使钢液成分均匀，也易于去除钢液中气体。保证精炼真空度 2~4 Pa 及充足的时间（ \geq 45 min），加强搅拌，每隔 20 min 搅拌 3 min，以利于去气。因超低碳钢脱氧较困难，除去碳过程脱去一部分氧外，其余氧只能靠加入脱氧效果好的 Al、金属 Ca、Ni-Mg 等进行强制脱氧，以保证钢的脱氧效果。

2.3 真空自耗重熔工艺

钢锭重熔采用从德国进口的 L700P7 真空自耗重熔炉，重熔过程如图 1 所示。结晶器为 Φ 305 mm，极限真空度 0.1 Pa，水温 \leq 45 $^{\circ}$ C，漏气率 \leq 1 Pa·L/s，工作电压 22~26 V，电流 6 000~8 000 A，平均熔化速度 200~300 kg/h。全过程采用计算机自动控制熔速，加强电磁搅拌，同时，后期采用阶梯式降速，以起到减少偏析、改善组织的作用。自耗重熔控制合适的熔速，保证熔池成分均匀，确保要求成分及钢锭表面质量优良。

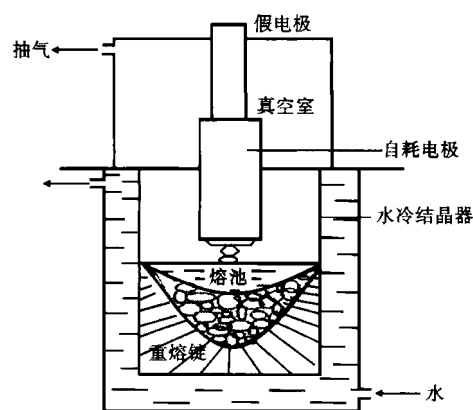


图1 真空自耗重熔示意图

Fig.1 Schematic diagram of vacuum consumption melting

3 实际试验结果及分析

3.1 化学成分

真空感应炉 3 t 坩共冶炼 4 炉，电极棒具体化学成分如表 2 所示，真空自耗重熔后最终化学成分如

表 2 005Cr25Ni20 奥氏体不锈钢电极棒化学成分和氧含量
Table 2 Chemical composition and oxygen content of electrodes of austenite stainless steel 005Cr25Ni20

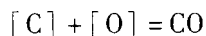
炉号	化学成分/%										[O]/ 10 ⁻⁶
	C	Mn	Si	S	P	Ni	Cr	W	Mo	Cu	
1	0.005	0.33	0.04	0.001 0	0.004	21.25	24.62	0.030	0.05	0.02	30
2	0.005	0.34	0.03	0.002 0	0.006	21.20	24.42	0.030	0.05	0.02	45
3	0.005	0.33	0.04	0.001 5	0.004	21.22	24.55	0.035	0.05	0.02	20
4	0.006	0.33	0.04	0.001 5	0.005	21.22	24.34	0.050	0.05	0.015	20

表 3 真空自耗重熔后 005Cr25Ni20 奥氏体不锈钢的化学成分和氧含量
Table 3 Chemical composition and oxygen content of vacuum consumption remelted austenite stainless steel 005Cr25Ni20

炉号	化学成分/%										[O]/ 10 ⁻⁶
	C	Mn	Si	S	P	Ni	Cr	W	Mo	Cu	
3H210098	0.007 ~ 0.005	0.33	0.04	0.001 5	0.005	21.22	23.34	0.05	0.05	0.02	12
3H210099	0.005	0.33	0.04	0.001 5	0.004	21.22	24.55	0.04	0.05	0.02	15
3H210100	0.007 ~ 0.006	0.33	0.04	0.001 0	0.004	21.25	24.62	0.03	0.05	0.02	20
3H210101	0.005	0.34	0.03	0.002 0	0.005	21.20	24.42	0.03	0.05	0.02	22

表 3 所示。

因为真空感应炉冶炼时,用碳和氢脱氧是最有效的^[3]。钢液中发生下列反应:



$$\lg K = \lg \frac{P_{CO}}{a_C \cdot a_O} = \frac{1160}{T} + 2.003 \quad (1)$$

式中:K-平衡常数; a_C -钢液中的碳浓度/%; a_O -氧浓度/%; P_{CO} -CO的分压(单位为大气压);T-钢液温度/℃。

根据式(1)近似的评价碳在1600℃时的脱氧能力,在 $P_{CO}=1$ 大气压时, $[C][O]=2.4 \times 10^{-3}$;在 $P_{CO}=10^{-3}$ 大气压时, $[C][O]=2.4 \times 10^{-6}$ 。可见,CO在分压降得越低,则碳的脱氧能力越大。同时,降低金属液面的压力可以导致金属中氢、氮气体含量的减少。此外,由于真空熔炼时添加了与氧亲和力强的元素进行脱氧,且真空熔炼工作真空度高,漏气率小,更有利于去气。

此次生产通过适当富氧去碳,去氧的同时碳含量也控制在较低水平,故获得了较理想的合金成分,尤其是Si、P等元素达到了用户满意的要求。

3.2 夹杂物及氧含量情况

分别在真空感应炉冶炼的电极棒和自耗重熔后的钢锭上切取了金相试片,参照GB10561-2005标准进行夹杂物评定,结果发现,各视场均无硫化物夹杂、氧化物夹杂、硅酸盐夹杂,只有个别点状不变形

夹杂物,级别均 ≤ 0.5 级,且经过自耗重熔后夹杂物更细小,纯洁度更高。同时,对电极棒、双真空钢的氧含量进行了分析,结果见表2和表3。

由表2和表3[O]分析结果可见,经过双真空冶炼后,钢中的气体氧含量明显降低,普通电弧炉冶炼不锈钢[O]为 $(40 \sim 150) \times 10^{-6}$,电渣炉冶炼[O]为 $(30 \sim 80) \times 10^{-6}$,与此相比,双真空冶炼后钢的脱气效果显著。

4 结论

(1)此次冶炼的005Cr25Ni20工艺合理,化学成分均达到了技术要求,基本达到内控指标,并超过了以往的实际水平。

(2)双真空冶炼的奥氏体不锈钢005Cr25Ni20的夹杂物及气体含量均较电渣重熔冶炼的钢低,钢材质量较好。

参考文献

- 1 陈德和. 不锈钢的性能和组织. 北京:机械工业出版社,1977
- 2 侯少良,边 舫. 3 t和6 t真空感应炉冶炼工艺实践. 特殊钢, 2000,21(3):42
- 3 马廷温. 电炉炼钢学. 北京:冶金工业出版社,1990

郭淑娟(1972-),女,硕士,讲师,工程师,大连交通大学毕业,金属材料研究。

收稿日期:2011-03-11