



## Mn18Cr18N 加压冶炼的氮含量精准控制 工艺分析与实验

林腾昌<sup>1</sup>, 李龙飞<sup>1</sup>, 程 挺<sup>2</sup>

(1 钢铁研究总院有限公司冶金工艺研究所, 北京, 100081;

2 中国钢研科技集团有限公司数字化研发中心, 北京, 100081)

**摘要:**高氮不锈钢中氮含量的精准控制是生产关键控制要素。以 Mn18Cr18N 高氮钢为研究对象, 利用冶金学原理、Factsage 热力学软件及热态实验与检测分析等方法, 对加压感应熔炼过程钢种成分、温度及氮气压力与氮含量控制的关系进行研究。结果表明, 基于理论数据的“成分-温度-压力”关系方程可信度高, 3 炉实验的氮气压力理论值、预测值与实际控制值吻合度良好。热态实验验证发现, Mn 和 Cr 含量不变时, 依靠提高氮分压可以提高钢锭中 N 含量, 但是  $w[N]$  达到约 1% 时, 通过提高氮分压增加氮含量的效果降低。Mn 或 Cr 含量低时, 可以通过提高氮分压达到提高氮含量的目的。降低钢中 C 和 Si 含量有利于钢中高氮含量的合金化及稳定控制。当需要控制 Mn18Cr18N 钢中的  $w[N] \geq 0.8\%$  时, 宜控制加压炉熔炼温度在 1 500 ~ 1 550 °C, 氮气压力在 0.225 ~ 0.325 MPa。

**关键词:** Mn18Cr18N; 高氮钢; 加压熔炼; 热力学; 氮含量

**DOI:**10.20057/j.1003-8620.2024-00106 **中图分类号:** TF743

## Process Analysis and Experiment of Precise Control of Nitrogen Content in Pressure Smelting of Mn18Cr18N

Lin Tengchang<sup>1</sup>, Li Longfei<sup>1</sup>, Cheng Ting<sup>2</sup>

(1 Department of Metallurgical Technology Research, Central Iron and Steel Research Institute Co., Ltd., Beijing 100081, China; 2 Material Digital Research and Development Center, China Iron and Steel Research Institute Group, Beijing 100081, China)

**Abstract:** The precise control of nitrogen content of high nitrogen stainless steel is the key control factor of production. Taking Mn18Cr18N high nitrogen steel as an example, this paper studies the relationship between steel composition, temperature, nitrogen pressure and nitrogen content control in pressure induction melting process by using metallurgical principle, factage thermodynamic software and thermal state experiment and detection analysis methods. The results show that the reliability of the "composition temperature pressure" relationship equation based on the theoretical data is high, and the theoretical and predicted values of nitrogen pressure in the three heats experiment are in good agreement with the actual control values. The thermal experiment finds that when the contents of Mn and Cr remain unchanged, increasing the nitrogen partial pressure can increase the N content in the ingot, but when the nitrogen reaches about 1%, the effect of increasing the nitrogen content by increasing the nitrogen partial pressure decreases. When the content of Mn or Cr is low, the nitrogen content can be increased by increasing the nitrogen partial pressure. Reducing the content of C and Si in steel is beneficial to the alloying and stable control of high nitrogen content in steel. It is advisable to control the melting temperature of the pressure furnace at 1 500-1 550 °C and the nitrogen pressure at 0.225-0.325 MPa when the nitrogen content in Mn18Cr18N steel is necessary to be controlled  $\geq 0.8\%$ .

**Key Words:** Mn18Cr18N; High Nitrogen Steel; Pressure Melting; Thermodynamics; Nitrogen Content

高氮不锈钢通过提高氮元素含量替代高价镍元素来得到稳定奥氏体, 具有节能、环保、成本低等优势<sup>[1-3]</sup>。随着加压冶炼技术、分析检测等技术的综合进步<sup>[4]</sup>, 高氮钢的氮含量控制水平得到有效提高, 氮在钢中的作用更加明晰<sup>[5-7]</sup>。国内外学者通过冶金热动力学计算、数值模拟软件、实验室热态实验与先进检测等方法开展了大量高氮钢制备工艺方

面的基础与技术研究<sup>[8-11]</sup>。

目前, 高氮不锈钢的制备工艺主要包括氮化合物增氮和高压氮气相增氮两种方式。张士岩等<sup>[12]</sup>研究了温度、压力、合金成分对铁合金熔体中氮溶解度的热力学影响因素, 提出了利用铬当量预测铁合金中氮溶解度的理论方法。Simmons 以及岳江波等<sup>[13-14]</sup>的研究表明, 铬、锰、钛、钼、锆、钒、铌等

元素的加入可以有效降低氮在钢液中的活度系数,提高氮在不锈钢中的溶解度。任伊宾等<sup>[15]</sup>以 Cr-Mn-Mo-N 系奥氏体不锈钢为研究对象,研究发现氮化锰的增氮效果以及氮在钢中的收得率均优于氮化铬和氮化铬-氮化锰混合合金料。

然而,如何在高氮钢的工业化生产过程中高效精准控制氮含量,仍然是亟待攻关的管理和技术难题。本文以 Mn18Cr18N 高氮钢为例,利用加压感应炉冶炼高氮钢时氮含量的高效合理、精准稳定控制进行理论研究与热态实验分析,以期对工业生产工艺参数制定提供指导。

### 1 高氮钢 Mn18Cr18 加压感应熔炼基础热力学计算

高氮奥氏体不锈钢 Mn18Cr18N 是一种 Fe-Cr-Mn 系高氮钢,钢中  $w[N]$  达到了 0.60% 以上,具有优异的力学性能和化学性能、低廉价格优势,主要应用于发电机转子护环等。高氮钢 Mn18Cr18N 标准成分见表 1。

表 1 Mn18Cr18 钢的化学成分(质量分数)  
Table 1 Chemical composition of Mn18Cr18 steel %

C	Si	Mn	Cr	P	S	N
≤0.12	≤0.80	17.5 ~ 20.0	17.5 ~ 20.0	≤0.050	≤0.015	0.60 ~ 1.20

高氮钢种在冶炼过程中的氮含量控制主要受到化学成分、冶炼温度、氮分压等因素的影响。基于表 1 成分利用 Jmatpro 计算得到 Mn18Cr18 的熔化区间 1 342 ~ 1 400 °C,由 1 800 °C 液相至室温 25 °C 形成的相与比例如图 1 所示。当温度降低到 1 400 °C 以下时开始急剧析出奥氏体相,温度到约 750 °C 时开始析出  $\sigma$  相,温度约为 530 °C 时析出铁素体相等,与熔融态金属熔池相比,凝固过程析出相的总的氮溶解能力会急剧下降。

#### (1) 化学成份的影响

合金元素对氮在钢中含量的影响,是因为合金元素的加入,改变了氮在钢中的活度,若合金元素

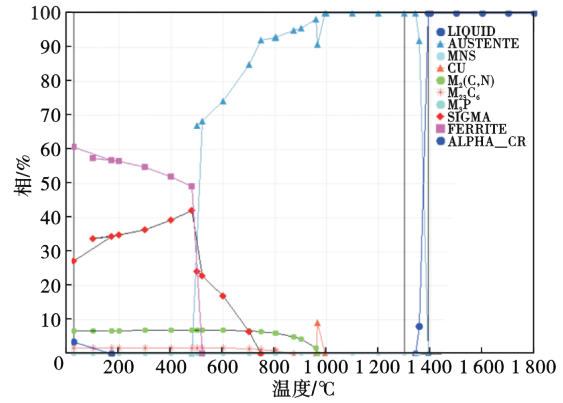


图 1 Mn18Cr18 钢凝固过程相组成

Fig. 1 Phase composition of Mn18Cr18 steel during solidification

与氮之间亲和力强,氮在钢中活泼程度下降即活度减小,因而氮含量将增加。

合金元素对氮在钢中活度系数的影响,在不考虑合金元素间交互影响的前提下,可以利用处理多元合金活度问题的近似方法来计算:

$$\lg f_N = \sum_j e_N^j(T) \times [\%j] \quad (1)$$

式中,  $f_N$  为氮在钢中的活度系数;  $e_N^j$  为  $T_K$  时含 1% 的  $j$  元素的铁液中,  $j$  对氮的作用系数;  $[\%j]$  为  $j$  元素在钢中的重量百分含量。

表 2 列出了 1 600 °C 时部分元素在钢液中与氮的相互作用系数  $e_N^j(1 873 K)$ <sup>[16]</sup>。

#### (2) 压力的影响

由  $\frac{1}{2}N_2 = [N]$  可知,

$$K_N = a[N] / (P_{N_2}/P^0)^{1/2} = f_N \times [\%N] / (P_{N_2}/P^0)^{1/2} [\%N] = K_N \times P_{N_2}^{1/2} / f_N \quad (2)$$

$$\lg [\%N] = \lg K_N + \frac{1}{2} \lg P_{N_2} - \lg f_N \quad (3)$$

由(2)式可知,氮在钢中的含量随体系氮分压的升高而增加。

#### (3) 温度的影响

由反应  $\frac{1}{2}N_2 = [N]$ , 根据氮在钢液中溶解的标

表 2 部分元素与钢液中氮的作用系数(1 600 °C)

Table 2 Interaction coefficient between some elements and nitrogen in molten steel (1 600 °C)

j	Al	As	B	C	Co	Cr	Cu	Mn	Mo	Nb
$e_N^j(1 873 K)$	-0.028	0.018	0.094 0	0.130	0.011 0	-0.047	0.009	-0.02	-0.011	-0.06
j	Ni	O	P	S	Sb	Se	Si	Sn	Ta	Te
$e_N^j(1 873 K)$	0.010	0.050	0.047 0	0.007	0.008 8	0.006	0.047	0.007	-0.032	0.07
j	Ti	V	W	Zr	N	-	-	-	-	-
$e_N^j(1 873 K)$	-0.53	-0.093	-0.001 5	-0.63	0	-	-	-	-	-

准吉布斯自由能变化<sup>[17]</sup>,得到,

$$\Delta G^0 = 860 + 5.71T \quad (4)$$

$$\lg K_N = -188/T - 1.218 \quad (5)$$

由(4)式可知,氮在钢液中的溶解时吸热过程,因而温度升高,氮的溶解度增大。将式(1)、(5)带入(3)得到,

$$\lg [\%N] = -188/T - 1.248 + \frac{1}{2} \lg P_{N_2} - \sum_j e_N^j(T) \times [\%j] \quad (6)$$

由于氮的活度系数与温度有下列关系:

$$e_N^j(T) = (3280/T - 0.75)e_N^j(1873K) \quad (7)$$

将(7)式带入(6)式得到:

$$\lg [\%N] = -188/T - 1.248 + \frac{1}{2} \lg P_{N_2} - (3280/T - 0.75) \sum_j e_N^j(1873K) \times [\%j] \quad (8)$$

令(8)式中  $-188/T - 3280/T \times \sum_j e_N^j(1873K) \times$

$[\%j] = 0$ ,得

$$\sum_j e_N^j(1873K) \times [\%j] = -0.0573$$

因此,温度对氮含量的影响因钢种化学成分的不同而不同,当  $\sum_j e_N^j(1873K) \times [\%j] < -0.0573$  时,温度升高钢中氮含量降低,当  $\sum_j e_N^j(1873K) \times [\%j] > -0.0573$  时,温度升高钢中的氮含量增加。

为提高企业冶炼炉工艺制定的合理性、生产经济性和过程控制的精准性,基于以上冶金反应热力学方程和 Factsage 热力学软件,针对 C-Si-Mn-Cr-P-S-N-O-Fe 体系,对不同成分的合金冶炼时的温度与氮分压进行了设计计算,典型结果如图2所示,得到不同合金成分的温度-氮分压关系,如图3所示,进一步处理得到目标成分与冶炼温度下所需控制的氮分压关系式如(9)。Multiple R=0.9915, Significance F=3.1×10<sup>-206</sup>。

$$P(N_2) = -1.09083 + 0.08639w[C] + 0.07270w[Si] - 0.01988w[Mn] - 0.04357w[Cr] + 1.23417w[N] + 0.00097T \quad (9)$$

式中,  $P(N_2)$  为冶炼时氮气压力, MPa;  $T$  为冶炼时温度, °C。其中各元素的含量适用范围分别为:  $w[C] \in [0.05, 0.12]$ 、 $w[Si] \in [0.2, 0.7]$ 、 $w[Mn] \in [0.17, 0.21]$ 、 $w[Cr] \in [0.17, 0.21]$ 、 $w[P] \in [0.005, 0.1]$ 、 $w[N] \in [0.8, 1.2]$ 、 $w[S] \in [0.002, 0.01]$ 、 $w[O] \in [0, 0.01]$ 、 $T \in$

$[1000, 1800]$ 。由图3可知,理论计算值与预测值吻合度较高。

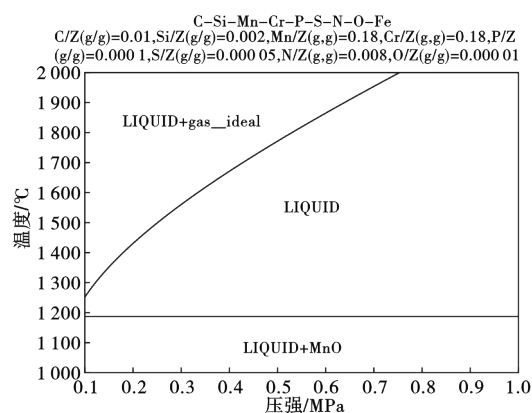


图2 确定Fe-Cr-Mn-C-Si-N-S-Al合金含量时冶炼温度与氮分压关系

Fig. 2 Relationship between smelting temperature and nitrogen partial pressure when determining the content of Fe-Cr-Mn-C-Si-N-S-Al alloy

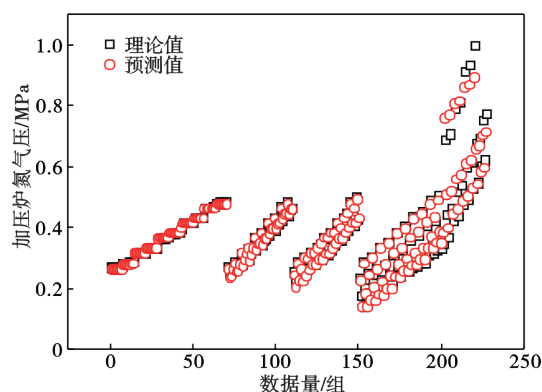


图3 Mn18Cr18冶炼时氮气压力理论值与预测值对比  
Fig. 3 Comparison between theoretical value and predicted value of nitrogen pressure during Mn18Cr18 smelting

## 2 分析讨论与实验

对实验结果进行归纳,分析讨论氮气压力设定值预测公式的准确性特征。

由图4可知,基于不同成分和温度的氮气压力预测值与理论值的比值分布分为5个区域,其中,比值0.95~1.05的高可信区域占比最高,对应的压力范围在2.4~4.7 MPa。此外,当冶炼  $w[Cr]$  20%~21% 合金且温度控制过高时(1680~1720 °C)时,预测的压力值与理论值比值范围1.05~1.1,应尽量避免操作失误导致的熔池温度过高,容易导致熔池中氮的溢出。在冶炼  $w[N]$  0.9%~1.2% 合金且在1480~1560 °C时,预测值与理论值比值范在

围 1.05 ~ 1.15, 在进行高氮含量控制时预测误差较大。在冶炼  $w[\text{Cr}]20\% \sim 21\%$  合金且在 1 680 ~ 1 720 °C 时, 比值范围 0.8 ~ 0.95, 偏差过大。在冶炼  $w[\text{N}]1\% \sim 1.2\%$  合金且在 1 600 ~ 1 700 °C 时, 比值范围 0.9 ~ 0.95。综上, 根据成分特点和冶炼温度情况辨识预测值偏差域, 并应适当提高或降低约 10% 的压力预测值作为设定值, 特别当熔池温度超过 1 600 °C 时, 即使含有  $w[\text{Cr}]20\% \sim 21\%$  时熔池中的氮含量控制精度也会加大, 所以应避免发生供电功率波动导致的熔池温度过高情况。

基于图 4 分析, 将比值 0.95 ~ 1.05 高可信区的预测值特征进一步解析, 如图 5 所示。由图 5 可知, 一般情况下, 冶炼时 N 按中限控制, 充氮压力按预测值设定, 对于预测值与理论值比值在 1 ~ 1.05, 冶炼成分将难以超出上限, 进一步重点对预测值低于理论值的区域进行分析, 统计情况见表 3。

在此基础上, 进行了 3 炉 Mn18Cr18 高氮钢的加压感应实验。设定成分、实际检测结果及冶炼温度见表 4, 各个成分及冶炼温度时所需要的氮气压力的理论值、预测值及实际冶炼控制值, 如图 6 所示。

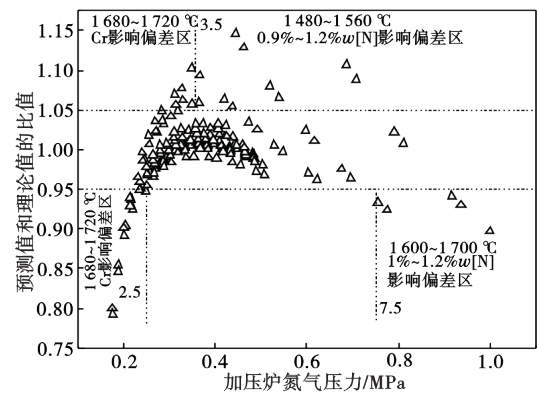


图 4 预测值与理论值比值分布(区间 0.75 ~ 1.15)  
Fig. 4 Distribution of ratio between predicted value and theoretical value (interval 0.75-1.15)

由图 6 可知, 1#实验的氮气压力实际控制值与预测值基本一致(偏差约 3.4%), 并且与钢锭的头尾部成分计算得到的氮分压需求值基本一致。2#实验的氮气压力实际控制值与预测值基本一致(偏差约 2.8%), 比钢锭的头尾部成分计算得到的氮分压需求值高约 9%。3#实验的氮气压力实际控制值比预测值低约 4.7%, 比钢锭的头尾部成分计算得到的氮

表 3 高可信度区域预测值特征

Table 3 Characteristics of predicted values in high reliability areas

影响温度/°C	特征	氮气压/MPa	措施
1 480 ~ 1 560-Si 影响偏差区	$w[\text{Si}]$ 为 0.2% ~ 0.7%	0.24 ~ 0.3	温度落在感应炉冶炼主温度区间, 压力范围小, 比值 0.98 ~ 1.0, 可按预测值设定氮气压力
1 490 ~ 1 570-Mn 影响偏差区	$w[\text{Mn}]$ 为 17.5%(占 50%) ~ 21%	0.24 ~ 0.5	温度落在感应炉冶炼主温度区间, 比值 0.95 ~ 1.0, 按 100% ~ 105% 预测值设定氮气压力 (Mn 含量低时应按 105% 预测值控制)
1 480 ~ 1 650-Cr 影响偏差区	$w[\text{Cr}]$ 为 17.5%(占 50%) ~ 21%	0.23 ~ 0.55	比值 0.95 ~ 1.0, 按 100% ~ 105% 预测值设定氮气压力 (Cr 含量低时应按 105% 预测值控制)
1 480 ~ 1 550/1 690 ~ 1 710-C 影响偏差区	$w[\text{C}]$ 为 0.05% ~ 0.12%	0.24 ~ 0.48	比值 0.98 ~ 1.0, 可按预测值设定氮气压力
1 660 ~ 1 720-N 影响偏差区	$w[\text{N}]$ 为 0.9% ~ 1.0%	$\geq 0.54$	比值 0.96 ~ 1.0, 按 100% ~ 104% 预测值设定氮气压力, 不宜使熔池温度过高

表 4 热态实验主要参数设定值及实际值

Table 4 Set and actual values of main parameters in thermal state experiment

项目	成分(质量分数)/%								冶炼温度/°C
	C	Si	Mn	Cr	P	S	N	O	
1#设计	0.08	0.40	18.50	20.00	0.006 0	0.002 0	0.80	0.002	1 500 ~ 1 550
2#设计	0.12	0.60	17.50	19.50	0.006 0	0.002 0	0.80	0.002	1 500 ~ 1 550
3#设计	0.12	0.60	18.00	20.50	0.006 0	0.002 0	1.00	0.002	1 500 ~ 1 550
1#顶实测	0.08	0.39	18.50	20.10	0.006 4	0.001 8	0.82	0.002	1 500 ~ 1 550
1#底实测	0.08	0.39	18.32	20.19	0.006 0	0.001 7	0.81	0.002	1 500 ~ 1 550
2#顶实测	0.12	0.61	17.19	19.61	0.006 3	0.002 2	0.83	0.002	1 500 ~ 1 550
2#底实测	0.12	0.60	17.17	19.60	0.006 3	0.002 4	0.82	0.002	1 500 ~ 1 550
3#顶实测	0.12	0.57	18.10	20.77	0.007 2	0.002 1	1.00	0.002	1 500 ~ 1 550
3#底实测	0.12	0.58	18.09	20.77	0.007 2	0.001 8	0.95	0.002	1 500 ~ 1 550

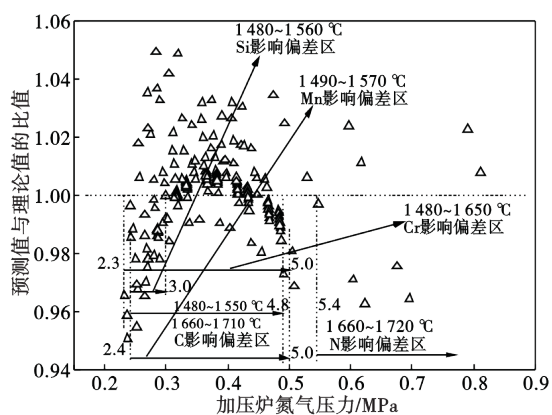


图5 预测值与理论值比值分布(区间0.95~1.05)

Fig. 5 Distribution of ratio between predicted value and theoretical value (interval 0.95-1.05)

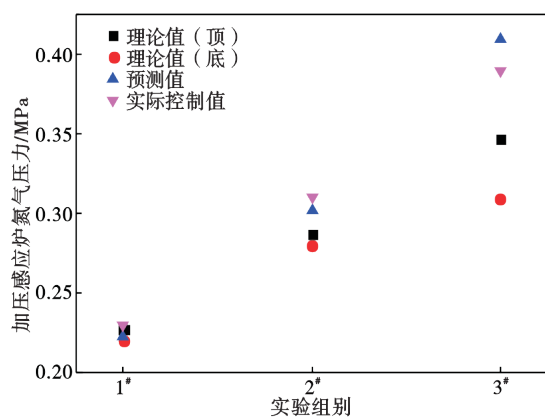


图6 3炉实验的氮气压力理论值、预测值与实际控制值

Fig. 6 Theoretical value, predicted value and actual control value of nitrogen pressure in 3 heats experiment

分压需求值高12%~26%,可能是在合金凝固过程

### 参考文献

- [1] 刘海定, 王东哲, 魏捍东, 等. 高氮奥氏体不锈钢的研究进展[J]. 特殊钢, 2009, 30(4): 45-48.
- [2] 汪洋. Mn18Cr18N不锈钢制备工艺及组织和性能的研究[D]. 昆明: 昆明理工大学, 2018.
- [3] 汤旭炜. Mn18Cr18N护环钢工艺的基础研究[D]. 北京: 北京科技大学, 2017.
- [4] 王书桓, 赵定国. 高压冶金技术在高氮钢冶炼中的应用[J]. 太原理工大学学报, 2014, 45(1): 15-18+24.
- [5] Zhu D L, Zhang M, Wang Y. Electron backscattered diffraction study of microstructural evolution during isothermal deformation of high-N Mn18Cr18 alloy[J]. Metallurgical and Materials Transactions B, 2019, 50(4): 1662-1673.
- [6] Gan B, Zhang M, Li H Y, et al. A modified constitutive model and dynamic recrystallization behavior of high-N Mn18Cr18 alloy[J]. Steel Research International, 2017, 88(9): 433-440.
- [7] Qin F M, Zhu H, Wang Z X, et al. Dislocation and twinning mechanisms for dynamic recrystallization of as-cast Mn18Cr18N steel[J]. Materials Science and Engineering: A, 2017, 684: 634-644.
- [8] Li F, Zhao X D, Zhang H Y, et al. Bauschinger effect of Mn18Cr18N austenitic stainless steel[J]. Journal of Wuhan University of Technology-Mater Sci Ed, 2020, 35(2): 399-406.
- [9] Chen H Q, Wang Z X, Qin F M, et al. Hot deformation behavior and processing maps of as-cast Mn18Cr18N steel[J]. Journal of Wuhan University of Technology-Mater Sci Ed, 2017, 32(4): 935-943.
- [10] Ma Y P, Li X L, Wang C H, et al. Microstructure and impact wear resistance of TiN reinforced high manganese steel matrix[J]. Journal of Iron and Steel Research International, 2012, 19(7): 60-65.

中氮含量产生损失<sup>[18-19]</sup>。基于预测模型、1#和2#对比发现,降低钢中C和Si含量有利于钢中氮的合金化,对氮分压要求降低。

综合分析,合金中含有较高含量Mn和Cr时,随着氮气分压升高可以提高钢中N含量;与1#、2#的0.8%w[N]结果对比,3#的1%w[N]冶炼所需的氮气压力值明显大幅高于理论值,推测当w[N]超过1%时,通过提高氮分压来提高N含量的效果降低;Mn或Cr含量低时,可以通过提高氮分压达到提高N含量的目的。综上,当需要控制Mn18Cr19N钢中的 $w[N] \geq 0.8\%$ 时,宜控制加压炉熔炼温度在1500~1550℃,氮气压力在0.225~0.325MPa。

### 3 结论

(1)基于热力学计算和数据分析归纳,得到Mn18Cr18高氮钢的加压熔炼时氮含量精准控制的“成分-温度-压力”预测关系方程,理论值与预测值关联性较好,可信度较高。

(2)通过热态实验,合金中含有较高含量Mn和Cr时,随着氮气分压升高可以提高钢中N含量,但当w[N]超过1%时,通过提高氮分压来提高N含量的效果降低;Mn或Cr含量低时,可以通过提高氮分压达到提高N含量的目的。降低钢中C和Si含量有利于钢中高氮含量的合金化及稳定控制,可降低对冶炼氮气压力要求。

(3)当需要控制Mn18Cr19N中 $w[N] \geq 0.8\%$ 时,宜控制加压炉熔炼温度在1500~1550℃,氮气压力在0.225~0.325MPa。

[11] Wang Z H, Xie J P, Li Q, et al. TiN/ $\gamma$ -Fe interface orientation relationship and formation mechanism of TiN precipitates in Mn18Cr2 steel[J]. China Foundry, 2021, 18(3): 180-184.

[12] 张士岩, 卢永, 王书桓. 液态铁基合金中氮溶解度的影响因素[J]. 钢铁研究, 2006, 34(1): 1-3.

[13] Simmons J W. Overview: High-nitrogen alloying of stainless steels [J]. Materials Science and Engineering: A, 1996, 207(2): 159-169.

[14] 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): 1-4.

[15] 任伊宾, 杨柯, 张炳春, 等. 真空感应炉充氩冶炼高氮 Cr-Mn-Mo-Cu 奥氏体不锈钢[J]. 特殊钢, 2004, 25(4): 13-15.

[16] 陈家祥. 炼钢常用图表数据手册[M]. 北京: 冶金工业出版社, 1984.

[17] 黄希祐. 钢铁冶金原理[M]. 北京: 冶金工业出版社, 1981.

[18] 王书桓, 吴彦辉, 赵定国. 凝固压力对高氮钢中氮宏观偏析的影响[J]. 铸造技术, 2013, 34(7): 848-850.

[19] 李花兵, 姜周华, 张祖瑞, 等. 氮在 Fe-Cr-Mn 合金体系中的溶解度计算模型[J]. 东北大学学报(自然科学版), 2008, 29(4): 549-552.

=====

### 下 期 要 目

螺纹加工顺序对 A286 紧固件室温疲劳性能的影响 ..... 孔祥伟等

Nb 对 GH4169 合金管材组织性能的影响 ..... 王哨兵等

显微组织对薄壁 X65M 管线钢落锤试验性能的影响 ..... 张明

固溶温度对 GH4163 合金显微组织及拉伸性能的影响 ..... 李晴

GH4706 合金涡轮盘锻件不同部位的组织及高温力学性能 ..... 徐烨玲等

淬火温度对  $M_6C$  强化 2 200 MPa 级超高强度钢力学性能影响 ..... 唐远寿等

稀土元素 Gd 对 Ni-Cr-Mo 合金热变形行为的影响 ..... 杨志豪等

B 对 Fe-Cr-B-C 合金热处理后显微组织和强韧性的影响 ..... 李阳等

40Cr13 塑料模具钢连续冷却相变行为研究 ..... 苏蒙蒙等

130 t 钢包底吹氩工艺优化数值模拟 ..... 李琦等

1Cr13 不锈钢连铸保护渣成分设计 ..... 朱立光等

Si 元素对海工高强钢丝绳用热轧盘条组织和力学性能的影响 ..... 李建平等

125 ksi 超级马氏体油管成分—组织—性能—工艺综合控制技术 ..... 赵吉庆等

1 000~2 200 mm 宽板坯连铸机结晶器流场优化与应用 ..... 王玉平等

帘线钢 XLX72A 中氧化物夹杂的演变解析与去除 ..... 杨建华等

稀土精炼与电渣重熔 3%Cr 轧辊钢对比分析 ..... 袁麟等

改善模具钢抛光性能的工艺研究与实践 ..... 刘泳等

高拉速薄板坯保护渣剪切变稀行为和表面性质 ..... 马少晨等