

· 组织和性能 ·

电渣重熔对高氮 17Cr-17Mn-2Mo 奥氏体不锈钢冶金质量和性能的影响

姚春发 邢长军 孙国强 吴林 宁小智 胡秋利

(钢铁研究总院工程用钢所,北京 100081)

摘要 通过 50 kg 真空加压感应炉 + 气氛保护电渣重熔 (ESR) 熔炼的超低碳 17Cr-17Mn-2Mo-0.8N 奥氏体不锈钢,研究了该钢 ESR 前后的夹杂物含量和尺寸、冶金质量和力学性能。结果表明,经电渣重熔,钢中夹杂物含量明显降低,夹杂物平均尺寸由重熔前的 2.36 μm 降低至 1.81 μm,钢中硫含量由重熔前 0.004% 降低至 0.001%;电渣重熔后 Φ20 mm 锻材组织均匀细小,力学性能 R_m 、 A 和 A_{KU} 分别从重熔前 924 MPa、30.5% 和 248 J 提高到 1 053 MPa、50.0% 和 296 J;电渣重熔消除了电极中的气孔缺陷,电渣锭成材率较电渣前提高了 30% 以上。

关键词 高氮 17Cr-17Mn-2Mo 奥氏体不锈钢 保护气氛电渣重熔 夹杂物 冶金质量 力学性能 成材率

Effect of Electro-Slag Remelting on Metallurgical Quality and Properties of High Nitrogen 17Cr-17Mn-2Mo Austenite Stainless Steel

Yao Chunfa, Xing Changjun, Sun Guoqiang, Wu Lin, Ning Xiaozhi and Hu Qiuli
(Institute of Steel for Engineering, Central Iron and Steel Research Institute, Beijing 100081)

Abstract The 17Cr-17Mn-2Mo-0.8N ultra-low carbon austenite stainless steel is melted by a 50 kg vacuum and pressure induction furnace + gas shielded electroslag remelting (ESR) process, and the inclusions content and size, metallurgical quality and mechanical properties of steel before and after ESR are studied. Results show that with ESR the inclusions content in steel decreases obviously, the average size of inclusions decreases to 1.81 μm from 2.36 μm before ESR, and the sulphur content in steel decreases to 0.001% from 0.004% before ESR; after ESR the structure in Φ20 mm forged bar is fine and uniform, the mechanical properties R_m , A and A_{KU} of steel respectively increase to 1 053 MPa, 50.0% and 296 J from 924 MPa, 30.5% and 248 J before ESR; the blowhole defect in electrode is eliminated by ESR, as compared before ESR the yield of ESR ingot increases by more than 30%.

Material Index High Nitrogen 17Cr-17Mn-2Mo Austenite Stainless Steel, Gas Shielding ESR, Inclusions, Metallurgical Quality, Mechanical Properties, Yield

N 元素作为间隙原子,与合金元素 Cr、Mn 等相互作用,可以显著提高钢的力学性能和耐蚀性能^[1-2],目前高氮钢的冶炼通常采用加压电渣重熔和反压铸造等工艺来完成,其他还有采用热等静压熔炼、加压感应熔炼及粉末冶金等方法^[3-5]。

1 工艺试验

采用 50 kg 真空加压感应熔炼炉冶炼,原材料采用高纯 Fe、Cr、Mn、Mo 为主要原材料,以及氮化锰和氮化铬合金提供 N 元素。原材料经熔化、精炼后通入氮气至 0.8 MPa,加入氮化合金,氮化合金熔化后搅拌 3 min 使其充分均匀,降温浇铸成 Φ80 mm 棒。其中 2# 试验钢为 1# 试验钢棒采用气氛保护电渣重熔成 Φ120 mm 电渣锭,1# 和 2# 试验钢锭经自由锻,锻造成 Φ20 mm 棒材。最后测试试验钢化学成分,化学成份如表 1 所示。

2 试验结果与分析

2.1 钢中 N 含量的控制

合金元素对钢中 N 含量的影响较大^[6],N 元素

可以与许多金属形成氮化物。

根据经验公式(1)^[7]和公式(2)^[8]计算钢液中理论 N 含量:

$$[N] = K_z \cdot \frac{K_N}{f_N^{Me}} \cdot \sqrt{\frac{P_b}{P^0 \sqrt{S_{\text{熔}}}}} \quad (1)$$

$$\begin{aligned} \lg f_N^{Me} = & \{-164 [Cr] + 8.33 [Ni] - 33.2 [Mo] - 134 \\ & [Mn] + 1.68 [Cr]^2 - 1.83 [Ni]^2 - 2.78 [Mo]^2 + \\ & 8.82 [Mn]^2 + (1.6 [Ni] + 1.2 [Mo] + 2.16 [Mn]) \\ & [Cr] + (-0.26 [Mo] + 0.09 [Mn]) [Ni]\} / T + \\ & \{0.0415 [Cr] + 0.0019 [Ni] + 0.0064 [Mo] + \\ & 0.035 [Mn] - 0.0006 [Cr]^2 + 0.001 [Ni]^2 + 0.0013 \\ & [Mo]^2 - 0.0056 [Mn]^2 + (-0.0009 [Ni] - 0.0005 \\ & [Mo] - 0.0005 [Mn]) [Cr] + (0.0003 [Mo] + \\ & 0.0007 [Mn]) [Ni]\} + 0.13 [C] + 0.06 [Si] + \\ & 0.046 [P] + 0.007 [S] + 0.01 [Al] - 0.9 [Ti] - 0.1 \\ & [V] - 0.003 [W] - 0.12 [O] \end{aligned} \quad (2)$$

式中: K_z -真空感应炉冶炼影响因子(当考虑真空炉

表 1 试验高氮 17Cr-17Mn-2Mo 奥氏体钢电极(1[#])和 ESR 锭(2[#])的化学成分/%

Table 1 Chemical composition of electrode (1[#]) and ESR ingot (2[#]) of tested high nitrogen austenite stainless steel 17Cr-17Mn-2Mo /%

试验钢(工艺)	C	Cr	Mn	Mo	N	S
1 [#] (单真空)	0.02	17.8	17.1	2.29	0.87	0.004
2 [#] (真空+电渣)	0.02	17.4	16.4	2.27	0.79	0.001

参数及其他因数影响时, $K_2 \leq 1$); $S_{\text{渣}}$ - 氮化物熔化停留时间/min; $[N]$ - 钢中氮含量预测值/%; p^θ - 标准态, $p = 10^5 \text{ Pa}$; P_b - 真空炉内的保护气的压力/Pa; K_N - 当氮分压等于 10^5 Pa 时, 纯铁液中氮溶解反应 $\frac{1}{2}N_2 = [N]$ 的平衡常数, 这里 K 按 0.0451 计算; f_N^{Mc} - 钢液中氮的活度系数。

由式(1)可以计算出 1[#] 试验钢 N 的含量为 0.9%, 实测结果为 0.87%, 理论值与实测值差别较小, 可以在一定程度上指导高氮钢的冶炼。

2.2 电渣重熔对合金元素含量影响

由表 1 可以看出, 经电渣重熔后的 2[#] 试验钢主要元素含量变化不大, 其中易烧损、易挥发元素如 Mn 和 N 有明显降低。另外, 值得注意的是, 经电渣重熔后, 钢中有害元素 S 含量降低至原来 1/4。

2.3 电渣重熔对高氮钢组织的影响

图 1(a) 1[#] 为单真空冶炼浇铸成 $\Phi 80 \text{ mm}$ 铸钢棒, 图 1(b) 2[#] 为经单真空 + 电渣重熔铸成 $\Phi 120 \text{ mm}$ 电渣锭。从图 1 中可以看出, 1[#] 试验钢沿冒口处切除 50 mm 后, 钢中仍含有大量气孔。经电渣重熔后的钢锭沿冒口处切除 20 mm, 宏观组织上已经没有明显的气孔存在。经锻造成型, 电渣重熔后的钢锭成材率较电渣前提提高 30% 以上。

从图 2 可以看出, 1[#]、2[#] 试验钢的组织均为单一奥氏体组织, 且经双联工艺的 2[#] 试验钢组织更为细小。对 1[#]

和 2[#] 试验钢夹杂物进行评级可知, 两个试验钢夹杂物含量均比较低, 夹杂物级别如表 2 所示。

利用蔡司 40MAT 设备对夹杂物种类及数量进行分析, 三个试验钢夹杂物均以 MnS 、 Al_2O_3 为主, 含有少量的 CaS , 其中 CaS 的产生可能是由于熔渣与熔化金属液的界面处, 钢液中的硫与液态熔渣发生以下反应^[9]: $(CaO) + [S] = (CaS) + [O]$, 在常规大气下电渣重熔中, 熔渣中的硫会被空气氧化成为 SO_2 , 降低了渣中硫含量, 其反应如下: $2(CaS) +$

表 2 试验高氮 17Cr-17Mn-2Mo 奥氏体不锈钢电极(1[#])和 ESR 锭(2[#])锻成的 $\Phi 20 \text{ mm}$ 棒材中夹杂物等级

Table 2 Rating of inclusions in $\Phi 20 \text{ mm}$ bar forged from electrode (1[#]) and ESR ingot (2[#]) of tested high nitrogen austenite stainless steel 17Cr-17Mn-2Mo

试验钢	A		B		C		D	
	粗	细	粗	细	粗	细	粗	细
1 [#] (单真空)	0	0	0	0	0	0	0	0.5
2 [#] (真空+电渣)	0	0	0	0	0	0	0	0.5

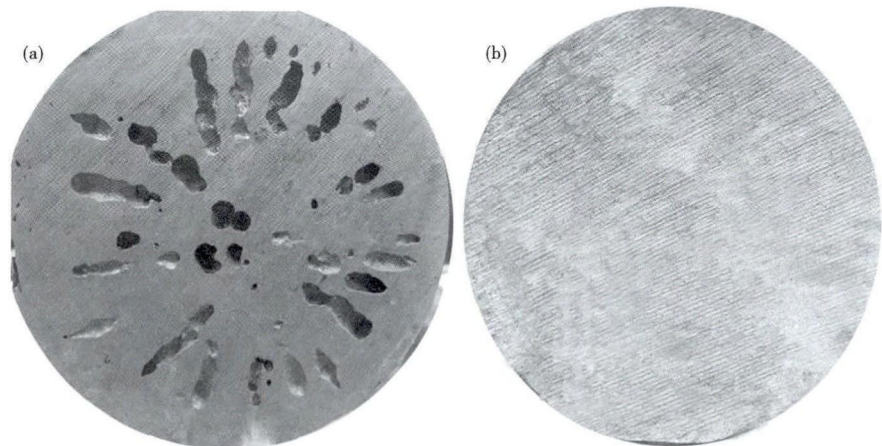


图 1 试验高氮 17Cr-17Mn-2Mo 奥氏体不锈钢电渣前(a, 1[#], $\Phi 80 \text{ mm}$)后(b, 2[#], $\Phi 120 \text{ mm}$)宏观组织形貌

Fig. 1 Morphology of macrostructure of before electrode (a, 1[#], $\Phi 80 \text{ mm}$) and after ESR ingot (b, 2[#], $\Phi 120 \text{ mm}$) of tested high nitrogen austenite stainless steel 17Cr-17Mn-2Mo

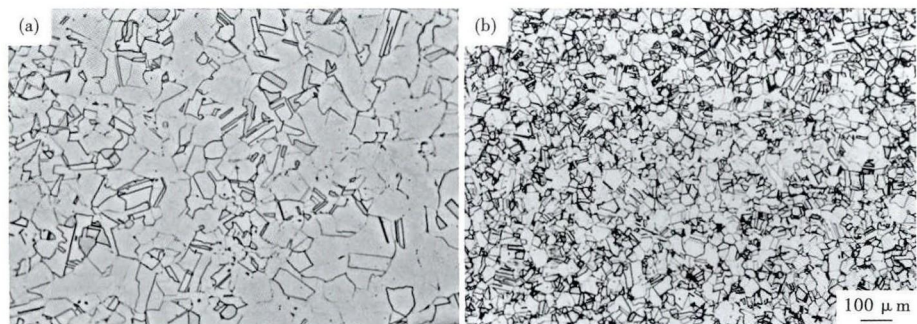


图 2 试验高氮 17Cr-17Mn-2Mo 奥氏体不锈钢 $\Phi 20 \text{ mm}$ 锻材组织形貌:(a) 1[#], 电渣重熔前; (b) 2[#], 电渣重熔后

Fig. 2 Morphology of structure of tested high nitrogen austenite stainless steel 17Cr-17Mn-2Mo $\Phi 20 \text{ mm}$ bar forged: (a) 1[#], before ESR; (b) 2[#], after ESR

$3\{O_2\} = 2(CaO) + 2\{SO_2\}$, 但在气氛保护下, 气态脱硫无法进行, 重熔期间钢中脱除的硫元素在熔渣中积累, 可能将 CaS 带入钢液中。对夹杂物定性分析可知, 1[#] 试验钢中 MnS 的含量明显高于 2[#] 试验钢, 且 1[#] 试验钢中夹杂物以 MnS 和氧化物为主, 而 2[#] 试验钢主要夹杂物为氧化物, 仅有少量的 MnS 存在。

对夹杂物表面积和尺寸测量得出, 1 mm² 内夹杂物面积百分比为 1[#] 试样 0.033%, 2[#] 试样 0.017%, 夹杂物平均尺寸为 1[#] 试样 2.36 μm, 2[#] 试样 1.81 μm。可见, 通过电渣重熔工艺冶炼试验钢, 可以有效的降低钢中硫化物的含量, 钢更为纯净, 且夹杂物尺寸数量明显要低于单真空冶炼工艺。

2.4 电渣重熔对试验钢力学性能的影响

从 1[#] 和 2[#] 锻棒中取样, 通过机械加工成 Φ5 mm 标准拉伸试样, 利用 WE300 分别测试两个试验钢室温力学性能, 如表 3 所示。从表 3 可以看出, 经电渣重熔的 2[#] 试验钢抗拉强度和屈服强度明显高于 1[#] 试验钢, 与此同时, 试验钢的韧性不但没有降低, 较电渣前伸长率和断面收缩率提高近 1 倍, 冲击韧性提高近 50 J。由此可以得出, 电渣重熔虽然降低了强化元素 N 的含量, 但是经电渣重熔后, 提高了合金元素的均匀性, 钢的组织得到细化, 降低了钢中夹杂物含量, 提高了钢的洁净度。

图 3 为试验钢冲击断口形貌, 可以看出, 1[#]、2[#] 试验钢断口形貌为典型的韧性断裂, 在 1[#] 试验钢的部分韧窝里有夹杂物小颗粒, 说明在受外力作用下, 夹杂物的存在可以成为断裂的源头, 而 2[#] 试验钢中没有发现明显的夹杂物颗粒, 且韧窝相对 1[#] 较细小。对比力学性能和夹杂物尺寸大小可知, 夹杂物含量越低, 尺寸越细小, 钢的韧性越好, 反映在微观

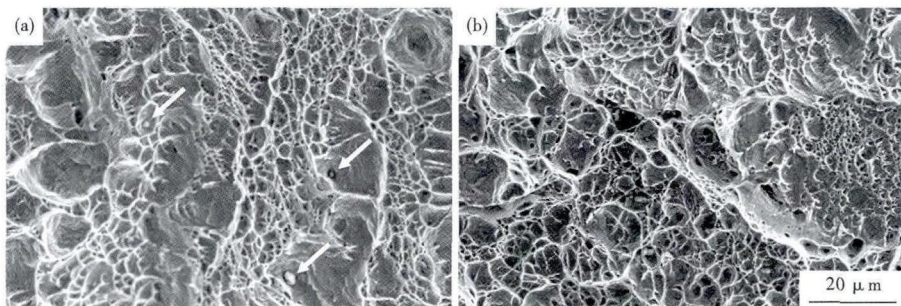


图 3 试验高氮 17Cr-17Mn-2Mo 奥氏体不锈钢 (a) 1[#], 电极和 (b) 2[#], ERS 锭锻制的 Φ20 mm 棒材冲击断口形貌

Fig. 3 Morphology of impact fracture of tested high nitrogen austenite stainless steel 17Cr-17Mn-2Mo Φ20 mm bar forged from (a) 1[#], electrode and (b) 2[#], ESR ingot

形貌上为韧窝越细小。

3 结论

(1) 试验高氮 17Cr-17Mn-2Mo 奥氏体不锈钢经电渣重熔后, 钢锭组织致密, 无明显气孔存在, 成材率提高 30%, 其 Φ20 mm 锻材组织均匀细小, 力学性能有较大幅度提高。

(2) 试验高氮 17Cr-17Mn-2Mo 奥氏体不锈钢经电渣重熔后的钢锭中夹杂物数量和尺寸分布均有改善, 脱硫效果明显, 硫化物含量明显降低。

参考文献

- [1] 李光强, 董延亮. 高氮钢的基础研究应用进展[J]. 中国冶金, 2007, 17(7): 5-11.
- [2] 崔大伟, 曲选辉, 李科. 高氮低镍奥氏体不锈钢的研究进展[J]. 材料导报, 2005, 19(12): 64-67.
- [3] Hans Berns. Manufacture and Application of High Nitrogen Steels [J]. Zeitschrift Fuer Metallkunde, 1995, 86(3): 156-163.
- [4] Balachandran G, Bhatia M L, Ballal N B, et al. Processing Nickel Free High Nitrogen Austenitic Stainless Steels Through Conventional Electroslag Remelting Process [J]. ISIJ. International, 2000, 40(5): 478-483.
- [5] Yu Tao, Tarek Ei Gammal. High Nitrogen Steel Powder for Near Net Shape Products [J]. Steel Research, 1999, 70(4): 135-140.
- [6] 邱绍岐, 祝桂花. 电炉炼钢原理及工艺 [M]. 北京: 冶金工业出版社, 2001. 69-70.
- [7] 任伊宾, 杨柯, 张炳春, 等. 真空感应炉冶炼高氮钢的影响因素 [J]. 材料与冶金学报, 2004, 3(1): 8-12.
- [8] Kuwana T, Kokawa H, Saotoma M. Quantitative Prediction of Nitrogen Absorption by Steel during Gas Tungsten Arc Welding [A]. Cerjak H. Mathematical Modelling of Weld Phenomena [C]. London: Institute of Materials, 1997. 64-80.
- [9] 汤旭炜, 朱荣. 高氮钢电渣重熔夹杂物控制研究 [J]. 工业加热, 2015, 44(1): 48-51

表 3 试验高氮 17Cr-17Mn-2Mo 奥氏体不锈钢电极 (1[#]) 和 ERS 锭 (2[#]) 锻成的 Φ20 mm 棒材的力学性能

Table 3 Mechanical properties of Φ20 mm bar forged from electrode (1[#]) and ESR ingot (2[#]) of tested high nitrogen austenite stainless steel 17Cr-17Mn-2Mo

试验钢	R_m / MPa	$R_{p0.2}$ / MPa	A / %	Z / %	A_{KU} / J
1 [#] (单真空)	924	710	30.5	38	248
2 [#] (真空+电渣)	1 053	726	50.0	75	296

姚春发 (1964-), 男, 高级工程师, 1994 年北京化工学院 (本科) 毕业, 金属材料冶炼和加工研究。

E-mail: yaoxiao933@sohu.com

收稿日期: 2016-08-01