



## 高钼含量镍基合金低成本非真空感应炉冶炼

王树财, 郭京, 吴智龙, 韩魁, 赵越, 陈秀强  
(抚顺特殊钢股份有限公司技术中心, 抚顺 113000)

**摘要:**基于抚顺特殊钢股份有限公司镍基合金生产平台,研究了“30 t非真空感应炉-炉外精炼-电渣重熔”工艺代替传统高成本工艺冶炼高钼含量镍基合金的可行性,并结合生产实际分析了生产效率和成本优势。结果表明,采用30 t非真空感应炉熔炼钢水, VOD吹氧脱碳后抽真空至67 Pa以下脱气冶炼工艺方案,成功实现了高钼含量镍基合金 N06625、N10276 产品的冶炼。电渣后的钢锭生产为204 mm锻材产品,化学成分、非金属夹杂物均满足行业标准要求,进一步提高了高钼镍基合金的生产保障及成本控制能力。

**关键词:**镍基合金; 非真空感应炉; VOD; 电渣重熔; 低成本冶炼

**DOI:**10. 20057/j. 1003-8620. 2024-00006 **中图分类号:**TF741. 7

## Low-cost Non-vacuum Induction Furnace Smelting of High Molybdenum Content of Nickel-base Alloy

Wang Shucui, Guo Jing, Wu Zhilong, Han Kui, Zhao Yue, Chen Xiuqiang  
(Technical Centre, Fushun Special Steel Co., Ltd., Fushun 113000, China)

**Abstract:** Based on the nickel-base alloy production platform of Fushun Special Steel Co., LTD., this paper studies the feasibility of "30 t non-vacuum induction furnace-external furnace refining-electroslag remelting" process instead of the traditional high cost process to smelt nickel-base alloys with high molybdenum content, and analyzes the production efficiency and cost advantages combined with the production practice. The results show that by degassing smelting process scheme with 30 t non-vacuum induction furnace was used to melt molten steel, VOD blowing oxygen and decarbonized after vacuum to below 67 Pa, and the smelting of nickel-base alloy N06625 and N10276 products with high molybdenum content was successfully realized. The steel ingot produced after electroslag is 204 mm forging products, the chemical composition and non-metallic inclusions meet the industry standard requirements, and further improve the production guarantee and cost control ability of high molybdenum nickel-base alloy.

**Key Words:** Nickel-base Alloy; Non-VIM; VOD; ESR; Low-cost Smelting

Ni-Cr-Mo 和 Ni-Cr-Mo-W 合金是用量最大和使用范围最广的镍基合金,因其含有较高的 Cr 和 Mo 元素,在氧化性介质及一些还原性介质中均表现出优良的耐蚀性,特别是在 F<sup>-</sup> 和 Cl<sup>-</sup> 等离子的氧化性酸中具有其他耐蚀合金无法比拟的独特耐蚀性能,如 N06625 合金。然而,高 Mo 的 Ni-Cr-Mo 合金的碳化物和金属间析出相又是导致其晶间腐蚀敏感性的根源,因此,1965 年推出了降低碳、硅含量的 N10276 合金,此合金能有效地缓解由 M<sub>6</sub>C 析出引起的晶间腐蚀问题<sup>[1-2]</sup>。由于以 N06625、N10276 为代表的高钼镍基合金具有良好的耐蚀、抗氧化、抗硫化性能,同时,还具备高的强度、塑性、韧性及焊接性,直接导致其在行业被广泛应用,使用需求也不断增加,而如何能够在保障产品冶金质量的前提下,提高合金生产效率、降低生产成本是急需解决

的问题。

通常高钼镍基合金的冶炼方法主要有:①真空感应炉-电渣重熔双联法;②真空感应炉-真空自耗炉双联法;③电弧炉-炉外精炼-电渣重熔法<sup>[3]</sup>。而对于目前国内冶金企业而言,“真空感应炉-真空自耗炉双联法”是上述三种冶炼方法中冶炼效率最低、成本最高的,因此,冶炼 N06625 和 N10276 合金最常用的方法为“①真空感应炉-电渣重熔双联法”或“③电弧炉-炉外精炼-电渣重熔法”。虽然方法①的真空感应冶炼存在较多优点,但生产效率相对较低,且受入炉原材料质量要求限制原材料成本相对较高;而方法③通常情况下生产效率高,且可以高效实现合金的超低碳(C≤0.02%)及高纯净度的需求,但电弧炉冶炼过程中 Cr、Ni、Mo 等合金元素烧损严重,金属收得率相对较低,导致成

本增加。

抚顺特殊钢股份有限公司(以下简称“抚顺特钢”)30 t VOD自2011年由INTECO公司进行改造后<sup>[4]</sup>,先后成功冶炼了N08028、N08825、G3、GH3044、GH3128、GH536、GH1016、GH3039、GH3030等镍基合金,积累了大量的生产实践经验。同时,结合抚顺特钢实际设备特点,成功研发了“30 t非真空感应炉-炉外精炼-电渣重熔”冶炼镍基和镍铁基高温合金的生产工艺。近年来,为了提高高钨含量镍基合金的生产效率,已将该工艺成功推广至N06625和N10276等合金的冶炼上,通过大量生产实践总结发现,该工艺不但可以有效提高产品的生产效率,还可以减少原材料消耗,降低其冶炼成本。

## 1 非真空感应-炉外精炼

### 1.1 非真空感应炉冶炼

#### 1.1.1 非真空感应冶炼化学成分控制

非真空感应炉由于合金收得率高、能源消耗低等因素,生产节奏控制灵活,早已广泛应用于特殊钢和特殊合金的冶炼<sup>[5]</sup>。但其脱碳、脱磷等冶金功能较差,因此,用于镍基合金冶炼时对原料的要求相对较高<sup>[6]</sup>。

GH3128、GH1140等合金自20世纪70年代发明至今,长期使用1 t非真空感应炉冶炼,该类镍基合金普遍含有较高的Cr、Mo、W等元素。近十年来,为

了提高非真空感应炉冶炼镍基合金效率和产品质量,成功开发了30 t非真空感应炉冶炼工艺;并在原材料的使用方面积累了大量的先进经验,先后开发了多个Ni、Cr、Mo、W、Nb等元素的中间合金。通过原材料的优化,不但可以有效提高镍基合金的冶炼效率,还可以降低磷和硫等有害元素含量。以产量相对较大的GH3030合金为例,采用30 t非真空感应炉和采用30 t电弧炉生产的合金成分对比见表1。

#### 1.1.2 生产效率和成本控制

从生产资源调配方面而言,通过实践对比电弧炉与非真空感应炉冶炼镍基合金的优缺点见表2。

通过对采用电弧炉和非真空感应炉生产镍基合金的金属收得率的统计,见表3,可见采用非真空感应冶炼的镍基合金的金属收得率可达到97.91%,比电弧炉工艺提高了4.82%,按吨钢原材料成本8万元计算,仅一次冶炼钢水收得率可降低成本约4 000元。

由于两种冶炼工艺所使用设备的工装存在显著差异,在耗材等原辅材料方面的消耗也可得到适当压缩。

采用非真空感应炉冶炼,由于不使用电极加热,电极消耗可降低92元/t;钢包冶炼时间比电弧炉降低20%,钢包成本可降低93元/t;由于不使用炉盖生产,所以炉盖消耗可降低11元/t。

表1 不同冶炼工艺GH3030合金的主要化学成分控制水平(质量分数)

冶炼工艺	C	Mn	Si	S	P	Cr	Al	Ti	Fe
非真空感应炉+VOD	0.064	0.41	0.30	0.001	0.004	20.42	0.06	0.38	0.44
电弧炉+VOD	0.062	0.39	0.26	0.001	0.003	20.38	0.06	0.33	0.54

表2 不同冶炼工艺在生产组织方面的优缺点

冶炼工艺	优缺点
电弧炉	1、受生产量的限制,镍基高温合金专用炉体利用率低,存在大量闲置时间,导致资源占用; 2、洗炉困难,易造成残余元素偏高的情况; 3、因电弧炉炉壁、炉盖残留物较多,金属损耗大,且后续品种接续困难。
非真空感应炉	1、不受产量限制,随时可以投入生产,可以保证生产的及时性; 2、洗炉过程易控制,不会造成残余元素偏高的问题; 3、炉体为整体打结炉体,不存在炉壁残留物问题、金属损耗小。

表3 不同冶炼工艺生产镍基合金的金属收得率

冶炼工艺	平均装入量/t	平均收得量/t	平均收得率/%
非真空感应炉+VOD	32.12	31.45	97.91
电弧炉+VOD	33.00	30.72	93.09

## 1.2 炉外精炼

抚顺特钢镍基合金的炉外精炼生产工艺有两个,分别为 LF 和 VOD,其中 LF 主要用于主元素调整(Cr、Ni、Mo、W、C)、脱硫、调整温度;VOD 则是用于吹氧脱碳及还原脱氧、氮,并根据实际生产进程适当调整合金温度和成分。

抚顺特钢现有 LF 和 VOD 联合工位设备主要技术参数见表 4。

VOD 配备了先进的 MTA 废气分析系统,可以在 VOD 脱碳过程中收集数据,分析废气成分,测量废气流量,并通过这些数据来评估 VOD 工艺过程,进而在生产控制中发挥指导作用<sup>[7]</sup>。同时,通过对近 10 年来镍基合金 VOD 脱碳数据的整理,总结了更具指导意义的废气曲线分析方法,可以保障吹氧过程的快速判断及准确控制,目前,镍基合金经 VOD 脱碳后可将碳含量控制在 0.005% 以下。

## 1.3 非真空感应炉和炉外精炼工艺优点

①原料中有害杂质少;②炉体为整体打结炉体,不存在炉壁残留物问题,金属损耗小,金属收得率高;③可以大量使用返回料,缓解镍基合金资源占用;④不受产量限制,随时可以投入生产,可以保证生产的及时性;⑤洗炉过程易控制,不会造成残余元素偏高的问题;⑥有利于电渣锭型及产能匹配;⑦产品范围广,特别适用于生产超低碳、高合金

比的镍基合金;⑧利于降低成本。

总之,从原料供给、金属消耗、工序成本等因素综合考虑,高 Mo 含量镍基合金选择“30 t 非真空感应炉-炉外精炼-电渣重熔”的生产工艺流程,不仅具备生产效率、机动性和灵活性优势,还具备低成本优势。

## 2 N06625 和 N10276 合金的冶炼

N06625、N10276 是高钼镍基合金中的典型牌号,用途广泛<sup>[8-10]</sup>。根据合金成分(见表 5)特点,优化了非真空感应炉配料方案:改纯金属料配料方案为 60% 以上的镍基合金返回料搭配成分合适的 Ni-Cr、Mo-Fe、Ni-Nb 等中间合金投产冶炼。冶炼采用非真空感应炉熔清合金钢液;LF 调整 Ni、Cr、Mo、Nb、C 等元素含量,并底吹氩气造还原渣脱硫;VOD 吹氧脱碳后抽真空至 67 Pa 以下脱气,并适当微调成分,合格后出炉浇注。在浇注前取样分析成品化学成分见表 5。

为保障合金的夹杂物水平,VOD 吹氧后造新渣,并采用氩气软吹去除非金属夹杂物;浇注后电极采用恒溶速电渣炉进行二次重熔冶炼,冶炼后化学成分满足标准要求,钢锭采用快精锻联合工艺锻造成  $\phi 204$  mm 棒材,对成品棒材取样检验非金属夹杂物,检验结果见表 6。

表 4 主要设备技术参数

Table 4 Technical parameters of the major equipment

设备	主要技术参数
LF	公称容量 30 t, 变压器额定功率 7 000 kVA, 升温速度 1~6 °C/min, 底吹氩
VOD	公称容量 30 t, 5 级真空泵, 极限真空度 < 20 Pa, 底吹氩

表 5 “非真空感应炉-炉外精炼”工艺冶炼 N06625 和 N10276 合金化学成分(质量分数)

Table 5 Chemical composition of N06625 and N10276 alloys by "IM-LF-VOD" process

钢种	项目	C	Mn	Si	S	P	Ni	Cr	W	Mo	Al	Ti	Fe
N06625	标准	≤0.050	≤0.50	≤0.50	≤0.015	≤0.015	≥58.00	20.00 23.00	-	8.00 10.00	≤0.40	≤0.40	≤5.00
	平均成分	0.014	0.14	0.20	0.0016	0.012	余	22.56	-	8.60	0.23	0.26	1.95
N10276	标准	≤0.018	≤1.00	≤0.19	≤0.030	≤0.040	余	14.50 16.50	3.00 4.50	15.00 17.00	-	-	4.00 7.00
	平均成分	0.007	0.49	0.05	0.001	0.009	余	16.15	3.30	15.33	-	-	6.50

表 6 N06625 和 N10276 合金非金属夹杂物检验结果

Table 6 Non-metallic inclusions test results in N06625 and N10276 alloys

钢种	A		B		C		D	
	粗系	细系	粗系	细系	粗系	细系	粗系	细系
N06625	0	0	0	0.5	0	0	0	1.0
N10276	0	0	0	1.0	0	0	0	1.0

3 结论

(1)与电弧炉相比,采用非真空感应炉生产镍基合金可以显著提高金属收得率,降低用料成本。

(2)从原料供给、金属消耗、工序成本等因素综合考虑,高 Mo 含量镍基合金选择“30 t非真空感应

炉-炉外精炼-电渣重熔”的生产工艺流程与电弧炉工艺相比,不仅有较高的生产效率,而且具有机动、灵活以及低成本的优势。

(3)“30 t非真空感应炉-炉外精炼-电渣重熔”工艺适用于 N06625 合金和 N10276 合金的大规模、低成本生产,产品冶金质量满足相关标准要求。

参考文献

[1] 康喜范. 镍及其耐蚀合金, [M]. 北京:冶金工业出版社:2016. : 204-307.

[2] 陆世英. 超级不锈钢和高镍耐蚀合金, [M]. 北京:化学工业出版社: 2012:548-561.

[3] 孟凡国, 董建新, 张麦仓, 等. 油井管用镍基耐蚀合金的两种冶炼工艺比较[J]. 世界钢铁, 2013, 13(4): 41-45.

[4] 周伟基, 王海江, 魏仁杰, 等. T91 钢 VOD 冶炼工艺研究[C]. 第十七届(2013年)全国炼钢学术会议论文集(A卷). 杭州, 2013: 422-426.

[5] 王振东, 曹孔健, 何纪龙. 感应炉冶炼[M]. 北京:化学工业出版社, 2007: 28.

[6] 唐琳, 刘仕良, 杨波, 等. 中频感应炉生产镍铬铁[J]. 铁合金, 2007, 38(2): 5-9+18.

[7] 张金鑫, 李宏, 张炯明, 等. MTA 废气分析在 VOD 脱碳过程中的应用[J]. 中国冶金, 2018, 28(9): 23-27.

[8] 刘海定, 王东哲等. 高性能镍基耐蚀合金的开发进展[J]. 材料导报 A: 综述篇, 2013(3): 99-105.

[9] 谢锡善, 董建新, 胡尧和, 等. 铁镍基高温耐蚀合金的研究与发展[J]. 世界钢铁, 2009, 9(1): 50-55.

[10] 林黎颖. Hastelloy 系耐蚀合金的性能及其应用[J]. 腐蚀与防护, 1997, 18(5): 20-23.

《特殊钢》期刊官方投稿网站

www.specialsteeljournal.com

地址:湖北省黄石市黄石大道 316 号、大冶特殊钢有限公司《特殊钢》杂志社

邮编:435001 咨询电话:15961618632 19371518672 0510-80673212

《特殊钢》编辑部邮箱:E-mail:tsghs@sina.com