



N08120 镍基耐蚀合金 20 t 扁锭初锻开裂 原因分析和工艺改进

刘 煜, 徐文亮

(宝武特种冶金有限公司, 上海 200940)

摘 要: 针对 N08120 镍基耐蚀合金 20 t 扁锭锻造开裂问题, 开展了实验和现场工艺分析, 采用低倍实验、光学显微镜和扫描电子显微镜等对裂纹附近的凝固组织和裂纹断口表面成分进行探究, 并结合材料的平衡态相图和现场数据, 综合分析表明, 开裂是钢锭内部凝固缺陷和不恰当的锻造加热工艺共同导致。凝固过程容易在扁锭的中下部形成疏松、缩孔缺陷, 且锻造加热时存在冷锭叠装的装炉方式, 钢锭内部存在较大的拉应力, 当应力值高于其结合强度的时候便会萌生裂纹, 并在锻造过程向外扩展。通过降低帽口补注流速为锭身的 30%, 当补注至帽口 2/3 时提前加入发热剂, 发热剂用量从 2 kg/t 提升至 2.5 kg/t, 并按照 0.8 kg/t 添加碳化稻壳保温, 在锻造工序, 提升热送钢锭比例, 对于冷锭严禁叠装入炉, 锻造开裂问题得以解决。

关键词: N08120 镍基合金; 扁锭; 凝固缺陷; 锻造开裂

DOI: 10.20057/j.1003-8620.2024-00141 **中图分类号:** TG316.2

Cause Analysis and Process Improvement Measures of Primary Forging Cracking for 20 t Flat Ingot of N08120 Nickel-based Corrosion-resistant Alloy

Liu Yu, Xu Wenliang

(Baowu special metallurgy Co., Ltd., Shanghai 200940, China)

Abstract: With regard to the forging cracking problem of 20 t flat ingot of N08120 nickel-based corrosion-resistant alloy, experiments and on-site process analysis were carried out. The solidification structure near the crack and the surface composition of the crack fracture were explored by macrostructure inspection, optical microscope and scanning electron microscope, combined with the equilibrium phase diagram and on-site data of the material, the comprehensive analysis showed that the cracking was caused by the internal solidification defects of the ingot and improper heating process before forging. During the solidification process, it was prone to form porosity and shrinkage defects in the lower middle part of the flat ingot, and there was a stacked charging mode of cold ingots during heating, resulting large tensile stress inside the ingot. When the stress value was higher than the internal bonding strength, cracks would initiate and expand outward during forging process. By reducing the casting speed of shrink head to 30% of that of ingot body, adding the heating agent in advance when the molten steel level reached 2/3 of height of the shrink head, increasing heating agent from 2 kg/t to 2.5 kg/t and adding carbonized rice husk in order to improve the insulation effect, increasing the proportion of hot-feeding ingots in the forging process and strictly prohibiting the stacking of cold ingots into the furnace, the problem of forging cracking was solved.

Key Words: N08120 Nickel-based Alloy; Flat Ingot; Solidification Defect; Forging Cracking

在“双碳”背景下, 光伏等新能源产业已进入大规模、市场化、高质量发展新阶段, 其主要原料多晶硅更是面临产能需求的快速增长。2022 年国内多晶硅产量 85.7 万吨, 同比增长 63.4%, 有效产能 116.6 万吨/年, 同比增加 69.4%, 光伏新增装机容量达 87.41 GW, 且业内预计到 2025 年全国多晶硅总产能将达到 300 万吨/年。冷氢化反应器作为多晶硅生产的“核心”单元, 服役温度约 600 °C, 反应器压力 3.5 MPa 左右, 其主体结构为镍基耐蚀合金厚板。

N08120 合金厚板是最新的替代材料, 其含有 N、Mo、Nb 等强化元素, 使其具有更加优异的高温强度和抗氧化能力^[1-2]。与此同时, 高合金比和强化元素的引入不可避免地增加了材料的冶炼和热加工难度, 特别是难变形镍基合金具有变形抗力大、加工窗口窄等特点^[3]。本文针对宝武特冶在生产 N08120 合金厚板过程中遇到的初锻开裂问题开展详细分析与讨论, 提出工艺改进措施建议。

1 实验材料及方法

N08120 厚板的生产流程为 40 t 电弧炉 (EF) → AOD → LF → 模铸 20 t 扁锭 → 锻造开坯 → 初轧开坯 → 终轧成材。锭型为 20 t 扁锭, 钢锭规格为 700 mm × 1 700 mm × 2 300 mm, 钢锭带帽口, 总高度 2 850 mm, 锻坯尺寸 340 mm × 1 600 mm × L, 锻造加热温度为 1 140 ~ 1 200 °C。合金的主要化学成分和 ASME SB409—2021 标准中规定的成分见表 1。

在 N08120 钢锭锻造开坯过程中, 发生了批量宽面开裂问题, 裂纹位于钢锭距离水口端约 800 mm 处, 裂纹形貌如图 1 所示。开裂一般在锻造第一火次的第一道次压下, 通常为单向的拔长, 压下量约 50 mm, 开裂是在钢锭的整体变形量较小的情况下发生。裂纹长度在 550 ~ 1 000 mm, 既发现有向上弯曲的裂纹形态, 又有平直的裂纹形态。为了确认裂纹的三维形状, 将开裂钢锭进行了解剖。钢锭裂纹段的横截面、钢锭表面及纵截面的形貌如图 2 所示, 根据三个剖面可以将裂纹的三维形态重构, 裂纹三维分布的示意图, 近似于“马鞍”形, 如图 3 所示。

2 实验结果与分析

2.1 开裂原因

首先对解剖的钢锭进行低倍组织检验, 如图 4 所示。由于裂纹基本沿钢锭的中心轴线对称分布, 因此, 横、纵低倍各选取一半进行观察。由图 4(a) 可以看出, 钢锭的结晶组织基本与铸造钢锭的激冷层-柱状晶-粗大等轴晶组织分布相吻合, 但是钢锭



图 1 N08120 钢锭初锻开裂的宏观形貌图
Fig. 1 Macroscopic morphology of crack on N08120 steel ingot after primary forging

内部存在严重的疏松、缩孔。由图 4(b) 中的纵低倍组织可以判断, I 区域的缩孔在锻造变形过程引起了裂纹的扩展, 扩展到柱状晶组织时, 由于柱状晶的位向关系原因, 裂纹发生偏转, 沿柱状晶晶界发生开裂, 因此, 裂纹走向为向下弯曲的弧形。

在 I 区域和 II 区域分别取样进行断口形貌观察, 如图 5 所示。I 区域的断口形貌更加平滑, 没有规律性, 是凝固末端的自由表面, 而 II 区域是裂纹扩展的断裂面, 柱状晶和枝晶状轮廓均清晰可见。裂纹断口的扫描电子显微图如图 6 所示, 利用能谱仪对其表面化学成分进行分析, 结果见表 2, 其化学成分均为 Cr 和 Fe 等基体成分的氧化物, 裂纹表面未发现钢渣、保护渣等成分, 排除了由于卷渣等冶金缺陷引起的开裂。然而疏松、缩孔是大型钢锭内部的常见凝固缺陷^[4], 在钢锭由外向内的凝固收缩过程

表 1 镍基耐蚀合金 N08120 的化学成分 (质量分数)

Table 1 Chemical components of Ni-based corrosion-resistant alloy N08120

项目	C	Si	Mn	P	S	Ni	Cr	Mo	Nb	N	%
实验合金	0.041	0.24	0.59	0.018	0.001	37.43	24.92	1.38	0.61	0.22	
标准	0.020 ~ 0.100	≤1.00	≤1.50	≤0.040	≤0.030	35.00 ~ 39.00	23.00 ~ 27.00	≤2.50	0.40 ~ 0.90	0.15 ~ 0.30	



图 2 解剖开裂钢锭的形貌图: (a) 横截面, (b) 钢锭表面, (c) 纵截面

Fig. 2 Morphology of dissected cracked ingot : (a) cross-section, (b) surface, (c) longitudinal section

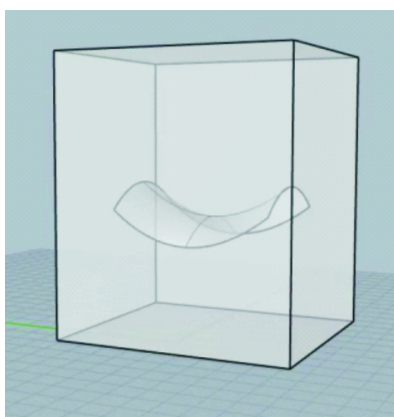


图3 裂纹的三维形态示意图

Fig 3 Schematic diagram of three-dimensional morphology of crack

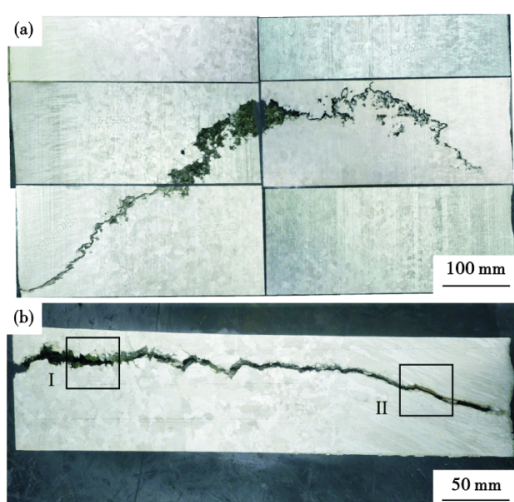


图4 开裂钢锭的低倍组织:(a)横向,(b)纵向

Fig. 4 Macrostructure of cracked ingot : (a) transverse , (b) longitudinal

中,当浇注工艺控制不当,帽口补缩效果不佳时,便会在钢锭中心轴线附近产生疏松、缩孔。

王利君^[5]以国内某钢厂的20 t水冷扁锭模为原型,

利用数值模拟的方法模拟Q235B钢的浇注和凝固过程。模拟锭型尺寸为500 mm×2 000 mm×2 300 mm,分别采用不同的冷却强度组合,即模壁和底盘采用相同或差异的水冷强度,分析其对扁锭中心缩孔的影响,发现无论采用何种冷却强度组合方式,均无法完全消除内部的疏松或缩孔缺陷,研究中疏松、缩孔的位置与此次N08120扁锭初锻开裂的位置基本吻合,均位于钢锭高度距底部五分之二处左右。可见,利用下注法浇注扁锭,由于锭模两宽面的距离较短,极易在凝固过程中发生搭桥,液相穴与糊状区形态趋于细长,造成上部钢液无法有效补充,在钢锭中下部形成疏松或缩孔缺陷^[6]。然而即便如此,通常钢锭内部的疏松、缩孔可以通过热变形实现愈合,徐斌等^[7]研究锻造过程中钢锭内部的空洞型缺陷的闭合规律,揭示试样高径比、孔洞位置和孔洞形状等因素对锻造过程中孔洞闭合的影响,提出宽砧径向压实工艺,仅20%的压下量便可使钢锭中心的疏松、缩孔完全闭合。而此次N08120钢锭在较小变形量的情况下发生严重开裂,裂纹形貌与裂纹深度均与此合金较好的热塑性不符。

2.2 工艺分析

20 t扁锭型是宝武特冶的常用锭型,除了N08120合金,还应用在N08810及TP405不锈钢等板材生产中,从未出现过类似的严重表面横裂,因此,首先对钢种特性和现场浇注工艺进行分析。

利用Thermo-Calc软件计算得到的N08120合金的平衡相图如图7所示,由图可知,平衡态下在锻造加热温度下(1 140 ~ 1 200 °C)仅有微量的 M_3B_2 相的析出^[8-9],且前期研究表明,在凝固过程伴随着MX型析出相向Z相(NbCrN)的转变,且Z相在后续锻造、轧制和热处理过程均能稳定存在^[10-11],但该合金的两相区较宽,计算得到的固液相线相差177 °C。

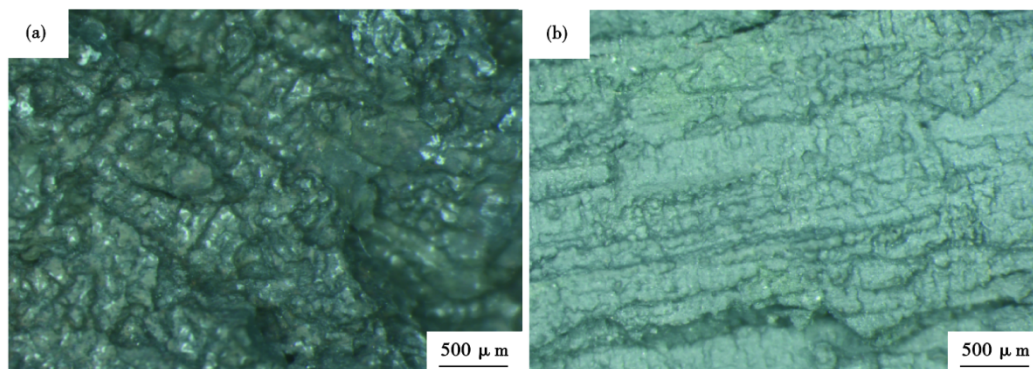


图5 裂纹断口表面形貌:(a) I区域,(b) II区域

Fig. 5 Surface morphology of crack fracture: (a) region I, (b) region II

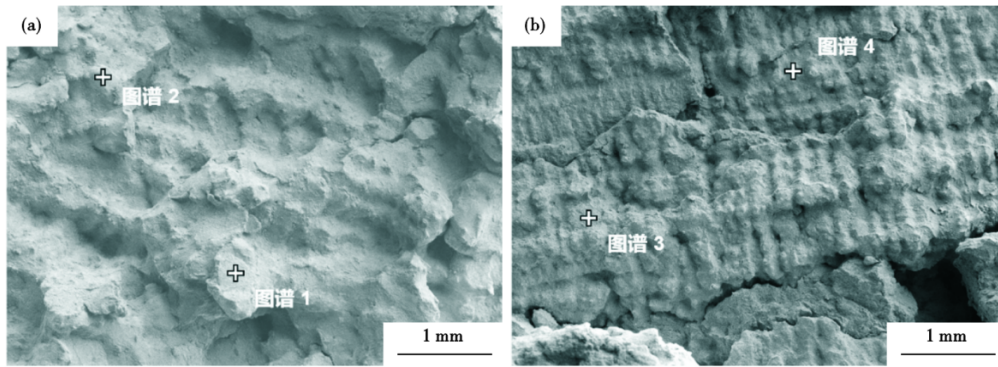


图 6 断口表面的扫描电子显微图: (a) I 区域, (b) II 区域
Fig. 6 Scanning electron micrograph of the fracture surface: (a) region I, (b) region II

表 2 断口表面的成分分析(质量分数)

图 6 区域	C	O	Si	Cr	Mn	Fe	Ni	Nb	Total
图谱 1	3.42	39.44	0.64	40.60	3.52	7.11	2.16	3.11	100.00
图谱 2	-	27.42	-	56.14	14.28	2.16	-	-	100.00
图谱 3	-	29.03	-	63.20	-	4.19	3.57	-	100.00
图谱 4	4.65	30.91	0.82	51.47	5.04	4.84	2.28	-	100.00

对此,又利用 DSC 实测了该合金的固液相线,计算结果见表 3。实测的固液相线温度差为 70 °C 左右,而 N08810 合金的实测值约为 30 °C,因此,从钢种特性角度,N08120 的两相区更宽,凝固过程中随着温度降低,上部钢液的流动性会迅速下降,补缩效果差,造成 N08120 钢锭内部的疏松、缩孔缺陷相比其他钢种更加严重。

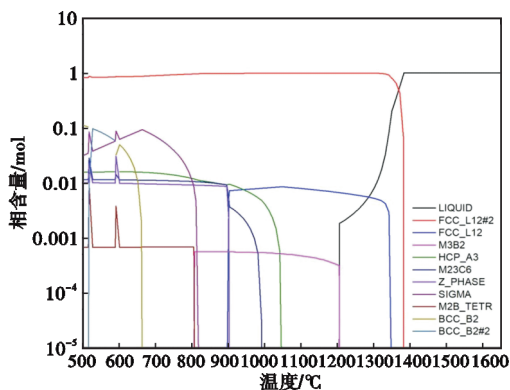


图 7 N08120 合金的平衡相图
Fig. 7 Equilibrium phase diagram of N08120 alloy

表 3 N08120 合金固液相线的 DSC 测试结果
Table 3 DSC test results of melting and solidification points measurement of N08120 alloy

样品重量/ mg	升温速率/ (°C·min ⁻¹)	固液相线温度/°C		
		起始点	峰值	终止点
69.457	10	1 342.0	1 402.1	1 410.0

宝武特冶的模铸产线设计在深约 1 m 的浇注坑,对钢锭的凝固产生不利影响,坑内空气流动性差,造成钢锭下部的冷却效果不如钢锭上部,而下注法自身会使底部钢锭模蓄热量高于上部锭模,锭模温度快速升高,不利于钢锭自下而上逐层凝固。浇注结束后钢锭模表面温度随时间的变化曲线如图 8 所示,分别在钢锭模表面选取 3 个测温点进行测量,由图 8 可知,钢锭模的总体温度在浇注结束后 5 h 开始下降,且锭模中间高度(即测温点 2)的温度最高,属于整个铸锭的热节位置。可见帽口、发热剂和绝热板的作用较小,在凝固后期钢锭上部的温度快速下降。

鉴于裂纹形貌大多具有平直的特点,符合应力

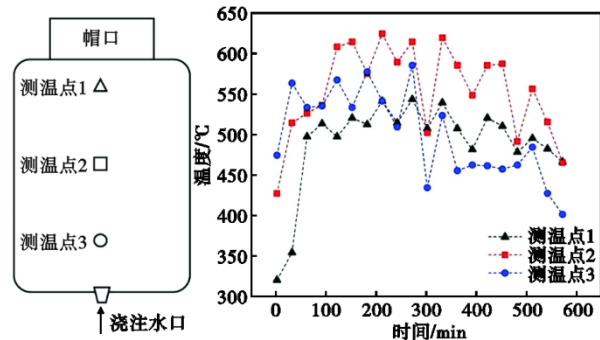


图 8 浇注结束后锭模表面温度随时间的变化
Fig. 8 Variation of surface temperature of ingot mould with time after casting

开裂的特征,因此,对锻造加热工序进行审视,经过数据统计,在同期96支钢锭中,有11支20t扁锭发生宽面开裂,发生率为11.5%,且其均为叠装入炉。在锻造加热过程,共有56支钢锭为叠装入炉,叠装开裂率高达20%,而值得注意的是,在叠装入炉中有8炉是热送钢锭,均未发生锻造开裂。这意味着加热方式对开裂问题有直接影响,首先,热送钢锭在脱模后经现场测温,其表面温度可达600℃左右,中心温度更高,因此在脱模冷却过程中钢锭心部表现为压应力,表层表现为拉应力。若此时进入加热炉加热,本质上钢锭表面与心部的温差首先会逐步缩小,直到两者温度相同,随后表面温度逐渐升高,向心部传热^[12]。而冷锭进炉加热钢锭表面温度始终高于心部,且在初期温度差呈增大的趋势,钢锭表面受压应力,心部受拉应力。而心部存在严重的疏松、缩孔缺陷,是材料结合力薄弱的位置,当应力值高于其结合强度的时候便会萌生裂纹,并在锻造过程向外扩展。而叠装入炉则会加剧钢锭厚度方向的温度差,王生朝等^[13]对Q345C连铸板坯堆垛冷却的模拟过程中发现,最上层板坯在厚度方向上存在较大的温度梯度。因此,叠装入炉加热势必会造成钢锭内部应力的增加。

综合以上分析,N08120合金20t扁锭的开裂,一方面是材料凝固缺陷的原因,主要体现在钢种特性和扁锭模的自身特点上,使钢锭中下部容易产生疏松、缩孔,另一方面是现场工况和生产工艺的影响,浇注坑内空气流动性差,不利于钢锭底部的散热,冷锭加热相比热送加热会引起更大的钢锭内部

拉应力,特别是叠装入炉会加剧钢锭厚度方向的温度不均匀性。

2.3 工艺改进措施

宝武特冶在生产N08120合金大单重厚板时,遇到20t扁锭锻造开坯宽面开裂问题,经过钢锭解剖分析和现场工艺分析,认为开裂是钢锭内部凝固缺陷和不恰当的锻造加热工艺共同导致,针对开裂产生原因采取工艺改进措施:

(1)针对钢锭内部凝固缺陷(内因):加强钢锭模下部的冷却,同时改善帽口补缩工艺,原工艺规定浇注至帽口线后降低流速50%,浇毕按2kg/t比例加入发热剂,改进工艺则降低补注流速为锭身的30%,帽口补注2/3开始加入发热剂,并且增加发热剂的用量,按2.5kg/t的比例加入,并按照0.8kg/t添加碳化稻壳保温。以上工艺更改有助于补充锭身钢液的凝固收缩,改善内部凝固缺陷。

(2)针对生产组织及锻造加热工艺(外因):规范和改进锻造加热工艺,在生产组织允许的条件下,提升热送钢锭比例,对于冷锭加热的情形,则严禁叠装入炉的方式。

3 结论

生产采取一系列针对性改进措施:将帽口补注流速从锭身的50%降低至30%,当补注至帽口2/3时开始加入发热剂,发热剂用量从2kg/t提升至2.5kg/t,并按照0.8kg/t添加碳化稻壳保温;在锻造工序,提升热送钢锭比例,对于冷锭严禁叠装入炉。经过现场工艺优化,20t扁锭初锻开裂问题得到解决,后续批量生产中,质量稳定,无锻造开裂问题发生。

参考文献

- [1] 孙延永. HAYNES HR120合金的性能分析[J]. 机械制造与自动化, 2005, 34(2): 21-22.
- [2] 刘益民,张利祥,李俊. 哈氏合金HR-120制造800℃高温风机的试验研究[J]. 宝钢技术, 2017(6):49-52.
- [3] 王鑫潮,王岩,李吉东. 镍基耐蚀合金N10276开坯开裂原因分析和工艺改进[J]. 特殊钢, 2022, 43(2): 36-39.
- [4] 李振彦,陈慧琴. 55t大型锻造用钢锭疏松缺陷的模拟与试验研究[J]. 铸造设备与工艺, 2012(5): 15-18.
- [5] 王利君. 水冷铸扁锭凝固过程及工艺参数探究的数值模拟[D]. 沈阳:东北大学, 2013.
- [6] 刘宁宇,许长军,吕严,等. 大型钢锭锭重兼容设计的适用性研究和应用[J]. 特殊钢, 2022, 43(2): 6-11.
- [7] 徐斌,孙明月,李殿中. 锻造过程中钢锭内部孔洞型缺陷闭合规律研究[J]. 金属学报, 2012, 48(10): 1194-1200.
- [8] Qi C J, Jiang Y H, Zhou R. First principles study the stability and mechanical properties of M3B2(M=V, Nb and Ta) compounds[J]. Rare Metal Materials and Engineering, 2014, 43(12): 2898-2902.
- [9] Hu X B, Niu H Y, Ma X L, et al. Atomic-scale observation and analysis of chemical ordering in M3B2 and M5B3 borides[J]. Acta Materialia, 2018, 149: 274-284.
- [10] 刘煜,徐文亮. N08120镍基合金厚板生产全流程Z相析出规律研究[J]. 特殊钢, 2023, 44(5): 83-89.
- [11] 王志刚,王立,曹政. Nb在变形高温合金中的作用[J]. 特殊钢, 2023, 44(6): 1-7.
- [12] 徐东,祭程,朱苗勇,等. 步进式加热炉内钢坯加热过程的模拟研究[J]. 东北大学学报(自然科学版), 2013, 34(2): 244-247+251.
- [13] 王生朝,孙斌. Q345C钢连铸板坯热送热装过程中温度场和应力场模拟[J]. 特殊钢, 2016, 37(1): 13-16.