

真空感应熔炼核级 316H 不锈钢氮含量变化规律研究

王春辉^{1, 2}, 李龙飞¹, 宋 波², 杨 勇¹, 王 宁¹

(1. 钢铁研究总院有限公司 冶金工艺研究所, 北京 100081;

2. 北京科技大学冶金与生态学院, 北京 100083)

摘要: 为解决316H奥氏体不锈钢在真空冶炼过程中钢液控氮困难, 需反复采用合金增氮, 导致冶炼周期长、冶炼成本高的问题, 本研究以高纯金属及合金为原料, 利用50 kg真空感应炉熔炼316H不锈钢。通过控制不同的熔炼气氛、熔炼压力以及不同类型的增氮用氮化合金, 探究其对钢液氮含量的影响规律, 并分析真空冶炼过程中脱氮反应的热力学和动力学规律。结果表明: 在恒定的压力条件下, 氮在钢中的溶解度会随着温度的升高而增加; 当添加等量的合金元素时, 压力相比温度对氮溶解度的影响更大。合金液中的平衡氮含量会随真空度的提高和冶炼温度的上升而减少, 且高真空度下真空度的变化对平衡氮含量变化的影响更大。在氮气保护和同等熔炼压力下, 使用氮化锰作为添加剂, 其增氮效果优于氮化铬。在1 600 ℃冶炼温度、50 kPa氩气真空压力和50 kPa空气真空压力条件下, 真空感应熔炼316H不锈钢的脱氮反应均以钢液内部向液相边界层传质为限制性环节, 且反应更符合一级反应动力学规律, 传质系数分别为 0.35×10^{-3} cm/s、 -0.858×10^{-4} cm/s。同时, 氮含量在0.042%~0.044%的小范围内变化。

关键词: 316H奥氏体不锈钢; 真空感应熔炼; 控氮; 脱氮热力学; 脱氮动力学; 氮化合金; 氮溶解度

中图分类号: TF764; TG142.71 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-4977 (2026) 07-0746-07

DOI: 10.27014/j.cnki.zhuzao.2026.0095

Study on the Variation of Nitrogen Content in Vacuum Induction Melted Nuclear-Grade 316H Stainless Steel

WANG Chun-hui^{1, 2}, LI Long-fei¹, SONG Bo², YANG Yong¹, WANG Ning¹

(1. Metallurgical Process Research Institute, China Iron & Steel Research Institute Co., Ltd., Beijing 100081, China;

2. School of Metallurgy and Ecology, University of Science and Technology Beijing, Beijing 100083, China)

Abstract: To address the issue that it is difficult to control the nitrogen content in 316H austenitic stainless steel melt during vacuum smelting, which requires repeated addition of nitrogen-increasing alloys, leading to long smelting cycles and high costs, this study uses high-purity metals and alloys as raw materials to melt 316H stainless steel in a 50 kg vacuum induction furnace. The effects of different melting atmospheres, melting pressures, and types of nitrogen-increasing alloys on the nitrogen content in the molten steel were investigated. Additionally, the thermodynamic and kinetic behaviors of the denitrogenization reaction during the vacuum smelting were analyzed. The results show that under constant pressure, the solubility of nitrogen in steel increases with increasing temperature; when equal amounts of alloying elements are added, pressure has a greater impact on the nitrogen solubility than temperature. The equilibrium nitrogen content in the alloy melt decreases with an increase in the vacuum degree and smelting temperature, and the changes in vacuum degree have a greater effect on the equilibrium nitrogen content under high-vacuum degree conditions. Under nitrogen protection and the same melting pressure, using manganese nitride as an additive has a better nitrogen-increasing effect than using chromium nitride. Under the conditions of a smelting temperature of 1 600 ℃, a 50 kPa argon vacuum pressure and a 50 kPa air vacuum pressure, the denitrogenization reactions during vacuum induction melting of 316H stainless steel are both limited by mass transfer from the interior of the molten steel to the liquid-phase boundary layer, and the reactions follow first-order reaction kinetics, with the mass transfer coefficients of 0.35×10^{-3} cm/s and -0.858×10^{-4} cm/s, respectively. Meanwhile, the nitrogen content varies within the small range of 0.042% to 0.044%.

基金项目: 中央企业自主投入基金项目 (集 23161230)。

收稿日期: 2025-11-18 收到初稿, 2026-03-09 收到修订稿。

作者简介: 王春辉 (1999-), 男, 硕士生, 研究方向为特种不锈钢。E-mail: 18246004635@163.com

通信作者: 李龙飞, 男, 博士, 高级工程师。E-mail: aifei_0105@126.com

引用格式: 王春辉, 李龙飞, 宋波, 等. 真空感应熔炼核级 316H 不锈钢氮含量变化规律研究 [J]. 铸造, 2026, 75 (7): 746-752.

Wang Chunhui, Li Longfei, Song Bo, et al. Study on the variation of nitrogen content in vacuum induction melted nuclear-grade 316H stainless steel [J]. Foundry, 2026, 75 (7): 746-752.

Key words: 316H austenitic stainless steel; vacuum induction melting; nitrogen control; denitrogenization thermodynamics; denitrogenization kinetics; nitrogen-containing alloy; nitrogen solubility

含氮不锈钢在多个方面优于传统不锈钢,应用广泛。首先,其性能表现为显著提升了传统不锈钢的强度、韧性和耐腐蚀性,是高性能不锈钢的重要发展方向。因此,在石油化工、医疗器械、船舶桥梁及航空航天等行业备受青睐^[1-4]。其次,其性能提升的机理在于:氮作为合金元素,原子半径较小,在基体中的固溶度大,可通过强烈的固溶强化作用同步改善材料的强度、塑韧性和耐腐蚀性^[5-8]。与普通不锈钢相比,含氮不锈钢表现出更卓越的抗点蚀性能^[9-14]。氮提高不锈钢抗点蚀能力是一个多机制协同作用的结果:氮通过促进形成富Cr的致密、稳定的钝化膜,提高抵抗氯离子侵入屏障的能力;在点蚀坑内缓冲酸化形成 NH_4^+ ,提高局部pH,创造钝化条件^[15]。此外,氮协同Mo形成Mo-N化合物,覆盖活性点,大幅提高点蚀形核难度,显著增强材料的再钝化能力,从而提高不锈钢的抗点蚀性能^[16-17]。这些机理的叠加使得添加少量氮就能带来不锈钢抗点蚀性能的显著提升,氮成为开发高性能不锈钢不可或缺的关键元素。此外,氮元素还能减轻铬、镍等合金元素在两相中分布的差异,从而有效抑制基体贫铬现象的发生^[18-19]。氮也是强力的奥氏体形成元素,其稳定奥氏体的能力甚至高于镍。在保证奥氏体相稳定的前提下,通过以氮代镍,可大幅减少昂贵镍的用量^[20-23]。

核级等高级别的316H不锈钢,因其需满足高洁净度、成分窄窗口控制以及低元素偏析等严格的冶金质量控制要求,通常采用真空感应+真空自耗的双真空特种冶金工艺制备^[24]。在316H不锈钢的真空冶炼过程中,合金化后冶炼气氛中氮分压低,钢液增氮困难,往往需凭借经验加入CrN合金增氮并反复取样确认。一方面,生产成品率较低;另一方面,即便冶炼出合格铸锭,但冶炼周期过长,这两方面均造成了冶炼成本的大幅增加^[25]。

核级316H不锈钢的氮含量控制在0.04%~0.045%,目标值为0.042%,控制范围极为严格。氮的强化作用主要源于其作为间隙原子固溶于基体。此外,由于316H钢中的主要合金元素铬与氮之间存在较强的亲和力,这也对氮的行为和强化效果产生了重要影响^[26-27]。采用氮化铬进行渗氮工艺时,需要在氮化铬加入前在真空感应炉内充入一定压力的氮气或者氩气进行保护;同时,该工艺存在着带入各种杂质、导致成分不均匀和成本高等诸多缺点^[25, 28]。彭雷朕等人^[29]开展了控氮工艺研究,在30 kg真空感应炉冶炼含氮合金钢9Cr (0.01%~0.03%N),采用充入不同压力的氮气进

行保护的渗氮工艺,发现采用6 kPa的氮分压,渗氮时间约为15 min,能够保证9Cr钢中氮含量在目标范围内。

袁晓光等人^[30]研究了真空感应炉内氮气分压不同对马氏体不锈钢含氮量的影响。本研究通过采用不同气体作为保护气氛,系统探讨了它们对马氏体不锈钢中氮元素收得率的影响,并建立了氮分压与熔体氮溶解度之间的经验关系式,从而为精确控制含氮马氏体不锈钢的氮含量提供了理论依据。王育飞等人^[31]通过50 kg真空感应炉试验,系统探讨了熔炼气氛、压力及氮化合金类型对氮收得率的作用规律。研究发现,在氩气保护与相同熔炼压力条件下,采用氮化锰的增氮效果优于氮化铬。然而,对于316H不锈钢,其氮含量受不同保护气氛、压力以及渗氮处理时间等因素的影响同样缺乏系统研究。

本课题以核级316H不锈钢为例,通过理论计算与热态试验的研究方法,探究不同真空熔炼条件对钢液中氮含量变化规律的影响,建立钢液氮含量控制动力学模型,进一步制定出高效、低成本及稳定生产控氮型不锈钢的工艺制度。这将为新型控氮型合金钢的开发设计及工业化生产提供冶炼工艺方面的理论指导和技术支撑。

1 试验材料与方法

1.1 试验材料

316H不锈钢真空感应炉冶炼用原材料为高纯金属或合金,主要包括电解镍(99.98% Ni)、金属铬(99.44% Cr)、光电碳(98.50% C)、纯铁(99.95% Fe)、金属钼(99.80% Mo)、金属铜(99.99% Cu)、金属铝(99.62% Al)、高纯硅(99.14% Si)、硼铁(80.76% B、18.57% Fe)、氮化铬(11.04% N、87.32% Cr)和氮化锰(9.85% N、90.15% Mn)等。根据各元素收得率,拟冶炼316H不锈钢及对冶炼后合金锭化学检测的化学成分,如表1所示。按照20 kg的装炉量。

1.2 试验方法

合金料入炉量及加入顺序如表2、表3所示。真空感应炉的装料顺序为:先加入工业纯铁、光电碳、金属铬块、高纯硅、金属镍板、金属铜和金属钼棒。易与氧反应的金属铝粒、氮化铬和硼铁合金,依次在真空感应熔炼的合金化阶段加入。其中,表4中组号10的

表1 316H不锈钢的目标成分及实测成分
Tab. 1 Target and actual measured compositions of the 316H alloys

项目	C	Mn	Si	P	S	Cr	Mo	Ni	Al	H	N	O	Cu	Fe
上限	0.055	1.8	0.65			19.5	2.5	13.5			0.065			64
下限	0.05	1.4	0.35	0.008	0.03	18.5	2.2	12	0.025	1*	0.045	30*	0.1	63

*注：H、O的含量分别为 1×10^{-6} 、 30×10^{-6} 。

表2 CrN增氮各类合金原料入炉量及加入时间
Tab. 2 The charging amounts and timing of various alloy raw materials through nitrogen pickup via CrN addition

合金料名称	合金料纯度/%	入炉量/kg	加入时间
电解镍	99.98	2.600	冷态装入
金属铬	99.44	3.850	
光电碳	98.50	0.002	
工业纯铁	99.95	12.810	
金属钼	99.80	0.480	
高纯硅	99.14	0.120	
金属铜	99.99	0.010	
电解锰	98.00	0.350	合金化期第一次加入
铝粒	99.62	0.005	
硼铁	B 18.57、Fe 80.76	0.001	
氮化铬	N 11.04、Cr 87.32	0.130	
光电碳	98.5	0.011	
合计		20.369	

表3 MnN增氮各类合金原料入炉量及加入时间
Tab. 3 The charging amounts and timing of various alloy raw materials through nitrogen pickup via MnN addition

合金料名称	合金料纯度/%	入炉量/kg	加入时间
电解镍	99.98	2.600	冷态装入
金属铬	99.44	3.736	
光电碳	98.50	0.002	
工业纯铁	99.95	12.810	
金属钼	99.80	0.480	
高纯硅	99.14	0.120	
金属铜	99.99	0.010	
电解锰	98.00	0.200	合金化期第一次加入
铝粒	99.62	0.005	
硼铁	B 18.57、Fe 80.76	0.001	
氮化锰	N 9.85、Mn 90.15	0.168	
光电碳	98.5	0.011	
合计		20.143	

MnN加入量的氮含量，与前9组的氮含量保持一致。

炉料在真空环境下加热升温，直至全部熔化，随即降低电功率，进入精炼期。在精炼期内，根据不同组的要求，调整保护气氛及压力。当炉内炉料温度达到稳定后，将取出的第一个样品的时间记作0时，并将

表4 各对照组变量因素控制条件变化
Tab. 4 The changes in variable factor control conditions for each control group

组号	保护气氛	真空度/kPa	增氮合金类型
1	氩气	10	CrN
2	氩气	30	CrN
3	氩气	50	CrN
4	空气	10	CrN
5	空气	30	CrN
6	空气	50	CrN
7	氮气	10	CrN
8	氮气	30	CrN
9	氮气	50	CrN
10	氮气	30	MnN

此样品标记为1[#]。之后，每隔10 min依次取样，并分别标记为2[#]、3[#]、4[#]和5[#]样品。合金化结束后，调整到合适的温度，然后开始浇注，并将铸锭在真空环境中保持15 min。试验过程中的样品是从炉盖上一个由插板阀与熔炼室隔离的独立真空空间取样获取的。如表4所示，更换试验条件，重复10组试验。最后，通过机械加工，从所有过程样品及最终铸锭上制备出尺寸为 $\Phi 5\text{ mm} \times 30\text{ mm}$ 的气体分析试样。

对过程样品取金属屑和气体棒，采用红外吸收法检测过程样品中C、O元素的成分；采用热导法检测过程样品中N元素的成分。对终点316H不锈钢钢锭样品取金属屑和气体棒，检测钢锭中的全元素成分。

2 结果及分析

2.1 钢液增氮方式

目前，含氮不锈钢的制备常采用真空感应炉冶炼工艺，主流的增氮工艺包括氮气气氛加压增氮与添加氮化合金两类，其原理分述如下：

式（1）所示的氮气气氛增氮法，是向炉内充入加压氮气。氮气分子（ N_2 ）在钢液表面吸附并分解为氮原子（N），这些原子随后溶入钢液内部，或以自由态存在，或与合金元素结合形成氮化物。

氮化合金增氮法式（2）是在适当脱氧、脱硫后，

向钢液加入氮化物,其通过直接溶解或分解后溶解,所引入的自由氮原子既可形成新氮化物,也可结合为氮分子逸出。

$$\frac{1}{2}\text{N}_{2(\text{g})}=[\text{N}] \quad (1)$$

$$\text{M}_x\text{E}=\text{X}[\text{M}]+[\text{N}] \quad (2)$$

式中: $[\text{N}]$ 为氮在钢中的溶解度; M_xE 为氮化物。

2.2 氮在钢液中的溶解

研究表明,在低氮钢的冶炼过程中,当氮气压低于0.1 MPa时,氮在钢液中的溶解度遵循西华特(Sievert)定律,可由公式(3)表示。

$$\lg[\text{N}]=\frac{1}{2}\lg p_{\text{N}_2}-\lg \frac{188}{T}-1.25-\left\{\left(\frac{3280}{T}-0.75\right)\sum_{j=1}^n e_N^j[j]\right\} \quad (3)$$

式中: $[\text{N}]$ 为氮在钢液中的溶解度,%; p_{N_2} 为炉内氮气压,MPa; T 为钢液的热力学温度,K; e_N^j 为钢液中合金元素 j 对氮的相互作用系数; $[j]$ 为合金元素 j 的质量分数,%。

表5为1 600 °C时316H不锈钢钢液中其他合金元素对氮的活度相互作用系数^[28],将表5的数据带入式(3)可计算钢液氮溶解度。由式(3)可知,钢液氮溶解度主要关联温度、氮分压与合金成分。当成分与温度一定时,溶解度与氮分压的平方根成正比,且此效应显著;当成分与氮分压一定时,溶解度随温度升高而降低,但温度的影响相对较弱。

表5 1 600 °C时316H不锈钢钢液中元素 j 对氮的活度相互作用系数

Tab. 5 The activity interaction coefficients of element j with nitrogen in the 316H stainless steel melt at 1 600 °C

元素 j	e_N^j
C	0.09
Al	0
Ni	0
Cu	0.016
Si	-0.047
Mo	-0.043
Mn	-0.051
Fe	-0.021
Cr	-0.1

在假设316H不锈钢的化学成分取表1中各元素范围中值的基准上,结合表5所列的合金元素对氮的相互作用系数,即可计算得到钢液氮溶解度与炉气氮分压及钢液温度之间的定量关系。

由图1和图2可知,氮的溶解度受温度和氮分压的共同影响。具体表现为:在温度一定的条件下,溶

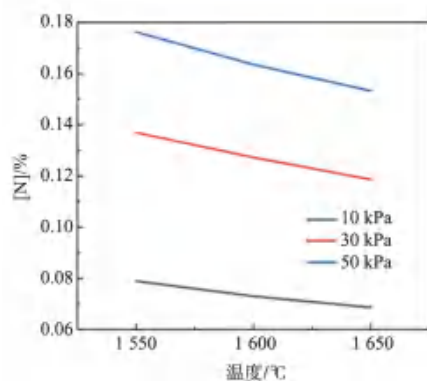


图1 不同氮分压下氮溶解度受温度影响变化情况

Fig. 1 The variation in nitrogen solubility with temperature under different nitrogen partial pressures

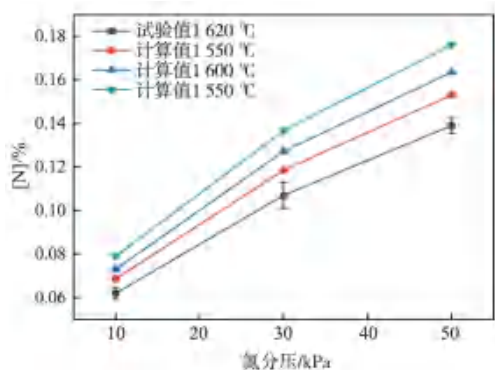


图2 理论计算与实际试验过程中不同压力氮含量

Fig. 2 The nitrogen contents at different pressures during theoretical calculation and practical testing processes

解度随氮分压的升高而增大;而在氮分压一定的条件下,溶解度则随温度的升高而降低。

相较于温度,气相中的氮分压是影响钢液氮溶解度的主要因素。这主要是因为较高的氮分压会直接增大氮原子向钢液内部的扩散驱动力,从而显著提高其溶解度,而温度的影响则相对次要。

图2显示理论计算值高于试验值,其原因主要源于实际条件与理论假设的偏差。理论计算忽略了实际钢液中存在的氧、硫等表面活性元素的阻碍作用,这些杂质会抑制氮在气-液界面的吸附与溶解过程。此外,理论模型假设的剧烈搅拌条件在本试验中因功率干扰而未能实现,导致钢液表面更新不足,熔体内部传质受限,使得整体氮含量无法达到理论饱和度。

2.3 真空脱氮反应动力学分析

为了掌握真空感应冶炼316H不锈钢中氮元素含量变化的动力学规律,在熔炼进入精炼期后,每隔10 min取一次过程样,共取5次样,分别为1[#]、2[#]、3[#]、4[#]和5[#]样品。图3展示了在精炼期,以氩气、氮气作为保护气氛以及不通入保护气氛的情况下,分别在10 kPa、30 kPa

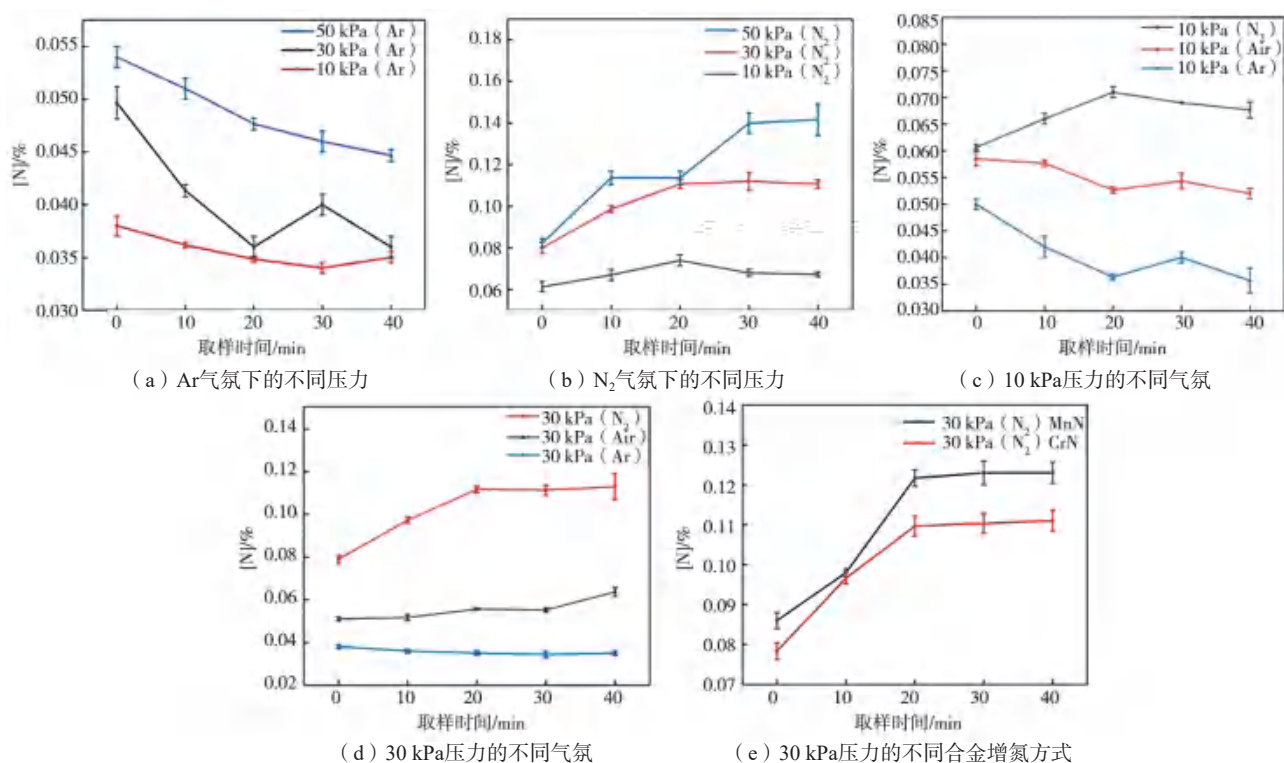


图3 不同条件下316H不锈钢在真空感应精炼过程中氮含量的演变规律

Fig. 3 Evolution of nitrogen content in the 316H stainless steels during vacuum induction refining under different conditions

和50 kPa压力条件下,五次取样的氮含量变化。从图3(a)和(b)的结果可以看出,在精炼期充入氩气作为保护气氛时,氮含量随精炼时间下降;而通入氮气作为保护气氛时,氮分压越高,氮含量越高,但增幅缓慢。试验观测到,合金熔体中的实际氮含量低于热力学计算得到的、试验条件下316H不锈钢对应的平衡氮溶解度。

对316H不锈钢真空脱氮反应过程,如图4所示,其中包括五个步骤:①钢液中溶解的氮[N]由钢液内部向液相边界层传输;②随后,[N]穿过液相边界层至气-液界面;③在气-液界面处发生化学反应,两个氮原子结合形成一个氮分子(N₂);④N₂分子在气相边界层内

扩散;⑤最终,N₂离开边界层进入气相区。

由于感应炉真空系统对炉气具有强大的抽离作用,使得步骤①、③、④和⑤的速率极快,因此它们均不构成脱氮过程的限制性环节。对于316H不锈钢而言,其脱氮动力学由步骤②,即氮从钢液内部向液相边界层的传质过程所控制。当保护气氛为氩气时,脱氮反应全程正向进行,充入感应炉的氩气压强越高,终点氮含量相对越高。而当充入氮气作为保护气氛时,在10 kPa氮气压力条件下,脱氮反应在精炼期前20 min逆向进行,随后脱氮反应开始正向进行,终点氮含量达到了0.066%;而在氮气压力为30 kPa和50 kPa时,脱氮反应逆向进行,终点氮含量分别达到了0.011%和0.014%。此外,在精炼期,通过炉体针形调节阀进行放气操作,并控制炉内压力为50 kPa。在精炼期内,钢液氮含量均在0.040%~0.045%的小范围内波动,结果如图5所示,且终点氮含量与精炼初始样品相同。此处,50 kPa空气压力与通入39 kPa纯氮气条件下的氮分压相同。进而,由式(3)可计算得到钢液中氮平衡溶解度为0.1549%,该值高于精炼开始阶段钢液氮含量,脱氮反应应逆向进行。但是,实际精炼期钢液氮含量处于小范围动态平衡状态。这是由于在1 600 ℃冶炼高温的空气气氛中,氧气与氮气易发生反应,生成氮氧化物,消耗了氮源;同时,钢液表面易发生氧化反应,形成的氧化膜阻碍了氮原子的溶解。综合以

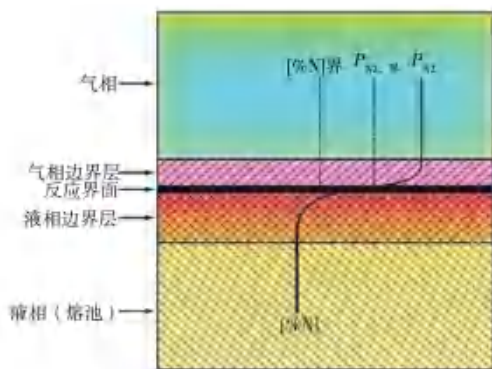


图4 熔炼脱氮反应机理示意图

Fig. 4 Schematic diagram of the nitrogen removal reaction mechanism in smelting

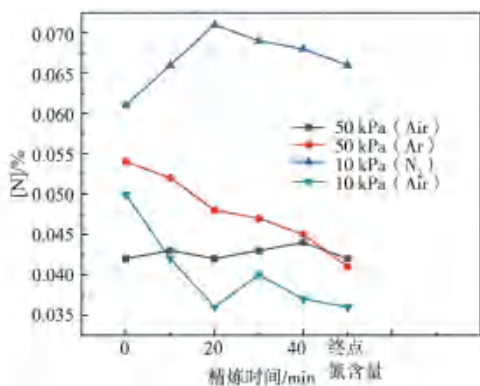


图5 精炼期316H不锈钢氮含量变化规律

Fig. 5 Variation of nitrogen content in the 316H stainless steels during the refining periods

上因素,使得在此气氛压力条件下,316H不锈钢钢液氮含量实现了窄窗口稳定控制。

此外,在其他条件相同的情况下,添加与CrN相同N含量的MnN来替代CrN,由图3(e)可知,氮化锰对钢液的增氮效率显著高于氮化铬。这是因为氮化锰的分解温度约950℃、熔化温度约1200℃均显著低于氮化铬的分解温度约1200℃、熔化温度约1600℃,使其在钢液中能更快释放氮原子。此外,在真空冶炼时,熔炼压力越大,氮气从钢液中的逸出速率越小,因此氮的收得率越高^[32]。鉴于钢液温度远高于氮化物的分解温度,且氮化锰的分解与熔化温度均低于氮化铬,其加入后能迅速分解熔化。这不仅缩短了它在钢液中的停留时间,更有效抑制了氮气的挥发,从而使更多氮原子固溶于钢中,显著提高最终氮含量。因此,为有效提升氮收得率,必须对熔炼压力、氮化合金种类及其停留时间进行协同控制。

首先,根据精炼期氮含量随时间的变化数据,通过积分法推导出脱氮反应的反应级数。进而,在假设其遵循一级反应动力学的前提下,将脱氮速率表述为式(4)。该式经积分后可获得式(5)。

$$-\frac{d[\%N]}{dt} = \frac{A}{V(t)} k_{a1} [\%N] \quad (4)$$

$$\ln \frac{[\%N]_0}{[\%N]_t} = \frac{A}{V(t)} k_{a1} t \quad (5)$$

若316H不锈钢的真空脱氮反应遵循二级反应动力学规律,则其脱氮速率可用式(6)描述。对式(6)进行积分运算,即可得到式(7)。

$$-\frac{d[\%N]}{dt} = \frac{A}{V(t)} k_{a2} [\%N]^2 \quad (6)$$

$$\frac{1}{[\%N]_t} - \frac{1}{[\%N]_0} = \frac{A}{V(t)} k_{a2} t \quad (7)$$

式中: k_{a1} 为脱氮一级反应的表现速率常数; k_{a2} 为脱氮二级反应的表现速率常数;[%N]为氮的质量分数;

$[\%N]_t$ 和 $[\%N]_0$ 分别为 t 时刻与初始时刻(0时刻)合金液中氮的质量分数; A 为反应界面气-液接触面积; $V(t)$ 为合金液体积随时间变化瞬时体积。

精炼期不同时刻的脱氮反应动力学参数,是根据真空感应熔炼试验数据,采用公式(5)和(7)计算得出的,具体结果示于表6。利用表6中的数据,在1600℃、50kPa氩气压力下真空感应熔炼316H钢时,其脱氮反应的限制性环节为钢液内部至液相边界层的传质过程,并且该过程符合一级反应动力学规律,传质系数为 0.35×10^{-3} cm/s。当在1600℃冶炼温度50kPa空气气氛条件下,传质系数为 -0.858×10^{-4} cm/s。由于氮分压升高使界面平衡浓度 $[\%N]_{eq}$ 接近甚至超过钢液本体浓度 $[\%N]_{bulk}$,脱氮反应逆向进行,导致传质系数为负值。

表6 不同时期316H不锈钢脱氮动力学参数数据
Tab. 6 Kinetic parameter data of nitrogen removal in the 316H stainless steel during different periods

t/min	$\ln ([\%N]_0/[\%N]_t)$	$1/[\%N]_t - 1/[\%N]_0$
0	-	-
10	0.378	0.7123
20	0.117 8	2.3148
30	0.138 6	2.7581
40	0.182 3	3.7037

3 结论

(1)在相同合金体系条件下,气相渗氮与渗氮压力、渗氮时间、渗氮温度有关,其中316H不锈钢的氮含量受氮分压影响最大。在不同渗氮压力条件下,316H不锈钢氮含量的热力学理论计算值高于实际测量值。产生这一差异的主要原因是受到动力学条件的制约,即液相边界层的传质过程成为限制环节,导致气相渗氮效率降低。

(2)在氮气保护且相同熔炼压力下,氮化锰的增氮效果显著优于氮化铬。具体而言,当熔炼压力为30kPa时,采用氮化锰可使氮的收得率提升约9%。在氩气气氛下,当氮气压力为10kPa时,脱氮反应先逆向进行,随后正向进行;当氮气压力达到30kPa以上时,精炼期脱氮反应逆向进行,达到平衡之后不再变化。

(3)在1600℃、50kPa氩气为保护气氛的真空条件下,传质系数为 0.35×10^{-3} cm/s;50kPa空气气氛条件下,反应传质系数为 -0.858×10^{-4} cm/s。在该条件下,氮含量可以稳定保持在0.042wt.%~0.044wt.%范围内,达到控氮要求。

参考文献:

- [1] 李兵兵, 郎宇平, 陈海涛, 等. 超级奥氏体不锈钢的发展 [J]. 中国冶金, 2022, 32 (6): 54-60.
- [2] Dai J, Feng H, Li H B, et al. Nitrogen significantly enhances corrosion resistance of 316L stainless steel in thiosulfate-chloride solution [J]. Corrosion Science, 2020, 174: 108792.
- [3] Tian H, Wang J, Liu Z, et al. Effect of nitrogen on the corrosion resistance of 6Mo super austenitic stainless steel [J]. Metals, 2024, 14 (4): 7-9.
- [4] Gao Fengyin, Qiao Yanxin, Chen Jian, et al. Effect of nitrogen content on corrosion behavior of high-nitrogen austenitic stainless steel [J]. npj Materials Degradation, 2023, 7 (1): 14-15.
- [5] Zhao F, Liu X H, Zhang Z H, et al. Effect of nitrogen content on the mechanical properties and deformation behaviors of ferritic-pearlitic steels [J]. Materials Science & Engineering A, 2022, 855 (1): 3-5.
- [6] 袁超, 郭建亭, 李谷松, 等. 铸造高温合金中氮的影响机理与控制 [J]. 中国有色金属学报, 2011, 21 (4): 46-47.
- [7] 冯志慧, 李静媛, 王一德. 经济型双相不锈钢2101中氮化物在基体中的平衡固溶度计算 [J]. 工程科学学报, 2016, 38 (12): 61-65.
- [8] 么洪勇. 钒微合金化钢中碳氮化钒固溶度积研究 [J]. 铸造技术, 2017, 38 (12): 35-38.
- [9] 安朋亮, 梁平, 任建民, 等. 高氮奥氏体不锈钢点蚀行为的电化学噪声特征 [J]. 中国腐蚀与防护学报, 2018, 38 (1): 26-32.
- [10] 安朋亮, 梁平, 张云霞, 等. 高氮奥氏体不锈钢耐点蚀性能研究 [J]. 材料保护, 2017, 50 (7): 48-52.
- [11] 华晓春, 黄国辉, 左竞成, 等. 控氮型不锈钢316LN在含氯介质中的点蚀行为 [J]. 机械科学与技术, 2024, 43 (6): 91-93.
- [12] 吴彪, 李刚, 宋帅男, 等. 不同氮含量电弧增材制造不锈钢点蚀和电化学腐蚀行为研究 [J]. 材料科学与工艺, 2025, 33 (5): 38-42.
- [13] 吴浩, 徐桂芳, 严羽, 等. 新型高氮低镍奥氏体不锈钢的点蚀性能 [J]. 金属热处理, 2015, 40 (12): 6-11.
- [14] 徐桂芳, 王志隆, 刘文通. 氮含量对新型奥氏体不锈钢电化学响应及点蚀行为的影响 [J]. 热加工工艺, 2023, 52 (16): 5-7.
- [15] Ning K, Miao F, Liu F D, et al. Research on the mechanism of the influence of chromium and nitrogen elements on the formation of the passivation film on the surface of high-nitrogen steel [J]. Int. J. Quantum Chem., 2025, 125 (7): e70037.
- [16] 陈德香, 黄俊霞, 才箴. 氮对SUS301L不锈钢耐蚀性影响的探讨 [J]. 上海金属, 2013, 35 (6): 6-11.
- [17] Li B, Lang Y, Chen H, et al. Combined role of molybdenum and nitrogen in limiting corrosion and pitting of super austenitic stainless steel [J]. Heliyon, 2024, 10 (4): e25964.
- [18] 薄鑫涛. 含氮奥氏体不锈钢 [J]. 热处理, 2020, 35 (6): 45-46.
- [19] 左娟, 麻季冬, 杨益航, 等. 高强度含氮奥氏体不锈钢研究现状与发展趋势 [J]. 海峡科学, 2023 (1): 57-58.
- [20] 曲青博, 王星星, 施建军, 等. 高氮无镍不锈钢研究进展及应用 [J]. 精密成形工程, 2025, 17 (8): 94-99.
- [21] 邹兴政, 王宏, 张十庆, 等. 新型医用高氮无镍不锈钢 [J]. 材料导报, 2012, 26 (S1): 254-257.
- [22] Ahmed A, Ghali S N, Eissa M, et al. Influence of partial replacement of nickel by nitrogen on microstructure and mechanical properties of austenitic stainless steel [J]. Journal of Metallurgy, 2011 (1): 639283.
- [23] Zhang W, Li L, Huang C, et al. Achieving homogeneous microstructure and superior properties in high-N austenitic stainless steel via a novel atmosphere-switching method [J]. Metals, 2024, 14 (7): 795-798.
- [24] Xiang Changshu, Wang Xiaofeng, Yang Jun, et al. Preparation of high-quality 316H austenitic stainless-steel powder by electros slag remelting and plasma-rotating electrode process [J]. Powder Metallurgy and Metal Ceramics, 2021, 60 (11): 653-661.
- [25] 王明波, 刘海定, 黄国平, 等. 真空感应炉冶炼含氮316L不锈钢的控氮工艺研究 [J]. 材料导报, 2013, 27 (S2): 359-362.
- [26] 袁梦雨, 韦春贝, 陈玲, 等. 渗铬温度对304不锈钢渗氮与渗铬复合渗层组织与性能的影响 [J/OL]. 摩擦学学报 (中英文), 1-19. <https://link.cnki.net/urlid/62.1224.o4.20251013.1551.008>.
- [27] 胡培媛, 赵品, 付瑞东, 等. 固溶渗氮与盐浴渗铬复合处理渗层的组织与性能 [J]. 金属热处理, 2008, 33 (12): 5-9.
- [28] 时彦林, 包燕平, 崔衡, 等. 316L不锈钢中氮气合金化行为 [J]. 北京科技大学学报, 2014, 36 (S1): 151-163.
- [29] 彭雷朕, 姜周华, 耿鑫, 等. 真空感应炉冶炼含氮高合金钢控氮工艺 [C]// 中国金属学会. 第十一届中国钢铁年会论文集——S02. 炼钢与连铸. 东北大学材料与冶金学院, 2017: 457-463.
- [30] 袁晓光, 鲁海龙, 黄宏军. 含氮马氏体不锈钢氮含量控制的研究 [J]. 沈阳工业大学学报, 2007 (3): 254-258.
- [31] 王育飞, 徐于斌, 张福利, 等. 真空感应炉冶炼含氮不锈钢的控氮工艺研究 [J]. 上海金属, 2020, 42 (5): 78-81.
- [32] 岳江波, 甘晓龙, 陈子宏. 真空感应炉熔炼合金钢时用氮化物增氮的试验研究 [J]. 特殊钢, 2012, 33 (6): 1-5.