

· XXXX ·



冶炼工艺路线对 N06625 镍基合金偏析与性能的影响

王 岩, 谷 宇, 李吉东, 范新智

(太原钢铁(集团)有限公司先进不锈钢全国重点实验室, 太原 030003)

摘 要: 针对 VIM+ESR 以及电弧炉+AOD+连铸两种工艺生产的 N06625 镍基合金板材, 采用力学试验机、光学显微镜、扫描电镜(SEM)、能谱(EDS)、电子探针等手段, 对偏析与组织性能开展研究工作, 结果表明, N06625 镍基合金连铸坯 Mo、Nb 偏析小于传统电渣锭, 可以为后续均质化及热加工创造良好条件; 由于 N06625 镍基合金连铸坯原始枝晶细小, 偏析程度轻, 采用更短的均质化时间即可消除偏析, 具有更好的工艺适用性, $\phi 600$ mm 电渣锭合适的均质化参数是 $1\ 240\ ^\circ\text{C}/48\ \text{h}$; 180 mm 厚度连铸坯合适的均质化参数是 $1\ 240\ ^\circ\text{C}/36\ \text{h}$ 。两种工艺路线下板材力学性能、夹杂物、腐蚀性能(VIM+ESR 工艺 ASTM G28A、ASTM A262C、ASTM G48A 数值分别为 0.024 mm/月、0.03 mm/月、0 g/m²; AOD+连铸工艺分别为 0.021 mm/月、0.03 mm/月、0 g/m²)均处于同一技术水平。

关键词: N06625 镍基合金; 板材; 连铸; 偏析; 均质化

DOI:10.20057/j.1003-8620.N260054 **中图分类号:** TG335.3

Effect of Melting Process Route on Segregation and Properties of N06625 Nickel-Based Alloy

Wang Yan, Gu Yu, Li Jidong, Fan Xinzhi

(National Key Laboratory of Advanced Stainless Steel, Taiyuan Iron and Steel (Group) Co., Ltd., Taiyuan 030003, China)

Abstract: N06625 nickel-based alloy plates were produced by two different process routes, namely VIM+ESR and EAF+AOD+continuous casting. The segregation characteristics, microstructure and mechanical properties were systematically investigated by means of mechanical testing machine, optical microscope, SEM, EDS and electron probe microanalyzer. The results show that the segregation degrees of Mo and Nb in the continuous casting slab are lower than those in the conventional electroslag ingot, providing favorable conditions for subsequent homogenization treatment and hot working. Owing to the finer original dendrites and milder segregation, the continuous casting slab requires a shorter homogenization holding time to eliminate elemental segregation and exhibits better process applicability. Under the actual production conditions in this work, the optimal homogenization parameters for the $\phi 600$ mm electroslag ingot are $1\ 240\ ^\circ\text{C}$ for 48 h, while the parameters for the 180 mm-thick continuous casting slab are $1\ 240\ ^\circ\text{C}$ for 36 h. The mechanical properties, inclusion characteristics and corrosion resistance of the plates manufactured by the two process routes are at the same technical level. The corrosion rates of the VIM+ESR route measured by ASTM G28A, ASTM A262C and ASTM G48A are 0.024 mm/month, 0.03 mm/month and 0 g/m², respectively; the corresponding values of the EAF+AOD+continuous casting route are 0.021 mm/month, 0.03 mm/month and 0 g/m².

Key Words: N06625 Nickel-Based Alloy; Plate; Continuous Casting; Segregation; Homogenization

N06625 是 Ni 为基体, 以铬、钼、铌为主要强化元素的固溶强化型镍基耐蚀合金, 具有良好抗腐蚀、耐热性能, 目前, 在深海石油开采、高端装备制造、石油化工管道、油气输送等重要领域广泛使用^[1-4]。目前, 对于高端镍基合金板材, 基本还是以进口为主, 主要供货企业有 ATI、SMC、VDM、日本冶金等, 国产产品生产成本高、质量不稳定、供货范围窄, 市场认可度低。目前, 对于 N06625 板材生产主

要有两种工艺路线, 一是传统的 VIM+ESR+锻造+轧制路线, 二是创新性的电弧炉+炉外精炼+连铸路线。其中, 国外 N06625 能够实现连铸生产的企业只有日本冶金, 技术领先, 并且所有技术资料均高度保密。

国内外专家学者对 N06625 合金已经开展了深入的研究工作, 但是基本局限于传统冶炼方式以及实验室层面^[5-8], 缺乏工业化生产数据支撑, 尤其是

基金项目: 国家重点研发计划项目《深海油气管道和关键部件用耐蚀合金和不锈钢产品的研发》课题 1《海洋油气管道输送复合管用镍基耐蚀合金宽幅薄板研制》(2025ZD0611301)

作者简介: 王 岩(1982—), 男, 博士, 正高级工程师; **E-mail:** 15448681@qq.com; **收稿日期:** 2026-04-13

Editorial Office of Special Steel. OA under CC BY-NC-ND 4.0

连铸生产 N06625 镍基合金板材更加鲜有报道。太钢经过多年技术攻关,目前,已经实现了基于连铸工艺的 N06625 板卷量产与供货,中板宽度覆盖范围达到 3 500 mm,产品质量与国外相当,已经在石化、核电等方面实现国产化替代,太钢也是国内唯一能够实现 N06625 连铸生产的企业。本文对 VIM+ESR+锻造+轧制以及电弧炉+AOD+连铸+轧制两种路线工业化生板材组织性能开展对比分析工作,为相关研究提供实际生产数据支持,为用户提供多样化产品选择。

1 研究材料与方法

采用太钢 VIM+ESR+锻造开坯+轧制以及 AOD+连铸+轧制两种工艺生产的中厚板,规格均为 15.88 mm×2 990 mm×6 010 mm,单重 2.4 t。实际化学成分见表 1。

采用力学试验机、光学显微镜、SEM、EDS、电子探针等手段,对两种制备工艺条件下电渣锭及连铸偏析行为进行研究,并按照 ASTM E 8/E 8M—2021 进行力学性能测试,按照 ASTM E45—2018 进行及杂物评级,按照 ASTM A262—2021 中 C 法、ASTM G28—2024 中 A 法以及 ASTM G48—2025 中 A 法进行腐蚀性能检测。

2 试验结果分析与讨论

2.1 Mo、Nb 偏析行为研究

目前,国内 625 板材生产基本采用电渣重熔工艺,受合金元素偏析制约,电渣锭直径一般不超过 $\phi 600$ mm,太钢通过连铸工艺实现生产,连铸坯厚度 180 mm,图 1 为太钢 N06625 镍基合金立式连铸坯形貌。

图 2 为 $\phi 600$ mm 电渣锭和 180 mm 厚度连铸坯心部凝固组织形貌。从图 2 中可以看出,电渣锭二次枝晶间距要明显大于连铸坯。并且枝晶间合金元素的偏析及富集程度要比连铸坯严重。通过 EDS 分析,枝晶间主要偏析元素为 Mo 和 Nb。

原始铸态组织条件下,电子探针结果显示,对于连铸坯 Nb 的偏析系数(用枝晶间合金元素浓度



图 1 太钢 N06625 镍基合金立式连铸坯

Fig. 1 TISCO N06625 nickel-based alloy vertical continuous casting slab

最高值和枝晶干合金元素浓度最低值的比值: $A=C_{\max}/C_{\min}$) 约为 4.65, $w[\text{Mo}]$ 约为 1.43% (电子探针多点分析, $w[\text{Nb}]$ 枝晶间浓度数值在 6.24%~8.13%, 平均值约为 7.44%, $w[\text{Nb}]$ 枝晶干浓度数值在 1.47%~1.78%, 平均值约为 1.6%。其偏析系数为 $7.44/1.6=4.65$; $w[\text{Mo}]$ 枝晶间浓度数值在 10.14%~10.57%, 平均值约为 10.21%, $w[\text{Mo}]$ 枝晶干浓度数值在 7.05%~7.35%, 平均值约为 7.14%。其偏析系数为 $10.21/7.14=1.43$)。根据以上研究方法 & 数据分析, $\phi 600$ mm 直径电渣锭 Nb 偏析系数约为 6.18, Mo 为 1.48。可以看出,在连铸结晶器的强制冷却条件下,薄连铸坯的偏析程度要小于传统电渣锭。图 3 为合金中非常典型的 Mo 和 Nb 析出物形貌及能谱。

2.2 均质化研究

由于 625 合金存在严重的 Mo 和 Nb 偏析,因此,必须采用均质化热处理,使枝晶间 Mo 和 Nb 的析出物以及元素最大程度回溶,从而为后期热加工以及组织性能控制提供良好条件。关于 625 合金均质化方面已经有大量的研究工作,并且给出了成熟的均质化工艺(如 1 210~1 250 $^{\circ}\text{C}$, 保温 48~72 h)^[9-11]。但是要注意到,已发表的研究成果基本是基于模铸、电渣锭、自耗锭,尚未见基于工业化连

表 1 N06625 合金化学成分(质量分数)

Table 1 Chemical composition of the N06625 alloy

	C	Si	Mn	P	S	Cr	Mo	Al	Ti	Nb+Ta	Fe	Co	Cu	Ni	O	N
ASME SB-443	≤0.10	≤0.50	≤0.50	≤0.015	≤0.015	20.00~23.00	8.00~10.00	≤0.40	≤0.40	3.15~4.15	≤5.00	≤1.00	—	≥58	—	—
电渣	0.01	0.08	0.02	0.003	0.001	22.49	8.89	0.14	0.25	3.63	3.47	0.01	0.01	余量	0.001 2	0.004 1
连铸	0.01	0.12	0.08	0.005	0.001	22.35	8.78	0.15	0.19	3.58	3.78	0.02	0.02	余量	0.001 0	0.012 0

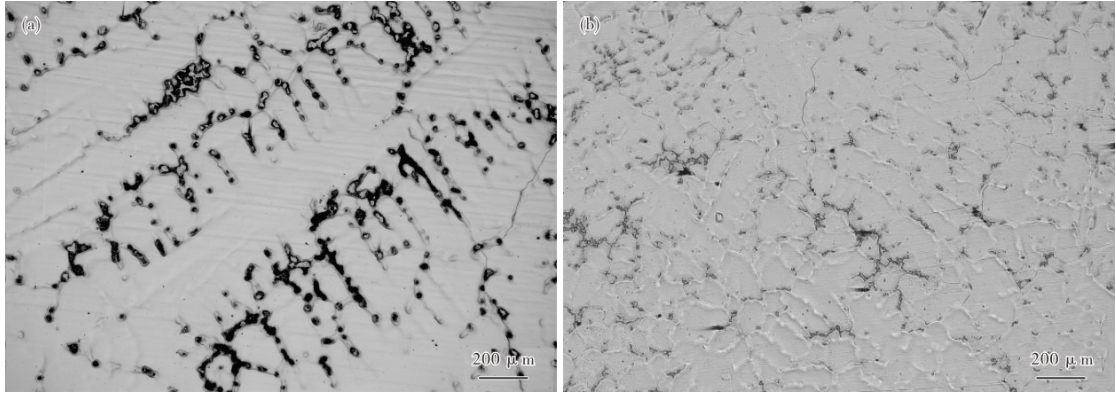


图2 N06625镍基合金 $\phi 600$ mm电渣锭和180 mm厚度连铸坯心部凝固组织形貌:(a)直径 $\phi 600$ mm电渣锭,(b)180 mm厚度连铸坯

Fig. 2 Core solidification microstructure morphology of $\phi 600$ mm electroslag ingot and 180 mm-thick continuous casting slab of N06625 nickel-based alloy : (a) $\phi 600$ mm electroslag ingot, (b) 180 mm-thick continuous casting slab

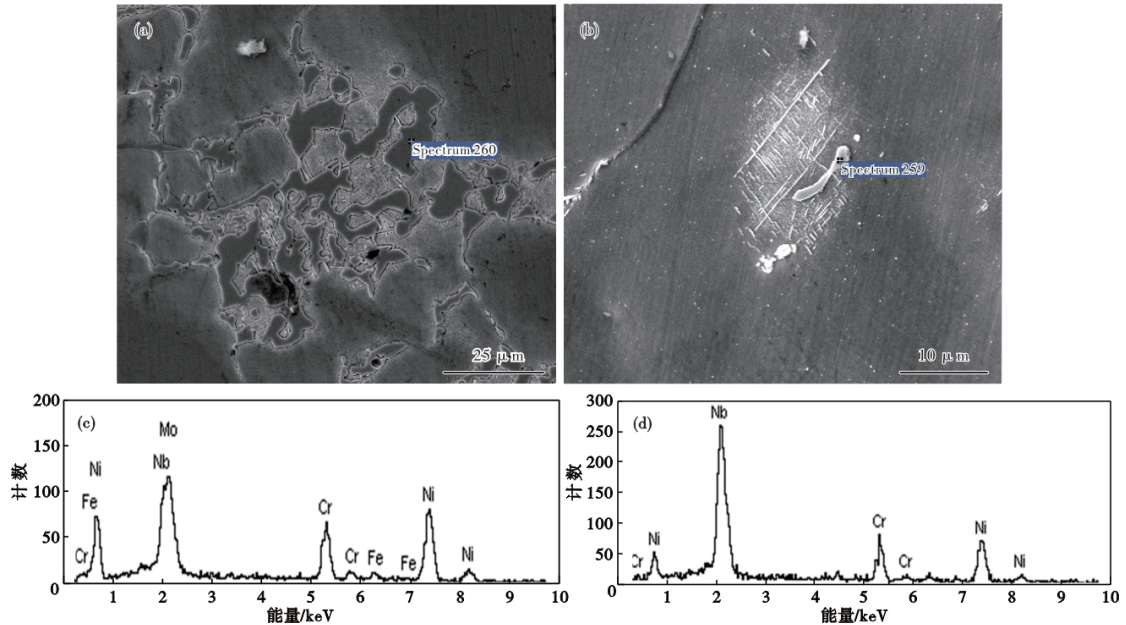


图3 N06625镍基合金枝晶间非常典型的Mo析出物及Nb析出物:(a)典型的高Mo析出物,(b)典型的高Nb析出物,(c)高Mo析出物能谱,(d)高Nb析出物能谱

Fig. 3 Typical Mo precipitates and Nb precipitates in interdendritic regions of N06625 nickel-based alloy: (a) typical high-Mo precipitates, (b) typical high-Nb precipitates, (c) EDS spectrum of high-Mo precipitates, (d) EDS spectrum of high-Nb precipitates

铸坯方面的文献。本文对电渣锭及连铸坯心部试样采用相同的均质化参数进行实验,并进行对比分析。

通常而言,铸态合金的元素在枝晶干和枝晶间的浓度分布近似符合正弦规律^[12-13],为了更清楚地表明扩散结果,同时,也为了计算方便,引入残余偏析指数 δ 来表征合金中元素的偏析程度, δ 越接近于0,元素的偏析程度越轻, δ 可以通过式(1)得到:

$$\delta = \frac{C_{\max} - C_{\min}}{C_{0\max} - C_{0\min}} = \exp\left(-\frac{4\pi^2}{L^2}Dt\right) \quad (1)$$

式中, $C_{\max}$ 和 $C_{\min}$ 分别为均质化处理后的最高浓度和最低浓度, $w\%$; $C_{0\max}$ 和 $C_{0\min}$ 分别为均质化处理前的最高浓度和最低浓度, $w\%$; L 为枝晶间距, μm ; D 为合金元素在基体中的扩散系数, cm^2/s ; t 是均匀化时间, s 。

从式(1)可以看出,对均质化影响最为关键因素是枝晶间距以及均质化温度^[14-16]。

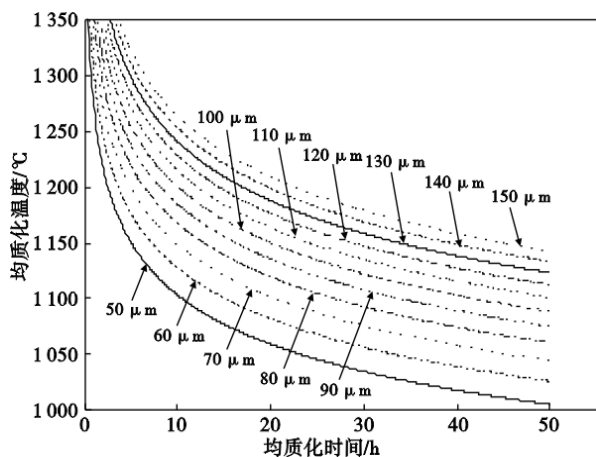


图4 基于残余偏析指数得到的偏析元素均质化动力学示意曲线

Fig. 4 Schematic curve of homogenization kinetics for segregated elements based on residual segregation index

图4为基于残余偏析指数得到的偏析元素均质化动力学示意曲线,箭头标注数值为二次枝晶间距。可以看出原始枝晶间距越小,相同温度下,完成均质化的时间越短,并且枝晶间距与冷却速度呈反比关系,冷速越大,枝晶间距越小^[17-20]。同时,均质化温度越高,合金元素扩散越快,也越容易完成均质化。但是在实际工程生产时,均质化温度不可无限升高,一般情况下在合金固相线温度100℃以下进行,否则晶界析出物极易快速液化,从而造成坯料内部孔洞。

对两种工艺下坯料进行多参数均质化试验(温度1100~1260℃,保温时间12~72h),并对结果综合分析。图5为采用1240℃/36h均质化参数电渣锭与连铸坯偏析情况。可以看出,经过36h均质化,连铸坯合金元素偏析基本消除,但是电渣锭枝

晶形貌依然明显,枝晶间仍然存在大量未回溶的析出物。电子探针结果显示,此时电渣锭Nb的偏析系数约为1.35,Mo的偏析系数约为1.08;连铸坯Nb的偏析系数约为1.19,Mo的偏析系数约为1.06。

经过1240℃/48h均质化后,如图6所示,两种工艺条件下偏析情况基本消除,Nb的偏析系数均小于1.2,Mo的偏析系数均小于1.04。可以看出,由于连铸坯原始枝晶细小,偏析程度轻,采用更短的均质化时间即可消除偏析,具有更好的工艺适用性。

在实际生产条件下,φ600mm电渣锭合适的均质化参数是1240℃/48h,180mm厚度连铸坯合适的均质化参数是1240℃/36h。

2.3 板材性能对比分析

对两种不同冶炼工艺条件下,采用相同轧制及热处理工艺制备的板材性能进行对比分析。可以看出两种制备工艺条件下板材性能、冶金纯净度、腐蚀性能均处于同一技术水平,可以为用户提供更加多样化的低成本、短流程、高效率、高品质的产品选择。

表2为按照ASTM E45—2018标准进行及杂物评级情况。

表3为按照ASTM E 8/E 8M—2021标准进行力学性能测试情况。

表4为按照按照ASTM A262—2021标准中C法、ASTM G28—2024标准中A法以及ASTM G48—2025标准中A法进行腐蚀性能检测情况。

3 结论

1) N06625镍基合金连铸坯Mo、Nb偏析小于传统电渣锭,可以为后续均质化及热加工创造良好条件。

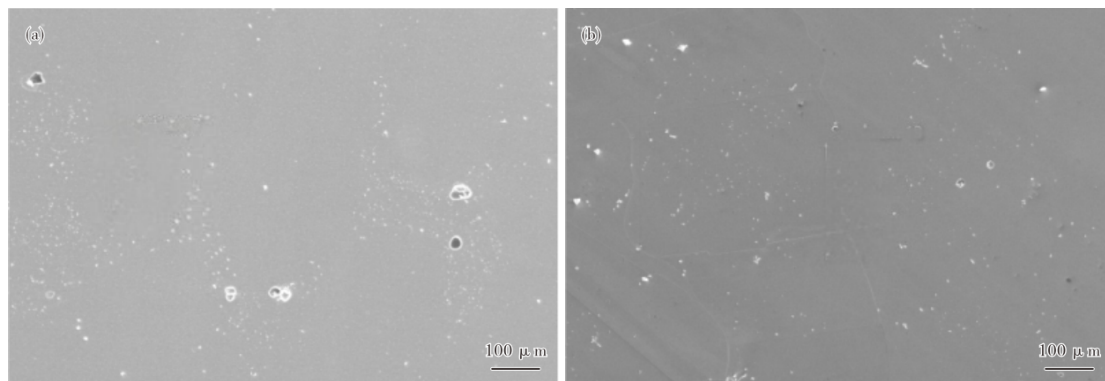


图5 N06625镍基合金1240℃/36h均质化参数电渣锭与连铸坯偏析情况:(a)直径φ600mm电渣锭,(b)180mm厚度连铸坯
Fig. 5 Segregation status of electroslag ingot and continuous casting slab of N06625 nickel-based alloy under homogenization parameters of 1240℃/36h:(a) φ600mm diameter electroslag ingot, (b) 180mm-thick continuous casting slab

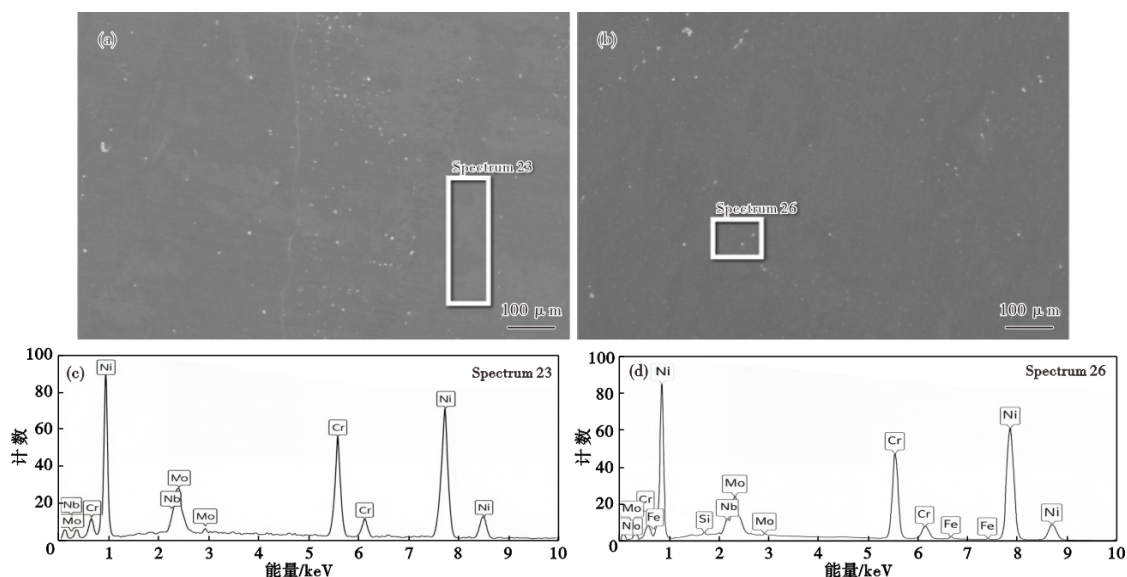


图6 1 240 ℃/48 h均质化参数电渣锭与连铸坯偏析情况:(a)直径 $\phi 600$ mm电渣锭,(b)180 mm厚度连铸坯,(c)图a面扫描能谱,(d)图b面扫描能谱

Fig. 6 Segregation of electroslag ingot and continuous casting slab under homogenization parameters of 1 240 ℃/48 h : (a) $\phi 600$ mm diameter electroslag ingot, (b) 180 mm-thick continuous casting slab, (c) surface scanning EDS spectrum of fig. a, (d) surface scanning EDS spectrum of fig. b

表2 N06625镍基合金的夹杂物控制水平(级)

Table 2 Inclusion control level (grade) of N06625 nickel-based alloy

工艺	A粗	A细	B粗	B细	C粗	C细	D粗	D细
ESR	0	0	0	0.5	0	0	0	0.5
连铸	0	0	0	0.5	0	0	0	0.5

表3 N06625镍基合金的板材力学性能

Table 3 Mechanical properties of plate of N06625 nickel-based alloy

工艺	屈服强度/MPa	抗拉强度/MPa	伸长率/%
标准(级别1)	≥ 379	≥ 758	≥ 30
ESR	437	859	51
连铸	438	867	53

2)由于N06625镍基合金连铸坯原始枝晶细小,偏析程度轻,采用更短的均质化时间即可消除偏析,具有更好的工艺适用性。在实际生产条件下, $\phi 600$ mm

表4 用不同标准检测腐蚀性能

Table 4 Corrosion performance according to different standards

工艺	每月腐蚀深度 {ASTM A262C (48 h-5周期)}/mm	每月腐蚀深度 {ASTM G28 A (120 h)}/mm	腐蚀率{ASTM G48 A(50 ℃- 72 h)}/(g·m ⁻²)
通用要求	≤ 0.075	≤ 0.06	≤ 4
ESR	0.03	0.024	0
连铸	0.03	0.021	0

电渣锭合适的均质化参数是1 240 ℃/48 h,180 mm厚度连铸坯合适的均质化参数是1 240 ℃/36 h。

3)两种工艺路线下板材力学性能、夹杂物、腐蚀性能(VIM+ESR工艺ASTM G28A、ASTM A262C、ASTM G48A数值分别为0.024 mm/月、0.03 mm/月、0 g/m²;电弧炉+AOD+连铸工艺分别为0.021 mm/月、0.03 mm/月、0 g/m²)均处于同一技术水平。

参考文献

- [1] 高钰璧,丁雨田,孟 斌,等. Inconel625合金中析出相演变研究进展[J]. 材料工程, 2020, 48(5): 13-22.
- [2] Chen X M, Lin Y C, Chen M S, et al. Microstructural evolution of a nickel-based superalloy during hot deformation[J]. Materials & Design, 2015, 77: 41-49.
- [3] 王方军,刘应龙,时 瑶,等. 等温退火处理对Inconel 625合金箔材组织和性能的影响[J]. 金属热处理, 2022, 47(3): 77-81.
- [4] 蔡远飞,隋 毅,朱治愿,等. 超低铁Inconel625合金的热处理[J]. 金属热处理, 2018, 43(9): 175-181.
- [5] 王 岩,徐芳泓,李 阳,等. 应变速率对617B镍基高温合金组织演变的影响[J]. 稀有金属材料与工程, 2014, 43(12): 3027-3030.
- [6] 李 烁,闫 森,金奎文,等. 碳含量及热加工变形量对镍基合金GH3625组织和性能的影响[J]. 特殊钢, 2022, 43(2): 75-78.

- [7] 张春林, 王新鹏, 宁天信, 等. UNS N06625 合金热成形工艺的模拟试验和分析[J]. 特殊钢, 2017, 38(2): 1-5.
- [8] Wang J, Dong J X, Zhang M C, et al. Hot working characteristics of nickel-base superalloy 740H during compression [J]. Materials Science and Engineering: A, 2013, 566: 61-70.
- [9] Zhang P, Hu C, Zhu Q, et al. Hot compression deformation and constitutive modeling of GH4698 alloy [J]. Materials & Design (1980-2015), 2015, 65: 1153-1160.
- [10] 丁雨田, 马元俊, 豆正义, 等. 固溶处理温度对 GH3625 合金热挤压管材微观组织和力学性能的影响[J]. 材料导报, 2018, 32(8): 1311-1317.
- [11] 王 岩, 李吉东, 谷 宇, 等. 工业化生产 N06625 镍基合金板材组织性能[J]. 锻压技术, 2024, 49(3): 47-51+93.
- [12] 蔡 梅, 刘建平, 吴香菊, 等. GH625 合金锻造工艺研究[J]. 沈阳航空航天大学学报, 2011, 28(4): 52-59.
- [13] Jiang H, Yang L, Dong J X, et al. The recrystallization model and microstructure prediction of alloy 690 during hot deformation [J]. Materials & Design, 2016, 104: 162-173.
- [14] 杨 浩, 王方军, 李 采, 等. 镍基高温合金的熔炼工艺研究进展[J]. 特殊钢, 2023, 44(3): 1-9.
- [15] 程 伟, 孙宏伟, 杨永石, 等. 宽幅 GH3600 带材制备技术的探究[J]. 有色金属加工, 2025, 54(2): 41-44+50.
- [16] 张海宝, 刘福斌, 姜周华, 等. 镁对 N06625 合金铸态组织的影响[J]. 中国冶金, 2023, 33(7): 51-58.
- [17] 张海宝, 刘福斌, 李花兵, 等. 冷却速率对 N06625 合金凝固过程微观偏析的影响[J]. 中国冶金, 2022, 32(12): 48-56.
- [18] 刘文月, 李天怡, 巩 俐, 等. Inconel 625 合金组织与性能的模拟计算与高通量试验[J]. 金属热处理, 2025, 50(8): 169-176.
- [19] 方 轶, 朱玉亮, 郑文杰, 等. 均匀化热处理工艺对 Inconel 625 合金铸锭组织性能的影响[J]. 特钢技术, 2018, 24(3): 4-8.
- [20] Guo Z L, Sha W. Quantification of Precipitation Hardening and Evolution of Precipitates [J]. Materials Transactions, 2002, 43(6): 1273-1282.