



## 改善模具钢洁净度与抛光性能的冶炼工艺实践

刘泳, 张云飞, 赵英利, 赵楠, 赵峥嵘, 樊明强, 田志强  
(河钢材料技术研究院特种材料研发中心, 石家庄 052165)

**摘要:**为解决模具钢 H13 镜面抛光效应较差的问题,通过冶炼工艺优化改进,改善模具钢的抛光效应。研究结果表明,镜面效应与钢的洁净度有密切对应关系。从电弧炉配料结构、脱氧制度、LF 精炼炉吹氩控制、VD 真空炉的高真空度周期优化,较全面地采取了改进措施,即电弧炉配料时采用增加 DRI 的使用量,采用硅预脱氧,优化钢包底吹氩控制和提高 VD 高真空度周期等措施。夹杂物有效尺寸从优化前的 27.93  $\mu\text{m}$  下降到 23.65  $\mu\text{m}$ ,夹杂物数密度从 256 个/ $\text{cm}^2$ ,下降到 176 个/ $\text{cm}^2$ ,夹杂物数密度下降了 31.2%,B 类和 DS 类以及 TiN 类夹杂物总量上得到了控制,抛光性能的顾客满意度得到了一定的认可。

**关键词:**模具钢 H13; 抛光性; 氮含量; 夹杂物; 数密度

**DOI:**10.20057/j.1003-8620.2024-00034 **中图分类号:**TF769.2; TF769.4

## Smelting Process Practice to Improve the Cleanliness and Polishing Proptice of Die Steel

Liu Yong, Zhang Yunfei, Zhao Yingli, Zhao Nan, Zhao Zhengrong, Fan Mingqiang, Tian Zhiqiang  
(Special Materials Research and Development Center, Material Technology Research Institute of HBIS Group, Shijiazhuang, 052165 China)

**Abstract:** In order to solve the problem of poor mirror polishing effect of steel used in plastic die, the polishing efficiency of die steel is improved by optimizing smelting process. The results showed that the mirror effect was closely related to the purity of steel. From the electric arc furnace burden structure, deoxidization system, LF refining furnace argon blowing control, high vacuum degree cycle of VD vacuum furnace and mold casting process optimization, more comprehensive improvement measures were taken, that is, increasing the use of DRI, using silicon predeoxygenation, optimizing the argon blowing control of steel ladle bottom and improving the high vacuum cycle of VD. The effective size of inclusions decreased from 27.93  $\mu\text{m}$  to 23.65  $\mu\text{m}$  before optimization. The number density of inclusions decreased from 256 /  $\text{cm}^2$  to 176 /  $\text{cm}^2$ , and the number density of inclusions decreased by 31.2%. The total amount of B and DS and TiN inclusions was controlled, and the customer satisfaction of polishing performance was recognized.

**Key Words:** Die steel H13; Polishing; Nitrogen Content; Inclusions; Number Density

模具钢是集团某公司重点开发的钢种之一,电弧炉-LF-VD-模铸的产线投产以来,作为“四位一体”紧凑式的生产流程,其产品的质量已经得到了部分顾客的认可。但是,随着顾客高端化发展的需求,应用塑料模具生产时,钢在经过抛光处理,抛光金属表面呈现“麻点”,造成镜面抛光效应较差的现象,影响顾客的满意度。由于国家对于模具钢抛光性能没有统一的评价标准,冶金企业往往是按 GB/T10561—2023 进行夹杂物评级<sup>[1]</sup>,通过对标检测发现钢材氧氮气体含量较高,金属 TiN 以及硫化物复合类夹杂物较多,从而造成加工性能受一定的影响。为此,通过气体检测、金相组织、夹

杂物扫描能谱,围绕冶炼工艺流程从炉料的品种结构开始进行优化攻关,大幅降低了钢的气体含量以及夹杂物的数密度。

### 1 模具钢抛光麻点分析

#### 1.1 麻点缺陷分析

切取顾客入厂规格为 300mm×800mm 的商品锻坯检测的出现麻点缺陷的 H13 试样,经打磨、抛光后低倍观察,如图 1(a)所示,然后采用德国蔡司 AXio Imager.M2M 全自动显微镜进行 500 倍条件下的金相组织观察,如图 1(b)所示,并按 GB/T10561—2023 标准进行夹杂物评级,通过金相分析存在以 B 类粗 0.5 级和 D 类、TiN 类为主的非金属夹杂物。

**基金项目:**河北省自然科学基金自助项目[氢基直接还原及其系统 CO<sub>2</sub> 脱除利用应用研究与示范(E2021318022)]

**作者简介:**刘泳(1969—)男,大学本科,正高级工程师; **E-mail:**sgliuyong@hbisco.com; **收稿日期:**2024-02-19

**通信作者:**赵峥嵘(1994—)男,硕士,工程师; **E-mail:**zhaozhengrong@hbisco.com

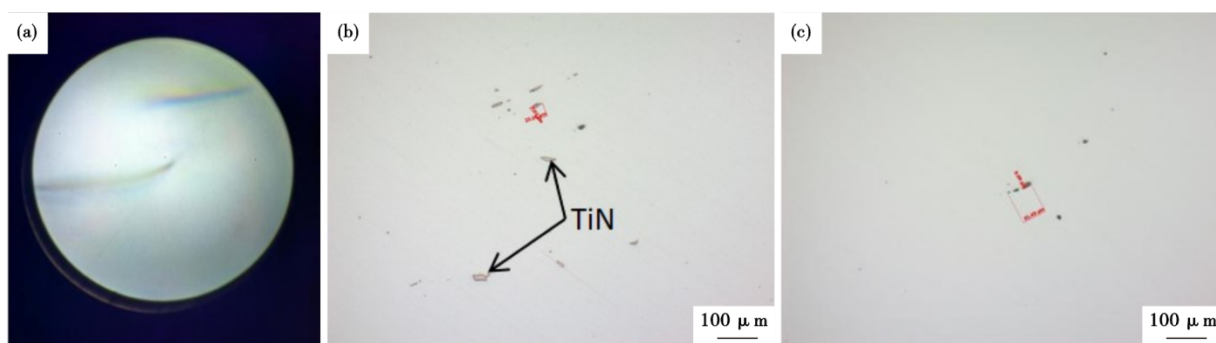


图1 H13 模具钢“麻点”缺陷试样的低倍和金相组织:(a)低倍组织,(b)D类夹杂,(C)B类夹杂

Fig. 1 Macrostructure and metallographic structure of "pitted" defect sample of H13 die steel:(a) macrostructure, (b) D inclusion, (C) B inclusion

针对存在“麻点”缺陷的样品,进一步借助 Ultra 55 型扫描电子显微镜与 EDS 能谱分析,结果如图 2 所示,存在的图谱 1 夹杂物成分见表 1。

表 1 H13 模具钢的夹杂物化学成分(质量分数)

Table 1 Chemical composition of inclusions in H13 die steel

| 元素 | 质量分数   | 原子分数   |
|----|--------|--------|
| N  | 15.34  | 38.89  |
| Ti | 56.24  | 41.69  |
| V  | 24.74  | 17.24  |
| Cr | 1.21   | 0.82   |
| Fe | 1.64   | 1.04   |
| Mo | 0.84   | 0.31   |
| 总量 | 100.00 | 100.00 |

### 1.2 模具钢锻坯夹杂物分析

切取该炉剩余的退火后的 H13 锻坯边缘位置的试样,经打磨、抛光后,采用德国蔡司 AXio Imager. M2M 全自动显微镜进行 500 倍条件下的金相组织观察。夹杂物形态如图 3(a)所示,存在宽度约 14.21 μm 沿

纵向方向长度约 105.64 μm,颜色为黑色的颗粒,根据 GB/T10561—2023 为 B 类粗系氧化物夹杂,级别达到 1.0 级;夹杂物形态如图 3(b)所示,存在直径约 10.37 μm 的 D 类单颗粒球状氧化物;夹杂物形态如图 3(c)所示,存在尺寸 19.96~29.67 μm 大量的金属类夹杂物,颜色呈金黄色,分布无规律,带尖角,属于 TiN 类夹杂物。

从 H13 模块的镜面抛光检测与金相的对比分析看出,H13 锻坯金相组织中存在这些夹杂物是影响模具钢抛光镜面效应的重要原因之一,如何在短流程电弧炉-LF-VD-模铸中降低氧化物、硫化物、氮化钛类夹杂,降低氧、氮含量是提高模具钢抛光性能的关键。

## 2 工艺优化试验

### 2.1 原材料结构的优化降低了电弧炉钢液终点氮含量

电弧炉冶炼由于废钢资源较杂乱,分拣手段不健全,氮含量较高废钢的原料,使电弧炉熔清时钢液氮较高<sup>[2]</sup>。近年来随着氢冶金的发展,其生产的

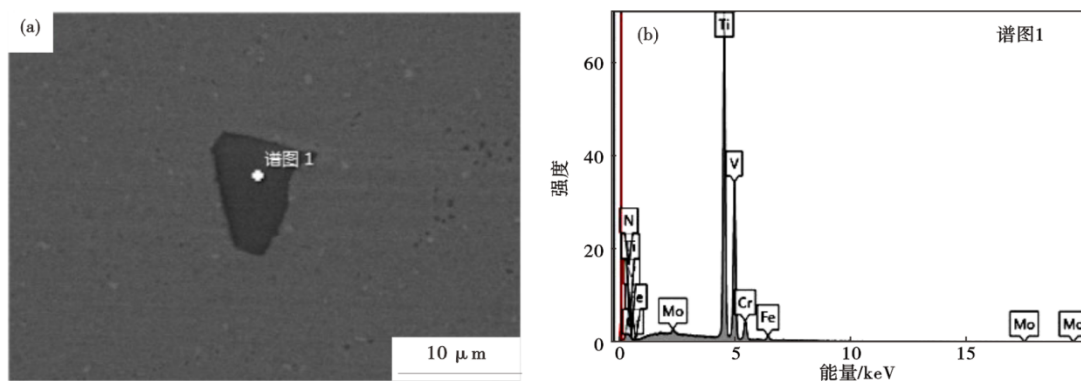


图 2 H13 模具钢“麻点”缺陷样品的夹杂物形貌和能谱分析:(a)夹杂物形貌,(b)夹杂物能谱

Fig. 2 Inclusion morphology and energy spectrum analysis of "pitted" defect samples of H13 die steel: (a) inclusion morphology, (b) inclusion energy spectrum



图3 H13模具钢不同夹杂物类型:(a)B类夹杂,(b)D类夹杂,(c)TiN夹杂

Fig. 3 Different inclusion types of H13 die steel: (a)class B inclusion, (b)class D inclusion, (C)class TiN inclusion

氢基DRI直接还原铁产品在电弧炉冶炼开始大量应用,使用的优点:(1)化学成分稳定,有害杂质少,特别是氮、硫、磷含量低;(2)其富含TFe含量使在一定条件下提高产量,缩短冶炼周期;(3)入炉前可取样检测<sup>[3]</sup>。

熔池出钢时的氮含量和熔池中的脱碳量或产生的量紧密相关<sup>[4]</sup>。DRI直接还原铁球团成分构成中,具有一定的碳含量,可以替代部分生铁中的碳素,形成泡沫渣屏蔽电极电弧,提高了电弧稳定性和能量传递,降低了电弧噪声,降低电耗<sup>[5]</sup>。在电弧炉熔化期间断性加入DRI,依靠碳氧反应的进行,产生CO气泡,气体降低了N<sub>2</sub>分压,可以使炉渣持续地保持泡沫渣。大气中的氮在泡沫渣中的扩散速率只有在钢液中的一半<sup>[6]</sup>,良好的泡沫渣覆盖可以有效减少钢液吸氮速率。

在采用DRI产品作为入炉原料结构后,电弧炉配加不同比例DRI电弧炉终点氮质量分数如图4所示,横坐标代表DRI的加入量,可以看出,随着DRI产品加入比例的增加,电炉终点氮质量分数呈下降趋势。DRI加入比例平均增加到30%以上时,出钢时氮含量平均下降0.0014%。

## 2.2 炼钢工艺因素对于钢液氮含量的影响

研究报告<sup>[7]</sup>,钢水温度为1873 K,空气压力为一个标准大气压条件时,空气中氮气分压约为79 kPa,与钢水平衡时的氮质量分数约为0.0396%,远远大于钢液中实际氮质量分数,因此在冶炼过程中只要钢水与大气接触就易造成增氮。

非兑铁的电弧炉冶炼钢水终点碳较低,造成终点氧位偏高,在沉淀脱氧时加入铝铁,钢液中氧活度从炉内的高氧位剧烈下降,抑制吸氮界面反应的能力快速下降<sup>[8]</sup>;出钢过程中钢流发散增大了与空气接触的几率。采用预先在钢包底部加入预熔精炼渣,预熔精炼渣熔点比较低,保证电弧炉出钢完

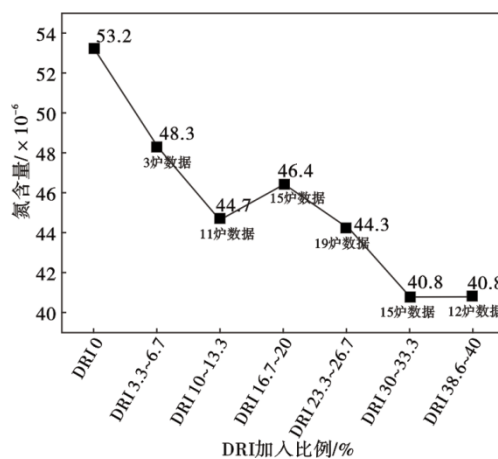


图4 H13模具钢氮含量随DRI量的变化

Fig. 4 Changes of nitrogen content with DRI of H13 die steel

毕后化渣良好,维护好出钢口座砖饱满的圆流出钢;沉淀脱氧不采用铝而采用硅铁弱脱氧, Si元素可以降低减少氮在钢液中的溶解度(见表2),降低了出钢过程的增氮量。

从表2可以看出,沉淀脱氧采用硅铁弱脱氧和预熔精炼渣覆盖的钢液,座包氮含量的增幅为0.0009%~0.0014%,而采用铝脱氧和石灰覆盖剂氮增幅0.0016%~0.0057%。

## 2.3 LF精炼对增氮的影响

### 2.3.1 合理的吹氩制度

模具钢合金总含量较高,LF精炼过程还原期的任务繁重,加热、造渣脱硫、调成分、均匀成分和温度、软吹去夹杂等都需要吹氩搅拌<sup>[9]</sup>。图5揭示了不同任务阶段对应的底吹氩气流量,特别是在合金化与脱硫期,需要充分的搅拌动力学条件,氩气流量太大,使钢水裸露直径增大,增加钢液与炉气接触的机会。

图5(a)为不同底吹流量的增氮试验数据,数据表明,底吹流量对增氮影响非常大,采用底吹氩量

表 2 不同沉淀脱氧方式增氮情况比较

Table 2 Comparison of nitrogen enhancement in different precipitation deoxygenation modes

| 炉次 | 终点碳/% | 出钢温度/°C | 终点氧/%   | 终点氮/%   | LF 座包氮/% | 氮增量/%   | 钢芯铝/(kg·t <sup>-1</sup> ) | 硅铁/(kg·t <sup>-1</sup> ) | 白灰/(kg·t <sup>-1</sup> ) | 预熔精炼渣/(kg·t <sup>-1</sup> ) |
|----|-------|---------|---------|---------|----------|---------|---------------------------|--------------------------|--------------------------|-----------------------------|
| 1  | 0.08  | 1 637   | 0.056 4 | 0.008 6 | 0.010 3  | 0.001 7 | 1.0                       | -                        | 10                       | -                           |
| 2  | 0.09  | 1 630   | 0.043 2 | 0.007 8 | 0.009 4  | 0.001 6 | 1.0                       | -                        | 10                       | -                           |
| 3  | 0.06  | 1 627   | 0.069 3 | 0.008 1 | 0.011 5  | 0.003 4 | 1.0                       | -                        | 10                       | -                           |
| 4  | 0.10  | 1 641   | 0.032 1 | 0.007 0 | 0.010 8  | 0.003 8 | 1.0                       | -                        | 10                       | -                           |
| 5  | 0.08  | 1 621   | 0.076 4 | 0.006 7 | 0.012 4  | 0.005 7 | 1.0                       | -                        | 10                       | -                           |
| 6  | 0.05  | 1 645   | 0.068 7 | 0.012 1 | 0.013 4  | 0.001 3 | 1.0                       | -                        | 10                       | -                           |
| 7  | 0.11  | 1 633   | 0.058 8 | 0.008 8 | 0.009 9  | 0.001 1 | -                         | 1.5                      | -                        | 10                          |
| 8  | 0.07  | 1 620   | 0.071 1 | 0.007 2 | 0.008 7  | 0.001 4 | -                         | 1.5                      | -                        | 10                          |
| 9  | 0.06  | 1 619   | 0.075 3 | 0.008 0 | 0.008 9  | 0.000 9 | -                         | 1.5                      | -                        | 10                          |
| 10 | 0.06  | 1 642   | 0.063 4 | 0.008 1 | 0.009 3  | 0.001 2 | -                         | 1.5                      | -                        | 10                          |

500 L/min 以上增氮量达到 0.004%~0.008%。图 5(b) 以脱硫率来量化表征 LF 的气体搅拌情况, 搅拌越强烈, 增氮越明显, 控制 LF 精炼过程底吹流量十分关键。

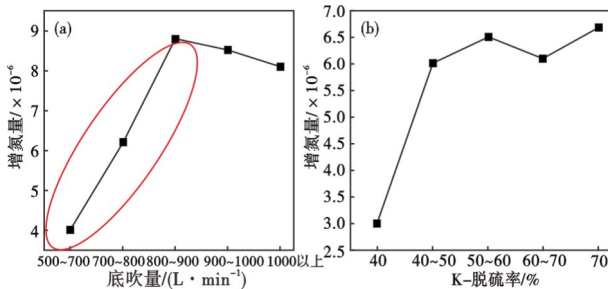


图 5 底吹流量和脱硫率与增氮的关系: (a)底吹量和增氮趋势, (b)脱硫率和增氮趋势  
Fig. 5 Relationship between bottom blowing strength and desulfurization rate with nitrogen increase (a) bottom blowing and trend of nitrogen increase (b) desulfurization rate and nitrogen increase trend

其它工艺条件相似,进行了相关的优化吹氩流量对增氮的试验,表 3、图 6 为 LF 精炼各阶段底吹氩流量优化前两炉和优化后两炉的数值对比,重点是调整预吹、合金化及脱硫期及软吹的氩气量。

经过试验数据对比,图 6 所示红色和黑色曲线的纵坐标表示优化前的炉次各阶段的增氮量,绿色和蓝色曲线纵坐标表示优化后的炉次各阶段的增氮量,可以看出,在合金化和脱硫期绿色和蓝色比红色和黑色的曲线斜率要平缓,斜率代表氮含量的增幅。从降烟罩 6 min 至软吹 6 min 的增氮量对比,优化前增氮 0.002 6%、0.002 7%,优化后增氮量 0.001 1%、0.001 2%。

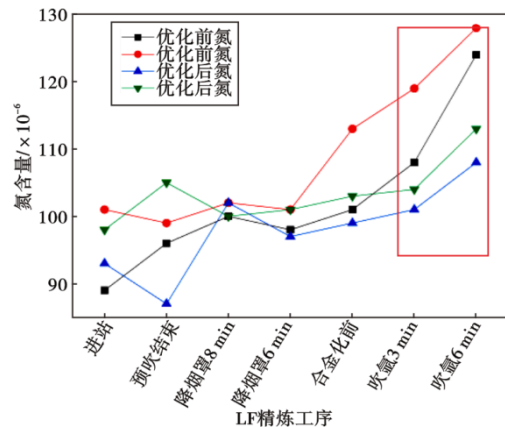


图 6 LF 过程吹氩的优化和过程增量的比较  
Fig. 6 Optimization of argon blowing in LF process and comparison of process increment

表 3 LF 各阶段底吹氩流量

Table 3 LF bottom blown argon flow rate at each stage

| 阶段       | 优化前流量/(L·min <sup>-1</sup> ) | 优化后流量/(L·min <sup>-1</sup> ) |
|----------|------------------------------|------------------------------|
| 预吹氩      | 150~300                      | 100~200                      |
| 初期起弧     | 100~150                      | 100~150                      |
| 增碳脱硫及合金化 | 250~350                      | 200~300                      |
| 停电期间底吹氩  | 100~150                      | 100~150                      |
| 软吹       | 100                          | 60~80                        |

### 2.3.2 LF 精炼渣的脱硫影响因素

组成合理、理化性能优越的精炼渣可以吸附夹杂,有利于气体的排除,脱氧、脱硫、脱氮、防止钢液吸气和二次氧化和保温的作用。

合成精炼渣还原性比较强,当其与未还脱氧的钢液(出钢时)接触时,钢中溶解的氧通过扩散进入渣中,从而使钢液脱氧。特别是渣洗时,合成精炼渣在钢液中乳化,使钢渣界面成千倍地增大,同时强烈地搅拌使扩散过程显著加速<sup>[10]</sup>。

该公司采用CaO-SiO<sub>2</sub>-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>渣系,造渣过程分两个阶段,第1阶段,为避免钢液面裸漏,造成钢水吸气,保证钢水在精炼送电过程中快速形成泡沫渣,在电炉出钢过程中,向钢包内分别加入适量的精炼渣和石灰,其中精炼渣8 kg/t、小粒石灰5 kg/t,保证电炉出钢完毕后化渣良好,钢液面覆盖均匀,在出钢位加渣比例位为总渣量的70%~80%,第2阶段,其余的石灰渣料在LF精炼位调剂补加,精炼终渣主要组元见表4。

表4 精炼渣系组元(质量分数)  
Table 4 Ingredients of refining slag %

| Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> | CaO   | MgO  | SiO <sub>2</sub> |
|--------------------------------|-------|------|------------------|
| 30~35                          | 45~55 | 5~10 | 10~15            |

使用该渣系试验炉次脱氮率达到59%~93%,说明该精炼渣系具有硫容较高、炉渣脱氧能力强的特点。在实际LF精炼过程中,需要协调吹氩的动力条件,在钢液不二次氧化的情况下,强化脱氧,提高精炼渣的Cs。

#### 2.4 VD真空精炼设备和工艺

脱气是VD真空炉的重要功能之一,根据式(1)降低VD炉真空室内的真空度,将使钢液内平衡条件下氮含量增加。

根据文献<sup>[11]</sup>可知,冶炼过程中的氮的溶解反应为:

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

平衡常数如式(2):

$$K_N = \frac{a_N}{P_{N_2}^{\frac{1}{2}}} \quad (2)$$

因此,保持VD真空炉提高高真空度的周期是获得在平衡条件下钢液提高脱氮效率的必要条件之一。表5为工艺条件相似的情况下,模具钢种在不同真空度的脱氮量。反应出VD真空度在4~10 Pa对应的脱氮率33%~55%,真空度在30~80 Pa对应的脱氮率20%~25%。因此,保持真空泵良好的抽气能力以及真空系统的密闭效果,使VD设备的真空效率大幅提高。

#### 2.5 模铸的工艺优化

传统的模铸工艺成本虽然比连铸工艺高,但是许多特殊钢的模铸材的内在质量和力学性能具有一定的优势。特别是模具钢的钢种特性,采用弧形连铸工艺的具有局限性,国内外大多数厂家均采用

表5 脱氮率与真空度的关系

Table 5 Relationship between nitrogen removal rate and vacuum degree

| VD真空度/Pa | 高真空时间/min | 进站氮/%   | 破空后氮/%  | 脱氮量氮/%  | 脱氮率/% |
|----------|-----------|---------|---------|---------|-------|
| 4        | 15        | 0.011 7 | 0.007 8 | 0.003 9 | 33    |
| 8        | 15        | 0.017 6 | 0.008 0 | 0.009 6 | 55    |
| 35       | 15        | 0.010 4 | 0.007 5 | 0.002 9 | 28    |
| 8        | 15        | 0.016 8 | 0.009 4 | 0.007 4 | 44    |
| 10       | 15        | 0.012 2 | 0.006 4 | 0.005 8 | 48    |
| 9        | 15        | 0.009 9 | 0.006 0 | 0.003 9 | 39    |
| 60       | 15        | 0.020 3 | 0.015 3 | 0.005 0 | 25    |
| 50       | 15        | 0.013 4 | 0.010 7 | 0.002 7 | 20    |
| 30       | 15        | 0.015 4 | 0.011 5 | 0.003 9 | 25    |
| 80       | 15        | 0.011 2 | 0.010 2 | 0.001 0 | 9     |

下注的模铸工艺<sup>[12]</sup>。

采用全方位吹氩保护系统,首先,中注管入口处氩气在开浇前3 min进行浇铸系统排空的置换(50~100 L/min),其次在钢包下水口和中注管浇钢口之间的距离带有氩气隔离装置<sup>[12]</sup>。形成的氩气环包围钢流,最后在浇钢过程锭模上口在不影响保护渣对钢液的覆盖效果情况下也进行微量的氩气密封(10~30 L/min)。

模铸工艺优化前后,从VD破空至铸坯增氮量有了下降趋势如图7所示,左边Y轴对应的黑色氮含量表示优化前,右侧Y轴对应的红色数值表示优化后的增氮量,优化前后增氮量平均下降了0.001 58%。

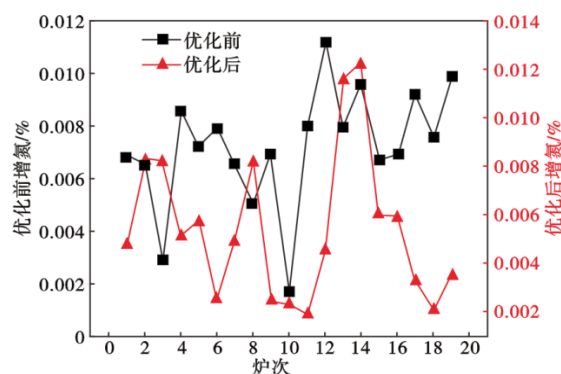


图7 H13模具钢的工艺优化增氮对比图

Fig. 7 Comparison of process optimization for nitrogen addition of H13 die steel

### 3 冶金效果

经过上述工艺的优化,钢中夹杂物数密度的发生了显著的变化,借助Ultra 55型扫描电子显微镜Feture分析铸坯中针对3 μm以上的夹杂物类型、粒

径,计算夹杂物的数密度,夹杂物类型TiN单颗粒夹杂数量基本消除,夹杂物有效尺寸ECD从工艺优化前的27.93  $\mu\text{m}$ 下降到23.65  $\mu\text{m}$ ,夹杂物数密度从256个/ $\text{cm}^2$ ,下降到176个/ $\text{cm}^2$ ,夹杂物数密度下降了31.2%,B类和Ds以及TiN类夹杂物总量上得到了一定的控制。工艺优化后同样规格30mm $\times$ 800mm的H13模具钢锻坯在顾客入厂抛光性能检测分析时,如图8所示,没有发现“麻点”缺陷的存在,产品质量合格,无质量异议发生。



图8 H13模具钢抛光检测  
Fig. 8 Polishing test of H13 die steel

#### 参考文献

- [1] 曹锡梅. 我国模具钢抛光标准的思考[J]. 模具制造, 2018, 18(8): 68-70.
- [2] 李维华. 电炉连铸坯中氮含量控制技术[J]. 福建冶金, 2023, 52(2): 35-38.
- [3] 袁金甲. 电炉炼钢原料及直接还原铁生产技术[J]. 冶金与材料, 2022, 42(2): 101-102.
- [4] 贺美乐, 张豫川, 王庆, 等. 电弧炉采用直接还原铁炼钢工艺技术分析[J]. 特殊钢, 2023, 44(5): 33-38.
- [5] 陈军召等. 喷吹微粒脱磷法在130 t电弧炉炼钢中的应用[J]. 特殊钢, 2023, 44(2): 34-38.
- [6] 凌天鹰, 徐匡迪, 蒋国昌. 氮在Ca-SiO<sub>2</sub>-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>渣中的热力学研究[J]. 钢铁研究学报, 1990, 2(1): 13-19.
- [7] 刘同威, 张燕超, 张彩军, 等. 吹氩条件下结晶器钢渣液面波动行为[J]. 连铸, 2022, 47(3): 18-24.
- [8] 邓南阳, 孙波, 解养国, 等. 120 t LF精炼过程钢水吸氮量控制[J]. 炼钢, 2023, 39(3): 44-51.
- [9] 周世祥, 傅杰, 王平. EAF-LF-VD-WF-CC工艺生产低氮钢技术[J]. 特殊钢, 1998, 19(1): 1-6.
- [10] E. A. Vieira等使用合成精炼渣控制钢中夹杂含量.《2019年全国高效连铸应用技术及铸坯质量控制研讨会论文集》, 2019: 407-413.
- [11] 贾毅, 刘春阳, 韩少伟, 等. 铝镇静钢氮含量控制分析[J]. 中国冶金, 2021, 31(3): 116-121.
- [12] 周同军, 刘军占. 模铸氩气保护浇注的工艺实践[J]. 世界钢铁, 2012, 12(5): 34-37.

#### 4 结论

(1) 模具钢使用时的表面的抛光性与钢基体的B类和DS以及TiN类夹杂物关系密切。改善表面“镜面效应”,首先提高钢的纯净度。

(2) 改善电弧炉炉料结构,提高DRI球团的比例可以降低出钢时钢液的终点氮含量,DRI球团比例增加至30%,终点氮含量平均下降0.0014%。

(3) 优化脱氧制度,出钢采用Si弱脱氧并覆盖预熔精炼渣,座包氮含量的增幅为0.0009%~0.0014%,而采用铝脱氧和石灰覆盖剂氮增幅0.0016%~0.0057%。

(4) 优化LF精炼渣系,协调合理的吹氩搅拌参数,保持了精炼渣良好的脱硫率59%~93%,并氮含量可以控制。

(5) 延长VD真空精炼炉高真空的处理周期,脱氮率提高30%。

(6) 做好模铸浇注系统的保护,从VD破空至铸坯增氮量有了下降趋势,优化前后增氮量平均下降了0.00158%。