

# 不同冶炼工艺对 1Cr18Ni10Ti 钢夹杂物的影响

郭 诚, 都祥元, 李红军, 孔凡亚

(中国科学院金属研究所, 沈阳 110016)

**[摘要]** 通过试验研究了 1Cr18Ni10Ti 不锈钢的 4 种冶炼工艺: 真空感应 + 电渣重熔、真空感应(陶瓷过滤器)、真空感应(陶瓷过滤器) + 电渣重熔、真空感应 + 真空自耗, 得到钢锭中夹杂物的种类、大小以及数量的变化。对比试验结果可知, 采用真空感应(陶瓷过滤器)冶炼工艺与真空感应 + 真空自耗之后的钢锭的夹杂物水平相当, D 类夹杂物数量最少, 大颗粒夹杂物占比也最小。

**关键词:** 冶炼工艺; 非金属夹杂物; 1Cr18Ni10Ti

## Effect of Different Smelting Process on the Non-Metallic Inclusions of 1Cr18Ni10Ti

GUO Cheng, DU Xiangyuan, LI Hongjun, KONG Fanya

(Institute of Metal Research, Chinese Academy of Sciences, Shenyang 110016, China)

**[ABSTRACT]** Finding the species, size and number of non-metallic inclusions according to four smelting processes: vacuum induction + electroslag remelting, vacuum induction (ceramic filter), vacuum induction (ceramic filter) + electroslag remelting, vacuum induction + vacuum consumable. According to the results, vacuum induction (ceramic filter) can reach considerable non-metallic content with vacuum induction + vacuum consumable, then get the least quantity of type-D oxide and minimum proportion of large-size type-D oxide.

**Keywords:** Smelting process; Non-metallic inclusion; 1Cr18Ni10Ti

**DOI:**10.16080/j.issn1671-833x.2016.23/24.129

1Cr18Ni10Ti 是一种典型的 18-8 型不锈钢, 即铬、镍质量分数分别在 18%、8% 左右的奥氏体不锈钢。因为铬含量比较高, 所以耐腐蚀性强, 应用广泛, 同时为了降低晶间腐蚀的倾向, 钢中添加 Ti 以防止 Cr 和 C 结合生成  $Cr_{23}C_6$ , 但添加了一定量的 Ti 元素之后就容易形成 TiN、TiCN 夹杂物。钢铁产品中, 非金属夹杂物会降低钢的塑性、韧性和疲劳性能, 使钢的冷热加工性能乃至塑性、韧性等力学性能变差。因此夹杂物的尺寸、数量及分布形态是衡量钢材质量的重要指标<sup>[1-4]</sup>。TiN、TiCN 这种夹杂物一方面致使该钢的抛光性能恶化, 无法获得小的粗糙度, 也不利于提高薄壁钢管、薄钢带及冷拉钢丝的表面质量; 另一方面, TiN 夹杂物作为腐蚀源, 使钢耐蚀性, 特别是耐点蚀性能下降<sup>[5]</sup>。

## 1 试验

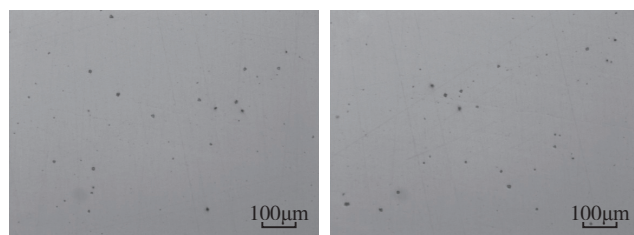
目前 1Cr18Ni10Ti 不锈钢常采用的冶炼方法为真空感应 + 电渣重熔, 化学成分见表 1, 产品的夹杂物图片见图 1。通过分析图 1 的夹杂物图片, 根据标准 GB/T 10561-2005<sup>[6]</sup> 对夹杂物进行评级。真空感应 + 电渣重熔熔炼后 1Cr18Ni10Ti 钢锭中夹杂物评级为 A 类  $i=0$ 、B

类  $i=0$ 、C 类  $i=0$ 、D 类  $i=2.5$ 。在 100 倍金相显微镜下观察  $0.50\text{mm}^2$  视场内 D 类夹杂物数量约为 28~30 个, 而且  $8\sim 13\mu\text{m}$  的大尺寸夹杂物数量较多, 约为 11~14 个, 夹杂物主要以 TiN 为主, 粗系所占比例为 40%~50%。

为了减少夹杂物的总体数量, 同时降低粗系夹杂物的比例, 使 1Cr18Ni10Ti 钢更加纯净, 试验中还采用了另外 3 种冶炼方法: (1) 加陶瓷过滤器的真空感应熔

表1 1Cr18Ni10Ti钢化学组分

化学元素	C	Si	Mn	Ni	Cr	Ti	P	S
质量分数 /%	0.044	0.25	0.73	10.4	17.66	0.55	0.010	< 0.002



(a) 局部 1

(b) 局部 2

图1 1Cr18Ni10Ti钢夹杂物

Fig.1 Non-metallic inclusions of 1Cr18Ni10Ti

炼;(2)加陶瓷过滤器的真空感应熔炼+电渣重熔;(3)真空感应熔炼+真空自耗。通过试验分析对比不同冶炼方法冶炼后钢锭中的夹杂物的种类、数量和大小差异。

### 1.1 加陶瓷过滤器的真空感应

#### 1.1.1 化学成分分析

为了进一步降低夹杂物, C的质量分数控制在0.03%左右。采用200kg真空感应熔炼炉进行熔炼试验, 熔炼时Ti约有0.1%的烧损,因此Ti按质量分数0.22%配料;碳按质量分数0.035%配料。浇注时采用12ppi氧化锆多孔泡沫陶瓷过滤器。浇注电极棒尺寸110/90mm×1100mm,重量110kg。

表2 真空感应配料和熔炼成分质量分数对比 %

化学元素	C	Si	Mn	Ni	Cr	Ti	Al	Fe	S	P
配料成分	0.035	0.3	1.80	10.5	17.7	0.22	0.05	余量	—	—
熔炼分析	0.031	0.36	1.67	10.8	17.68	0.1	—	—	0.004	0.006

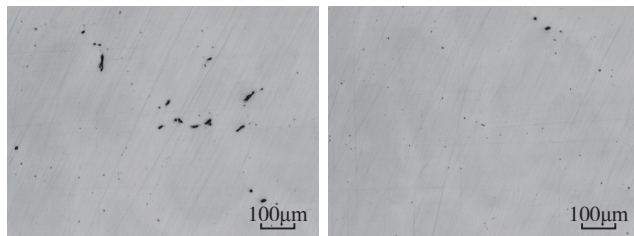
通过表2可以看出,电极棒C的质量分数为0.031%,Ti质量分数为0.1%。在电极棒上端(冒口处)和下端取样进行夹杂物分析(夹杂物分析要求锻比大于3,铸锭夹杂物分析仅供试验分析用,无法评级)。

#### 1.1.2 真空感应(过滤器)熔炼后夹杂物分析

真空感应熔炼加氧化锆陶瓷过滤器浇注后,D类夹杂物总体数量较少,数量约23~24个,8~13μm大颗粒夹杂物数量也较少,数量约1~3个,粗系夹杂物占比约5%~13%。电极棒上端由于接近冒口,个别外来的耐火材料夹杂物尺寸较大(图2),而下端则无大颗粒夹杂物(图3)。

### 1.2 加陶瓷过滤器的真空感应熔炼+电渣重熔

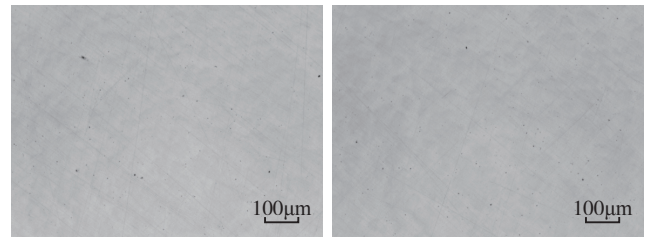
在真空感应熔炼加氧化锆陶瓷过滤器浇注成点击后,采用3t电渣重熔炉进行二次重熔。为了防止Ti的烧损,采用了含TiO<sub>2</sub>渣:70%CaF<sub>2</sub>+25%Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>+5%MgO,另加5%TiO<sub>2</sub>。即在“三七”渣的基础上进行了改进,加入了5%的MgO,而Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>质量分数由传统上的30%降



(a)局部1 (b)局部2

图2 电极棒上端

Fig.2 Top of electrode bar



(a)局部1 (b)局部2

图3 电极棒下端

Fig.3 Bottom of electrode bar

低到了25%。加入MgO的作用是在渣池表面形成一层半凝固膜,防止渣池吸氧或渣中变价氧化物向金属熔池传递供氧,从而防止Si、Mn的氧化,降低钢中氢、氧、氮等气体含量。

#### 1.2.1 成分分析

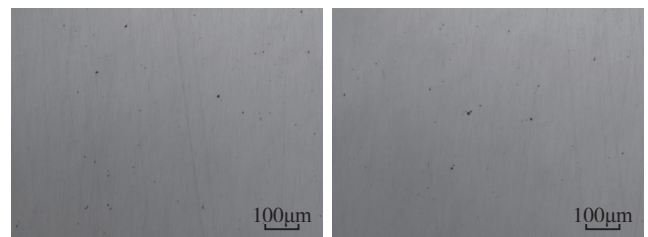
从电渣重熔后的钢锭化学成分(表3)可以看出,钢锭头尾C的质量分数基本没有变化,真空感应熔炼后为0.031%,而电渣重熔后钢锭头尾C的质量分数分别为0.031%和0.033%,即尾部略有增加。而钢锭头尾Si的质量分数有所变化,头部由0.36%降低到0.23%,而尾部增加到0.44%,即头部烧损36.1%,而尾部增硅率为22.2%。钢锭头尾Mn的质量分数变化不大,分别由1.67%降低到了1.60%和1.48%,烧损率分别为4.2%和11.4%。钢锭头尾Ti的质量分数烧损最大,分别由0.1%降低到了0.03%和0.08%,烧损率分别为70%和20%。

表3 电渣重熔后钢锭头尾成分

化学元素	C	Si	Mn	Ni	Cr	Ti	P	S	
质量分数/%	头	0.031	0.23	1.60	10.60	17.67	0.03	0.008	0.003
	尾	0.033	0.44	1.48	10.55	17.61	0.08	0.014	0.003

#### 1.2.2 夹杂物分析

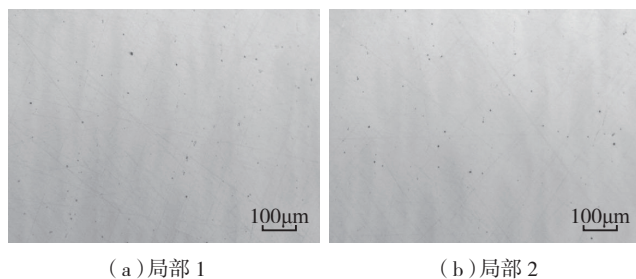
从图4、图5可以看出,从夹杂物评级上看,电渣重熔钢锭上下端夹杂物评级基本一样:A类*i*=0、B类*i*=0、C类*i*=0、D类*i*=2,而且大颗粒D类夹杂物很少,大约2~4个,总数量为20~26个。



(a)局部1 (b)局部2

图4 电渣重熔钢锭上端

Fig.4 Top of electroslag remelting ingot



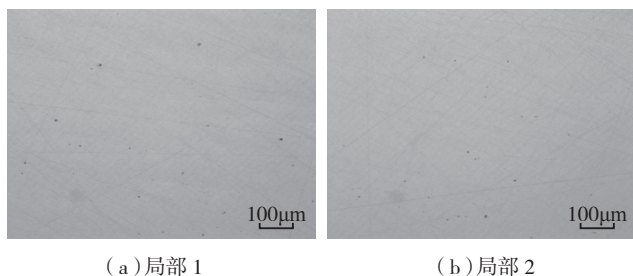
(a)局部1 (b)局部2

图5 电渣重熔钢锭下端

Fig.5 Bottom of electroslag remelting ingot

### 1.3 真空感应熔炼+真空自耗

从图6可以看出,真空感应+真空自耗后1Cr18Ni10Ti钢锭中夹杂物评级为A类*i*=0、B类*i*=0、C类*i*=0、D类*i*=1。如表4所示,D类氧化物数量较少,约为20~21个,而且8~13µm的大颗粒氧化物数量也较少,约为2个,粗系占比为0~10%。



(a)局部1 (b)局部2

图6 真空感应+真空自耗后1Cr18Ni10Ti钢锭

Fig.6 1Cr18Ni10Ti through vacuum induction and VAR

表4 1Cr18Ni10Ti钢不同冶炼方法夹杂物对比

冶炼方法	真空感应+ 电渣重熔	真空感应 (陶瓷过滤器)	真空感应 (陶瓷过滤器) +电渣重熔	真空感应+ 真空自耗
夹杂物总数/个	28~30	23~24	26~31	20~21
8~13µm颗粒数量/个	11~14	1~3	2~4	0~2
粗系所占比例/%	40~50	5~13	7~13	0~10

## 2 讨论

通过对比分析4种不同冶炼方法所得的1Cr18Ni10Ti钢锭中夹杂物,可知:真空感应+电渣重熔后锻棒的D类夹杂物数量较多,约为28~30个,大颗粒氧化物所占比例较高,约为40%~50%。真空感应+真空自耗后的锻棒D类夹杂物数量较少,约为20~21个,而且8~13µm的大颗粒氧化物数量也较少,约为2个,粗系占比为0~10%。

真空感应熔炼时采用氧化锆陶瓷过滤器浇注可以有效地去除大颗粒氧化物,而且总的D类夹杂物数量也得到降低,其脱除夹杂物的效果跟真空感应+真空

自耗的效果相当。根据初生夹杂物的形成理论,合金中夹杂物是在合金凝固阶段析出形成,夹杂物析出时的主要方式是非均质生核,需要有固态核心。本文冶炼1Cr18Ni10Ti钢存在大量TiN或是Ti(N,C),这两种夹杂物熔点接近3000℃,钢液中必然有大量的弥散固态TiN或是Ti(N,C)微粒子,尺寸极小,容易成为夹杂物析出核心。由此看来,经泡沫陶瓷过滤的1Cr18Ni10Ti钢中夹杂物数量偏少与尺寸偏小,是因为泡沫陶瓷对作为夹杂物形核核心的极微细的固态粒子有一定的滤除作用<sup>[7]</sup>。

不考虑Si、Mn、Ti元素的烧损,真空感应熔炼1Cr18Ni10Ti钢时采用陶瓷过滤器的钢中D类夹杂物数量较少,大颗粒D类夹杂物占比约在5%~13%,陶瓷过滤器通过滤饼机制、表面效应及整流效应,能够有效减少液态铸造合金中的O、N含量<sup>[8]</sup>,进而降低夹杂物的数量,真空感应熔炼后的1Cr18Ni10Ti钢经过真空自耗熔炼也可以明显去除N的含量,所以这两种冶炼方式钢中的D类夹杂物水平相当。再进行二次电渣重熔,随着渣系内氧化物的部分残留以及与大气接触后N的渗入,导致D类夹杂物的总数量增多,但大颗粒D类夹杂物数量并基本没有增加,这与真空感应+电渣重熔熔炼1Cr18Ni10Ti钢中的D类夹杂物水平相比,数量相当,但大颗粒D类夹杂物数量占比明显降低,从40%~50%降低到了7%~13%。

## 3 结论

真空感应熔炼1Cr18Ni10Ti钢锭时,与真空感应+电渣重熔后锻棒的相比较,采用12ppi陶瓷过滤器可以有效去除D类夹杂物,在100倍金相显微镜下观察0.50mm<sup>2</sup>视场内由30个左右降低到20个左右。尤其是粗系夹杂物去除效果更明显,由占比40%~50%降低到0~10%。

真空感应熔炼时采用12ppi陶瓷过滤器浇注时去除D类夹杂物的效果跟真空感应+真空自耗的效果相当,在100倍金相显微镜下观察0.50mm<sup>2</sup>视场内D类夹杂物总数量为20个左右。

## 参考文献

- [1] KNOTT J F. Micro-mechanisms of fibrous crack extension in engineering alloys[J]. Metal Science, 1980, 14(8-9):327-336.
- [2] SCHWALBE K H. On the influence of microstructure on crack propagation mechanisms and fracture toughness of metallic materials[J]. Engineering Fracture Mechanics, 1977, 9(4):795-835.
- [3] SPEICH G R, SPITZIG W A. Effect of volume fraction and shape of sulphide inclusions on through thickness ductility and impact energy of high strength 4340 plate steels[J]. Metallurgical Transactions A,

1982,13(12):2239-2257.

[4] 赵杰,曹喜彪,张敏红,等.铸造缺陷对 A356 铝合金缸盖疲劳性能的影响[J].上海金属,2015,37(5):6-10.

ZHAO Jie, CAO Xibiao, ZHANG Minhong, et al. The effect of casting defects on the fatigue properties of A356 aluminum alloy head[J]. Shanghai Metal, 2015, 37(5):6-10.

[5] 罗通伟. 0Cr18Ni10Ti 钢中 TiN 夹杂物的危害及应对措施[J]. 特钢技术, 2014(3):1-4.

LUO Tongwei. Harmfulness of TiN inclusion in 0Cr18Ni10Ti steel and its countermeasures for its eliminating[J]. Special Steel Technology, 2014(3):1-4.

[6] 全国钢标准化技术委员会. GB/T 10561-2005 钢中非金属夹杂物含量的测定标准评级图显微检验法[S]. 北京: 中国标准出版社, 2005.

China National Standardization Technical Committee. GB/T 10561-2005 Steel-determination of content of nonmetallic inclusions-micrographic method using standards diagrams[S]. Beijing: Standards Press of China, 2005.

[7] 戴斌煜,马仁东,高景利,等.泡沫陶瓷过滤对 42CrMo 钢中夹杂物的影响[J].铸造技术,2007,28(3):409-412.

DAI Binyu, MA Rendong, GAO Jingli, et al. Effect of foam ceramic filter on the inclusion in 42CrMo steel[J]. Casting Technology, 2007, 28(3): 409-412.

[8] 陈汉添,吴基球.氧化锆基泡沫陶瓷的工艺原理及性能表征[J].陶瓷,2006(6):16-20.

CHEN Hantian, WU Jiqiu. Process principle and performance characterization of zirconia based foam ceramics[J]. Ceramics, 2006(6):16-20.

(责编 海山)

(上接第125页)

LI Zhiqiang, GUO Heping. Application of superplastic forming/diffusion bonding technology aerospace[J]. Forging & Stamping Technology, 2005(1):79-80.

[31] 邵杰,韩秀全,韩晓宁,等. SP/DB 设计与制造一体化技术在导弹中的应用[J].航空制造技术,2009(10):71-76.

SHAO Jie, HAN Xiuquan, HAN Xiaoning, et al. Application of structural optimization design and manufacture technology in missile[J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2009(10):71-76.

[32] 潘雄,翟步英,孙梅梅,等.浅议我国无余量熔模精密铸造技术的发展、现状及其差距[J].广西大学学报,2008,33(S1):71-76.

PAN Xiong, ZHAI Buqing, SUN Meimei, et al. Discussing national marginless melted module precise casting technique's development and present situation[J]. Journal of Guangxi University, 2008,33(S1):71-76.

[33] 樊振中,徐秀利,王玉灵,等.熔模精密铸造技术在航空工业的应用及发展[J].特种铸造及有色合金,2014,34(3):285-289.

FAN Zhenzhong, XU Xiuli, WANG Yuling, et al. Investment casting technology application and development in the aviation industry[J]. Special Casting & Nonferrous Alloys, 2014,34(3):285-289.

[34] 庞滔,郭大春,庞楠.超精密加工技术[M].北京:国防工业出版社,2000:1-5.

PANG Tao, GUO Dachun, PANG Nan. Ultra-precision machining technology[M]. Beijing: National Defense Industry Press, 2000:1-5.

[35] 杨辉.高效、极致——精密超精密加工技术的发展与展望[J].航空制造技术,2014(11):26-31.

YANG Hui. High efficient, perfection-development trend of ultra-precision machining technology[J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2014(11): 26-31.

[36] 张建明.现代超精密加工技术和装备的研究与发展[J].航空精密制造技术,2008,44(1):1-7.

ZHANG Jianming. Research and development of ultra-precision machining technology and equipment[J]. Aviation Precision Manufacturing Technology, 2008, 44(1): 1-7.

(责编 李丹)

(上接第128页)

Engineering, 2002,19(1):1-4.

[3] 张冰,陈立伟,陈永祥,等.离心试验在产品可靠性检验中的应用[J].环境技术,2014(5):44-47.

ZHANG Bing, CHEN Liwei, CHEN Yongxiang, et al. Application of centrifugal acceleration test in product reliability inspection[J]. Environmental Technology, 2014(5):44-47.

[4] FLEMING A J, LELAND Q H, YERKES K L, et al. Aircraft thermal management using loop heat pipes:experimental simulation of high acceleration environments using the centrifuge table test bed[R]. AFRL-PR-WP-TP-2007-208.

[5] DONG L L, YAN G R, LI R L. Electro-hydraulic servo system in the centrifuge field[J]. Chinese Journal of Mechanical Engineering, 2004, 17(2): 237-242.

[6] 王保乾.以离心机为主体的静态复合环境试验方法[J].环境技术,1993(4):13-16.

WANG Baoqian. Static combined environmental test methods based on centrifuge[J]. Environmental Technology, 1993(4): 13-16.

[7] 王保乾.对以离心机为主体的复合环境试验设备的探讨[J].环境条件与试验,1991(4):15-20.

WANG Biaoqian. Discussion about the static combined environmental test equipment based on centrifuge[J]. Environmental Conditions & Tests, 1991(4): 15-20.

[8] 董龙雷,闫桂荣,余建军,等.离心机振动台复合环境实验系统的隔振研究[J].应用力学学报,2002,19(1):23-26.

DONG Longlei, YAN Guirong, YU Jianjun, et al. Vibration isolation of the combined environments test system with centrifuge and vibration table[J]. Chinese Journal of Applied Mechanics, 2002, 19(1): 23-26.

[9] 鲁亮,周本权.基于 DDE 技术的温度试验系统[J].现代电子技术,2014(9):90-93.

LU Liang, ZHOU Benquan. Temperature test system based on DDE[J]. Modern Electronics Technique, 2014(9): 90-93.

[10] 沙占友.集成化智能传感器在环境监测中的应用[J].国外电子测量技术,2005,24(4):30-34.

SHA Zhanyou. Application of integrated intelligent sensor in environmental monitoring[J]. Foreign Electronic Measurement Technology, 2005, 24(4): 30-34.

[11] 王燕,方景林.过程检测与控制[M].北京:清华大学出版社,2009.

WANG Yan, FANG Jinglin. Process detection and control[M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2009.

(责编 海山)